

2006-9



TÜRKİYE BİLİMSEL VE  
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL  
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

63766

**ARAZİ GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİNDE  
AKUSTİK EMİSYON TEKNİĞİNİN PERFORMANSININ  
VE ÖLÇÜMLERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN  
ARAŞTIRILMASI**

ÇAYDAG

**PROJE NO: 103Y013**

**Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri  
Araştırma Grubu**

Environment, Atmosphere, Earth and Marine Sciences  
Research Grant Group

63766

**ARAZİ GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİNDE  
AKUSTİK EMİSYON TEKNİĞİNİN PERFORMANSININ  
VE ÖLÇÜMLERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN  
ARAŞTIRILMASI**

ÇAYDAG

**PROJE NO: 103Y013**

PROF. DR. REŞAT ULUSAY  
DR. ERGÜN TUNCAY  
DOÇ. DR. HARUN SÖNMEZ

MART 2006  
ANKARA

## ÖNSÖZ

Günümüzde Akustik Emisyon (AE) deneyleriyle belirlenen Kaiser Etkisi (KE) seviyelerinin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılabilirliğine ilişkin tartışmalar sürmektedir. Özellikle literatürde laboratuvarda önyüklemelere maruz bırakılmış örneklerde tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden belirlenen KE seviyelerinin ifade ettiği gerilmeler açısından çelişkili sonuçlar bulunmaktadır.

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 103Y013 no.lu araştırma projesi kapsamında ve AE deneyleriyle ilgili olarak literatürdeki tartışmalı sonuçlara, bir ölçüde de olsa, ışık tutması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, deney örneklerinin içerdikleri mikroçatlakların konuyla ilgili tartışmalara neden olan sonuçların değerlendirilmesinde oldukça önemli olduğu ve çalışma kapsamında Griffith kuramına göre yapılan yaklaşımların ve önerilen eşitliklerin bu tür çalışmalarda dikkate alınması gerektiği ortaya konulmuştur.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kişi ve kuruluşlara içtenlikle teşekkür eder.

Prof. Dr. Hasan Gerçek ve talihsiz bir şekilde yitirdiğimiz Prof. Dr. Erdal Ünal çalışma süresince değerli öneri ve düşünceleriyle yönlendirici olmuşlardır.

Prof. Dr. Bahtiyar Ünver, Doç. Dr. Hüsnü Aksoy ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali Hindistan çalışmanın son şeklini almasında katkı sağlamışlardır.

Nihon Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Hisatako Tano'nun yardımları ve eşi Taeko Tano'nun özverili desteği unutulamaz. Ayrıca, aynı bölümden Doç. Hidehiko Watanabe ile lisans ve yüksek lisans öğrencilerinin gerek yardımları, gerekse misafirperverlik anlayışları akılda kalacaktır.

Tokai Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Ömer Aydan, çalışma konusunun şekillenmesi ve uygulanması aşamalarında öneri ve görüşleriyle destek olmuştur. Kumamoto Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Yuzo Obara, Prof. Dr. Katsuhiko Sugawara ve Prof. Dr. Masayasu Ohtsu, arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda AE tekniği ve diğer yöntemlere ilişkin görüşleri ile yönlendirici olmuşlardır.

Deney örneklerinin derlenmesi, deneylere hazırlanması ve laboratuvar deneylerinin yapılmasına ilişkin çalışmaların farklı aşamalarında Jeoloji Müh. Hakan Altınsoy, Jeoloji Yük. Müh. Celal Tunusluoğlu, teknisyen Özgür Erol ve Ahmet Bay yardımcı olmuşlardır. Ayrıca, örnek yerlerinin belirlenmesinde, Prof. Dr. Can Ayday ve Prof. Dr. Yavuz Okan'ın görüşlerinden yararlanılmıştır.

Proje konusuna ilişkin ön çalışma olarak değerlendirilen ve projeye başlamadan önce yapılmış olan yönlü kaya bloğu örneklerinin alınması ve taşınması aşamasında, TKİ Genel Müdürlüğü'nden Çetin Koçak, ETİBANK Genel Müdürlüğü'nden İrfan Gencer, ETİ-BOR Genel Müdürlüğü, ETİ-ALÜMİNYUM Genel Müdürlüğü, DSİ Eskişehir Bölge Müdürlüğü ve personellerinin yanı sıra, ECETUR Genel Müdürü İnşaat Müh. Emre Ulukütük ve Makina Müh. Mehmet Tuncay'ın yardımları olmuştur. Bekletilmiş karot örneklerinin derlenmesinde MTA Genel Müdürlüğü Karot Bankası'ndan yararlanılmıştır. Çalışmanın yazım aşamasında Jeoloji Yük. Müh. Nilsun Hasaınçebi yardımcı olmuştur.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	i
TEŞEKKÜR .....	ii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. AKUSTİK EMİSYON (YAYILMA) (AE) TEKNİĞİ .....	4
2.1. AE Tekniğinin Gelişimi .....	5
2.2. AE Sinyalleri .....	5
2.3. AE İzleme Sistemleri .....	7
2.4. AE Parametreleri .....	12
3. AE TEKNİĞİ İLE GERİLMELERİN BELİRLENMESİ .....	16
3.1. Önceki Çalışmalar .....	18
3.2. Genel Değerlendirme .....	41
4. ARAŞTIRMADA KULLANILAN AE DENEY DÜZENEGİ .....	45
5. ÖRNEKLEME ÇALIŞMALARI .....	51
5.1. Kaya Bloklarının Derlenmesi .....	51
5.2. Harç Örneğinin Hazırlanması .....	57
5.3. Sondaj Karotlarından Örneklemeye Yapılması .....	57
6. JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİN TAYİNİ .....	62
6.1. Laboratuvar Deneyleri .....	62
6.1.1. Birim hacim ağırlık .....	63
6.1.2. Dayanım ve elastik parametreler .....	63
6.1.3. Görünür porozite (gözeneklilik) .....	63
6.1.4. Boyuna dalga (P) hızı .....	64
6.2. Makaslama Dayanımı Parametreleri .....	64
6.3. Kaya örneklerinin sınıflandırılması .....	66
7. DEFORMASYON VE ÇATLAK İLERLEMESİ AŞAMALARININ BELİRLENMESİ .....	70
8. LABORATUVARDA ÖNYÜKLEMELER VE KAİSER ETKİSİ (KE) SEVİYELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	85

8.1. Harç Örneklerinde AE deneyleri .....	86
8.1.1. Tekrarlı tek eksenli yükleme ve AE deneyleri .....	86
8.1.2. Üç eksenli önyükleme ve tek eksenli koşulda AE deneyleri .....	88
8.1.3. Genel Değerlendirme .....	115
8.2. Derlenen Kaya örneklerinde AE deneyleri .....	120
8.2.1. Tekrarlı tek eksenli yükleme ve AE deneyleri .....	120
8.2.2. Üç eksenli önyükleme ve tek eksenli koşulda AE deneyleri .....	123
8.3. Bazı Yenilme Ölçütleri Dikkate Alınarak Yapılan Yaklaşımlar .....	130
9. ARAZİ GERİLMELERİYLE KE SEVİYELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRMELER .....	159
9.1. Sondajlardan Alınan Örneklerde KE Seviyelerinin Değerlendirilmesi .....	159
9.2. AE Tekniği Kullanılarak Arazi Gerilmelerinin Belirlenebilirliğine İlişkin Değerlendirmeler .....	162
10. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	167
YARARLANILAN KAYNAKLAR .....	173

**EKLER:**

EK-1. Jeomekanik özelliklere ilişkin deney sonuçları

EK-2. Tekrarlı tek eksenli yükleme ile yapılan AE deneylerinden elde edilen sonuçlar

EK-3. Üç eksenli ön yükleme yapılmış örneklerde gerçekleştirilen tek eksenli yükleme koşulundaki AE deneylerinin sonuçları

EK-4. Sondajlardan elde edilen örneklerde gerçekleştirilen tek eksenli yükleme koşulundaki AE deneylerinin sonuçları

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa No

Çizelge 3.1: Çeşitli araştırmacıların AE tekniğinden ve arazi deneylerinden elde ettikleri gerilme değerleri .....	33
Çizelge 5.1: Derlenen kaya türleri, bunlara ilişkin tanımlamalar ve örnekleme yerleri .....	52
Çizelge 6.1: Derlenen kaya türlerine ait bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin ortalama değerleri .....	67
Çizelge 7.1. Yenilme anına kadar oluşan deformasyon süreçleri (Ohnaka and Mogi, 1982'den) .....	75
Çizelge 7.2. Eberhardt et al. (1999) tarafından önerilen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları .....	77
Çizelge 7.3. Derlenen kaya türleri için belirlenmiş deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının sınır değerlerinin değişimi .....	82
Çizelge 8.1: (a) Yükleme aşamalarındaki en büyük gerilme değerleri ve (b) belirlenen KE seviyeleri .....	88
Çizelge 8.2: Üç eksenli önyükleme yapılan örneklerde uygulanan gerilme seviyeleri.....	90
Çizelge 8.3: AE deneylerinde 1. yüklemde $RI(t)$ grafiğinde <i>belirgin olarak ayırtedilen en büyük doruk noktanın</i> KE seviyesi olarak seçilmesini öngören değerlendirme sonuçları .....	107
Çizelge 8.4: AE deneylerinde 1. yüklemde $RI(t)$ grafiğinde <i>belirgin olarak gözlenen ilk doruk noktanın</i> KE seviyesi olarak seçilmesini öngören değerlendirme sonuçları .....	108
Çizelge 8.5: AE deneylerinde 2. yüklemde en büyük ( $RI(t)_{max}$ ) ve belirgin olarak gözlenen ilk doruk noktalar ( $RI(t)_{ilk}$ ) dikkate alınarak belirlenmiş KE seviyeleri .....	112
Çizelge 8.6: Aynı ayrı önyüklemelerin yapıldığı örneklerle ilişkin yanal ve eksenel gerilme seviyeleri ve bu örneklerde tek eksenli yükleme koşulundaki AE deneyinden belirlenen KE seviyeleri .....	115
Çizelge 8.7: Örnek grupları için belirlenen k katsayıları .....	128

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1: AE tekniğinin temel ilkesi (Hardy, 1981'den düzenlenmiştir) .....	6
Şekil 2.2: Laboratuvar çalışmalarında elde edilmiş tipik bir AE sinyalinin kaydı (yatay bölmeler yaklaşık 6 ms'yi temsil eder) (Hardy, 1972) .....	8
Şekil 2.3: AE sinyalleri için frekansın uzaklığa bağlı değişimi (Hardy, 1981) .....	8
Şekil 2.4: (a) Temel AE sisteminin yalınlaştırılmış çizimi (Hardy 1981'den düzenlenmiştir) ve (b) AE sinyalinin yükseltilmesi .....	10
Şekil 2.5: (a) AE sayısının belirlendiği parametrik AE sisteminin yalınlaştırılmış çizimi ve (b) eşik seviyesi belirleyici kullanılarak AE sinyali sayısının belirlenmesi (Hardy, 1981'den düzenlenmiştir) .....	11
Şekil 2.6: Temel ve parametrik AE sistemlerinin birlikte kullanılmasına bir örnek (Nihon Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kaya Mekaniği Laboratuvarı, Japonya, 2001) .....	13
Şekil 2.7: AE verisinin tipik bir kesiti ve AE parametrelerinin belirlenmesi (Hardy, 1981 ve Ohtsu, 1996'dan düzenlenmiştir) .....	14
Şekil 3.1: Kaiser Etkisi seviyesinin "toplam AE sayısı – zaman" grafiğinden belirlenmesi (Hayashi et al., 1979) .....	17
Şekil 3.2: (a) Tipik bir "toplam AE sayısı – zaman - gerilme" grafiğinde KE seviyesinin belirlenmesinde farklı yorumlamalara ilişkin bir örnek ve (b) Yoshikawa and Mogi (1981 ve 1990) tarafından önerilen KE belirleme yöntemi .....	19
Şekil 3.3: (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 .....	21
Şekil 3.4: Ön yükleme yapılmış karot örneklerinde gerçekleştirilen AE deneylerinde 1. yüklemede belirlenemeyen KE seviyesinin 2. ve 3. yüklemelerde belirlenmesi (Seto et al. (1992)'dan yeniden düzenlenmiştir) .....	23
Şekil 3.5: Bir sahada AE deneyi için örneğin alındığı ve gerilim boşaltma yönteminin (overcoring) uygulandığı yerler ve kazı öncesi ile sonrasına ait şev geometrisi (Kanagawa et al., 1981) .....	25
Şekil 3.6: Üç eksenli koşulda ön yükleme yapılmış bir örneğin tek eksenli yükleme ile gerçekleştirilen AE deneyinden elde edilen "AE Sayısındaki Artış - Gerilme" grafiği (Hardy et al. (1989)'dan yalınlaştırılarak alınmıştır) .....	27
Şekil 3.7: Üç eksenli koşulda belirli gerilme değerlerine kadar ön yükleme uygulanmış büyük bir tuf karot örneğinden alınan yönlü karotlar üzerinde gerçekleştirilen AE deneylerinden belirlenen KE seviyelerinin karşılaştırılması (Watanabe et al., 1994) ( $\sigma_{1p}$ ve $\sigma_{3p}$ : ön yüklemedeki asal gerilmeler, V: düşey, H: yatay) .....	29
Şekil 3.8: (a) Gerçek üç eksenli yükleme düzeneğinin örneğin yerleştirildiği bölümünden görünüm ve (b) Z, Y ve X yönlerinde ayrı ayrı gerçekleştirilen ön yüklemeler ile (b) AE deneylerinin gerçekleştirildiği Z, Y ve X yönlerindeki yüklemelerde elde edilen KE seviyeleri (Stuart et al., 1995) .....	30



Şekil 3.9: AE uygulaması için yeraltından yönlü blok örnek alınması .....	35
Şekil 3.10: Blok örneklerden yönlü karotların hazırlanması .....	36
Şekil 3.11: (a). "Toplam AE sayısı zaman" grafiğinden AE sayısı artışının, RI(t), belirlenmesi ve (b) farklı zaman aralıkları ( $\Delta t_i$ ) için üç farklı "RI(t) - zaman" grafiğinin elde edilerek KE seviyesinin belirlenmesi .....	37
Şekil 3.12: Brown and Hoek (1978 - Hoek and Brown 1980'dan) tarafından derlenmiş dünyanın çeşitli yerlerindeki düşey gerilmeler ile bu çalışmada AE'den belirlenen düşey gerilmelerin derinlikle değişimi ....	39
Şekil 3.13: Brown and Hoek (1978 - Hoek and Brown 1980'dan) tarafından hazırlanmış olan ortalama yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranının derinlikle değişimini gösteren grafik ve bu çalışmada elde edilen sonuçların grafikteki dağılımı .....	40
Şekil 4.1: Tez kapsamındaki ön çalışmalarda (a)'ve diğer çalışmaların yürütülmesinde (b) kullanılan parametrik AE aletleri ve algılayıcıdan bir görünüm .....	46
Şekil 4.2: TÜBİTAK'ın verdiği destekle temin edilen yük hücresi ve veri transferi ünitesi .....	47
Şekil 4.3: Tez çalışması kapsamında üretilen sayıcı ünitesinin değişik açılardan görünümü .....	48
Şekil 4.4: Sayıcı ünitesinin şematik gösterimi ve mikroişlemcisine yüklenen programın akış şeması .....	49
Şekil 5.1: Eskişehir iline bağlı Gülpınar köyünün güneybatısındaki Karaağaçlık Mevkii'nde yüzeylenen ve örnek alınan andezit çıkması .....	53
Şekil 5.2: Eskişehir civarından alınan kaya bloğu örneklerinin yerleri (jeoloji haritası Ayday vd. (2001)'nden alınmıştır) .....	54
Şekil 5.3: Ankara'nın yakın civarından alınan kaya bloğu örneklerinin yerleri: (a) Eskişehir yolu, Mesa-Koru sitesi karşısı, (b) Beytepe köyü, (c) Orhaniye ilçesi, (d) Karşıyaka mezarlığı arkası, çevre yolu (jeoloji haritaları Sarıaslan vd. (1998)'nden alınmış olup, sadece örnekleme yapıldığı birimlerin açıklamaları verilmiştir) .....	55
Şekil 5.4: (a) Haymana, (b) Bala ve Köprüköy ile (c) Nevşehir civarından alınan kaya bloğu örneklerinin yerleri (jeoloji haritaları, MTA (2003) ve Temel et al. (1998)'dan alınmıştır) .....	56
Şekil 5.5: (a) Harç bloğu hazırlanmasında kullanılan karışım oranları ve (b) oluşturulan harç bloğu .....	59
Şekil 5.6: MTA karot arşivinde önceki yıllarda alınmış karotlarda örnekleme işlemi .....	59
Şekil 5.7: MTA Karot Bankası'ndan alınan karotların elde edildiği sondajlara ait yalınlaştırılmış kuyu logları ve örnekleme derinlikleri .....	60
Şekil 6.1: (a) Brazilian deneyinde örneğin merkezine etkiyen asal gerilmeler ve (b) dolaylı yoldan belirlenen çekilme dayanımına bağlı olarak çizilen Mohr çemberi .....	65
Şekil 6.2: Çekilme dayanımı ve tek eksenli sıkışma dayanımı dikkate alınarak çizilen Mohr çemberleri ve yenilme zarfı .....	65

Şekil 6.3: Çalışma kapsamında derlenen farklı kaya örneklerinin Deere and Miller (1966)'in birleşik mühendislik sınıflaması abağı üzerindeki dağılımları: (a) tüm örnekler ve (b) her kaya türüne ait ortalama değerler .....	68
Şekil 6.4: Çalışma kapsamında derlenen farklı kaya örneklerinin Ramamurty (2004) tarafından önerilen abak üzerindeki dağılımları: (a) tüm örnekler ve (b) her kaya türüne ait ortalama değerler .....	69
Şekil 7.1: Çatlak ilerlemesi aşamalarını gösteren gerilme – birim deformasyon diyagramı (Martin 1993 - Martin and Chandler, 1994'ten) .....	71
Şekil 7.2: (a) Shinkomatsu andeziti ve (b) Mannari graniti için tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri ve bunların I – V no.lu aşamalarla ilişkileri (Ohnaka and Mogi, 1982) .....	74
Şekil 7.3: Granodiyorit, gri granit ve pegmatit örnekleri için "hacimsel sıkılık – aksenal gerilme" grafikleri (Eberhardt et al., 1999) .....	76
Şekil 7.4: AE aktivitesine karşı gerilme artışı grafiği (Diederichs et al., 2004) ....	79
Şekil 7.5: Deformasyon aşamalarının belirlenmesinde kullanılan tipik bir grafik (E5 no.lu andezit örneği) .....	80
Şekil 7.6: Derlenen kaya örnekleri için oranlanmış deformasyon aşaması sınır değerlerinin tek aksenli sıkışma dayanımına bağlı değişimi .....	81
Şekil 8.1: Harç örneklerinde gerçekleştirilen tekrarlı tek aksenli yüklemeler ve her bir yükleme aşamasında KE seviyelerinin belirlenmesi .....	87
Şekil 8.2: Belirlenen KE seviyelerinin bir önceki yüklemeye uygulanan en büyük gerilme değerinden olan yüzde cinsinden farkı .....	89
Şekil 8.3: (a) Birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü üç aksenli önyüklemeye ve boşaltma şekilleri ( $\sigma_{1p}$ : aksenal gerilme, $\sigma_{3p}$ : yanal gerilme) .....	92
Şekil 8.4: Üç aksenli önyüklemeye ve arkasından tek aksenli koşulda AE deneylerinin yapılışı .....	93
Şekil 8.5: B1-T1 ve B1-T2 no'lu örnekler için tek aksenli yüklemeye koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	95
Şekil 8.6: B1-T3 ve B1-T4 no'lu örnekler için tek aksenli yüklemeye koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	96
Şekil 8.7: B1-T5 ve B1-T6 no'lu örnekler için tek aksenli yüklemeye koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	97
Şekil 8.8: B1-T7 ve B1-T8 no'lu örnekler için tek aksenli yüklemeye koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	98
Şekil 8.9: B1-T9 ve B1-T10 no'lu örnekler için tek aksenli yüklemeye koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	99
Şekil 8.10: B1-T11 ve B1-T12 no'lu örnekler için tek aksenli yüklemeye koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	100

Şekil 8.11: B1-T13 ve B1-T14 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	101
Şekil 8.12: B1-T15 ve B1-T16 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	102
Şekil 8.13: B1-T17 ve B1-T18 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	103
Şekil 8.14: B1-T19 no'lu örneğe ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	104
Şekil 8.15: B1-T20 ve B1-T21 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	105
Şekil 8.16: Belirlenen KE seviyeleri ile (a) önyüklemadaki gerilmelerin farkları ( $\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ ) ve (b) $\sigma_{1p}-(1+1.48)\sigma_{3p}$ eşitliğinden belirlenen değerler arasındaki doğrusal ilişkiler (r: korelasyon katsayısı) .....	110
Şekil 8.17: (a) Dördüncü ve (b) beşinci üç eksenli önyükleme ve boşaltma şekilleri ( $\sigma_{1p}$ : eksenel gerilme, $\sigma_{3p}$ : yanal gerilme) .....	114
Şekil 8.18: B1-T22 ve B1-T23 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri .....	116
Şekil 8.19: B1-T24 no'lu örneğe ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneyinden elde edilen "zaman - gerilme", "zaman - RI(t)" ve "zaman - AE aktivitesi" grafikleri .....	117
Şekil 8.20: Kaya örneklerinde belirlenen KE seviyelerinin bir önceki yüklemeye uygulanan en büyük gerilme değerinden yüzde olarak farklarının; (a) önceki yüklemeye uygulanan en büyük gerilmenin tek eksenli sıkışma dayanımına oranına, (b) frekans dağılımına ve (c) tek eksenli sıkışma dayanımına bağlı olarak değişimi .....	122
Şekil 8.21: Belirlenen KE seviyelerinin, önyüklemadaki gerilmelerden olan yüzdelik farkları: (a) önceki en büyük gerilmeden, (b) en küçük gerilmeden ve (c) saptırıcı gerilmeden olan yüzdelik farkları ile bu farkların yüzde frekans dağılım histogramları .....	125
Şekil 8.22: Önyüklemadaki saptırıcı gerilme değerleri, örneklerin elastik ve çatlak ilerlemesi aşamalarında yer alacak şekilde uygulanan karotlar için belirlenen KE seviyelerinin, önyüklemadaki gerilmelerden olan yüzdelik farkları: (a) önceki en büyük gerilmeden, (b) en küçük gerilmeden ve (c) saptırıcı gerilmeden olan yüzdelik farkları ile bu farkların yüzde frekans dağılım histogramları .....	126
Şekil 8.23: k katsayısı ile örneklerin bazı jeomekanik özellikleri arasındaki ilişkiler .....	129
Şekil 8.24: 2. yüklemelerden belirlenen KE seviyelerinin, 1. yüklemelerdeki en büyük gerilmelerden olan yüzde farkları .....	131

Şekil 8.25: Belirlenen KE seviyelerinin, (a) Coulomb (b) iki boyutlu Griffith ve (c) üç eksenli deneyler için önerilmiş Griffith ölçütlerinden varsayımla hesaplanan değerlerden olan yüzde farkları ile bu farkların yüzde frekans dağılım histogramları .....	135
Şekil 8.26: Önyüklemedeki saptırıcı gerilme değerleri, örneklerin elastik ve çatlak ilerlemesi aşamalarında yer alacak şekilde uygulanan karotlar için belirlenen KE seviyelerinin, (a) Coulomb (b) iki boyutlu Griffith ve (c) üç eksenli deneyler için önerilmiş Griffith ölçütlerinden varsayımla hesaplanan değerlerden olan yüzde farkları ile bu farkların yüzde frekans dağılım histogramları .....	136
Şekil 8.27: Bir kaya örneği içinde gelişigüzel dağılmış mikroçatlakların iki boyutlu görünümü .....	138
Şekil 8.28: Griffith çatlağının bulunduğu ortama etkiyen asal gerilmelere bağlı olarak gelişen en büyük çekilme gerilmesi ve çatlak ilerleme yönü (Jaeger and Cook, 1979) .....	138
Şekil 8.29: (a) Saptırıcı gerilme ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ve (b) gerilme oranlarına ( $\sigma_1 / \sigma_3$ ) bağlı olarak $\beta_{crit}$ açısının ve $\xi_0 \sigma_e$ değerlerinin yanal gerilmeye göre değişimini gösteren eğriler .....	141
Şekil 8.30: $\sigma_3 = 1$ birim için gerilme oranına bağlı olarak $\xi_0 \sigma_e$ değerinin değişimi.....	142
Şekil 8.31: $\sigma_3 = 1$ birim için, gerilme oranı ve $\beta$ açısına bağlı olarak $\xi_0 \sigma_e$ değerinin değişimi .....	142
Şekil 8.32: Önyüklemedeki gerilme oranının (a) 3, (b) 10 ve (c) 100 olması durumları için $0^\circ$ 'den $90^\circ$ 'ye kadar değişen $\beta$ açılarında sahip çatlaklarda oluşan etki (kırmızı renkli eğri) ile tek eksenli yüklemelerde gerilme artışına bağlı olarak gelişen etkiyi (siyah renkli eğriler) ifade eden eğriler .....	144
Şekil 8.33: Önyüklemelerde örneklere uygulanan gerilmelerin oranına bağlı olarak belirlenen $\beta_{crit}$ açılarının değişimi .....	147
Şekil 8.34: (a) Önyüklemedeki gerilmelerden hesaplanmış $\beta_{crit}$ açıları ile (b) $\beta=60$ durumu için kuramsal olarak ve aynı açılar için KE seviyeleri dikkate alınarak hesaplanmış yanal gerilmeye oranlanmış $\sigma_e \xi_0$ değerlerinin değişimi .....	149
Şekil 8.35a: A4 no.lu örnek grubuna ait karotlarda, farklı $\beta$ açılarında sahip çatlaklarda önyüklemelerde oluşturulan etki (gri renkli eğriler) ile KE seviyeleri dikkate alınarak belirlenen etkiyi ifade eden eğriler (renkli eğriler). (Şekillerde KE seviyelerinden belirlenen eğrilerin önyüklemede hangi eğriyle karşılaştırılması gerektiğini ifade etmek için, açıklamalarda renkli doğrusal sembollerin yanında önyüklemedeki gerilme oranları verilmiştir) .....	151
Şekil 8.35b: Her bir örnek grubuna ait karotlarda, farklı $\beta$ açılarında sahip çatlaklarda önyüklemelerde oluşturulan etki (gri renkli eğriler) ile KE seviyeleri dikkate alınarak belirlenen etkiyi ifade eden eğriler (renkli eğriler). (Şekillerde KE seviyelerinden belirlenen eğrilerin önyüklemede hangi eğriyle karşılaştırılması gerektiğini ifade etmek için, açıklamalarda renkli doğrusal sembollerin yanında önyüklemedeki gerilme oranları verilmiştir) .....	152

Şekil 9.1: Belirlenen KE seviyelerinin kuramsal olarak hesaplanan örtü gerilmeleriyle karşılaştırılması .....	161
Şekil 9.2: (a) Şerit, (b) kare, (c) dikdörtgen ve (d) gelişigüzel şekilli topuk bırakma düzenleri ile boşluk ve topuk alanlarını ifade eden parametreler (Hoek and Brown, 1980) .....	164
Şekil 9.3: (a) Düşey ve (b) düşey ve yatay yönde asal gerilmelere maruz kalan bir yeraltı açıklığında bırakılan topuklar .....	166

## ÖZET

Bu çalışma, Akustik Emisyon (AE) tekniğinin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve bu konuya ilişkin literatürde yer alan tartışmalara, bir ölçüde de olsa, açıklık getirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalarda varılan sonuçlar dikkate alınarak, konuya yönelik tartışmalı noktalara ilişkin araştırmalara ağırlık verilmesi ve bu doğrultuda laboratuvarında önyüklemelere maruz bırakılmış örneklerde tek eksenli yükleme koşulunda AE deneylerinin yapılması öngörülmüştür. Bu kapsamda, farklı kaya türlerine ait örnekler derlenmiş ve ayrıca laboratuvarında harç örnekleri hazırlanmıştır. Bu örneklerin bazı jeomekanik özellikleri tayin edildikten sonra, her örnek grubu için deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları belirlenmiştir. Söz konusu aşamalar gözönünde bulundurularak, belirlenen öngerilme seviyeleri örneklerde tek eksenli ve üç eksenli yükleme koşullarında uygulanmıştır. Önyüklemelerden hemen sonra örnekler üzerinde tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapılmış ve gerilmeye bağlı AE aktiviteleri değerlendirilerek Kaiser Etkisi (KE) seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca, önceki yıllarda yapılmış sondajlardan karot örnekleri alınmış ve AE deneyleri bu örneklerde de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar görgül ve kuramsal yaklaşımlar dikkate alınarak değerlendirilmiş ve tek eksenli yükleme koşulundaki AE deneyinden belirlenen KE seviyesinin, deney örneğinin sadece yükleme yönünde etkisinde kaldığı öngerilmeyle değil, diğer yönlerde etkisinde kaldığı gerilmelerle ve ayrıca örneklerin içerdiği mikroçatlaklarla ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu belirlemeler doğrultusunda, sınırlamalarına ilişkin hususlar da belirtilerek, KE seviyesinin ifade edilebileceği bazı eşitlikler önerilmiştir. Yapılan çalışmadan elde edilenler ile literatürdeki bazı çalışmaların sonuçları dikkate alınarak, "yönlü blok örneklerden alınan değişik yönlerdeki karotlarda tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapılarak belirlenen KE seviyelerinin, karotların tek eksenli yükleme yönünde maruz kaldıkları arazi gerilmelerine karşılık geleceği" yaklaşımıyla elde edilecek sonuçların tartışmalı olacağı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Akustik Emisyon (AE), Kaiser Etkisi (KE), Arazi gerilmesi, Öngerilme, Griffith kuramı.

## **ABSTRACT**

This study was performed for the purpose to investigate the applicability of the Acoustic Emission (AE) technique to determine in-situ stresses and, to some extent, to clarify the controversial issues related to this technique given in literature. By taking into consideration the results from previous studies, it was decided to give prime consideration to the controversial aspects of the subject and to perform AE experiment under uniaxial loading conditions on specimens which were pre-loaded in laboratory. For the purpose, different types of rock samples were collected and mortar samples were prepared. After some geomechanical properties of these samples were determined, deformation and crack propagation stages were identified for each sample group. On the basis of these stages, the pre-stress levels selected were applied to the specimens under uniaxial and triaxial conditions. Just after the pre-loadings, AE experiments under uniaxial loading conditions were carried out on these specimens and Kaiser Effect (KE) levels were determined. In addition, rock core samples were obtained from boreholes drilled in previous years and the AE experiments were also carried out on these samples. The results of the tests were evaluated based on some theoretical and empirical approaches, and it was concluded that the KE levels determined from the AE experiments under uniaxial loading conditions were related to, not only the axial pre-stresses affecting the rock samples, but also the lateral pre-stresses and microcracks involved by the test samples. According to these findings, some equations of which KE levels could be expressed were suggested. These studies and some of those in literature revealed that the results from the approach, that "the KE levels determined from AE experiments under uniaxial loading conditions on cores, which are extracted from oriented block samples, can be used to determine in-situ stresses (pre-stresses) acting on the test sample in the direction of uniaxial loading", are open to discussion.

**Keywords:** Acoustic Emission (AE), Kaiser Effect (KE), In-situ stress, Pre-stress, Griffith theory.

## 1. GİRİŞ

Arazi gerilmelerinin belirlenmesi için, başta kuramsal yaklaşımlar olmak üzere, bazı arazi deneyleri ve dolaylı yöntemler kullanılmaktadır. Yerkabuğunun karmaşık bir yapıya sahip olması, kuramsal yaklaşımların güvenilirliğini azaltmakta ve özellikle Türkiye gibi engebeli bir topoğrafyaya sahip ve aktif tektonik bölgelerdeki mühendislik yapılarının tasarımında arazi deneylerinden yararlanılmasını zorunlu kılmaktadır. Arazi gerilmelerinin ölçülmesi amacıyla ISRM (Kim ve Franklin, 1987) tarafından; yassı kriko, hidrolik çatlatma, USBM (US Bureau of Mines) ve CSIRO üstten karot alma gerilim boşaltma yöntemleri önerilmektedir. Son on yılda 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 (Aydan vd., 2001; Aydan ve Kim, 2002), küresel konumlama sistemine (GPS) dayanan yöntem (Aydan, 2000a; Aydan vd., 2000) ve fay çiziklerinden gerilmeyi belirleme yöntemi (Angelier, 1975 ve 1984; Aydan 2000b) gibi dolaylı yöntemler de kullanılmaktadır.

Akustik Emisyon (Yayıma) (AE) tekniğinin arazi gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla kullanımı, ilk kez Kanagawa vd. (1976; Hayashi vd. 1979'dan) tarafından önerilmiş ve araziden alınan yönlü örnekte tek eksenli koşulda AE deneyi yapılarak belirlenen Kaiser Etkisi (KE) seviyesinin örneğin alındığı yönde etkisinde kaldığı normal gerilmeye karşılık geldiği belirtilmiştir. Doğrudan yöntemlere göre daha pratik ve daha az maliyetli olmasından dolayı, bu yöntemle gerilmelerin belirlenmesi ve yöntemin bu amaçla kullanılabilirliği üzerine gerçekleştirilen çalışmalar son yıllarda yaygınlaşmıştır. Buna karşın, AE yönteminin gerilmelerin belirlenmesinde kullanılabilirliğiyle ilgili tartışmalar da giderek artmıştır (örn; Hughson ve Crawford, 1987; Hardy vd., 1989; Momayez ve Hassani, 1992; Holcomb 1993; Seto vd., 1999).

Bazı arazide gerilme ölçüm teknikleriyle AE yönteminden elde edilmiş gerilme değerlerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda uyumlu sonuçlar elde edilmiş olmasına karşın, arazi gerilmelerinin laboratuvarında üç eksenli ön yüklemelerle temsil edildiği



ve bu örneklerde tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapıldığı çalışmalarda birbirinden oldukça farklı sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu çalışmaların bazılarında tek eksenli koşulda AE deneyi yapılarak arazi gerilmelerinin belirlenemeyeceği vurgulanırken, bazılarında tam tersi sonuçlar sunulmuştur. Bu durum ve bugüne değin AE yönteminin kullanılabilirliğine yönelik kuramsal bir taban oluşturulamamış olması nedeniyle, AE yöntemi ile arazi gerilmelerinin belirlenmesine ilişkin çalışmalardan elde edilen sonuçlar çoğu araştırmacı tarafından kabul görmemekte, ya da şüpheli görülmektedir. Dolayısıyla, bu konuya ilişkin gerek deneysel, gerekse kuramsal çalışmalara halen gereksinim vardır. Özellikle, laboratuvarında kaya örnekleri üzerinde üç eksenli önyüklemelerin ve ardından tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapıldığı çalışmalardan elde edilen farklı sonuçların nedeninin açıklanması gerekmektedir. Bunun yanı sıra, KE seviyelerinin üç eksenli öngerilmelerle olan ilişkisi hakkında genel olarak kabul görebilecek bir yaklaşımın ortaya konması önem taşımaktadır. Elde edilebilecek böyle bir sonuç, bu konuya ilişkin gelecekte yapılacak çalışmalara yön vermesi açısından da katkı sağlayabilecektir.

Yukarıda ana hatlarıyla değinilen belirsizliğin, bir ölçüde de olsa, giderilebilmesine katkıda bulunmak amacıyla bu çalışmanın yapılması öngörülmüştür. Diğer bir ifadeyle, üç eksenli önyüklemeye maruz bırakılmış kaya karot örneklerinde oluşturulan etkinin daha sonra tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinde Kaiser Etkisi (KE) seviyesi olarak belirlenip belirlenemeyeceğinin, belirlenmesi durumunda ise önyüklemedeki gerilmelerle olan ilişkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, farklı dayanım ve özellikteki kaya türleri derlenmiş, ayrıca herhangi bir yüklemeye maruz kalmamış bir malzeme olarak laboratuvarında harç örnekleri hazırlanmıştır. Bu örneklerin jeomekanik özellikleri belirlenmiş ve örneklerde deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının gerilme cinsinden sınır değerleri saptanmıştır. İkinci aşamada ise, deformasyon aşamalarının sınır değerleri dikkate alınarak, bu malzemelerden alınmış karot örnekleri laboratuvarında tek ve üç eksenli ön yüklemelere maruz bırakıldıktan sonra, tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden belirlenen Kaiser Etkisi (KE) seviyelerinin neyi ifade edebileceği, literatürde elde edilen farklı sonuçlar gözönünde bulundurularak değerlendirilmiş olup, kuramsal ilişkilerden yararlanılarak ve varsayımlara gidilerek bazı sonuçlara

ulaşmıştır. Son aşamada ise, önceki yıllarda maden arama amaçlı yapılmış bazı sondajların farklı derinliklerinden alınmış karot örneklerinde tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapılmış ve belirlenen KE seviyeleri kuramsal olarak belirlenen örtü gerilmesi değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Gerek literatürde değinilen belirsizlikler, gerekse bu çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alınarak, tek eksenli koşuldaki AE deneylerinden belirlenen KE seviyeleri ile arazi gerilmelerinin tayin edilemeyeceğine yönelik bazı değerlendirmeler yapılmıştır.

## 2. AKUSTİK EMİSYON (YAYILMA) (AE) TEKNİĞİ

Kaya, 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 (Yayılma) 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.

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 bazı Avrupa ülkeleri başta olmak üzere, bir çok ülkede kullanılan ve üzerinde araştırma yapılan bir yöntem olmuştur. Bu teknik; yeraltında depolama çalışmalarında, yeraltı açıklıklarında karşılaşılan kaya ve grizu patlaması, aşırı sökülme, tavan göçüğü vb. gibi duraysızlıkların önceden kestiriminde ve duraysızlıkların oluşacağı olası yerlerin belirlenmesinin yanı sıra, şev duraysızlıklarının izlenmesinde de kullanılmaktadır (Leighton, 1970; Blake, 1971; Blake ve Leighton, 1970; Hardy, 1972; 1976; 1978; Hooker vd., 1974; Koerner vd., 1977; 1978; McCauley, 1977; Hardy, 1981; Ünal vd., 1982; Sugawara vd., 1987; Chichibu vd., 1989; Vladut ve Lepper, 1989; Srinivasan vd., 1995; Styles vd., 1995; Will vd., 1995; Suzuki vd., 1998). Bu çalışmalara ilişkin daha ayrıntılı bilgiye gerek yukarıda adı geçen çalışmalardan, gerekse Hardy (1981), Kasapoğlu ve Gökışık (1982) ve Tuncay ve Ulusay (2002) tarafından hazırlanmış derleme türündeki çalışmalardan ulaşılabilir. Ayrıca, yeraltı yapılarının tasarımında ve depremlerin yorumlanmasında oldukça önemli bir yeri olan arazi gerilmelerinin belirlenmesinde de AE tekniğinin kullanımına yönelik araştırmalar, özellikle son on yıldır artmıştır. Bu bölümde, AE tekniğinin gelişimine kısaca değinilmiş, AE sinyalleri, sistemleri ve parametreleri hakkında bilgi verilmiştir.

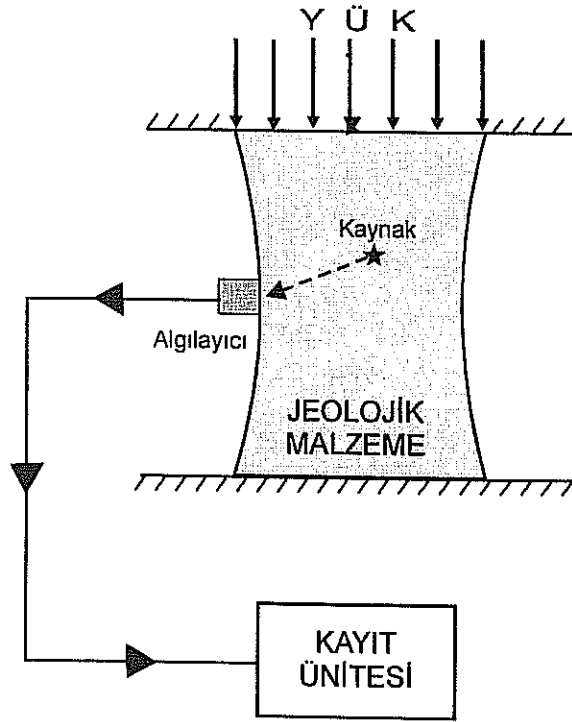
## 2.1. AE Tekniğinin Gelişimi

1930'lu yılların sonlarına doğru USBM'dan L. Obert ve W.I. Duvall, derin bir yeraltı işletmesinde gerçekleştirdikleri sonik araştırmalar sırasında, gerilmelerin etkisi altındaki kayaya sonik dalga göndermeksizin, kayadan yayılan mikro düzeydeki titreşimleri kaydederek, AE tekniğinin gelişimine öncülük etmişlerdir (Hardy, 1981) (Şekil 2.1). Obert ve Duvall (1942 - Hardy, 1972'den) ve Obert ve Duvall (1945)'in sonraki yıllarda yaptıkları çalışmalar bu tekniğin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. 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)'in metaller üzerinde yaptığı çalışmalarla başladığı kabul edilmektedir (Hardy, 1981).

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). Teknolojideki hızlı gelişmeye koşut olarak, AE ölçüm cihazlarıyla ilgili önemli gelişmeler kaydedilmiş ve yöntemin kaya mühendisliğinde; kaya patlamaları ve kömür püskürmeleri, yeraltı ve yerüstü yapılarının duraylılığı, depremlerin önceden kestirimi ve arazi gerilmelerinin belirlenmesi (örneğin; Ünal vd., 1982; Sugawara vd., 1987; Chichibu vd., 1989; Vladut ve Lepper, 1989; Armstrong vd., 1995; Descour, 1995; Srinivasan vd., 1995; Styles vd., 1995; Will vd., 1995; Suzuki vd., 1998; Barr vd., 1999; Seto vd., 1999; Wang vd., 2000; Park vd., 2001, Lavrov vd., 2002a), zemin mekaniği alanında da; şev duraylılığı ve killerin şişme özellikleri ile tek eksenli yük altında AE sayısındaki değişim (örneğin; Koerner vd., 1977 ve 1978; Koerner ve Lord, 1989; Ruiz de Argondona vd., 1995; Lavrov vd., 2002b) gibi konularda yöntemin kullanımına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

## 2.2. AE Sinyalleri

Jeolojik malzemedeki birikmiş olan elastik deformasyon enerjisinin ani olarak boşalması sonucu gelişen elastik gerilme dalgası, kaynağından malzemenin



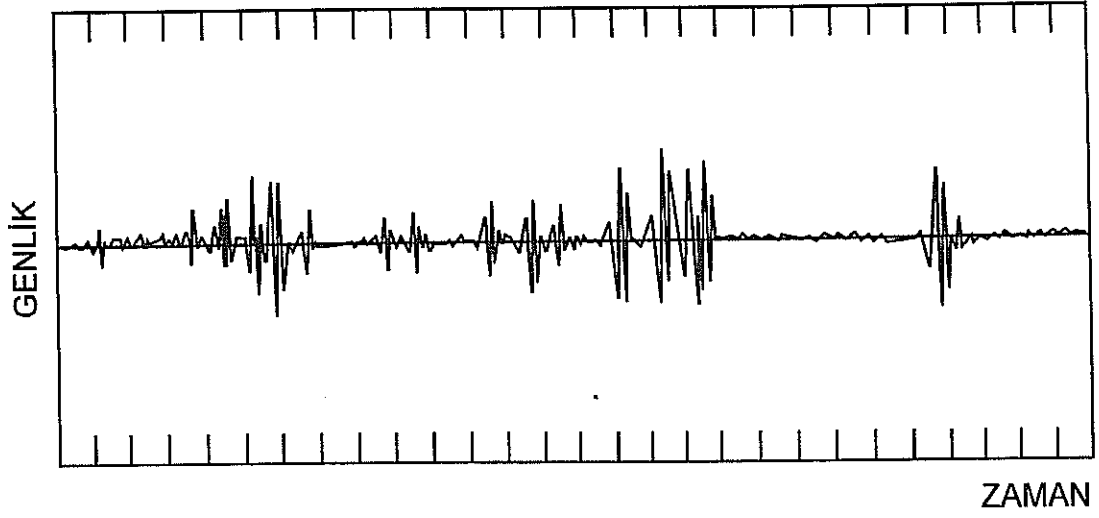
Şekil 2.1: AE tekniğinin temel ilkesi (Hardy, 1981'den düzenlenmiştir).

sınırına kadar yayılarak burada AE sinyali olarak algılanmaktadır. AE aktivitesinin doğada çok kristalli veya taneli olan jeolojik malzemede; mikro düzeyde yerdeğişirmelerin 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 2.2'de zamana bağlı 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 bağlıdır (Hardy, 1981).

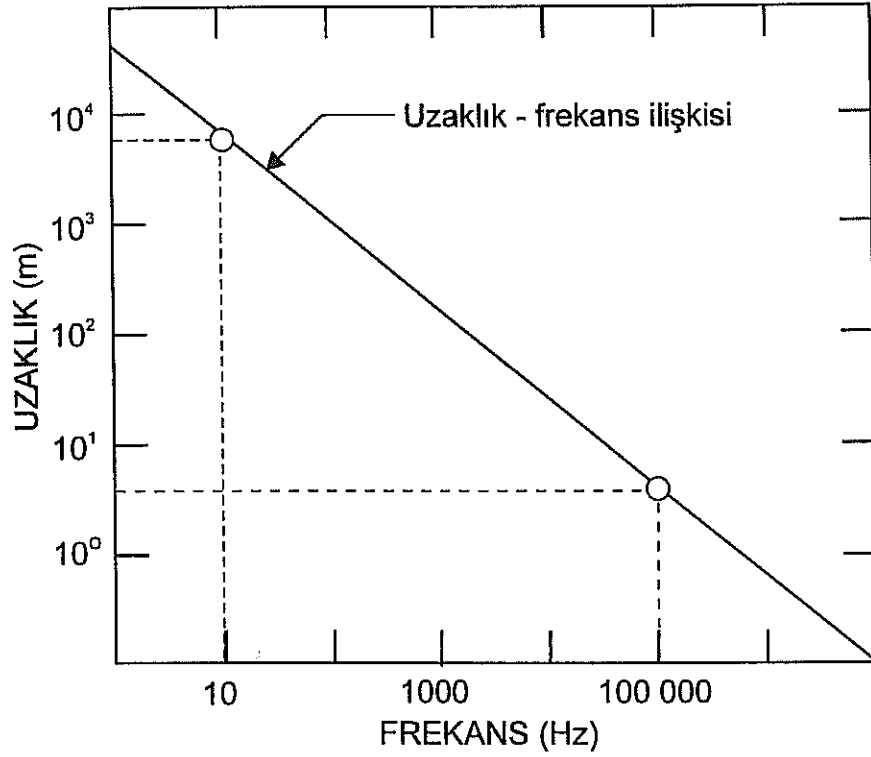
Genel bir kural olarak, azalım (dalganın yayılımı sırasında kaynaktan olan uzaklık arttıkça etkisinin azalması ve bir noktada sönümlenmesi) ile dalganın frekansı doğru orantılıdır. Bu nedenle, kaynaktan olan uzaklık arttıkça sadece düşük frekanslı AE sinyalleri izlenebilir. Dolayısıyla yüksek frekanslı sinyallerin gözlenebilmesi için kaynağa olan uzaklık belirli bir mesafeyi geçmemelidir. Hardy (1981) tarafından uzaklık-frekans ilişkisi için Şekil 2.3'te verilen grafik önerilmiş olup, Ohtsu (1996), bu grafiğin algılayıcı yerlerinin belirlenmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca bir AE sinyali, kaynak spektrumuna ve dalganın yayılımı sırasındaki etkilere bağlı olarak, farklı frekansları içerebilmektedir. Bu nedenlerle, arazide ve laboratuvarında yapılan 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 bağlı olarak, yüksek frekanslı algılayıcılar da kullanılabilmektedir (Hardy ve Kimble, 1995).

### **2.3. AE İzleme Sistemleri**

Arazi veya laboratuvar çalışmalarında AE sinyallerinin belirlenebilmesi için, "temel" ve "parametrik" olmak üzere, yaygın olarak iki tür sistem kullanılmaktadır. Temel



Şekil 2.2: Laboratuvar çalışmalarında elde edilmiş tipik bir AE sinyalinin kaydı (yatay bölmeler yaklaşık 6 ms'yi temsil eder) (Hardy, 1972).

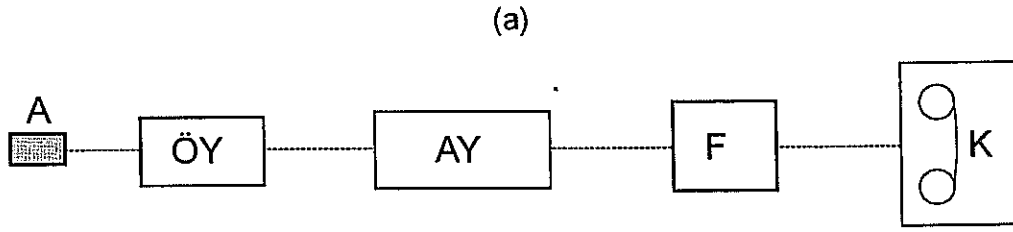


Şekil 2.3: AE sinyalleri için frekansın uzaklığa bağlı değişimi (Hardy, 1981).

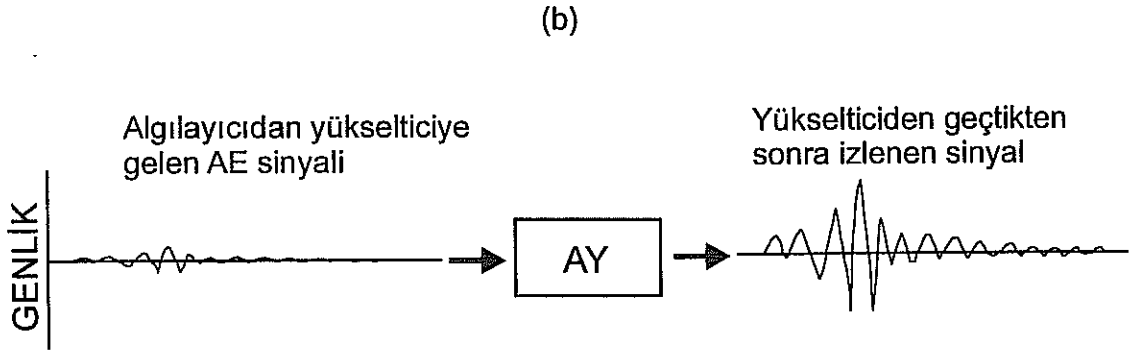
sistemin blok diyagramı Şekil 2.4a'da gösterilmiştir. Algılayıcılar aracılığıyla belirlenen AE aktivitesi gerçekte sadece bir kaç milivolt genliğe sahip bir dalga şeklindedir. Oldukça küçük genlikli bu sinyallerin değerlendirilebilmeleri için, öncelikle bunların herhangi bir yapısal değişikliğe uğratılmadan yükseltilmesi gerekmektedir (Şekil 2.4b). Yükseltileen AE sinyallerinin; laboratuvar ve arazi ortamında çalışılan malzeme dışından algılanan, yükleme 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 rağmen, dalga formundaki şekillerinin korunmasıdır. Ancak bu sistemi kullanarak sürekli olarak izleme yapılabilmesi, kaydedilmesi gereken verinin çok fazla olması nedeniyle güçleşmektedir.

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 genliğinin dağılımı gibi AE parametrelerinden bir veya birkaçı birlikte belirlenebilmektedir. Şekil 2.5a'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 2.5b'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 2.5a'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 olamamaktadır. Hardy (1981), arazide herhangi bir alanda yapılacak AE çalışmaları için öncelikle temel sistemlerin kullanılmasını ve ortamdaki AE sinyallerinin özellikleri belirlendikten sonra, çalışmanın amacı da gözönünde bulundurularak, bir sonraki aşama için kullanılacak sistemin seçilmesini

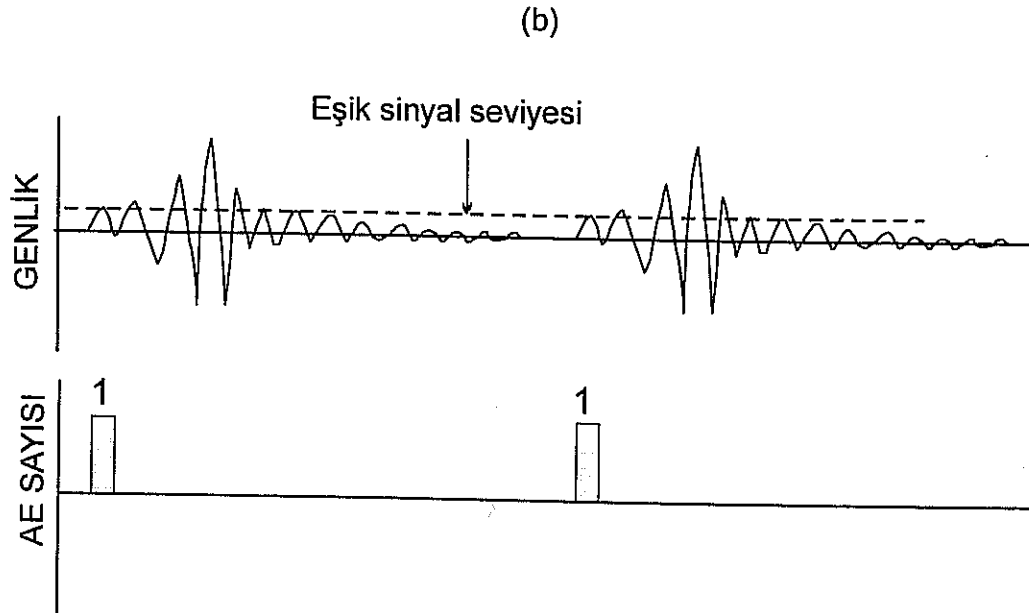
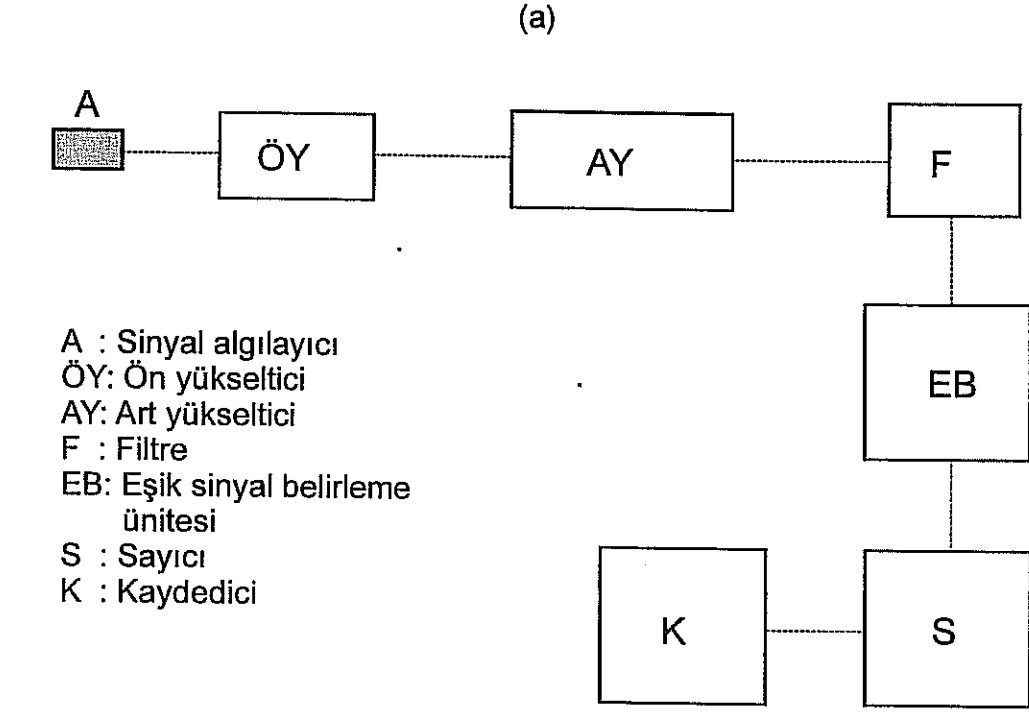




A : Algılayıcı      F : Filtre  
 ÖY: Ön yükseltici    K : Kaydedici  
 AY: Art yükseltici



Şekil 2.4: (a) Temel AE sisteminin yalınlaştırılmış çizimi (Hardy 1981'den düzenlenmiştir) ve (b) AE sinyalinin yükseltilmesi.



Şekil 2.5: (a) AE sayısının belirlendiği parametrik AE sisteminin yalınlaştırılmış çizimi ve (b) eşik seviyesi belirleyici kullanılarak AE sinyali sayısının belirlenmesi (Hardy, 1981'den düzenlenmiştir).

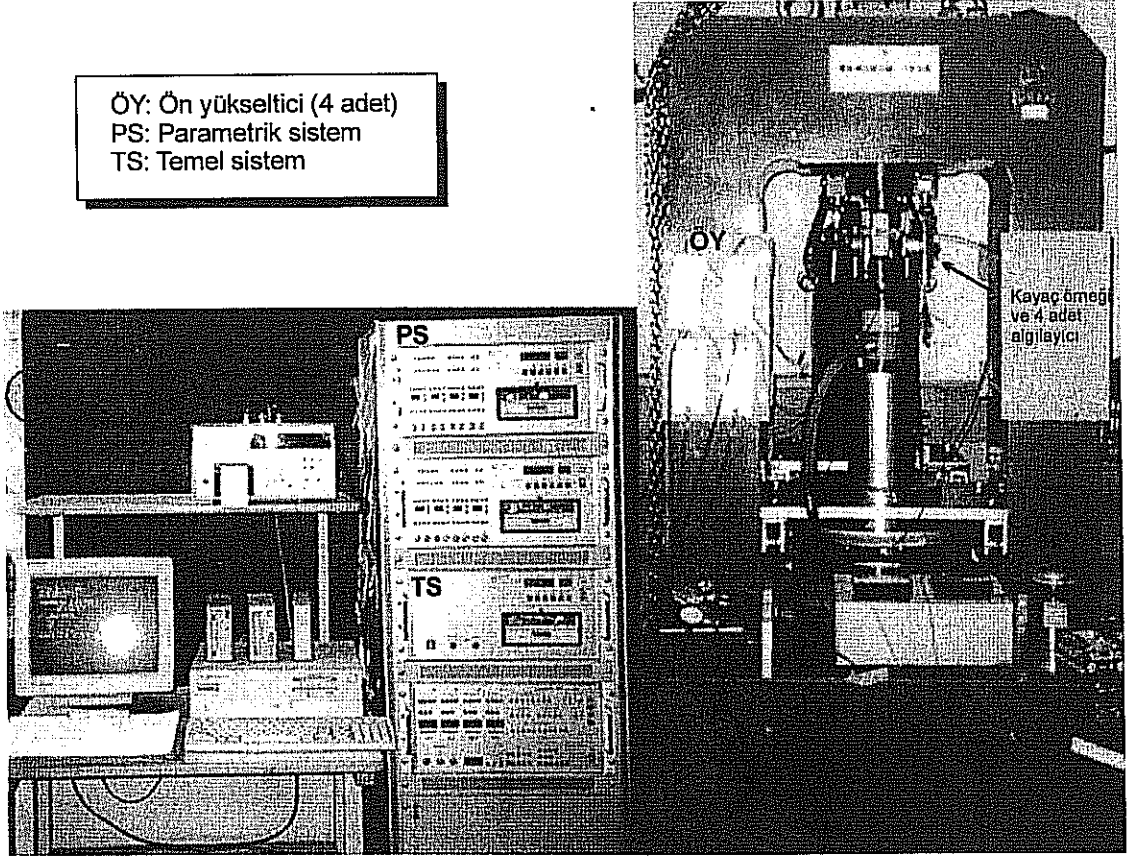
önermektedir. Şekil 2.4a ve 2.5a'da şematik olarak gösterilen sistemlerin her ikisinin de özelliklerine sahip gelişmiş sistemler de günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da laboratuvarda kayaların davranışlarını belirlemek için kullanılan bir hidrolik pres ile buna bağlı temel ve parametrik sistemlerin her ikisinin de özelliklerine sahip bir AE sistemi görülmektedir.

## 2.4. AE Parametreleri

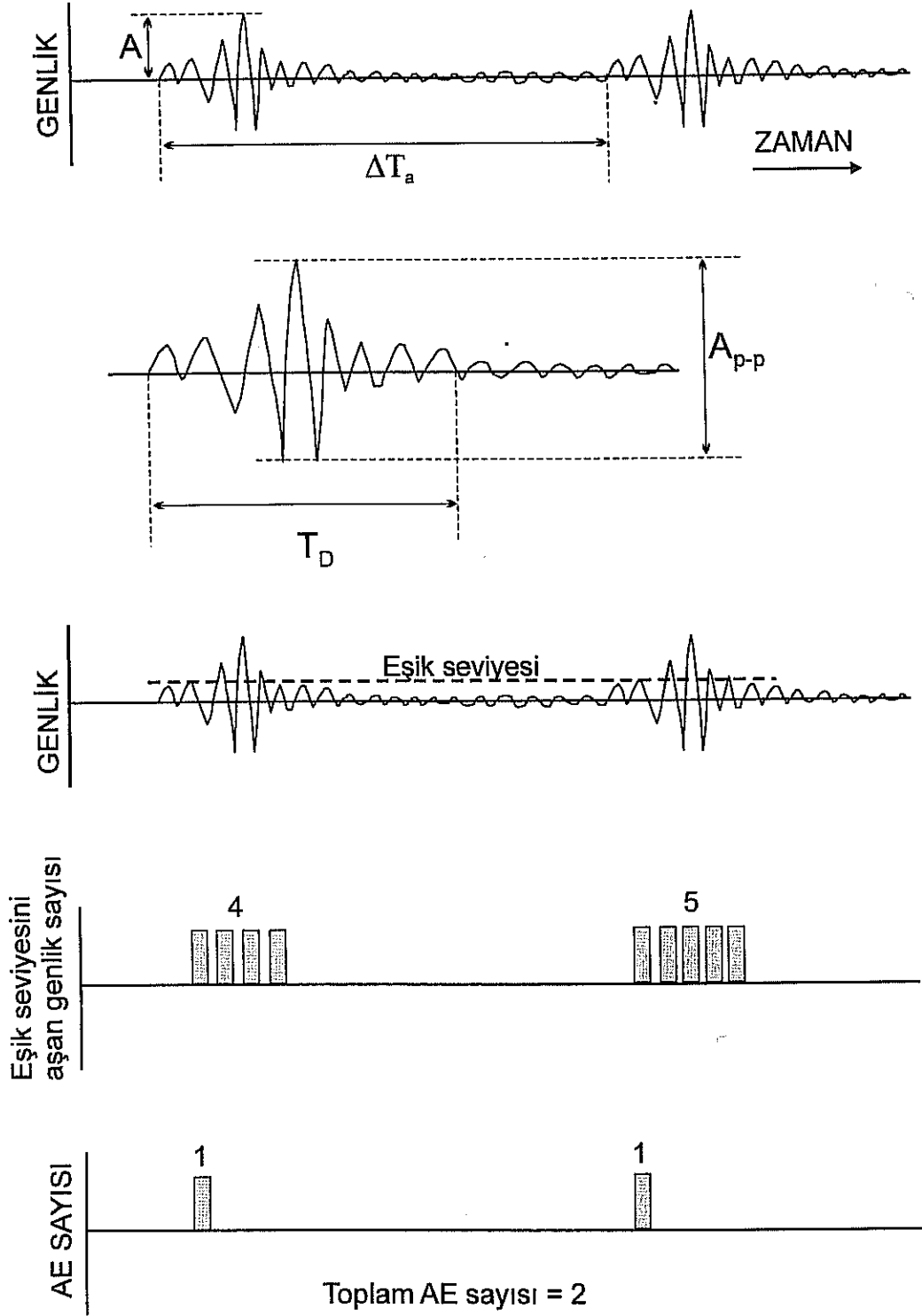
Parametrik sistemlerle gerçekleştirilen izleme çalışmalarında çoğunlukla toplam AE sayısı veya AE hızı parametreleri elde edilmektedir. AE sayısı veya AE hızı, duraysız bölgeden kaynaklanan AE aktivitesinin zamana bağlı değişiminin belirlenmesi ve duraysızlığın gelişiminin izlenmesi açısından oldukça 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 başlıca parametreler aşağıda tanımlanmıştır. Bu tanımlamalardan bazıları Şekil 2.7'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 olgu hızı (AE rate / 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 ( $\sum E_i$ ).

ÖY: Ön yükseltici (4 adet)  
PS: Parametrik sistem  
TS: Temel sistem



Şekil 2.6: Temel ve parametrik AE sistemlerinin birlikte kullanılmasına bir örnek (Nihon Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kaya Mekaniği Laboratuvarı, Japonya, 2001).



Şekil 2.7: AE verisinin tipik bir kesiti ve AE parametrelerinin belirlenmesi (Hardy, 1981 ve Ohtsu, 1996'dan düzenlenmiştir).

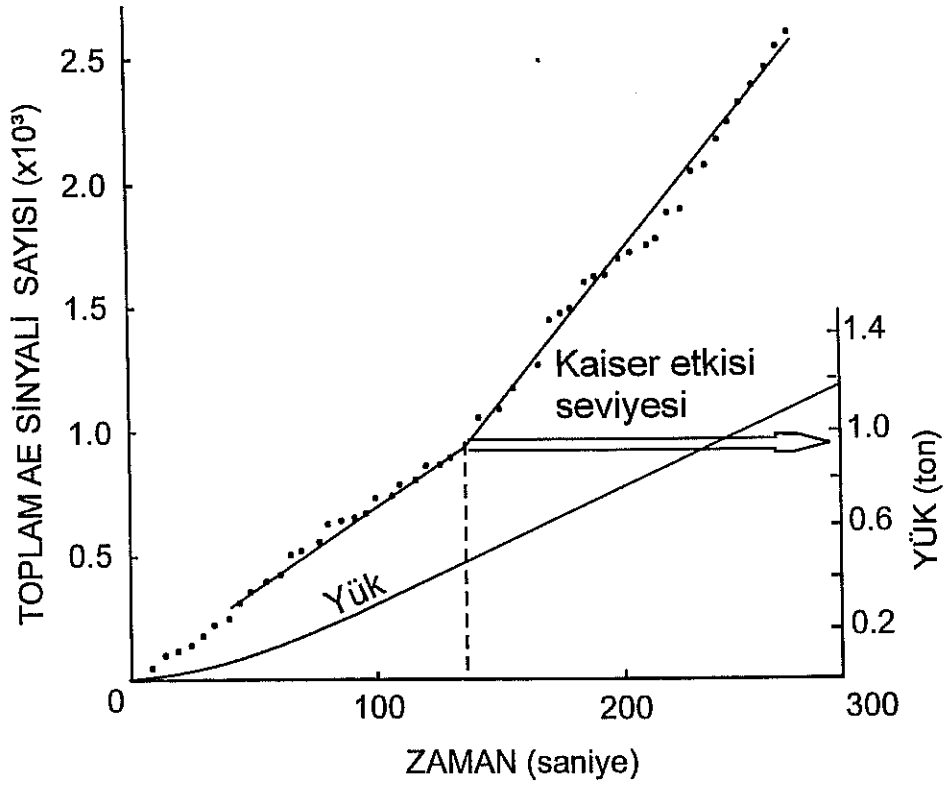
8. *Enerji Hızı (energy rate) (ER)*: Birim zamanda gözlenen tüm AE'lerden yayılan enerjinin toplamı ( $\sum E_i/\Delta t$ ).
9. *AE Süresi ( $T_D$ )*: Bir AE'nin oluşumu ve bitimi arasında geçen toplam zaman.
10. *AE'ler Arası Süre ( $\Delta T_a$ )*: İki AE oluşumu arasında geçen süre.

Jaroszewska ve Reymond (1995), dolomitik kireçtaşı ve kumtaşlarından hazırladıkları karotlar üzerinde laboratuvarda 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.

### 3. AE TEKNİĞİ İLE ARAZİ GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİ

Laboratuvarda gerilme uygulanan kaya karot örneklerinden algılanan AE sinyallerinin kayanın doğal ortamında maruz kaldığı birincil gerilme değerinin belirlenmesinde kullanılabileceği, ilk kez Kanagawa vd. (1976 - Hayashi vd., 1979'dan) tarafından öne sürülmüştür. Bu araştırmacılar, Kaiser (1953 - Hayashi vd., 1979'dan) tarafından metaller için önerilen ve "Kaiser Etkisi (KE)" olarak bilinen gerilme seviyesinin kayalar için de kullanılabileceğini önermiştir. Daha önce belirli bir gerilmenin etkisi altında kalmış metal, kaya 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 gözlemlendiği bu seviye Kaiser Etkisi (KE) olarak bilinmektedir. Benzer şekilde, laboratuvarda yüklenen kaya 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 3.1). Aynı araştırmacılar ayrıca, farklı yönlerde elde edilecek karotlar üzerinde AE deneylerinin yapılması ile arazi gerilmelerinin bileşenlerinin belirlenebileceğini de önermişlerdir.

Sonraki yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda, özellikle bu tekniğin gerilmenin belirlenmesi amacıyla kullanılabilirliği tartışılmıştır. En önemli tartışma ise, arazi gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla, AE deneyinin tek eksenli yükleme koşulu altında yapılmasının uygun olup olmadığı konusunda yaşanmış ve bu konuya ilişkin olarak farklı araştırmacılar tarafından farklı sonuçlar elde edilmiştir (Holcomb ve Martin, 1985; Hughson ve Crawford, 1987; Hardy vd., 1989; Jupe vd., 1992; Seto vd., 1992 ve 1999; Holcomb, 1993; Watanabe vd., 1994; Shen, 1995; Shin ve Kanagawa, 1995; Stuart vd., 1995; Ishiguro vd., 1999; Park vd., 2001; Pestman vd., 2001; Filiminov vd., 2001; Lavrov vd., 2002a; Villaescusa vd., 2002; Lavrov, 2003). Bu çalışmaların bir kısmında, laboratuvarda üç eksenli ön yükleme yapılmış kaya örnekleri üzerinde tek eksenli koşulda AE deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bazı araştırmacılar, yanal gerilmenin KE üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Bu



Şekil 3.1: Kaiser Etkisi seviyesinin "toplam AE sayısı – zaman" grafiğinden belirlenmesi (Hayashi vd., 1979).

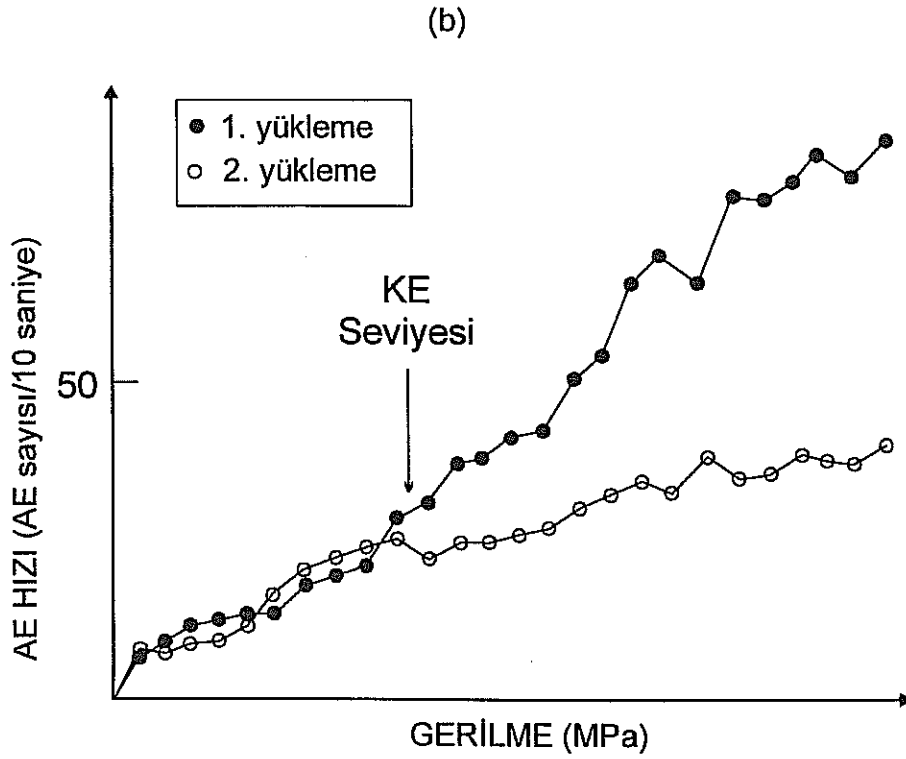
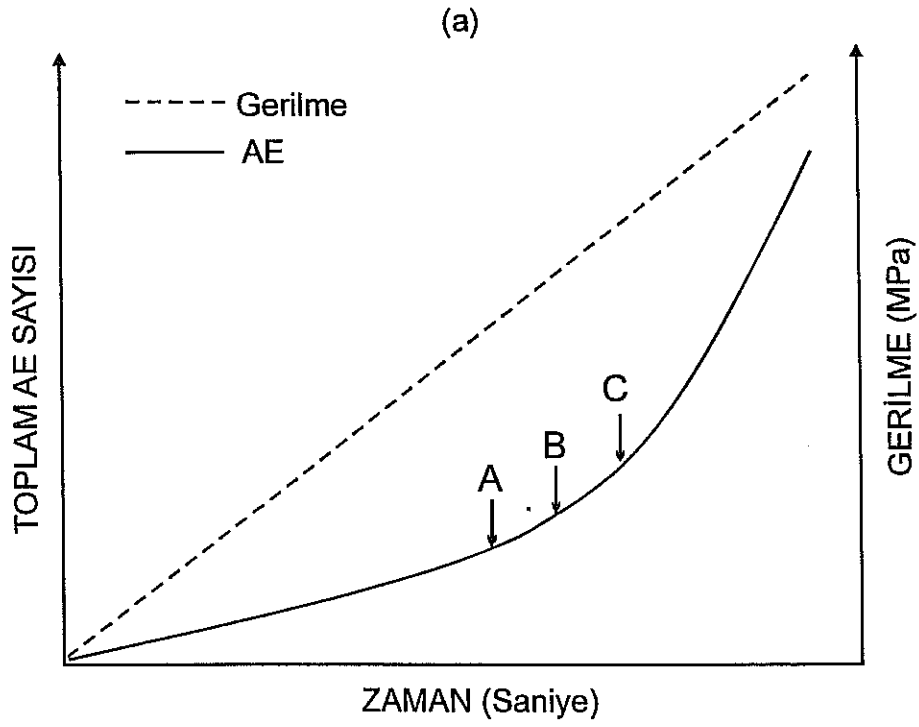


nedenle, tek eksenli koşulda AE deneyleri gerçekleştirilerek elde edilen KE seviyesinin karotun alındığı yöndeki arazi gerilmesine karşılık gelemeyeceği üzerinde durulmuştur. Buna karşın bazı çalışmalarda ise, bunun tam tersi yönde bulgular ortaya konulmuştur. Bu nedenle, günümüzde halen AE tekniği ile arazi gerilmelerinin belirlenmesi üzerinde araştırmacıların ağırlıklı olarak kabul ettiği ortak bir sonuca ulaşılammıştır. Bu konuya ilişkin olarak yapılan önceki çalışmalar Bölüm 3'te değerlendirildiğinden burada ayrıntıya girilmemiştir.

### 3.1. Önceki Çalışmalar

Bu bölümde, 1976'dan bugüne değin bu konuyla ilgili çalışmalara aşağıda ayrıntılı olarak değinilmiş ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular tartışılmıştır.

Öncelikle, "zaman – AE aktivitesi – gerilme" grafiklerinden KE seviyesinin belirlenmesine ilişkin yapılan çalışmalara değinilmiştir. AE deneyinden elde edilen "zaman – AE sayısı" eğrilerinden KE seviyesinin belirlenmesi, basit gibi görünmesine rağmen, bazı durumlarda güçleşmektedir. Örneğin, Şekil 3.2a'da görülen ve özellikle çok miktarda AE aktivitesinin algılandığı kaya örneklerinden elde edilen eğrilerde A, B, C noktalarından hangisinin KE seviyesi olarak seçileceği konusunda yorumlama aşamasında karışıklık olabilmektedir. Bu nedenle, Kanagawa vd. (1976; Hayashi vd., 1979'dan)'ın çalışmasından sonra, kaya örneklerinde KE seviyesinin belirlenmesi için bazı araştırmacılar tarafından çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir (Hayashi, 1979; Boyce, 1981-Hardy vd., 1989'dan; Yoshikawa ve Mogi, 1981 ve 1990; Momayez vd., 1992; Shen, 1995; Watanabe ve Tano, 1999; Shin vd., 2000; Villaescusa vd., 2002). 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 andaki gerilmenin KE seviyesi olduğunu belirtmektedirler (Şekil 3.2b). Ancak Hardy vd. (1989), 2. yüklemeye deneyin başlangıcından itibaren AE sayısında azalma olması gerektiğini vurgulamışlardır. Tuncay vd. (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da, Hardy vd. (1989)'ın belirttiği gibi, 2. yüklemeye belirlenen AE sayılarında önemli oranlarda azalmaların

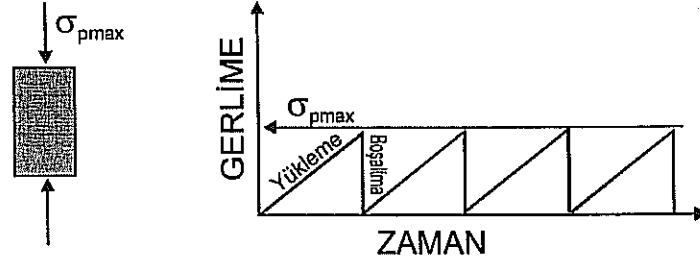


Şekil 3.2: (a) Tipik bir "toplam AE sayısı - zaman - gerilme" grafiğinde KE seviyesinin belirlenmesinde farklı yorumlamalara ilişkin bir örnek ve (b) Yoshikawa ve Mogi (1981 ve 1990) tarafından önerilen KE belirleme yöntemi.

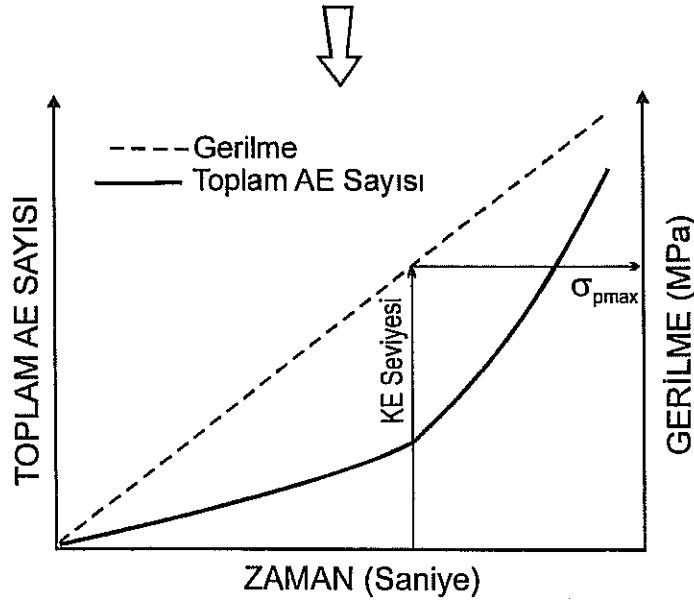
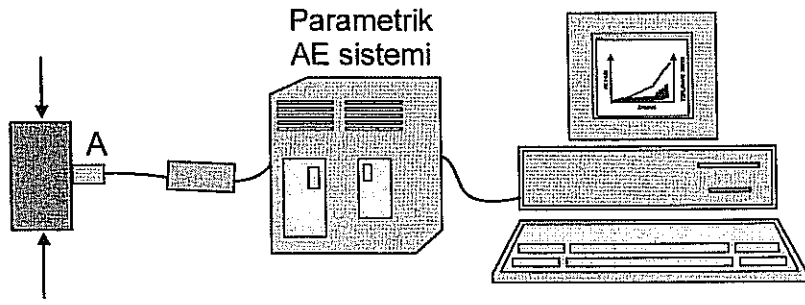
olduğu gözlenmiştir. Yukarıda değinilen diğer çalışmalarda önerilen yöntemlerde, KE seviyesinin belirlenme biçimi farklı olmakla birlikte, elde edilen sonuçlar birbirine yakın ve Şekil 3.2a'da verilen A, B ve C noktaları arasında bir değere karşılık gelecek şekilde KE seviyesinin bulunması söz konusu olmaktadır.

AE deneyiyle KE seviyesinin belirlenmesinde; kaya türünün, kayanın etkisinde bulunduğu gerilme ortamından alınıp AE deneyi yapıncaya kadar geçen sürenin (bekletme zamanı) ve etkisinde kaldığı gerilmenin büyüklüğü ile örnek boyut etkisinin önemli olduğu bazı araştırmacılar tarafından laboratuvarında gerçekleştirilen AE deneyleriyle ortaya konulmuştur (Hardy vd., 1989; Kojima ve Matsuki, 1990; Barr vd., 1992; Hardy ve Shen, 1992; Momayez ve Hassani, 1992; Seto vd., 1992 ve 1999; Shin ve Kanagawa, 1995; Jingen vd., 1995; Barr ve Hunt, 1999; Barr vd., 1999; Shin vd., 2000; Park vd., 2001). Bu çalışmalarda, kaya örneği üzerine etkileyen gerilme, laboratuvarında uygulanan ön yüklemelerle temsil edilmiş ve örnek tek eksenli yükleme koşulunda belirli bir gerilme seviyesine kadar yüklendikten sonra yük kaldırılmıştır (Şekil 3.3a). İkinci aşamada ise, tek eksenli yükleme koşulunda parametrik AE sistemi ile gerçekleştirilen deneyle (Şekil 3.3b) zamana karşı AE sayısı, toplam AE sayısı ve gerilme değerleri elde edilerek KE seviyeleri belirlenmiştir. Değerlendirme aşamasında ise, ön yüklemeye uygulanan gerilme ile AE deneyinde belirlenen KE seviyeleri de karşılaştırılmıştır. Kaya türleri, bekletme zamanları ve karot boyutları farklı olacak şekilde gerçekleştirilen bu deneylerde, genel anlamda, sert kayalara nazaran yumuşak kayalarda KE seviyesinin belirlenmesinin daha güç olduğu belirtilmiştir. Bekletme süresi arttıkça bu seviyenin belirlenmesi güçleşmiş ve karot boyutu ile kayanın etkisinde kaldığı gerilme seviyesi büyüdükçe KE seviyesinin belirlenebilme süresinin de arttığını gösteren sonuçlar elde edilmiştir. Bekletme süresinin etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, laboratuvarında önyüklemeye yapılmış örnekler üzerinde gerçekleştirilen AE deneyleriyle belirlenen KE seviyelerinin 4 gün ile 7 yıl arasında değişen bir süre sonunda belirsizleştiği yönünde oldukça değişkenlik gösteren bir aralıkta sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmalarda, farklı araştırmacılar farklı kaya türleri üzerinde AE deneyleri yapmışlar ve uygulanan öngerilme seviyeleri kullanılan kaya türlerinin dayanımları ve deformasyon aşamaları gibi etkiler dikkate alınmadan seçilmiştir. Ayrıca, bu çalışmalarda öngerilmelerin örnek üzerinde etki süreleri ve şekli de farklılık göstermektedir. Seto vd. (1992 ve 1999), KE

(a)



(b)



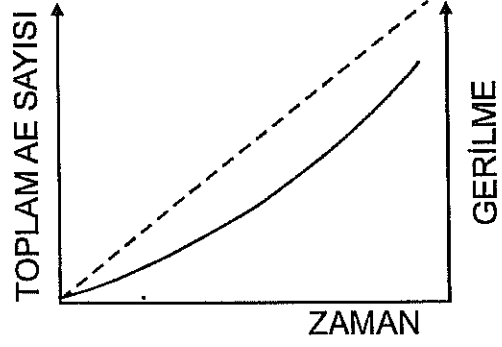
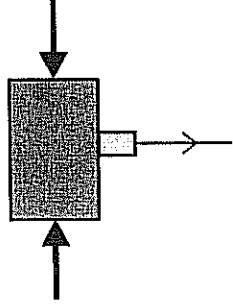
Şekil 3.3: (a) Karot örneğine tek eksenli ön yüklemesi yapıp yükün tekrar boşaltılması ve (b) parametrik AE sistemi ile deney yapılarak elde edilen sonuçlardan KE seviyesinin belirlenmesi.

seviyesinin bazen AE deneyinin yapıldığı 1. yüklemde gözlenemediğini, ancak 2. veya 3. yükleme sırasında belirlenebildiğini ifade etmişlerdir (Şekil 3.4). 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 (% 13) belirleyebilmişlerdir. Ancak bu araştırmacılar da bu sonucu sınırlı sayıda kaya (Inada graniti ve Shirahama kumtaşı) türü için vermektedirler.

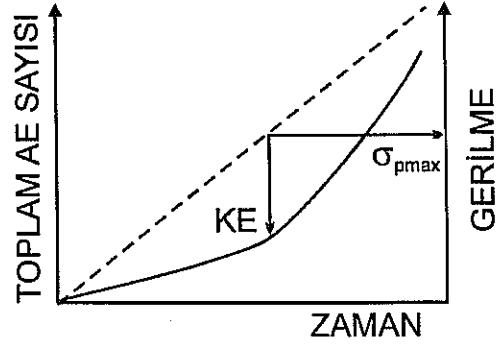
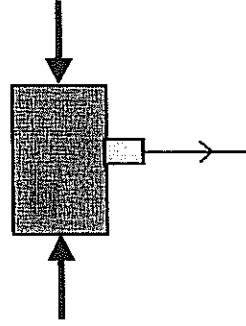
Bu çalışmaların yanı sıra, KE seviyesinin kayaların jeolojik süreç boyunca etkisinde kaldıkları en büyük gerilmelere mi, yoksa güncel gerilmelere mi karşılık geldiği, AE tekniğinin arazi gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılabilirliği ve bu amaç doğrultusunda AE deneyinin tek eksenli koşullar altında yapılmasının uygun olup olmadığı tartışma konusu olmuştur (Hayashi vd., 1979; Kanagawa vd., 1981; Holcomb ve Martin, 1985; Hughson ve Crawford, 1987; Hardy vd., 1989; Jupe vd., 1992; Seto vd., 1992 ve 1999; Holcomb, 1993, Watanabe vd., 1994; Shen, 1995; Shin ve Kanagawa, 1995; Stuart vd., 1995; Ishiguro vd., 1999; Park vd., 2001; Pestman vd., 2001, Filiminov vd., 2001; Lavrov vd., 2002a, Villaescua vd., 2002). Bu çalışmaların büyük bir bölümünde, laboratuvarında üç eksenli ön yükleme yapılmış kaya örnekleri üzerinde tek eksenli koşulda AE deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bazı araştırmacılar, yanal gerilmenin KE üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, tek eksenli koşulda AE deneyleri gerçekleştirilerek elde edilen KE seviyesinin karotun alındığı yöndeki arazi gerilmesine karşılık gelmeyeceği üzerinde durulmuştur. Buna karşın bazı çalışmalarda ise, bunun tam tersi yönde bulgular ortaya konulmuştur. Aşağıda, bu çalışmalarda sunulan sonuçlar verilmiştir.

Hayashi vd. (1979), araziden farklı yönlerden elde ettikleri kaya karot örneklerinde tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapmışlardır. Bu deneylerden belirledikleri KE seviyelerinin karotların alındıkları yöndeki gerilmelere karşılık geldiğini dikkate alarak elde ettikleri gerilmeleri, gerilim boşaltma (overcoring) yönteminden elde ettikleri değerlerle karşılaştırmışlar ve AE tekniğinden belirlenen değerlerin daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Bu nedenle bu araştırmacılar,

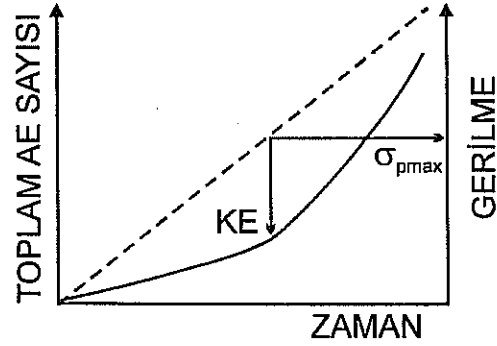
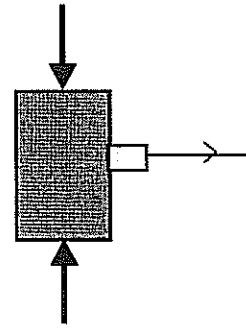
### 1. YÜKLEME



### 2. YÜKLEME



### 3. YÜKLEME



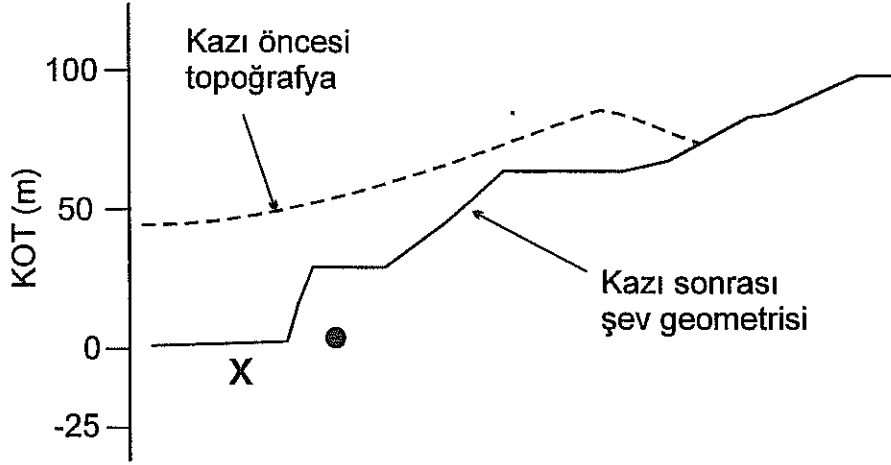
Şekil 3.4: Ön yükleme yapılmış karot örneklerinde gerçekleştirilen AE deneylerinde 1. yüklemede belirlenemeyen KE seviyesinin 2. ve 3. yüklemelerde belirlenmesi (Seto vd. (1992)'dan yeniden düzenlenmiştir).

AE'den elde ettikleri gerilme değerlerinin kayanın tarihsel süreçte etkisi altında kaldığı en büyük gerilme değerleri olabileceğine işaret etmişlerdir.

Kanagawa vd. (1981), AE tekniğinden geçmişteki gerilmelerin mi, yoksa güncel gerilmelerin mi belirlendiği sorusuna açıklık getirmek amacıyla, şev kazısı yapılmış (Şekil 3.5) bir yerde gerilim boşaltma yöntemi (overcoring) ile AE'den elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. 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)'in gerçekleştirdiği bu çalışma ile AE yönteminden belirlenen gerilmelerin belirli bir zaman önce kayanın etkisinde kaldığı gerilmelere karşılık geldiği sonucu çıkmaktadır. Ancak bu sonuç, AE yöntemiyle jeolojik süreç boyunca en büyük gerilmelerin belirlendiği anlamına da gelmemektedir.

Holcomb ve Martin (1985), laboratuvarında tuf örnekleri üzerinde üç eksenli yükleme altında AE deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, karot örneği 60 MPa yanıl basınç ( $\sigma_{3p}$ ) altında 38 MPa saptırıcı (deviatorik) gerilmeye ( $\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ ) kadar yüklenmiş ve daha sonra gerilmeler kaldırılmıştır. 2. aşamada yanıl gerilme değeri 25 MPa olarak seçilmiş ve karot 30 MPa'lık saptırıcı gerilmeye kadar yüklenmiştir. Bu yükleme sırasında kaydedilen AE sayılarındaki ani artışın 26 MPa'a eşit bir saptırıcı gerilme (gerilme farkı) seviyesinde (KE seviyesi) başladığı ve yanıl gerilmenin KE seviyesi üzerinde etkisinin bulunduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, elde ettikleri sonuçları gözönünde bulundurarak, kayanın doğada etkisinde kaldığı gerilme ortamının üç eksenli yükleme ortamına benzer olduğunu ve bu nedenle AE deneyinin tek eksenli yükleme altında yapılamayacağını öne sürmüşlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca, KE seviyelerinin Coulomb yenilme ölçütüne benzer bir yaklaşım ile değerlendirilebileceği görüşünü de ortaya atmışlardır.

Hughson ve Crawford (1987), Berea kumtaşından hazırladıkları karot örneklerini farklı eksenel ve yanıl gerilme değerlerine göre üç eksenli koşulda yüklemişler ve ikinci aşamada ön yükleme yapılmış bu karotlardan farklı yönlerde alınan daha küçük boyuttaki karotlar üzerinde tek eksenli yükleme altında AE deneylerini



- Üstten karot alma yönteminin (Overcoring) uygulandığı lokasyon
- X AE yöntemi için blok örnek alınan lokasyon

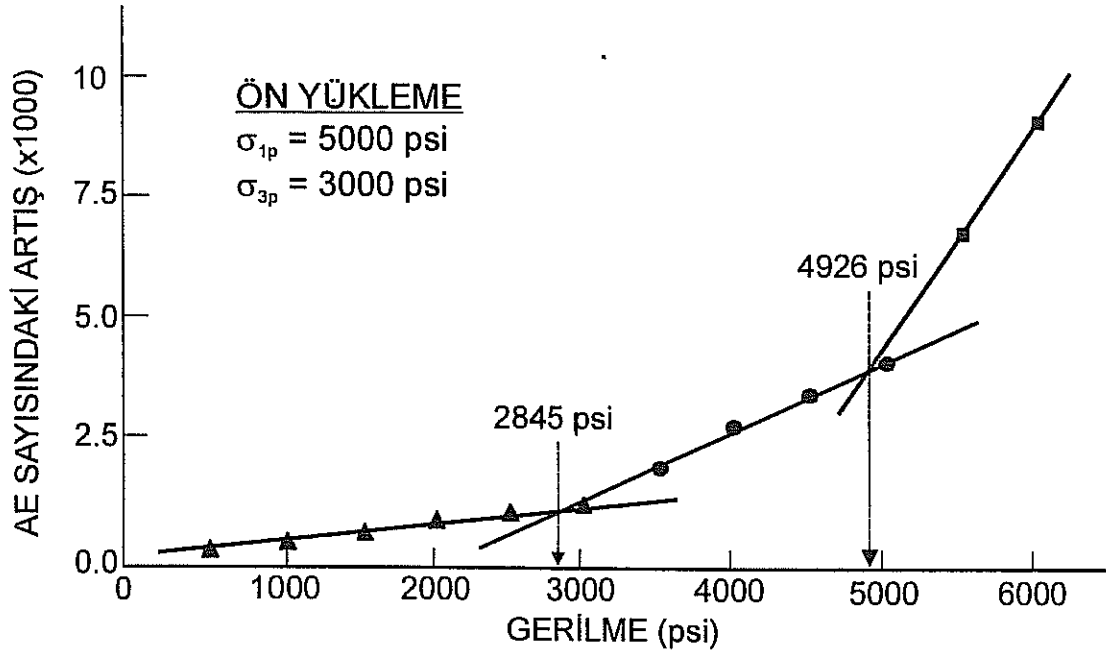
Şekil 3.5: Bir sahada AE deneyi için örneğin alındığı ve gerilim boşaltma yönteminin (overcoring) uygulandığı yerler ve kazı öncesi ile sonrasına ait şev geometrisi (Kanagawa vd., 1981).



gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, tüm örneklerden elde ettikleri KE seviyelerinin saptırıcı gerilmeye karşılık geldiğini vurgulamışlardır. Aynı araştırmacılar ayrıca, üç eksenli koşulda ön yükleme yaptıkları bir örnek üzerinden eksenel gerilme (en büyük gerilme) sabit iken, öncelikle yanal gerilmenin etkisinin kaldırıldığını ve sonra eksenel gerilmenin boşaltıldığını ve bu örneğin tek eksenli koşulda tekrar yüklenerek AE deneyinin yapıldığını belirtmektedirler. Bu deneyde belirlenen KE seviyesinin ise, ön yüklemedeki eksenel gerilme değerine karşılık geldiği ve kayanın ön yükleme sırasında yanal gerilme etkisinden bir süre için kurtulması durumunda yükleme yönündeki önceki gerilmenin belirlenebileceği ifade edilmiştir.

Hardy vd. (1989) tarafından, Hughson ve Crawford (1987)'un yaptıklarına benzer bir uygulama kireçtaşı örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve "AE sayısındaki artış – gerilme" grafiklerinde ani artışın gözlemlendiği iki noktanın varlığı saptanarak bu noktaların eksenel ve yanal gerilmelere karşılık geldiği belirtilmiştir (Şekil 3.6). Bu araştırmacılar ayrıca, farklı yönlerde alınan karot örnekleri üzerinde yapılan deneylerden de benzer sonuçlar elde etmişler ve bu durumun "farklı yönlerden elde edilecek karotlar üzerinde AE deneyi yapılarak tüm gerilme tansörünün belirlenmesi" görüşüne ters olduğunu öne sürmüşlerdir.

Holcomb (1993), kuramsal olarak değerlendirildiğinde, arazi gerilmelerinin tek eksenli yükleme ile gerçekleştirilen AE deneylerinden belirlenemeyeceğini, ancak bazı araştırmacıların bu şekilde gerçekleştirdikleri AE deneyleri ile geleneksel arazi deneylerinden elde ettikleri sonuçlar arasında benzerlik olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı bu durumun, kayaların laboratuvar ortamındaki üç eksenli ön yükleme koşulları ile arazide doğal ortamda maruz kaldıkları gerilme koşulları arasında farklılık olması gerektiğine işaret ettiğini vurgulamıştır. Araştırmacı, arazi gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan DSCA (Differential Strain Curve Analysis) yöntemi için öne sürülen kuramın AE deneyi için de geçerli olabileceğini belirtmiştir. Bu kurama göre, doğal ortamından alınan kayanın içerdiği mikroçatlaklar açılmakta ve kaya tekrar gerilmeye maruz bırakıldığında mikroçatlaklar önceki gerilme seviyesinde kapanarak bu seviyeden sonra çatlaklar içerdikleri pürüzlülüğünden dolayı daha fazla dayanım göstermektedir (Holcomb, 1993).



Şekil 3.6: Üç eksenli koşulda ön yükleme yapılmış bir örneğin tek eksenli yükleme ile gerçekleştirilen AE deneyinden elde edilen "AE Sayısındaki Artış - Gerilme" grafiği (Hardy vd. (1989)'dan yalınlaştırılarak alınmıştır).

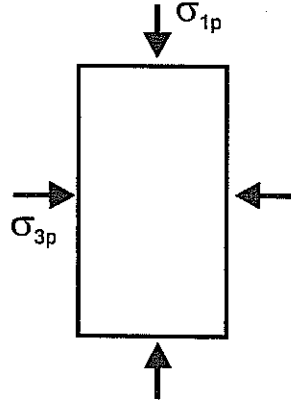
Watanabe vd. (1994) tarafından bir tuf karotu üzerinde laboratuvarında üç eksenli ön yükleme yapılmıştır. Daha sonra bu örnekten çıkartılan yönlü karotlar üzerinde tek eksenli yükleme koşulunda gerçekleştirilen AE deneyleri sonucunda KE seviyesinin yön kavramından bağımsız olabileceği belirtilmiştir (Şekil 3.7).

Shen (1995), Berea kumtaşı ve Indiana kireçtaşı örneklerini laboratuvarında üç eksenli ön yüklemeye maruz bırakmış ve daha sonra tek eksenli yükleme ile AE deneylerini gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, Hardy vd. (1989)'ın belirttiği gibi, AE deneylerinden elde ettiği "AE sayısındaki artış – gerilme" grafiklerinde artışın gözlemlendiği iki nokta belirlemiş, ancak bu noktaların ön yüklemedeki en büyük eksenel ve saptırıcı gerilmelere karşılık geldiğini belirtmiştir.

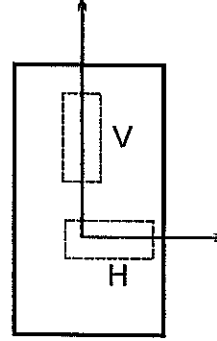
Shin ve Kanagawa (1995) tarafından, Inada granitinden hazırlanan küp şeklinde örnekler laboratuvarında üç eksenli koşulda yüklenmiş, ancak örnekler öncelikle 300 kgf/cm<sup>2</sup> değerine kadar eksenel gerilme altında ve daha sonra 500 kgf/cm<sup>2</sup> yanal gerilmeye maruz bırakılmıştır. İkinci aşamada eksenel yükleme yönünde ve tek eksenli koşulda gerçekleştirilen AE deneylerinde belirlenen KE seviyelerinin ön yüklemedeki en büyük eksenel gerilmeye (300 kgf/cm<sup>2</sup>) karşılık geldiğini gösteren sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmacılar, elde ettikleri sonuçlara dayanarak, KE üzerinde yanal gerilmenin etkili olmadığını ve bu nedenle AE deneyinin 6 farklı yönde elde edilen örnekler üzerinde gerçekleştirilerek arazi gerilmelerinin üç boyutlu olarak belirlenebileceğini öne sürmektedirler.

Stuart vd. (1995), gerçek üç eksenli deney aleti olarak tanımladıkları düzenek (Şekil 3.8a) ile küp şeklinde hazırlanmış kumtaşı örnekleri üzerinde öncelikle 4 MPa hidrostatik gerilme uygulamışlar ve sonra örneği X, Y ve Z yönlerinde ayrı ayrı belirli gerilme seviyelerine kadar yüklemişlerdir (Şekil 3.8b). Daha sonra aynı yöntemle uygulanan yüklemeler altında AE deneyleri yapılmış ve elde edilen KE seviyelerinin her bir yön için ön yüklemeye uygulanan en büyük gerilme değerlerine karşılık geldiğini gösteren sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 3.8c). Araştırmacılar, bu sonuçlara dayanarak, KE'nin yönden bağımsız olduğunu belirtmişler ve farklı yükleme yönlerindeki gerilmelere karşılık kayanın farklı dayanım bileşenleri içerdiğini öne sürmüşlerdir.

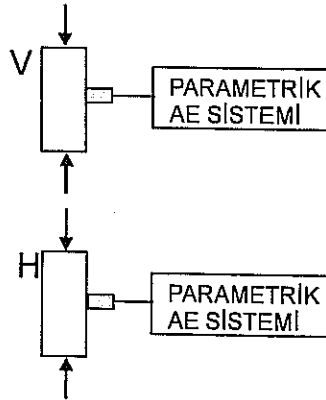
### ÖN YÜKLEME



### YÖNLÜ KAROT ALIMI

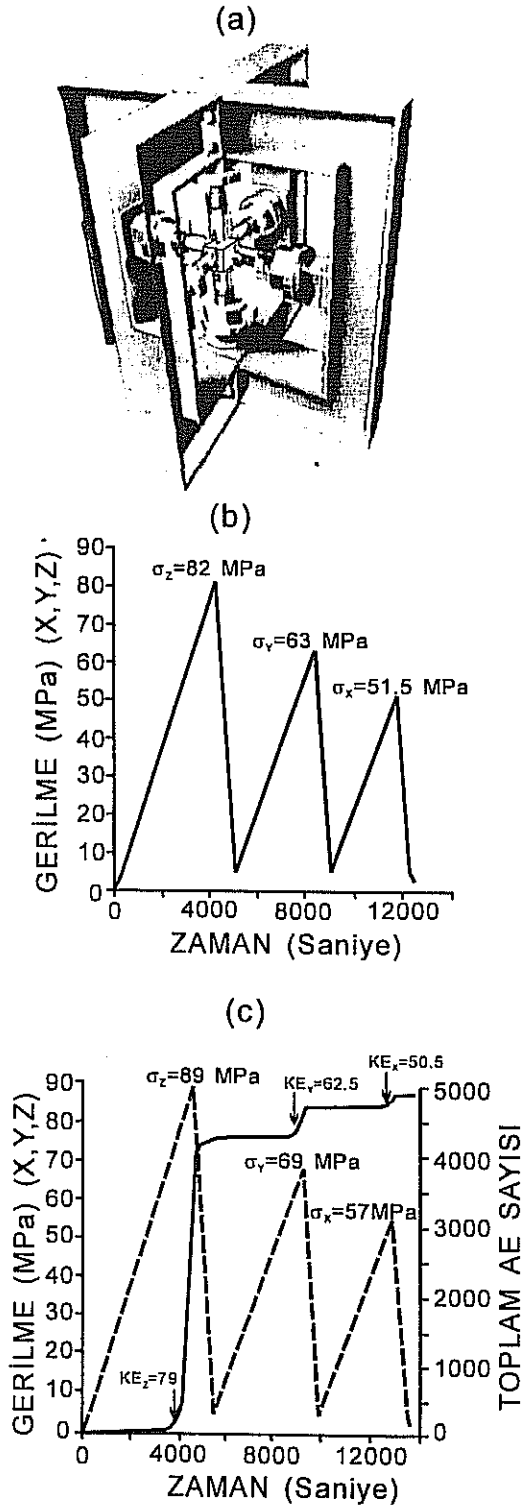


### AE DENEYİ



Ön yükleme (MPa)	KE Seviyesi (MPa)
$\sigma_{1p} = 19.6$	V = 20.2
$\sigma_{3p} = 9.8$	H = 9.3

Şekil 3.7: Üç eksenli koşulda belirli gerilme değerlerine kadar ön yükleme uygulanmış büyük bir tüf karot örneğinden alınan yönlü karotlar üzerinde gerçekleştirilen AE deneylerinden belirlenen KE seviyelerinin karşılaştırılması (Watanabe vd., 1994) ( $\sigma_{1p}$  ve  $\sigma_{3p}$ : ön yüklemedeki asal gerilmeler, V: düşey, H: yatay).



Şekil 3.8: (a) Gerçek üç eksenli yükleme düzeneğinin örneğin yerleştirildiği bölümünden görünüm ve (b) Z, Y ve X yönlerinde ayrı ayrı gerçekleştirilen ön yüklemeler ile (c) AE deneylerinin gerçekleştirildiği Z, Y ve X yönlerindeki yüklemelerde elde edilen KE seviyeleri (Stuart vd., 1995).

Seto vd. (1999), Inada granitinden hazırladıkları karot örneklerini üç eksenli koşulda ön yüklemeye maruz bırakmışlar ( $\sigma_{1p}=31$  MPa,  $\sigma_{3p}=15$  MPa) ve sonraki aşamada aksenal gerilmenin uygulandığı yönde tek eksenli yüklemeler ile ardarda 2 yükleme ile AE deneyi gerçekleştirmişlerdir. 1. yükleme ile gerçekleştirilen AE deneyinde KE seviyesi 30 MPa belirlenirken, 2. yüklemeye 31 MPa bulunmuştur.

Park vd. (2001), Hwangdeung graniti üzerinde üç eksenli ön yükleme ( $\sigma_{1p}=15$  MPa,  $\sigma_{3p}=30$  MPa) ve arkasından tek eksenli yükleme ile AE deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, elde ettikleri sonuçlara göre KE seviyesi üzerinde yanal gerilmenin etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Pestman vd. (2001) ise, AE deneyinin 3 eksenli yükleme koşulunda yapılarak arazi gerilmelerinin belirlenebileceği bir yöntem önermişlerdir. Ancak araştırmacıların önerdikleri bu yöntemde asal gerilmelerin yönlerinin önceden bilinmesi zorunluluğu olduğundan, yöntemin uygulanabilirliğinde önemli sınırlamalar mevcuttur.

Filiminov vd. (2001), AE deneylerinin genellikle, araziden alınan kaya örneğinin laboratuvarındaki sıkıştırma yönüyle arazideki en büyük sıkışma yönünün aynı olduğu varsayılarak, tek eksenli sıkışma ortamında gerçekleştirildiğini belirtmektedirler. Filiminov vd. (2001), bu sınırlamadan dolayı bu konuda daha ileri araştırmaların yapılması, özellikle üç eksenli ön yükleme yapılmış örnekler üzerinde tek eksenli yükleme ile kayaların hafıza etkilerinin (KE seviyesi) ayrıntılı olarak araştırılması gerektiğini vurgulamışlardır. Araştırmacılar, Kaliningrad ve Tula kaya tuzlarından aldıkları karot örneklerine üç eksenli ön yükleme uygulamışlar ve ön yüklemeye en büyük gerilme yönüne paralel olacak şekilde uyguladıkları tek eksenli yükleme ile AE deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler sonucunda; AE deneyinin yapıldığı ikinci yüklemeye elde edilen KE seviyesinin, dolayısıyla üzerinde AE deneyi yapılan karotun yükleme yönlerine bağlı olarak etkisinde kaldığı gerilmenin aşağıda verilen eşitlikle ifade edilebileceğini öne sürmüşlerdir.

$$\sigma_{KE} = \sigma_{1p} - (k + 1)\sigma_{3p} \quad (\text{Eş. 3.1})$$

Burada;

$\sigma_{KE}$  : AE deneyinin yapıldığı tek eksenli yüklemeye belirlenen KE seviyesine karşılık gelen gerilme

$\sigma_{1p}$  : Ön yüklemeye kayanın maruz kaldığı en büyük eksenel gerilme

$\sigma_{3p}$  : Ön yüklemeye kayanın maruz kaldığı en büyük yanal gerilme

k : Boyutsuz bir katsayı

Filiminov vd. (2001), üzerinde çalıştıkları kaya tuzu için k katsayısının 0.5-0.6 değerleri arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmanın sonucuna dayanarak, arazi gerilmelerinin belirlenebilmesi için kayanın arazide etkisinde kaldığı asal gerilmelerin oranının ve yönlerinin bilinmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

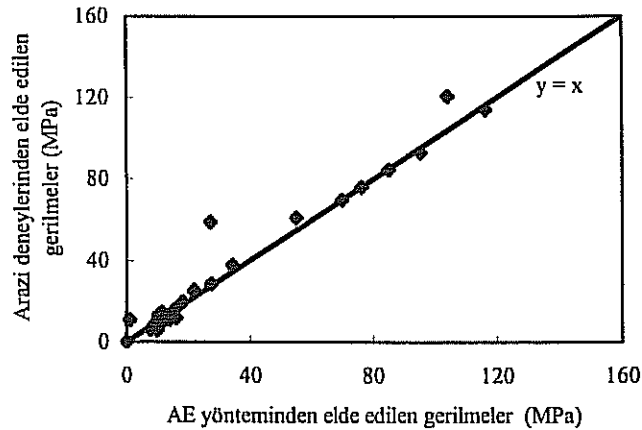
Lavrov vd. (2002a), Brazilian deneyleri ile ön yüklemeye maruz bıraktıkları kireçtaşı örneklerini ön yükleme eksenine 0° ile 90° derece arasında değişen yönlerde tekrar yükleyerek AE deneyleri yapmışlardır. Bu çalışmada, KE seviyesinin yöne bağlı olarak değiştiği, önceki yükleme ile ikinci yükleme eksenleri arasındaki farkın 15°'ye ulaşması durumunda KE seviyesinin gözlenemediği belirtilmiştir.

AE tekniğinin gerilmelerin belirlenmesinde kullanılabilirliğini araştırmaya yönelik yukarıda özetle değinilen laboratuvar çalışmalarının yanı sıra, AE ve diğer gerilme ölçüm yöntemleriyle belirlenmiş gerilme değerlerinin karşılaştırıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (Çizelge 3.1). Çizelge 3.1'den görüleceği gibi, Jupe vd. (1992) tarafından gerçekleştirilen çalışmada AE tekniğinden ve gerilim boşaltma yönteminden elde edilen en büyük ve en küçük asal gerilmeler oldukça farklıdır. Jupe vd. (1992) ve Barr vd. (1999), bu farklılığın bekletme süresiyle ilişkili olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca Jingen vd. (1995) tarafından yapılan çalışmada 3 yerden birinde AE tekniği ile hidrolik çatlatma deneyinden elde edilen en küçük asal gerilmeler arasında yaklaşık % 15 civarında bir farklılık belirlenmiştir. Ancak, bu ölçüde ve hatta daha büyük farklılıkların, arazi gerilmelerinin belirlenmesinde ISRM tarafından önerilen yöntemlerin karşılaştırıldığı çalışmalarda da gözlemlendiği

Çizelge 3.1: Çeşitli araştırmacıların AE tekniğinden ve arazi deneylerinden elde ettikleri gerilme değerleri.

Araştırmacı	Ülke	Arazi gerilmesi değerleri (MPa)		
		AE yöntemi	Üstten karot alma gerilim boşaltma yöntemi	Hidrolik çatlatma yöntemi
Hayashi vd. (1979)	Japonya	$\sigma_{hx}=5.9-9.81$ $\sigma_{hy}=11.8$ $\sigma_v=9.81$	$\sigma_{hx}=5.9$ $\sigma_{hy}=5.9-13.7$ $\sigma_v=3.9-7.8$	-
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	$\sigma_1=55\pm 5$ $\sigma_3=14\pm 1$	$\sigma_1=61\pm 6$ $\sigma_3=11\pm 5$	-
Jingen vd. (1995)	Çin	$(\sigma_h)_{max}=116.3$ $(\sigma_h)_{min}=85.1$ $(\sigma_h)_{max}=155.2$ $(\sigma_h)_{min}=104$ $(\sigma_h)_{max}=95.5$ $(\sigma_h)_{min}=76.2$	-	$(\sigma_h)_{max}=114.1$ $(\sigma_h)_{min}=84.6$ $(\sigma_h)_{max}=162.5$ $(\sigma_h)_{min}=120.9$ $(\sigma_h)_{max}=93.4$ $(\sigma_h)_{min}=76.2$
Barr vd. (1999)	ABD	$\sigma_1=34.4$ $\sigma_2=16.1$ $\sigma_3=15.7$	-	$\sigma_1=37.6^*$ $\sigma_2=15.7^*$ $\sigma_3=11.6^*$
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	$\sigma_1=27.5$ $\sigma_2=18.4$ $\sigma_3=13.8$	$\sigma_1=28.4$ $\sigma_2=19.7$ $\sigma_3=12.0$	-

Elde edilen gerilme değerlerinin  $y=x$  grafiğindeki konumları



$\sigma_v$ : düşey gerilme,  $\sigma_{hx}$ ,  $\sigma_{hy}$ : X ve Y yönündeki yatay gerilmeler,  $(\sigma_h)_{max}$ ,  $(\sigma_h)_{min}$ : en büyük ve en küçük yatay gerilmeler,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ : asal gerilmeler, \* AE tekniği ile gerilmelerin belirlendiği seviyede daha önceden yapılmış olan gerilim boşaltma, hidrolik çatlatma ve DSCA yöntemlerinden elde edilen gerilmelerin ortalaması.



bilinmektedir (Amadei ve Stephansson, 1997). Çizelge 3.1'de belirtilen bu iki gerilme değeri dışında diğer değerlerin oldukça benzer olduğu görülmektedir.

Watanabe vd. (1999) ve Tuncay vd. (2002) tarafından Türkiye'de yeraltı ve yerüstü işletmeleri, taş ocakları, tünel gibi kaya yapılarının ve kazılarının bulunduğu farklı yerlerden ve farklı türde yönlü kaya bloğu örnekleri alınmıştır (Şekil 3.9). Bu çalışmalarda, önceki çalışmalarda verilen ve bir kısım araştırmacının da yaptığı gibi, yönlü örneklerde tek eksenli yükleme altında AE deneyleri yapılarak belirlenen KE seviyelerinin, deneylerin yapıldığı yöndeki arazi gerilmelerine karşılık geldiği kabul edilmiştir. Her bloktan Şekil 3.10'da gösterildiği şekilde laboratuvarında yönlü karotlar hazırlanmış ve her karot üzerinde AE deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriden, Watanabe ve Tano (1999) tarafından önerilen ve doğrudan parametrik sistemden elde edilen veriler üzerinde işlem yapılabilen, ayrıca uygulanması da oldukça basit olan yaklaşım kullanılarak KE seviyeleri belirlenmiştir. Bu yaklaşımda, Şekil 3.11a'da görüldüğü gibi, "toplam AE sayısı – zaman" grafiği üzerinde her bir nokta için AE sayısı artışı  $RI(t)$  olarak adlandırılan fark, aşağıda verilen eşitlikten belirlenmektedir.

$$RI(t) = CR(t+\Delta t) - CR(t) \quad (\text{Eş. 3.2})$$

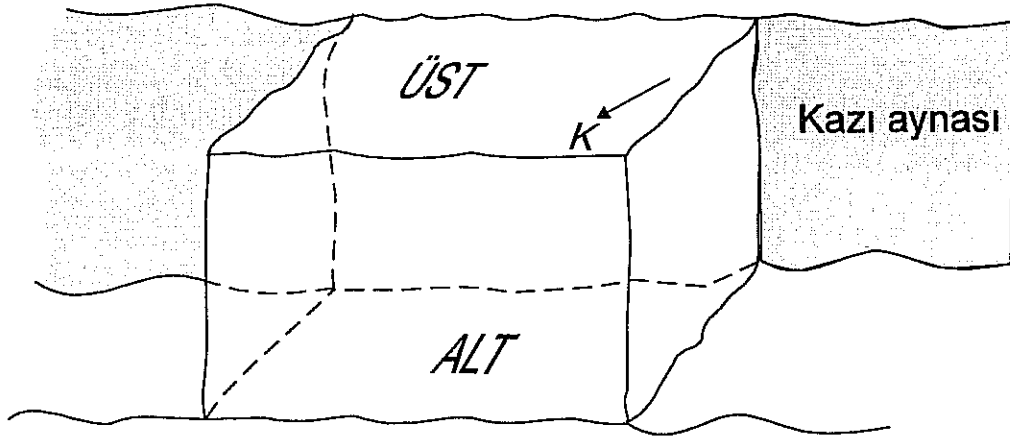
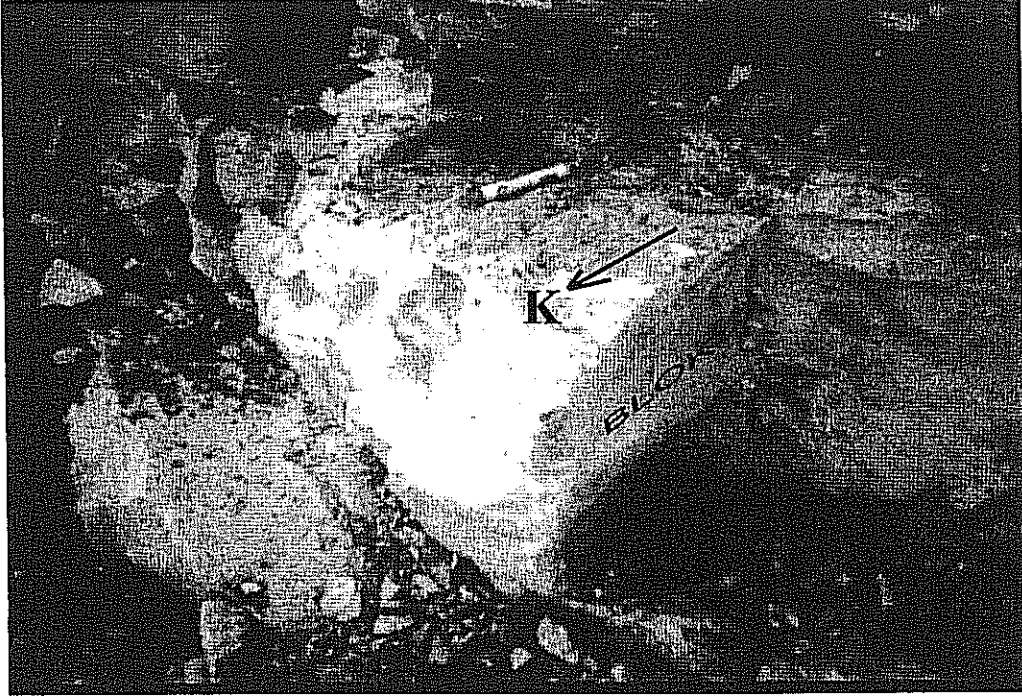
Burada;

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

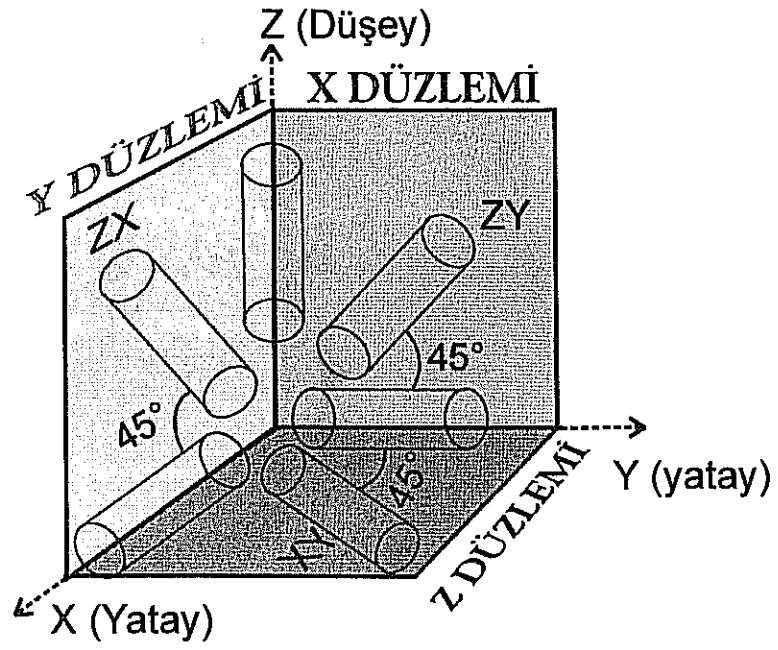
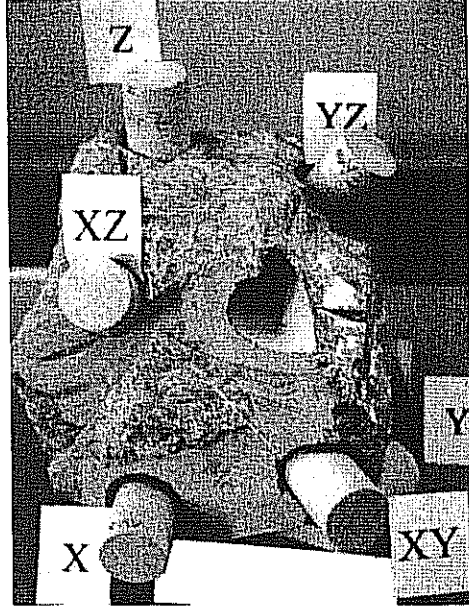
$CR(t)$ :  $t$  ve  $t-\Delta t$  zamanlarındaki toplam AE sayıları arasındaki fark

$\Delta t$ : Zaman farkı

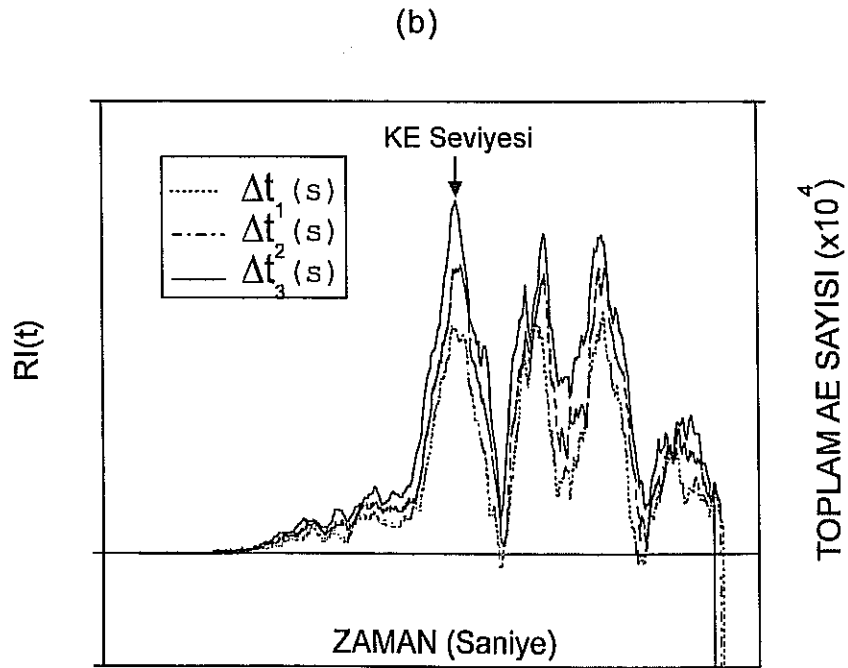
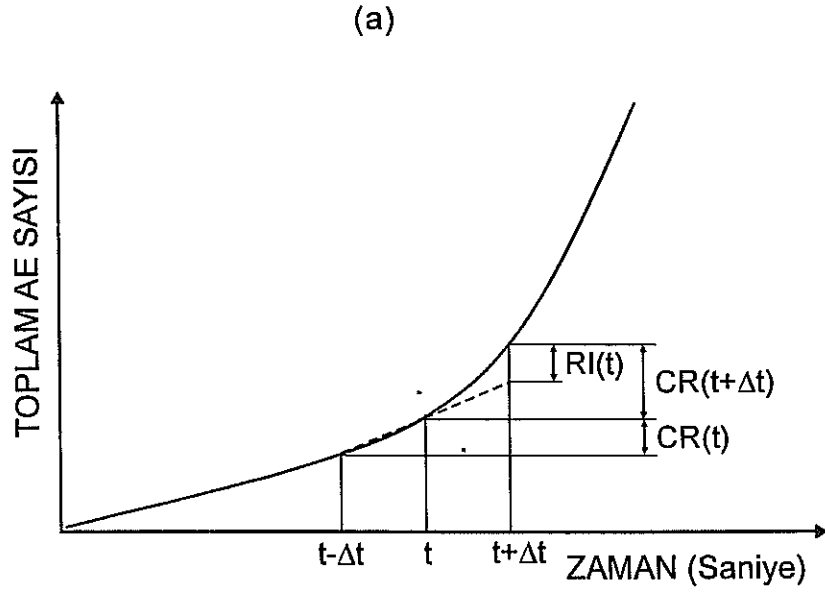
Bu eşitlikteki  $\Delta t$  zaman aralığı, farklı değerler alacak şekilde belirlenebilmekte ve bir tek grafik yerine daha fazla sayıda "RI(t) – zaman" grafiği elde edilerek yorum yapılabilmektedir. "Toplam AE sayısı – zaman" grafiği üzerinde her bir nokta için Eşitlik 3.2'de verilen işlem yapıldıktan sonra "AE sayısı artışı RI(t) – zaman" grafiği çizilerek, en büyük RI(t) değerinin elde edildiği zamandaki gerilme değeri KE seviyesi olarak belirlenmektedir (Şekil 3.11b).



Şekil 3.9: AE uygulaması için yeraltından yönlü blok örnek alınması.



Şekil 3.10: Blok örneklerden yönlü karotların hazırlanması.

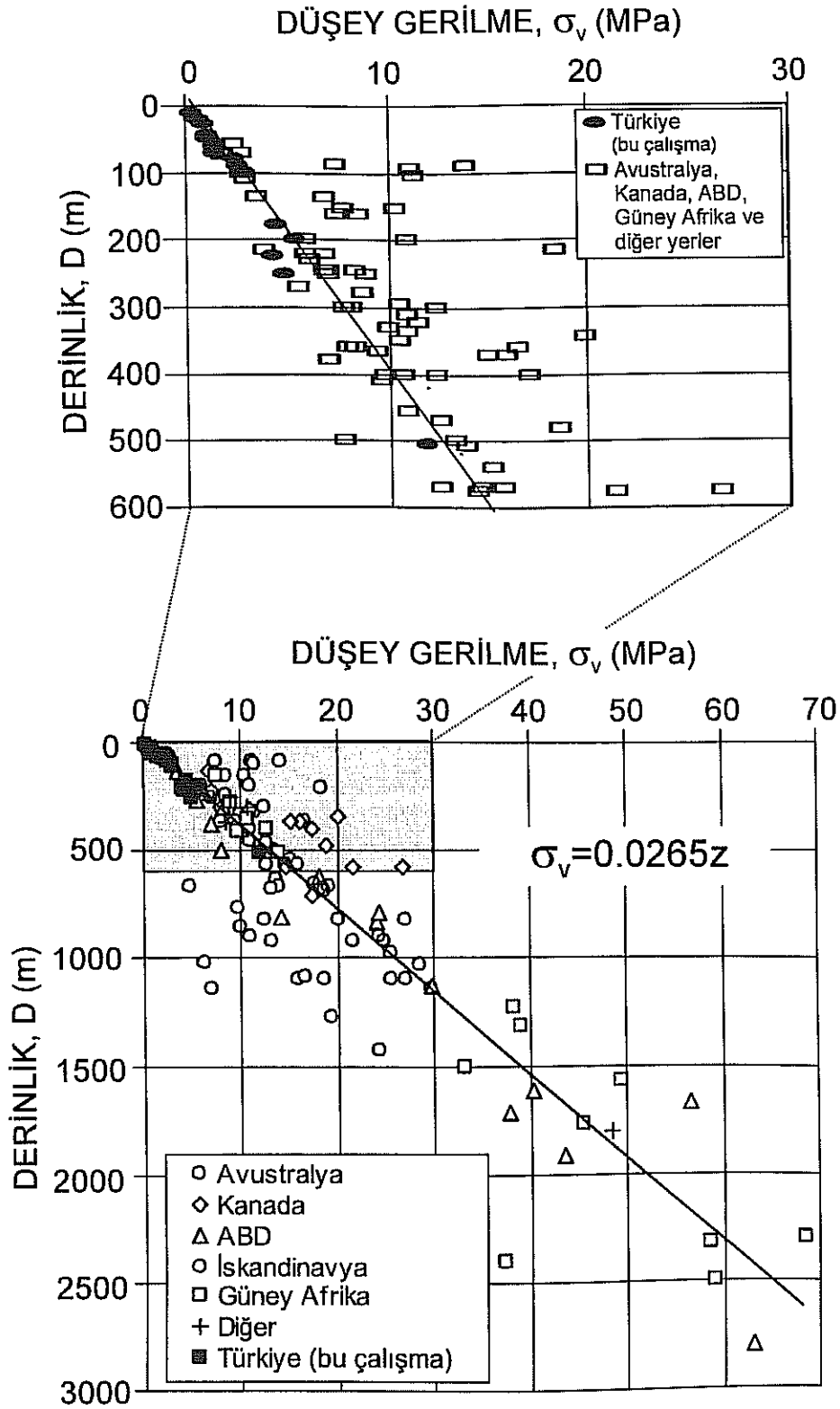


Şekil 3.11: (a). "Toplam AE sayısı zaman" grafiğinden AE sayısı artışının,  $RI(t)$ , belirlenmesi ve (b) farklı zaman aralıkları ( $\Delta t_i$ ) için üç farklı "RI(t) - zaman" grafiğinin elde edilerek KE seviyesinin belirlenmesi.

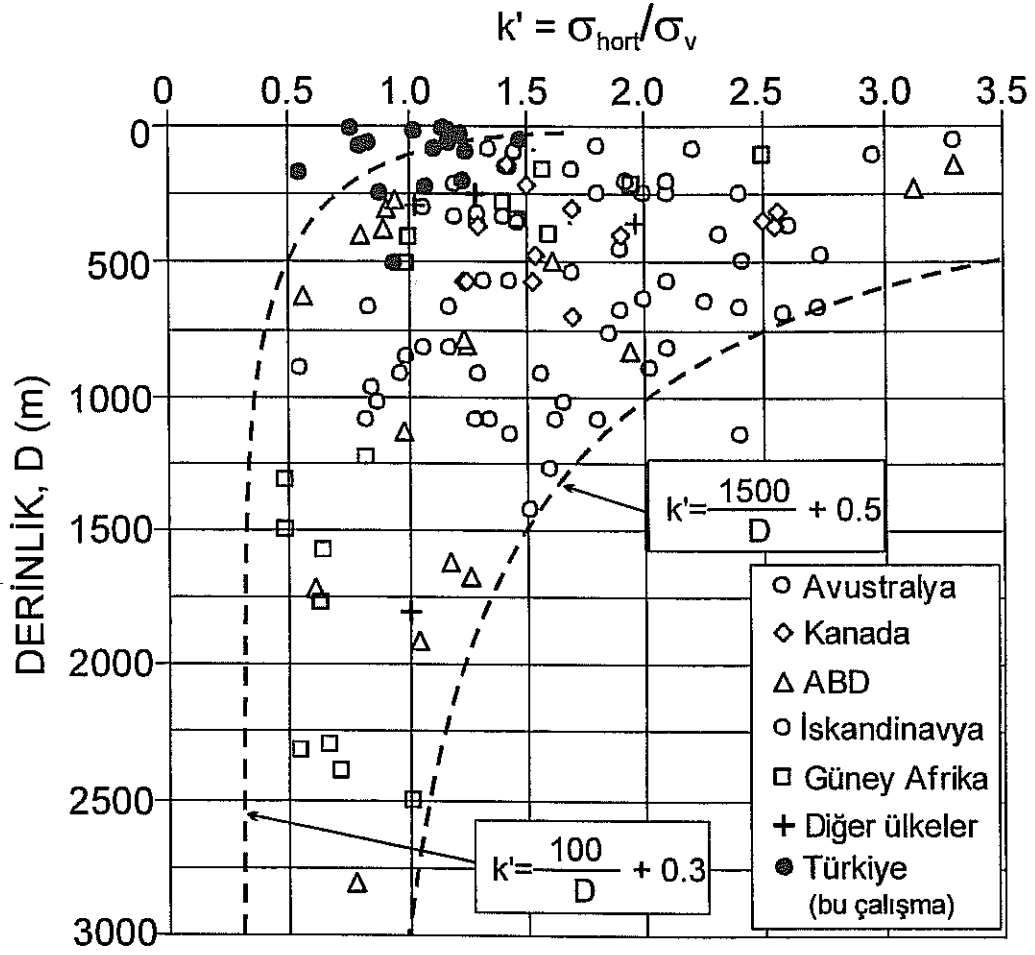
Adı geçen araştırmacılar tarafından değişik yönlerde alınan karotlar için belirlenen KE seviyeleri kullanılarak ve gerilme dönüşüm ilişkilerinden yararlanılarak örneklerin alındığı lokasyonlar için asal gerilmeler belirlenmiştir. Aynı yerler için arazide yapılmış deneyler mevcut olmadığından, dünyanın farklı bölgelerinde gerçekleştirilen arazide gerilme tayin deneylerinden elde edilen düşey ve yatay gerilmelerle (Brown ve Hoek, 1978 - Hoek ve Brown, 1980'den) karşılaştırma yapılmıştır (Tuncay vd., 2002). Bu verilerle birlikte bu çalışmada AE yönteminden elde edilen sonuçlar kullanılarak hazırlanmış ve düşey gerilmenin derinlikle değişimini gösteren grafik Şekil 3.12'de verilmiştir. Bu grafikte, AE'den elde edilen düşey gerilmelerin Brown ve Hoek (1978 - Hoek ve Brown, 1980'den) tarafından derlenen verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca, ortalama yatay gerilmenin ( $\sigma_{\text{hort}}$ ) düşey gerilmeye ( $\sigma_v$ ) oranı olan "k" katsayısının derinliğe bağlı değişimi Şekil 3.13'te verilmiştir. Bu grafikten de görüleceği gibi, veriler oldukça geniş bir aralıkta dağılım göstermektedir. Brown ve Hoek (1978 - Hoek ve Brown, 1980'den) bu verileri derlerken, topoğrafyanın fazla değişim göstermediği nisbeten düz bölgelerde yapılmış arazi deneylerinin sonuçlarını seçmişler ve topoğrafyanın oldukça değişken olduğu bölgelerde verilerin daha da değişken olabileceğini belirtmişlerdir. AE deneyinden Türkiye'deki yerler için belirlenen "k" katsayılarının bu grafikteki verilerin alt sınırına yakın konumda bulunduğu ve bazılarının önerilen sınırların dışında kaldığı görülmektedir. Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılmış yerinde deney sonuçları, herhangi bir elemeye tabi tutulmaksızın, ayrıca Aydan ve Paşamehmetoğlu (1994) tarafından da derlenmiş ve yorumlanmıştır. Adı geçen araştırmacılar, "k" katsayısının derinlikle değişimini gösteren grafiği kendi derledikleri verilerle yeniden değerlendirmişler ve Brown ve Hoek (1978 - Hoek ve Brown, 1980'den) tarafından önerilen alt ve üst sınırlar için farklı eşitlikler sunmuşlardır. Aydan ve Paşamehmetoğlu (1994), "k" katsayısı için alt sınır olarak aşağıda verilen ve Terzaghi ve Richart (1952) tarafından elde edilmiş eşitliği önermişlerdir

$$k' = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (\text{Eş 3.12})$$

Yukarıdaki eşitlik ve kayaların Poisson oranı ( $\nu$ ) değerlerinin genelde 0.25 olduğu gözönünde bulundurulduğunda, "k" için alt sınır 0.33 değerine karşılık gelen düşey



Şekil 3.12: Brown ve Hoek (1978 - Hoek ve Brown (1980)'dan) tarafından derlenmiş dünyanın çeşitli yerlerindeki düşey gerilmeler ile bu çalışmada AE'den belirlenen düşey gerilmelerin derinlikle değişimi.



Şekil 3.13: Brown ve Hoek (1978 - Hoek ve Brown (1980)'dan) tarafından hazırlanmış olan ortalama yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranının derinlikle değişimini gösteren grafik ve bu çalışmada elde edilen sonuçların grafikteki dağılımı.

bir çizgi olmaktadır. Bu durumda, Türkiye'deki çeşitli yerler için AE'den belirlenen gerilmelerin önerilen sınırlar içinde kaldığı görülmektedir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, bazı dolaylı yöntemlerden yararlanılarak belirlenen gerilmelere ilişkin sonuçlarla birlikte değerlendirilmiş, ancak bu çalışmalardan (Aydan vd., 2002; Ulusay vd., 2003) AE yönteminin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılabilirliğine ilişkin kesin olarak kabul edilebilecek sonuçlara gidilmesi mümkün olamamıştır.

### 3.2. Genel Değerlendirme

AE tekniğiyle gerilmelerin belirlenmesi, özellikle 1990'dan sonra üzerinde durulan bir konu olmuş ve gerek laboratuvarında önyükleme, gerekse araziden alınan yönlü örneklerde AE deneyleri yapılarak bazı sonuçlar elde edilmiştir. Bölüm 3.1'de sunulan çalışmalara ilişkin genel değerlendirmeler ve bunlara bağlı olarak araştırmanın kapsamını oluşturan çalışmalar ana hatlarıyla aşağıda verilmiştir.

Laboratuvarında tek eksenli önyükleme ve arkasından tek eksenli yüklemeye koşulunda AE deneylerinin yapıldığı önceki çalışmalar gözönünde bulundurularak aşağıda verilen çıkarımlara gidilmiştir.

- (1) KE seviyesinin belirlenebildiği bekletme süreleriyle ilgili elde edilen sonuçlarda farklılık bulunmakla birlikte, bu sürenin sağlam kayalara nazaran yumuşak kayalarda daha kısa olduğu, önyüklemelerin örnek üzerindeki etki süresi arttıkça daha uzun olduğu genel olarak varılabilecek sonuçlardan biridir.
- (2) Örnekler önyükleme etkisinde çok az kalsalar dahi, önyükleme boşaltılıp hemen sonrasında yapılan AE deneylerinde bu seviyelerin KE seviyesi olarak belirlenebildiği diğer bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, farklı kaya örneklerinin farklı deformasyon aşamalarına karşılık gelen öngerilmelere maruz bırakılıp, hemen sonraki yüklemelerde belirlenen KE seviyelerinin kaya türüne bağlı olarak hangi hassasiyette öngerilmeleri ifade ettiği araştırılmalıdır. Böyle bir çalışmanın arkasından, farklı kaya örnekleri farklı deformasyon aşamalarına karşılık gelen öngerilmelere maruz bırakılıp, bu örnekler belirli süreler bekletildikten sonra



AE deneyleri yapılarak elde edilen KE seviyeleri üzerinde, kaya türlerine bağlı olarak, bekletme süreleri araştırılmalıdır. Ancak KE seviyelerinin belirlenebildiği bekletme süreleri, önyüklemelerin örnekler üzerinde tutulduğu süreye göre kayadan kayaya farklılık gösterebileceğinden, ortak bir önyükleme şekli belirlenmelidir.

Laboratuvarda üç eksenli önyükleme ve arkasından tek eksenli yükleme koşulunda AE deneylerinin yapıldığı önceki çalışmalar gözönünde bulundurularak varılan sonuçlar ise aşağıda sunulmuştur.

- (1) Özellikle laboratuvarda yapılan bazı çalışmalarda, kaya örneklerine benzer üç eksenli önyükleme şekilleri uygulanmasına karşın, bu örneklerde tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen KE seviyelerinin ifade ettiği gerilmeler yönünde birbirlerinden oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu farklılığın nedenini anlamak güç olmakla birlikte, farklı ve sınırlı sayıda kaya örneklerinin kullanılmış olması, örneklerin üç eksenli önyüklemelere ne kadarlık bir süre boyunca maruz bırakıldığı, tek eksenli koşulda AE deneylerinin hemen önyüklemeden sonra yapılıp yapılmadığı akla ilk gelen sorular olarak dikkati çekmektedir.
- (2) Üç eksenli önyüklemelerde gerilmelerin örnek üzerinde ayrı ayrı, yani önce yanal gerilme sonra eksenel veya küp örneklerde üç ayrı yönde ayrı ayrı öngerilmelerin uygulanıp ve daha sonra tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapıldığı çalışmalarda ise, belirlenen KE seviyelerinin AE deneyinin yapıldığı yöndeki öngerilmeye karşılık geldiği yönünde sonuçlara ulaşılmıştır.

AE ve diğer gerilme ölçüm yöntemleriyle belirlenmiş gerilme değerlerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda elde edilen gerilme değerlerinin genellikle benzerlik sunduğu ve aralarındaki farklılığın, literatürde kabul gören arazi deneylerinin kendi aralarında yapılan karşılaştırmalardaki farklılıktan daha büyük olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte, henüz AE deneyi ile diğer yöntemlerin karşılaştırıldığı çalışmaların az olması ve laboratuvarda elde edilen sonuçların farklılığı nedeniyle, yöntemin kullanımı ile ilgili kabul görmüş genel bir görüş söz konusu değildir.

Türkiye'nin belirli yerlerinden alınan yönlü kaya örnekleri için AE tekniğinden yararlanılarak ve Kanagawa (1976 – Hayashi vd., 1979'dan) tarafından önerildiği şekliyle arazi gerilmelerinin belirlendiği çalışmalarda ise, elde edilen sonuçlar kabul görmüş bir yöntemden elde edilenlerle karşılaştırılamamıştır. Bunun yerine, literatürden derlenen gerilme değerlerine göre Brown ve Hoek (1978 - Hoek ve Brown, 1980'den) tarafından hazırlanmış grafikler kullanılarak değerlendirme yapılmış ve elde edilen sonuçlarla bu grafikler arasında belirli oranlarda benzerlik olduğu görülmüştür. Ancak, bu çalışmaların tam anlamıyla planlandığı gibi ve karşılaştırmaların arazide gerilme ölçüm yöntemleriyle yapılamaması nedeniyle, genel anlamda kabul görebilecek bir sonuca ulaşılamamıştır.

Yukarıda belirtilen saptamalar dikkate alınarak, kaya türünün, AE deneylerinin yapıldığı örnekler üzerinde gerçekleştirilen önyükleme seviyelerinin, kullanılan kaya türlerinin dayanımının, bazı fiziksel özelliklerinin vb. gibi faktörlerin önceki çalışmalarda farklı sonuçların elde edilmesinde etkili olabileceği dikkate alınmış ve proje kapsamında aşağıda belirtilen çalışmaların yapılması öngörülmüştür.

- (1) Üç eksenli önyüklemeler ve daha sonra tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapıldığı önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlardaki farklılığa ve dolayısıyla tartışmalara, bir ölçüde de olsa, açıklık getirilmesi amacıyla, yanal gerilmenin KE üzerinde etkisinin olup olmadığının araştırılması. Bu amaçla, farklı türde derlenen kaya örneklerinin laboratuvarında üç eksenli önyüklemeye maruz bırakılması ve arkasından tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapılması. Bu çalışmalarda, AE deneylerinin önyüklemelerden hemen sonra yapılarak KE üzerinde bekletme süresinden kaynaklanabilecek etkiye izin verilmemesi.
- (2) Önyüklemeye ve AE deneylerine maruz bırakılacak kaya örneklerinin bazı jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi ve öngerilme seviyelerinin seçilmesinde yararlanmak üzere deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının belirlenmesi.
- (3) Üç eksenli önyükleme yapılan örneklerde tek eksenli koşulda AE deneylerine başlamadan, öncelikle tüm örneklerde yanal gerilme etkisi olmaksızın, tekrarlı tek eksenli yüklemelerin yapılması ve belirlenecek KE

seviyelerinin bir önceki en büyük gerilmelerden olan sapmalarının belirlenmesi. Bu çalışmalarda, AE deneylerinin önyüklemelerden hemen sonra yapılarak KE üzerinde bekletme süresinden kaynaklanabilecek etkiye izin verilmemesi. (Bu deneyler sonucunda, farklı gerilme seviyelerinde tek eksenli önyüklemelere maruz bırakılmış farklı türdeki örneklerden belirlenen KE seviyelerinin farklılık gösterip göstermediği açısından değerlendirme yapabilme olanağı elde edilebilecektir. Ayrıca bu deneyler, her bir kaya grubu için, üç eksenli önyükleme yapılmış örneklere ait AE deneylerinden elde edilen "AE Aktivitesi – Zaman – Gerilme" grafikleriyle tekrarlı tek eksenli yüklemelerden elde edilen grafiklerin karşılaştırılması açısından da önem taşımaktadır).

- (4) Elde edilen sonuçların önceki çalışmalardan elde edilenlerle karşılaştırılması ve genel bir değerlendirme yapılması.

Ayrıca, laboratuvarında önyüklemelerin yapıldığı bu çalışmaların yanı sıra, Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'nün Karot Bankası'ndan değişik zamanlarda alınmış (bekletilmiş) sondaj karot örneklerinde tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapılarak elde edilen KE seviyelerinin örtü gerilmeleriyle karşılaştırılarak değerlendirmeye gidilmesi de öngörülmüştür.

#### 4. ARAŞTIRMADA KULLANILAN AE DENEY DÜZENEGİ

Nihon Üniversitesi'nde daha önceki yıllarda kullanılan ve farklı bir firmanın ürettiği taşınabilir parametrik AE deney sistemi, bir tez kapsamında kullanılmak üzere Prof. Dr. Hisataka Tano tarafından bağışlanmış ve sisteme ilişkin bazı eksiklikler giderilerek çalışır hale getirilmiştir (Şekil 4.1). Bu sistemin yanı sıra, deneylerde ayrıca, belirlenen AE aktivitesine eş zamanlı olarak yük aşamalarının da sürekli okunması için bir yük hücresi (load cell) ve gerek bu yük hücresinden, gerekse birim deformasyon deneylerindeki okumaların sürekli olarak ve doğrudan bilgisayara aktarılabilmesi için veri transferi ünitesi gerekli olmuştur. Bu gereçler ise, TÜBİTAK tarafından desteklenen bu araştırma projesi kapsamında karşılanmış ve 50 kN kapasiteli bir yük hücresi ile 120 ve 350 ohm dirençlik birim deformasyon ölçer ve yük hücrelerinden veri aktarımı için gerekli modülleri içeren bir veri transferi ünitesi (Şekil 4.2) kurularak çalışır hale getirilmiştir.

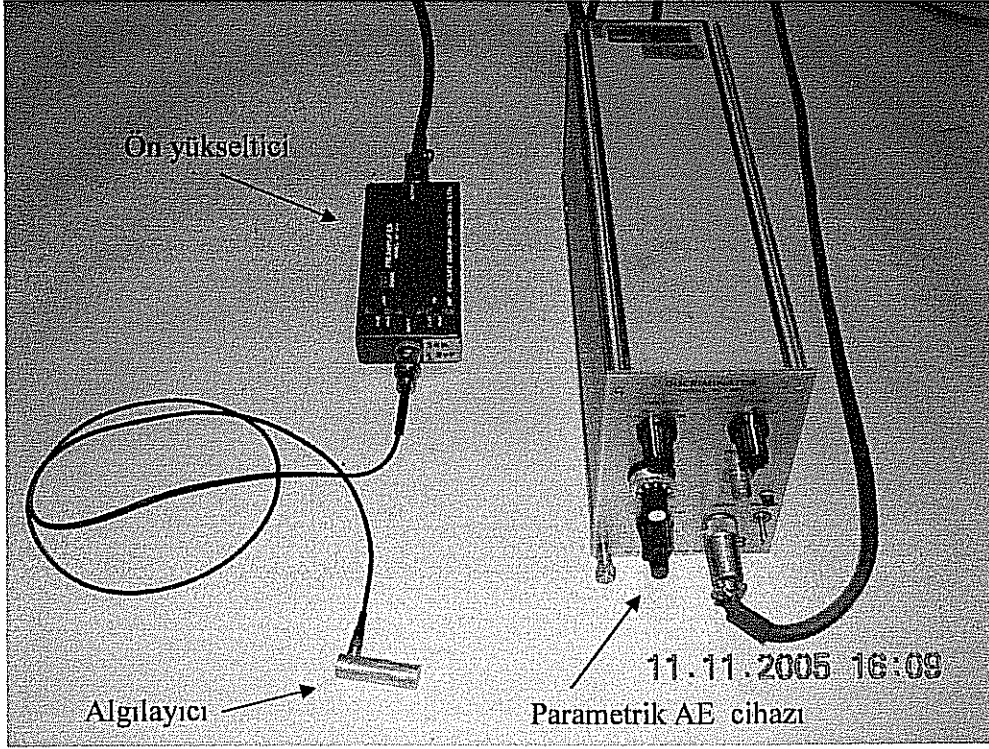
Parametrik AE deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.3'te verilmiştir. Sistemde 150 kHz hakim frekans hassasiyetinde piezoelektrik malzeme içeren bir algılayıcı (10 – 400 kHz aralığındaki dalgaları da yaklaşık 40dB daha az bir hassasiyette algılayabilir nitelikte), 20 ve 40 dB yükseltme özelliğine sahip bir önyükseltici (preamplifier) ve ana ünite bulunmaktadır. Ana ünite 10 – 40 dB aralığında yükseltme kapasitesine sahip bir art yükseltici (postamplifier), yüksek ve alçak geçiren filtreler (sırasıyla 100, 300 kHz ve 300, 1000 kHz ve ayrıca devre dışı bırakma seçimi mevcut) ile eşik sinyal belirleme ünitesi mevcuttur. Algılayıcı aracılığıyla belirlenen AE sinyali, önyükselticiden geçtikten sonra ana üniteye ulaşmakta ve burada kullanıcı tarafından sistem özelliklerine bağlı olarak işleme tabi tutulduktan sonra pulse olarak sayıcıya, analog haliyle de osiloskoba iletilmektedir. Tüm sistem, deneylerde kullanıldığı şekliyle Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan tüm AE deneylerinde, deneme niteliğindeki deneyler ve gürültü durumu dikkate alınarak, sistem aşağıda verilen özelliklerde tutulmuştur.

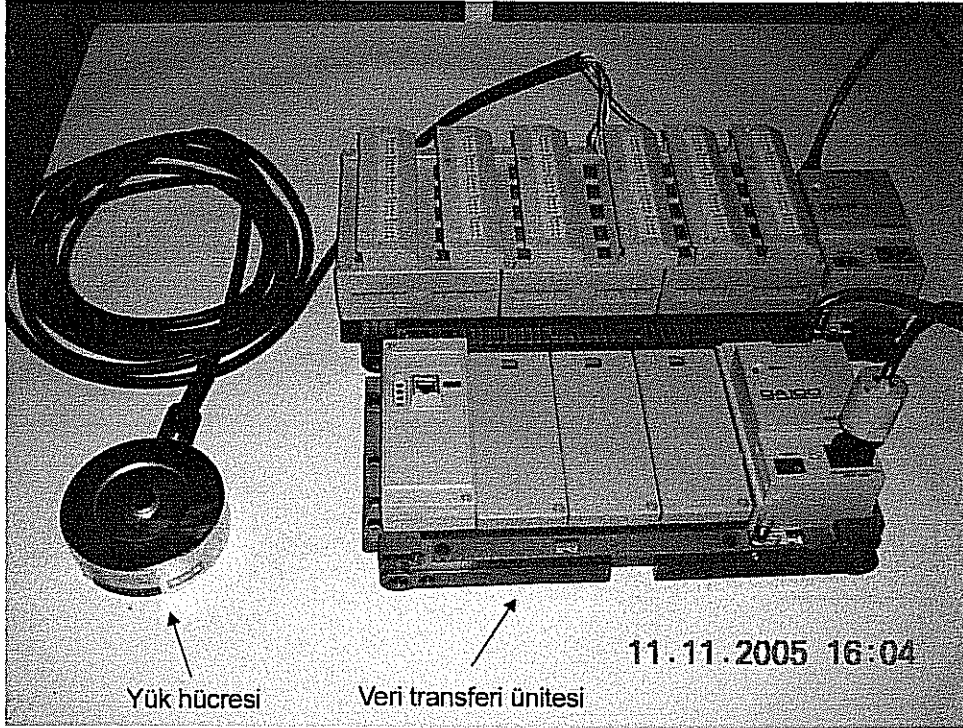
Ön yükseltici: 40 dB

Art yükseltici: 40 dB

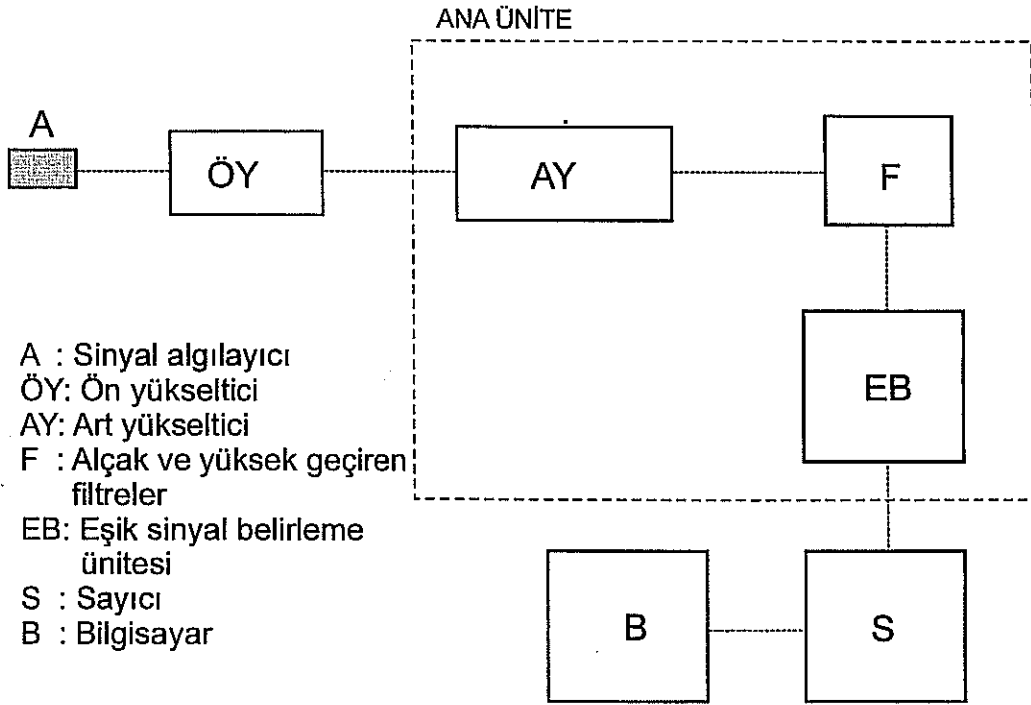
Yüksek geçiren filtre: 100 kHz



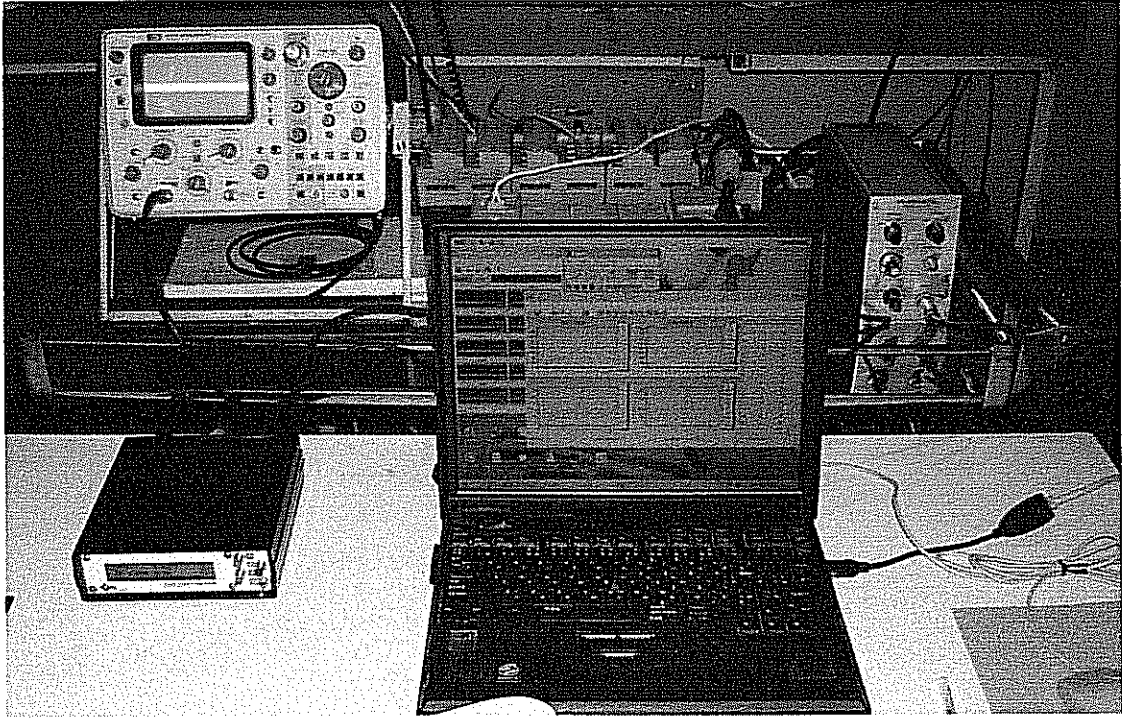
Şekil 4.1: Çalışma kapsamında kullanılan parametrik AE aleti, önyükseltici ve algılayıcıdan bir görünüm.



Şekil 4.2: TÜBİTAK'ın verdiği destekle temin edilen yük hücresi ve veri transferi ünitesi.



Şekil 4.3: AE sisteminin şematik gösterimi.



Şekil 4.4: AE deneylerinin uygulandığı tüm sistemden bir görünüm.



Alçak geçiren filtre: 1 MHz

Eşik sinyal belirleme seviyesi: 96-102 mvolt

Sayıcı zaman dilimi: 125 msn

Bilgisayarda görüntülenme zamanı: 1- 2 sn

Bu özellikler, literatürde laboratuvarında KE seviyesinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalardaki özelliklerle oldukça benzer olup, kullanılan algılayıcının hakim frekans özelliği de bu amaçlar için yapılan çalışmalarda kullanılan türdendir.

## 5. ÖRNEKLEME ÇALIŞMALARI

Bölüm 3'te değinildiği gibi, laboratuvarda önyükleme yapılan örneklerdeki AE deneylerinden elde edilen KE seviyelerinin değerlendirilmesi için kaya türünün, AE deneylerinin yapıldığı örnekler üzerinde gerçekleştirilen ön yükleme seviyelerinin, kullanılan kaya türlerinin dayanımının, bazı fiziksel özelliklerinin vb. gibi faktörlerin dikkate alınarak araştırmanın daha ayrıntılı olarak yapılması gerektiği öngörülmüştür. Bu nedenle, çalışma kapsamında laboratuvarda önyükleme ve AE deneylerini içeren çalışmalarda kullanılmak üzere, Orta Anadolu'daki değişik illerden (Eskişehir, Ankara, Nevşehir) farklı kaya örneklerine ait blok örnekler alınmıştır. Bu örneklerin yanı sıra, aynı amaçlar için kullanılmak üzere laboratuvarda harç örneği de hazırlanmıştır. Ayrıca, MTA Genel Müdürlüğü'nün karot arşivinden 6 ila 44 yıl önce yapılmış sondajlardan elde edilen farklı kaya türlerine ait karot örnekleri de temin edilmiştir.

### 5.1. Kaya Bloklarının Derlenmesi

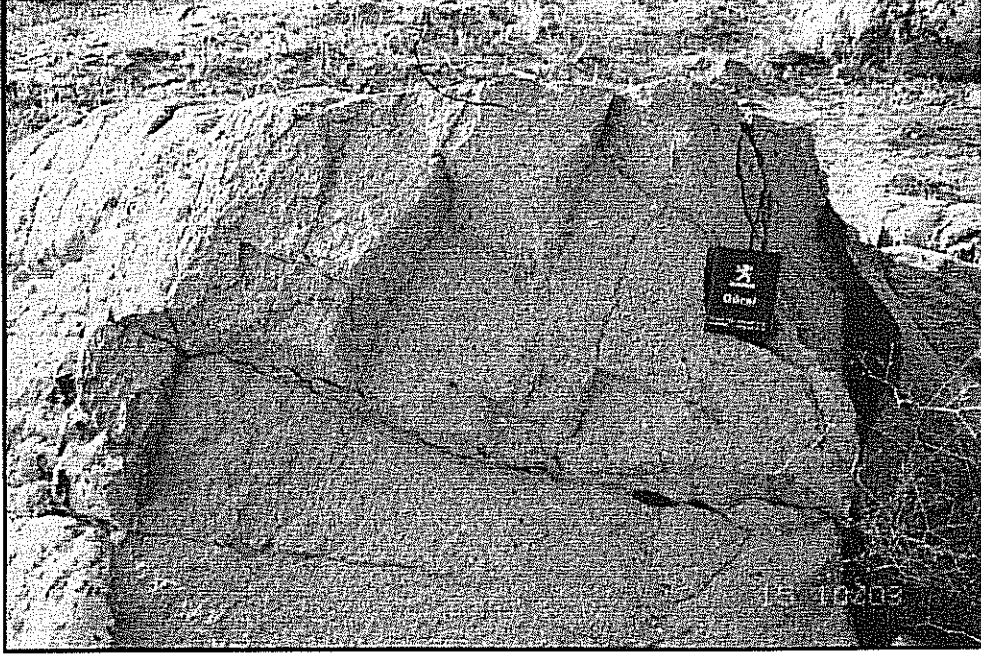
Laboratuvarda planlanan AE çalışmalarının gerçekleştirilmesi amacıyla Ankara çevresinde Sariaslan vd. (1998) ve MTA (2003), Eskişehir çevresinde Ayday vd. (2001), Nevşehir çevresinde ise Temel vd. (1998) tarafından hazırlanan jeoloji haritaları esas alınarak, örnekleme yerlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Saha çalışmaları sırasında; örneklenecek kaya bloklarının yeterli büyüklükte ve mümkün olduğunca prizmatik şekilli ve aynı türdeki örneklerin renk, doku, sertlik vb. gibi nitel özelliklerinin farklı olmamasına özen gösterilmiştir. Bu çerçevede, toplam 21 yerden 12 farklı kaya türüne ait blok örnek alınmıştır (Çizelge 5.1). Şekil 5.1'de Eskişehir Gülpınar Köyü'nün yakın civarındaki Karaağaçlık mevkiinden andezit bloğu örneklerinin alındığı çıkma (mostra) görülmektedir.

Eskişehir civarından alınan örneklerin yerleri Şekil 5.2'de, Ankara'nın yakın civarından alınanlar Şekil 5.3'te, Haymana, Bala, Köprüköy ve Nevşehir civarından alınanlar ise Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Bu bölgelerden sert kayaların yanı sıra, nispeten yumuşak ve sünümlü davranış gösterebilecek (kıltaşı, marn gibi) daha fazla

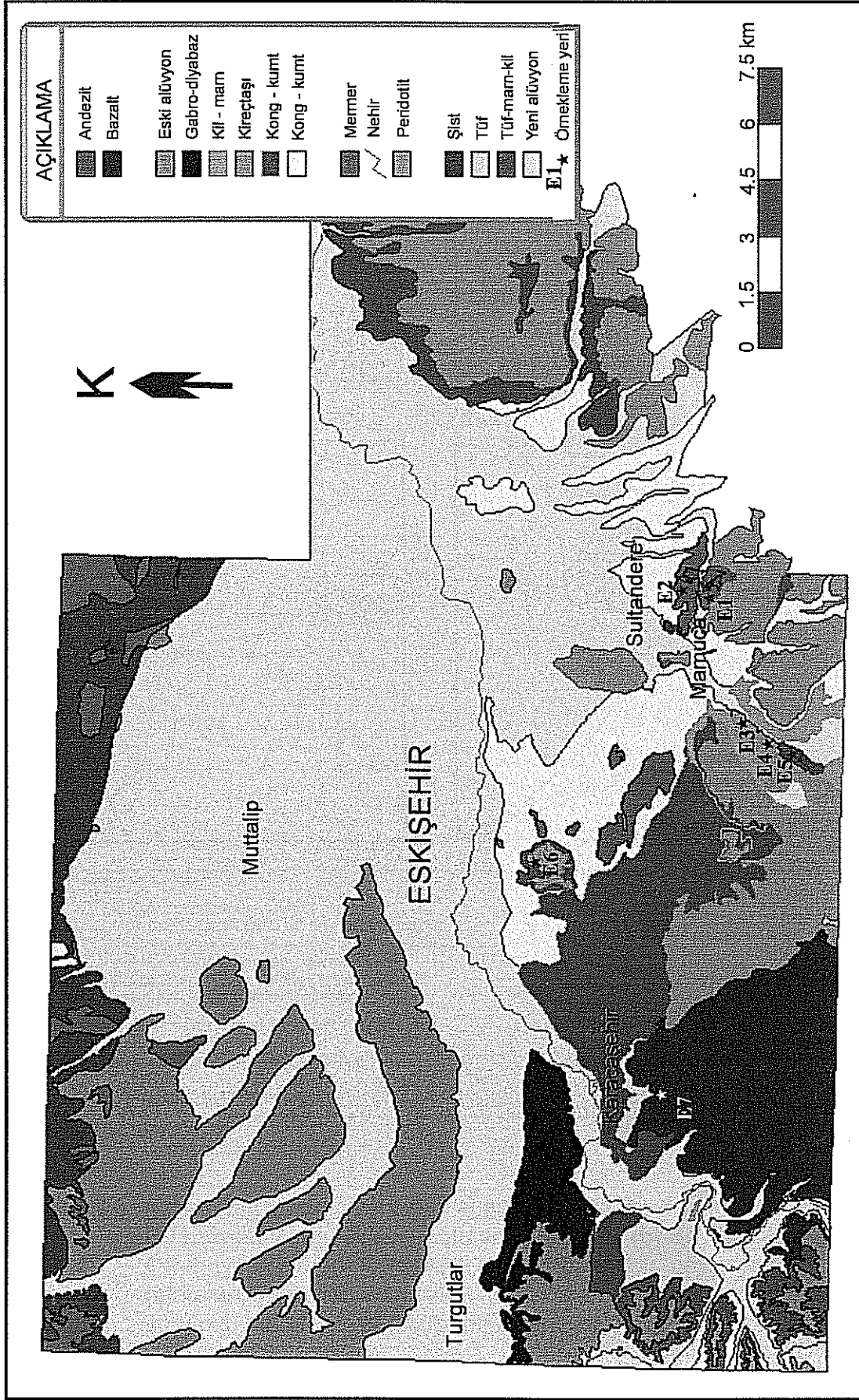
Çizelge 5.1: Derlenen kaya türleri, bunlara ilişkin tanımlamalar ve örnekleme yerleri.

Örnek No.	Kaya türü	Tanımlama	Yaş	Alındığı Yer
A1	Kireçtaşı	Pelajik, sarımsı bej – mat	<sup>2</sup> Jura	<b>Ankara</b> Koru sitesi Migros karşıtı Bağlıca köyü yol ayrımı
A2	Kireçtaşı	Rekristalize, gri	<sup>2</sup> Triyas	Beytepe köyü
A3	Kumtaşı	İnce taneli, gri, yüzeyi bozunmadan dolayı toprak rengi kahve tonlarında	<sup>2</sup> Eosen	Orhaniye köyü kuzeyi, Sarıbeyler formasyonu
A4	Kumtaşı	İri taneli, yeşilimsi gri	<sup>2</sup> Eosen	Orhaniye köyü kuzeyi, Sarıbeyler formasyonu
A5	Karbonatlı Kilitaşı	Beyaz	<sup>2</sup> Eosen	Orhaniye köyü kuzeyi, Sarıbeyler formasyonu
A6	Kumlu kilitaşı / killi kumtaşı	Kırmızı	<sup>2</sup> Geç Kretase	Orhaniye köyü kuzeyi, Çamurtaşı birimi içinden
A7	Andezit	Mor	<sup>2</sup> Geç Senoniyen	Karşıyaka mezarlığı yanı
A8	Marn	Yeşil	<sup>3</sup> Üst Miyosen	Haymana kuzeyi
A9	Anhidrit	Saydam-beyaz	<sup>3</sup> Geç Kretase	Ankara-Bala yolu üzeri (ocak)
A10	Granodiyorit	Gri, orta derecede bozunmuş	<sup>3</sup> Geç Kretase	Köprüköy
				<b>Eskişehir</b>
E1	Mermer	Mat bej	<sup>1</sup> Triyas	Sultandere güneyi
E2	Mermer	Parlak, kristalize	<sup>1</sup> Triyas	Sultandere güneyi
E3	Gabro	Yer yer serpantinize olmuş	<sup>1</sup> Triyas	Gülpınar köyünün GB'sı Karaağaçlık Mevkii
E4	Peridotit	Koyu yeşil	<sup>1</sup> Triyas	Gülpınar köyünün GB'sı Karaağaçlık Mevkii
E5	Andezit	Az çatlaklı, taze veya az bozunmuş, gri	<sup>1</sup> Miyosen	Gülpınar köyünün GB'sı Karaağaçlık Mevkii
E6	Kireçtaşı	Bej, kristalize, boşluklu	<sup>1</sup> Miyosen	Kayapınar Mahallesi, Tepeliler Sok., Huzurevi kuzeyi
E7	Bazalt	Koyu yeşilimsi – bordo/siyah,	<sup>1</sup> Pliyosen	Karacaahmet mevkii
				<b>Nevşehir</b>
N1	Tüf	Açık sarı, masif	<sup>4</sup> Miyosen	Kayakapı Mahallesi, Ürgüp
N2	Tüf	Bej – beyaz, pekişmiş pomzadan oluşmuş	<sup>4</sup> Miyosen	Kayakapı Mahallesi, Ürgüp
N3	Tüf	Pembe	<sup>4</sup> Miyosen	Avanos
N4	Tüf	Sarı	<sup>4</sup> Miyosen	Avanos

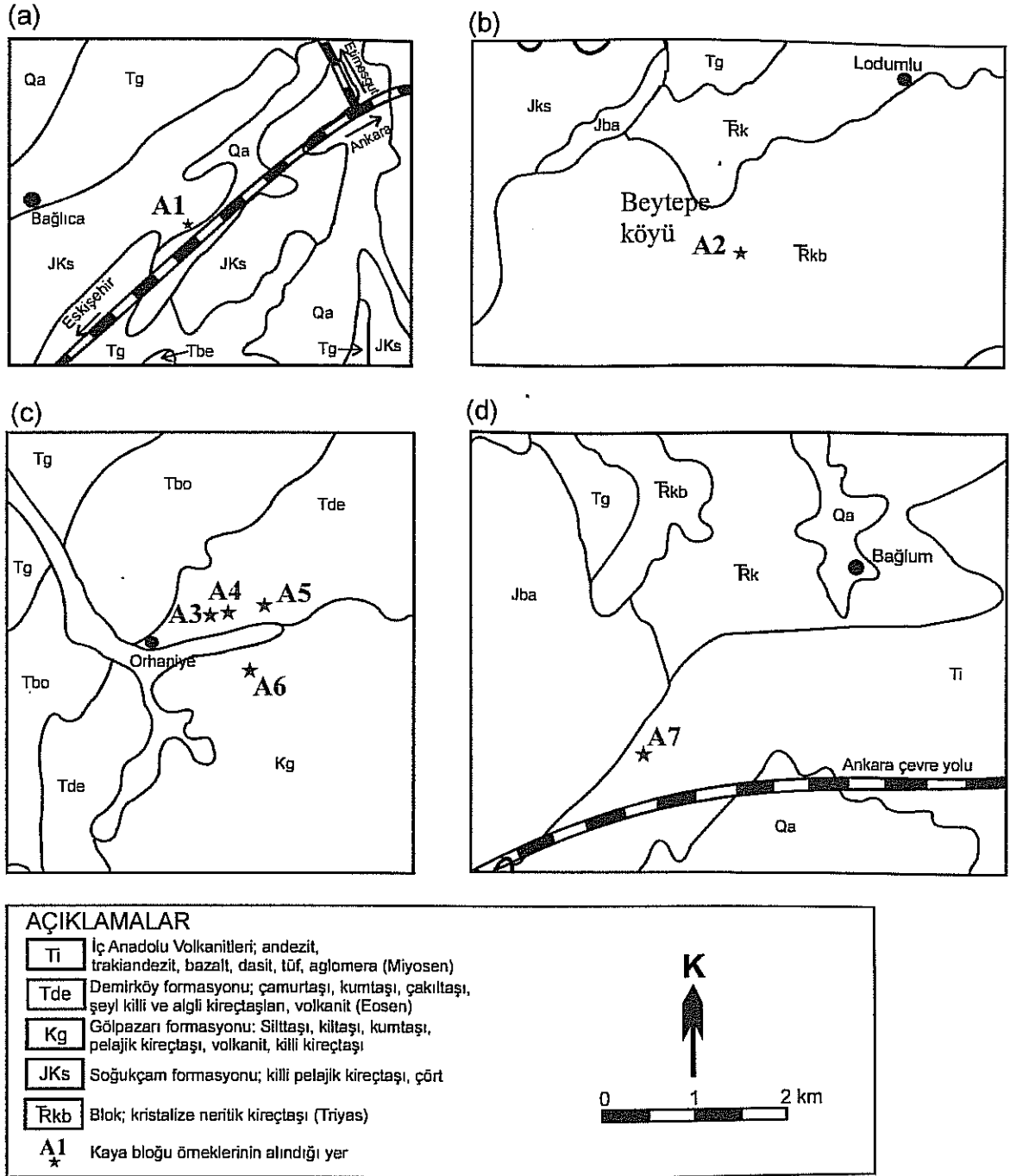
<sup>1</sup> Ayday vd. (2001)'den, <sup>2</sup> Sarıalan vd. (1998)'den, <sup>3</sup> MTA (2003)'ten <sup>4</sup> Temel vd. (1998)'den



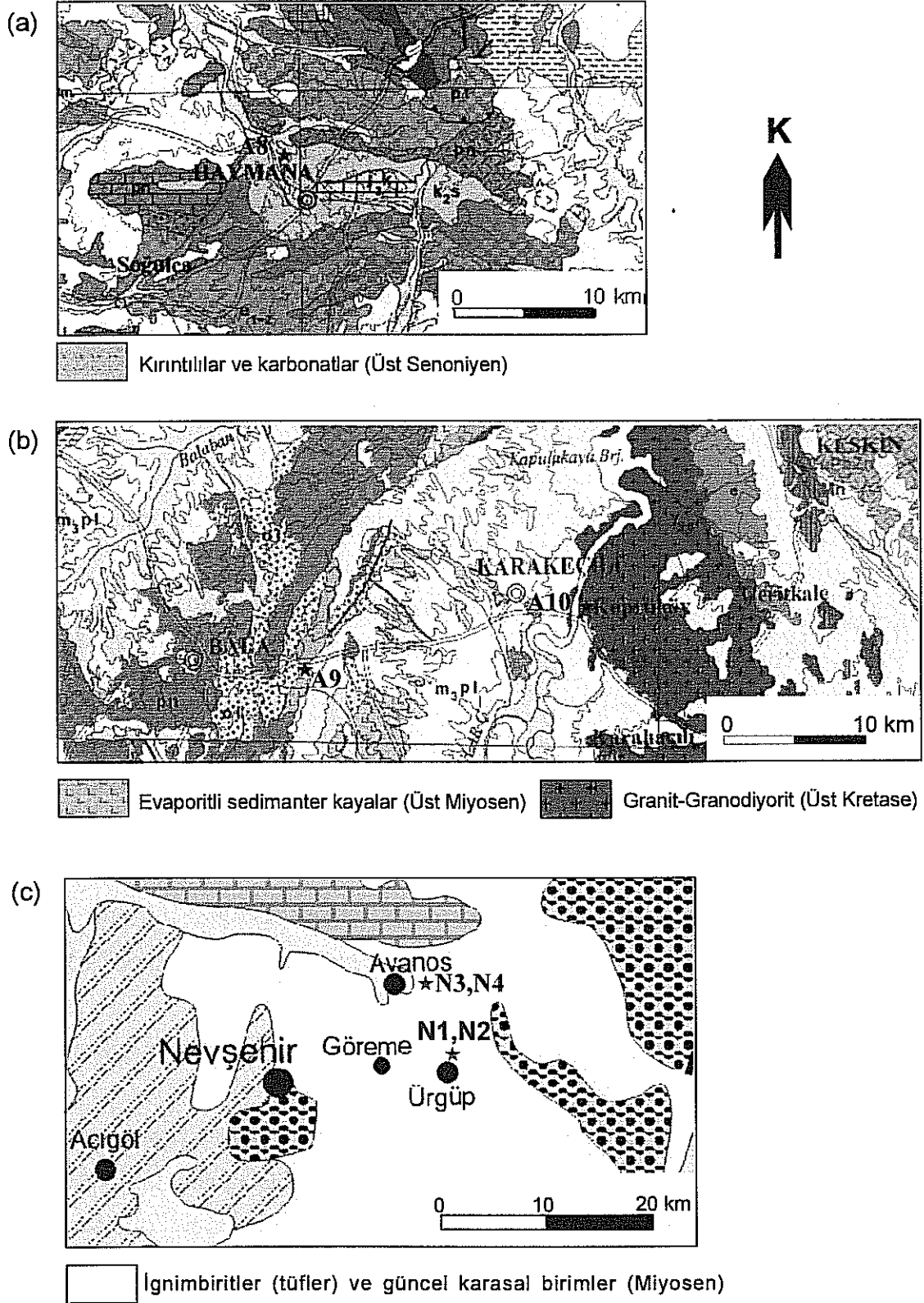
Şekil 5.1: Eskişehir iline bağlı Gölpinar köyünün güneybatısındaki Karaağaçlık Mevkii'nde yüzeylenen ve örnek alınan andezit çıkması.



Şekil 5.2: Eskişehir civarından alınan kaya bloğu örneklerinin yerleri (jeoloji haritası Ayday vd. (2001)'nden alınmıştır)



Şekil 5.3: Ankara'nın yakın civarından alınan kaya bloğu örneklerinin yerleri: (a) Eskişehir yolu, Mesa-Koru sitesi karşısı, (b) Beytepe köyü, (c) Orhaniye ilçesi, (d) Karşıyaka mezarlığı arkası, çevre yolu (jeoloji haritaları Sarıaşlan vd. (1998)'nden alınmış olup, sadece örnekleme yapıldığı birimlerin açıklamaları verilmiştir).



Şekil 5.4: (a) Haymana, (b) Bala ve Köprüköy ile (c) Nevşehir civarından alınan kaya bloğu örneklerinin yerleri (jeoloji haritaları, MTA (2003) ve Temel vd. (1998)'dan alınmıştır).

örneğin alınması planlanmış olmasına rağmen, çoğunda bozunmanın ileri derecede olması nedeniyle, bu tür birimlerden örnekleme mümkün olamamıştır.

## **5.2. Harç Örneğinin Hazırlanması**

Derlenen kaya örneklerine oranla daha önce herhangi bir etkiye maruz kalmamış, bileşimi ve oranları kesin olarak bilinen bir malzemenin oluşturulması ve planlanan çalışmaların öncelikle bu tür bir malzemede yapılarak elde edilen sonuçların kaya örneklerinde uygulanacak deney programının hazırlanmasında yol gösterici olması düşünülmüştür. Bu nedenle, olabildiğince homojen olması amacıyla kum boyutunda taneleri içeren bir harç bloğunun hazırlanması öngörülmüştür. Ağırlıkça karışım oranlarının belirlenmesinde, ASTM C1260-94 (ASTM, 1994)'te verilen harç hazırlama standartları gözönünde bulundurulmuş ve önerilen agrega, çimento ve su oranlarında malzeme kullanılarak blok örnek hazırlanmıştır (Şekil 5.5). Harç örneklerinde prizlenme süresi 29 gün olarak bilinmektedir. Bu süre, harcın önemli derecede prizlendiği ve dayanımını büyük ölçüde kazandığı gün sayısına karşılık gelmekle birlikte, sonraki günlerde de prizlenme devam etmekte ve örneğin dayanımı bir miktar daha artmaktadır. Bu nedenle, hazırlanan bloklardan karot alınması için 49 gün beklenmiştir. Bir haftaya yakın bir süre de bu örnekler üzerinde deneylere başlanması için geçmiştir. Bu nedenle, yapılan tüm deneylerde, kullanılan örneklerin birbirine çok yakın özelliklerde olduğunu söylemek mümkündür.

## **5.3. Sondaj Karotlarından Örnekleme Yapılması**

KE seviyesinin belirlenmesinde bekletme süresinin etkisi olduğuna önceki çalışmaların tartışıldığı Bölüm 3.1'de değinilmişti. Bölüm 3.2'de ise, laboratuvarda önyüklemelerle yapılacak bu tür çalışmalarda farklı kaya örneklerinin farklı deformasyon aşamaları için önerilmelere maruz bırakılması ve önerilmeler boşaltıldıktan belirli süreler sonra tekrar yüklemelerde belirlenen KE seviyelerinin kaya türüne bağlı olarak hangi hassasiyette önerilmeleri ifade ettiğinin araştırılması gerektiği vurgulanmıştır. Ancak, bu tür bir çalışma için kaya türü sayısının da artması

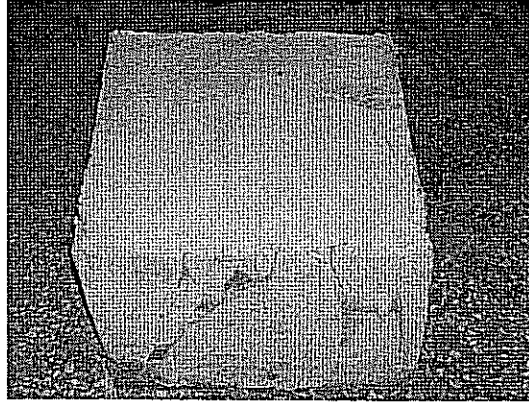


ile farklı sürelerde bekletilmiş çok sayıda örneğe, dolayısıyla AE deneyine gereksinim duyulacaktır. Bu nedenle, planlanan diğer çalışmaların yanı sıra, zaman faktörünün de işin içine girmesinden dolayı böyle bir çalışmanın proje kapsamında yapılmasına olanak bulunmamaktadır. Bunun yerine, geçmiş yıllarda yapılmış sondajlardan örnek alınması planlanmış ve bu örnekler üzerinde AE deneylerinin yapılması öngörülmüştür. Bu örneklerin alındıkları derinliklerin bilinmesi ve sondaj loglarının mevcut olması nedeniyle, etkisinde kaldıkları örtü gerilmelerinin kuramsal olarak hesaplanması ve AE deneylerinden belirlenecek KE seviyelerinin hesaplama sonuçlarıyla karşılaştırılması mümkün olabilecektir. Ancak, AE deneylerinin tek eksenli yükleme koşulunda yapılması halinde belirlenen KE seviyesinin deneyin yapıldığı yöndeki arazi gerilmesine karşılık geldiği varsayılarak, bu örneklerde belirlenen KE seviyelerinin örtü gerilmeleriyle karşılaştırılması mümkün olabilir. Aksi bir durumda böyle bir karşılaştırma yapılamaz ve dolayısıyla bekletme süresinin araştırılmasına olanak kalmaz. Bununla birlikte, önceki çalışmalarda kaya örneğine laboratuvarında uygulanan öngerilmenin etki süresi arttıkça bekletme süresinin de arttığı ve önyüklemeden 7 yıl sonra yapılan AE deneylerinde KE seviyesinin belirlenebildiği vurgulanmıştı. Sondajlardan alınan örneklerin de uzun süreler boyunca örtü gerilmesinin etkisinde kaldığı düşünülürse, bu sürenin daha uzun olabileceği dikkate alınabilir. AE deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla, 1962 yılından bu yana MTA tarafından maden arama ve rezerv amaçlı yapılmış 10 sondajın farklı derinliklerinden elde edilmiş karotlar ve şekilsiz örnekler MTA Karot Bankası'ndan alınarak laboratuvara nakledilmiştir (Şekil 5.6). Örnekleme yapıldığı dönemde, MTA karot arşivinde yürütülen düzenleme ve arşivleme çalışmaları nedeniyle daha yakın tarihli daha fazla sayıda sondajdan örnek alınamamıştır. Sağlanan karotlar, 43 yıldan 5 yıl öncesine kadar değişen bekleme sürelerine sahip olup, MTA tarafından yapılan sondajlarda yönlü karot alınmadığından dolayı, bu örneklerin alındığı yerler için sadece düşey gerilmelere ilişkin bir değerlendirme yapılabileceği öngörülmüştür. Bu sondajlara ait yalınlaştırılmış kuyu logları ve örnekleme yapılan derinlikler Şekil 5.7'de verilmiştir.

(a)

Agrega tane çapı (mm)	Toplam agregadaki oranı (%)	Karışımındaki toplam agreganın oranı (%)	Çimento oranı (%)	Su oranı (%)
2.36 – 1.18	30			
1.18 – 0.6	30	57.14	28.57	14.29
0.6 – 0.3	25			
0.3 – 0.15	15			

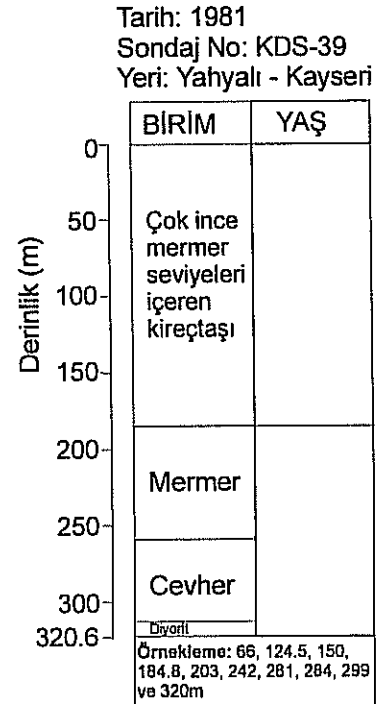
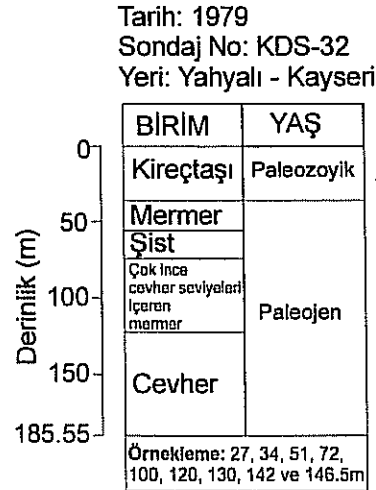
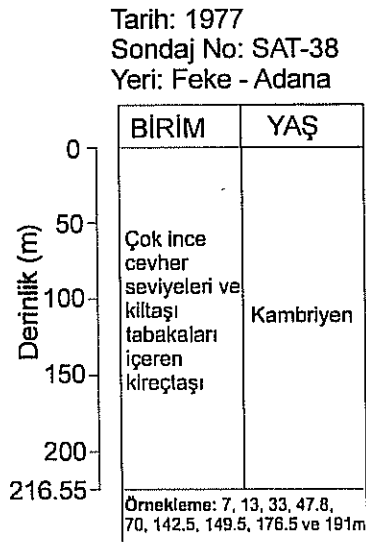
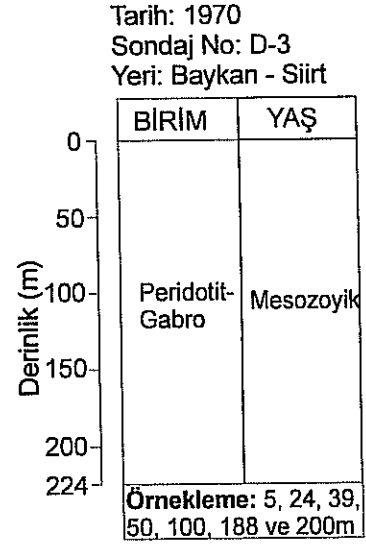
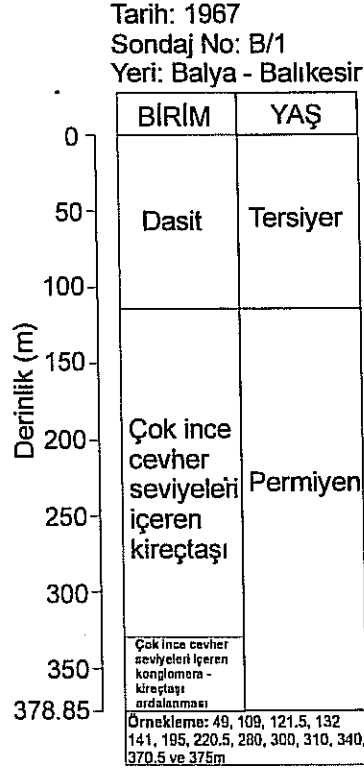
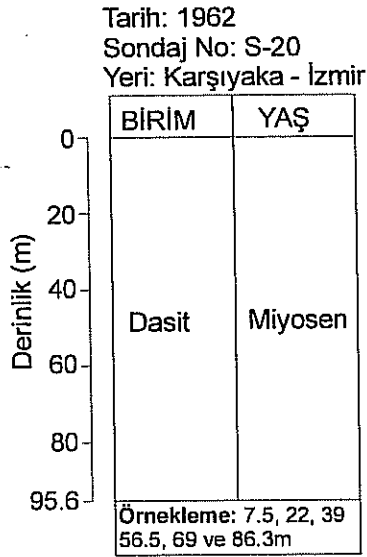
(b)



Şekil 5.5: (a) Harç bloğu hazırlanmasında kullanılan karışım oranları ve (b) oluşturulan harç bloğu.



Şekil 5.6: MTA karot arşivinde önceki yıllarda alınmış karotlarda örnekleme işlemi.



Şekil 5.7: MTA Karot Bankası'ndan alınan karotların elde edildiği sondajlara ait yalınlaştırılmış kuyu logları ve örnekleme derinlikleri.

Tarih: 1982  
Sondaj No: Ş-5  
Yeri: Ulukışla - Niğde

Derinlik (m)	BİRİM	YAŞ
0		
50	Porfir, pirit skarn, mermer	Senoniyen
100	Metamorfik kayalar	
150	Pirit, skarn mermer	
200	Bazik kaya, mermer, skarn, porfir	
250		
300		
350		
375.9		
Örnekleme: 8, 26, 31, 41, 62.5, 75, 100.5, 120.5, 130.5, 135, 142, 155, 169, 205, 210, 240, 255, 291, 305, 325, 329, 372.5 ve 345m		

Tarih: 1983  
Sondaj No: B-73  
Yeri: Kemaliye - Erzincan

Derinlik (m)	BİRİM	YAŞ
0		
50	Yamaç molozu	Kuvaterner
100		Eosen
150	Ultrabazik kaya	
200	İnce cevher seviyeli skarn, en alt seviyede ince diyarit	
250		
262		
Örnekleme: 50, 79/80, 145.5, 148, 182 ve 193m		

Tarih: 1990  
Sondaj No: 90/3  
Yeri: Gemerek - Sivas

Derinlik (m)	BİRİM	YAŞ
0	Alüvyon	Kuvaterner
50	Kiltaş	Orta Miyosen
100	Silttaş - kiltaş	
150	Kireçtaş bantlı kiltaş	
200	Linyit bantlı kil.	
250	Silttaş - kiltaş ardalanması	
300	Linyit ve linyit izli silttaş ve kiltaş	
350	Kumtaş - silttaş	
400		
450		
Örnekleme: 49, 60/70, 150/155, 188, 249, 280, 380 ve 430m		

Tarih: 2000  
Sondaj No: KPS - 3/B  
Yeri: Kırkpavli - Gümüşhane

Derinlik (m)	BİRİM	YAŞ
0		
50	Yamaç molozu	Kuvaterner
100		(Yaşı belirtilmemiş)
150	Piritli kireçtaş	
200	Masif pirit	
250	Piritli kireçtaş	
300	Çamurtaş	
350	Andezit	
400	Piritli çört ve piritli kireçtaş	
450	Piritli andezit	
500	Çamurtaş	
555		
Örnekleme: 20, 46, 65.5, 88, 108, 124, 147, 160, 194.1, 230, 234 ve 246.5m		

Şekil 5.7: (devamı).

## 6. JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİN TAYİNİ

Bölüm 1 ve 2'de de değinildiği gibi, AE deneylerinden elde edilen KE seviyesinin değerlendirilmesi amacıyla yapılan önceki çalışmaların bir kısmında sadece çalışılan kaya türü belirtilirken, bazılarında ise çalışılan sınırlı sayıdaki kaya türünün oldukça sınırlı sayıda fiziksel ve/veya mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ancak, kaya örneklerinin boşluklu olup olmadığı, dayanımlarının düşük veya yüksek olması, elastik parametrelerinin değişimi ve gerilme seviyesine bağlı olarak deformasyon davranış aşamaları vb. özelliklerinin benzer türdeki kaya türlerinde farklılık göstereceği bilinmektedir. Bu nedenle, derlenen tüm kaya türlerinin nicel tanımlamalarının yapılabilmesi amacıyla, bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinin önem taşıdığı dikkate alınarak, AE deneylerinden elde edilen sonuçların bu özelliklerin de dikkate alınarak değerlendirilmesinde yarar görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında hazırlanan harç örneğinin yanı sıra, kaya örneklerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri ile sondajlardan alınan örneklerin bazı fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesinde laboratuvar deneyleri ve kuramsal yaklaşımlardan yararlanılmıştır.

### 6.1. Laboratuvar Deneyleri

Sözü edilen kaya ve harç örnekleri üzerinde, ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemler dikkate alınarak, aşağıda belirtilen özellikler laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir.

- (a) Birim hacim ağırlık
- (c) Tek eksenli sıkışma dayanımı
- (d) Çekilme dayanımı
- (e) Statik elastisite modülü ve Poisson oranı
- (f) Porozite (Gözeneklilik)
- (g) P dalga hızı

### 6.1.1. Birim hacim ağırlık

Harç ve kaya örneklerinden hazırlanan karotlar ile sondajlardan alınan karot ve şekilsiz örneklerin, ISRM (1981) tarafından önerildiği şekilde kompas ve civa taşıma yöntemleri kullanılarak, birim hacim ağırlıkları tayin edilmiştir. Bu deneyler, toplam 618 adet karot örneği ile 29 adet şekilsiz örnekte yapılmıştır.

### 6.1.2. Dayanım ve elastik parametreler

Hazırlanan harç ve derlenen kaya örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımları ( $\sigma_c$ ) ve ayrıca Brazilian deney yöntemi ile dolaylı çekilme dayanımları ( $\sigma_{tB}$ ) belirlenmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımlarının belirlenmesi sırasında deney örnekleri üzerine birim deformasyon ölçerler yapıştırılarak elastik parametreler de tayin edilmiştir. Belirlenen dayanım değerleri, Bölüm 6.2'de değinilen kuramsal yaklaşımlarla makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde ve Bölüm 7'de değinilen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarına ait istatistiksel değerlendirmelerde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Bölüm 8'de sunulan harç ve derlenen kaya örneklerine ait AE deneylerinde belirlenen KE seviyelerinin önyüklemelerdeki en büyük gerilmelerle olan ilişkileri değerlendirilirken dayanım parametreleriyle birlikte elastik parametrelerden de yararlanılmıştır. Elastik parametrelerin belirlendiği "birim deformasyon – gerilme" grafikleri ise, Bölüm 7'de belirtilen örnek grupları için deformasyon ve çatlak gelişimi aşamalarının sınır değerlerinin saptanmasında kullanılmıştır.

### 6.1.3. Görünür porozite (gözeneklilik)

Örneklerin içerdikleri boşlukların bu çalışma kapsamında öngörülen AE ölçümlerinden elde edilen sonuçlar üzerinde bir etkisinin bulunup bulunmadığının değerlendirilmesi amacıyla, ISRM (1981) tarafından önerilen suya doyurma yöntemi esas alınarak porozite (gözeneklilik) değerleri tayin edilmiştir. Bu amaçla harç, derlenen kaya ve sondajlardan alınan kaya karot örneklerinde toplam 146 adet deney yapılmıştır.

#### 6.1.4. Boyuna dalga (P) hızı

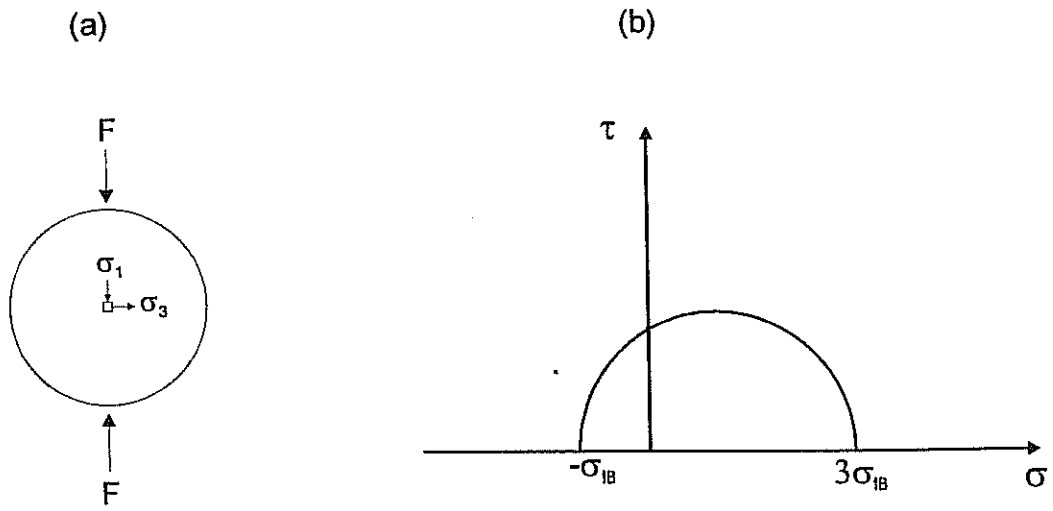
Yukarıda değinilen deneylerin yanı sıra, aynı amaç doğrultusunda harç ve derlenen kaya örneklerine ait karotlarda ultrasonik hız aleti kullanılarak P dalga hızları belirlenmiştir.

#### 6.2. Makaslama Dayanımı Parametreleri

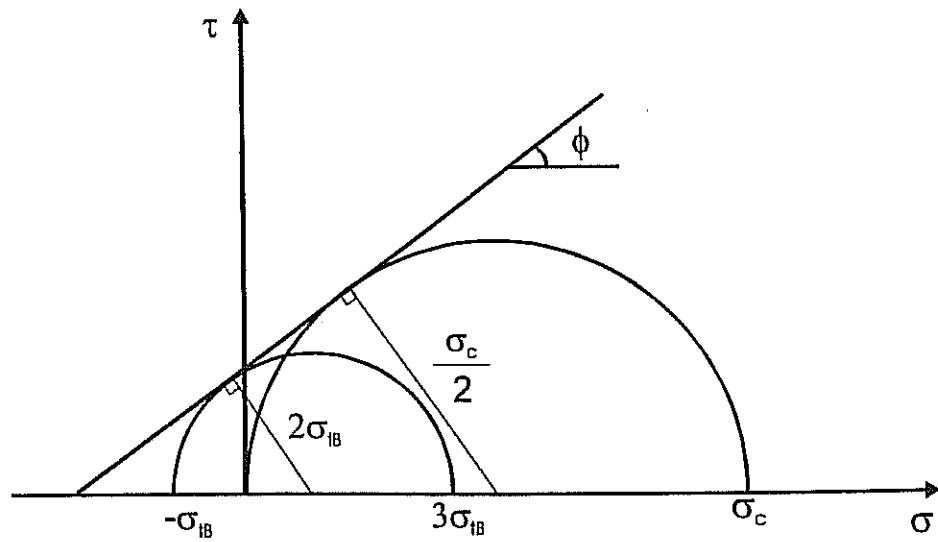
Çalışma kapsamında planlananlar göz önünde bulundurulduğunda, gerek dayanım parametrelerinin belirlenmesi, gerekse planlanan AE deneylerinin yapılması için her örnek grubuna ait çok sayıda karot örneğine gereksinim duyulmuştur. Bu nedenle, harç ve derlenen kaya örneklerinin makaslama dayanımı parametrelerinin üç eksenli deneylerle belirlenmesi yerine, örneklerin tek eksenli sıkışma ( $\sigma_c$ ) ve dolaylı yoldan saptanan çekilme ( $\sigma_{tB}$ ) dayanımları kullanılarak belirlenmesi planlanmış ve bu amaçla aşağıda verilen yaklaşımlar dikkate alınmıştır.

Çekilme dayanımının dolaylı yönden belirlendiği Brazilian deneyinde, Şekil 6.1a'da gösterildiği gibi, deney örneğinin merkezinde gerçekleşen asal gerilmelerden yatay yöndeki, düşey yönde gelişen gerilmenin üçte birine eşit olmaktadır (Andreev, 1995). Bu durumda, Brazilian deneyinden dolaylı yoldan belirlenen çekilme dayanımı ( $\sigma_{tB}$ ) pozitif bir değer olarak alınır ve dolayısıyla en büyük asal gerilmenin ( $\sigma_1$ ) üçte birine eşit olmaktadır. Şekil 6.1b'de dolaylı çekilme dayanımı kullanılarak çizilen Mohr dairesi verilmiştir. Bu durum ve tek eksenli sıkışma dayanımı için Mohr dairesi çizilip, yenilme zarfının doğrusal olduğu varsayılırsa Şekil 6.2'de verilen geometri kullanılarak makaslama dayanımı parametrelerinin analitik yoldan belirlenmesi mümkündür. Bu amaçla, Şekil 6.2'deki üçgen benzerliği ilişkilerinden yararlanılarak içsel sürtünme açısı,

$$\phi = \arcsin \left( \frac{\sigma_c - 4\sigma_{tB}}{\sigma_c - 2\sigma_{tB}} \right) \quad (\text{Eş. 6.1})$$



Şekil 6.1: (a) Brazilian deneyinde örneğin merkezine etkiyen asal gerilmeler ve (b) dolaylı yoldan belirlenen çekilme dayanımına bağlı olarak çizilen Mohr daresi.



Şekil 6.2: Çekilme dayanımı ve tek eksenli sıkışma dayanımı dikkate alınarak çizilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı.



eşitliğiyle, kohezyon ise Coulomb yenilme ölçütündeki tek eksenli sıkışma dayanımı ve makaslama dayanımı parametreleri arasındaki ilişkiden yararlanılarak aşağıdaki ilişkiyle belirlenebilir.

$$c = \frac{\sigma_c}{2} \tan \left[ 45^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{\sigma_c - 4\sigma_{IB}}{\sigma_c - 2\sigma_{IB}} \right) \right] \quad (\text{Eş. 6.2})$$

Harç ve derlenen kaya örneklerine ilişkin makaslama dayanımı parametreleri Eşitlik 6.1 ve Eşitlik 6.2 kullanılarak, örneklerin tek eksenli sıkışma ve Brazilian yöntemiyle saptanan çekilme dayanımlarından yararlanılarak dolaylı şekilde belirlenmiştir. Bu parametreler, Bölüm 8'de KE seviyelerinin kayaların jeomekanik özellikleri ile karşılaştırılmasının yapıldığı kısımda kullanılmıştır.

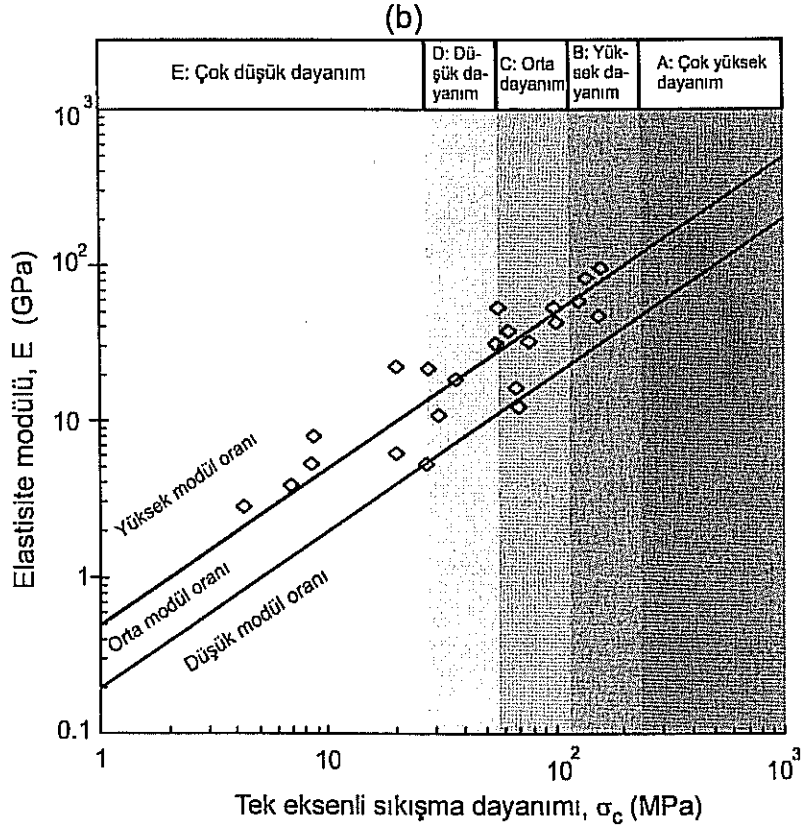
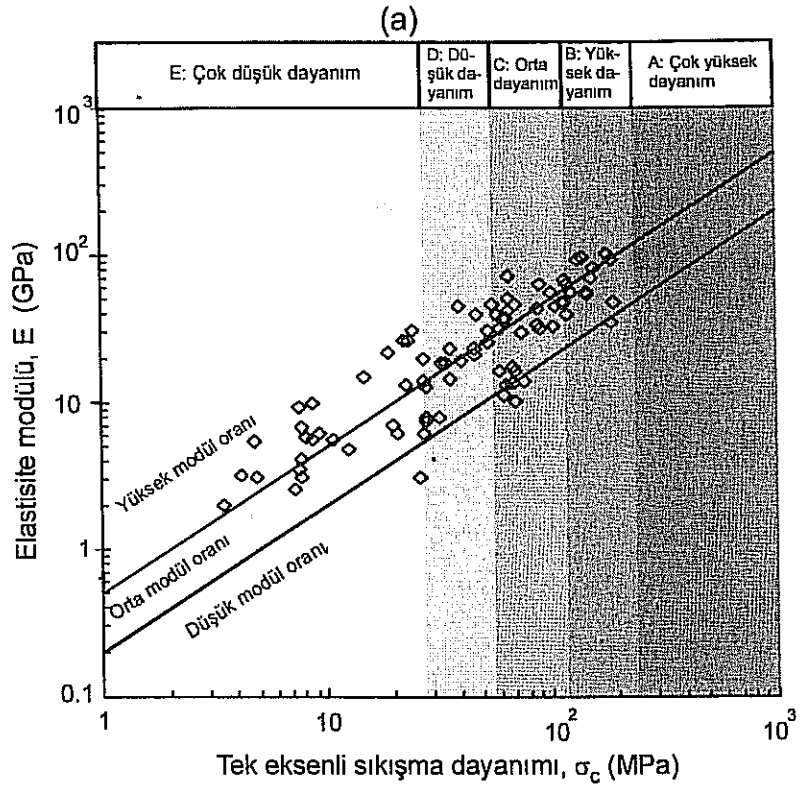
### 6.3. Kaya Örneklerinin Sınıflandırılması

Harç ve derlenen kaya örneklerine ait jeomekanik özelliklerin ortalama değerleri Çizelge 6,1'de verilmiştir. Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı ( $\sigma_c$ ) ve elastisite modülü (E) değerleri Deere and Miller (1966) tarafından önerilen birleşik mühendislik sınıflaması abağı üzerinde gösterilmiştir (Şekil 6.3). Bu şekilden de görülebileceği gibi, derlenen kaya örneklerinin  $\sigma_c$ 'leri "Çok yüksek dayanım" sınıfı dışında diğer farklı dayanım sınıfları içinde dağılım göstermektedir. Ayrıca, kaya türlerine ait modül oranlarının ise; çoğunlukla "Orta modül oranı" ve "Yüksek modül oranı" sınıflarında dağılım gösterdiği, "Düşük modül oranı" sınıfında ise sadece birkaç örneğin yer aldığı görülmektedir. Ramamurthy (2004) tarafından önerilen dayanım ve modül oranlarının sınıflandırılması dikkate alındığında ise, veriler Şekil 6.4'te sunulduğu gibi bir dağılım göstermektedir. Bu durumda, örneklerin bir kaçı "Orta modül oranı" sınıfında yer alırken, diğer örnekler "Yüksek modül oranı" ve "Çok yüksek modül oranı" sınıflarına dahil olmaktadır.

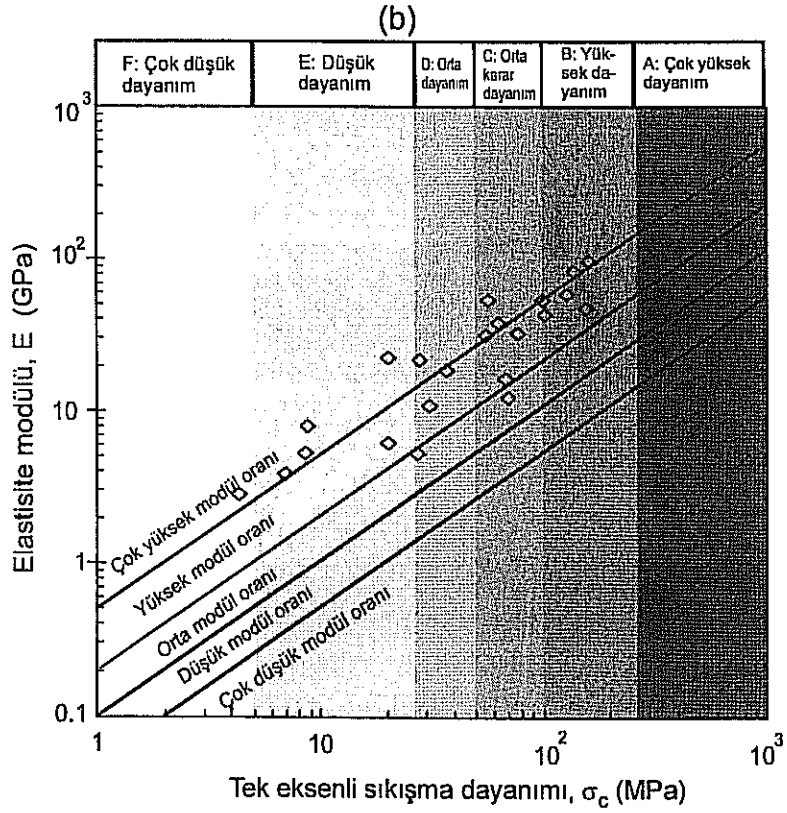
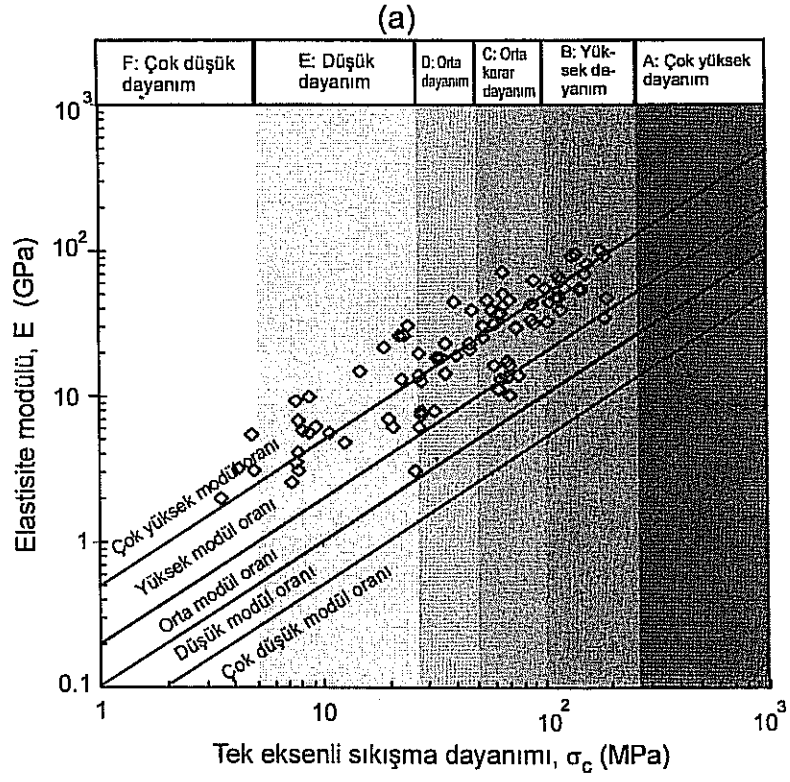
Çizelge 6.1: Derlenen kaya türlerine ait bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin ortalama değerleri.

Örnek No.	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{IB}$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	$V_p$ (m/s)	n (%)	E (GPa)	$\nu$	c (kPa)	$\phi$ (°)
A1	24.0	9.1	128.9	4542.9	4.8	58.1	0.17	19.3	56.7
A2	26.3	7.7	57.3	4516.5	0.2	53.4	0.27	13.6	39.1
A3	24.4	10.2	77.4	3669.3	4.5	32.0	0.23	18.1	39.8
A4	22.7	3.5	20.2	2494.0	11.4	6.1	0.24	6.1	27.4
A5	22.2	5.7	55.8	4001.7	14.7	30.8	0.27	10.6	48.2
A6	20.3	4.5	31.1	2672.8	17.1	10.7	0.29	7.9	36.3
A7	23.6	10.2	101.2	4462.4	2.4	42.1	0.20	19.2	48.4
A8	24.0	5.5	27.2	3048.6	7.8	5.3	0.26	9.7	18.6
A9	22.2	2.0	19.9	3266.4	*	22.3	0.30	3.8	48.0
A10	26.0	4.1	68.9	2942.9	2.1	12.1	0.18	9.3	59.8
E1	22.7	4.5	62.7	4112.1	8.4	37.7	0.35	9.5	56.4
E2	26.2	11.8	137.8	5219.2	0.3	81.1	0.24	23.4	52.5
E3	26.9	10.7	100.0	4389.8	0.2	53.2	0.26	19.8	46.8
E4	28.5	15.6	160.6	4807.4	0.1	96.7	0.21	29.7	49.3
E5	22.8	5.5	67.3	3050.7	5.9	16.0	0.18	11.1	53.6
E6	22.8	5.0	28.0	4048.0	7.3	21.6	0.21	8.7	26.2
E7	25.5	15.6	156.7	3701.1	2.5	46.3	0.21	29.5	48.7
N1	13.5	1.0	4.3	1969.3	25.5	2.8	0.30	1.8	10.2
N2	12.3	1.8	8.7	1944.6	22.8	7.9	0.31	3.2	16.5
N3	15.8	1.4	6.9	1887.7	30.1	3.8	0.21	2.5	19.2
N4	15.1	0.9	8.5	2039.7	27.5	5.3	0.24	1.7	45.6
B1	20.7	3.8	36.5	3343.1	7.7	18.2	0.17	7.1	47.5

$\gamma$ : Birim hacim ağırlık,  $\sigma_c$ : Çekilme dayanımı,  $\sigma_c$ : Tek eksenli sıkışma dayanımı, n: Görünür porozite, E: Elastisite modülü,  $\nu$ : Poisson oranı, c: Kohezyon,  $\phi$ : İçsel sürtünme açısı, \* Bu örnek anhidrit olup, örneğin görünür boşluk oranı suda bekletme yöntemiyle belirlenememektedir.



Şekil 6.3: Çalışma kapsamında derlenen farklı kaya örneklerinin Deere and Miller (1966)'in birleşik mühendislik sınıflaması abağı üzerindeki dağılımları: (a) tüm örnekler ve (b) her kaya türüne ait ortalama değerler.



Şekil 6.4: Çalışma kapsamında derlenen farklı kaya örneklerinin Ramamurty (2004) tarafından önerilen abak üzerindeki dağılımları: (a) tüm örnekler ve (b) her kaya türüne ait ortalama değerler.

## 7. DEFORMASYON VE ÇATLAK İLERLEMESİ AŞAMALARININ BELİRLENMESİ

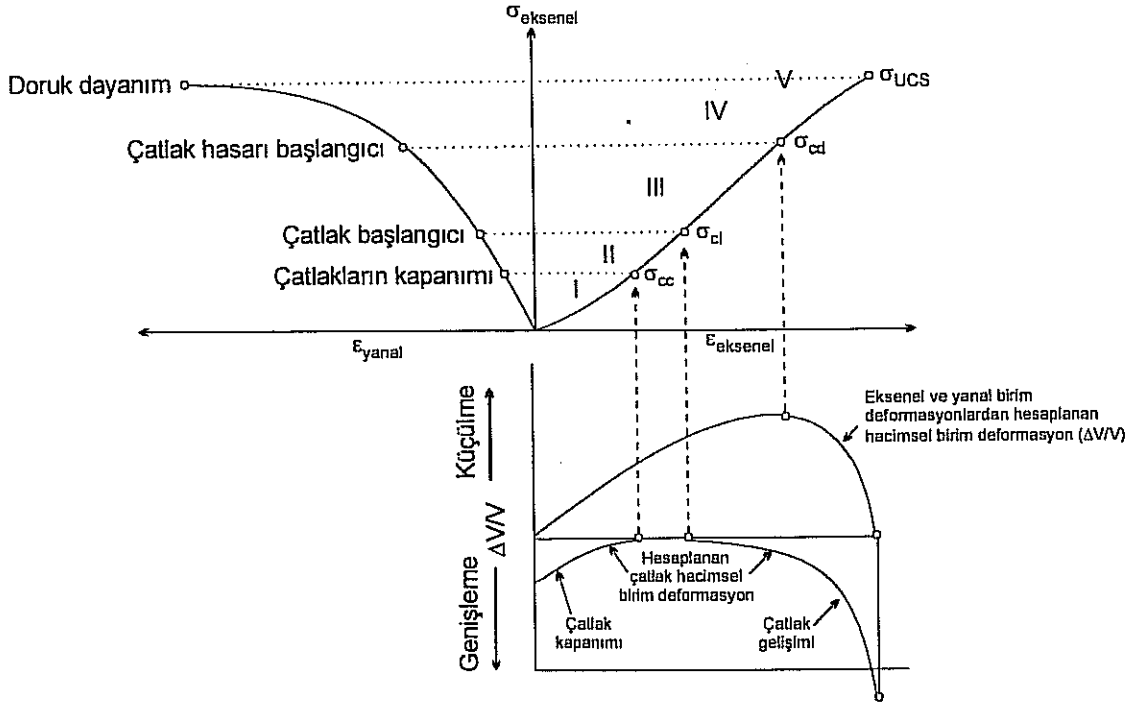
Gerilme seviyesi arttıkça, kayaların gerilmeye karşı gösterdikleri deformasyon davranışlarında farklılık olduğu bilinmektedir. En yalın şekliyle, düşük gerilme seviyelerinde kaya örneği içindeki mikroçatlakların kapanımı, gerilme seviyesi arttıkça doğrusal elastik deformasyon ve sonrasında plastik davranış söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada tek ve üç eksenli koşullarda önyükleme seviyelerinin önceki çalışmaların çoğunda yapıldığı gibi gelişi güzel seçilmesi yerine, derlenen kaya türlerinde yapılan deformasyon deneylerinden elde edilen sonuçların kullanılması öngörülmüştür. Bu yaklaşım çerçevesinde hazırlanan harç örneği ve derlenen kaya türleri için deformasyon davranış aşamaları belirlenmiştir.

Gevrek kayaların laboratuvar koşullarında yüklenmesi sonucu, deformasyon ve kırılma özellikleri konusu son 40 yıldır çeşitli araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır (Brace, 1964 - Eberhardt vd., 1998'den; Bieniawski 1967; Ohnaka ve Mogi, 1982; Martin ve Chandler, 1994; Eberhardt vd., 1999, Diederichs vd., 2004).

Brace (1964; Eberhardt vd. 1998) ve Bieniawski (1967) tarafından, yüklemeye maruz bırakılan bir kayanın "gerilme – birim deformasyon" davranışı gözönünde bulundurularak gevrek kayalardaki deformasyon ve çatlak ilerlemesi süreçleri (Şekil 7.1),

- I. Çatlak kapanımı
- II. Doğrusal elastik deformasyon
- III. Çatlak ilerlemesinin başlangıcı ve duraylı çatlak ilerlemesi
- IV. Kritik enerjinin açığa çıkması ve duraysız çatlak ilerlemesi
- V. Yenilme ve yenilme sonrası davranış

şeklinde farklı aşamalarla tanımlanmıştır. Bu aşamalar, aşağıda ana hatlarıyla açıklanmıştır.



Şekil 7.1: Çatlak ilerlemesi aşamalarını gösteren gerilme – birim deformasyon diyagramı (Martin 1993 - Martin ve Chandler, 1994'ten).

*Çatlak kapanımı (Aşama I)*, yüklemenin ilk aşamalarında gelişmekte ve bu aşamada yükleme eksenini ile yönelimi arasında büyük açılar olan çatlakların kapanması söz konusu olmaktadır. Bu aşamada, "gerilme – aksenal birim deformasyon" davranışı doğrusal olmayıp, eğim sürekli bir artış göstermektedir. Bu süreç, kaya örneğinde var olan mikroçatlak yoğunluğuna ve bunların geometrik karakteristiklerine bağlı olarak, farklılık sunmaktadır. Bu özelliklere bağlı olarak, kaya içindeki mikroçatlakların büyük bir çoğunluğunda kapanma gerçekleştiğinden sonra ( $\sigma_{cc}$ ) *doğrusal elastik deformasyon davranışına (Aşama II)* geçilmektedir.

*Çatlak ilerlemesi başlangıcı ve duraylı çatlak ilerlemesi aşamasında (Aşama III)*, mikroçatlak ilerlemesi başlamakta ve bu çatlaklar duraylı çatlaklar olarak tanımlanmaktadır. Çatlak ilerlemesinin duraylı ya da duraysız olması, yüklemenin durdurulması halinde çatlak ilerlemesinin devam edip etmediğiyle kontrol edilmektedir. Duraylı koşulda, yükleme durdurulduğunda çatlak ilerlemesi de sona ermekte iken, duraysız koşulda tersi bir durum söz konusu olmaktadır. Bu aşamanın başlangıcı, yanal ve hacimsel birim deformasyon grafiklerinin doğrusallıktan saptığı gerilme seviyesi ( $\sigma_{ci}$ ) olarak tanımlanmaktadır.

*Kritik enerjinin açığa çıkması ve duraysız çatlak ilerlemesi (Aşama IV)*, yukarıda değinildiği gibi, duraysız çatlak ilerlemesinin gelişimiyle başlamakta ( $\sigma_{cd}$ ) ve bu başlangıç seviyesi hacimsel birim deformasyon eğrisinin ilerleme yönünden geriye doğru dönmesi (hacimsel birim deformasyonun en yüksek sıkışma değerine ulaşması) ile belirlenmektedir. Bu seviye, aynı zamanda kritik enerjinin açığa çıkması veya çatlak hasarı için gerekli gerilme seviyesi olarak tanımlanmıştır (Martin 1993; Martin ve Chandler, 1994'ten). Bu aşamadan sonra, *yenilme kırığının oluşumu ve yenilme sonrası davranışın (V. Aşama)* gerçekleştiği süreç gelişmektedir.

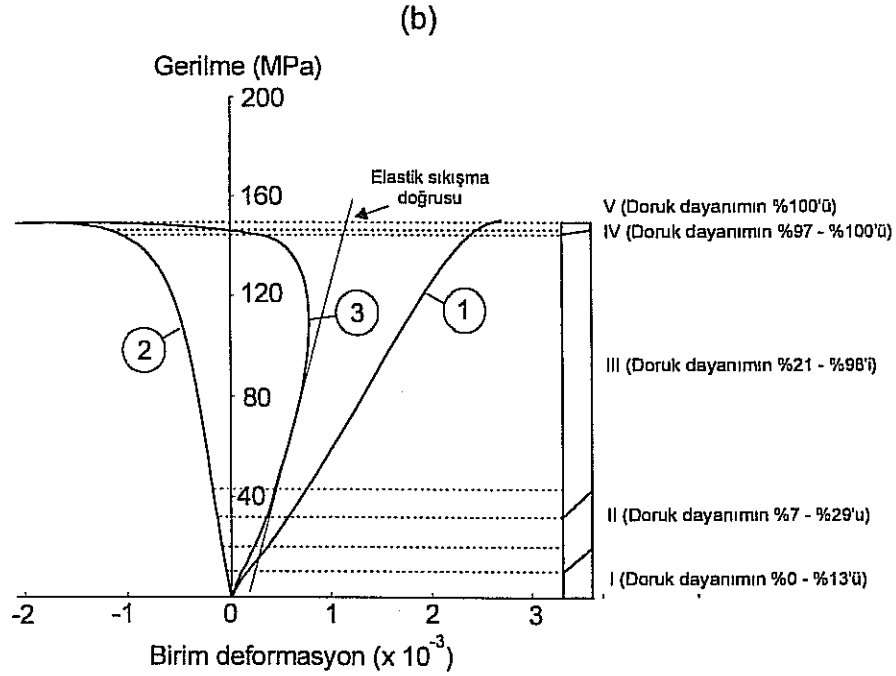
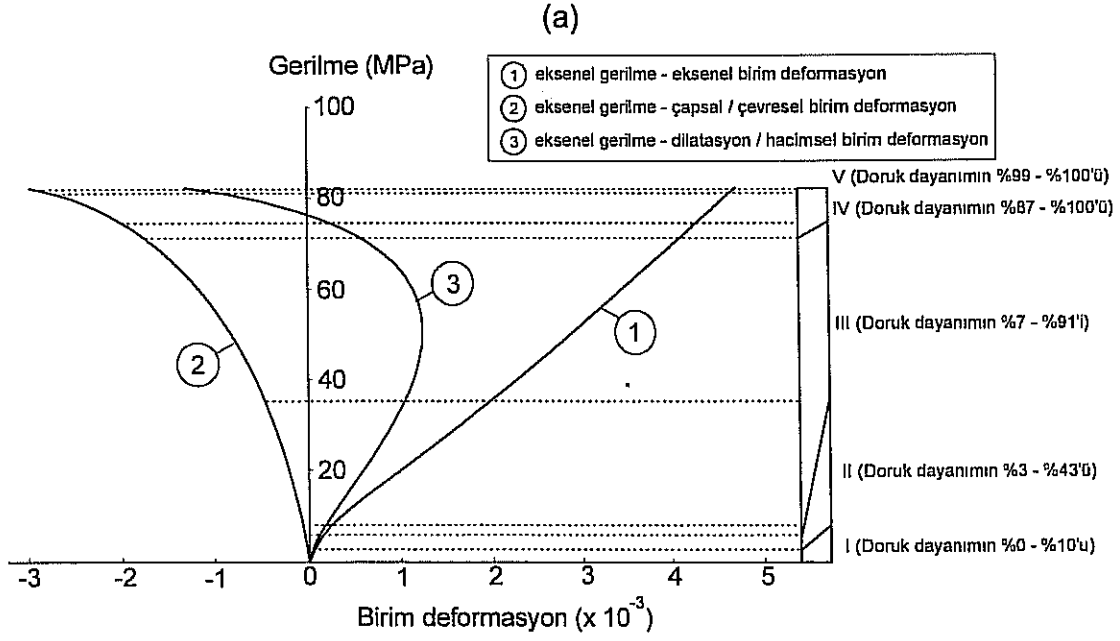
Ohnaka ve Mogi (1981; Ohnaka ve Mogi, 1982'den) tarafından tek eksenli yüklemeye maruz bırakılmış gevrek kayaların deformasyon davranışları, AE ölçümlerinden elde edilen sonuçlar da dikkate alınarak, yine 5 farklı aşamada değerlendirilmiştir. Adı

geçen araştırmacıların Mannari graniti ve Shinkomatsu andezitinden elde ettikleri "gerilme - birim deformasyon" grafikleri ile farklı deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları Şekil 7.2'de, bu seviyelerin açıklamaları ise Çizelge 7.1'de verilmiştir. Bu çizelgeden de görülebileceği gibi Ohnaka ve Mogi (1981; Ohnaka ve Mogi, 1982'den), Brace (1964; Eberhardt vd., 1998) ve Bieniawski (1967) tarafından önerilen 5 aşama için AE aktivitesinde gözlenen değişikliklere ilişkin açıklama getirmişlerdir.

Eberhardt vd. (1998) ise, bu seviyelerin sadece birim deformasyon ölçerler kullanılarak belirlenmesinin güç olduğunu, bu nedenle Ohnaka ve Mogi (1981; 1982'den) tarafından yapıldığı gibi, AE verisi ile birlikte değerlendirmeye gidilerek daha doğru sonuçların elde edildiğini belirtmektedirler. Araştırmacılar, Lac du Bonnet graniti üzerinde laboratuvar deneyleri yaparak elde ettikleri birim deformasyon eğrileri ve AE aktivitesi ölçümlerini değerlendirmişler ve yukarıda değinilen çalışmalarda önerilen gevrek kayaların deformasyon süreçlerini hacimsel sıklık (volumetric stiffness) grafiğini de dikkate alarak değerlendirmişlerdir. Hacimsel sıklık grafiği, "hacimsel birim deformasyon - eksenel gerilme" eğrisinin her bir noktasındaki eğimleri ifade etmektedir.

Eberhardt vd. (1999); granodiyorit, granit ve pegmatit örnekleri üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişler ve Şekil 7.3'te görüldüğü gibi, deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarını Eberhardt vd. (1998) tarafından önerilen hacimsel sıklık eğrisine bağlı olarak belirlemişlerdir. Bu araştırmacılar, daha öncekilere göre farklı sonuçlar ortaya koymuşlardır. Çizelge 7.2'de bu araştırmacılar tarafından önerilen süreçler verilmiştir. Buna göre; çatlak kapanımı ve doğrusal elastik deformasyon davranışı önceki çalışmalarda önerilen süreçlerle aynı olmakla birlikte, Brace (1964; Eberhardt vd., 1998) ve Bieniawski (1967) tarafından 3. aşama olarak (çatlak ilerlemesi başlangıcı ve duraylı çatlak ilerlemesi) verilen süreç Eberhardt vd. (1999) tarafından üç ayrı süreç olarak tanımlanmıştır. Bunlar; birincil çatlak ilerlemesi, ikincil çatlak ilerlemesi, ve çatlak birleşimi olarak verilmiş, son aşaması ise çatlak hasarı ( $\sigma_{cd}$ ) olarak adlandırılmıştır.

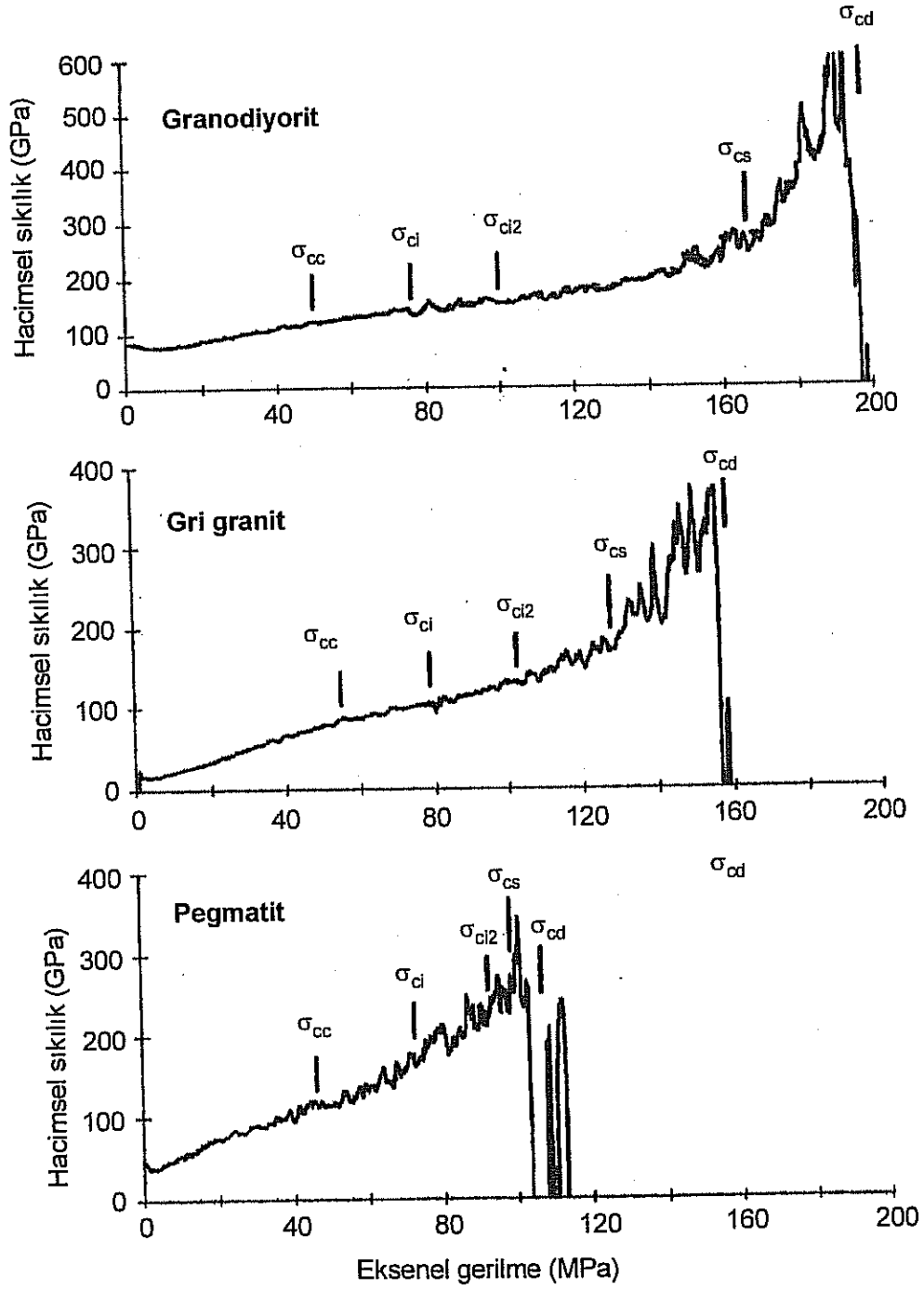




Şekil 7.2: (a) Shinkomatsu andeziti ve (b) Mannari graniti için tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri ve bunların I – V no.lu aşamalarla ilişkileri (Ohnaka ve Mogi, 1982).

Çizelge 7.1. Yenilme anına kadar oluşan deformasyon süreçleri (Ohnaka ve Mogi, 1982'den).

Aşama	AE Aktivitesi	Kırılma/Deformasyon Süreci
I	Ani AE aktivitesi	Yükleme eksenine büyük açılarda konumlanmış çatlakların kapanımı, kaynaşmış kısımlarının ve pürüzlülüklerinin kırılması
II	Az miktarda AE aktivitesi	Örnek, çok sayıda çatlak ilerlemesi/gelişimi için yeterli büyüklükte gerilmenin etkisinde değil
III	AE aktivitesinde artış (eksponansiyel)	Yeni çatlakların ilerlemesi/gelişimi ve yükleme eksenine küçük açılarda konumlanmış çatlakların (boşlukların) açılması (dilatancy başlangıcı)
IV	AE aktivitesinde önemli düzeyde artış (eksponansiyel-eğim daha da artar)	Çatlaklararası etkileşim
V	AE aktivitesinin çok hızlı bir yükseliş göstermesi	Çatlakların hızla birleşimi sonucu yenilme kırığının oluşması



Şekil 7.3: Granodiyorit, gri granit ve pegmatit örnekleri için "hacimsel sıkılık – eksenel gerilme" grafikleri (Eberhardt vd., 1999).

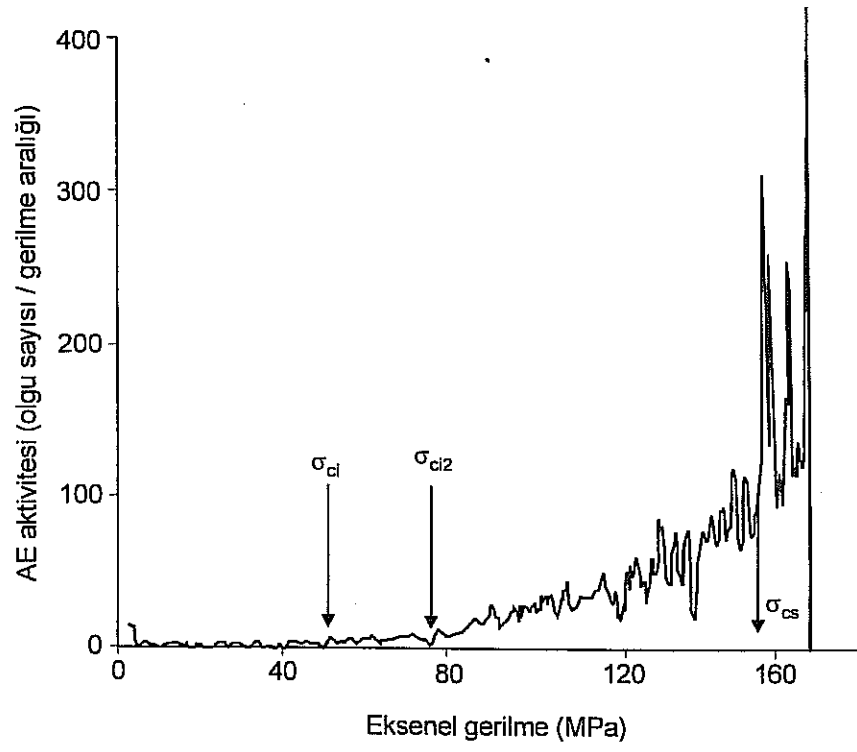
Çizelge 7.2. Eberhardt vd. (1999) tarafından önerilen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları.

Aşama	Tanımlama
I. Çatlak kapanımı	Eksenel birim deformasyon eğrisinin eğrisellikten doğrusal hale geçtiği noktaya ( $\sigma_{cc}$ ) kadar olan davranış
II. Doğrusal elastik deformasyon	Hacimsel sıkılık eğrisinin doğrusal davranış gösterdiği kısım
III. Birincil çatlak ilerlemesi	Hacimsel sıkılık eğrisinin doğrusal davranıştan en fazla saptığı ilk nokta başlangıcına ( $\sigma_{c1}$ ) karşılık gelmekte. AE aktivitesinin belirgin olarak yükseldiği ilk gerilme seviyesiyle başlamakta.
IV. İkincil çatlak ilerlemesi	Hacimsel sıkılık eğrisinde belirgin kırılmaların oluşmasıyla başlayan ( $\sigma_{c2}$ ) aşama. Çatlak ilerlemesi başlangıcından sonra AE aktivitesindeki ilk önemli artışın gözlemlendiği seviyeyle başlamakta.
V. Çatlak birleşimi	Eksenel birim deformasyonun doğrusallıktan saptığı seviye ( $\sigma_{cs}$ ) ile başlayan aşama. Hacimsel sıkılık eğrisinde büyük düzensizlikler gözlenir. Ayrıca, AE aktivitesinde değişiklik var.
VI. Çatlak hasarı	Hacimsel birim deformasyon eğrisinin döndüğü seviye , ya da hacimsel sıkılık eğrisinde pozitiften negatif değerlere geçildiği seviye ile başlayan aşama ( $\sigma_{cd}$ )

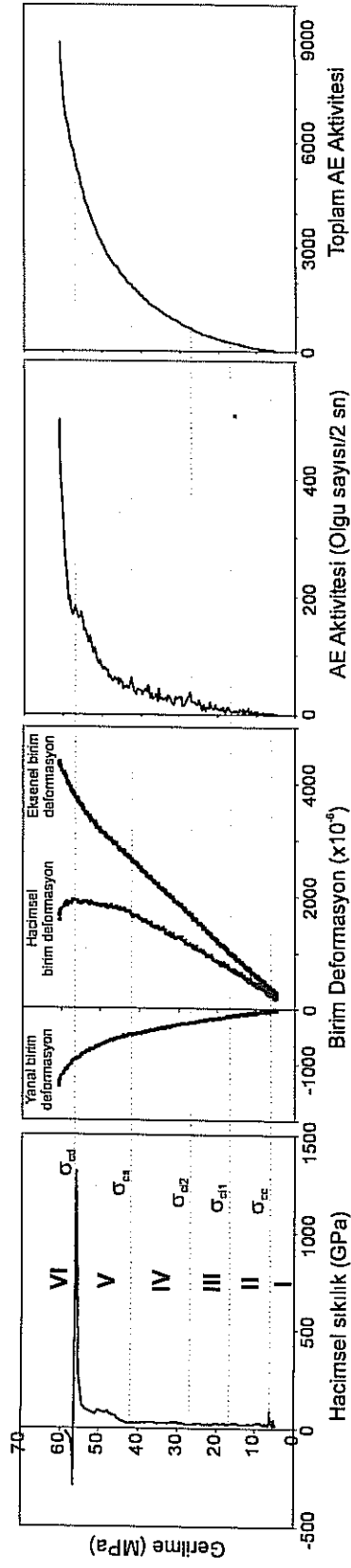
Diederichs vd. (2004) ise, sadece çatlak ilerlemesi başlangıcı, sistematik çatlak ilerlemesi (ikincil çatlak ilerlemesi) ve çatlak etkileşimi aşamalarının başlangıç seviyeleri (sırasıyla,  $\sigma_{ci1}$ ,  $\sigma_{ci2}$ , ve  $\sigma_{cs}$ ) ile AE aktivitesi arasındaki ilişkiyi granit örneği üzerinde yaptıkları deneylerle belirlemişlerdir (Şekil 7.4).

Çalışma kapsamında, laboratuvar deneylerinin sunulduğu 6. Bölüm'de değinildiği gibi, derlenen kaya örneklerinde elastik parametreler deneylerle tayin edilmiş ve bu deneylerde yüklemenin başından yenilme anına kadar gerilmeye karşılık eksenel, yanal ve bunlardan hesaplanan hacimsel birim deformasyonlar belirlenmiştir. Bu deneyler sırasında AE ölçümleri de alınmış olmasına karşın, AE sisteminde karşılaşılan sorunlardan dolayı ölçülen AE verileri iptal edilmiştir. Sistem kullanılabilir hale getirildikten sonra, aynı kaya türleri için birer adet daha deformasyon deneyi yapılmış ve sadece bu deneylerde AE ölçümleri alınmıştır. Deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının belirlenmesinde; tüm örnekler için elde edilen gerilmeye karşılık eksenel, yanal ve hacimsel birim deformasyon ile hacimsel sıkılık eğrilerinden yararlanılmıştır. Her bir kaya grubu için birer örnekte belirlenen AE ölçümleri ise, karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Şekil 7.5'te deformasyon aşamalarının belirlenmesi için kullanılan grafiklerden biri görülmektedir. Bu örnekte, Eberthardt vd. (1999) tarafından önerilen aşamaların tamamı belirlenebilmiştir. Ancak, tüm örneklerde deformasyon aşamalarının sınır değerleri için aynı başarıyla belirleme yapıldığı söylenemez. Her ne kadar her kaya grubu için olabildiğince özdeş örneklerde deneyler yapılmaya çalışılmış olursa da,

1. kullanılan birim deformasyon ölçerlerin bir veya birkaçının yükleme sırasında ani deformasyon değişikliğine bağlı olarak kopması veya kırılması,
2. mikroçatlakların yayılımı ve yönelimlerinin aynı kaya türüne ait örneklerde bile farklılık gösterebilmesi,
3. özellikle kristalin kaya örneklerinde kristallerin dağılım ve yönelimlerinin farklılık gösterebilmesi,
4. aynı kaya türlerinde belirlenen dayanımların belirli bir aralıkta dağılım göstermesi ve



Şekil 7.4: AE aktivitesine karşı gerilme artışı grafiği (Diederichs vd., 2004).



Şekil 7.5: Deformasyon aşamalarının belirlenmesinde kullanılan tipik bir grafik (E5 no.lu andezit örneği).

5. bu çalışmada belirlenmesi öngörülen aşamaların kristalin gevrek kayalar için önerilmiş olması ve kullanılan kaya türlerinin tamamının bu özellikte olmaması

gibi nedenlerden dolayı, tüm deney örneklerinde deformasyon aşamalarının tamamının belirlenememesinin olağan olduğu düşünülmüştür. Derlenen kaya türleri için belirlenen deformasyon aşaması sınırları ile tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin alt ve üst sınırları Çizelge 7.3a'da verilmiştir. Çizelge 7.3a'dan, deformasyon aşamalarının sınır değerlerine ait dağılımın oldukça farklılıklar gösterebildiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, deformasyon aşamalarının alt ve üst sınırlarına karşılık gelen gerilme değerleri açısından net olarak ortaya konması da çoğu örnekte mümkün olamamaktadır. Daha genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla, deneye tabi tutulan tüm karot örneklerinden elde edilen deformasyon aşaması sınır değerleri, bu örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımlarına ( $\sigma_c$ ) oranlanarak normalize edilmiştir. Kaya türlerine ait oranlanmış deformasyon aşaması sınır değerlerinin değişim aralıkları Çizelge 7.3b'de verilmiştir. Bu değerler, aşamalar arasındaki ayrımın biraz daha netlik kazandığını göstermektedir. Deneye tabi tutulan tüm örneklerin oranlanmış deformasyon aşaması sınır değerlerinin  $\sigma_c$  değerlerine bağlı değişimi ise Şekil 7.6'da verilmiştir. Bu durumda, derlenen kaya örneklerinde çatlak kapanımı seviyesi, ilksel çatlak ilerlemesinin başlangıcı, sistematik çatlak ilerlemesi, çatlak etkileşimi ve çatlak hasarının başlaması,  $\sigma_c$  değerlerinin sırasıyla % 4.6-35.6'sı, %18.2-45.8'i, %28.1-67.3'ü, %36.5-84.2'si ve %41.2-96.5'i arasında değişim göstermektedir. Şekil 7.6'da sunulan grafiklerin kaya türlerine bağlı olarak bir ayrıma gidildikten sonra tekrar düzenlenmesi halinde yukarıda değinilen yüzdelik dilimlerin daha da daralabileceği düşünülmüşse de, Çizelge 7.3b incelendiğinde, değerlendirme açısından farklı bir sonuca ulaşamayacağı görülmektedir. Ohnaka ve Mogi (1982) tarafından tek bir kaya türü için verilen deformasyon aşamalarının sınır değerleri de oldukça büyük bir aralıkta değişim göstermektedir (bkz. Şekil 7.2). Bu durumun, bir önceki sayfada maddeler halinde belirtilen nedenlerin bir veya birkaçıyla ilişkili olabileceği düşünülmüştür.

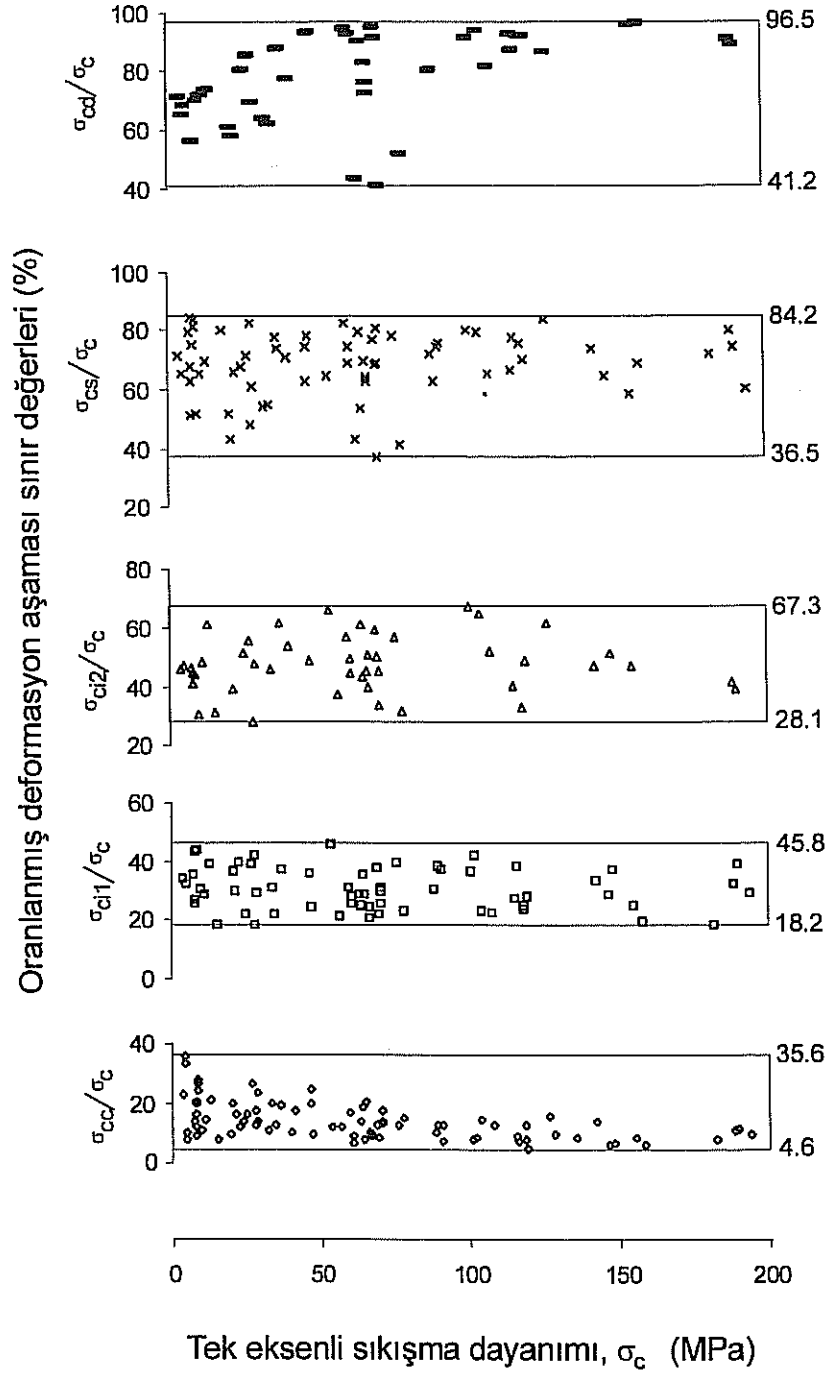


Çizelge 7.3. Derlenen kaya türleri için belirlenmiş deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının sınır değerlerinin değişimi.

Örnek No.	(a) Deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları sınır değerleri (MPa)					
	$\sigma_{cc}$	$\sigma_{cl1}$	$\sigma_{cl2}$	$\sigma_{cs}$	$\sigma_{cd}$	$\sigma_c$
A1	8.5-10	30-55	39-76	90-95	-	102.1-148.2
A2	4-7	12.1-16.5	21.1-34	28.2-45.9	30.9-55	39.8-66.7
A3	9.1-15	16-26.8	35.2-67.5	64-83	71.2-98.5	53.3-104.2
A4	2.7-4	4.9-7.4	7.7-8.1	8.8-10.5	9.3-19.2	12.6-27.4
A5	6.4-11.6	16.8-30	-	29.3-59.2	-	46.3-75.7
A6	3.5-3.9	-	-	17.2-28.1	-	28-36.2
A7	8.5-14	24.5-45.2	-	56.4-90.4	-	89.2-116.4
A8	6.7-7	-	-	-	-	26.3-28.0
A9	1.2-3.3	2.7-8.8	-	-	-	14.8-23.4
A10	8.7-13.3	18.1-18.6	23.6-28	25.6-35	27.5-40.3	63.1-77.7
B1	4.4-7.2	7.6-11.6	15.2-22.8	18.3-36.8	-	27.5-46.8
E1	4-10	14.1-22.7	26.5-33.7	43-51	51-58	59.2-66.8
E2	7.8-13.1	31.5-38.6	68-73.6	81-91	92.5-149	101-158.5
E3	5.5-9.9	22-33.5	-	56.7-84	-	70.4-119.8
E4	12.6-20.5	33.7-61	67.2-79	106-152	-	128.6-188.6
E5	5.5-12.5	15.5-26.1	27-40.6	42-52.9	56.5-65.7	60.7-70.4
E6	4-7	5.5-13.5	12.8-22.5	14.3-27	-	23-36.3
E7	10.5-21.9	32-74.8	47-78.7	77.5-142	108-170	115.8-194.1
N1	0.5-1.6	1.2-1.6	1.6-2.3	2.5-3.2	-	3.5-4.9
N2	1.5-2.4	3.1-3.3	-	6.4-7.3	-	7.6-10.8
N3	0.4-1.3	2-2.6	3.2-3.5	4-5.8	-	4.8-7.8
N4	0.9-2.2	2.9-3.6	-	4.8-7.1	-	7.6-9.4

Örnek No	(b) Oranlanmış deformasyon aşaması ve çatlak ilerlemesi aşamaları sınır değerleri (%)				
	$\sigma_{cc} / \sigma_c$	$\sigma_{cl1} / \sigma_c$	$\sigma_{cl2} / \sigma_c$	$\sigma_{cs} / \sigma_c$	$\sigma_{cd} / \sigma_c$
A1	5.8-12.6	25.3-42.1	32.9-51.3	64.8-75.8	-
A2	9.0-12.0	21.4-24.7	37.3-53.8	63.0-70.8	72.7-83.3
A3	10.3-19.0	23.0-45.8	64.8-66.0	72.4-79.6	80.5-94.5
A4	12.8-21.4	18.6-38.9	28.1-61.1	43.2-69.8	58.2-73.8
A5	12.0-25.0	36.2-39.6	-	63.2-78.2	-
A6	10.9-13.9	-	-	54.4-77.6	-
A7	7.3-12.9	22.6-38.8	-	63.2-77.7	-
A8	23.9-26.6	-	-	-	-
A9	8.1-14.1	18.2-39.6	-	-	-
A10	13.4-20.6	23.3-28.7	31.8-43.3	36.5-54.1	41.2-?
B1	9.6-20.1	22.1-42.2	45.6-48.7	55-82.9	-
E1	6.6-16.9	21.1-31.1	39.7-61.2	64.4-82.8	76.3-95.1
E2	6.1-8.4	19.9-36.6	47.4-67.3	58.6-80.2	91.6-96.5
E3	4.6-14.1	23.6-31.2	-	70.1-80.5	-
E4	7.8-13.8	18.5-32.3	41.9-47.1	72.2-80.3	-
E5	8.4-17.8	22.3-38.0	44.5-59.1	68.9-77.0	92.1-95.6
E6	16.1-19.3	22.2-37.2	51.6-62.0	67.7-80.3	-
E7	9.1-16.0	27.6-39.3	39.3-62.1	60.7-84.1	87.1-93.3
N1	22.9-35.6	32.6-34.3	45.7-46.9	65.3-71.4	-
N2	14.8-27.6	28.7-43.4	-	65.7-84.2	-
N3	8.1-16.7	25.6-35.6	41.0-46.6	37.5-79.4	-
N4	10.6-26.8	30.8-43.9	-	52.1-81.6	-

$\sigma_{cc}$ : Çatlak kapanımının tamamlandığı ve doğrusal elastik davranışa geçildiği gerilme seviyesi,  $\sigma_{cl1}$ : İksel çatlak ilerlemesinin başladığı seviye,  $\sigma_{cl2}$ : Sistematik çatlak ilerlemesinin başladığı seviye  $\sigma_{cs}$ : Çatlak etkileşiminin başladığı seviye,  $\sigma_{cd}$ : Çatlak hasarının başladığı seviye,  $\sigma_c$ : Tek eksenli sıkışma dayanımı.



Şekil 7.6: Derlenen kaya örnekleri için oranlanmış deformasyon aşaması sınır değerlerinin tek eksenli sıkışma dayanımına bağlı değişimi.

Elde edilen sonuçlara göre; kaya türlerinin deformasyon aşamaları hakkında genel olarak bir fikir edinilmekle birlikte, deformasyon aşaması sınır değerlerinin çoğu örnekte geniş bir aralıkta değişim göstermesi, kayalara uygulanması planlanan önyüklemeye seviyelerinin belirlenmesi açısından güçlükler doğurabilecektir. Bu nedenle, belirlenebilen seviyeler dışında, deformasyon aşamalarını temsil edebilecek gerilme seviyelerinin yaklaşık olarak seçilmesi mümkün görülmektedir.

## 8. LABORATUVARDA ÖNYÜKLEMELER VE KAISER ETKİSİ (KE) SEVİYELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bölüm 3'te değinildiği gibi, arazi gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla, AE deneyinin tek eksenli yükleme koşulu altında yapılmasının uygun olup olmadığı konusunda farklı araştırmacılar tarafından farklı sonuçlar elde edilmiştir (Holcomb ve Martin, 1985; Hughson ve Crawford, 1987; Hardy vd., 1989; Jupe vd., 1992; Seto vd., 1992 ve 1999; Holcomb, 1993, Watanabe vd., 1994; Shen, 1995; Shin ve Kanagawa, 1995; Stuart vd., 1995; Ishiguro vd., 1999; Park vd.; 2001; Pestman vd., 2001, Filiminov vd., 2001; Lavrov vd., 2002a, Villaescusa vd., 2002). Bu çalışmaların bir kısmında, laboratuvarda üç eksenli ön yükleme yapılmış kaya örnekleri üzerinde tek eksenli koşulda AE deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bazı araştırmacılar, yanal gerilmenin KE üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, tek eksenli koşulda AE deneyleri gerçekleştirilerek elde edilen KE seviyesinin karotun alındığı yöndeki arazi gerilmesine karşılık gelmeyeceği üzerinde durulmuştur. Buna karşın bazı çalışmalarda ise, bunun tam tersi yönde bulgular da ortaya konulmuştur.

Yukarıda özetle belirtilen çalışmalarda elde edilen sonuçlara ve değerlendirmelere Bölüm 3'te ayrıntılı olarak değinilmiş ve proje çalışması ağırlıklı olarak bu amaç doğrultusunda şekillendirilmişti. Bu amaca yönelik olarak, önyüklemedeki yanal gerilmenin tek eksenli koşuldaki AE deneyinde belirlenen KE üzerinde etkisinin olup olmadığının araştırılması için, hazırlanan harç ve derlenen kaya örneklerinin (bkz. Bölüm 5) laboratuvarda üç eksenli önyüklemeye maruz bırakılması ve ardından tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapılması planlanmıştır.

Üç eksenli önyükleme yapılan örneklerde tek eksenli koşulda AE deneylerine başlamadan, öncelikle tüm örneklerde yanal gerilme etkisi olmaksızın, tekrarlı tek eksenli yüklemelerin yapılması ve belirlenen KE seviyelerinin bir önceki en büyük gerilmelerden olan sapmalarının belirlenmesi öngörülmüştür. Bu deneyler sonucunda, farklı gerilme seviyelerinde tek eksenli önyüklemelere maruz bırakılmış farklı türdeki örneklerden belirlenen KE seviyelerinin aynı hassasiyette belirlenip belirlenemeyeceği

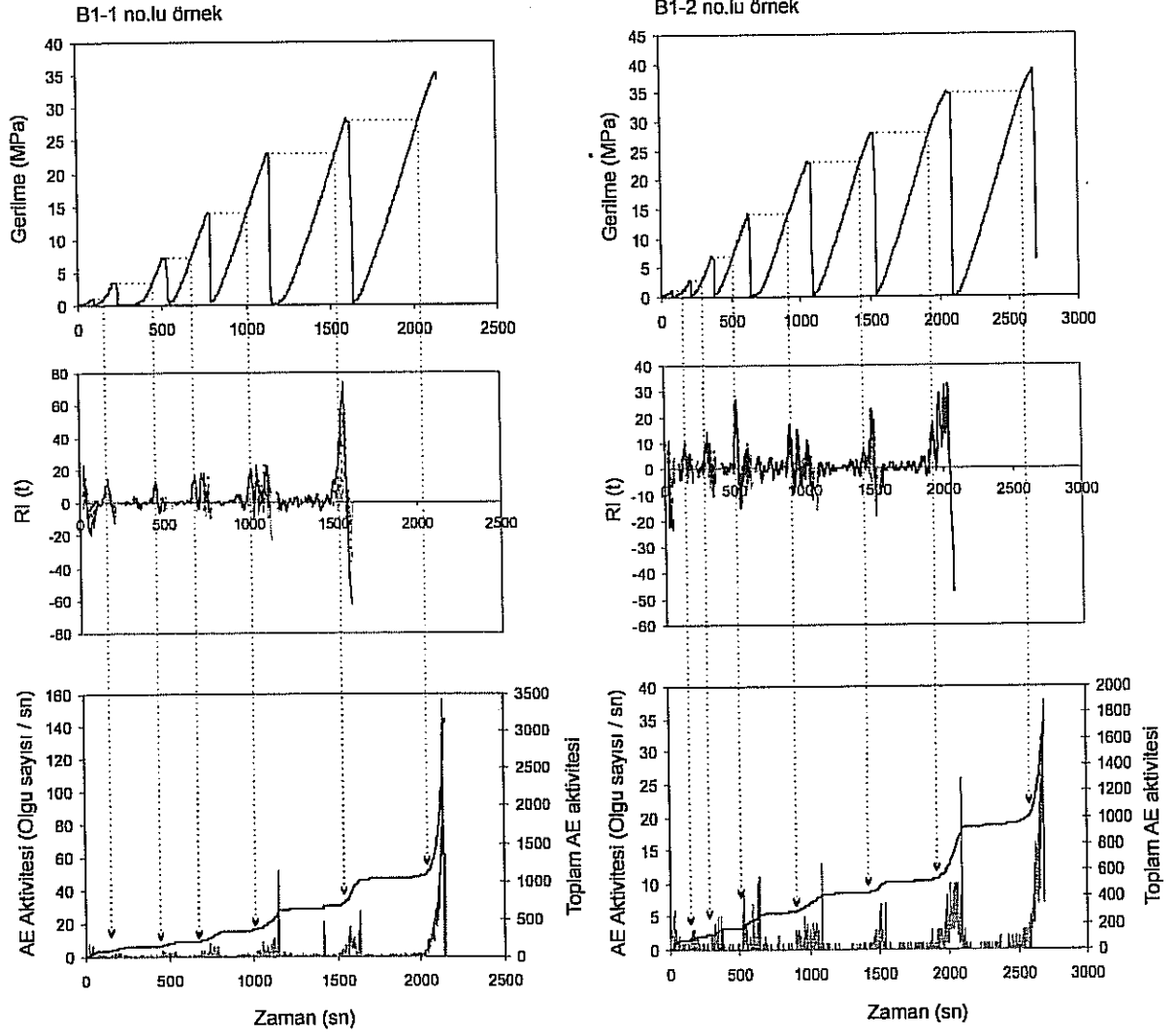
yönünde değerlendirme yapılabilecektir. Ayrıca bu deneyler, harç ve her bir kaya grubu için, üç eksenli önyükleme yapılmış örneklerdeki AE deneylerinden elde edilen "AE Aktivitesi – Zaman – Gerilme" grafikleriyle tekrarlı tek eksenli yüklemelerden elde edilen grafiklerin karşılaştırılması açısından da önem arz etmektedir.

## **8.1. Harç Örneklerinde AE Deneyleri**

### **8.1.1. Tekrarlı tek eksenli yüklemeler ve AE deneyleri**

Bu bölümde sunulan çalışmalarda; harç bloğundan alınan karotlarda tekrarlı tek eksenli yüklemelerin yapılması ve harç örneği için belirlenen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının (bkz Çizelge 7.3a, B1 no.lu örnek) farklı bölümlerine karşılık gelecek şekilde seçilen öngerilmelerin, bir sonraki yüklemelerinde AE ölçümlerinden belirlenen Kaiser Etkisi (KE) seviyesiyle uyumluluğunun araştırılması öngörülmüştür. Bu amaçla, harç örneğinden alınan iki karotta tekrarlı tek eksenli yüklemeler yapılmış ve bu yüklemeler sırasında AE aktivitesi izlenmiştir (Şekil 8.1). Her bir yüklemeler için "zaman - toplam AE aktivitesi" grafiğinin en fazla dönüm yaptığı noktanın ve bu noktaya karşılık gelen gerilme seviyesinin (KE seviyesi) belirlenebilmesi amacıyla Watanabe ve Tano (1999) tarafından önerilen ve AE Aktivitesi (sayısı) artışı  $RI(t)$  olarak bilinen farktan yararlanılmıştır.  $RI(t)$ 'nin belirlenmesine ilişkin ayrıntılı açıklamalar Bölüm 3.1'de verildiğinden, burada bu konuya tekrar değinilmemiştir.

Tekrarlı tek eksenli yüklemelerin her aşamasında uygulanan en büyük gerilmeler ve bir sonraki yüklemelerinde belirlenen KE seviyeleri Çizelge 8.1'de verilmiştir. Harç örneğinde gerçekleştirilen tek eksenli yüklemelerden, 1. ve 2. yüklemeler seviyeleri çatlak kapanımı bölgesinde, 3. yüklemeler çatlak kapanımı veya elastik bölgede, 4. yüklemeler seviyesi birincil çatlak ilerlemesinin geliştiği bölgede, 5, 6 ve 7. yüklemeler ise sonraki deformasyon aşamalarının içinde yer almaktadır. Belirlenen KE seviyelerinin bir önceki yüklemelerin en büyük değerlerinden olan sapmalarını yüzde olarak gösteren grafik Şekil 8.2'de verilmiş olup, bu grafiklerden sapmanın %10'u



Şekil 8.1: Harç örneklerinde gerçekleştirilen tekrarlı tek eksenli yüklemeler ve her bir yükleme aşamasında KE seviyelerinin belirlenmesi.

geçmediği görülmektedir. Yapılan bu deneylerin sonuçları dikkate alındığında, tek eksenli koşulda ön yükleme uygulanmış harç örneklerinde yapılan AE deneylerinden belirlenen KE seviyelerinin önyüklemelerdeki en büyük gerilme değerlerine karşılık geldiğini söylemek mümkündür.

Çizelge 8.1: (a) Yükleme aşamalarındaki en büyük gerilme değerleri ve (b) belirlenen KE seviyeleri.

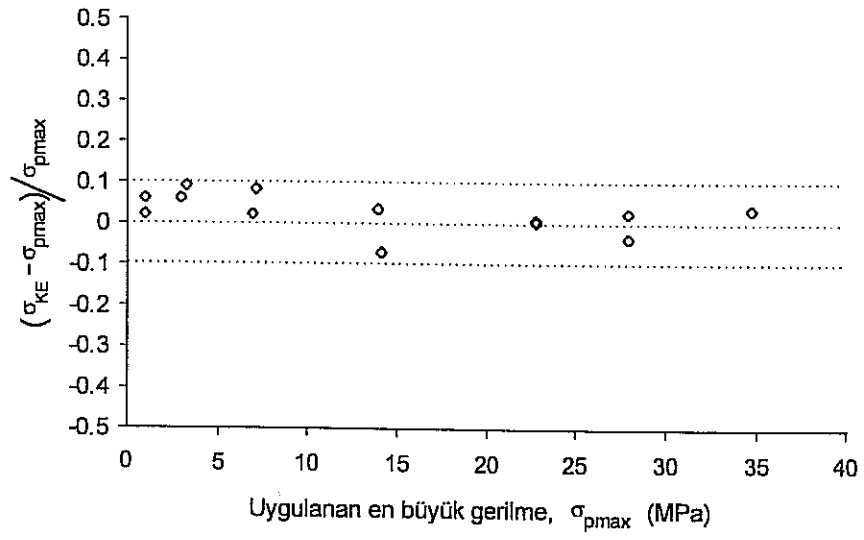
Örnek No.	(a) Yükleme aşamalarındaki en büyük gerilme seviyeleri, $\sigma_{pmax}$ (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
B1-1	1.02	3.3	7.1	13.9	22.8	27.9	35.3	
B1-2	1.02	2.95	6.9	14.1	22.8	27.9	34.7	38.9

Örnek No.	(b) Yükleme aşamalarında belirlenen KE seviyeleri, $\sigma_{KE}$ (MPa)							
	2	3	4	5	6	7	8	
B1-1	1.08	3.9	7.7	14.4	22.9	28.6		
B1-2	1.04	3.13	7.06	13.1	23.04	26.9	35.9	

### 8.1.2. Üç eksenli önyükleme ve tek eksenli koşulda AE deneyleri

Harç örneklerine üç eksenli koşulda önyüklemeler yapılırken, uygulanacak eksenel ve yanal gerilmelerin seçilmesi amacıyla, harç örneği için belirlenen deformasyon aşamalarına ait sınır değerleri dikkate alınmıştır (bkz Çizelge 7.3a: B1 no'lu örnek). Uygulanan üç eksenli önyükleme seviyeleri Çizelge 8.2'de verilmiştir. Harç örneği için belirlenen deformasyon aşaması sınır değerleri gözönünde bulundurulduğunda, önyükleme amaçlı seçilen en büyük eksenel gerilme değerlerinin çatlak kapanımı ( $\sigma_{1p} \approx 3$  MPa), birincil çatlak ilerlemesinin geliştiği aşama ( $\sigma_{1p} \approx 14$  MPa) ve ikincil çatlak ilerlemesi veya çatlak etkileşimi aşamalarına ( $\sigma_{1p} \approx 24$  MPa) karşılık geldiği görülmektedir. Yanal gerilmeler, genel anlamda eksenel gerilme değerlerinin yaklaşık üçte biri ve daha büyük olacak şekilde belirlenmiş olmakla birlikte, daha düşük yanal gerilmelerin uygulandığı önyüklemeler de yapılmıştır. Çizelge 8.2'nin son kolonundan görüleceği gibi, öngerilmelerin farkları ise ( $\sigma_{1p} - \sigma_{3p}$ ), yine deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları dikkate alındığında farklı aşamalara karşılık gelmektedir.



Şekil 8.2: Belirlenen KE seviyelerinin bir önceki yüklemde uygulanan en büyük gerilme değerinden olan yüzde cinsinden farkı.



Çizelge 8.2: Üç eksenli önyüklemeye yapılan örneklerde uygulanan gerilme seviyeleri.

Örnek No.	Eksenel gerilme, $\sigma_{1p}$ (MPa)	Deformasyon/ Çatlak ilerlemesi aşaması	Yanal gerilme, $\sigma_{3p}$ (MPa)	Gerilme farkı, $\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ (MPa)	Deformasyon/ Çatlak ilerlemesi aşaması
B1-T1	2.93	C	1	1.93	C
B1-T2	3.16	C	1	2.16	C
B1-T3	3.09	C	3	0.09	-
B1-T4	3.00	C	3	0.00	-
B1-T5	3.07	C	8	-4.92	-
B1-T6	2.93	C	8	-5.07	-
B1-T7	14.17	G	1	13.17	G
B1-T8	14.11	G	3	11.11	EG
B1-T9	14.51	G	5	9.51	EG
B1-T10	14.18	G	5	9.18	EG
B1-T11	14.27	G	8	6.27	CE
B1-T12	14.17	G	8	6.17	CE
B1-T13	14.16	G	14	0.16	-
B1-T14	14.22	G	14	0.22	-
B1-T15	24.34	G	1	23.34	G
B1-T16	24.16	G	3	21.16	G
B1-T17	24.36	G	3	21.36	G
B1-T18	23.98	G	3	20.98	G
B1-T19	24.29	G	5	19.29	G
B1-T20	23.78	G	8	15.78	G
B1-T21	23.77	G	8	15.77	G

C: Çatlak kapanımı bölgesi, E: Elastik bölge, G: Çatlak ilerlemesi bölgesi NOT: Birlikte kullanılan simgeler (EG, CE), deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarından tam olarak hangi bölgeye düştüğü tespit edilemeyen değerlere karşılık gelmektedir.

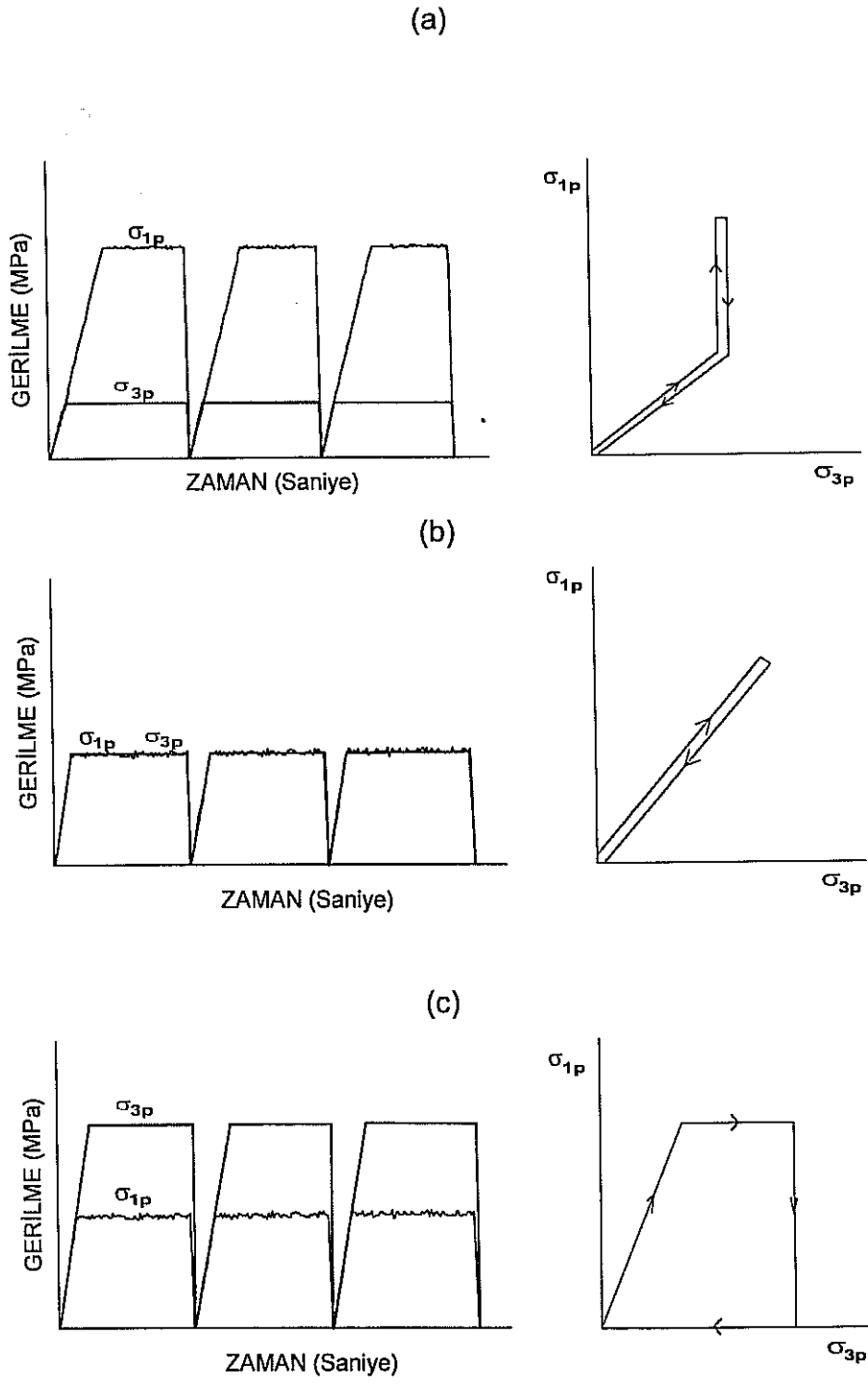
Bu aşamada, yanal ve eksenel gerilmelerin yükleme ve boşaltma işlemleri, üç farklı şekilde gerçekleştirilmiş olup, bu yükleme ve boşaltma işlemlerinde seçilen eksenel gerilmelerin yanal gerilme etkisi olmaksızın kayaya uygulanmamasına özen gösterilmiştir.

*Birinci önyükleme şekli* (Üç eksenli sıkışma,  $\sigma_{1p} > \sigma_{3p}$  koşulunda): Her iki gerilme değeri, yanal gerilme seviyesine kadar birlikte artırılmış ve bu değerde yanal gerilme sabitlenerek, eksenel gerilme en büyük değerine kadar yükseltilmiştir. Örnek, 5 dakika süreyle bu gerilme koşulunda bırakılmış ve önce eksenel gerilme yanal gerilme seviyesine düşürülüp, sonra her iki gerilme değeri sıfıra indirilmiştir (Şekil 8.3a).

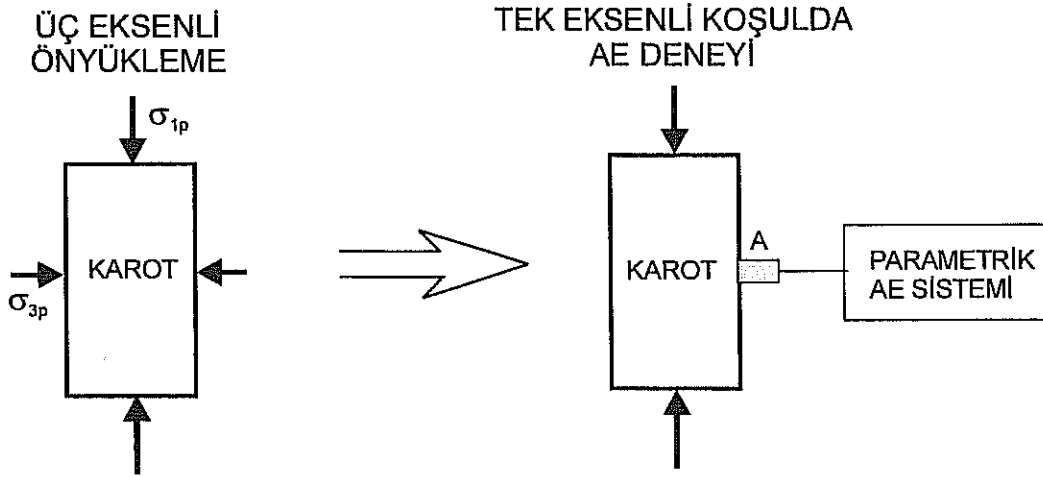
*İkinci önyükleme şekli* (Hidrostatik sıkışma,  $\sigma_{1p} = \sigma_{3p}$  koşulunda): Her iki gerilme en büyük değerlerine kadar yükseltilmiş, örnek 5 dakika bu gerilme koşulunda bırakılmış ve daha sonra her iki gerilme değeri sıfıra indirilmiştir (Şekil 8.3b).

*Üçüncü önyükleme şekli* (Üç eksenli uzama,  $\sigma_{1p} < \sigma_{3p}$  koşulunda): Her iki gerilme değeri, eksenel gerilme seviyesine kadar birlikte artırılmış ve bu değerde eksenel gerilme sabitlenerek, yanal gerilme en büyük değerine kadar yükseltilmiştir. Örnek, 5 dakika süreyle bu gerilme koşulunda bırakılmış ve önce eksenel gerilme sonra da yanal gerilme değeri sıfıra indirilmiştir (Şekil 8.3c) (Normal olarak,  $\sigma_1$  simgesi her zaman  $\sigma_3$  simgesiyle ifade edilenden daha büyük gerilmeler için kullanılır. Ancak bu son yükleme şekli için  $\sigma_{1p}$  eksenel gerilmeyi  $\sigma_{3p}$  ise yanal gerilmeyi ifade etmekte olup, eksenel gerilme yanal gerilmeden daha düşük olmasına rağmen simgelerde değişiklik yapılmamıştır).

Üç eksenli önyükleme yapılmış bu örneklerde, önyükleme boşaltıldıktan hemen sonra tek eksenli koşulda AE deneyleri gerçekleştirilmiş (Şekil 8.4) ve elde edilen gerilme ve



Şekil 8.3: (a) Birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü üç eksenli önyükleme ve boşaltma şekilleri ( $\sigma_{1p}$ : aksenal gerilme,  $\sigma_{3p}$ : yanal gerilme).



$\sigma_{1p}$ : Üç eksenli önyüklemede uygulanan en büyük eksenel gerilme  
 $\sigma_{3p}$ : Üç eksenli önyüklemede uygulanan en büyük yanal gerilme  
 A : Algılayıcı (Transducer)

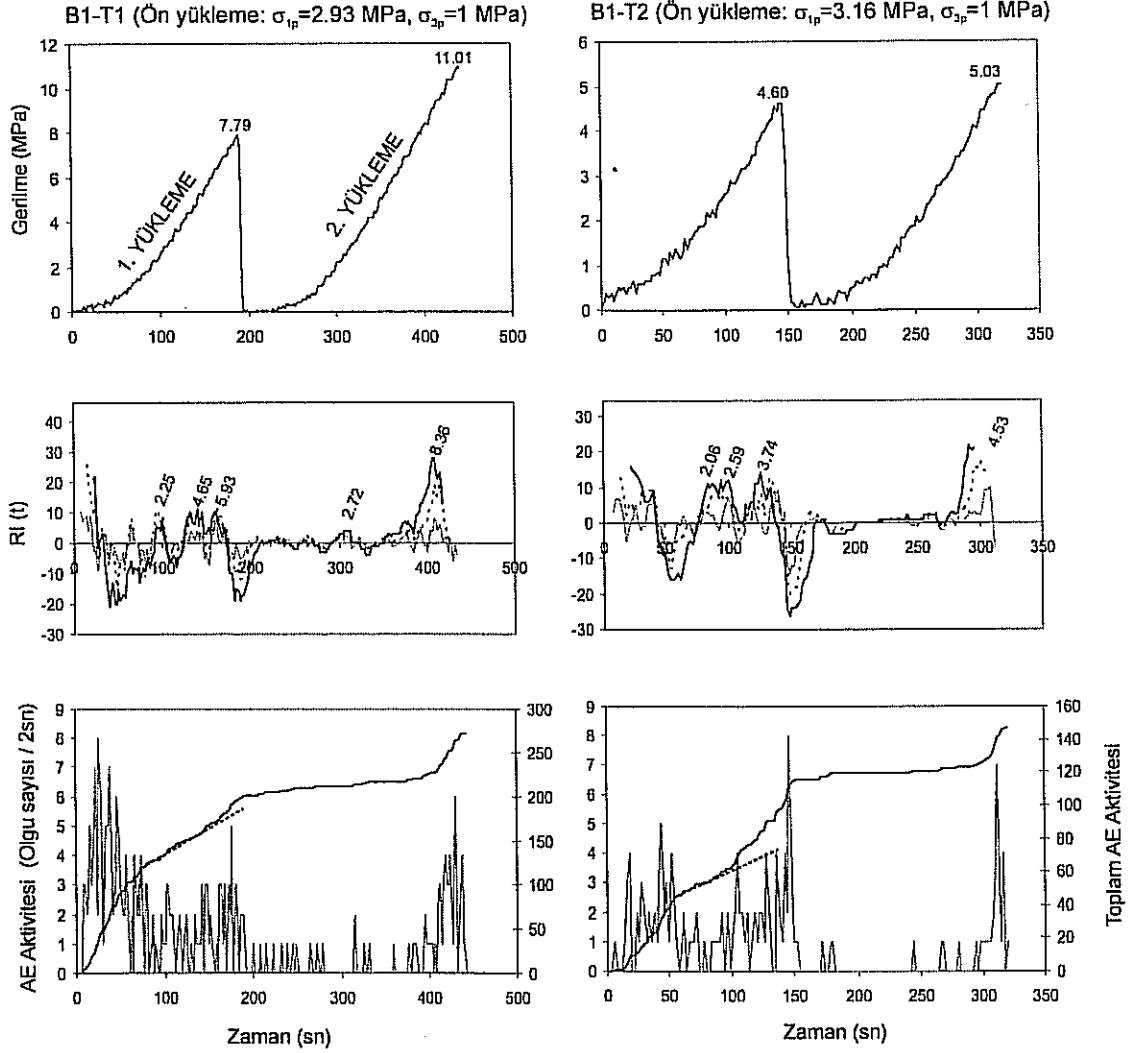
Şekil 8.4: Üç eksenli önyükleme ve arkasından tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapılışı.

AE aktivitesi grafikleri Şekil 8.5-8.15'te verilmiştir. AE deneyleri, arka arkaya iki kez yükleme yapılarak gerçekleştirilmiş (1. ve 2. yükleme) ve değerlendirmeler önce 1., sonra 2. yüklemelerde elde edilen sonuçlara göre aşağıda ayrı ayrı sunulmuştur.

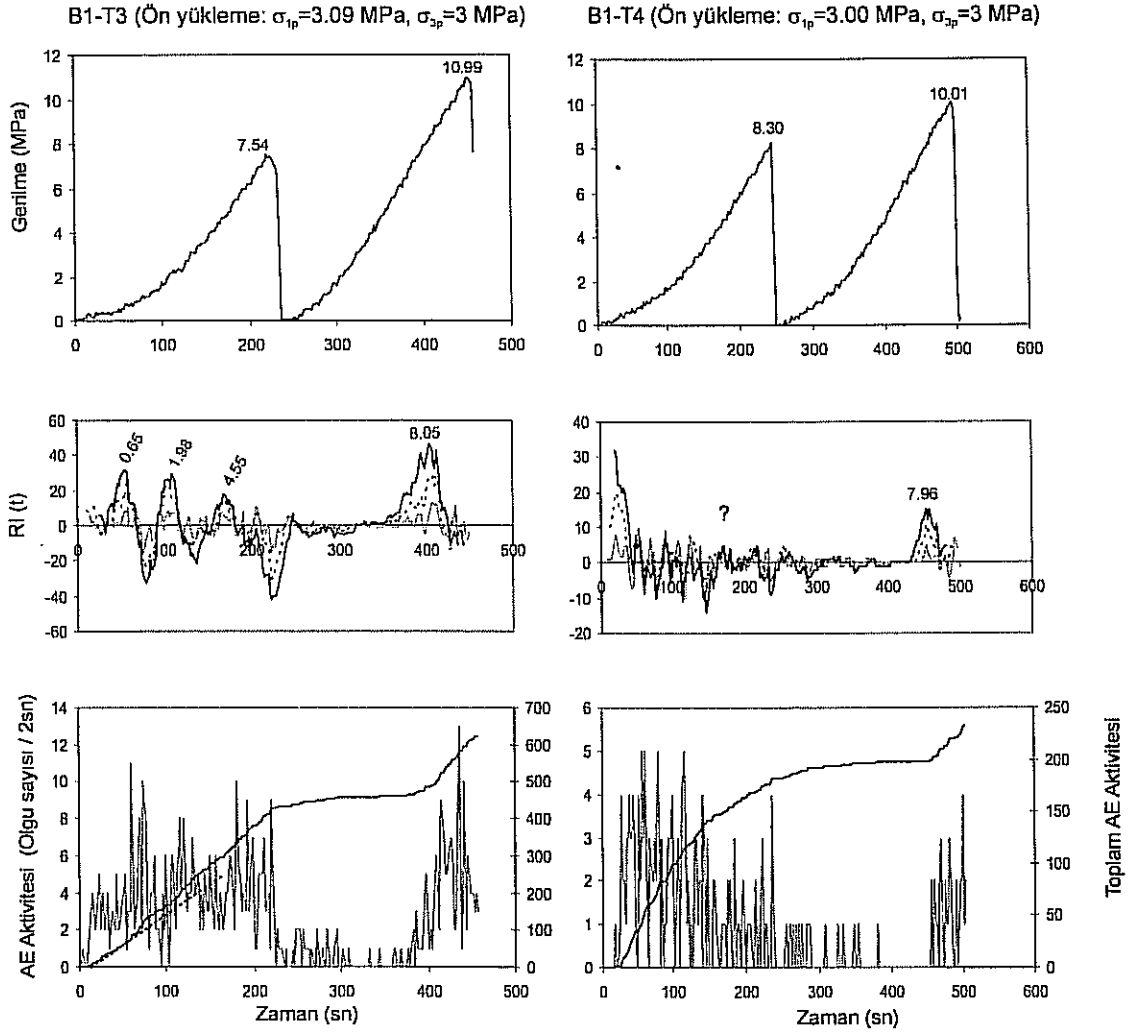
### 1. Yüklemelerdeki AE aktivitesinden elde edilen sonuçlar:

Şekil 8.5 - 8.15'te verilen grafiklerin 1. yüklemesindeki kısımları incelendiğinde, genel anlamda, yanal gerilmelerin aksenal gerilmelere oranları oldukça düşük tutularak önyüklemeye uygulanan karotlarda yapılan AE deneylerinden elde edilen "Zaman – Toplam AE aktivitesi" grafiklerinde çok belirgin dönüm noktalarının varlığı gözlenmektedir. Bu seviyeler, "Zaman -RI(t)" grafiklerinde çok belirgin bir doruk nokta olarak belirmektedir. Önyüklemelerde seçilen yanal gerilmelerin aksenal gerilmelere oranı arttıkça, birbirine yakın RI(t) doruk seviyeleri artmakta ve dönüm noktalarının kesin olarak saptanması güçleşmektedir. Benzer şekilde, hidrostatik basınç uygulanan örneklerde de kesin bir dönüm noktasının varlığını belirlemek güçtür. Bunların aksine, yanal basıncın yüksek olarak tutulduğu bazı örneklerde yapılan AE deneylerinden elde edilen grafiklerden belirgin olarak ayırtedilebilen dönüm noktalarının varlığı ise dikkat çekicidir. Bu nedenle, KE seviyesinin belirlenmesinde aşağıda belirtilen yol izlenmiştir.

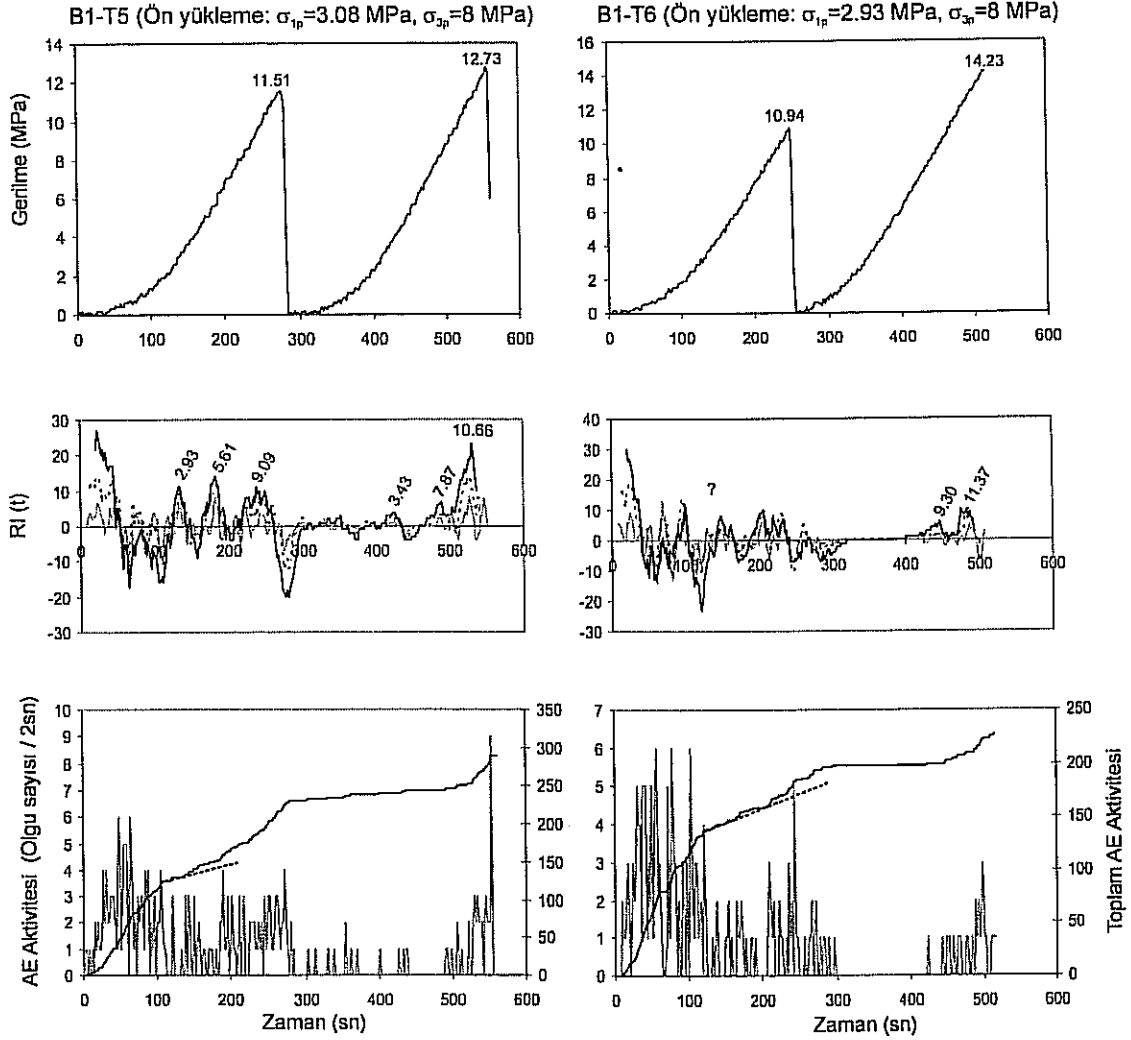
Tekrarlı tek eksenli yüklemelerde (bkz. Bölüm 8.1.1), "Zaman - AE aktivitesi" grafiklerinin en fazla dönüm yaptığı seviyelere karşılık gelen gerilme değerlerinin (KE seviyesi), yaklaşık olarak bir önceki yüklemelerdeki en büyük gerilmelere karşılık geldiği belirlenmiştir (bkz. Şekil 8.1). Bu seviyeler, RI(t) grafiklerinde en yüksek doruk noktalar olarak gözlenmiş ve bu seviyelere değin gözlenen RI(t) değerlerinin ayırt edilemeyecek düzeyde düşük olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, üç eksenli önyüklemeye uygulanmış örneklerde tek eksenli koşulda yapılan AE deneylerinin sonuçları da öncelikle aynı bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Diğer bir ifadeyle, öncelikle RI(t) grafiğinde *belirgin olarak ayırtedilen en büyük doruk noktanın* (Zaman- Toplam AE Aktivitesi grafiğinin en fazla dönüm yaptığı nokta) saptanması ve bu seviyelere



Şekil 8.5: B1-T1 ve B1-T2 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

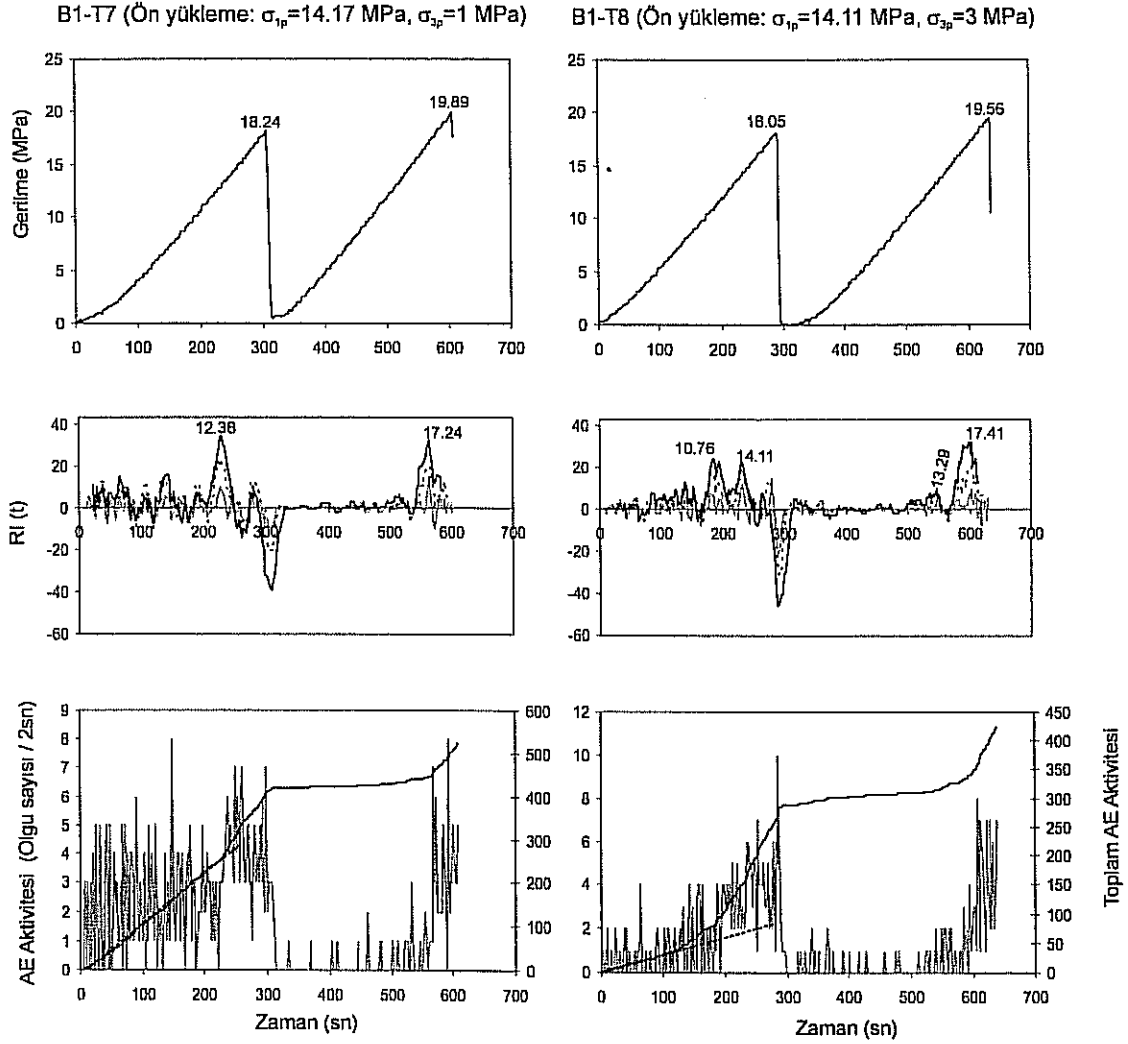


Şekil 8.6: B1-T3 ve B1-T4 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

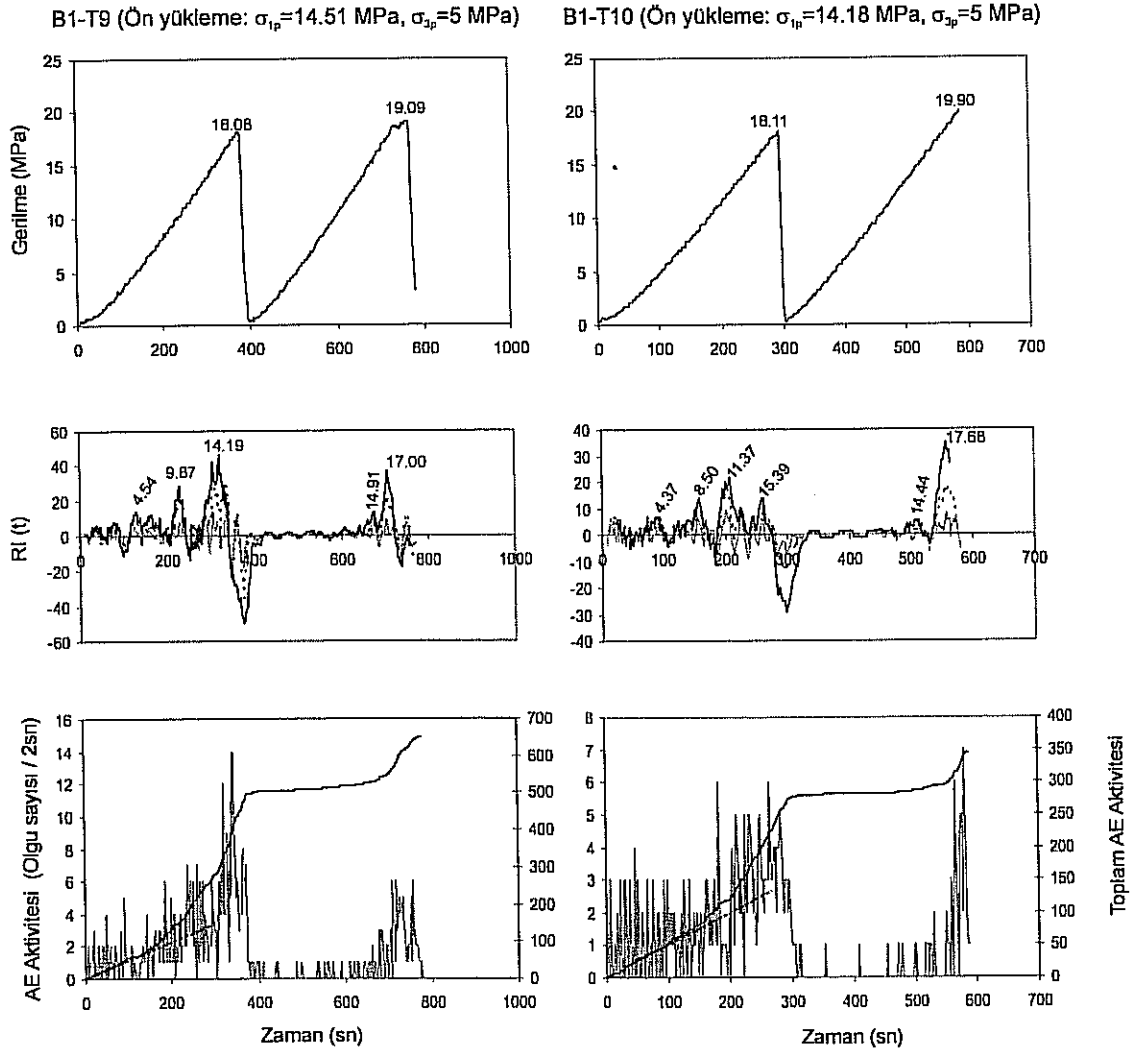


Şekil 8.7: B1-T5 ve B1-T6 no'lu örnekler için tek eksenli yükleme koşullarında yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

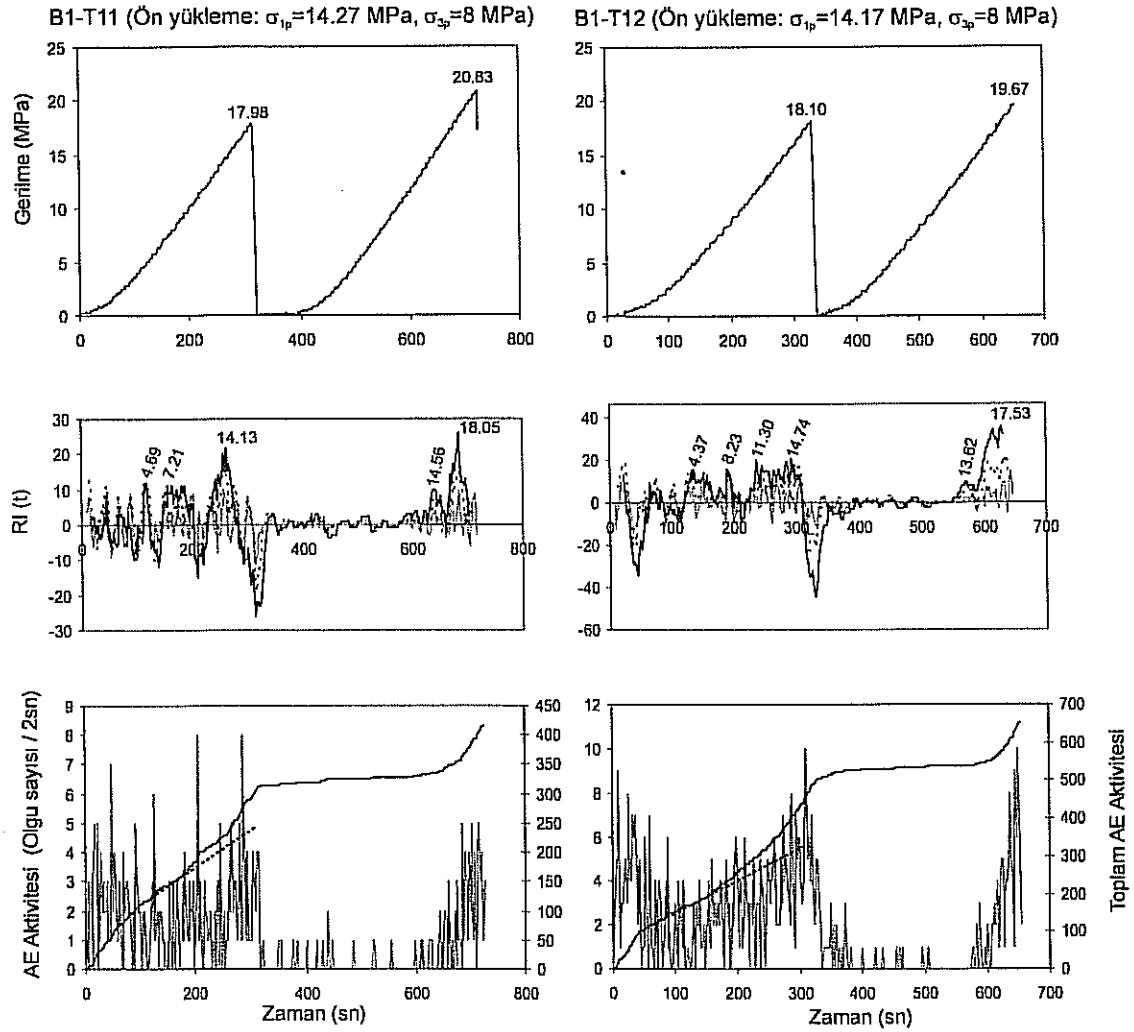




Şekil 8.8: B1-T7 ve B1-T8 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – Ri(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

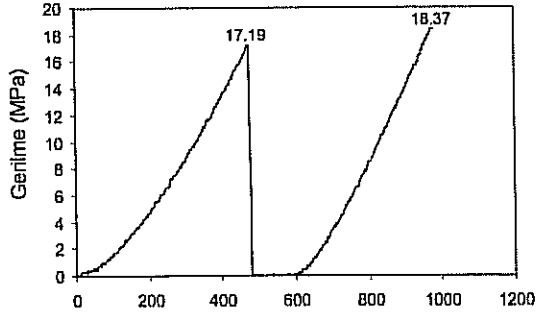


Şekil 8.9: B1-T9 ve B1-T10 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

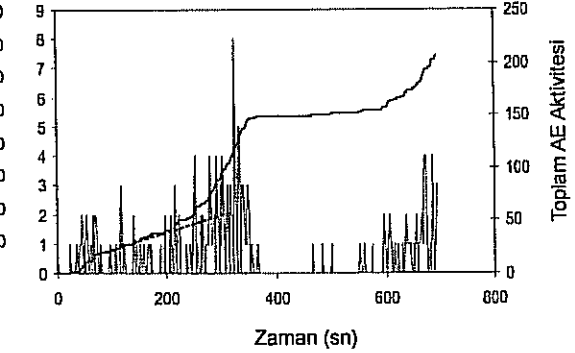
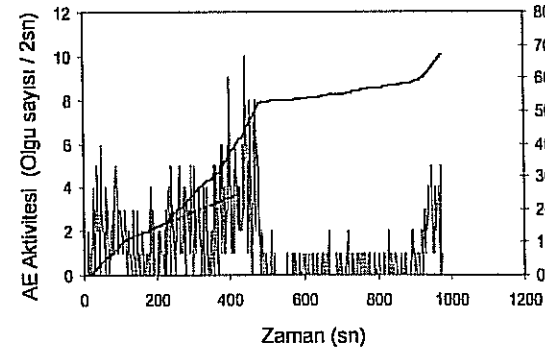
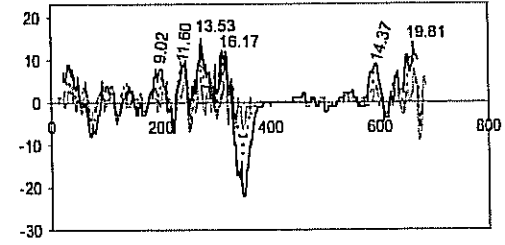
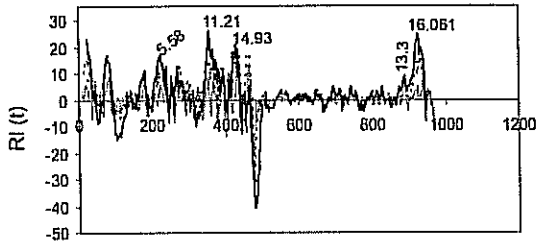
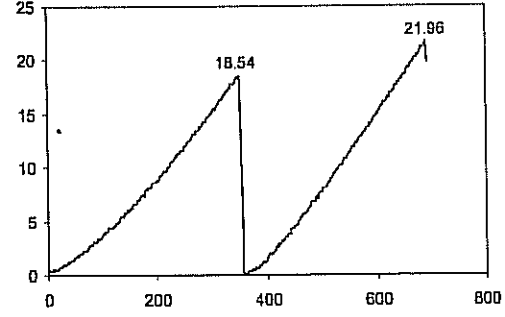


Şekil 8.10: B1-T11 ve B1-T12 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

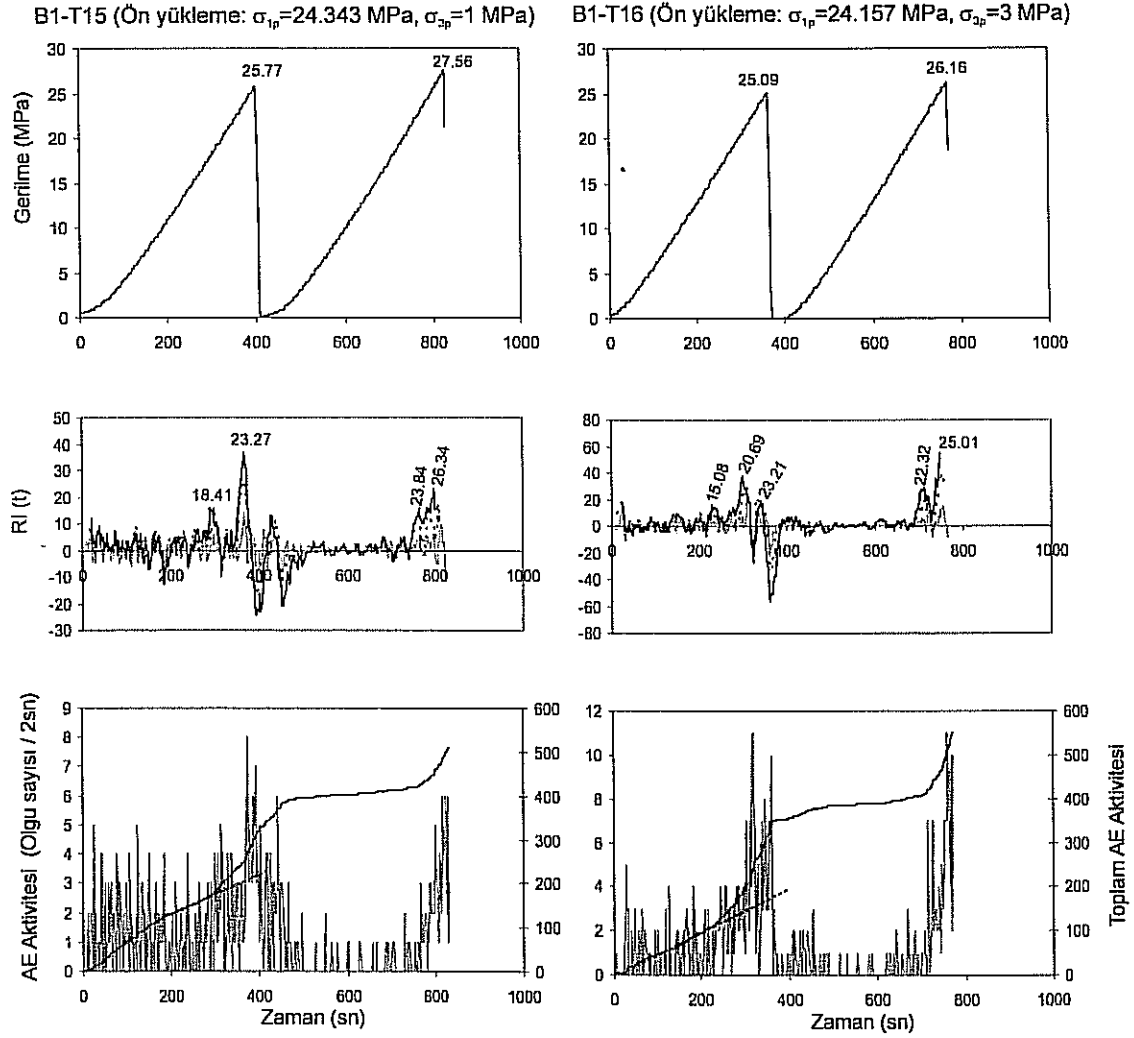
B1-T13 (Ön yükleme:  $\sigma_{1p}=14.16$  MPa,  $\sigma_{3p}=14$  MPa)



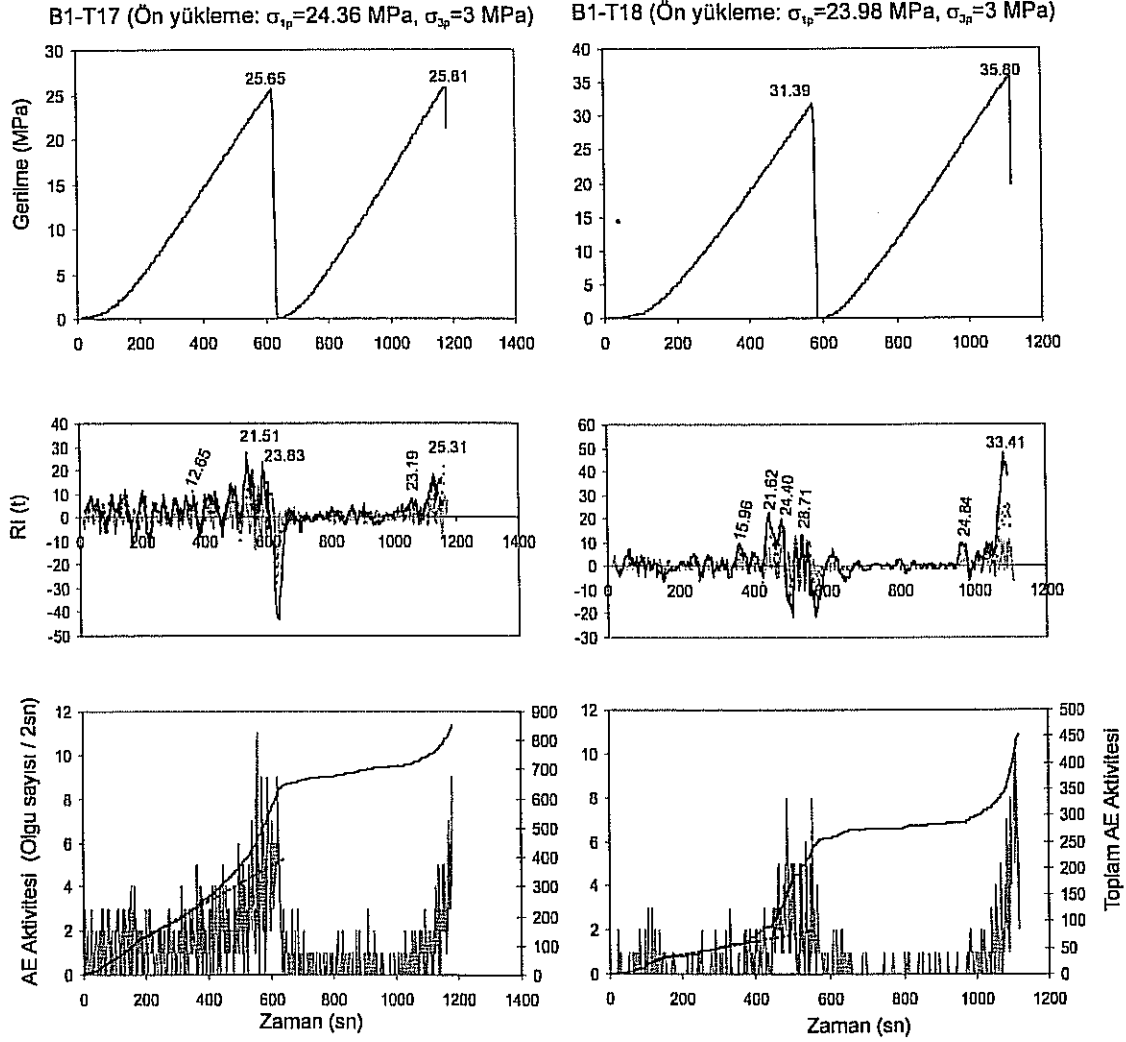
B1-T14 (Ön yükleme:  $\sigma_{1p}=14.22$  MPa,  $\sigma_{3p}=14$  MPa)



Şekil 8.11: B1-T13 ve B1-T14 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

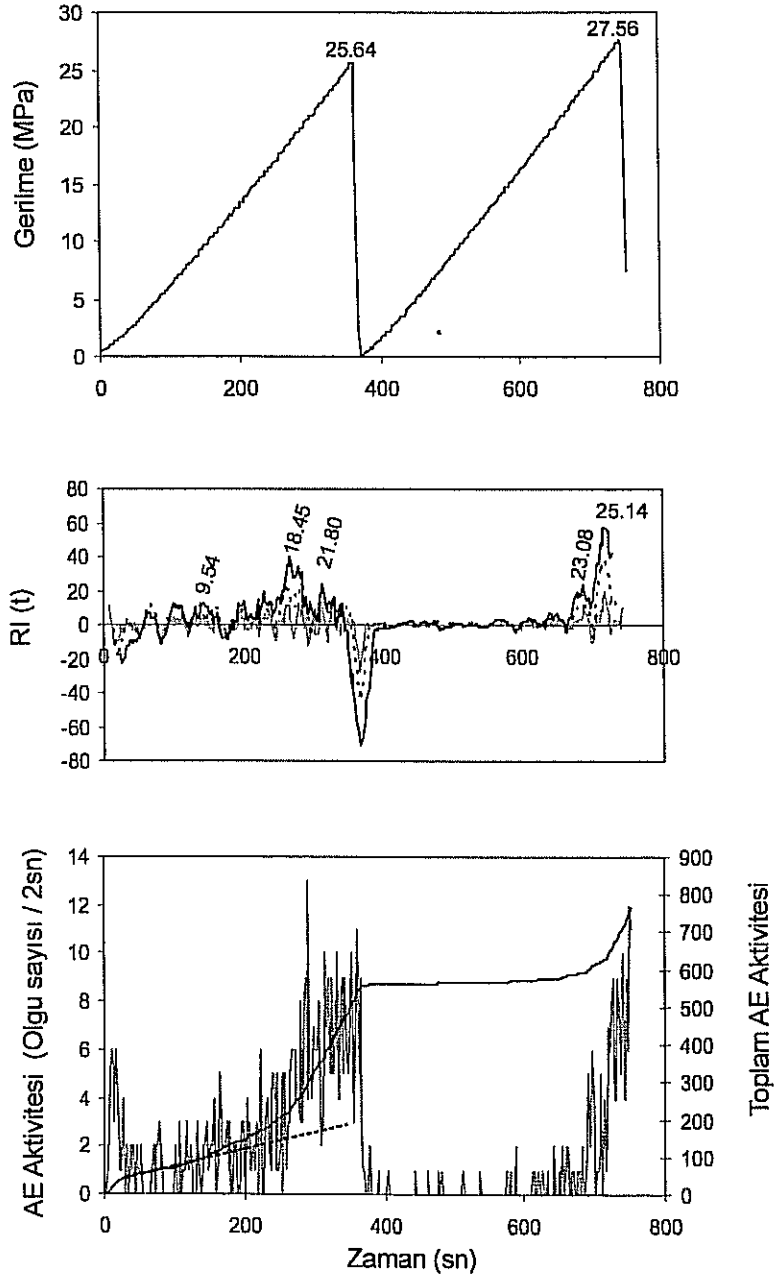


Şekil 8.12: B1-T15 ve B1-T16 no'lu örnekler için tek eksenli yükleme koşullarında yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

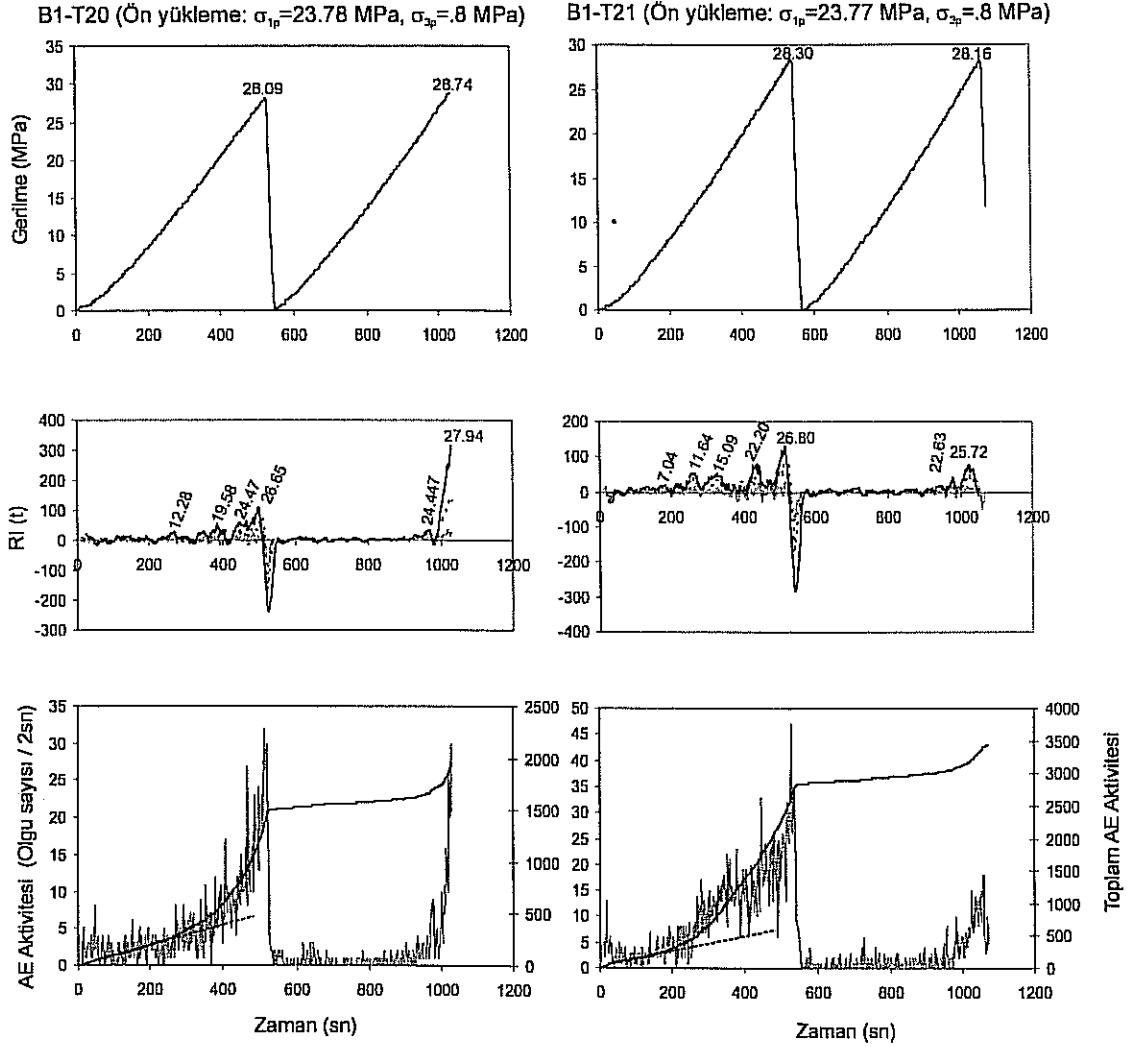


Şekil 8.13: B1-T17 ve B1-T18 no'lu örnekler için tek eksenli yükleme koşullarında yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

B1-T19 (Ön yükleme:  $\sigma_{1p}=24.29$  MPa,  $\sigma_{3p}=5$  MPa)



Şekil 8.14: B1-T19 no'lu örneğe ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.



Şekil 8.15: B1-T20 ve B1-T21 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.



karşılık gelen gerilme değerlerinin (KE seviyesi) belirlenerek yorumlanması öngörülmüştür. Bu değerlendirmede, birbirine yakın doruk noktaların mevcut olması durumunda ilk belirgin doruk seviye gözönünde bulundurulmuştur. Bu bakış açısıyla değerlendirme yapıldığında, Çizelge 8.3'te verilen değerler KE seviyeleri olarak belirlenmiştir.

Çizelge 8.3 incelendiğinde; belirlenen bazı KE seviyelerinin önyüklemedeki aksenal ve yanal gerilmelerin farkına ( $\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ , 9 örnek) oldukça yakın olduğunu söylemek mümkündür. Bununla birlikte, yanal gerilme aksenal gerilmeye eşit veya büyük tutularak önyüklemeye maruz bırakılmış örneklerde gerçekleştirilen AE deneylerinden elde edilen KE seviyelerinin, iki örneğe ait sonuçlar hariç (B1-T5 ve T14), önyüklemede uygulanan gerilmelerden herhangi biriyle veya bunların farklarıyla ilişkilendirilmesi mümkün olamamıştır. Tüm örneklerin dördünde (B1-T5, T9, T11 ve T14) ise, önyüklemedeki aksenal gerilmelerle KE seviyeleri benzerlik taşımaktadır. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi, bu değerlendirmede en büyük  $RI(t)$  doruk noktalarının KE değeri olarak gözönünde bulundurulmuş olmasına rağmen, daha düşük olmakla birlikte, bu seviyelerden önce belirgin seviyelerin varlığı dikkat çekicidir.

$RI(t)$  grafiğinde öncekilere oranla *belirgin olarak gözlenen ilk doruk noktanın* KE seviyesi olarak seçilmesini öngören diğer bir yaklaşımla değerlendirme yapıldığında ise, Çizelge 8.4'te verilen KE değerleri söz konusu olmaktadır. Bu değerlendirme şeklinde aynı zamanda "Toplam AE aktivitesi – Zaman" eğrisine teğet çizilerek eğrinin teğetten ayrıldığı ilk nokta da gözönünde bulundurulmuştur (Şekil 8.5- 8.15, en alttaki grafikler). Çizelge 8.4 incelendiğinde, yanal gerilme aksenal gerilmeye eşit veya büyük tutularak önyükleme yapılmış örnekler (B1-T3, T4, T5, T6, T13, T14) ve seçilen öngerilme değerleri çatlak kapanımı bölgesinde (bkz. Çizelge 8.2, C simgeli örnekler) olan örnekler (B1-T1 ve T6 arası) hariç, diğer örneklerdeki AE deneylerinden elde edilen KE seviyelerinin önyüklemedeki gerilmelerin farkından ( $\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ ) genellikle daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.3: AE deneylerinde 1. yüklemde  $Rl(t)$  grafiğinde *belirgin olarak ayırtedilen en büyük doruk noktanın* KE seviyesi olarak seçilmesini öngören değerlendirme sonuçları.

Örnek No.	Önyükleme			AE Deneyi
	$\sigma_{1p}$ (MPa)	$\sigma_{3p}$ (MPa)	$\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ (MPa)	KE seviyesi, $\sigma_{KE}$ (MPa)
B1-T1	2.93	1	<b>1.93</b>	<b>2.25</b>
B1-T2	3.16	1	<b>2.16</b>	<b>2.06</b>
B1-T3	3.09	3	0.09	0.65
B1-T4	3.00	3	0.00	-
B1-T5	<b>3.07</b>	8	-4.92	<b>2.93</b>
B1-T6	2.93	8	-5.07	1.76
B1-T7	14.17	1	<b>13.17</b>	<b>12.38</b>
B1-T8	14.11	3	<b>11.11</b>	<b>10.76</b>
B1-T9	<b>14.51</b>	5	9.51	<b>14.19</b>
B1-T10	14.18	5	9.18	11.37
B1-T11	<b>14.27</b>	8	6.27	<b>14.13</b>
B1-T12	14.17	8	6.17	4.37
B1-T13	14.16	14	0.16	11.21
B1-T14	<b>14.22</b>	14	0.22	<b>13.53</b>
B1-T15	24.34	1	<b>23.34</b>	<b>23.27</b>
B1-T16	24.16	3	<b>21.16</b>	<b>20.69</b>
B1-T17	24.36	3	<b>21.36</b>	<b>21.51</b>
B1-T18	23.98	3	<b>20.98</b>	<b>21.62</b>
B1-T19	24.29	5	<b>19.29</b>	<b>18.45</b>
B1-T20	23.78	8	15.78	26.65
B1-T21	23.77	8	15.77	26.80

Koyu olarak verilen değerler, birbirine yakın değerlerdir.

Çizelge 8.4: AE deneylerinde 1. yüklemde RI(t) grafiğinde belirgin olarak gözlenen ilk doruk noktanın KE seviyesi olarak seçilmesini öngören değerlendirme sonuçları.

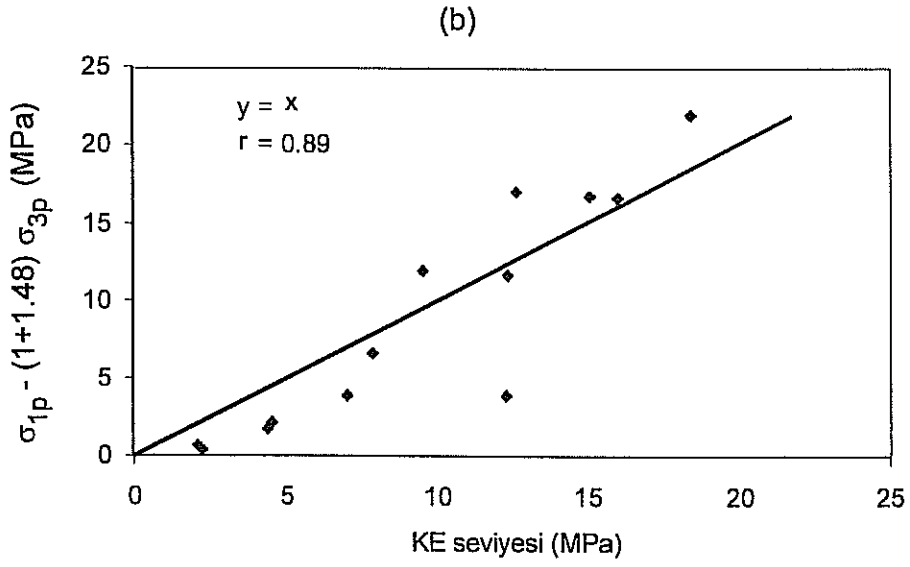
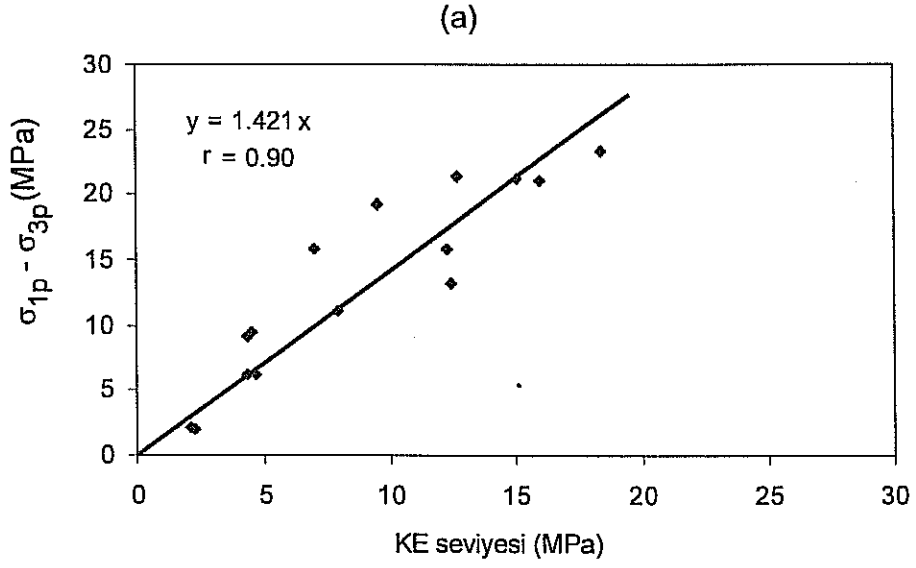
Örnek No	Önyükleme			AE Deneyi
	$\sigma_{1p}$ (MPa)	$\sigma_{3p}$ (MPa)	$\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ (MPa)	$\sigma_{KE}$ (MPa)
B1-T1	2.93	1	1.93	2.25
B1-T2	3.16	1	2.16	2.06
B1-T3	3.09	3	0.09	0.65
B1-T4	3.00	3	0.00	-
B1-T5	<b>3.07</b>	8	-4.92	2.93
B1-T6	2.93	8	-5.07	1.76
B1-T7	14.17	1	13.17	12.38
B1-T8	14.11	3	11.11	7.88
B1-T9	14.51	5	9.51	4.54
B1-T10	14.18	5	9.18	4.37
B1-T11	14.27	8	6.27	4.69
B1-T12	14.17	8	6.17	4.37
B1-T13	14.16	14	0.16	5.58
B1-T14	14.22	14	0.22	9.02
B1-T15	24.34	1	23.34	1.84
B1-T16	24.16	3	21.16	15.08
B1-T17	24.36	3	21.36	12.65
B1-T18	23.98	3	20.98	15.96
B1-T19	24.29	5	19.29	9.54
B1-T20	23.78	8	15.78	12.28
B1-T21	23.77	8	15.77	7.04

Yanal gerilme aksenal gerilmeye eşit veya büyük tutularak önyükleme yapılmış örnekler dışında, diğer tüm örneklerden elde edilen KE seviyeleri ile önyüklemedeki gerilmelerin farkı ( $\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ ) arasındaki doğrusal ilişki Şekil 8.16a'da verilmiştir. En yüksek korelasyon katsayısının elde edildiği doğrunun 1:1 doğrusundan oldukça sapma gösterdiği bu şekilden görülmektedir. Bu nedenle, Filiminov vd. (2001) tarafından kaya tuzları için önerilen ilişkinin geçerli olabileceği varsayılarak, Eşitlik 2.1'deki k katsayısı dikkate alınmış ve Şekil 8.16a'daki verinin 1:1 eğrisine en fazla yaklaşması (en iyi şekilde uyum göstermesi) için gerekli olan k katsayısı belirlenmiştir. Böyle bir değerlendirmeye, k katsayısının 1.48 olması durumunda veri 1:1 eğrisi ile uyum göstermektedir (Şekil 8.16b). İstatistiksel açıdan; böyle bir katsayının değerlendirmede önemli olduğu ön plana çıkarken, bu sonuca tek tür malzemede ulaşılmış olmasından dolayı, benzer yaklaşımların farklı malzemelerde de yapılarak elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

## 2. Yüklemelelerdeki AE aktivitesinden elde edilen sonuçlar:

1. yüklemelerde elde edilen sonuçlara ilişkin ayrıntılı değerlendirmeler, literatürde elde edilen kimi sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, benzer sonuçların sunulduğu çalışmalarda, önyüklemeden sonra tek aksenli koşulda AE deneyleri tek bir yüklemeye gerçekleştirilmiştir. 1992'den bu yana, Seto (Japonya) ve ekibi tarafından yapılan çalışmalarda vurgulanmasına rağmen dikkate alınmayan ve 1. yüklemekten hemen sonra 2. kez AE deneylerinin yapılmasını öngören deneylerden elde edilen sonuçların önemli olup olmadığı hususu da, harç örneğinde yapılan deneylere ait sonuçlar esas alınarak değerlendirilmiştir.

1. yüklemelerin hemen ardından tüm deney örneklerinde 2. yüklemeler yapılmış ve AE aktivitesi bu yüklemelerde de belirlenmiştir (bkz. Şekil 8.5-8.15). 2. yüklemelerdeki AE aktivitesi dikkate alınarak oluşturulan "Zaman - RI(t)" grafiklerinde belirgin olarak ayırtedilen en büyük doruk noktanın 1. yüklemeye örneğe uygulanan en büyük gerilmeye karşılık geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, bazı örneklerdeki deneylerde bu doruk noktalardan hemen önce, az sayıda olmakla birlikte, AE aktivitesinde bir hareketliliğin varlığı gözlenmiştir. 2. yüklemelerdeki en büyük



Şekil 8.16: Belirlenen KE seviyeleri ile (a) önyüklemedeki gerilmelerin farkları ( $\sigma_{1p} - \sigma_{3p}$ ) ve (b)  $\sigma_{1p} - (1+1.48)\sigma_{3p}$  eşitliğinden belirlenen değerler arasındaki doğrusal ilişkiler ( $r$ : korelasyon katsayısı).

( $RI(t)_{max}$ )'a karşılık gelen ve sözü edilen hareketliliğin başladığı ( $RI(t)_{ilk}$ ) gerilmeler dikkate alınarak belirlenmiş KE seviyeleri ve önyüklemedeki eksenel gerilmeler ile AE deneyinin yapıldığı 1. yüklemdeki en büyük gerilme değerleri Çizelge 8.5'te verilmiştir. 2. yüklemelerde, en büyük  $RI(t)_{max}$  değerlerinden hemen önce AE aktivitesinde gözlenen hareketlilik, önyüklemedeki eksenel gerilme ( $\sigma_{1p}$ ) değerleriyle uyumlu gibi görünmektedir. Ancak, gerek  $RI(t)_{max}$ 'ın çok fazla belirgin olması, gerekse hemen  $RI(t)_{max}$  değerinin hemen önünde gerçekleşmesi nedeniyle, bu hareketliliğin 2. yüklemdeki KE seviyesine yaklaşılmasından dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir. Nitekim, tekrarlı tek eksenli yüklemelerin yapıldığı AE deneylerinde de benzer hareketlilik gözlenmiştir. Bu durumun daha ayrıntılı olarak irdelenmesi ve değerlendirilmesi için, kaya örneklerinde yapılacak olan deneylerin sonuçlarının da dikkate alınması gerekmektedir.

Üç eksenli önyüklemelerin üç farklı şekilde uygulanarak (*birinci, ikinci ve üçüncü önyükleme şekli*) ardından tek eksenli koşulda AE deneylerin gerçekleştirildiği uygulamalardan elde edilen sonuçlara yukarıda değinilmiştir. Bu uygulamalarda, önyüklemeler için seçilen yanal gerilmelerin (bkz. Çizelge 8.2) etkisi olmaksızın öngörülen eksenel gerilmelerin örnek üzerinde tek başına etkimesine izin verilmemiştir. Literatürde verilen ve farklı sonuçların alındığı uygulamalarda bu tür yüklemeler yapılmıştır. Önyüklemelerde yanal ve eksenel gerilmenin ayrı ayrı, ya da birinin etkisi olmaksızın diğerinin uygulandığı önceki çalışmalarda (Hughson ve Crawford, 1987; Shin ve Kanagawa, 1995; Stuart vd., 1995) ise, elde edilen sonuçlar arasında farklılık bulunmamaktadır. Yine de, önyüklemelerde yanal ve eksenel gerilmelerin ayrı ayrı uygulandığı birkaç örnek üzerinde AE deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu örneklerde önyükleme şekilleri aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

*Dördüncü önyükleme şekli:* Örnek, önce yanal gerilmenin en yüksek seviyesine kadar yüklenmiş ve 5 dakika süreyle bu gerilme koşulunda bırakılmıştır. Sonra yanal gerilme sıfıra indirilerek eksenel gerilme en büyük değerine kadar yükseltilmiş ve örnek 5 dakika süreyle bu gerilme koşulunda bırakılmıştır. Son

Çizelge 8.5: AE deneylerinde 2. yüklemde en büyük  $(RI(t)_{max})$  ve belirgin olarak gözlenen ilk doruk noktalar  $(RI(t)_{ilk})$  dikkate alınarak belirlenmiş KE seviyeleri.

Örnek No.	Üç eksenli önyüklem			AE deneyleri				
	$\sigma_{1p}$ (MPa)	$\sigma_{3p}$ (MPa)	$\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ (MPa)	1. yükleme (MPa)	KE Seviyesi, $\sigma_{KE}$ (MPa)			
					$RI(t)_{max}$ için	1. yüklemde farkı (%)	$RI(t)_{ilk}$ için	$\sigma_{1p}$ 'den farkı (%)
B1-T1	2.93	1	1.93	7.79	8.36	7.32	-	-
B1-T2	3.16	1	2.16	4.60	4.53	-1.52	-	-
B1-T3	3.09	3	0.09	7.54	8.05	6.76	-	-
B1-T4	3.00	3	0.00	8.30	7.96	-4.10	-	-
B1-T5	3.07	8	-4.92	11.51	10.66	-7.47	7.87	156.35
B1-T6	2.93	8	-5.07	10.94	11.37	3.93	9.30	217.41
B1-T7	14.17	1	13.17	18.24	17.24	-5.48	-	-
B1-T8	14.11	3	11.11	18.05	17.41	-3.55	13.29	-5.81
B1-T9	14.51	5	9.51	18.08	17.00	-5.97	14.91	2.76
B1-T10	14.18	5	9.18	18.11	17.68	-2.37	14.44	1.83
B1-T11	14.27	8	6.27	17.98	18.05	0.39	14.56	2.03
B1-T12	14.17	8	6.17	18.10	17.53	-3.15	13.62	-3.88
B1-T13	14.16	14	0.16	17.19	16.06	-6.57	-	-
B1-T14	14.22	14	0.22	18.54	19.81	6.85	14.37	1.05
B1-T15	24.34	1	23.34	25.77	26.34	2.21	-	-
B1-T16	24.16	3	21.16	25.09	25.01	-0.32	22.32	-7.62
B1-T17	24.36	3	21.36	25.65	25.31	-1.33	-	-
B1-T18	23.98	3	20.98	31.39	33.41	6.44	24.84	3.59
B1-T19	24.29	5	19.29	25.64	25.14	-1.95	23.08	-4.98
B1-T20	23.78	8	15.78	28.09	27.94	-0.53	20.50	-13.79
B1-T21	23.77	8	15.77	28.30	-	-	22.63	-4.80

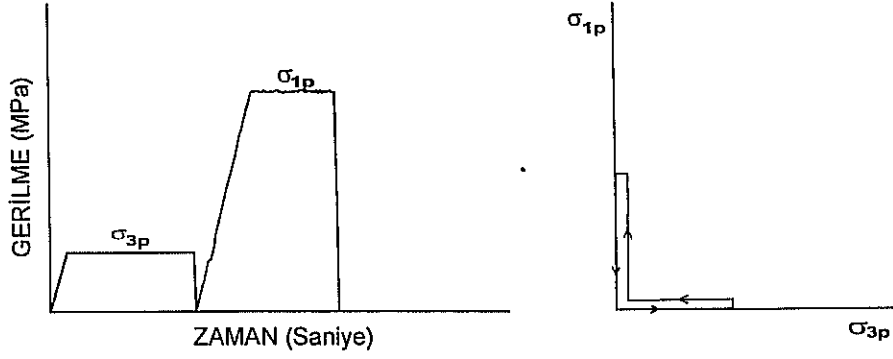
aşamada ise, eksenel gerilme değeri sıfıra indirilmiştir (Şekil 8.17a).

*Beşinci önyükleme şekli:* Örnek, önce eksenel gerilme en büyük seviyesine kadar yüklenmiş ve örnek 5 dakika süreyle bu gerilme koşulunda bırakılmıştır. Sonra eksenel gerilme değeri sıfıra indirilerek yanal gerilme en büyük değerine kadar yükseltilmiş ve örnek 5 dakika süreyle bu gerilme koşulunda bırakılmıştır. Sonra yanal gerilme değeri sıfıra indirilmiştir (Şekil 8.17b).

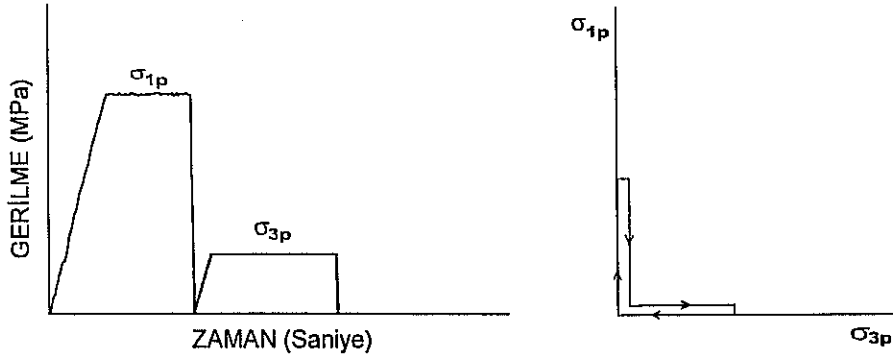
Çizelge 8.6'da, önyükleme sırasında üç örneğe uygulanan yanal ve eksenel gerilme değerleriyle, tek eksenli koşuldaki AE deneylerinden elde edilen KE seviyeleri (Şekil 8.18 ve 8.19) verilmiştir. Şekil 8.18 ve 8.19'dan da görülebileceği gibi, bu deneylerde 2. yüklemeler yapılmamıştır. Bunun nedeni, 1. yüklemelerde elde edilen "Zaman – Toplam AE Aktivitesi" grafiklerinin en fazla dönüm yaptığı ve  $RI(t)$  grafiklerinde belirlenen doruk seviyelerin (KE seviyeleri) önyüklemelerdeki eksenel gerilmelerle çakışmasıdır. Bu deneylerden elde edilen  $RI(t)$  doruk seviyelerinin oldukça belirgin olduğu da dikkati çekmektedir. Şekil 8.10'da verilen B1-T11 ve B1-T12 ve Şekil 8.18'de verilen B1-T22 ve B1-T23 no'lu örneklerde aynı eksenel ve yanal gerilme seviyelerinde önyüklemeler yapılmıştır. Bu örneklerle ilgili Şekil 8.10 ve Şekil 8.18'deki grafikler karşılaştırıldığında, birlikte (*birinci önyükleme şekli*) ve ayrı ayrı önyükleme (*dördüncü ve beşinci önyükleme şekli*) şekillerinin, tek eksenli koşuldaki yüklemelerden elde edilen AE aktivitesini etkilediğini söylemek mümkündür. Şekil 8.10'da birbirine yakın doruk  $RI(t)$  seviyeleri birden fazla iken, doruk noktası Şekil 8.18'de oldukça net olarak ayırtedilebilmektedir. Şekil 8.19'da ise, yanal gerilmenin eksenel gerilmeden fazla olduğu ve beşinci önyükleme şeklinin gerçekleştirildiği B1-T24 no'lu örnek üzerinde yapılan AE deneyinin sonucu görülmektedir. Bu örnekte de B1-T22 ve B1-T23 no'lu örneklerden elde edilenlere benzer sonuçlar alınmıştır.



(a)



(b)



Şekil 8.17: (a) Dördüncü ve (b) beşinci üç eksenli önyükleme ve boşaltma şekilleri ( $\sigma_{1p}$ : aksenal gerilme,  $\sigma_{3p}$ : yanal gerilme).

Çizelge 8.6: Ayrı ayrı önyüklemelerin yapıldığı örneklerle ilişkin yanal ve aksenal gerilme seviyeleri ve bu örneklerde tek aksenli yükleme koşulundaki AE deneyinden belirlenen KE seviyeleri.

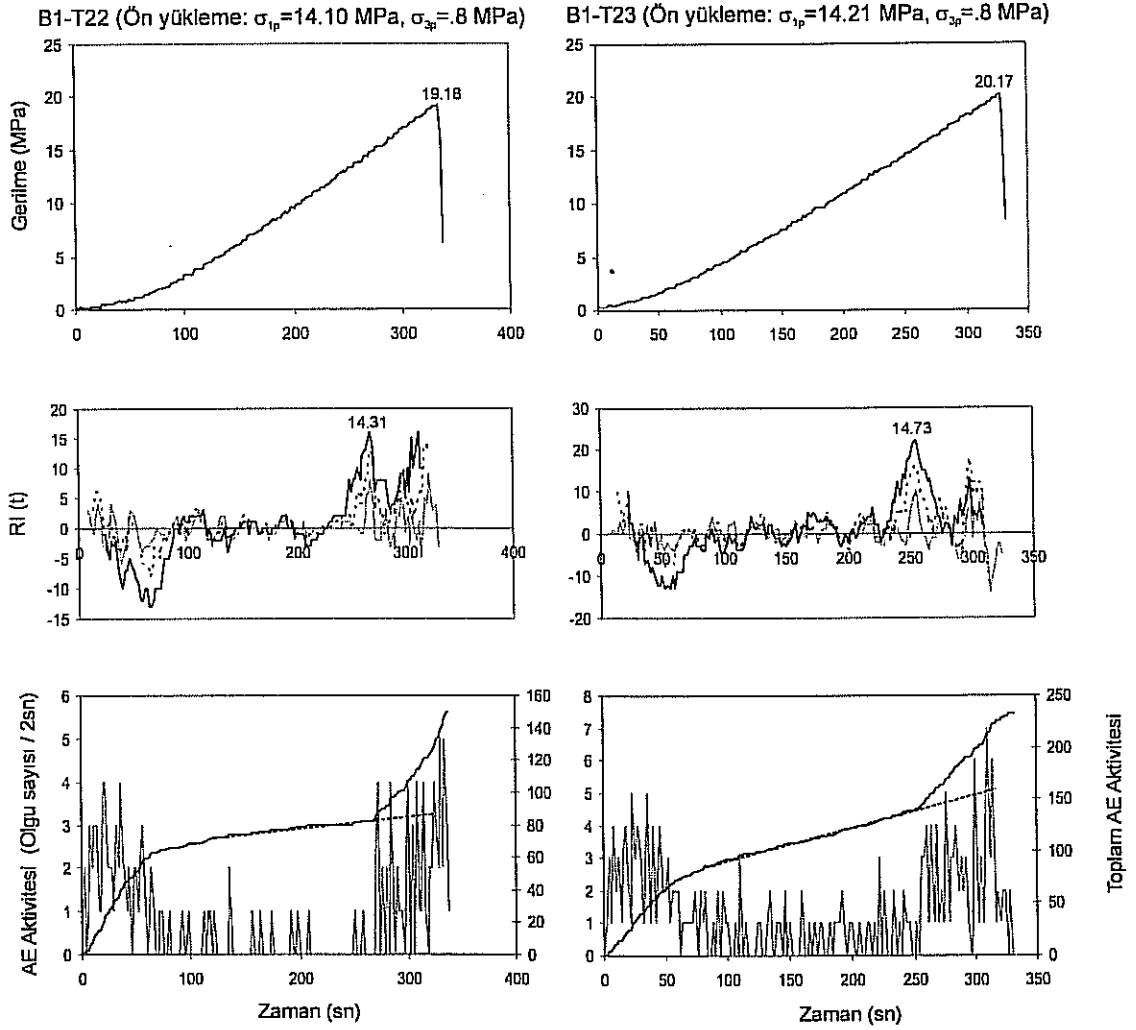
Örnek No	Önyükleme			AE Deneyi
	$\sigma_{1p}$ (MPa)	$\sigma_{3p}$ (MPa)	Önyükleme şekli	KE seviyesi, $\sigma_{KE}$ (MPa)
B1-T22	14.10	8	<i>Dördüncü</i>	14.31
B1-T23	14.21	8	<i>Beşinci</i>	14.73
B1-T24	4.99	8	<i>Beşinci</i>	5.22

Bu deneylerden elde edilen sonuçlar; önyüklemelerdeki yanal ve aksenal gerilmelerin ayrı ayrı uygulandığı örneklerde tek aksenli koşulda AE deneyi yapılarak belirlenen KE seviyelerinin, ilk yüklemelerde dahi (1. yükleme) AE deneyinin yapıldığı yönde uygulanan öngerilmelere karşılık geldiğini göstermektedir. Elde edilen bu sonucun, literatürde elde edilenlerle herhangi bir farklılık göstermemesi nedeniyle, dördüncü ve beşinci önyükleme şekillerinin uygulandığı daha fazla sayıda deneye gerek duyulmamıştır.

### 8.1.3. Genel Değerlendirme

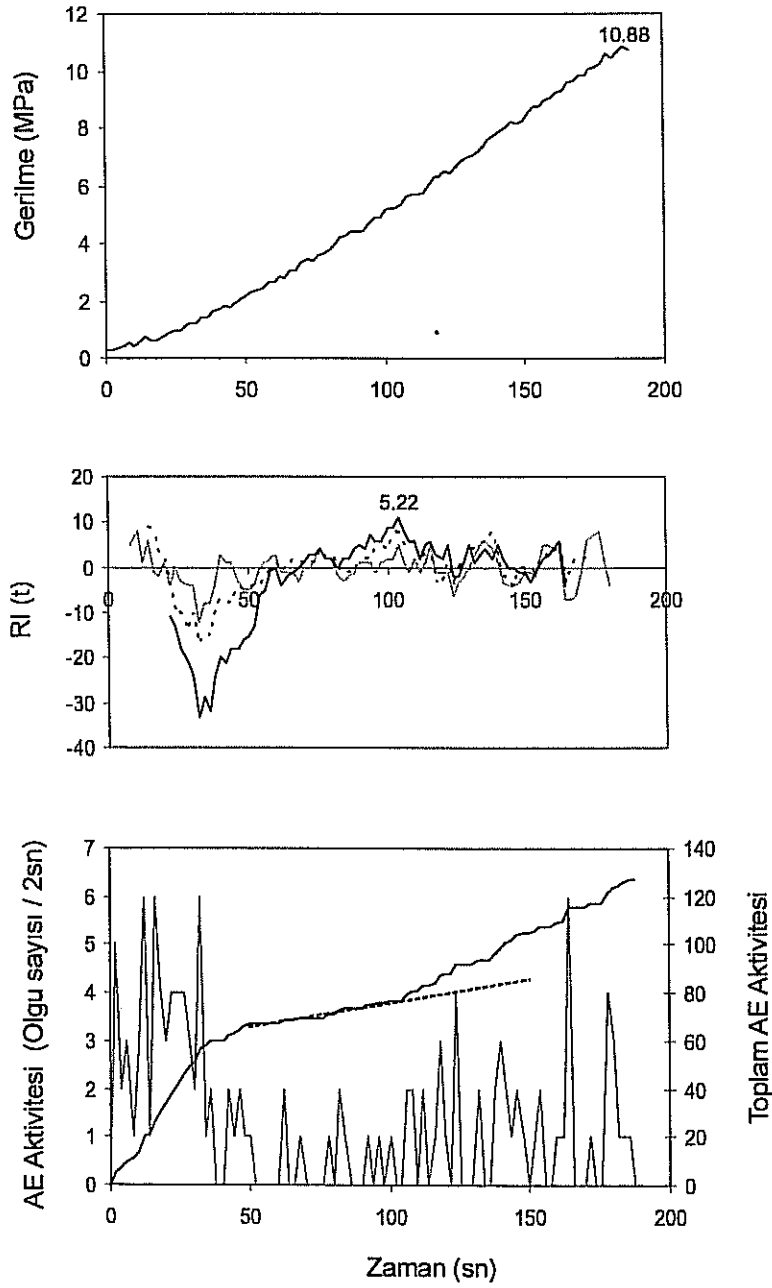
Harç örneklerinde tekrarlı tek aksenli yüklemeler gerçekleştirilerek, tek aksenli önyükleme ve ardından tek aksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen KE seviyelerinin, Kaiser (1953) tarafından belirtildiği gibi, oldukça belirgin olarak önyüklemedeki en büyük gerilme değerlerine karşılık geldiği gözlenmiş ve farklılığın %10'dan daha düşük olduğu ortaya konmuştur.

Üç aksenli önyükleme uygulanmış harç örneklerine ilişkin genel değerlendirme, önyükleme şekilleri dikkate alınarak ayrı ayrı yapılmıştır. Öncelikle *birinci, ikinci ve üçüncü önyükleme şekillerinin* uygulandığı ve aksenal gerilme etkisi olmaksızın yanal gerilmenin örnek üzerinde etkili olmasına izin verilmeyen örneklerdeki deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu tür önyükleme uygulanmış örneklerde tek aksenli koşulda yapılan AE deneyleri tek bir yükleme ile değil, kimi araştırmacıların da



Şekil 8.18: B1-T22 ve B1-T23 no'lu örneklere ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen "zaman – gerilme", "zaman – RI(t)" ve "zaman – AE aktivitesi" grafikleri.

B1-T24 (Ön yükleme:  $\sigma_{1p}=4.99$  MPa,  $\sigma_{3p}=8$  MPa)



Şekil 8.19: B1-T24 no'lu örneğe ait tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneyinden elde edilen "zaman - gerilme", "zaman - RI(t)" ve "zaman - AE aktivitesi" grafikleri.

belirttiği gibi, arka arkaya iki yüklemeyle yapılmış ve her iki yükleme aşamasında KE seviyesi olarak yorumlanabilecek gerilme seviyeleri değerlendirilmiştir. Tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyi yapılarak elde edilen KE seviyesinin üç eksenli önyüklemedeki hangi değere karşılık geldiğini belirlemek amacıyla harç örneklerinde yapılan deneylerle ilgili olarak birden fazla değerlendirmenin söz konusu olabileceği ortaya çıkmıştır.

Bölüm 8.1.2'deki AE deneylerinin (üç eksenli ön yükleme ve ardından tek eksenli koşulda AE deneyleri) **1. yüklemelerinden** elde edilen grafikler ile Bölüm 8.1.1'deki (tekrarlı tek eksenli yükleme ile AE deneyleri) çalışmalardan elde edilen grafikler incelendiğinde, belirlenen AE aktivitelerinde gözle görülür bir farklılığın olduğu dikkat çekmektedir. Tek eksenli önyükleme yapılmış bir örnekte tekrar tek eksenli yükleme ile AE deneyi yapıldığında, önceki en büyük yükleme seviyesine kadar AE aktivitesi gözlenmez ya da çok az iken, bu seviyeden sonra ani ve çok fazla belirgin bir artışın olduğu saptanmıştır. Ancak, üç eksenli önyükleme yapılmış bir örnekte tek eksenli koşulda AE deneyi yapılarak elde edilen AE aktivitesinde görünüş olarak farklılıklar bulunmaktadır. Hiç önyükleme yapılmamış örneklerde AE deneyi yapıldığında çatlak kapanımı davranışı sırasında bol miktarda AE aktivitesi gözlemlendiği ve daha sonra azalma olduğu gerek önceki çalışmalarda (Ohnaka ve Mogi, 1982; Eberhardt vd., 1999), gerekse bu proje kapsamında yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Tek eksenli önyükleme yapılmış bir örnekte tek eksenli koşulda AE deneyi yapıldığında bu davranış gözlenmezken, üç eksenli ön- yükleme yapılmış bir örnekte tek eksenli koşulda AE deneyi yapıldığında benzer davranış genelde gözlenmiştir. Özellikle yanal gerilmelerin eksenel gerilmelere oranla göreceli olarak büyük değerler alması koşulunda bu durum daha da belirginleşmektedir. Ayrıca, üç eksenli önyüklemedeki eksenel / yanal gerilme oranı azaldıkça, daha sonra tek eksenli koşulda yapılan AE deneyinden elde edilen "zaman - toplam AE aktivitesi" grafiğindeki dönüm noktasının, dolayısıyla KE seviyesinin belirlenmesi güçleşmektedir. Bu durumda, "zaman - toplam AE aktivitesi" grafiğindeki dönüm noktasının belirlenmesi amacıyla kullanılan  $RI(t)$  grafiğinde birbirine yakın doruk seviyelerin ortaya çıkması söz konusu olmaktadır. Bu belirlemeler, tek eksenli koşuldaki AE deneylerinden elde edilen KE seviyelerinin

sadece AE deneyinin yapıldığı yönde etkimiş olan öngerilmeye değil, diğer yönlerde de etkimiş öngerilmelere bağlı olarak farklılık gösterebileceğine işaret etmektedir. Bölüm 8.1.2'de değinildiği gibi, tek eksenli yükleme koşulunda 1. yüklemelerde belirlenen KE seviyelerinin; önyüklemede uygulanan gerilmelerin farkıyla ( $\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ ), ya da Filiminov vd. (2001) tarafından belirtildiği gibi,  $\sigma_{1p}-(1+k)\sigma_{3p}$  eşitliğinden elde edilen verilerle uyumlu olduğu yönünde bir sonuca ulaşılması mümkündür. Ancak, 1. yüklemelerde belirgin olarak gözlenen ilk doruk nokta, ya da teğetten ayrılan ilk noktanın KE seviyesi olarak esas alınması doğru bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir. Çünkü, KE seviyesi, Kaiser (1953) tarafından önerildiği şekliyle ve tanımı gereği, belirgin olarak gözlenen ilk dönüm noktasına karşılık gelmek zorundadır. Hiçbir önyükleme yapılmamış dahi olsa, bir örneğin yüklenerek AE deneyi yapılması sürecinde gerilmenin artması ile AE aktivitesinin sürekli artan bir davranış içinde olduğu bilinmektedir. Bölüm 7'de verilen deformasyon ve çatlak ilerlemesi süreçlerinde AE davranışına ilişkin tanımlamalar da bu saptamayı desteklemektedir. Bu nedenle, üç eksenli önyüklemeye ve dolayısıyla bir etkiye maruz bırakılan bir örnekte yapılan AE deneyinde belirgin olarak gözlenen ilk  $RI(t)$  doruk noktasının KE olarak alınması gerekmektedir. Aksi bir yaklaşıma gidilmesi (en büyük  $RI(t)$  değerinin KE olarak değerlendirilmesi) durumunda, belirlenen KE değerinin örneğe uygulanan önceki gerilmelerle değil, bunun yerine AE aktivitesinin çatlak ilerlemesi süreçlerinde sürekli artması ve aşama geçişlerinde belirgin olarak artış göstermesi gibi nedenlerden dolayı örneğin kırılma süreçlerinden herhangi biriyle ilişkilendirilerek hata yapılması olasıdır. Bu nedenlerden dolayı, ilk  $RI(t)$  seviyesinin KE olarak alınması gerekmekte olup, bu açıdan bir değerlendirme yapıldığında belirlenen KE seviyelerinin  $\sigma_{1p}-(1+k)\sigma_{3p}$  eşitliğinden elde edilen verilerle ( $k=1.48$ ) uyumlu olabileceği ortaya çıkmakla birlikte, farklı türde malzemelerde de bu tür deneylerin yapılması bu sonucun desteklenmesi açısından önemlidir. Dolayısıyla, bu sonucun geçerliliğinin sınanması için, derlenen kaya türlerinde de bu deneylerin gerçekleştirilmesi önem kazanmaktadır.

AE deneylerinin yapıldığı 1. yüklemenin hemen ardından uygulanan **2. yüklemelerde ise, belirgin olarak gözlenen  $RI(t)$  doruk noktalarının** (2. yüklemedeki KE seviyesi) 1.

yüklemelerde uygulanan en büyük gerilmelere karşılık geldiği görülmüştür. Bu seviyelerden hemen önce AE aktivitesinde az miktarda bir hareketliliğin gözlemlendiği dikkat çekmektedir. Bu hareketliliğin KE seviyesi olarak değerlendirilmesi durumunda ise, KE seviyesinin üç eksenli önyüklemedeki eksenel gerilmeye ( $\sigma_{1p}$ ) karşılık geldiği gibi bir yorumun yapılması mümkün olabilmektedir. Ancak, bu hareketliliğin en büyük doruk RI(t) noktaya oranla oldukça belirsiz olması ve benzer aktivitenin tekrarlı tek eksenli yüklemelerdeki AE deneylerinde de belirlenmesi nedeniyle doğrudan  $\sigma_{1p}$  ile ilişkilendirilmesi doğru görünmemektedir. Elde edilen bu sonucun da geçerliliğinin sınanması bakımından AE deneyleri, kaya türlerinde de arka arkaya 2 kez yapılan yüklemelerle gerçekleştirilmiştir.

Üç eksenli önyüklemelerdeki yanal ve eksenel gerilmelerin ayrı ayrı uygulandığı örneklerde ise, tek eksenli koşulda AE deneyi yapılarak belirlenen KE seviyelerinin, ilk yüklemelerde dahi (1. yükleme) AE deneyinin yapıldığı yönde uygulanan öngerilmelere karşılık geldiği saptanmıştır.

## **8.2. Derlenen Kaya Örneklerinde AE Deneyleri**

### **8.2.1. Tekrarlı tek eksenli yükleme ve AE deneyleri**

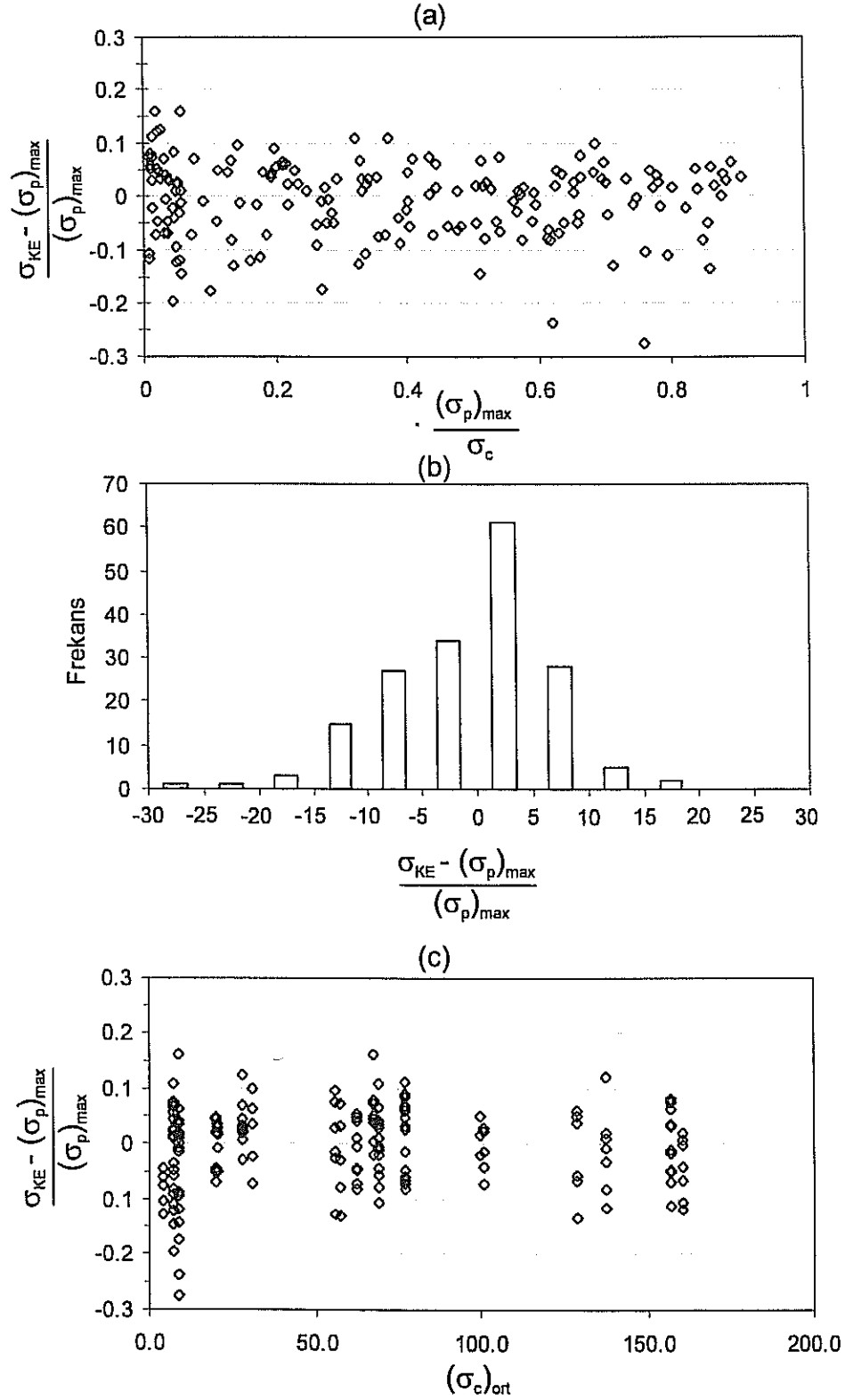
Harç örneklerinde uygulandığı gibi, derlenen kaya örneklerinde de tekrarlı tek eksenli yüklemeler ve AE deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı yükleme aşamalarının en büyük gerilme seviyeleri seçilirken, kaya örnekleri için belirlenen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları dikkate alınmıştır. Kaya bloklarından alınan karot örneklerinin sayısının harç örneğinden alınanlar kadar fazla olmaması nedeniyle, deneyler bazı kaya türleri için iki, bazıları içinse bir adet örnek üzerinde yapılmıştır. AE deneylerinin sonuçlarından elde edilen "Toplam AE Aktivitesi – Zaman – Gerilme" grafiklerinde KE seviyesinin belirlenmesi amacıyla, harç örneklerinde olduğu gibi, Watanabe ve Tano (1999) tarafından önerilen AE aktivitesi artışı RI(t) olarak bilinen farktan yararlanılmıştır. Toplam 29 adet örnekte 181 kez tekrarlı tek eksenli yükleme

ve AE deneyi yapılmış olup, yüklemelerin her aşamasında uygulanan en büyük gerilmeler ve belirlenen KE seviyeleri EK 1'de verilmiştir.

Elde edilen sonuçların tümü istatistiksel olarak değerlendirilmiştir (Şekil 8.20). KE seviyelerinin bir önceki yüklemelerdeki (önyükleme) en büyük gerilmelerden (öngerilme) olan % farkları ile tek eksenli sıkışma dayanımına oranlanmış önyükleme seviyelerinin değişimi Şekil 8.20a'da, 181 deneye ait % farkların frekansları da 8.20b'de verilmiştir. Bu sonuçların %85'inin %10'luk, %96'sının ise %15'lik farktan daha az olduğu belirlenmiştir. Şekil 8.20a'da görülebileceği gibi, deneylerde kullanılan kaya örnekleri, tek eksenli sıkışma dayanımlarının yaklaşık olarak %90'ına kadar önyüklemelere maruz bırakılmış olup, KE seviyelerinin önyükleme seviyelerine %10 ila 20 arasında bir yakınlıkla belirlendiği görülmektedir. Şekil 20c'de ise, belirlenen % farkların kaya örneklerinin ortalama tek eksenli sıkışma dayanımlarına bağlı değişimi verilmiştir. Bu grafiğe göre, genel olarak tüm kaya örnekleri için benzer farklar elde edilmiş olmakla birlikte, düşük dayanımlı kaya örneklerindeki deneylerden elde edilen farkların % 15'i geçtiği görülmektedir. Bu deney sonuçları, N2, N3 ve N4 no'lu tuf örneklerinden elde edilmiştir (bkz. EK 2).

Harç örneklerinde yapılan deneylerde de önyüklemelerden %10'dan daha az bir farkla KE seviyeleri belirlenebilmişti. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, tek eksenli önyüklemeye maruz kalmış bir kaya örneği tekrar tek eksenli koşulda yüklenerek AE deneyi yapıldığında, belirlenen KE seviyelerinin malzemenin maruz kaldığı önceki yüke karşılık geldiği görülmektedir. Ayrıca, önyükleme seviyesinin kaya örneklerinin deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarından herhangi birine karşılık gelmesi sonucu değiştirmemektedir. Ancak bu çalışma kapsamında, örnekler tek eksenli önyüklemelere belirli süreler maruz bırakılmamış ve tek eksenli koşuldaki AE deneyleri hemen önyüklemeden sonra yapılmıştır. Bu nedenle, yapılan bu son yorumun bu şekilde yapılmış deneyler için geçerli olduğu bilinmelidir. Çünkü, özellikle çatlak kapanımı bölgesinde önyükleme yapılan örneklerin belirli süreler bekletildikten sonra tekrar tek eksenli koşulda yüklenmesi durumunda aynı sonuçların alınıp





Şekil 8.20: Kaya örneklerinde belirlenen KE seviyelerinin bir önceki yüklemeye uygulanan en büyük gerilme değerinden yüzde olarak farklarının; (a) önceki yüklemeye uygulanan en büyük gerilmenin tek eksenli sıkışma dayanımına oranına, (b) frekans dağılımına ve (c) tek eksenli sıkışma dayanımına bağlı olarak değişimi.

alınamayacağı yönünde bir sonuca, yapılan bu deneylerden sonra varılması doğru değildir.

### 8.2.2. Üç eksenli önyükleme ve tek eksenli koşulda AE deneyleri

Harç örneklerinde yapılan uygulamalar ve elde edilen sonuçlar dikkate alınarak, derlenen kaya örneklerinde üç eksenli koşulda önyüklemelerde uygulanacak eksenel ve yanal gerilmelerin seçilmesi amacıyla, kaya örnekleri için belirlenen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının sınır değerleri dikkate alınmıştır (bkz. Çizelge 7.3a). Uygulanan üç eksenli önyükleme seviyeleri EK 2'de verilmiştir. Kaya örnekleri için belirlenen deformasyon aşaması sınır değerleri gözönünde bulundurulduğunda, önyükleme amaçlı seçilen en büyük eksenel gerilme değerlerinin çatlak kapanımı (C), elastik (E) ve çatlak gelişiminin (G) gözlemlendiği aşamalarda yer aldığı görülmektedir (EK 2). Yanal gerilmeler, genel anlamda eksenel gerilme değerlerinin yaklaşık onda biri ve daha büyük değerler olacak şekilde belirlenmiş ve yine deformasyon ve çatlak gelişimi aşamaları dikkate alındığında, gerilmelerin farkları ( $\sigma_{1p}-\sigma_{3p}$ ) farklı aşamalara karşılık gelecek şekilde önyüklemeler uygulanmıştır.

Yanal ve eksenel gerilmelerin yükleme ve boşaltma işlemleri, harç örneklerinde uygulandığı gibi, üç farklı şekilde gerçekleştirilmiş (bkz. Bölüm 8.1.2; *Birinci, ikinci ve üçüncü önyükleme şekilleri*) ve bu yükleme ve boşaltma işlemlerinde seçilen eksenel gerilmelerin yanal gerilme etkisi olmaksızın örneklere uygulanmamasına özen gösterilmiştir. Harç örneklerinde gerçekleştirilen *dördüncü ve beşinci önyükleme* şekli ve AE deneyleri, gerek harç örneklerinden elde edilen sonuçlar gerekse literatürde bu tür uygulamalardan elde edilen sonuçların farklılık göstermemesi nedeniyle, kaya örneklerinde yapılmamıştır. Kaya karot örneklerinin sayısının harç örneklerindeki kadar fazla olmaması nedeniyle, harç örneğinde yapılanlara oranla daha az sayıda deney yapılmıştır.

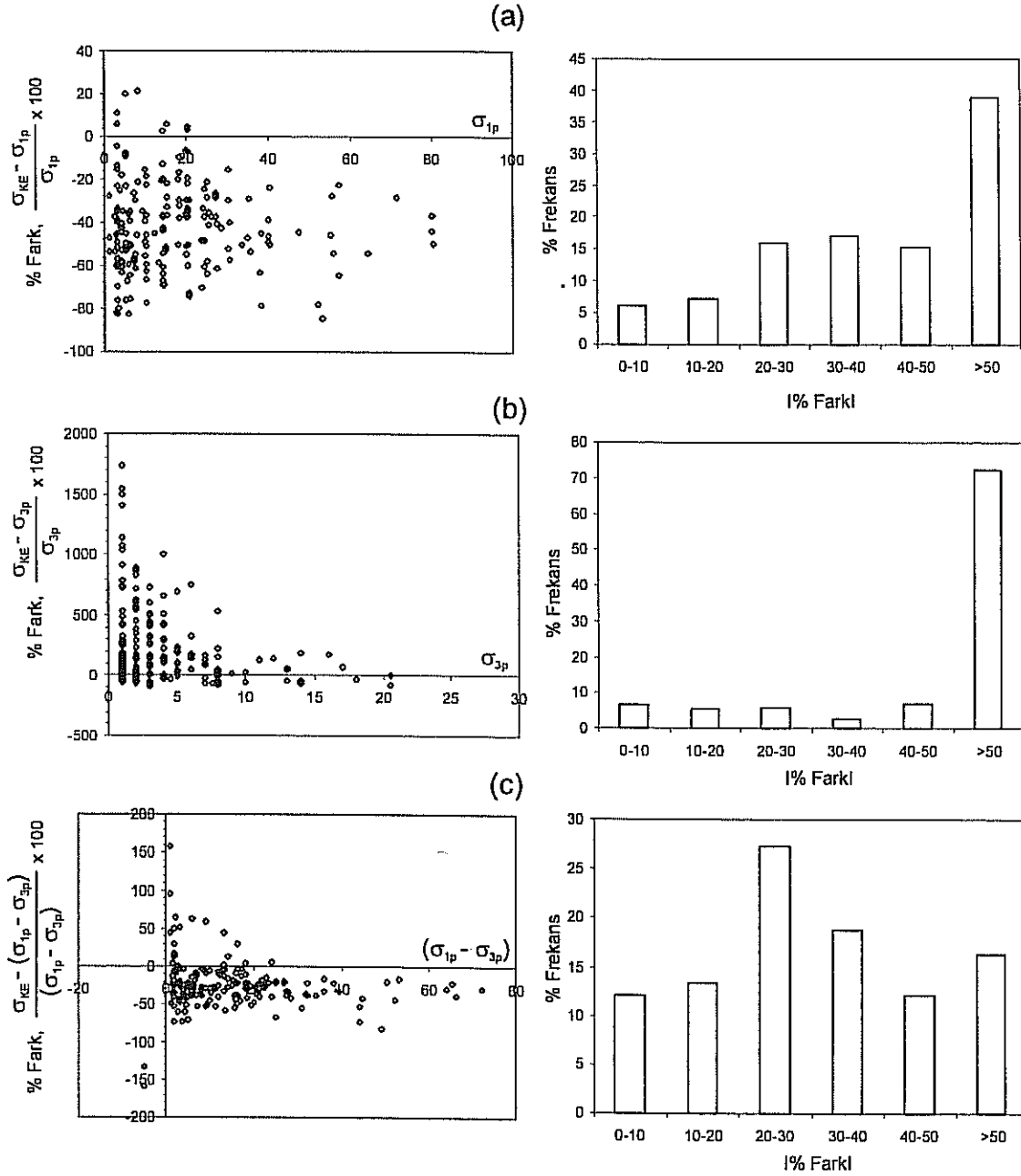
Toplam 231 adet karot örneği üzerinde üç eksenli önyükleme yapılmış ve önyükleme boşaltıldıktan hemen sonra tek eksenli koşulda AE deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her

bir karot örneği, bazıları hariç, arka arkaya iki kez tek eksenli yüklemeye tabi tutularak toplam 420 yükleme aşamasında AE aktivitesi gözlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar grafikler halinde EK 2a'da verilmiştir. KE seviyesinin belirlenmesine yönelik değerlendirmeler; önce 1., sonra 2. tek eksenli yüklemelerde elde edilen "zaman – AE aktivitesi – gerilme" grafikleri gözönünde bulundurularak aşağıda ayrı ayrı sunulmuştur.

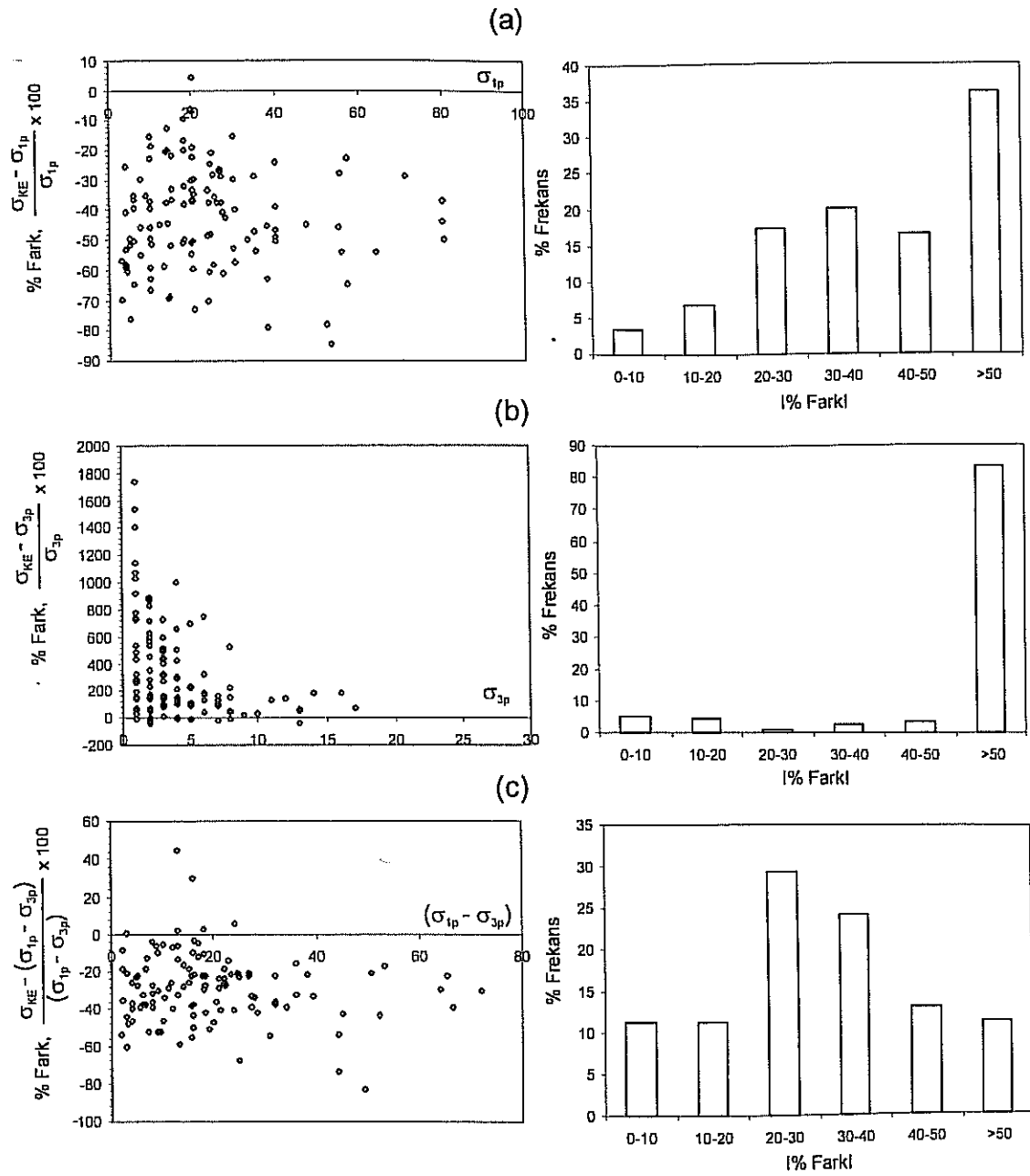
### 1. Yüklemelerdeki AE aktivitesinden elde edilen sonuçlar:

Harç örneklerinden elde edilen sonuçlara göre, KE seviyesinin belirlenmesi aşamasında farklı değerlendirmelerin yapılabileceği ve bunun uygulamanın amacına hizmet etmeyip, hataya neden olabileceği belirtilmişti. Bu nedenle, bu aşamada belirgin olarak gözlenen ilk doruk nokta, diğer bir ifadeyle "Zaman – Toplam AE Aktivitesi" eğrisine çizilen teğetle eğrinin ayrıldığı ilk nokta yaklaşımına göre KE seviyeleri belirlenmiş ve EK 2b'de sunulmuştur. 1. yüklemelerden belirlenen KE seviyelerinin önyüklemelerde uygulanan eksenel, yanal ve saptırıcı gerilmelerden olan % farkları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir (Şekil 8.21). Şekil 8.21'den, belirlenen KE seviyeleri ile önyüklemelerdeki gerilmeler arasında doğrudan bir ilişki kurmanın mümkün olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte, KE seviyelerinin genel olarak önyüklemedeki eksenel gerilmelerden daha küçük, yanal gerilmelerden büyük ve gerilme farklarından küçük olduğu açık şekilde görülebilmektedir. Bu sonuç, harç örneklerinde de elde edilmiş olup, önyüklemedeki eksenel gerilmelerin yanı sıra, yanal gerilmelerin de KE seviyesi üzerinde etkili olduğunun bir göstergesidir.

Aynı değerlendirme, sadece E (elastik), EG (elastik, ya da çatlak ilerlemesi gelişimi) ve G (çatlak ilerlemesi gelişimi) aşamalarında önyüklemeye maruz bırakılmış örneklerdeki AE deneylerinden elde edilen sonuçlar (bkz. EK 2b) dikkate alındığında, Şekil 8.22'de verilen % farklar elde edilmektedir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, KE seviyelerinin önyüklemelerdeki eksenel gerilmelerden ve gerilme farklarından küçük, yanal gerilmelerden ise genelde büyük olduğu görülmektedir. Şekil 8.21'le



Şekil 8.21: Belirlenen KE seviyelerinin, önyüklemedeki gerilmelerden olan yüzdelik farkları: (a) önceki en büyük gerilmekten, (b) en küçük gerilmekten ve (c) saptırıcı gerilmekten olan yüzdelik farkları ile bu farkların yüzde frekans dağılım histogramları.



Şekil 8.22: Önyüklemedeki saptırıcı gerilme değerleri, örneklerin elastik ve çatlak ilerlemesi aşamalarında yer alacak şekilde uygulanan karotlar için belirlenen KE seviyelerinin, önyüklemedeki gerilmelerden olan yüzdelik farkları: (a) önceki en büyük gerilmeden, (b) en küçük gerilmeden ve (c) saptırıcı gerilmeden olan yüzdelik farkları ile bu farkların yüzde frekans dağılım histogramları.

karşılaştırıldığında ise, gerilme farklarından büyük ve yanal gerilmeden küçük olarak belirlenen KE seviyelerinin elendiği dikkati çekmektedir.

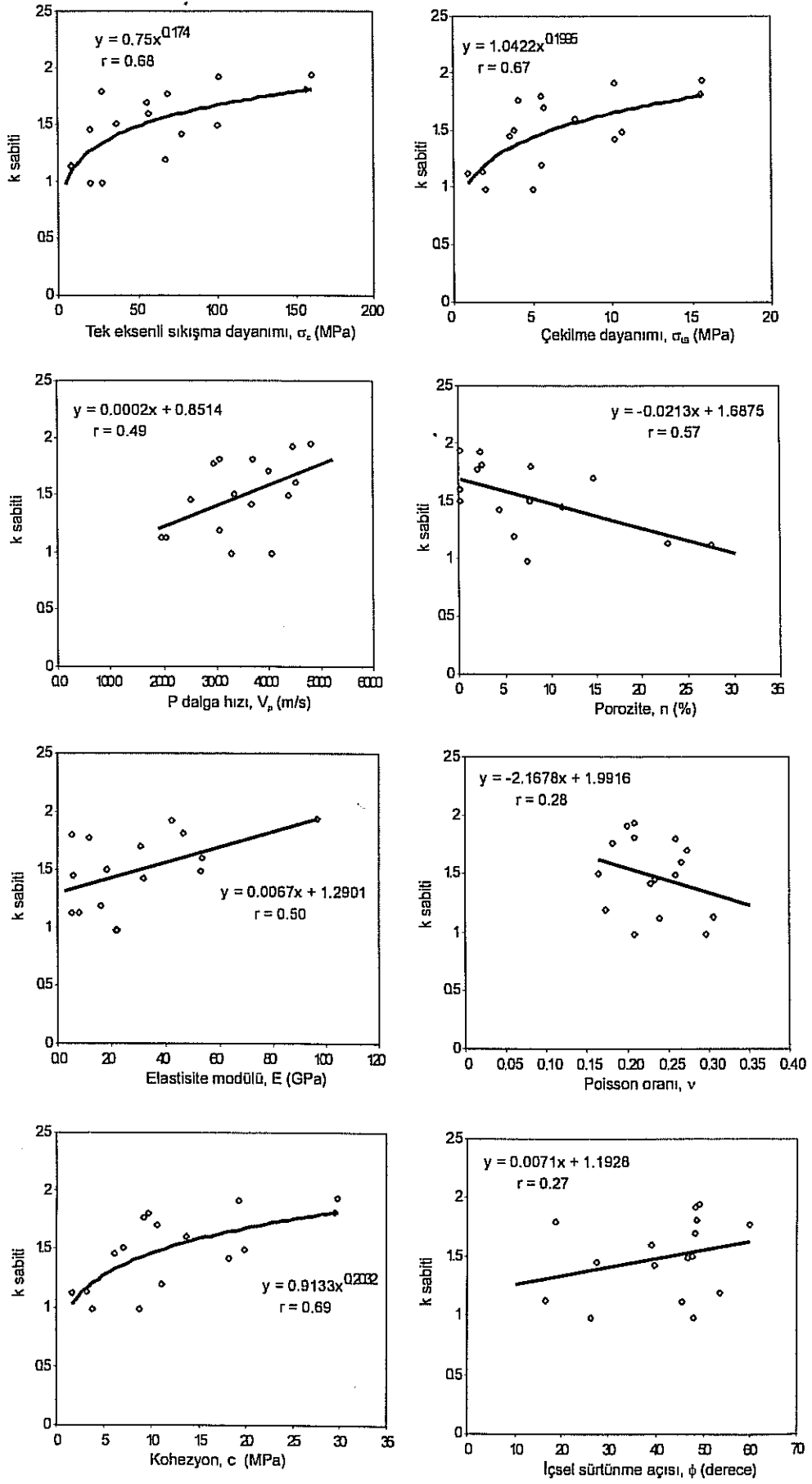
Bu değerlendirmeler sonucunda, 1. yüklemelerde belirlenen KE seviyelerinin, harç örneklerinde de varılan sonuca benzer olarak, Filiminov vd. (2001) tarafından önerilen yaklaşımla ( $\sigma_{KE} = \sigma_{1p} - (1+k)\sigma_{3p}$ ) uyumlu olabileceği anlaşılmaktadır. Bu amaçla, tüm kaya örnekleri için belirlenen KE seviyeleri dikkate alınarak her bir örnek grubu için k katsayıları belirlenmiştir. Bu katsayının belirlenmesi için, harç örneklerinde uygulanan yaklaşım kullanılmış (bkz. Şekil 8.16) ve elde edilen değerler tüm örnek grupları için Çizelge 8.7'de verilmiştir.

Bazı örnek grupları için (A1, E1, E2 ve N3) k katsayısının belirlenememesinin nedeni, bu örnek gruplarına ait karotlardaki deneylerde belirlenen KE seviyelerinin, Filiminov vd. (2001) tarafından önerilen modelle doğrusal bir ilişki göstermemesi ve 1:1 doğrusu için korelasyon katsayılarının çok düşük, hatta negatif değerler almasıdır. Birkaç durumda ise, 1:1 doğrusuna yaklaşılmaması için k katsayısı düzeltilmesi yapıldığında, bazı örnekler için elde edilen değerlerin negatif olmasıdır.

Harç ve derlenen kaya örnekleri için Bölüm 5'te verilen bazı fiziksel ve mekanik özellikler ile k katsayısı arasında bir ilişkinin olup olmayacağı araştırılmıştır. Buna göre, örnek grupları için belirlenen özelliklerin ortalama değerleri ile k katsayısı arasında en büyük korelasyon katsayısına sahip ilişkiler Şekil 8.23'te sunulmuştur. Bu değerlendirmelere, A6 örneği için belirlenen k katsayısı katılmamıştır. Bunun nedeni, diğer örnek grupları için belirlenen k değerlerine oranla oldukça düşük (0.44) ve bu örnek için belirlenen KE seviyelerinin ağırlıklı olarak gerilme farklarıyla uyumlu olması, ayrıca bu verinin değerlendirmeye alınması halinde elde edilen ilişkilerin çok daha düşük korelasyon katsayıları vermesidir. Şekil 8.23 incelendiğinde, k katsayılarının genel olarak örnek grupları için belirlenen fiziksel ve mekanik özellikler ile yüksek korelasyon katsayılarına sahip bir ilişki göstermedikleri görülmektedir. Bununla birlikte, k katsayısının örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı ( $\sigma_c$ ), Brazilian çekilme dayanımı ( $\sigma_{IB}$ ) ve kohezyon (c) değerleriyle göreceli olarak biraz daha iyi bir ilişki

Çizelge 8.7: Örnek grupları için belirlenen k katsayıları.

Örnek grubu	k katsayısı	Veri çifti sayısı	Korelasyon katsayısı, r
A1	-	3	-
A2	1.60	4	0.85
A3	1.42	5	0.88
A4	1.45	3	0.93
A5	1.70	6	0.95
A6	0.44	6	0.79
A7	1.92	2	0.99
A8	1.80	3	0.99
A9	0.98	4	0.79
A10	1.77	7	0.95
B1	1.50	11	0.85
E1	-	4	-
E2	-	7	-
E3	1.49	5	0.99
E4	1.94	5	0.98
E5	1.19	7	0.87
E6	0.98	9	0.96
E7	1.81	6	0.91
N2	1.13	5	0.94
N3	-	6	-
N4	1.12	6	0.78



Şekil 8.23: k katsayısı ile örneklerin bazı jeomekanik özellikleri arasındaki ilişkiler.



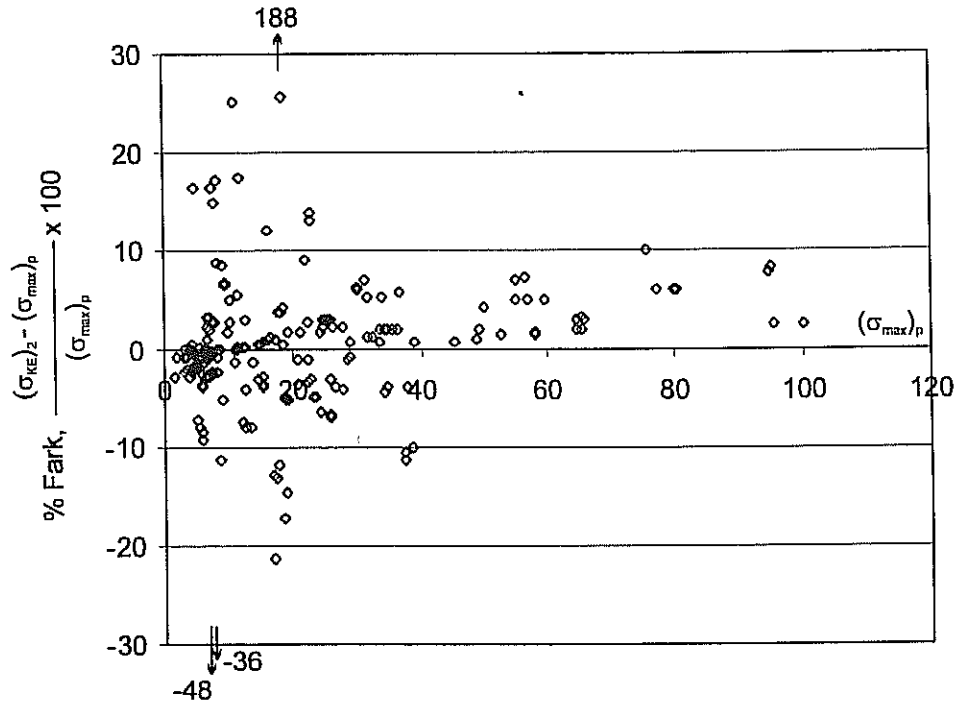
gösterdiği söylenebilir. Genel olarak bu değerlerin artmasıyla, k katsayısının da doğrusal olmayan bir ilişki göstererek arttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, görünür porozite değerlerinin azalması ile k katsayılarının da azaldığı dikkat çekmektedir.

## 2. Yüklemelelerdeki AE aktivitesinden elde edilen sonuçlar:

1. yüklemelerin hemen ardından tüm deney örneklerinde 2. yüklemeler yapılmış ve AE aktivitesi bu yüklemelerde de belirlenmiştir (EK 2a ve EK 2b). Harç örneklerinden elde edilen sonuçlara göre; 2. yüklemelerde belirlenen KE seviyelerinin 1. yüklemelerde uygulanan en büyük gerilmeye karşılık geldiği, bununla birlikte, KE seviyelerinden hemen önce AE aktivitesinde az miktarda bir hareketliliğin söz konusu olduğu belirlenmiştir. Kaya örnekleri için yapılan deneylerin 2. yüklemelerinde de aynı sonuçlar elde edilmiştir. 2. yüklemelerde belirlenen KE seviyelerinin 1. yüklemelerdeki en büyük gerilmelerden olan farkları yüzde olarak belirlenmiş ve Şekil 8.24'te sunulmuştur. Belirlenen % farkların %89'u %10'dan, %95'i ise %15'ten daha düşüktür. Bazı deneylerde, KE olarak belirlenen gerilme seviyelerinden hemen önce AE aktivitesinde gözlenen az miktardaki artış, KE seviyelerindeki artışa oranla çok düşük olup, bu nedenle dolayı dikkate alınmamıştır. Bu seviyelerin üç eksenli önyüklemelerdeki eksenel gerilmelerden de farklı olduğu ve AE deneyinin yapıldığı 1. yüklemelerdeki en büyük gerilmelere bağlı olarak değiştiği gerek deneyler, gerekse elde edilen grafiklerin değerlendirilmesi sırasında anlaşılmıştır.

### **8.3. Bazı Yenilme Ölçütleri Dikkate Alınarak Yapılan Yaklaşımlar**

Üç eksenli önyükleme yapılmış örneklerdeki tek eksenli koşuldaki AE deneylerinin 1. yüklemelerinde yanal gerilmenin değerine bağlı olarak AE aktivitesinde farklılık ve genel olarak belirlenen KE seviyelerinin önyüklemedeki gerilme farklarından düşük olduğu, ayrıca her örnek grubu için bir k katsayısının belirlenebileceği ortaya çıkmıştır. Belirlenen k katsayılarının ise, örnek gruplarının dayanım parametreleri ile ( $\sigma_c$ ,  $\sigma_B$  ve c) belirli oranlarda ilişkili olabileceği sonucuna varılmıştır. Bölüm 2'de de değinildiği gibi, Holcomb ve Martin (1985) tarafından önyüklemedeki yanal gerilmenin



Şekil 8.24: 2. yüklemelerden belirlenen KE seviyelerinin, 1. yüklemelerdeki en büyük gerilmelerden olan yüzde farkları.

KE seviyesi üzerinde etkin olduğu ve yanal gerilmenin değişimine bağlı olarak KE seviyesinin de değiştiği belirtilmiştir. Bu araştırmacılar ayrıca, KE seviyelerinin Coulomb yenilme ölçütüne benzer bir yaklaşım esas alınarak araştırılabileceği görüşünü ortaya atmışlardır. Bu bölümde, adı geçen araştırmacıların önerisi doğrultusunda ve sağlam kayalar için önerilen yenilme ölçütleri dikkate alınarak, AE deneylerinin 1. yüklemelerinde belirlenen KE seviyeleri için bazı varsayımlar yapılmış ve bu varsayımlar doğrultusunda elde edilen ilişkilerin geçerliliği araştırılmıştır. Coulomb yenilme ölçütü aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi + 2 c \cos \phi \quad (\text{Eş. 8.1})$$

Burada;

$\sigma_1$ : En büyük asal gerilmeyi

$\sigma_3$ : En küçük asal gerilmeyi

$\phi$  : İçsel sürtünme açısını

$c$  : Normal gerilme etkisi olmaksızın sağlam kayanın makaslama dayanımını (kohezyon)

ifade etmektedir. Eşitlik 8.1,

$$\sigma_1 = \sigma_3 (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) + 2 c \cos \phi / (1 - \sin \phi) \quad (\text{Eş. 8.2})$$

şeklinde düzenlendiğinde ve yanal gerilmenin sıfır olması durumunda, tek eksenli sıkışma dayanımı aşağıdaki ilişkiden belirlenebilir.

$$\sigma_c = 2 c \cos \phi / (1 - \sin \phi) \quad (\text{Eş. 8.3})$$

Eşitlik 8.3 , Eşitlik 8.2'de yerine konularak,

$$\sigma_c = \sigma_1 - \sigma_3 (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) \quad (\text{Eş. 8.4})$$

ifadesi elde edilir. Yenilmeye neden olan asal gerilme çiftleri ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında, malzemenin makaslama parametrelerine bağlı olarak, bir ilişki söz konusudur. Bu çalışma kapsamında da, örneklere üç eksenli önyüklemeler yapılmış ve bu örnekler üzerinde tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapılarak KE seviyeleri belirlenmiştir. Bu seviyelerin üç eksenli önyüklemelerdeki gerilmelerin aldığı değerlere göre değiştiği dikkate alınır, söz konusu malzemede üç eksenli önyükleme ile bir etki oluşturulduğu ve AE deneylerinde bu etkinin KE seviyesi olarak belirlendiği söylenebilir. Bu belirleme dikkate alınarak ve bu durumun Eşitlik 8.4 ile bir benzerlik gösterebileceği varsayılarak, KE seviyesi aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir.

$$(\sigma_{KE})_C = \sigma_{1p} - \sigma_{3p} (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) \quad (\text{Eş. 8.5})$$

Bu eşitlik, KE seviyesi için Filiminov vd. (2001) tarafından önerilen eşitlikle oldukça benzerlik taşımaktadır. Coulomb yenilme ölçütünün yanı sıra, Griffith yenilme ölçütü de dikkate alınmıştır. Griffith ölçütü,

$$\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0 \text{ ise,} \quad (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8 \sigma_t (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (\text{Eş. 8.6a})$$

$$\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \text{ ise,} \quad \sigma_3 = -\sigma_t \quad (\text{Eş. 8.6b})$$

eşitlikleriyle ifade edilmektedir. Burada;

$\sigma_1$ : En büyük asal gerilme

$\sigma_3$ : En küçük asal gerilme

$\sigma_t$ : Çekilme dayanımı

Bu yenilme ölçütünde yer alan  $8\sigma_t$  ifadesi tek eksenli sıkışma dayanımına karşılık gelmekte olup, Coulomb yenilme ölçütü dikkate alınarak yapıldığı gibi burada da KE seviyesi için yaklaşım yapılacak olursa, aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$(\sigma_{KE})_{G2} = (\sigma_{1p} - \sigma_{3p})^2 / (\sigma_{1p} + \sigma_{3p}) \quad (\text{Eş. 8.7})$$

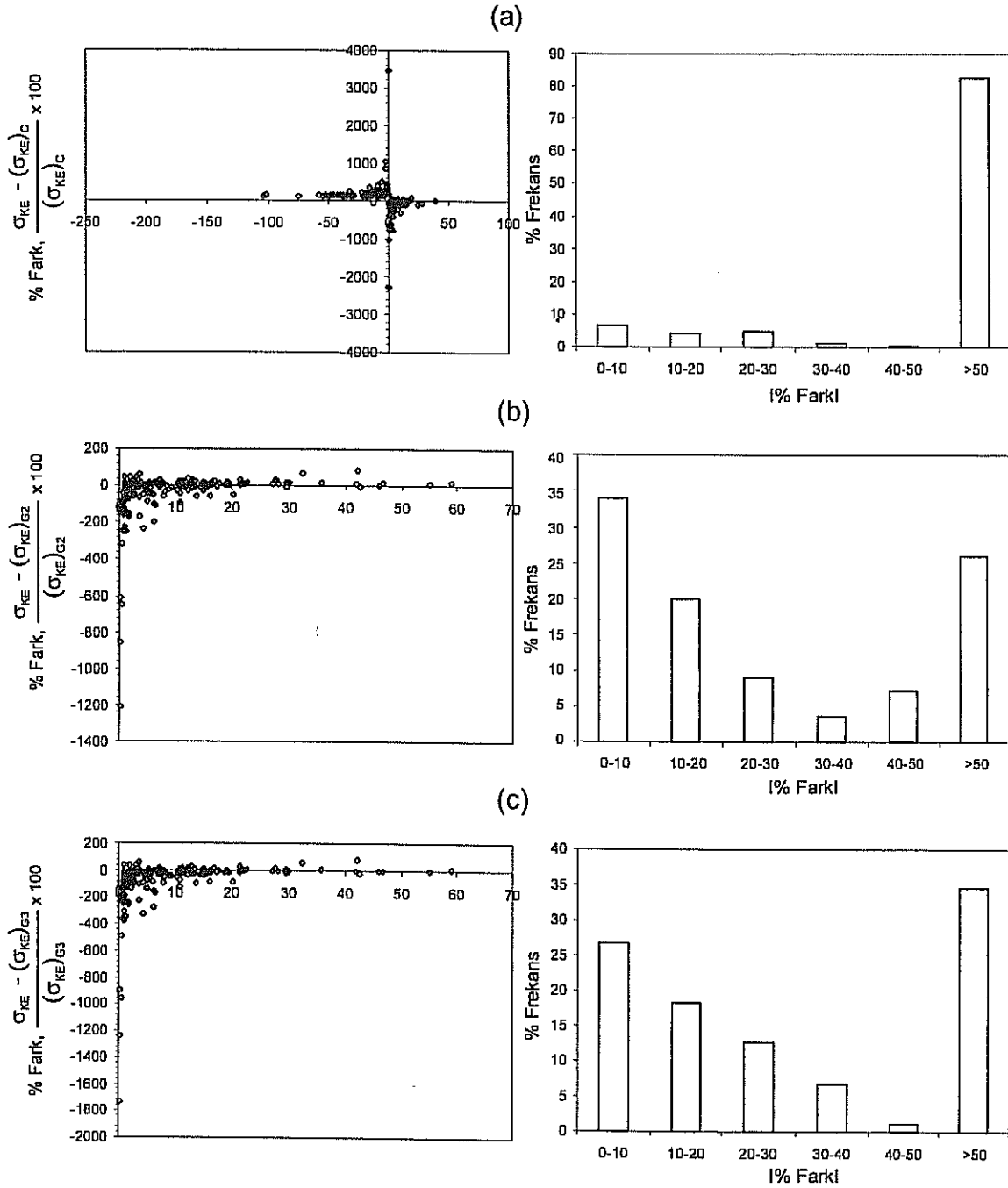
İki boyutlu Griffith ölçütü, Murrel (1963 - Jaeger ve Cook, 1979'dan) tarafından üç boyutlu olarak yeniden düzenlenmiş ve üç eksenli deneyler için Eşitlik 8.8'de verildiği gibi ifade edilmiştir.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 12 \sigma_t (\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (\text{Eş. 8.8})$$

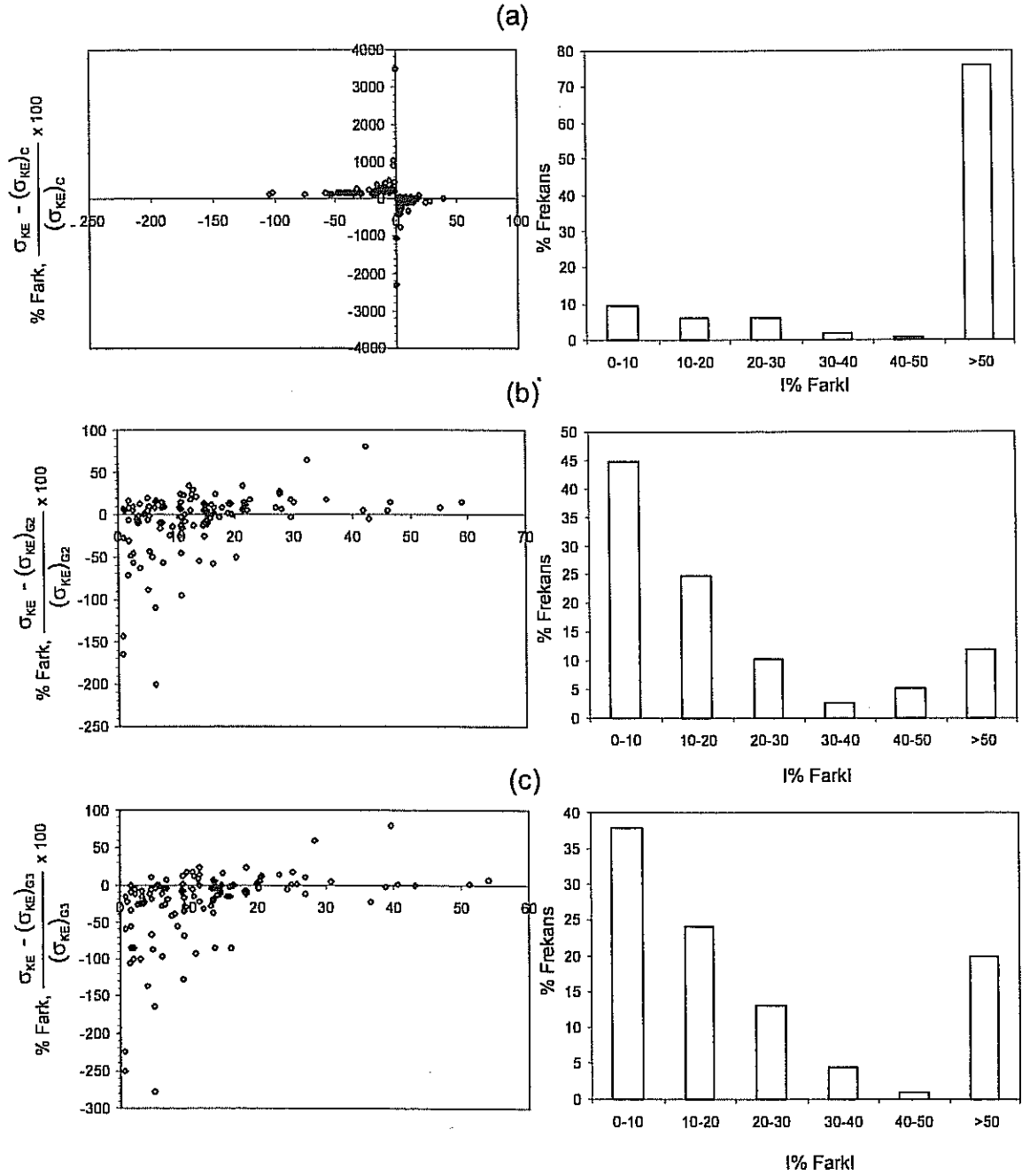
Burada  $12 \sigma_t$  ifadesi tek eksenli sıkışma dayanımına karşılık gelmekte olup, Eşitlik 8.8 KE seviyesi ile ilişkilendirilirse Eşitlik 8.9'da verilen şekle dönüşür.

$$(\sigma_{KE})_{G3} = (\sigma_{1p} - \sigma_{3p})^2 / (\sigma_{1p} + 2\sigma_{3p}) \quad (\text{Eş. 8.9})$$

Harç ve kaya örneklerinin makaslama dayanımı parametreleri ve üç eksenli önyüklemelerde uygulanan gerilmeler dikkate alınarak, Eşitlik 8.5, 8.7 ve 8.9'daki ilişkilerle öngörülen  $\sigma_{KE}$  değerleri hesaplanmış ve bunlar için sırasıyla  $(\sigma_{KE})_C$ ,  $(\sigma_{KE})_{G2}$  ve  $(\sigma_{KE})_{G3}$  simgeleri kullanılmıştır. Daha sonra bu değerler AE deneylerinin 1. yüklemelerinden elde edilen KE seviyeleri  $(\sigma_{KE})$  ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar öncelikle tüm örnekler için (Şekil 8.25), daha sonra, harç örneklerinde de yapıldığı gibi, sadece önyüklemedeki gerilme farkları örneklerin elastik (E) ve çatlak ilerlemesi gelişimi (G) aşamalarına düşen örnekler için (Şekil 8.26) yapılmıştır. Şekil 8.25a incelendiğinde, Coulomb ölçütünden varsayımla belirlenen KE seviyelerinin  $(\sigma_{KE})_C$  yaklaşık %11'inin AE deneylerinden elde edilen KE seviyeleriyle  $(\sigma_{KE})$  arasında %20 ve daha düşük bir farkın olduğu görülmektedir. İki boyutlu Griffith ölçütünden varsayımla belirlenen KE seviyelerinin  $(\sigma_{KE})_{G2}$  %54'ünün (Şekil 8.25b), üç eksenli deney için önerilen Griffith ölçütünden belirlenen KE seviyelerinin  $(\sigma_{KE})_{G3}$  ise %45'inin (Şekil 8.25c) %20'den daha az bir farkla benzerlik gösterdiği dikkat çekmektedir. Şekil 8.26'da verilen grafikler incelendiğinde, yine %20 ve daha az bir fark için bu oranların  $(\sigma_{KE})_C$  için %15,  $(\sigma_{KE})_{G2}$  için %70,  $(\sigma_{KE})_{G3}$  için ise %62 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar dikkate alındığında, AE deneylerinden elde edilen KE değerlerinin büyük bir bölümünün Griffith ölçütünden daha önce belirtilen varsayımla belirlenen KE seviyeleri ile ilişkili olabileceği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 8.25: Belirlenen KE seviyelerinin, (a) Coulomb (b) iki boyutlu Griffith ve (c) üç eksenli deneyler için önerilmiş Griffith ölçütlerinden varsayım ile hesaplanan değerlerden olan yüzde farkları ile bu farkların yüzde frekans dağılım histogramları.



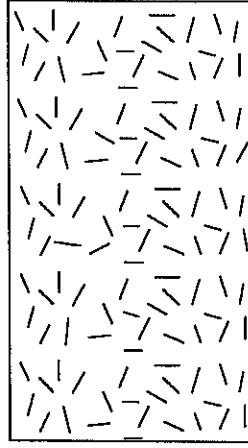
Şekil 8.26: Önyüklemedeki saptırıcı gerilme değerleri, örneklerin elastik ve çatlak ilerlemesi aşamalarında yer alacak şekilde uygulanan karotlar için belirlenen KE seviyelerinin, (a) Coulomb (b) iki boyutlu Griffith ve (c) üç eksenli deneyler için önerilmiş Griffith ölçütlerinden varsayım ile hesaplanan değerlerden olan yüzde farkları ile bu farkların yüzde frekans dağılım histogramları.

Şekil 8.27'de bir kaya örneğinin içindeki gelişigüzel dağılmış çatlak ve/veya zayıflık düzlemleri sembolik olarak gösterilmiştir. Kaya malzemesi; mikroçatlak, kristal ve tane kenarları vb. nedenlerden dolayı farklı yönlerde zayıflık düzlemleri içerebilmektedir. Kaya örneklerinin oluşum koşullarından alınarak laboratuvar ortamına taşınması gibi süreçlerden geçmesi, malzeme üzerinden gerilme boşalmasına neden olacağından, zayıflık düzlemlerinin bir kısmının ya da önemli bir bölümünün bir miktar açılması söz konusudur. Gerek AE deneylerinden elde edilen KE seviyelerinin Griffith ölçütünden varsayımla belirlenen KE seviyelerine büyük ölçüde yakın olması, gerekse kaya örneklerinin değişik yönelimlere sahip mikro düzeydeki zayıflık düzlemlerini içerebileceği ve ayrıca Bölüm 7'de verilen kaya örneklerinin deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları için yapılan tanımlamalar dikkate alındığında, AE aktivitesinin örnek içindeki çatlaklarla ve dolayısıyla bunların yönelimleriyle yakından ilişkili olabileceği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, Griffith ölçütünün çıkış noktası olan yassı elips şekilli çatlakların ucunda gelişen en büyük çekilme gerilmeleri ile üç eksenli önyüklemeye maruz bırakılmış örneklerde yapılan tek eksenli koşuldaki AE deneylerinin 1. yüklemelerinden elde edilen KE seviyeleri arasında bir ilişkinin olabileceği dikkate alınarak, bu durum aşağıdaki paragraflarda irdelenmiştir.

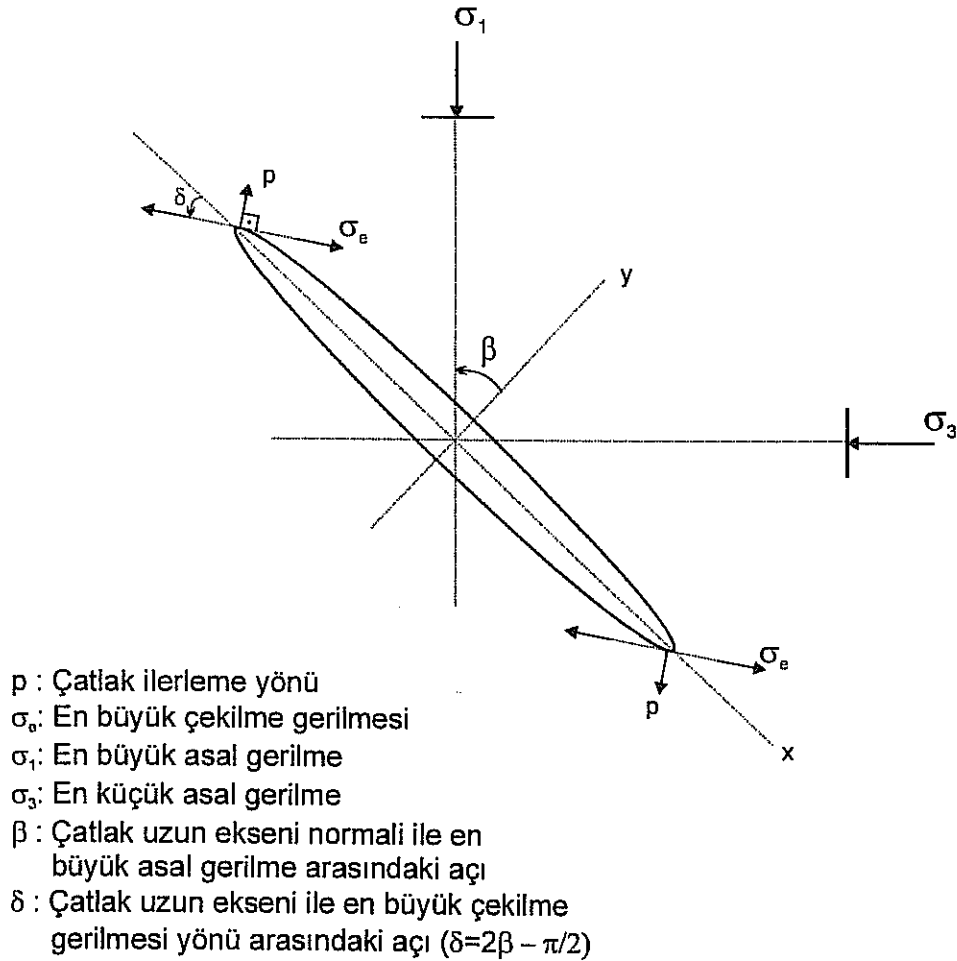
1921'de Griffith tarafından önerilen ölçüt; malzeme içinde varolduğu düşünülen çok küçük *Griffith çatlaklarının* uçlarındaki gerilme birikimlerine bağlı olarak kırılmanın meydana geldiği ve en uygun yönelime sahip çatlağın ucundaki en büyük gerilmenin malzemenin karakteristik bir değerine ulaşması ile kırılma sürecinin başladığı kuramına dayanmaktadır (Jaeger ve Cook, 1979). Şekil 8.28'de; Griffith ölçütüne esas olan ve Griffith çatlağı olarak bilinen yassı elips şekilli açık çatlağın bulunduğu ortama etkiyen gerilmeler ve çatlak ucunda en büyük teğetsel gerilmelerin geliştiği düzlemler ile çatlak ilerleme yönü görülmektedir. Uygulanan asal gerilmelerin değerlerine bağlı olarak çatlak ucunda gelişen en büyük çekilme gerilmeleri aşağıda verilen eşitlikle tanımlanmıştır.

$$\sigma_e = \frac{(\sigma_1 \cos^2\beta + \sigma_3 \sin^2\beta) - (\sigma_1^2 \cos^2\beta + \sigma_3^2 \sin^2\beta)^{1/2}}{\xi_0} \quad (\text{Eş. 8.10})$$





Şekil 8.27: Bir kaya örneği içinde gelişigüzel dağılmış mikroçatlakların iki boyutlu görünümü.



Şekil 8.28: Griffith çatlağının bulunduğu ortama etkiyen asal gerilmelere bağlı olarak gelişen en büyük çekilme gerilmesi ve çatlak ilerleme yönü (Jaeger ve Cook, 1979).

Burada;

$\sigma_e$  : Çatlak ucunda gelişen en büyük çekilme gerilmesi

$\sigma_1$  : En büyük asal gerilme

$\sigma_3$  : En küçük asal gerilme

$\beta$  : Çatlak uzun eksenini normaline ile en büyük gerilme yönü arasındaki açı

$\xi_0$  : Çatlağın eliptik geometrisini ifade eden katsayı

olarak tanımlanmaktadır. *En büyük çekilme gerilmesinin gerçekleşeceği* eliptik çatlağın normaline ile uygulanan en büyük asal gerilme arasındaki açı ( $\beta_{crit}$ ) ise aşağıda verilen eşitlikle ifade edilmektedir.

$$\cos 2\beta_{crit} = -\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (\text{Eş.8.11a})$$

Asal gerilmeler oran olarak ifade edilip  $\beta_{crit}$  çekilirse Eşitlik 8.11a,

$$\beta_{crit} = \arccos\left(\frac{1 - \sigma_1/\sigma_3}{2(1 + \sigma_1/\sigma_3)}\right)/2 \quad (\text{Eş. 8.11b})$$

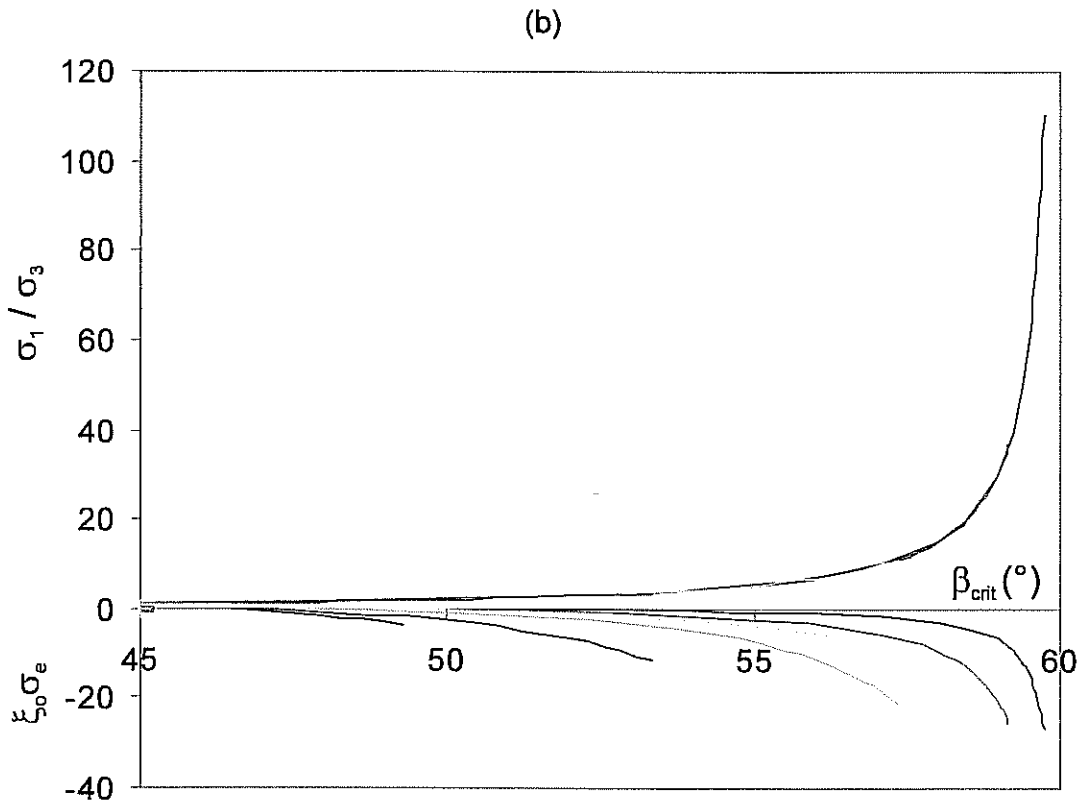
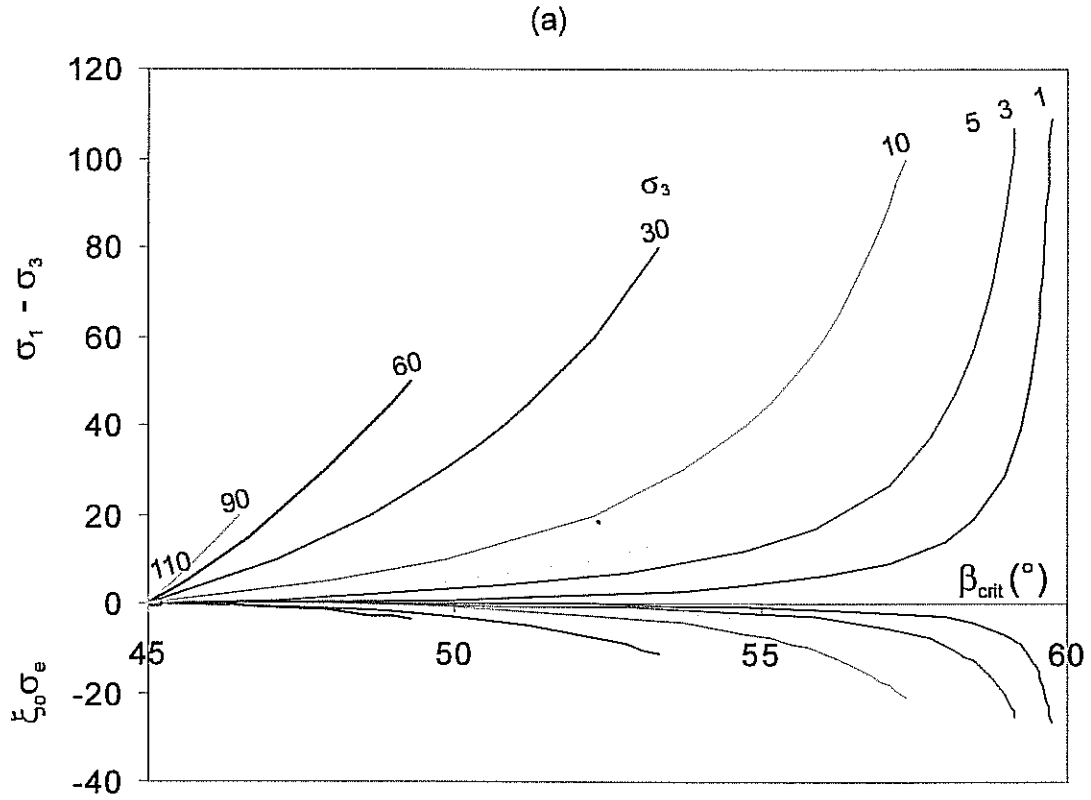
şeklini almaktadır. Eşitlik 8.11'den hesaplanan açı, bir örnek içindeki farklı yönelimdeki Griffith çatlaklarının ucunda gelişen en büyük çekilme gerilmelerinin hangi çatlakta daha büyük olacağını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Asal gerilmelerin oranına bağlı olarak  $\beta_{crit}$  açısı;

$$0 < \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \leq 1 \text{ iken, } 30^\circ < \beta_{crit} \leq 45^\circ$$

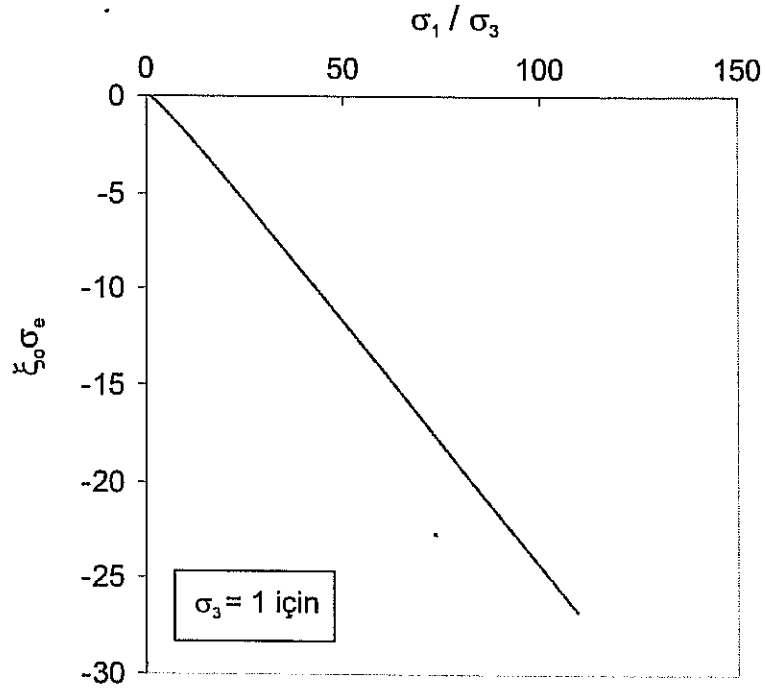
$$1 \leq \frac{\sigma_1}{\sigma_3} < \infty \text{ iken, } 45^\circ \leq \beta_{crit} < 60^\circ$$

değerleri arasında değişmektedir. Diğer bir ifadeyle, yüklemeye maruz kalan bir malzemede en büyük çekilme gerilmelerine, eksenin normaliyle en büyük asal gerilme yönü arasında 30 ile 60 derecelik açılar bulunan çatlaklar maruz kalacaktır. En büyük asal gerilmenin en küçük asal gerilmeye oranı sıfıra yaklaşırken  $\beta_{crit}$  açısı  $30^\circ$  'ye, sonsuza giderken ise  $60^\circ$  'ye yaklaşacaktır. Bu oranın 1 olması durumunda ise,  $\beta_{crit}$  açısı  $45^\circ$  olacaktır.

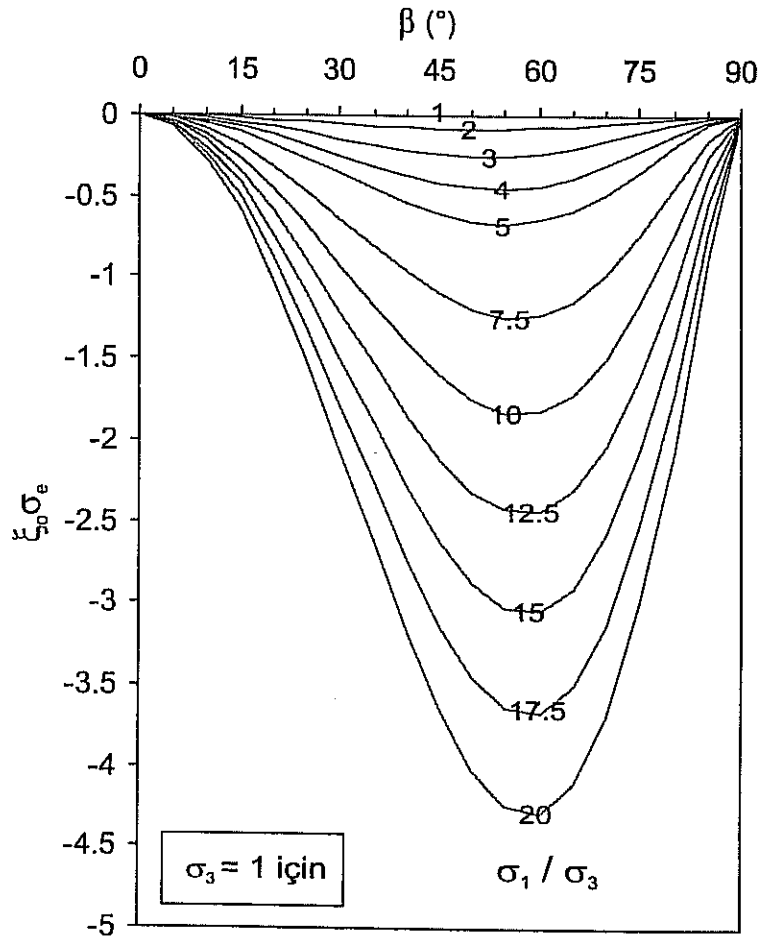
Yukarıda verilen eşitliklerle tanımlanan kuramsal yaklaşımlar dikkate alınarak, asal gerilmelerin değişimi ile  $\beta_{crit}$  açılarının ve  $\sigma_e \xi_o$  değerlerinin değişimi Şekil 8.29 - 8.31'de grafiksel olarak sunulmuştur.  $\xi_o$  çalışma kapsamında kullanılan deney örnekleri için bilinmediğinden ve bir örneğin dahi farklı boyutta Griffith çatlakları içerebileceğinden dolayı, bu değer değişkenlik gösterebilecektir. Şekil 8.29 – 8.31'deki grafikler, bu durum göz önünde bulundurularak ve bir tür normalleştirme yapılması amacıyla, en büyük çekilme gerilmesi ( $\sigma_e$ ) yerine, çarpımlarından bulunan  $\sigma_e \xi_o$  ifadesi için hazırlanmıştır. Bu grafiklerin hazırlanmasında;  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  değerleri pozitif ve 1'den 110 MPa'a kadar değişecek şekilde seçilmiş olup, ayrıca  $\sigma_1$ 'in  $\sigma_3$ 'ten büyük ve  $\sigma_3$ 'e eşit olması koşulu esas alınmıştır. Şekil 8.29a'da,  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 'e bağlı olarak  $\beta_{crit}$  açısının ve  $\sigma_e \xi_o$  değerinin değişimi gösterilirken, Şekil 8.29b'de  $\beta_{crit}$  açısı ve  $\sigma_e \xi_o$  değerinin  $(\sigma_1 / \sigma_3)$ 'e bağlı olarak değişimini gösteren eğriler sunulmuştur. Bu şekilden de görülebileceği gibi,  $\beta_{crit}$  açısının değişimi asal gerilmelerin oranına bağlı olarak tek bir eğri ile ifade edilebilmektedir. Şekil 8.30'da ise,  $\sigma_e \xi_o$  değerinin doğrudan  $(\sigma_1 / \sigma_3)$ 'e bağlı olarak değişimi verilmiş olup, bu değişim  $\sigma_3 = 1$  koşulu için geçerlidir.  $\sigma_3$  değerinin 1'den farklı değerler alması durumunda, bu grafiğin y ekseninden belirlenen değer  $\sigma_3$  değeriyle çarpılarak Griffith çatlaklarının ucundaki  $\sigma_e \xi_o$  değeri belirlenebilmektedir. Şekil 8.31'de  $\beta$  açısına ve  $(\sigma_1 / \sigma_3)$ 'e bağlı olarak  $\sigma_e \xi_o$  değerlerini gösteren eğriler verilmiş olup, bu eğriler de  $\sigma_3 = 1$  koşulu için geçerlidir.  $\sigma_3$ 'ün farklı değerler alması durumunda ise, Şekil 8.30'daki işlemin yapılması gerekmektedir. Şekil 8.31'de verilen  $\beta$  açılarının  $\beta_{crit}$  açıları ile karıştırılmaması gerekmektedir.  $\beta$  açıları  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında değişecek şekilde keyfi seçilmişken,  $\beta_{crit}$  açıları Eşitlik 8.11b'den belirlenmektedir.



Şekil 8.29: (a) Saptırıcı gerilme ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ve (b) gerilme oranlarına ( $\sigma_1 / \sigma_3$ ) bağlı olarak  $\beta_{crit}$  açısının ve  $\xi_0 \sigma_e$  değerlerinin yanıl gerilmeye göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 8.30:  $\sigma_3 = 1$  birim için gerilme oranına bağlı olarak  $\xi_0 \sigma_e$  değerinin değişimi.



Şekil 8.31:  $\sigma_3 = 1$  birim için, gerilme oranı ve  $\beta$  açısına bağlı olarak  $\xi_0 \sigma_e$  değerinin değişimi.

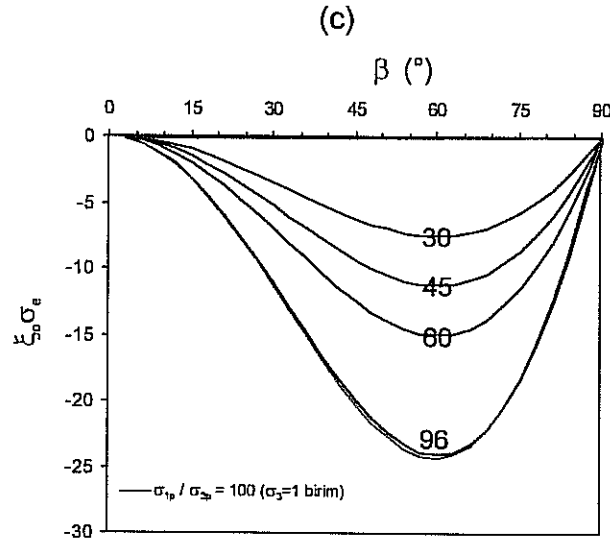
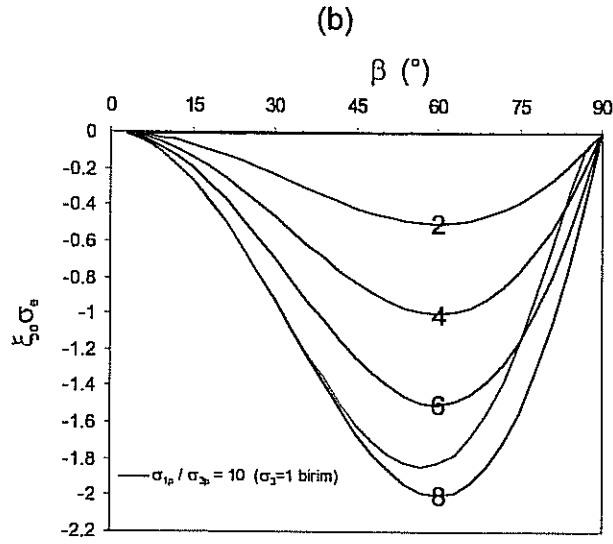
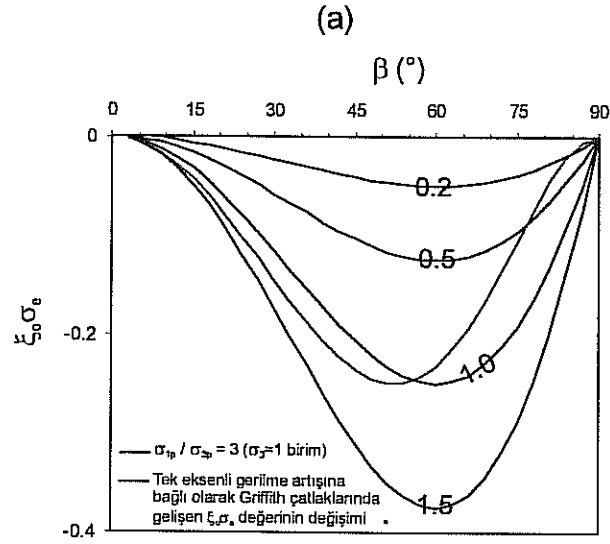
Tek eksenli koşulda yüklemeye maruz bırakılan bir malzemenin içerdiği Griffith çatlığının ucunda gelişen en büyük çekilme gerilmesi ise, Eşitlik 8.10'dan yola çıkılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_1 \cos^2 \beta - \sigma_1 \cos \beta}{\xi_0} \quad (\text{Eş. 8.12})$$

Bu koşulda, *en büyük çekilme gerilmesinin gerçekleşeceği* eliptik çatlığın normali ile uygulanan en büyük asal gerilme arasındaki açı ( $\beta_{\text{crit}}$ ) ise  $60^\circ$  olmaktadır.

Çalışma kapsamında derlenen kaya ve hazırlanan harç örneklerine uygulanan üç eksenli öngerilmelerin etkisiyle örneklerin muhtemelen içerdiği Griffith çatlaklarının ucunda gelişen en büyük çekilme gerilmelerinin, tek eksenli koşuldaki AE deneylerinin 1. yüklemelerinden elde edilen KE seviyeleriyle ilişkili olabileceği dikkate alınmış ve aşağıda sunulan yaklaşımlar irdelenmiştir.

Öncelikle, örneklerin  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye kadar değişen  $\beta$  açlarına sahip Griffith çatlaklarını içerdiği ve üç eksenli önyüklemelerdeki gerilmelerin değerlerine bağlı olarak belirlenen  $\beta_{\text{crit}}$  açlarına sahip çatlaklar ile farklı yönelimlere sahip diğer çatlaklarda gelişen en büyük çekilme gerilmelerinin, örnek içinde bir etki bıraktığı varsayılmıştır. Bu varsayım doğrultusunda, üzerinde değerlendirme yapılması için, Şekil 8.31'de sunulan eğrilerden sadece  $\sigma_{1p}/\sigma_{3p} = 3$  ve 10 durumları ve ayrıca 100 durumu için örnek içinde farklı  $\beta$  açlarına sahip Griffith çatlaklarında gelişen  $\sigma_e \xi_0$  değerleri ile tek eksenli yükleme koşulunun farklı gerilme seviyelerinde oluşan  $\sigma_e \xi_0$  değerlerini ifade eden eğriler Şekil 8.32'de verilmiştir. Bu şekilde kırmızı renkle gösterilen eğriler önyüklemedeki gerilmeler ile  $\beta$  açısına bağlı olarak gelişen  $\sigma_e \xi_0$  değerlerinin değişimini, dolayısıyla önyüklemelerde örnek içinde bırakılan etkiyi ifade etmektedir. Siyah renkli eğriler ise, tek eksenli yüklemenin farklı gerilme seviyelerinde (Şekil 32'de siyah çizgiler üzerindeki değerler) farklı  $\beta$  açlarına sahip çatlaklarda gelişen  $\sigma_e \xi_0$  değerlerini, dolayısıyla bu yükleme aşamasında örnek içinde ulaşılan etkiyi temsil etmektedir. KE seviyesinin tanımından yola çıkıldığında, tek eksenli yükleme



Şekil 8.32: Önyüklemedeki gerilme oranının (a) 3, (b) 10 ve (c) 100 olması durumları için  $0^{\circ}$ 'den  $90^{\circ}$ 'ye kadar değişen  $\beta$  açılına sahip çatlaklarda oluşan etki (kırmızı renkli eğri) ile tek eksenli yüklemde gerilme artışına bağlı olarak gelişen etkiyi (siyah renkli eğriler) ifade eden eğriler.

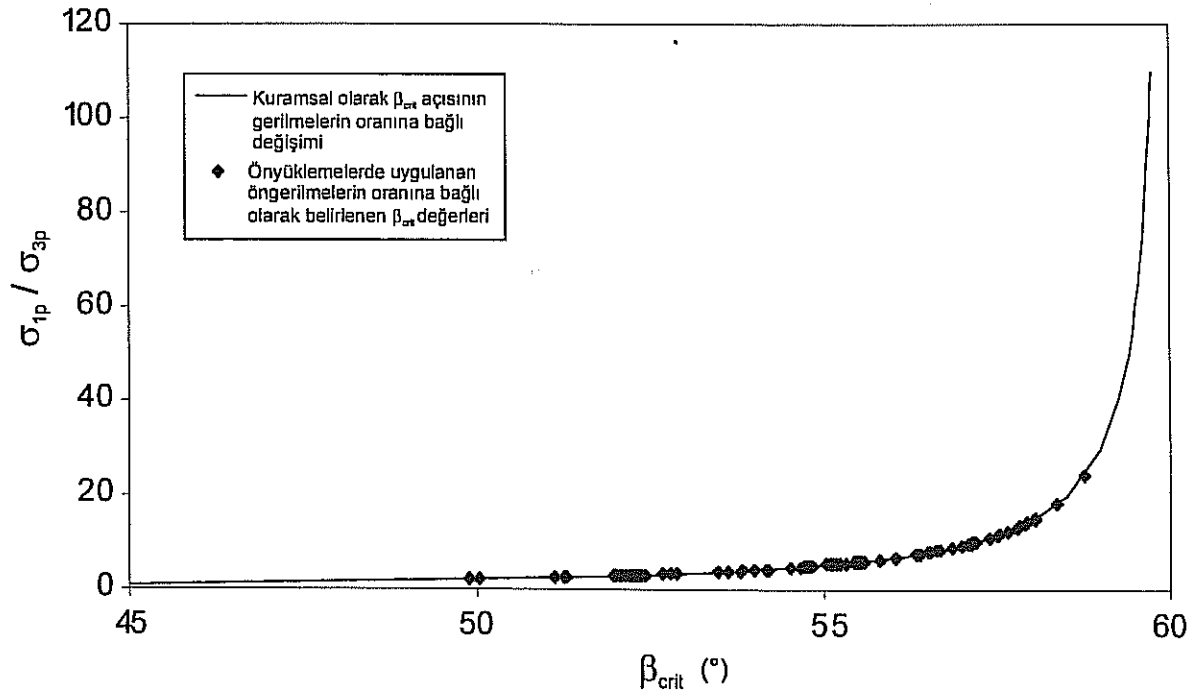
aşamasındaki etki önyüklemedeki etkiye ulaştığı anda KE seviyesinin belirmesi gerekmektedir. Bu bakış açısıyla Şekil 8.32a'da verilen  $\sigma_{1p}/\sigma_{3p} = 3$  durumu için bir değerlendirme yapılması halinde, tek eksenli yüklemenin düşük gerilme seviyelerinde (örneğin 0.2 ve 0.5 gerilme değerleri için) önyüklemede örnek içindeki büyük  $\beta$  açılara sahip çatlaklarda oluşan  $\sigma_e \xi_o$  değerlerine ulaşılmaktadır. Gerilme arttıkça (1 ve 1.5 gerilme değeri) daha düşük  $\beta$  açılara sahip çatlaklarda önyüklemede oluşturulmuş olan etkiye ulaşılmakta ve belirli bir gerilme değerinden sonra tüm çatlaklardaki etki aşılmaktadır. Aynı belirleme, Şekil 8.32b ve 8.32c'de verilen  $\sigma_{1p}/\sigma_{3p} = 10$  ve 100 durumları için de geçerlidir. Ancak, önyüklemedeki  $\sigma_{1p}/\sigma_{3p}$  oranı arttıkça (sırasıyla Şekil 8.32a, b ve c), tek eksenli yüklemeye gelişen  $\sigma_e \xi_o$  değerlerini temsil eden eğri, büyük  $\beta$  açılara sahip çatlaklarda önyüklemede oluşturulan etkiyi henüz çok fazla geçmemişken diğer yöndeki çatlaklardaki etkiye de ulaştığı, belirgin bir farklılık olarak dikkati çekmektedir. Bu belirlemeler, proje kapsamında planlanan ve uygulanan üç eksenli öngerilmeler ile oluşturulan etkinin, sonraki aşamada tek eksenli yükleme koşulu ile yapılan AE deneylerinde, örneklerin farklı yönlerde çatlak içermesi durumunda, tek bir seviye olarak belirlenmesinin güçlüğüne işaret etmektedir. Çünkü bu durumda, üç eksenli önyüklemeye maruz kalmış bir örneğin tek eksenli koşulda AE deneyine tabi tutulması durumunda, düşük gerilme seviyelerinde dahi AE aktivitesi gözlenebilmelidir. Nitekim, yapılan uygulamalarda da bu durum çok belirgin olarak gözlenmiştir (bkz. EK2). Deneylerde ayrıca, üç eksenli önyüklemede uygulanan gerilmelerin oranı azaldıkça AE aktivitesinin yoğunluğunun arttığı diğer dikkat çeken ve yukarıda verilen belirlemelerle oldukça uyum gösteren bir davranış şeklidir. Düşük öngerilme oranlarına maruz kalmış örneklerdeki AE deneylerinde KE seviyesinin belirlenmesinin güçleştiğine Bölüm 8.1.1'de de değinilmişti. Bu saptamalar aynı zamanda, üç eksenli önyüklemedeki örneklerde tek eksenli yükleme koşulundaki deneylerden belirlenen AE aktivitesinin, tek eksenli önyükleme ve sonra yine tek eksenli yükleme koşulunda belirlenen AE aktivitesi ile neden birebir benzerlik göstermediğini de açıklar niteliktedir. Tek eksenli önyükleme ve tek eksenli AE deneylerinde, önyüklemenin en büyük gerilme değerine kadar AE aktivitesi çok az gözlenirken, üç eksenli önyükleme ve tek eksenli AE deneylerinde deneyin başından itibaren bir miktar AE aktivitesi mevcuttur.



Yukarıda değinilen çıkarımlara rağmen, bu çalışmada üç eksenli önyüklemeye maruz bırakılmış örneklerde yapılan AE deneylerinde KE seviyesi olarak nitelendirilebilecek seviyeler saptanmış (EK 2) ve bu seviyelerin Griffith eşitliğinden yola çıkılarak oluşturulan ilişkiden (bkz. Eş. 8.7) elde edilen değerlerle büyük ölçüde uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, tek eksenli yükleme sırasında düşük gerilme seviyelerinde de algılanan AE aktivitesinin, yüklemenin bir gerilme seviyesine ulaşması ile belirgin bir farklılıkla artması gerekmektedir. Bu durum ise, ağırlıklı olarak öngerilmelerin oranı tarafından kontrol edilmelidir. Tek eksenli yükleme koşulunda en büyük çekilme gerilmelerinin 60°'lik  $\beta$  açılara sahip çatlaklarda geliştiği önceki paragraflarda belirtilmişti. Bu koşul dikkate alındığında, yapılan AE deneylerinde belirgin olarak gözlenen KE seviyelerinin, örneklerdeki 60°'lik çatlaklarda önyüklemelerde oluşturulan etkiye, diğer bir ifadeyle örnek içinde oluşturulan en büyük çekilme gerilmelerine ulaşıldığı andaki değerlerle ilişkilendirilebileceği kuramı güçlenmektedir. Benzer bir yaklaşım dikkate alındığında, KE seviyesini belirleyen unsur üzerinde öngerilmelere bağlı olarak belirlenen  $\beta_{crit}$  açılara sahip çatlaklardaki en büyük çekilme gerilmelerinin etkili olabileceği de varsayılabilir.

Çalışma kapsamında uygulanan üç eksenli önyüklemelere maruz kalmış örneklerde yapılan tek eksenli yükleme koşulundaki AE deneylerinde belirlenen KE seviyelerinin, yukarıda değinilen hususlar doğrultusunda yorumlanabilmesi amacıyla, karot örneklerine uygulanan üç eksenli öngerilmelerin oranı dikkate alınarak  $\beta_{crit}$  açıları belirlenmiş ve Şekil 8.29b'deki " $\sigma_{1p}/\sigma_{3p} - \beta_{crit}$ " grafiği üzerine işlenmiştir (Şekil 8.33). Şekil 8.33'ten de görülebileceği gibi, uygulanan öngerilmelerin oranları 2 ile 24.3 arasında değişirken,  $\beta_{crit}$  açıları 49.8° ile 58.7° arasında değerler almaktadır. Şekil 8.31 ve 8.32 tekrar incelendiğinde, bu aralıktaki ve 60°'lik  $\beta$  açılara sahip Griffith çatlaklarında önyüklemelerde oluşturulan  $\sigma_{e\xi_0}$  değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülebilir.

Bu çalışmada belirlenen KE seviyeleri Eşitlik 8.12'de  $\sigma_1$ 'in yerine konulmuş ve KE seviyelerinin belirlendiği örneklere uygulanan öngerilmeler dikkate alınarak

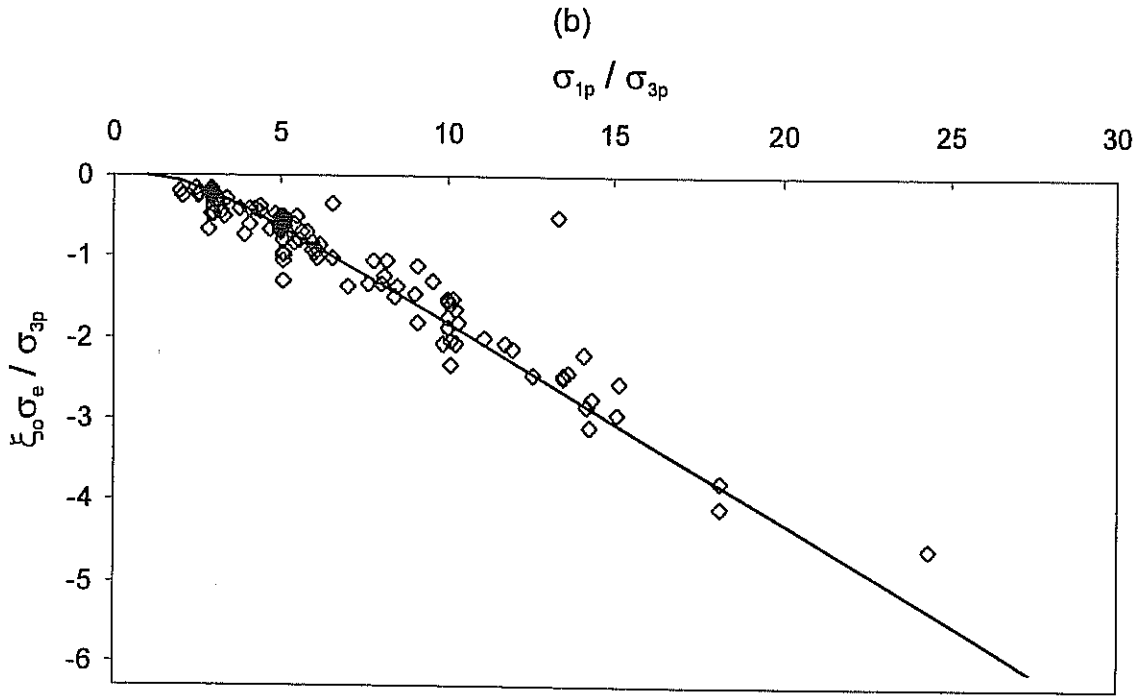
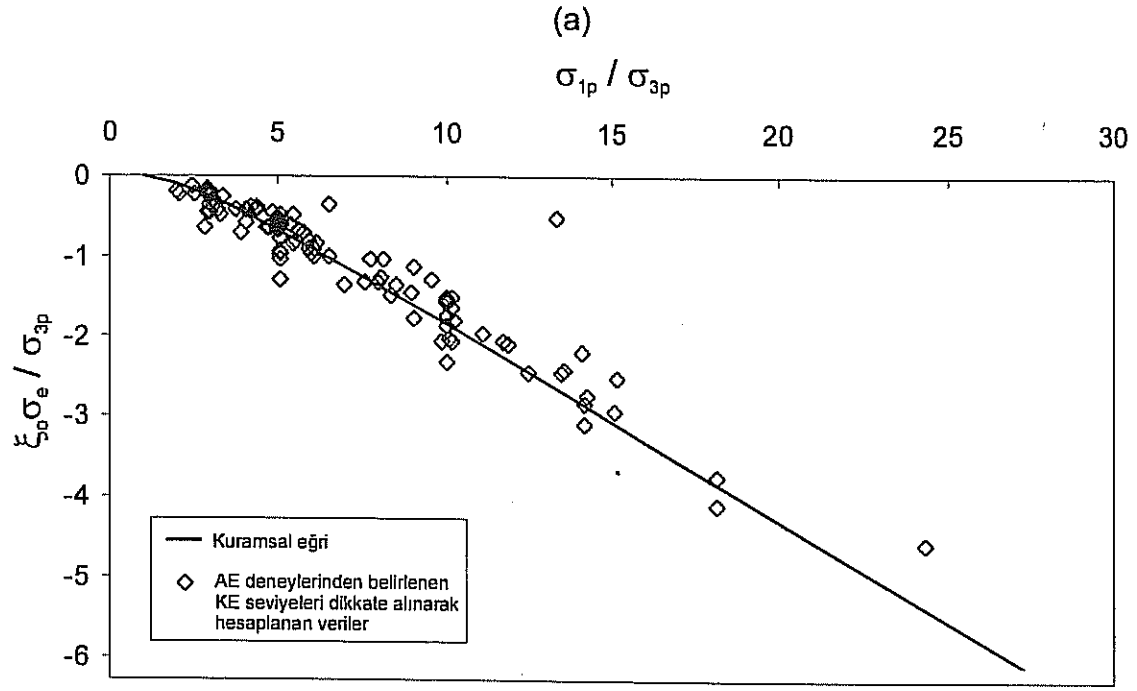


Şekil 8.33: Önyüklemelerde örneklere uygulanan gerilmelerin oranına bağlı olarak belirlenen  $\beta_{crit}$  açılarının değişimi.

hesaplanan  $\beta_{crit}$  açıları ile  $\beta=60^\circ$  durumu için ayrı ayrı  $\sigma_e \xi_o$  değerleri belirlenmiş ve Eşitlik 8.10 dikkate alınarak belirlenen kuramsal eğriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 8.34). Şekil 8.34a'da öngörülmelelere bağlı olarak hesaplanan  $\beta_{crit}$  açılarna sahip çatlaklar için belirlenen kuramsal eğri ve KE seviyesi ile hesaplanan  $\beta_{crit}$  açıları dikkate alınarak belirlenen  $\sigma_e \xi_o$  değerlerinin dağılımı verilmiştir. Şekil 8.34b'de ise,  $\beta=60^\circ$  olan çatlaklar için belirlenen kuramsal eğri ve KE seviyesi ile  $\beta=60^\circ$  olan çatlaklar için belirlenen  $\sigma_e \xi_o$  değerlerinin dağılımı verilmiştir. Her iki şekil incelendiğinde, AE deneylerinde belirlenen KE seviyeleri kullanılarak hesaplanan  $\sigma_e \xi_o$  değerlerinin kuramsal olarak verilen eğrinin etrafında bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum, yukarıda değinildiği gibi,  $\beta=60^\circ$  ve hesaplanan  $\beta_{crit}$  açılarna sahip çatlaklarda önyüklemelerde oluşturulan etkiye, tek eksenli yükleme sırasında ulaşıldığı anda AE aktivitesinde belirgin bir artışın gözlemlendiğini ve bu seviyenin KE seviyesi olarak tanımlandığını desteklemektedir.

Bu yorumlar, örneklerin  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında değişen  $\beta$  açılarna sahip Griffith çatlakları içerdığı varsayımına göre yapılmıştır. Ancak, örneklerin hakim yönelimi olan çatlakları içerebilmesi, belirli yön aralıklarında çatlaklar mevcutken belirli aralıklarda mevcut olmaması, bazı yönlerdeki çatlaklardan sayı olarak daha fazla bulunması gibi durumların KE seviyesini etkileyeceği de dikkate alınmalıdır. Ayrıca, belirlenen KE seviyelerinin de belirli oranlarda hata içerebileceği dikkate alındığında, Şekil 8.34'de verilen kuramsal eğriler ile deneylerden elde edilen sonuçların birebir çakışmaması doğal bir durum olarak değerlendirilmiştir.

Bu çıkarımlar doğrultusunda, örneklerin belirli bir yönde hakim çatlakları ( $\beta$  açısı belirli bir değerde hakim olan Griffith çatlaklarını) içermesi durumunda, KE seviyesinin belirlenmesi için bir ilişkinin önerilmesi mümkündür. Bu ilişki, Eşitlik 8.10'daki  $\sigma_e \xi_o$  değeri ile Eşitlik 8.12'deki  $\sigma_e \xi_o$  değerinin birbirine eşit olması gerektiği dikkate alınarak ve Eşitlik 8.12'deki eksenel gerilme ( $\sigma_1$ ) yerine KE seviyesini ifade eden gerilme değerinin ( $\sigma_{KE}$ ) konulmasıyla elde edilebilir.

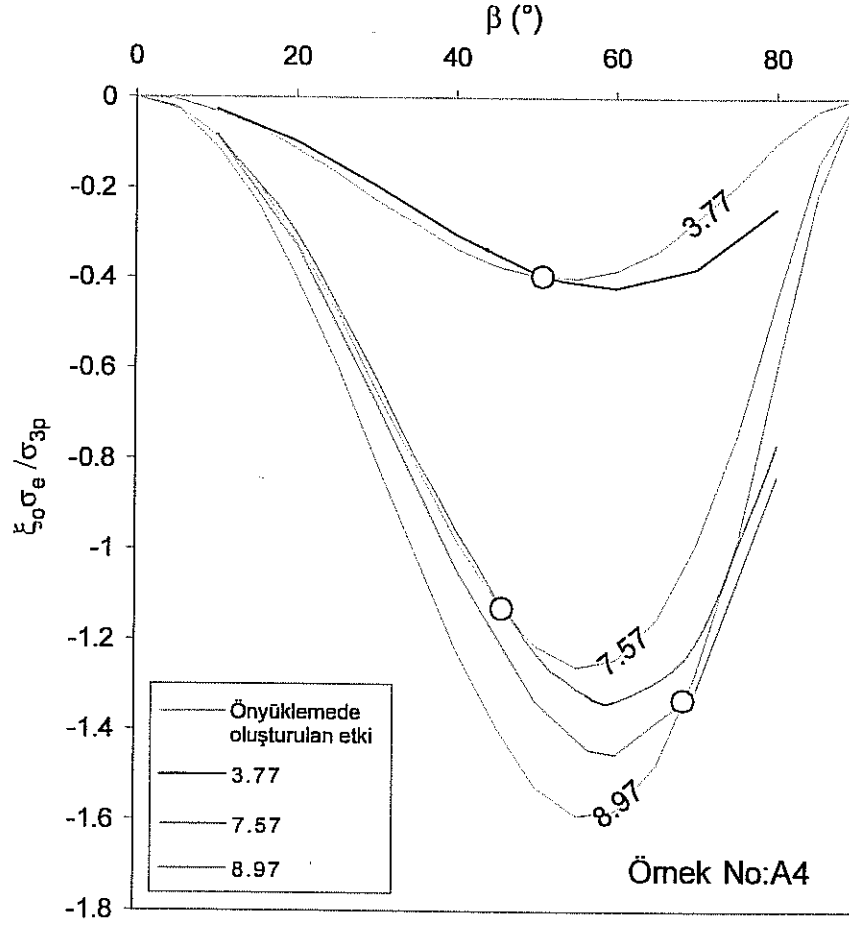


Şekil 8.34: (a) Önyüklemedeki gerilmelerden hesaplanmış  $\beta_{crit}$  açıları ile (b)  $\beta=60^\circ$  durumu için kuramsal olarak ve aynı açılar için KE seviyeleri dikkate alınarak hesaplanmış yanal gerilmeye oranlanmış  $\sigma_e \xi_{50}$  değerlerinin değişimi.

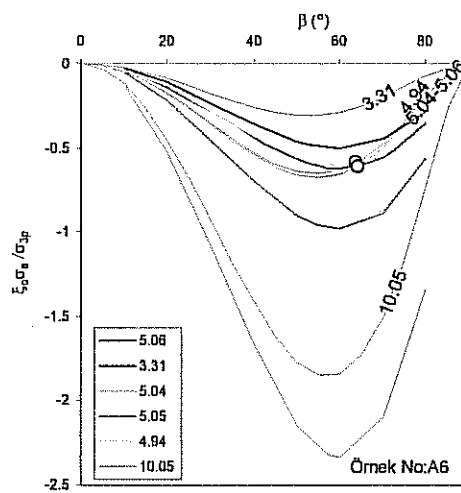
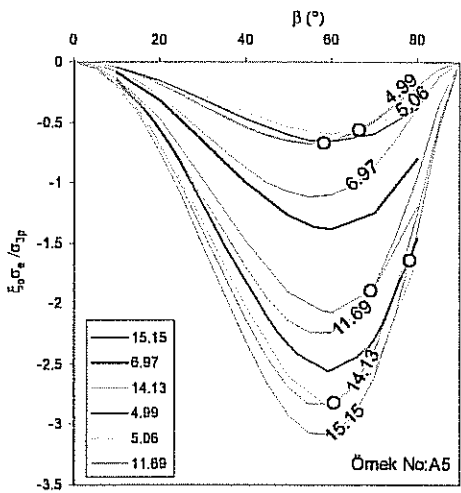
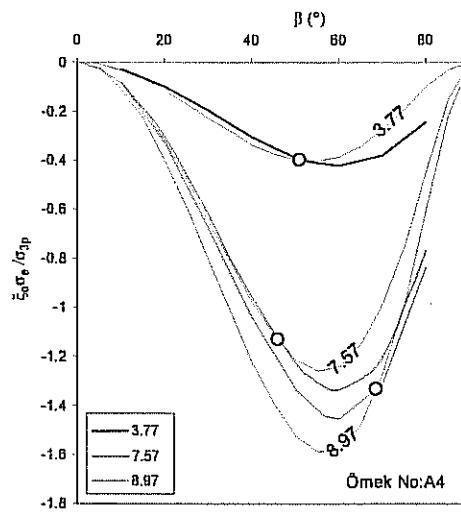
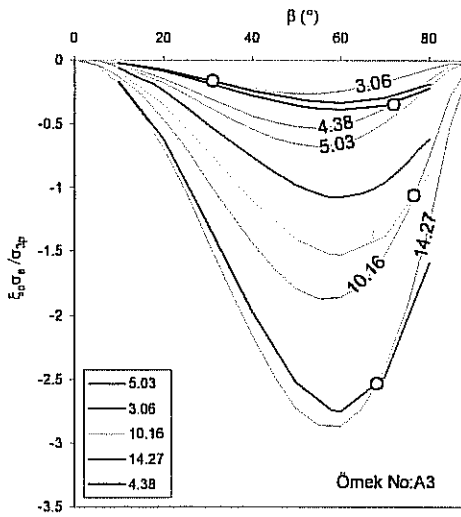
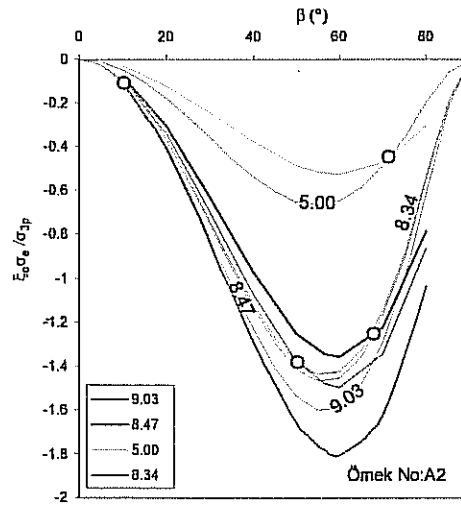
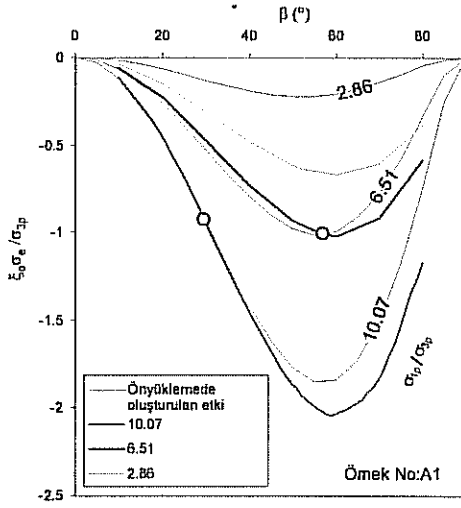
$$\sigma_{KE} = \frac{(\sigma_{1p} \cos^2\beta + \sigma_{3p} \sin^2\beta) - \sqrt{(\sigma_{1p}^2 \cos^2\beta + \sigma_{3p}^2 \sin^2\beta)}}{\cos^2\beta - \cos\beta} \quad (\text{Eş. 8.13})$$

Diğer bir ifadeyle bu ilişki, ancak belirli bir yönelime sahip Griffith çatlakları içeren örneklerin üç eksenli önyüklemeye maruz kalması ve bu örneklerde tek eksenli yükleme ile AE deneyleri yapılarak belirlenen KE seviyelerinin kuramsal bir tabana oturtulabilmesi için geçerli olacaktır. Söz konusu örneklerin birden fazla yönde yönelime sahip çatlaklar içermesi ve bu çatlakların eşit sayıda dağılması durumunda, yukarıda değinilen hususlar nedeniyle, Eşitlik 8.13'ün doğrudan geçerli olması mümkün değildir. Bunun yerine, yukarıda değinildiği gibi, bazı varsayımlar doğrultusunda yaklaşımlarda bulunulması mümkün olabilecektir.

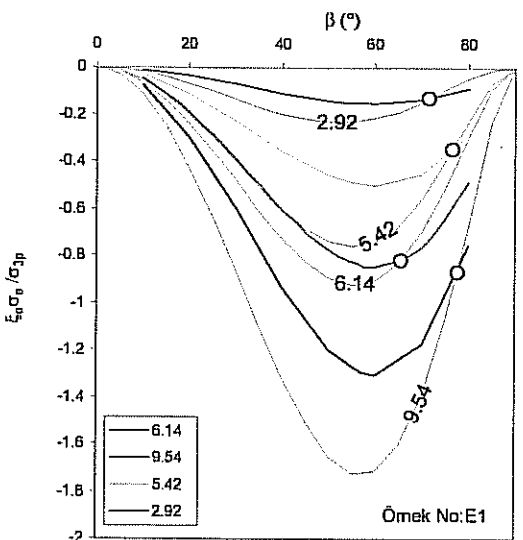
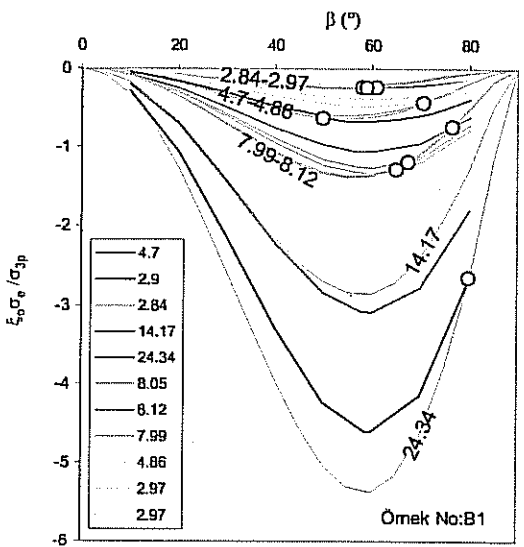
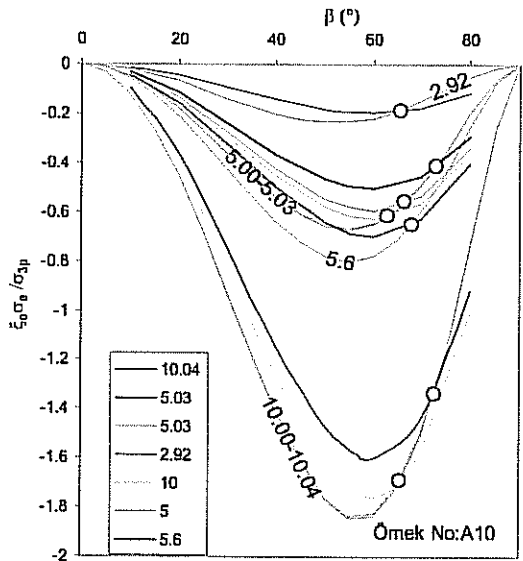
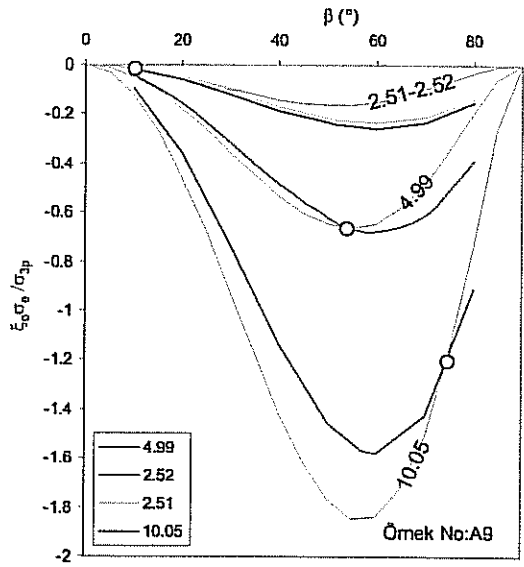
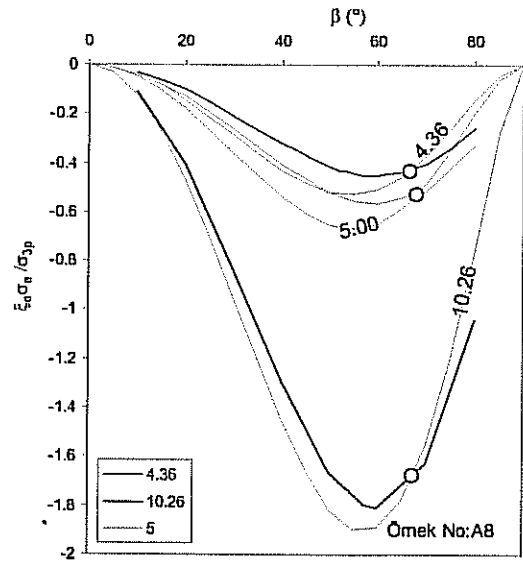
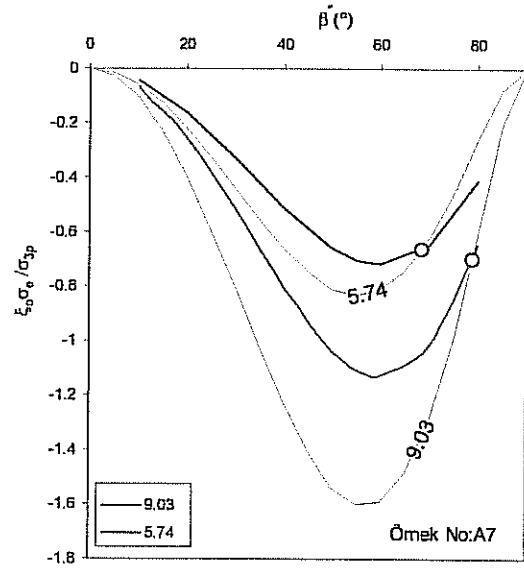
Bu çalışmalara ve yapılan yorumlara katkı sağlayabileceği düşüncesiyle, ek olarak, Şekil 8.35'te verilen grafikler hazırlanmıştır. Karşılaştırmaların her örnek grubu için tek bir grafik üzerinde yapılabilmesi amacıyla, Şekil 8.31'de hazırlanan grafiğin kullanımına ilişkin tanımlamalar dikkate alınarak, y ekseninde  $\sigma_e \xi_o$  yerine  $\sigma_e \xi_o / \sigma_{3p}$  değerleri konulmuştur. Böylelikle, önyüklemelerde uygulanan gerilmelerde  $\sigma_{3p}$  değeri ne olursa olsun, aynı eğri üzerinden yorumlama yapılmasına olanak sağlanmıştır. Şekil 8.35'teki grafiklerde verilen gri eğriler, örneklere uygulanan üç eksenli öngerilmeler dikkate alınarak ve Eşitlik 8.10 kullanılarak, önyüklemelerde örnek içinde oluşturulan  $\sigma_e \xi_o / \sigma_{3p}$  değerlerinin  $\beta$  açısı ve gerilme oranlarına bağlı değişimlerini göstermektedir. Bir başka ifadeyle, örnek içinde yer alması muhtemel olan farklı yönlerdeki çatlaklarda önyüklemelerdeki gerilmelerin oranlarına bağlı olarak oluşturulan etkiyi temsil etmektedir. Diğer eğriler ise, aynı örneklerdeki AE deneylerinde belirlenen KE seviyelerinin Eşitlik 8.12'de  $\sigma_1$  yerine konularak hesaplanan  $\sigma_e \xi_o$ 'lerin örneğe önyüklemede uygulanan  $\sigma_{3p}$ 'ye oranlanarak normalleştirilmesiyle elde edilmiş değerlerin  $\beta$  açısına bağlı değişimlerini göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, tek eksenli yüklemedeki AE deneylerinde KE seviyesinin belirlendiği gerilme değerine ulaşıldığı anda farklı yönlerdeki çatlaklarda ulaşılan etkiyi temsil etmektedir. Grafiklerin yorumlanmasında kolaylık sağlaması



Şekil 8.35a: A4 no.lu örnek grubuna ait karotlarda, farklı  $\beta$  açlarına sahip çatlaklarda önyüklemelerde oluşturulan etki (gri renkli eğriler) ile KE seviyeleri dikkate alınarak belirlenen etkiyi ifade eden eğriler (renkli eğriler). (Şekillerde KE seviyelerinden belirlenen eğrilerin önyüklemede hangi eğriyle karşılaştırılması gerektiğini ifade etmek için, açıklamalarda renkli doğrusal sembollerin yanında önyüklemedeki gerilme oranları verilmiştir).

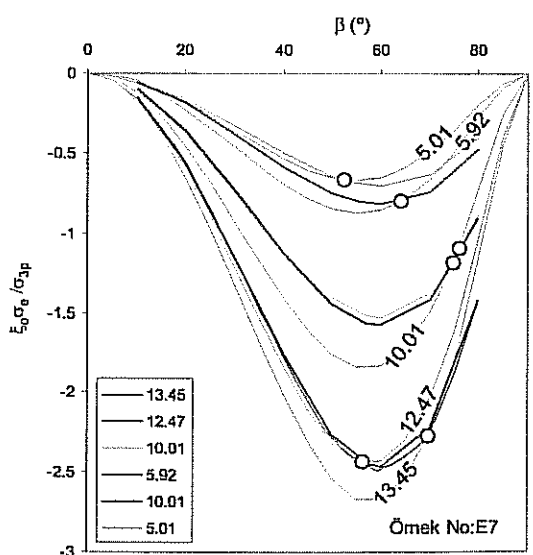
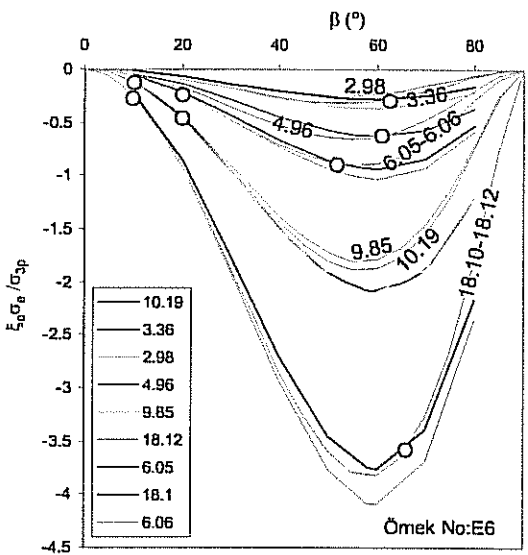
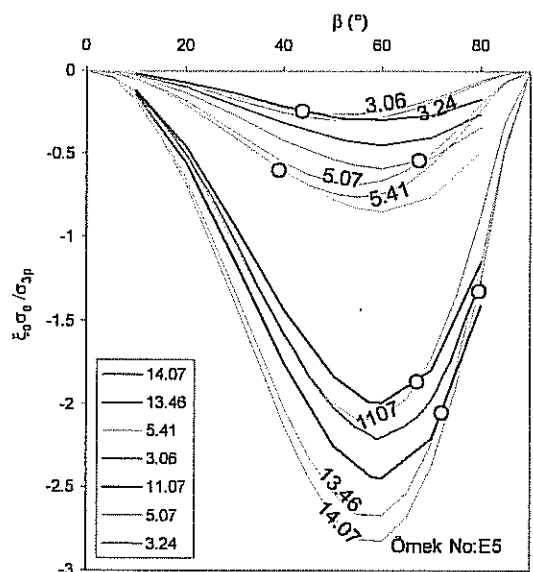
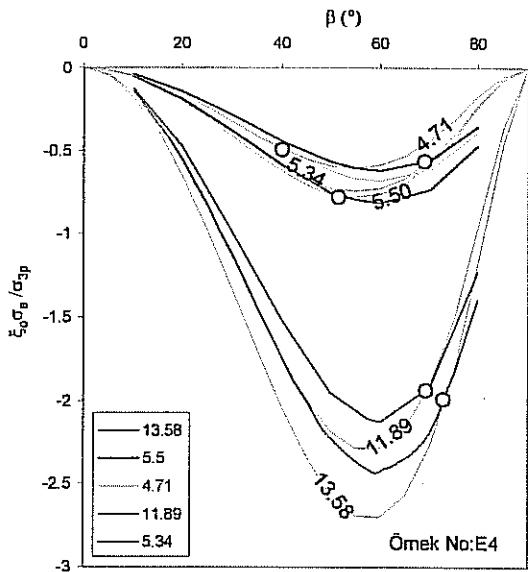
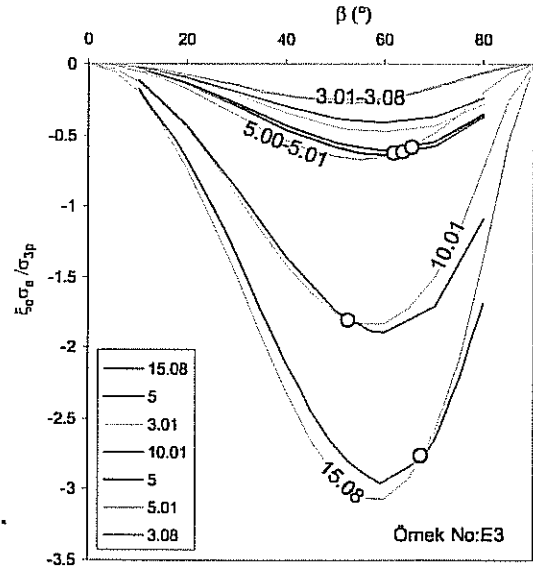
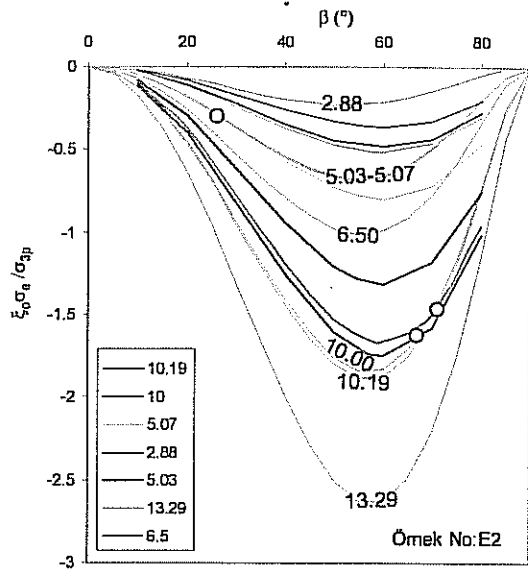


Şekil 8.35b: Her bir örnek grubuna ait karotlarda, farklı  $\beta$  açlarına sahip çatlaklarda önyüklemelerde oluşturulan etki (gri renkli eğriler) ile KE seviyeleri dikkate alınarak belirlenen etkiyi ifade eden eğrileri (renkli eğriler). (Şekillerde KE seviyelerinden belirlenen eğrilerin önyüklemelerde hangi eğriyle karşılaştırılması gerektiğini ifade etmek için, açıklamalarda renkli doğrusal sembollerin yanında önyüklemelerdeki gerilme oranları verilmiştir).

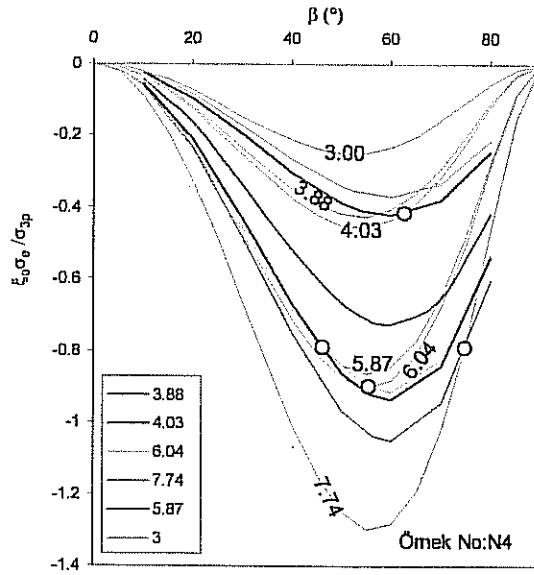
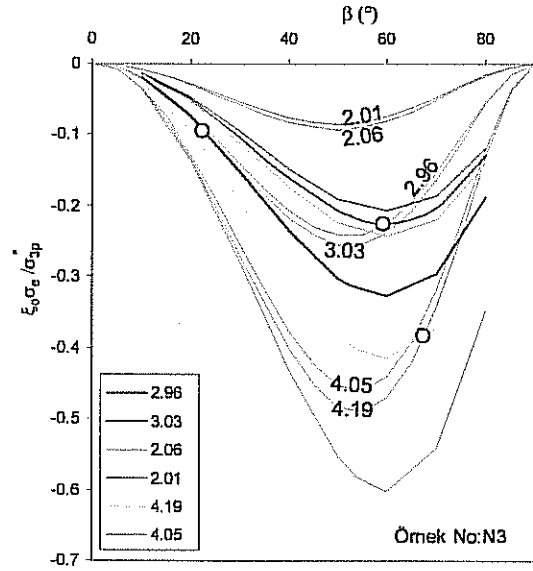
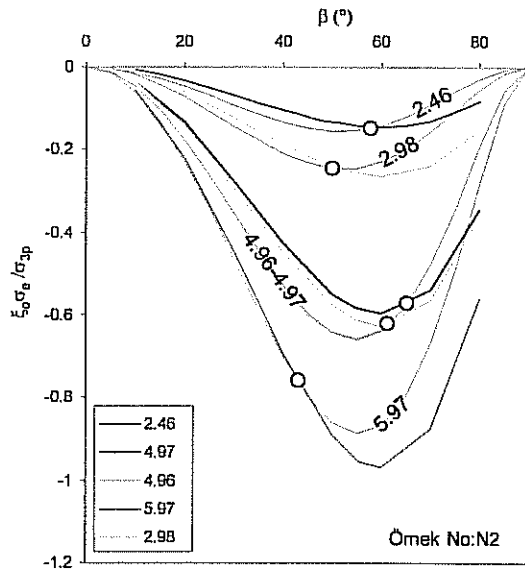


Şekil 8.35b: (devamı).





Şekil 8.35b: (devamı).



Şekil 8.35b: (devamı).

amacıyla, A4 no'lu örnek grubuna ait karotlardaki deneylerden elde edilen sonuçlara göre hazırlanan eğriler Şekil 8.35a'da verilmiş ve bu şekil üzerinde ayrıntılı değerlendirme yapılmıştır. Bu şekilden de görülebileceği gibi, A4 no.lu örnek grubundan 3 karot örneği üç eksenli önyüklemelerde 3.77, 7.57 ve 8.97 gibi  $\sigma_{1p}/\sigma_{3p}$  oranlarına karşılık gelen gerilmelere maruz bırakılmıştır. Bu karotlara uygulanan öngerilmelere bağlı olarak, farklı yönlerdeki çatlaklarda gelişen  $\sigma_{e\xi\sigma}/\sigma_{3p}$  değerlerine, dolayısıyla oluşturulan etkiye karşılık gelen eğriler gri renkle ve önyüklemedeki gerilme oranları üzerlerinde gösterilmiştir. Sonraki aşamada, bu karotlarda tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapılmış ve belirlenen KE seviyelerine karşılık gelen gerilme değerine ulaşıldığı anda örnek içindeki farklı yönelimlere sahip çatlaklarda ulaşılan etki, Şekil 8.35a'da renkli eğrilerle gösterilmiştir (önyüklemede 3.77, 7.57 ve 8.97  $\sigma_1/\sigma_3$  oranlarına maruz bırakılmış örnekler için sırasıyla, kırmızı, mavi ve yeşil eğriler). Başka hiç bir etki gözönünde bulundurulmaz ve sadece örneğin belirli yönlerdeki mikroçatlakları hakim olarak içerdiği düşünülürse, üç eksenli önyüklemelerde oluşturulan etkiler ile AE deneylerindeki KE seviyelerine karşılık gelen gerilme değerlerinde ulaşılan etkileri ifade eden Şekil 8.35a'daki eğrilerin kesişme noktaları (dairelerle gösterilmiştir), deney örneklerinin hakim olarak içerdiği mikroçatlak yönlerinin  $\beta$  cinsinden değerlerine karşılık gelmektedir. Bu durumda A4 no.lu örnek grubundaki deney örnekleri için bu açılar,  $\sigma_1/\sigma_3$  oranı 3.77 olan karot örneği için yaklaşık,  $50^\circ$ , 7.57 için  $45^\circ$  ve 8.97 için  $70^\circ$ 'dir. Daha önce de değinildiği gibi, bu yorum sadece örneklerin belirli bir yönde diğer yönlerle oranla belirgin olarak ayırtedilebilecek düzeyde daha fazla mikroçatlak içermesi durumunda geçerlidir. Bununla birlikte, KE seviyelerinin deneysel olarak belirlenen bir değer olması nedeniyle, bazı düzensizliklerin olabileceği ve gerek bu durum gerekse özellikle önyüklemelerde düşük  $\sigma_{1p}/\sigma_{3p}$  oranı uygulanan örneklerde KE seviyesinin belirlenmesine ilişkin güçlükler dikkate alındığında, yukarıda değinilen yoruma ilişkin bir hata payı olabileceği gözardı edilmemelidir. Bu nedenle, söz konusu kesişme noktalarına karşılık gelen  $\beta$  açılarının daha farklı değerler alabileceği ve kesişme noktalarının söz konusu hata payları ölçeğinde farklılık gösterebileceği düşünülmelidir. Diğer bir ifadeyle, yukarıda belirtilen açılar ( $50^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $70^\circ$ ), yukarıda

değınilen nedenlerden dolayı, gerçekte olduğundan belirli oranlarda sapma gösterebilirler.

Bu açıklamalar doğrultusunda, Şekil 8.35a ve 8.35b'de verilen grafikler incelendiğinde, toplam 116 deneyden 23'ü için belirlenen eğri çiftlerinin kesişmediği görülmektedir. A6, E2, ve E3 no'lu örnek grupları için sırasıyla 4, 4 ve 3'er adet eğri çifti  $\sigma_{1p}/\sigma_{3p}$  oranları nispeten yüksek (bu gruplara ait 7 örnek için bu oran 4 ve daha fazla) olmasına karşın kesişmezken, tüm örnekler için de kesişmeyen 13 adet eğri çiftinin  $\sigma_{1p}/\sigma_{3p}=3$ 'e yakın ve daha düşük oranlara sahip olduğu belirlenmiştir. Dairelerle gösterilen kesişme noktaları ise, ağırlıklı olarak önyüklemeleri temsil eden eğrilerin  $\beta_{crit}$  açıları veya daha yüksek açılar için aldığı değerlere karşılık gelmektedir.

Bu değerlendirmelerin ışığında, bu bölümde değınilen AE deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- (1) Üç eksenli önyüklemeye maruz bırakılmış örneklerde tek eksenli yükleme ile AE deneyleri yapılarak belirlenen KE seviyeleri, öngerilmelerin oranlarına ve deney örneklerinin içerdikleri Griffith çatlaklarının yönelimlerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.
- (2) Üç eksenli önyüklemelerle örnek içinde oluşturulan etkinin, örneklerin deformasyon ve çatlak gelişimi aşamalarından çatlak kapanımı bölgesi içinde yer alması durumunda KE'nin belirlenmesi güçleşmektedir. Bu nedenle, bu bölgede oluşturulan etkinin KE ile ilişkilendirilmesi için Griffith çatlağında gelişen en büyük çekilme gerilmelerinin belirlendiği eşitlikler kullanılamamaktadır. Bu durumda muhtemelen farklı mekanizmaların geçerliliği söz konusu olmaktadır.
- (3) Önyüklemelerdeki gerilme oranlarının  $(\sigma_{1p}/\sigma_{3p}) \leq 3$  olması durumunda, KE seviyesinin belirlenmesi güçleşmekte ve bu nedenle belirlenen seviyelerin örnek içinde önyüklemede oluşturulan etkiyle değil, daha farklı bir gerilme aşamasıyla ilişkilendirilmesi söz konusu olabilmektedir.

(4) Örneklerin belirli yönlerde hakim Griffith çatlakları içermeleri durumunda ise, belirlenen KE seviyelerinin, Griffith çatlaklarında gelişen en büyük çekilme gerilmeleriyle ilişkilendirilip Eşitlik 8.13'te verildiği gibi ifade edilmesi mümkündür. Böyle bir durumda, düşük öngerilme oranları için dahi KE seviyesinin bu eşitlikle belirlenmesi mümkün olacaktır.

(5) Örneklerin tüm yönlerde eşit veya benzer miktarda Griffith çatlakları içermesi durumunda da yaklaşık olarak  $\beta_{crit}$  ve  $\beta=60^\circ$ 'lik yönelimlere sahip çatlaklardaki en büyük çekilme gerilmeleri ile KE seviyelerinin kabul edilebilir oranlarda benzerlik gösterdiğini söylemek mümkündür. Ancak bu yaklaşım, bu çalışma kapsamında uygulanan öngerilmelerin oranı ile sınırlı olup, sadece

$$1 \leq \frac{\sigma_{1p}}{\sigma_{3p}} < \infty$$

durumu için geçerlidir. Diğer durumlar için gerek kuramsal, gerekse deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

## 9. ARAZİ GERİLMELERİYLE KE SEVİYELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRMELER

### 9.1. Sondajlardan Alınan Örneklerde KE Seviyelerinin Değerlendirilmesi

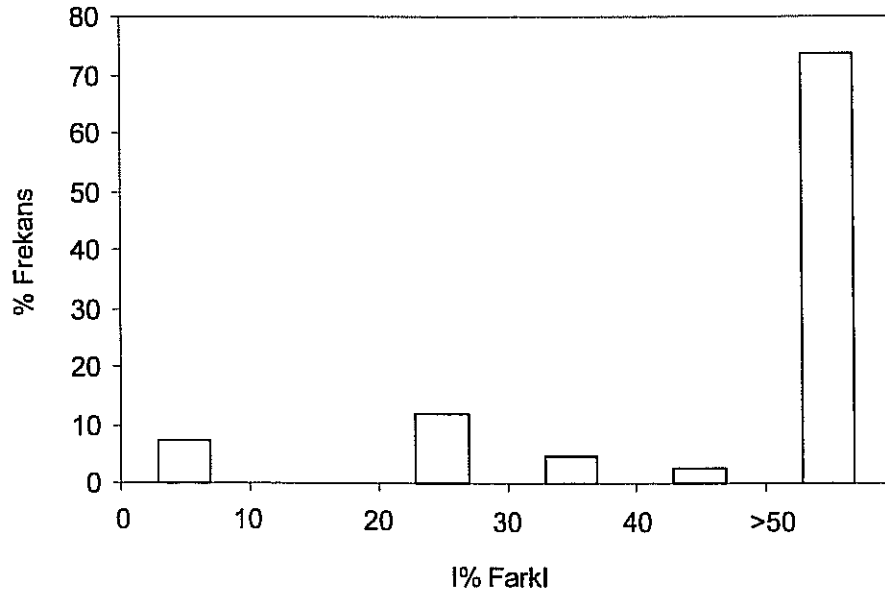
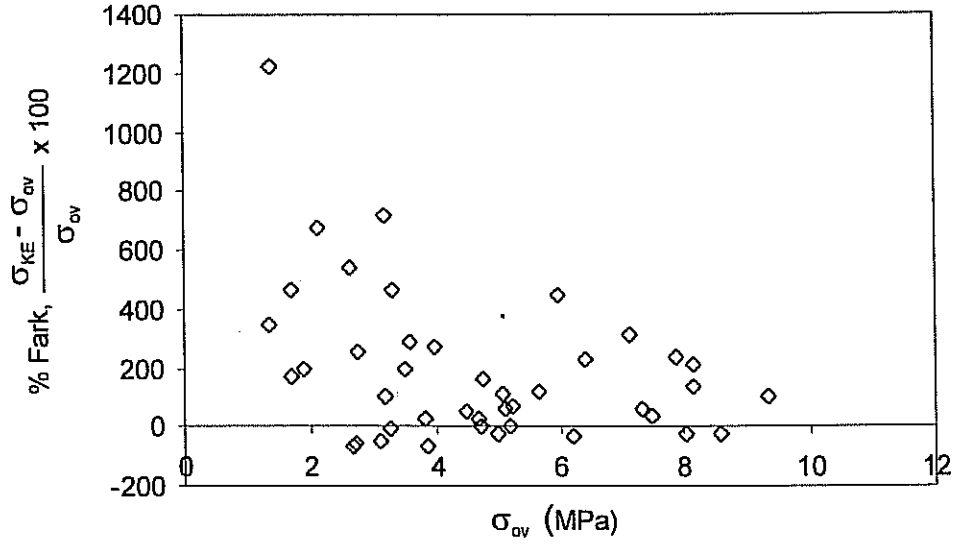
Literatürde verilen bilgiler (bkz. Bölüm 2.1) dikkate alındığında, laboratuvardaki üç eksenli önyükleme ve tek eksenli koşuldaki AE deneylerinden belirlenen KE seviyelerinin önyüklemedeki en büyük asal gerilmelerle ( $\sigma_{1p}$ ) ilişkili olabileceği de olası bir sonuç olarak görülmektedir. Bu nedenle, Bölüm 5'te de belirtildiği gibi, bu çalışma kapsamında bu tür bir sonucun elde edilmesi durumunda örnek üzerinden gerilme etkisi kalktıktan sonra AE deneyi yapıncaya değin geçen sürenin (bekletme zamanı) etkisinin araştırılması amacıyla, MTA karot arşivinden geçmiş yıllara ait sondajlardan karot örnekleri alınmıştır. Farklı bir sonucun çıkması durumunda ise, oldukça yakın tarihte yapılmış sondajlara ait karot örnekleri üzerinde tek eksenli yüklemeye koşulunda AE deneyleri yapılarak, belirlenecek KE seviyelerinin örtü gerilmeleriyle karşılaştırılması planlanmıştır. Ancak, örnekleme yapıldığı dönemde, MTA karot arşivinde yürütülen düzenleme ve arşivleme çalışmaları nedeniyle yakın tarihli sondajlardan örnekler alınamadığına değinilmiştir. Bu çalışmanın yapılmasıyla, laboratuvara önyüklemeye maruz bırakılmış örneklerden alınan sonuçların sondajlardan alınan örneklerdeki sonuçlarla teyit edilmesi veya daha farklı bir bakış açısının ortaya çıkması söz konusu olabilecektir.

Bölüm 8'de verilen çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, eksenel gerilmelerin yanı sıra, yanal gerilmelerin de ( $\sigma_{3p}$ ) KE seviyesi üzerinde etkili olduğu ve ayrıca örneklerin içerdikleri Griffith çatlaklarının yönelimlerinin de rol oynadığı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, yakın tarihli sondajlardan alınmış örnekler üzerinde tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapılması çok daha uygun olmakla birlikte, ancak mevcut örnekler üzerinde deneyler yapılabilmiş ve elde edilen sonuçlar yukarıda değinilen hususlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu örneklerde yapılan AE deneylerinin sonuçları ve belirlenen KE seviyeleri EK 3'te verilmiştir.

Deneylerden elde edilen "AE aktivitesi – zaman – gerilme" grafikleri incelendiğinde (EK 3a), tek eksenli yüklemenin düşük seviyelerinde genel olarak çok fazla AE

aktivitesi gözlenirken, belirli bir gerilmeden sonra AE aktivitesi azalmış ve aktivite bir süre yaklaşık sabit kaldıktan sonra tekrar artış göstermiştir. Bu grafiklerdeki AE aktivitesi genel olarak; deformasyon ve çatlak ilerlemesi süreçlerinden çatlak kapanımı, elastik kısım ve birincil çatlak ilerlemesinin başladığı kısım ile oldukça benzerlik sunmaktadır. Bu deneylerde AE aktivitesinin tekrar artış gösterdiği andaki gerilme değerleri KE seviyesi olarak değerlendirilmiş ve kuramsal olarak hesaplanan örtü gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 9.1). Şekil 9.1'den görüleceği gibi, belirlenen KE seviyelerinin hemen hemen tamamı hesaplanan örtü gerilmelerinden oldukça büyüktür. Elde edilen bu sonuç, Bölüm 8'de varılan sonucu destekler nitelikte olup, tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyinden belirlenen KE seviyesinin örneğin yükleme yönünde etkisinde kaldığı önceki gerilmeye karşılık gelmediğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu konuya ilişkin aşağıda verilen hususlar bu değerlendirmenin kesinliğini belirsizleştirmektedir.

- (1) Bekletme süresi uzadıkça KE seviyesinin kaybolduğu, laboratuvarında önyüklemeye maruz bırakılmış örneklerde AE deneylerinin yapıldığı çalışmalarda özellikle değinilen bir konudur (bkz. Bölüm 3.1). Sondaj örneklerinin uzun süreler beklediği düşünülürse, KE seviyesi olarak nitelendirilen bu gerilme değerlerinin örneklerin etkisinde kaldıkları önceki gerilmelerle ilişkili olmayabileceğinin değerlendirmelerde dikkate alınması gereken bir husus olduğu ortaya çıkmaktadır.
- (2) 1. maddedeki yorumun geçerli olması durumunda, bu deneylerde KE seviyesi olarak nitelendirilen gerilme değerleri birincil çatlak ilerlemesi aşamasının başladığı gerilme değerleriyle ilişkili olmalıdır.
- (3) Literatürde; örneklerin etkisinde kaldıkları öngerilme süresi arttıkça, KE seviyesinin kaybolması için gerekli bekletme süresinin arttığı da belirtilmektedir (bkz. Bölüm 3.1). Laboratuvarında önyükleme yapılmış örneklere oranla kayaların arazide çok daha uzun süre boyunca gerilme etkisinde kaldıkları dikkate alınırsa, KE seviyesinin kaybolması için gerekli bekletme süresinin laboratuvarında yapılan çalışmalardan elde edilenlere oranla daha uzun olması gerekmektedir. Bu durumda, belirlenen KE seviyeleri örneklerin etkisinde kaldıkları önceki gerilmelerle ilişkilendirilebilir.



Şekil 9.1: Belirlenen KE seviyelerinin kuramsal olarak hesaplanan örtü gerilmeleriyle karşılaştırılması.



Yukarıda değinilen belirsizliklerden dolayı, sondaj örneklerinden elde edilen KE seviyelerinin yorumlanmasında güçlük çekilmektedir. Daha sağlıklı bir sonuca ulaşılması için, sondajlardan örnekler alındıktan sonra fazla bekletilmeden tek eksenli koşulda AE deneylerinin yapılması ve öncelikle bu tür örneklerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu tür bir çalışmada bekletme süresinin etkisi devre dışı bırakılarak, yukarıda değinilen belirsizliklerden dolayı farklı değerlendirmelerin yapılabilmesine olanak tanınmamış olacaktır. Tez kapsamında sondaj örnekleri için elde edilen sonuçlar, ancak önerilen bu tür çalışmalar sonrasında varılan sonuçlarla birlikte değerlendirildiği takdirde anlamlı olacaktır. Bu nedenle, sondajlardan alınan örnekler için elde edilen KE seviyeleri, kuramsal yaklaşımlar da dikkate alınarak, daha ayrıntılı bir değerlendirmeye tabi tutulmamıştır. Yukarıda önerilen deneyler yapıldığı takdirde, sondaj örneklerinin etkisinde kaldığı yatay gerilmeler bilinmemekle birlikte, literatürde sunulan bazı kuramsal ve görgül eşitliklerden yararlanılarak yaklaşımlara gidilebilir. Bu amaç doğrultusunda, örneğin Terzahgi ve Richart (1952) tarafından önerilen  $k' = v/(1-v)$  eşitliğinin yanı sıra, Sheorey (1994) ve Sheorey vd. (2001) tarafından kayaların Poisson oranı ve elastik modülü değerlerinin girdi parametresi olarak kullanıldığı eşitliklerden yararlanılabilir. Ayrıca, literatürde verilen yatay gerilmelerin derinlik ve örtü gerilmesine bağlı olarak değişimini ifade eden görgül yaklaşımlar Amadei ve Stephansson (1997) tarafından derlenmiş olup, bu ilişkilerden de yararlanılarak, yapılacak çalışmada elde edilen sonuçların bu yaklaşımlarla hangi oranlarda benzerlik gösterdiği araştırılabilir.

Bu çalışmanın yanı sıra, proje kapsamında bazı lokasyonlardan yönlü blok örnekleri derlenmiş ve bunlardan alınacak yönlü karotlarda AE deneyleri yapılarak değerlendirme yapılması planlanmıştır. Ancak, 8. Bölüm'de verilen sonuçlar ve sondaj karotlarına ilişkin değerlendirmeler dikkate alınarak yönlü örneklerde AE deneylerinin yapılmasına gerek kalmadığı anlaşılmıştır.

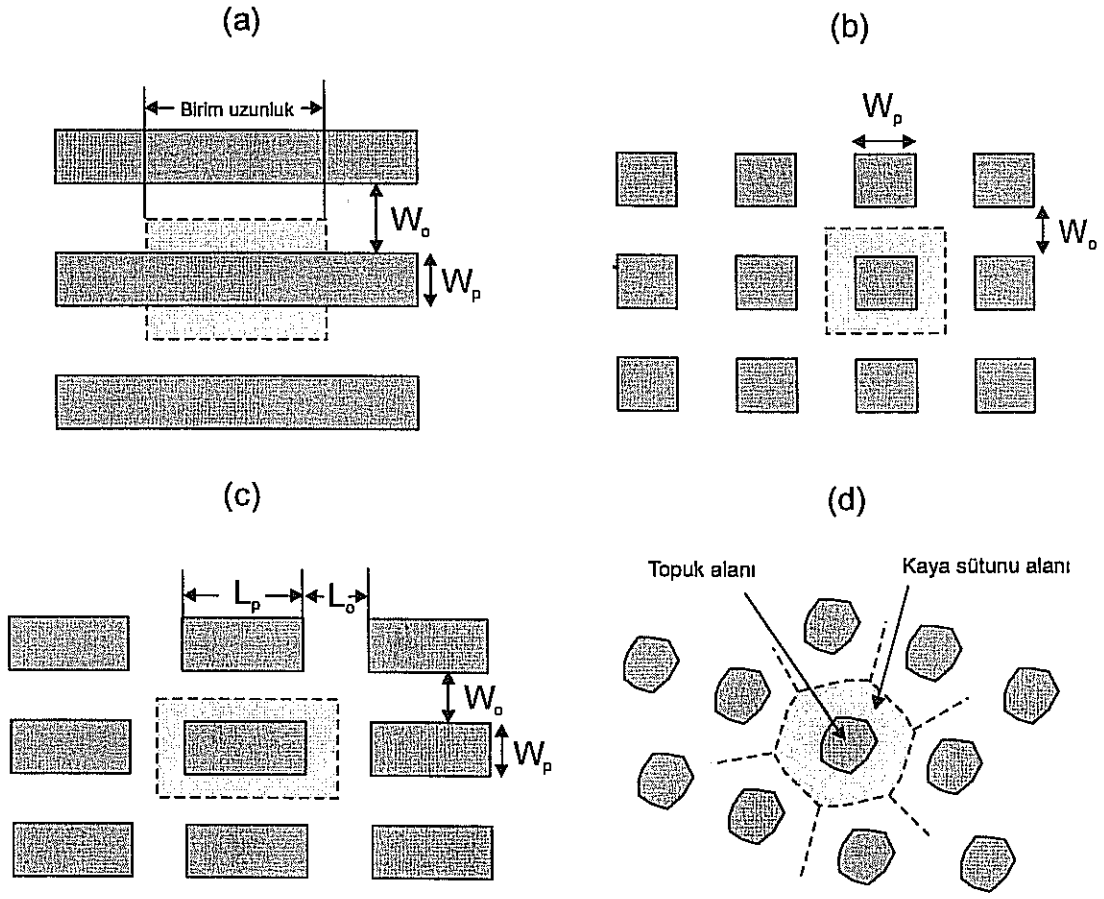
## **9.2. AE Tekniği Kullanılarak Arazi Gerilmelerinin Belirlenebilirliğine İlişkin Değerlendirmeler**

Bölüm 3'te belirtilen gerekçelerden dolayı, tez kapsamında; gerilim boşaltma, hidrolik çatlatma vb. gibi ölçüm tekniklerinden yararlanılarak pilot bir bölgede

gerilmelerin belirlenmesi ve aynı yerlerde AE yöntemiyle de gerilmelerin belirlenerek karşılaştırılma yapılması mümkün olamamıştır. Bu nedenle, Bölüm 8'de sunulan laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçların bu tür çalışmalardan elde edilenlerle farklılık gösterip göstermeyeceği yönünde değerlendirme yapılamamıştır. Bununla birlikte, tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyi yapılarak örneğin alındığı yöndeki arazi gerilmesinin (normal gerilme) belirlenmesini öngören yaklaşımın kabul görmemesinin en büyük nedeni, literatürdeki laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçların farklılık göstermesi ve önyüklemelerdeki yanal gerilmelerin etkili olduğunu ortaya koyan çalışmalardır. Bölüm 8'de verilen çalışmalardan da benzer sonuç elde edilmiş ve ayrıca mikroçatlakların yöneliminin önemli olabileceği belirlenmiştir. Buna karşın, tek eksenli önyüklemeye maruz kalmış örnekler için belirlenen KE seviyelerinin ise, önyüklemede uygulanan gerilmeye karşılık geldiği görülmüştür. Bu çalışmalar dikkate alındığında, arazi gerilmesinin AE tekniğinden yararlanarak belirlenebilmesi için; kaya örneğinin araziden alındığı anda tek eksenli bir gerilme etkisinde kalması ve tek eksenli yükleme koşulundaki AE deneyinin söz konusu arazi gerilmesinin etkin olduğu yöne paralel olarak alınacak karot üzerinde yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, "doğada bir kaya örneğinin böyle bir etkiye maruz kaldığı durumlar mevcut mudur?" sorusuna "evet" yanıtı bulunduğu takdirde, bu konuya ilişkin önerilerin yapılması mümkün olabilecektir. Herhangi bir dış müdahale olmadığı takdirde böyle bir durum doğada mevcut değildir. Bu nedenle, mühendislik yapılarının inşası sırasında bu tür durumların söz konusu olup olmadığı dikkate alınmalıdır. İlk olarak akla gelen durum, maden mühendisliği uygulamalarında yeraltı işletmelerinde destek amaçlı bırakılan topuklardır. Düşey yönde belirli aralıklarla bırakılan topukların her biri, şekillerine ve örtü gerilmelerine bağlı olarak, belirlenebilen ikincil gerilmelerin etkisinde kalmaktadır. Maden mühendisliği uygulamalarında farklı topuk düzenleri Şekil 9.2'de, bu şekildeki yapılara bağlı olarak topuklara etkiyen ikincil gerilmelerin ( $\sigma_p$ ) belirlenmesi için kullanılan ilişkiler ise Eşitlik 9.1'de verilmiştir (Hoek ve Brown, 1980).

$$\sigma_p = \gamma D(1 + W_o / W_p) \dots\dots\dots (\text{Şerit topuk}) \quad (\text{Eş. 9.1a})$$

$$\sigma_p = \gamma D(1 + W_o / W_p)^2 \dots\dots\dots (\text{Kare topuk}) \quad (\text{Eş. 9.1b})$$



Şekil 9.2: (a) Şerit, (b) kare, (c) dikdörtgen ve (d) gelişigüzel şekilli topuk bırakma düzenleri ile boşluk ve topuk alanlarını ifade eden parametreler (Hoek ve Brown, 1980).

$$\sigma_p = \gamma D(1 + W_o / W_p)(1 + L_o / L_p) \dots\dots\dots \text{(Dikdörtgen topuk)} \quad (\text{Eş. 9.1c})$$

$$\sigma_p = \gamma z(1 + \text{topuğun taşıdığı katman sütununun alanı/ topuk alanı}) \dots\dots\dots \text{(Gelişigüzel şekilli topuk)} \quad (\text{Eş. 9.1d})$$

Burada;

$\gamma$  : birim hacim ağırlık

D : derinlik

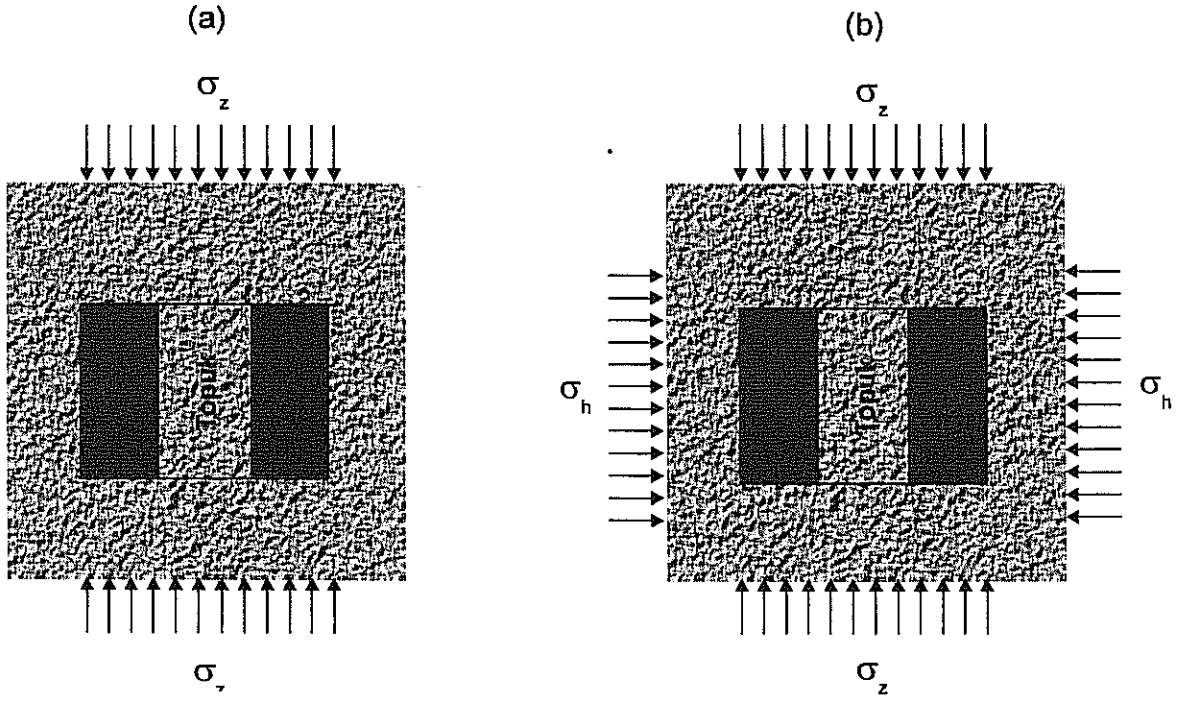
$W_o$ : oda genişliği

$W_p$ :topuk genişliği

$L_o$ : oda uzunluğu

$L_p$ : topuk uzunluğu

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 9.1a, 9.1b, 9.1c ve 9.1d'deki ilişkiler sırasıyla Şekil 9.2a, 9.2b, 9.2c ve 9.2d'de gösterilen topuk düzenleri için önerilen ilişkilerdir. Ancak bu ilişkiler, sadece düşey gerilmenin varlığı dikkate alınarak üretilmiştir (Şekil 9.3a). Yatay yönde de bir asal gerilme etkidiği taktirde (Şekil 9.3b), topuk içinde gelişen gerilme dağılımı değişmektedir (Hoek ve Brown, 1980). Bu durumu, bırakılan topuğun şekli ve boyutları ile düşey ve yatay yöndeki gerilmelerin oranları denetlemektedir. Üçüncü boyuttaki asal gerilmenin de farklı bir büyüklükte etkidiği düşünülürse, durum daha daha karmaşık bir hal almaktadır. Bu durumda, bir topuk yapısından alınacak örnekte AE deneyi yapılarak belirlenen KE seviyesi, sözü edilen birden fazla gerilmenin örnek içinde yarattığı etkiye karşılık gelecektir. Bu nedenle, belirlenen KE seviyesinden yola çıkılarak ortamdaki gerilmelerin yorumlanması güçleşmektedir.



Şekil 9.3: (a) Düşey ve (b) düşey ve yatay yönde asal gerilmelere maruz kalan bir yeraltı açıklığında bırakılan topuklar.

## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Akustik Emisyon (AE) tekniğinin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve bu konuya ilişkin literatürde yer alan tartışmalara ilişkin katkı sağlanması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- (1) Araziden derlenen kaya ve laboratuvarda hazırlanan harç örnekleri için belirlenen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının sınır değerleri (çatlak kapanımı seviyesi, ilksel çatlak ilerlemesinin başlangıcı, sistematik çatlak ilerlemesi, çatlak etkileşimi ve çatlak hasarının başlaması), örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımlarının ( $\sigma_c$ ) sırasıyla % 4.6-35.6'sı, %18.2-45.8'i, %28.1-67.3'ü, %36.5-84.2'si ve %41.2-96.5'i arasında değişim göstermektedir. Değişimlerin geniş bir aralıkta yer alması, deney örneklerinin içerdiği mikroçatlakların ve özellikle kristalli kaya örneklerinde kristallerin dağılım ve yönelimlerinin aynı kaya türüne ait örneklerde dahi farklılık gösterebilmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.
- (2) Harç örneklerinde tekrarlı tek eksenli yüklemeler gerçekleştirilerek, tek eksenli önyükleme ve ardından tek eksenli yükleme koşulunda yapılan AE deneylerinden elde edilen KE seviyelerinin, oldukça belirgin olarak önyüklemedeki en büyük gerilme değerlerine karşılık geldiği gözlenmiş ve farklılığın %10'dan daha düşük olduğu ortaya konmuştur.
- (3) Tekrarlı tek eksenli yüklemelerle belirlenen KE seviyelerinin, bir önceki yüklemelerdeki en büyük gerilmelerle (önyükleme) ilişkisi araştırılmıştır. Bu önyükleme seviyeleri, örneklerin çatlak kapanımı aşamasından çatlak ilerleme süreçlerine kadar değişim gösteren bir aralıkta yer almaktadır. Belirlenen Kaiser Etkisi seviyeleri ile önyüklemelerdeki gerilmeler arasındaki farkların %85'inin %10'dan, %96'sının ise %15'den daha az olduğu görülmüştür. Genel olarak tüm kaya örnekleri için benzer farklar elde edilmiş olmakla birlikte, düşük dayanımlı kaya örneklerine ait deneylerden elde edilen farkların % 15'i geçtiği belirlenmiştir.

(4) Üç eksenli önyüklemeye maruz bırakılmış harç ve kaya örneklerinde arka arkaya iki kez yapılan tek eksenli yükleme (1. ve 2. tek eksenli yüklemeler) koşulundaki AE deneylerinden belirlenen KE seviyelerinin önyüklemelerdeki gerilmelerle olan ilişkileri araştırılmış olup, 1. ve 2. tek eksenli yüklemelerdeki AE aktivitesinin karakteristiklerine ve KE seviyelerinin belirlenmesine ilişkin elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

(a) 2. yüklemelerde belirlenen KE seviyeleri önyüklemelerdeki gerilmelerle değil, AE deneyinin yapıldığı 1. yüklemelerde örneğe etkiyen en büyük gerilmelerle ilişkilidir. Bu durum, tekrarlı tek eksenli yüklemelerden alınan sonuçlarla da uyumludur. Bu nedenle, bazı araştırmacıların önerdiği gibi, önyüklemeye maruz bırakılmış bir örnek üzerinde arka arkaya iki kez tek eksenli yükleme yapılarak, 1. yüklemelerde belirgin olarak gözlenmediği takdirde 2. yüklemelerde önyüklemelerdeki gerilmelerle ilişkilendirilen KE seviyesinin belirlenebileceği yaklaşımı doğru görünmemektedir. Bu tür yaklaşımlardan elde edilen sonuçların literatürde diğer yaklaşımlarla elde edilen sonuçlardan farklılık göstereceği açıktır.

(b) KE seviyesinin tanımı doğrultusunda ve yanlış yorumlamaya gidilmemesi açısından, "toplam AE aktivitesi - zaman - gerilme" eğrisinin belirli bir eğimden saptığı (bu seviyeden sonra artarak devam etmesi durumunda) andaki gerilme değeri, bir başka ifadeyle teğetten ilk sapma noktasına karşılık gelen gerilme değeri KE seviyesi olarak nitelendirilmelidir. Literatürde farklı sonuçların elde edilmesinde KE seviyesinin belirlenmesiyle ilgili farklılıkların da rol oynadığı düşünülmektedir.

(c) Önyüklemelerde uygulanan yanal gerilmelerin aksenal gerilmelere oranı arttıkça, sonraki aşamadaki AE deneyinde KE seviyesinin belirlenmesi güçleşmektedir. Aynı durum, öngerilme farklarının örneklerin çatlak kapanımı aşamasında yer alması durumunda da gözlenmiştir.

(5) Üç eksenli önyüklemeye maruz bırakılmış örneklerde yapılan AE deneylerinde belirlenen KE seviyelerinin önyüklemelerdeki aksenal veya yanal gerilmelerle, ya

da gerilme farklarıyla ilişkili olmadığı istatistiksel bir değerlendirmeyle ortaya konmuştur.

- (6) Bu deneylerden elde edilen KE seviyelerinin ( $\sigma_{KE}$ ), literatürde önerilen  $\sigma_{KE} = \sigma_{1p} - (k + 1)\sigma_{3p}$  eşitliğiyle değerlendirilmesi durumunda göreceli olarak daha iyi bir yaklaşım sağladığı görülmektedir. Ancak, deneylerde belirlenen KE seviyeleri ile önyüklemelerdeki gerilmeler dikkate alınarak ve bu eşitlik kullanılarak her örnek grubu için k katsayılarının belirlenmesi amacıyla yapılan değerlendirmelerde, verilerin 1:1 doğrusundan önemli oranlarda sapmalar gösterdiği görülmüştür. Belirlenen k katsayılarının örneklerin jeomekanik özellikleriyle ilişkisi araştırılmış, ancak istatistiksel açıdan önemli sayılabilecek bir ilişkinin varlığı saptanamamıştır. Bununla birlikte, örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı ( $\sigma_c$ ), Brazilian çekilme dayanımı ( $\sigma_{IB}$ ) ve kohezyon (c), değerlerinin artmasıyla, doğrusal olmayan bir ilişki göstererek, k katsayılarının da arttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, görünür porozite değerlerinin azalması ile k katsayılarının da azaldığı dikkat çekmektedir.
- (7) Mohr-Coulomb ile iki boyutlu ve üç boyutlu Griffith yenilme ölçütleri dikkate alınarak ve bazı varsayımlara gidilerek, KE seviyelerinin önyüklemelerdeki gerilmeler ve kaya örneklerinin içsel sürtünme açalarına bağlı olarak ifade edilebileceği eşitlikler oluşturulmuş ve bu ilişkilerden belirlenen değerlerle AE deneylerinden belirlenen KE seviyeleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda iki ve üç boyutlu Griffith yenilme ölçütlerinden varsayımla belirlenen değerlerin, öngerilme farklarının özellikle çatlak kapanımı aşaması dışındaki deformasyon aşamalarına karşılık gelen örneklerde belirlenen KE seviyeleriyle yaklaşık %70 oranında % 20'den daha az bir farkla benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.
- (8) Bir önceki maddede değinilen sonuçlar göz önünde bulundurularak, Griffith kuramının temelini oluşturan yassı elips şekilli açık mikroçatlaklarda gelişen en büyük çekilme gerilmeleri dikkate alınmış ve değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler ışığında, bir örneğin belirli bir yönde mikroçatlaklar içermesi durumunda, üç eksenli önyüklemeye maruz kalmış bu örnekte tek eksenli koşulda AE deneyi yapılarak belirlenen KE seviyesinin kestirilebileceği bir



eşitlik önerilmiştir. Önerilen eşitlik, önyüklemelerde uygulanan gerilmelerin  $1 \leq \sigma_{1p}/\sigma_{3p} < \infty$  koşuluna uygun olması durumunda geçerlidir.

- (9) Örneklerin 0°'den 90°'ye kadar değişen yönlerde mikroçatlaklar içermesi ve bunların tüm yönler için birbirlerine yakın oranlarda olması durumunda ise, önyüklemelerle oluşturulan en büyük çekilme gerilmelerinin geliştiği  $\beta$  açılarında ( $\beta_{crit}$ ) sahip ve  $\beta=60^\circ$  olan mikroçatlaklarda oluşturulan etkilerle, KE seviyelerine karşılık gelen gerilmelerin bu çatlaklarda oluşturdukları etkiler arasında bir ilişkinin olabileceği söylenebilir. Bu belirleme, yine önyüklemelerde uygulanan gerilmelerin  $1 \leq \sigma_{1p}/\sigma_{3p} < \infty$  koşuluna uygun olması durumunda geçerlidir.
- (10) Sondajlardan alınan karot örnekleri için belirlenen KE seviyeleri ile bu karotların arazide maruz kaldıkları örtü gerilmeleri arasında bir ilişki bulunamamıştır. Bu örneklerin alınması ve AE deneylerinin yapılması arasında geçen zamanın uzun olması nedeniyle, ortaya çıkan bekletme zamanının etkisinin olup olmadığı bilinemediğinden kesin olarak bir sonucun ortaya konması mümkün olamamıştır.
- (11) Tüm bu çalışmalara ilişkin genel bir değerlendirme yapılacak olursa, tek eksenli yüklemeye yapılan AE deneyinden belirlenen KE seviyesinin, sadece deneyin yapıldığı yönde örneğin etkisinde kaldığı önceki gerilmeyle değil, bunun yanı sıra, diğer yönlerde etkiyen öngerilmelerle ve içerdikleri mikroçatlakların yönlere bağlı olarak dağılımlarıyla da ilişkili olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, AE tekniğinden yararlanılarak arazi gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla, yönlü blok örneklerinden alınan altı yöndeki karot örneği üzerinde AE deneyi yapılarak belirlenen KE seviyelerinin karotların alındığı yöndeki normal gerilmelere karşılık geldiği yaklaşımı tartışmalıdır.
- (12) AE tekniğinden yararlanılarak ve tek eksenli yükleme koşulunda AE deneyleri yapılarak belirlenen KE seviyesinin arazi gerilmeleriyle ilişkilendirilebilmesi için, örneğin arazide de sadece tek eksenli bir gerilme koşuluna maruz kalmış olması gerekmektedir. Böyle bir durum doğada mevcut değildir. Mühendislik yapılarının inşası ile ortamdaki gerilme koşulunun değiştirilmesi durumunda

dahi KE seviyesinden yararlanılarak arazi gerilmelerinin belirlenmesine ilişkin bir sonuca ulaşılabilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar gözönünde bulundurularak, konuya ilişkin gelecekte yapılmasında yarar görülen çalışmalar aşağıda öneri olarak sunulmuştur.

- (1) Örneklerin deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamalarının belirlenmesinde örnek gruplarına ait birer karot örneğinde AE deneyleri yapılmış olup, deney sayısının azlığı nedeniyle genel bir yoruma gidilememiştir. Sözü edilen aşamalar, literatürde kırılmalı kırılmalı kaya malzemesi için önerilmiştir. Bu nedenle, diğer kaya türlerinin deformasyon aşamalarının da kristalin kayalar için önerilenle benzerlik gösterip göstermediği, özellikle bu belirmelerin yapıldığı deneylerde örneklerden yayılan AE sinyallerine ilişkin veri de değerlendirilerek araştırılmalıdır. Bu tür bir çalışma sonucunda, örnek türüne bağlı olarak, AE karakteristiklerine ilişkin genel bir tanımlamaya ya da ayırtlamaya gidilebilir ve bu veriden yararlanılarak diğer kaya türlerinin deformasyon aşamaları daha ayrıntılı şekilde değerlendirilebilir.
- (2) Üç eksenli önyüklemelerin ve AE deneylerinin yapıldığı çalışmalardan çıkan sonuçlara ilişkin bazı belirsizliklerin giderilmesi amacıyla, içerisinde boyutları bilinen bir yönde ve farklı yönlerde Griffith çatlaklarını içeren modeller hazırlanarak bu örneklerde önyüklemeler ve AE deneyleri yapılarak bu çalışmada ulaşılan sonuçların geçerliliğinin ayrıca araştırılmasında yarar vardır.
- (3) Gerek bu çalışmada, gerekse laboratuvarda önyükleme yapılan örneklerde AE deneylerinin yapıldığı önceki çalışmaların bir kısmında elde edilen sonuçlara göre AE tekniği kullanılarak arazi gerilmelerinin belirlenmesi olası görünmemektedir. Ancak, önceki bazı çalışmalarda AE tekniği ve ISRM tarafından önerilen yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasında dikkat çekici düzeyde benzerlikler görülmektedir. Bu nedenle, bundan sonra bu tür çalışmalara ağırlık verilmesi gerekmekte olup, bu çalışmalarda KE seviyesi olarak nitelendirilen gerilme seviyelerinin seçimi sırasında kullanılan yaklaşımın açıklanmasına özen gösterilmelidir.

- (4) Bu çalışmada; AE sisteminin yanı sıra, osiloskop da deney sistemine dahil edilmiş ve deneyler süresince gürültü seviyesi kontrol edilebilmiştir. Böylelikle yüklemenin farklı gerilme seviyelerinde gürültü seviyesinde değişiklik olup olmadığı, dolayısıyla gerilme artışına bağlı olarak yükleme presinden kaynaklanabilecek gürültü değişiminin olup olmadığı kontrol edilebilmektedir. Bu nedenle, tüm AE deneylerinde osiloskop da sisteme dahil edilmelidir.
- (5) Akustik Emisyon tekniği, jeoteknik ve kaya mühendisliği uygulamalarında diğer bazı amaçlar için de kullanılmaktadır. 1. maddede sunulan öneride sözü edilen çalışmaların yanı sıra, şev duraysızlıkları, depremler, yeraltı açıklıklarında yenilmeye yönelik sorunlar vb. alanlarda da bir izleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de bu tür çalışmalar şimdiye değin yapılmamış olup, AE tekniğinin bu tür alanlarda kullanımıyla ilişkili çalışmalara da ağırlık verilmelidir.
- (6) Bu çalışmada kullanılan parametrik AE sistemiyle AE sayısı belirlenebilmektedir. Bu parametrenin yanı sıra, AE sinyallerinin enerjilerinin vb. parametrelerin de belirlenebildiği sistemlerin kullanılmasının değerlendirmelere başka bir boyut katması açısından önemli olduğu düşünülmektedir.
- (7) Bu çalışmada AE deneylerinin tümü havada kurutulmuş örnekler üzerinde yapılmıştır. Nem ve sıcaklık değişimlerinin KE ile ilgili yapılan değerlendirmeleri ne ölçüde etkileyeceği bir araştırma konusu olarak çalışılmalıdır.

## YARARLANILAN KAYNAKLAR

- AMADEI, B., and Stephansson, O., Rock Stress and Its Measurement. Chapman and Hall, London, (1997) 490pp.
- ANDREEV, G.E., Brittle Failure of Rock Materials: Test Results and Constitutive Models. A.A Balkema, Rotterdam, (1995) 446pp.
- ANGELIER, J., 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, (1975) 1805-1808.
- ANGELIER, J., Tectonic analysis of fault slip data sets. Journal of Geophysical Research, 89(B7), 5834-5848 (1984).
- ARMSTRONG, B.H., Valdes-Gonzales, C.M., and Leaird, J.D., 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, (1995) 429-446.
- ASTM, ASTM C 1260-94 – Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Concrete and Mineral Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, (1994) 650-653.
- AYDAN, Ö., GPS ölçümlerine dayanılarak Türkiye'nin yıllık birim deformasyon ve gerilim hızı dağılımı üzerine bir çalışma. Yerbilimleri, 22, 21-32 (2000a).
- AYDAN, Ö., Fay çiziklerinden yerkabuğuna etkiyen gerilimlerin saptanması için yeni bir yöntem ve uygulaması. Yerbilimleri, 22, 223-236 (2000b).
- AYDAN, Ö. ve Paşamehmetoğlu, A.G., Dünyanın çeşitli yörelerinde ölçülmüş yerinde gerilimler ve yatay gerilim katsayısı. Kaya Mekaniği Bülteni, 10, 1-17 (1994).
- AYDAN, Ö., and Kim, Y., 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 (2002).

- AYDAN, Ö., Kumsar, H., and Ulusay, R., 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, (2000) (on CD).
- AYDAN, Ö., Ulusay, R., Tuncay, E., Kumsar, H., Yılmazoğlu, M. ve Yüzer, E., 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. (2001).
- AYDAN, Ö., Watanabe, H., Tano, H., Tuncay, E., Ulusay, R., ve Bilgin, H.A., Orhaneli Kömür İşletmesi ve yakın çevresinin gerilme ortamı. KAYAMEK'2002, 6. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Konya, C. Şensöğüt, ve İ. Özkan (eds.), Bildiriler Kitabı, (2002) 25-32.
- AYDAY, C., Tuncan, M., Altan, M., Azdiken, S., Özkan, S., Gençler, G., Uça, D., Nefeslioğlu, H.A., Canıgür, A., Yerel, S., Ünal, G., Güney, Y., ve Çetin, A., Eskişehir yerleşim yeri mühendislik jeolojisi haritasının hazırlanması. Anadolu Üniversitesi, Araştırma Fonu Projesi, No: 000401, 192s (2001).
- BARR, S.P., and Hunt, D.P., The Kaiser effect for samples pre-stressed at 820 m and 2.4 km with stress tensor results. Rock Mechanics and Rock Engineering, 32(3), 169-193 (1999).
- BARR, S.P., Pine, R.J., and Jupe, A.J., 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, (1992) 175-182.
- BARR, S.P., Jupe, A., and Hunt, D.P., 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, (1999) 1133-1136.
- BIENIAWSKI, Z.T., Mechanism of brittle fracture of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 4(4), 395-430 (1967).

- BLAKE, W., Rock burst research at the Galena mine, Wallace, Idaho. Bureau of Mines Technical Progress Report, TPR 39, 22pp (1971).
- BLAKE, W., and Leighton, F., Recent developments and applications of the microseismic method in deep mines. Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics, New York, W.H. Somerton (ed.), AIME, (1970) 429-443,
- CHICHIBU, A., Jo, K., Nakamura, M., Goto, T., and Kamata, M., Acoustic emission characteristics of unstable slopes. Journal of Acoustic Emission, 8(4), 107-112 (1989).
- DEERE, D.V., and Miller, R.L., Engineering classification and index properties of intact rock. Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, 90-101 (1966).
- DESCOUR, J.M., 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, (1995) 529-543.
- DIEDERICHS, M.S., Kaiser, P.K., and Eberhardt, E., Damage initiation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(5), 785-812 (2004).
- EBERHARDT, E., Stead, D., Stimpson, B., and Read, R.S., Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. Canadian Geotechnical Journal, 35, 222-233 (1998).
- EBERHARDT, E., Stimpson, B., and Stead, D., Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures. Rock Mechanics and Rock Engineering, 32(2), 81-99 (1999).
- FILIMINOV, Y.L., Lavrov, A.V., Shafarenko, Y.M., and Shkuratnik, V.L., Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurement in a rock mass. Rock Mechanics and Rock Engineering, 34(4), 275-291 (2001).

- HARDY, H. R. Jr., 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, (1972) 41-83.
- HARDY, H. R. Jr., Microseismic monitoring of storage reservoirs. Proceedings of AGA Transmission Conference, Las Vegas, (1976) T354-T359.
- HARDY, H. R. Jr., 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, (1978) 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., Acoustic Emission / Microseismic Activity. A.A. Balkema, Lisse, Vol:1, (2003) 281pp.
- HARDY, H.R.Jr., and Shen, W., 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, (1992) 149-157.
- HARDY, H.R.Jr., and Kimble, E.J.Jr., 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, (1995) 457-477.
- HARDY, H.R.Jr., Zhang, D., and Zelanko, J.C., 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, (1989) 27-55.

- HAYASHI, M., Discussion: Acoustic emission to detect the geostress. Proceedings of the 4th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreux, Vol. 3, (1979) 230-231.
- HAYASHI, M., Kanagawa, T., Hibino, S., Motozima, M., and Kitahara, Y., 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, (1979) 211-218.
- HOEK, E., and Brown, E. T., Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, (1980) 527pp.
- HOOKER, V. E., Leighton, F., and Steblay, B.J., Microseismic investigations in coal mines. Mining Congress Journal, 60(10), 66-71 (1974).
- HOLCOMB, D.J., General theory of the Kaiser effect. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanic Abstracts, 30(7), 929-935 (1993).
- HOLCOMB, D.J., and Martin, R.J., Determining peak stress history using acoustic emissions. Proceedings of the 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, E. Ashworth (ed.), A.A. Balkema, (1985) 715-722.
- HUGHSON, D.R., and Crawford, A.M., 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.), (1987) 981-985.
- ISHIGURO, Y, Nishino, K., Murakami, A., Sugawara, K., and Kawamoto, T., In-situ initial rock stress measurement and design of deep underground powerhouse cavern. Proceedings of the 9th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Paris, G. Vouille and P. Berest (eds.), Vol. 2, (1999) 1155-1158.
- ISRM, Rock Characterization, Testing and Monitoring – ISRM Suggested Methods. E.T. Brown (ed), Pergamon Press, Oxford, (1981) 211pp.
- JEAGER, J.C., and Cook, N.G.W., Fundamentals of Rock Mechanics. Chapman and Hall, Third edition, London, (1979) 593pp.



- JAROSZEWSKA, A., and Reymond, M.C., 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, (1995) 313-332.
- JINGEN, D., Kangping, W., and Rongzun, H., In-situ stress determination at great depth by using acoustic emission. Proceedings of the 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics, J.J.K. Daemen and R.A. Schultz (eds.), Reno, (1995) 245-250.
- JUPE, A.J., Barr, S.P., and Pine, R.J., In-situ stress measurements obtained using overcoring and the Kaiser effect of acoustic emissions within the Cammenellis 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, (1992) 167-174.
- KAISER, J., Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen. Archiv Eisenhüttenwesen 24(1/2), 43-45 (1953).
- KANAGAWA, T., Hayashi, M., and Kitahara, Y., Acoustic emission and overcoring methods. Proceedings of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo, (1981)1205-1210.
- KASAPOĞLU, K.E. ve Gökışık, H., Akustik emisyon / mikrosismik aktivite ve kaya mekaniğindeki uygulamaları. Kaya Mekaniği Bülteni, 1, 27-34 (1982).
- KIM, K., and Franklin, J. A., Suggested methods for rock stress determination. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanic Abstracts, 24(1), 53-74 (1987).
- KOERNER, R.M., and Lord, A.E., 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, (1989) 73-86.

- KOERNER, R.M., Lord, A.E.Jr., and McCabe, W.M., 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, (1977) 243-256.
- KOERNER, R.M., Lord, A.E.Jr., and McCabe, W.M., Acoustic emission monitoring of soil stability. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 104(GT5), 571-582 (1978).
- KOJIMA, T., and Matsuki, K., A fundamental study on the Kaiser effect in the rock for tectonic stress measurement. Proceedings of the 10th International Acoustic Emission Symposium, Progress in Acoustic Emission V, K. Yamaguchi, H. Takahashi and H. Niitsuma (eds.), Sendai, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, (1990) 468-475.
- LAVROV, A., The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, 151-171 (2003).
- LAVROV, A., Vervoort, A., Wevers, M., and Napier, J.A.L., Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, 287-302( 2002a).
- LAVROV, A., Vervoort, A., Filiminov, Y., Wevers, M., and Mertens, J., Acoustic emission in host-rock material for radioactive waste disposal: comparison between clay and rock salt. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 61, 379-387( 2002b).
- MARTIN, C.D., and Chandler, N.A., The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Geomechanic Abstracts, 31(6), 643-659 (1994).
- MCCAULEY, M.L., Monitoring slope stability with acoustic emission. Proceedings of the 1st Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic

- Structures and Materials, Pennsylvania, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), Trans Tech Publications, (1977) 257-269.
- MOMAYEZ, M., and Hassani, F.P., Application of Kaiser effect to measure in-situ stresses in underground mines. Proceedings of the 33rd US Symposium on Rock Mechanics, Santa Fe, J.R. Tillerson and W.R. Wawersik (eds.), A.A. Balkema, (1992) 979-988.
- MOMAYEZ, M., Hassani, F.P., and Hardy, H.R.Jr., Maximum curvature method: A technique to estimate Kaiser-effect load from acoustic emission data. Journal of Acoustic Emission, 10(3/4), 61-65 (1992).
- MTA, 1:500 000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları (2003).
- OBERT, L., and Duvall, W., The microseismic method of predicting rock failure in underground mining. Part II: Laboratory Experiments, U.S. Bureau of Mines, RI 3803, 14pp (1945).
- OHNAKA, M., and Mogi, K., Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure. Journal of Geophysical Research, 87 (B5), 3873-3884 (1982).
- OHTSU, M., The history and development of acoustic emission in concrete engineering. Magazine of Concrete Research, 48 (177), 321-330 (1996).
- PARK, P., Park, N., Hong, C., and Jeon, S, 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, (2001) 1281-1284.
- PESTMAN, B.J., Kenter, C.J., and Van Munster, H.G., Core based determination of in-situ stress magnitudes. 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, (2001) 1353-1360.

- RAMAMURTY, T., A geo-engineering classification for rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 89-101 (2004).
- RUIZ DE ARGONDONA, V.G., Calleja, L., and Suarez del Rio, L.M., Acoustic emission during swelling and contraction tests. *Engineering Geology*, 39, 147-150 (1995).
- SARIASLAN, M.M., Yurdakul, M.E., Keçer, M., Osmañeçlebioğlu, R., Şentürk, K., Basa, F., Mutlu, G., Erkal, T., ve Aktımur, H.T., Ankara ilinin çevre jeolojisi ve doğal kaynakları. MTA Raporu, Derleme No:10069 (1998).
- SETO, M., Utagawa, M., and Katsuyama, K., 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, (1992) 159-166.
- SETO, M., Nag, D.K., and Vutukuri, V.S., In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 17, 241-266 (1999).
- SHEN, W., 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, (1995) 177-195.
- SHEOREY, P.R., A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 31, 23-24 (1994).
- SHEOREY, P. R., Murali Mohan, G. and Sinha, A., Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 1211-1216 (2001).
- SHIN, K., and Kanagawa, T., Kaiser effect of rock in acousto-elasticity, AE & DR. *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, (1995) 197- 204.

SHIN, K., Oikawa, Y., and Ito, H., 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, (2000) 965-971 (Japonca).

SRINIVASAN, C., Nair, G.J., and Raju, N.M., 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, (1995) 371-381.

STUART, C.E., Meredith, P.G., Murrell, S.A.F., and Van Munster, H., Influence of anizotropic crack damage developement on the Kaiser effecet under true triaxial stress conditions. 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, (1995) 206-219.

STYLES, P., Emsley, S.J., and McInairnie, E.A., Microseismic prediction and control of coal outburts 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, (1995) 383-399.

SUGAWARA, K., and Obara, Y., 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), (1995) 1-6.

SUGAWARA, K., and Obara, Y., 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 (1999).

SUGAWARA, K., Kanoko, K., Obara, Y., and Aoki, T., 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, (1987) 1251-1254.
- SUZUKI, T., Hikita, S., and Hashimoto, S., Measurement of landslide behaviour by an acoustic emission method. Proceedings of the 8th International IAEG Congress, A.A. Balkema, Rotterdam, (1998) 1733-1739.
- TEMEL, A., Gündoğdu, M.N., Ground, A., and Le Pennec, J.L., Ignimbrites of Cappadocia (Central Anatolia – Turkey): petrology and geochemistry. Journal of Volcanology and Geothermal Resources, 85, 447-471 (1998).
- TERZAGHI, K., and Richart, F.E., Stress in rock about cavities, Geotechnique, 3, 57-90 (1952).
- TUNCAY, E. ve Ulusay, R., Akustik Emisyon (Yayımla) (AE) tekniği: 1- AE'nin temel ilkeleri ve kaya mühendisliğindeki uygulama alanları. Yerbilimleri, 25, 65-82 (2002).
- TUNCAY, E., Ulusay, R., Watanabe, H., Tano, H., Aydan, Ö. ve Yüzer, E., Akustik Emisyon (AE) tekniği: 2- AE tekniğiyle Türkiye'de arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda bir ön inceleme. Yerbilimleri, 25, 83-98 (2002).
- ULUSAY, R., Tuncay, E., Watanabe, H., Tano, H., and Aydan, Ö., The measurement of the stress state of Turkey by Acoustic Emission (AE) method., Proc. of the 3rd International Symposium on Rock Stress, RS KUMAMOTO '03, K. Sugawara, Y. Obara, A. Sato (eds.), November 4-6, Kumamoto, Japan, (2003) 255-260.
- ÜNAL, E., Hardy, H.R.Jr., and Bieniawski, Z.T., 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, (1982) 985-995.
- VILLAESCUSA, E., Seto, M., and Baird, G., Stress measurements from oriented core. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39 (5), 603-615 (2002).

- VLADUT, T.I., and Lepper, M., 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, (1989) 511-529.
- WANG, H.T., Xian, X.F., Yin, G.Z., and Xu, J., A new method of determining geostresses by the acoustic emission Kaiser effect. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, 543-547 (2000).
- WATANABE, H., and Tano, H., 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 (1999) (Japonca).
- WATANABE, H., Tano, H., and Akatsu, T., Fundamental study on pre-stress measurement of triaxial compressed rock. Journal of College of Engineering, Nihon University, 35(A), 11-19 (1994) (Japonca).
- WATANABE, H., Tano, H., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M., and Aydan, Ö., The initial stress state in Cappadocia. Proceedings of the '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, Fukuoka, K. Matsui and H. Shimada (eds.), (1999) 249-260.
- WILL, M., Rakers, E., and Schulz, R., 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, (1995) 401-409.
- YOSHIKAWA, S., and Mogi, K., 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. (1981).
- YOSHIKAWA, S., and Mogi, K., 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 (1990).

## EK 1

Tekrarlı tek eksenli yükleme ile yapılan AE deneylerinden  
elde edilen sonuçlar



Örnek No.	Tekrarlı tek eksenli yükleme aşamaları (MPa)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A1-14	$(\sigma_p)_{max}$	0.96	3.02	19.96	45.67	59.71	80.98	94.50			
	$\sigma_{KE}$		1.01	3.14	21.16	43.09	55.68	70.14			
A2-5	$(\sigma_p)_{max}$	1.25	2.64	9.95	18.01	24.77	34.77				
	$\sigma_{KE}$		1.29	2.83	9.65	16.60	21.55				
A3-14	$(\sigma_p)_{max}$	1.02	4.06	15.43	30.00	39.98	49.03	59.77	59.77	76.74	90.57
	$\sigma_{KE}$		1.08	4.40	15.23	30.99	37.14	45.78	45.78	56.87	70.44
A3-15	$(\sigma_p)_{max}$	0.97	3.99	15.49	25.48	40.10	47.90	59.90	77.89		
	$\sigma_{KE}$		1.08	4.09	16.88	27.20	42.86	45.00	62.84		
A4-5	$(\sigma_p)_{max}$	1.51	4.46	7.57	9.80	12.43	14.99	16.98			
	$\sigma_{KE}$		1.50	4.23	7.71	9.96	12.86	15.43			
A5-13	$(\sigma_p)_{max}$	1.06	3.42	13.16	20.06	29.83	39.94	52.20	91.82		
	$\sigma_{KE}$		1.14	3.52	14.45	19.77	26.06	42.90	50.86		
A6-13	$(\sigma_p)_{max}$	1.94	5.82	11.04	19.01	25.06	27.63				
	$\sigma_{KE}$		1.80	6.19	10.79	20.89	25.98				
A7-12	$(\sigma_p)_{max}$	1.01	3.99	19.12	31.83	64.74	87.07				
	$\sigma_{KE}$		1.04	3.83	19.57	29.52	63.76				
A9-18	$(\sigma_p)_{max}$	0.88	2.69	4.42	12.37	16.36	20.47	23.93			
	$\sigma_{KE}$		0.84	2.82	4.11	12.62	17.10	19.44			
A10-10	$(\sigma_p)_{max}$	1.00	2.06	11.97	15.84	22.99	27.68	38.12	50.57	82.42	
	$\sigma_{KE}$		1.03	2.13	11.84	16.51	22.89	24.70	35.99	46.66	
A10-12	$(\sigma_p)_{max}$	0.96	4.00	19.26	26.52	38.26	49.84	59.98	71.35		
	$\sigma_{KE}$		0.94	4.04	19.08	29.42	36.52	53.10	60.87		
E1-14	$(\sigma_p)_{max}$	1.11	2.02	12.01	23.99	37.92	49.79	59.50			
	$\sigma_{KE}$		1.03	2.01	12.67	25.11	39.55	52.40			
E1-15	$(\sigma_p)_{max}$	0.90	2.00	12.03	24.00	38.61	41.75				
	$\sigma_{KE}$		0.86	2.02	11.44	22.08	?				
E2-17	$(\sigma_p)_{max}$	1.05	2.94	18.06	45.42	77.13	96.66	118.55	137.06		
	$\sigma_{KE}$		0.93	3.30	16.59	45.94	76.61	93.47	121.10		
E3-13	$(\sigma_p)_{max}$	1.16	2.56	15.97	36.34	46.42	57.87				
	$\sigma_{KE}$		1.22	2.51	16.23	38.14	47.19				
E4-9	$(\sigma_p)_{max}$	1.12	5.08	27.03	65.15	85.24	99.63	125.96	168.40		
	$\sigma_{KE}$		1.00	4.74	23.79	62.50	87.03	100.52	125.74		
E5-10	$(\sigma_p)_{max}$	1.04	2.12	14.04	26.58	41.34	59.25	72.13			
	$\sigma_{KE}$		?	?	14.57	?	41.58	58.12			
E5-11	$(\sigma_p)_{max}$	1.05	1.94	14.07	26.61	40.80	53.80	61.33			
	$\sigma_{KE}$		1.22	2.08	14.77	26.70	44.01	56.18			
E6-17	$(\sigma_p)_{max}$	0.96	2.00	5.04	13.00	19.99	25.09	29.93	38.30		
	$\sigma_{KE}$		1.08	1.94	5.39	13.29	20.55	25.79	30.75		

Örnek No.	Tekrarlı tek eksenli yükleme aşamaları (MPa)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
E6-18	$(\sigma_p)_{max}$	0.89	1.96	4.88	13.07	19.93	25.04	29.62	38.29		
	$\sigma_{KE}$		0.93	2.01	5.10	13.50	20.47	25.26	30.17		
E7-3	$(\sigma_p)_{max}$	0.86	5.09	24.95	45.54	59.78	89.90				
	$\sigma_{KE}$		0.93	5.03	23.70	43.30	61.94				
E7-8	$(\sigma_p)_{max}$	1.07	5.09	25.01	41.46	63.30	90.50	111.21	141.88		
	$\sigma_{KE}$		1.15	4.74	22.22	42.81	67.20	86.00	109.34		
N1-16	$(\sigma_p)_{max}$	0.55	1.46	1.96	2.41	3.11	4.09				
	$\sigma_{KE}$		0.48	1.35	1.84	2.30	2.79				
N2-15	$(\sigma_p)_{max}$	0.51	0.97	2.61	3.79	4.97	6.03	7.37	9.71		
	$\sigma_{KE}$		0.45	0.80	2.16	3.46	4.26	4.60	5.34		
N2-18	$(\sigma_p)_{max}$	0.55	1.06	2.54	3.90	5.97	7.68	9.66			
	$\sigma_{KE}$		0.47	1.01	2.31	3.68	5.48	6.85			
N3-14	$(\sigma_p)_{max}$	0.36	1.54	2.73	4.07	4.61	5.97	7.57	8.51		
	$\sigma_{KE}$		0.29	1.61	3.03	4.11	4.96	6.13	8.07		
N3-15	$(\sigma_p)_{max}$	0.33	1.64	2.86	3.98	4.62	6.00	6.98			
	$\sigma_{KE}$		0.29	1.68	3.06	4.03	4.46	6.34			
N4-15	$(\sigma_p)_{max}$	0.56	2.49	4.06	6.00	7.04	8.84	10.09			
	$\sigma_{KE}$		0.65	2.52	4.03	5.91	7.28	8.86			
N4-16	$(\sigma_p)_{max}$	0.53	2.39	3.89	5.83	6.89	8.57	11.00			
	$\sigma_{KE}$		0.48	2.54	4.03	5.92	7.03	8.92			

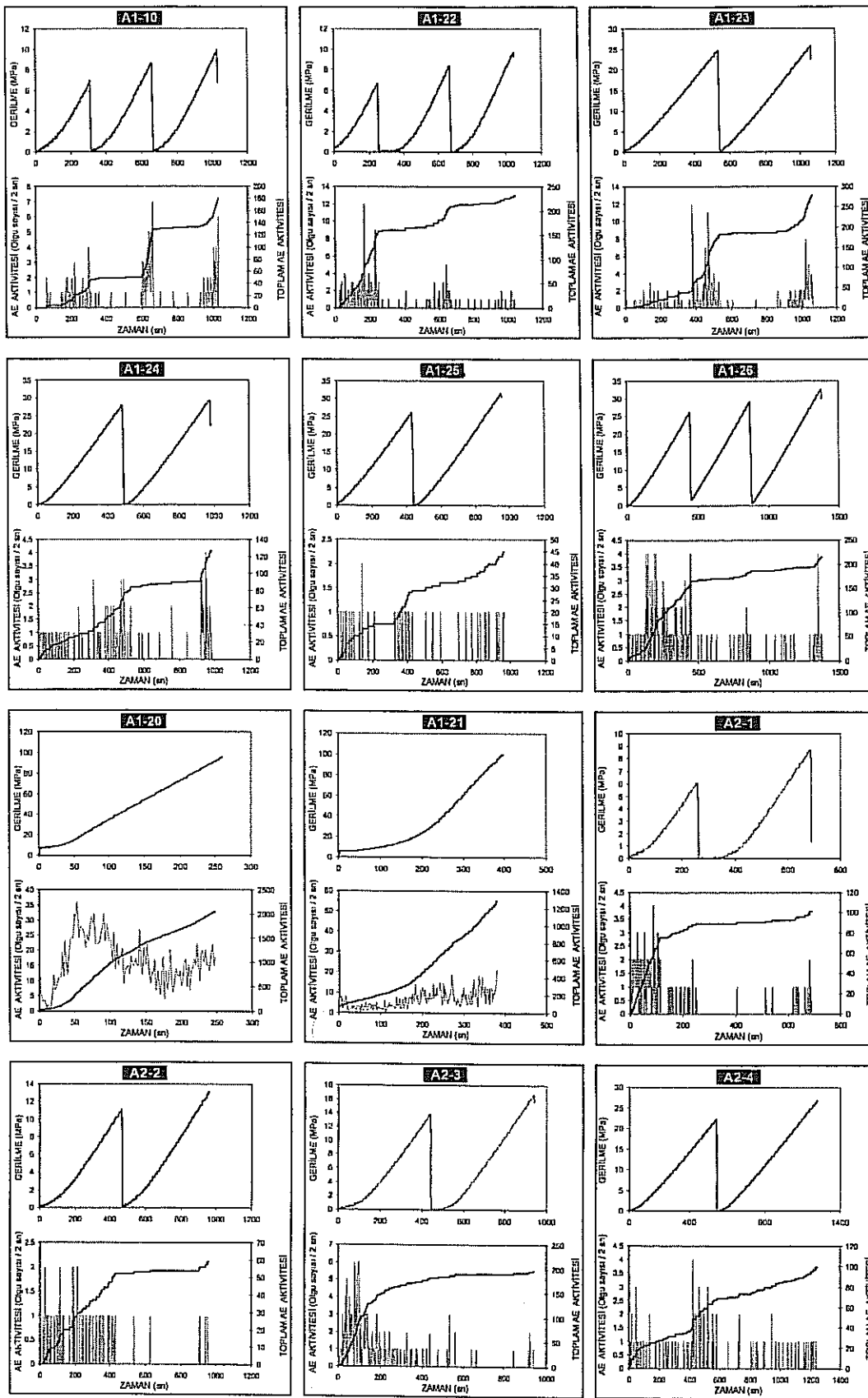
$(\sigma_p)_{max}$  : Tekrarlı tek eksenli yükleme aşamalarında uygulanan en büyük gerilme  
 $\sigma_{KE}$  : Tekrarlı tek eksenli yükleme aşamalarında belirlenen KE seviyesi

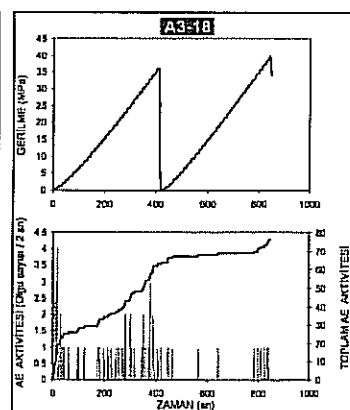
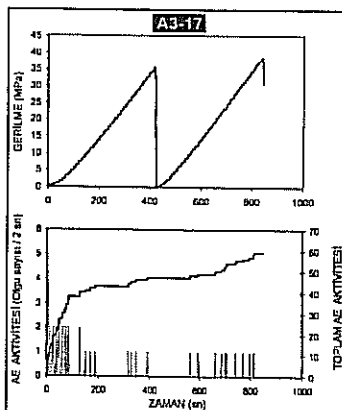
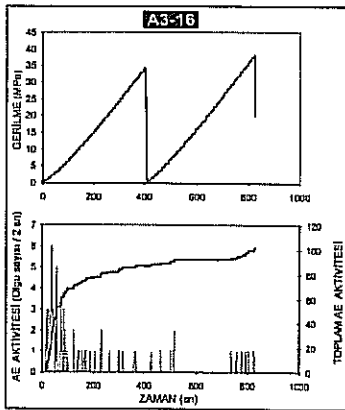
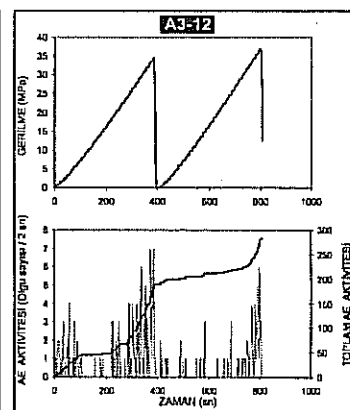
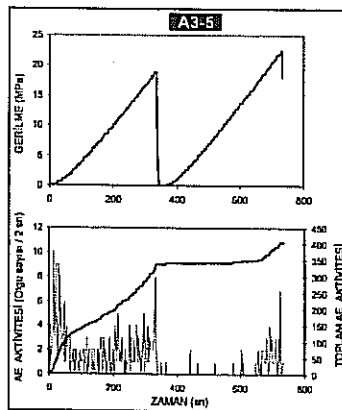
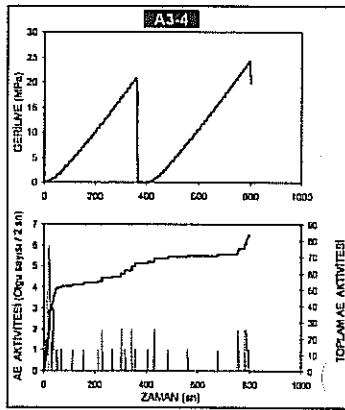
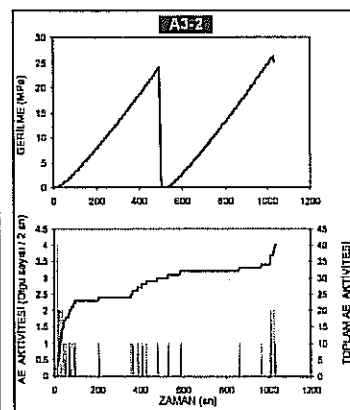
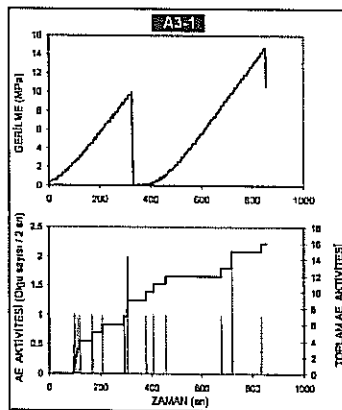
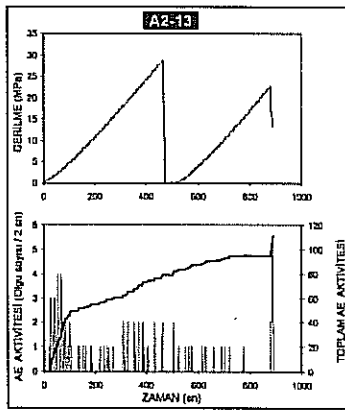
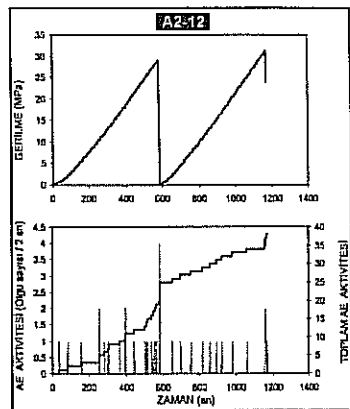
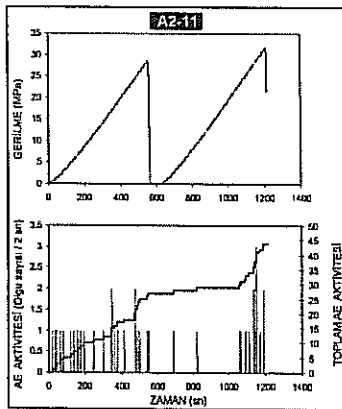
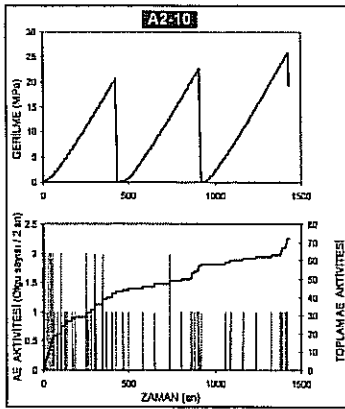
## EK 2

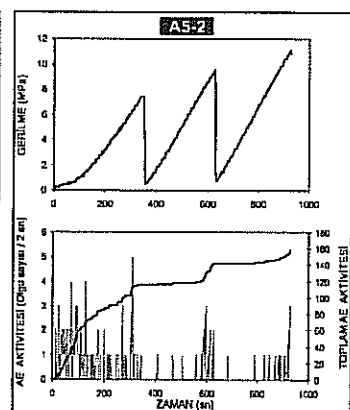
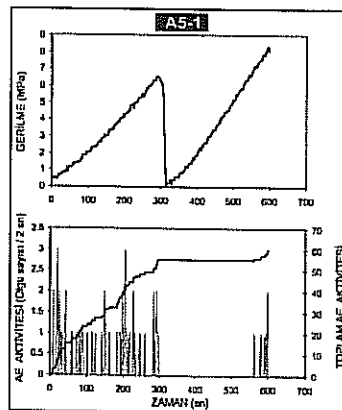
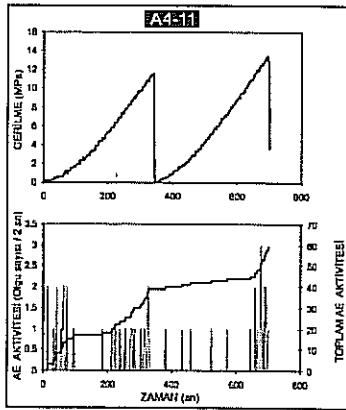
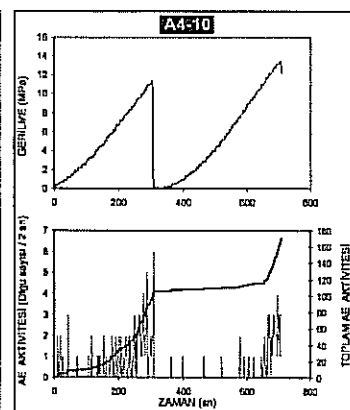
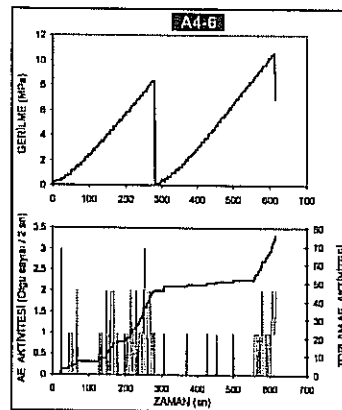
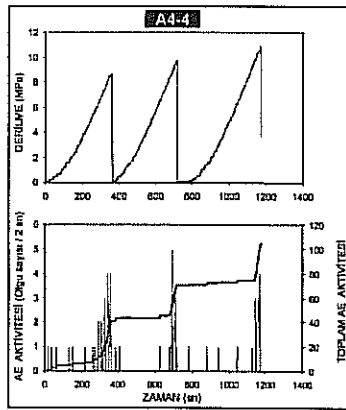
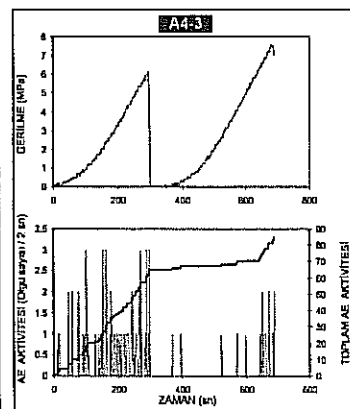
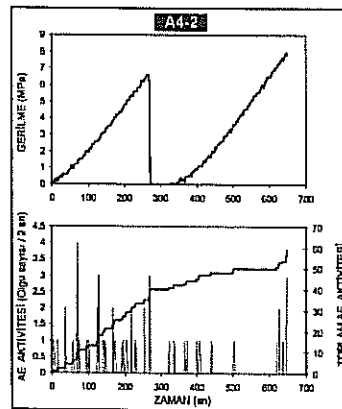
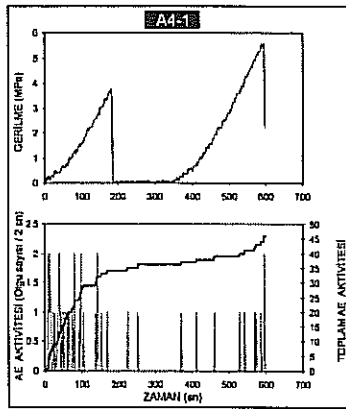
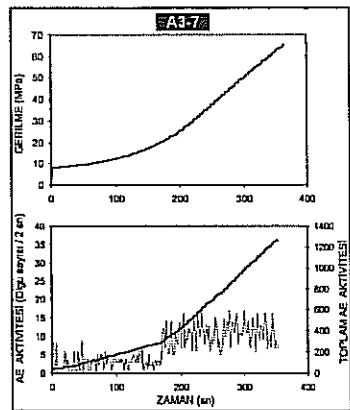
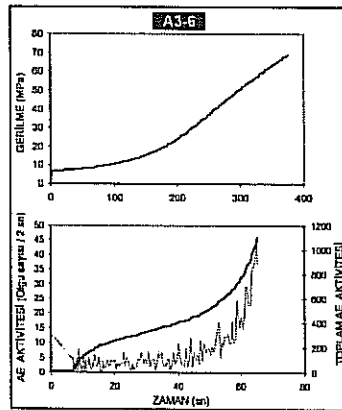
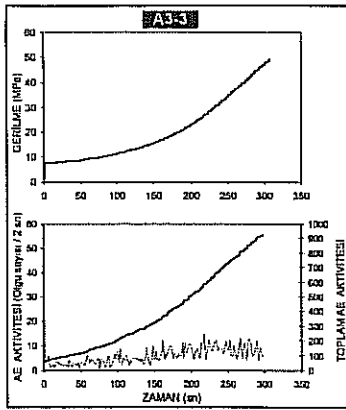
Üç eksenli ön yükleme yapılmış örneklerde gerçekleştirilen tek eksenli yükleme koşulundaki AE deneylerinin sonuçları

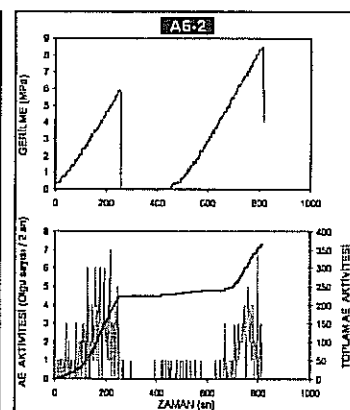
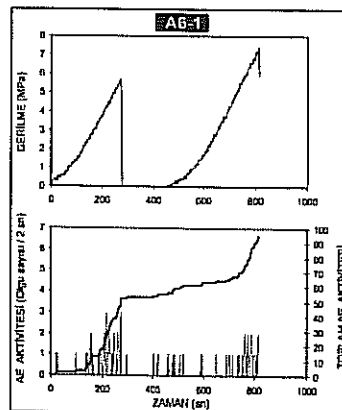
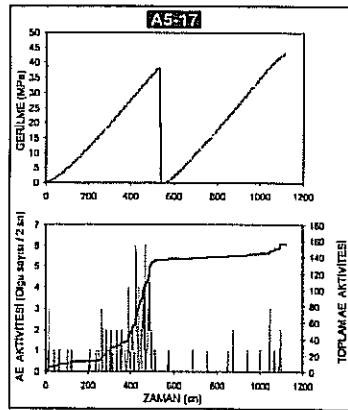
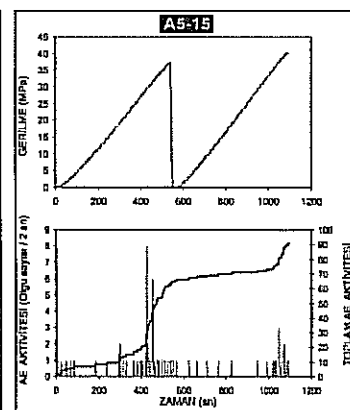
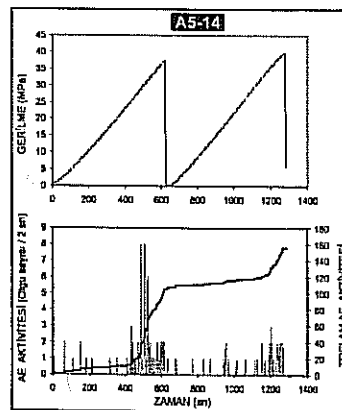
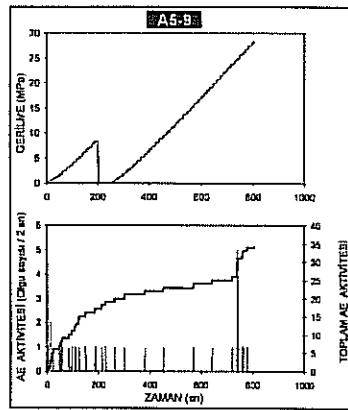
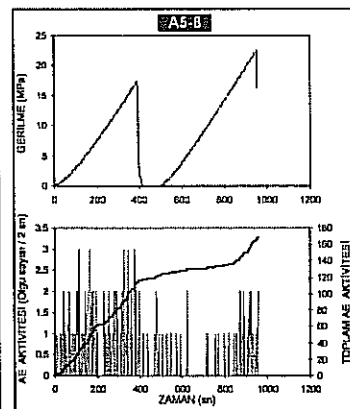
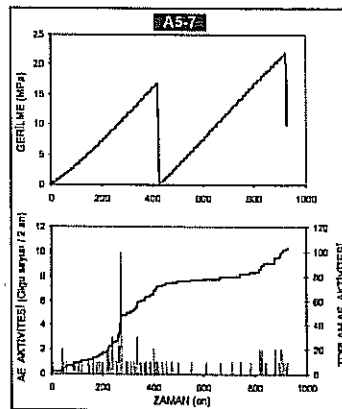
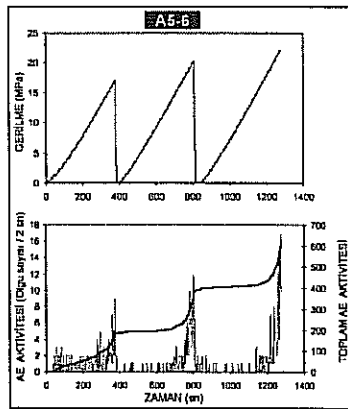
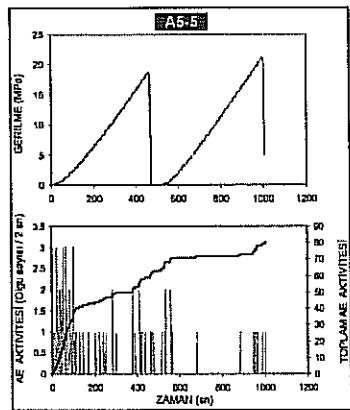
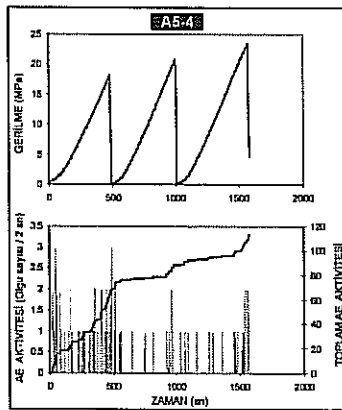
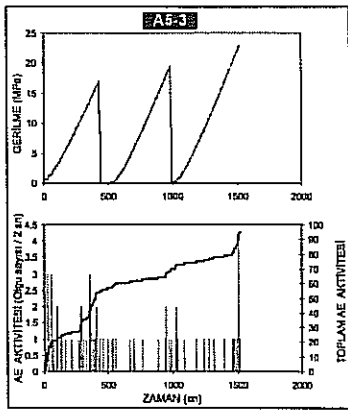
EK 2a

AE deneylerinden elde edilen grafikler

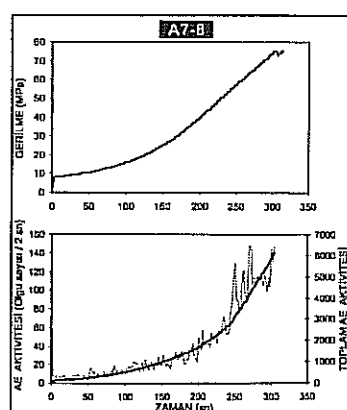
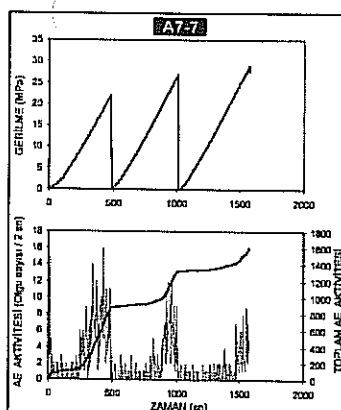
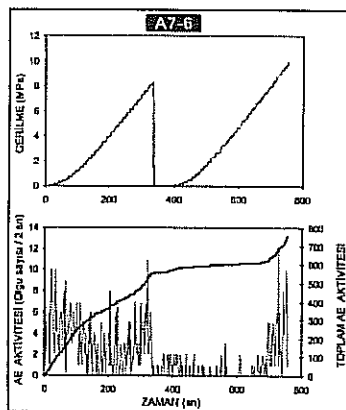
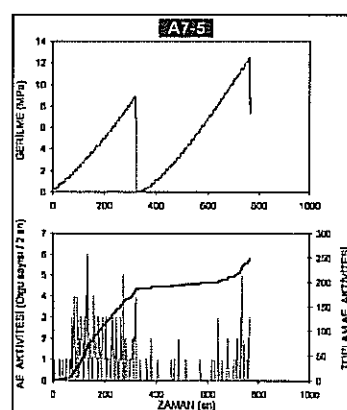
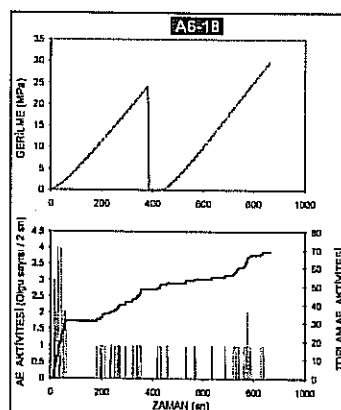
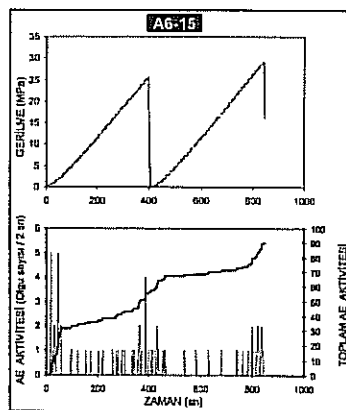
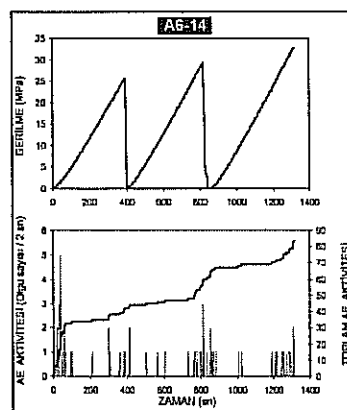
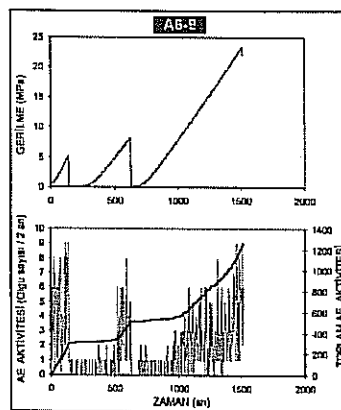
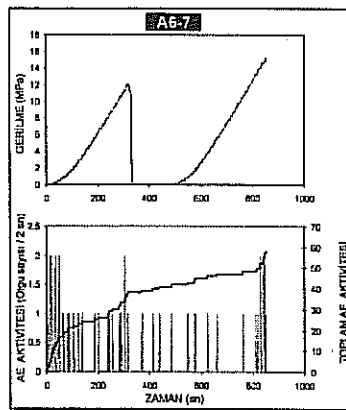
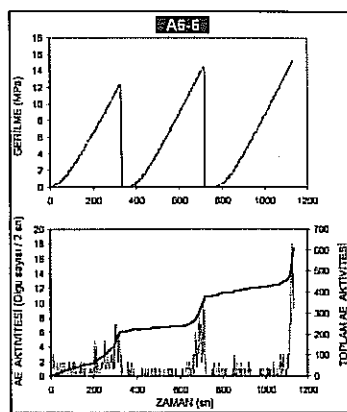
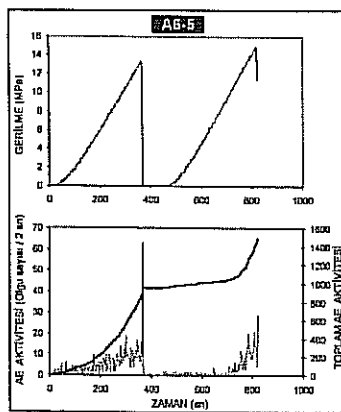
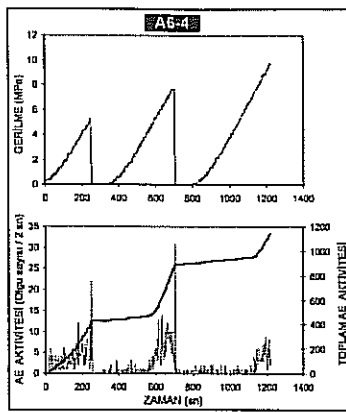


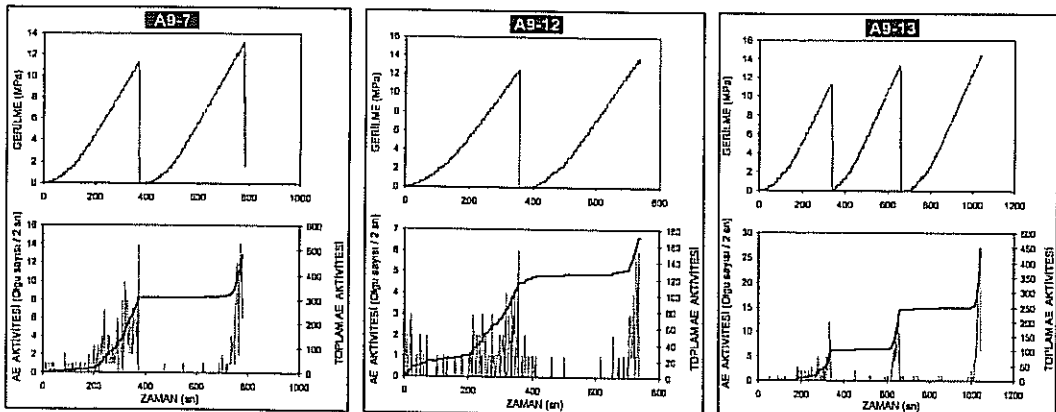
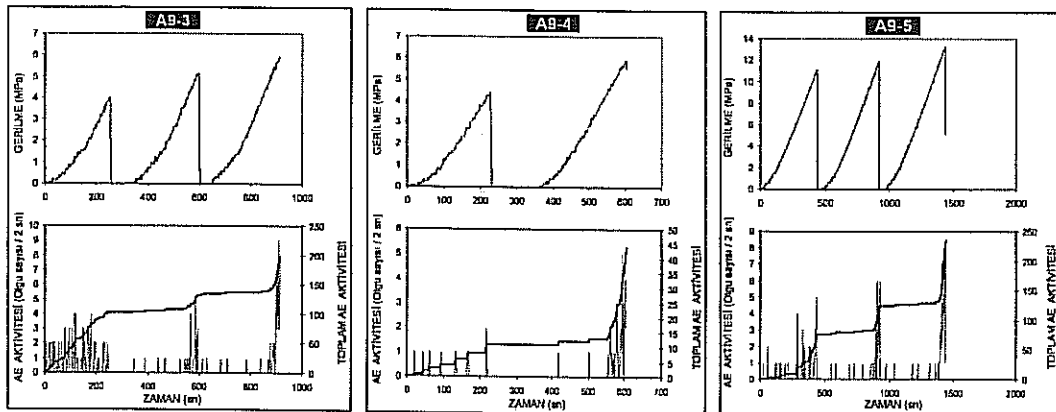
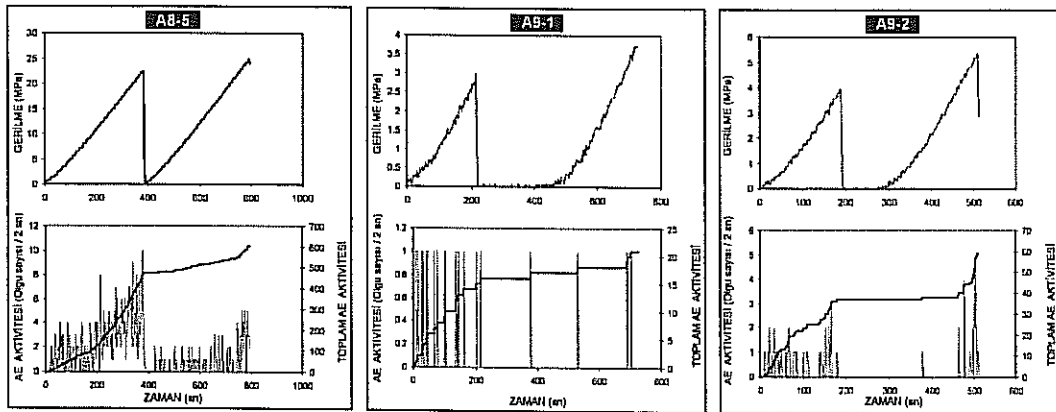
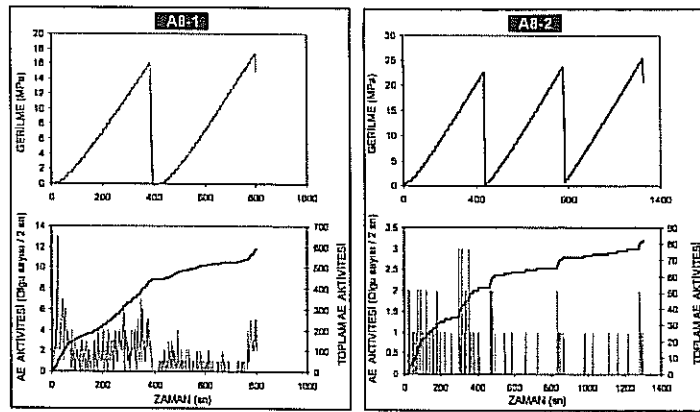


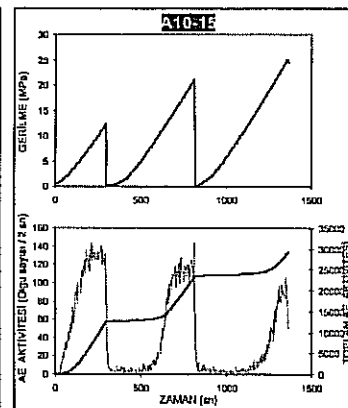
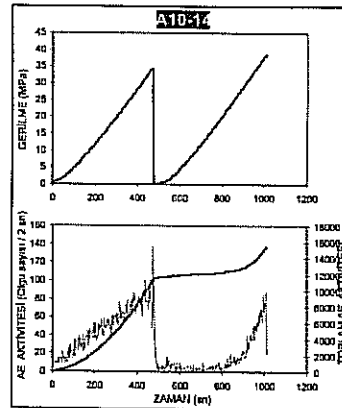
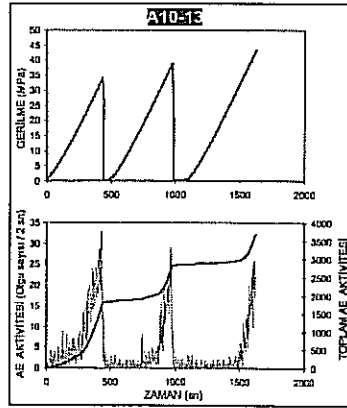
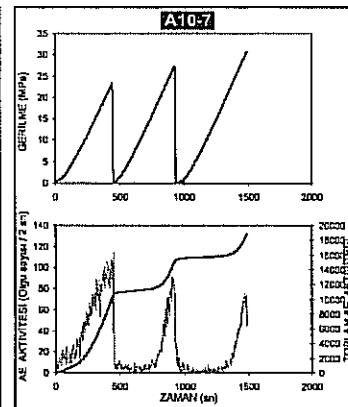
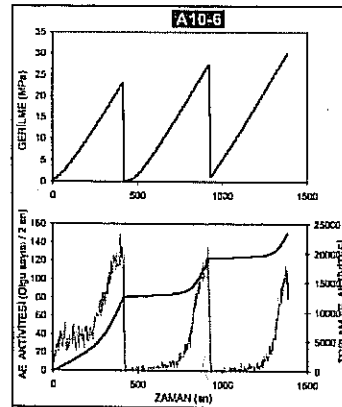
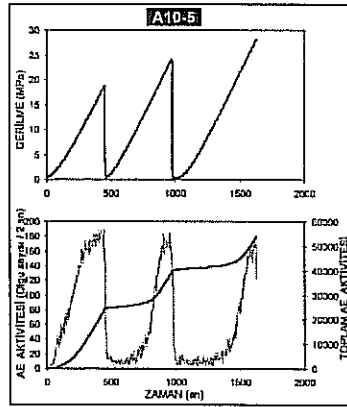
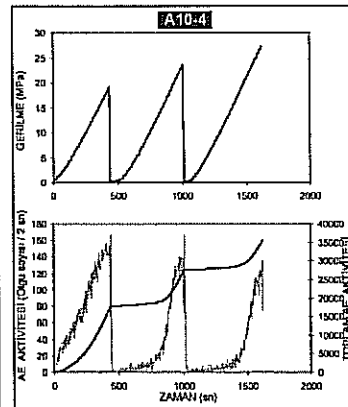
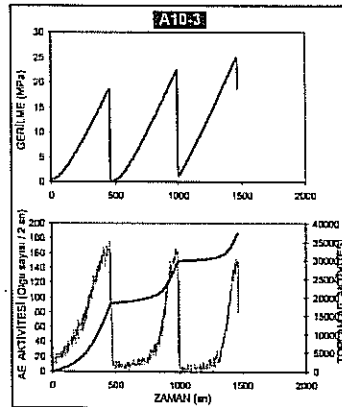
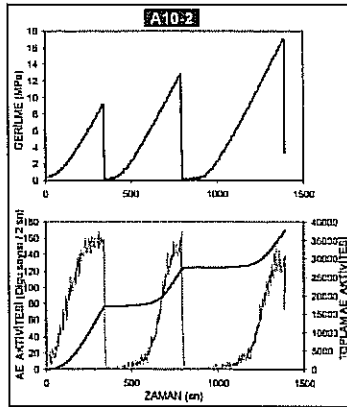
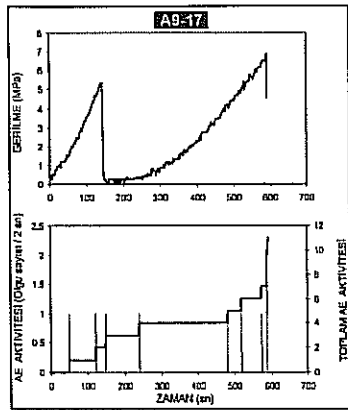
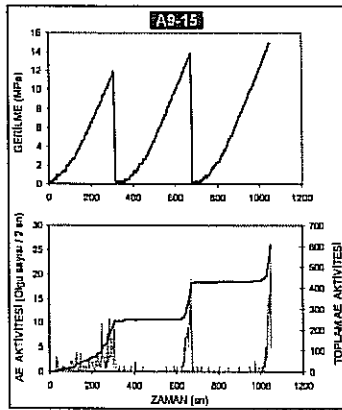
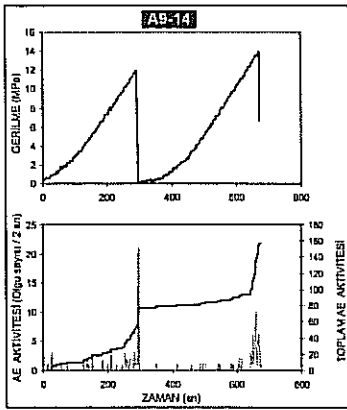




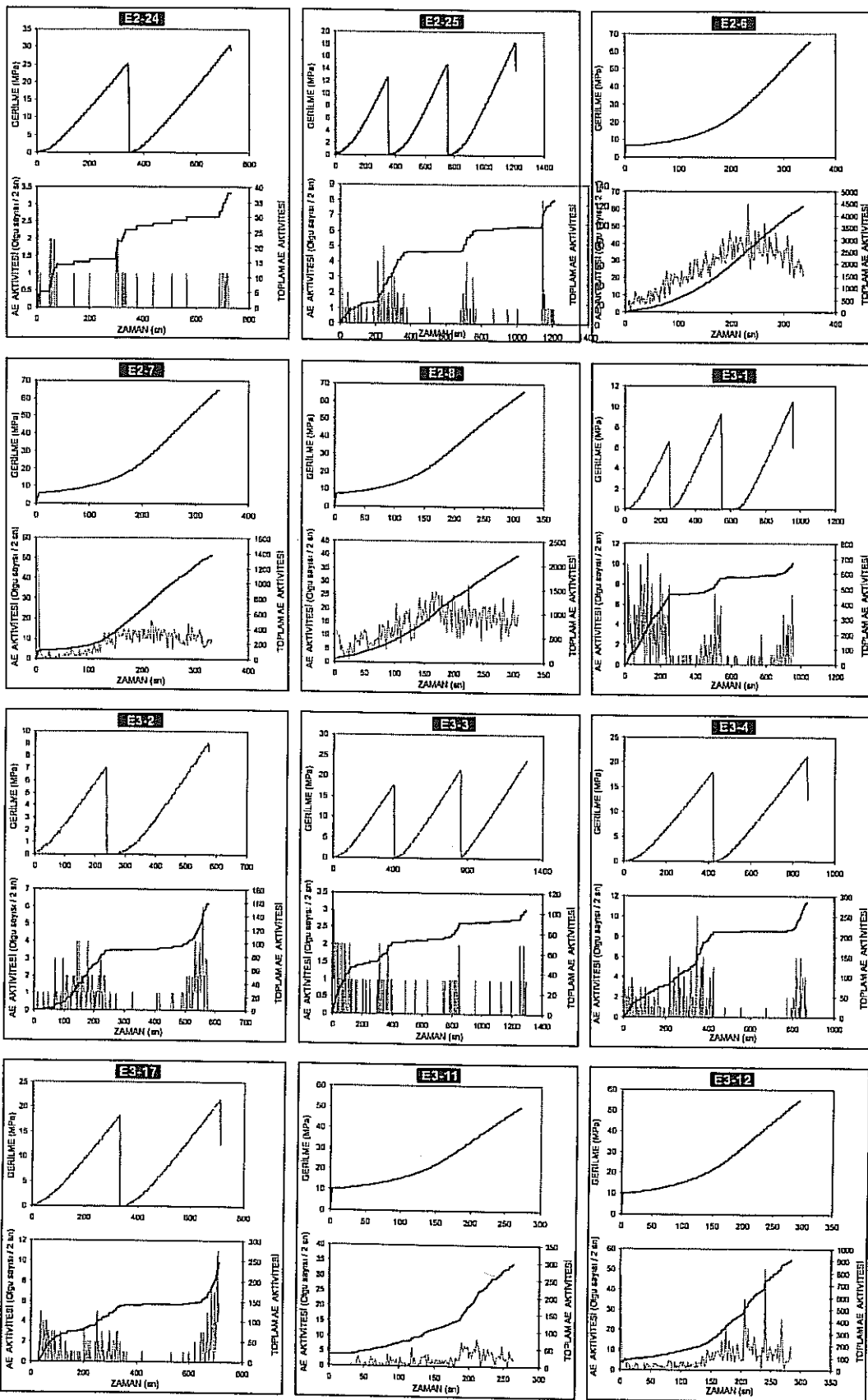


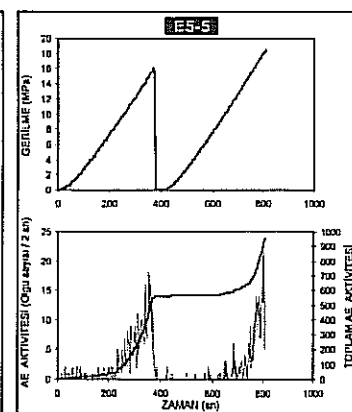
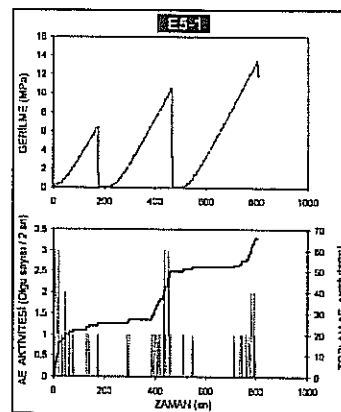
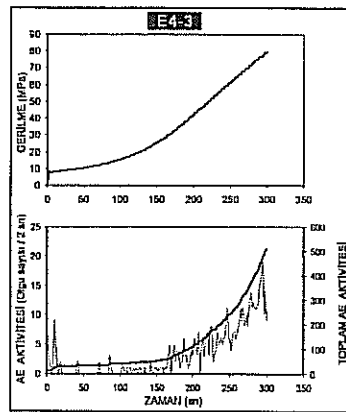
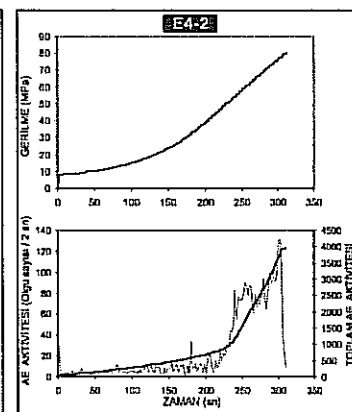
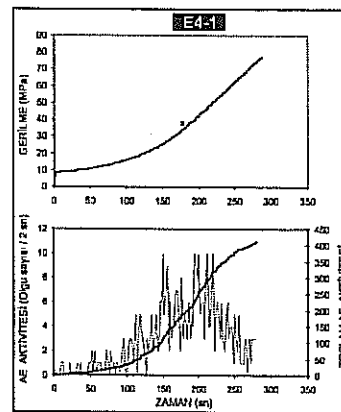
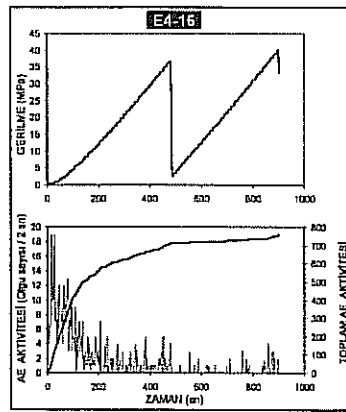
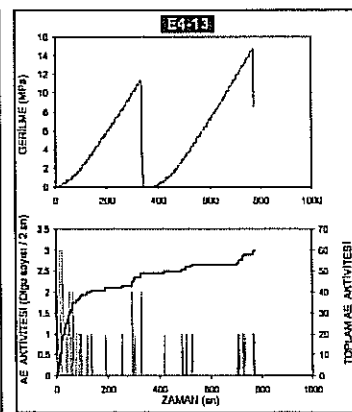
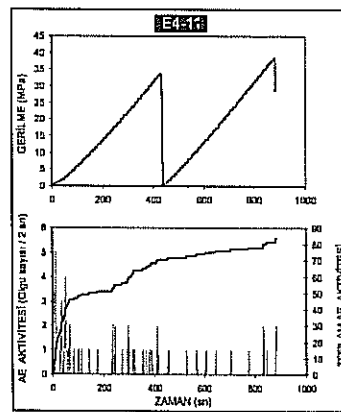
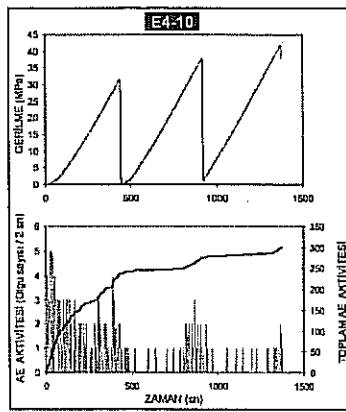
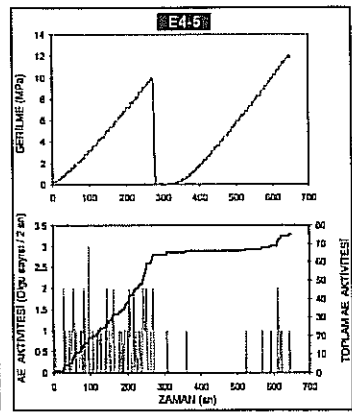
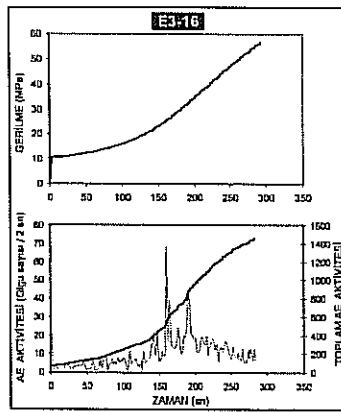
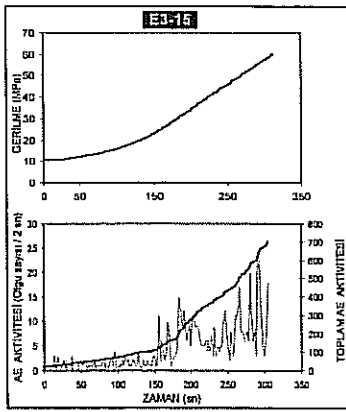


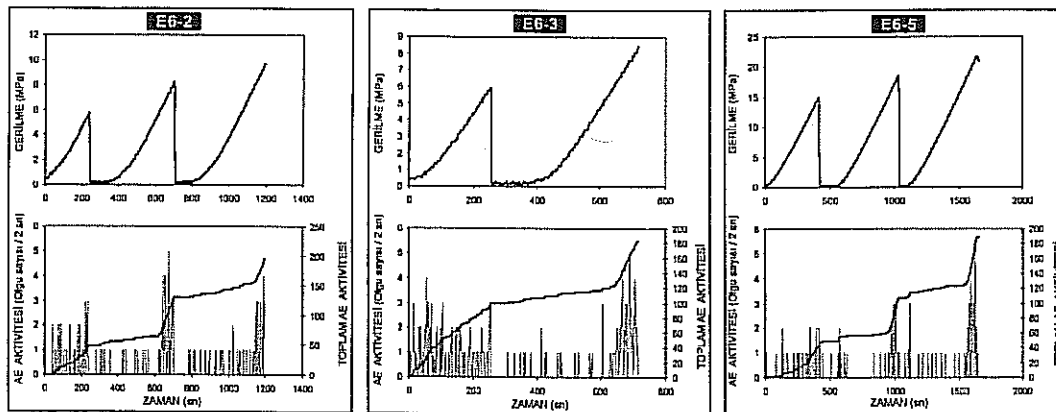
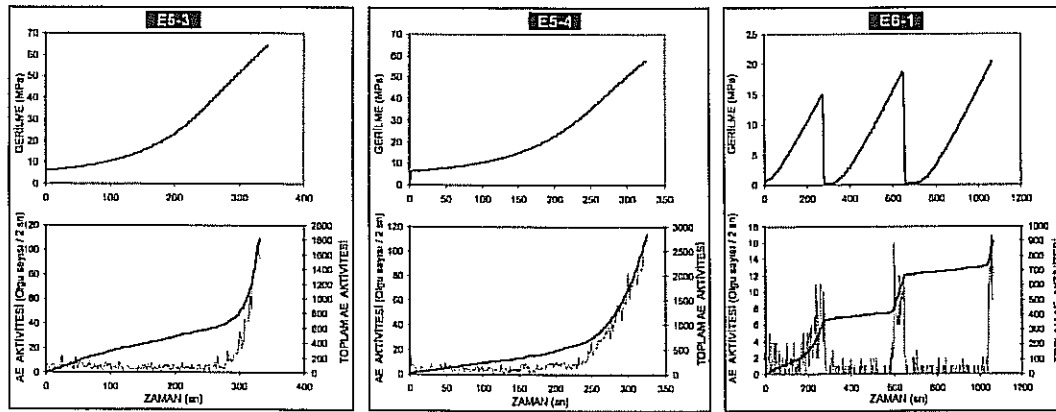
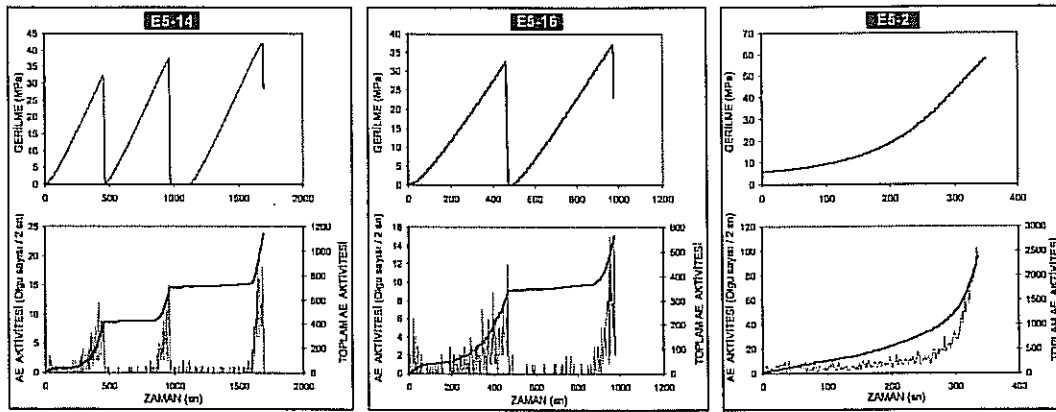
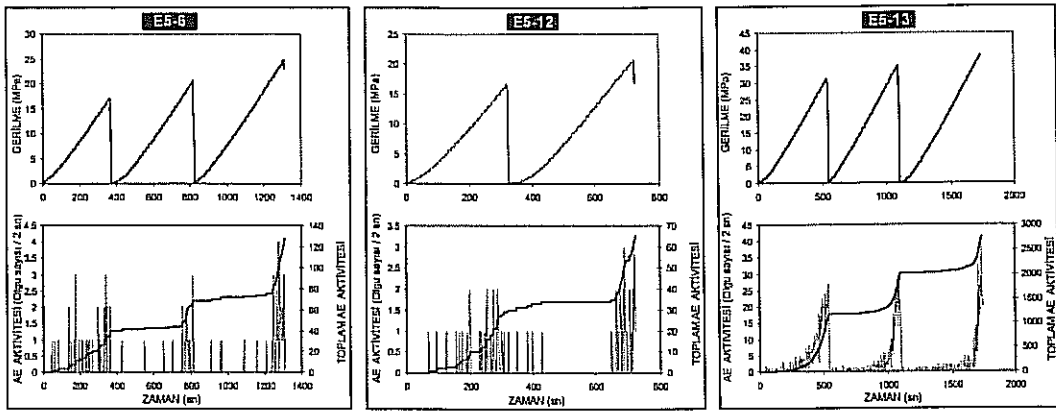


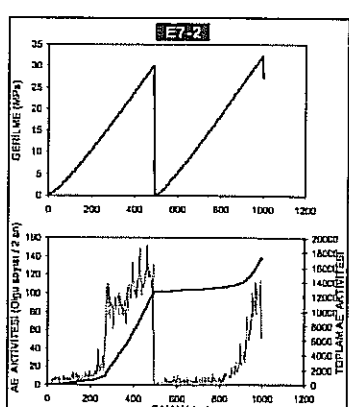
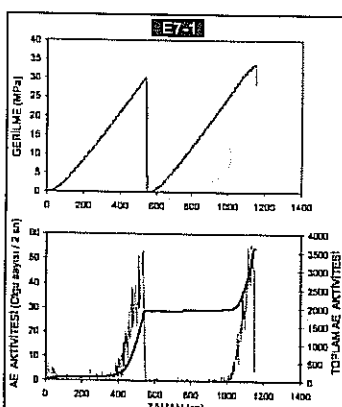
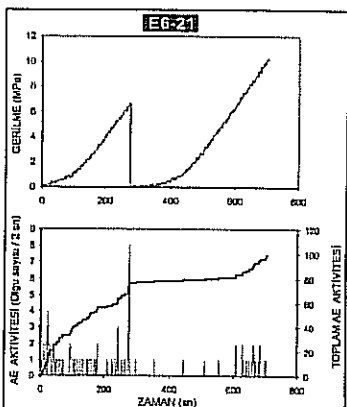
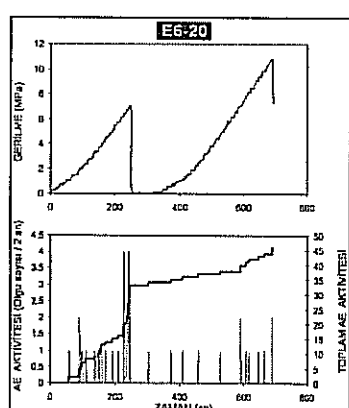
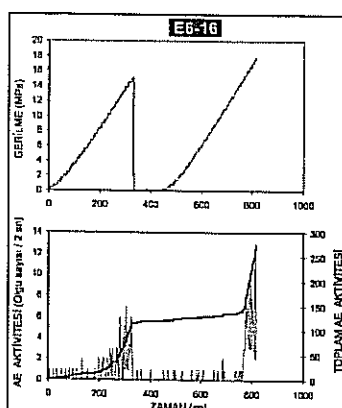
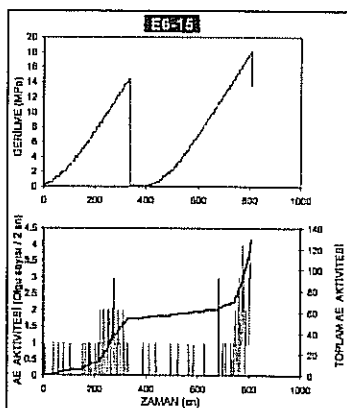
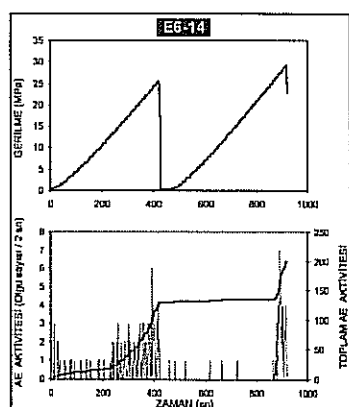
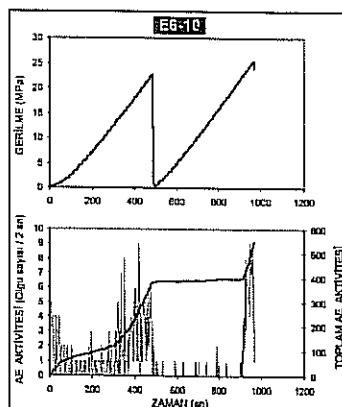
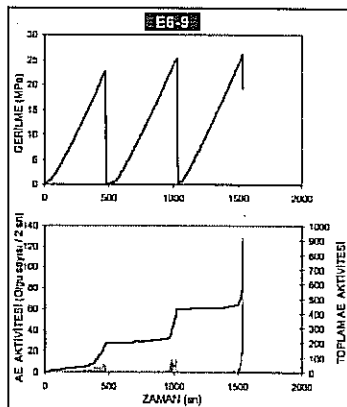
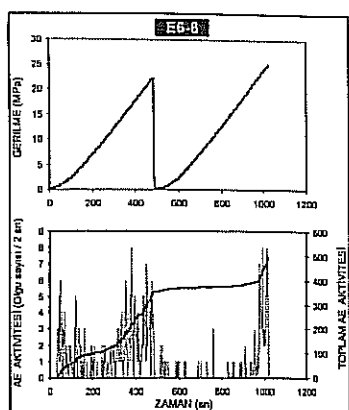
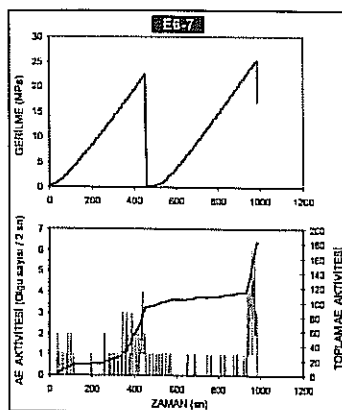
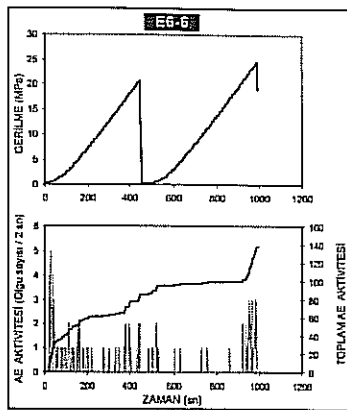




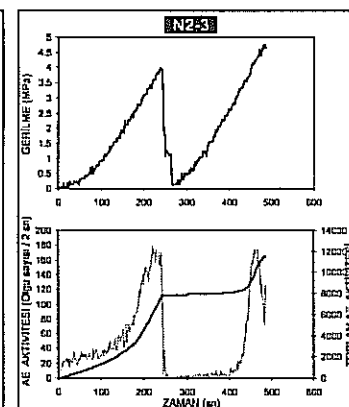
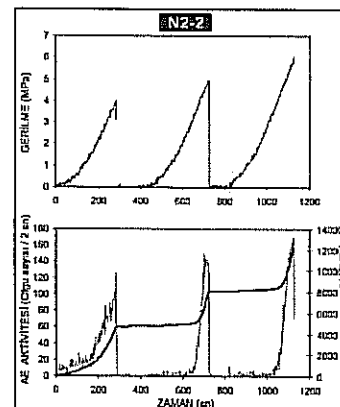
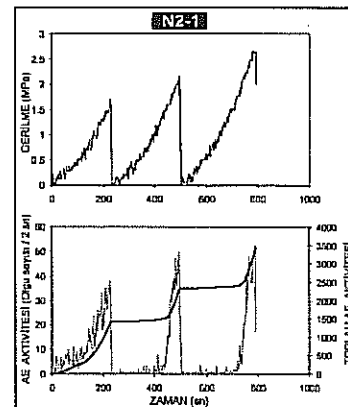
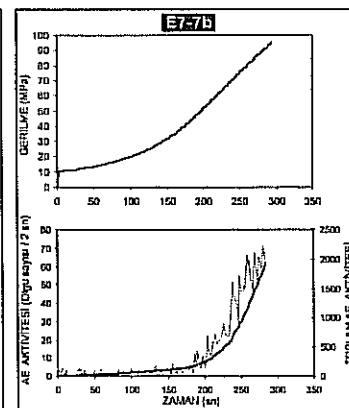
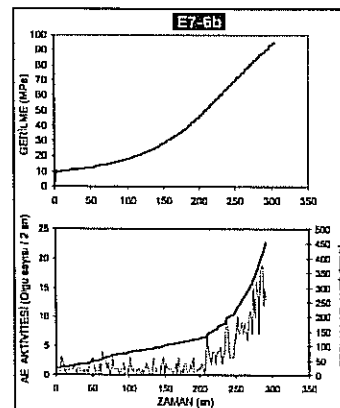
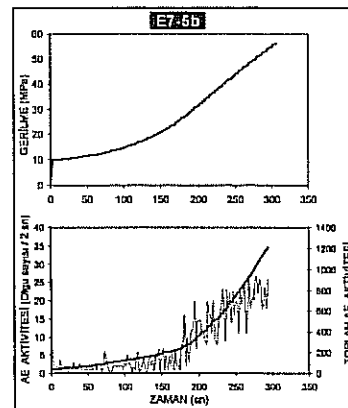
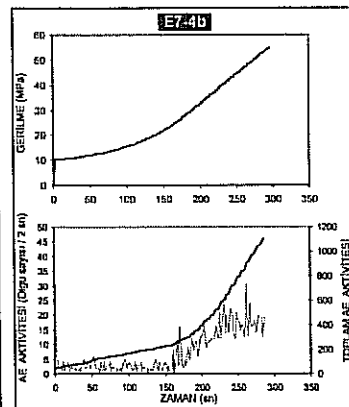
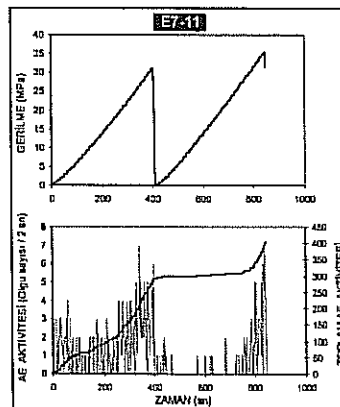
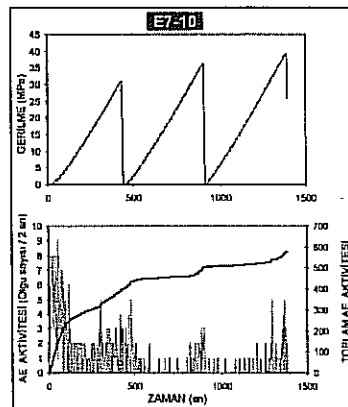
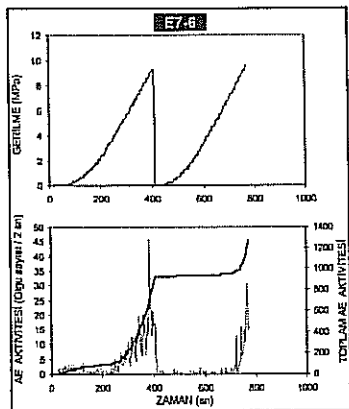
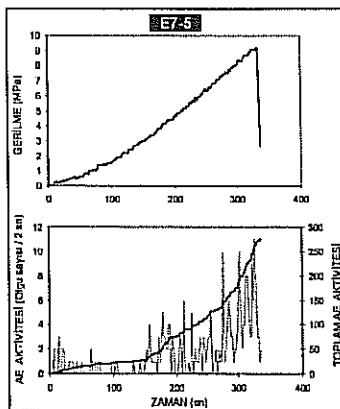
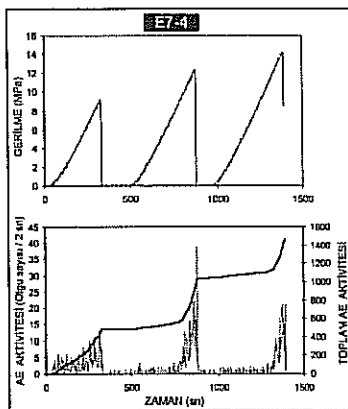


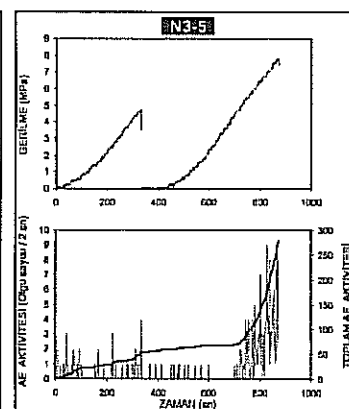
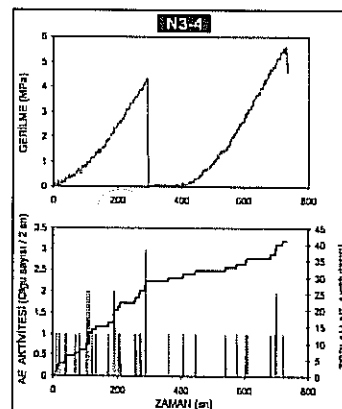
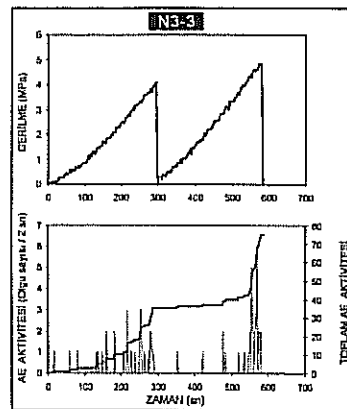
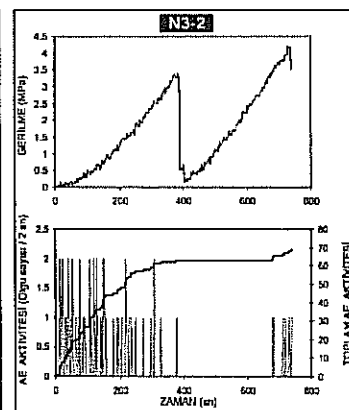
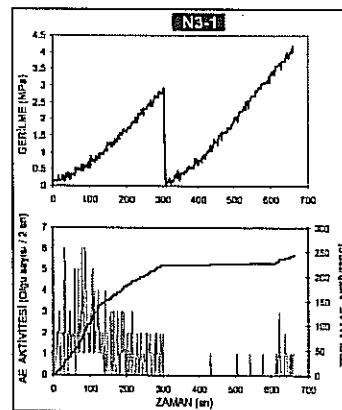
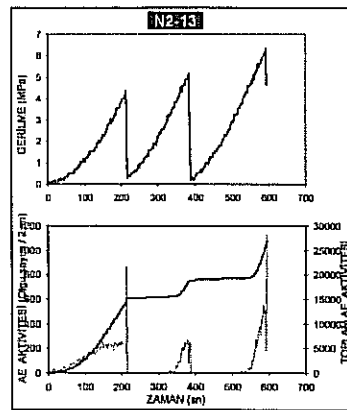
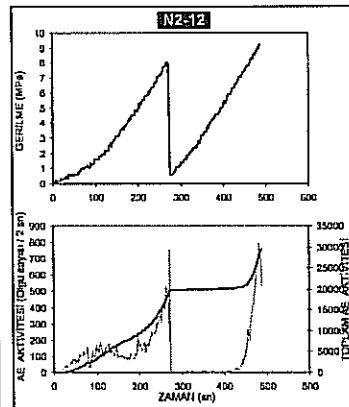
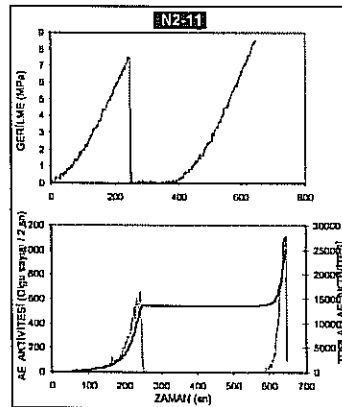
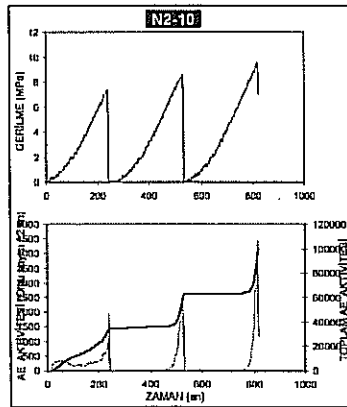
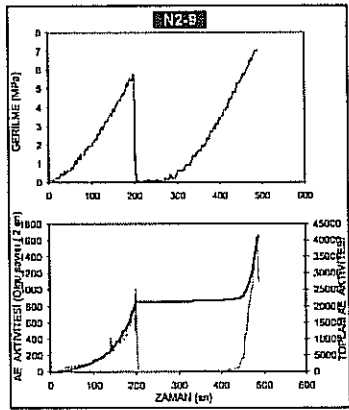
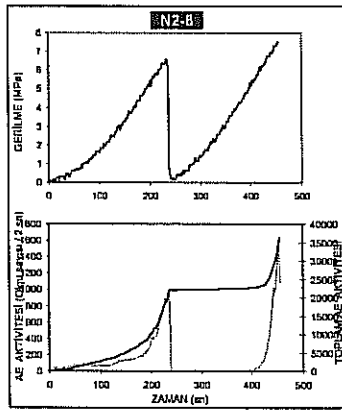
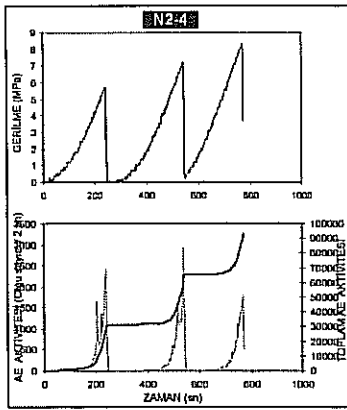


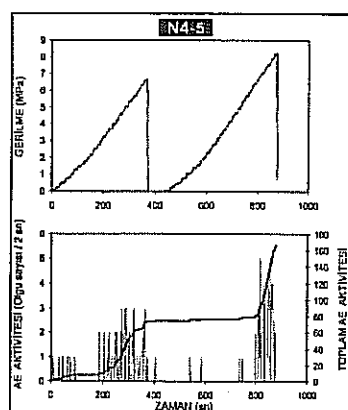
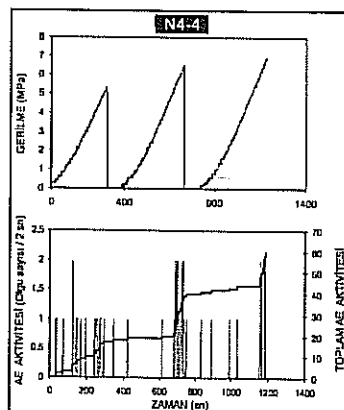
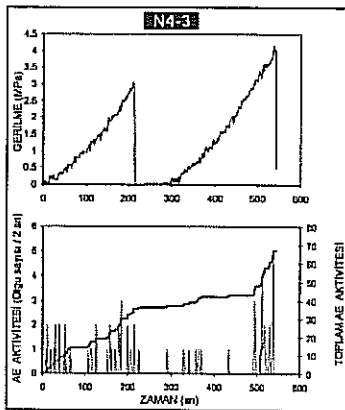
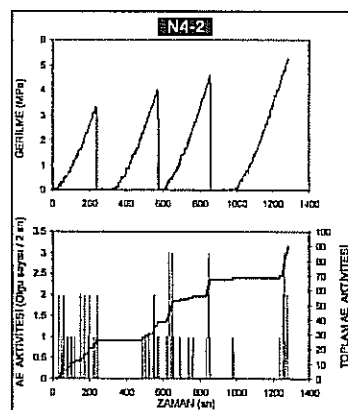
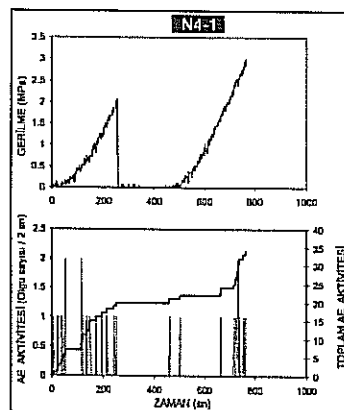
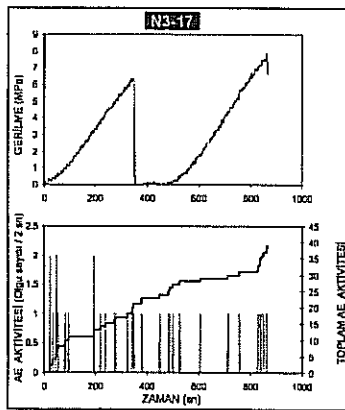
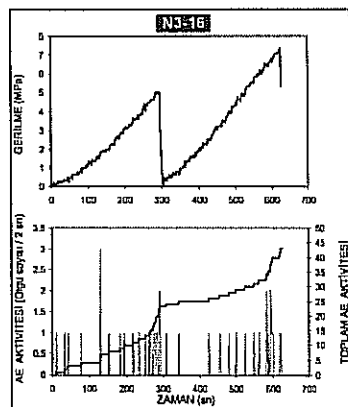
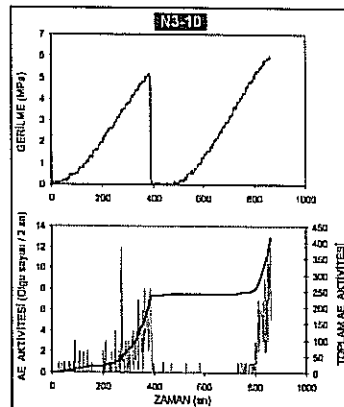
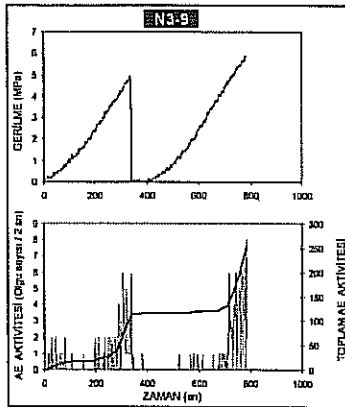
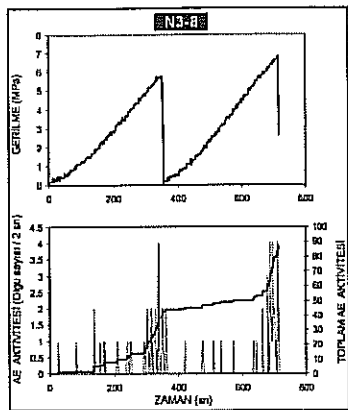
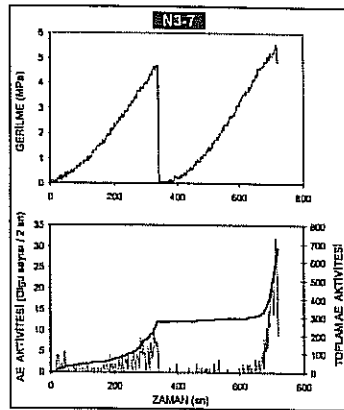
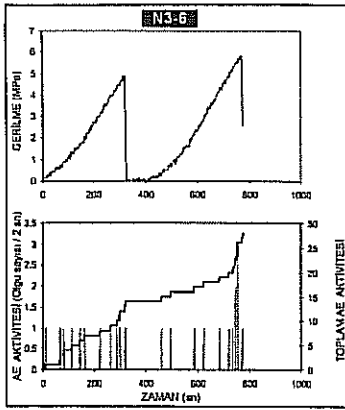


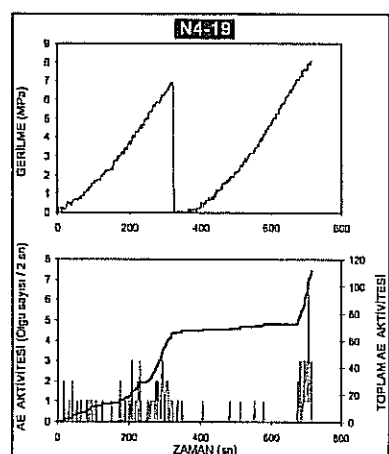
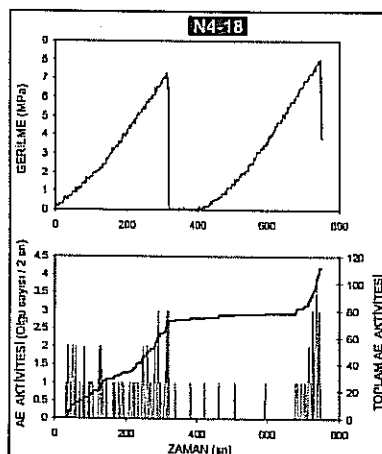
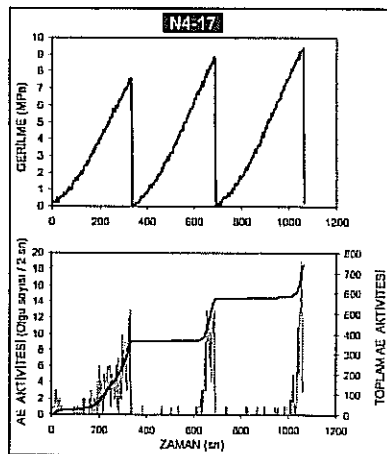
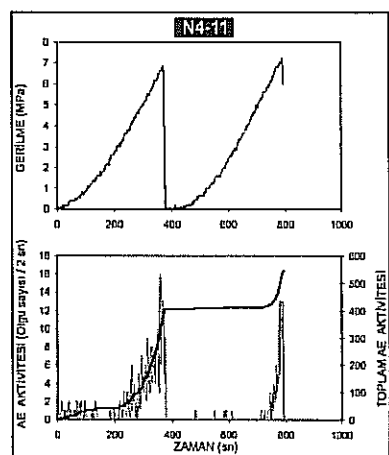
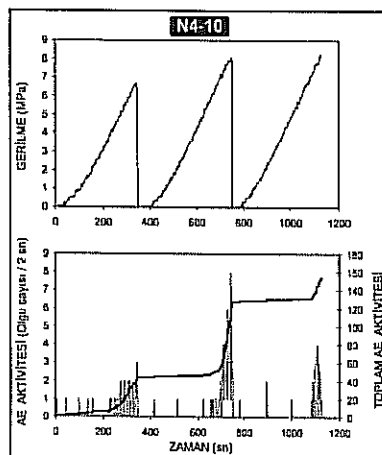
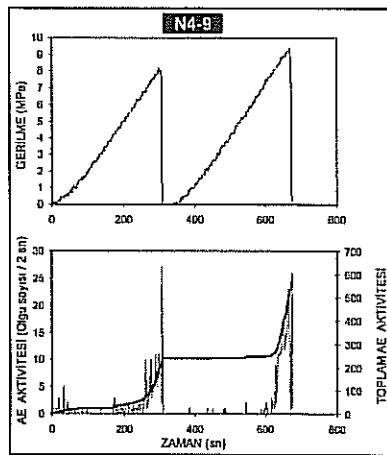
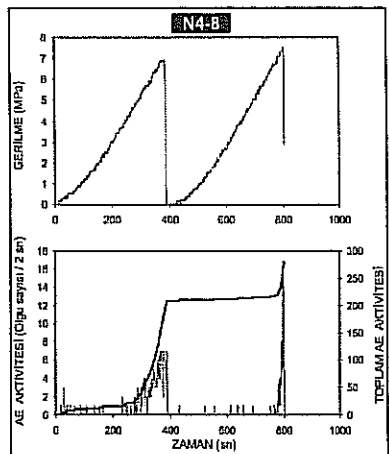
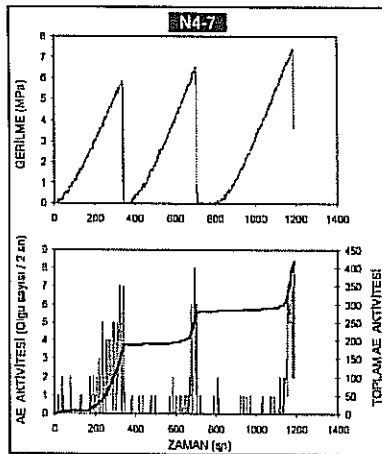
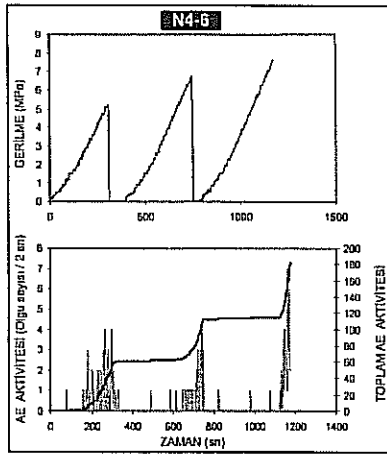












EK 2b

Örneklere üç eksenli koşulda uygulanan öngerilmeler ve  
belirlenen KE seviyeleri

ÖRNEK NO.	ÜÇ EKSENLİ ÖN YÜKLEME				TEK EKSENLİ YÜKLEME KOŞULUNDA AE DENEYLERİ					
	(MPa)		(MPa)		(MPa)		(MPa)			
	$\sigma_{1p}$	$\sigma_{3p}$	$(\sigma_{1p} - \sigma_{3p})$	CBS	KE	$Y_{ük_{max}}$	KE	$Y_{ük_{max}}$		
A1-10	5.04	1	4.04	C	2.76	6.89	6.67	8.62	8.79	9.87
22	5.15	2	3.15	C	2.44	6.61	6.61	8.4	8.67	9.7
23	20.14	2	18.14	E	16.27	24.54	23.47	25.69		
24	26.04	4	22.04	E	16.29	27.83	25.71	29.09		
25	19.99	7	12.99	E	18.74	26.19	24.29	31.35		
26	20.51	20.5	0.01	-	5.25	26.14	26.63	29.12	28.41	32.74
A1-20	80.16	8	72.16	G	-	95.4				
21	80.08	25	55.08	G	-	100.01				
27	88.61	16	72.61	G	İPTAL					
A2-1	3	1	2	C	-	6.06	6.5	8.68		
2	9.2	1	8.20	E	-	11.06	11.38	13.08		
3	8.93	3	5.93	CE	-	13.8	15.77	16.7		
4	18.06	2	16.06	EG	14.45	22.22	23.13	26.71		
10	18.09	6	12.09	E	-	20.55	19.9	22.63	23.12	25.74
11	25.42	3	22.42	G	16.32	28.54	27.34	31.61		
12	25.02	5	20.02	G	10.51	28.91	30.66	31.05		
13	25.03	3	22.03	G	17.98	28.84				
A3-1	5.77	1	4.77	C	2.33	9.93	9.88	14.76		
2	15.07	1	14.07	CE	15.91	24.01	20.92	25.98		
4	15.09	3	12.09	CE	10.77	20.87	22.78	24.24		
5	14.99	5	9.99	CE	7.02	18.92	17.91	22.46		
11	30.10	3	27.10	G	İPTAL	33.48	26.36	37.93	36.71	39.15
12	30.47	3	27.47	G	18.37	34.51	34.65	37.17		
16	30.19	3	27.19	G	-	34.44	33.5	38.11		
17	30.15	6	24.15	EG	25.56	35.54	22.54	38.77		
18	30.56	10	20.56	EG	13.11	36.06	34.69	39.82		
A3-3	40.94	8	32.94	G	-	49.11				
6	57.07	4	53.07	G	44.06	64.76				
7	56.93	13	43.93	G	20.16	65.31				



6	5.98	2	3.98	C	-	8.35	7.86	9.8	27.4	29.05
7	18.07	2	16.07	E	9.03	21.91	22.34	26.83		
15	18.03	4	14.03	E	IPAL					
A7-8	80.32	14	66.32	G	40.18	75.42				
A8-1	13.08	3	10.08	EG	5.38	16.08	16.17	17.35		
2	20.53	2	18.53	EG	14.46	22.54	22.31	24.92		
5	19.99	4	15.99	EG	9.07	22.47	22.14	25.34		
A9-1	0.93	1	-0.07	-	-	3.01	3.07	3.76		
2	3.02	1	2.02	CE	2.61	3.95	4.94	5.34		
3	3.00	1	2.00	CE	0.52	3.99	4.33	5.14	5.31	5.95
4	2.98	2	0.98	C	-	4.41	4.55	5.9		
5	10.05	1	9.05	G	6.33	11.03	10.74	11.85	12.17	13.3
7	9.88	10	-0.12	-	4.37	11.32	11.55	13.1		
12	9.99	2	7.99	EG	5.43	12.38	12.16	13.82		
13	10.09	4	6.09	EG	4.11	11.24	11.53	13.26	13.62	14.41
14	10.03	4	6.03	EG	3.75	11.91	12.3	13.93		
15	10.01	7	3.01	CE	2.23	11.96	11.8	13.83	13.76	14.91
17	3.03	3	0.03	-	-	5.34	6.14	6.86		
A10-1	5.94	1	4.94	C	IPAL					
2	5.9	2	3.9	C	1.02	9.11	8.95	12.86	11.9	17.04
3	15.08	1	14.08	E	-	18.69	17.18	22.41	21.87	25
4	15.19	3	12.19	CE	-	19.09	18.65	23.58	23.3	27.36
5	14.96	5	9.96	CE	-	18.73	16.74	24.11	24.11	28.09
6	20.08	2	18.08	E	12.78	23.04	21.16	27.23	26.42	30.07
7	20.11	4	16.11	E	8.09	23.23	23.94	27.33	27.65	30.62
13	30	3	27	G	21.06	34.12	32.96	33.32	34.84	43.13
14	29.66	10	19.66	G	-	34.3	30.66	34.58		
15	5.84	6	-0.16	-	-	12.33	11.97	21.12	20.69	25.09
16	20.11	4	16.11	E	10.02	27.82	27.54	33.95		
17	30.02	6	24.02	G	14.26	34.63	34.92	38.95	38.16	43.34
18	33.58	6	27.58	G	16.75	37.69	35.74	42.96		
20	20.45	7	13.45	E	5.49	26.55	25.83	29.97		
E1-1	3.01	1	2.01	C	1.19	4.25	3.69	5.78		
2	16.36	1	15.36	EG	-	18.22	9.39	19.9		
3	12.27	2	10.27	E	6.77	14.4	16.29	17.26		



4	12.35	4	8.35	CE	-	14.75	13.55	16.3
5	12.46	12	0.46	-	-	15.16	12.92	17.35
6	25.10	2	23.10	G	-	28.84	29.42	31.35
16	24.91	2	22.91	G	-	33.43	31.05	36.83
17	25.63	5	20.63	EG	-	33.36	35.17	35.96
E1-7	38.15	4	34.15	G	20.88	39.06		
8	37.95	7	30.95	G	14.07	45.16		
9	38.01	13	25.01	G	8.04	48.71		
E2-1	5.01	1	4.01	C	-	7.57	6.26	13.28
2	5.11	2	3.11	C	-	7.61	8.53	11.74
3	5.50	1	4.50	C	1.80	10.02	9.8	12.14
4	20.37	2	18.37	E	13.31	22.34		
5	19.99	2	17.99	E	14.02	24.67	21.84	27
9	20.26	4	16.26	E	12.72	25.12	25.61	28.23
10	20.43	20.5	-0.07	-	21.13	25.59	26.38	26.81
22	20.16	7	13.16	E	13.42	24.9	29.24	31.5
23	20.08	7	13.08	CE	12.59	25.4	27.13	31.89
24	20.13	4	16.13	E	20.99	25.09	26.6	30.4
25	5.10	5	0.10	-	6.11	12.58	11.93	14.74
E2-6	53.15	4	49.15	G	8.27 ?	65.65		
7	51.99	8	43.99	G	11.53 ?	64.83		
8	53.93	15	38.93	G	-	65.55		
E3-1	4.53	1	3.53	C	-	6.61	7.7	9.28
2	3.98	2	1.98	C	1.47	7.04	7.53	9.12
3	15.08	1	14.08	E	11.76	17.63	17.47	21.44
4	14.99	3	11.99	E	7.23	17.98	18.25	21.19
17	15.07	5	10.07	E	9.54	18.15	18.44	21.6
E3-11	40.04	4	36.04	G	30.38	50.02		
12	40.02	8	32.02	EG	20.47	54.88		
15	40.06	8	32.06	EG	19.97	59.7		
16	40.02	13	27.02	EG	21.39	56.78		
E4-5	7.98	1	6.98	C	6.29	9.95	10.17	12.09
10	27.15	2	25.15	E	19.40	31.61	28.66	37.86
11	27.50	5	22.50	E	16.27	33.77	33.91	38.52
13	7.94	2	5.94	C	9.64	11.39	12.54	14.73
							9.5	10.54
							21.5	23.89
							37.36	42.02



11		24.86	8	16.86	CE	8.98	31.11	29.6	35.42		
E7b-4		40.02	4	36.02	EG	24.45	54.96				
5		47.33	8	39.33	EG	26.20	56.3				
6		80.05	8	72.05	EG	50.39	94.87				
7		80.11	16	64.11	EG	44.96	95.13				
N2-1		1.02	1	0.02	-	0.74	1.7	1.65	2.16	2.18	2.67
2		2.63	1	1.63	CE	1.43	3.94	4.17	4.97	4.8	6.06
3		2.68	1	1.68	CE	1.08	4	3.71	4.74		
4		4.97	1	3.97	G	2.39	5.77	5.91	7.21	7.28	8.36
8		4.96	1	3.96	G	2.51	6.61	6.75	7.54		
9		4.91	2	2.91	E	1.16	5.78	5.13	7.08		
10		5.97	1	4.97	G	3.88	7.33	7.04	8.41	8.12	9.56
11		5.96	2	3.96	G	2.11	7.47	7.18	8.54		
12		5.2	5	0.2	-	4.81	8.04	7.39	9.19		
13		2.79	3	-0.21	-	0.51	4.34	3.83	5.14	4.74	6.34
N3-1		1	1	0	-	0.53	2.93	3.34	4.16		
2		1.5	1	0.5	CE	-	3.42	3.76	4.17		
3		3.03	1	2.03	EG	1.31	4.11	4.28	4.85		
4		2.96	1	1.96	E	0.90	4.35	4.65	5.63		
5		3.01	2	1.01	CE	1.45	4.67	4.98	7.76		
6		3.25	2	1.25	CE	0.64	4.87	5.11	5.86		
7		3.07	3	0.07	-	1.56	4.69	5.02	5.56		
8		4.19	1	3.19	G	1.66	5.79	5.96	6.83		
9		4.05	1	3.05	G	2.41	4.94	4.7	5.88		
10		4.12	2	2.12	EG	1.94	5.18	5.18	5.94		
16		4.02	2	2.02	EG	1.65	5.03	6.32	7.18		
17		4.05	4	0.05	-	3.32	6.36	6.86	7.56		
N4-1		0.98	1	-0.02	-	0.46	2.08	2.14	3.01		
2		2.52	1	1.52	CE	1.58	3.34	3.46	3.99	4.11	4.57
3		2.52	1	1.52	CE	1.17	3.05	2.99	4.16		
4		4.03	1	3.03	EG	1.69	5.32	5.38	6.54	6.19	6.95
5		3.88	1	2.88	E	2.90	6.66	6.83	8.22		
6		3.96	2	1.96	CE	2.20	5.25	6.12	6.76	6.76	7.64
7		3.97	2	1.97	CE	2.27	5.89	5.72	6.53	6.65	7.41
8		6.04	1	5.04	G	3.66	6.97	7.03	7.55		

9	7.74	1	6.74	G	4.20	8.09	8.27	9.39	
10	5.87	1	4.87	G	3.74	6.68	7.08	8.06	8.24
11	6.01	2	4.01	G	2.97	6.82	6.82	7.23	
17	5.98	4	1.98	CE	2.95	7.56	7.49	8.79	9.37
18	5.98	6	-0.02	-	-	7.28	7.36	8	
19	4.55	4.5	0.05	-	2.96	6.93	7.07	8.08	

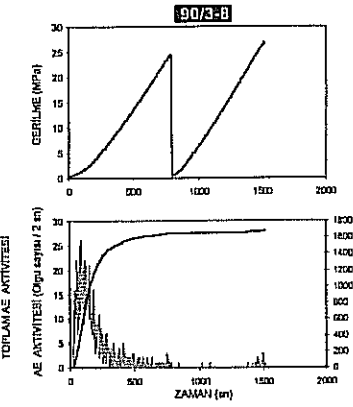
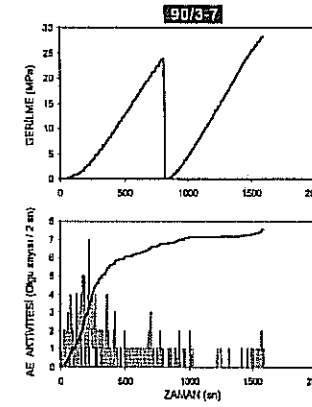
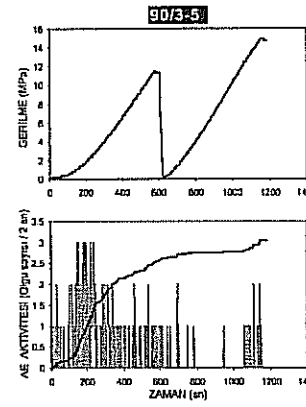
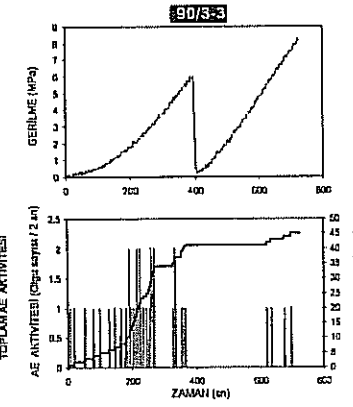
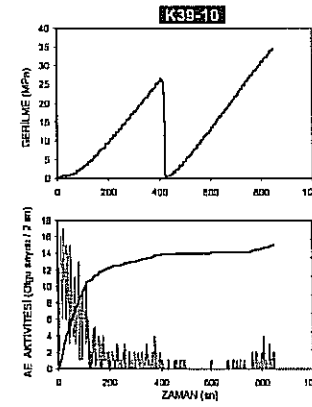
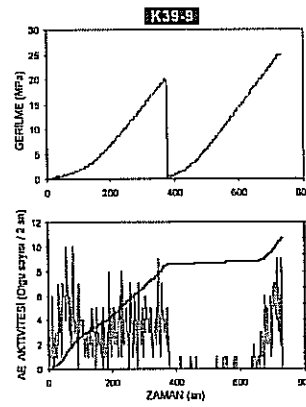
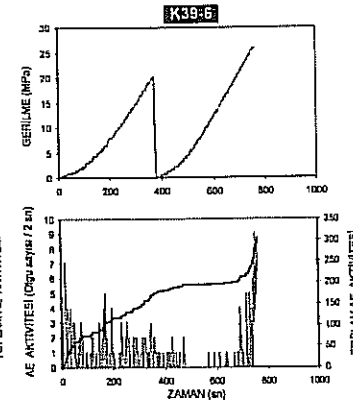
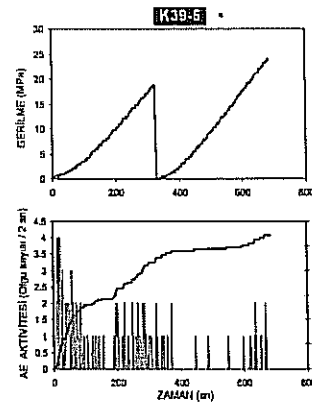
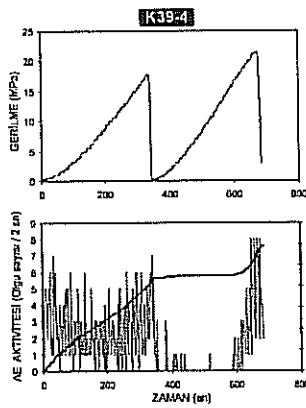
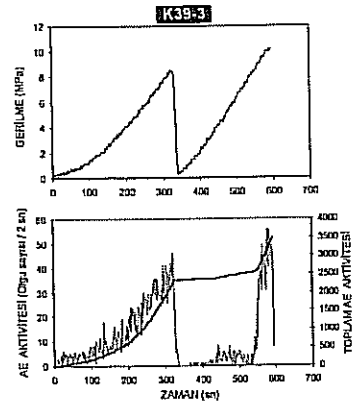
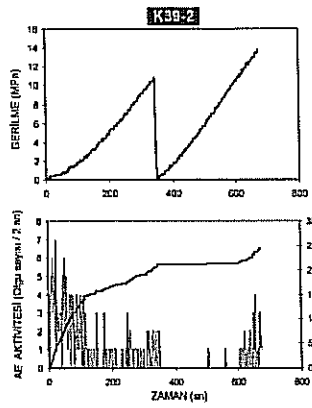
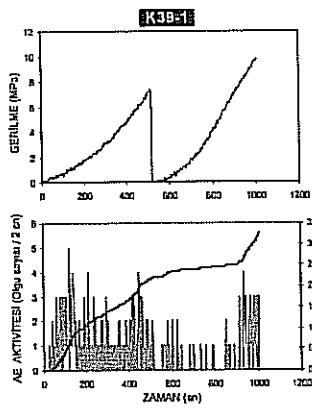
$\sigma_{1p}$ ,  $\sigma_{3p}$ : Önyüklemdeki aksenal ve yanıl gerilmeler CBS: Deformasyon ve çatıak ilerlemesi aşamaları, C: Çatıak kapanımı aşaması, E: Elastik aşama, G: Çatıak ilerlemesi aşamaları, CE, EG: Uygulanan öngerilme farklarının tam olarak hangi aşamaya düştüğü belirlenemeyen durumlar için, olası aşamalar ifade edilmiştir, KE: Kaiser etkisi seviyesi,  $Y_{ükmax}$ : AE deneylerinin yapıldığı tek aksenli 1. ve 2. yüklemelerde uygulanan en büyük gerilmeler.

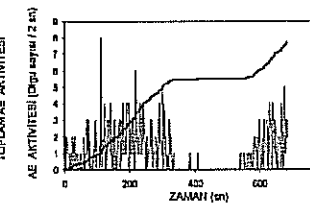
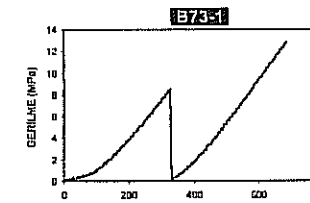
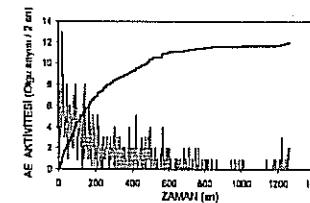
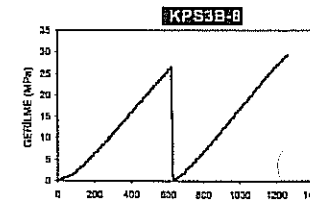
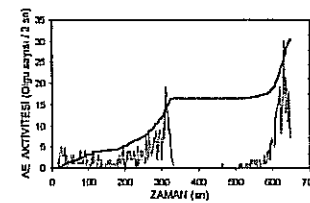
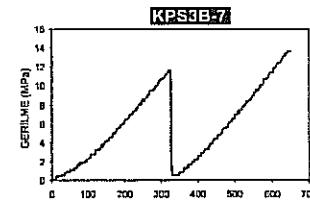
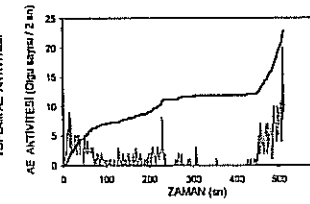
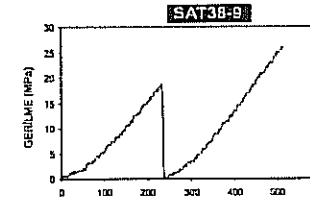
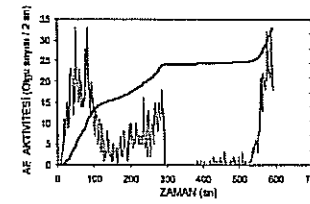
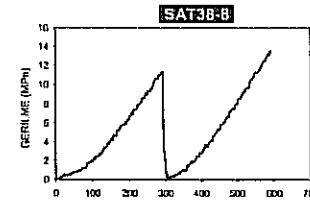
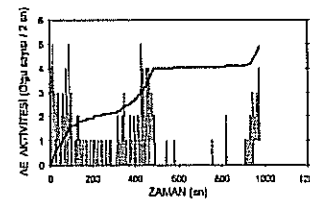
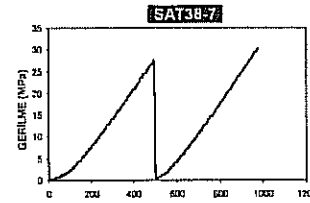
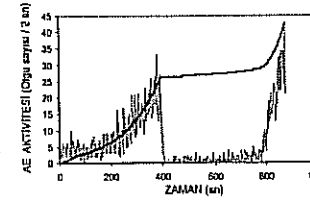
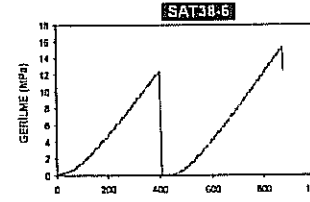
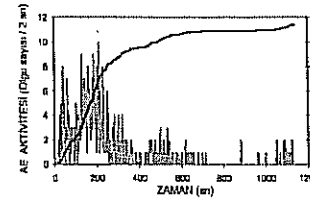
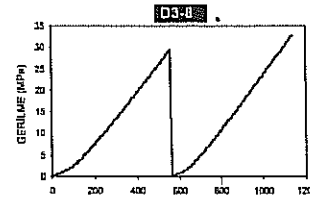
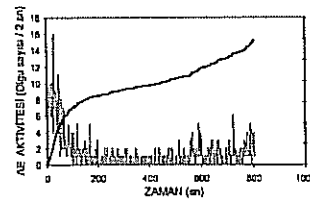
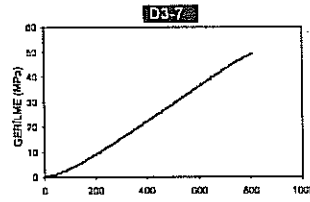
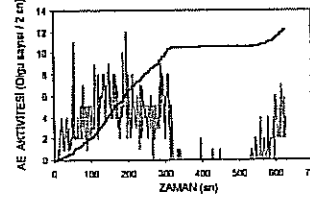
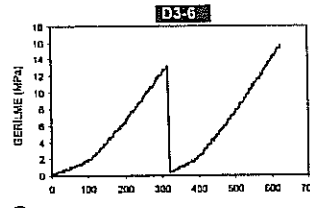
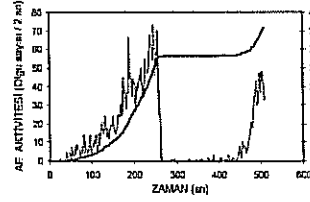
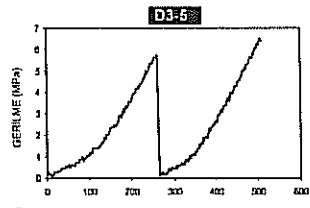
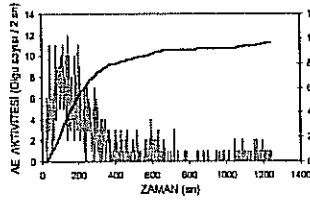
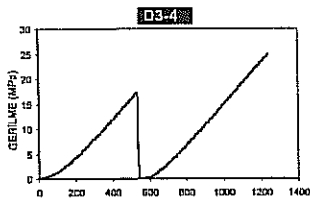
## EK 3

Sondajlardan elde edilen örneklerde gerçekleştirilen tek eksenli yükleme koşulundaki AE deneylerinin sonuçları

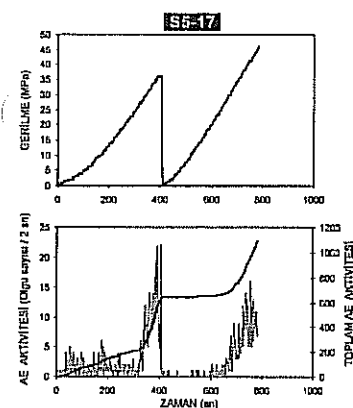
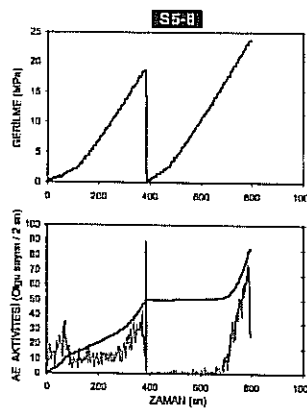
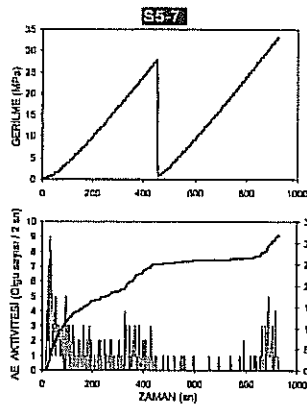
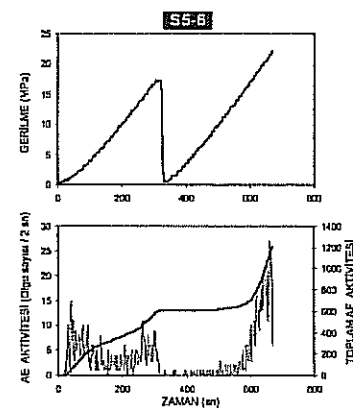
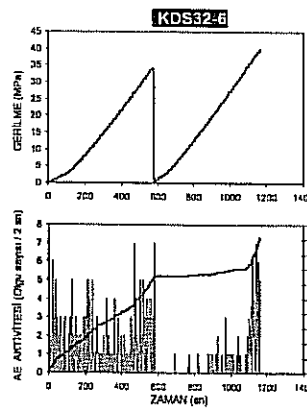
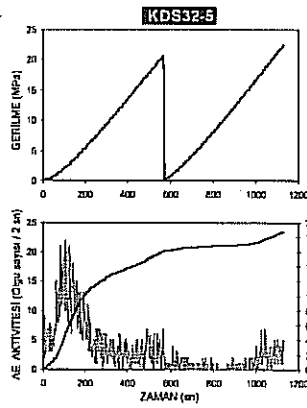
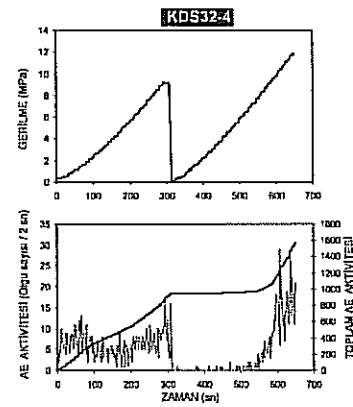
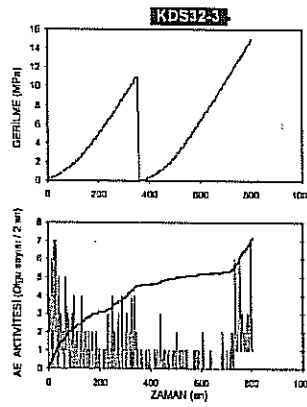
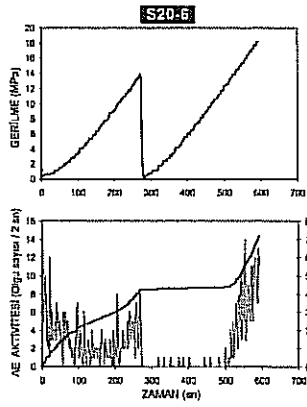
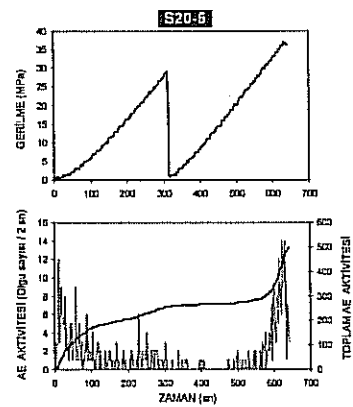
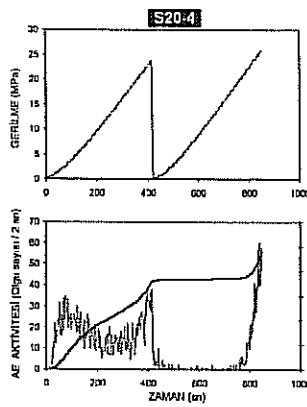
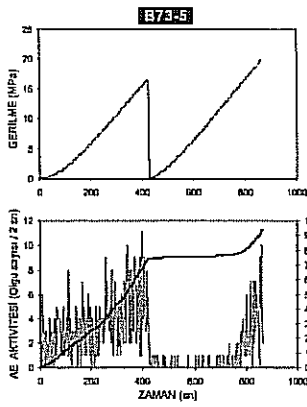
EK 3a

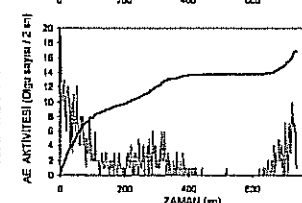
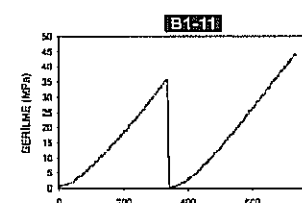
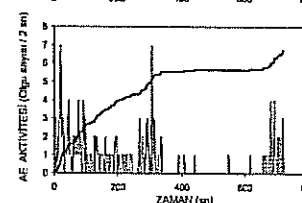
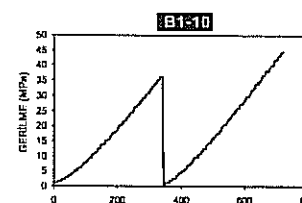
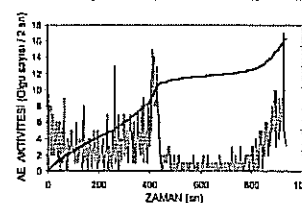
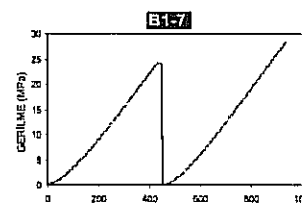
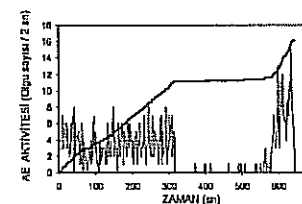
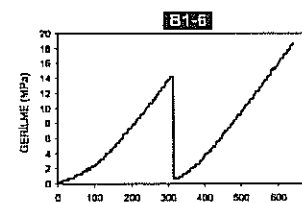
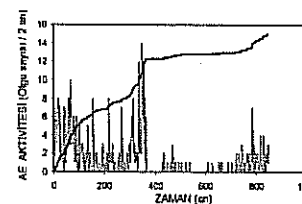
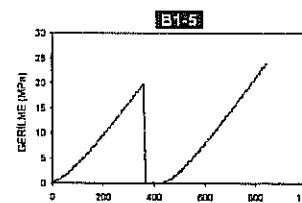
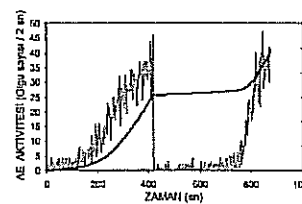
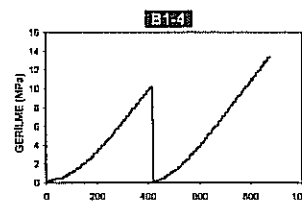
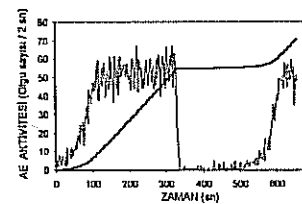
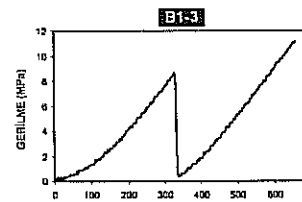
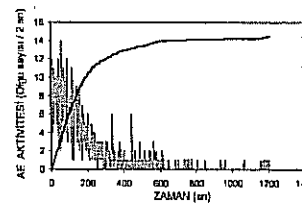
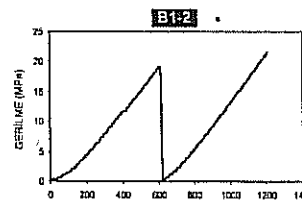
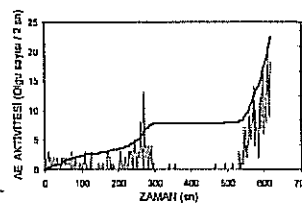
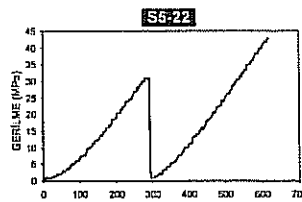
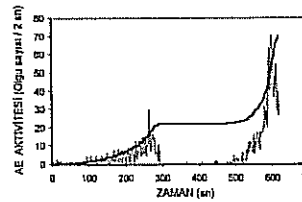
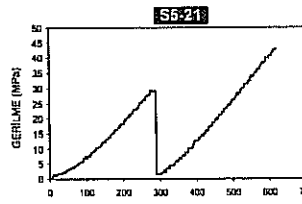
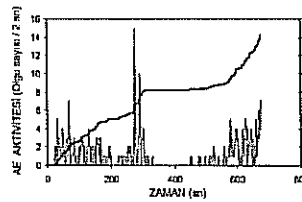
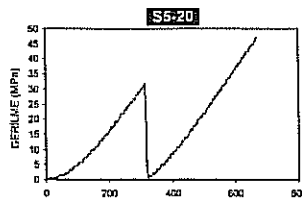
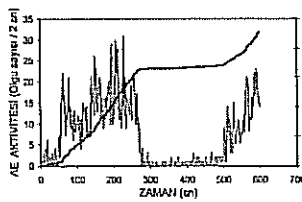
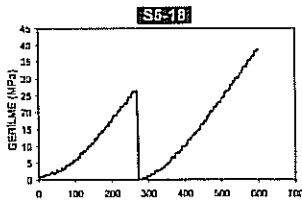
AE deneylerinden elde edilen grafikler











## EK 3b

Sondajlardan elde edilen örneklere ilişkin bilgiler ve bu örnekler için belirlenen örtü gerilmeleri ve KE seviyeleri

Sondaj No: K39 Yapıldığı yılı: 1981

TEK EKSENLİ YÜKLEME KOŞULUNDA  
AE DENEYLERİ

SONDAJLARDAN ALINAN ÖRNEKLERE İLİŞKİN BİLGİLER

BİRİM	BİRİM ALT SINIRI (m)	ÖRNEK NO.	ÖRNEK TÜRÜ	ÖRNEK ŞEKLİ	DERİNLİK (m)	γ <sub>ort</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	σ <sub>ov</sub> (MPa)	1. YÜKLEME (MPa)			2. YÜKLEME (MPa)		
								KE	Yük <sub>max</sub>	KE	Yük <sub>max</sub>	KE	Yük <sub>max</sub>
Çok ince mermer seviyesi içeren kireçtaşı	181	1	Kireçtaşı	Karot	66.00	25.7	1.70	4.56	7.38	7.89	9.77		
		2	Kireçtaşı	Karot	124.50	25.7	3.20	6.51	10.81	10.45	13.75		
		3	Kireçtaşı	Karot	150.00	25.7	3.86	1.5	8.48	8.55	10.18		
Mermer	263.95	4	Mermer	Karot	184.50	26.8	4.74	12.39	17.78	17.64	21.4		
		5	Mermer	Karot	203.00	26.8	5.22	8.84	18.8	18.68	24.03		
		6	Mermer	Karot	242.00	26.8	6.23	4.28	20.29	19.78	25.96		
Cevher-skam	316.47	7	Skam	Karot	281.00	35.1	7.39						
		8	Cevher	Şekilsiz	284.00	35.1	8.02	5.94	20.16	20.54	25.11		
		9	Skam	Karot	299.00	35.1	8.02						
Diyorit		10	Diyorit	Karot	320.00	27.2	8.73	-	26.22	27.2	34.59		

Sondaj No: 90/3 Yapıldığı yılı: 1990

Alüvyon	18					18.5							
Kilitaşı	79.15	90/3-1	Kilitaşı	Şekilsiz	49	21.1	1.32						
		2	Kilitaşı	Karot	60/70	21.1	1.32						
Silttaşı - silttaşı	234.85	3	Silttaşı-kilitaşı	Karot	150/155	20.5	3.13	1.59	6	5.29	8.24		
		4	Silttaşı-kilitaşı	Şekilsiz	188	20.5	3.13						
Kireçtaşı bantlı kilitaşı	274.85	5	Kireçtaşı bantlı kilitaşı	Karot	249	22.9	5.14	-	11.5	12.03	14.88		
		6	Linyit bantlı kilitaşı	Şekilsiz	280	21.4	21.4						
Silttaşı-kilitaşı ard.	369.45												
Linyit izli kilitaşı-silttaşı	404	7	Linyit izli kilitaşı	Karot	380	23.6	8.02	-	23.84	23.78	28.38		
		8	Kumtaşı-kilitaşı	Karot	430	23.9	9.21	-	24.39	24	26.9		



175														
Çamurtaşı	183	Örn. alınamadı												
Andezit	199.25	7	Andezit	Karot	194.5	24.4	5.19	5.42	11.64	11.78	13.64			

Piritli çört-Piritli kçt	227.8		Örnek alınamadı										
Piritli andezit	241.8	8	Piritli andezit	Karot	230	26.4	6.14	-	26.4	26.97	29.25		
Çamurtaşı	255.15	10	Çamurtaşı	Karot	234	25.7	6.24						

**Sondaj No: B73 Yapıldığı yıl: 1983**

Yamaç molozu	68.15					18.5							
Ultrabazik kaya	196.25	5	Ultrabazik k.	Karot	193	4.48	6.9	16.58	15.72	19.85			
		2	Ultrabazik k.	Karot	145.5	3.25							
		3	Ultrabazik k.	Karot	148	3.32							
		4	Ultrabazik k.	Karot	182	4.20							
		79/80	Ultrabazik k.	Karot	79/80	1.56		8.53	8.42	12.82			

**Sondaj No: S20 Yapıldığı yıl: 1962**

Dasit	95.6	6	Dasit	Karot	69	1.69	9.58	13.86	13.77	18.24			
		5	Dasit	Karot	86.3	2.11	16.34	29.86	31.41	36.27			
		4	Dasit	Karot	56.5	1.38	18.3	23.75	22.27	25.97			
		3	Dasit	Karot	39	0.96							
		2	Dasit	Karot	22	0.54							
		7.5	Dasit	Karot	7.5	0.18							

**Sondaj No: KDS32 Yapıldığı yıl: 1979**

Kireçtaşı	36	2	Kireçtaşı	Şekilsiz	27	25.9							
Mermer	57	3	Mermer	Karot	51	26.1	1.32	5.97	11.03	11.09	15.01		
Şist	76	4	Şist	Karot	72	27.4	1.89	5.6	9.2	9.58	11.89		
Çok ince cevher		5	Mermer	Karot	100	26.7	2.64	16.92	20.63	17.62	22.51		

seviyeleri içeren mermer	121.5	6	Mermer	Karot	120	3.18	26.06	34.19	34.56	39.83
Cevher-skarn		7	Cevher	Şekilsiz	130					
		8	Cevher	Şekilsiz	142	38.7				
	185.55	9	Cevher	Karot	146.5	4.18				

**Sondaj No: S5 Yapıldığı yılı: 1982**

Porfir, pirit, skarn, mermer		8	Porfir	Şekilsiz	8						
	S5-1	26	Mermer	Şekilsiz	26						
	2	31	Porfir	Şekilsiz	31	27.6					
	3	41	Mermer	Karot	41	1.13					
	4	62.5	Skarn	Şekilsiz	62.5						
Metamorfik kaya	81.75	75	Mermer	Karot	75	2.07					
		100.5	Metamorfik	Karot	100.5	2.77	9.77	17.23	17.14	22.11	
	134.8	120.5	Metamorfik	Karot	120.5	3.31	18.65	27.84	28.2	33.17	
Pirit, skarn, mermer		130.5	Metamorfik	Karot	130.5	3.58	13.84	18.7	17.69	23.74	
		135	Pirit	Şekilsiz	135						
	167.05	142	Pirit	Şekilsiz	142	31.2					
Bazik kaya, mermer, skarn, porfir		155	Mermer	Şekilsiz	155						
		169	Bazik kaya	Şekilsiz	169						
		205	Skarn	Şekilsiz	205						
		210	Porfir	Şekilsiz	210						
		240	Skarn	Şekilsiz	240						
		255	Porfir	Şekilsiz	255						
		291	Skarn	Karot	291	27.0	7.12	29.16	36.24	32.7	45.96
		305	Porfir	Karot	305	7.49	7.49	10.03	26.53	24.07	38.56
		325	Porfir	Şekilsiz	325						
		329	Bazik kaya	Karot	329	8.14	8.14	25.41	31.6	31.81	47.06
		345	Porfir	Karot	345	8.57	8.57	6.43	29.27	30.82	43.02
	375.9	372.5	Porfir	Karot	372.5	9.32	9.32	19.1	30.92	31.38	42.74

Sondaj No: B1 Yapıldığı yılı: 1967

	B1 - 1	Dasit	Karot	49	24.4	1.20	19.21	19.26	21.56
Dasit	2	Dasit	Karot	109		2.66			
	119.3						8.7	8.36	11.18
		Piritli kireçtaşı	Karot	121.5		2.97	10.24	10.18	13.4
		Piritli kireçtaşı	Karot	132		3.26	19.75	19.57	24.01
		Piritli kireçtaşı	Karot	141		3.51	14.28	14.46	18.67
Çok ince		Kçt - cevher	Karot	195	27.4	4.99	24.24	21.42	28.53
cevher seviyeleri		Kçt - cevher	Karot	220.5		5.68			
İçeren kireçtaşı		Kçt - cevher	Karot	280		7.31			
		Kçt - cevher	Karot	300		7.86			
	332.64	Kireçtaşı	Karot	310		8.14	26.54	37.11	44.53
Çok ince cevher		Kçt-cev-kong	Karot	340		8.95	18.99	35.27	44.14
seviyeleri içeren		Cevher	Şekilsiz	370.5	25.9				
kireçtaşı									
konglomera ard.	378.85	Kong-kçt	Karot	375		9.85			



## PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

<b>Proje Kodu:</b> 103Y013
<b>Proje Başlığı:</b> Arazi Gerilmelerinin Belirlenmesinde Akustik Emisyon Tekniğinin Performansının Ve Ölçümleri Etkileyen Faktörlerin Araştırılması
<b>Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar:</b> Prof. Dr. Reşat ULUSAY, Dr. Ergün TUNCAY, Doç. Dr. Harun SÖNMEZ
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 06532 Beytepe ANKARA
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> TÜBİTAK Tunus Cad. No:80 06100 Kavaklıdere ANKARA
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 1 Ağustos 2003 – 1 Şubat 2006
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> Bu çalışma, Akustik Emisyon (AE) tekniğinin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve konuya ilişkin literatürde yer alan tartışmalara, bir ölçüde de olsa, açıklık getirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda Kaiser Etkisi (KE) seviyesi üzerinde önyüklemedeki gerilmelerle birlikte örneklerin içerdikleri mikroçatlakların da etkili olduğu belirlenmiştir. KE seviyesinin öngerilmelerle ve mikroçatlaklarla ilişkisine yönelik, sınırlamalarıyla birlikte, Griffith kuramından yararlanılarak bazı eşitlikler önerilmiştir. AE tekniğinin literatürde önerildiği şekliyle arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılmasının tartışmalı olacağı görülmüştür.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Akustik Emisyon (AE), Kaiser Etkisi (KE), Arazi gerilmesi, Öngerilme, Griffith kuramı.
<b>Projeden Kaynaklanan Yayınlar:</b> Hazırlık aşamasında
<b>Bilim Dalı:</b> Yerbilimleri ve Mühendisliği
<b>Doçentlik B. Dalı Kodu:</b> 91