



The improvement of gelling property of bentonites using their physico–chemical and mineralogical characteristics

Bentonitlerin jelleşme özelliğinin fiziko–kimyasal ve mineralojik özellikleri kullanılarak iyileştirilmesi

Abdullah OBUT, İsmail GİRGIN

Hacettepe University, Department of Mining Engineering, 06532 Beytepe, Ankara, TURKEY

ABSTRACT

In this study, the physical, chemical, and mineralogical properties of three commercial bentonite samples (Turkey) were determined using physical, chemical, XRD, TG–DTA and IR analysis methods. Experimental results show that the studied samples contain smectite as the dominant clay mineral and considering the tetrahedral layer charges (Çankırı >Ordu >Reşadiye), Reşadiye sample was found to resemble an ideal montmorillonite, Çankırı sample a beidellitic montmorillonite and Ordu sample having an intermediate character. The octahedral iron content of the Çankırı sample also was found to be highest and that of the Ordu sample was the lowest. The critical coagulation concentration, sedimentation volume, gelling coefficient, glycerol surface area and cation exchange capacity tests were done in order to reveal the physico–chemical characteristics of the samples. Considering these characterisations, Çankırı sample was found suitable for the improvement of its rheological properties. MgCl₂·6H₂O was used as an inorganic additive and the effect of pH and reagent concentration on the rheological properties was investigated. It was found that the gelling and swelling properties were improved by 30% and 34%, respectively.

Key words: Bentonite, gelling coefficient, sedimentation volume, smectite.

ÖZ

Bu çalışmada, fiziksel, kimyasal, XRD, TG–DTA ve IR analiz yöntemleri kullanılarak üç ticari bentonit (Türkiye) örneğinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar; kullanılan bentonit örneklerinin baskın olarak smektit içerdiğini ve terahedral tabaka yükü göz önüne alındığında (Çankırı >Ordu >Reşadiye), Reşadiye örneğinin ideal montmorillonite, Çankırı örneğinin beyidellitik montmorillonite ve Ordu örneğinin de ara karakterdeki montmorillonite benzediğini göstermiştir. Ayrıca, Çankırı örneğindeki oktahedral demir içeriğinin en fazla ve Ordu örneğindeki oktahedral demirin de en az olduğu bulunmuştur. Örneklerin fiziko–kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla kritik koagülasyon konsantrasyonu, çökelti hacmi, jelleşme katsayısı, gliserol yüzey alanı ve katyon değişim kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Bu tanımlamalar dikkate alınarak, reolojik özelliklerinin iyileştirilmesi için en uygun örneğin Çankırı örneği olduğu anlaşılmıştır. Anorganik katkı maddesi olarak MgCl₂·6H₂O kullanılarak, pH ve reaktif derişiminin reolojik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Jelleşme ve şişme özelliklerinde sırasıyla %30 ve %34 iyileştirme sağlanabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Bentonit, jelleşme katsayısı, çökelti hacmi, smektit.

INTRODUCTION

Montmorillonite and beidellite are the principal constituents of bentonite deposits resulted from

various alteration and weathering processes of alkaline rocks. While montmorillonite represents Mg for Al octahedrally substituted end–member of the dioctahedral smectites, beidellite repre-

sents Al for Si tetrahedrally substituted end-member (Grim, 1968). As montmorillonite and beidellite have the highest occurrence, bentonites having intermediate chemical and mineralogical compositions can be formed (Lim and Jackson, 1986; Çoban and Ece, 1999). Due to random interstratifications, some of their properties (gelling, swelling, cation exchange, etc.) may alter and so detailed physico-chemical and mineralogical identification of the samples are required in order to evaluate and to improve their properties, which have crucial importance in drilling, foundry, bleaching, clarification and pelletizing industries (Murray, 1999).

Edge-to-edge (EE), edge-to-face (EF) and face-to-face (FF) interactions (van Olphen, 1963) are very important and practical for understanding the stability and rheological characteristics of clay suspensions. These type of particle interactions are intimately related to the electrical charges on the basal planes and the edge surfaces. The electrical charges vary in magnitude and sign depending on suspension pH, suspension electrolyte concentration, electrolyte type and the presence of special complexing anions (van Olphen, 1963; Heath and Tadros, 1983; Benna et al., 1999). In alkaline suspensions, EF type interactions are not favourable due to the repulsion of negative surfaces, but an EE type or a band-like interaction favors due to the high negative potential on the high surface area basal planes of the particles (Luckham and Rossi, 1999). Durán et al. (2000), using theoretical considerations, found that at $\text{pH} < 7$ the EF interactions and at $\text{pH} > 7$ the EE interactions are dominant and at $3 < \text{pH} < 10$ the FF interactions are practically impossible. Special complexing anions, such as polymetaphosphates, are added to the clay suspensions to greatly reduce the Bingham yield stress by disrupting the EE or EF type associations and specific adsorption of the anion to the clay edge surface makes the edge charge more negative as showed by Oster et al. (1980). Accordingly, the Bingham yield value of the suspension should increase if the potential on the edges is changed from negative to positive in alkaline pH values and the mechanism of the improvement in gelling property of bentonites due to formation of positively charged edge surfaces by use of inorganic additives was explained by Obut (2001).

Although the mineralogical and petrographical studies on some of the Turkish bentonite deposits, such as Çankırı, Tokat, Ayvacık, and Ordu have been done (Türkmenoğlu and Aker, 1990; Gümüşer ve Yalçın, 1998; Çoban and Ece, 1999; Çelik et al., 1999), their physical characterisation related to gelling and swelling properties are not correlated in detail with their mineralogical properties. The aim of this study is to determine some physical, chemical, and mineralogical properties of three commercial bentonite samples so as to be able to improve some of their properties by inorganic additives. In this respect; Çankırı sample was found suitable for improvement of the gelling coefficient and the sedimentation volume properties, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ was tested as an inorganic additive, and the effect of reagent concentration and pH on the rheological properties was studied.

EXPERIMENTAL STUDY

Materials

The Çankırı, Reşadiye and Ordu bentonite samples were supplied by Karakaya Bentonit A.Ş. which are marketed as foundry sand binder, drilling mud additive and bleaching earth, respectively and these marketed samples were named as original samples. Original, $-2\mu\text{m}$ separated fractions, methylene blue (Hoechst), glycerol (Prolabo), Merck grade reagents (NaCl, LiCl, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, HCl, NaOH, ethylene glycol) and distilled water were used in the experiments.

Methods

Original clay samples were used as received from the supplier. Purified clay fractions were prepared by first removing carbonates and organic matter, and then collecting clay fraction by centrifugation as described in Jackson (1964) for use in only ethylene glycolated and heated XRD analysis for identification of the existing clay mineral type. $-2\mu\text{m}$ fractions used in all other experiments were prepared only by decantation obeying Stokes' law.

XRD patterns of random powder, ethylene glycolated, heated (300°C) and Li-250 treated (Lim and Jackson, 1986) specimens were obtained using Philips PW 1140 X-ray diffractome-

ter with $\text{CuK}\alpha$ radiation. Chemical analysis of the original and $-2\mu\text{m}$ fractions were carried out using Philips PW 1480 X-ray spectrometer, and carbon contents of the original samples were determined using Leco 1000 model analyzer. The amount of exchanged Na in cation exchange capacity measurements for original samples were done using Varian Spectra AA-5 atomic absorption spectrometer. Thermal behavior of the original samples were identified using Rigaku 2.22E2 model TG-DTA thermal analyzer with $10^\circ\text{C}/\text{min}$ heating rate, and infrared spectra of the $-2\mu\text{m}$ fractions were determined using Nicolet 520 FT-IR spectrometer with KBr disc method.

pH (6% wt/vol), critical coagulation concentration with NaCl (3% wt/vol), methylene blue index (ASTM, 1992), cation exchange capacity (Bain and Smith, 1994), measured and theoretical glycerol surface areas (Jackson, 1964; Güven, 1992), gelling coefficient (TS 5360, 1996) and sedimentation volume (1.4g sample/100ml water) values of the original samples were also determined.

In the improvement studies conducted on the $-2\mu\text{m}$ fractions of the Çankırı sample which is the most invaluable one, suspensions containing 4g sample and 190ml distilled water ($\sim 2\%$ wt/vol) were prepared by vigorous mixing for 5 minutes and then the required amount of $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ was added to the suspension. During the magnetic stirring of suspension, the desired pH values (8, 9, 10, 10.5, 11 and 12) were adjusted using HCl or NaOH solutions with concentrations between 0.005–0.1 M. After 1 hour stirring at the desired pH value, the suspensions were dried at $105 \pm 5^\circ\text{C}$ and used in sedimentation volume and gelling coefficient tests.

RESULTS AND DISCUSSION

X-ray Diffraction Analysis

Random powder diffraction patterns (Figure 1) show that the original and the $-2\mu\text{m}$ fractions contain smectite as the dominant clay mineral with the associated impurities of quartz, feldspar, dolomite, kaolinite, illite, cristobalite, and zeolite. Although $-2\mu\text{m}$ fractions contain these impurities, the maximum semi-quantitatively estimated total amount of these impurities using XRD patterns are not higher than 25%. On the

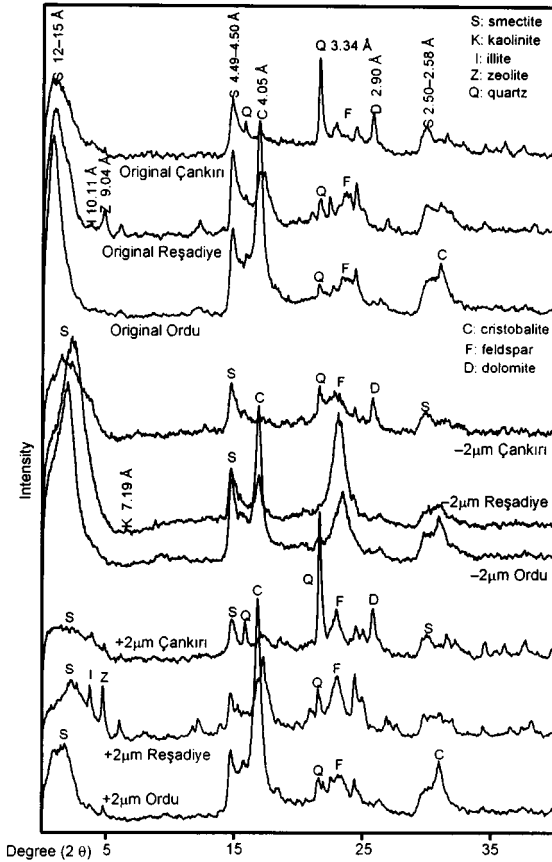


Figure 1. XRD patterns of the original and the $-2\mu\text{m}$ fraction

Şekil 1. Orijinal ve $-2\mu\text{m}$ 'lik fraksiyonun XRD desenleri

other hand, $+2\mu\text{m}$ fractions contain low amounts of smectite and very high amounts of the above mentioned impurities. $d_{(001)}$ values of the samples show that the $-2\mu\text{m}$ fractions of the Ordu and Reşadiye samples contain Na^+ ($d_{(001)}=12.5\text{Å}$) and $-2\mu\text{m}$ fraction of the Çankırı sample contains Na^+ and Ca^{2+} ($d_{(001)}=12.1\text{Å}$ and 15.2Å) as the main exchangeable cations.

The patterns of heated and ethylene glycolated samples (Figure 2) confirm that the dominant clay mineral in the three samples is smectite, due to the increase of basal spacing to 17.3Å – 18.0Å (Grim, 1968; Borchardt, 1989). Octahedral characters of the samples were determined from $d_{(060)}$ values that were 1.512, 1.503 and 1.499Å for the Çankırı, Reşadiye and Ordu samples, respectively. Since all these $d_{(060)}$ values are in the range of 1.49 – 1.52Å , the smectites in the samples can be characterized

as dioctahedral in character (Moore and Reynolds, 1989). The $d_{(060)}$ value also has an increasing tendency with the increase of the Fe content of octahedral layer, as found by Russell and Clark (1978), and accordingly, octahedral Fe content of the smectites in the samples is highest for the Çankırı sample, intermediate for the Reşadiye and lowest for the Ordu sample. On the other hand, Li-250 treatment (Figure 2) shows that the Reşadiye and Çankırı samples have the lowest and the highest tetrahedral charges, respectively.

High K_2O content of the Çankırı sample can be attributed to the presence of illite which is determined as a separate phase rather than a mixed layer type from ethylene glycolated pattern as described by Moore and Reynolds (1989). On

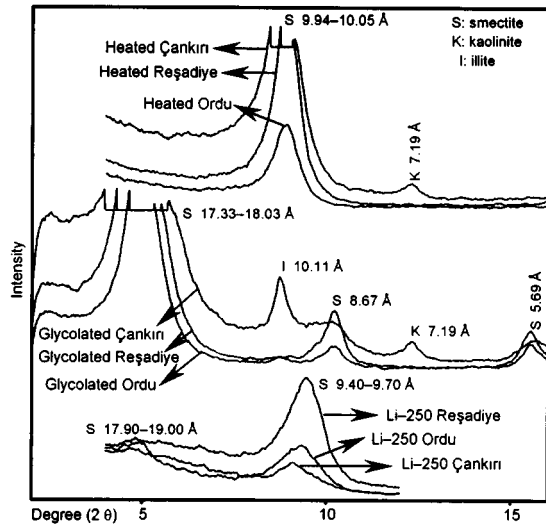


Figure 2. XRD patterns of the treated clay samples
Şekil 2. İşlenmiş kil örneklerinin XRD desenleri

the other hand, considering the findings of Çoban and Ece (1999) for iron(III)-rich beidellitic montmorillonite, it may be concluded that the Çankırı sample contains this type of smectite related with the peaks of 4.42 Å, 4.00 Å, and 3.53 Å.

Thermal Analysis

Differential thermal analysis (DTA) and thermal gravimetric analysis (TG) data for original samples are given in Table 1. The DTA curves are characteristic for smectite minerals (Greene-Kelly, 1957), namely, a large endothermic peak between 80–150°C, a smaller endotherm between 500–700°C and an endo-exothermic inversion between 800–1000°C. These peaks correspond to the loss of adsorbed water, dehydroxilation and the structural changes, respectively. Absence of any exotherm in the DTA curves around 300°C is an indication that the original samples do not contain organic contaminants in appreciable quantities (Özkan and Ross, 1979) as verified by the carbon analysis results of 1%, 0.6% and 0.3% for the Çankırı, Reşadiye and Ordu samples, respectively.

Although the second endothermic peak was obtained around 650°C for Reşadiye and Ordu samples, the Çankırı sample has an endotherm around 500°C due to high Fe content in its octahedral layer (MacKenzie, 1970). Accordingly, among the studied samples, the Çankırı sample has the highest amount of octahedral iron in its structure. The endotherm around 500°C for the Çankırı sample may also be explained in terms of the possible low crystallinity sequence of the original samples (Özkan and Ross, 1979). The endothermic peak around 700°C

Table 1. The DTA-TG data for the original samples
Çizelge 1. Orijinal örneklerin DTA-TG verileri

Sample	DTA data			TG data	
	1 st peak (°C)	2 nd peak (°C)	3 rd peak (°C)	Temp. range (°C)	Weight loss (%)
Çankırı	88	495	799 (exo)	20–195 342–830	8.2 6.8
Reşadiye	88	669	848 (endo)	20–257 605–910	8.7 3.9
Ordu	93	654	886–924 (endo-exo)	20–300 577–990	9.2 2.3

may be related to the carbonate mineral content of the Çankırı sample (Smykatz–Kloss, 1974).

Infrared Analysis

Infrared spectra of $-2\mu\text{m}$ fractions are given in Figure 3. The Reşadiye sample has no or very low Si substitution for Al in its tetrahedral layer, since there is no band absorption near 3660 cm^{-1} . But, the Çankırı and Ordu samples have noticeable absorption considering ideal montmorillonite and unnoticeable absorption with respect to ideal beidellite (Borchardt, 1989). These results well correlate with the results of Li–250 tests.

Main O–H stretching absorptions occur at 3636 , 3634 , and 3627 cm^{-1} for the Ordu, Reşadiye and Çankırı samples, respectively. This sequence, as stated by Köster et al. (1999), is related to the amount of Fe in octahedral layers of the samples. The amount of octahedral Fe in the samples according to the IR analysis is highest for the Çankırı, intermediate for the Reşadiye, and lowest for the Ordu sample, which is in good agreement with the XRD and the DTA results. Considering also the band absorption between $877\text{--}890\text{ cm}^{-1}$ for octahedral Al–Fe–OH, octahedral Fe content of the samples is determined to follow the above sequence (Bishop et al., 1994).

The IR absorption caused by the structural O–H and FeFe–OH bands at 3560 and 820 cm^{-1} ,

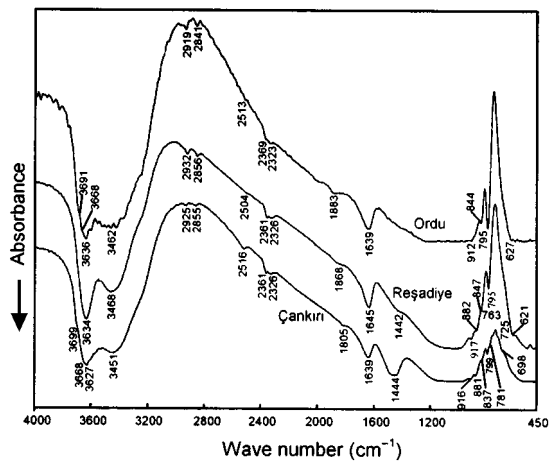


Figure 3. IR spectra of the original samples
Şekil 3. Orijinal örneklerin IR desenleri

respectively are characteristic for nontronites (Borchardt, 1989). The absence of such bands is an indication that none of the samples is nontronite. As stated by Kloprogge et al. (1999), natural beidellites have strong absorption bands at 698 , 779 and 799 cm^{-1} . Only Çankırı sample has weak absorptions at 698 , 781 and 799 cm^{-1} , which may show that the sample has high beidellitic character or contains beidellite as mixed layer.

Very weak absorption at 3699 and 3691 cm^{-1} may be related to the presence of trace amounts of kaolinite in Çankırı and Ordu samples, respectively. The absorption bands near 1444 and 1442 cm^{-1} indicate the presence of carbonate minerals which show typical absorption band at 1450 cm^{-1} as found by Huang and Kerr (1960).

The absorption bands in the infrared spectra of all samples at 3450 and $1630\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ are related to the H–O–H stretching and bending vibrations that can be removed upon heating to 200°C as stated by Grim (1968). Related absorption values found for the samples were $3468/1645\text{ cm}^{-1}$, $3462/1639\text{ cm}^{-1}$ and $3451/1639\text{ cm}^{-1}$ for the Reşadiye, Ordu and Çankırı samples, respectively.

Chemical Analysis

Chemical compositions of original and $-2\mu\text{m}$ fractions are given in Table 2. This table shows that the amount of total iron is lower than that of ideal or natural nontronites (Russell and Clark, 1978; Köster et al., 1999). The decrease in SiO_2 and increase in Al_2O_3 and MgO contents of $-2\mu\text{m}$ fractions show an increase in smectite content with respect to the original samples.

Physico–Chemical Tests

The test results related to the physico–chemical properties of the studied smectite samples are given in Table 3. As the Reşadiye sample has the lowest tetrahedral charge and contains sodium as the dominant exchangeable cation, the critical coagulation concentration value with NaCl (CCC_{NaCl}), as expected, has the highest value. Since tetrahedrally charged clays have lower critical coagulation concentration values than the octahedrally charged clays (Hetzl and

Table 2. Chemical compositions of the original and the $-2\mu\text{m}$ fractions
Çizelge 2. Orijinal ve $-2\mu\text{m}$ 'luk fraksiyonların kimyasal bileşimleri

Weight %	Çankırı		Reşadiye		Ordu	
	Original	$-2\mu\text{m}$	Original	$-2\mu\text{m}$	Original	$-2\mu\text{m}$
SiO ₂	52.51	51.64	59.70	60.20	68.05	65.29
Al ₂ O ₃	15.72	17.30	16.55	18.66	14.36	16.19
$\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$	6.30	7.51	3.74	4.73	1.94	2.40
MnO	0.11	0.08	0.11	0.03	0.07	0.03
MgO	3.56	3.82	1.70	2.20	2.52	2.60
CaO	4.10	2.73	3.16	1.07	1.61	0.88
Na ₂ O	1.94	2.11	2.33	2.59	1.68	2.24
K ₂ O	2.10	2.17	1.14	0.51	1.01	0.50
TiO ₂	0.72	0.77	0.34	0.35	0.22	0.23
P ₂ O ₅	0.13	0.13	0.15	0.03	0.03	0.01
Cr	0.0173	0.0190	0.0006	0.0032	0.0004	0.0039
Zr	0.0099	0.0109	0.0165	0.0106	0.0033	0.0029
LOI*	10.27	10.83	8.74	8.29	6.20	8.09
Total	97.49	99.12	97.68	98.67	97.69	98.47

*LOI: Loss on ignition.

Doner, 1993), the results of CCC_{NaCl} tests related with Ordu and Çankırı samples are also in good agreement in this respect, that the Ordu sample (Na type) has a higher value than the Çankırı sample.

The methylene blue index (M.B.I.) value is lowest for the Çankırı sample and highest for the Ordu sample. The M.B.I. experiment was done at pH ~3 and at this pH value the released octahedral cations, mainly Fe³⁺ and Mg²⁺, compete with the positively charged methylene blue cation for the exchange sites on the clay plates thus reducing the M.B.I. value. Since the Çankırı sample has the highest amounts of iron and magnesium in its structure (see Table 2), the

measured index for the Çankırı sample has the lowest value and for the Ordu sample the situation is reversed.

The glycerol surface area (G.S.A.) values are also related to the tetrahedral charge of the bentonites and increasing tetrahedral charges cause lower measured glycerol surface areas. According to G.S.A._{measured} results, Çankırı sample has the highest tetrahedral charge while the Reşadiye sample has the lowest supporting the results of IR analysis and Li-250 tests.

The sedimentation volume and the gelling coefficient values of $-2\mu\text{m}$ fractions were determined as 11.5–12.8, 25.2–18.2 and 19.9–16.7 for the Çankırı, Reşadiye and Ordu samples, respectively. It may be stated that $-2\mu\text{m}$ fractions of the Reşadiye and Ordu samples are sodium type since, their sedimentation volume and gelling coefficient values are very high compared to the Çankırı sample which is a Na/Ca type mineral. The sedimentation volume and gelling coefficient values of the Reşadiye sample are higher than those of the Ordu sample and this may be related to the high tetrahedral charge that reduces particle swelling and layer separation. The sedimentation volume and gelling coefficient values of the original samples are low and can not be compared due to high amounts and variable impurity contents of them.

Table 3. Some physico-chemical properties of the original samples

Çizelge 3. Orijinal örneklerin bazı fiziko-kimyasal özellikleri

Property	Çankırı	Reşadiye	Ordu
pH	10.1	9.9	9.8
CCC_{NaCl} (me/l)	14.3	23.7	16.0
C.E.C. (meq/100g)	47.7	69.9	57.7
M.B.I. (meq/100g)	52.7	65.0	72.2
G.C.	12.3	11.8	10.0
S.V.	7.0	8.0	5.7
G.S.A. _{measured} (m ² /g)	482	741	602
G.S.A. _{theoretical} (m ² /g)	762	753	749

The Improvement Studies

The effect of pH on the sedimentation volume (S.V.) and the gelling coefficient (G.C.) values (without inorganic additive) on $-2\mu\text{m}$ fractions of the Çankırı sample were determined and the results are given in Figure 4. The S.V. and the G.C. values of the $-2\mu\text{m}$ fractions at natural pH of 10.25 were 11.5 and 12.8, respectively. Considering these values, increase of pH from 10.25 to 10.50 gives the maximum values of the S.V. and the G.C. of 12.2 and 13.3, respectively. This increase can be attributed to the sodium cation added for pH regulation. But this does not explain the fact of the lowering of these values at higher pH values. As the S.V. and the G.C. reach their maximum values at $\text{pH}=10.5$ this may be related to the release of magnesium cation from the interlayers or from the structure of the clay sample as stated by Chen *et al.* (1990). In order to support this claim, magnesium chloride ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) was decided to be used as the inorganic additive.

The minimum and maximum amounts of added magnesium chloride were determined considering the critical coagulation concentration (CCC) value of the sample with $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1.90 meq/liter). The S.V. and the G.C. test results of the $-2\mu\text{m}$ fractions treated at the minimum and the maximum amounts of the inorganic additive are given in Figure 5. The S.V. and the G.C. values were increased with respect to the original values when $1.45\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\{[\text{Mg}]=1.5 \cdot 10^{-3} \text{M}\}$ was used and the highest values obtained

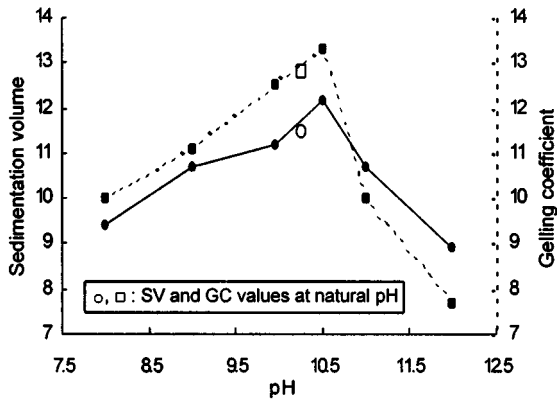


Figure 4. The S.V. and the G.C. values of the $-2\mu\text{m}$ fraction

Şekil 4. $-2\mu\text{m}$ 'lik fraksiyonun S.V. ve G.C. değerleri

were 15.4 and 16.7, respectively at $\text{pH}=10$. Since the CCC value was exceeded with addition of $27.46\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, the S.V. and the G.C. values were very low as seen from Figure 5. Since the observed increasing and decreasing tendency in the S.V. and the G.C. values could be related with the change of potentials on the edge and basal surfaces of the clay platelets, zeta potential measurements were done on the $-2\mu\text{m}$ fraction (without inorganic additive) and $-2\mu\text{m}$ fraction treated with $1.45\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. The results of these measurements related with the pH–logarithmic concentration diagram for a total magnesium concentration of $1.0 \cdot 10^{-4} \text{M}$ and $1.5 \cdot 10^{-3} \text{M}$ are given in Figures 6 and 7, respectively. As seen from these figures, the concentration of the MgOH^+ reaches its maximum value at pH values around 10.5 and 10, respectively, when the zeta potential values become about 7–10 mV more positive.

CONCLUSIONS

In this study, the physico–chemical characteristics of three bentonite samples were determined using critical coagulation concentration, sedimentation volume, gelling coefficient, glycerol surface area and cation exchange capacity tests. The type and origin of tetrahedral charge, the amount of octahedral iron and the type of exchangeable cation in the samples were determined by mineralogical identification and then

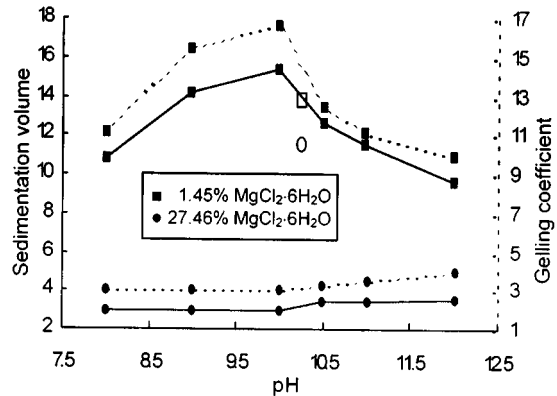


Figure 5. The S.V. and the G.C. values of the $-2\mu\text{m}$ fraction for $1.45\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $27.46\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ additions.

Şekil 5. $-2\mu\text{m}$ 'lik fraksiyonun $1.45\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $27.46\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ilavelerindeki S.V. ve G.C. değerleri.

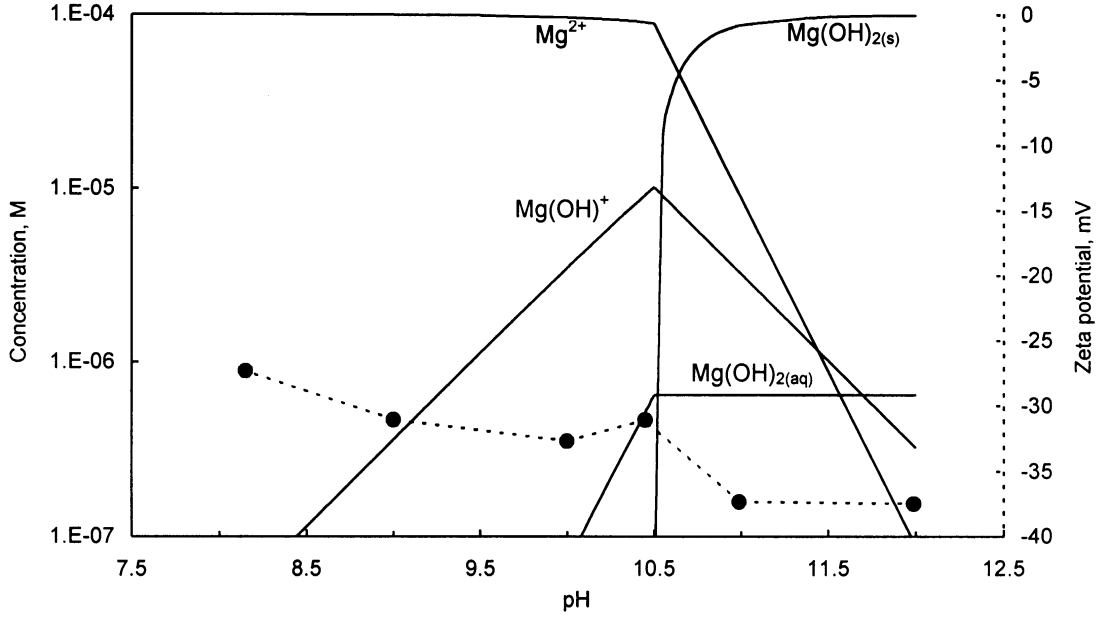


Figure 6. Zeta potential values for $-2\mu\text{m}$ fraction and the pH-logarithmic concentration diagram for $1.0 \cdot 10^{-4}$ M Mg concentration

Şekil 6. $-2\mu\text{m}$ 'lik fraksiyonun zeta potansiyel değerleri ve $1.0 \cdot 10^{-4}$ M Mg derişimi için pH-logaritmik derişim diyagramı

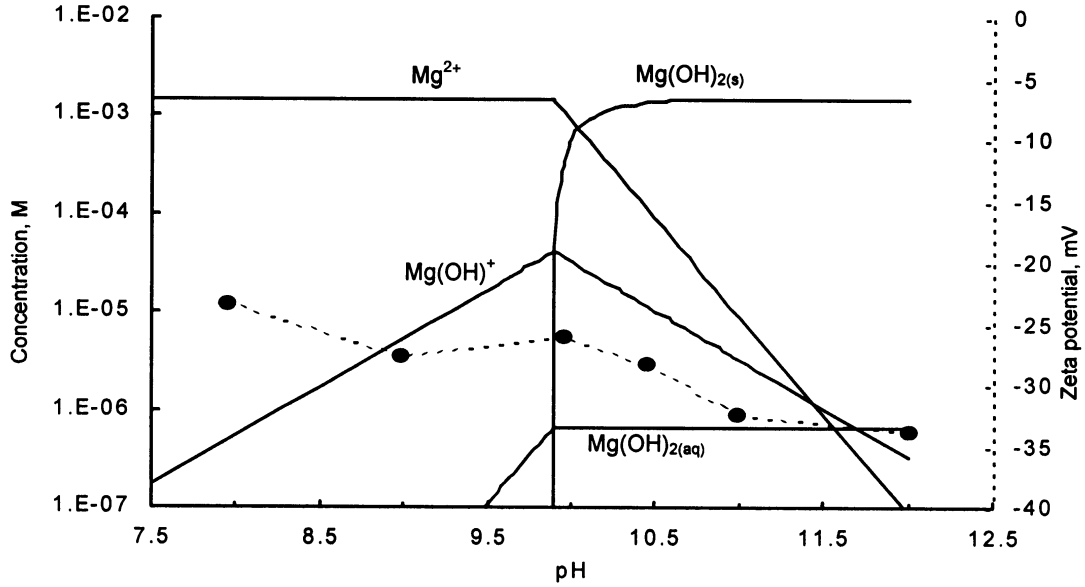


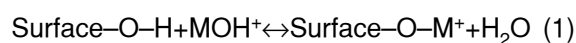
Figure 7. Zeta potential values for $-2\mu\text{m}$ fraction treated with 1.45% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and the pH-logarithmic concentration diagram for $1.5 \cdot 10^{-3}$ M Mg concentration.

Şekil 7. 1.45% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ile işlenmiş $-2\mu\text{m}$ 'lik fraksiyonun zeta potansiyel değerleri ve $1.5 \cdot 10^{-3}$ M Mg derişimi için pH-logaritmik derişim diyagramı.

relationships between the physico-chemical and mineralogical characteristics of the samples were correlated.

The maximum S.V. and the G.C. values, without any use of inorganic additive, were obtained at a pH of 10.50 which corresponded to the ma-

ximum concentration of MgOH^+ formed from the logarithmic concentration diagram drawn for a magnesium concentration of $1.0 \cdot 10^{-4}$ M estimated from the dissolution of magnesium from the structure of the sample. The validity of this result and the consideration was checked by introduction of Mg^{+2} ions into the medium using $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and adjusting the pH so as to control the amount of MgOH^+ formed. In this case, the maximum S.V. and the G.C. values were obtained at pH 10 which corresponded to maximum amounts of MgOH^+ formation at the logarithmic concentration diagram for a magnesium concentration of $1.5 \cdot 10^{-3}$ M. These conditions lead to the formation of positively charged edges and as verified from the zeta potential values, the potential becomes about 7–10 mV more positive around these pH values due to the adsorption of MgOH^+ on clay edges. The potential does not reverse in sign completely similar to findings of Fuerstenau (1975) for quartz, since the high surface area of negatively charged basal surfaces mask the positive potential. After treatment with %1.45 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 30% and 34% improvements in gelling and swelling properties were obtained, respectively and the mechanism of the improvement of the gelling and swelling properties can be explained by Equation 1.



When the amount of the MOH^+ specie is at its maximum value, the interaction with the edge surface of the clay platelet dominate to form a positively charged clay surface which favours the particle interactions and increases the gelling coefficient value of the clay.

The physico-chemical and mineralogical characteristics of the Reşadiye sample, currently used as a drilling mud additive, due to its high Na content and very low tetrahedral charge, seems suitable for direct treatment with quaternary ammonium cations to produce organoclays that are used for wastewater remediation (Jaynes and Boyd, 1991). Ordu sample, already being used for bleaching purposes, can further be processed by ion exchange methods to produce aluminum, iron, vanadium, titanium, niobium, tantalum, or zirconium type pillared clays suitable for molecular sorption and catalysis (Christiano et al., 1985; Tennakoon et al., 1986) or for

adsorption of organic contaminants (Wu et al., 2001) such as benzene, toluene, xylene, or phenol from polluted waters.

REFERENCES

- ASTM, 1992. Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay. The American Society for Testing Materials, C 837–81, 267–268.
- Bain, D.C., and Smith, B.F.L., 1994. Chemical Analysis. In: Clay Mineralogy–Spectroscopic and Chemical Determinative Methods. M.J. Wilson (ed.), Chapman & Hall, New York, 300–332.
- Benna, M., Kbir–Ariguib, N., Magnin, A. and Bergaya, F., 1999. Effect of pH on rheological properties of purified sodium bentonite suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 218, 442–455.
- Bishop, J.L., Pieters, C.M., and Edwards, J.O., 1994. Infrared spectroscopic analyses on the nature of water in montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 42(6), 702–716.
- Borchardt, G., 1989. Smectites. In *Minerals in Soil Environments*. J.B. Dixon and S.B. Weed (eds.), SSSA Book Series, Madison, 675–727.
- Chen, J.S., Cushman, J.H., and Low, P.F., 1990. Rheological behavior of Na–montmorillonite suspensions at low electrolyte concentration. *Clays and Clay Minerals*, 38(1), 57–62.
- Christiano, S.P., Wang, J., and Pinnavaia, T.J., 1985. Intercalation of niobium and tantalum $\text{M}_6\text{Cl}_{12}^{n+}$ cluster cations in montmorillonite: A new route to pillared clays. *Inorganic Chemistry*, 24, 1222–1227.
- Çelik, M., Karakaya, N., and Temel, A., 1999. Clay minerals in hydrothermally altered volcanic rocks, eastern pondites, Turkey. *Clays and Clay Minerals*, 47(6), 708–717.
- Çoban, F., and Ece, Ö.I., 1999. Fe^{3+} –rich montmorillonite–beidellite series in Ayvacık bentonite deposit, Biga Peninsula, Northwest Turkey. *Clays and Clay Minerals*, 47(2), 165–173.
- Durán, J.D.G., Ramos–Tejada, M.M., Arroyo, F.J., and González–Caballero, F., 2000. Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite suspensions: I. rheological properties and interparticle energy of interaction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 229, 107–117.
- Fuerstenau, M.C., 1975. Role of metal ion hydrolysis in oxide and silicate flotation systems. In: *AIChE Symposium Series*, P. Somasunda-

- ran and R.B. Gries (eds.), 71(150), 16–22.
- Greene–Kelly, R., 1957. The montmorillonite minerals (smectites). In: *The Differential Thermal Investigation of Clays*. R.C. MacKenzie (ed.), Mineralogical Society, London, 140–164.
- Grim, R.E., 1968. *Clay Mineralogy*, McGraw–Hill, New York, 596 pp.
- Gümüşer, G., ve Yalçın, H., 1998. Kelkit vadisi kuze-yindeki (Reşadiye–Yazıcık–Bereketli/Tokat) bentonit yataklarının mineralojik ve je-okimyasal incelenmesi. *Yerbilimleri*, 20, 91–110.
- Güven, N., 1992. Molecular aspects of clay–water interactions. In: *Clay–Water Interface and its Rheological Implications*. N. Güven and R.M. Pollastro (eds.), The Clay Minerals Society, Colorado, 2–79.
- Heath, D., and Tadros, Th.F., 1983. Influence of pH, electrolyte, and poly (vinyl alcohol) addition on the rheological characteristics of aqueous dispersions of sodium montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 93(2), 307–319.
- Hetzl, F., and Doner, H.E., 1993. Some colloidal properties of beidellite: Comparison with low and high charge montmorillonites. *Clays and Clay Minerals*, 41(4), 453–460.
- Huang, C.K., and Kerr, P.F., 1960. Infrared study of the carbonate minerals. *American Mineralogist*, 45, 311–324.
- Jackson, M.L., 1964. Soil clay mineralogical analysis. In: *Soil Clay Mineralogy–A Symposium*. C.I. Rich and G.W. Kunze (eds.), The University of North Carolina Press, 245–294.
- Jaynes, W.F., and Boyd, S.A., 1991. Clay mineral type and organic compound sorption by hexadecyltrimethylammonium–exchanged clays. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 318–323.
- Kloprogge, J.T., Komarneni, S., Yanagisawa, K., Fry, R., and Frost, R.L., 1999. Infrared emission spectroscopic study of the dehydroxylation via surface silanol groups of synthetic and natural beidellite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 212, 562–569.
- Köster, H.M., Ehrlicher, U., Gilg, H.A., Jordan, R., Murad, E., and Onnich, K., 1999. Mineralogical and chemical characteristics of five nontronites and Fe–rich smectites. *Clay Minerals*, 34, 579–599.
- Lim, C.H., and Jackson, M.L., 1986. Expandable phyllosilicate reactions with lithium on heating. *Clays and Clay Minerals*, 34(3), 346–352.
- Luckham, P.F., and Rossi, S., 1999. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82, 43–92.
- MacKenzie, R.C., 1970. Simple phyllosilicates based on gibbsite– and brucite–like sheets. In: *Differential Thermal Analysis*. R.C. MacKenzie (ed.), Academic Press, New York, 497–537.
- Moore, D.M., and Reynolds, R.C. Jr., 1989. *X–Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press, New York, 179–309.
- Murray, H.H., 1999. Applied clay mineralogy–Today and tomorrow. *Clay Minerals*, 34, 39–49.
- Obut, A., 2001. Küçükhacıbey–Eldivan–Çankırı bentonitinin anorganik katkı maddeleri kullanılarak jelleşme özelliğinin iyileştirilmesi. Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 73 s. (yayımlanmamış).
- Oster, J.D., Shainberg, I., and Wood, J.D., 1980. Flocculation value and gel structure of sodium/calcium montmorillonite and illite suspensions. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 955–959.
- Özkan, A.I., and Ross, G.J., 1979. Ferruginous beidellites in Turkish soils. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 1242–1248.
- Russell, J.D., and Clark, D.R., 1978. The effect of Fe–for–Si substitution on the b–dimension of nontronite. *Clay Minerals*, 13, 133–137.
- Smykatz–Kloss, W., 1974. *Differential Thermal Analysis–Application and Results in Mineralogy*. Springer–Verlag, 185 pp.
- Tennakoon, D.T.B., Jones, W., and Thomas, J.M., 1986. Structural aspects of metal–oxide–pillared sheet silicates. *Journal of Chemical Society Faraday Transactions–1*, 82, 3081–3095.
- TS 5360, 1996. Döküm Bentoniti. Türk Standartları Enstitüsü, 17 s.
- Türkmenoğlu, A., and Aker, S., 1990. Origin of sedimentary bentonite deposits of Çankırı basin, Turkey. *Sciences Géologiques*, 86, 63–72.
- van Olphen, H., 1963. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. Interscience Publication, New York, 301 pp.
- Wu, P.X., Liao, Z.W., Zhang, H.F., and Guo, J.G., 2001. Adsorption of phenol on inorganic–organic pillared montmorillonite in polluted water. *Environment International*, 26, 401–407.



Kirazlı (Yahyalı, G Kayseri) Pliyo-Kuvaterner kolüvyonlarının fasiyesleri ve iklimsel yorumu

Facies and climatic interpretation of the Plio-Quaternary Kirazlı (Yahyalı, G Kayseri) colluvium

Faruk OCAKOĞLU

Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 26480 Batı Meşelik, ESKİŞEHİR

ÖZ

Bu çalışmada, Yahyalı (Kayseri güneyi) yakın güneyinde, yaşı önceki jeomorfolojik bulgulara dayanılarak Geç Pliyosen olarak tahmin edilen birincil kolüvyal çökeller ve bunların olasılıkla Pleyistosen'de yeniden taşınıp depolanmasıyla oluşmuş sedimanlar incelenmiştir. Saptanan sedimanter fasiyeslerde egemen kütle taşınma süreçleri ve kolüvyonlarda temel belirleyici olan iklim arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Birincil kolüvyonlarda saptanan fasiyesler; baskın kütle taşınma süreçlerinin kaya düşmesi ile daha az olarak moloz akmaları olduğunu, yüzeysel bozunma şiddetinin farklı tane boyundaki kaya düşmesi fasiyeslerinde saptanabilir farklılıklar sergilediğini göstermektedir. Genel olarak sıcak ve kısmen nemli bir iklimde gelişen birincil kolüvyonlar, daha sonra heyelanlar ve moloz akmaları nedeniyle daha düşük kotlara taşınmışlardır. Olasılıkla Pleyistosen'deki bol yağışlı dönemde ortaya çıkan bu kütle hareketleri Holosen'deki yarı kurak iklim nedeniyle sonlanmış olup, bu son dönemde egemen iklimin yansıması olarak kalıçiler gelişmiştir.

Anahtar kelimeler: İklim, kolüvyon, Pliyo-Kuvaterner, sedimanter fasiyes, Yahyalı.

ABSTRACT

In this study, the colluvial deposits of probable Late Pliocene age according to the previous geomorphologic evaluations, and their re-sedimented parts due to mass movements in Pleistocene near south of Yahyalı (south of Kayseri) were studied. A relationship between the described facies, and the dominant mass transport processes, and the climate as a fundamental factor in development of colluvium was established. The facies described in the primary colluvium show that the prevalent mass transport mechanisms are rock falls and to a lesser degree debris flows. The intensity of surficial weathering varies considerably according to the grain size of the rock fall facies. The primary colluvium was probably deposited generally under hot and relatively wet climate, and later remobilized due to landslides and debris flows. These mass movements probably occurred in Pleistocene under quite rainy conditions, halted in Holocene due to semi-arid climatic conditions and consequently caliche occurrences developed.

Key words: Climate, colluvium, Plio-Quaternary, Sedimentary facies, Yahyalı.

GİRİŞ

Bozunma ve aşınma sonucu yaşlı kayalardan türeyen değişik boyutta parçaların sedimanter havzalara doğru hareketleri, taşınma süresi ve süreçleri açısından oldukça farklılıklar sunar. Havzanın boyutuna ve drenaj alanının büyüklü-

ğüne bağlı olarak taşınma uzaklığı binlerce kilometreyi bulabileceği gibi (örneğin, Kuzey Hint Denizi'ndeki Bengal Havzası), bazı dağarası havzaların kenarlarında konumlanmış alüvyial yelpazelerde bu mesafe kilometreler mertebesine iner. Sarp yamaçlarda, büyük bir kısmı sarplığa dayanmış birbirine girik koni biçimli birikim

alanlarında ise bu uzaklık, çoğunlukla onlarca veya yüzlerce metrelerle ölçülür. Bu sonuncu depolanma alanı, yamaç molozu (veya kolüvyon) olarak bilinir ve yamaç eğimlerinin azalmasına yolaçan kütle hareketlerinin (bir dizi çığlanmanın) ürünü olarak kabul edilir (Blikra ve Nemec, 1993). Kolüvyonlar sarplıkların yamaçlarına kurulmuş dinlenme tesisleriyle yerleşim alanları üzerinde afetlere yol açabildiklerinden oldukça ilgi çekmişlerdir (Selby, 1994; Nemec ve Kazancı, 1999). Bazı sarplıkların aktif faylara bağlı olarak oluşması nedeniyle, bu tür alanlarda gelişmiş kolüvyonların tektonik etkinliğin tipik bir göstergesi olduğuna inanılmaktadır (Nelson, 1992; Amit vd., 1995). Bu gerekçelerin yanı sıra, kolüvyal süreçlerin iklimsel değişikliklere karşı diğer pek çok çökme ortamından daha duyarlı olması (Blikra ve Nemec, 1993; Blikra ve Nesje, 1997; Nemec ve Kazancı, 1999), kolüvyal sedimanların çökme süreçleri açısından yorumunu giderek ilgi çekici hale getirmektedir.

Kolüvyonlar, tipik olarak dağ yamaçları ile onların tabanlarında çökelmiş, oldukça sınırlı drenaj alanına sahip sedimanter kütlelerdir. Başlıca malzemesi olgun olmayan çakıllar olup, ve oluşumlarından; kaya düşmesi, moloz akışı, kar akışı ve daha az olarak su ve akarsu akışları sorumludur (Nemec ve Kazancı, 1999). İklimsel değişimlere karşı duyarlılıkları, kolüvyal süreçlerin iklimle doğrudan ilişkili olmasından kaynaklanır. Örneğin, soğuk ve yağışlı bir iklimde kar akışlarının, sıcak ve yağışlı bir iklimde kanallı/taşkın akışlarıyla moloz akışlarının, ve karasal bir iklimde ise, kaya düşmeleri ile moloz/tane akışlarının baskınlığı sözkonusu olacaktır (Blikra ve Nemec, 1993). Pliyosen ve Kuvaterner dönemlerine ait pek çok kolüvyon üzerinde gerçekleştirilen sedimantolojik çalışmalar, sedimanter süreçlerin karşılık geldiği genel iklimsel özelliklerin, başka veri takımlarından elde edilen iklimsel bulgularla büyük ölçüde uyum içinde olduğunu göstermektedir (Blikra ve Nemec, 1993; Blikra ve Nesje, 1997; Nemec ve Kazancı, 1999).

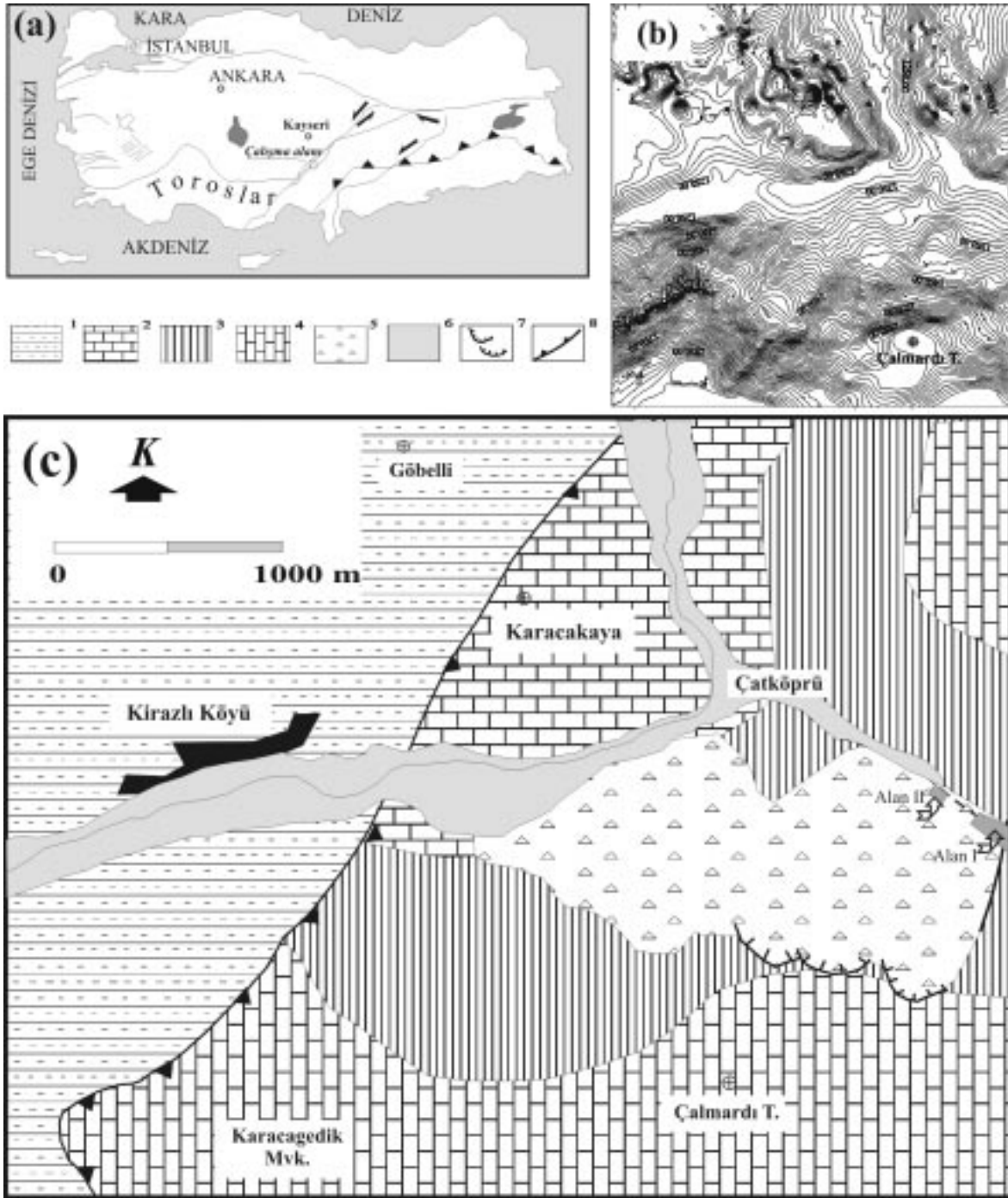
Türkiye yerbilimleri literatüründe kolüvyonlara ilişkin çalışma yok denecek kadar azdır. Kolüvyonlarla ilgili yegane örnek çalışma, Nemec ve Kazancı (1999) tarafından Eğirdir kolüvyonları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, kolüvyal pakette gözledikleri sedimanter fasiyeslerin paleoiklimsel anlamını tartışmışlar ve bulgularını diğer bağımsız verilerle iyi ölçüde denestir-

rebilmişlerdir. Bu çalışmada da, oldukça benzer bir yöntem izlenerek, Yahyalı'nın (güney Kayseri) yakın güneyinde bir heyelan bloğu üzerinde iyi korunmuş bir kolüvyal istif ve bunun kütle süreçleri ile yeniden biçimlendirilmiş ürünleri üzerinde sedimantolojik gözlemler yapılmıştır (Şekil 1). Belirlenen sedimanter fasiyesler literatürdekilerle karşılaştırılmış ve bunların işaret ettiği sedimanter süreçlerle paleoiklimsel koşullar arasındaki ilişkiler tartışılmıştır.

YAHYALI KOLÜVYONLARININ KONUMU VE SAHA ÖZELLİKLERİ

Bu çalışma kapsamında incelenen kolüvyonlar Pliyo-Kuvaterner yaşlı (Ercan vd. 1994) Erciyes stratovolkanının güneyindeki Yahyalı ilçe merkezinin 2 km kadar GGB'sında yer alır (bknz. Şekil 1a, 1c). Civar bölgenin en belirgin morfo-tektonik özelliği Ecemiş Fay Zonu'nun oluşturduğu Yeşilhisar-Sultansazlığı Ovası'dır. Bu çöküntü alanı, batıda Yeşilhisar ve güneyde Yahyalı civarındaki iki büyük alüvyal yelpazenin yanı sıra, kendisini çevreleyen dört bir yandan çok sayıda küçük yelpazelerle dolmayı halen sürdürmektedir. Erol (2001), Yahyalı civarındaki Toros Dağları'nda 1300-1200 m yükseltiyeye sahip alçak plato yüzeylerini tanımlamış, bunların Geç Pliyosen'deki bölgesel aşınmaya karşılık geldiğini belirtmiştir. İncelenen kolüvyonlar bugün 1450 ile 1250 m kotları arasında yer almakta ve Erol (2001)'un Üst Pliyosen alçak plato yüzeyleri ile kökensel olarak ilişkili gözükmektedir. Ayrıca, Yahyalı kolüvyonlarının kırmızı rengi, Nemec ve Kazancı (1999) tarafından tartışıldığı üzere, Akdeniz bölgesinin sıcak ve kuru-nemli mevsimsel aralanma gösteren bir iklimsel döneminin ürünüdür ve bu renk tuf seviyeleri sayesinde iyi yaşlandırılmış Geç Pliyosen Eğirdir kolüvyonlarının rengine oldukça benzemektedir.

Yahyalı kolüvyonları, güneyde Çalmardı Tepe ve Karacagedik'in oluşturduğu kabaca D-B doğrultulu sarp sırtın kuzey yamacında korunmuş 2 km²'den biraz az yüzey alanına sahip bir sediman birikimidir (bknz. Şekil 1b, 1c). Kolüvyonların kaynaklandığı ve üzerlediği temel kayaçların tamamı Paleozoyik yaşlı koyu gri/siyahımsı, orta-kalın tabakalı kireçtaşından oluşur (bknz. Şekil 1c). Bu kayaçlar yer yer erime bolukları içermekte olup, üzerlerinde çok kalın olmayan, otsu bitkilerle meşe türünden cılız odunsu bitkileri barındıran ince bir toprak zonu gelişmiştir. Kolüv-



Şekil 1. (a)Yahyalı kolüvyonlarının konumu, (b) kolüvyonların yakın civarının topoğrafik haritası ve (c) alanın basitleştirilmiş jeoloji haritası (1:şeyl, 2:tabakalı kireçtaşı, 3:masif kireçtaşı, 4:ince tabakalı kireçtaşı, 5:kolüvyonlar, 6:alüvyon, 7:heyelan taşları, 8:bindirme).

Figure 1. (a)Location of the Yahyalı colluvium, (b) topographic map of the colluvium nearby area and (c) geology of the nearby area (1:shale, 2:bedded limestone, 3:massive limestone, 4:thin bedded limestone, 5:colluvium, 6:alluvium, 7:crowns of landslide, 8:thrust).

yon yüzeyi ise, boyutları onlarca metreden yüzlerce metreye değişen çukurlar ve tümseklerden

oluşan eski bir heyelan morfolojisine sahiptir. Yüzey; dağınık halde, boyu yer yer 3 m'yi bulan

ağaçlarla ve bunların altındaki çalı ve otlarla kaplıdır. Eğimin az olduğu bazı kesimlerde tahıl tarımı yapılmaktadır.

Kolüvyonlar, Çalmardı Tepe'ye doğru en çok 1450 m kotuna kadar ulaşabilmekte ve bu kesimde çok belirgin, kavisli eski heyelan taçları ile temel kireçtaşlarından ayrılmaktadırlar. Daha üst kotlarda, Çalmardı Tepe'nin güneydoğusunda kireçtaşları içine oyulmuş, kolüvyonların alt kotlarına doğru giderek silikleşen bir vadi sistemi de dikkat çekicidir (bknz. Şekil 1b).

Yahyalı kolüvyonları, kuzeyde Çatköprü civarında birbirine kavuşan iki dere yatağı ve Çatköprü'nün hemen güneyinde bir temel kireçtaşı sırtı tarafından sınırlandırılmıştır. Burada temel kireçtaşı 1310 m kotuna kadar yükselmekte ve bu seviye olasılıkla kolüvyon kütlelerinin heyelanlarından önceki taban kotuna karşılık gelmektedir. Dere yatakları, özellikle batıdaki Kirazlı dere, kolüvyon kütlelerini de aşındırarak Paleozoyik kireçtaşı içine 20 m kadar gömülmüş haldedir.

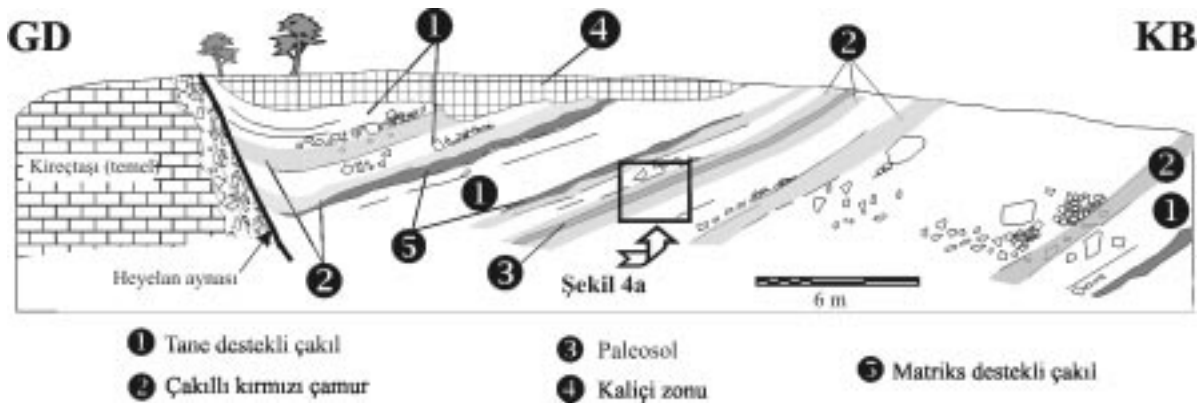
Kolüvyonlar üzerindeki sedimanter fasiyes çalışmaları alanın doğusundaki isimsiz dere yatağı boyunca 500 m uzanan yol yarmasında gerçekleştirilmiştir (bknz. Şekil 1c). Yapılan incelemelerle içsel deformasyon göstermeyen bir heyelan bloğunda kolüvyonların ilksel çökelme süreçleri ortaya çıkarılmış, heyelanların topuk bölgesi civarına karşılık gelen bir başka alanda kolüvyon kütlelerinin heyelanlarla yeniden işlenmesi sonucunda ortaya çıkan fasiyesler yorumlanmıştır.

KOLÜVYAL FASİYESLER

Yahyalı kolüvyonlarının oluşumu sırasında ve oluşumlarından sonra maruz kaldıkları kütle yenilmesi süreçlerini incelemek üzere çalışmalar sırasıyla I ve II numaralı alanlarda yoğunlaştırılmıştır (bknz. Şekil 1c). İlk alanda bir heyelan bloğu içinde iç yapısı hiç bozulmamış 20 m kalınlığında bir kolüvyon istif bulunmuştur (Şekil 2). Bu istif kolüvyonun oluşumu sırasındaki egemen kütle taşınma süreçlerinin kaydını içermektedir. İkinci alanda ise, kolüvyonların oluşumlarından sonra, olasılıkla farklı bir iklim rejiminde gerçekleşen kolüvyon kütlelerinin yenilme koşullarının izleri araştırılmıştır.

Birincil Kolüvyal Fasiyesler

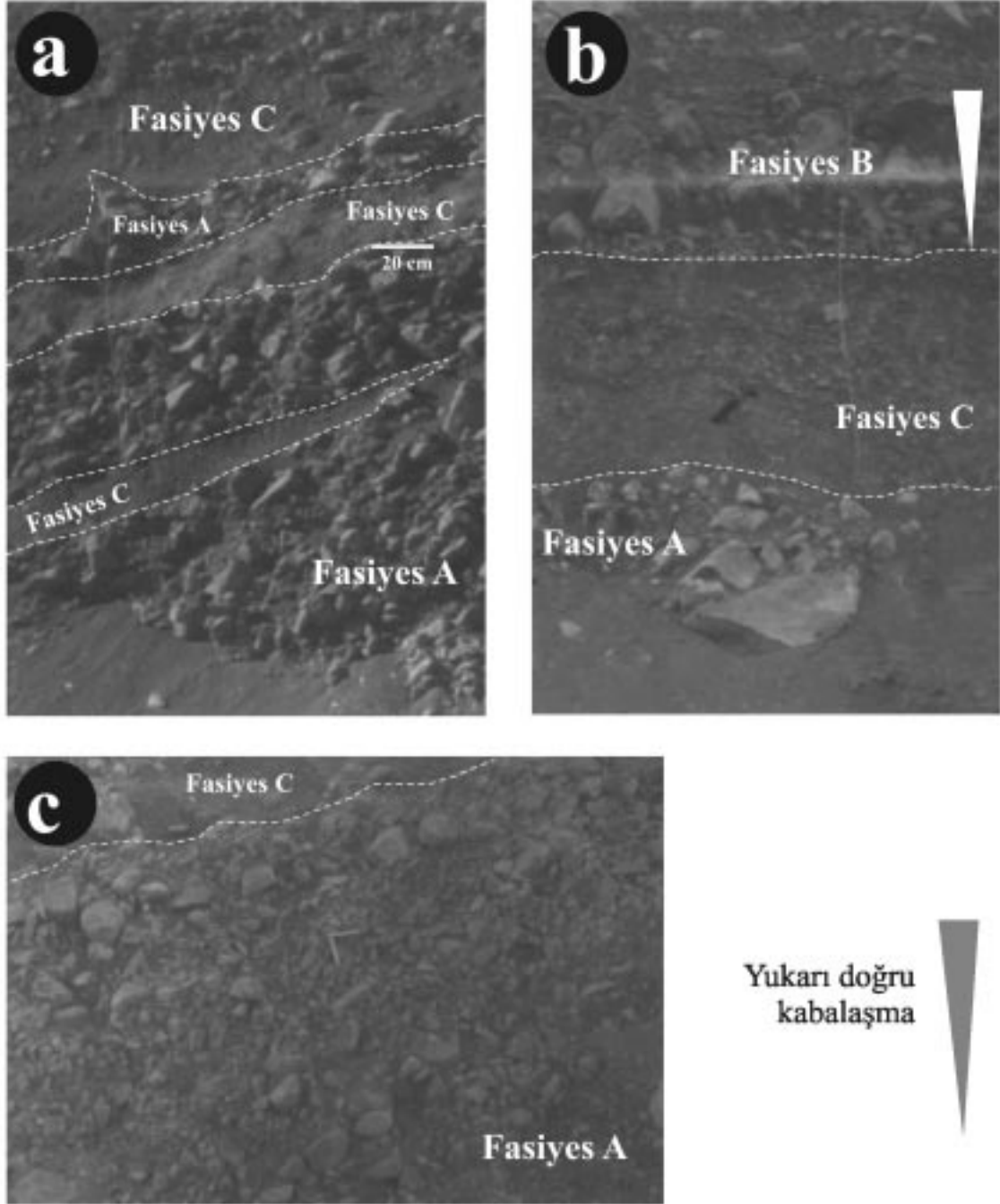
Tanım: Yol yarması boyunca ortaya çıkan ve kendi içinde hiç bir deformasyon izi taşımayan bir heyelan bloğu içinde incelenmişlerdir. Kütle, orta-kalın tabakalı koyu gri kireçtaşlarından belirgin bir makaslama düzlemi ile ayrılmıştır (Şekil 2). Makaslama düzlemi boyunca bir karbonat birikimi gelişirken, blok dizilimleriyle belirginleşen kolüvyon tabakalanma düzlemlerinin hafifçe kıvrımlandığı ve genel olarak kayma düzlemine doğru eğim kazandığı gözlenmektedir. Makaslama yüzeyi ile temel kireçtaşları arasında iri ve köşeli bloklardan oluşan, yer yer karbonat bağlayıcı ile tutturulmuş bir yığılım yer alır. Kolüvyon kütleleri yatay konumlu, beyaz, 1.5-2 m kalınlığında toprağımsı bir kaliçi seviyesi tarafından üzerlenir. Bu seviye, az eğimli güncel topoğrafyaya az çok paraleldir (bknz. Şekil 2).



Şekil 2. İncelenen birincil kolüvyal istif (lokasyonu için Şekil 1c'ye bakınız).
Figure 2. Investigated primary colluvial succession (see figure 1 for the location).

Ana kolüvyon kütlesi genel olarak blok boyu çakıllardan ibaret, kiremit kırmızısı renkte bir yığılıştır. Yapılan gözlemler kolüvyon istifi içinde birbirleriyle geçişli dokanağa sahip üç fasiyesin varlığını ortaya koymuştur.

Fasiyes A (Tane destekli çakıllar): Bu fasiyes, büyük oranda tane destekli köşeli kireçtaşı bloklarından ibarettir (Şekil 3a-c) ve toplam kolüvyonun %90 kadarını oluşturur. Kalınlığı 0.5-6 m arasında değişir. Alt ve üst dokanakları aşağıda



Şekil 3. Birincil kolüvyal fasiyeslerden bazı örnekler: (a) Fasiyes A ve Fasiyes C ardalanmasının uzaktan görünüşü, (b) Fasiyes B içinde ters derecelenme ve (c) Fasiyes A'nın yakından görünüşü.

Figure 3. Some examples of primary colluvial facies: (a) distant view of the alternation of Facies A and B, (b) reverse grading in Facies B and (c) close-up view of the facies A.

özetlenen Fasiyes C ile geçişlidir ve bu nedenle ince olanlara uzaktan bakıldığında belirgin bir tabakalanma izlenir. Kalın olanlarda iç yapı gözlenmez. Genel eğilim olarak, yassı bloklar tabakalanma düzlemine paralel durmakla birlikte, rastgele duran blokların sayısı da az değildir. Çakılların sistematik binikliği (imbrikasyon) gözlenmez. Bileşen çapları çoğunlukla 5-10 cm'den büyük olup yer yer 100 cm'ye ulaşabilmektedir. Taneler arası çoğunlukla kiremit kırmızısı renkli, kum, silt ve kil karışımından ibaret bir malzeme ile doldurulmuştur (Şekil 3c). Bazı kesimlerde taneler arası boştur. Fasiyes C'den A'ya geçiş; kumlu çamur bağlayıcı içinde iri blokların az çok bir seviye boyunca görülmesiyle başlar, yukarı doğru tane oranı giderek artar ve bileşenlerin boyutlarında belirgin bir azalma gözlenir (Şekil 3b). Fasiyes C, Fasiyes A 'daki iri blokların oluşturduğu engebeli topoğrafyayı doldurur.

Fasiyes B (Matriks destekli çakıllar): Bu fasiyes, birincil kolüvyonların hacimsel olarak % 20 kadarını oluşturur. Tabaka kalınlıkları 1 m'den azdır. Fasiyes C üzerine geldiğinde önce görece küçük blokların bir seviye boyunca dizildiği gözlenir. Bu kesimlerde bileşenler çoğunlukla 3-5 cm çapındadır ve matriks desteği tipiktir. Yassı bileşenler genellikle tabakalanma düzlemine paralel olma eğilimindedir. Üste doğru tanelerin miktarı ve çapı artarak, yer yer tane desteği gözlenebilir. Böylece belirgin bir ters derecelenme ortaya çıkar (bkz. Şekil 3b). Bazı durumlarda görece iri bloklardan oluşan fasiyes B az çok keskin bir şekilde fasiyes C'ye ait çakıllı çamurlar tarafından üzerlenmekte ve yanal yönde mercçeklenmeler sunarak 3-4 m içinde sonlanmaktadır.

Fasiyes C (Çakıllı çamurlar): Bu fasiyes, kiremit kırmızısından kirli sarıya kadar değişen renklerde, hemen hiç bir iç yapı göstermeyen çamurdan oluşur. Önemli oranda kum ve az sayıda, çapları çoğunlukla 3-5 cm'yi geçmeyen çakılları homojen bir karışım şeklinde içerir (bkz. Şekil 3a, b). Fasiyesin kalınlığı çoğunlukla 1.5 m'yi geçmez. Gözlemlerin gerçekleştirildiği 15-20 m uzunluğunda yol yarması boyunca yanal devamlılık mevcuttur. Bazı örneklerde fasiyes A ile sarmalanarak kamalandığı gözlenir (bkz. Şekil 3a). Fasiyes B, ender olarak ve bazı örneklerde renginin giderek açılmasına koşut olarak, Fasiyes C'ye geçiş gösterir.

Fasiyes D (Paleosol): Bu fasiyes, kirli beyaz renkte, yol yarması boyunca 5-6 m yanal devam-

lılığa sahip, gevşek, toprağımsı bir çamurdur. Kalınlığı 15 cm kadar olup, yer yer çakılları içerebilmektedir. Altta ve üstte dereceli olarak kırmızısı renklerdeki Fasiyes B'ye geçiş gösterir.

Yorum: Fasiyes A, B, C ve D düşey yönde birbirleri ile geçişli olmaları nedeniyle, kökensel bir ilişkiye sahip gözükümlerdir. Fasiyes A'da iri ve yassı bileşenlerin hep köşeli ve tabakalanma düzlemine çoğunlukla paralel olması, boylanmanın olmaması, taneler arasının kırmızı çamurla dolu olması, ya da tamamen boş bulunması karakteristik özellikler olup, bunlar bir bütün olarak kaya düşmelerine işaret etmektedir (Blikra ve Nemec, 1993). Bu görüş, fasiyes A içinde akışkan akışına işaret edecek hiç bir keskin dokanak ve tane yönlenmesinin bulunmamasıyla daha da güçlenmektedir. Fasiyes B'de matriks desteği ve çoğu örnekte gözlenen ters derecelenme moloz akmalarına işaret etmektedir (Hampton, 1979; Naylor, 1980; Nemec ve Kazancı, 1999).

Fasiyes A'nin incelenen bütün örneklerde jeolojik anlamda ani, ancak keskin olmayan bir dokanakla Fasiyes C'ye geçiş göstermesi, bu arada Fasiyes C içinde hala küçük boyutlu çakılların bulunması Fasiyes C'nin, Fasiyes A'nin daha yamaç yukarı kesimlerinde (kaya düşmelerinin kuyruk kesimlerinde) olduğu şeklinde yorumlanabilir (Nemec ve Kazancı, 1999). Yamaç yukarı bölgelerde fiziksel ve kimyasal bozunma ile oluşan küçük tane boyundaki malzemeler, yuvarlanma sırasındaki düşük kütle momentleri nedeniyle Fasiyes A'ya göre daha yamaç yukarı alanlarda çökelme eğilimindedirler (Blikra ve Nemec, 1993). Fasiyes D ise, sedimantasyon hızının görece düşük olduğu bu yamaç yukarı alanlarda kireçtaşından oluşan kaynak bölgeyi akaçlayan kalsiyum ve bikarbonatça zengin suların yarı-kurak iklimsel dönemlerde oluşturduğu kalsitçe zengin toprağa karşılık gelmektedir.

Bu yorum, Yahyalı kolüvyonlarının birincil oluşumlarında, bozunma ve toprak oluşumuyla birlikte kaya düşmeleri ve moloz akmalarının birincil öneme sahip olduğuna işaret etmektedir. Bu değerlendirme, doğal olarak, iri blok birikiminin hızlı gerçekleştiği ve daha sonra taneler arasının yukarıdan taşınan ince taneli fraksiyonun süzülmesiyle doldurulduğu Fasiyes A'dan, sedimantasyonun görece yavaş, dolayısıyla kimyasal bozunmanın daha belirgin olduğu Fasiyes C'ye ve oradan, büyük ölçüde kimyasal toprak

oluşum süreçlerinin egemen olduğu Fasiyes D'ye kadar farklı sığ bozunma derecelerinin varlığını gerektirmektedir. Bunu test edebilmek üzere farklı fasiyeslerin ince tane boyulu fraksiyonlarından 6 adet örnek alınmış (Şekil 4a) ve X-ışınları kırınım analizine tabi tutulmuş olup, sonuçlar Şekil 4b ve c'de verilmiştir.

Analizlerden elde edilen bazı kayaç yapıcı minerallerin bağıl bollukları her üç fasiyeste bir eşik kalsit bolluğunun varlığını göstermekte (olasılıkla kum tane boyutundaki kireçtaşı parçalarının varlığından dolayı), Fasiyes C'de ve özellikle Fasiyes D'de kalsit oranının arttığını kanıtlamaktadır. Bu belirleme Fasiyes D'nin kalıç olarak yorumlanmasını doğrulamaktadır (bknz. Şekil 4b). Örneklerin kil fraksiyonlarının analizi ise, smektit oranının fasiyes C'de (Fasiyes A'ya oranla) azaldığını, Fasiyes D'de ise tamamen ortadan kalktığını göstermektedir (Şekil 4c). Buna karşın kaolinit bolluğu Fasiyes A'dan C'ye belirgin bir artış sunmakta, illit oranı ise her üç fasiyeste de az çok sabit kalmaktadır.

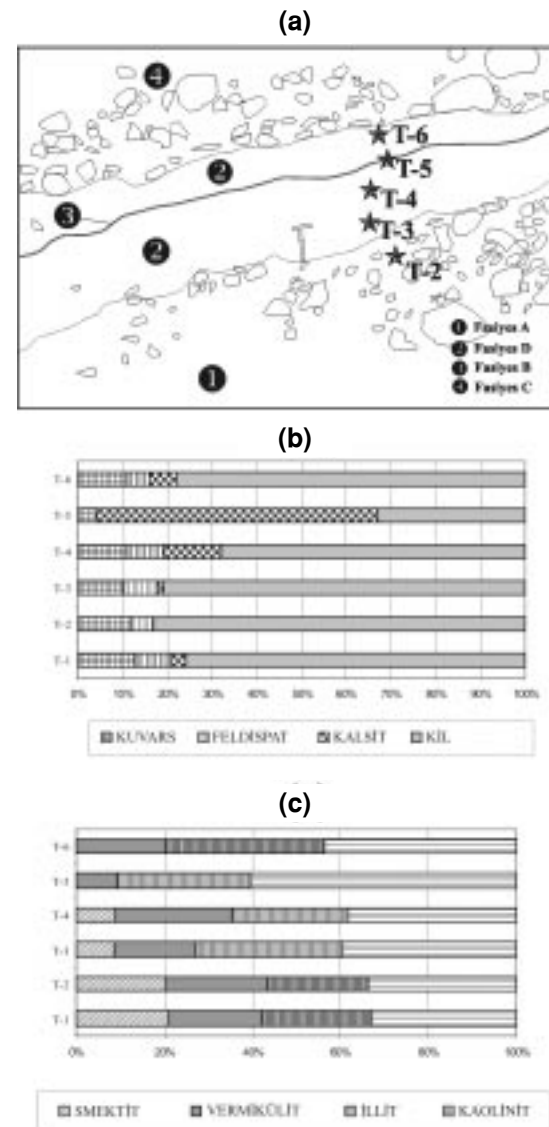
Yukarıda değinilen sonuçlara göre, oluşumları sırasında kaya düşmeleri ve moloz akmalarının egemen olduğu Yahyalı kolüvyonlarında yüzeysel bozunma şiddeti, kolüvyon yüzeyi boyunca fasiyeslerin dağılımının ve bunlara neden olan süreçlerin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Ortalama tane boyu daha küçük olan fasiyeslere geçildikçe (Fasiyes A'dan C'ye) kil bolluğunun artması, genel olarak kimyasal bozunmanın şiddetinin de arttığı şeklinde yorumlanabilir. Bu durum, ortamdaki suyun bolluğu ve sıcaklık artışı ile ilişkilendirilebilir. Kil fraksiyonunda smektitin azalması/kaybolması; buna karşın kaolinit oranının artması bu stratigrafik seviyelerdeki yoğun kimyasal bozunmayla ilgilidir (Chamley, 1989). Ancak kil fraksiyonunda hala illitin varlığı, yüzeysel bozunmanın belli bir eşik şiddeti aşmadığını göstermektedir. Kalıç seviyesinin varlığı ise, mevsimsel farklılıkların belirgin olduğu dönemsel yarı-kurak koşulların göstergesidir (Chamley, 1989).

Yeniden Aktarılmış Kolüvyonlar

Şekil 1'de II numaralı alandaki yol yarması boyunca bu kolüvyonlara rastlanmıştır. Bunlar çok iri blokları içermeleri nedeniyle, Fasiyes A'ya benzemekle birlikte, alt ve üst dokanaklarının onlarca metre ölçeğinde bazen sarp yamaçlı kavisler göstermesi nedeniyle Fasiyes A'dan ayrı-

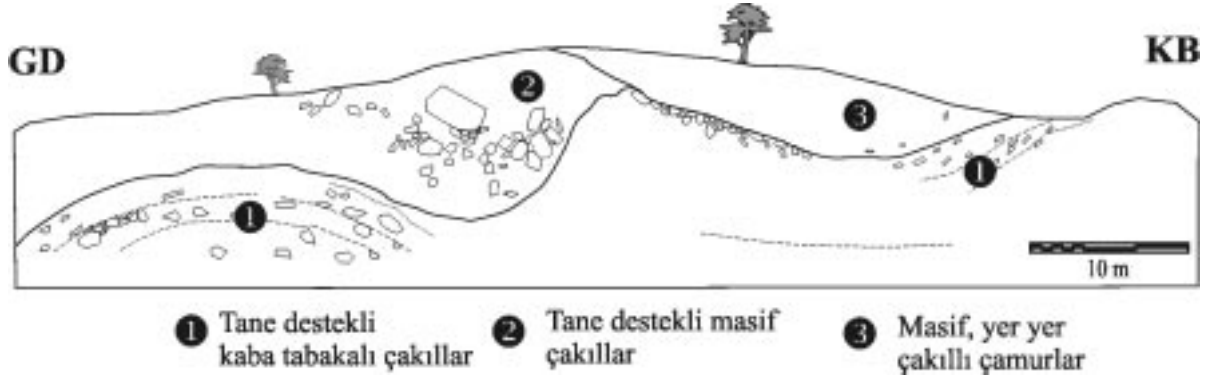
lırlar (Şekil 5). Bu kolüvyonların üst yüzeyleri aynı zamanda bugünkü topoğrafyadaki çukurluk ve tümsekleri de denetlemektedir.

Tanım: Aktarılmış kolüvyonlarda üç farklı fasiyes tanımlanmış olup, bunların başlıca özelliklerine aşağıda değinilmiştir.



Şekil 4. Birincil kolüvyal istifin farklı fasiyeslerinde bazı ana minerallerle kil minerallerinin dağılımı: (a) örneklerin yeri, (b) ana mineral gruplarının dağılımı ve (c) kil minerallerinin dağılımı.

Figure 4. Distribution of the major and clay minerals in various facies of primary colluvium: (a) position of samples, (b) distribution of major minerals and (c) distribution of clay minerals.



Şekil 5. Yeniden aktarılmış kolüvyonlarda keskin içbükey ve dışbükey üst yüzeyler.
Figure 5. Sharp concave and convex bounding surfaces in the re-sedimented colluvium.

Fasiyes E: Oldukça düzenli kavisli üst yüzeylere sahip matriks destekli çakıllardan oluşur. Blok oranı genellikle yüksektir; bazı kesimlerde tane destekli bir görünüm sunarlar. Fasiyes içinde kavisli üst yüzeye paralel belli belirsiz bir tabakalanma mevcuttur (bkz. Şekil 5). Blok uzun eksenleri bu kaba tabakalanma yüzeylerine az çok paralel olma eğilimindedir. Fasiyes üzerindeki kavislerin dalga boyları 25-30 m kadar olup, huni şekilli bu morfolojik öğelerin uzanımları genel olarak yamaç yukarıdan yamaç aşağıya doğrudur.

Fasiyes F: Tamamen tane destekli ve yer yer 4 m çapında köşeli blokları, kaotik bir şekilde içerebilmektedir. Fasiyesin alt dokanağı, Fasiyes E'nin üst dokanakları tarafından belirlenir ve herhangi bir kazınma veya aşındırma olmaksızın onu bir örtü şeklinde örter. Bazı kesimlerde çakılların alt dokanağa paralel belli belirsiz bir diziliminden sözedilebilir.

Fasiyes G: Fasiyes E ve F'nin üst yüzeylerini oluşturduğu iri blok dizilimleri ile belirgin topoğrafyanın çukurluk kesimlerini dolduran çakıllı kırmızı çamurtaşlarından oluşur ve iç yapı gözlenmez.

Fasiyes H: Kalınlığı 1.5-2 m'yi bulan, güncel topoğrafyaya az çok paralel, yaşlı kolüvyal istife ait tabakalanma düzlemlerini keser konumdaki beyaz renkli yığılımlardır (bkz. Şekil 2). Daha çok yayvan düzlüklerde gözlenir. Bazı örneklerde yanal devamlılığı 15 m'yi bulabilir. Yer yer yumru veya tüpsü şekle sahip kesimleri mevcuttur.

Yorum: Harita görünümünde, taşınmış kolüvyonların heyelan topoğrafyasıyla ilişkili olduğu açık bir şekilde izlenmektedir (bkz. Şekil 1c). Bu durum, taşınmış kolüvyal fasiyeslerin moloz akmaları sonucu geliştiğinin dolaylı bir kanıtıdır. Fasiyes E'nin üst yüzeyinin dışbükey geometrisi ve fasiyes içinde bu yüzeye az çok paralel ikincil tabakalanma yüzeylerinin varlığı, çoğunlukla yüksek blok miktarına sahip matriks desteği, kohezyonsuz moloz akmalarının varlığına işaret etmektedir (Johnson, 1970; Naylor, 1980). Moloz akmasında kohezyonun düşük olması, kendi içinde belli belirsiz makaslama yüzeyleri içeren, kenarları görece yüksek eğimli moloz dillerinin oluşumuna yol açmış olmalıdır. Fasiyes F, yalnızca akış karakteristikleri ile Fasiyes E'den ayrılmaktadır. İç yapısız olması, bu sonuncu fasiyesin kohezyonsuz moloz akması ile tane akışı arasında bir reolojide taşınıp farklı Fasiyes E dilleri arasındaki çukurlarda biriktiğini göstermektedir (bkz. Şekil 5). Fasiyes G ise, Fasiyes E ve F'nin ardalanması ile temsil edilen yamaç duraysızlığı tamamlandıktan sonra ortaya çıkan çukurlukların, olasılıkla krip sonucu çakıl ve çamur karışımı bir malzeme ile dolmasıyla oluşmuştur. Fasiyes H, heyelanların etkinliklerini kaybettiği dönemde yeraltısuyu seviyesine bağlı olarak gelişen karasal karbonat çökeline (kaliçi) karşılık gelmektedir (Chamley, 1989).

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Saha verilerine göre Geç (?) Pliyosen yaşlı Yahyalı kolüvyonları ile bunların daha sonraki zamanlarda yeniden aktarılmış ürünleri, ilk oluşumlarından bugüne değin bölge yamaçlarında egemen olan kütle taşınma süreçleri ile bunları

yöneten iklimsel koşullar hakkında ipuçları sağlamaktadır.

Ana hatlarıyla; Geç Pliyosen'de Çalmardı Tepe ve Karacagedik'in daha güneyindeki Toros yüksek zirvelerinden kuzeye doğru kaya düşmeleri ve daha az olarak moloz akmalarının egemen olduğu bir kolüvyon istif gelişmiştir. Bu çalışmada gözlemler, sonraki süreçte heyelanlara maruz kalmış bu kolüvyonların yalnızca 20 m kadarlık bozulmamış bir bölümünde yürütüldüğünden, istifin tamamında kaya düşmesinden başka süreçlerin etkin olması kuvvetle muhtemeldir. Örselenmemiş kolüvyal istif içinde tanımlanan dört fasiyes bu zamanda iklimin genelde ılık ve yağışlı, ayrıca belirgin günlük ve mevsimsel değişimler sergilediğini göstermektedir. Kolüvyonun ince tane boyulu fasiyeslerinde illitlerin hala varlıklarını korumaları, simektit ve kaolinitlerin birlikte bulunmaları yağışın çok bol olmadığını kanıtlamaktadır.

Kolüvyal paketin oluşumunu izleyen dönemde, olasılıkla Pleyistosen'de, bu sedimanların çok yaygın kütle hareketlerine (kaymalar ve moloz akmaları) maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Bunun bir nedeni, kolüvyonları kuzeyden sınırlayan ve Yahyalı üzerinden Sultansazlığı Ovası'na boşalan akarsu kollarının yataklarını kolüvyonların alt kotundan daha aşağıya oyararak (topuk aşınması) duraysızlığa yol açması olabilir de, asıl ne-

den bol yağışlı bir döneme geçilmiş olmasıdır. Yaygın kütle hareketlerinin yağışlarla yakından ilişkili oldukları bilinmektedir (örneğin; Caine, 1980; Blikra ve Nesje, 1997; Ocakoğlu vd., 2002). Bu süreçte daha önce oluşmuş kolüvyonlar kaymalar ve kohezyonsuz malzemedan oluşan moloz akmaları şeklinde yamaç aşağı hareketlenmişlerdir. Birincil kolüvyal süreçlerin incelendiği I numaralı alandaki heyelan aynası olasılıkla bu dönemin ürünüdür (bknz. Şekil 2). Bütün kolüvyon yüzeyine egemen olan tepelikli/çukurlu heyelan topoğrafyası ve II numaralı alandaki (bknz. Şekil 1) bloklu fasiyesler de benzer şekilde bu dönemin ürünleridir.

Yağışlı (plüviyal) dönemin sona ermesiyle birlikte kaymalar ve diğer kütle hareketleri etkinliklerini yitirmişler, heyelan topoğrafyası üzerindeki çukurluklar kriplerle taşınmış çamurlarla dolmuş, yeraltısuyunun uygun seviyede bulunduğu kesimlerde ve tamamen bugünkü topoğrafyanın denetiminde kalın kalıç oluşumları gerçekleşmiştir.

Yahyalı kolüvyonlarının sedimanter fasiyesleri ve morfolojik özellikleri temel alınarak önerilen bu yaklaşım, iklimsel değişimlere ilişkin sonuçları batıda Eğirdir civarında Nemec ve Kazancı (1999) tarafından incelenen Geç Pliyosen'den günümüze kesiksiz bir kolüvyal istifin bulguları ile oldukça iyi bir uyum göstermektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1: Eğirdir ve Yahyalı kolüvyonlarının egemen süreçler açısından karşılaştırılması.
Table 1: Correlation of the Eğirdir and Yahyalı colluviums in terms of dominant processes.

Yaş	Eğirdir kolüvyonları (Nemec ve Kazancı, 1999)		Yahyalı kolüvyonları (Bu çalışma)	
	Tanım	Yorum	Tanım	Yorum
GÜNCEL	KOLÜVYON D	Tane akması ve kaya düşmesi	Fasiyes G ve H	Krip ve kalıç oluşumları
PLEYİSTOSEN	KOLÜVYON C	Örtü akması, kaya düşmesi ve kar akışı	Yeniden aktarılmış kolüvyal fasiyesler (Fasiyes E ve F)	Heyelanlar, kohezyonsuz malzeme içeren moloz akmaları
	KOLÜVYON B	Kaya düşmesi, kohezyonlu malzeme içeren moloz akması ve suda çökeltim		
PLİYOLESEN	KOLÜVYON A	Kaya düşmesi, kohezyonlu malzeme içeren moloz akması, tane akışı ve az örtü akışı	Birincil kolüvyal fasiyesler (Fasiyes A, B, C ve D)	Kaya düşmesi ve moloz akmaları

Bu deneştirmede, Pleyistosen'de Yahyalı kolüvyonlarında kesiksiz, farklı sulu fasiyeslerle temsil edilen bir kaydın bulunmasının gerekmediği vurgulanmalıdır. Bunun yerine, iklimin belirleyiciliğinde ve olasılıkla öngörülemeyen yerel morfolojik/hidrografik koşullar (yüksek kolüvyon yüzeyi eğimleri, komşu akarsu sistemleriyle ilişki gibi) nedeniyle Yahyalı kolüvyonlarının tamamen tahrip olması sözkonusudur. Her durumda birbirine uzak olan iki kolüvyal istif arasındaki bu uyum, allosiklik bir mekanizma olarak iklimin kolüvyonlar üzerinde egemen bir etkiye sahip olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilmelidir.

KATKI BELİRTME

Yazar, kil örneklerinin X-ışınları kırınım analizlerinin değerlendirilmesi ve metni okuyarak yaptığı eleştirileriyle sağladığı katkılardan dolayı Yrd. Doç. Dr. Candan Gökçeoğlu (Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü)'na teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Amit, R., Harrison, J.B.J., and Enzel, Y., 1995. Use of soils and colluvial deposits in analyzing tectonic events, the southern Arava Rift, Israel. *Geomorphology*, 12 (2), 91-107.
- Blikra, L.H., and Nemec, W., 1993. Postglacial avalanche activity in Western Norway: Depositional facies sequences, chronostratigraphy and palaeoclimatic implications. *In Solifluction and Climatic Variation in the Holocene*, B. Frenzel (ed.), *Palaoklimaforschung*, 11, 143-162.
- Blikra, L.H., and Nesje, A., 1997. Holocene avalanche activity in western Norway: Chronostratigraphy and palaeoclimatic implications. *Palaoklimaforschung*, 19, 299-312.

- Caine, N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geographie Annual.*, 62A, 23-27.
- Chamley, H., 1989. *Clay Sedimentology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 623 p.
- Ercan, T., Fujitani, T., Matsuda, J.I, Tokel, S., Notsu, K., Ui, T., Çan, B., Selvi, Y., Yıldırım, T., Fişekçi, A., Ölmez, M., and Akbaşlı, A., 1990. The origin and evolution of the Cenozoic volcanism of Hasandağı-Karacadağ area (central Anatolia). *Jeomorfoloji Bülteni* 18, 39-54.
- Erol, O., 2001. Ecemiş koridoru kuzeydoğu ucundaki Sultansazlığı Ovası ve Erciyes Dağı kesiminin jeomorfolojisi. *Ecemiş Fay Zonu Workshop-I, Niğde, Bildiriler Kitabı*, 9-19.
- Hampton, M.A., 1979. Buoyancy in debris flows. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49, 753-758.
- Johnson, A.M., 1970. *Physical Processes in Geology*. Freeman Cooper and Co., San Francisco, 327 p.
- Naylor, M.A., 1980. The origin of inverse grading in muddy debris flow deposits-a review. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50, 1111-1116.
- Nelson, A.R., 1992. Lithofacies analysis of colluvial sediments- an aid in interpreting the recent history of Quaternary normal faults in the Basin and Range province, western United States. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, 607-621.
- Nemec, W., and Kazancı, N., 1999. Quaternary colluvium in west-central Anatolia: sedimentary facies and palaeoclimatic significance. *Sedimentology*, 46, 139-170.
- Ocakoğlu, F., Gökçeoğlu, C. and Ercanoğlu, M., 2002. Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: A case study from NW Turkey. *Geomorphology*, 42 (3-4), 329-341.
- Selby, M.J., 1994. Hillslope sediment transport and deposition. *In Sediment Transport and Depositional Processes*, K. Pye (ed.), Blackwell Scientific Publications, Oxford, 61-87.



Akarçay Havzası'nda (Afyon) jeotermal kökenli kirlenme: 1. Akarçay Nehri'nde su ve sediman kirliliği

*Pollution of geothermal origin in the Akarçay Basin (Afyon, Turkey):
1. water and sediment pollution in the Akarçay Stream*

Müfit Ş. DOĞDU, C. Serdar BAYARI

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

ÖZ

Çeşitli elementleri yüksek derişimlerde içeren jeotermal kökenli suların doğal, ya da yapay yollarla çevreye salınması önemli çevre ve sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Akarçay Havzası'nda (Afyon) bulunan birkaç jeotermal alandan doğal, ya da yapay olarak elde edilen sular tedavi ve konut ısıtması amacıyla kullanılmaktadır. Bu sular, daha sonra çeşitli yollarla Akarçay Nehri'ne ulaşmaktadır. Nehir boyunca çeşitli noktalarda gerçekleştirilen gözlemler, özellikle 125 l/sn debili Afjet ısıtma sistemi deşarjının akarsuya boşaltılmaya başlanması ile birlikte önemli kalite değişikliklerinin olduğunu göstermiştir. Doğal koşullarda Ca-HCO₃ tipinde olan akarsu, Afjet deşarjı katkısından sonra Na-Cl tipine dönüşmektedir. Akarsu yatak sedimanları da kirlenmiş su ile iyon takas dengesine erişmiş durumdadırlar.

Anahtar kelimeler: Afyon-Akarçay, jeotermal, sıcak su, su kalitesi, yatak sedimanı.

ABSTRACT

Geothermal waters containing high concentrations of various elements present potential threat to environment and public health, if naturally or deliberately discharged into the environment. The Akarçay Basin hosts several geothermal fields from which Na-Cl type water has been used for therapeutic and heating purposes. This water is discharged to the Akarçay Stream in various ways. Evaluation of hydrochemical data obtained from the sites along the Akarçay Stream revealed that particularly the thermal water discharge of 125 l/sec from the Afjet district heating system started to degrade the quality of the stream water. The stream water, which is of Ca-HCO₃ type before the discharge, becomes Na-Cl after the discharge. The streambed sediments were found to be in ion exchange equilibrium with polluted stream water.

Key words: Afyon-Akarçay, geothermal, hot water, water quality, streambed sediment.

GİRİŞ

Fosil ve nükleer yakıtlara dayalı enerji üretim biçimlerinin çevre üzerindeki olumsuz etkileri, maliyeti zaman zaman üretilen enerji eşdeğerini aşan büyüklükte ve önemli zararlara neden olmaktadır. Gerek enerji üretim maliyetinin azaltılması, gerekse çevresel etkilerin en aza indirgenmesi amacıyla klasik uygulamalara alternatif oluşturan enerji kaynaklarının kullanılması

na yönelik çalışmalar tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de sürdürülmektedir. Güneş ve rüzgar enerjilerinin yanı sıra, jeotermal akışkanın içerdığı ısı enerjisi de günümüzdeki başlıca alternatif enerji kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Jeotermal enerji, enerji üretiminde dışa bağımlılığın azaltılması gibi avantajlar sunmasına karşın, üretim sonrası akışkanın kirlenme etkilerinin önlenmemesi durumunda, önemli çevre sorunlarını da beraberinde getirebilmektedir.

Çevreye zararlı olabilecek derişimdeki bir çok elementi içeren jeotermal deşar suları çoğunlukla yakın çevredeki akarsu, dere, göl vb. açık su kütlelerine boşaltılmaktadır. Bu uygulamanın bir sonucu olarak, dünyadaki pek çok jeotermal saha dolayında çevre kirliliği oluşmaktadır. Örneğin, Mt.Apo-Filipinler jeotermal sahasında As (Webster, 1999), Los Azufres-Meksika jeotermal sahasında Fe, Mn, F, B, As (Birkle ve Merkel, 2000) ve Mt.Amiata-İtalya jeotermal sahasında Hg (Loppi, 2001) kirliliğinin jeotermal akışkan üretimi ile orantılı olarak artış gösterdiği saptanmıştır. Türkiye'de de jeotermal enerji üretim sahalarından biri olan Denizli-Kızıldere elektrik santralinden Büyük Menderes Nehri'ne iletilen termal deşarj suyunun içerdiği yüksek B derişimi nedeniyle tarımsal üretimde zararlara neden olabileceği saptanmıştır (Beker, 1999).

Jeotermal enerjinin kullanımı konut ve sera ısıtması şeklinde olup, dünya rezervlerinin %49'u halen bu amaçla kullanılmaktadır (Lund ve Freeston, 2000). Bir jeotermal enerji envanteri çalışmasına göre, Türkiye'de 49 ilde 149 jeotermal saha bulunmaktadır (Erişen vd., 1996). Batık vd. (2000) tarafından yürütülen daha güncel bir çalışmaya göre ise, Türkiye'de mevcut 170 jeotermal sahanın 5 milyon konut eşdeğeri ısıtma kapasitesine sahip olduğu belirtilmektedir. Büyük çoğunluğu (%95) düşük, ya da orta entalpi düzeyindeki bu kaynakların planlanan başlıca kullanım alanı konut ısıtması olup, bu yöndeki kullanımın zamanla artması beklenmektedir. Konuyla ilgili geniş kapsamlı bir uygulama Afyon şehir merkezinin ısıtılması amacıyla Afjet (Afyon Jeotermal Isıtma Sistemi) projesi kapsamında 1997 kışında devreye girmiştir. Bu faaliyet sonunda halen yaklaşık 125 l/sn debili jeotermal akışkan her yıl Ekim-Nisan döneminde 6-7 ay süre ile ısıtmada kullanıldıktan sonra Akarçay Nehri'ne boşaltılmaktadır. Ayrıca, gelecek yıllarda projenin 625 l/sn'lik akışkan debisine ulaşacak şekilde genişletilmesi de planlanmıştır (Yılmaz, 1999).

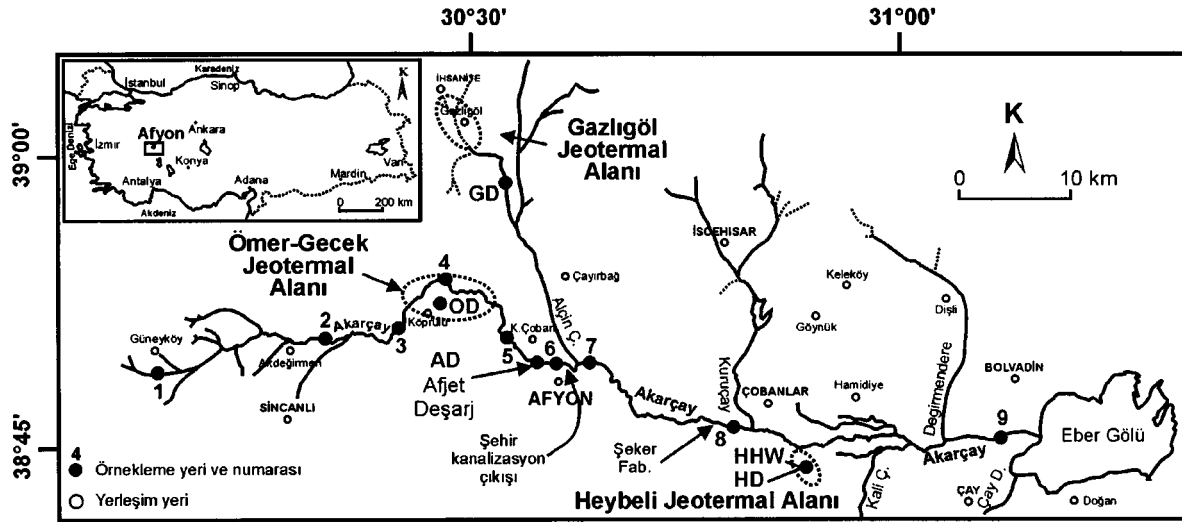
Bu çalışmanın amacı; Afjet'in yanı sıra, diğer kaynaklardan da doğal, ya da yapay nedenlerle Akarçay Havzası'ndaki yüzey ve yeraltısuyu sistemlerine katılan jeotermal akışkandan kaynaklanan kirlilik düzeyinin belirlenmesi ve çözüm önerilerinin geliştirilmesidir. Çalışma, yüzey ve yeraltısuyu sistemlerinin incelendiği iki ayrı bölümde ele alınmış olup, bu makalede Akarçay

Nehri'nde jeotermal kökenli kirlenme değerlendirilmiş olup, konuyla ilgili daha ayrıntılı değerlendirmeler Doğdu (2001) tarafından verilmiştir.

ÇALIŞMA ALANININ TANITIMI

Batı Anadolu'da 38°-39° kuzey ve 30°-32° doğu koordinatları arasında yer alan Akarçay Havzası, 7300 km²'lik su toplama alanına sahip kapalı bir havzadır. Güneyden Sultandağları, kuzeyden ise Emirdağ ile sınırlanan havza, batıdan doğuya hafif bir eğimle uzanan oluk şekilli bir morfolojiye sahiptir. Batıda Güneyköy yöresinden kaynaklanan Akarçay Nehri, havzanın orta kesimini doğuya doğru izleyerek Afyon şehir merkezi üzerinden Eber Gölü'ne ulaşmaktadır. Eber Gölü'nün akışaşağısında yer alan Akşehir Gölü ile bağlantısı ise, son 10 yıldır DSİ tarafından kapatılmıştır. Akarçay Nehri'nin Afyon şehrinin akış aşağısında bulunan Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİEİ) 1107 no.lu akım gözlem istasyonuna ait uzun yıllar (1969-1990) yağışlı (Ekim-Nisan) ve kurak (Mayıs-Eylül) dönem ortalama debi değerleri 4.11 m³/sn ile 1.06 m³/sn'dir. Aynı dönemde akarsuyun Eber Gölü akış yukarısında bulunan EİEİ 1104 no.lu akım istasyonunda ise yağışlı ve kurak dönem debileri 6.84 m³/sn ve 2.47 m³/sn olarak belirlenmiştir. EİEİ 1107 ve 1104 no.lu akım gözlem istasyonları bu çalışmada hidrokimyasal amaçlı su örneklerinin alındığı 7 ve 9 no.lu istasyonlar ile aynı konumda yer almaktadırlar (Şekil 1). Akarçay Ovası'nın yüzey kesiminin hidrolik iletkenliği oldukça düşük ince taneli malzemeden oluşmasından dolayı, akarsu yatağı boyunca düşey yönde su hareketinin mümkün olmadığı belirtilmektedir (Tezcan, 2001).

Akarçay Nehri'ne doğal, ya da yapay yollarla jeotermal akışkan katılımının gerçekleştiği başlıca alanlar; batıdan doğuya doğru Ömer-Gecek jeotermal sahası, Afjet termal deşarjı ve Heybeli kaplıcası deşarj suyundan oluşmaktadır (bknz. Şekil 1). Ayrıca, kuzeyde yer alan Gazlıgöl jeotermal sahasından boşalan Na-HCO₃ karakterli termal sular da Alçin Çayı tarafından Afyon şehrinin akışaşağısında Akarçay Nehri'ne iletilmektedir. Bu katkılardan Afjet deşarjı ile 125 l/sn, Gazlıgöl ve Heybeli deşarjları ile sırasıyla ortalama 20 l/sn ve 5 l/sn düzeyinde termal su doğrudan, ya da dolaylı olarak Akarçay Nehri'ne ulaşmaktadır. Öte yandan, Ömer-Gecek sahasında 1971-1997 yılları arasında, verimleri 5 l/sn



Şekil 1. Akarçay Nehri ve dolayı su ve sediman örnekleme istasyonları (AD: Afjet deşarj suyu; GD: Gazlıgöl hamamı deşarj suyu; HD: Heybeli hamamı deşarj suyu; HHW: Heybeli sıcak suyu; OD: Ömer hamamı deşarj suyu).

Figure 1. Water and sediment sampling stations in and around Akarçay Stream

(AD: Afjet discharge water; GD: Gazlıgöl bath discharge water; HD: Heybeli bath discharge water; HHW: Heybeli hot water; OD: Ömer bath discharge water).

ile 100 l/sn arasında değişen 23 adet kuyu açılmıştır (Şimşek, 2002). Özellikle 1990, 1996 ve 1997 yıllarında bu kuyularda yapılan testler sırasında da üretilen jeotermal akışkan, kısa süreli de olsa, Akarçay Nehri'ne katılmıştır. Jeotermal kökenli deşarj sularının yanı sıra, evsel, endüstriyel ve tarımsal kökenli deşarj suları da Akarçay Nehri'ne katılmaktadır. Bu kapsamda Afyon şehir kanalizasyonu (15-20 l/sn), Et Balık Kurumu Mezbahası (20 l/sn) ve Afyon Şeker Fabrikası da (20 l/sn) başlıca kirletici kaynaklarını oluşturmaktadırlar. Kanalizasyon suyu debisinin yıl boyu süreklilik göstermesine karşın, endüstriyel tesislerin deşarj suyu debileri işletme süreleri ile sınırlı kalmaktadır. Akarçay Nehri'ne boşaltılan deşarj sularının jeotermal kökenli olup olmadıkları konusunda en önemli gösterge, Na-HCO₃ fasiyesinde bulunan Gazlıgöl ve Heybeli Kaplıcası dışında, bu suların belirgin olarak yüksek derişimli Na-Cl fasiyesine ait olmalarıdır. Diğer deşarj suları Ca-HCO₃ karakterli olup, toplam çözünmüş katı madde içerikleri daha düşüktür.

YÖNTEM VE VERİLER

Afjet deşarj suyunun Akarçay Nehri su kimyası üzerindeki etkisinin belirlenmesi için çeşitli amaçlarla DSİ Genel Müdürlüğü Su ve Kanali-

zasyon Dairesi Başkanlığı tarafından 1991-1998 yılları arasında üretilen yayımlanmamış su kalitesi verilerinin yanı sıra, bu çalışma kapsamında 1999 yılı yağışlı (Mart) ve kurak (Temmuz) dönemlerinde gerçekleştirilen ölçüm ve analiz sonuçlarından yararlanılmıştır. DSİ tarafından üretilen veriler analitik kalite açısından kontrol edilmiş ve majör anyon-kasyon dengesi %6'dan iyi olan analiz sonuçları kullanılmıştır. Öte yandan, bu çalışma kapsamındaki veriler ise, Akarçay Nehri boyunca seçilen 9 istasyonda gerçekleştirilen ölçüm ve analizler sonucunda üretilmiştir (bkz. Şekil 1, Çizelge 1). Bu istasyonlarda akım koşullarının karışımı tam olarak sağlaması nedeniyle ilgili akarsu kesitini temsilen tek bir örnek alınmıştır. Akarsu kimyasal kompozisyonu üzerinde doğrudan ve dolaylı olarak etkisi olabileceği düşünülen Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli Hamamları ile Afjet deşarj suyu da anılan dönemlerde örneklendirilmiştir (bkz. Çizelge 1). Akarsu sedimanlarının katyon takas kapasitelerinin ve bu sedimanlarda tutulan majör katyon miktarlarının belirlenmesi için ise, aynı istasyonlarda yatak tabanının üstten 25 cm'lik bölümü kurak dönemde örneklendirilmiştir. Sediman örnekleme çalışmalarında kirlenmenin önlenmesi amacıyla naylon kürek ve torba kullanılmıştır.

Çizelge 1. Akarçay Nehri ve jeotermal kökenli diğer sulara ait kimyasal analiz sonuçları (Mart 1999 ve Temmuz 1999).
Table 1. The chemical analyse results of Akarçay Stream and other waters of geothermal origin (March 1999 and July 1999).

Örnek Numarası ve Adı	T (°C)	pH	EI (µS/cm)	ÇÖ (mg/l)	Değişim (mmol/l)										Değişim (mg/l)										
					Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	SO ₄	Cl	SO ₄	NO ₂ +NO ₃ -N	NH ₃ -N	PO ₄	Fe	Mn	Li	Al	B	F	Br	As (ng/l)	
1-Eğrek Dere (Güneyköy)	3.4	8.18	366	9.3	0.120	0.060	1.745	0.265	0.470	2.550	0.150	0.260	0.150	0.260	0.27	0.14	0.21	0.43	0.03	0.01	0.56	0.67	1.01	0.18	2.15
2-Akardere (Akdüğirmen)	5.7	8.09	444	8.4	0.190	0.130	2.045	0.330	0.470	3.020	0.300	0.335	0.300	0.335	0.57	0.32	0.14	0.87	0.06	0.01	0.73	1.92	1.17	0.20	2.15
3-Akarçay (Köprülü)	6.3	8.08	411	8.5	0.270	0.100	1.685	0.330	0.340	2.770	0.250	0.375	0.250	0.375	1.18	0.31	0.11	3.81	0.16	0.01	3.80	2.11	1.15	0.21	4.55
4-Akarçay (Gecek)	6.0	8.01	430	8.7	0.280	0.100	1.960	0.330	0.340	2.850	0.400	0.410	0.400	0.410	0.85	0.55	0.21	3.30	0.04	0.01	2.29	2.03	1.25	0.35	3.21
5-Akarçay (Küçükçobanlar)	5.7	8.05	430	8.9	0.370	0.100	1.645	0.390	0.340	2.850	0.350	0.385	0.350	0.385	0.83	0.30	0.15	0.64	0.04	0.01	0.56	1.87	1.22	0.28	2.68
6-Akarçay (AD Sonrası)	6.7	8.04	594	7.8	1.720	0.260	2.035	0.350	0.385	3.280	1.500	0.420	1.500	0.420	0.48	0.57	0.13	0.65	0.04	0.07	0.90	2.01	1.94	0.91	2.68
7-Akarçay (Akçin Köprüsü)	7.5	7.80	516	7.3	1.260	0.320	1.620	0.350	0.300	2.850	1.100	0.385	1.100	0.385	0.66	0.34	0.35	2.92	0.12	0.06	3.54	1.02	1.41	0.78	4.01
8-Akarçay (Çobanlar Köprüsü)	7.4	7.82	570	6.1	1.820	0.150	1.545	0.330	0.340	2.980	1.200	0.435	1.200	0.435	0.70	0.60	0.28	0.71	0.08	0.07	1.19	0.00	1.53	0.76	5.87
9-Akarçay (Develi Köprüsü)	9.0	7.62	614	4.6	2.010	0.240	1.535	0.390	0.680	2.680	1.250	0.495	1.250	0.495	0.66	1.66	0.67	0.93	0.10	0.07	1.46	0.00	1.89	0.78	3.75
AD-Afjet Termal Deşarjı ^a	47.6	7.70	7197	1.6	62.860	4.160	4.805	0.615	2.385	14.810	49.000	4.465	49.000	4.465	0.21	1.75	0.42	0.32	0.05	2.68	0.00	10.64	13.20	18.20	165.38
HHW-Heybeli Kaplıcası ^b	60.0	6.68	3795	0.9	21.360	1.380	9.795	1.810	1.870	19.830	5.500	5.825	5.500	5.825	0.06	0.28	1.07	0.57	0.03	1.10	0.00	2.22	8.43	2.65	0.00
1-Eğrekdere (Güneyköy)	16.3	7.93	559	8.6	0.180	0.040	2.420	0.430	0.745	3.740	0.200	0.200	0.200	0.200	0.30	0.03	-	0.12	0.03	0.00	0.00	0.27	159.00	0.24	6.94
2-Akardere (Akdüğirmen)	16.8	7.98	618	7.1	0.370	0.080	2.555	0.535	0.840	4.020	0.550	0.225	0.550	0.225	0.58	0.02	-	0.42	0.05	0.00	0.66	0.11	101.00	0.52	8.01
3-Akarçay (Köprülü)	18.0	7.90	639	6.0	0.500	0.130	2.360	0.640	0.840	3.830	0.500	0.285	0.500	0.285	0.67	0.29	-	2.00	0.20	0.01	2.24	0.29	82.30	0.30	8.54
4-Akarçay (OD Sonrası)	20.9	7.89	640	6.8	1.120	0.180	2.170	0.515	0.745	3.640	1.100	0.230	1.100	0.230	0.82	0.06	-	1.00	0.10	0.03	2.09	0.38	53.80	0.45	39.43
5-Akarçay (AD Öncesi)	25.0	8.13	2370	7.0	15.010	1.530	3.345	1.935	0.795	6.730	14.500	1.505	14.500	1.505	0.29	1.40	-	0.61	0.47	0.59	1.88	2.08	21.20	3.23	159.52
6-Akarçay (AD Sonrası)	26.2	7.37	1543	1.4	8.090	2.940	1.745	0.985	0.000	7.940	6.100	0.515	6.100	0.515	0.05	4.21	-	0.39	0.19	0.25	0.81	0.00	23.70	1.73	97.48
7-Akarçay (Akçin Köprüsü)	28.7	7.65	1244	4.2	6.310	0.410	1.870	0.780	0.000	7.710	4.300	0.450	4.300	0.450	0.07	0.10	-	0.39	0.15	0.19	0.45	0.15	35.40	1.89	61.26
8-Akarçay (Çobanlar Köprüsü)	24.7	7.69	1624	1.0	8.700	0.560	2.385	0.825	0.000	10.000	5.400	0.385	5.400	0.385	0.13	0.97	-	0.19	0.27	0.24	0.00	0.00	25.50	2.15	81.23
9-Akarçay (Develi Köprüsü)	30.6	9.37	1676	-	9.220	0.960	1.770	1.315	1.310	4.760	6.600	0.770	6.600	0.770	0.17	0.38	-	0.75	0.22	0.15	1.47	0.00	31.60	2.39	80.44
OD-Ömer Hamamı Deşarjı ^a	28.2	8.18	5546	4.7	50.030	2.100	3.120	0.825	1.680	10.840	39.000	2.930	39.000	2.930	0.32	0.35	-	0.72	0.06	1.74	0.78	6.59	6.34	6.40	176.56
AD-Afjet Termal Deşarjı ^a	34.0	7.46	6660	1.8	62.530	2.760	4.365	1.030	0.000	19.900	52.000	3.030	52.000	3.030	0.68	0.12	-	2.69	0.14	2.41	0.00	2.95	2.86	9.78	173.90
GD-Gazlıgöl Hamamı Deşarjı ^a	33.5	7.53	2325	1.9	19.840	0.930	2.110	0.660	2.055	20.650	0.650	0.190	0.650	0.190	0.19	1.87	-	0.74	0.12	1.27	0.00	5.50	13.40	0.89	17.86
HD-Heybeli Hamamı Deşarjı ^a	35.5	7.44	2862	1.0	14.220	0.730	5.915	1.650	0.000	19.900	5.250	1.705	5.250	1.705	0.04	4.63	-	0.20	0.05	0.61	0.00	0.00	11.40	1.43	168.58

a: termal deşarj suyu; b: termal su; -: analiz/ölçüm yok

Su örneklerinin sıcaklık, elektriksel iletkenlik (Eİ), pH ve çözülmüş oksijen (ÇO) gibi parametreleri örnekleme noktasında ölçülmüş, kimyasal analiz amaçlı su örnekleri polietilen şişelere alınmıştır. Tüm su örnekleri 0.45 mikro m'lik filtre ile yerinde süzölmüş, APHA vd. (1989) tarafından belirtilen standart yöntemlerle korunmuş ve analiz edilmişlerdir. Su örneklerinde katyon ve iz element analizleri alev atomik absorpsiyon spektrofotometrik (AAS); SO₄, NO₂, NO₃, NH₃, PO₄, B ve F analizleri spektrofotometrik; Br analizi iyon seçici elektrod; As analizi hidrür AAS ve Cl, HCO₃, CO₃ analizleri ise titrasyon yöntemleri ile yapılmıştır.

Sediman örneklerinde % kil içeriği D422-63 no.lu deney standardına (ASTM, 1988), organik madde içeriği ise D2974 no.lu deney standardına (ASTM, 1988) göre belirlenmiştir. Örneklerin katyon takas kapasitesi değerlerinin belirlenmesinde amonyum-asetat (NH₄OAc) yöntemi kullanılmıştır (USDA, 1996).

AKARÇAY NEHRİ'NİN SU KİMYASI ÜZERİNDE JEOTERMAL DEŞARJ SUYU ETKİSİ

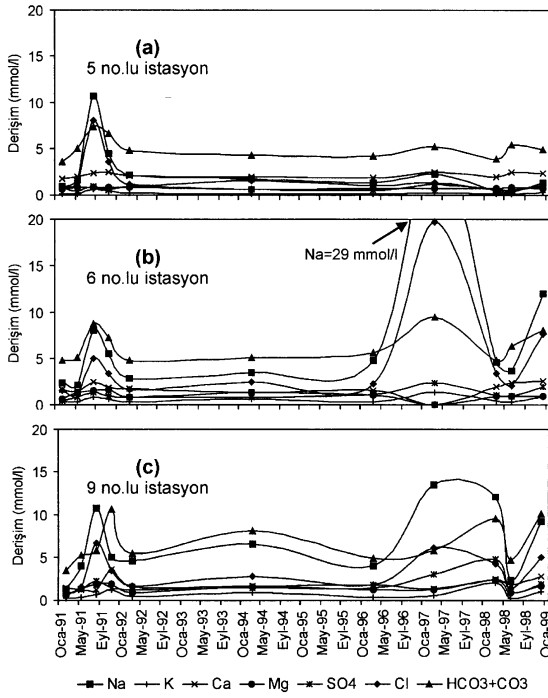
Akarçay Nehri'nin kimyasal kompozisyonu üzerinde jeotermal deşarj suyu etkisinin belirlenmesinde yüksek debili bu suların hakim Na-Cl fasiyesine sahip olmalarından dolayı, öncelikle akarsuya ait Na ve Cl derişimleri kullanılmıştır. Bu iyonlardan Cl, akarsu koşullarında oldukça konservatif eğilimli olup, derişiminin azalmasına neden olacak önemli bir kimyasal süreç bulunmamaktadır. Buna karşın, Na derişiminin su-sediman arası iyon takası sonucunda kısmen değişmesi ise beklenen bir durumdur.

Aşağıda öncelikle Afjet'in devreye girmesinden önceki ve sonraki döneme ait akarsu majör iyon verileri, geçmiş yıllara ait verilerin alındığı üç istasyon (5, 6, 9 no.lu istasyonlar) için değerlendirilmiştir. Akarsu boyunca daha fazla sayıda istasyonu kapsayan majör iyonlara dayalı değerlendirmeler ise, bu çalışma kapsamında üretilen 1999 yılı kurak ve yağışlı dönem verileri kullanılarak bundan sonraki bölümlerde yapılmıştır. Jeotermal kökenli sulara daha bol miktarda bulunan iz element (Li, B, As, Fe vb.) derişimlerinin akarsu boyunca değişimi ayrıca değerlendirilmiştir.

Afjet Katkısından Önceki Dönem

Afjet'in 1997 yılında işletmeye alınmasından önceki dönemde olası bir jeotermal kökenli kirlenmenin belirlenmesi amacıyla Akarçay Nehri'nin 5, 6 ve 9 no.lu istasyonlarının (bkz. Şekil 1) 1991-1999 yılları arasındaki verileri incelenmiştir. Bunlardan 5 no.lu istasyon Ömer-Gecek jeotermal alanının akışaşağısını, 6 no.lu istasyon Afyon şehri akışaşağısını ve 9 no.lu istasyon ise Akarçay Nehri'nin Eber Gölü'ne boşalım noktasını temsil etmektedir. 6 no.lu istasyonun akışyukarisında şehir kanalizasyon suyu ile 1997 yılı kış aylarından itibaren Afjet deşarjı Akarçay Nehri'ne katılmaktadır. Diğer yandan, 9 no.lu istasyonun akışyukarisında akarsuya katılan başlıca noktasal kirlenici kaynakları ise yaklaşık olarak 7 no.lu istasyon dolayından akarsuya katılan Et Balık Kurumu deşarj suyu ile 8 no.lu istasyonun akışaşağısından akarsuya katılan Şeker Fabrikası deşarj suyudur.

5, 6 ve 9 no.lu istasyonlara ait iyon profillerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda 1991 yılı ile 1997-1999 yıllarının kış ayları boyunca akarsu majör iyon (özellikle Na, Cl ve HCO₃) derişimlerinde jeotermal su katkısına bağlanabilecek artışlar olduğu görülmektedir (Şekil 2). Afjet'in henüz devreye girmediği Eylül 1991 ayında tüm istasyonlarda gözlenen bağıl olarak daha düşük derişim artışlarının bu sisteme sıcak su sağlayan Ömer-Göcek jeotermal alanı kuyularında yapılan testler süresince akarsuya termal kökenli su salınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Söz konusu katkıdan dolayı normal koşullar altında Ca-HCO₃ karakterine sahip olan akarsu kimyasal kompozisyonunun Na-Cl fasiyesine dönüştüğü anlaşılmaktadır. Jeotermal katkı nedeniyle 5 no.lu istasyonda 10 mmol/l düzeyine ulaşan Na ve Cl derişimlerinin 6 ve 9 no.lu istasyonlarda da bu büyüklüğünü koruması, jeotermal kökenli iyon taşınımının Eber Gölü'ne kadar devam ettiğini göstermektedir. Öte yandan, kuyu testlerine bağıl jeotermal su katkısının oluşmadığı 1992-1996 yılları arasındaki dönemde Akarçay Nehri majör iyon derişimlerinin 5 mmol/l dolayında bulunduğu ve normal koşullar altında akarsuyun Ca-HCO₃ karakterine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Temiz yüzey sularının Ca-HCO₃ fasiyesinde olmaları ise, beklenen bir durum olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 2. Akarçay Nehri majör iyon içeriğinin 5 (a), 6 (b) ve 9 (c) no.lu istasyonlarda uzun süreli değişimi.

Figure 2. Long term variation of major ion concentrations at the Akarçay Stream's stations of 5 (a), 6 (b) and 9 (c).

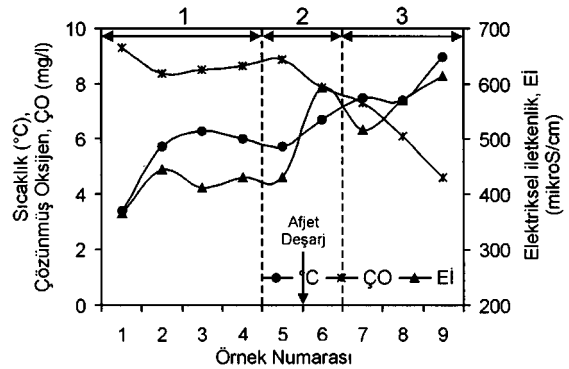
Afjet Katkısından Sonraki Dönem

Afjet sisteminin devreye girmesi ile birlikte 1997'den sonraki yılların kış aylarında jeotermal deşarj suyunun akarsu kimyası üzerinde belirgin biçimde etkili olmaya başladığı 5 ve 6 no.lu istasyonlarda gözlenen derişimlerin karşılaştırılmasından anlaşılmaktadır. Afjet deşarj suyunun etkisiyle 1997 kış aylarında 6 no.lu istasyonda majör iyon derişimlerinin akışıyukarıdaki 5 no.lu istasyona göre 5-6 kat artarak 20-30 mmol/l düzeyine yükseldiği görülmektedir. Aynı tarihlerdeki gözlemler incelendiğinde, akışıyaşağıda yer alan 9 no.lu istasyonda majör iyon derişimleri, olasılıkla Akarçay'ın yan kolların katılımı ve/veya yüzey akışından kaynaklanan seyrelme vb. etkiler nedeniyle, 10-15 mmol/l düzeyine inmekle birlikte doğal derişim düzeyinin (~5 mmol/l) üzerinde bulunmaktadır (bkz. Şekil 2c). Afjet katkısının etkili olduğu dönemlerde akışıyukarıda bulunan 5 no.lu istasyondaki derişimlerin 1992-1997 yılları arasında gözlenen doğal derişim düzeyinde kalması bu kesimde jeotermal

kökenli bir kirlenmenin oluşmadığını göstermektedir (bkz. Şekil 2a). Bununla birlikte, söz konusu dönemlerde 5 no.lu istasyonda gözlenen derişim salınımlarının akışıyukarıda bulunan Afjet kuyu (Ömer-Gecek) sahasındaki üretim kayıplarından kaynaklanması da olası görülmektedir.

Yağışlı Dönemde (Mart 1999) Kimyasal Kompozisyon Değişimi

Sıcaklık, ÇO ve Eİ'in yağışlı dönemde Akarçay Nehri boyunca değişimi söz konusu parametreler açısından üç farklı bölgenin (1, 2, 3) varlığına işaret etmektedir (Şekil 3). Akarsuyun kaynağına yakın birinci istasyonun akışıyaşağısı ile Afyon şehri akışıyukarısında kalan 5 no.lu istasyon arasındaki ilk bölge, söz konusu parametreler açısından oldukça homojen bir yapıya sahiptir. Yağışlı dönemde, bu bölgedeki sıcaklık 6°C, ÇO 9 mg/l ve Eİ ise 400 mikroS/cm dolayındadır. İkinci bölge, Afyon şehrinin akışıyukarısını ve akışıyaşağısını temsil eden 5 ve 6 no.lu istasyonlar arasında kapsamakta olup, Afjet bu alandaki en önemli deşarj su kaynağını oluşturmaktadır. Afjet suyunun yüksek iyon içeriğine ve sıcaklığına (7197 mikroS/cm ve 47.6°C) bağlı olarak, iki istasyon arasında sıcaklık 7°C'ye, Eİ 600 mikroS/cm'ye yükselmiş, buna karşın ÇO 8 mg/l dolayına düşmüştür. Afyon şehri ile Eber Gölü girişi arasında kalan üçüncü bölgede ise akarsu yatağı boyunca genel olarak sıcaklık ve Eİ artmakta, ÇO ise artan sıcaklık ve tuzluluğun çözünürlüğü düşürmesinden dolayı azalmaktadır. Akarsu sıcaklığının atmosferle ısı alışverişisi so-

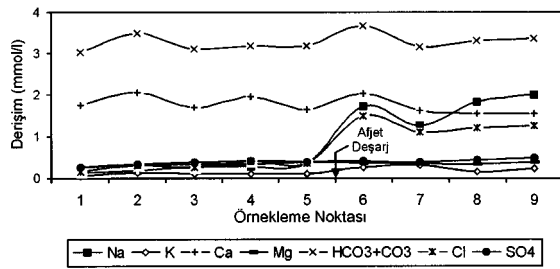


Şekil 3. Akarçay Nehri boyunca fiziksel parametrelerdeki değişimler (Mart 1999)

Figure 3. Variation of physical parameters along the Akarçay Stream (March 1999)

nucu değişmesi m¼mk¼n olduğundan, ¼¼nc¼ b¼lgedeki su kalitesi değişiminin incelenmesi a¼ısından El'in daha temsil edici olduğu d¼ř¼n¼lmektedir. Bu a¼ıdan değerlendirildiğinde, 6 no.lu istasyon akışyukarisındaki Afjet deşarjı katkısından sonra Eber G¼l¼ girişine kadar akarsu iyonik kompozisyonunun korunduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, 7 no.lu istasyonda El'te gözlenen azalmanın akarsuya kuzeyden katılan Al¼in ¼ayı'nın neden olduğu seyrelme ile a¼ıklanması m¼mk¼nd¼r. 7 no.lu istasyondan sonra El'in tekrar artması, bu b¼lgede yüksek iyon i¼eriđine sahip suların akarsuya katıldığına işaret etmektedir. S¼z konusu katkıların Heybeli Kaplıcası deşarjı suyu gibi y¼zey sularının yanı sıra, jeotermal su ile karışmış sığ yeraltısularının akarsuyu beslemesinden kaynaklanmış olması da olası g¼r¼lmektedir. Diğer yandan, atmosfere a¼ık halde bulunan akarsuyun s¼rekli olarak atmosferik karbon dioksit ile dengeye gelmesinden dolayı, gerek kurak ve gerekse yağışlı d¼nemdeki pH değerleri de 8'in ¼zerinde g¼zlenmiřtir. Bu nedenle, akarsu boyunca pH değerini bu ¼alıřma kapsamındaki değerlendirmelerde ele alınmamıştır.

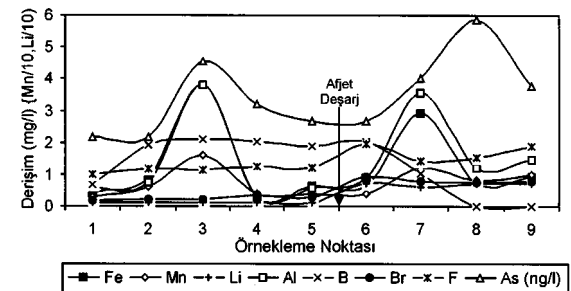
Yağışlı d¼nemde akarsu maj¼r iyon kimyasal kompozisyonu Afjet deşarjı noktasına kadar önemli bir değerini g¼stermemektedir (şekil 4, 1-5 no.lu ¼rnekleme noktaları). Bu d¼nemde Akar¼ay Nehri'nin kaynağından Afjet deşarjı noktasına kadar olan b¼l¼mde Ca deşişiminin 2 mmol/l, HCO₃ deşişiminin ise 3 mmol/l d¼zeyinde sabit kaldığı anlaşılmaktadır. Diğer iyonların deşişimleri ise 0.5 mmol/l ve daha d¼ř¼k d¼zeydedir. Afjet deşarjından sonra (şekil 4, 5-6 no.lu istasyonlar arası), Na ve Cl deşişimlerinin yaklaşık 3 kat arttığı, buna karşın Ca ve HCO₃ deşişimlerinde zayıf bir artış olduğu g¼zlenmektedir. Diğer iyonların deşişiminde ise hafif artışlar oluşmuştur. Afjet deşarjının akarsu kimyasal kompozisyonu ¼zerindeki etkisi akışaşağıdaki 7, 8 ve 9 no.lu istasyonlarda da devam etmektedir. Bu kesimde, 7 no.lu istasyonda g¼zlenen deşişim azalmasının, yukarıda El ile ilgili değerlendirmede de belirtildiği gibi, Akar¼ay Nehri'ne kuzeyden katılan Al¼in ¼ayı'nın seyreltme etkisinden kaynaklandığı d¼ř¼n¼lmektedir. Bu durumun, Gazlıg¼l jeotermal sahası sularının NaHCO₃ karakterli olmasından kaynaklanması olasıdır. Diğer yandan, 7 no.lu istasyondan sonra Na iyonundaki artışın Ca iyonundaki azalma ile paralellik g¼stermesi Al¼in ¼ayı katkısının yanı sıra, akarsu ile yatak sedimanları arasındaki katyon takas tepkimelerinin de (Ca tutulmasına karşılık Na salınması) akarsu kimyası ¼zerinde etkili olabileceğine işaret etmektedir. Akar¼ay Nehri boyunca yağışlı d¼nemde g¼zlenen iz element deşişimlerinde jeotermal su katkısı ile ilişkili olduğu d¼ř¼n¼len değerinişler saptanmıştır. Akışyukarıdaki 1 ve 2 no.lu istasyonlarda B dışındaki elementler a¼ısından önemli bir değerini g¼zlenmezken, 3 no.lu istasyonda As, Fe, Mn ve Al deşişimlerinde önemli artışlar g¼r¼lmektedir (şekil 5). Akarsuyun bu kesimde g¼zle g¼r¼l¼r bir jeotermal su girdisi olmamasına karşın, s¼z konusu element deşişimleri y¼ksektir. Bu durum, b¼lgede ge¼miř yıllarda aktif olan buna karşın jeotermal ¼retim kuyularının a¼ılması ile g¼n¼m¼zde kurumuş durumda bulunan termal kaynaklara (Uyuz, Kızık Hamamları) ait yeraltısuyunun y¼zeyaltı akış ile akarsuya ulaştığına işaret etmektedir. D¼rt ve 5 no.lu istasyonlarda azalma g¼steren deşişimler 6 no.lu istasyon ¼ncesinde ger¼ekleřen Afjet ve



şekil 4. Akar¼ay Nehri boyunca yağışlı d¼nem (Mart 1999) maj¼r iyon kimyası.

Figure 4. Major ion chemistry along the Akar¼ay Stream in the wet period (March 1999).

şimlerinde zayıf bir artış olduğu g¼zlenmektedir. Diğer iyonların deşişiminde ise hafif artışlar oluşmuştur. Afjet deşarjının akarsu kimyasal kompozisyonu ¼zerindeki etkisi akışaşağıdaki 7, 8 ve 9 no.lu istasyonlarda da devam etmektedir. Bu kesimde, 7 no.lu istasyonda g¼zlenen deşişim azalmasının, yukarıda El ile ilgili değerlendirmede de belirtildiği gibi, Akar¼ay Nehri'ne kuzeyden katılan Al¼in ¼ayı'nın seyreltme etkisinden kaynaklandığı d¼ř¼n¼lmektedir. Bu durumun, Gazlıg¼l jeotermal sahası sularının NaHCO₃ karakterli olmasından kaynaklanması olasıdır. Diğer yandan, 7 no.lu istasyondan sonra Na iyonundaki artışın Ca iyonundaki azalma ile paralellik g¼stermesi Al¼in ¼ayı katkısının yanı sıra, akarsu ile yatak sedimanları arasındaki katyon takas tepkimelerinin de (Ca tutulmasına karşılık Na salınması) akarsu kimyası ¼zerinde etkili olabileceğine işaret etmektedir. Akar¼ay Nehri boyunca yağışlı d¼nemde g¼zlenen iz element deşişimlerinde jeotermal su katkısı ile ilişkili olduğu d¼ř¼n¼len değerinişler saptanmıştır. Akışyukarıdaki 1 ve 2 no.lu istasyonlarda B dışındaki elementler a¼ısından önemli bir değerini g¼zlenmezken, 3 no.lu istasyonda As, Fe, Mn ve Al deşişimlerinde önemli artışlar g¼r¼lmektedir (şekil 5). Akarsuyun bu kesimde g¼zle g¼r¼l¼r bir jeotermal su girdisi olmamasına karşın, s¼z konusu element deşişimleri y¼ksektir. Bu durum, b¼lgede ge¼miř yıllarda aktif olan buna karşın jeotermal ¼retim kuyularının a¼ılması ile g¼n¼m¼zde kurumuş durumda bulunan termal kaynaklara (Uyuz, Kızık Hamamları) ait yeraltısuyunun y¼zeyaltı akış ile akarsuya ulaştığına işaret etmektedir. D¼rt ve 5 no.lu istasyonlarda azalma g¼steren deşişimler 6 no.lu istasyon ¼ncesinde ger¼ekleřen Afjet ve



şekil 5. Akar¼ay Nehri boyunca yağışlı d¼nem (Mart 1999) iz element kimyası.

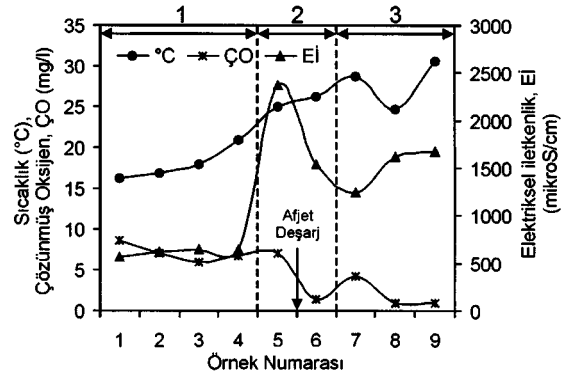
Figure 5. Trace elements chemistry along the Akar¼ay Stream in the wet period (March 1999).

özellikle 7 no.lu istasyon öncesinde gerçekleşen Alçin Çayı katkıları ile önemli artışlar göstermişlerdir. Afjet katkısının Br, B, Li, F ve Al gibi jeotermal aktivite ile doğrudan ilgili elementlerin derişimlerinde artışa neden olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, Alçin Çayı katkısı ise Fe, Mn, As ve Al derişimlerinde önemli artışa neden olurken, B ve F derişimlerinde azalma oluşmuştur. Anılan element derişimleri Alçin Çayı katkısından sonra azalmakta, daha akışaşağıdaki 8 ve 9 no.lu istasyonlarda hemen hemen sabit kalmaktadır. Diğer yandan, 8 no.lu istasyonda As derişiminde gözlenen artışın bu yörede gözle görülür bir jeotermal boşalımın bulunmamasından dolayı civardaki pestisid kullanımından kaynaklanması da olası görülmektedir. Bununla birlikte, bu çalışma kapsamında söz konusu olasılığın kontrol edilmesine yönelik ek kanıtlar toplanamamıştır.

Yağışlı dönemde akarsu boyunca gözlenen fosfat (PO_4) ve azot türevi (NO_2 , NO_3 ve NH_3) derişimlerinin çoğunlukla 1 mg/l'nin altında olduğu (bkz. Çizelge 1) ve istasyonlar arasında önemli bir farklılık bulunmadığı gözlenmiştir. Azot türevleri ve fosfat derişimleri ayrıca Eber Gölü girişinde diğer istasyonlara göre artış göstermektedir.

Kurak Dönemde (Temmuz 1999) Kimyasal Kompozisyon Değişimi

Kurak dönemde Akarçay Nehri'ndeki debinin oldukça azalmasına, yatak boyunca göllenmenin olduğu kesimler bulunmasına karşın, akış genel olarak süreklilik göstermektedir. Fiziksel parametrelerin bu dönemdeki değişimi de Akarçay Nehri boyunca üç farklı bölgenin varlığına işaret etmektedir (1, 2, 3, Şekil 6). Afyon şehri akışyukarısındaki 1 ve 4 no.lu istasyonlar arasındaki alanı kapsayan birinci bölgede ÇO ve Eİ değerleri oldukça homojen olup, sırasıyla 6 mg/l ve 500 mikroS/cm dolayında gözlenmişlerdir. Akışaşağıya doğru atmosferik ısı girdisine bağlı olarak, su sıcaklığında oluşan artış ÇO içeriğinde de hafif bir azalmaya neden olmaktadır. Afyon şehri akışyukarısında bulunan 5 no.lu istasyon ise akış hızının oldukça düşük olduğu göllenmiş bir su kütesini temsil ettiğinden etkili buharlaşmaya bağlı olarak oldukça yüksek Eİ değerine sahip olmuştur. Kurak dönemde Afjet deşarj debisinin 0.5 l/sn düzeyine kadar düşmüş olmasına karşın, gerek yataktaki göllenme ne-

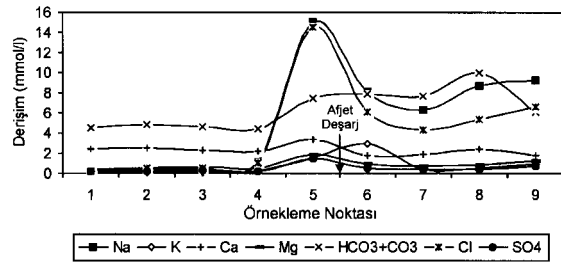


Şekil 6. Akarçay Nehri boyunca fiziksel parametrelerdeki değişimler (Temmuz 1999).

Figure 6. Variation of physical parameters along the Akarçay Stream (July 1999).

deniyle buharlaşmanın artan etkisi ve gerekse azalan akarsu debisi üzerinde jeotermal deşarj suyu katkısının hacimce daha etkili olması nedeniyle 5 ve 6 no.lu istasyonlar arasında Eİ değeri yağışlı dönemde olduğu gibi artış göstermektedir (bkz. Şekil 6; 2 no.lu bölge). Bu dönemde 6 no.lu istasyon akışaşağısında gözlenen Eİ değerleri (1500 mikroS/cm) yağışlı dönemde gözlenen değerlerin 2 katından daha yüksektir (bkz. Şekil 6; 3 no.lu bölge).

Kurak dönemde akarsu boyunca majör iyon derişimlerinin yağışlı döneme niteliksel bir benzerlik gösterdiği izlenmektedir. Bu dönemde de akarsuyun 1 ve 4 no.lu istasyonları arasında iyon derişimlerinde önemli bir değişim gözlenmezken, akışaşağı kesimde özellikle Na ve Cl derişimleri yağışlı dönemde olduğu gibi artmaktadır (Şekil 7). Bununla birlikte, olasılıkla buharlaşmaya bağlı zenginleşmenin de etkisiyle ku-



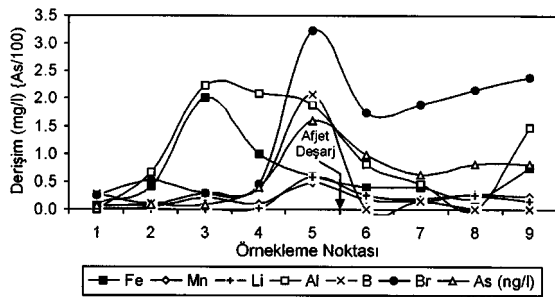
Şekil 7. Akarçay Nehri boyunca kurak dönem (Temmuz 1999) majör iyon kimyası.

Figure 7. Major ion chemistry along the Akarçay Stream in the dry period (July 1999).

rak dönemdeki iyon derişimleri daha yüksektir. Buharlaşma sonucu iyon derişimindeki artışın tipik bir örneği yatak boyunca göllenmenin olduğu 5 no.lu istasyonda gözlenmektedir. Benzer şekilde, Afjet deşarjının akışaşağısında kalan 7 ve 9 no.lu istasyonlardaki derişim artışında da buharlaşmanın etkili olduğu düşünölmektedir.

İz element derişimlerinin kurak dönemdeki değişimi de nitel olarak yağışlı döneme benzerlik göstermektedir. Bu dönemde de 3 no.lu istasyonda Fe, Mn ve Al derişimlerinde bir artış söz konusudur. Tüm elementler göllenme sonucu buharlaşmanın etkili olduğu 5 no.lu istasyonda oldukça yüksek derişimlere ulaşmaktadırlar (Şekil 8). Öte yandan, majör iyon derişimlerinden farklı olarak Afjet deşarjının akışaşağısında yer alan 6 ve 7 no.lu istasyonlarda iz element derişimleri düzensiz bir değişim göstermektedirler. Genel olarak As dışındaki elementlerin kurak dönem derişimlerinin yağışlı dönem derişimlerinden düşük olduğu gözlenmektedir. Bu durum, söz konusu elementlerin sucul fazdan çökme ve tutulma gibi süreçler sonucunda akarsudan ayrılmış olabileceğine işaret etmektedirler. As derişiminde gözlenen artışının ise pestisid içeren sulama dönüş sularının katkısı ile açıklanması olası görölmektedir.

Yağışlı dönemde olduğu gibi, kurak dönemde de akarsu boyunca gözlenen fosfat (PO_4) ve azot türevleri (NO_2 , NO_3 ve NH_3) derişimlerinin çoğunlukla 1 mg/l'nin altında olduğu gözlenmişlerdir. Bu bileşiklerin derişimi 6 no.lu istasyondan sonra Eber Gölü'ne doğru düzenli biçimde azalarak 0.25 mg/l dolayına kadar düşmüştür (bknz. Çizelge 1).



Şekil 8. Akarçay Nehri boyunca kurak dönem (Temmuz 1999) iz element kimyası.

Figure 8. Trace elements chemistry along the Akarçay Stream in the dry period (July 1999).

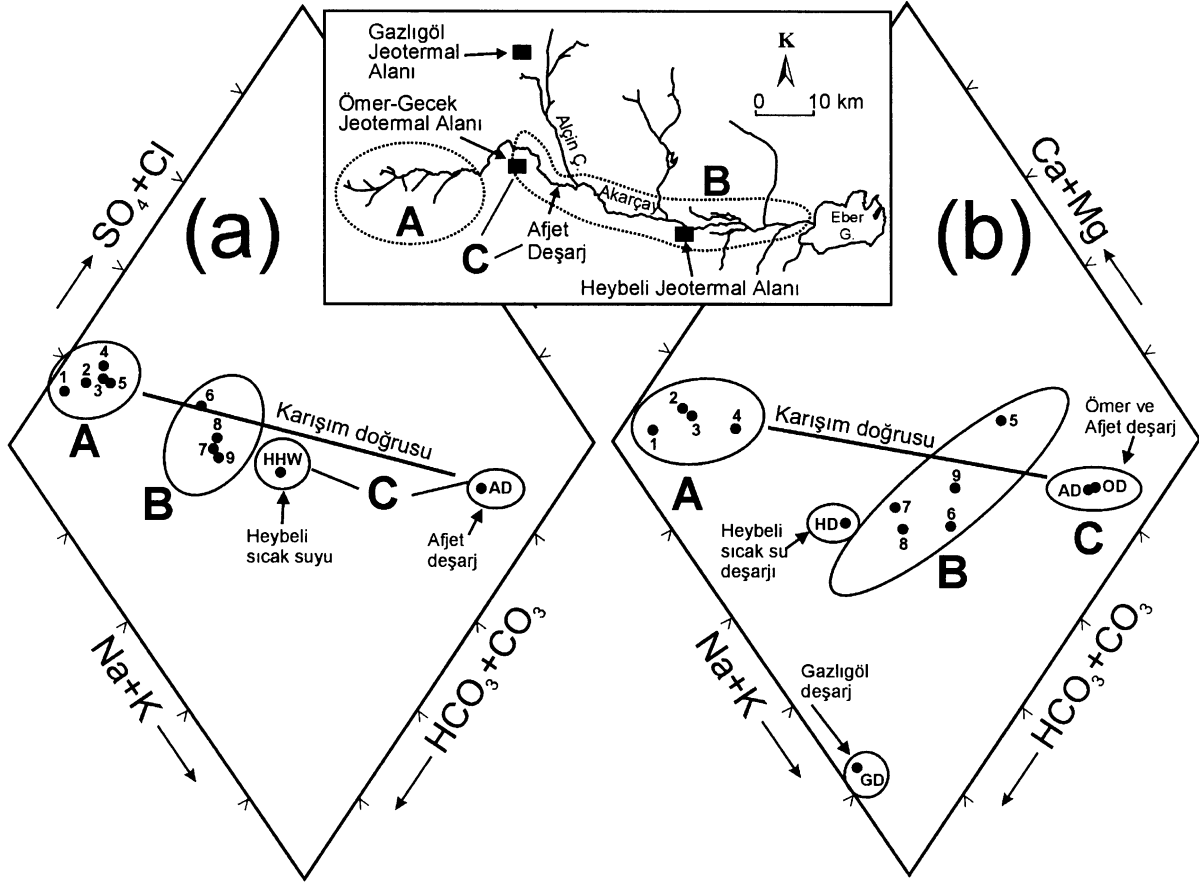
Majör İyon Derişimlerinin Yağışlı ve Kurak Dönemler Arasındaki Değişimi

Akarçay Nehri boyunca seçilen istasyonların majör iyon derişimleri üzerinde Afjet deşarj suyunun etkisi 1999 yılı yağışlı ve kurak dönemlerine ait Piper diyagramları üzerinde de görölmektedir (Şekil 9 a, b). Her iki dönemde de, akarsuyun Afjet deşarjı akışaşağısında kalan bölümüne ait suların, akışyukarı sular ile Afjet deşarj suyunu birleştiren korunumlu karışım doğrusu dolayında yer aldıkları görölmektedir. Yağışlı dönemde akarsuyun içerdığı tatlı su miktarının büyüklüğünden dolayı akışaşağı sular, tatlı sulara daha yakın konumda iken, kurak dönemde olasılıkla buharlaşmanın etkisi ile Afjet deşarjına daha yakın konumda bulunmaktadırlar.

Öte yandan akışaşağı suların her iki dönemde de karışım doğrusundan sapmalar gösterdiği ve bu sapmaların kurak dönemde daha fazla olduğu gözlenmektedir. Bu durum, akışyukarı su ile Afjet deşarjının karışmasından sonra karışım suyunun kimyasal kompozisyonunda çeşitli reaksiyonlara bağlı değişimlerin olduğuna işaret etmektedir. Söz konusu kompozisyon değişikliklerinde kurak dönemdeki akış süresince gerçekleşen buharlaşmanın yanı sıra, yağışlı dönemde yan dere katkılarının da etkili olması olası görölmektedir. Diğer yandan, iyon takası ve çökme gibi kimyasal süreçlerin de akarsu kimyasal kompozisyonunda değişime neden olması beklenen bir durumdur.

AKARÇAY NEHRİ SEDİMANLARINDA KATYON TAKAS KAPASİTESİ

Jeotermal kökenli deşarj sularının içerdığı kirliticilerin akarsu sedimanları tarafından iyon takası ile tutulması gelecekteki su kirliliği düzeyini etkileyen önemli ve yaygın kimyasal süreçtir. Sediman minerallerinin kristal hatalarına bağlı olarak oluşan elektriksel yük noktaları ile polar karakterli organik moleküllerin elektriksel çekim gücünden kaynaklanan bu süreç, Akarçay Nehri'nde gözlendiği gibi, bazik pH koşullarında katyon tutma şeklinde gelişmektedir. Katyon takas tepkimeleri saniye-dakika mertebesinde bir hızla sahip olduklarından, suyun içerdığı katyonlar kısa zamanda ve kabaca sudaki bollukları ile orantılı biçimde akarsu sedimanları tarafından tutulmaktadırlar. Bu durum, başlangıçta Na vb.



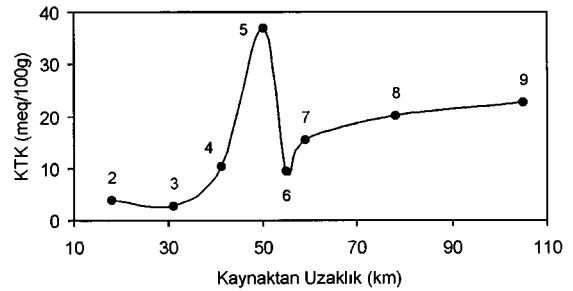
Şekil 9. Yağışlı (a) ve kurak (b) dönemlerde su örneklerinin Piper diyagramı üzerindeki dağılımı (A: Akarçay (Afjet akışyukarısı), B: Akarçay (Afjet akışaşağısı), C: Afjet deşarjı).

Figure 9. Distribution of wet (a) and dry period (b) water samples in Piper diagram (A: Akarçay (upstream of Afjet discharge), B: Akarçay (downstream of Afjet discharge), C: Afjet discharge).

kirletici nitelikteki katyonların akarsudan arındırılması gibi olumlu bir sonuca neden olmaktadır. Buna karşın, akarsuya kirletici girişinin kesilmesi durumunda ise, bu kez sedimanlar temiz su ile katyon takas dengesine ulaşmak için daha önce tuttıkları kirletici nitelikli katyonları suya salmaktadırlar. Sonuçta, akarsuya kirletici girişi kesilmiş olsa bile, geçmişte sedimanlarca tutulan kirletici katyonların suya geçişi ile kirlenme bir süre daha devam etmektedir. Söz konusu etkinin ne denli önemli olduğu ise, yatak sedimanlarının katyon takas kapasiteleri (KTK) ile orantılıdır. Bu nedenle, çalışma kapsamında Akarçay Nehri boyunca yatak sedimanlarının KTK'lerinin belirlenmesi gerekli görülmüştür.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar Akarçay Nehri yatak sedimanlarının KTK'nin 7.5

meq/100g sediman ile 40.9 meq/100g sediman arasında değiştiğini göstermiştir (Şekil 10). Sedimanların KTK değerleri genel olarak akışaşağıya doğru artış göstermektedir. KTK sedimanın

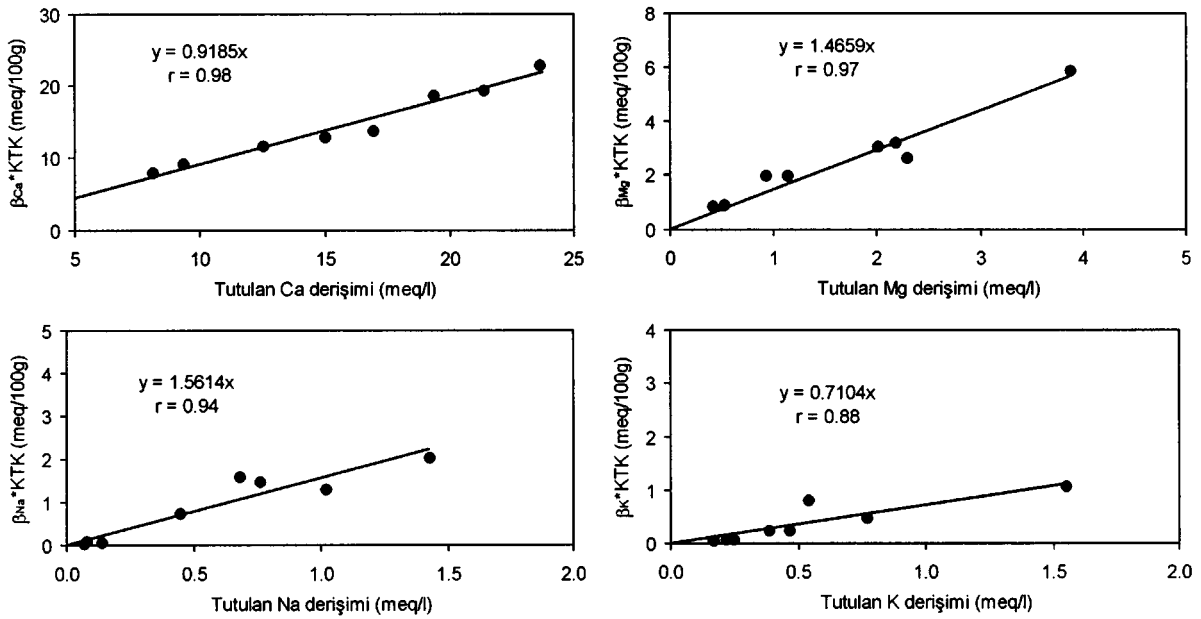


Şekil 10. Akarçay Nehri sedimanları KTK'lerinin yatak boyunca değişimi.

Figure 10. Variation of KTK values of the stream sediments along the Akarçay Stream bed.

yüzde kil ve organik madde içeriği ile doğru orantılı olduğundan, bu durumun havzanın uç kesimlerinde daha fazla killi malzeme birikiminden kaynaklanması makul görünmektedir. Ayrıca, KTK değerinin olasılıkla sedimanlardaki organik madde bolluğundan dolayı Afyon şehri akışyukarisında arttığı gözlenmiştir. Buna karşın, şehrin akışaşağısında 6 no.lu istasyonda gözlenen düşük KTK değerlerinin ise, bu kesimde akarsu yatağının yakın geçmişte ışlah edilmesine bağlı olarak killi malzeme miktarındaki azalma ile ilgili olduğu düşünölmektedir. Öte yandan, bir katyonun sudaki yüzde miktarına bağlı olarak sediman üzerinde sahip olması gereken yüzde miktarı β_{katyon} parametresi ile ifade edildiğinde, akarsu kompozisyonu ile katyon takas dengesine ulaşan sedimanlarda, $\text{KTK} \cdot \beta_{\text{katyon}}$ değerinin sediman üzerinde tutulan katyon miktarına (TKM) denk olması gerekmektedir. Akarçay Nehri sediman örneklerinde ölçölen TKM ile bu sedimanların $\text{KTK} \cdot \beta_{\text{katyon}}$ değerleri karşılaştırıldığında, akarsu boyunca her yerde su ile sedimanlar arasında katyon takas dengesinin olduğu anlaşılmaktadır (şekil 11). Su kompozisyonundan itibaren farklı katyonlar için β_{katyon} değerlerinin hesaplanmasına ilişkin ayrıntılar Appelo ve Postma (1994) tarafından verilmektedir.

Değişik kesitlerden alınan 28 adet örnek üzerinde yapılan deneyler sonucunda Akarçay Nehri yatak sedimanlarında ortalama gözenekliliğin (n) %35, ortalama yoğunluğun (d) ise 2.5 g/cm^3 olduğu saptanmıştır. Yatak sedimanlarının ortalama KTK değerlerinin 15 meq/100g , Afjet deşarjı akışaşağısından Eber Gölü'ne kadar uzanan yatak uzunluğunun (U) 50 km, ortalama yatak genişliğinin (g) 10 m ve ortalama yatak sedimanı kalınlığının (k) 25 cm olduğu varsayıldığında, söz konusu alanda toplam tutulan katyon (TTK) değerinin ($\text{TTK} = U \cdot g \cdot k \cdot d \cdot [1-n] \cdot \text{KTK}$) $3.05 \cdot 10^{10} \text{ meq}$ 'a ulaşabileceği anlaşılmaktadır. Diğer yandan, kurak dönem akarsu kimyasal kompozisyonu dikkate alındığında, Akarçay Nehri'nin Afjet deşarjı akışaşağısı bölümündeki sedimanların ortalama Na iyon miktarının (β_{Na}) 0.0965 düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Böylece bu sedimanlarda tutulan toplam Na elementi miktarının ($\text{TTK} \cdot \beta_{\text{Na}}$; $\text{TTK} = 3.05 \cdot 10^{10} \text{ mmol}$, $\beta_{\text{Na}} = 0.0965$) yaklaşık 68 ton ($= \text{TTK} \cdot \beta_{\text{Na}} \cdot 22.98 \text{ g/mol} \cdot 10^{-3} \text{ mol/mmol} \cdot 10^{-6} \text{ ton/g}$) olacağı anlaşılmaktadır. Öte yandan, bu sedimanların Afjet deşarjı suyu etkisi içermeyen, Akarçay Nehri akışyukarı su ($\beta_{\text{Na}} = 0.0643$) ile temas ederek katyon takas dengesine gelmesi durumunda ise, sedimanlar tarafından tutulabilecek Na elementi miktarı ise 45 ton olmaktadır. Diğer bir deyişle;



şekil 11. Akarçay Nehri sedimanlarında farklı katyonlar için $\beta_{\text{katyon}} \cdot \text{KTK}$ ve TKM değerlerinin karşılaştırılması.
Figure 11. Comparison of the $\beta_{\text{cation}} \cdot \text{KTK}$ and TKM values of the Akarçay streambed sediments for various cations.

Afjet suyu ile temas sonucu 68 ton Na elementi tutan akışaşağı yatak sedimanları, deşarjının kesilmesi durumunda akışyukarı su ile katyon takas dengesine ulaşacaktır. Yeni denge koşulları 45 ton Na elementi tutulmasına izin vereceğinden 23 ton Na akarsuya salınacaktır. Sedimanlardan salınacak kirletici katyonların yerel hidrojeolojik koşullara bağlı olarak düşey yönde doygun olmayan zona, ya da akarsu ile Eber Gölü'ne taşınacaklardır. Benzer süreçlerin Li, As, Fe, Mn vb. kirletici nitelikteki iz katyonlar için de gerçekleşmesi beklenen bir durumdur.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerek önceki çalışmalarda ve gerekse bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen gözlemler, Afjet Isıtma Sistemi deşarj suyunun günümüzdeki debisi (~125 l/sn) ve kimyasal derişimi ile Akarçay Nehri su ve yatak sedimanı kimyasal kalitesi üzerinde olumsuz etkilere neden olduğunu göstermektedir. Jeotermal atık suyun doğrudan akarsuya verilmesi sonucunda doğal koşullarda Ca-HCO₃ karakterinde olan su kompozisyonu Na-HCO₃ karakterine dönüşmektedir. Diğer yandan, doğal koşullarda oldukça düşük olan ağır metal ve iz element derişimleri de jeotermal su katkısına bağlı olarak belirgin biçimde artmaktadır. Gelecekte ısıtma sisteminde planlanan 625 l/sn'lik debiye ulaşılması ile söz konusu etkilerin boyutları da orantılı biçimde artacaktır. Bu durumda, söz konusu olumsuz etkilerin giderilmesine yönelik önlemlerin kısa sürede planlanması ve uygulanması gerekmektedir.

Afjet deşarj suyunun akarsu kompozisyonu üzerindeki olumsuz etkilerinin giderilmesi için çeşitli önlemlerin alınması mümkündür. Jeotermal deşarj suyunun akifere geri-basılması (re-enjeksiyon) çözüm seçeneklerinden birisini oluşturmaktadır. Diğer bir yaklaşım ise, kış aylarında depolanan deşarj suyunun yaz aylarında buharlaştırma yoluyla iyonlarından arındırılması olabilir. İyon takasına dayalı kimyasal arıtma sistemleri ile de kirletici bileşenlerin deşarj suyundan arındırılması mümkün görülmektedir. Gerek buharlaştırma ve gerekse kimyasal işlemlerle arındırma yoluyla Br, B, Li, As vb. gibi değerli elementlerin geri kazanılması ve gelir elde edilmesi de dikkate alınması gereken bir diğer seçenektir. Bu seçeneklerden hangilerinin ekonomik ve teknik açıdan uygulanabilir olduklarının belirlenmesi ise, kapsamlı araştırmaların yapılması

nı gerektirecektir. Tüm bu araştırmalar ve alınacak önlemler önemli boyutlarda harcamalar gerektirmekle birlikte, mevcut uygulamanın devam ettirilmesi halinde, yöredeki en önemli tatlı yüzey suyu kaynağı olan Eber Gölü'nün gelecekte ileri boyutlarda kirlenmesi kaçınılmaz olacaktır.

Geri-basma işlemleri jeotermal akiferin su ve ısı dengesinin korunması açısından da uygun bir seçenektir. Öte yandan, Afjet sistemi kuyularının işletmeye alınması ile birlikte bunların yakınlıklarında bulunan Uyuz ve Kızık Hamamları gibi kaynakların kuruması (Mutlu, 1996), jeotermal akiferde su bütçesinin de akışkan üretiminden olumsuz yönde etkilendiğine işaret etmektedir. Dolayısıyla, karbonat, ya da silis çökeliminden kaynaklanan sorunlar ve pompaj maliyeti gibi nedenlerle uygulanmasından kaçınılan geribasma işlemleri çevre koruması açısından olduğu kadar akiferin beslenmesi ve jeotermal ısıtma sisteminin sürdürülebilirliği açısından da önem taşımaktadır. Öte yandan, iyon takas sistemlerinin karmaşık düzenekler gerektirmesi, tutulan iyonların katı faza alınması ve takas sistemlerinin sıklıkla gençleştirilmesi (rejenerasyon) gibi uygulama güçlükleri bu yöntemin pratik olarak uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Jeotermal deşarj suyundaki iyonların (tuzların) kademeli buharlaştırma yoluyla çöktürülmesi ise, pratik olarak daha uygulanabilir bir seçenek olmakla birlikte, geniş buharlaştırma ve büyük hacimli deşarj suyu depolama tesislerine gereksinim duyulması gibi güçlükler içermektedir. Tüm bu güçlüklerle karşı, Afjet deşarj suyunun işletme dönemindeki ortalama debisi (125 l/sn) ve kimyasal bileşimi (örn.: Li=2.68 mg/l, B=10.64 mg/l, F=13.20 mg/l, Br=18.20 mg/l) dikkate alındığında, tesisin yılda 6 aylık işletimi ile jeotermal deşarj suyundan 5.2 ton Li (2.68 mg/l*6 ay*30 gün/ay*86400 sn/gün*125 l/sn*10⁻⁹ ton/mg = 5.2 ton), 20.7 ton B, 25.7 ton F ve 35.4 ton Br elementi üretilebileceği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, jeotermal deşarj suyundan aynı süre içinde 2190 ton Na eşdeğeri NaCl tuzu üretilmesi de mümkün görünmektedir. Geribasma vb. deşarj suyu uzaklaştırma seçeneklerinin ekonomik ve/veya teknik açıdan uygulanabilir olmaması durumunda, deşarj suyunun 100 km'lik bir kanal sistemi ile Akşehir Gölü'ne iletilmesi seçeneği de dikkate alınmalıdır. Terminal bir göl konumunda bulunan bu su kütlesi doğal koşullar altında da, yoğun buharlaşmaya bağlı olarak, tuzlu ve kullanılamaz özellikte su içermektedir. Bu-

nunla birlikte, Afjet deşarj suyu katkısının Akşehir Gölü sulak alanları üzerinde olumsuz bir etkiye neden olup olmayacağı da araştırılmalıdır.

KATKI BELİRTME

Birinci yazarın doktora tezi çalışmasının bir bölümünü içeren bu araştırma, "Akarçay (Afyon) Havzasında Jeotermal Kökenli Yüzeysuyu ve Yeraltısuyu Kirliliğinin Araştırılması" başlıklı, 01.T07.604.001 no.lu "Lisansüstü Öğrenim Araştırma Projesi" kapsamında Hacettepe Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından maddi olarak desteklenmiştir. DSİ Genel Müdürlüğü adına Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) tarafından yürütölen "Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltısuyu Akım Modeli" adlı proje çalışması kapsamında saha çalışmalarına lojistik destek sağlanmıştır. Yazarlar, yukarıda belirtilen kurum ve kuruluşlara teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) and WPCF (Water Pollution Control Federation), 1989. Standard Methods for the Analysis of Water and Waste Water. APHA publication, 17th Edition, Washington DC, 2005, 1133 pp.
- Appelo, C.A.J., and Postma, D., 1994. Geochemistry, Groundwater and Pollution. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 536 pp.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 1988. Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.08 Soil and Rock, Building, Stones; Geotextiles. 953 pp.
- Batık, H., Koçak, A., Akkuş, İ., Şimşek, Ş., Mertoğlu, O., Dokuz, İ., and Bakır, N., 2000. Geothermal energy utilisation development in Turkey (present geothermal situation and projections). Proceedings of the World Geothermal Congress, E. Iglesias, D. Blackwell, T. Hunt, J. Lund, S. Tamanyu and K. Kimbara (eds.), Kyushu-Tohoku, Japan, 85-91 pp, (CD-ROM).
- Beker, U.G., 1999. Treatment of geothermal wastewater by ion exchange method. Environmental Technology, 20 (4), 437-442.
- Birkle, P., and Merkel, B., 2000. Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufers, Michoacan-Mexico. Water Air and Soil Pollution, 124 (3-4), 371-410.
- Doğdu, M.Ş., 2001. Akarçay (Afyon) Havzası'nda jeotermal kökenli yüzeysuyu ve yeraltısuyu kirliliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 143 s (yayımlanmamış).
- Erişen, B., Akkuş, İ., Uygur, N. ve Koçak, A., 1996. Türkiye Jeotermal Envanteri. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 480 s.
- Loppi, S., 2001. Environmental distribution of mercury and other trace elements in the geothermal area of Bagnore (Mt. Amiata, Italy). Chemosphere, 45, 991-995.
- Lund, J.W., and Freeston, D.H., 2000. World-wide direct uses of geothermal energy 2000. Proceedings of the World Geothermal Congress, E. Iglesias, D. Blackwell, T. Hunt, J. Lund, S. Tamanyu and K. Kimbara (eds.), Kyushu-Tohoku, Japan, 1-21 pp, (CD-ROM).
- Mutlu, H., 1996. Geochemical assessment of thermal waters from the Afyon Geothermal Area: geothermometry applications and fluid-mineral equilibria. Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 169 pp (unpublished).
- Şimşek, Ş., 2002. Kişisel görüşme. Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hidrojeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Beytepe, 06532, Ankara.
- Tezcan, L., 2001. Kişisel görüşme. Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hidrojeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Beytepe, 06532, Ankara.
- USDA (United States Department of Agriculture), 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Natural States Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Washington, D.C., Soil Investigation Report No: 42, Version 3.0, 693 pp.
- Webster, J.G., 1999. The source of arsenic (and other elements) in the Marble-Matingao River Catchment, Mindanao-Philippines. Geothermics, 28 (1), 95-111.
- Yılmaz, Ö., 1999. Jeotermal Enerji ve Afyon'da Kullanımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi Yayınları, 93 s.



Akarçay Havzası'nda (Afyon) jeotermal kökenli kirlenme: 2. yeraltısuyu kirliliği

*Pollution of geothermal origin in the Akarçay Basin (Afyon, Turkey):
2. groundwater pollution*

Müfit Ş. DOĞDU, C. Serdar BAYARI

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

ÖZ

Jeotermal kökenli yeraltısuları pek çok element açısından sağlığa ve çevreye zararlı derişime sahiptirler. Bu suların termal su akiferinden sızma, ya da termal su üretim kuyularından oluşan yeraltı kaçakları nedeniyle soğuk su akiferine karışması sulama ve içme kullanma suyu kalitesi açısından kirlenmeye neden olmaktadır. Bu çalışmada, Afyon-Akarçay Havzası'nda Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli jeotermal alanlarını kapsayan bölgedeki soğuk yeraltısuları jeotermal kökenli kirlenme açısından incelenmiştir. Hidrokimyasal değerlendirmeler, termal suların Na-Cl, soğuk sularının ise Ca-HCO₃ karakterli olduğunu göstermektedir. Termal su karışımının göstergesi olarak kullanılan Na+K, Cl, Li, B, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik parametrelerinin alansal dağılımı soğuk yeraltısuyundaki kirlenmenin jeotermal alanlara yakınlık ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Az sayıdaki tatlı yeraltısuyu üretim kuyusunda sulama, içme ve kullanma suyu kriterleri açısından jeotermal su katkısına bağlı kirlenmenin oluştuğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Afyon-Akarçay, jeotermal, termal su, soğuk su, su kalitesi.

ABSTRACT

Geothermal groundwaters usually possess high concentrations of many elements that are potentially hazardous in terms of environmental pollution and public health. These waters may contaminate and eventually pollute the fresh and cool groundwaters upon seepage from thermal water aquifer or from the casing failures of production wells. In this study, pollution of cool groundwater due to geothermal contribution was investigated in the area comprising Ömer-Göcek, Gazlıgöl and Heybeli geothermal fields. Thermal and cool groundwaters are characterized by Na-Cl and Ca-HCO₃ facies, respectively. Spatial distribution of Na+K, Cl, Li, B, temperature and electrical conductivity, which were taken as the indicator of geothermal contribution, revealed that the pollution in cool groundwater was correlated with its proximity to the geothermal fields. A few cool groundwater wells possess apparent degradation in terms of irrigation, drinking and potable water quality criteria.

Key words: Afyon-Akarçay, geothermal, thermal water, cool water, water quality.

GİRİŞ

Alp-Himalaya dağ oluşum kuşağı üzerinde bulunan Türkiye'de aktif tektonizmanın bir sonucu olarak termal su kaynakları oldukça geniş bir yayılıma sahiptirler. Erişen vd. (1996) tarafından gerçekleştirilen bir envanter çalışmasının sonuç-

larına göre Türkiye'de sıcaklığı 30°C'nin üzerinde bulunan termal su kaynakları 49 ilde, 149 jeotermal alanda yayılım göstermektedirler. Daha güncel bir çalışmada ise, mevcut jeotermal alanlarının sayısının 170'e ulaştığı belirtilmektedir (Batık vd., 2000). Bu sular; genellikle termal su tedavisinde kullanılmakta olup, son yıllarda mer-

kezi ısıtma, elektrik ve karbondioksit üretimi vb. amaçlarla da kullanılmaktadırlar. Tüm termal sular, kısmen magmatik kökenli, büyük oranda ise uzun süreli yeraltı dolaşımına sahip meteorik suların yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında mineraller ile uzun süre temas etmelerinin bir sonucu olarak yüksek element derişimlerine sahiptirler. Termal sularca içerilen elementler, çevre ve insan sağlığı açısından hemen her zaman sınırlı değerlerin üzerinde derişimlere sahiptirler. Yerel jeolojik yapının bir sonucu olarak doğal yollarla, ya da sıg ve derin sondajlar aracılığı ile yüzeye çıkan bu sular yer kabuğu içerisindeki yükselimleri sırasında değerli ve sınırlı bir kaynak olan tatlı yeraltısularına karışarak bunları kirletmektedirler. Öte yandan, Türkiye'deki tatlı yeraltısuyu kaynaklarının gerek iklimdeki kuraklaşma ve gerekse plansız ve aşırı çekim nedeniyle hızla tüketilmekte ve tarımsal, endüstriyel ve yaşamsal faaliyetlere bağlı olarak gittikçe artan hızda kirletilmekte olduğu da gözlenmektedir. Bu durumda, Türkiye'deki termal su kaynaklarının geniş yayılımı da dikkate alındığında, bunların tatlı yeraltısuyu üzerindeki kirletici etkilerinin özenle araştırılmasının öncelikli bir sorun olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmaya konu olan Akarçay (Afyon) Havzası'ndaki Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli jeotermal alanlarındaki sular çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bölgede doğal yollarla yüzeye ulaşan termal suların yanı sıra, özellikle Afyon şehrinin ısıtılması ve kaplıcalara su temini amacıyla yoğun olarak yapay termal su üretimi de yapılmaktadır. Aynı zamanda sulama amacıyla yeraltısuyu kullanımının da yaygın olduğu bu alanda termal yeraltısuyu kökenli kirleticilerin tatlı yeraltısuyu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu makalede, ayrıntısı Doğdu (2001) tarafından belirtilen etkiler kısa ve öz olarak sunulmuştur. Termal suların havzayı drene eden ana akarsu olan Akarçay Nehri üzerindeki etkileri ise, diğer bir çalışmada (Doğdu ve Bayarı, 2002) ele alınmıştır.

İNCELEME ALANININ KONUMU, JEOLÖJİK VE HİDROJEOLÖJİK YAPISI

İnceleme Alanının Konumu

İnceleme alanı; 30°-32° doğu boylamları ile 38°-39° kuzey enlemleri arasında, 7300 km²lik dre-

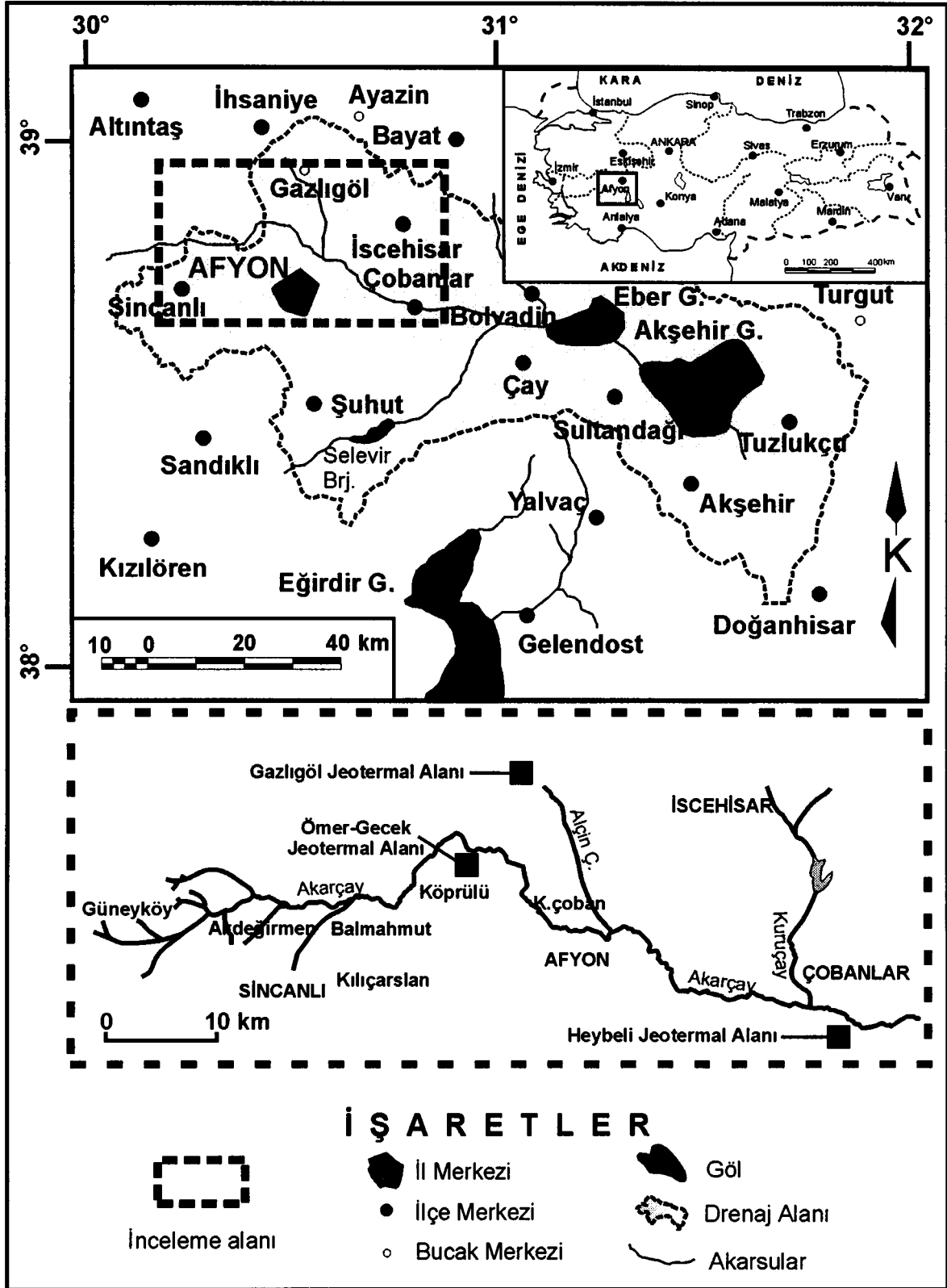
naj alanına sahip Akarçay Havzası'nın batısında yer alan Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli jeotermal alanları ve dolayını kapsamaktadır. Akarçay kapalı havzasını doğuda yer alan Eber ve akışaşağısındaki Akşehir Gölü'ne drene eden Akarçay Nehri kabaca batıdan doğuya uzanarak çalışma alanından geçmektedir (Şekil 1).

Jeoloji

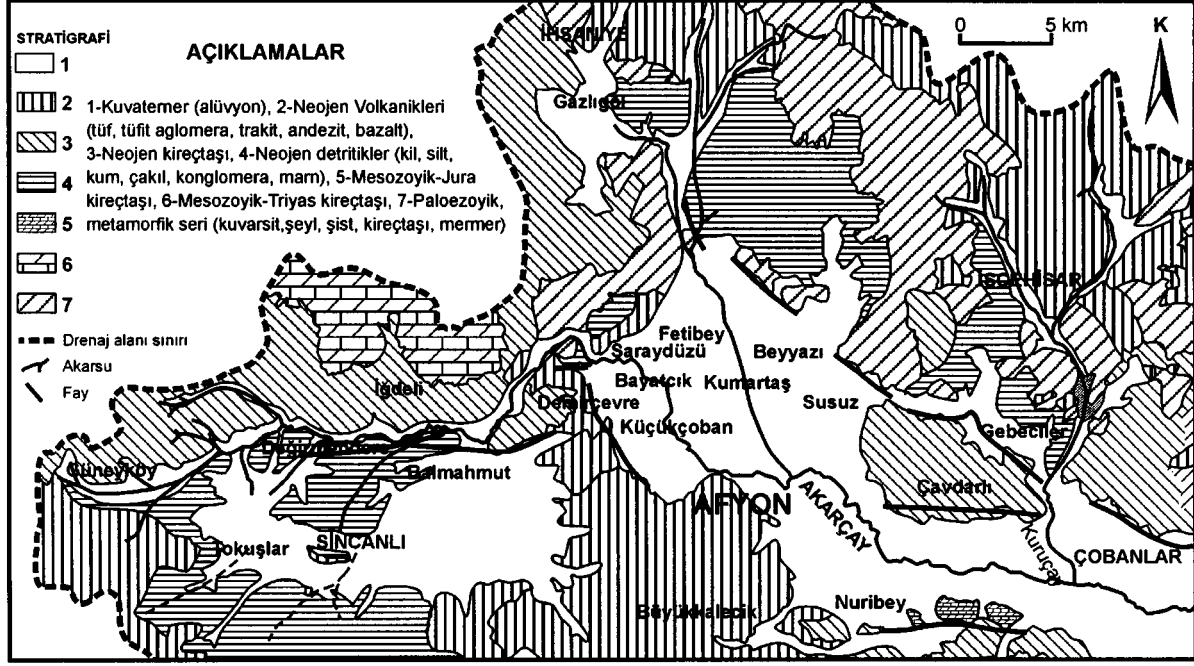
Havzanın jeolojisi DSİ ve MTA Genel Müdürlüğü'nce yapılan incelemeler ile ayrıntılı biçimde çalışılmış (Demirkol vd., 1977; DSİ, 1977; Metin vd., 1987, 1988; Umut vd., 1987; Öztürk vd., 1987); bölgesel jeolojik yapıya ilişkin ayrıntılı ve güncel bir derleme ise Tezcan (1998) tarafından hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan formasyon adları Metin vd. (1987;1988)'den alınmıştır.

Akarçay Havzası'ndaki jeolojik birimleri genel olarak 4 grup altında toplanabilir. İlk grup, inceleme alanının dışında, havzanın güney-güneydoğusunda geniş alanlar kaplayan Paleozoyik yaşlı metamorfik birimler (kuvarsit, şeyl, şist, kristalize kireçtaşı, mermer, (Şekil 2; 7 no.lu birim)) ile Mesozoyik yaşlı kireçtaşlarını (Şekil 2; 6 no.lu birim) içeren Toros kuşağından (Sultandağ kesimi) oluşmaktadır. İkinci grup ise inceleme alanının kuzey ve kuzeybatısında, havzanın kuzeybatı, kuzey ve kuzeydoğusunda yayılım gösteren İç Toros kuşağı (Afyon kesimi) olup, Paleozoyik (mermer, metakonglomera, kireçtaşı, kuvarsit - Şekil 2; 7 no.lu birim), Mesozoyik (kireçtaşı, konglomera, kumtaşı, silttaşı - Şekil 2; 5 ve 6 no.lu birimler) ve Senozoyik yaşlı (killi kireçtaşı, konglomera-kumtaşı-silttaşı ve marn - Şekil 2; 3, 4 ve 5 no.lu birimler) birimlerinden oluşmaktadır. Üçüncü grubu oluşturan volkanik kayalar (Şekil 2; 2 no.lu birim), Afyon'un güney ve güneybatı ve kuzeydoğusundaki alanlarda gözlenen tüf, aglomera, andezit, trakit, trakiandezit ve bazaltları içermektedir. Dördüncü grup olarak, kum, çakıl ve kil gibi kırıntılı malzemeden oluşan Kuvaterner'e ait birimler (Şekil 2; 1 no.lu birim) ise, havzanın orta bölümlerinde batıdan doğuya geniş alanlar kaplamaktadır.

Gerek bölgesel jeolojik araştırmalar ve gerekse derin termal su sondajlarından elde edilen verilere göre bu çalışmaya konu olan Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli jeotermal alanlarını kapsayan bölgede jeolojik istif tabanda Paleozoyik



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.
Figure 1. Location map of the study area.



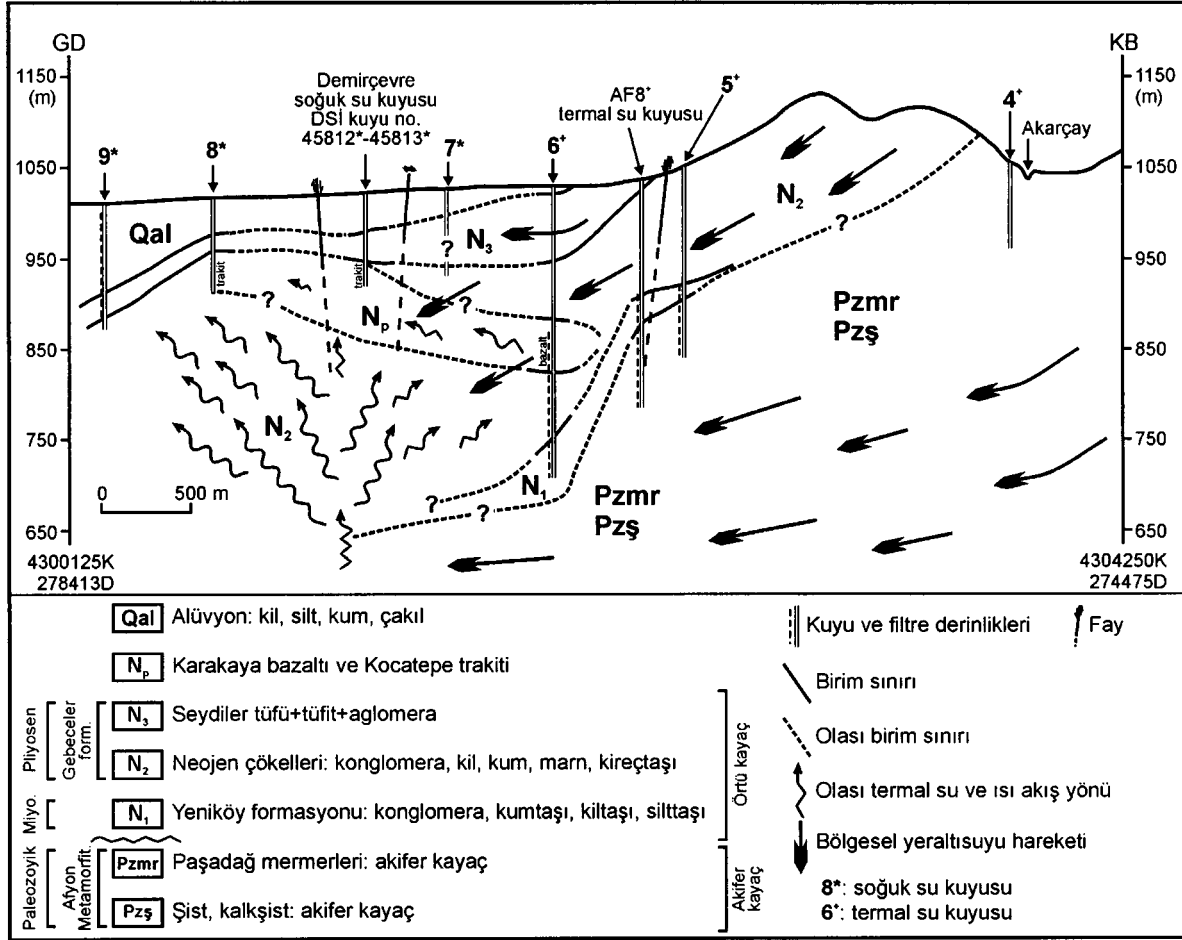
Şekil 2. İnceleme alanına ait jeoloji haritası (Tezcan, 1999'dan basitleştirilmiştir).
Figure 2. Geological map of the study area (simplified from Tezcan, 1999).

yaşlı Paşadağ Mermerleri ve bunlarla yer yer geçişli olan, çoğunlukla altta bulunan metamorfik şistler ile başlamaktadır. Kalınlığı 50-300 m arasında değişen ve erime boşlukları da içeren mermerler üzerinde Miyosen-Pliyosen yaşlı kil, silt, kum, killikum, kumtaşı, killi kireçtaşı ve konglomeraları içeren çökeller uyumsuz olarak yer almaktadır (Mutlu, 1996). Gecek hamamı kuzeybatısında yüzeylenen ve mermerlerin hemen üzerinde yer alan 35-40 m kalınlıktaki kırmızı konglomera sondajlarda termal su akiferine geçişi gösteren kılavuz seviyeyi oluşturmaktadır (Öktü vd., 1997). Konglomeralar üzerinde ortalama kalınlığı 50 m olan killi kireçtaşı-kumtaşı birimi yer almaktadır. Bu birimlerin üzerinde ise, Ömer-Gecek jeotermal alanının kuzeydoğusunda yüzeylenen ve Neojen çökellerinin en üst seviyesini oluşturan zayıf tutturulmuş konglomera ve breş birimleri bulunmaktadır. Çalışma alanında geç Miyosen-Pliyosen aralığındaki volkanik aktivitenin ürünü olan tuf, aglomera, andezit, trakit, trakiandezit ve bazalt birimleri de yer almaktadır. Karakaya Bazaltı ve Kocatepe Trakiti alttaki tüm birimleri kesmektedirler (Mutlu, 1996). Kuvaterner yaşlı kil, kum, çakıl gibi çökeltilerden oluşan alüvyon ise, akarsu yatakları çevresinde ve havzanın doğusunda geniş alanlar

kaplamaktadır. Halen oluşumu devam etmekte olan traverten çökelleri ise Ömer-Gecek alanının batısında yüzeylenmektedir.

Hidrojeoloji

Çalışma alanında açılan hemen her sondajda kesilen Paşadağ Mermerleri (Pzmr) ve şistler (Pzş) jeotermal sisteminin ana akifer kayacını oluşturmaktadır (Şekil 3). Ayrıca, temel kayaların yüzeye yakın olduğu kuzeybatı bölgesindeki alüvyon örtünün konglomera ve kumtaşı seviyeleri de nispeten düşük sıcaklıklı suları içerebilmektedir (Tamgaç vd., 2000). Jeotermal akiferin örtü kayacını Miyosen yaşlı Yeniköy formasyonu içerisinde bulunan kilitaşı-silttaşı seviyeleri, daha üstte yer alan Pliyosen yaşlı kil ve marn birimlerini de içeren Gebeceler formasyonu ile alüvyon içerisindeki killi-siltli seviyeler oluşturmaktadır. Çalışma alanına ait genelleştirilmiş yeraltısuyu dolaşım modeline göre (bkz. Şekil 3) termal su kuyuları Paleozoyik yaşlı mermer ve şistlerden beslenmekte, bu birimin üzerinde yer alan Neojen yaşlı seriler ise, örtü kayacını oluşturmaktadır. Öte yandan, örtü kayacını Paleozoyik yaşlı birimlere yaklaştığı derinliklere inen kuyulardan da (örn.: 6 no.lu 320 m derinlikteki

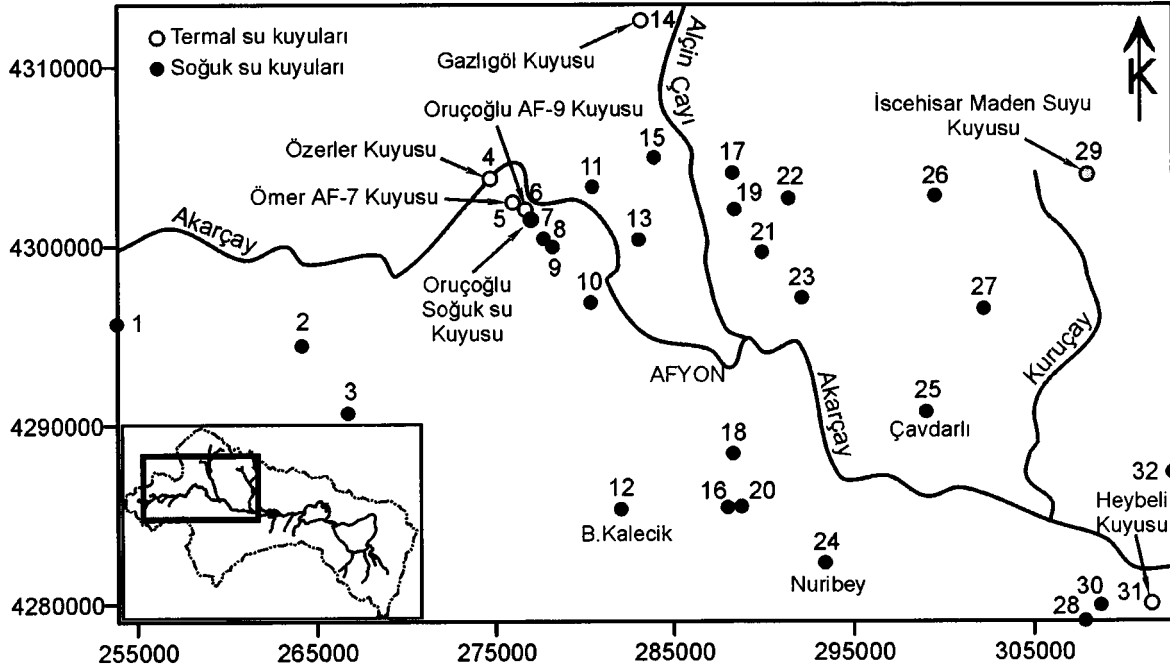


Şekil 3. Ömer-Gecek jeotermal alanı yakın civarına ait genelleştirilmiş yeraltısuyu dolaşım modeli.
Figure 3. The generalized groundwater circulation model of Ömer-Gecek geothermal area and its vicinity.

AF9 kuyusu, bkz. Şekil 3) termal su üretimi yapılabilmektedir. Ovardaki soğuk su kuyuları ise, alüvyonun yanı sıra, Neojen yaşlı serinin kumlu, çakıllı bölümlerinden su almaktadırlar. Gerek soğuk su, gerekse termal su akiferlerinin beslenimi ovayı çevreleyen yükseltilerde yer alan jeolojik birimlerin su iletme yetisi yüksek bölümlerince sağlanmaktadır. Alüvyon akiferin üst seviyelerinin hidrolik iletkenliği düşük olan malzemeden oluşması nedeniyle yüzeyden beslenim pratik olarak mümkün görülmemektedir (Tezcan, 2001). Diğer yandan, ileriki bölümlerde açıklandığı gibi, termal su kuyuları civarında yer alan soğuk su kuyularının bir bölümüne termal su katkısının olduğu fiziksel ve kimyasal parametre değerlerinden anlaşılmaktadır. Bu konuyla ilgili ayrıntılı değerlendirmeler Doğdu (2001) tarafından verilmiştir.

VERİLER VE YÖNTEM

İnceleme kapsamında termal yeraltısularının tatlı yeraltısuları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla Afyon-K24 ve Afyon-K25 1/100000 ölçekli topoğrafik paftaları içinde, $255^{000}_3 10^{000}$ (UTM) doğu boylamları ile $4280^{000}_4 315^{000}$ kuzey enlemleri arasında yer alan, MTA, DSİ ve özel sektör tarafından açılmış bulunan 32 adet termal ve soğuk su kuyusundan alınan örneklerden elde edilen veriler değerlendirilmiştir (Şekil 4). Soğuk yeraltısularından yağışlı dönemde çekim yapılmaması nedeniyle inceleme kurak dönem (Temmuz 1999) verileri ile sınırlı tutulmuştur. Bununla birlikte, yeraltısuyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yıl içinde önemli değişim gösterme eğiliminden dolayı kurak döneme ait kimyasal değerlendirmelerin genel durumu güvenilir sınırlar içinde temsil ettiği düşünülmektedir.



Şekil 4. Yeraltısuyu örnekleme noktaları.
Figure 4. Groundwater sampling points.

Çalışma kapsamında sıcaklık, elektriksel iletkenlik (Eİ), pH ve çözülmüş oksijen (ÇO) ölçümleri kuyu başında yapılmış ve kimyasal analiz amaçlı örnekler polietilen şişelere alınmıştır. Ölçüm, örnekleme, örnek koruma ve analiz aşamalarında APHA vd. (1989) tarafından verilen standart yöntemler kullanılmıştır. Tüm örneklerde analiz kalitesi açısından anyon-kasyon dengesinin $\pm\%5$ 'ten iyi olduğu belirlenmiştir. Örneklerle ait majör iyon, iz element (Fe, Li, B, Br, As), N türevi (NO_2 , NO_3 , NH_3) derişimleri ile yerinde ölçüm sonuçları (sıcaklık, Eİ ve ÇO) ve hesaplanan yüzde Na (%Na) ve sodyum adsorpsiyon oranı (SAO) değerleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

HİDROKİMYASAL FASİYESLER

Alandaki termal yeraltısuları yüksek Na, Cl ve Eİ değerleri ile tipik olup, bu parametrelerin en küçük ve en büyük değerleri sırasıyla 20.62-65.25 meq-Na/l, 5.00-53.00 meq-Cl/l ve 3596-7186 mikroS/cm olarak belirlenmiştir (bknz. Çizelge 1). Bu durumun tersine, termal su karışımından etkilenmeyen soğuk yeraltısuları ise, düşük Na, Cl ve EC, yüksek Ca, HCO_3 + CO_3 değerleri ile karakteristiktir. Bu sularda söz konusu parametreler açısından en küçük ve en büyük değerler

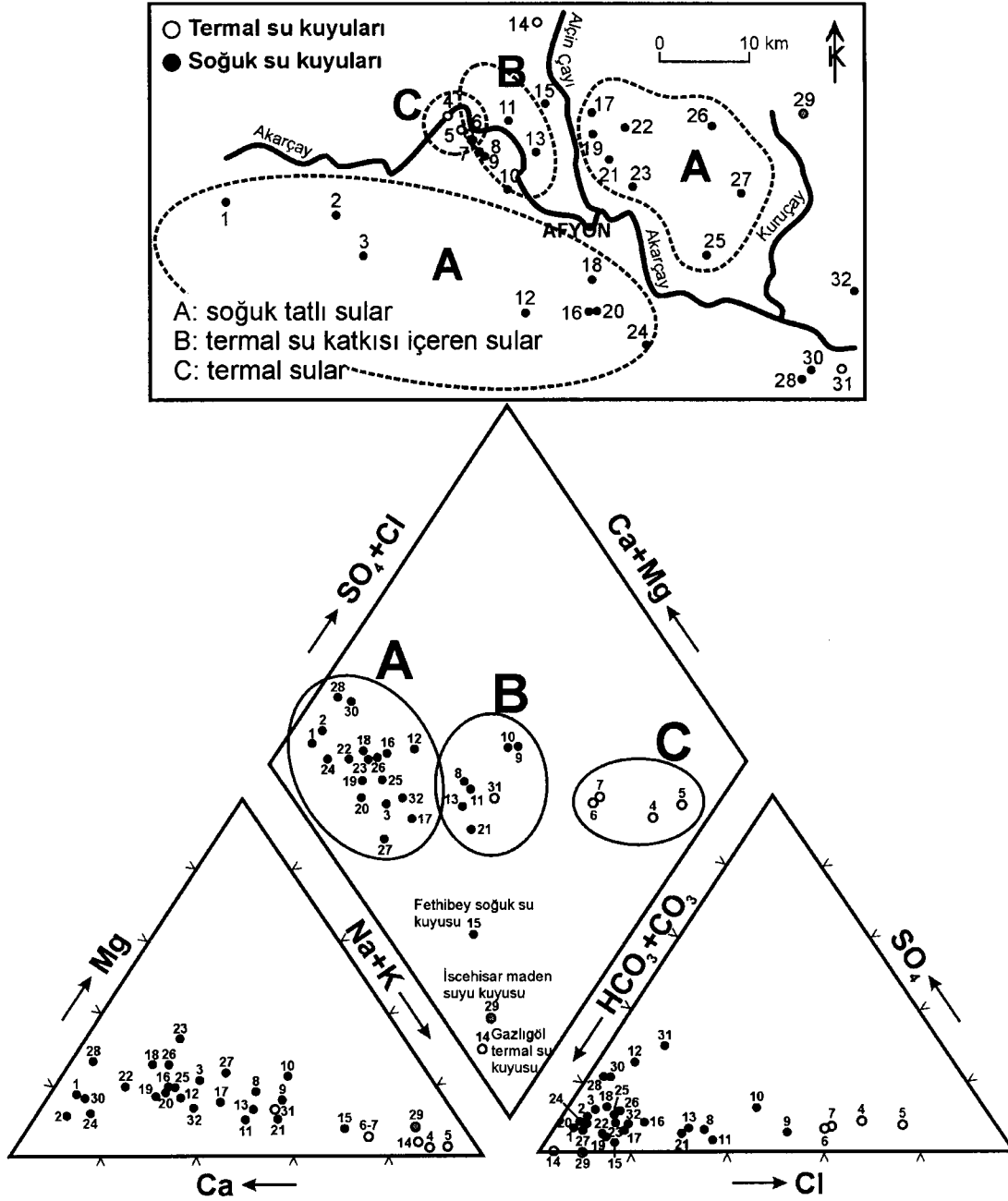
ise sırasıyla 0.22-6.45 meq-Na/l, 0.15-1.45 meq-Cl/l, 1.02-7.19 meq-Ca/l, 1.31-9.44 meq- HCO_3 + CO_3 /l ve 202-1357 mikroS/cm olarak belirlenmiştir (bknz. Çizelge 1). Termal su karışımından etkilenen soğuk yeraltısularında ise bu parametrelerin 2.28-26.5 meq-Na/l, 1.75-22.00 meq-Cl/l, 604-3634 mikroS/cm şeklinde ara değerler aldıkları görülmektedir.

Su örneklerinin majör iyon derişimlerine bağlı olarak Piper diyagramı üzerinde buldukları konulardan termal yeraltısularının Na-Cl (Şekil 5, C bölgesi), soğuk yeraltısularının ise Ca- CO_3 (Şekil 5, A bölgesi) fasiyes tipinde oldukları anlaşılmaktadır. Termal su karışımından etkilenen diğer soğuk yeraltısuları ise, etkilenme derecelerine bağlı olarak, bu iki fasiyes arasında farklı konumlar da yer aldıkları görülmektedir (Şekil 5, B bölgesi). Na-Cl fasiyesi ile karakteristik olan termal yeraltısuları, derin termal su sondajlarının ve kaynaklarının yoğun olarak bulunduğu Ömer-Gecek bölgesinde yer almaktadırlar. Öte yandan, Ca- CO_3 fasiyesi ile tipik olan soğuk yeraltısuları Akarçay'ın güneyi ile kuzeyde Alçın Çayı ve Kuruçay akarsuları arasında kalan bölümde yayılım göstermektedirler. Alçın Çayı'nın batısında, Ömer-Gecek bölgesine doğru uza-

Çizelge 1. Termal ve soğuk su kuyularına ait fiziksel ve kimyasal parametreler.
Table 1. Physical and chemical parameters of the thermal and cool water wells.

Örnek Numarası ve Örnekleme Yeri	Koordinat		El	ÇÖ		Derişim (meq/l)										Derişim (mg/l)					Kuyu Derinliği (m)	Filtre Derinliği ve Litoloji							
	Enlem	Boylam		°C	(µS/cm)	pH	Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	SAR*	%Na ⁺	%NH ₄ ⁺	NO ₂ -N	NO ₃ -N	Fe			Li	B	Br	Mn	Al	I	As
1 Tokaşlar (DSI kuyu no:50544) ^P	253935	4295617	11.9	568	7.30	6.07	0.22	0.14	4.32	0.99	5.14	0.35	0.36	0.1	3.8	0.868	0.164	0.048	0.000	0.303	0.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	140	50-135, çakıl
2 Kupağbükük (DSI kuyu no:11254) ^P	284211	4294366	10.6	692	7.24	8.56	0.35	0.10	5.64	0.82	5.84	0.45	0.73	0.2	5.0	1.256	0.034	0.000	0.000	0.383	0.367	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	175	kum-çakıl	
3 Ahnepsaş (DSI kuyu no:22312) ^P	266767	4290591	14.2	365	7.24	3.49	0.97	0.20	1.90	0.82	2.99	0.25	0.47	0.8	25.0	0.315	0.019	0.105	0.020	0.177	0.267	0.000	0.000	0.000	0.010	0.014	150	çakıl-tüf	
4 Öster termal su kuyusu ^P	274750	4303710	65.0	5668	6.56	1.48	51.33	2.35	6.04	1.23	16.54	38.00	5.44	26.9	84.2	-	4.264	2.090	5.830	6.650	0.089	0.410	0.111	0.178	75	veri yok			
5 Öner AF-7 termal su kuyusu ^A	276060	4302390	92.0	7186	7.61	1.85	65.25	3.10	5.09	1.32	14.95	53.00	5.86	36.5	87.3	-	0.126	2.450	8.838	9.320	0.018	0.000	0.000	0.151	0.176	210	152, mermer-şist-konglomera		
6 Onuçoğlu AF-9 termal su kuyusu ^P	276760	4302010	48.0	4299	6.18	1.56	31.41	1.46	9.61	2.63	16.63	26.00	3.29	12.7	69.6	-	3.398	1.220	2.696	5.560	0.416	0.000	0.069	0.176	320	185, bazalt-kumtaşı-konglomera			
7 Onuçoğlu kuyusu ^P	277020	4301410	25.8	3634	5.98	3.53	26.54	1.34	7.86	2.47	13.31	22.00	2.87	11.7	69.5	0.203	0.008	0.162	0.980	0.892	4.500	0.048	0.000	0.048	0.170	vy	vy		
8 Demirçevre (DSI kuyu no:45810) ^P	277797	4300347	19.2	604	6.50	5.69	2.28	0.19	2.22	1.03	3.46	1.75	0.42	1.8	39.8	2.727	0.005	0.218	0.080	-	0.483	0.018	0.000	0.014	0.058	100	30-100, çakıl-tüf-trakit		
9 Sadırbey (DSI kuyu no:31882) ^P	278293	4299920	24.0	1704	6.45	5.15	5.00	0.32	3.64	1.65	4.58	5.20	0.55	3.1	47.1	0.394	0.419	2.361	0.150	-	1.510	0.068	0.610	0.022	0.073	134	40-90, çakıl-aglomera		
10 DSI tesis. kuyu (DSI kuyu no:34230) ^P	280400	4296800	22.3	1327	7.16	5.28	8.13	0.31	5.34	3.74	8.22	7.00	2.09	3.8	46.4	0.125	0.218	1.346	0.240	-	2.750	0.437	0.000	0.105	0.062	532	28-60, çakıl, 155-222 çakıl		
11 Saraydızu (DSI kuyu no:34429) ^P	280520	4303270	14.8	1039	6.96	5.71	4.22	0.32	4.49	0.95	6.17	3.55	0.42	2.6	42.3	0.632	0.010	0.058	0.180	-	0.935	0.000	0.000	0.018	0.047	80	20-75, çakıl		
12 Büyükkalecik (DSI kuyu no:53026B) ^P	282086	4285243	14.9	202	7.78	3.08	0.52	0.04	1.02	0.33	1.31	0.15	0.49	0.6	27.1	0.064	0.000	0.062	0.020	-	0.178	0.008	0.000	0.029	0.014	193	25-190, çakıl-trakit		
13 Bayatçık (DSI kuyu no:42670) ^P	283105	4300299	11.8	1178	7.33	5.72	4.89	0.35	4.72	1.48	7.19	3.10	0.70	2.8	42.8	0.237	0.959	0.058	0.230	-	1.030	0.014	0.000	0.015	0.042	85	23-80, çakıl		
14 Gazlıoğlu termal su kuyusu (G1) ^A	283300	4312520	65.0	3872	7.20	1.94	39.72	1.98	5.61	2.06	47.65	0.95	0.08	20.3	80.4	0.147	1.869	0.323	2.850	10.24	0.918	0.089	0.000	0.029	0.011	138	kuvarsit-kalkçışt		
15 Fethibey (DSI kuyu no:30513) ^P	283946	4304825	14.1	974	7.34	5.9	6.45	0.33	2.69	0.82	8.74	1.45	0.36	4.9	62.6	0.798	0.030	0.000	0.270	0.588	0.550	0.020	0.000	0.014	0.012	80	30-75, kum-çakıl		
16 Suğın (DSI kuyu no:47854B) ^P	288055	4285364	17.5	252	7.05	6.6	0.52	0.19	1.65	0.58	2.24	0.80	0.25	0.5	17.8	0.263	0.875	0.288	0.000	-	2.204	0.019	0.000	0.006	0.025	190	50-185, çakıl-kum		
17 Çayırbağ (DSI kuyu no:33039) ^P	288348	4304051	15.2	597	6.98	6.22	2.02	0.14	2.79	0.91	4.67	0.95	0.35	1.5	34.5	1.006	0.026	0.120	0.090	-	0.379	0.011	0.000	0.014	0.007	85	40-80, çakıl		
18 Alaköy (DSI kuyu no:15947) ^P	288358	4288384	14.0	346	7.20	6.68	0.49	0.17	2.02	0.91	2.85	0.30	0.45	0.4	13.6	0.501	0.824	0.016	0.000	-	0.194	0.012	0.000	0.007	0.009	205	30-187, kum-çakıl-tüf		
19 Kumartaş (DSI kuyu no:40939) ^P	288463	4301975	15.1	537	7.30	7.02	1.17	0.08	3.19	0.91	4.39	0.85	0.27	0.8	22.0	0.083	0.097	0.584	0.020	-	2.235	0.035	0.760	0.013	0.008	86	20-80, çakıl		
20 Salar (DSI kuyu no:36442) ^P	288800	4285397	19.4	276	6.93	4.07	0.50	0.22	1.82	0.58	2.82	0.25	0.23	0.5	16.1	0.344	0.740	0.053	0.000	-	0.138	0.011	0.000	0.006	0.025	111	40-105, trakit, kum		
21 Beyyaz (DSI kuyu no:13324) ^P	289997	4299963	15.9	1683	6.45	4.19	7.53	0.47	6.04	1.56	10.28	4.10	0.65	3.9	48.2	0.932	0.952	0.023	0.380	1.063	1.150	0.031	0.000	0.017	0.011	187	60-140, çakıl		
22 Beyyaz (DSI kuyu no:51980) ^P	291448	4302607	14.9	518	7.79	7.02	0.69	0.04	3.17	0.99	3.74	0.50	0.28	0.5	14.1	1.056	1.428	0.965	0.020	-	0.169	0.042	1.300	0.010	0.006	110	32-95, çakıl		
23 Susuz (DSI kuyu no:49179) ^P	292171	4297021	16.5	577	7.36	9.02	1.04	0.12	2.74	1.89	4.39	0.85	0.51	0.7	17.9	0.893	0.749	1.192	0.040	-	0.268	0.060	1.750	0.030	0.015	158	40-152, çakıl		
24 Nuribey (DSI kuyu no:38720) ^P	293431	4282246	14.8	395	7.40	7.52	0.30	0.14	3.12	0.53	3.46	0.25	0.34	0.2	7.3	1.373	0.590	0.689	0.000	1.348	0.226	0.043	0.000	0.005	0.012	190	andezit-trakiandezit-çakıl		
25 Çavdarlı (DSI kuyu no:32590B) ^P	299038	4250680	18.4	1357	6.55	3.98	2.89	0.31	7.19	2.59	9.44	1.30	1.26	1.3	22.3	1.221	0.000	0.146	0.170	-	0.499	0.036	0.000	0.005	0.025	153	35-145, çakıl		
26 Çalışlar (DSI kuyu no:35599) ^P	299574	4302729	16.1	645	7.40	4.7	1.21	0.10	3.34	1.65	4.86	0.85	0.70	0.8	19.2	1.043	1.298	0.044	0.030	-	0.530	0.022	0.000	0.009	0.009	173	32-162, kum-çakıl		
27 Gebeceles (DSI kuyu no:41068) ^P	302266	4296461	14.6	612	7.45	5.56	1.94	0.18	2.64	1.56	5.72	0.50	0.37	1.3	30.7	0.598	0.067	0.091	0.050	-	0.373	0.012	0.000	0.010	0.021	70	20-65, çakıl-konglomera-kireçtaşı		
28 Değirmendere (DSI kuyu no:49759) ^P	307887	4279014	13.8	629	7.39	6.87	0.32	0.06	4.09	1.56	4.49	0.30	1.31	0.2	5.3	0.578	1.214	0.080	0.000	0.161	0.241	0.011	0.000	0.004	0.005	145	40-105, trakit-kum		
29 İsehisar (DSI kuyu no:30082) ^A	308074	4303917	21.5	3817	6.31	1.06	34.80	1.94	4.59	3.70	43.45	2.45	0.00	17.1	77.3	0.029	2.816	1.551	2.830	6.568	0.825	0.072	0.000	0.016	0.007	35	15-34, şist		
30 Değirmendere (DSI kuyu no:15022) ^P	308789	4278652	16.5	486	7.39	7.85	0.30	0.06	3.54	0.82	3.55	0.20	1.02	0.2	6.3	0.415	0.532	0.306	0.030	0.367	0.209	0.021	0.000	0.004	0.003	192	40-130, çakıl-kireçtaşı		
31 Heybeli termal su kuyusu (H2) ^P	311610	4279950	60.0	3596	7.13	2.3	20.62	1.41	16.49	5.97	25.79	5.00	13.22	6.2	46.4	0.025	0.899	0.831	0.880	-	1.920	0.037	0.000	0.015	0.181	292	237-248, kalkçışt-mermer		
32 Kocabz (DSI kuyu no:19277) ^P	312772	4287286	16.1	546	7.42	7.63	1.62	0.08	2.82	0.82	4.11	0.75	0.45	1.2	30.4	1.491	0.021	0.029	0.020	0.018	0.362	0.000	0.000	0.007	0.011	91	48-62, kireçtaşı		

P; pompaj, A; artezyen, -: analiz yapılmamıştır, vy: veri yok, *: SAO (sodium adsorbsiyon oranı)=Na/((Ca+Mg)/2)^{0.5}] (derişimler meq/l),
**, %Na=[Na/(Na+K+Ca+Mg)]*100 (derişimler meq/l)



Şekil 5. Termal ve soğuk kuyu sularının Piper diyagramı.
Figure 5. Piper diagram of the thermal and cool water wells.

nan alanda yer alan yeraltısularının ise, artan termal su katkısına bağlı olarak, Na-Cl ve Ca-CO₃ fasiyesleri arasında bir bileşime sahip oldukları anlaşılmaktadır. Öte yandan, çalışma alanının kuzeyinde yer alan ve yüksek karbondioksit içeriğine sahip olan Gazlıgöl ve İscehisar kuyu suları ise Na-CO₃ fasiyesinde yer almaktadırlar.

TERMAL SU ETKİSİNİN ALANSAL YAYILIMI

Soğuk yeraltısuları üzerinde termal su etkisinin alansal yayılımının belirlenmesi amacıyla sıcaklık, Eİ, Na+K, Cl, Li ve B parametrelerine ait kontur haritalarından yararlanılmıştır. Bu parametrelerin tümü termal sularda daha yüksek değerlere sahip olup, termal ve soğuk suların karış-

ması durumunda oldukça korunumlu davrandıkları varsayılmıştır. Cl ve Li gibi elementleri içeren minerallerin yüksek çözünürlüğe sahip olması ve yeraltı suyu sisteminde ısı üreten, ya da soğuran reaksiyonların mevcut olmayışı bu varsayımın başlıca gerekçelerini oluşturmaktadır. Öte yandan, gaz kaybına bağlı mineral çökmesi (örn.: CaCO_3) sonucunda El'de azalma ve iyon takas reaksiyonları ile akiferde tutulma sonucunda Na+K ve B derişimlerinde artma, ya da azalmanın meydana gelmesi mümkün olmakla birlikte, termal suların sözü edilen parametreler açısından sahip oldukları yüksek değerler dikkate alındığında, söz konusu süreçlerin önemli bir etkiye sahip olması beklenmemektedir.

Söz konusu parametrelere ilişkin kontur haritalarının çiziminde izotrop Krigging yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşımda akifer içindeki üç boyutlu kütle ve enerji taşınımına etki eden faktörler ihmal edildiğinden, noktasal verilerden itibaren türetilen alansal konturlar ilgili parametrenin alansal değişiminin yarı-niceliksel göstergeleri olarak değerlendirilmelidir. Öte yandan, noktasal verilerin de her bir kuyuya ait derinlik boyunca debi ağırlıklı kompozit derişimler olduğu da dikkate alınmalıdır. Tüm bu sınırlamalara karşın, kontur haritaları ilgili parametrelerin alansal değişimindeki genel eğilimin belirlenmesi açısından faydalıdır.

Aşağıdaki değerlendirmelerde her bir parametre için, bu parametrenin termal ve soğuk sulardaki değerleri ile yalnızca soğuk sulardaki değerlerini içeren iki ayrı kontur haritası kullanılmıştır. Her bir parametreye ait termal+soğuk su kontur haritası ile soğuk su kontur haritasının karşılaştırılması yoluyla termal suların soğuk sular üzerindeki etkisi alansal olarak görülebilmektedir.

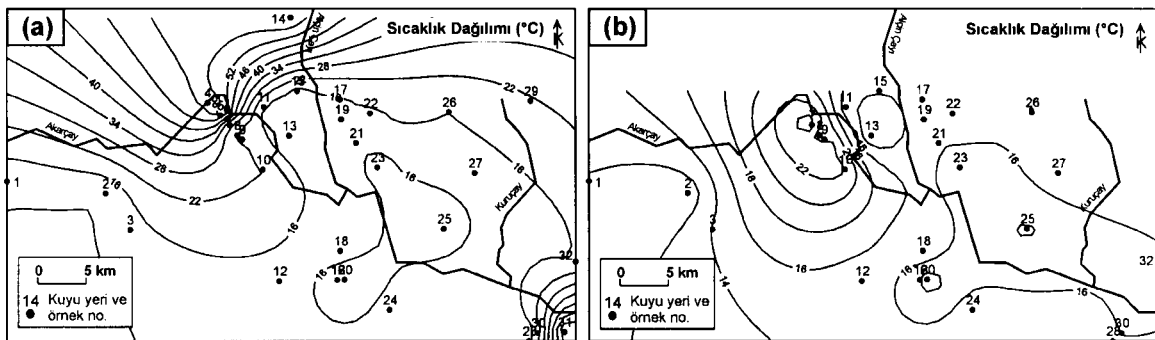
Yalnızca soğuk sular için hazırlanan kontur haritalarında sıcaklığı 25°C 'nin altında bulunan su noktaları kullanılmıştır. Bölgedeki jeotermal ısı akısının normalin üzerinde oluşu nedeniyle, soğuk sular için havzanın ortalama hava sıcaklığının (12°C) üzerinde ve 25°C 'lik bir üst sınır değeri seçilmiştir.

Sıcaklık dağılımı

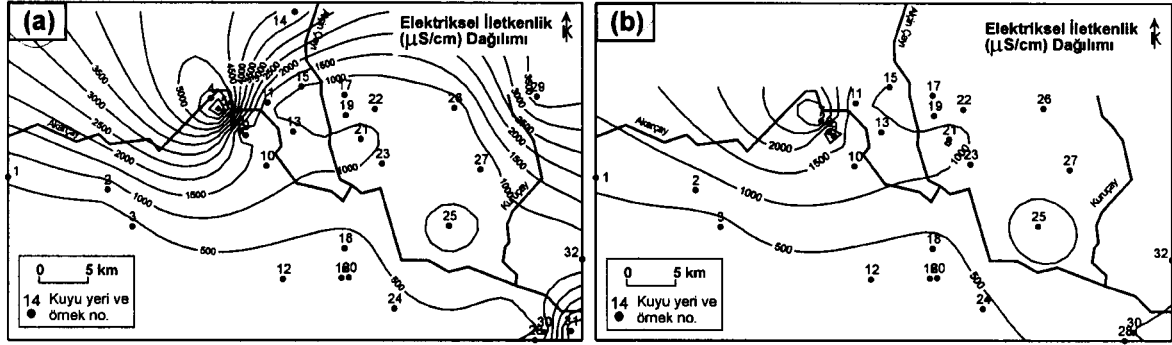
İnceleme alanında jeotermal ısı gradyanındaki yerel artışa bağlı olarak, termal su kaynak ve kuyuları çevresinde oldukça yüksek sıcaklıklar gözlenmektedir (Şekil 6a). Jeotermal gradyanındaki artışa ve termal suların soğuk su akiferine karışmasına bağlı olarak termal sulara yakın soğuk sularda da nispeten yüksek sıcaklıklar gözlenmektedir (Şekil 6b). Termal sulara yakın soğuk su kuyularının (örn.: 7, 8, 9, 10 ve 25 no.lu kuyular) bulunduğu sınırlı bir alanda, bölgedeki yüksek ısı gradyanı nedeniyle diğer soğuk su kuyularına oranla yüksek sıcaklıklar ($19.3-25.8^\circ\text{C}$) ölçülmektedir. Diğer yandan, alanın batısında yer alan kuyu sularında sıcaklık $10.6-14.2^\circ\text{C}$ arasında değişmekte olup, bu kesimde termal su karışımının ve yüksek ısı gradyanının etkili olmadığı anlaşılmaktadır.

Elektriksel iletkenlik dağılımı

Termal sular çevresindeki özgül (25°C 'ye uyarlanmış) El değerleri de, sıcaklık dağılımı ile benzerlik göstermektedir. İçerdikleri yüksek miktardaki çözünmüş maddeye bağlı olarak termal sularda yüksek El değerleri ölçülmüştür. Sahada ölçülen en yüksek El değeri 7186 mikroS/cm ile 5 no.lu AF-7 termal su kuyusuna aittir (Şekil 7a).



Şekil 6. a) Termal ve soğuk ve b) sadece soğuk su kuyuları için sıcaklık dağılımı.
Figure 6. Distribution of temperature for a) thermal and cool, and b) only cool water wells.



Şekil 7. a) Termal ve soğuk ve b) sadece soğuk su kuyuları için elektriksel iletkenlik dağılımı.
Figure 7. Distribution of electrical conductivity for a) thermal and cool, and b) only cool water wells.

Termal su kuyularından uzakta, alanın batısında yer alan kuyu sularında Eİ 365-692 mikroS/cm arasında değişirken, yakındaki soğuk su kuyularındaki Eİ değerleri 974-3634 mikroS/cm gibi yüksek değerlere ulaşmaktadır (Şekil 7b). Bu durum, termal sulara yakın soğuk sulardaki yüksek Eİ değerlerinin bu alanda ısı akısının yanı sıra, soğuk sulara doğru olan bir kütle akısından da kaynaklandığını göstermektedir.

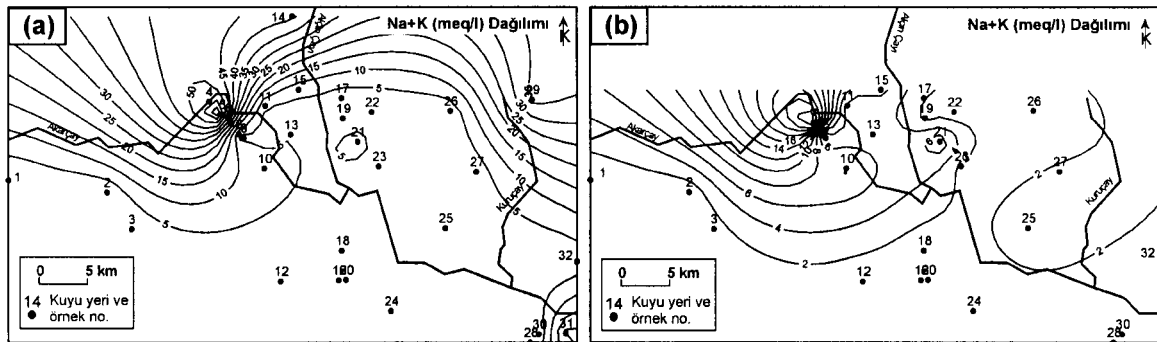
Na+K dağılımı

Batıdaki termal su kuyuları ile kuzeydoğuda bulunan İscehisar maden suyu (29) çevresinde Na+K derişimi yüksek değerler almaktadır (Şekil 8a). Na+K derişimi açısından Akarçay'ın güney bölümünde kalan kuyu sularında önemli bir termal su katkısı gözlenmezken, özellikle Akarçay'ın kuzeyi ve Alçin Çayı'nın batısında yer alan, termal su kaynak ve kuyularının yoğunlaştığı bölgedeki soğuk su kuyularında bu etki belirginleşmektedir. Bu durum, özellikle 8, 9, 11, 15, 21 no.lu soğuk su kuyularının termal su ka-

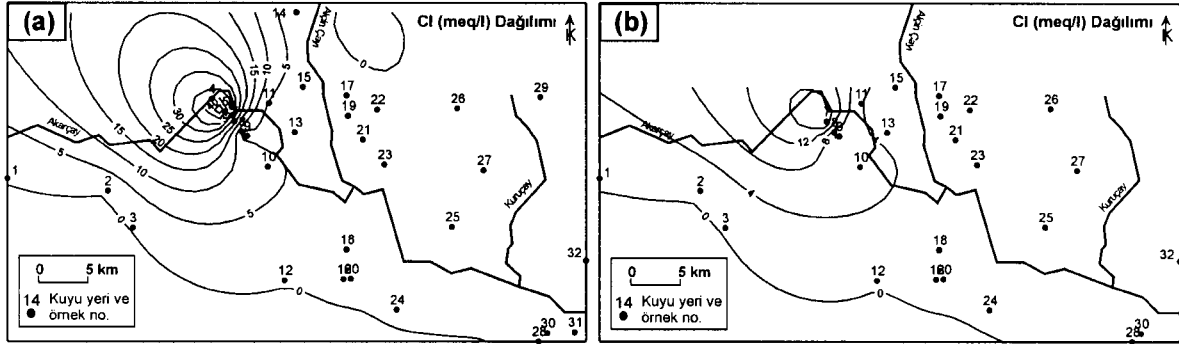
rışımından etkilendiklerine işaret etmektedir (Şekil 8b).

Cl dağılımı

Cl derişimi ile oluşturulan kontur haritası, Na+K derişimine göre oluşturulan harita ile benzerlik göstermektedir. Na+K kontur haritasında olduğu gibi, Cl kontur haritasında da Akarçay'ın güneyinde kalan alanda yüksek Cl derişimlerine rastlanmamaktadır. Buna karşın, özellikle batıda yer alan termal sular çevresinde oldukça yüksek Cl derişimleri (~50 meq/l) gözlenmektedir (Şekil 9a). Sadece soğuk sular için oluşturulan haritada (Şekil 9b), termal su kökenli Cl'e çok yerel olarak rastlanmaktadır. Bölgede sadece termal sulara çok yakın konumda bulunan (örn.: 6 no.lu AF-9 termal su kuyusuna 650 m uzaklıktaki) 7 no.lu Oruçoğlu soğuk su kuyusunda (22 meq/l) ve 9 no.lu Sadıkbey soğuk su kuyusunda yüksek Cl derişimleri (5.2 meq/l) gözlenmektedir. Bu durum; örtü kayalar içindeki kırık ve çatlaklar boyunca, ya da bu birimler içindeki yüksek



Şekil 8. a) Termal ve soğuk ve b) sadece soğuk su kuyuları için Na+K dağılımı.
Figure 8. Distribution of Na+K for a) thermal and cool, and b) only cool water wells.



Şekil 9. a) Termal ve soğuk ve b) sadece soğuk su kuyuları için Cl dağılımı.
Figure 9. Distribution of Cl for a) thermal and cool, and b) only cool water wells.

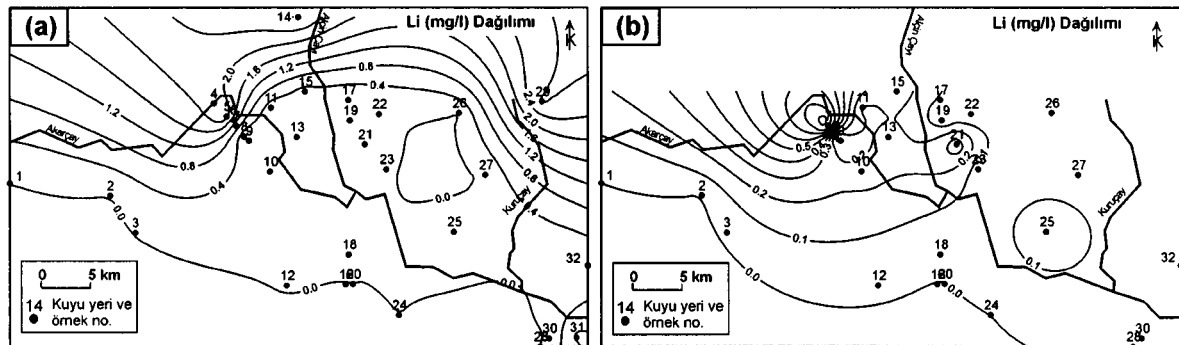
hidrolik iletkenliğe sahip seviyeler aracılığı ile termal su akiferinden soğuk su akiferine doğru bir kütle taşınımının oluştuğunu açıkça göstermektedir.

Li dağılımı

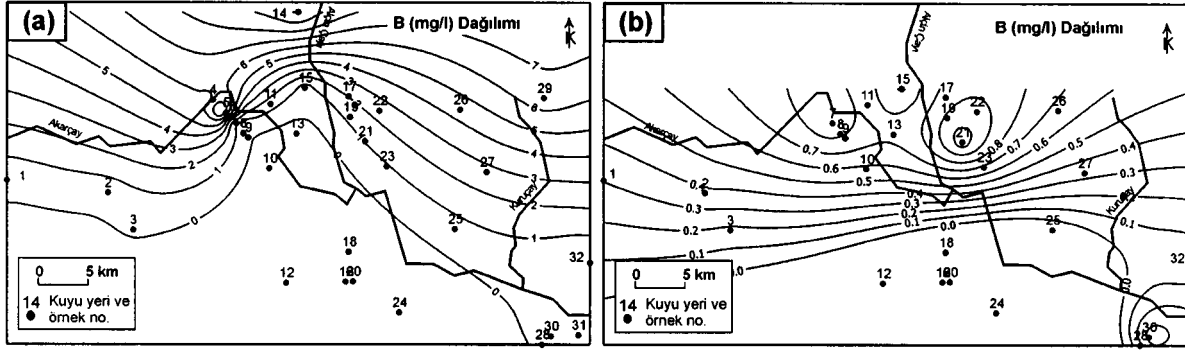
Li termal kökenli sulara özgü karakteristik hidro-kimyasal bileşenlerden birisi olup, termal suların Li içeriği genellikle 2.0-5.0 mg/l arasında değişmektedir (Hem, 1986). İnceleme alanındaki termal sulara Li içeriğinin 0.9 ile 2.9 mg/l arasında değiştiği belirlenmiştir. Li derişimi özellikle termal sular ve yakın çevresindeki soğuk sulara (örn.: 7 no.lu soğuk su kuyusu) yüksek değerler göstermektedir (Şekil 10a). Termal su çıkışının ve üretiminin yoğun olduğu alanların dışında kalan bölgelerdeki soğuk su kuyularında ise, termal su katkısına işaret eden belirgin Li derişim anomalilerine rastlanmamaktadır (Şekil 10b). Bu durum, diğer parametrelerin alansal dağılımı ile de uyumludur.

B dağılımı

Termal sular dikkate değer düzeyde B içerebilmektedirler (Hem, 1986). Bitkiler üzerindeki zehirleyici etkisi nedeniyle 1 mg/l'nin üzerinde bor derişimine sahip olan sular sulamaya uygun değildirler. Termal ve soğuk sular kullanılarak oluşturulan kontur haritasında (Şekil 11a), termal sular çevresinde B miktarının yüksekliği dikkat çekmektedir. Diğer yandan, yalnızca soğuk su derişimleri kullanılarak oluşturulan haritadan (Şekil 11b) Beyyazı kuyusu (21) dışında, bitkiler için sınır değerini aşmadığı görülmektedir. Buna karşın, B'a hassas bazı ürünler için uzun dönemde kullanılacak sulama suyunda B derişiminin 0.750 mg/l'yi aşmaması önerilmektedir (USEPA, 1976; Fetter, 1980). Bu durumda, genel olarak 7, 23, 26 no.lu kuyuları izleyen hattın kuzeyinde yeraltı suyu B içeriğinin sınır değer açısından riskli olabileceği anlaşılmaktadır (bkz. Şekil 11b).



Şekil 10. a) Termal ve soğuk ve b) sadece soğuk su kuyuları için Li dağılımı.
Figure 10. Distribution of Li for a) thermal and cool, and b) only cool water wells.



Şekil 11. a) Termal ve soğuk ve b) sadece soğuk su kuyuları için B dağılımı.
Figure 11. Distribution of B for a) thermal and cool, and b) only cool water wells.

SULAMA VE İÇME-KULLANMA SUYU KALİTESİNİN ALANSAL DEĞİŞİMİ

İnceleme alanındaki termal ve soğuk su kuyularından elde edilen yeraltısuyunun sulama, içme ve kullanma amaçlarına uygun olup olmadıkları çeşitli standart ve ölçütlere göre değerlendirilmiştir (Çizelge 2).

Sulama suyu kalitesi

Sulama suyu kalitesi açısından sular Na, SAO, Eİ, Cl, SO₄, iz element vb. içeriklerine göre incelenmiştir. Bu değerlendirmelere göre, tüm termal sular özellikle %Na ve SAO değerleri açısından sulama amaçlı olarak kullanılması sakıncalı sular grubuna girmektedir. Benzer şekilde termal su girişiminden etkilenen Oruçoğlu soğuk su kuyusunun da (7) sulama amaçlı olarak kullanılması uygun değildir. Öte yandan, termal su girişiminden etkilenen 9, 15 ve 21 no.lu soğuk su kuyularının da %Na değerleri sulama suyu üst sınır değerlerine oldukça yakın olup, risk oluşturabilecekleri anlaşılmaktadır. B derişimleri açısından 21 ve 24 no.lu suların, Cl derişimleri açısından 9 ve 10 no.lu suların üst sınır derişim değerlerini aştıklarından sulama suyu olarak kullanılmaları uygun değildir. Genel olarak, Afyon'un kuzeybatısında bulunan termal sular çevresindeki soğuk suların bir bölümü ya bir/birkaç parametre açısından sulama suyu kriterlerine uymamakta, ya da parametrelerin izin verilebilir üst sınırlarına çok yakın değerler almaktadırlar. Soğuk suların sulama suyu kullanımında içerdikleri riskler termal su üretim ve kaynak bölgelerinden uzaklaştıkça azalmaktadır.

İçme ve kullanma suyu kalitesi

İnceleme alanındaki termal suların tümü pekçok parametre (Eİ, Na, K, SO₄ vb.) açısından içilmeye ve kullanılmaya uygun değildir. Özellikle termal su kuyularına yakın soğuk su kuyularında da (örn.: 7, 9, 10, 15, 21 ve 25 no.lu kuyular) suyun bir, ya da birkaç parametre (Na, K, NH₃-N vb.) açısından kullanıma uygun olmadığı görülmektedir. Diğer yandan, termal sulardan uzakta bulunan bazı soğuk su kuyularında da (16, 18, 20, 24, 26, 28 ve 30 no.lu kuyular), olasılıkla tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan kirlenme nedeniyle NH₃-N derişimleri nispeten yüksektir ve içme-kullanma suyu açısından bir risk oluşturmaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Afyon-Akarçay Havzası'nda Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli jeotermal alanlarında termal su katkısına bağlı olarak soğuk yeraltısularında oluşan kirlenmenin yayılım ve boyutlarının belirlenmesini amaçlayan bu çalışmada özellikle, termal su kaynak ve üretim kuyularına yakın bazı soğuk su kuyularında jeotermal kökenli kirlenmenin mevcut olduğu belirlenmiştir.

Su kaynaklarının sınırlı olduğu bu bölgede mevcut yeraltısuyu kalitesinin korunması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, soğuk yeraltısuyu üretimine yönelik mevcut ve yeni kuyuların, termal su girişimini hızlandırmayacak biçimde açılmaları gerekmektedir. Söz konusu amaç doğrultusunda termal ve soğuk su akiferleri arasındaki dinamik ilişkinin sayısal modeller aracılığı ile incelenmesi ve yeni soğuk su kuyularının

Çizelge 2. Kuyu sularının içme, kullanma ve sulama suyu açısından değerlendirilmesi.
Table 2. Evaluation of the well waters with respect to drinking, domestic use and irrigation water quality.

Örnek Numarası ve Örnekleme Yeri	°C ⁽¹⁾	EH ⁽¹⁾	pH ⁽¹⁾	ÇÖ ⁽²⁾	Na ⁽¹⁾	K ⁽¹⁾	Ca ⁽¹⁾	Mg ⁽¹⁾	HCO ₃ +CO ₃ ⁽¹⁾	Cl ^(1,1a)	SO ₄ ^(1,1a)	SAR ⁽³⁾	%Na ⁽⁴⁾	NO ₂ +NO ₃ -N ⁽⁵⁾	NH ₃ -N ⁽⁵⁾	Fe ⁽¹⁾	Li ^(6,1a)	B ⁽¹⁾	Br ⁽²⁾	As ⁽¹⁾	Mn ^(1,1a)	Al ⁽¹⁾	I ⁽²⁾
1 Tokuşlar (DSI kuyu no:50544)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2 Küçükhöyük (DSI kuyu no:11254)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3 Ahmetpaşa (DSI kuyu no:22312)	X	X	+	+	X	X	+	+	+	X	X	X	X	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
4 Özerler termal su kuyusu	X	X	+	+	X	X	+	+	+	X	X	X	X	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
5 Ömer AF-7 termal su kuyusu	X	X	+	+	X	X	+	+	+	X	X	X	X	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
6 Oruçoğlu AF-9 termal su kuyusu	X	X	+	+	X	X	+	+	+	X	X	X	X	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
7 Oruçoğlu kuyusu	X	X	+	+	X	X	+	+	+	X	X	X	X	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
8 Demirciçevre (DSI kuyu no:45810)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	X ⁽⁶⁾	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9 Sadıkbey (DSI kuyu no:31882)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	X ⁽⁶⁾	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
10 DSI tesisindeki kuyu (DSI kuyu no:34230)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	X ⁽⁶⁾	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
11 Saraydüzü (DSI kuyu no:34429)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
12 Büyükkalecik (DSI kuyu no:53026B)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
13 Bayatçık (DSI kuyu no:42670)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
14 Gazlıgöl termal su kuyusu	X	X	+	+	X	X	+	+	+	+	+	X	X	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
15 Fethibey (DSI kuyu no:30513)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
16 Süğün (DSI kuyu no:47854B)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
17 Çayırbağ (DSI kuyu no:33039)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
18 Ataköy (DSI kuyu no:15947)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
19 Kumantaş (DSI kuyu no:40939)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
20 Salar (DSI kuyu no:36442)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
21 Beyyazı (DSI kuyu no:13324)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
22 Beyyazı (DSI kuyu no:51980)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
23 Susuz (DSI kuyu no:49179)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
24 Nuribey (DSI kuyu no:38720)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
25 Çavdarlı (DSI kuyu no:32590B)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
26 Çalışlar (DSI kuyu no:35599)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
27 Gebeceler (DSI kuyu no:41068)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
28 Değirmendere (DSI kuyu no:49758)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
29 İscehisar (DSI kuyu no:30082)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
30 Değirmendere (DSI kuyu no:15022)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
31 Heybeli termal su kuyusu	X	X	+	+	X	X	+	+	+	X ⁽⁶⁾	X	X	X	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
32 Kocaöz (DSI kuyu no:19277)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

X: içme ve kullanma suyuna uygun değil (izin verilen sınır değerlerin üzerinde) ; +: içme ve kullanma suyuna uygun (izin verilen sınır değerleri arasında) ; +x: içme ve kullanma suyuna izin verilen sınır değerleri arasında ama üst sınıra çok yakın (-%5) ; -: parametrenin analizi yapılmamıştır. (1): TSE (1997)'ye göre 1.inci sınıf olarak tarif edilen "Kaynak Suları Dışında İçme ve Kullanma Suları" için belirtilen sınır değerleri baz alınmıştır; (1a): sulama suları sınıflama kriterleri (T.C. Resmi Gazete, 7 Ocak 1991); (2): sınır belirtilmemiştir ; (3): sulama suyu açısından, SAR<6 olmalıdır (Mc Neely vd., 1979) ; (4): sulama suyu açısından Wilcox değerlendirilmesi ; (5): içme suyu açısından NO₂+NO₃-N<10, NH₃-N<0.5, Cr<0.05, Pb<0.05, Cd<0.005 mg/l olmalıdır (Mc Neely vd., 1979) ; (6): sulama suyu açısından Li<2.5, B<1, Cl<150 mg/l olmalıdır (Mc Neely vd., 1979)

bu modellerin öngörülerini doğrultusunda açılması uygun olacaktır. Diğer yandan, soğuk su kuyularında belirlenen jeotermal kökenli kirlenmenin oluşum mekanizması konusunda yeterli bilgiler mevcut değildir. Söz konusu kirlenmenin termal ve soğuk su akiferleri arasındaki doğal etkileşimin yanı sıra, termal su kuyularının hatalı teçhizinden ve/veya doğru teçhiz edilmiş kuyu cidarlarının zamanla yıpranması ile oluşan kaçaklardan kaynaklanması da mümkün görülmektedir. Bu soruların yanıtlanması için ayrıntılı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Teçhizleri yıpranmış termal su kuyularında teçhiz yenilenmeli, bunun mümkün olmadığı durumlarda kuyuların tüm kesitleri boyunca tıkanarak yalıtılmaları gereklidir.

KATKI BELİRTME

Birinci yazarın doktora tezi çalışmasının bir bölümünü içeren bu araştırma "Akarçay (Afyon) Havzasında Jeotermal Kökenli Yüzeysuyu ve Yeraltısuyu Kirliliğinin Araştırılması" başlıklı, 01.T07.604.001 no.lu "Lisansüstü Öğrenim Araştırma Projesi" kapsamında Hacettepe Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından maddi olarak desteklenmiştir. DSİ Genel Müdürlüğü adına Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) tarafından yürütülen "Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltısuyu Akım Modeli" adlı proje çalışması kapsamında saha çalışmalarına lojistik destek sağlanmıştır. Yazarlar, yukarıda belirtilen kurum ve kuruluşlara teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) and WPCF (Water Pollution Control Federation), 1989. Standard Methods for the Analysis of Water and Waste Water. APHA publication, 17th Edition, Washington DC, 2005, 1133 pp.

Batık, H., Koçak, A., Akkuş, İ., Şimşek, Ş., Mertoğlu, O., Dokuz, İ., and Bakır, N., 2000. Geothermal energy utilisation development in Turkey (present geothermal situation and projections). Proceedings of the World Geothermal Congress, E. Iglesias, D. Blackwell, T. Hunt, J. Lund, S. Tamanyu and K. Kimbara (eds.), Kyushu-Tohoku, Japan, 85-91 pp, (CD-ROM).

Demirkol, C., Sipahi, H., Çiçek, S., Barka, A. ve Sönmez, Ş., 1977. Sultandağının stratigrafisi ve jeolojik evrimi. MTA Derleme No: 6305, 86 s (yayımlanmamış).

Doğdu, M.Ş., 2001. Akarçay (Afyon) Havzası'nda jeotermal kökenli yüzeysuyu ve yeraltısuyu kirliliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 143 s (yayımlanmamış).

Doğdu, M.Ş. ve Bayarı, C.S., 2002. Akarçay Havzası'nda (Afyon) jeotermal kökenli kirlenme: 1. Akarçay Nehri'nde su ve sediman kirliliği. Yerbilimleri, 25, 21-33.

DSİ, 1977. Akarçay Havzası hidrojeolojik etüt raporu. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara, 64 s.

Erişen, B., Akkuş, İ., Uygur, N. ve Koçak, A., 1996. Türkiye Jeotermal Envanteri. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 480 s.

Fetter, C.W., 1980. Applied Hydrogeology. Charles E. Merrill Publ. Co., 488 pp.

Hem, J.D., 1986. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3rd Edition, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 264 pp.

Mc Neely, R.N., Neimanis, V.P., and Dwyer, L., 1979. Water Quality Sourcebook: A Guide to Water Quality Parameters. Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa 88 pp.

Metin, S., Genç, Ş. ve Bulut, V., 1987. Afyon ve dolayının jeolojisi. MTA Derleme No: 8103, 74 s (yayımlanmamış).

Metin, S., Genç, Ş., Bulut, V., Ölmez, M., Kılıç, İ., Akıncı, A., Umut, M. ve Kurt, Z., 1988. Bolvadin (Afyon) - Yunak (Konya) dolayının jeolojisi. MTA Derleme No: 8522, 78 s (yayımlanmamış).

Mutlu, H., 1996. Geochemical assessment of thermal waters from the Afyon Geothermal Area: geothermometry applications and fluid-mineral equilibria. Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 169 pp (unpublished).

Öktü, G., Kara, İ. ve Önder, İ., 1997. Afyon ili'nde yer alan Ömer-Gecek-Uyuz Hamamı, Alaplı-Kızık Hamamı ve Gazlıgöl jeotermal enerji sahalarının detay etüdü. MTA Derleme No: 10097, 41 s (yayımlanmamış).

Öztürk, E.M., Dalkılıç, H., Ergin, A. ve Avşar, Ö.P., 1987. Sultandağı güneydoğusu ile Anamasdağı dolayının jeolojisi. MTA Derleme No: 8191, 140 s (yayımlanmamış).

T.C. Resmi Gazete, 1991. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Unsurlar Tebliği. 7.Bölüm: Artırılmış Atıksuların Sulamada Kullanılma-

- si, 7 Ocak 1991 tarih ve 20748 sayılı Resmi Gazete, 31-39.
- Tamgaç, Ö.F., Güner, A., Sarp, S. ve Yıldırım, N., 2000. Afyon-Ömer-Gecek sahasının koruma alanları, test ve potansiyel değerlendirme raporu. MTA Derleme No: 10388, 66 s (yayımlanmamış).
- Tezcan, L., 1998. Revize hidrojeolojik etütler kapsamında Akarçay Havzası hidrojeolojisi ve yeraltısuyu akım modeli projesi birinci ara raporu. Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi, 74 s.
- Tezcan, L., 1999. Akarçay Havzası hidrojeolojisi ve yeraltısuyu akım modeli ikinci ara raporu. Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi, 191 s.
- Tezcan, L., 2001. Kişisel görüşme. Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hidrojeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- TSE (Türk Standardları Enstitüsü), 1997. TS266 Sular-İçme ve Kullanma Suları Standardı. Birinci Baskı, 25 s.
- Umut, M., Karabıyıköğlu, M., Saraç, G., Bulut, V., Demirci, A.R., Erkan, M., Kurt, Z., Metin, S. ve Özgönül, E., 1987. Tuzlukçu - İlgın - Doğanhisar - Doğanbey (Konya İli) ve dolayının jeolojisi. MTA Derleme No: 8246, 39 s (yayımlanmamış).
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1976. Quality Criteria for Water. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 256 pp.



Derince (Keban-Elazığ) çevresinde dere sedimenti jeokimyasal yönlendirme çalışması

A stream sediment geochemical orientation study in Derince (Keban-Elazığ) vicinity

Cemal BÖLÜCEK

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 23119 ELAZIĞ

ÖZ

Masif sülfid ve damar tipi cevherleşmeler içeren inceleme alanı, kirlenmenin olmadığı bir bölgede yer almaktadır. Çalışma alanı, yarı kurak iklime ve engebeli bir topoğrafyaya sahiptir. Dere sedimenti yönlendirme çalışması ile bu tür bölgeler için uygun sediment fraksiyonu, çözme yöntemi ve metal dağılım şekilleri belirlenmiştir. Ortamın fiziko-kimyasal özellikleri nedeniyle, dere kumlarındaki elementlerin, kimyasal olaylardan çok fiziksel olayların etkisi altında meydana geldikleri sanılmaktadır. -80 +200 mesh fraksiyonu en uygun boyut olarak belirlenmiş ve bu fraksiyonun analiz yapılmıştır. Uygun çözme yönteminin belirlenebilmesi için değişik çözme yöntemleri denenmiştir. Bu yöntemlerden kral suyu ile çözme; yüksek değerler vermesi, birden fazla örneği kısa sürede ve kolaylıkla çözebilmesi, bir tek çözündürme ile çok sayıda elementin analizinin yapılabilmesi gibi özellikleri nedeniyle en uygun çözme yöntemi olarak belirlenmiştir. Volcano-sedimanter ve volkanik kayaların yüzeylendiği Derince'nin güneyinde Cu, Zn, Cd ve (Co) anomalileri belirlenmiştir. Tonalitik kayaların yüzeylendiği Çayecorik Dere civarında düşük dereceli bir Pb anomalisi ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Dere sedimenti, Derince (Keban-Elazığ), kral suyu.

ABSTRACT

The study area including massive sulphide and vein type mineralizations is in a non-contaminated environment. It has a semi-arid climate and rough topography. Suitable sediment fraction, dissolution method and metal dispersion patterns were determined suitable for such an area by stream sediment orientation survey. The physico-chemical features of the area indicates that the metallic contents of the stream sediments originate from physical rather than chemical processes. -80+200 mesh fraction seems to be the most suitable fraction and this fraction is chosen for the analyses. In order to determine the most effective solution method, several methods were experimented and aqua regia digestion was considered as the most effective method due to high values obtained, readily dissolution of the samples, multi element determination from the same solution and rapid sample preparation. In the southern part of Derince, where volcano-sedimentary and volcanic rocks crop out, and Cu, Zn, Cd and (Co) anomalies exist. Low grade Pb anomalies were determined in the vicinity of Çayecorik Stream, where tonalitic rocks are observed.

Key words: Stream sediment, Derince (Keban-Elazığ), aqua regia.

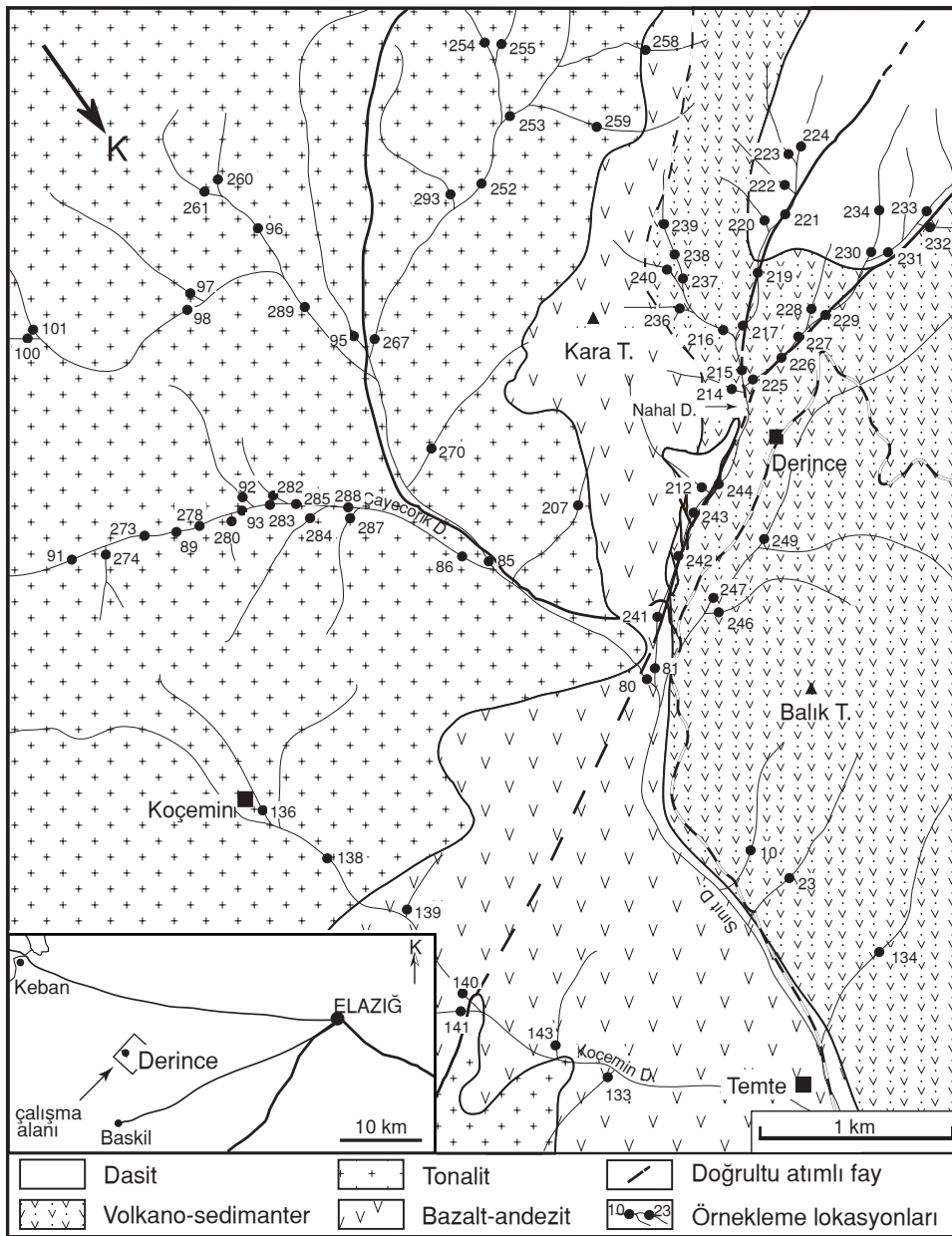
GİRİŞ

Jeokimyasal verilerden yararlanılarak yapılan prospeksiyon çalışmaları, dünyada yoğun ve başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (örneğin;

Govett, 1985; Plant vd., 1988). Jeokimyasal prospeksiyon yöntemlerini kullanan çoğu ülkeler, yeraltı zenginliklerinin belirlenmesinde büyük ilerlemeler sağlamışlardır (Plant ve Moore, 1979; Bölviken vd., 1990; Darnley, 1990). Ülke-

mizde de son yıllarda Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından bu konuda yapılan çalışmalarda bir artış gözlenmektedir. Tüm ülke ölçeğinde jeokimyasal prospeksiyon yapmak uzun zaman, yüksek maliyet ve fazla iş gücü gerektirdiği için, bu tür çalışmalara başlanmadan önce yönlendirme çalışmaları yapılarak, farklı bölgeler için arama aşamasında yararlanılabilecek jeokimyasal parametreler belirlenmektedir.

Bu çalışma, Doğu Toroslarda oldukça geniş yayılım gösteren ve çeşitli cevherleşmeler içeren (Sağiroğlu, 1986 ve 1992; Şaşmaz ve Sağiroğlu, 1990) magmatik kayaların yüzeylediği Elazığ'ın yaklaşık 30 km batısındaki Derince çevresinde yürütülmüştür. İnceleme alanında Üst Kretase yaşlı bazaltik, tonalitik, dasitik ve volkano-sedimanter kayalar yüzeylenmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. İnceleme alanının yerbulduru ve jeoloji haritası.
Figure 1. Location and geological map of the study area.

İnceleme alanı ve yakın çevresinde genel olarak petrografi konusunda çalışmalar yapılmıştır (Asutay, 1987; Akgül, 1993). Ayrıca MTA, inceleme alanını da içine alan geniş bir bölgede, genel jeokimyasal prospeksiyon çalışması yapmıştır (Tüfekçi ve Dumanlılar, 1994 a, b). Dere kumu örnekleme yapılan bu çalışmada 80 meshin altındaki kum fraksiyonu nitrik asit ile çözülmüştür. Anak çalışma alanı içerisinde bir anomali belirlenememiştir. Bölücek (1995), aynı bölgede gerçekleştirdiği araştırmanın bir bölümünde dere kumu örnekleme ile ayrıntılı jeokimyasal prospeksiyon yapmıştır.

Bölgede dere sedimenti örnekleme ile yapılan ilk yönlendirme çalışması niteliğindeki bu çalışmada, Bölücek (1995)'e ait veriler yeni bulgular ışığında değerlendirilmiştir. İnceleme alanında 93 dere kumu örneği alınmış, bunların 13'ünde Cu ve Zn, diğerlerinde Cu, Pb, Zn, Cd, Co ve Ni analizi yapılmıştır. Çeşitli çözme yöntemleri denenmiş, elek analizi yapılarak bölge için uygun kum fraksiyonu ve çözme yöntemi belirlenmiş, ayrıca elementlerin alansal dağılımı ortaya konmuştur. Bu yönlendirme çalışmasıyla benzer bölgeler için yararlanılabilecek uygun jeokimyasal arama karakteristiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

JEOLJİ VE CEVHERLEŞME

İnceleme alanında Üst Kretase yaşlı Elazığ Magmatitlerine ait kayaçlar yüzylemektedir. Bölgede Elazığ Magmatitleri, tonalitik bileşimli derinlik kayaçları, bazaltik ve dasitik bileşimli volkanitler ve volkano-sedimanter birimlerle temsil edilmektedir. Tonalitik derinlik kayaçları ve dasitik volkanitler temeldeki en yaşlı birim olan bazaltik kayaçları kesmektedir. Bazaltik kayaçların üzerine yer yer dasitik ve andezitik volkanitleri içeren bir volkano-sedimanter istif gelmektedir. Ayrıca aplit, lamprofir, mikrotonalit ve tonalit porfir bileşimli yarı derinlik kayaçları da inceleme alanında gözlenmektedir.

Bazaltik Volkanitler

İnceleme alanında bazalt ve bazaltik andezit bileşimli kayaçlarla temsil olunan birim bölgedeki magmatitlerin en yaşlısıdır. Bazaltik kayaçlar tonalitler ve dasitler tarafından kesilmekte; volkano-sedimanterler tarafından da üzerlenmektedirler. Bu kayaçlar çoğunlukla masiftirler ve yer

yer de yastık lavlar oluşturmaktadırlar. Bazaltik volkanitlerin yüzeylendiği alanların sert topografyaya sahip olması ve koyu kahverengi bir görünüm sunması diğer birimlerden ayrılmasını kolaylaştırmaktadır.

Bazaltik kayaçlar esas olarak plajiyoklas, klinopiroksen ve orto piroksen minerallerinden oluşmaktadır. Klorit, epidot, kuvars, kalsit ve zeolit mineralleri bu kayaçlarda ikincil bileşen olarak izlenmektedir. Spilliteleşmenin etkisiyle plajiyoklasların anortit içeriği oldukça düşük değerler vermektedir (Akgül, 1993). Bazaltik kayaçlar çoğunlukla saçınımlı olarak pirit ve çok az oranda kalkopirit gibi opak mineraller içermektedirler.

Tonalitik Kayaçlar

Bölgede oldukça geniş alanlarda yüzlek veren tonalitik kayaçlar, inceleme alanının D-GD bölümünde yer almaktadırlar. Bu kayaçlar; arazide hem renk farklılığı, hem de nispeten düz topografyası ile diğer birimlerden kolaylıkla ayrılmaktadırlar. Tonalitik bileşimli derinlik kayaçları, en fazla dokanak oluşturdukları bazaltları kesmekte (Akgül, 1993), aplit ve lamprofir daykları tarafından ise kesilmektedir.

Tonalit bileşimli kayaçlar el örneği düzeyinde grimsi kirli beyaz ve soluk pembemsi beyaz, orta - iri taneli porfirik dokulu holokristalen bir kayaç görünümündedirler. Lökokrat minerallerce zengin tonalitik kayaçlarda; başlıca anhedral granüler, subhedral granüler, porfiritik, mirmekitik ve grafit dokular olmak üzere, holokristalen dokunun değişik türleri görülmektedir. Kuvars, plajiyoklas, K - feldispat, biyotit ve hornblend mineralleri tonalitik kayaçların esas bileşenlerini; epidot, klorit, serizit ve nadiren kalsit mineralleri ise ikincil bileşenlerini oluşturmaktadır. Tonalitler yer yer artan K - feldispat oranları ile granodiyoritlere geçiş gösterirler (Asutay, 1987; Akgül, 1993). Granodiyoritler çok dar alanlarda gözlenmektedirler ve bunların saha gözlemleri ile tonalitlerden ayrılması oldukça güçtür. Tonalitik kayaçlar içerisinde birkaç cm kalınlığında, başlıca sfalerit, galen, kalkopirit ve pirit içeren damarlar ve çoğunlukla asenopirit içeren kuvars damarları izlenmektedir (Bölücek ve Sağıroğlu, 1997).

Dasitik Volkanitler

Hem dar alanlarda bazik volkanik kayaçları keser konumda, hem de volkano-sedimanter ka-

yaçlar içerisinde dasitik volkanikler yüzelemektedirler. Bu kayaçlarda yer yer dasitten riyolit doğru bir geçiş gözlenmektedir. Volkano-sedimanter istifin değişik seviyelerinde dasitlerin gözlenmesi, farklı evreler halinde dasitik volkanizmanın geliştiğini göstermektedir. Akgül (1993), dasitik volkanitlerin, magmatizmanın en son evresini temsil eden aplitik kayaçlardan mineralojik bileşimleri ve kimyasal özellikleri bakımından farklı olmaları nedeniyle, bu kayaçların olasılıkla tonalit bileşimli magmanın yüzeye çıkarak katılması sonucu oluşmuş olabileceğini belirtmektedir.

Mikroporfirik doku gösteren bu kayaçlar esas olarak kuvars ve plajiyoklas minerallerinden meydana gelmiştir. Biyotit ve hornblendler mafik; klorit, epidot ve zeolit mineralleri ikincil ve çok az miktardaki opak mineraller ise, kayaç içerisinde tali bileşenler olarak izlenmektedir. Mikrolitler ve camsı hamur malzemesi kayacın hacim olarak yaklaşık % 70'ini oluşturmaktadır. Kuvars ve plajiyoklas mineralleri hem mikrolit, hem de feno kristal halinde görülürken, mafik bileşenler (biyotit ve hornblend) genellikle feno kristal fazın bileşenleri şeklinde izlenir. Opak mineraller (pirit ± kalkopirit) çoğunlukla hornblend kristallerine tutunmuş halde veya onların kapamaları halinde öz şekilli ve yarı öz şekilli kristaller şeklinde bulunmaktadır. Ayrıca hamur malzemesi içerisinde hamuru oluşturan diğer bileşenlere saçınımlı ve çok küçük kristaller halinde eşlik etmektedirler (Akgül, 1993).

Volkano-Sedimanter Kayaçlar

Tabandaki bazaltik volkanitlerin üzerine gelen ve yer yer dasitik bileşimli kayaçlar tarafından kesilen volkano-sedimanter kayaçlar oldukça kalın bir istif oluşturur. Taban seviyelerde çoğunlukla dasitik, üst seviyelere doğru çoğunlukla andezitik lav akıntısı ara seviyeleri içeren bu volkano-sedimanter istif, alt düzeylerde volkanik breş ve tüflerle başlar, orta seviyelere doğru kristalce zengin kumtaşı, pelajik çamurtaşı ve tüfit araldanması, en üst düzeylerde ise bazalt ve peridotit olistolitleri içeren kumtaşı aratabakalı marnlarla temsil olunur (Akgül, 1993).

Volkano-sedimanter istifin taban seviyelerinde olasılıkla dasitik-riyolitik volkanik faaliyeti ile kökensele ilişkisi olan piritik masif sülfid cevherleşmeleri bulunmaktadır. Değişik evrelerde geliş-

miş bu cevherleşmeler yaklaşık 1.5-2 m kalınlığında tabaka ve mercekler halinde, yer yer de laminalıdır. Dasit-riyolit bileşimli volkanitler içerisinde de saçınımlı ve ağsı cevherleşmeler bulunmaktadır. Cevherleşmede baskın olarak pirit, daha az olarak da kalkopirit, bornit ve sfalerit gözlenmektedir.

JEOKİMYA

Fiziko-Kimyasal Koşullar

Çalışma alanında genellikle sarp ve engebeli bir topoğrafya hakimdir. Bazaltik kayaçların yüzeleendiği alanlar tonalitik kayaçların yüzeleendiği alanlara göre daha yüksek bir engebeye sahiptir. Yüzeysel ayrışmaya uğrayan kayaçlara ait malzemenin taşınması ile dağ eteklerinde ve dere içlerinde oldukça kalın alüvyon birikintileri oluşmuştur.

İnceleme alanında dendritik drenaj ağı hakimdir. Ana dereler çoğunlukla sulu, tali dereler ise kurudur. Tipik karasal iklimin görüldüğü bu alan, bitki örtüsü bakımından oldukça fakirdir. Bölgeye düşen yağış miktarı çok azdır. Baskil (Elazığ) meteoroloji istasyonundan alınan kayıtlara göre, son 25 yıllık yağış miktarları ortalamasına göre, yıllık yağış miktarı ortalama 441 mm'dir. Yörede, çok hızlı erozyon nedeniyle toprak örtüsü oldukça incedir.

İnceleme alanında piritik cevherleşmelerin görüldüğü Nahal derenin ana ve bazı tali kollarındaki suların pH değerleri ortalama 8 civarındadır. Dünyadaki bazı bölgelerde pirit cevherleşmelerinin bulunduğu alanlardaki sularda pH genellikle 2-4 arasında değişirken (Learned vd., 1985), pH'ın bölgede bu kadar yüksek olmasının nedeni; bölgedeki bazaltik kayaçlarda Ca'ca zengin plajiyoklasların bozunması ile ortaya çıkan ikincil karbonat (kalsit) oluşumlarına ve suların kaynaklandığı alanlarda bulunan kireçtaşlarının varlığından dolayı suların bazik karakterli oluşuna bağlanabilir. Çözeltideki HCO₃⁻ iyonu asit ilavesi ile eriyiğe sokulan H⁺ iyonlarının büyük bir kısmını bünyesine alarak serbest H⁺ miktarında önemli değişimlere olanak vermez. Aynı şekilde, CaCO₃ da



eşitliği ile H⁺'ni absorbe ederek pH'ı sabit tutmaktadır (Krauskopf, 1989). Bu yüzeysel koşul-

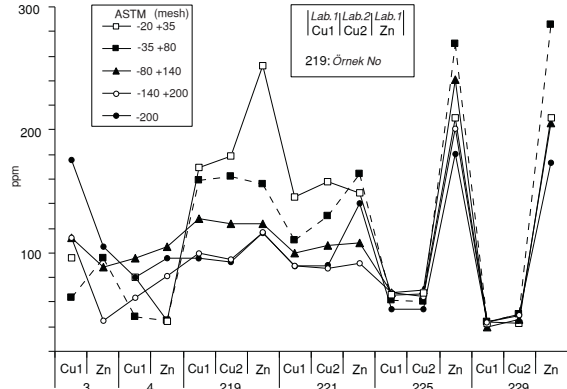
larda Eh da oldukça yüksek değer almaktadır. Yukarıda verilen Eh-pH koşulları, iklim ve topoğrafik etkiler nedeniyle sülfürlü cevherleşmelerin kimyasal bozunması önemli ölçüde engellenmekte ve inceleme alanının erozyona uygun yapısı nedeniyle metaller ortamdan kolaylıkla uzaklaşmaktadır.

Örnek Alımı ve Örnek Hazırlama İşlemleri

Örnek alım yöntemlerini geliştirmek, uygun tane boyu ve analiz yöntemlerini saptamak için ön çalışmalar yapılmıştır. Örnekler, mümkün olduğunca, aktif dere yataklarından geniş derelerde farklı noktalardan alınmıştır. Örneklemeye lokasyonlarında derenin genişliğine bağlı olarak, mümkün olduğu kadar fazla noktada alınan kumların karışımıyla oluşturulan bir örnek, örneklemeye lokasyonunu gerçeğe daha yakın bir şekilde temsil edebilmektedir (Rose vd., 1979). Çok iri taneli kırıntıların bulunmaması için örnekler, delik çapı yaklaşık 1cm² olan elekten geçirilerek alınmıştır. Yaklaşık 3-4 kg ağırlığındaki örnekler naylon torbalara konularak numaralandırılmış ve oda sıcaklığında kurutulmuşlardır. Kurutulmuş örnekler, analize uygun tane boyutu fraksiyonlarının belirlenmesi için farklı elek boyutlarına (-20+35, -35+80, -80+140, -140+200, -200 mesh) ayrıştırılmıştır.

Uygun Tane Boyutu Fraksiyonlarının Belirlenmesi

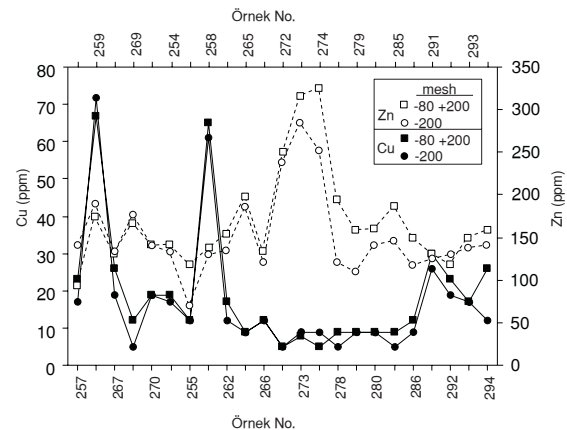
Bazı örneklerin farklı elek açıklıklarındaki tane boyutları analiz edilmiştir. Farklı elek boyutundaki örneklerden bazılarında, Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü (Laboratuvar 1) ve İnönü Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü (Laboratuvar 2) laboratuvarlarında bulunan iki değişik AAS ile Cu ve Zn analizi yapılmıştır (Şekil 2). İki farklı AAS ile elde edilen analiz sonuçlarının benzerliği, örnek hazırlama ve analiz sırasında işlemlerin hassas bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Dolayısıyla inceliği etkileyen tesadüfi hataların en az seviyede olduğu söylenebilir. Element konsantrasyonu yüksek olan 219, 221 no.lu örneklerde büyük boyuttan küçük boyutlu fraksiyona gidildikçe element konsantrasyonu belirgin şekilde azalmaktadır. 3 ve 4 no. lu örneklerde ince fraksiyonlarda derişim göreceli olarak fazladır. Bu örnekler, kaynak alanında tonalit türü derinlik kayaların yoğun olduğu derelerden alınmıştır. 225 ve 229 no. lu örneklerde Cu için değişik boyutlarda fazla bir ayrılım göz-



Şekil 2. Bazı dere kumu örneklerinin farklı boyuttaki fraksiyonlarındaki Cu ve Zn içerikleri. Çözme Yöntemi: 3 ve 4 no.lu örnekler kral suyu (4), diğer örnekler nitrik asit (5). (Lab. 1: Perkin Elmer 370 AAS, Lab.2: Philips PU 9100X AAS).

Figure 2. Cu and Zn content of different size fractions of some stream sediment samples. Decomposition Method: Samples 3 and 4 aqua regia (4), others nitric acid (5). (Lab. 1: Perkin Elmer 370 AAS, Lab.2: Philips PU 9100X AAS).

lenmemekte, Zn için ise ayrılım dikkat çekmektedir. Benzeri bir durum örneklerde -80 +200 ve -200 mesh boyutunda Cu ve Zn dağılımlarında da gözlenmektedir (Şekil 3). Cu için yüksek konsantrasyonlu örneklerde (kaynak alanı volkanosedimanterler) -80 +200 mesh boyutunda element değerlerinde genellikle bir artış gözlenir-



Şekil 3. Bazı dere sedimentlerinin -80+200 ve -200 mesh boyutundaki Cu ve Zn içerikleri. (Çözme Yöntemi: Nitrik asit).

Figure 3. Cu and Zn content of -80+200 and -200 mesh size of some stream sediment. (Decomposition Method: Nitric acid).

ken, düşük konsantrasyonlu örneklerde (kaynak alanı tonalitler) farklı boyuttaki örneklerde çok fazla bir değişim gözlenmemektedir. Zn değerleri için bu fark biraz daha belirgindir.

Yukarıda da belirtildiği gibi, cevherli alanlardan türeyen kum örneklerinde elementler genellikle büyük ve orta boyuttaki fraksiyonlarda yüksek değerler almaktadır. Çok iri tanelerin homojeniteyi bozarak hatalara neden olabileceği düşünülerek, kum örneklerinin -80 +200 mesh boyutu öğütülerek analize hazırlanmıştır. Öğütme işleminde yaklaşık 50 g örnek kullanılmıştır. Öğütme, porselen bilyeli değirmende yapılmıştır.

Çözme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Jeokimyasal arama çalışmalarında, örnekleri çözmede genellikle çeşitli asitlerin kullanılması tercih edilmektedir. Çözme işleminde, açık veya kapalı sistem, farklı sıcaklık ve zaman aralıkları seçilebilmektedir (Chao ve Sanzolone, 1992; Van Loon ve Barefoot, 1989). Açık sistemde çözünmeyen veya kısmen çözünen bazı refrakter mineraller aynı asit veya asit karışımıyla kapalı sistemde çözünebilmektedir. Bu husus, yüksek sıcaklık ve basınçlarda asitlerin artan aktifliği ile ilişkilidir. Bu çalışmada özel olarak tasarlanmış, metal gövde içerisine yerleştirilen "teflon bomba" olarak adlandırılan bir kroze yapılmış ve bazı deneylerde kullanılmıştır.

Atomik Absorbsiyon Spektrometresi (AAS) için uygun çözme yönteminin belirlenmesi amacıyla değişik yöntemler denenmiştir. Seçilen bu farklı yöntemler yardımıyla dere kumlarında analiz edilen elementlerin bulunuş şekilleri de belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çözme yöntemleri veya benzerleri daha önce değişik araştırmacılar tarafından uygulanmıştır (Yöntem 1 ve 2; Brenner vd., 1987; Maqueda vd., 1986); Yöntem 3 (Betinelli vd., 1986); Yöntem 4 (Rubeska vd., 1987; Macalalad vd., 1988); Yöntem 5 (Köksoy ve Topçu, 1976)). Çözme yöntemlerinin ayrıntıları aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

I. Yöntem (1): 1g örnek teflon bombaya konularak, 10 ml nitrik asit (HNO_3) ilave edilmiştir. 200C° sıcaklıkta, etüvde bir saat bekletildikten sonra soğutulmuş ve kapak açılarak 5 ml hidroklorik asit (HF) eklenmiştir. Kuruluğa kadar buharlaştırılıp, 5 ml HNO_3 ve 2 ml HF konmuş ve tekrar kuruluğa kadar buharlaştırılmıştır. 5 ml

HNO_3 ve 2 ml perklorik asit (HClO_4) eklenerek yine kuruluğa kadar buharlaştırılmıştır. Daha sonra, 5 ml %50 HNO_3 +HCl (1/1, v/v) eklenerek filtre kağıdından süzülmüş ve çözelti 100 ml'ye tamamlanmıştır.

II. Yöntem (2): 0,5 g örnek teflon kröze tartılarak 5 ml HNO_3 +5 ml HF+5ml HCl eklenmiş ve bir gün bekletildikten sonra buharlaştırılmıştır. 1 ml % 50 HNO_3 +HCl (1/1) konduktan sonra, süzülerek saf su ile 50 ml'ye tamamlanmıştır.

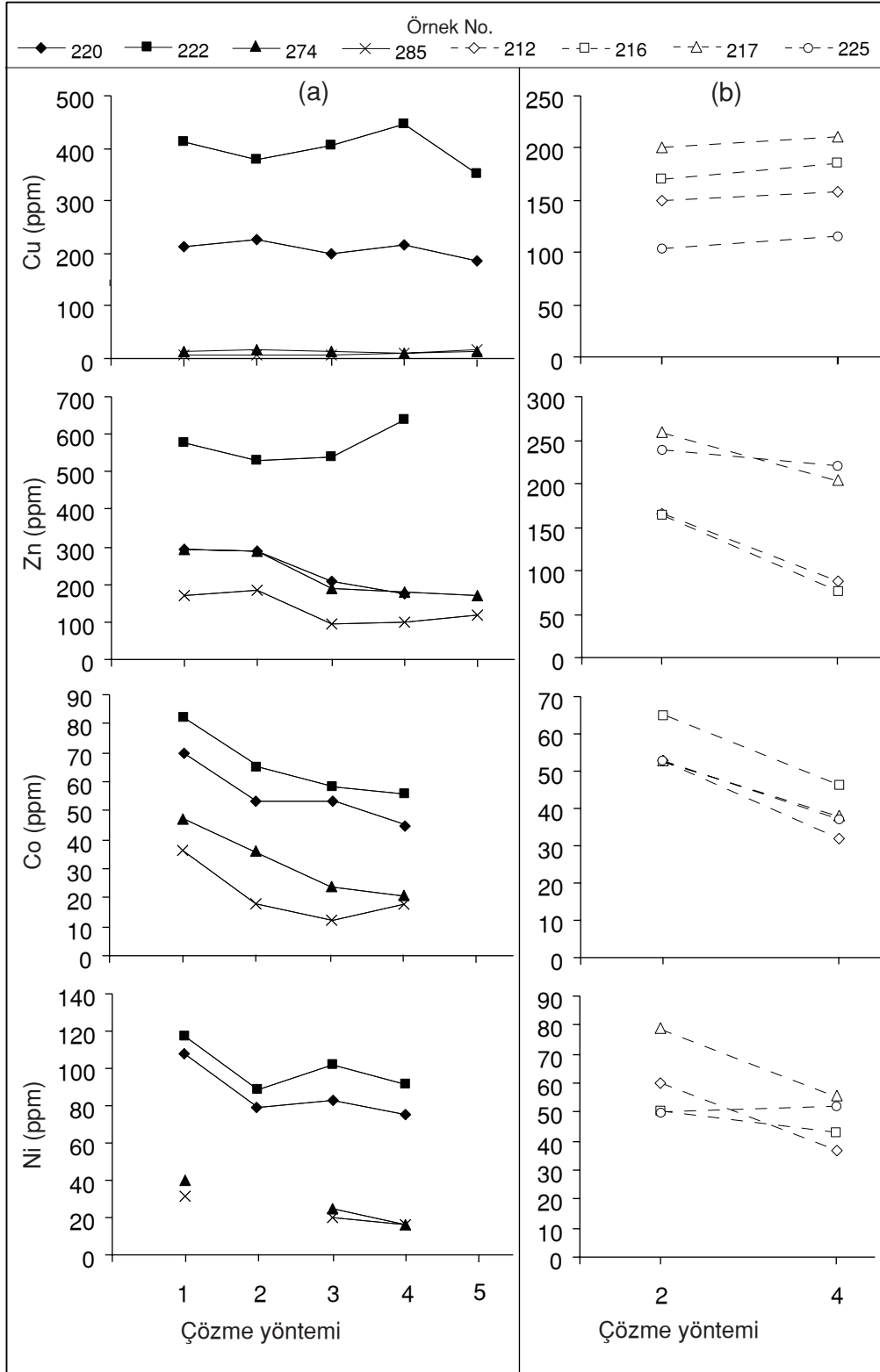
III. Yöntem (3): 1g örnek teflon bombaya konularak, 20 ml HNO_3 +5 ml HClO_4 eklenmiş ve 200C° sıcaklıkta 1 saat etüvde bekletilmiştir. Buharlaştırıldıktan sonra, 1 ml %50 HNO_3 +HCl (1/1) ve 10 ml %10'luk tartarik asit konularak süzülümüştür. Çözelti distile su ile 50 ml'ye tamamlanmıştır.

IV. Yöntem (4): 1.25 g örnek test tüpüne tartılmış ve 4 ml kral suyu ilave edilmiştir. Isıtıcı tabla üzerinde 30 dakika kaynatıldıktan sonra, %10'luk 10 ml tartarik asit eklenerek. 25 ml'ye tamamlanmıştır. Santrifüj yapılarak direkt okuma alınmıştır.

V. Yöntem (5): 0.5 g örnek ve 10 ml HNO_3 test tüpüne konularak yaklaşık bir saat su banyosunda 95C° de tutulmuş ve 20 ml'ye tamamlandıktan sonra santrifüj yapılarak okuma gerçekleştirilmiştir.

220, 222, 274 ve 285 nolu örnekler 1, 2, 3, 4 ve 5. yöntemlerle, 212, 216, 217 ve 225 nolu örnekler ise 2. ve 4. yöntemlerle çözümlenerek Cu, Zn, Ni ve Co elementleri analiz edilmiştir. Uygulanan çözme yöntemi ve element derişimi Şekil 4'de verilmiştir. Metal konsantrasyonu yüksek olan örneklerin (220, 222) Cu içeriği 4. yöntemde oldukça yüksek çıkmaktadır (Şekil 4a). Bu yöntemde Şekil 4b'deki örneklerin bakır içerikleri de fazladır. 222 no.lu örneğin Zn içeriği de kral suyu yöntemiyle yüksek değerler vermektedir.

Toplam metal konsantrasyonu düşük olan örneklerde genellikle kral suyunun kullanıldığı çözme yöntemi (4) tüm elementler için düşük seviyededir (bkz. Şekil 3). Teflon bombanın kullanıldığı yöntemlerde (1, 3) yüksek metal içeriğine sahip örneklerin Cu ve Zn değerleri hariç, genel olarak element konsantrasyonları yüksek düzeydedir (Şekil 4a). Cu ve Zn için uygulanan



Şekil 4. Bazı dere kumu örneklerinin farklı çözme yöntemlerinde Cu, Zn, Co ve Ni içerikleri (1. HF, HNO₃; 2. HF, HNO₃, HCl; 3. HNO₃, HClO₄; 4. 3HCl + HNO₃; 5. HNO₃).

Figure 4. Cu, Zn, Co and Ni content, with different decomposition methods of some stream sediment samples (1. HF, HNO₃; 2. HF, HNO₃, HCl; 3. HNO₃, HClO₄; 4. 3HCl + HNO₃; 5. HNO₃).

nitrik asit ile çözme yöntemi (5) diğer yöntemlere göre düşük değerler vermektedir.

1. ve 2. yöntemlerde diğer asitlerle birlikte HF asit kullanıldığı için, çoğu silikatler çözünmekte ve silikatların yapısına da girme eğilimi olan Ni ve Co değeri yüksek çıkmaktadır. Silikatların çözünmesinin ihmal edilebileceği kral suyu ile çözülen yüksek metal içeriğine sahip örneklerin Cu ve Zn içeriğinin yüksek çıkması, dere kumlarındaki metallerin birincil ve/veya ikincil sülfürler şeklinde bulunduğunu göstermektedir. Çünkü kral suyu tüm sülfürleri çözebilmektedir (Olade ve Fletcher, 1974). Yukarıda değinilen nedenlerden dolayı örnekleri çözmek için kral suyu (4) tercih edilmiştir.

Örneklerin analizleri Atomik Absorbsiyon Spektrometresi (AAS) ile yapılmıştır. Alev, hava-asetilen karışımından (1/2) oluşmaktadır. Analiz edilen elementler için alt tayin limitleri ppm olarak Cu 0.04, Co 0.05, Ni 0.06, Zn 0.01, Pb 0.1, Cd 0.01' dir. Değerler, örneklerin hiçbirinde alt tayin limitlerinin altında çıkmamıştır.

Bazı örneklerden ikişer adet örnek çözeltisi hazırlanmış ve bunlara farklı örnek numaraları verilerek analizleri yapılmıştır. Bu örneklerin % inceliği, Youden (1951) tarafından önerilen yöntemle belirlenmiştir. % 95 güvenilirlik seviyesinde her bir element için % incelik değerleri Cu 14.5, Co 4.4, Ni 4, Zn 1.6, Pb 17.4 ve Cd 21.2' dir. Jeokimyasal prospeksiyon amacıyla yapılan analizlerde % 95 güvenilirlik seviyesindeki inceliği \pm % 25 'den küçük olan yöntemler iyi olarak kabul edilmektedir (Köksoy ve Topçu, 1976). Buna göre, bu çalışmada uygulanan analiz yönteminin oldukça iyi bir inceliğe sahip olduğu söylenebilir.

ELEMENTLERİN DAĞILIMI

Piritik masif sülfid cevherleşmelerinin gözleendiği Derince'nin güneyindeki ana dere ve tali kollarında (Şekil 5; A, B ve C kolları) alınan örneklerin element dağılımları mesafe-konsantrasyon diyagramında değerlendirilmiştir. Bu diyagramda A ve B derelerine ait veriler içi dolu, bunların tali kollarına ait veriler içi boş noktalarla gösterilmiştir. Genel olarak A ve B derelerinde ve bunun tali kollarında dereye katılan cevherli ve cevhersiz malzemedan dolayı dağılım, bu derelerin C deresi ile birleşim noktasına kadar düzensiz şekilde değişmektedir. Bu birleşim nokta-

sından sonra 244 no.lu örnek alım noktasına kadar element içeriğinde bir azalma söz konusudur ve bu durum C deresinden yoğun steril malzeme getirimini düşündürmektedir. Bu seyrelmeye rağmen 243 no.lu örneğin metal içeriğinde tüm elementler açısından bir artış gözlenmektedir. Bu noktadan sonra, derenin akış yönünde gidildikçe, element konsantrasyonu genel olarak azalmaktadır. Bu nedenle, 244 no.lu ve 243 no.lu örnek alım noktaları arasında bir cevherleşmenin bulunduğunu ve bu noktadan aşağıya doğru dere yatağına giren yeni bir cevherli malzeme olmadığından, mesafeye bağlı olarak basit bir seyrelme ile konsantrasyonda azalma olduğunu söylemek mümkündür.

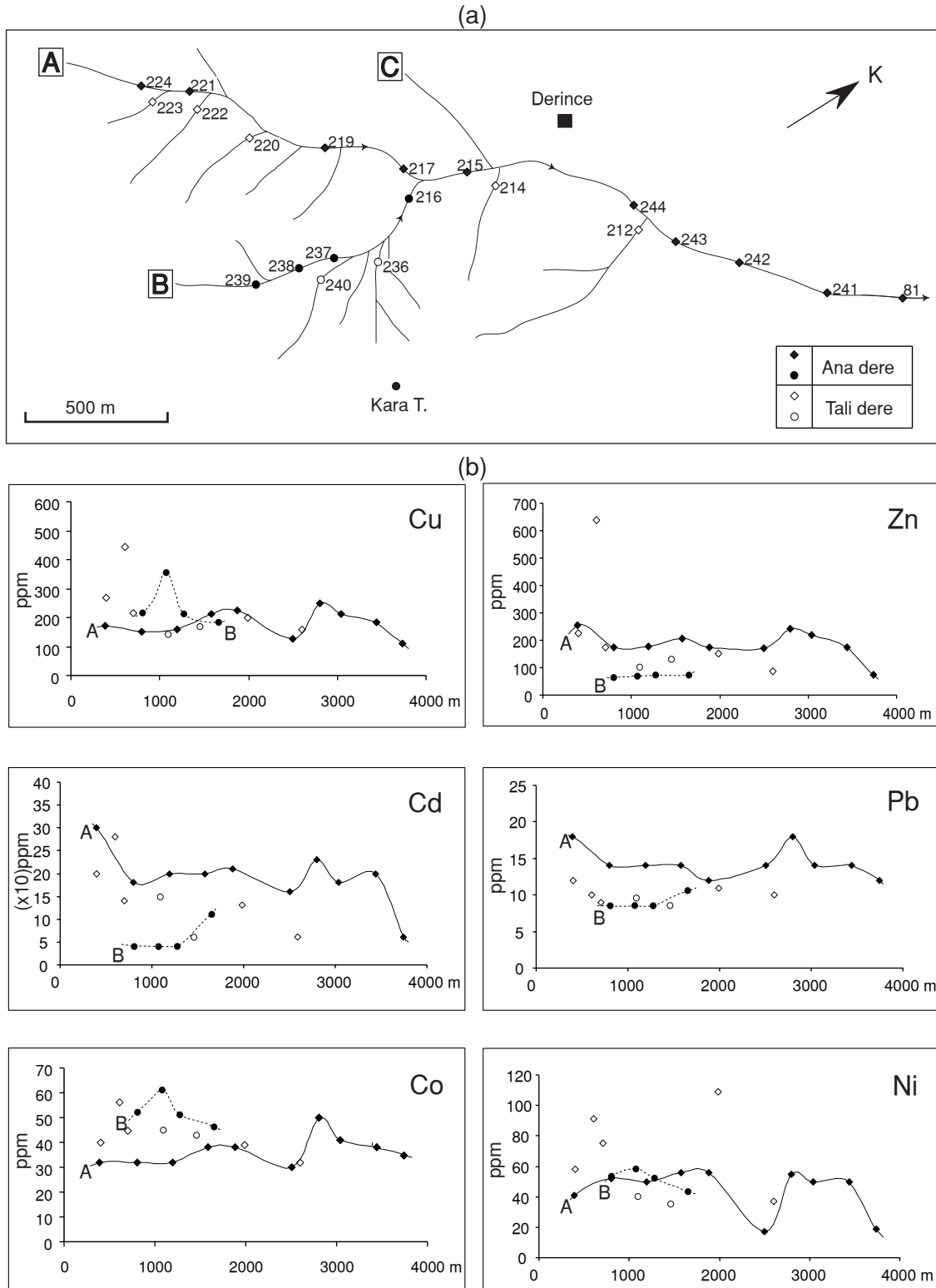
Analizi yapılan Cu, Pb, Ni, Co, Zn ve Cd elementleri, tonalitik kayalardaki Pb hariç, log-normal dağılım göstermektedir. Cu, Ni, Zn ve Cd nispeten birbirlerini üzerleyen iki topluluktan oluşurken, Co ve Pb sadece temel değer topluluğu içeren bir dağılıma sahiptir. Alansal dağılımlar, veriler eğer sadece tek topluluktan oluşuyorsa toplam verilerin, %25, %50, %75, %90, %95 kümülatif değerleri, eğer iki topluluktan oluşuyorsa temel değer topluluğunun %25 ve %50, anomali topluluğunun ise %50, %75, %90 kümülatif değerleri esas alınarak hazırlanmıştır.

Derince'nin güneyinde ve batısında bulunan derelerde Cu, Zn ve Cd birbirleriyle iyi bir korelasyon sunmakta ve diğer alanlara göre konsantrasyon açısından belirgin bir karşıtlık göstermektedirler (Şekil 6 ve 7). Bu derelerde Co, daha düşük derişimlerle de olsa, Cu, Zn ve Cd ile uyumlu bir dağılım göstermektedir. Ni, yukarıda sayılan elementlere benzer dağılım sunmamakta, Derince'nin kuzey doğusundaki derelerde belirgin bir artış göstermektedir (Şekil 8). Pb'un Derince ve çevresinde diğer elementlerle negatif bir korelasyonu vardır ve Pb içeriği temel değer seviyesindedir (bknz. Şekil 6).

Bölgede diğer derelerdeki örneklerin element dağılımları Pb dışında temel değer seviyesinde düşük derişimde ve benzer özelliktedir. Pb Çayecorik Derede az da olsa belirgin derişim artışı göstermektedir (bknz. Şekil 6 ve 8).

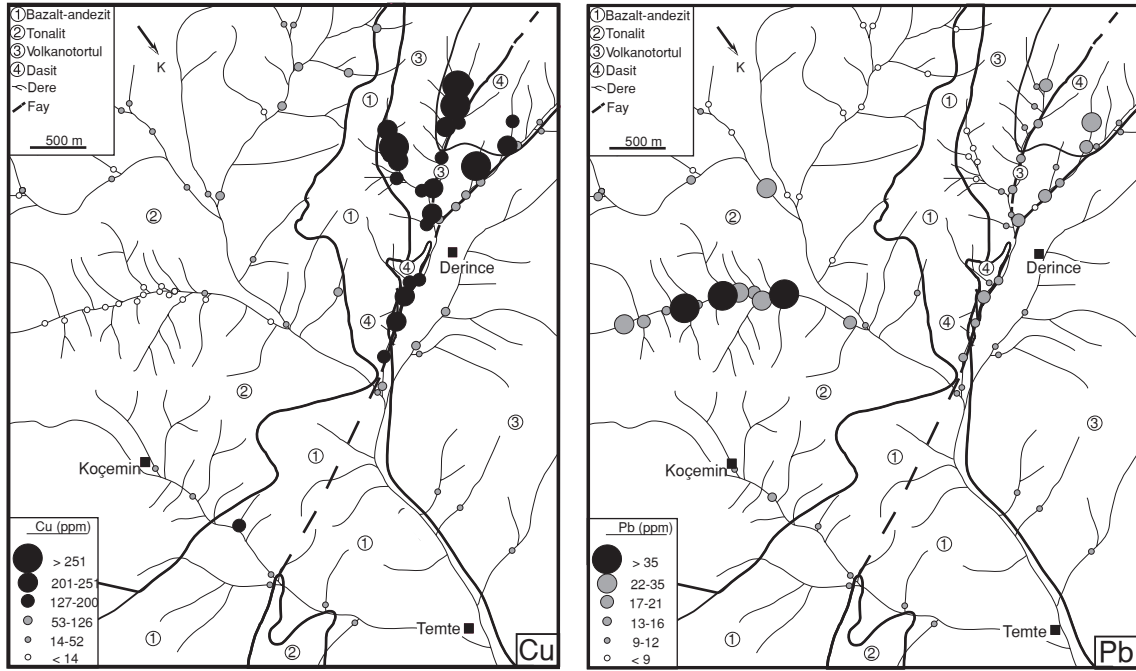
TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Genel olarak dere sedimentlerinin tane boyu seçimi; iklim, topoğrafya ve elementin bulunuş şekline bağlıdır. Kimyasal ayrışmanın baskın ol-

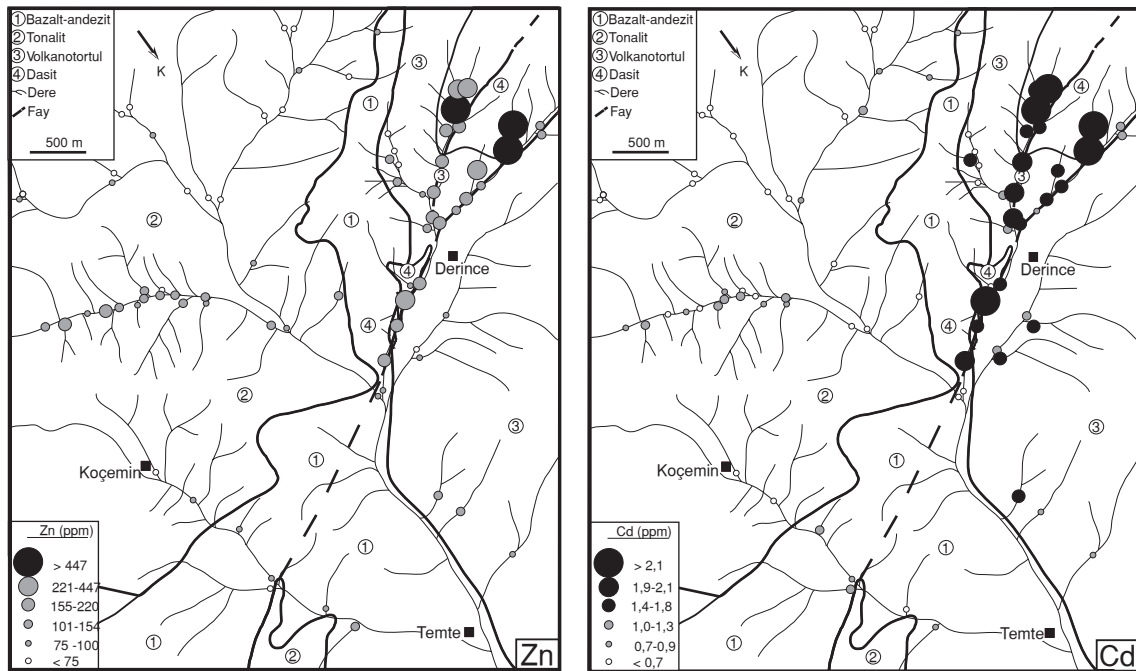


Şekil 5. Derince'nin güneyindeki derelerde dere akış yönünde dağılım: a) örnekleme lokasyonlarını gösteren drenaj haritası, b) sedimenterde gözlenen metal içeriği.

Figure 5. Downstream dispersion in streams at the south of Derince: a) drainage map showing the sampling locations, b) observed metal content of sediments.



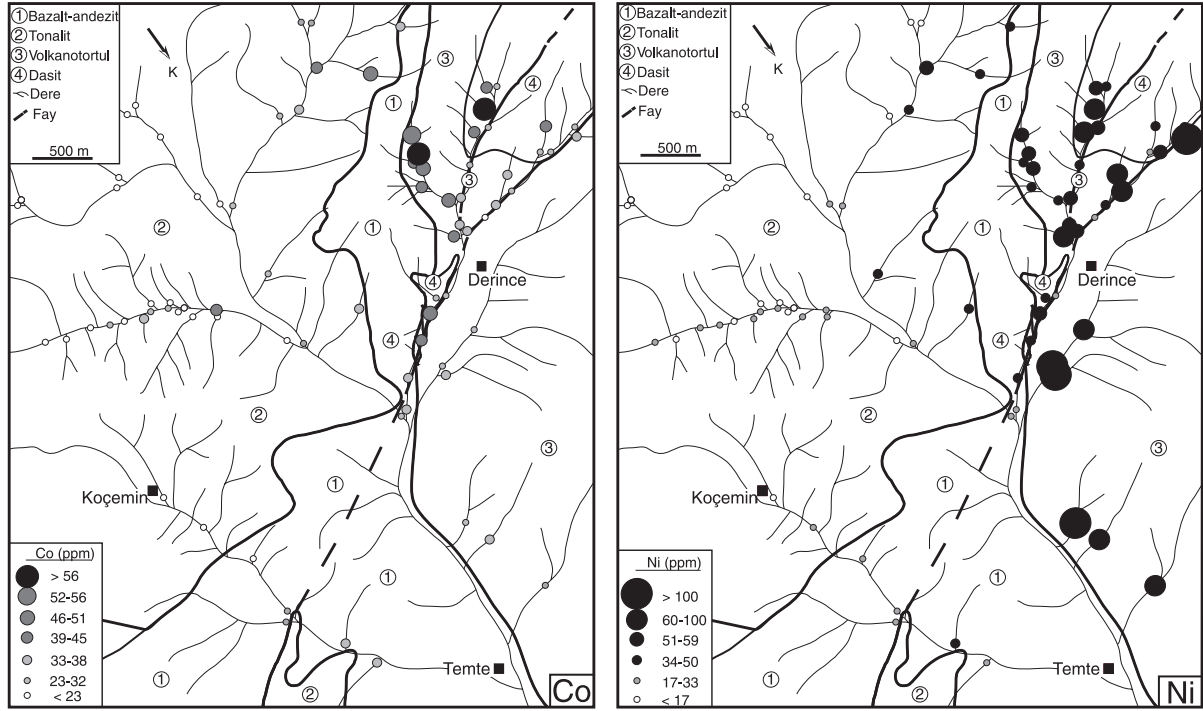
Şekil 6. Dere sedimentlerinde Cu ve Pb dağılımı.
Figure 6. Distribution of Cu and Pb in stream sediments.



Şekil 7. Dere sedimentlerinde Zn ve Cd dağılımı.
Figure 7. Distribution of Zn and Cd in stream sediments.

duğu alanlarda genellikle 80 mesh altındaki dere sedimenti fraksiyonu kullanılmaktadır (Rose vd., 1979; Appleton ve Ridgway, 1994). İncele-

me alanına benzer, yarı kurak ve genç dağlık bölgelerde genellikle iri fraksiyon tercih edilmektedir. Bu tür yarı kurak bölgelerde erezyonun et-



Şekil 8. Dere sedimentlerinde Ni ve Co dağılımı.
Figure 8. Distribution of Ni and Co in stream sediments.

kisiyle kaynağa yakın alanlarda galen, sfalerit ve kalkopirit gibi düşük dirençli mineraller de kırıntılı malzeme içerisinde gözlenebilmektedir (Ötügen ve Theobald, 1994). Birbirine çok yakın örnek alım noktalarında çok farklı element derişimlerinin olması yüksek konsantrasyonlu örneğin cevherleşmeye çok yakın olduğunu ve yüksek erozyon nedeniyle çok kısa mesafede ortamdaki uzaklaştığını gösterir. Nitekim, inceleme alanına göre daha fazla yağışın olduğu, ancak çalışma alanına benzer topoğrafik yapıya sahip olan Doğu Karadeniz Bölgesi'nde de drenaj ağındaki element dağılımını, daha çok sülfütlü mekanik olarak ayrılmış ürünlerin oluşturduğu bilinmektedir (Çağatay, 1984).

Örneklerin alındığı ortamın fiziksel ve kimyasal koşulları nedeniyle, dere kumlarındaki elementlerin kimyasal olaylardan ziyade fiziksel olayların etkisiyle oluştuğu sanılmaktadır. Dolayısıyla dere kumlarında element dağılımı hidromorfik fraksiyondan ziyade, klastik fraksiyonunun içerisinde yoğunlaşmaktadır. Özellikle yüksek topografyaya sahip alanlardan kaynaklanan dere kumu örneklerinin kaba boyuttaki fraksiyonu içerisinde element konsantrasyonu fazla, düşük

fraksiyonda ise çok azdır. Bununla birlikte, iri fraksiyonda sadece aşırı yüksek bileşimli birkaç taneden dolayı kabul edilemez büyük örnekleme hataları olabileceğinden, -80 ile +200 mesh arasındaki kum fraksiyonunun analizi uygun görülmüştür.

HF asidin de kullanıldığı asit karışımları (1. ve 2. yöntemler) toplam çözündürme sağlamaktadırlar (Fletcher, 1983; Van Loon ve Barefoot, 1989; Chao ve Sanzolone 1992). Deney sonuçları, HF asidin kullanıldığı çözündürme ile en yüksek değerler elde edildiğini göstermektedir.

Kral suyunun kullanıldığı çözündürme yöntemi (4. yöntem) ile oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. Kral suyunun tüm sülfütlü çözündüğü bilinmektedir (Chao ve Sanzolone 1992). Toplam çözme yöntemiyle (1. ve 2. yöntemler) Ni ve Co'nun kral suyu çözündürmesinden daha yüksek değerler vermesi, bu elementlerin silikatların yapısına da girmiş olabileceğini gösterir. Ancak örneklerdeki Cu değerlerinin toplam çözündürme ve kral suyu çözündürmesinde de yaklaşık eşit değerler vermesi, Cu'nun esas olarak sülfürler şeklinde bulunduğunu göstermektedir.

Kral suyu çözündürmesi, nitrik asit ve nitrik asit - perklorik asit çözündürmelerinden daha daha yüksek değerler vermektedir. Nitekim, Olade ve Fletcher (1974) de kral suyunun sülfat fazını $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ karışımından daha iyi çözdüğünü belirtmişlerdir.

İnceleme alanında kimyasal bozunma oldukça azdır ve elementler birincil sülfatlar ve bunların fiziksel bozunma ürünleri halinde bulunmaktadır. Kral suyu, bu tür örnekler için oldukça iyi bir çözücüdür. (Schüler, 1971; Allcott ve Lakin, 1978; Rubeska vd., 1987). Bu asit hem primer sülfat fazlarını, hem de sekonder fazları çözebilmekte (Churc vd., 1986) olup, silikatlar üzerindeki etkisi sınırlıdır (Fletcher, 1983). Bu karışım ($3\text{HCl}+1\text{HNO}_3$), kolloidlerle ilişkili metalleri, oksit çökeltilerini ve minerallerini de çözebilmekte (Mothersill, 1977) ve bu yöntemle tek bir örnek çözündürmesi ile 16 element analizi yapılabilir (Rubeska vd., 1987). Ayrıca çok sayıda örnek, çok basit ekipmanla kısa sürede çözülebilmektedir.

Derince'nin güneyindeki ve batısındaki derelerde Cu, Zn ve Cd bakımından bir anomali söz konusudur. Bu derelerde Co daha düşük derişimlerle de olsa, Cu, Zn ve Cd ile uyumlu bir dağılım göstermektedir. Ni, yukarıda sayılan elementlere benzer dağılım göstermemekte, Derince'nin kuzey doğusundaki derelerde belirgin bir artış sunmaktadır. Pb'un Derince ve çevresinde diğer elementlerle ters yönde bir ilişkisi vardır ve Pb içeriği temel değer seviyesindedir. Sadece Çayecorik Dere'de, düşük konsantrasyonda olsa da, Pb belirgin bir şekilde öne çıkmaktadır.

Cu, Zn ve Cd anomalisi ve bunlarla uyumlu Co dağılımı bölgede yer alan piritik masif sülfat cevherleşmesi ile ilgili olmalıdır. Bu elementlerle benzer dağılım sunmayan nikelin bazı örneklerde lokasyonlarındaki yüksek konsantrasyonları volkano-sedimanter istif içerisindeki bazaltik volkanitler ve/veya peridotit olistolitlerinin temel değer olarak yüksek Ni içeriği ile ilgili olmalıdır. Benzer jeolojik, topografik ve iklimsel özelliklere sahip ortamlar için bu yönlendirme çalışması ile elde edilen bulgular bir referans noktası olabilir.

KATKI BELİRTME

Yazar, Doktora Tez Danışmanı Prof. Dr. Ahmet Sağıroğlu'na (Fırat Üniversitesi) katkılarından dolayı teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akgül, B., 1993. Piran köyü (Keban) çevresindeki magmatik kayaların petrografik ve petrolojik özellikleri. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 125 s (yayımlanmamış).
- Allcott, G.H., and Lakin, H.W., 1978. Tabulation of geochemical data furnished by 109 laboratories for six exploration reference samples. U.S. Geological Survey, Open File Report, 78-163.
- Appleton, J.D., and Ridgway, J., 1994. Drainage Geochemistry in Tropical Rain Forest Terrains *In*: M. Hale and J.A. Plant (eds.), Drainage Geochemistry, Handbook of Exploration Geochemistry, Elsevier, Amsterdam, 341-378.
- Asutay, H.J., 1987. Baskil (Elazığ) çevresinin jeolojisi ve petrografik incelenmesi. MTA Dergisi, 106, 55-61.
- Betinelli, M., Pastorelli, N., and Baroni, U., 1986. Determination of trace metals in sediment standard reference materials by grafit-furnace atomic absorption spectrometry with a stabilized temperature platform. Analytical Chemical Acta, 185, 109-117.
- Bölücek, C. 1995. Baskil Magmatitleri ile ilişkili cevherleşmelerin jeokimyasal prospeksiyonu. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 186 s (yayımlanmamış).
- Bölücek, C., ve Sağıroğlu, A., 1997. Hacımustafa (Baskil-Elazığ) cevherleşmelerinin özellikleri ve kökeni. Selçuk Üniversitesi 20. Yıl Jeoloji Sempozyumu, Bidiriler Kitabı, 149-157.
- Bölviken, B., Kullerud, G., and Loucks, R.R., 1990. Geochemical and metallogenic provinces: a discussion initiated by results from geochemical mapping across northern Fennoscandia. Journal of Geochemical Exploration, 39, 49-90.
- Brenner, I.B., Lang, Y., LeMarchand, A., and Grosdillan, P., 1987. A versatile technique for multi element ICP-AES analysis of geological samples. American Laboratory, 17-32.
- Chao, T.T., and Sanzalone, R.F., 1992. Decomposition techniques. *In* G.E.M. Hall (ed.), Geoanalysis, Journal of Geochemical Exploration, 44, 65-106.
- Church, S.E., Mosier, E.L., and Motooka, J.M., 1986. Mineralogical basis for the interpretation of multi-element (ICP-AES), oxalic acid, and aqua regia partial digestions of stream sediments for reconnaissance exploration geochemistry. *In* R.G. Garrett (ed.), Geochemical Exploration 1985, Journal of Geochemical Exploration, 29, 207-333.

- Çağatay, M.N., 1984. Selective extraction techniques in exploration for volcano-genetic sulphide deposits, Eastern Black Sea Region, Turkey. *Journal of Geochemical Exploration*, 21, 273-290.
- Darnley, A.G., 1990. International geochemical mapping: a new global project. *Journal of Geochemical Exploration*, 39, 1-13.
- Fletcher, W.K., 1983. Analytical methods in geochemical prospecting. *In: G.J.S.Govett (ed.), Handbook of Exploration Geochemistry*, Elsevier, Oxford, 255 pp.
- Govett, G.J.S., 1985. Rock Geochemistry in Mineral Exploration. G.J.S.Govett (ed.), *Handbook of Exploration Geochemistry*, Elsevier, New York, 461pp.
- Köksoy, M. ve Topçu, S., 1976. Jeokimyasal prospeksiyonun tanıtımı ve laboratuvar teknikleri. M.T.A. Eğitim Serisi Kitapları, 16, 96s.
- Krauskopf, K.B., 1989. *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill International Editions, Paris, 617pp.
- Learned, R.E., Chao, T.T., and Sanzolone, R.F., 1985. A comparative study of stream water and stream sediment as geochemical exploration media in the Rio Tanoma Porphyry copper district, Puerto Rico. *Journal of Geochemical Exploration*, 24, 171-195.
- Macalalad, E., Bayoran, R., Ebarvia, B., and Rubeska, I., 1988. A concise analytical scheme for 16 trace elements in geochemical exploration samples using exclusively AAS. *Journal of Geochemical Exploration*, 30, 167-177.
- Maqueda, C., Rodriguez, J.L.P., and Justo, A., 1986. Problems in the dissolution of silicates by acid mixtures. *Analyst*, 111, 1107-1108.
- Miesh, A.T., 1981. Estimation of the geochemical threshold and its statistical significance. *Journal of Geochemical Exploration*, 16, 49-76.
- Mothersill, J.S., 1977. Selected element concentrations in the post-glacial sediments of Thunder Bay, Lake Superior: distribution and methods of analyses. *Canadian Journal of Earth Science*, 14, 1054-1061.
- Olade, M., and Fletcher, K., 1974. Potassium chlorate-hydrochloric acid; a sulfide selective leach for bedrock geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 3, 337-344.
- Ottesen, R.T., and Theobald, P.K., 1994. Stream Sediments in Mineral Exploration. *In: M. Hale and J.A. Plant (eds.), Drainage Geochemistry, Handbook of Exploration Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 147-184.
- Plant, J.A., and Moore, P.J., 1979. Geochemical mapping and interpretation in Britain. *Philos. Transactions of the Royal Society of London, Ser. B*, 288, 95-112.
- Plant, J.A., Hale, M., and Ridgway, J., 1988. Developments in regional geochemistry for mineral exploration. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 97, B116-B140.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E., and Webb, J.S., 1979. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Academic Press, New York, 657 pp.
- Rubeska, I., Ebarvia, B., Macalalad, E., Ravis, D., and Roque, N., 1987. Multi-element preconcentration by solvent extraction compatible with an aqua regia digestion for geochemical exploration samples. *Analyst*, 112, 27-29.
- Sağiroğlu, A., 1986. Kızıldağ-Elaziğ cevherleşmelerinin özellikleri ve kökeni. *Jeoloji Mühendisliği Bülteni*, 29, 5-13.
- Sağiroğlu, A., 1992. Pertek -Demürek (Tunceli) skarn tipi manyetit ve ilişkili bakır cevherleşmeleri. *TJK Bülteni*, 35, 63-70.
- Schüler, V.C.O., 1971. Chemical Analysis and Sample Preparation. *In: R.E.Wainerdi and E.A. Uken (eds.), Modern Methods of Geochemical Analysis*, London, 53-71.
- Şaşmaz, A. ve Sağiroğlu, A., 1990. Billurik dere cevherleşmelerinin özellikleri ve kökeni. *MTA Dergisi*, 110, 45-54.
- Tüfekçi, M.Ş. ve Dumanlılar, Ö., 1994 a. Güneydoğu Anadolu maden arama projesi genel tahkik ve detay jeokimya çalışmaları raporu. Ankara, MTA Rapor No. 9736, 25 s (yayımlanmamış).
- Tüfekçi, M.Ş. ve Dumanlılar, Ö., 1994 b. Malatya-İspendere-Kızmehtet ve Elaziğ-Baskil-Nazaruşağı arasında görülen cevherleşmelerin genel görünümü ve maden jeolojisi çalışmaları raporu. MTA Rapor No. 9739, 26 s (yayımlanmamış).
- Van Loon, J.C., and Barefoot, R.R., 1989. *Analytical Methods for Geochemical Exploration*. Academic Press, New York, 344pp.
- Youden, W.J., 1951. *Statistical Methods for Chemists*. John Wiley and Sons Inc, N.Y., 16-17.



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

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

Ergün TUNCAY, Reşat ULUSAY

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

ÖZ

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

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

ABSTRACT

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

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

GİRİŞ

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

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

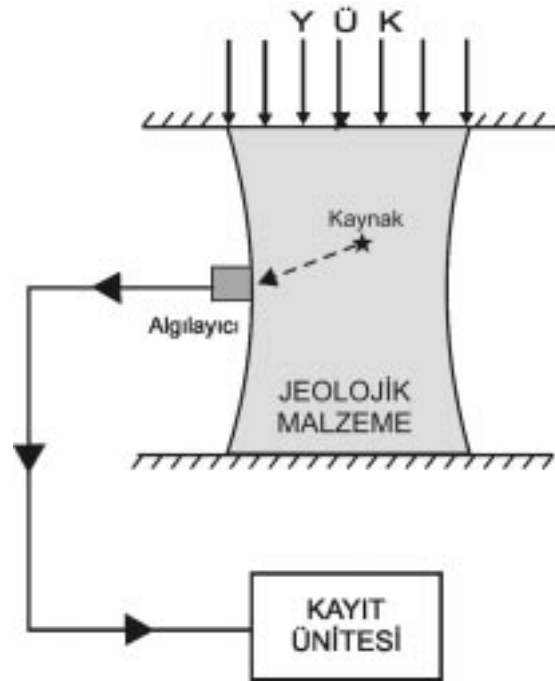
AE tekniğinin kaya mühendisliğindeki uygulamaları ABD, Kanada, Japonya ve Avrupa’da yapılan çalışmalarla yaygınlaşmış ve 1975 yılında “Jeolojik Yapı ve Jeolojik Malzemelerde AE/Mikrosismik Aktivite” konusunda gerçekleştirilmiş olan birinci konferansla birlikte AE yönteminin bu alanda kullanımı uluslararası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

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

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

AE SİNYALLERİ

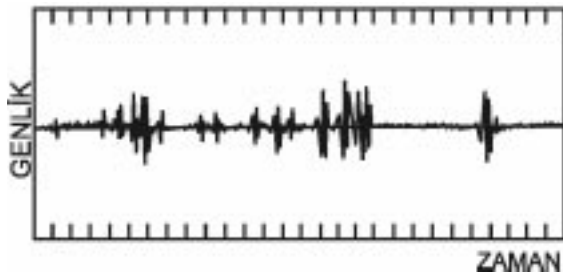
Jeolojik malzemede birikmiş olan elastik deformasyon enerjisinin ani olarak boşalması, elastik



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

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

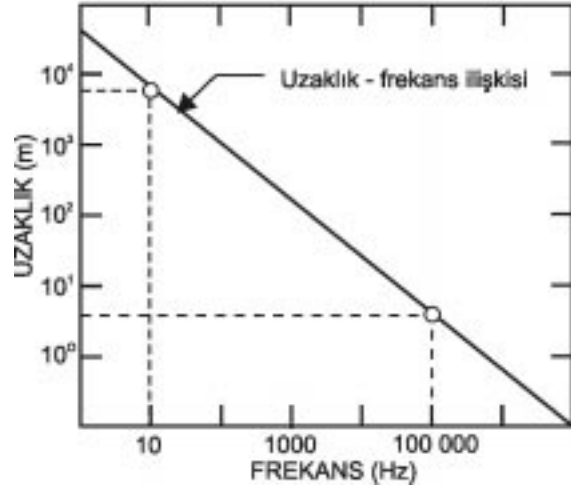
gerilme dalgası üretir ve bu dalga kaynağından malzemenin sınırına kadar yayılarak burada AE sinyali olarak izlenir. AE aktivitesinin doğada çok kristalli veya taneli olan jeolojik malzemede; mikro düzeyde yerdeğiştirmelerin sonucu, makro düzeyde ikizlenme, taneler arasındaki hareket, mineral taneleri boyunca veya tanelerin sınırındaki çatlak başlangıcı veya ilerlemesi; daha büyük ölçekte ise, geniş alana yayılmış malzemede meydana gelen kırılma, yenilme, ya da yapısal elemanların göreceli hareketi sonucu oluşabileceği belirtilmektedir (Hardy, 1972). Şekil 2'de zamana 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).



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

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

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



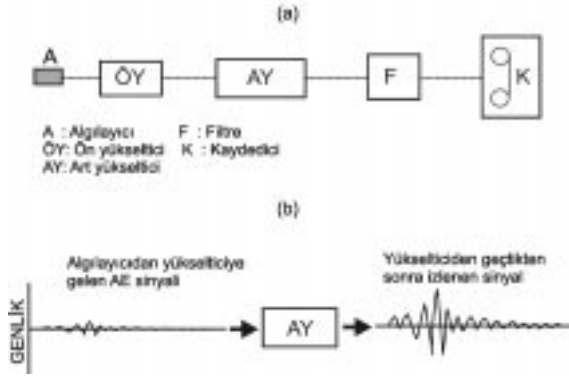
Şekil 3. AE sinyalleri için frekansın uzaklığa bağlı değişimi (Hardy, 1981).

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

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

AE İZLEME SİSTEMLERİ

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

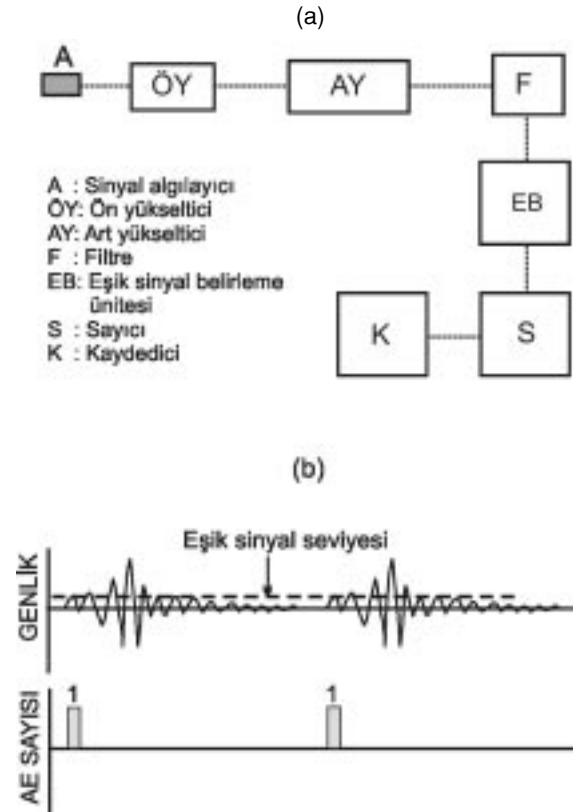


Şekil 4. (a) Temel AE sisteminin yalınlaştırılmış çizimi (Hardy 1981'den düzenlenmiştir) ve (b) AE sinyalinin yükseltilmesi.

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

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

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



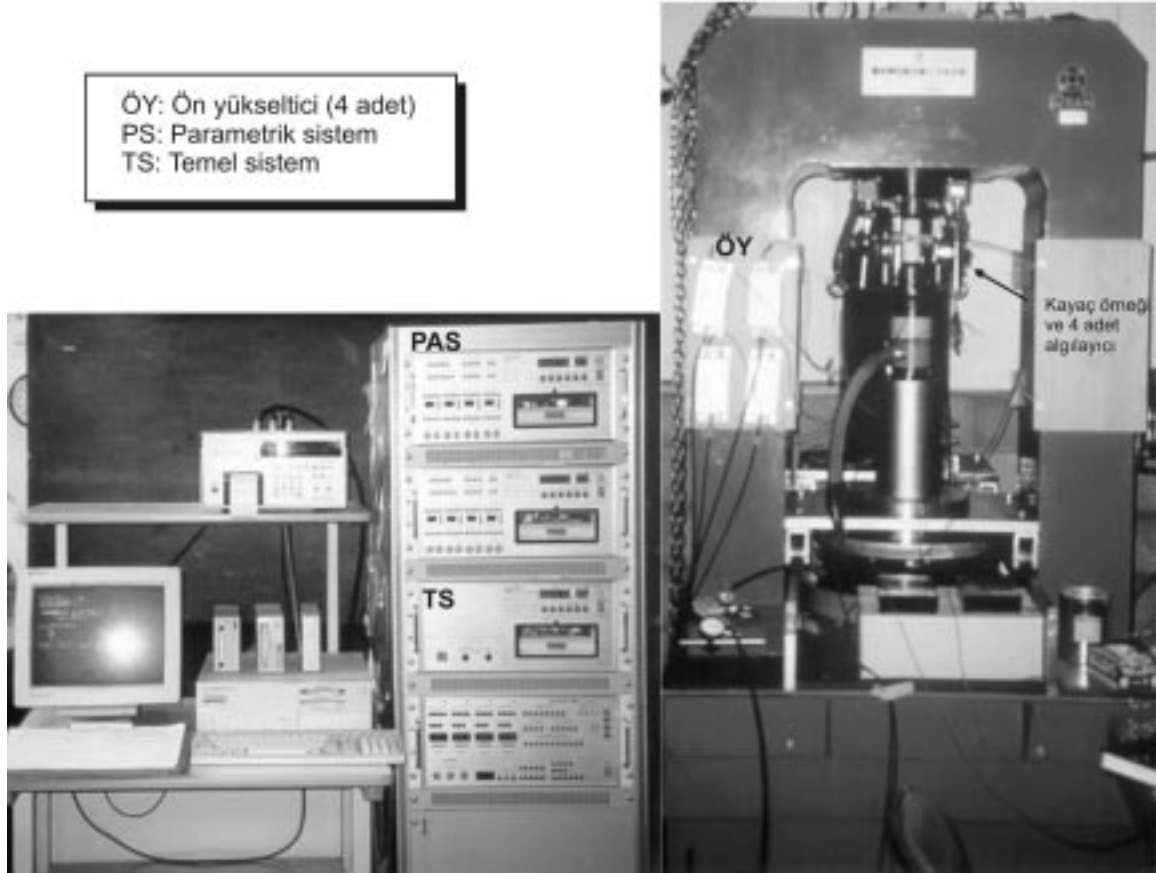
Şekil 5. (a) AE sayısının belirlendiği parametrik AE sisteminin yalınlaştırılmış çizimi ve (b) eşik seviyesi aracılığıyla AE sayısının belirlenmesi (Hardy, 1981'den düzenlenmiştir).

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

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

AE PARAMETRELERİ

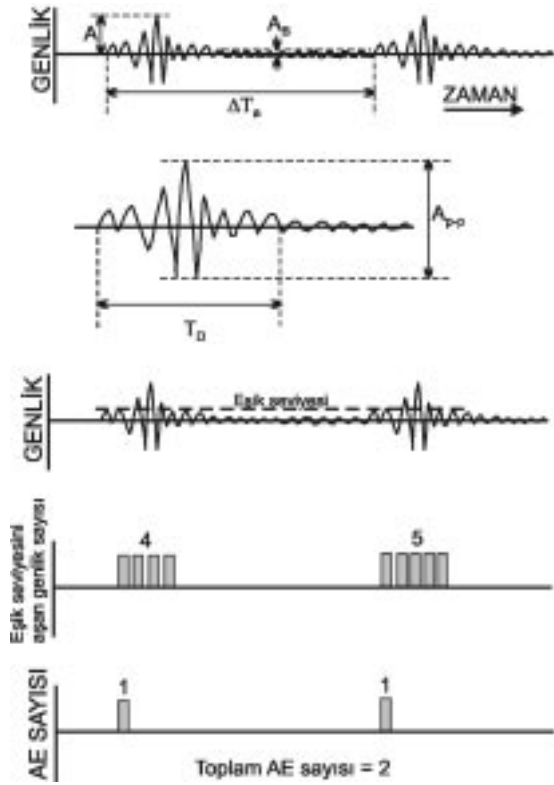
Parametrik sistemlerle gerçekleştirilen izleme çalışmalarında çoğunlukla toplam AE sayısı ve



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

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

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



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

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

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

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

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

AE İZLEME TEKNİKLERİ

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

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

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

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

Burada;

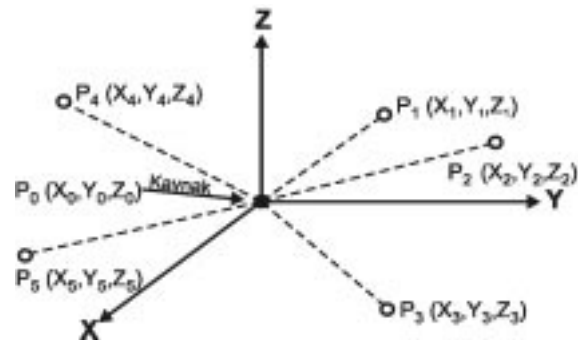
T_0 : Kaynaktan yayılan AE'nin gerçek başlangıç zamanı

t_i : AE sinyalinin algılayıcıya varış zamanı

V_i : AE sinyalinin yayılma hızı (m/s)

X_0, Y_0, Z_0 : Kaynağın koordinatları

X_i, Y_i, Z_i : Algılayıcıların koordinatları



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

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

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

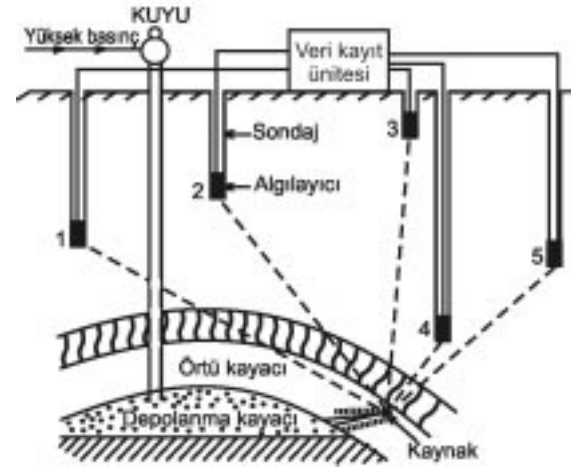
Kaynak lokasyonunun yerinin uygulamalarıyla belirlenmesi ise, üzerinde çalışılan jeolojik malzemenin geometrisinin karot veya küp gibi düzgün şekilli olmasından ve tek bir malzemeden oluşmasından dolayı daha basit bir uygulama gibi görünmektedir. Ancak laboratuvar uygulamalarında araştırılan malzemenin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

AE TEKNİĞİNİN KAYA MÜHENDİSLİĞİNDEKİ UYGULAMALARI

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

Yeraltı Depolama Çalışmaları, Yeraltı Madenciliği ve Tünelcilikteki Uygulamalar

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

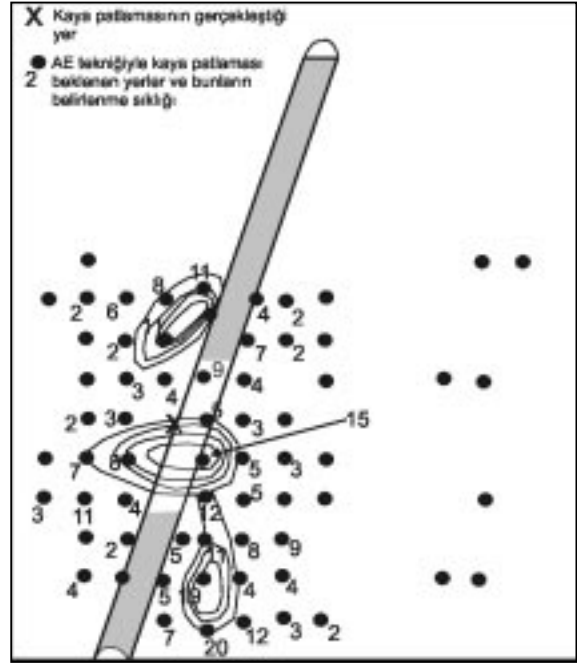


Şekil 9. Bir yeraltı gaz depolama sahasıyla ilgili olarak AE aktivitesinin yerinin belirlenmesi ve algılayıcıların konumları (1-5: algılayıcılar) (Hardy, 1978).

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

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

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

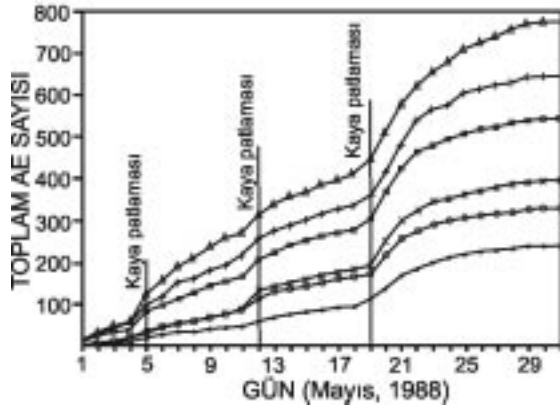


Şekil 10. Galena yeraltı işletmesinde (ABD) AE tekniği ile belirlenmiş kaya patlaması beklenen lokasyonlar ve gerçekleşen kaya patlamasının yeri (Blake ve Leighton, 1970).

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

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

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



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

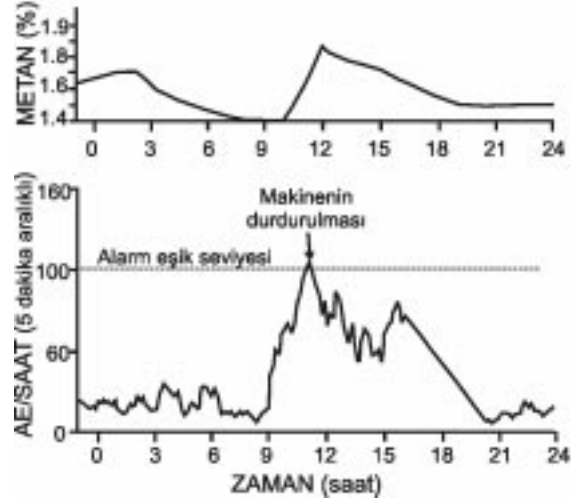
Figure 11. Cumulative AE count plots taken from the transducers located at 98 to 103 levels of a shaft at Kolar gold mine (India) and relationship between the AE counts and rock bursts (Srinivasan et al., 1995).

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

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

Şevlerdeki Uygulamalar

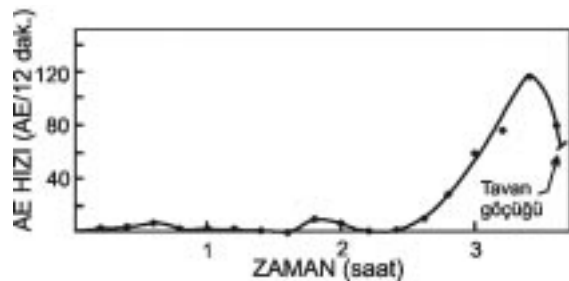
Özellikle açık işletmelerde meydana gelen şev duraysızlıkları mühendislerin sıkça karşılaştığı



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

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

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

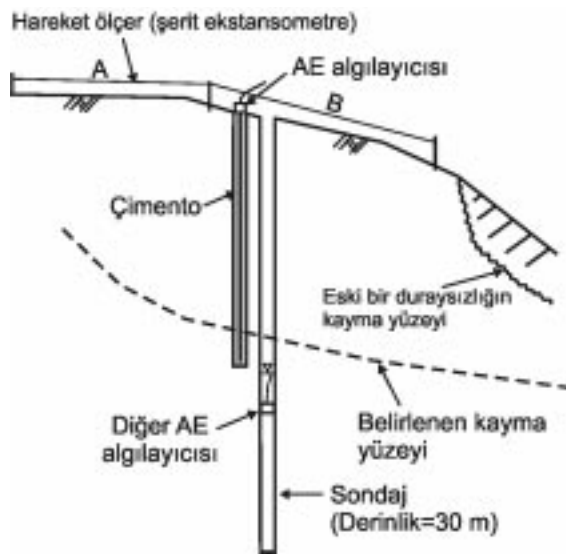


Şekil 13. Tavan göçüğünün meydana geldiği bir tünelde göçük öncesine ait AE hızı – zaman grafiği (Hooker vd., 1974).

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

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

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



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

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

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

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

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

Burada;

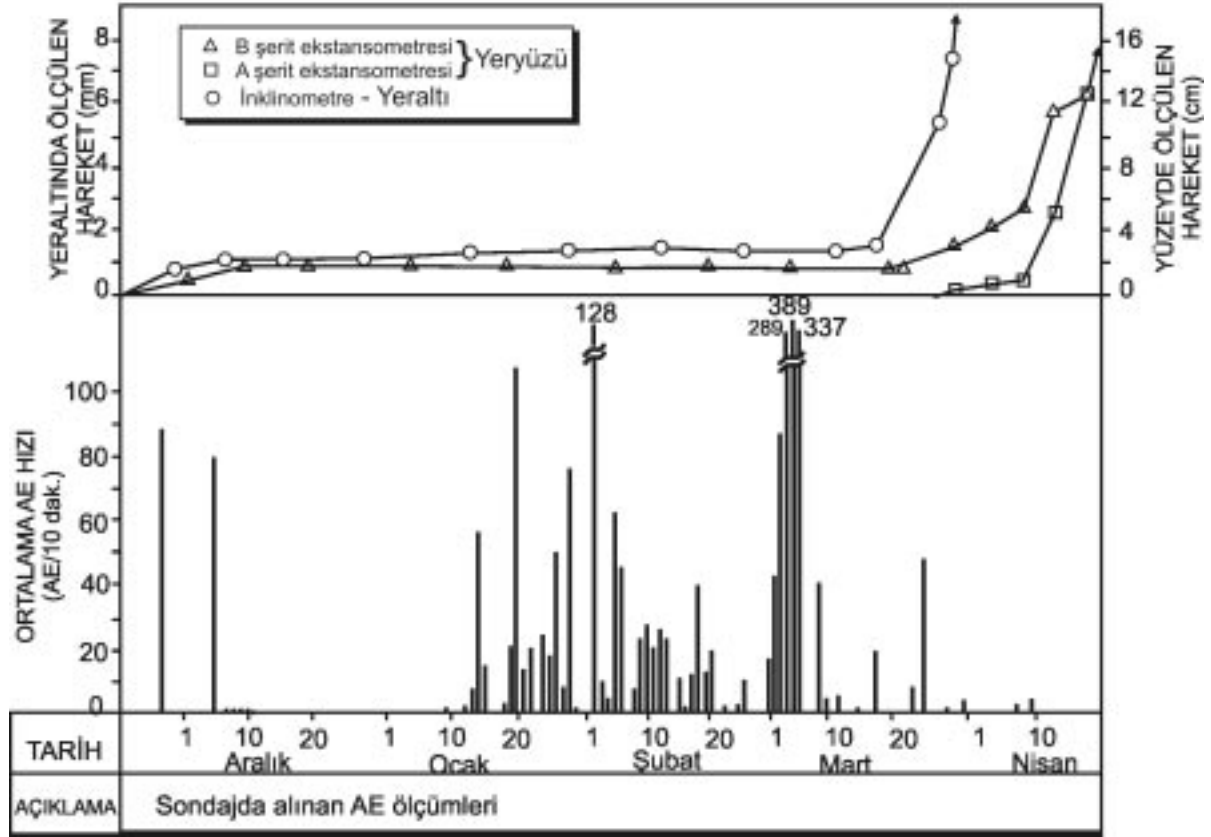
L: AE çubuğunun uzunluğu (m)

V_p : AE dalgalarının yayılma hızı (m/s)

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

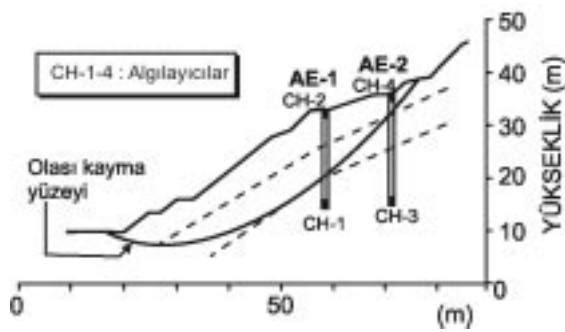
Ancak Suzuki vd. (1998), kaydedilen AE sinyallerinin belirgin olmamasından dolayı kayma yüzeyine ilişkin bilgi toplayamadılar. Araştırmacılar, böyle bir araştırma için daha fazla veriye ihtiyaç duyulduğunu, ancak yeraltısuyunun yükselmesi ve hareketin artması ile AE hızındaki artışın uyumlu olduğunu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

Şev duraysızlıklarında kayma yüzeylerinin belirlenmesi amacıyla AE tekniğinin başarılı şekilde



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

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



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

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

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

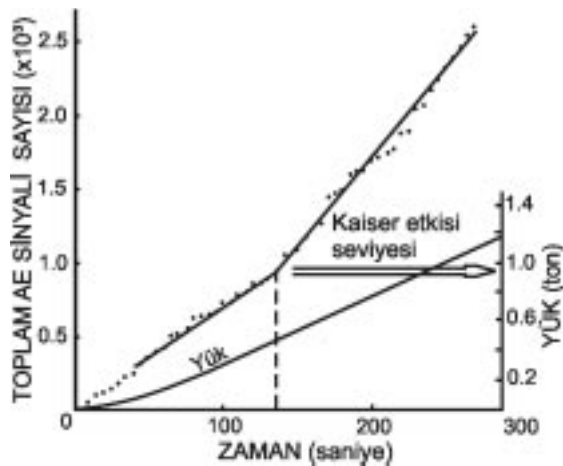
gibi, AE çubuklarından daha fazla veri toplanarak kayma yüzeyinin konumu tahmin edilse bile, elde edilen verinin benzer şekilde yerleştirilen ve daha kesin sonuçların alınabildiği inklinometrelere oranla, daha az güvenilir olduğunu düşünmektedirler.

Arazi Gerilmelerinin Belirlenmesi ve Depremlerin Yorumlanmasıyla İlgili Uygulamalar

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

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

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

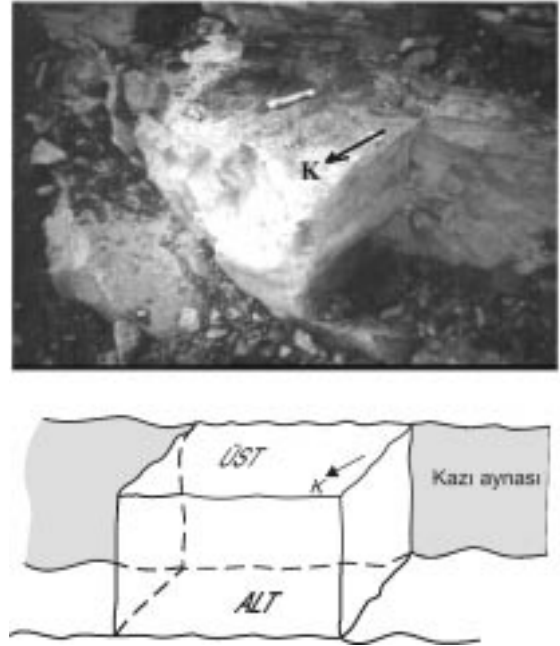


Şekil 17. Kaiser Etkisi seviyesinin "toplam AE sayısı - zaman" grafiğinden belirlenmesi (Hayashi vd., 1979).

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

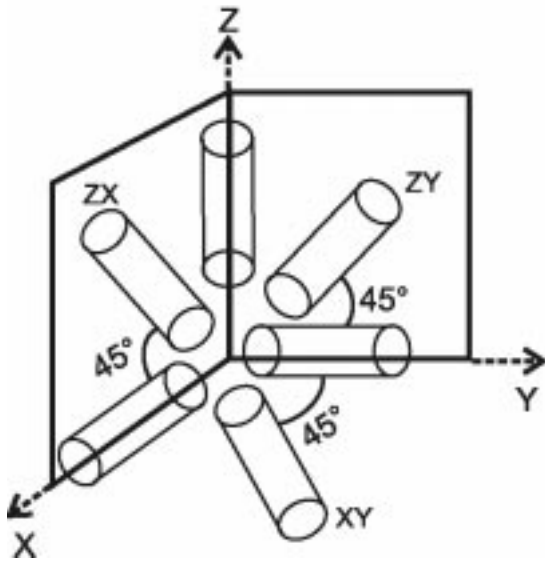
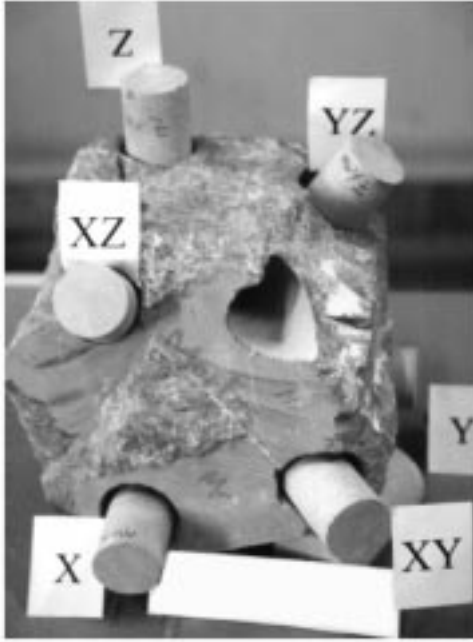
yönlü karot örnekleri üzerinde yapılan AE deneyleriyle “zaman - toplam AE sayısı ve gerilme” grafiğinden KE seviyeleri belirlenerek, kayacın alındığı yerde etkisi altında bulunduğu asal gerilmeler belirlenmiştir. Bu çalışmada, z yönünde alınmış örnek için saptanan gerilme değerinin, kayacın alındığı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

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

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

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

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



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

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

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

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

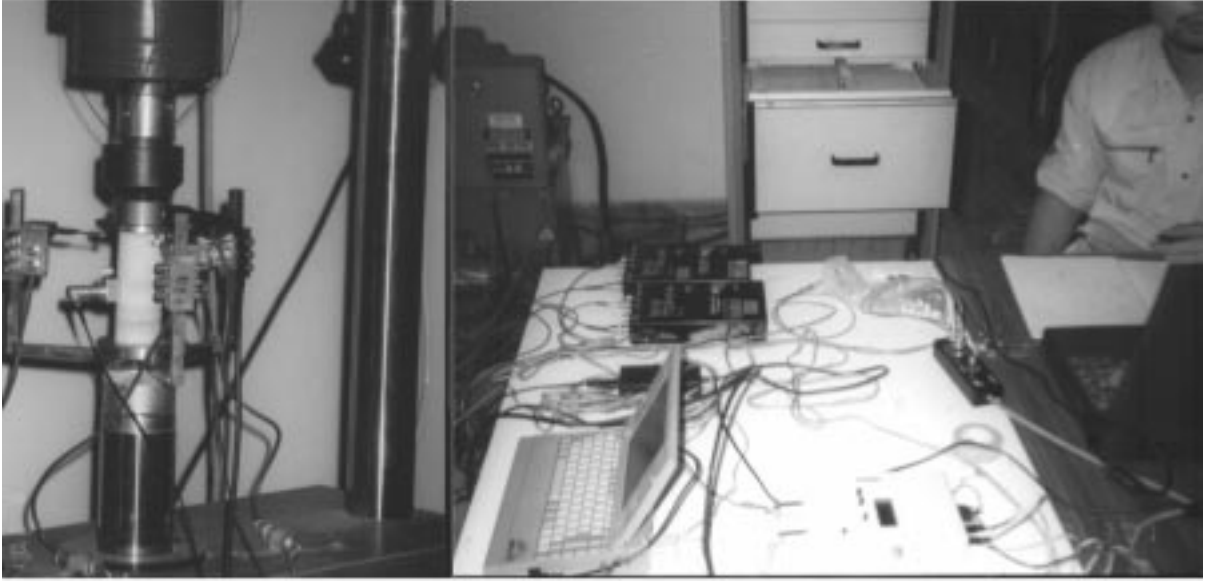
Depremlerin önceden kestirimi (öngörülmesi), yıllardır üzerinde durulan bir konu olmasına rağmen, bilimin bugün ulaştığı düzeyde bu konuya çözüm getirilmiş değildir. Bununla birlikte, gerilme birikmelerinin yorumlanmasını ve depremler sırasında gözlenen bazı sıradışı olayların değerlendirilmesini esas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

TARTIŞMA VE ÖNERİLER

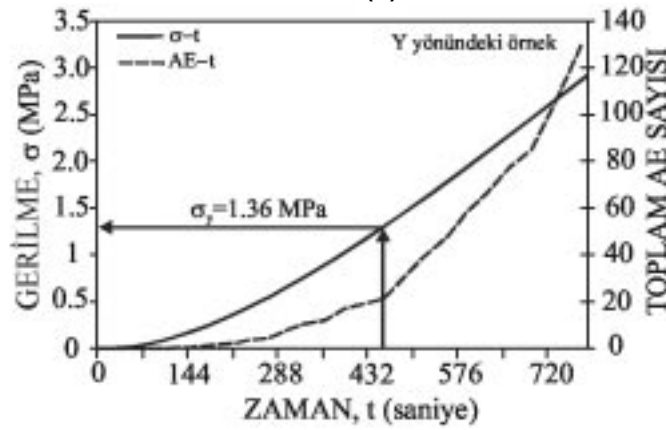
Akustik Emisyon (AE) tekniği, kaya mühendisliği alanında 1970'li yıllardan bu yana yaygın olarak kullanılmasına karşın, Türkiye'de pek fazla tanımamakta olup, birkaç araştırma dışında pek fazla tanınmamakta ve uygulanmamıştır. Çalışmanın amacına bağlı olarak, uygun algılayıcıların seçilmesi, algılayıcıların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

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

(a)



(b)



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

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

nometrelerden çok daha güvenilir sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır.

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

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

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

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

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

M_L : Richter yerel büyüklüğü

KAYNAKLAR

Armstrong, B.H., Valdes-Gonzales, C.M., and Leaird, J.D., 1995. Acoustic emission in an earthquake preparation zone. Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans. Tech. Publications, 429-446.

Aydan, Ö., Ulusay, R., Tuncay, E., Kumsar, H., Yılmazoğlu, M. ve Yüzer, E. 2001. Batı Anadolu'nun etkin gerilim ortamı. JEOTEKNİK-III, İzmir ve Çevresinin Deprem ve Jeotek-

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

Barr, S.P., Jupe, A., and Hunt, D.P., 1999. The Kaiser effect for samples pre-stressed at 820 m and 2.4 km with stress tensor results. Proceedings of the ISRM International Congress on Rock Mechanics, Paris, G. Vouille and P. Berest (eds.), Vol. 2, 1133-1136.

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

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

- mic method in deep mines. Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics, New York, W.H. Somerton (ed.), AIME, 429-443.
- Chichibu, A., Jo, K., Nakamura, M., Goto, T., and Kamata, M., 1989. Acoustic emission characteristics of unstable slopes. *Journal of Acoustic Emission*, 8(4), 107-112.
- Descour, J.M., 1995. Use of wave spectra in source location – an integral part of source characterization. Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 529-543.
- Hardy, H. R. Jr., 1972. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research. *Acoustic Emission*, ASTM STP 505, Philadelphia, R.G. Liptai, D.O. Harris, and C.A. Tatro (eds.), American Society for Testing and Materials, 41-83.
- Hardy, H. R. Jr., 1976. Microseismic monitoring of storage reservoirs. Proceedings of AGA Transmission Conference, Las Vegas, T354-T359.
- Hardy, H. R. Jr., 1978. Some current applications of microseismic techniques in geomechanics. Proceedings of the NATO Symposium on Dynamic Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, A.A. Balkema Co., Vol. 3, 173-199.
- Hardy, H. R. Jr., 1981. Application of acoustic emission techniques to rock and rock structures: A state-of-the-art review. *Acoustic Emission in Geotechnical Engineering Practice*, STP 750, Philadelphia, V.P. Drnevich and R.E. Gray (eds.), American Society for Testing and Materials, 4-92.
- Hardy, H.R.Jr., and Kimble, E.J.Jr., 1995. Application of high-frequency AE/MS techniques to rock slope monitoring. Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 457-477.
- Hardy, H.R.Jr., Zhang, D., and Zelanko, J.C., 1989. Recent studies of the Kaiser effect in geologic materials. Proceedings of the 4th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), Trans. Tech. Publications, 27-55.
- Hayashi, M., Kanagawa, T., Hibino, S., Motozima, M., and Kitahara, Y., 1979. Detection of anisotropic geo-stresses trying by acoustic emission, and non-linear rock mechanics on large excavating caverns. Proceedings of the 4th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreux, Vol. 2, 211-218.
- Holcomb, D.J., and Martin, R.J., 1985. Determining peak stress history using acoustic emissions. Proceedings of the 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, E. Ashworth (ed.), A.A. Balkema, 715-722.
- Hooker, V. E., Leighton, F., and Steblay, B.J., 1974. Microseismic investigations in coal mines. *Mining Congress Journal*, 60(10), 66-71.
- Hughson, D.R., and Crawford, A.M., 1987. Kaiser effect gauging: The influence of confining stress on its response. Proceedings of the 6th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreal, G.Herget and S. Vongpaisal (eds.), 981-985.
- Ishiguro, Y, Nishino, K., Murakami, A., Sugawara, K., and Kawamoto, T., 1999. In-situ initial rock stress measurement and design of deep underground powerhouse cavern. Proceedings of the ISRM International Congress on Rock Mechanics, Paris, G. Vouille and P. Berest (eds.), Vol. 2, 1155-1158.
- Jaroszewska, A., and Reymond, M.C., 1995. Characteristic features of AE in some rocks. Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 313-332.
- Jupe, A.J., Barr, S.P., and Pine, R.J., 1992. In-situ stress measurements obtained using overcoring and the Kaiser effect of acoustic emissions within the Carnmenellis granite, Cornwall, UK. Proceedings of the 11th International Acoustic Emission Symposium, Progress in Acoustic Emission VI, T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu (eds.), Fukuoka, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 167-174.
- Kasapoğlu, K.E. ve Gökışık, H., 1982. Akustik emisyon / mikrosismik aktivite ve kaya mekaniğindeki uygulamaları. *Kaya Mekaniği Bülteni*, 1, 27-34.
- Koerner R.M., Lord, A.E.Jr., and McCabe, W.M., 1977. Acoustic emission studies of soil masses in the laboratory and field. Proceedings of the 1st Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), Trans Tech Publications, 243-256.
- Koerner R.M., Lord, A.E.Jr., and McCabe, W.M., 1978. Acoustic emission monitoring of soil stability. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104(GT5), 571-582.

- McCauley, M.L., 1977. Monitoring slope stability with acoustic emission. Proceedings of the 1st Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), Trans Tech Publications, 257-269.
- Momayez, M., and Hassani, F.P., 1992. Application of Kaiser effect to measure in-situ stresses in underground mines. Proceedings of the 33rd US Symposium, Rock Mechanics, Santa Fe, J.R. Tillerson and W.R. Wawersik (eds.), A.A. Balkema, 979-988.
- Obert, L., and Duvall, W., 1945. The microseismic method of predicting rock failure in underground mining. Part II: Laboratory Experiments, U.S. Bureau of Mines, RI 3803, 14pp.
- Ohtsu, M., 1996. The history and development of acoustic emission in concrete engineering. Magazine of Concrete Research, 48 (177), 321-330.
- Park, P., Park, N., Hong, C., and Jeon, S., 2001. The influence of delay time and confining pressure on in-situ stress measurement using AE and DRA. Proceedings of the 38th US Symposium, Rock Mechanics in the National Interest, Washington, D. Elsworth, J.P. Tinucci and K.A. Heasley (eds.), Swets & Zeitlinger Lisse, 1281-1284.
- Seto, M., Utagawa, M., and Katsuyama, K., 1992. The estimation of pre-stress from AE in cyclic loading of pre-stressed rock. Proceedings of the 11th International Acoustic Emission Symposium, Progress in Acoustic Emission VI, T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu (eds.), Fukuoka, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 159-166.
- Seto, M., Nag, D.K., and Vutukuri, V.S., 1999. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis. Geotechnical and Geological Engineering, 17, 241-266.
- Srinivasan, C., Nair, G.J., and Raju, N.M., 1995. Microseismic precursor analysis prior to seismic events in Kolar gold mine fields: A case study. Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 371-381.
- Styles, P., Emsley, S.J., and McInairnie, E.A., 1995. Microseismic prediction and control of coal outbursts in Cynheidre Colliery, South Wales, United Kingdom. Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 383-399.
- Sugawara, K., Kanoko, K., Obara, Y., and Aoki, T., 1987. Prediction of coal outburst. Proceedings of 6th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreal, G. Herget and S. Vongpaisal (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, 1251-1254.
- Suzuki, T., Hikita, S., and Hashimoto, S. 1998. Measurement of landslide behaviour by an acoustic emission method. Proceedings of the 8th International IAEG Congress, A.A. Balkema, Rotterdam, 1733-1739.
- Tuncay, E., Ulusay, R., Watanabe, H., Tano, H., Aydan, Ö. ve Yüzer, E., 2002. Akustik Emisyon (AE) tekniği: 2- AE tekniğiyle Türkiye'de arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda bir ön inceleme. Yerbilimleri, 25, 83-98.
- Ünal, E., Hardy, H.R.Jr., and Bieniawski, Z.T., 1982. New instrumentation for the evaluation of rock bolt behaviour. Proceedings of the 23rd Symposium on Rock Mechanics, California, R.E. Goodman and F.E. Heuze (eds.), Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 985-995.
- Vladut, T.I., and Lepper, M., 1989. Early warning of slope instabilities by microseismic monitoring. Proceedings of the 4th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), Trans Tech Publications, 511-529.
- Wang, H.T., Xian, X.F., Yin, G.Z., and Xu, J., 2000. A new method of determining geostresses by the acoustic emission Kaiser effect. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, 543-547.
- Watanabe, H., and Tano, H., 1999. In-situ stress estimation of Cappadocia region using the increment of AE event count rate. Journal of College of Engineering, Nihon University, 41 (1), 35-42 (Japonca).
- Watanabe, H., Tano, H., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M., and Aydan, Ö., 1999. The initial stress state in Cappadocia. Proceedings of the '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, Fukuoka, K. Matsui and H. Shimada (eds.), 249-260.
- Will, M., Rakers, E., and Schulz, R., 1995. Control of burst-prone areas with seismoacoustical measurements. Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Pennsylvania, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 401-409.



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

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

Ergün TUNCAY, Reşat ULUSAY

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

Hidehiko WATANABE, Hisataka TANO

Nihon Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Koriyama, JAPONYA

Ömer AYDAN

Tokai Üniversitesi, Deniz İnşaat Mühendisliği Bölümü, Shimizu, JAPONYA

Erdoğan YÜZER

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

ÖZ

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

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

ABSTRACT

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

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

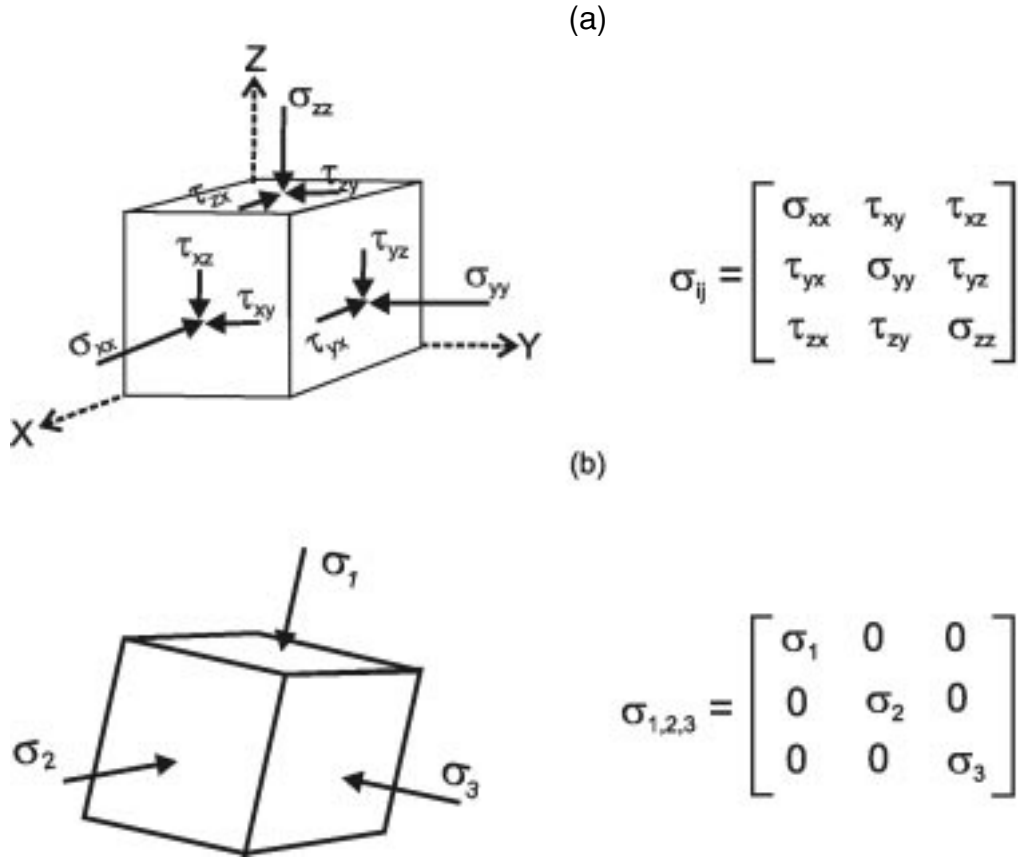
Key words: Acoustic emission (AE), in-situ-stress, Kaiser effect.

GİRİŞ

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

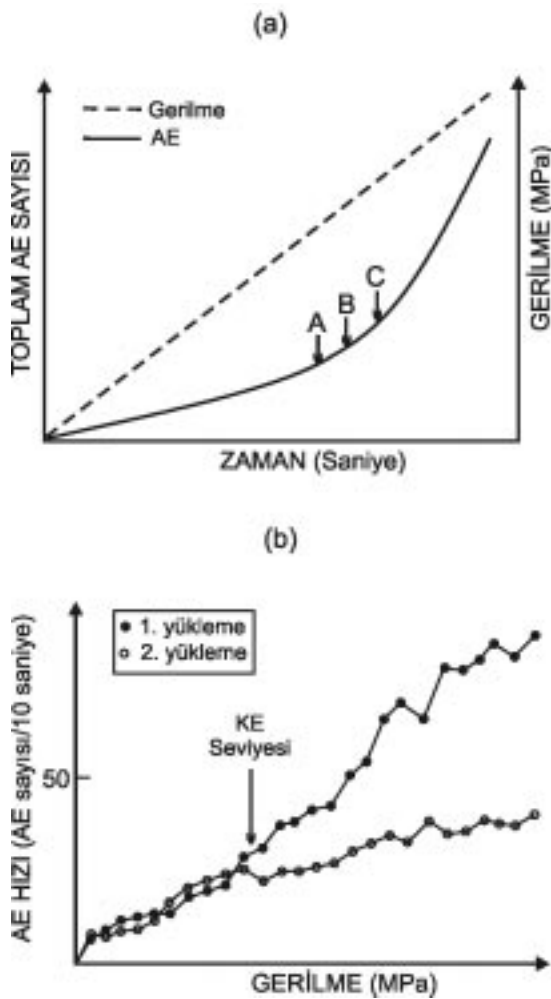
AE TEKNİĞİYLE ARAZİ GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİ

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

Kaiser Etkisi (KE) Seviyesinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Yaklaşım

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

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



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

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

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

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

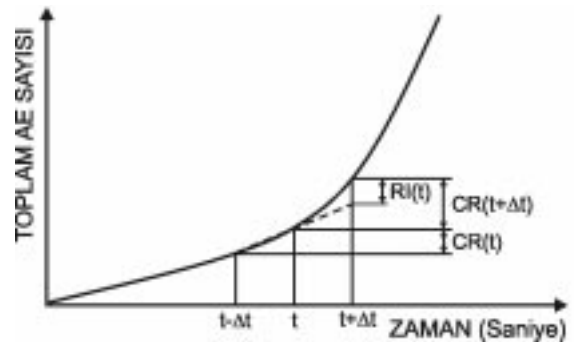
Burada;

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

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

Δt : Zaman farkı

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



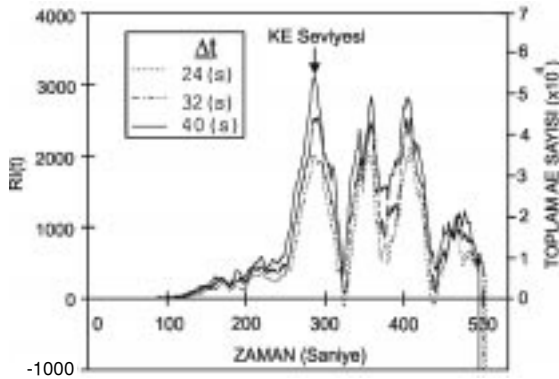
Şekil 3. “Toplam AE sayısı – zaman” grafiğinden AE sayısı artışının, $RI(t)$, belirlenmesi.

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

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

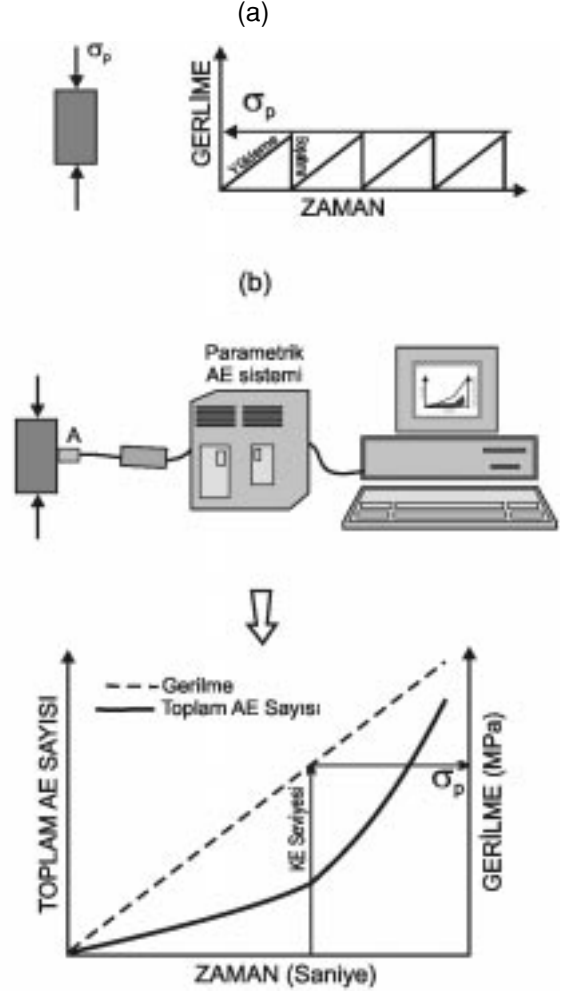
KE Seviyesinin Belirlenmesini Etkileyen Faktörler

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



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

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



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

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

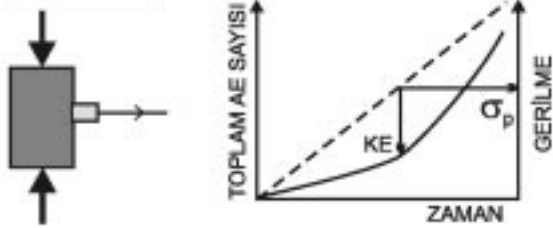
Ayrıca ön yüklemeye uygulanan gerilme ile AE deneyinde belirlenen KE seviyeleri de karşılaştırılmıştır. Kayaç türleri, bekletme zamanları ve karot boyutları farklı olacak şekilde gerçekleştirilen bu deneylerde sert kayaçlarda olumlu sonuçlar alınırken, yumuşak kayaçlarda KE seviyesinin belirlenmesi daha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

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

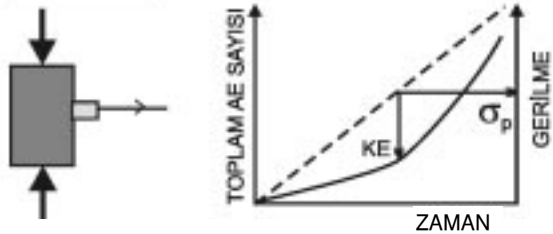
1. YÜKLEME



2. YÜKLEME



3. YÜKLEME

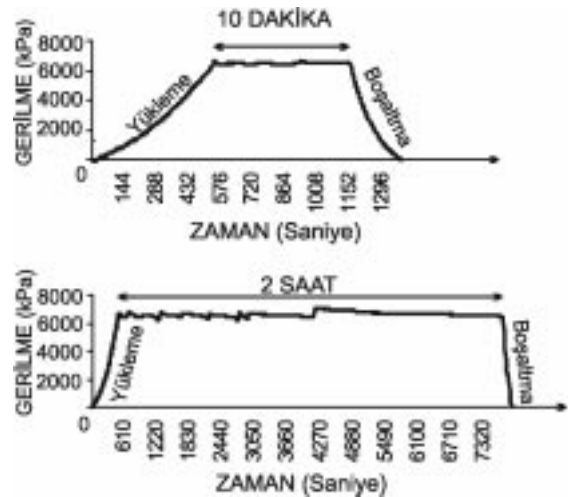


Şekil 6. Ön yükleme yapılmış karot örneklerinde gerçekleştirilen AE deneylerinde 1. yüklemde belirlenemeyen KE seviyesinin 2. ve 3. yüklemelerde belirlenmesi (Seto vd., 1992'den yeniden düzenlenmiştir)

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

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

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



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

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

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

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

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

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

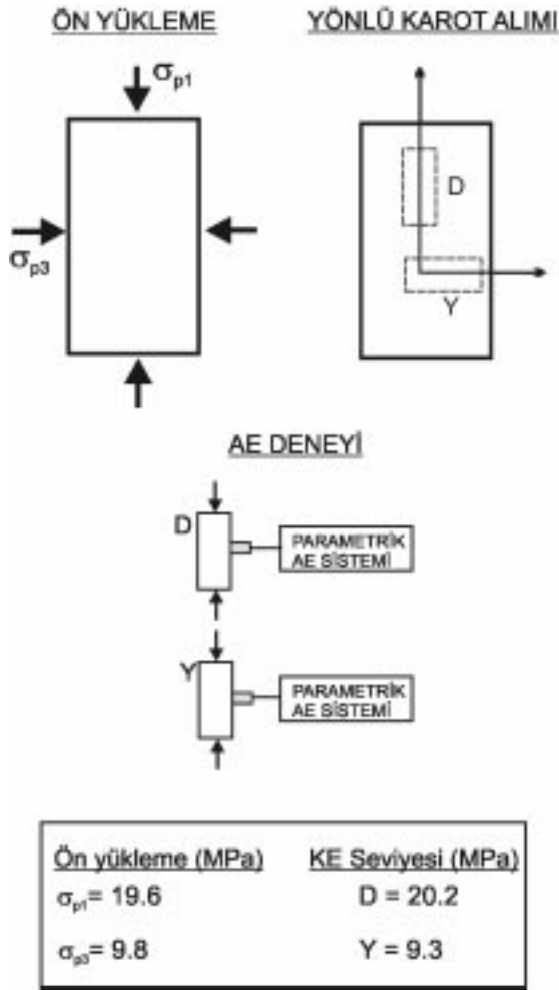
lenen gerilmelerin kayaçların jeolojik süreç boyunca etkisinde kaldıkları en büyük gerilmelere mi, yoksa güncel gerilmelere mi karşılık geldiği ve AE deneyinin tek eksenli koşullar altında yapılmasının uygun olup olmadığıdır. AE deneyinin tek eksenli yükleme altında yapılamayacağı ve kayacın doğada etkisinde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

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

TÜRKİYE'DE ARAZİ GERİLMELERİNİN AE YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

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

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

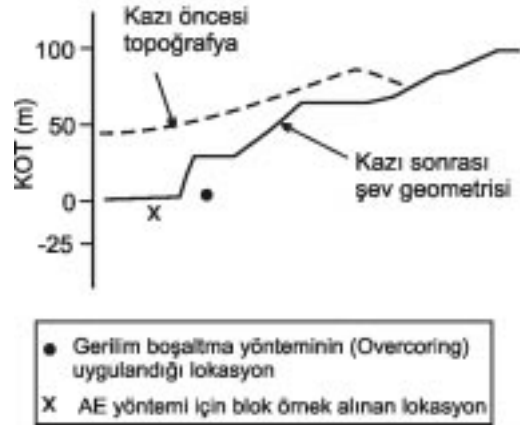


Şekil 8. Üç eksenli koşulda belirli gerilme değerlerine kadar ön yükleme uygulanmış büyük beton karot örneğinden alınan yönlü karotlar üzerinde gerçekleştirilen AE deneylerinden belirlenen KE seviyelerinin karşılaştırılması (Watanabe vd., 1994) (σ_{p1} ve σ_{p3} : ön yüklemedeki asal gerilmeler, D: düşey,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

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

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

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



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

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

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

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

Burada;

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

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

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

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

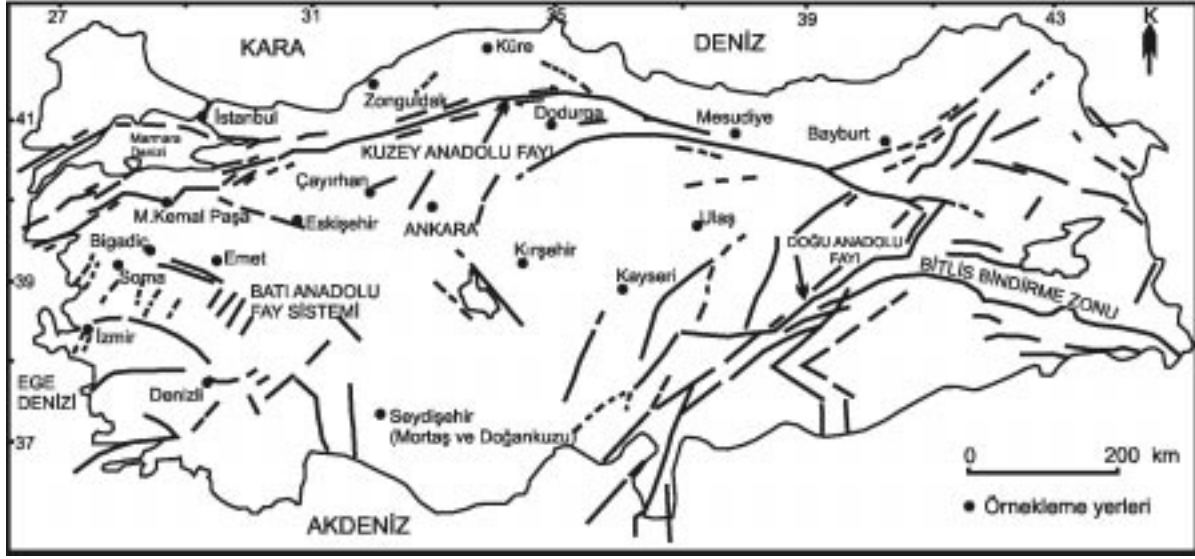
$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

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

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

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



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

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

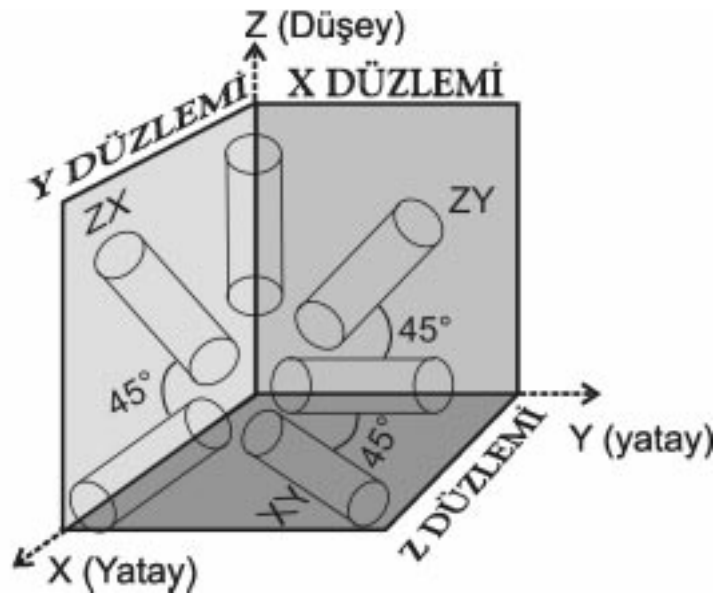
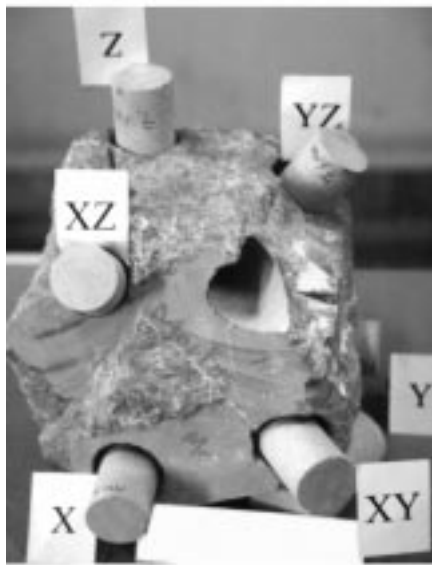
$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma^* & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma^* & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma^* \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

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

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

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

Belirlenen her bir asal gerilme için,



Şekil 11. Blok örneklerden yönlü karotların hazırlanması

Figure 11. Preparation of the oriented cores from block samples

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

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

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

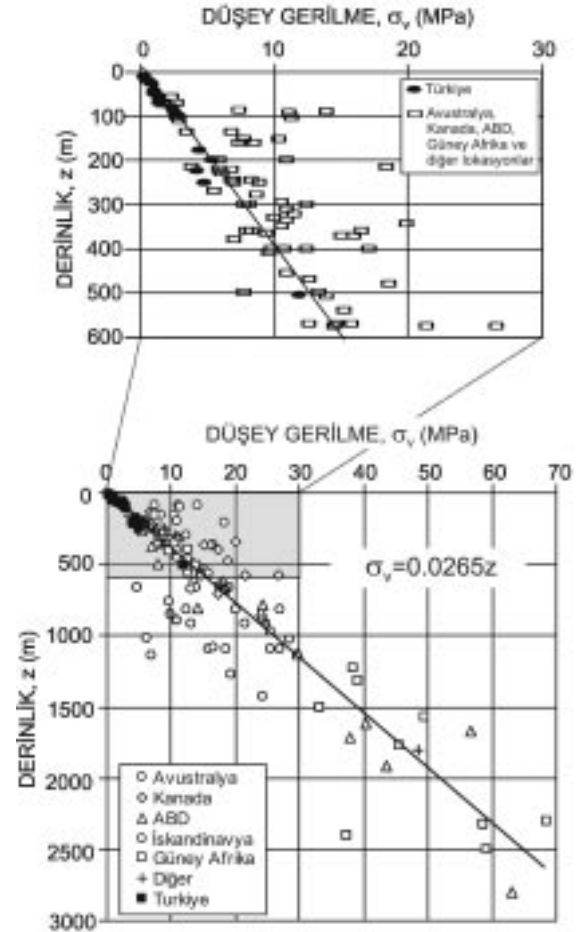
$$\begin{bmatrix} l_{x'} & m_{x'} & n_{x'} \\ l_{y'} & m_{y'} & n_{y'} \\ l_{z'} & m_{z'} & n_{z'} \end{bmatrix} \quad (10)$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

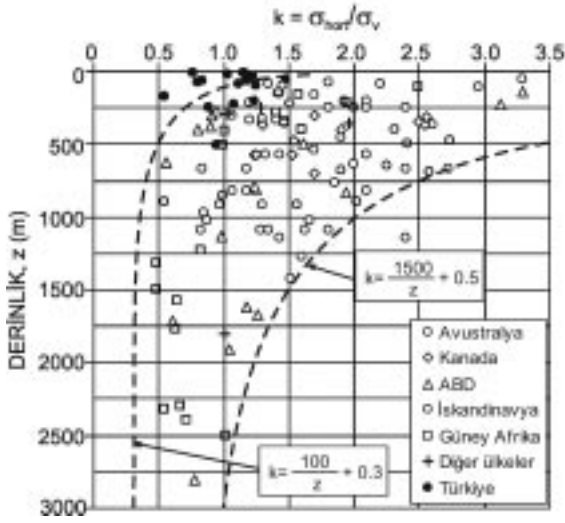
*Asal gerilmelerin eğimleri üst yarımküre için belirlenmiş olup, açılar yataydan yukarıya doğru verilmiştir.

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

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

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

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



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

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

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

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

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

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

KATKI BELİRTME

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

KAYNAKLAR

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

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

- Momayez, M., Hassani, F.P., and Hardy, H.R.Jr., 1992. Maximum curvature method: A technique to estimate Kaiser-effect load from acoustic emission data. *Journal of Acoustic Emission*, 10(3/4), 61-65.
- Park, P., Park, N., Hong, C., and Jeon, S, 2001. The influence of delay time and confining pressure on in-situ stress measurement using AE and DRA. *Proceedings of the 38th US Symposium, Rock Mechanics in the National Interest*, Washington, D. Elsworth, J.P. Tinucci and K.A. Heasley (eds.), Swets & Zeitlinger Lisse, 1281-1284.
- Seto, M., Utagawa, M., and Katsuyama, K., 1992. The estimation of pre-stress from AE in cyclic loading of pre-stressed rock. *Proceedings of the 11th International Acoustic Emission Symposium, Progress in Acoustic Emission VI*, T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu (eds.), Fukuoka, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 159-166.
- Seto, M., Nag, D.K., and Vutukuri, V.S., 1999. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 17, 241-266.
- Shen, W., 1995. Objective Kaiser stress evaluation in rock. *Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 177-195.
- Shin, K., Oikawa, Y., and Ito, H., 2000. Consideration on DSCA and AE methods for stress measurement by comparing with corediscing information and others. *Journal of The Mining and Materials Processing Institute of Japan*, Vol. 116, 965-971 (Japonca).
- Sugawara, K., and Obara, Y., 1995. Rock stress and rock stress measurements in Japan. *Proceedings of International Workshop on Rock Stress Measurements at Great Depth*, Tokyo, K. Matsuki and K Sugawara (Coordinators), 1-6.
- Sugawara, K., and Obara, Y., 1999. Draft ISRM suggested method for in-situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 307-322.
- Tuncay, E. ve Ulusay, R. 2002. Akustik Emisyon (Yayımla) (AE) tekniği: 1- AE'nin temel ilkeleri ve kaya mühendisliğindeki uygulama alanları. *Yerbilimleri*, 25, sayfa no.65-82.
- Watanabe, H., and Tano, H., 1999. In-situ stress estimation of Cappadocia region using the increment of AE event count rate. *Journal of College of Engineering, Nihon University*, 41(1), 35-42 (Japonca).
- Watanabe, H., Tano, H., and Akatsu, T., 1994. Fundamental study on pre-stress measurement of triaxial compressed rock. *Journal of College of Engineering, Nihon University*, 35(A), 11-19 (Japonca).
- Watanabe, H., Tano, H., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M., and Aydan, Ö., 1999. Initial stress state in Cappadocia. *Japan-Korea Rock Engineering Symposium*, K. Matsui and H. Shimada (eds.), Fukuoka, Japan, 113-124.
- Yoshikawa, S., and Mogi, K., 1981. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression. *Tectonophysics*, 74, 323-339.
- Yoshikawa, S., and Mogi, K., 1990. Experimental studies on the effect of stress history on acoustic emission activity – A possibility for estimation of rock stress. *Journal of Acoustic Emission*, 8(4), 113-123.



Kuzeydoğu Ege Denizi Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale üçgenindeki dip sedimanlarında Güncel planktik foraminifer dağılımı

Distribution of the Recent planktic foraminifera of bottom sediments at the northeastern Aegean Sea in the Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale triangle

Vedia TOKER

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06100 Tandoğan, ANKARA

Ayşegül YILDIZ

Niğde Üniversitesi, Aksaray Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 68100 AKSARAY

ÖZ

Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale üçgeni arasında dip sedimanlarından alınan 100 örnekten 70 tanesinde, 4 planktik foraminifer cinsine ait 8 tür tanımlanmış ve bunların Akdeniz tipi türler olduğu belirlenmiştir. Çanakkale Boğazı'ndan Ege Denizi'ne doğru, su derinliğine ve sıcaklığına bağlı olarak, bolluk ve çeşitlerinde artış gözlenen bu türler; *Globigerina bulloides* (d'Orbigny), *Globigerina falconensis* (Blow), *Globigerina praebulloides* Blow, *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny), *Globigerinoides sacculifer* (Brady) *Globigerinoides trilobus immaturus* LeRoy, *Globigerinoides trilobus trilobus* (Reuss), *Neogloboquadrina* sp., *Orbulina universa* d'Orbigny'dir. Bu türler, subtropikal kuşağın sıcak ve serin sularına aittirler ve ılıman-sıcak su formları diğerlerine göre daha bol oranda bulunmaktadır. Ayrıca, Çanakkale Boğazı çıkışında juvenil formların hakim olduğu, Ege Denizi'ne doğru ve derinlik arttıkça olgun fertlerin çoğaldığı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Dip sedimanları, Güncel planktik foraminifer, kuzeydoğu Ege Denizi.

ABSTRACT

Mediterranean type 8 species of 4 planktic foraminiferal genera were described in 70 of 100 bottom samples collected from the Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale triangle. These species, which show an increase in their abundance and variety depending on depth and temperature of the sea water from Dardanelles to Aegean Sea, are Globigerina bulloides (d'Orbigny), Globigerina falconensis (Blow), Globigerina praebulloides Blow, Globigerinoides ruber (d'Orbigny), Globigerinoides sacculifer (Brady), Globigerinoides trilobus immaturus LeRoy, Globigerinoides trilobus trilobus (Reuss), Neogloboquadrina sp., Orbulina universa d'Orbigny. The specie represent warm and cool waters of the subtropical belt and within the assemblages and proportions of the subtropical-warm water forms are more abundant than the others. In addition, it was observed that the juvenil forms were abundant at the exit of Dardanelles and the number of the adult forms increases towards the Aegean Sea depending on increase in depth and juvenile forms were dominant at the exit of Dardanelles.

Key words: Bottom sediments, Recent planktic foraminifera, northeastern Aegean Sea.

GİRİŞ

Çalışma alanı, Ege Denizi'nin kuzeydoğusunda Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale üçgeni arasın-

da kalan kıta sahanlığı üzerinde yer almaktadır (Şekil 1). Bölge kuzeyde Saroz Körfezi, batıda Midilli Adası, doğuda Gelibolu ve Biga Yarımada- ları ve daha güneyde de Edremit Körfezi Çu-

neklerin 70 tanesinde, *Globigerina*, *Globigerinoides*, *Neogloboquadrina* ve *Orbulina* cinslerine ait 8 tür tanımlanmıştır (Şekil 2).

Örnek no	Derinlik (m)	Planktik foraminifer türleri								Taşınmış türler										
		<i>Globigerina bulloides</i>	<i>Globigerina falconensis</i>	<i>Globigerina praebulloides</i>	<i>Globigerinoides trilobus trilobus</i>	<i>Globigerinoides ruber</i>	<i>Globigerinoides sacculifer</i>	<i>Globigerinoides tri. innotatus</i>	<i>Neogloboquadrina sp.</i>	<i>Orbulina universa</i>	<i>Chilomenella cubensis</i>	<i>Globigerina brazili</i>	<i>Globigerina brevispira</i>	<i>Globigerina dubia</i>	<i>Globigerina nepenthes</i>	<i>Globigerina regularis</i>	<i>Globigerina woodi connecta</i>	<i>Globigerinoides belcinus</i>	<i>Globigerinoides pinnordius</i>	<i>Globorotalia munda</i>
7	62																			
9	79				*	*														
11	47					*														
14	60				*	*														
15	96	*			*	0											*	*		
16	69	*			0												*	*		
17	47	*			*	*	*													
19	32	*	*		*	*	*												*	
34	39			*	0	*	*	*			*									*
35	29				*	*	*													
57	35			*	0	*	*	*			*									*
58	69	*		*	0					*										*
59	73	*		*	0															*
60	68			*	*	*	*													*
68	71			*	*	*	*													*
69	68			*	*	*	*													*
70	47			*	0	*	*	*			*			*	*	*	*	*	*	*
86	73			*	*	*	*			*				*	*	*	*	*	*	*
87	72			*	*	0	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
94	58			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
95	74			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
96	72			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
97	70			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
104	28			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
108	76			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
109	76			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
110	46			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
120	39			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
121	38			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
130	80			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
131	82	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
132	81			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
133	77	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
139	93	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
141	35			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
144	83			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
145	30			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
146	34	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
147	72			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
148	86	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
150	60			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
151	75			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
152	28			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
155	77	*	*	*	0	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
156	30			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
157	35			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
158	39			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
159	35			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
160	40	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
161	43	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
162	16			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
163	75			*	*	0	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
169	12			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
171	30	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
172	28			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
173	30			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
174	74			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
175	28	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
177	12			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
178	15			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
179	18			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
180	30			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
181	39			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
182	13			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
183	23			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
184	28			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
185	39	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
186	30			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
187	30			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*
188	56			*	*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	*	*

Yaygın ■
Birkaç 0
Nadir *

Şekil 2. İnceleme alanından derlenen örneklerdeki planktik foraminifer türlerinin dağılımı.
Figure 2. Distribution of the planktic foraminifera species of the samples from the study area.

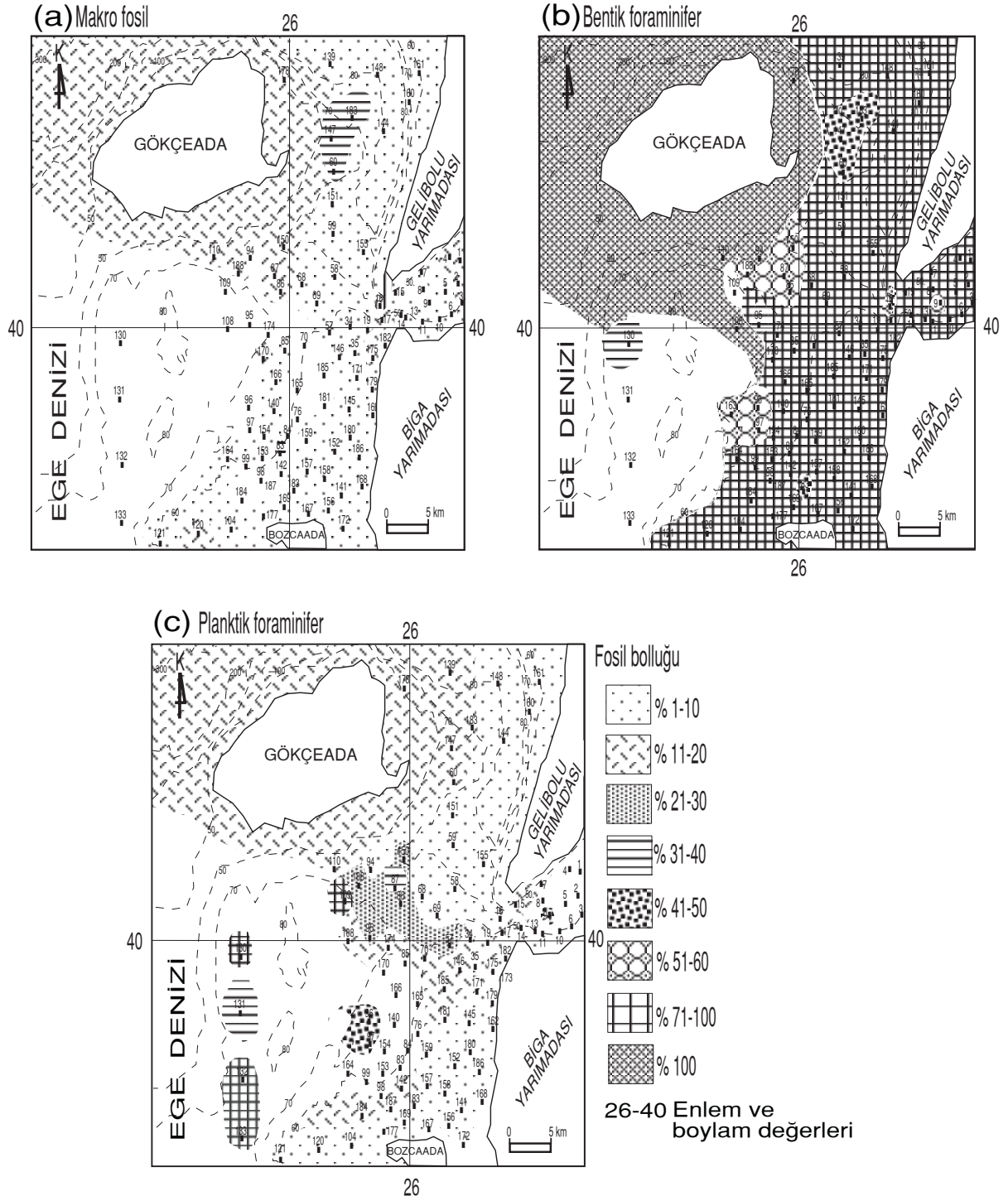
MALZEME VE YÖNTEM

Araştırma malzemesini, 1995 yılında Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu tarafından yürütülen YDABCAG-156 nolu Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu projesi çerçevesinde, 12-96 m su derinlikleri arasında deniz tabanının üstündeki, ilk 10 cm'den alınan 100 örnek oluşturmaktadır. Bu örnekler kurutulmuş ve 60, 120, 200, 250 numaralı eleklerden geçirilmiş, örneklerdeki makrofosil, bentik ve planktik foraminiferler ayrılarak sayımları yapılmış ve yüzde bolluk dağılımları esas alınarak dağılım haritaları hazırlanmıştır (Şekil 3). Daha sonra, örneklerdeki planktik foraminifer türleri tanımlanmış ve ısıya karşı duyarlı olan planktik foraminifer türlerinin diğerlerine göre yüzde olarak bolluk oranları hesaplanmış ve bu türlerin bolluk dağılımları Şekil 4 ve 5'teki haritalar üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca her örneğe ait sayısal planktik foraminifer bolluğuna ve toplam planktik foraminiferlerden en bol bulunan *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny)'in tanımlandığı örneklerin alındığı derinliklere göre dağılım yüzdeleri saptanmış ve grafik şeklinde sunulmuştur (Şekil 6 ve 7).

DİP SEDİMANLARINDA PLANKTİK FORAMİNİFER DAĞILIMI

Derinliğe Göre Dağılım

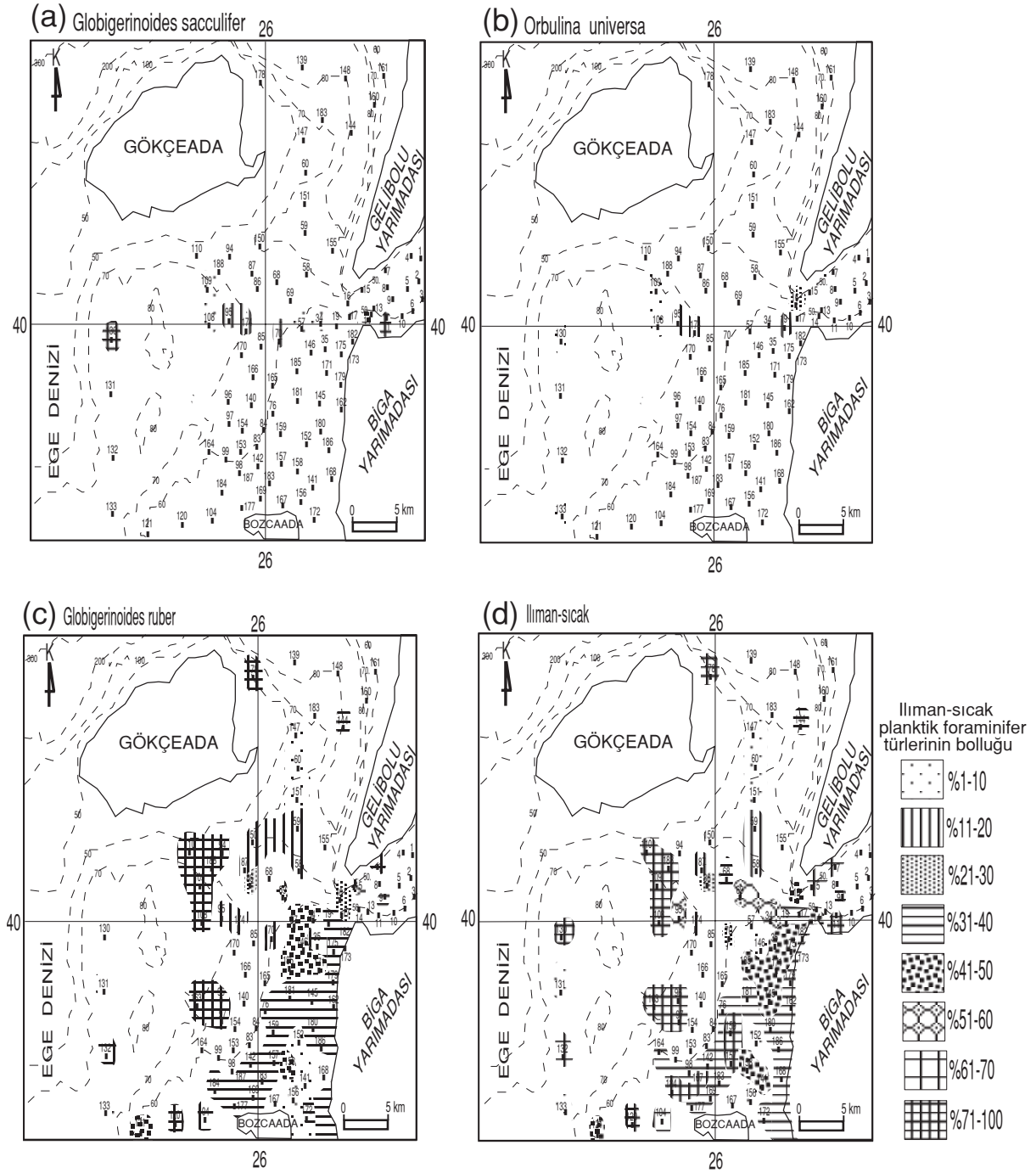
İnceleme alanında Çanakkale Boğazı-Ege çıkışından itibaren, Ege Denizi açıklarına doğru 12 m ile 96 m arasındaki her derinlikte planktik foraminiferlere rastlanılmıştır. Çanakkale Boğazı-Ege çıkışında sedimanlardaki planktik foraminifer oranı %20-50 iken, Ege Denizi'ne doğru Gökçeada-Bozcaada açıklarında %50-100'e ulaşmaktadır. Çanakkale Boğazı çıkışında jüvenil formların hakim olduğu, Ege Denizi'ne doğru ve derinlik arttıkça olgun fertlerin çoğaldığı gözlenmiştir. Planktik foraminiferlerin bolluk ve çeşitlerinin arttığı yer Ege Denizi'ne doğru, Gökçeada-Bozcaada açıklarıdır. Burada su derinliği 70-80 m, sedimanlardaki çakıl oranı %5-15, kum oranı %15-60, çamur oranı %15-60, silt oranı %10-40, kil oranı %10-20, CaCO₃ oranı ise %15-45'dir. Çalışma alanındaki planktik foraminifer topluluklarının su derinliğinin 70-80 m olduğu yerlerde bollaştıkları, özellikle kum, çamur ve CaCO₃ oranının yüksek olduğu yerleri tercih ettikleri gözlenmiştir (bknz. Şekil 3 ve 6).



Şekil 3. İnceleme alanının makro fosil, bentik ve planktik foraminifer bolluk dağılımı haritaları.
Figure 3. Maps of distribution of abundances of macro fossil, benthic and planktic foraminifera of the study area.

Bu özellikleri, planktik foraminiferlerin dağılımlarının aynı yörede daha önce Yıldız (2001) ile Yıldız ve Toker (2001) tarafından yapılan çalışma-

larda belirlenen nannoplankton ve diatome gruplarının dağılımlarıyla uyumlu olduklarını göstermektedir.



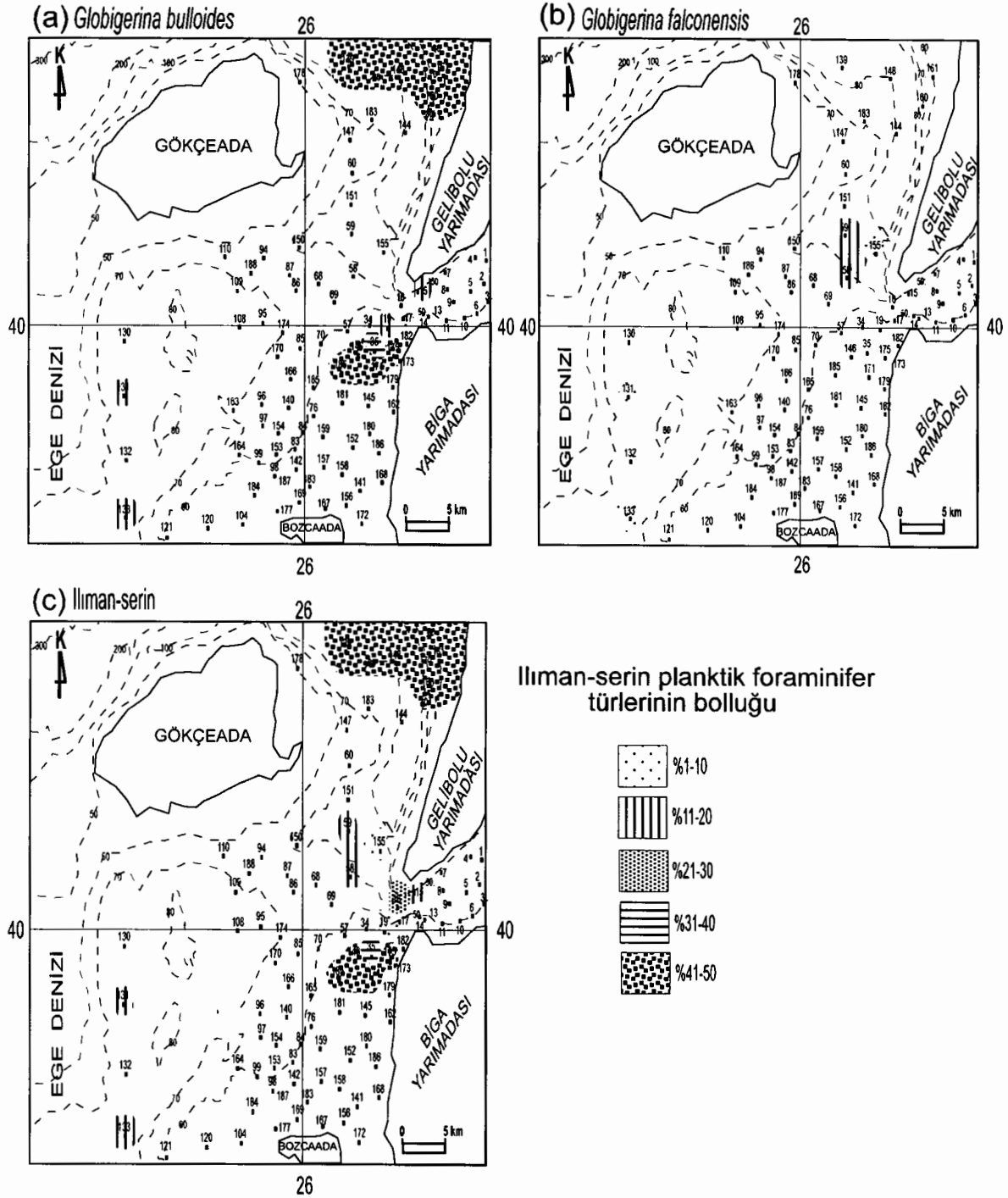
Şekil 4. İnceleme alanındaki ılıman-sıcak su formlarının dağılım haritaları.

Figure 4. Maps of distribution and abundance of the subtropical-warm water forms of the study area.

Isıya Karşı Duyarlı Olan Türlerin Dağılımı

Geniş coğrafik dağılıma sahip olan planktik foraminifer türlerinin temsil ettikleri iklim kuşakları eskiden beri yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (Bé, 1967, 1969; Bé ve Tolderlund,

1971; Boltovskoy 1969). İnceleme alanında saptanan *Globigerina bulloides* (d'Orbigny), *Globigerina falconensis* (Blow), *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny), *Globigerinoides sacculifer* (Brady), *Orbulina universa* d'Orbigny, iklim kuşaklarını belirleyen en önemli planktik foraminifer



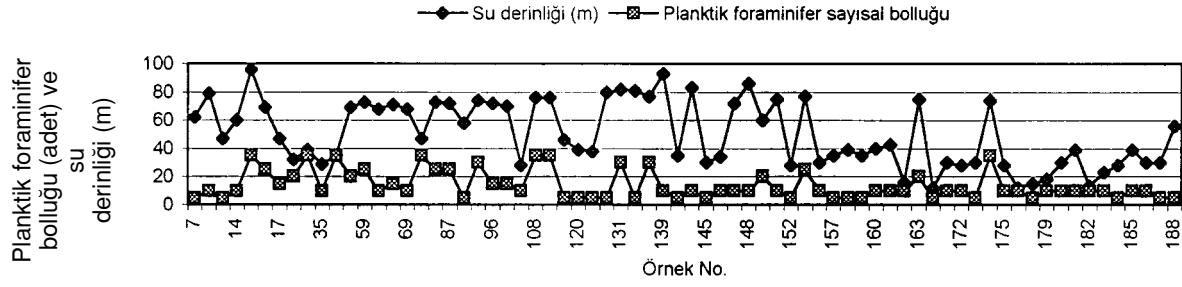
Şekil 5. İnceleme alanındaki ilman-serin su formlarının dağılım haritaları.

Figure 5. Maps of distribution and abundance of the subtropical-cool water forms of the study area.

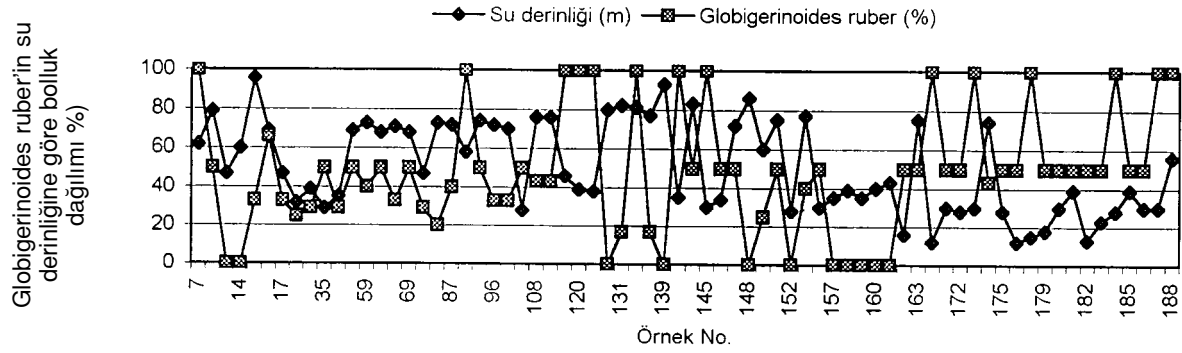
fer türleridir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ise, planktik foraminifer türlerinin mevsimsel ısı değişimlerine göre dağılımları üzerinde yoğunlaşmaktadır (Thunell, 1978; Pujol ve Grazzini, 1995).

Globigerina bulloides (d'Orbigny)

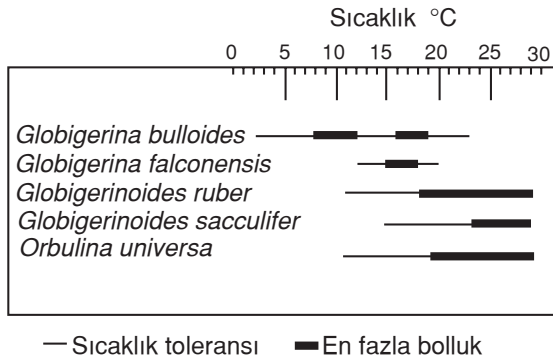
Globigerina bulloides Atlantik Okyanusu'nun yarı-kutup ve geçiş sularında %50'ye varan bolluklarına en baskın türdür (Şekil 8). *Globigerina*



Şekil 6. İnceleme alanında planktik foraminifer sayısal bolluk dağılımının su derinliği ile ilişkisi.
Figure 6. Relationship between the distribution of numerical abundance of planktic foraminifera and depth of water.



Şekil 7. İnceleme alanında *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny) türünün yüzde bolluk dağılımının su derinliği ile ilişkisi.
Figure 7. Relationship between the distribution of percentage abundance of *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny) species and depth of water.



Şekil 8. Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale üçgeni arasında bulunan ısıya karşı duyarlı planktik foraminifer türlerinin ekolojik dağılımları (Bé, 1967, 1969; Boltovskoy, 1969; Bé ve Tolderlund, 1971; Parker ve Berger, 1971; Rögl ve Bolli, 1973' den).

Figure 8. Ecological distribution of the temperature-sensitive planktic foraminifera species in the Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale triangle (after Bé, 1967, 1969; Boltovskoy, 1969; Bé and Tolderlund, 1971; Parker and Berger, 1971; Rögl and Bolli, 1973).

bulloides Doğu Akdeniz'in ılık sularında %5-20 iken, Ege Denizi'nde 13-16 °C su sıcaklığında %20-40 oranını verir (Thunell, 1978). Isıya karşı en duyarlı planktik foraminifer türlerinden olan *Globigerina bulloides*, genellikle yarı-kutup ve geçiş ortamlarının en önemli formudur (Parker ve Berger, 1971; Kipp, 1976; Hutson ve Prell, 1980; Thompson, 1981). Tropikal Atlantik ve Pasifik yüzey sedimanlarındaki faunal topluluk içerisinde çok az oranda bulunur (Cullen ve Prell, 1984). *Globigerina bulloides*'in bolluğu, Batı Arap Denizi sedimanları içerisinde açık denizin tabanından şelf kenarına doğru yükselen besince zengin soğuk okyanus sularına bağlı olarak, %30'u aşar (Cullen ve Prell, 1984). *Globigerina bulloides* bugün Kuzey Atlantik yüzey sularında en yüksek bolluğa 5-15 °C sıcaklık ve % 34-35 tuzluluk koşullarında ulaşır (Dowsett ve Wiggs, 1992). İnceleme alanında *Globigerina bulloides* (d'Orbigny) türüne genellikle 28-96 m arasındaki su derinliklerindeki sedimanlarda

en bol olarak (%11-50 oranında) Çanakkale Boğazı-Ege çıkışında ve Gökçeada-Gelibolu Yarımadası arasında, daha az oranda (%11-20 oranında) ise Ege Denizi'ne doğru rastlanmıştır (bknz. Şekil 5a).

***Globigerina falconensis* (Blow)**

Globigerina falconensis, subtropikal-serin suların formudur (Bé ve Tolderland, 1971) (bknz. Şekil 8) ve su sıcaklığının 12-20 °C olduğu alanlarda bollaşır. Güney Pasifik'de 10-45 °G enlemlerinde yaygındır (Parker ve Berger, 1971). *Globigerina falconensis* tüm Akdeniz'de çok düşük bollukta yer alır, batı havzalarında ancak %1 bolluğa ulaşır (Thunell, 1978). Bu türe inceleme alanında 32-77 m su derinliklerinde ve çok sınırlı alanlarda Gelibolu Yarımadası-Gökçeada arasında %11-20, Ege Denizi açıklarında ise %1 oranında rastlanmıştır (bknz. Şekil 5b).

***Globigerinoides ruber* (d' Orbigny)**

Kuzey Hint Okyanusu yüzey sedimanları içerisinde en bol bulunan planktik foraminifer türü olan *Globigerinoides ruber*, dünya ölçeğinde tropikal yüzey sedimanları içerisinde esaslı bir formdur (Cullen ve Prell, 1984) ve genellikle sıcaklığın 20°C'den fazla olduğu yerlerde bollaşır (Dowsett ve Poore, 1990; Dowsett, 1991). Atlantik'te de %50'lik bir oranla oldukça bol ve geniş bir dağılıma sahip olan bu ılık su formu (bknz. Şekil 8), günümüz Akdeniz sularında da yaygındır. Batı Akdeniz'de bolluğu zaman zaman % 10'un altına düşmekte, Doğu Akdeniz'de ise %40'a ulaşmaktadır. *Globigerinoides ruber* en fazla bolluğa 21.5-26.5 °C arasındaki sıcaklıklarda ulaşır (Thunell, 1978). Dağılımını; sıcaklığın yanı sıra, tuzluluk da kontrol eder. Bol olarak %36'nın üstünde veya %34.5'un altında tuzluluğa sahip sulara bulunur (Rögl ve Bolli, 1973). İnceleme alanında en bol rastlanılan planktik foraminifer türüdür. Özellikle Çanakkale Boğazı-Ege çıkışında, Biga Yarımadası-Bozcaada arasında, Gökçeada-Bozcaada açıklarında Ege Denizi'ne doğru su derinliğinin 17-96 m olduğu yerlerdeki sedimanlar içerisinde, %1' den %100'e kadar artarak değişen bolluklarda bulunur (bknz. Şekil 4c).

***Globigerinoides sacculifer* (Brady)**

Globigerinoides sacculifer, tropikal bölgenin yüzey sedimanları içerisindeki en önemli bileşen-

dir (Bé ve Tolderlund, 1971) (bknz. Şekil 8) ve en fazla ekvatoryal bölgede yaygındır (Cullen ve Prell, 1984). *Globigerinoides sacculifer* günümüz Kuzey Atlantik Okyanusu yüzey sularında sıcaklığın 20 °C' den fazla olduğu durumlarda ancak %10 bolluğa ulaşır (Dowsett ve Poore, 1990; Dowsett, 1991). İnceleme alanında Çanakkale Boğazı-Ege çıkışında ve Gökçeada-Bozcaada açıklarında Ege Denizi'ne doğru bolluğu artarak (%1'den %100'e varan bolluklarda), sınırlı alanlarda ve 35-80 m su derinliklerindeki sedimanlar içerisinde yer alır (bknz. Şekil 4a).

***Orbulina universa* d' Orbigny**

Okyanusların subtropikal ve geçiş sularında yaygın olarak bulunan bu türe tropikal sularda da rastlanır (bknz. Şekil 8). Genellikle 13-19 °C ısıya sahip yüzey sularını tercih eder (Pujol ve Grazzini, 1995). *Orbulina universa*'nın soğuk sulardaki boyutu, ılıman sulardaki boyutunun 1/4 veya 1/3'ü kadardır. Ayrıca soğuk sularda kavkı kalınlığı fazla olup, gözenekleri hemen hemen kapanmıştır (Rögl ve Bolli, 1973). İnceleme alanında ılıman kuşağı temsil eden oldukça iri boyutlu ve ince kavkılı *Orbulina universa* d'Orbigny türüne hiç rastlanılamamıştır. Sadece Çanakkale Boğazı-Ege çıkışında ve Gökçeada-Bozcaada açıklarında Ege Denizi'ne doğru bolluğu azalarak (%30 dan %1'e varan bolluklarda), sınırlı alanlarda ve 32-96 m su derinliklerindeki sedimanlar içerisinde yer alır (bknz. Şekil 4b).

İnceleme alanında ısıya karşı duyarlı formların bolluk dağılımları farklılık göstermektedir. Çanakkale Boğazı-Ege çıkışında ılıman-sıcak (%50-70) ve ılıman-serin formların (%20-50) bollukları hemen hemen birbirine eşittir. Gökçeada-Gelibolu Yarımadası arasında kalan bölgede ılıman-sıcak formlar %1-100, ılıman-serin formlar %41-50, Ege Denizi'ne doğru Biga Yarımadası-Bozcaada arasında ılıman-sıcak formlar %20-100, ılıman-serin formlar ise %31-40 oranındadır. Dolayısıyla inceleme alanında ılıman-sıcak su formları diğerlerine göre daha bol olarak bulunmaktadır. Özellikle Biga Yarımadası-Bozcaada arasında ve Ege Denizi açıklarına doğru sayıları artış göstermektedir. İliman-serin suları temsil eden formlar ise, daha az oranda olmak üzere, daha çok Gökçeada-Gelibolu Yarımadası arasındaki bölgede yoğunlaşmışlardır (bknz. Şekil 4 ve 5).

SONUÇLAR

Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale üçgeni arasındaki güncel dip sedimanlarında yapılan bu çalışmada saptanan planktik foraminifer türleri Akdeniz kuşağını temsil eden ılıman kuşağa ait formlardır. Tanımlanan türlerden ılıman-sıcak suları karakterize edenler, ılıman-serin suları karakterize edenlere göre daha bol olarak bulunmaktadır. Bu türlerin bollukları Çanakkale Boğazı-Ege çıkışından Ege denizi'ne doğru artış göstermektedir. Bu durum, inceleme alanının daha çok Ege Denizi'nin etkisi altında olduğunu göstermektedir. Tanımlanan türler arasında en bol olan *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny)'dir. Bu tür, Çanakkale Boğazı-Ege çıkışından Ege Denizi'ne doğru su derinliğinin 17-96 m arasında olduğu yerlerdeki sedimanlar içerisinde, %1' den %100'e kadar artarak değişen bolluklarda bulunmaktadır.

İnceleme alanında 12 m ile 96 m arasındaki her derinlikte planktik foraminiferlere rastlanılmış, ayrıca Çanakkale Boğazı'ndan Ege Denizi'ne doğru bu formların bolluk ve çeşitlerinin arttığı gözlenmiştir. Planktik foraminiferlerin en bol bulunduğu su derinliği ise ortalama 70-80 m'dir. Bunların özellikle kum, çamur ve CaCO₃ oranının yüksek olduğu yerleri tercih ettikleri gözlenmiştir. Bu durum, derinlik ve su sıcaklığının yanı sıra, ortamdaki su akıntılarının da planktik foraminiferlerin dağılımını etkilediğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Aksu, A.E., Yaşar, D., Mudie, P.J., and Gillespie, H., 1995. Late glacial-Holocene paleoclimatic and paleoceanographic evolution of the Aegean Sea: micropaleontological and stable isotopic evidence. *Marine Micropaleontology*, 25, 1-28.
- Artüz, M.İ., 1970. Some observations on the hydrography of the Turkish Aegean waters during 4-25 September 1963. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Hidrobiyoloji Araştırma Enstitüsü Yayınları, Seri B, 1-9.
- Bé, A.W.H., 1967. Foraminifera Families: Globigerinidae and Globorotaliidae. Fiches' ident. Zooplancton, Charlottenlund Slot, Denmark, Sheet 108.
- Bé, A.W.H., 1969. Planktonic foraminifera. Antarctic Map Folio Serie Geography Society, 11, 9.
- Bé, A.W.H., and Tolderlund, D.S., 1971. Distribution and ecology of living planktonic foraminifera in surface waters of the Atlantic and Indian Oceans. B.M. Funnel, and W.R. Riedel (eds.), In *Micropaleontology of Oceans*, London, Cambridge University Press, 105-109.
- Benli, H. ve Küçüksezgin, F., 1988. Ulusal deniz ölçme ve izleme programı, Ege Denizi ölçme ve izleme alt projesi 1988 dönemi kesin raporu. Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri Teknik Enstitüsü, İzmir, 281s.
- Beşiktepe, Ş.T., Sur, H.İ., Özsoy, E., Latif, M.A., Oğuz, T., and Ünlüata, Ü., 1994. The circulation and hydrography of the Marmara Sea. *Program of Oceanography*, 34, 285-334.
- Blechschild, G., Cita, M.B., Mazzei, R., and Salvadorini, G., 1982. Stratigraphy of the western Mediterranean and southern Calabrian ridges, Eastern Mediterranean. *Marine Micropaleontology*, 7, 101-134.
- Boltovskoy, E., 1969. Living planktonic foraminifera at the 90° E meridian from the equator to the Antarctic. *Micropaleontology*, 15, 237p.
- Cimerman, F., and Langer, M.R., 1991. Mediterranean foraminifera. Slovenska Akademija Znanosti in Umetnosti, Ljubljana, 118pp.
- Cita, M.B., Broglia, C., Malinverno, A., Spezzibottiani, G., Tomadin, L., and Violanti, D., 1982. Late Quaternary pelagic sedimentation on the Southern Calabrian ridge and Western Mediterranean ridge, eastern Mediterranean. *Marine Micropaleontology*, 7, 135-162.
- Cullen, J.L., and Prell, W.L., 1984. Planktonic foraminifera of the northern Indian Ocean: distribution and preservation in surface sediments. *Marine Micropaleontology*, 9, 1-52.
- Dowsett, H.J., 1991. The development of a long-range foraminifer transfer function and application to late Pleistocene North Atlantic climatic extremes. *Paleoceanography*, 6(2), 259-273.
- Dowsett, H.J., and Poore, R.Z., 1990. A new planktonic foraminifer transfer function for estimating Pliocene-Holocene paleoceanographic conditions in the North Atlantic. *Marine Micropaleontology*, 16(1/2), 1-23.
- Dowsett, H.J., and Wiggs, L.B., 1992. Planktonic foraminiferal assemblage of the Yorktown Formation, Virginia. *Micropaleontology*, 38, 1, 75-86.
- Ergin, M., Bodur, M.N., Ediger, D., Ediger, V., and Yılmaz, A., 1993. Organic carbon distribution in the surface sediments of the Sea of Marmara and its control by the inflows from adjacent water masses. *Marine Chemistry*, 41, 311-326.
- Ergin, M., Kazancı, N., Varol, B., İleri, Ö., Karadenizli, L., Taner, G., Işık, U., Kurtel, A., Altıok, H., Okur, E., Yüksek, A., Uysal, A., Avşar, N., Bayhan, E. ve Temel, A., 1997. Kuzey-

- doğu Ege Denizi'nin Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale üçgeninde kalan kıta sahanlığındaki geç Kuvaterner tortularının ve deniz tabanı mikrotopoğrafyasının araştırılması. TÜBİTAK Raporu, Proje No. YDAB-ÇAG-156, 168s (yayımlanmamış).
- Görür, N., Oktay, F.Y., Eryılmaz, M., Bodur, M.N. ve Gökaşan, E., 1992. Ege doğal uzantısı. İTÜ-SHOD ortak raporu, SHOD Arşivi, 157s.
- Hutson, W.H., and Prell, W.L., 1980. A paleoecological transfer function, F1-2, for Indian Ocean planktonic foraminifera. *Journal of Paleontology*, 54, 381-399.
- Kipp, N.G., 1976. New transfer function for estimating past conditions from sea-bed distribution of planktonic foraminiferal assemblages in the North Atlantic. R.N. Cline, and J.D., Hays (eds.), *Investigation of Late Quaternary Paleoceanography and Paleoclimatology*. Geological Society of America Memoir, 145, 3-42.
- Miller, A.R., 1983. The Mediterranean Sea, a Physical Aspects. In: *Estuaries and Enclosed Seas, Ecosystems of the World*, B.H., Ketchum (ed.), 26, Elsevier, 219-238.
- Muerdter, D., and Kennett, J.P., 1983/1984. Late Quaternary planktonic foraminiferal biostratigraphy, Strait of Sicily, Mediterranean Sea. *Marine Micropaleontology*, 8, 339-359.
- Parker, F.L., and Berger W.H., 1971. Faunal and solution patterns of planktonic foraminifera in surface sediments of the South Pacific. *Deep-Sea Research*, 18, 73-107.
- Pujol, C., and Grazzini, C.V., 1995. Distribution patterns of live planktic foraminifers as related to regional hydrography and productive systems of the Mediterranean Sea. *Marine Micropaleontology*, 25, 187-217.
- Rasmussen, T.L., 1991. Benthonic and planktonic foraminifera in relation to the Early Holocene stagnation in the Ionian Basin. *Central Mediterranean*. *Boreas*, 20, 357-376.
- Rögl, F., and Bolli, H.M., 1973. Holocene to Pleistocene planktonic foraminifera of Leg 15. Site 147 (Cariaco Basin (trench), Caribbean Sea) and their climatic interpretation. Initial Report of Deep Sea Drilling Project, 15, 553-615.
- Sprovieri, R., 1992. Mediterranean Pliocene biochronology: an high resolution record based on quantitative planktonic foraminifera distribution, *Rivide Italiana Paleontologia Stratigraphia*, 98, 61-100.
- Thompson, P.R., 1981. Planktonic foraminifera in the western North Pacific during the last 150.000 years: comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 35, 241-279.
- Thunell, R.C., 1978. Distribution of Recent planktonic foraminifera in surface sediments of the Mediterranean Sea. *Marine Micropaleontology*, 3, 147-173.
- Ünlüata, Ü., Oğuz, T., Latif, M.A., and Özsoy, E., 1990. On the physical oceanography of the Turkish Straits. In *The Physical Oceanography of Sea Straits*, L.J. Pratt (ed.), NOTA/ASI Series, Kluwer, 25-60.
- Violanti, D., Parisi, E., and Erba, E., 1987. Fluttuazioni climatiche durante il Quaternario nel mar Tirreno, Mediterraneo occidentale (Caroto PC-19 Ban 80). *Rivide Italiana Paleontologia Stratigraphia*, 92, 515-570.
- Yıldız, A., 2001. Distribution of Recent calcareous nannofossils in bottom sediments from Gökçeada-Bozcaada-Dardanelles Triangle. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 26 (2A), 83-96.
- Yıldız, A. ve Toker, V., 2001. Kuzeydoğu Ege Denizi Gökçeada-Bozcaada-Çanakkale üçgenindeki dip sedimanlarında Güncel diatomeler. *Yerbilimleri*, 24, 53-69.

LEVHA 1 / PLATE 1

- Şekil 1. *Globigerinoides ruber* (d' Orbigny),
Ombilikal görünüm, X 50, Örnek no: 15
- Şekil 2. *Globigerinoides ruber* (d' Orbigny),
Spiral görünüm, X 50, Örnek no: 59
- Şekil 3. *Globigerinoides ruber* (d' Orbigny),
Spiral görünüm, X 75, Örnek no: 70
- Şekil 4. *Globigerinoides sacculifer* (Brady),
Spiral görünüm, X 100, Örnek no: 7

- Şekil 5. *Globigerinoides sacculifer* (Brady),
Ombilikal görünüm, X 100, Örnek no: 7
- Şekil 6. *Globigerinoides trilobus trilobus* (Reuss),
Spiral görünüm, X 50, Örnek no: 15
- Şekil 7. *Globigerina bulloides* (d' Orbigny),
Spiral görünüm, X 150, Örnek no: 19
- Şekil 8. *Orbulina universa* d' Orbigny,
Spiral görünüm, X 100, Örnek no: 19

LEVHA 1 / PLATE 1

