



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).

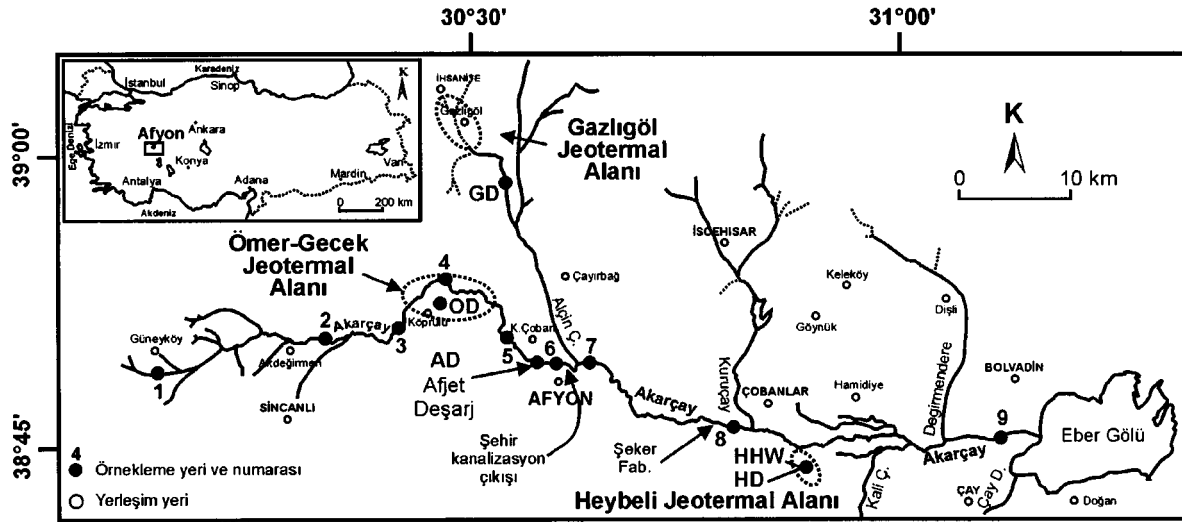
Bu çalışmanın amacı; Afjet’in yanı sıra, diğer kaynaklardan da doğal, ya da yapay nedenlerle Akarçay Havzası’ndaki yüzey ve yeraltı su sistemlerine katılan jeotermal akışkandan kaynaklanan kirlilik düzeyinin belirlenmesi ve çözüm önerilerinin geliştirilmesidir. Çalışma, yüzey ve yeraltı su sistemlerinin 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 Alçın 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 (bknz. 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 düşünölen Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve Heybeli Hamamları ile Afjet deşarj suyu da anılan dönemlerde örneklendirilmiştir (bknz. Çizelge 1). Akarsu sedimanlarının kasyon takas kapasitelerinin ve bu sedimanlarda tutulan majör kasyon 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)	ÇO (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	0.14	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	0.32	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	1.18	0.31	1.11	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	0.85	0.55	0.21	0.30	0.04	0.01	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	0.83	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	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	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	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	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 Deşarj ^a	47.6	7.70	7197	1.6	62.860	4.160	4.805	0.615	2.385	14.810	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	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	0.30	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	0.58	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	0.67	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	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	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	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	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	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	0.17	0.38	-	0.75	0.22	0.15	1.47	0.00	31.60	2.39	80.44	
OD-Ömer Hamamı Deşarj ^a	28.2	8.18	5546	4.7	50.030	2.100	3.120	0.825	1.680	10.840	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 Deşarj ^a	34.0	7.46	6660	1.8	62.530	2.760	4.365	1.030	0.000	19.900	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 Deşarj ^a	33.5	7.53	2325	1.9	19.840	0.930	2.110	0.660	2.055	20.650	0.650	0.190	0.19	1.87	-	0.74	0.12	1.27	0.00	5.50	13.40	0.89	17.86	
HD-Heybeli Hamamı Deşarj ^a	35.5	7.44	2862	1.0	14.220	0.730	5.915	1.650	0.000	19.900	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 çözünmüş oksijen (ÇO) gibi parametreleri örnekleme noktasında ölçülmüş, kimyasal analiz amaçlı su örnekleri polietilen şişelelere 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

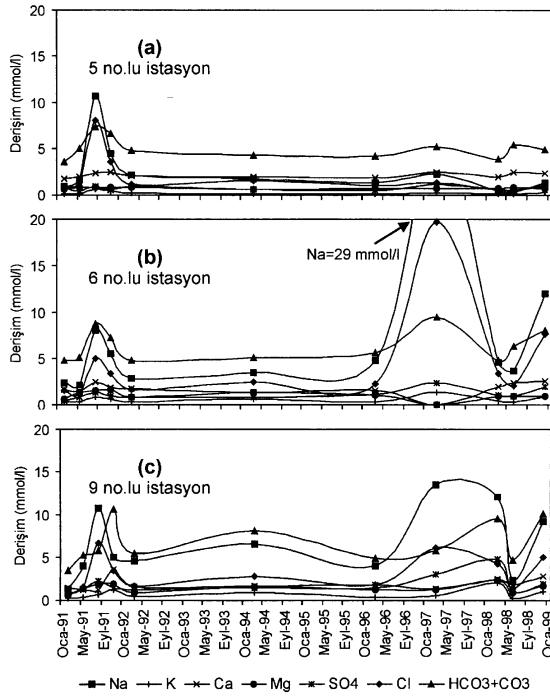
Akarçay Nehri'nin kimyasal kompozisyonu üzerinde jeotermal deşarj suyu etkisinin belirlenmesinde yüksek debili bu suların hakim Na-Cl fasiyesine sahip olmalarından dolayı, öncelikle akarsuya ait Na ve Cl derişimleri kullanılmıştır. Bu iyonlardan Cl, akarsu koşullarında oldukça konservatif eğilimli olup, 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 sular da 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 (bknz. 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 oluştuğu görölmektedir (Şekil 2). Afjet'in henüz devreye girmediği Eylül 1991 ayında tüm istasyonlarda gözlenen bağlı olarak daha düşük derişim artışlarının bu sisteme sıcak su sağlayan Ömer-Göcek jeotermal alanı kuyularında yapılan testler süresince akarsuya termal kökenli su salınmasından kaynaklandığı düşünölmektedir. Söz konusu katkıdan dolayı normal koşullar altında Ca-HCO₃ karakterine sahip olan akarsu kimyasal kompozisyonunun Na-Cl fasiyesine dönüştüğu 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 bağlı 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).

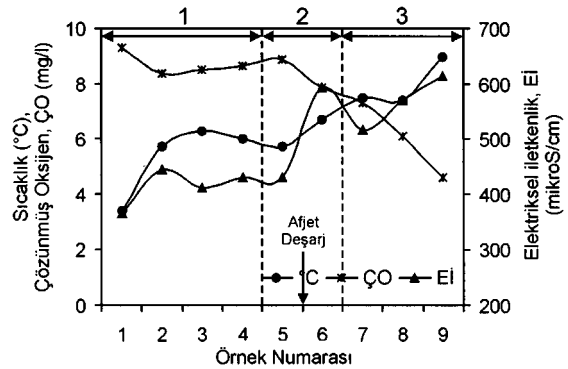
Afjet Katkısından Sonraki Dönem

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 alışverişi so-

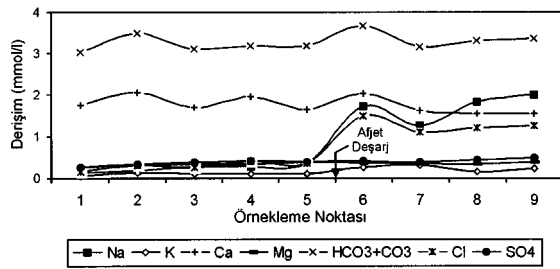


Şekil 3. Akarçay Nehri boyunca fiziksel parametrelerdeki değişimler (Mart 1999)

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

nucu değişmesi mümkün olduğundan, üçüncü bölgedeki su kalitesi değişiminin incelenmesi açısından El'in daha temsil edici olduğu düşünülmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, 6 no.lu istasyon akışıyukarıdaki Afjet deşarjı katkısından sonra Eber Gölü girişine kadar akarsu iyonik kompozisyonunun korunduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, 7 no.lu istasyonda El'te gözlenen azalmanın akarsuya kuzeyden katılan Alçin Çayı'nın neden olduğu seyrelme ile açıklanması mümkündür. 7 no.lu istasyondan sonra El'in tekrar artması, bu bölgede yüksek iyon içeriğine sahip suların akarsuya katıldığına işaret etmektedir. Söz konusu katkıların Heybeli Kaplıcası deşarj suyu gibi yüzey sularının yanı sıra, jeotermal su ile karışmış sığ yeraltısularının akarsuyu beslemesinden kaynaklanmış olması da olası görülmektedir. Diğer yandan, atmosfere açık halde bulunan akarsuyun sürekli olarak atmosferik karbon dioksit ile dengeye gelmesinden dolayı, gerek kurak ve gerekse yağışlı dönemdeki pH değerleri de 8'in üzerinde gözlenmiştir. Bu nedenle, akarsu boyunca pH değişimi bu çalışma kapsamındaki değerlendirmelerde ele alınmamıştır.

Yağışlı dönemde akarsu majör iyon kimyasal kompozisyonu Afjet deşarj noktasına kadar önemli bir değişim göstermemektedir (Şekil 4, 1-5 no.lu örnekleme noktaları). Bu dönemde Akarçay Nehri'nin kaynağından Afjet deşarj noktasına kadar olan bölümde Ca derişiminin 2 mmol/l, HCO₃ derişiminin ise 3 mmol/l düzeyinde sabit kaldığı anlaşılmaktadır. Diğer iyonların derişimleri ise 0.5 mmol/l ve daha düşük düzeydedir. Afjet deşarjından sonra (Şekil 4, 5-6 no.lu istasyonlar arası), Na ve Cl derişimlerinin yaklaşık 3 kat arttığı, buna karşın Ca ve HCO₃ deri-

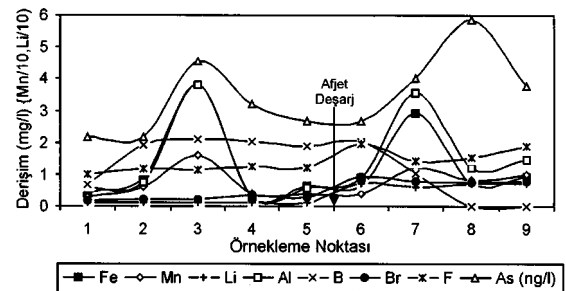


Şekil 4. Akarçay Nehri boyunca yağışlı dönem (Mart 1999) majör iyon kimyası.

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

şimlerinde zayıf bir artış olduğu gözlenmektedir. Diğer iyonların derişiminde ise hafif artışlar oluşmuştur. Afjet deşarjının akarsu kimyasal kompozisyonu üzerindeki etkisi akışışağıdaki 7, 8 ve 9 no.lu istasyonlarda da devam etmektedir. Bu kesimde, 7 no.lu istasyonda gözlenen derişim azalmasının, yukarıda El ile ilgili değerlendirmede de belirtildiği gibi, Akarçay Nehri'ne kuzeyden katılan Alçin Çayı'nın seyreltme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumun, Gazlıgöl jeotermal sahası sularının NaHCO₃ karakterli olmasından kaynaklanması olasıdır. Diğer yandan, 7 no.lu istasyondan sonra Na iyonundaki artışın Ca iyonundaki azalma ile paralellik göstermesi Alçin Çayı katkısının yanı sıra, akarsu ile yatak sedimanları arasındaki katyon takas tepkimelerinin de (Ca tutulmasına karşılık Na salınması) akarsu kimyası üzerinde etkili olabileceğine işaret etmektedir.

Akarçay Nehri boyunca yağışlı dönemde gözlenen iz element derişimlerinde jeotermal su katkısı ile ilişkili olduğu düşünülen derişimler saptanmıştır. Akışıyukarıdaki 1 ve 2 no.lu istasyonlarda B dışındaki elementler açısından önemli bir derişim gözlenmezken, 3 no.lu istasyonda As, Fe, Mn ve Al derişimlerinde önemli artışlar görülmektedir (Şekil 5). Akarsuyun bu kesimde gözle görülür bir jeotermal su girdisi olmamasına karşın, söz konusu element derişimleri yüksektir. Bu durum, bölgede geçmiş yıllarda aktif olan buna karşın jeotermal üretim kuyularının açılması ile günümüzde kurumuş durumda bulunan termal kaynaklara (Uyuz, Kızık Hamamları) ait yeraltısuyunun yüzeyaltı akış ile akarsuya ulaştığına işaret etmektedir. Dört ve 5 no.lu istasyonlarda azalma gösteren derişimler 6 no.lu istasyon öncesinde gerçekleşen Afjet ve



Şekil 5. Akarçay Nehri boyunca yağışlı dönem (Mart 1999) iz element kimyası.

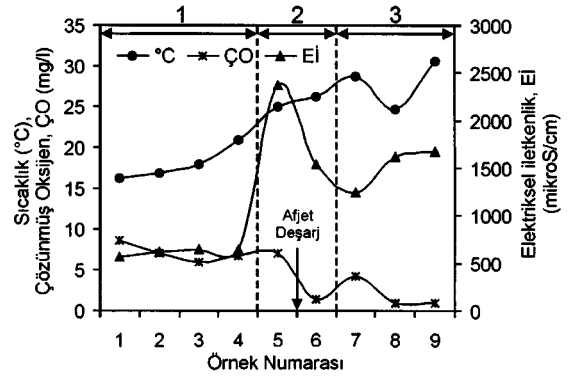
Figure 5. Trace elements chemistry along the Akarçay Stream in the wet period (March 1999).

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-

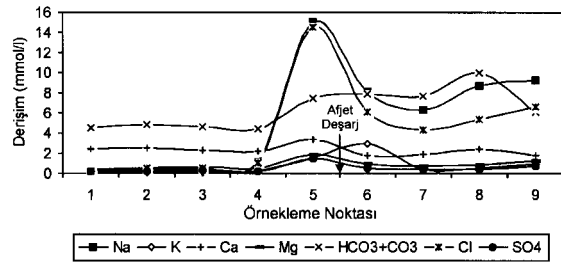


Şekil 6. Akarçay Nehri boyunca fiziksel parametrelerdeki değişimler (Temmuz 1999).

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-



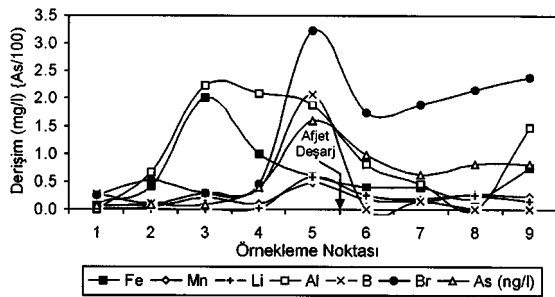
Şekil 7. Akarçay Nehri boyunca kurak dönem (Temmuz 1999) majör iyon kimyası.

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).

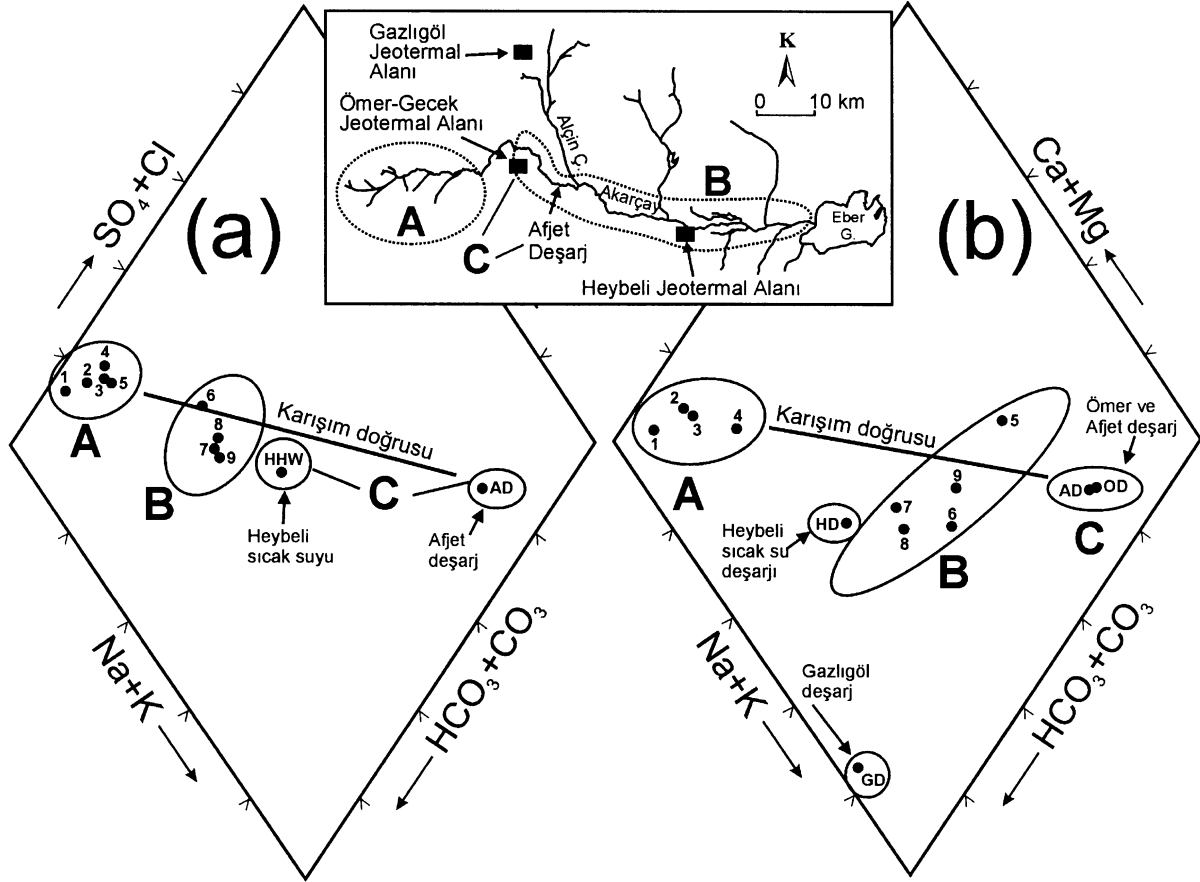
Majör İyon Derişimlerinin Yağışlı ve Kurak Dönemler Arasındaki Değişimi

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 içerdigi 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 içerdigi kirlenmelerin 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 içerdigi katyonlar kısa zamanda ve kabaca sudaki bollukları ile orantılı biçimde akarsu sedimanları tarafından tutulmaktadırlar. Bu durum, başlangıçta Na vb.



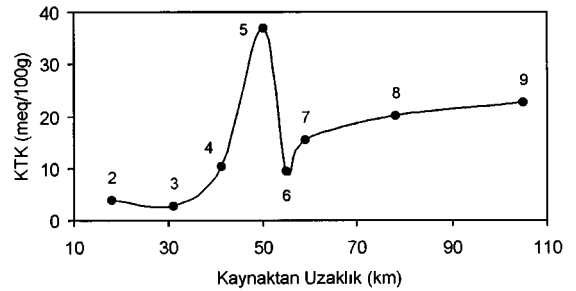
Şekil 9. Yağışlı (a) ve kurak (b) dönemlerde su örneklerinin Piper diyagramı üzerindeki dağılımı (A: Akarçay (Afjet akışyukarısı), B: Akarçay (Afjet akışaşağısı), C: Afjet deşarjı).

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

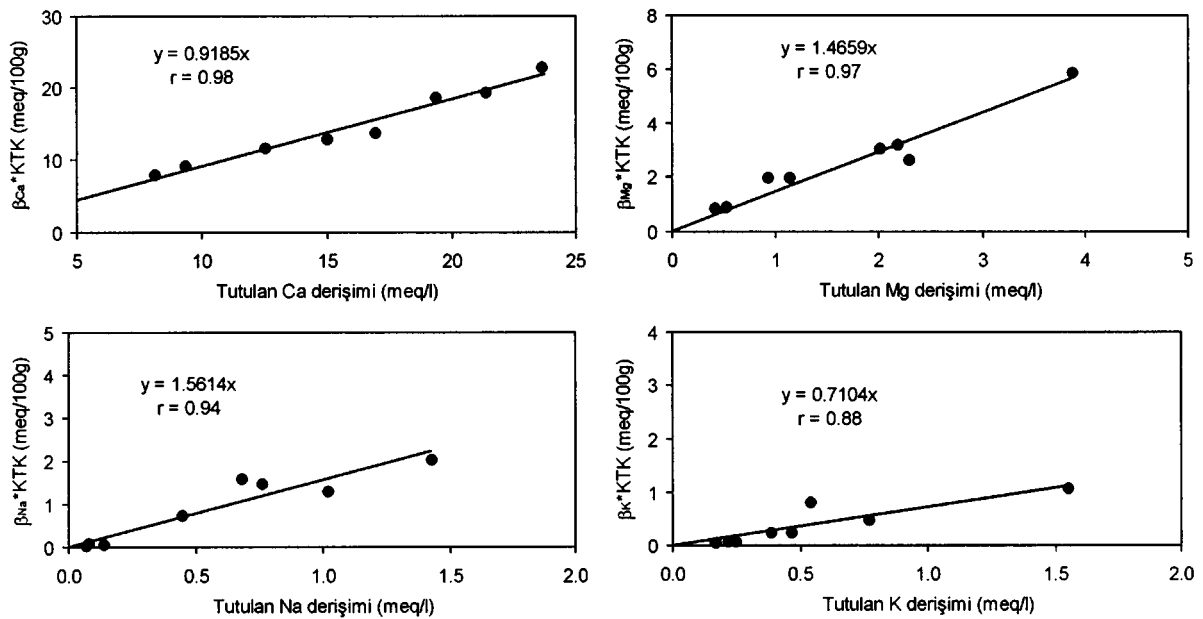


Şekil 10. Akarçay Nehri sedimanları KTK'lerinin yatak boyunca değişimi.

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 akışıyukarisında arttığı gözlenmiştir. Buna karşın, şehrin akışaşağısında 6 no.lu istasyonda gözlenen düşük KTK değerlerinin ise, bu kesimde akarsu yatağının yakın geçmişte ıslah edilmesine bağlı olarak killi malzeme miktarındaki azalma ile ilgili olduğu düşünülmektedir. 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 ölçülen 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 akışıyukarı 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 çökeltilmesi 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.