

Halim MUTLU

M.T.A. Genel Müdürlüğü, Maden Analizleri ve Teknoloji Dairesi, Ankara

Gazlıgöl (Afyon) termal ve maden sularının jeokimyasal özellikleri ve jeotermometre uygulamaları

Sıcaklıkları 18.5 ile 64 °C arasında değişen Gazlıgöl termal ve maden suları Na ve HCO₃'ça zengin bir karakter sergilerler. Sularda tespit edilen düşük sulfat derişimleri büyük olasılıkla bakteriyel sülfat indirgenmesi nedeniyle. Silika ve kation jeotermometreleri ile Gazlıgöl jeotermal sahası için elde edilen rezervuar sıcaklığı maksimum 120 °C dir. Akışkan-mineral denge modeli yardımıyla elde edilen rezervuar sıcaklıkları da bu sonucu desteklemektedir. Yaklaşık 100 °C'lik rezervuar sıcaklığının saptandığı entalpi-klor karışım modeli suların kimyasal bileşim ve sıcaklıklarındaki değişimin, kaynama, derin kökenli sıcak suyun kondüktif olarak soğuması ve bu suyun soğuk su ile karışımını içeren birtakım işlevlerin bir araya gelmesi ile açıklanabileceğini göstermektedir.

Giriş

Afyon şehrinin yaklaşık 20 km kuzeyinde yer alan Gazlıgöl, bölgenin Ömer-Gecek'den sonra ikinci büyük sıcak su sahasıdır (Şekil 1). Gazlıgöl, çok sayıda sıcak su kaynaklarının yanı sıra, maden sularıyla da bilinmektedir. (Örneğin, Kızılay Maden Suyu).

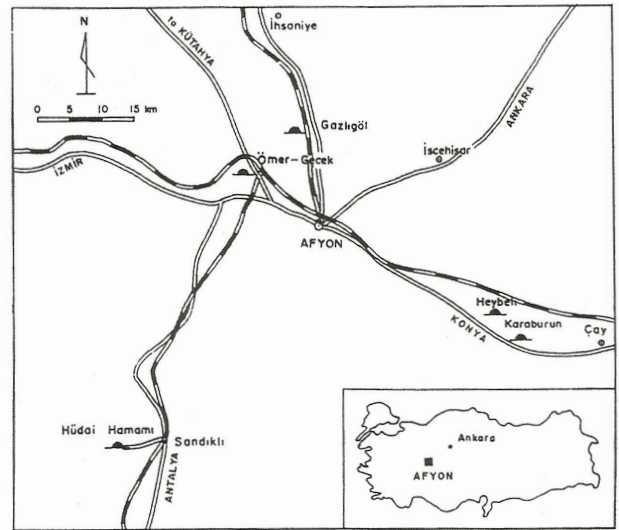
Gazlıgöl alanındaki sıcak su kaynaklarına ait ayrıntılı hidrojeolojik ve yüzey jeolojisi çalışmaları ilk olarak Gökalp (1970) ve Karamandere (1972) tarafından yapılmıştır. Gülay (1972) ise, Gazlıgöl sahasındaki sıcak su potansiyelinin sondaj çalışmalarıyla ortaya çıkarılmasına yönelik araştırmalar yapmıştır. Gülay (1972) elde edilen 6 ile 10 ohm-m lik düşük resistivite değerlerini değerlendirerek sıcak su anomalisinin varlığını belirlemiştir.

Alanda toplam 10 adet sıcak su kaynağı tespit edilmiş olup bunların sıcaklıkları 30 ile 40 °C arasında değişmektedir. Bu kaynaklarının çoğu kaptajlanarak banyolara ulaştırılır. Gökalp (1970) bazı kaynak sıcaklıklarının sondaj çalışmalarından önce 70 °C'ye kadar vardığını belirtmektedir.

Gazlıgöl'deki sondaj çalışmaları 1974 yılında MTA tarafından başlatılmış ve sırasıyla G-1, G-2 ve G-3 olmak üzere toplam üç adet jeotermal kuyusu delinmiştir. Bunlardan G-2 kuyusu düşük su debisi nedeniyle kapalı tutulmaktadır. Bu kuyulara ait bazı bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Bunlara ilaveten, GB (Başak kuyusu), GGW (Güngörler kuyusu), GKH (Köy Hizmetleri kuyusu) gibi bazı özel şahıs ve devlet kuruluşları tarafından açılan kuyular da mevcuttur.

Jeotermal kuyuların yanı sıra, Gazlıgöl'de toplam 2 adet maden suyu kuyusu da açılmıştır. Bunlardan ilki, Kızılay Maden Suyu fabrikasının maden suyu gereksinimini karşılamak üzere 1973'de MTA tarafından açılan kuyudur (GMW) (Gökalp, 1973). Bir diğeri ise, Gazlıgöl Belediyesi tarafından halkın kullanımına sunulmak üzere delinmiştir (GMWW). Bunlara ilaveten, alanda iki adet de maden suyu kaynağı (GKOK ve GMWS) yer almaktadır.

Bu çalışma, mineral-akışkan ilişkilerine dayanarak Gazlıgöl'deki sıcak ve maden sularının jeokimyasal değerlendirme-



Şekil 1. Afyon jeotermal alanının bulduru haritası.

Örnek No.	Kuyu derinliği (m)	Üretim Seviyesi (m)	Rezervuar kayaç	Kuyu Başı Sıcaklığı (°C)	Debi (lt/san)	Yıl	Ref.
G-1	138.0	n.d.a.	kuvarsit-kalk şist	67.0	6.0	1974	a
G-2	300.1	n.d.a.	v.y.	51.0	0.428	1990	a
G-3	207.0	146.0	kuvarsit-kalk şist	74.0	28.0	1995	b

a)Demirel, 1990; b)Uzel, 1995; v.y.: veri yok.

Tablo 1. Gazlıgöl jeotermal kuyularına ait rezervuar verileri.

sini amaçlamaktadır. Bu çerçevede, suların kimyasal bileşimi ve mineral dengesini etkileyen işlevler belirlenmiştir.

Jeoloji

Alandaki temel, başlıca muskovit ve serizitten oluşan Paleozoyik şistlerle temsil olunmaktadır (Şekil 2). Şistler genellikle, Alicin çayının batısındaki yüksek kesimlerde yüzeylenirler. Gökalp (1970), bunların daha batıdaki Menderes masifinin devamı olduklarını ileri sürmüştür.

Gökalp (1970), Gazlıgöl'deki Neojen çökellerini yaşlıdan gence doğru n_1 , n_2 ve n_3 olmak üzere üç farklı litolojik seviyeye ayırmıştır. Yaklaşık 15-20 m'lik bir kalınlık sunan, alta marnlarla başlayıp ve üste doğru kil ve kumtaşları ile devam eden n_1 seviyesi alanın batısında metamorfik kayaçları uyumsuz olarak örtmektedir. İnce tuf bantları, killi kumtaşları ve kireçtaşlarıyla ara tabakalı marnlardan oluşan n_2 seviyesi ise Alicin çayının doğusunda n_1 seviyesinin üzerine uyumlu bir şekilde gelmektedir. Bu seviyenin kalınlığı 20 ile 30 m arasında değişmektedir. Kuvars ve gevşek çimentolu metamorfik kayaç çakıllarından oluşan ve kalınlığı yaklaşık 50 m olan n_3 seviyesi, Şekil 2'de gösterilen alanın KD'sunda kalan Aydoğmuş tepesi civarında n_2 seviyesini uyumlu olarak örtmektedir. Gökalp (1970) bütün bu birimler için Pliyosen yaşı öngörmüştür.

Alandaki Kuvaterner yaşlı allüvyonlar Alicin çayı boyunca çökelmişlerdir (Şekil 2). Gazlıgöl sahasında iki ana traverten oluşumu mevcuttur. Bunlar, irili ufaklı normal faylar yardımıyla yüzeye ulaşan sıcak suların çökerek oluşmuşlardır. Travertenlerden bir tanesi 300 m uzunlukta ve birkaç m genişlikte olup KD-GB doğrultulu iki normal fayın arasında bulunmaktadır. Bir diğeri ise, ilkinin hemen 200 m G-GB'sında yerleşmiş olup KKD-GGB doğrultulu bir başka fay boyunca çökelmiştir.

Su kimyası

Örneklerin toplanması

Gazlıgöl alanının jeokimyasal incelemesi 1995 yılının Temmuz ayında gerçekleştirilmiştir. Alandan toplam 11 adet kuyu ve kaynak suyu toplanmıştır (MTA kuyusu dışındakiler yazar tarafından adlandırılmıştır). Toplam yedi kuyudan örnek alınmıştır. Bunlar; GB (Başak kuyusu), GGW (Güngörler kuyusu), GKH (Köy Hizmetleri kuyusu), G-3 (MTA kuyusu), GMWW (Gazlıgöl maden suyu kuyusu), GMW (Kızılay

Maden Suyu kuyusu) ve IMW (İscehisar maden suyu kuyusu) kuyusudur (Şekil2). İscehisar Gazlıgöl'e 20 km kadar uzak olmasına karşın, bu bölgeden alınan örnek (IMW) aralarında genetik bir ilişki olabileceği gerekçesi ile Gazlıgöl maden sularıyla beraber değerlendirilmiştir. Gazlıgöl sahasından sıcak su kaynakları olarak ilçe merkezindeki çamaşırhane (GWH) ve Alicin çayı ile tren yolu arasında bulunan doğal bir kaynak (GS) örneklenmiştir. Ayrıca, sahanın kuzeyinde Kokarca olarak adlandırılan maden suyundan (GKOK) ve yine Kızılay Maden Suyu fabrikası yakınındaki bir maden suyu kaynağından (GMWS) örnek alınmıştır. Son olarak, sahadaki soğuk su bileşimini belirlemek amacıyla, G-3 kuyusu yakınındaki soğuk su çeşmesinden de numune (GCS) alınmıştır (Şekil 2).

Analitik metodlar

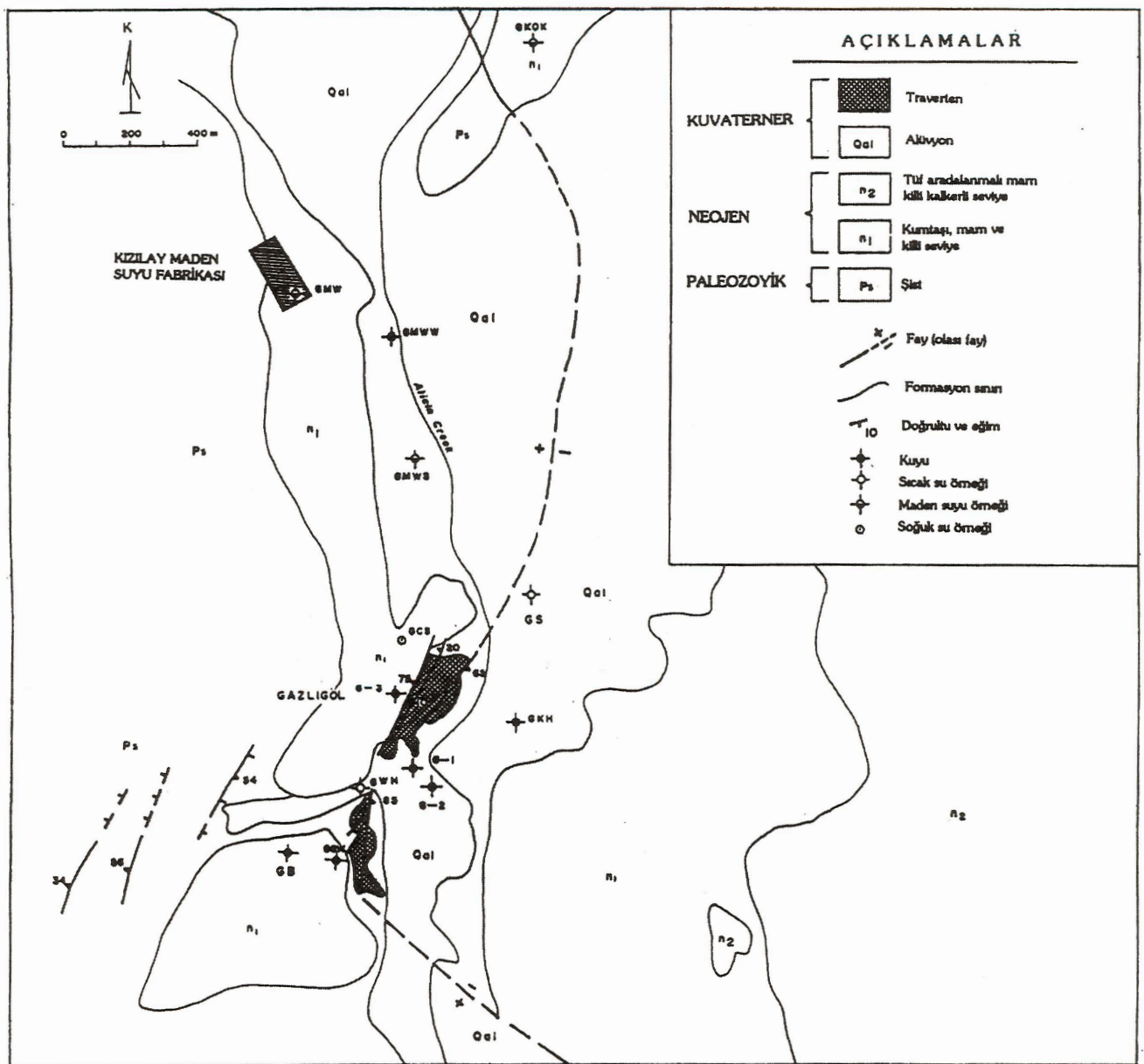
Su örnekleri 500 ml polietilen kaplara filtrelenmek suretiyle toplanmıştır. Herbir örnek iki kısım halinde alınmış olup, katyon analizleri yapılacak olana 5 ml konsantre HCl ilave edilmiştir. Anyon analizleri için toplanan partiye ise bir işlem uygulanmamıştır. Silika konsantrasyonunun 100 mg/l (ppm) üzerinde olabileceği şüphelenilen örnekler ise saf su ile 1/1 oranında karıştırılarak toplanmıştır. Bu tür bir işlem silikanın jel şeklinde çökmesini önlemiştir. Sıcaklık ve pH ölçümleri örnek alın yerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Suların kimyasal analizleri MTA Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında U.S.G.S. (1989)'un standart metodları kullanılarak yapılmıştır. Na ve K konsantrasyonları alev fotometresi ile belirlenmiştir. Ca, Mg, C, ve alkalinite (HCO_3) analizleri için titrasyon metodu kullanılmıştır. SO_4 konsantrasyonu ise iyon kromatograf ile tayin edilmiştir. Fe, Al, SiO_2 ve Li analizleri atomik absorpsiyon ile belirlenmiştir. Son olarak, B konsantrasyonları ise spektrofotometri ile elde edilmiştir. MTA laboratuvarları analiz sonuçları için herhangi bir doğruluk ve kesinlik ölçütü rapor edilmemiştir. Fakat, analiz edilen sulara ait yük-denge (charge-balance) oranlarının genellikle %5'den az oluşu nedeniyle (Tablo 2), sonuçlar güvenilir olarak kabul edilmiştir.

Suların kimyasal özellikleri

Gazlıgöl sularına ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. pH değerleri 6.1 ile 7.45 arasında değişen sular genel olarak nötr bir karakter sergilerler. Maden suları ise 6.2 civarındaki pH değerleri ile sahanın geneline göre biraz daha asidiktirler. Gazlıgöl sularının toplam çözünmüş madde içeriği (GCS örneği hariç) 2295 ile 4625 mg/l (ppm) arasında değişmektedir (ortalaması 3691 mg/l). Termal kaynaklar en fazla 41.5 °C'lik bir sıcaklığa (GWH) erişirler. Sondaj kuyularından alınan suların sıcaklıkları ise 64 °C'ye kadar (G-3 kuyusu) ulaşabilmektedir. 18.5 ile 31 °C arasında bir sıcaklığa sahip Gazlıgöl maden sularını ise ılık sular olarak nitelemek mümkündür.

Tablo 2'de verilen su derişimleri Langelier-Ludwig (1942) diyagramına yerleştirildiğinde, tüm Gazlıgöl sularının Na ve



Şekil 2. Gazlıgöl jeotermal sahasının jeoloji haritası. Gökalp (1970)'den basitleştirilmiştir.

HCO₃'ça zengin oldukları görülür (Şekil 3). Gazlıgöl sularındaki baskın HCO₃ derişimlerinin kökeninin CO₂'çe zengin sularla olan karışım olduğu söylenebilir. Bu görüş, arazide gözlenen gaz kabarcıkları ile de uyumluluk arz etmektedir. Gazlıgöl'de yapılan ölçümlerde H₂S gazı saptanmadığından, söz konusu bu kabarcıklar büyük olasılıkla CO₂ gazı olmalıdır. Düşük SO₄ derişimleri de (G-3, GKOK ve GCS, örnekleri hariç, <10 mg/l) gözönüne alındığında, HCO₃'ın bir diğer kaynağının bakteriyel sülfat indirgenmesi olduğu sonucuna varılabilir. Bu tür indirgenme aşağıda verilen reaksiyonla kontrol edilmektedir (Berner, 1971):



Bu yüzden, sülfat indirgenmesi doğal sularda beklenmedik

şekilde düşük SO₄ derişimlerine sebep olabilmektedir. Gazlıgöl'ün muhtelif kesimlerinden toplanan yüzey sedimanlarında X-ray difraktometre yöntemiyle tespit edilen ince trona (doğal soda) çökelleri (0.5-1 cm) sülfat indirgenmesi görüşünü güçlendirmektedir. Yukarıda verilen reaksiyon neticesinde açığa çıkan HCO₃ ve CO₃, ortamda en fazla bulunan katyon olan Na ile birleşerek trona (NaHCO₃.Na₂CO₃.2H₂O) ve diğer çözünür sodyum karbonat minerallerini (termonatrit, Na₂CO₃, gibi) oluşturmaktadır. Arazide yapılan ölçümlerde H₂S gazı saptanamaması, kükürtün, sondaj çamuru kırıntılarında (tüm kayacın yaklaşık % 5'i) ve korozyona maruz kalmış sondaj borularında da gözlenebilen piriti (FeS₂) oluşturmak üzere demir ile bileşiğe girmesi nedeniyledir.

Tablo 2. Gazlıgöl jeotermal sahasından toplanan suların kimyasal analiz sonuçları (ppm). Bütün CO₂ konsantrasyonları 0.01 ppm'in altındadır. TÇM: Toplam çözünmüş madde. Y.D.: Suyun yük dengesi. +kuyu, Δkaynak, °maden suyu.

Örnek No.	T °C	pH	K	Na	Ca	Mg	HCO ₃	SO ₄	Cl	Fe _T	Al	SiO ₂	Br	Li	TÇM	Y.D.
GB*	43.5	6.70	43.0	580	87.0	20.0	1696	<10	93	<0.1	<0.02	20	7.5	1.0	2548	3.05
GGW*	42.0	6.45	34.0	464	98.8	23.6	1523	<10	97.8	4.2	<0.02	33	4.2	0.8	2295	0.46
GRH*	63.0	7.45	80.2	940	37.0	15.3	2471	<10	225	2.2	<0.02	36	12.0	1.9	3821	0.83
GMW ^Δ	11.5	6.55	78.0	920	53.0	16.6	2672	<10	158	<0.1	<0.02	48	12.4	1.9	3960	2.39
GSA*	32.0	6.55	80.2	920	64.0	15.5	2611	<10	158	<0.1	<0.02	60	12.0	1.9	3923	0.73
G-3*	64.0	7.05	88.0	1088	40.0	15.6	2934	15.8	157	0.6	<0.02	61	14.8	1.9	4417	0.28
GKOK ^Δ	22.0	6.10	61.0	666	40.0	12.0	1781	35.0	127	0.8	<0.02	144	9.0	1.2	2877	0.32
GMWS ^Δ	18.5	6.20	91.9	1080	97.8	19.2	3103	<10	167	<0.1	<0.02	38	14.0	1.9	4625	0.25
GMWW ^Δ	31.0	6.20	93.8	1041	100.6	16.0	3012	<10	157	<0.1	<0.02	23	16.0	1.8	4474	0.25
GMW ^Δ	26.8	6.20	70.0	840	102.0	18.5	2593	<10	127	1.6	<0.02	75	10.8	1.6	3840	1.24
BMW ^Δ	21.5	6.35	86.0	850	97.4	42.0	2605	<10	83	1.3	<0.02	51	8.0	1.8	3826	2.89
GCSA	18.0	6.40	10.6	32.4	50.8	8.0	170	48.9	38	<0.1	<0.02	71	0.4	<0.1	430	0.21

Gazlıgöl'deki maden suları sıcak sulara nazaran daha soğuk olmalarına rağmen daha yüksek toplam çözünmüş madde içeriğine sahiptirler (özellikle GMWS ve GMWW örnekleri). Bu durum, CO₂ gazının maden sularının bileşimine olan etkisiyle açıklanabilir. Ortamdaki yüksek CO₂ miktarı bu suların pH değerlerini göreceli olarak düşürmektedir (yaklaşık 6.2). Maden suları sıg kökenli olduklarından, olası bir karışımdan önceki pH değerleri muhtemelen mevcut ölçülen pH değerlerinden daha da düşüktür (CO₂+H₂O ⇒ HCO₃+H⁺).

Termal sulara göre daha asidik olan bu sular, yüksek HCO₃ derişimlerinden kaynaklanan anyon fazlalığını dengelemek üzere çevre kayaları çözerek Na ve K gibi katyonları bünyelerine alırlar. Aşırı HCO₃ oluşumuna neden olan CO₂'in bu etkisi sadece maden sularıyla sınırlı kalmayıp muhtemelen sıcak sular da içermektedir.

Jeotermometre uygulamaları

Gazlıgöl jeotermal sahasındaki rezervuar sıcaklığını tespit etmek amacıyla çeşitli jeotermometre metodları kullanılmıştır. Bunlar, sırasıyla jeotermometre hesaplamaları, entalpi-klor diyagramı ve akışkan-mineral denge modelleridir.

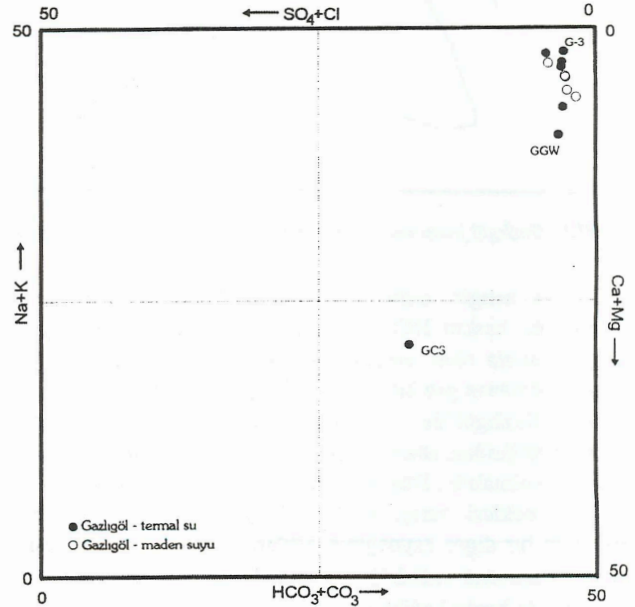
Jeotermometre Hesapları

Çeşitli silika ve katyon jeotermometrelerinin kullanılmasıyla Gazlıgöl jeotermal sahası için elde edilen rezervuar sıcaklıkları Tablo 3'de verilmiştir. Fournier ve Potter (1982) ve Arnórsson (1985)'ün kuvars jeotermometreleri ile elde edilen rezervuar sıcaklıkları 63 ile 159 °C arasındadır. Fournier (1977) ve Arnórsson ve diğ. (1983b)'nin kalsedon jeotermometresi kullanılarak hesaplanan yüksek sıcaklık, ya örnekleme sırasında ortaya çıkan bir kirlilikten ya da analitik bir hatadan kaynaklanan bir silika anomalisiyle açıklanabilir (144 mg/l lik bir SiO₂ derişimi). Aynı şekilde, GB ve GKH örneklerinden hesaplanan düşük sıcaklıklar (31 ve 56 °C) da belirsizdir. Bunun nedeni, bu suların yüzeye çıkışları sırasında silika çökeltmeleri veya seyreltik soğuk sularla karışmaları olabilir.

Kuvars jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları kalsedon jeotermometreleri ile hesaplananlardan daha yüksektir (Tablo 3). Fournier (1991)'in de belirttiği gibi 180 °C'nin altındaki sıcaklıklarda silika çözünürlüğü kuvarstan çok kalsedon ve bazı durumlarda bu her iki mineral

tarafından kontrol edilmektedir. Bazı örnekler için kalsedon jeotermometreleri kullanılarak hesaplanan rezervuar sıcaklıklarının, ya ölçülen sıcaklıktan daha düşük (GB ve GKH) ya da bu sıcaklığı az olarak aşan (GGW) sonuçlar vermesi nedeniyle, Gazlıgöl sahası için kuvars jeotermometrelerinin rezervuar sıcaklıklarını daha iyi yansıttığı söylenebilir. Fakat bu aynı katyon jeotermometreleri ile de test edilmelidir.

Katyon jeotermometrelerinden her bir örnek için hesaplanan rezervuar sıcaklıkları, genelde silika jeotermometreleri ile hesaplananlardan daha yüksektir. Giggenbach (1988) ve Arnórsson ve diğ. (1983b)'nin Na-K jeotermometresi ile elde edilen rezervuar sıcaklıkları 165 ile 233 °C arasındadır (Tablo 3). Giggenbach (1988)'in K-Mg jeotermometresi ise 87-120 °C lik bir sıcaklık aralığı ile Na-K'a göre daha gerçekçi gözükmektedir. Na-K jeotermometresi üzerindeki Ca derişimlerinin etkisini azaltmak için Fournier ve Truesdell (1973) tarafından geliştirilen Na-K-Ca jeotermometresi kullanıldığında alınan sonuçlar silika ve K-Mg jeotermometrelerinden hesaplanana göre daha yüksektir (126-198 °C) (Tablo 3). Bunun nedeni, CaCO₃ çökmesidir. Sıvı haldeki Ca²⁺ kaybı, Na-K-Ca jeotermometresi için genellikle yüksek sıcaklıklar vermektedir. Na-K-Ca jeotermometresi Mg'ca zengin sulara uygulandığında elde edilen sonuçlar çok yüksek çıkmaktadır. Fournier ve Potter (1979) bunun önlenmesi için, sıcaklık düzeltilmesi olan R gibi bir hesaplanan değer için Na-K-Ca jeotermometresinden çıkartılması gerektiğini savunarak Na-K-Ca-Mg jeotermometresini geliştirmişlerdir. Bu jeotermometrenin Gazlıgöl sularına uygulanmasıyla elde edilen yeni rezervuar sıcaklık aralığı 66-120 °C'dir (Tablo 3).



Şekil 3. Gazlıgöl suları için Langlier-Ludwig diyagramı.

Tablo 3. Gazlıgöl sularına uygulanan jeotermometreler ve sonuçları.

Örnek No	Ölçülen Sıcaklık (°C)	Kuvars ^a	Kuvars ^b	Kals. ^c	Kals. ^d	Na-K ^e	Na-K ^d	K-Mg ^e	Na-K-Ca ^f	Na-K-Ca-Mg düzelt. ^g
GB	43.5	63	63	31	34	209	166	95	143	88
GGW	42.0	84	84	52	55	209	165	87	126	86
GKH	64.0	87	88	56	58	220	179	116	198	91
GWH	41.5	100	100	69	71	219	179	114	194	95
GS	32.0	110	110	81	81	222	181	116	194	105
G-3	64.0	112	111	82	83	216	174	119	197	94
GKOK	22.0	159	152	134	131	225	186	112	190	97
GMWS	18.5	90	90	59	61	220	179	117	188	110
GMWW	31.0	69	69	37	40	224	185	120	188	120
GMW	26.8	121	120	93	93	218	177	109	168	104
IMW	21.5	103	103	72	74	233	196	104	180	66

^aFournier ve Potter (1982); ^bAmörsson (1985); ^cFournier (1977); ^dAmörsson ve diğ. (1983b); ^eGiggenbach (1988); ^fFournier ve Truesdell (1973); ^gFournier ve Potter (1979)

Örneklerin pek çoğu için kuvars, K-Mg ve Na-K-Ca-Mg jeotermometreleri arasındaki uyuma göz ardı edilemeyecek kadar belirgindir. Özellikle, iki deri kuyu olan GKH ve G-3 için bu tür jeotermometrelerle hesaplanan sıcaklıklar gözönüne alındığında, Gazlıgöl sahasının rezervuar sıcaklığının 88 ile 119 °C arasında olabileceği görülecektir (Tablo 3). Ancak, bütün bu jeotermometre hesaplamalarının katı eriyik minerallerinin saf fazlarına yönelik olduğu ve böylece sulardaki ideal mineral denge çökelişini tam olarak yansıtmayabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Entalpi-klor karışım modeli

Gazlıgöl sahasının rezervuar sıcaklığı, Truesdell ve Fournier (1975)'in entalpi-klor modeli ile de belirlenmiştir (Şekil 4). Diyagramda kaynama, ölçülen ve belirlenen rezervuar sıcaklıklarına karşılık gelen entalpi değerleri, Henley ve diğ. (1984)'de verilen Buhar Tablosu'ndan aynen alınmıştır.

Sahada en fazla klor içeren su olan GKH'nin, R ile gösterilen ve 100 °C lik rezervuar sıcaklığı gösteren bir sıcak suyun kondüktif olarak soğuması sonucu oluştuğu ve daha sonra GCS ile karıştığı varsayıldığında, sulardan hemen hemen hiçbiri bu karışım çizgisi (M1) üzerine tam olarak düşmemektedir. Fakat, GB, GGW ve G-3 örnekleri GCS ile R arasında çizilen bir başka karışım çizgisini (M2) kesmektedirler. Diğer bir deyişle, bu sular rezervuar suyu (R) ile soğuk suyun (GCS) karışımından oluşmuşlardır.

Şekil 4'de görüldüğü üzere, GWH, GMWW ve GS suları G-3 suyunun kondüktif olarak soğuması sonucu ortaya çıkmışlardır. GWH suyu, GKH ile GCS suları arasındaki olası bir karışımından da oluşabilmektedir. Diyagramdaki diğer ilginç bir özellik de, maden suyu örnekleri olan IMW, GKOK, GMW ve GMWS'nin bir evaporasyon çizgisi (E) boyunca oluşmuşlardır. Başka bir deyişle, GMWS örneği IMW, GKOK ve GMW sularının ardaşıklı olarak evaporasyona maruz kalmaları sonucu oluşmuştur. Diyagramda, sıcak sular ve maden suları arasında doğrudan bir ilişki görünmemesine rağmen, maden suları büyük olasılıkla sıcak suların kondüktif olarak soğuması sonucu oluşmuşlardır. Bu görüşü sadece G-3 suyunun kondüktif soğumasıyla oluşan GMWW doğrulamaktadır. Başka bir deyişle, maden sularının kimyasını yansıtan diğer sıcak sular ya kondüktif soğumaya uğramadan önce örneklenmemiş ya da yüzeye kaynak olarak ulaşmamış olabilirler.

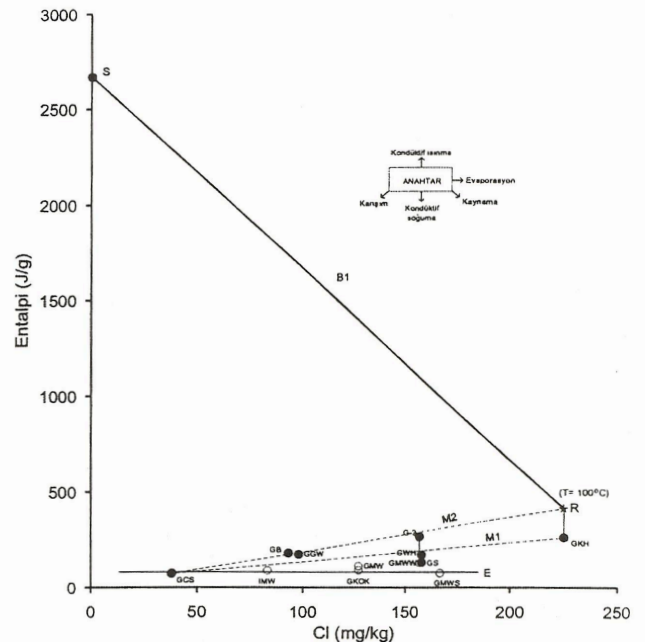
Rezervuar suyunun (R) kimyasını en iyi temsil eden GKH örneğinin kuvars jeotermometresi ile hesaplanan sıcaklığı 88

°C'dir. Bu sıcaklık entalpi-klor diyagramından elde edilen 100 °C'lik rezervuar sıcaklığıyla uyumaktadır. Yine aynı örneğe ait K-Mg (Giggenbach, 1988) ve Na-K-Ca-Mg (Fournier ve Potter, 1979) jeotermometreleri kullanılarak bulunan sıcaklıklar sırasıyla 116 ve 91 °C'dir, ve entalpi-klor diyagramından bulunan sıcaklık olan 100 °C ile büyük bir uyum içindedirler.

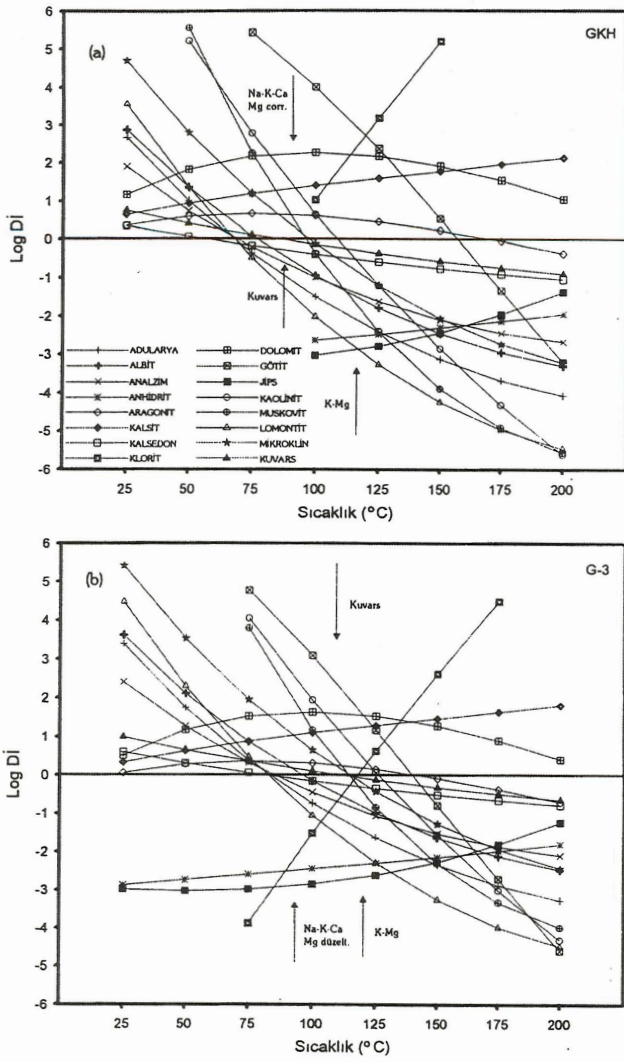
Akışkan-mineral denge modeli

Çok farklı bir jeotermometri uygulaması olan bu yaklaşım, ne belli bir mineral dengesi varsayımına ne de ampirik olarak kalibre edilmiş bir jeotermometreye dayanmaktadır. Bu tür bir modelleme, farklı sıcaklıklarda belli bir su kompozisyonundan çökebilecek değişik saf minerallerin denge durumu ile ilişkilidir. Eğer bir mineral grubu belli bir sıcaklıkta denge durumuna yakınlık gösteriyorsa (Doğunluk İndeksi (DI)=1), söz konusu su kompozisyonunun bu minerallerle denge halinde olduğu ve seçilen sıcaklığın rezervuar sıcaklığını belirttiğinden söz etmek mümkündür (Nordstrom ve Munoz 1986; Çamur, 1996; Mutlu, 1996). Diğer taraftan, Tole ve diğ. (1993)'nin de belirttiği üzere, bu tür sıcaklık tahmini esas olarak katı eriyik minerallerinin saf fazlarına yönelik bir denge durumunu yansıttığından, elde edilen sonuçlar sadece bir yaklaşımdır. Unutulmamalıdır ki, karışıma uğramış sular (sıg kökenli sular) herhangi bir sıcaklıkta hidrotermal minerallere göre denge durumu gösteremeyebilirler.

Termodinamik denge durumuna bağlı bu tür diyagramların oluşturulması toplam element derişimlerinin alt elementel bileşiklerine ayrılmasını gerektirmektedir. Bu tür hesaplamalar ancak bilgisayar programları vasıtasıyla yapılabilmektedir. Bu çalışmada, literatürde mevcut bu çeşit programlardan



Şekil 4. Gazlıgöl suları için entalpi-klor karışım diyagramı.



Şekil 5. Gazlıgöl suları için mineral denge diyagramları: a) GKH, b) G-3

biri olan WATSPEC (Wigley, 1977) kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda daha güvenilir sonuçlar alabilmek için, bu programın termodinamik veri tabanı, Arnórsson ve diğ. (1982)'nin çeşitli mineraller ve bileşiklere ait sıcaklık bağımlı çözünürlük katsayılarının hesaplanmasına ilişkin verdiği denklemlerle değiştirilmiştir.

Özellikle alüminyum silikat minerallerin doygunluk indekslerinin hesaplanmasında, Tablo 2'de verilen 0.02 ppm'den küçük Al değerleri yerine daha kesin Al derişimlerinin kullanılması zorunlu olmakla birlikte, söz konusu bu değer kullanılması ile elde edilecek sonuçların Gazlıgöl jeotermal sahası için maksimum rezervuar sıcaklıklarını vereceği de bir gerçektir (Mutlu, 1996).

Gazlıgöl'deki GKH ve G-3 kuyu sularına mineral-akışkan dengesi metodunun uygulanmasıyla elde edilen sıcaklık-doygunluk indeksi diyagramları Şekil 5'de verilmektedir. Değişik minerallere ait eğrilerden belirlenen doygunluk durumları, bu

minerallerin kimyasal jeotermometreler (özellikle kuvars, K-Mg ve Na-K-Ca-Mg jeotermometreleri) ve entalpi-klor diyagramından elde edilen sıcaklık aralıklarında jeotermal akışkanla denge halinde olduklarını göstermektedir. Başka bir ifadeyle, GKH ve G-3 kuyularına ait su kompozisyonları için farklı minerallere ait doygunluk eğrileri, denge çizgisini ($\log DI=0$) jeotermometreler ve entalpi-klor diyagramından bulunan benzer sıcaklıklarda (sıcaklık aralığında) kesmektedir.

Sonuçlar

Gazlıgöl termal ve maden suları Na ve HCO_3 'ça zengin bir bileşime sahiptir. Sahanın hemen hemen tamamında gözlenen Na-karbonat oluşumları ve bu sulara ölçülen düşük sülfat derişimleri bakteriyel bir sülfat indirgenmesine işaret etmektedir.

Jeotermometreler, entalpi-klor karışım modeli ve akışkan-mineral denge modeli kullanılarak Gazlıgöl jeotermal sahası için elde edilen rezervuar sıcaklığı 100 °C civarındadır. Ancak bu tür hesaplamaların, sadece yüksek sıcaklıktaki veya karışımından hiç veya çok az etkilenmiş sulara uygulanacağı da göz ardı edilmemesi gereken bir gerçektir.

Katkı Belirtme

Bu çalışma, yazarın Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde Doç. Dr. Nilgün Güleç'in danışmanlığı altında gerçekleştirilmiş olan doktora tezinin bir parçasıdır. Yazar, MTA Genel Müdürlüğü'ne doktora çalışmaları sırasında sağladığı katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilir.

Değinen Belgeler

- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., and Svavarsson, H., 1982, The chemistry of geothermal waters in Iceland-I. Calculation of aqueous speciation from 0° to 370 °C: *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 46, p. 1513-1532.
- Arnórsson, S., 1985, The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems: *J. Vol. Geothermal Res.*, v. 23, p. 209-335.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., and Svavarsson, H., 1983b, The chemistry of geothermal waters in Iceland-III. Chemical geothermometry in geothermal investigations: *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 47, p. 567-577.
- Berner, R. A., 19971, *Principles of Chemical Sedimentology*, McGraw-Hill Inc., 240 s.
- Çamur, M. Z., 1996, Doğal salamura sularında mineral çökeltim ve çözümünün termodinamik değerlendirimi için bilgisayar programı: *Jeol. Müh.*, sayı. 48, s. 40-56.
- Demirel, Z., 1990, Gazlıgöl G-2 Sondajı kuyu bitirme raporu: M.T.A. Raporu, No. 9016.
- Fournier, R. O., 1977, Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems: *Geothermics*, v.5, p. 41-50.
- Fournier, R. O., 1991, Water geothermometers applied to geothermal energy. In D'amore, F., Co-ordinator, Application of

- Geochemistry in Geothermal Reservoir Development, UNITAR, United States of America, p. 37-69.
- Fournier, R. O. and Truesdell, A. H., 1973, An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters: *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 37, p. 1255-1275.
- Fournier, R. O. and Potter, R. W., II, 1979, Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer: *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 43, p. 1543-1550.
- Fournier, R. O. and Potter, R. W., II, 1982, A revised and expanded silica (quartz) geothermometer: *Geotherm. Resourc. Coun. Bull.*, v. 11, n. 10, p. 3-12.
- Giggenbach, W. F., 1988, Geothermal solute equilibria Derivation of Na-K-Ca-Mg geothermometers: *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 52, p. 2749-2755.
- Gökalp, E., 1970, Gazlıgöl (Afyon) sıcak suları etüd raporu: M.T.A. Raporu, No. 4366.
- Gökalp, E., 1973, Türkiye Kızılay Derneği Afyonkarahisar madensuyu KMS I ve II nolu madensuyu kuyuları bitirme raporu: M.T.A. Raporu, No. 5046.
- Gülây, A., 1972, Afyon, Ömer-Gecek-Afyon Ovası, Gazlıgöl, Çobanlar, Heybeli, Çay yöreleri jeotermik enerji araştırmaları rezistivite etüdüleri raporu: M.T.A. Raporu, No. 4852.
- Henley, R. W., Truesdell, A. H., Barton, P.B., and Whitney, J.A., 1984, Fluid-Mineral equilibria in hydrothermal systems: *Reviews in Economic Geology-Volume 1*, Society of Economic Geologists, 267 p.
- Karamandereci, İ. H., 1972, Afyon K 24-b paftası detay jeoloji etüdü ve jeotermal alan olanakları hakkında rapor: M.T.A. Raporu, No. 5733.
- Langelier, W. and Ludwing, H., 1942, Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters: *J. Amer. W. W. Assoc.*, v. 34, p. 335-352.
- Mutlu, H., 1996, Afyon jeotermal alanındaki termal suların jeokimyasal değerlendirilmesi: Jeotermometre uygulamaları ve akışkan-mineral dengesi: Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 169 s.
- Nordstrom, D. K. and Munoz, J. L., 1986, *Geochemical Thermodynamics*, Blackwell Scientific Publications, 477 s.
- Tole, M. P., Armannsson, H., Zhong-He, P., and Arnórsson, S., 1993, Fluid/mineral equilibrium calculations for geothermal fluids and chemical geothermometry: *Geothermics*, v. 22, n.1, p. 17-37.
- Truesdell, A. H. and Fournier, R. O., 1975, Calculation of deep temperatures in geothermal systems from the chemistry of boiling spring waters of mixed origin: *Proc. Second U.N. Symposium on Geothermal Resources*, San Francisco, CA, p. 837-844.
- U.S.G.S., 1989, Methods for determination of inorganic substances in water and fluvial sediments. In: M.J. Fishman and L.C. Friedman (Eds.), *Techniques of water-resources investigations of the U.S.G.S. Book 5, Chapter A1*, 545 p.
- Uzel, Ö. F., 1995, Afyon-Gazlıgöl Kaplıcası G-3 sıcaksu kuyusu bitirme raporu: M.T.A. Raporu.
- Wigley, T.M.L., 1977, WASTPEC: a computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions: *Brit. Geomorph. Res. Group Tech. Bull.*, 20, 48 p.