

**Jeotermal Suların Rezervuar Sıcaklığının Tahmininde Kullanılan Jeotermometre Hesaplamaları İçin Bilgisayar Programı**

*A Computer Programme for Geothermometer's Calculations for the Estimation the Reservoir Temperature of the Geothermal Waters*

**Müfit Şefik DOĞDU**

*Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe -Ankara (e-posta: mufitd@hacettepe.edu.tr)*

**ÖZ**

Jeotermal suların rezervuar sıcaklığının belirlenmesinde kullanılan en önemli yöntemlerden biri jeotermometrelerdir. Jeotermometre eşitliklerinde termal suyun rezervuar kayaç etkileşimi ile kazandığı kimyasal içerik kullanılmaktadır. Rezervuar sıcaklığının kaç derece olabileceğini belirlemek, termal suyun ekonomik olarak işletilmesi ve geliştirilmesi açısından oldukça önemlidir. Katyon, silis, gaz, izotop vb. bir çok jeotermometre türü olmasına karşın örnekleme, analizi ve değerlendirilmesi kolay olduğundan dolayı genellikle rezervuar sıcaklığının tahmininde katyon ve silis jeotermometreleri tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında Microsoft Visual Basic 6.0 programlama dilinde hazırlanan bilgisayar programının amacı katyon ve silis jeotermometre eşitlikleri ile termal suyun rezervuar sıcaklığını belirlemektir. Jeotermometre sonuçlarının yanı sıra suyun tipini gösteren majör iyon sıralaması, analiz doğruluğunu belirten majör iyon dengesi ve termal suya Na-K jeotermometresinin uygulanıp uygulanamayacağını belirteci olan olgunluk indeksi de bu program tarafından hesaplanmaktadır. Jeotermometrelerin uygulanmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde, jeotermometrenin temel aldığı mineral bileşiminin alandaki rezervuar kayaç bileşimine uygunluğu, termal su ile kayaç arasında kimyasal dengenin sağlanmış olması, termal suya soğuk suyun karışması, termal suyun yüzeye yükselirken uğradığı kimyasal değişimler vb. gibi süreçler hesaplanan rezervuar sıcaklığının güvenilirliği açısından daima göz önünde bulundurulmalıdır.

**Anahtar kelimeler:** jeotermal su, jeotermometre, rezervuar sıcaklığı.

**ABSTRACT**

*Geothermometers are one of the most important methods used for determining the geothermal water reservoir temperature. Chemical content of the thermal water that was acquired by the water-rock interaction is used in the geothermometer equations. Determination of possible reservoir temperature of the thermal water is quite important for development and operation of the thermal waters. In spite of being lots of geothermometer type like cation, silica, gas and isotope, generally cation and silica geothermometers are preferred because their analyses and evaluations are easy. In the scope of this study, a computer programme has been prepared by using of the Microsoft Visual Basic 6.0 programming language and aim of this programme is determining the thermal water reservoir temperature by silica and cation geothermometer equations. Major ion order which*

*denotes the water type; majör ion balance which indicates the accuracy of the water analyses; and maturity index which indicates the application of the Na-K geothermometers are suitable or not to thermal water are determined by this programme in addition to the geothermometer calculations. Appropriateness of the reservoir rock mineral composition to the based mineral used in geothermometer equations, the chemical equilibrium between water and rock, cold water mixing, chemical changes in the thermal water when it was ascending, etc. must always be taken into consideration during the geothermometer applications, in terms of evaluations and reliability.*

**Key words:** *geothermal water, geothermometer, reservoir temperature.*

## GİRİŞ

Jeotermal sular rezervuarda (akifer kayada) kaldıkları süre içerisinde su-kayaç etkileşmesiyle kimyasal bileşimini kazanmaktadır. Termal suların yerin derinliklerinde kazandıkları bu kimyasal içerikler jeotermometre denklemlerinde kullanılarak rezervuar sıcaklıkları hesaplanabilmektedir. Bu çalışmaya konu olan jeotermometre terimi: jeotermal alanlarda fay gibi doğal yapılarla veya açılan kuyularla yüzeye ulaşan akışkanın (su+gaz+buhar) rezervuarda kazandığı kimyasal özelliklerinden (iyon, gaz, izotop vb. içeriği) yararlanılarak termal suların akifer kayadaki sıcaklıklarının tahmininde kullanılan eşitlikleri/yöntemleri kapsamaktadır (Truesdell ve Fournier, 1976; Bowen, 1989). Jeotermometrelerin termal suya uygulanmasında temel varsayım sıcaklığa bağlı su-mineral dengesinin derinlerdeki rezervuar kayada sağlanmış olmasıdır (Andresdottir ve Arnorsson, 1995). Bir çok çalışma 50-100 °C gibi düşük sıcaklıklarda bile birçok ana iyon bileşeni açısından su-mineral dengesinin sağlandığını göstermiştir (Giggenbach, 1980, 1981; Arnorsson vd. 1983a).

Termal suların yüzeyde ölçülen sıcaklıkları rezervuar kayada içindeki sıcaklıklarından düşüktür. Termal suların rezervuar kayadan yüzeye yükselmeleri sırasında sıcaklıklarının

azalmasına temas ettiği kayalarla ısı değişimi, soğuk yeraltı suları ile karışımı, rezervuar kayacın atmosferle ilişkisini kesen geçirimsiz kayaların (örtü kayada) çok ince oluşu veya bulunmayışı gibi faktörler neden olmaktadır. Termal suların rezervuar sıcaklıkları, bu suların gelecekte hangi amaçla (elektrik üretimi, ısıtıcılık, balneolojik (termal su ile tedavi) vb.) kullanılması gerektiğini belirlemede oldukça önemli bir bilgidir (Çizelge 1). Rezervuardaki suların sıcaklığı, verimleri, kimyasal özellikleri hakkında gerçek bilgiler rezervuara kadar ulaşan kuyuların incelenmesi ile elde edilir. Ancak, rezervuar sıcaklığının belirlenmesi için derin sondajların açılması oldukça zahmetli ve pahalı bir süreçtir. Bu nedenle, jeotermal alanda bulunan kaynak veya sığ sondajlarla elde edilmiş termal suların kimyasal içeriklerinden yararlanılarak, bir çok araştırmacı tarafından türetilmiş olan jeotermometreler ile rezervuar sıcaklığı hesaplanmaya çalışılmaktadır.

Daha önce yapılmış olan ve genellikle su analiz sonuçlarının kimyasal değerlendirilmesine yönelik AqQA (2003) bilgisayar programı 6 adet silis (kuvars, kalsedon, kristobalit, amorf silika vb.) ve 5 adet katyon jeotermometresi (Na-K, Na-K-Ca, Mg-Li, Na-Li vb.) olmak üzere toplam 11 adet jeotermometre içermektedir.

**Çizelge 1.** Değişik uygulamalar için gerekli en düşük termal su sıcaklıkları (Lindal, 1973).

**Table 1.** Required minimum thermal water temperatures for various applications (After Lindal, 1973).

°C	
200	
190	
170	Yüksek konsantrasyona sahip çözeltilerin buharlaştırılması, amonyum absorpsiyonu ile soğutma, kağıt hamurunun ayrıştırılması
170	Hidrojen sülfid süreçleriyle ağır su üretimi, diatomlu toprakların kurutulması
160	Balıkların ve kerestelerin kurutulması
150	• Bayer süreçleriyle alüminyum üretimi
140	• Fazla miktarda üretilen çiftlik ürünlerinin kurutulması (konserve sanayinde)
130	• Buharlaştırmayla şekerin saflaştırılması, kristalizasyon ve buharlaştırmayla tuzun ayrıştırılması, distilasyonla taze su sağlanması
120	• Tuzlu çözeltilerden buharlaştırma ile tuzun ayrıştırılması
110	Çimento tabakalarının kurutulması ve işlenmesi
100	• Organik maddelerin (yosun, ot, bitki vb.) kurutulması, pamuğun yıkanması ve kurutulması
90	Stok balıklarının kurutulması
80	Bina ve seraların ısıtılması
70	Soğutma işlemi (sıcaklık alt sınırı)
60	Hayvan çiftlikleri, sera ve toprağın ısıtılması
50	Manlar üretimi, balneoloji (kaplıca tedavisi)'de kullanım
40	Toprağın ısıtılması
30	Yüzme havuzlarında, biodegrasyon ve fermentasyon işlemlerinde, soğuk iklimlerdeki maden ocaklarının ısıtılması, buz çözme
20	Balık üretim çiftliklerinde

Arnorsson vd. (1982) tarafından hazırlanmış olan Watch bilgisayar programı ise kuvars, kalsedon ve Na-K değerlerini kullanan 3 adet jeotermometre ile rezervim sıcaklığı hesaplamaktadır. Sunulan bu çalışmada ise termal suların kimyasal içeriğini kullanan 22 adet jeotermometre eşitliği ile rezervuar sıcaklığını belirleyen bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu programın hazırlanmasıyla, hemen hemen tüm jeotermal araştırmalarda yaygın olarak kullanılan jeotermometre eşitlik sonuçlarının daha kolay ve hızlı bir şekilde hesaplanması, hesaplanan verilerin bilgisayar ortamında saklanması ve böylece bu konuda çalışan araştırmacılara yardımcı olmak hedeflenmiştir.

## JEOTERMOMETRELER

Jeotermometrelerle rezervuar sıcaklığının veya başka bir deyişle termal suyun ilksel sıcaklığının hesaplanması, suda bulunan iyon, gaz ve/veya izotop içeriklerinin hangi sıcaklıkta termal sudaki çözünürlüğe veya iyon takasına sahip olabileceğinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Jeotermometre eşitlikleri kullandıkları kimyasal reaksiyonlar açısından başlıca iki sınıfa ayrılmaktadır: 1) bir mineralin sıcaklığa bağlı çözünürlüğünü temel alan jeotermometreler (silis jeotermometreleri) ve 2) çözünmüş iyonların sıcaklığa bağlı iyon takas (ion exchange) reaksiyonlarına dayanan katyon jeotermometreleridir (Na-K, Na-Ca, Na-K-Ca, K-Mg, Li-Na vb.) (Fournier, 1991). Jeotermal araştırmalarda rezervuar sıcaklığının hesaplanmasında kullanılan eşitliklerde yer alan kimyasal parametrelerin (SiO<sub>2</sub>, Na, Ca, Mg, K, Li vb.) örnekleme ve analizinin daha kolay olması nedeniyle yaygın olarak silis

ve katyon jeotermometreleri tercih edilmektedir. Çalışmaya konu olan bilgisayar programında Çizelge 2'de verilmiş olan silis ve katyon jeotermometre eşitlikleri kullanılmıştır. Bu jeotermometre eşitliklerine dikkat edilecek olursa aynı kimyasal parametreyi (Na-K, K-Mg, Li-Na ve SiO<sub>2</sub>) kullanan fakat farklı sonuçlar veren jeotermometreler bulunmaktadır. Örnek olarak: birden çok silis jeotermometresinin olmasının nedeni, eşitliklerde denge sabitleri (K<sub>e</sub>) birbirinden farklı silis minerallerinin (kuvars, kalsedon gibi) kullanılması ve bazı varsayımların (buhar kaybının olup olmaması vb.) hesaplamalara katılmasıdır.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, katyon jeotermometreleri iyon takas reaksiyonlarının denge sabitlerinin (K<sub>e</sub>) alacağı değerlerin sıcaklığa bağlı değişiminin belirlenmesini temel alan eşitlikleri içermektedir. Rezervuar kayada bulunan alkali feldispatlar (yerkabuğunu oluşturan mineraller arasında ağırlıkça %60-65 ile en başta gelir (Erkan, 1978)) ve bu minerallerle temas halinde bulunan termal suyun arasında gerçekleşen Na ve K iyonlarının takas reaksiyonu örnek olarak verilebilir.



Burada R ve W alt indisleri sırasıyla kayac ve suyu ifade etmektedir. Yukarıdaki iyon takas reaksiyonunun denge sabiti (K<sub>e</sub>) aşağıdaki gibidir.

$$K_e = [\text{KAlSi}_3\text{O}_8]_R * [\text{Na}^+]_W / [\text{NaAlSi}_3\text{O}_8]_R * [\text{K}^+]_W \quad (2)$$

Saf katıların (albit: NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ve K-eldispat: KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) aktiviteleri 1 kabul edildiğinden Eş. (2) basit olarak

$$K_e = [\text{Na}^+]_W / [\text{K}^+]_W \quad (3)$$

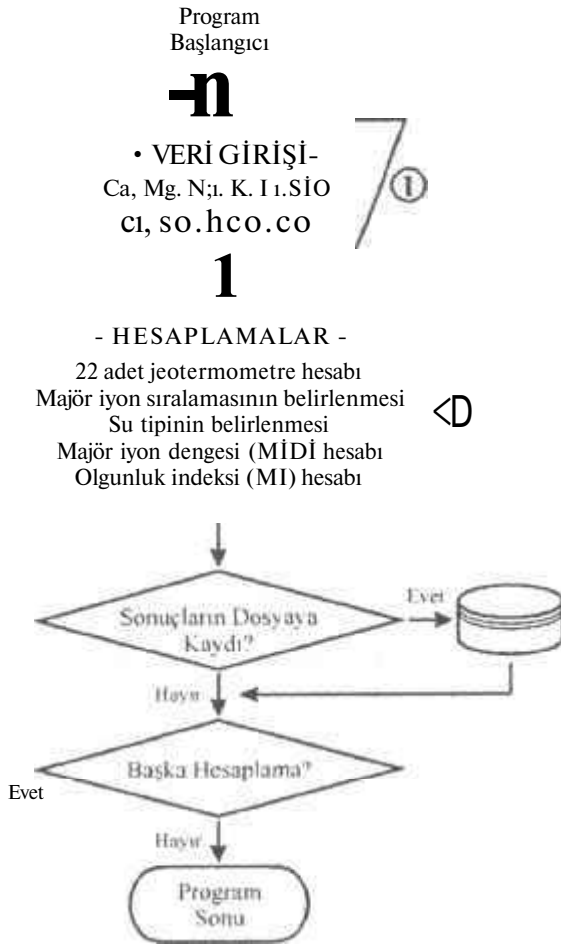
şeklinde ifade edilebilir. Termal sudaki Na ve K derişimlerinden hareketle Eş. 3'den hesaplanan denge sabitinin hangi sıcaklıkta bu değeri alabileceğinin hesabı da van't Hoff eşitliği ile yapılarak rezervuar sıcaklığını belirlemede kullanılan jeotermometre eşitlikleri türetilmektedir. Eşitlik 2'den Eş. 3'e geçişte katıların aktivitelerinin 1 kabul edildiği varsayımı ortamda saf uç elemanlar (püre end-member)'ın (albit ve K-feldispat gibi) olduğu durumda geçerlidir (Fournier, 1991). Fakat doğal sistemlerde böyle saf uç elemanları bulmak neredeyse imkansızdır. Katılar doğada genelde saf uç eleman formunda değil, iki form arasında yani katı çözeltili (solid solution) durumunda bulunurlar. Doğada katı çözeltilere örnek olarak, feldispat grubu minerallerinden olan plajiyoklazlarda değişik oranlarda Na ve Ca olması (albit ve anortit arası mineraller) verilebilir. Dolayısıyla araştırmacılar katyon jeotermometre eşitliklerini türetirken değişik feldispat grubu minerallerini (ki bu minerallerin çözünürlük denge sabitleri (K<sub>e</sub>) de birbirinden farklıdır) hesaplamalarına kattıkları için, aynı parametreyi (örn. Na-K) kullandığı halde farklı rezervuar sıcaklığını veren bir çok katyon jeotermometresi ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden, her termal suya uygulanabilecek ve doğru rezervuar sıcaklığını verecek tek bir katyon jeotermometresi yoktur. Bunun nedeni ise, yukarıda açıklandığı üzere, şüphesiz alandan alana değişecek olan rezervuar kayacın mineral bileşimidir. Hesaplanan jeotermometre sonuçlarının hangisinin o alan için gerçeğe en yakın olduğunun belirlenmesi o alandaki rezervuar kayacın mineral bileşiminin iyi bilinmesiyle mümkündür. Bu da kayacın temas halinde olan termal suyun kimyasal



bileşiminden itibaren doygunluk indisi hesaplamaları, bölgedeki kayaç mineral bileşiminin incelenmesi vb. gibi çalışmalarla gerçekleştirilebilmektedir.

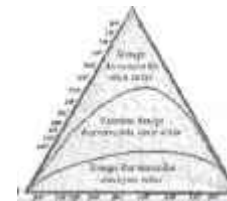
### JEOTERMOMETRE PROGRAMI

Bir çok araştırmacı tarafından türetilmiş olan jeotermometre eşitliklerini kullanarak hesaplama yapan bilgisayar programı Microsoft Visual Basic programlama dilinde hazırlanmıştır ve akış şeması Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Programın akış şeması.  
Figure 1. Flow chart of the programme

Program iki ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm hesaplamalar için gerekli veri girişini ve ikinci bölüm ise yapılan hesaplamaların sonuçlarını içermektedir. Veri girişi bölümünde (Şekil 2) kullanıcıdan termal suya ait majör anyon-kasyon ( $Cl$ ,  $SO_4$ ,  $HCO_3$ ,  $CO_3$  -  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $Na$ ,  $K$ ),  $SiO_2$  ve  $Li$  derişimlerinin  $mg/l$  veya  $meq/l$  biriminde girilmesi istenmektedir. Hesaplama sonuçlarının kullanıcıya sunulduğu ikinci bölümde ise sırasıyla; 1) termal sudaki iyonların  $meq/l$  derişimlerine göre yapılmış olan majör anyon-kasyon sıralaması ve su tipi, 2) termal su analizinin doğruluğunun bir göstergesi olan majör iyon dengesi (MID), 3) 22 adet jeotermometre eşitliğiyle hesaplanan rezervuar sıcaklıkları ve 4) termal suya  $Na-K$  jeotermometresinin uygulanıp uygulanamayacağını belirteci olan olgunluk indisi (MI: maturity index) değerleri verilmektedir (Şekil 3). Yine bu bölümde hesaplanan değerlerin (anyon-kasyon sıralaması, su tipi, MID, MI ve jeotermometre sonuçları) dosyaya kayıt bölümü ile jeotermometre eşitlikleri ve diğer hesaplamalar hakkında açıklamalar yer almaktadır.



Şekil 2. Veri giriş bölümü.  
Figure 2. Section of the data input

Şekil 3. Sonuçların gösterildiği bölüm.

Figüre 3. Section of the results'

presentation

### Programda Yapılan Hesaplamalar

Programın ana konusunu oluşturan rezervuar sıcaklıkları Çizelge 2'de verilmiş olan jeotermometre eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bunun dışında programda yapılan diğer hesaplamalara (MID, Mg düzeltmesi ve MI hesabı) ait bilgiler aşağıda kısaca sunulmuştur.

Programa veri olarak girilen su analiz sonuçlarının doğruluğunu test etmek amacıyla majör iyon dengesi (MID) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$MID = |S(Katyon - EAnyon) / Katyon + EAnyon| * 100 \quad (4)$$

Burada: katyon ve anyon derişimleri meq/l'dir. Sular elektriksel açıdan nötr olduklarından dolayı anyon ve katyon toplamları eşit olmalıdır (APHA vd., 1989). Fakat iyonların kimyasal analizlerinde yapılan hatalardan dolayı çoğu zaman bu eşitlik sağlanamaz. Su analizinin doğru sayılabilmesi için MID değerinin %5'den küçük olması istenmektedir (APHA vd., 1989). Bu nedenle jeotermometre eşitliklerinde kullanılacak olan termal suya ait iyon analiz sonuçları Eş. 4 ile kontrol edilmektedir ve MID sonucu kullanıcıya sunulmaktadır.

Çizelge 2'de verilmiş olan ve rezervuar sıcaklığı hesaplamalarında sıklıkla kullanılan 9 numaralı Na-K-Ca jeotermometre eşitliği 200 °C'nin üzerinde sıcaklığa sahip termal sularda iyi sonuç vermesine karşın, düşük sıcaklıklarda hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bu hatalı sonuçlara: kaynama sonucu  $CaCO_3$  çökelişi, yüksek  $CO_2$  basıncı, iyon takas reaksiyonlarına bu üç iyon dışında başka iyonların girmesi ve soğuk sularla karışım ile seyrelme gibi süreçler neden olmaktadır. Bu hatanın giderilmesi amacıyla Fournier ve Potter (1979) tarafından bu jeotermometre ile belirlenen rezervuar sıcaklığına bir düzeltme uygulanması önerilmiştir. Mg düzeltmesi olarak adlandırılan bu hesaplama programda aşağıdaki şekilde yapılmaktadır.

İlk olarak, programa veri olarak girilen termal sudaki Ca, Mg ve K iyonlarına ait meq/l derişimleri kullanılarak R katsayısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$R = [Mg / (K + Ca + Mg)] * 100 \quad (5)$$

Hesaplanan R ve Na-K-Ca jeotermometre eşitliği ile belirlenen sıcaklık (T) değeri Kelvin sıcaklık birimi cinsinden kullanılarak, jeotermometre sonucuna uygulanacak düzeltme değeri ( $At_{Mg}$ ) aşağıdaki eşitliklerle bulunur.

5 < R < 50 için düzeltme değeri:

$$At_{Mg} = 10.66 - 4.7415 * R + 325.87 * (\log R)^2 - 1.032 * 10^5 * (\log R)^2 / T - 1.968 * 10^7 * (\log R)^2 / T^2 + 1.605 * 10^3 * (\log R)^3 / T^2 \quad (6)$$

0.5 < R < 5 için düzeltme değeri :

$$At_{Mg} = 1.03 + 59.971 * \log R - 145.05 * (\log R)^2 - 3671.1 * (\log R)^2 / T - 1.67 * 10^7 * \log R / T^2 \quad (7)$$

Eğer Na-K-Ca jeotermometre eşitliği ile belirlenen sıcaklık 70 °C'den küçük, R değeri 50'den büyük veya 0.5'den küçük ve  $At_{Mg}$  negatif bir değer ise düzeltme

uygulanmamaktadır (Fournier ve Potter, 1979). Bu şartların sağlanıp sağlanmadığı program tarafından *test edildikten sonra hesaplanan* düzeltme değeri ( $At_{Mg}$ ) jeotermometre eşitliği ile bulunan sıcaklık değerinden çıkartılarak düzeltilmiş rezervuar sıcaklık değeri elde edilmektedir. Jeotermometre sonucuna düzeltmenin uygulanıp uygulanmadığı programın sonuçlar bölümünde (Bknz. Şekil 3, 9 nolu jeotermometre) belirtilmektedir.

Programda yapılan diğer bir hesaplama ise termal suya Na-K jeotermometrelerinin uygulanıp uygulanamayacağını gösteren olgunluk indeksi (MI) hesabıdır. Olgunluk indeksi Giggenbach (1988)'de verilen aşağıdaki eşitlik ile belirlenmektedir.

$$MI = 0.315 \cdot \log(K2/Mg) \log(K/Na) \quad (8)$$

Burada: iyon derişimleri mg/l'dir.

Olgunluk indeksi 2'den küçük ise Giggenbach (1988)'de verilen Na-K-Mg üçgen diyagrama (Şekil 2'de yer alan üçgen diyagram) göre termal su rezervuar kayaç ile kimyasal açıdan dengede değildir ve bu tip sulara Na-K jeotermometresinin uygulanması hatalı rezervuar sıcaklığı sonuçları vermektedir. Eğer MI değeri 2-2.66 arasında ise termal su rezervuar kayaç ile kısmen dengede, MI değeri 2.66'dan büyük ise termal su rezervuar kayaç ile tam dengede kabul edilmektedir. Başka bir deyişle, MI değerinin 2'den büyük olması durumunda diğer şartlarda (jeotermometre tipinin rezervuar kayaç mineral bileşimine uygunluğu vb.) göz önünde bulundurularak rezervuar sıcaklığının belirlenmesi amacıyla termal suya Na-K jeotermometresi uygulanabilmektedir. Termal suya Na-K jeotermometresinin uygulanıp uygulanamayacağına ait bilgi programda sonuçların verildiği bölümde (Bknz. Şekil 3, 4 nolu alan) kullanıcıya sunulmaktadır.

## TARTIŞMA ve SONUÇLAR

*Jeotermal alanlarda rezervuar sıcaklığının tahmini ve/veya belirlenmesi* o alanda termal suya dayalı hangi tür uygulamanın (elektrik üretimi, ısıtmacılık, balneoloji vb.) ekonomik olarak gerçekleştirilebileceğinin belirlenmesi açısından oldukça fazla önem taşımaktadır. Rezervuar sıcaklığının belirlenmesi için derin sondajların yapılması ekonomik açıdan çoğu zaman imkansızdır. Bu nedenle, çalışma kapsamında da sunulmuş olan jeotermometre eşitlikleri bu amaç için yaygın olarak kullanılmaktadır. Su örneklemesinin ve kimyasal analizinin derin sondajlara göre daha ekonomik ve kolay olması jeotermometre kullanımını yaygınlaştırmıştır. Her termal suya uygulanabilecek evrensel tek bir jeotermometre yoktur. Termal sulara uygun jeotermometrenin belirlenmesi, jeotermometre sonuçlarının güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Bölgedeki rezervuar kayacın mineral bileşiminin, kaynak ve/veya kuyudan sağlanan termal suların hidrodinamik yapısının, su-kayaç arasındaki kimyasal dengenin oluşup oluşmadığının iyi bilinmesi uygun ve doğru sonuçlar verecek jeotermometre tipinin seçiminde önemli kriterlerdir. Bu nedenlerden dolayı çalışmada sunulan bilgisayar programıyla belirlenen rezervuar sıcaklıklarının değerlendirmesinde yukarıda açıklanan kriterler göz önünde bulundurulmalıdır.

## KATKI BELİRTME

Yazar, makaleye yapıcı eleştirileri ile katkı sağlayan hakemler Prof.Dr. Şakir ŞİMŞEK ve Doç.Dr. M. Zeki ÇAMUR'a teşekkür eder.

**Çizelge 2.** Bilgisayar programında kullanılan jeotermometre eşitlikleri.  
**Table 2.** Geothermometer equations used in computerprogramme.

Jeotermometre Numarası ve Eşitliği < « KATYON JEOTERMOMETRELERİ » >	Uygulama Aralığı	Referans
Na-Kjeotermometreleri:		
1 $t^{\circ}\text{C} = 856/[0.857+\log(\text{Na}/\text{K})]-273.15$	>150C	d)
2 $t^{\circ}\text{C} = 883/[0.780+\log(\text{Na}/\text{K})]-273.15$		(2)
3 $t^{\circ}\text{C} = 933/[0.993+\log(\text{Na}/\text{K})]-273.15$	25-250C	(3)
4 $t^{\circ}\text{C} = 1319/[1.699+\log(\text{Na}/\text{K})]-273.15$	250-350C	(3)
5 $t^{\circ}\text{C} = 1217/[1.483+\log(\text{Na}/\text{K})]-273.15$	>150C	(4)
6 $t^{\circ}\text{C} = 1178/[1.471 +\log(\text{Na}/\text{K})]-273.15$		(5)
7 $t^{\circ}\text{C} = 1390/[1.750+\log(\text{Na}/\text{K})]-273.15$		(6)
• Na-Cajeotermometresi:		
8 $t^{\circ}\text{C} = 1096.7/[3.080+\log(\text{Na}/\text{Ca}^{+5})]-273.15$		(2)
• Na-K-Ca Jeotermometresi:		
9 <sup>a</sup> $t^{\circ}\text{C} = 1647/[\log(\text{Na}/\text{K})+(3[\log(\text{Ca}^{+5}/\text{Na})+2.06]+2.47)]-273.15$	0-300°C	<b>(7)</b>
• K-Mgjeotermometreleri:		
10 $t^{\circ}\text{C} = 2330/[7.350+\log(\text{K}^2/\text{Mg})]-273.15$	$\log(\text{K}^2/\text{Mg}) > 1.25$	(8)
10 $t^{\circ}\text{C} = 1077/[4.033+\log(\text{K}^2/\text{Mg})]-273.15$	$\log(\text{K}^2/\text{Mg}) < 1.25$	(8)
11 $t^{\circ}\text{C} = 4410/[14.00-\log(\text{K}^2/\text{Mg})]-273.15$		(9)
• K-Cajeotermometresi:		
12 $t^{\circ}\text{C} = 1930/[3.861+\log(\text{K}/\text{Ca}^{+5})]-273.15$		(2)
• Li-Mgjeotermometresi;		
13 $t^{\circ}\text{C} = 2200/[5.470-\log(\text{Li}/\text{Mg}^{+5})]-273.15$	0-350°C	(10)
• Li-Najeotermometreleri:		
14 $t^{\circ}\text{C} = 1590/[0.779+\log(\text{Na}/\text{Li})]-273.15$	0-350C	(10)
15 $t^{\circ}\text{C} = 1000/[0.389+\log(\text{Na}/\text{Li})]-273.15$	20-340°C, CI 0.3 molar	(11)
15 $t^{\circ}\text{C} = 1195/[0.130+\log(\text{Na}/\text{Li})]-273.15$	20-340°C, CI > 0.3 molar	(11)
< « SİLİS JEOTERMOMETRELERİ » >		
• Kuvarsjeotermometreleri:		
16 <sup>b</sup> $t^{\circ}\text{C} = C_j + C_2S + C_3S^2 + C_4S^3 + C_5\log S$	0-350°C	(12)
17 $t^{\circ}\text{C} = 1309/[5.19-\log(\text{SiO}_2)]-273.15$	0-250°C (buhar kaybı yok)	(13)
18 $t^{\circ}\text{C} = 1522/[5.75-\log(\text{SiO}_2)]-273.15$	100-250°C (en çok buhar kaybı)	(13)
• Kalsedon jeotermometreleri:		
19 $t^{\circ}\text{C} = 1032/[4.69-\log(\text{SiO}_2)]-273.15$	0-250°C (buhar kaybı yok)	(14)
20 $t^{\circ}\text{C} = 1522/[5.09-\log(\text{SiO}_2)]-273.15$	100-250°C (en çok buhar kaybı)	(14)
21 $t^{\circ}\text{C} = 1112/[4.91-\log(\text{SiO}_2)]-273.15$	25-180°C (buhar kaybı yok)	(15)
22 $t^{\circ}\text{C} = 1264/[5.31-\log(\text{SiO}_2)]-273.15$	100-180°C (en çok buhar kaybı)	(15)

**Açıklamalar:** Eşitliklerde yer alan iyon derişimleri mg/l'dir. (a)  $\log(\text{Ca}^{+5}/\text{Na})+2.06 < 0 \rightarrow /3 = 1/3$  ve  $\log(\text{Ca}^{+5}/\text{Na})+2.06 > 0 \rightarrow p = 4/3$ ; (b)  $C_1 = -4.2198 \cdot 10^1$ ,  $C_2 = 2.8831 \cdot 10^{-1}$ ,  $C_3 = -3.6686 \cdot 10^{-4}$ ,  $C_4 = 3.1665 \cdot 10^{-7}$ ,  $C_5 = 7.7034 \cdot 10^1$ , (S=SiO<sub>2</sub> derişimi); (1) Truesdell ve Fournier (1976); (2) Tonani (1980); (3) Amorsson (1983); (4) Fournier (1979); (5) Nieva ve Nieva (1987); (6) Giggenbach vd. (1983); (7) Fournier ve Truesdell (1973); (8) Fournier (1991); (9) Giggenbach (1988); (10) Kharaka ve Mariner (1988); (11) Fouillac ve Michard (1981); (12) Fournier ve Potter (1982); (13) Fournier (1973); (14) Fournier (1977); (15) Amorsson vd. (1983b).



### EXTENDED SUMMARY

Geothermal waters acquire the chemical composition by water-rock interaction during the circulation in the reservoir rock (aquifer or host rock). Thermal waters which ascend from a geothermal reservoir and emerges at the surface provides information about the subsurface conditions. Reservoir temperature of the thermal waters is calculated by using of this acquired chemical composition in geothermometer equations. Geothermometers are one of the most important methods used in the determination of reservoir temperature. They involve the analysis of surface discharge from which data underground temperatures are estimated. The fundamental assumption in the application of geothermometers is that temperature-dependent chemical equilibria between rock and water are attained at depth in the geothermal reservoir, and that re-equilibration upon cooling and boiling in upflow zones is not significant (Arnorsson, 1983; Andresdottir and Arnorsson, 1995). Geothermometers may be broadly classified into two groups: (1) those which are based on temperature-dependent variations in solubility of individual minerals (as silica geothermometers), and (2) those which are based on temperature-dependent exchange reactions, fix ratios of certain dissolved constituents (as Na-K, Na-Ca, Na-K-Ca, K-Mg, Li-Na geothermometers) (Fournier, 1991).

Estimation of thermal waters' reservoir temperature is important to designate the utilization purposes (electric production, district heating, balneological etc, Table 1) of

them. The genuine data about the chemical characteristics and reservoir temperature of thermal waters can be only obtained by means of deep wells reaching the reservoir rock. On the other hand, drilling deep wells are fairly onerous and costly for determining the reservoir temperature. For this reason, reservoir temperature of the thermal waters is calculated by using its chemical contents in geothermometer equations derived by several researchers (Fournier, 1973; Truesdell and Fournier, 1976; Fournier, 1977; Fournier, 1979; Tonani, 1980; Fouillac and Michard, 1981; Giggenbach, 1988; Kharaka and Mariner, 1988).

Some geothermometer equations use the similar chemical parameters (for example: Na-K, K-Mg, Li-Na and  $SiO_2$ ) but gives different reservoir temperature. Because these equations use different minerals hence different equilibrium constants ( $K_e$ ) for the equilibrium conditions. As a result, there is no unique geothermometer equation which can be applied to all thermal waters and provides the accurate reservoir temperature. Undoubtedly, mineral composition of the reservoir rock varies from field to field. The mineral composition of the reservoir rock must be taken into consideration while applying the geothermometers to the thermal waters. The mineral composition can be determined by mineralogical investigations and/or can be approximated using saturation indexes of thermal waters in contact with the reservoir rock.

in the scope of this study, a computer programme has been prepared by using the

Microsoft Visual Basic 6.0 programming language and aim of this programme is to determine the thermal water reservoir temperature by silica and cation geothermometer equations (Table 2). Easy and quick calculation of the geothermometer results widely used in almost all geothermal explorations, and storage of the calculated data in the computer environment have been intended by preparation of this programme. The computer programme consists of two main parts (Figure 1). First part includes the input data (concentrations of Cl,  $SO_4$ ,  $HCO_3$ ,  $CO_3$ , Ca, Mg, Na, K, SiO<sub>2</sub> and Li) and the second part comprises the results of calculations which are major anion-cation order (which denotes the water type), electro-neutrality (which indicates the accuracy of the water analyses), reservoir temperature and maturity index (which indicates whether the application of the Na-K geothermometers are suitable or not).

Appropriateness of the reservoir rock mineral composition to the based mineral used in geothermometer equations, the chemical equilibrium between water and rock, cold water mixing, chemical changes in the thermal water when it was ascending, etc. must always be taken into consideration during the geothermometer applications, in terms of evaluations and reliability.

#### **DEĞİNİLEN BELGELER**

Andresdottir, A. and Arnorsson, S., 1995. Studies of the chemical evolution of natural waters in The Hrepper-Land geothermal field, Iceland: an aid to geothermometry interpretation.

Proceedings of the World Geothermal Congress, 18-31 May 1995, International Geothermal Association (IGA), Vol. 2, Florence, Italy, 1001-1006.

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, 1133 pp.

AqQA, 2003. Quality assurance and presentation graphics for water analyses. RockWare Inc., 2221 East Street, Golden CO, 80401, USA, Web page: [www.rockware.com](http://www.rockware.com).

Arnorsson, S., Sigurdsson, S. and Svavarsson, H., 1982. The chemistry of geothermal waters in Iceland, I. calculation of aqueous speciation from 0° to 370 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 1513-1532.

Arnorsson, S., 1983. Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems, implications for chemical geothermal investigations. *Geothermics*, 12, 119-128.

Arnorsson, S., Gunnlaugsson, E. and Svavarsson, H., 1983a. The chemistry of geothermal waters in Iceland, II. mineral equilibria and independent variables controlling water composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 547-566.

Arnorsson, S., Gunnlaugsson, E. and Svavarsson, H., 1983b. The chemistry of geothermal waters in Iceland, III. chemical geothermometry in geothermal

- investigations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47,567-577.
- BOWeil*, R., 1989. *Geothermal Resources*. Elsevier Science Published Ltd., New York, 486 pp.
- Erkan, Y., 1978. Kayac Oluşturan Önemli Minerallerin Mikroskopta incelenmeleri. Cihan Matbaası, Hacettepe Üniversitesi Yayınları A26, 497 s.
- Fouillac, C. and Michard, G., 1981. Sodium/lithium ratios in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10,55-70.
- Fournier, R.O., 1973. Silica in thermal waters: laboratory and field investigations. In: *Proceedings of International Symposium on Hydrogeochemistry and Biochemistry*, J.W. Clark Co. (Publisher), Vol. 1, Tokyo, 122-139.
- Fournier, R.O., 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5,41-50.
- Fournier, R.O., 1979. A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geothermal Resources Council Transactions*, 3, 221-224.
- Fournier, R.O., 1991. Water geothermometers applied to geothermal energy. In: *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, Rome, F.D'amore (Co-ordinator), UNITAR/UNDP Publications, 37-69.
- Fournier, R.O. and Potter, R.W., 1979. Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43,1543-1550.
- Fournier, R.O. and Potter, R.W., 1982. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geoth.Res.Council Bull.*, 11-10,3-12.
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometers for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37,1255-1275.
- Giggenbach, W.F., 1980. Geothermal gas equilibria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44,2021-2032.
- Giggenbach, W.F., 1981. Geothermal mineral equilibria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45,393-410.
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria, derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52,2749-2765.
- Giggenbach, W.F., Gonfiantini, R., Jangi, B.L. and Truesdell, A.H., 1983. Isotopic and chemical composition of Parbatia Valley geothermal discharges, NW Himalaya, India. *Geothermics*, 12,199-222.
- Kharaka, Y.K. and Mariner, R.H., 1988. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In: *Thermal History of Sedimentary Basins*, N.D.Naesser and T.H.McCollon (ed.), Springer-Verlag, New York,99-117.
- Lindal, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In *Geothermal Energy*, (ed. H.C.H. Amsterdam), Earth Science, Vol. 12, UNESCO, Paris, 135-148 pp.
- Nieva, D. and Nieva, R., 1987. Developments in geothermal energy in Mexico-Part Twelve, A cationic composition geothermometer for prospection of geothermal resources. *Heat Recovery*

Systems & CHP, 7(3), 243-258.

Tonani, F., 1980. Some remarks on the application of geochemical techniques in geothermal exploration. in: Proceedings. Adv. Eur. Geoth. Res., Second Symp., Strasbourg, 428-443.

Truesdell, A.H. and Fournier, R.O., 1976. Calculations of deep temperatures in geothermal systems from the chemistry of boiling spring waters of mixed origin, in: Proceedings of 2nd United Nations Symposium on The Development and Use of Geothermal Resources, U.S. Government Printing Office, Vol. 1, Washington, 837-844.