

Bor Minerallerinin Duraylı İzotop Jeokimyası: Bigadiç (Balıkesir) Borat Yatağından Bir Örnek

Stable Isotope Geochemistry of Boron Minerals: An Example From Bigadiç (Balıkesir) Borate Deposits

YEŞİM YÜCEL ÖZTÜRK^{1*}, SELİN AY², CAHİT HELVACI¹

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Buca-İZMİR

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Buca-İZMİR

Geliş (received) : 31 Ocak (January) 2014

Kabul (accepted) : 03 Mart (March) 2014

ÖZ

Batı Anadolu'da bulunan Bigadiç borat yatakları Neojen yaşlı playa göl tortullarından yapıldığı KD-GB uzanımlı bir havza içinde iki farklı zonda yer almaktadır. Bu yataklardan alınan bor minerallerinin jeokimyasal ve duraylı izotop analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bigadiç Borat yatağından alınan kolemanit örneklerinin oksijen ve hidrojen izotop analizleri ve bu minerallerle birarada bulunan kalsit, klorit, montmorillonit gibi minerallere ait sabitler kullanılarak, bor minerallerini oluşturan akışkanın oksijen ve hidrojen izotop değerleri hesaplanmıştır. Bigadiç borat yatağından alınan kolemanit örneklerinin oksijen ve hidrojen izotop değerleri sırasıyla, 26.9 - 39.9‰ ile -50 - -81‰ aralıklarında ölçülmüştür. Bor yataklarının oluşum sıcaklıkları göz önüne alınarak 60, 40 ve 25 °C tahmini sıcaklıklarda bor mineralleri ile dengedeki akışkanın oksijen ve hidrojen izotop bileşimi hesaplanmıştır. Akışkanın hesaplanan oksijen ve hidrojen izotop değerleri 60°C tahmini oluşum sıcaklığında sırasıyla 6.78 - 22.51‰ ile -6.66 - -23.66‰, 40 °C tahmini oluşum sıcaklığında sırasıyla 8.72 - 30.9‰ ile -13.27 - 3.73‰ ve 25°C tahmini oluşum sıcaklığında sırasıyla 0.3 - 13.3‰ ile -19 - 12‰ değer aralıklarında bulunmuştur. Bor mineralleri ve bunlardan hesaplanan dengedeki akışkanın oksijen ve hidrojen izotop değerleri, doğal oksijen ve hidrojen izotop rezervuarları ve Türkiye'de bulunan önemli evaporit yataklarında gözlenen jips ve anhidrit minerallerine ait oksijen izotop değerleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre elde edilen oksijen ve hidrojen izotop değerleri sırasıyla andezit, riyolit ve gölsel evaporitlerin oksijen izotop değerleri ile meteorik su katkılı olduğu düşünülen formasyon sularına ait değerlere yakın olduğu saptanmıştır. Aynı zamanda Bigadiç bor minerallerine ait oksijen izotop değerleri Türkiye'de bulunan önemli evaporit yataklarında gözlenen jips ve anhidrit minerallerine ait oksijen izotop değerleri ile büyük benzerlik sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bigadiç borat yatakları, bor minerali, oksijen-hidrojen duraylı izotop jeokimyası

ABSTRACT

Bigadiç borate deposits are located in two different zones within NE-SW-trending basin which is made of Neogene playa lake sediments. Geochemical and stable isotope analyses of samples collected from the Bigadiç (Balıkesir) borate deposits were carried out.

Using the constants of minerals, such as calcite, chlorite and montmorillonite, in equilibrium with colemanite minerals, the oxygen and hydrogen isotope values of the fluid which formed the borate minerals were calculated from the measured colemanite samples collected from the Bigadiç deposit. The oxygen and hydrogen isotope values for the colemanite minerals obtained from the Bigadiç borate deposit are of 26.9 - 39.9‰ and -50 - -81‰, respectively.

Considering the formation temperatures of borate deposits, the oxygen and hydrogen isotope compositions of the fluid in equilibrium with the borate minerals were calculated by using the estimated temperatures of 60, 40 and 25°C. Calculated oxygen isotope values of the fluid at the estimated temperatures of 60, 40 and 25°C range from 6.78 to 22.51‰, 8.72 to 30.9‰ and 0.3 to 13.3‰, respectively. Calculated hydrogen isotope values of the fluid at the estimated temperatures of 60, 40 and 25°C range from -6.66 to -23.66‰, -13.27 to 3.73‰ and -19 to 12‰, respectively. The boron minerals and the calculated oxygen and hydrogen isotope values of the fluid in equilibrium with these minerals were compared with the natural oxygen and hydrogen isotopes reservoirs and the oxygen isotope values of the minerals, such as gypsum and anhydrite, obtained from the important evaporite deposits in Turkey. It is determined that the oxygen and hydrogen isotope values of the fluid which forms boron minerals are close to the oxygen isotope values of those andesite-rhyolite and lacustrine evaporites, and hydrogen isotope values of formation waters, which are thought to be mixed of meteoric water, respectively.

The oxygen isotope values for the Bigadiç borate minerals show great similarity with those of the minerals, such as gypsum and anhydrite, obtained from the important evaporite deposits in Turkey.

Keywords: *Bigadiç borate deposits, boron mineral, oxygen-hydrogen stable isotope geochemistry*

GİRİŞ

Çalışma alanı Balıkesir'in güneydoğusunda Balıkesir-İzmir karayolu üzerinde Bigadiç ilçesinin kuzeydoğusunda yer almaktadır (Şekil 1). Batı Anadolu'da yaklaşık 50-90 km genişliğinde bir zon boyunca yüzlek veren Bigadiç bor havzası, Menderes Masifi, Sakarya Zonu, Likya napları ve Bornova Filiş Zonu'ndan oluşan temel üzerinde geç Oligosen'den itibaren gelişen deformasyon sonucu oluşan KD-doğrultulu oluşmuş havzalardan biridir. Bigadiç (Balıkesir) borat yataklarına yönelik çalışmalar çoğunlukla yatağın jeolojisi (Alaca vd., 1987; Helvacı vd., 1987; Helvacı ve Alaca, 1991; Helvacı, 2001) ve mineralojisi (Gündoğdu, 1982; Helvacı, 1983; Helvacı ve Dora, 1985; Helvacı, 1995; Helvacı ve Alonso, 2000) üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Duraylı izotoplar, jeolojik olarak önemli olan akışkanların ana bileşenidir, bu nedenle akışkanlar ve akışkan-kayaç etkileşiminin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir. Çalışmanın ana konusunu oluşturan duraylı izotop (O, H, B, Li, S vs.) jeokimyası bir maden yatağının oluşum koşulları hakkında bilgilerin elde edilmesinde kullanılan en önemli araçlardan biridir ve yatak oluşması sırasında rol oynayan çözeltilerin kaynağı hakkında önemli ipuçları vermektedir. Duraylı izotoplar aynı zamanda paleotermometre olarak ve jeolojik süreçlerdeki reaksiyon mekanizmalarında ve difüzyon çalışmalarında da kullanılmaktadır.

Duraylı izotopların borat yatakları üzerinde kullanımına ilişkin en önemli çalışmalardan biri Palmer ve Helvacı (1997) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, borat mineralinden (boraks, kolemanit ve üleksit) B ve Sr izotop analizlerini yapmışlardır. Buna göre $\delta^{11}\text{B}$ değerleri genel olarak -1.6 ‰ ve -25.3‰ arasında değişmektedir. Araştırmacılar ana bor minerallerinin $\delta^{11}\text{B}$ değerlerinin büyük ölçüde mineralojilerine ve çökelimde rol oynayan akışkan bileşimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Farklı yataklardan alınan kolemanitlerin Sr ve B izotop değerlerinin birbirleriyle negatif korelasyon sunması B ve Sr kaynağında farklılıklar olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte araştırmacılar belirlenen izotop verilerinin, boratların çökeliminden sonra bor mineralleri ile tuzlu su arasındaki bor izotop dengesinin sağlanmadığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca Rayleigh fraksiyonlaşma modeline göre boraks çökelimi boyunca tuzlu suyun $\delta^{11}\text{B}$ değerlerinin kolemanit ve üleksit çökeliminden biraz daha ağır olduğuna işaret edilmiştir (Palmer ve Helvacı 1997). Bunun yanında Palmer vd. (2004) Türkiye'deki Senozoyik yaşlı evaporit yataklarında gözlenen sülfat (jips, sölestin, tenardit ve anhidrit) ve sülfat minerallerinin sülfür, sülfat, oksijen ve stronsiyum izotop bileşimlerini incelemişlerdir. Araştırmacılar bu verileri, bu minerallerin çökelen tuz çözeltisi içinde çözülmüş sülfatın kökenini belirlemek için kullanılmıştır. Bu çalışma ile aynı zamanda Türkiye'deki evaporit yatakların denizel ve denizel olmayan şeklinde sınıflandırılabilmesi de sağlanabilmektedir.



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

Bu çalışma ile Batı Anadolu'da Tersiyer süresince volkanik aktivitelerin devam ettiği dönemlerde, Neojen volkanosedimanter birimler içerisinde yer alan Bigadiç (Balıkesir) borat yatağının oluşum koşulları ve kökenine ilişkin önemli verilerin sağlanması amaçlanmıştır. Bigadiç borat yatağına ait ayrıntılı mineralojik ve jeokimyasal veriler bulunmasına karşın özellikle oksijen ve hidrojen duraylı izotop verisi bulunmamaktadır. Bu çalışma bu anlamda Bigadiç borat yatağının oluşum koşulları ve kökeni üzerine oksijen ve hidrojen izotop verileri ile sınırlamalar getiren ilk çalışmadır. Bigadiç (Balıkesir)

borat yataklarından alınan kolemanit örneklerinde duraylı izotop analizleri gerçekleştirilmiştir. Alınan kolemanit örneklerinin oksijen ve hidrojen izotop analizleri ve kolemanit minerali ile birlikte bulunan kalsit, klorit, montmorillonit gibi minerallere ait sabitler kullanılarak, bor minerallerini oluşturan akışkanın oksijen ve hidrojen izotop değerlerinin hesaplanmış ve Bigadiç borat yataklarının oluşum ortamı ve kökenine ilişkin önemli veriler elde edilmiştir.

BİGADIÇ BORAT YATAKLARININ JEOLJİSİ

Batı Anadolu geç Oligosen'den itibaren; Menderes Masifi, Sakarya Zonu, Likya napları ve Bornova Fliş Zonu'ndan oluşan temel üzerinde KD doğrultulu havzaların oluşumuna neden olan bir deformasyona uğramıştır (Yılmaz vd., 2000). KD doğrultulu havzaların oluşumu sırasında volkanik aktivite yaygın olarak gelişmiş ve daha önceden gelişen fay zonları boyunca sığ yerleşimli sokulumları ve ilişkili volkanik kayalar üretmiştir. KD-doğrultulu havzalardan biri olan Bigadiç bor havzası, 50-90 km genişliğinde bir zon boyunca yüzlek verir ve Üst Maastrichtiyen-Paleosen yaşlı, türbiditik matriks içinde, Mesozoyik kireçtaşı, spilitik volkanitler, çört, serpantinleşmiş peridotit blokları ve mikritik kireçtaşları merceklerinden oluşan Bornova Fliş Zonu üzerinde yer alır (Erdoğan, 1990; Okay ve Siyako, 1993).

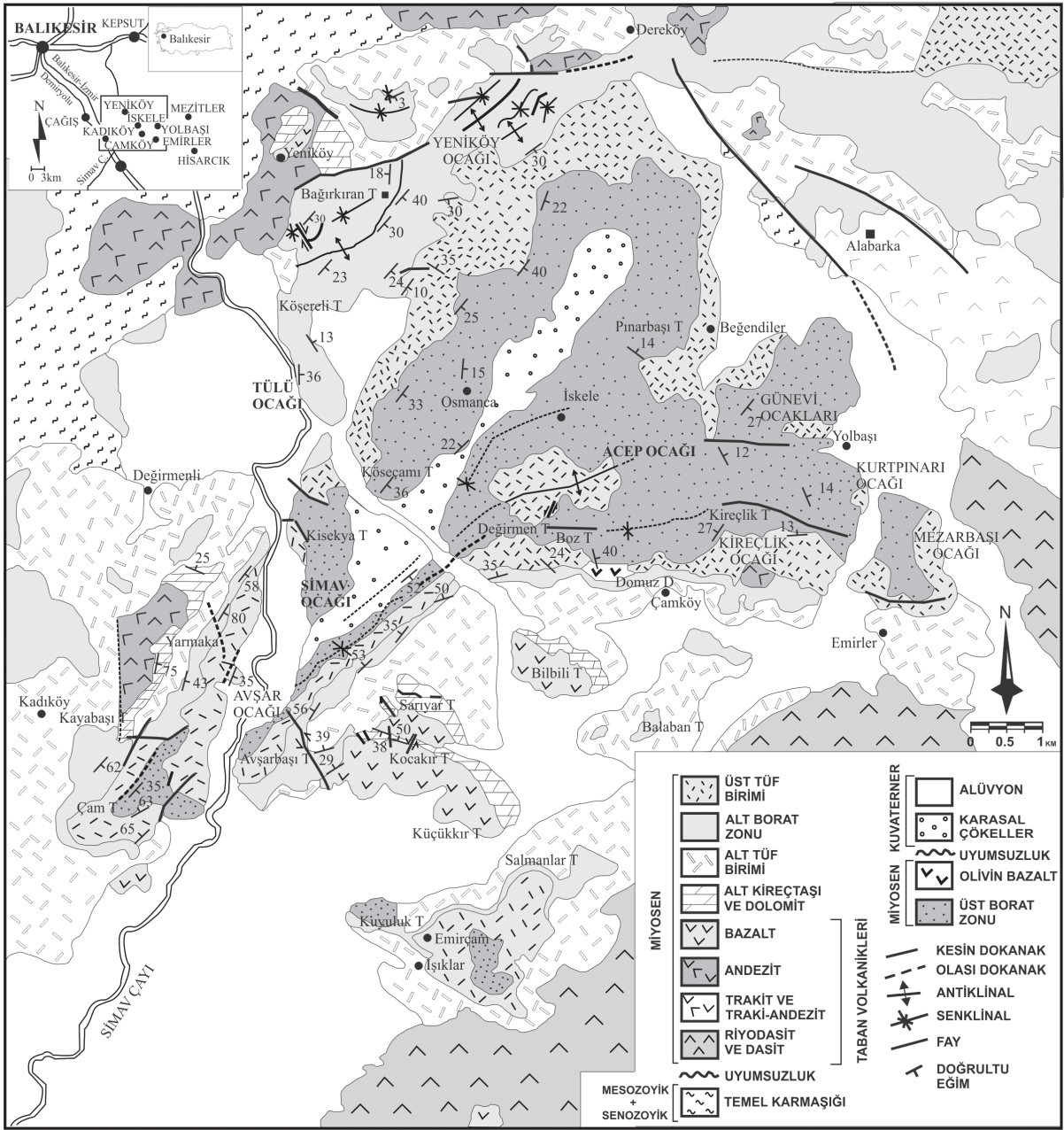
Bigadiç çevresinde, temel kayalar üzerindeki erken Miyosen yaşlı istifler, gölssel, flüvyal ve evaporitik tortullar ile bunları kesen KD doğrultulu volkanik çıkış merkezlerinden üretilen lav ve volkaniklastik kayalar ile temsil edilmektedir. Çalışma alanındaki Miyosen birimleri: Kocaiskan volkanik birimi, Bigadiç volkano-sedimenter serisi, Gölcük bazaltı, Sındırgı, Kayırlar ve Şahinkaya volkanik birimleri olmak üzere altı birim altında incelenmiştir (Ercan vd., 1984; Helvacı, 1995; Erkül vd., 2005a, 2005b) (Şekil 2 ve 3).

Kocaiskan volkanik birimi bölgedeki en yaşlı volkanizma olup, Sındırgı volkanik birimi, Bigadiç volkano-sedimenter serisi, Kayırlar ve Şahinkaya volkanik birimleri tarafından uyumsuzlukla üzerlenir. Sındırgı ve Kayırlar volkanik birimleri ile Bigadiç volkano-sedimenter serisi birbirleriyle yanıl ve düşey geçişlidir.

Bigadiç bor sahasındaki gölssel ve evaporitik çökelim öncesinde, sırasında ve sonrasında farklı karakterdeki volkanizma etkin olmuştur. Bunun en belirgin verilerinden biri, Bigadiç volkano-sedimenter serisine ait flüvyal/gölssel tortullar içerisinde tortullaşma ile eş yaşlı olarak yerleşmiş Sındırgı volkanik birimi, Gölcük bazaltı ve Kayırlar volkanik birimidir. Şahinkaya volkanik birimi ise, Bigadiç volkano-sedimenter serisini uyumlu olarak üstlemektedir. Bölgedeki tüm erken Miyosen yaşlı volkano-sedimenter istifi

uyumsuz olarak üstleyen diğer birimler, geç Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal çökeller ve alüvyondur (Ercan vd., 1984; Helvacı, 1995; Erkül vd., 2005a, 2005b).

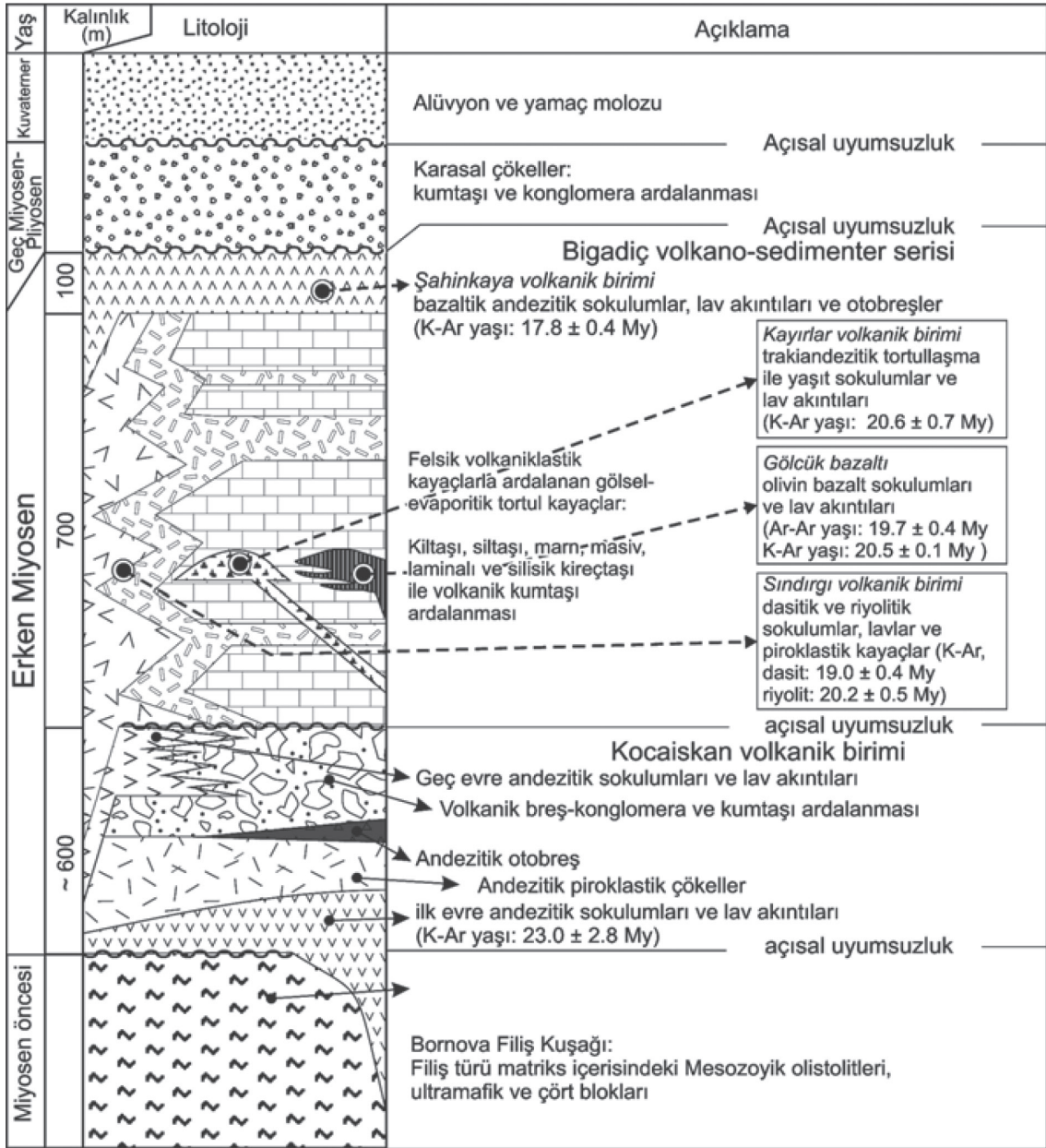
Erkül vd. (2005a) Bigadiç, Soma, Sındırgı çevresinde yüzlek veren bor çökelleriyle ilişkili volkanik kayaların stratigrafisini incelenmiş, çalışma alanında birbirinden uyumsuzlukla ayrılan üç farklı volkanik istif belirlemiştir. Bunlar yaşlıdan gence doğru; andezitik-bazaltik seri, dazitik volkanosedimenter seri ve riyoitik seriden oluşmaktadır. Dazit bileşimli volkanitler KD doğrultulu kırık hatları boyunca sırtlar oluşturacak şekilde yerleşmiştir. Bu zonlar borlu hidrotermal akışkanların havzaya getirilmesinde etkin olmuştur. Volkanik sırtların varlığı çok sayıda ve KD doğrultulu bor çanaklarının gelişmesini sağlamıştır. Erkül vd. (2005b) Bigadiç'te Miyosen yaşlı bor içeren volkanosedimenter evaporitik gölssel tortulların temelini oluşturan andezitik-bazaltik bileşimli volkanitleri sınıflandırmış, bor mineralleri içeren gölssel volkanosedimenter istifi litolojik ve stratigrafik olarak birbirinden ayrılan iki piroklastik seviye ile ardalandığını, ayrıca gölssel tortullar içerisinde ara düzeyler şeklinde volkanojenik epiklastik tortulların yer aldığını ileri sürmüşlerdir. Helvacı vd. (2004), Batı Anadolu Neojen havzalarında lityum ve dağılımını araştırmak amacıyla Beypazarı trona yatağı, Soma linyit yatağı ve Türkiye borat havzalarından alınan kil örnekleri ile Acıgöl, Salda, Yarışçı, Burdur, Eğirdir, Tersakan, Bolluk, Karapınar (Acıgöl) ve Tuzgölü'nden alınan su örneklerini incelemiştir. Analiz sonuçlarına göre, borat yataklarından alınan kilerdeki lityum değerlerinin %0.58-0.17 arasında, göl suyundaki lityum değerlerinin ise 0.30 - 325 mg/l arasında değiştiğini saptamışlardır. Erkül vd. (2005a) Bigadiç bor havzasındaki volkanizmanın 23 My önce başlayıp 17,8 My'a kadar süren iki evreli bir faaliyet olduğunu ifade etmişlerdir. Bu evrelerin ürünleri Kocaiskan volkanitleri ve Bigadiç volkano-sedimenter serisi olarak belirtilmiştir. Bigadiç volkanitlerinin İzmir-Balıkesir transfer kuşağının bir parçası KD doğrultulu kırıklar boyunca oluştuğunu ve bu kuşağın Geç Kretase'den günümüze kadar aktif olduğunu belirtmişlerdir. Erkül vd. (2005b) Batı Anadolu'nun Miyosen'den beri K-G açılma rejiminin etkisinde olduğunu, Kocaiskan volkanitlerinin 23 My yaşında, Bigadiç volkano-



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası (Helvacı, 1995)
Figure 2. Geological map of the study area (Helvacı, 1995)

sedimanter serisinin ise 20,6-17,8 My arasında yaşa sahip olduğunu K/Ar ile belirlemişlerdir. Kocaiskan volkanitlerinin, karasal sokulumlar, domlar, lav akıntıları ve piroklastiklerden oluştuğunu, ikinci evre volkanizmanın da gösel- evaporitik çökelime eşlik eden bazalttan riyolite kadar değişen bileşimdeki lav akıntıları ve piroklastik çökellerden oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Erkül vd. (2010), Bigadiç ve çevresindeki Erken Miyosen volkanizması, iki evre ile temsil edildiği ifade etmektedir. Bu volkanizmanın ürünleri birbirlerinden açılmal uyumsuzlukla ayrıldığını ve Kocaiskan volkanik birimi üzerine uyumsuzlukla gelen Sındırgı, Kayırlar ve Şahinkaya volkanik birimleri ile Gölcük bazaltı ikinci evrenin volkanik ürünlerini oluşturduğunu söylemektedir. Eş



Şekil 3. Çalışma alanının genelleştirilmiş kolon kesiti (Erkül vd. 2005)

Figure 3. Generalized stratigraphic columnar section of the study area (Erkül et al. 2005)

yaşlı riolitik/dasitik magmadan oluşan Sındırgı volkanik birimi ile olivin bazalttan oluşan Gölcük bazaltının homojen/heterojen karışımının Kayırlar ve Şahinkaya volkanik birimlerini oluşturduğu bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

Gemici vd. (2008) Bigadiç yatağı bölgesi yer altı sularını incelemişler, yer altı suyu kirlenmelerinde yatağın etkili olduğu ve su kalitesini doğrudan etkilediğini belirtmişlerdir

Bigadiç borat yatağında, kolemanit ve üleksit ekonomik olarak üretilen bor mineralleridir. Kolemanitler nodüler, masif, levhamsı, bantlı, lifsi ve az miktarda özbiçimli kristaller halindedir. (Helvacı ve Dora, 1985; Helvacı, 1995; Helvacı ve Orti, 1998)). Havzada gang mineralleri olarak jips, anhidrit, kalsit, aragonit ve kil bulunmaktadır. Jips, özellikle alt borat derin sondajlarında cevherler arasında bantlar halinde veya cevherlerle içiçe gelişmiştir. Anhidrit alt

boratlı birim içinde kolemanit ile birlikte bulunur. Kil ise cevher damarları arasında bantlar halinde, kireçtaşı ile laminalı ardalanmalar şeklinde bulunur. Ayrıca kolemanit ve üleksit karışık bir yapıda da bulunabilir.

ANALİTİK YÖNTEMLER

Bigadiç borat yataklarından derlenen 9 adet kolemanit cevherinin ana ve iz element analizleri ACME Analitik Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir. Bunların yanı sıra yataktan alınan 6 adet kolemanit örneğinin oksijen ve hidrojen izotop analizleri ActLabs (Ontario)'da gerçekleştirilmiştir. İzotop analizleri için uygulanan yöntemler aşağıda ayrıntılı şekilde verilmiştir

Oksijen izotop analizleri için kolemanit örnekleri, Clayton ve Mayeda (1963)'da tanımlanan prosedürler takip edilerek, nikel bombaları ile 650°C'de BrF₅ ile reaksiyona sokulmaktadır. Florlama reaksiyonu minerallerde bulunan oksijeni O₂ gazına dönüştürmekte, daha sonra sıcak bir C çubuk kullanılarak CO₂ gazına dönüştürmektedir. Reaksiyonun bütün adımları nicel olarak gerçekleştirilmektedir. İzotop analizleri, Finnigan MAT Delta marka izotop oranı kütle spektrometresi ile yapılmıştır. Elde edilen değerler V-SMOW (Vienna-standart Ortalama Okyanus Suyu) olarak permil cinsinden kaydedilmiştir. NBS 28 için laboratuvarın kullandığı değer 9.61±0.10‰ (1s)'dir.

Hidrojen izotop analizleri için, Molibden folyo ile sarılmış ve daha sonra, bir kuvars ekstraksiyon kabı içinde bekletilen 1.0-0.02 g ağırlığındaki örnekler bir platin kap içine yerleştirilir. Kap ve içerisinde bulunan örnek, yüzey ve absorbe suyunu kaybetmesi için 4 saat boyunca 120°C sıcaklıkta vakumlanır. Örnek, daha sonra 20 dakika boyunca 1400°C'de ısıtılır ve -196°C sıcaklıkta kapanılarak tutulur. Hemen hemen tüm hidrojen, su olarak serbest kalır, ancak bu uygulama sırasında ortaya çıkan veya serbest kalan az miktarda hidrokarbon veya moleküler hidrojen, kapan içinde aynı zamanda toplanan H₂O ve CO₂'i oluşturmak için 550°C'de tüm CuO'ü okside etmektedir. Örneklerdeki toplam hidrojen miktarını temsil eden su, dondurma teknikleri ile diğer gazlardan ayrılır. Kömür üzerinde toplanan su, 196°C'de H₂ üretmek için 900°C'de uranyum ile reaksiyona sokulur. H₂ miktarı manometrik olarak ölçülür. Su içeriği analizi ±0,2 ağırlık yüzdesi kadar tekrarlanabilir.

ANA VE İZ ELEMENT JEOKİMYASI

Batı Anadolu borat yataklarının jeolojisi ve mineralojisi ile ilgili detaylı çalışmalar (Meixner, 1952; Meixner, 1953; Helke, 1955; Meixner, 1956; Özpeker, 1969; Özpeker ve İnan 1978; Helvacı, 1983; Helvacı, 1995; Helvacı ve Alaca, 1991; Helvacı ve Alonso, 2000; Helvacı ve Dora, 1985; Helvacı ve Orti, 1998; Erkül vd. 2005a, 2005b) bulunmasına karşılık boratların jeokimyasal özelliklerini açıklayan kapsamlı araştırmalar halen daha devam etmektedir. Bugüne kadar yapılan jeokimyasal çalışmalar cevherleşmeyle ilişkili volkaniklerle sınırlı olduğu görülmektedir (Özpeker, 1969; Helvacı vd., 1993; Helvacı ve Alonso, 2000).

Bigadiç yatağından alınan 9 adet kolemanit ve üleksit cevherine ait ana ve iz element analiz sonuçları analiz sonuçları Tablo 1 ve 2'de verilmektedir. Bigadiç borat yatağından alınan 9 adet kolemanit ve üleksit cevherinin SiO₂ içeriğine göre diğer ana element oksit değerleri arasındaki değişimler Şekil 4'te verilmiştir. Bilindiği üzere killeri temsil eden Si, Al, Mg, K gibi elementler ile Ca ve Na gibi elementlerin ilişkisi borat yataklarının oluşum koşulları ve ortamları hakkında önemli veriler sunmaktadır. Buna göre, örneklerin bu element oksitleri arasında belirgin korelasyonu gözlenmezken, sadece SiO₂ - MgO içerikleri arasında oldukça belirgin pozitif ve SiO₂ - CaO arasında da hafif bir negatif korelasyon olduğu saptanmıştır. MgO ve SiO₂ arasındaki pozitif korelasyon, Mg ve Si'un kil fraksiyonundan gelmesine bağlı olarak (örn. Smektit), borat cevherinin birarada bulunduğu killere eş yaşlı olduğunu desteklemektedir.

Borat oluşum ortamında, özellikle Ca, Na ve Mg gibi katyonlar önemlidir. Bowser (1964) Na₂O/CaO oranının mineral oluşumundaki önemini ortaya koymuştur. Buna göre kırka boratları üzerinde çalışan bazı araştırmacılar (Baysal ve Ataman, 1975; İnan, 1975; Sunder 1980), Na₂O/CaO oranlarının %5'in altında kalanlarını Ca-boratlar, %5-95'in arasında olanları Na-Ca boratlar ve %95'in üzerindeki ise Na-boratlar olarak ayırt etmişlerdir (Helvacı ve Orti, 2004).

Bigadiç Boratları Na/Ca oranlarına göre değerlendirildiğinde oran %5'in çok altında sifıra yakın bir değerdedir ve bu Ca-boratlara karşılık gelmektedir.

Tablo 1. Bigadiç borat yataklarından alınan kolemanit ve üleksit cevherlerinin ana element bileşimleri.
 Table 1. Major element compositions of colemanite and ulexite ores from the Bigadiç (Balıkesir) borate deposits.

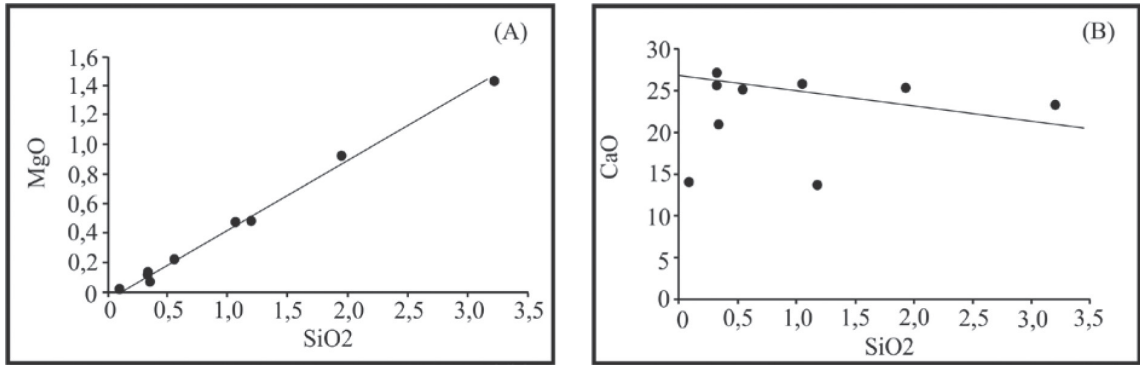
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Ni (ppm)	Sc (ppm)	LOI (%)	Sum (%)
B-2	1,18	0,04	<0,04	0,48	13,75	7,25	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	0,004	<20	<1	43,1	65,82
B-3	0,54	<0,01	<0,04	0,22	25,13	0,17	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,002	<20	<1	23,6	49,66
B-4	0,08	<0,01	<0,04	0,02	14,02	7,44	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,002	<20	<1	35,4	56,85
B-5	3,21	<0,01	<0,04	1,43	23,28	0,24	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,008	28	<1	22,7	50,95
B-6	0,32	<0,01	<0,04	0,13	25,67	0,04	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,002	<20	<1	22,3	48,45
B-7	0,34	<0,01	<0,04	0,07	20,99	<0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,003	<20	<1	41,3	62,73
B-8	1,05	0,01	<0,04	0,47	25,77	<0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,002	<20	<1	22,9	50,22
B-9	1,93	0,04	<0,04	0,92	25,27	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,002	<20	<1	22,6	50,69
B-10	0,32	<0,01	<0,04	0,11	27,13	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,002	<20	<1	22,6	50,15
(1) Kabuk ort.	28,2	8,1		2,3	4,1	2,4									
(2) Andezit ort.	26	8,5		2,18	4,65										
(3) Tatlısu ort. (*10-4)	5,33	<0,03		0,8-15,07	1,8-49,29	1,15-36,78									

(1) Krauskopf (1989), (2) Schroll (1975), (3) Abollino vd. (2004)

Tablo 2. Bigadiç borat yataklarından alınan kolemanit ve üleksit cevherlerinin iz element bileşimleri.
 Table 2. Trace element compositions of colemanite and ulexite ores from the Bigadiç (Balıkesir) borate deposits.

	Ba	Be	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	W	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
B-2	2,0	1,0	<0,2	0,7	0,9	<0,1	0,4	0,8	<1	2189	<0,1	<0,2	<0,1	<8	<0,5	0,4	0,5	0,4	0,7	0,1	0,3	0,1	0,0
B-3	66,0	1,0	<0,2	<0,1	0,6	<0,1	<0,1	0,5	<1	8856	<0,1	<0,2	<0,1	<8	<0,5	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	<0,3	0,1	0,0
B-4	<1,0	<1,0	<0,2	<0,1	0,6	<0,1	<0,1	0,3	<1	2002	<0,1	<0,2	<0,1	<8	<0,5	<0,1	0,8	1,5	2,7	0,3	0,8	0,2	0,0
B-5	20,0	1,0	1,5	0,6	0,8	<0,1	0,3	0,5	<1	6787	<0,1	0,2	0,2	203	0,8	1,1	10,2	3,3	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1
B-6	84,0	<1,0	<0,2	<0,1	<0,5	<0,1	0,1	0,3	<1	18711	<0,1	<0,2	<0,1	<8	<0,5	<0,1	21	0,2	0,0	<0,3	<0,1	0,0	0,0
B-7	13,0	<1,0	<0,2	<0,1	0,6	<0,1	0,1	0,2	<1	854,4	<0,1	<0,2	<0,1	<8	<0,5	2	0,3	<0,1	0,0	<0,3	0,1	0,0	0,0
B-8	6,0	<1,0	<0,2	0,2	<0,5	<0,1	0,9	0,3	<1	5458	0,2	<0,2	<0,1	<8	<0,5	1,3	0,1	0,2	0,0	<0,3	<0,1	0,0	0,0
B-9	22,0	1,0	<0,2	0,8	0,5	<0,1	<0,1	0,5	<1	4933	<0,1	<0,2	0,1	<8	<0,5	0,4	0,2	0,3	0,1	<0,3	<0,1	0,0	0,0
B-10	10,0	4,0	<0,2	0,2	<0,5	<0,1	1,2	0,1	<1	4740	<0,1	<0,2	<0,1	<8	<0,5	<0,1	0,2	<0,1	0,0	<0,3	<0,1	0,0	0,0

	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	Ti	Se	
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
B-2	0,1	<0,01	0,2	<0,02	<0,03	<0,01	0,1	<0,01	0,5	1	0,3	4	0,6	5,9	<0,1	0,4	<0,1	<0,1	1,2	0,02	<0,1	6,8	
B-3	0,1	<0,01	0,1	<0,02	0,1	<0,01	<0,05	<0,01	0,8	0,4	0,4	3	<0,1	1,7	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	2,9	0,05	<0,1	36,6	
B-4	0,1	0	0,2	<0,02	0,1	0	0,1	<0,01	<0,1	0,8	0,2	1	0,3	0,5	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	2,3	0,05	<0,1	10,3	
B-5	0,2	0	0,2	0,1	0,1	0	0,1	<0,01	0,3	0,2	0,1	1	0,4	28	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	3,6	0,03	<0,1	35,4	
B-6	<0,05	<0,01	0,1	<0,02	<0,03	<0,01	<0,05	<0,01	<0,1	0,3	0,3	3	<0,1	3,5	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	3,1	0,06	<0,1	37,2	
B-7	<0,05	<0,01	<0,05	<0,02	<0,03	<0,01	<0,05	<0,01	<0,1	0,2	0,2	1	<0,1	1,6	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	1,4	0,06	<0,1	19,5	
B-8	<0,05	<0,01	<0,05	<0,02	<0,03	<0,01	<0,05	<0,01	0,7	0,2	0,2	2	<0,1	1,9	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	2,1	0,03	<0,1	39	
B-9	<0,05	<0,01	<0,05	<0,02	0,1	<0,01	<0,05	<0,01	2,6	0,2	0,3	2	0,3	5,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	2,5	0,04	<0,1	32,1	
B-10	<0,05	<0,01	<0,05	<0,02	<0,03	<0,01	<0,05	<0,01	0,1	0,5	0,1	3	<0,1	0,7	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	2,4	0,04	<0,1	27,5	



Şekil 4. Bigadiç borat yataklarından alınan kolemanit ve üleksit cevherlerine ait MgO-SiO₂ ve CaO-SiO₂ değişim diyagramları

Figure 4. Variation diagrams of MgO-SiO₂ and CaO-SiO₂ for colemanite and ulexite ores from the Bigadiç (Balıkesir) borate deposits.

Bigadiç borat yatağından derlenen örneklerle ait ana element değerleri, bor oluşumunda etkin rol oynadığı düşünülen, bölgedeki etkin Neojen volkanizmasından (andezit, riyolit vs.) dolayı, yerkaşu (Krauskopf 1989) ve andezitlere (Schroll 1975 ait değerler ve tatlı su ortamlarına ait değerler (Abollino vd., 2004) ile korele edilmiştir. Buna göre Bigadiç'ten alınan örneklerin tümünde sadece Ca oranında yerkaşu ve andezitin ortalama değerlerine göre artma kaydedilmiştir. Yerkaşunun ortalama değerine göre, örneklerle ait Ca değerleri en az 3.354 en fazla 6.617 kat artış göstermektedir. Andezitin ortalama değerine göre ise Ca miktarında en az 2.99 kat en fazla 5.898 kat artış gözlenmektedir. Mineralojik bileşenlerde belirleyici olan Ca, Na ve Mg'un dışındaki ana elementlerin oranının bolluğu karşılaştırıldığında Bigadiç örneklerinin Si, Al, Mn ve P'nin yerkaşu ve andezitlerin ortalama değerine göre azaldığı tatlı su ortamlarına göre de ana elementlerde çok yüksek artış olduğu görülmektedir. Bu da Bigadiç bor havzasında Ca-boratların çökelimine uygun ortam koşullarını desteklemekte ve boratları oluşturan göl ortamına dış etkenlerle önemli oranda element transferi edildiğine işaret etmektedir.

DURAYLI İZOTOP JEOKİMYASI

Duraylı izotoplar genellikle jeolojik olarak önemli olan akışkanların ana bileşenidir. Bu nedenle Duraylı izotop çalışmaları ile akışkanlar ve akışkan-kayaç etkileşiminin etkisi irdelenebilmektedir. Ayrıca duraylı izotoplar, elementlerin

kökenini belirlemede anahtar parametre olarak kullanılmasının yanı sıra, paleotermometre olarak ve jeolojik süreçlerdeki reaksiyon mekanizmalarında ve difüzyon çalışmalarında da kullanılmaktadır.

Bigadiç borat yataklarından alınan 6 adet kolemanit mineraline ait oksijen ve hidrojen izotop analizleri ve aşağıda verilen Bigadiç borat yataklarında gözlenen bor mineralleri ve bunlarla dengedeki otojenik minerallerin oluşum sıcaklıkları kullanılarak hesaplanan, dengedeki akışkanın oksijen ve hidrojen izotop değerleri Tablo 3' de verilmiştir.

Batı Anadolu borat yataklarının özellikle bor minerallerini konu alan çalışmalarda Ca-borat, Ca-Na borat ve Na-borat çökelme ortamlarının fizikokimyasal şartlarıyla ilgili yorumlara rastlanmaktadır. Örneğin Baysal (1973), Sarıkaya (Kırka) borat yataklarının oluşumunu incelediği çalışmada göl suyunun pH'nın 8.5'ten yüksek olduğuna, sıcaklığın 30-40°C arasında değiştiğini ileri sürmüştür. Özpeker ve İnan (1978) Batı Anadolu'da yer alan tüm yatakların benzer şartlarda oluştuğunu açıklayarak borat yataklarının belirlenen parajenezlere göre düşük sıcaklık ve yüksek pH'lı ortamlarda oluştuğunu yorumlamıştır.

Krauskopf (1989), bor minerallerine eşlik eden montmorillonitin sudaki K sayesinde illite dönüşebileceğini açıklamaktadır. Oluşum ortamı sıcaklığının borat minerallerinden yola çıkarak 60°C'nin altında kaldığı ileri sürülmesine (Baysal, 1973 ve Sunder, 1980) karşın Krauskopf

Tablo 3. Bigadiç (Balıkesir) borat yataklarından alınan kolemanit örneklerine ait oksijen ve hidrojen izotop değerleri.

Table 3. Measured oxygen and hydrogen isotope values for colemanite samples from the Bigadiç (Balıkesir) borate deposits.

Örnek No	Mineral	$\delta^{18}\text{O}_{\text{kol}}$ (‰)	$\delta\text{D}_{\text{kol}}$ (‰)	T (°C)	$\Delta_{\text{min-H}_2\text{O}}(\text{O})$ (‰)	$\Delta_{\text{min-H}_2\text{O}}(\text{H})$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)
		(ölçülen)		(tahmini)	(hesaplanan)		(hesaplanan)	
1	Kolemanit	30,1	-58	60 (1)	21,48			
				40 (2)	24,99		8,38	
				60 (3)	17,39	-57,34	12,71	-0,66
				40 (4)	20,11	-61,73	11,92	3,73
				25 (5)	26,60	-62	3,5	4,00
2	Kolemanit	28,1	-60	60 (1)	21,48		3,11	
				40 (2)	24,99		6,38	
				60 (3)	17,39	-57,34	10,71	-2,66
				40 (4)	20,11	-61,73	9,92	1,73
				25 (5)	26,60	-62	1,5	2,00
3	Kolemanit	26,9	-77	60 (1)	21,48		5,42	
				40 (2)	24,99		5,18	
				60 (3)	17,39	-57,34	12,51	-19,66
				40 (4)	20,11	-61,73	8,72	-15,27
				25 (5)	26,60	-62	0,3	-15,00
4	Kolemanit	34,7	-50	60 (1)	21,48		13,22	
				40 (2)	24,99		12,98	
				60 (3)	17,39	-57,34	17,31	7,34
				40 (4)	20,11	-61,73	16,52	11,73
				25 (5)	26,60	-62	8,1	12,00
5	Kolemanit	28,5	-61	60 (1)	21,48		7,02	
				40 (2)	24,99		6,78	
				60 (3)	17,39	-57,34	11,11	-3,66
				40 (4)	20,11	-61,73	6,79	0,73
				25 (5)	26,60	-62	1,9	1,00
6	Kolemanit	39,9	-81	60 (1)	21,48		18,42	
				40 (2)	24,99		18,18	
				60 (3)	17,39	-57,34	22,51	-23,66
				40 (4)	20,11	-61,73	19,79	-19,27
				25 (5)	26,60	-62	13,3	-19,00

⁽¹⁾ 60°C tahmini oluşum sıcaklığında, oksijen izotop değerleri hesaplanırken kalsite ait sabitler kullanılmıştır (Golshev vd., 1981).⁽²⁾ 40°C tahmini oluşum sıcaklığında, oksijen izotop değerleri hesaplanırken kalsite ait sabitler kullanılmıştır (Golshev vd., 1981).⁽³⁾ 60°C tahmini oluşum sıcaklığında, oksijen (Cole, 1985) ve hidrojen (Graham vd., 1987) izotop değerleri hesaplanırken klorite ait sabitler kullanılmıştır.⁽⁴⁾ 40°C tahmini oluşum sıcaklığında, oksijen (Cole, 1985) ve hidrojen (Graham vd., 1987) izotop değerleri hesaplanırken klorite ait sabitler kullanılmıştır.⁽⁵⁾ 25°C tahmini oluşum sıcaklığında, oksijen ve hidrojen izotop değerleri (Graham vd., 1987) hesaplanırken montmorillonite ait sabitler kullanılmıştır.

(1989), kil minerallerinin alüminyum silikatlardan sular aracılığıyla birkaç 100°C' de oluştuklarını, düşük sıcaklıklarda ise oluşumun çok uzun zamanda gerçekleşebileceğini ifade etmektedir. Bu şekilde, Bigadiç yataklarındaki baskın borat (kolemanit, üleksit) ve kil mineralleri (montmorillonit) birlikte değerlendirildiğinde oluşumun bazik çözeltilerden birkaç 100°C sıcaklıkta, ya da 60°C' nin altında ancak çok uzun zaman alan bir süreçte gerçekleştiği ileri sürülebilmektedir (Koçak, 2009). Bunun yanında Koçak (2009) tarafından Bigadiç borat yataklarından alınan bor örneklerine ait birincil kökenli tek fazlı sıvı kapanımlarından elde edilen homojenleşme sıcaklıkları genel olarak 100°C hatta 45°C'nin altında olduğu saptanmıştır.

En yaygın bor minerallerinden üleksit 23°C, kolemanit 30-38°C'de oluşmaktadır (Bowser, 1964; Helvacı, 1986). Boraksın dönüşüm ürünleri olan kernit ve tinkalkonit, sıcaklığın sırasıyla 58.5°C ve 60.8°C'ye erişmesi halinde ortaya çıkmaktadırlar. Diğer borat mineralleri de yine 25-45°C'de oluşmaktadır (Bowser, 1964).

Bigadiç borat yatağından alınan kolemanit örneklerinin oksijen ve hidrojen izotop değerleri sırasıyla, 26.9 - 39.9‰ ile -50 - -81‰ aralıklarında ölçülmüştür (Tablo 3). Bu analiz sonuçları yukarıda belirtilen bor mineralleri ve bunlara eşlik eden kil gibi diğer otojenik minerallere ait sıcaklıklarla birlikte değerlendirilebilmektedir. Bu şekilde, kolemanit mineralleri ile birlikte bulunan kalsit, klorit, montmorillonit gibi minerallere ait sabitler kullanılarak, bor mineralleri ile dengedeki akışkanın oksijen ve hidrojen izotop değerleri hesaplanmış ve Bigadiç borat yataklarının oluşum ortamı ve kökenine ilişkin önemli veriler elde edilmiştir. Hesaplamalar bor yataklarının oluşum sıcaklıkları göz önüne alınarak 60, 40 ve 25 °C tahmini sıcaklıklar kullanılarak yapılmıştır (Hesaplamalarda ISOMOD-Isofrac (J. D. Martin) programı kullanılmıştır). 60 ve 40 °C tahmini sıcaklık için kalsit ve kloritin, 25°C tahmini sıcaklık için montmorillonitin sabitleri kullanılmıştır. Akışkanın hesaplanan oksijen ve hidrojen izotop değerleri 60°C tahmini oluşum sıcaklığında kloritin sabitleri kullanıldığında sırasıyla 6.78 - 22.51‰ ile -6.66 - -23.66‰ aralığında, 40 °C tahmini oluşum sıcaklığında kloritin sabitleri kullanıldığında sırasıyla 8.72 - 30.9‰ ile -13.27 - 3.73‰ aralığında, 25°C

tahmini oluşum sıcaklığında montmorillonitin sabitleri kullanıldığında sırasıyla 0.3 - 13.3‰ ile -19 - 12‰ arasında bulunmuştur (Tablo 3).

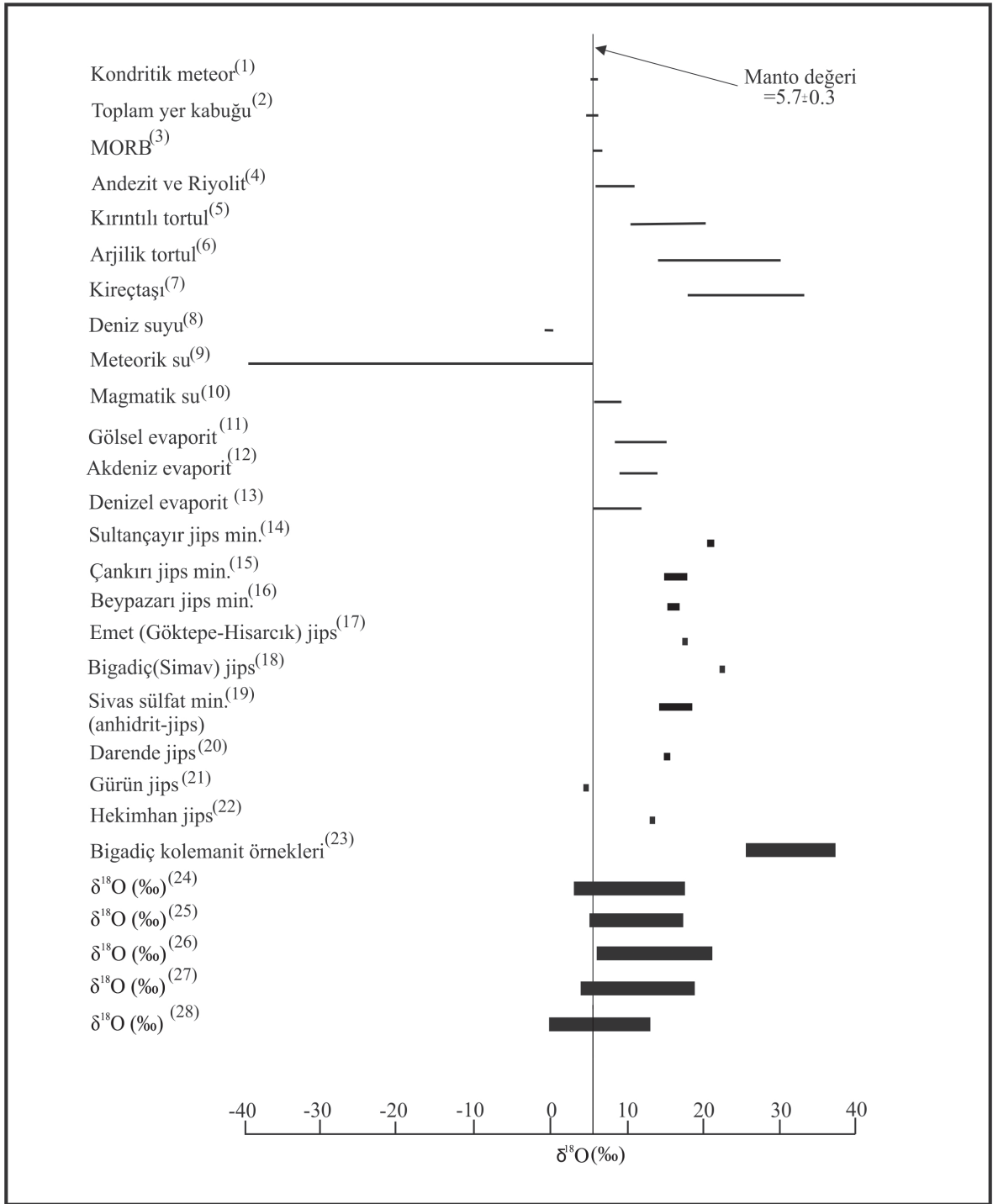
TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Birçok önemli bor yatağı, özellikle Türkiye'deki yataklar aktif volkanizma ile bir arada, karasal sedimanter ortamlarda, kurak veya yarı kurak iklim koşullarında ve denizel olmayan evaporitik koşullarda oluşmuştur. Neojen yaşlı playa göl tortullarından yapıldı KD-GB uzanımlı bir havza içinde iki farklı zonda yer alan Bigadiç borat yataklarını da kapsayan bu tür yatakların oluştuğu sığ göllerin, borca zengin jeotermal sular ve aynı zamanda çevredeki volkanik kayalardan sediman taşıyan yüzey suları ile beslendikleri düşünülmektedir (Helvacı, 2001).

Bigadiç alt ve üst borat yataklarının, kurak iklim koşullarında, lokal volkanizmayla bağlantılı olan hidrotermal çözeltiler ve sıcak su kaynakları ile beslenen sahalarda gelişmiş, ayırık veya birbirleriyle bağlantılı olabilen playa göllerinden oluştuğu bilinmektedir (Helvacı, 2001). Aynı zamanda Bigadiç borat yataklarını oluşturan göl ortamına, dış etkenlerle belli elementlerin önemli oranda transfer edildiği bu yataklardan elde edilen jeokimyasal verilerle ortaya konmaktadır. Bu anlamda bu yatakların oluşumunu sağlayan çözeltilerin (akışkanların) kökeninin duraylı izotop sistematiği ile desteklenmesi büyük önem taşımaktadır.

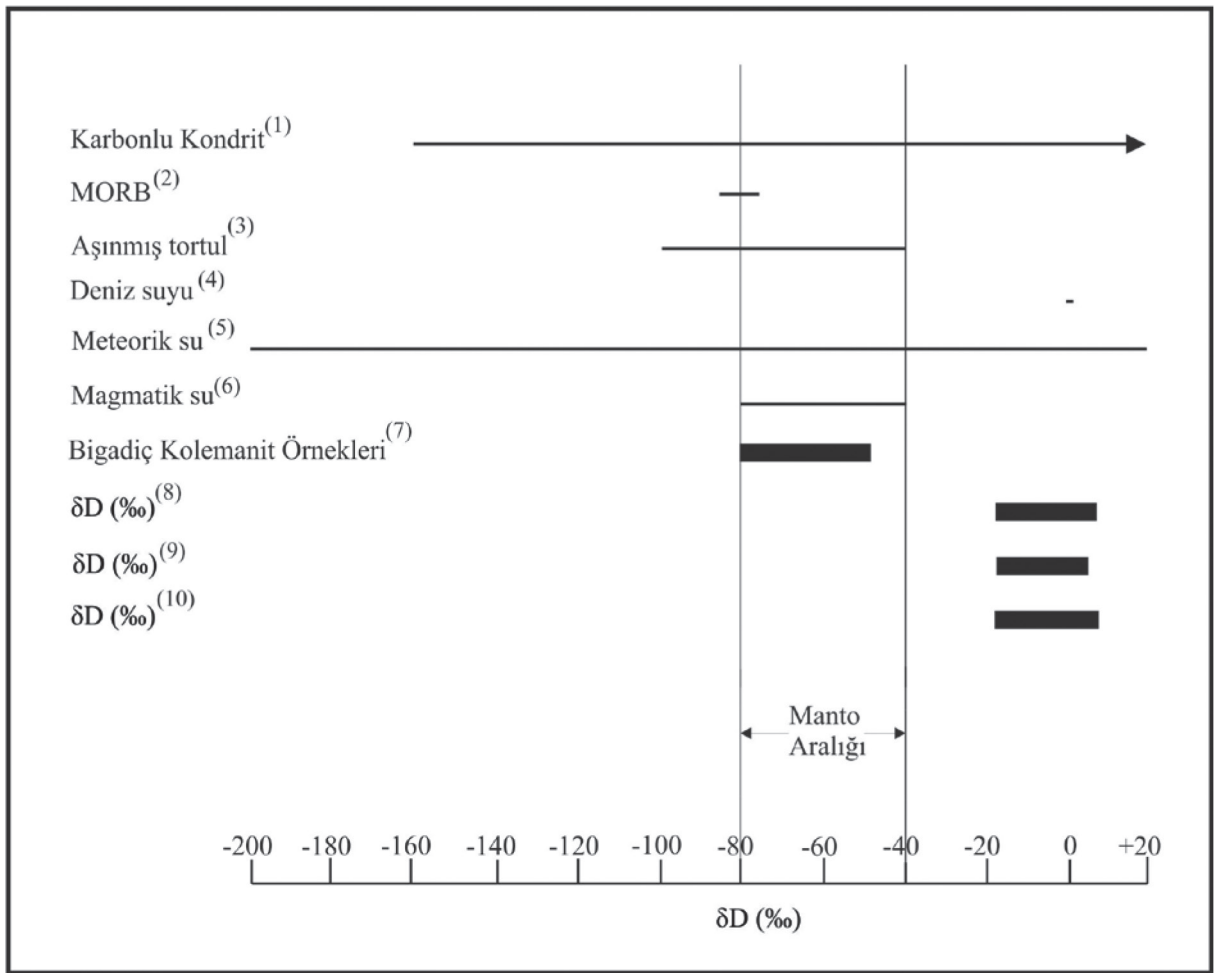
Bor minerallerini oluşturan akışkanın $\delta^{18}\text{O}$ değerinin tahmini

Bor mineralleri ve bunlardan hesaplanan dengedeki akışkanın oksijen ve hidrojen izotop değerleri, doğal oksijen ve hidrojen izotop rezervuarları ve Türkiye'de bulunan önemli evaporit yataklarında gözlenen jips ve anhidrit minerallerine ait oksijen izotop değerleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre bu minerallerle dengedeki akışkanın oksijen izotop bileşimlerinin, andezit-riyolit ve gölsel evaporitlerin oksijen izotop bileşimleri ile, hidrojen izotop bileşimlerinin ise meteorik sulara ait hidrojen izotop bileşimleri ile oldukça benzerlik bulunduğu görülmektedir (Şekil 5 ve 6). Aynı zamanda Bigadiç bor minerallerine



Şekil 5. Doğal oksijen izotop rezervuarları ile karşılaştırılan kolemanit minerallerine ait oksijen izotop bileşimleri. (1) - (13) Onuma vd. (1972), Taylor (1974), Hoefs (1987); (14)-(22) Türkiye'deki evaporit yataklarından alınan sülfat minerallerine ait oksijen izotop değerleri (Palmer vd., 2004);(23) Bigadiç bor yataklarından alınan kolemanit minerallerine ait oksijen izotop değerleri;

Figure 5. Oxygen-isotopic compositions of the colemanite minerals compared to natural oxygen isotope reservoirs. (1) - (13) Onuma et al. (1972), Taylor (1974), Hoefs (1987);(14)-(22) Oxygen isotope values for the sulphate minerals from the evaporite deposits (Turkey)(Palmer et al., 2004); (23) Oxygen isotope values of the colemanite minerals from the Bigadiç borate deposits;



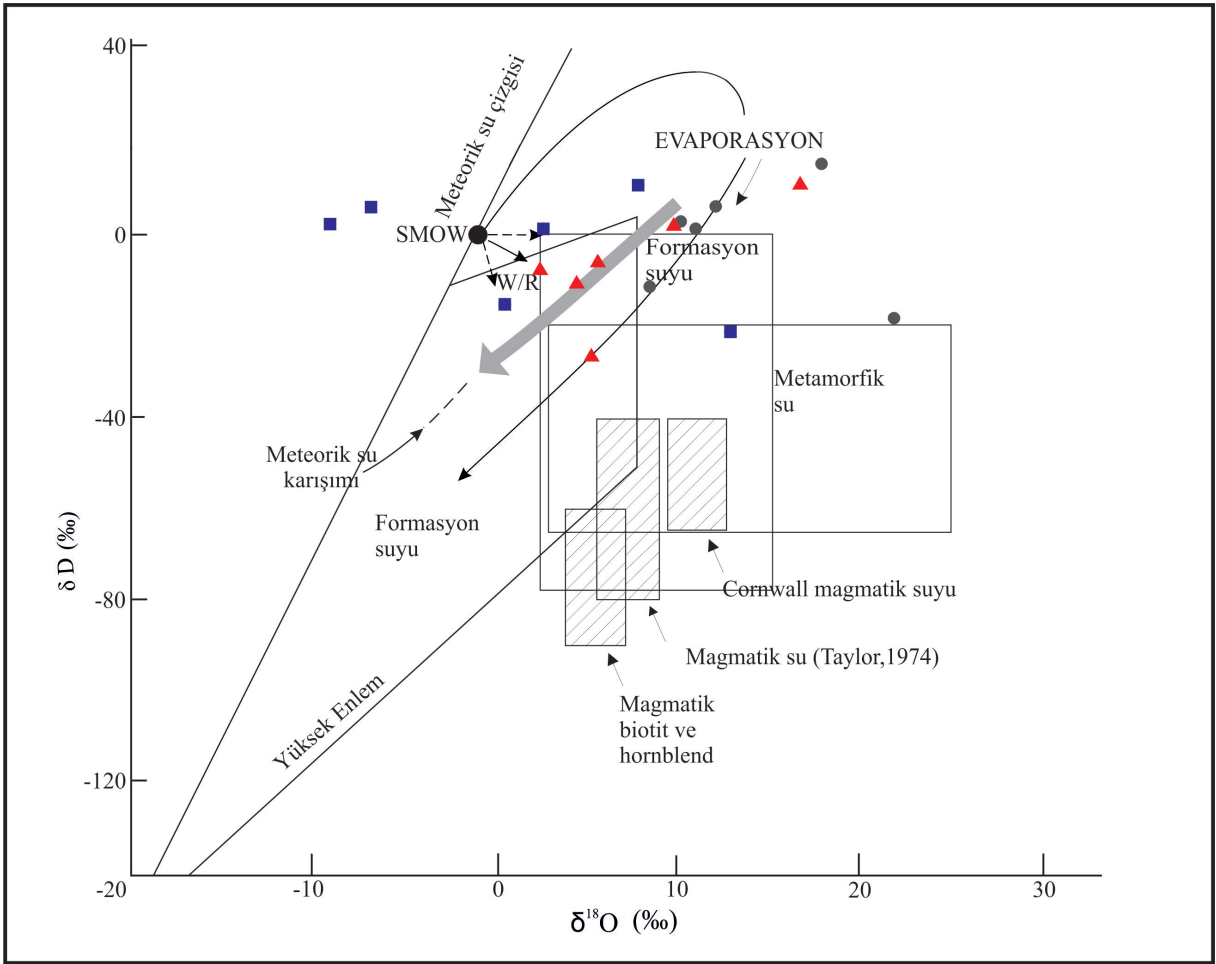
Şekil 6. Doğal hidrojen izotop rezervuarları ile karşılaştırılan kolemanit minerallerine ait hidrojen izotop bileşimleri. (1)-(6) Onuma vd. (1972), Taylor (1974), Hoefs (1987); (7) Bigadiç bor yataklarından alınan kolemanit örneklerinin hidrojen izotop değerleri; (8) 60°C tahmini oluşum sıcaklığında, hidrojen (Graham vd., 1987) izotop değerleri hesaplanırken klorite ait sabitler kullanılmıştır; (9) 40°C tahmini oluşum sıcaklığında, hidrojen (Graham vd., 1987) izotop değerleri hesaplanırken klorite ait sabitler kullanılmıştır; (10) 25°C tahmini oluşum sıcaklığında, hidrojen izotop değerleri (Graham vd., 1987) hesaplanırken montmorillonite ait sabitler kullanılmıştır.

Figure 6. The hydrogen-isotopic compositions of the colemanite minerals compared to natural hydrogen isotope reservoirs. (1)-(6) Onuma et al. (1972), Taylor (1974), Hoefs (1987); (7) Hydrogen isotope values of the colemanite minerals from the Bigadiç borate deposits; (8) In calculating the hydrogen isotope values, the constants of chloride (Graham et al., 1987) are used, at an estimated formation temperature of 60 °C; (9) In calculating the hydrogen isotope values, the constants of chloride (Graham et al., 1987) are used, at an estimated formation temperature of 40 °C; (10) In calculating the hydrogen isotope values, the constants of montmorillonite (Graham et al., 1987) are used, at an estimated formation temperature of 25 °C

ait oksijen izotop değerleri Türkiye’de bulunan önemli evaporit yataklarında gözlenen jips ve anhidrit minerallerine ait oksijen izotop değerleri ile büyük benzerlik sunmaktadır.

Şekil 7’de, bor mineralleri ve bunlarla dengedeki akışkanın hesaplanan oksijen ve hidrojen izotop değerleri birlikte incelenmiş ve değerlerin

meteorik su çizgisine yakın ve formasyon suyu alanı içine düştüğü saptanmıştır. Bunun yanında, şematik kanca şekilli evaporasyon eğrisi (Moldovanyi vd., 1993) ile Bigadiç kolemanit minerallerine dengedeki akışkana ait değerlerin gidişleri birbiriyle paralellik sunmakta, meteorik su katkısı süresince $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerlerinin



Şekil 7. Bigadiç borat yataklarından alınan kolemanit mineralleri için hesaplanan $\delta^{18}\text{O}$ - δD bileşimleri. Meteorik su, birincil magmatik sular (Taylor, 1974 ve Kyser ve O'Neil, 1984) ve metamorfik sular (Sheppard, 1986) alanı karşılaştırma amaçlı gösterilmiştir. (üçgen, 60°C tahmini oluşum sıcaklığına göre klorite ait sabitler kullanılarak hesaplanan oksijen (Cole, 1985) ve hidrojen (Graham vd., 1987) izotop değerlerini temsil etmektedir; kare, 25°C tahmini oluşum sıcaklığına göre montmorillonite ait sabitler kullanılarak hesaplanan oksijen ve hidrojen izotop değerlerini (Graham vd., 1987) temsil etmektedir; daire, 40°C tahmini oluşum sıcaklığına göre, klorite ait sabitler kullanılarak hesaplanan oksijen (Cole, 1985) ve hidrojen (Graham vd., 1987) izotop değerlerini temsil etmektedir). Şematik kanca şekilli evaporasyon eğrisi (Moldovanyi vd., 1993) oklar evaporasyon, kayaç-akışkan etkileşimi ve meteorik su katkısı süresince $\delta^{18}\text{O}$ ve δD değerlerinin beklenen değişimini göstermektedir.

Figure 7. Calculated $\delta^{18}\text{O}$ vs δD compositions for the colemanite minerals from the Bigadiç borate deposits. Fields for meteoric waters, primary magmatic waters (Taylor, 1974; Kyser and O'Neil, 1984) and metamorphic waters (Sheppard, 1986) are shown for comparison. (Triangle represent the oxygen (Cole, 1985) and the hydrogen (Graham et al., 1987) isotope values that were calculated by using the constants of chloride, according to the estimated formation temperature of 60°C ; square represent the oxygen and the hydrogen (Graham et al., 1987) isotope values that were calculated by using the constants of montmorillonite, according to the estimated formation temperature of 25°C ; circles represent the oxygen (Cole, 1985) and the hydrogen (Graham et al., 1987) isotope values that were calculated by using the constants of chloride, according to the estimated formation temperature of 40°C). A schematic "hooked" evaporation trajectory (Moldovanyi vd., 1993). Arrows indicate the expected shifts in $\delta^{18}\text{O}$ and δD during evaporation, rock-water interactions, and meteoric invasion.

beklenen değişimini gösteren hat ile aynı doğrultuda olduğu izlenmektedir. Bu durum, Bigadiç borat yatağının oluşumunda, evaporasyon süresince etkin meteorik su girişinin olduğuna işaret etmektedir.

Buna göre, Bigadiç borat yataklarından alınan bor cevherlerini oluşturan akışkanın karakteri yoğun meteorik su katkısıyla birlikte formasyon suyu olarak belirlenebilmektedir. Bu şekilde bir yaklaşımla, Türkiye'deki borat yataklarının kökeni ve oluşum sıcaklığına ilişkin yorumlar duraylı izotop verileri kullanılarak yapılabilmektedir. Aynı zamanda özellikle bor cevher mineralleri ile parajenez oluşturan diğer otojenik minerallerin de duraylı izotop çalışmaları yapılarak bu yorumların daha sağlıklı boyuta getirilebilmesi büyük önem taşımaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu makalenin ilk versiyonları Yurdal Genç tarafından okunmuş ve kritik olarak gözden geçirilmiştir. Katkılarından dolayı kendisine teşekkür ederiz. Ayrıca makalenin gelişmesinde yapmış oldukları olumlu eleştiri ve katkılarından dolayı adı saklı hakeme içtenlikle teşekkür ederiz. Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi 2010. KB.FEN.009 no'lu BAP Projesi ile desteklenmiştir. Ayrıca verdikleri lojistik destek ve Bigadiç borat yatağında çalışma imkânı sağladıkları için ETİ Bor İşletmeleri A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abollino, O., Aceto, M., Buoso, S., Gasparon, M., Green, W. J., Malandrino, M. And Men-tasti,
 E. 2004. Distribution of major, minor and trace elements in lake environments of Antarctica. *Antarctic Science* 16 (3): 277–291.
- Alaca, O., İşintek, İ., Selvi, A., Kurul, A., 1987, Bigadiç borat havzası batı kesiminin jeolojik incelemesi, Etibank Raporu (yayınlanmamış), Ankara, 37 s., 12 ek.
- Baysal, O., 1973 Sankaya (Kırka) borat yataklarının oluşumu: *Türkiye Mad Bil. Tek III. Kong.* 255 277.

- Baysal O. ve Ataman, G., 1975, Türkiye'de yem bir bor minerali: Kemit ve oluşumunun tartışması: *Türkiye Jeol. Kur. Bült.*, 18, 3-10.
- Bowser, J. C, 1964, *Geochemistry and Petrology of sodium borate in non-marine evaporate environments*, Ph. D. Thesis Univ. Calif., Los Angeles.
- Clayton, R. N., and Mayeda, T., 1963., The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, volume 27, pp. 47-52.
- Cole, D.R., 1985, A preliminary evaluation of oxygen isotopic exchange between chlorite and water; *Geol. Soc. America Abstr. with Programs*, 17, p. 550
- Ercan, T., Gunay, E., Çevikbaş, A., Ateş, M., Küçükayman, A., Can, B. ve Erkan, M. 1984. Bigadiç çevresinin (Balıkesir) jeolojisi, magmatik kayaçların petrolojisi ve kökensel yorumu. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Dairesi Raporu, Ankara (yayımlanmamış).
- Erdoğan, B., 1990. Stratigraphic features and tectonic evolution of the İzmir-Ankara Suture Zone in the region between İzmir and Seferihisar. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bulteni*, 2, 1-20.
- Erkül, F., Helvacı C. and Sözbilir, H. 2005a. Stratigraphy and Geochronology of the Early Miocene Volcanic Units in the Bigadiç Borate Basin western Turkey. *Turkish Journal of Earth Science*, vol. 14, pp. 227-253.
- Erkül, F., Helvacı C. and Sözbilir, H. 2005b. Evidence for two episodes of volcanism in the Bigadiç borate basin and tectonic implications for western Turkey, *Geological Journal*, 40: 545-570.
- Erkül, F., Tatar Erkül, S., Helvacı, C. 2010. Erken Miyosen Bigadiç bor havzasındaki volkanik birimlerin petrografik ve jeokimyasal özellikleri: magma karışımının kanıtları, *Batı Anadolu-Türkiye, Yerbilimleri* 31(2): 141- 168.
- Graham, C.M., Viglino, J.A., and Harmon, R.S., 1987, *Experimental study of hydrogen-*

- isotope exchange between aluminous chlorite and water and of hydrogen diffusion in chlorite; *Amer. Mineral.* 72, 566-579
- Gündoğdu, M. N., 1982, Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojilik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi, Doktora tezi, 386s., 3 ek, H.Ü.(yayımlanmamış), Ankara.
- Helke, A., 1955, Beobachtungen an Türkische minerallagerstätten II. N. Jb. Min. Abh.:178-180.
- Helvacı, C., 1983, Türkiye borat yataklarının mineralojisi. *Jeo. Müh. Derg.*, 17, 37-54.
- Helvacı, C., 1986, Geochemistry and origin of the Emet borate deposits, western Turkey. *Bulletin of Faculty of Engineering Cum. Uni., serie A, Earthsciences* 3, 49-74.
- Helvacı, C., 1995, Stratigraphy, mineralogy and genesis of the Bigadiç borate deposits, Western Turkey. *Economic Geology* 90, 1237-1260.
- Helvacı, C., 2001, Türkiye Borat Yatakları. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, no: 71, 34s., Ankara.
- Helvacı, C., ve Alaca, O., 1991, Bigadiç Borat Yatakları ve Çevresinin Jeolojisi ve Mineralojisi, *MTA Dergisi* 113, 61-92.
- Helvacı, C., ve Alonso, R., 2000, Borate deposits of Turkey and Argentina; A summary and geological comparison. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 9, 1-27.
- Helvacı, C., ve Dora, Ö., 1985, Bigadiç borat yalaklarında mineral oluşumları hakkında yeni görüşler: *TJK* 39. Bilimsel ve Teknik Kurultayı Bildiri özleri, 75-76.
- Helvacı, C., İnci, U., Yağmurlu, P., Yılmaz H., 1987, Batı Anadolunun Neojen stratigrafisi ve ekonomik potansiyeli, A.Ü: Isparta Müh. Fak. Dergisi, *Jeoloji*, 3., 31-45.
- Helvacı, C., Mordoğan, H., Çolak, M. and Gündoğan, İ, 2004, Presence and distribution of lithium in borate deposits and some recent lake waters of west-central Turkey. *International Geology Review*, vol. 46, p.177-190.
- Helvacı, C., and Orti, F., 1998, Sedimentology and diagenesis of Miocene colemanite-ulexite deposits (western Anatolia, Turkey). *Journal of Sedimentary Research* 68. 1021-1033.
- Helvacı, C., and Orti, F., 2004, Zoning in the Kırka borate deposit, western Turkey: primary evaporitic fractionation or diagenetic modifications? *The Canadian Mineralogist*, vol.42, no.4, p.1179-1204
- Helvacı, C., Stamatakis, M., G., Zagourogrou, C., and Kanaris, J., 1993, Borate minerals and related authigenic silicates in northeastern Mediterranean Late Miocene continental basins. *Explor. Mining Geology* 2, 171-178..
- Hoefs. J., 1987, Stable isotope geochemistry (3rd ed.): New York, Springer-Verlag, 241 p.
- İnan. K., 1975, Sulu bor mineral yalaklarının oluşum modeli: *Türkiye Jeol. Kur. Bull.*, 18, 165-168.
- Koçak, İ., 2009. Bigadiç (Balıkesir) çevresi borat yataklarının mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi, Ankara Üniversitesi (yüksek lisans tezi), Ankara (yayımlanmamış).
- Krouskopf, K. B., 1989. Introduction to Geochemistry. 2nd. Edition. Mc graw Hill Book company, London, 1989
- Kyser T. M., and O'Neil J.R., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, 48, 2123-2134.
- Martin, J.D. ISOMOD-Isofrac Stable isotope calculating programme. Departamento de Tecnología de la Construcción, E.T.S.de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad de La Coruña, SPAIN
- Meixner, H., 1952, Einige borate minerale (colemanitund tertschit, ein neues mineral) aus der Turkei. *Fortschr. Mineralogie*, 31: 39-42.
- Meixner, H., 1953, Neue Türkische boratlagertstätten Berg. U. Hüttenmann. *Monatsh.* 98: 86-92.
- Meixner, H., 1956, Die neue Türkische boratprovinz in İskeleköy bei Bigadiç im Vilayet Balıkesir. *Sonerabdruck aus Kaliund*

- Steinsals, part 2, p. 43-47, Essen, Verlag Glöckauf.
- Moldovanyi, E. P., L. M. Walter, and L. S. Land (1993) Strontium, boron, oxygen, and hydrogen isotopic geochemistry of brines from basal strata of the Gulf Coast sedimentary basin, USA: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 57, p.2083-2099.
- Okay A.I., and Siyako M. 1993. The revised location of the İzmir-Ankara Suture in the region between Balıkesir and İzmir. In: *Tectonics and Hydrocarbon Potential of Anatolia and Surrounding Regions*. S. Turgut (ed.). pp. 333-355.
- Onuma N., Clayton R. N., and Mayeda T.K., 1972, Oxygen isotope cosmo-thermometer, *Geochim.Cosmochim.Acta*36, 169-188.
- Özpeker, I., 1969, Batı Anadolu borat yataklarının mukayeseli ve jenetik etüdü: *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniv.*, 116 s.
- Özpeker, I., ve İnan. K., 1978, Batı Anadolu borat yataklarında izlenen mineral birliklerinin yatak evrimiyle ilişkileri: *Türkiye Jeol. Kur. Bült.*, 21, 1-10.
- Palmer, M.R. and Helvacı, C., 1997, The boron isotope geochemistry of the neogene borate deposits of western Turkey, v61, no.15, pp. 3161-3169.
- Palmer, M.R., Helvacı, C., and Fallick, A.E., 2004, Sulphur, sulphate oxygen and strontium isotope composition of Cenozoic Turkish evaporates. *Chemical Geology*, v. 209, p. 341-256
- Schroll, E. 1975. *Analytische Geochemie*, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, p. 292.
- Sheppard, S.M.F. (1986) In *Stable isotopes in high temperature geological processes* (Valley, J. W., Taylor, H. P., and O'Neil, J. R., eds.) *Reviews in Mineralogy*, vol. 16, 165-83, Min. Soc. America.
- Sunder, M. S., 1980, Geochemistry of the Sarıkaya borate deposits (Kırka-Eskişehir), *Bulletin of the Geological Society of Turkey* 2, 19-34.
- Taylor, H., P., Jr., 1974, The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition: *Econ. Geol.*, v, 69, p, 843-883.
- Yılmaz, Y., Genc, Ş.C., Gurer, F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, Ş., and Elmas, A., 2000. When did the western Anatolian grabens begin to develop? E. Bozkurt, J.A. Winchester and J.D.A. Piper (eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*, Geological Society, London, Special Publications, 173, 353-384.