بررسی منابع انرژی زمین‌گرمایی و کانی‌سازی آتشفشان تفتان با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار آب

دکتر محمد بومری

استادیار زمین‌شناسی دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

استراتوولکانو تفتان در ۱۰۰ کیلومتری جنوب- جنوب شرق زاهدان و جنوب شرق ایران واقع شده است. سنگ‌های آتشفشانی عمدتاً از نهشته‌های پیروکلاستیکی همراه با گدازه‌های آندزیتی، داسیتی و ریولیتی تشکیل شده‌اند. بخش زیادی از این سنگ‌ها بطور محلی شدیداً دچار دگرسانی گرمابی شده‌اند. در حال حاضر آتشفشان در مرحله فعال فومارولیک است چون تعدادی دهانه فعال فومارولیک که خروج بخارات و گازهای گوگردی از آنها نمایان است و تعدادی چشمه آب گرم در کراترهای جوان و در دامنه کوه تفتان دیده می‌شود.در این مطالعه چهارنمونه از چشمه‌های آب‌گرم و آب‌های‌جاری در کوه‌تفتان جهت تعیین ایزوتوپ‌های پایدار و ترکیب شیمیایی آنها تجزیه شد. مقادیر δD آب‌های جاری۳۰- و ۳۵- در هزار و مقادیر $\delta^{18}O$ آنها ۵/۴- و ۶/۴- در هزار می‌باشد. مقادیر δD چشمه‌های آبگرم ۲۵- و ۲۶- در هزار و مقادیر $\delta^{18}O$ آنها ۲- در هزارمی‌باشد. مقادیرδDو $\delta^{18}O$ آب‌های جاری منطبق با خط آب‌های جوی جهانی است در حالی‌که مقادیر δDو $\delta^{18}O$ چشمه‌های آب گرم منطبق بر آن نیست و سنگین‌تر است. عامل عمده این غنی‌شدگی تبخیر زیر زمینی آب‌های جوی نفوذ کرده در کوه تفتان است که بیان‌کننده حضور آب گرم در اعماق سطحی از حرارتی بین ۱۵۰ تا ۲۲۰ درجه سانتیگراد است. نتایج حاصل از مطالعات ایزوتوپی، خروج گاز، وجود چشمه‌های آب گرم، مناطق گسترده دگرسانی در کوه تفتان حاکی از وجود میدان زمین گرمایی فعال وکانی‌سازی اقتصادی در ناحیه تفتان می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: آتشفشان تفتان، چشمه گرم، ایزوتوپ‌های پایدار، انرژی زمین گرمایی، کانی‌زایی

مقدمه

در ایران به‌دلیل وجود منابع عظیم نفت و گاز، توجهی به دیگر منابع معدنی و انرژی نشده است در حالی‌که سوخت‌های فسیلی دیر یا زود به اتمام خواهند رسید. امکان وجود انرژی ژئوترمال در هر جایی وجود دارد و لی کوه‌های آتشفشانی جوان بهترین مناطق هستند. تأمین انرژی و بخصوص تولید الکتریسته از منابع زمین گرمایی از ابتدای قرن بیستم شروع

Archive of SID

www.SID.ir

شـده اسـت و نخسـتین مولد نیروی برق در لاردلو ایتالیا با استفاده از نیروی حاصل از جریان بخـارات زمیـن گرمایـی بـه کار افتاده است. به دنبال آن کشورهای دیگری چون ژاپن، ایالات مـتحده، نیوزلـند و ترکیه تلاش برای استفاده از این انرژی را آغاز کردند *(دانشور، ۱۳۶۴: ۲۵)*. اکنون استفاده و بهره‌برداری از آن در بسیاری از کشورها شروع شده است.

برخی از کشورها و از جمله ایران بر روی کمربندهای اصلی منابع زمین گرمایی جهان‌قرار دارنـد.کـوه‌های آتشفشانی جوان در ایران از آذربایجان تا سیستان و بلوچستان دیده می‌شوند که از مهمترین آنها می‌توان به سهند، سبلان، دماوند، بزمان و تفتان اشاره کرد.آتشفشان‌هایی کـه مـواد مـذاب بـه‌صورت انفجاری از آنها خارج می‌شوند را حتی مردم عادی نیز می‌شناسند چون انفجارات شدید آنها که توأم با خروج گازهای سوزان سمی، ذوب برف ویخ، جاری شدن جـریان‌هـای گِلـی و غـیره اسـت تـراژدی‌های دردناکی را به وجود آورده است. مردم از اینکه مناطق آتشفشانی می‌توانند منبع انرژی و مواد معدنی باشند آگاهی ندارند.کوه‌های آتشفشانی بـرای انسـان و محـیط زیسـت بسـیار ارزشـمند و مفـید اسـت و مطالعـه آنها نه تنها به‌دلیل فعالیت‌های ماگمایی بلکه به دلایل زیر نیز حائز اهمیت است :

الف- تأثیر آتشفشان‌ها روی آب و هوا و محیط زیست؛

ب- تشـکیل مـنابع مهـم معدنـی مخصوصـاً طـلا و نقـره بر اثر فرایندهای وابسته به فعالیت آتشفشان‌ها؛

ج- تولـید انـرژی زمیـن‌گرمایـی در اطـراف اکـثر آتشفشـان‌های جوان*(داودی‌راد،۱۳۶۴: ۲۰، دانشور، ۱۳۶۴: ۲۵)*؛

د- چشمه‌های معدنی و آب گرم؛

و- شناسایی ساختمان داخلی زمین و غیره؛

تعیین ترکیب‌شیمیایی و مقادیر ایزوتوپی آب‌های موجود در کوه تفتان در بررسی و شناخت هر کدام از موارد بالا کمک می‌کند.

بطور کلی آب‌های موجود در کوه آتشفشانی تفتان را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- آب‌های جاری حاصل از بارندگی و ذوب برف؛

۲- چشمه‌های آب معدنی گرم؛

۳- چشمه‌های آب معدنی سرد؛

بـه آب‌هـای گـرم حاصـل شـده از حفـاری‌هـای واقـع در مـیدان‌هـای زمین‌گرمایی و به چشـمه‌های آب معدنی گرم واقع در مناطق آتشفشانی، آب‌های ولکانیکی اطلاق می‌شود. آب و سـیالات آبـی در محـیط‌هـای زمیـن‌شناسـی در واکـنش‌هـای زیادی شرکت دارند و دارای منشاءهای متفاوتی است *(O'Neil, 1986: 1; Sheppard, 1986: 165)*.

Archive of SID

www.SID.ir

آب فقط از ایزوتوپ‌های دو عنصر اکسیژن و هیدروژن تشکیل شده است. عناصر اکسیژن و هیدروژن به دلیل سبکی و اختلاف جرمی نسبتاً زیاد ایزوتوپ‌هایشان در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهند.به همین دلیل برای جواب به سؤالاتی همچون منشاء و نحوه تشکیل آب‌های گرم، بخارات خارج شده، واکنش‌های متقابل آب و سنگ و تعیین دمای محیط، ابزاری بسیار قوی محسوب می‌شوند. علاوه بر این آب به عنوان یک حلال استثنایی می‌تواند عناصر زیادی را در خود حل کند که غلظت این عناصر راهنمای ژئوشیمی مهمی برای تفسیر محیط‌های زمین‌شناسی همچون کانی‌سازی و محیط زیست می‌باشد.

مقدار کل گرمایی که در درجه حرارتی بالاتر از دمای میانگین سالانه در اعماق زمین جمع شده تقریباً برابر 10^{30} ژول است. این مقدار انرژی چندین برابر مقدار انرژی پیش‌بینی شده لازم جهت برطرف نمودن نیازهای فنی جامعه بشری است *(اخروی،۱۳۶۲: ۳۱)*. ارزش اقتصادی انرژی زمین گرمایی به درجه حرارت آب‌های زیرزمینی بستگی دارد. قسمتی که دارای دمای زیاد است باید در عمقی باشد که به وسیله‌ی حفر چاه در دسترس قرار گیرد و مقدار واردات انرژی هر چاه نیز باید زیاد باشد. در حال حاضر فقط مناطق آتشفشانی کواترنری ممکن است دارای دمای بالا در اعماق کم باشند. در این مقاله ترکیب شیمیایی و ایزوتوپی، منشاء و دمای آب‌های موجود در تفتان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

موقعیت جغرافیایی و ژئومورفولوژی

کوه آتشفشانی تفتان در ۴۵ کیلومتری شمال شرق شهر خاش و در حدود ۱۰۰کیلومتری جنوب- جنوب شرق زاهدان در جنوب شرقی ایران واقع شده است. ارتفاع بلندترین قله این آتشفشان ۴۰۵۰ متر از سطح تراز آب دریا است.

آتشفشان تفتان دارای قله‌های متعددی است. اصلی‌ترین آنها دو قله است یکی در شمال غرب که مرتفع‌تر است ونرکوه نام دارد و یکی در جنوب شرق که ارتفاع کمتری داشته و مادر کوه یا تفتان نامیده می‌شود. این دو کوه به وسیله یک بخش زین مانند باریکی به هم متصل شده‌اند. قله جنوب شرقی تا اندازه‌ای شکل مخروطی خود را حفظ کرده و به وسیله‌ی جریان ضخیم و جوان‌تر گدازه پوشیده شده است (شکل۱).

Archive of SID

www.SID.ir

شکل ۱ : تصویری از قله‌های کوه تفتان

موقعیت زمین شناسی

فعالیت‌های گسترده ولکانیکی از ترکیه تا بلوچستان پاکستان از کرتاسه تا کواترنری ادامه داشته و آتشفشان‌های جوان کواترنر چون آرارات در ترکیه (مجاور مرز ایران در شمال غرب)، سهند، سبلان، دماوند، بزمان و تفتان در ایران و کوه سلطان در پاکستان (مجاور مرز ایران، جنوب شرق) در کمربند ساختمانی عظیم تیتیس قرار می‌گیرند. این کمربند، محل برخورد دو ابر قاره اورازیا و گندوانا است که در ایران به زون‌های تکتونیکی متعددی تقسیم‌بندی شده است. کوه‌های آتشفشانی، بزمان، تفتان در ایران و کوه سلطان در پاکستان خود یک کمان ولکانیکی مستقلی را تحت عنوان کمان ولکانیکی بلوچستان می‌سازند *(بومری،۱۳۸۳:۱۵)*. این آتشفشان‌ها را محصول فرورانش پوسته اقیانوسی عمان به زیر بلوک‌های لوت و هلمند از محل زون مکران ایران و پاکستان می‌دانند*(Farhoudi and Karig,1977:213)* کوه آتشفشانی تفتان درون سنگ‌های رسوبی و آذرین متعلق به کرتاسه و ائوسن زون شرق ایران فوران کرده و یکی از آتشفشان‌های جوان ایران و متعلق به کواترنری است.سنگ‌های آتشفشانی تفتان شامل گدازه‌ها و توف‌های شدیداً دگرسان شده، سنگ‌های پیروکلاستیک و لاهارمانند است وتنوعی از گدازه‌های آندزیتی ـ داسیتی و ریولیتی و حتی بازالتی در تناوب با آنها دیده می‌شود *(بومری،۱۳۸۳:۴۰)*. گازها و بخارات گوگردی از قله و دامنه‌های جنوبی کوه آتشفشانی تفتان در حال خارج شدن است (شکل ۲). فعال‌ترین مرحله بعد از فوران‌های آتشفشانی در ایران در حال حاضر در کوه تفتان دیده می‌شود *(Gannser, 1971: 319)*.

Archive of SID

www.SID.ir

شکل ۲ : تصویری از خروج گازهای گوگردی از دهانه‌های کوه تفتان

روش مطالعه

دو نمونـه از آب‌های جاری تفتان(یکی از رودخانه جم‌چن و یکی از آب‌های جاری نزدیک اردوگـاه) و دو نمونـه نـیز از چشـمه‌هـای آب گـرم نـزدیک پـناهگاه گرفـته شـد (شکل ۳). بطـری‌هـای مـورد استفاد برای نمونه‌برداری از جنس پلاستیک(پلی اتیلن) انتخاب شدند. هر بطـری دارای درب مخصوصـی بـوده کـه از نشـت نمونـه و ارتـباط آن با محیط خارج کاملا جلوگیری می‌کند. این نمونه‌ها جهت تعین مقادیر δD و $\delta^{18}O$ در آزمایشگاه ژئوشیمی دانشگاه آکیتا در کشور ژاپن به وسیله دستگاه اسپکترومتر جرمی تجزیه شدند.

بـرای تولـید هـیدروژن ابـتدا ۰/۱ میلـی لیـتر از نمونـه آب در حرارت حدود ۷۰۰ درجه سـانتیگراد توسط فلز روی احیاء گردید و سپس گاز هیدروژن در یک لوله آزمایش جمع‌آوری شـد. بـرای سنجش نسبت اکسیژن ۱۸ به ۱اکسیژن ۱۶ نمونه آب مورد نظر با دی‌اکسیدکربن مخلوط شد تا به‌حالت تعادل‌برسند*(Epstin and Mayeda, 1953: 213)*

از واکـنش بیـن دی اکسـیدکربن و آب تحـت شـرایط تعادل می‌توان گاز دی‌اکسیدکربن خـالص را نـیز در یک لوله آزمایش جمع‌آوری کرد. لوله‌های آزمایش حاوی دی‌اکسیدکربن و گـاز هیدروژن برای نمونه‌های مورد مطالعه و برای نمونه‌های استاندارد به دستگاه اسپکترومتر جرمی داده شد و از این طریق نسبت $^{18}O/^{16}O$ و D/H اندازه‌گیری گردید.سپس مقادیر δD و $\delta^{18}O$ نسبت به استاندارد مرجع SMOW برحسب قسمت در هزار(‰)محاسبه شد. اندازه‌گیری

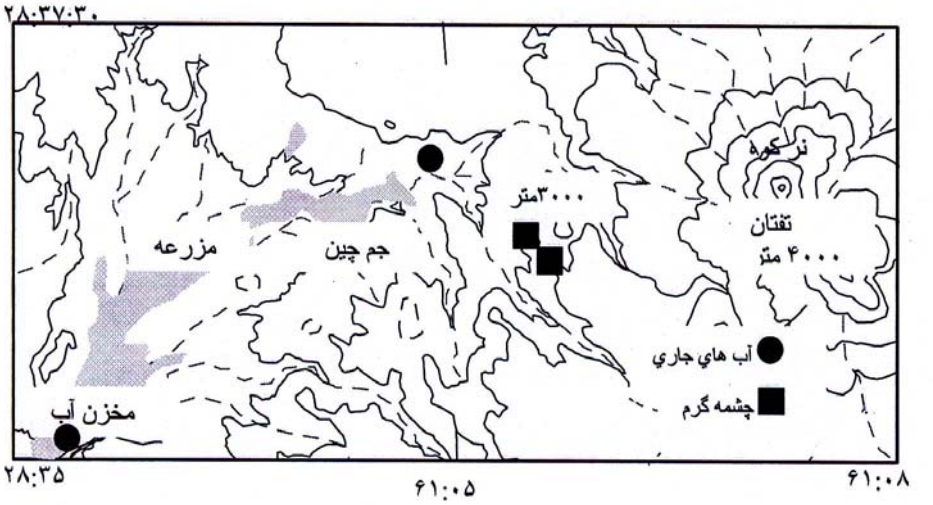
Archive of SID

www.SID.ir

بعضی از عناصر شیمیایی موجود در این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پیکسی انجام شده است.

ویژگی‌های آب‌های موجود در تفتان

نتایج تجزیه‌های شیمیایی برای عناصر موجود در نمونه‌های آب موجود درکوه تفتان در جدول ۱ نشان داده شده است. مقایسه ترکیب شیمیایی آب‌های موجود در این کوه نشان می‌دهد که چشمه‌های گرم دارای غلظت بالایی از عناصری همچون آهن، آلومنیم، گوگرد، سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سیلیسیم و غیره (جدول ۱). علاوه بر این PH چشمه‌های آب گرم کمتر از ۲ است در حالی‌که آب‌های جاری در کوه تفتان دارای PH حدود ۷ است. دمای چشمه‌های گرم در محل تخلیه ۴۷ و ۴۸ درجه سانتیگراد است.



شکل ۳: موقعیت نمونه‌های آب بر داشته شده بر روی نقشه توپوگرافی کوه تفتان. اعداد در حاشیه‌ها طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه، دقیقه و ثانیه هستند خطوط پیو سته منحنی‌ها تراز و خطوط منقطع آبراهه‌ها می‌باشند.

بر اساس مطالعات غفوری *(۱۳۶۶: ۲۹۲)* و *(Ghazban,2004:43)* بیشتر چشمه‌های معدنی سرد و گرم در تفتان اسیدی و دارای PH کمتر از ۵ می‌باشند. چشمه‌های معدنی سرد که حرارت آنها همان حرارت محیط است نسبت به آب‌های جاری دارای غلظت‌های بالاتری از عناصر هستند در حالی‌که نسبت به چشمه‌های گرم دارای غلظت کمتری از عناصر هستند *(Ghazban,2004:43)* بنابراین آب‌های چشمه‌های معدنی سرد هم از نظر PH و هم از نظر میزان املاح بین آب‌های جاری و چشمه‌های گرم تفتان قرارمی‌گیرد.

مقادیر δD آب‌های جاری تفتان ۳۰- و ۳۵- در هزار و مقادیر $\delta^{18}O$ آنها ۵/۴- و ۶/۴- در هزار می‌باشند. مقادیر δD چشمه‌های آبگرم۲۵- و ۲۶- در هزار و مقادیر $\delta^{18}O$ آنها ۲- در هزار

www.SID.ir

هســتند. مقادیــر δD و $\delta^{18}O$ آب‌های جاری منطبق با خط مبنای جهانی آب جوی (GMWL) است و مقادیر δD و $\delta^{18}O$ چشمه‌های آب گرم منطبق بر GMWL نیست و سنگین‌تر از مقادیر δD و $\delta^{18}O$ آب‌های جوی می‌باشند (جدول ۲ و شکل ۴).

جدول ۱ : نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب از کوه آتشفشانی تفتان با دستگاه PIXE. غلظت‌ها برحسب PPM

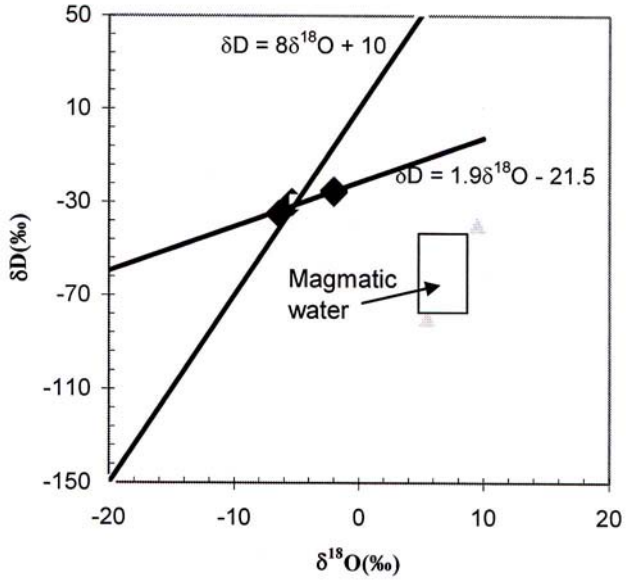
نوع آب	آب‌های جاری		چشمه‌های گرم	
نمونه‌ها	WTF-۱	WTF۲	WTF-۳	WTF-۴
Na	۱۷	۱۲	۸۱۷	۱۱۵۴
K	۱۵	۹	۳۰۲	۳۶۸
Ca	۱۷۱	۱۱۱	۶۷۳	۵۸۳
Mg	۳۳	۱۶	۴۵۸	۵۰۹
Al	۲	–	۸۰۹	۴۵۱
Si	۱۷	۲۵	۱۱۳	۱۰۱
S	۸۹	۴۷	۱۹۵۸	۱۱۶۴
Mn	۰/۳۸	–	۶	۳
Fe	۰/۱۵	۰/۱۲	۴۱۷	۴۰۸
Ni	۰/۰۳	–	–	–
Cu	۰/۰۱	–	–	–
Zn	۰/۰۵	۰/۰۳	۲	۲
Br	۰/۲	۰/۱۲	۷	۱۶
As	–	–	۱	۴
Sr	۱/۳	۰/۶	۱۷	۱۳
pH	۶/۸	۶/۷	۲	۱/۸
دما(° C)	دمای محیط	دمای محیط	۴۸	۴۷

جدول ۲: مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار آب‌های موجود در کوه تفتان

نمونه	نوع آب	‰ δD(SMOW)	‰ $\delta^{18}O$(SMOW)
WTf1	آب جاری	-۳۰	-۵/۴
WTf2	آب جاری	-۳۵	۶/۴
WTf3	چشمه گرم	-۲۵	۲/۰
WTf4	چشمه گرم	-۲۶	۲/۰

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۴:مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن درآب‌های کوه‌تفتان‌داده‌هایی که روی‌خط $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ قرار گرفته‌اند مقادیر آب‌های سطحی هستند و داده‌هایی که خارج از این خط قرار گرفته‌اند مربوط به چشمه‌های آب گرم است. خط $\delta D = 1.9\%\ \delta^{18}O - 21.5$ با فرض غنی‌شدگی مقادیر چشمه‌های گرم بر اثر تبخیر زیر زمینی آب‌های سطحی فرض شده است.

منشاء آب‌های گرم در کوه تفتان

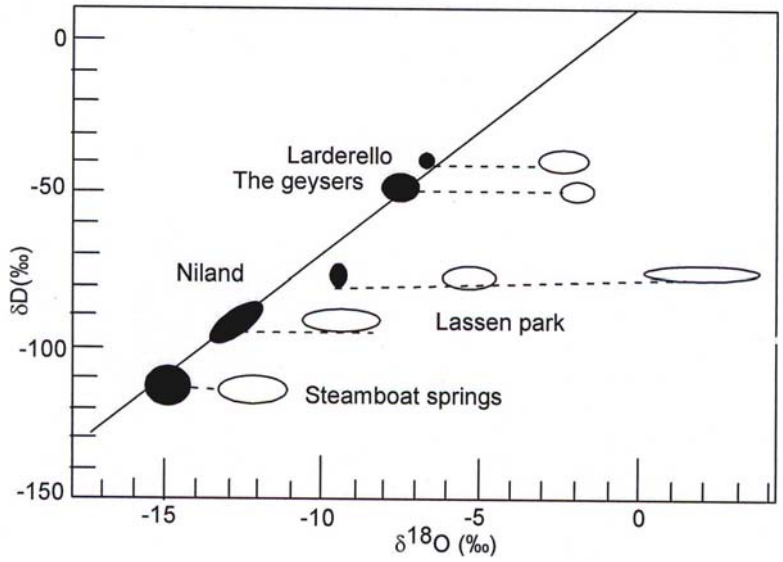
از ویژگی‌های آب‌های موجود در کوه تفتان مقادیر بالاδD و $\delta^{18}O$، pH اسیدی و غلظت بالای عناصر چشمه‌های گرم نسبت به آب‌های سطحی است (جدول ۱ و جدول ۲). علت غنی‌شدگی چشمه‌های آب گرم تفتان از δD و $\delta^{18}O$ نسبت به آب‌های جاری آنجا به دلایل متعددی می‌باشد که مهمترین آنها عبارتند از: واکنش آب‌های جوی گرم شده با سنگ‌های آذرین،اختلاط آب‌های جوی با آب‌های ماگمایی و تبخیر. این عوامل می‌توانند باعث افزایش مقادیر δD و $\delta^{18}O$ در آب‌های جوی شوند. تأثیر هر کدام از عوامل فوق‌الذکر بر ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن به شرح زیر است:

۱- واکنش آب‌های گرم با سنگ‌های آذرین(تاثیر متقابل آب و سنگ)

ترکیب ایزوتوپی آب‌های گرم ضمن عبور از سنگ‌های مسیرشان می‌تواند تغییر کند که شدیداً وابسته به نسبت مقدار آب به سنگ است. اگر مقدارآب نسبت به سنگ ضمن عبور طی یک زمان معینی خیلی زیاد باشد ممکن است از نظر ایزوتوپی تغییری در آب صورت نگیرد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵ : مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار آب‌های موجود در بعضی از مناطق آتشفشانی،دایره و بیضی‌های پر نشان‌دهنده آب‌های جوی محلی و دایره و بیضی‌های خالی نشان‌دهنده چشمه‌های گرم هستند. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود جابجایی ایزوتوپی در جهت محورافقی صورت گرفته که نشان‌دهنده غنی‌شدگی چشمه‌های گرم از اکسیژن ۱۸ بر اثر برخورد با سنگ‌های دیواره است *(شکل بر اساس Craig, 1963: 17)* .

اگر عامل غنی‌شدگی δD و $\delta^{18}O$ در چشمه‌های آب گرم تفتان (با فرض اینکه منشاء جوی داشته‌اند) بر اثر حرکت آنها از درون سنگ‌های دیواره و واکنش متقابل آنها با یکدیگر می‌بود، بایستی مقدار غنی شدگی $\delta^{18}O$ خیلی بیشتر ازمقدار غنی‌شدگی δD باشد چون مقدار هیدروژن سنگ‌های آتشفشانی در مقایسه با مقدار هیدروژن آب بسیارکم بوده در نتیجه تأثیر چندانی روی مقادیر δD آب نمی‌گذارد. در عوض سنگ‌ها نسبت به آب سر شار ازاکسیژن هستند و به راحتی مقدار $\delta^{18}O$ آب بر اثر واکنش با آب تغییر می‌کند. بنابراین بر اثر واکنش متقابل آب و سنگ غالبا مقدار $\delta^{18}O$ در آب افزایش می‌یابد یعنی جابجایی فقط در امتداد محورافقی صورت می‌گیرد (شکل ۵). این امر به سه مورد بستگی دارد: الف- نسبت مقدار اکسیژن در سنگ به مقدار اکسیژن در آب؛ ب- حرارت؛ ج- ترکیب اولیه فازها؛

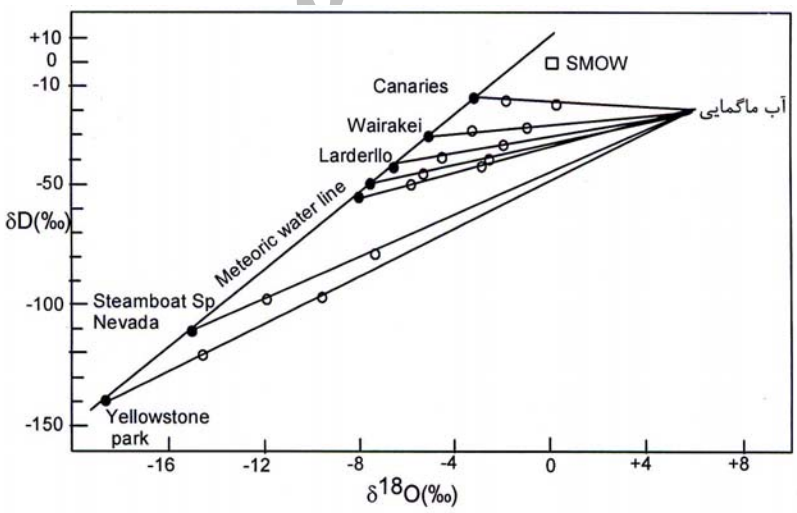
۲- اختلاط آب‌های جوی با آب‌های ماگمایی

عامل دوم برای غنی شدگی آب‌های گرم نسبت به آب‌های جوی در کوه تفتان، اختلاط آب‌های جوی زیر زمینی با آب‌های ماگمایی فرض می‌شود. در ابتدا مقدار δD برای آب‌های ماگمایی ۲۰- در نظر گرفته شد *(Craig,1963:17)*. با توجه به این مقدار و بر اساس شکل۶، مقادیر ایزوتوپی چشمه‌های آب گرم تفتان با فرض اختلاط با یک آب ماگمایی قابل توجیه است. اما بعدا مقادیر δD و $\delta^{18}O$ آب‌های ماگمایی اولیه به ترتیب ۴۰- تا۸۰- در هزار و ۵/۵+

Archive of SID

www.SID.ir

تـا ۹/۵+ در هـزار گـزارش شد *(Sheppard et al, 1969: 515)*. با توجه به مقادیر بالاترδD در چشـمه‌هـای آب گـرم تفـتان از مقادیـر δD در آب‌هـای ماگمایـی اولـیه، غنی‌شدگی δD در چشـمه‌های آب گرم تفتان بر اثر اختلاط با آب ماگمایی قابل توجیه نیست. هرچند در خیلی از آتشفشـان‌هـا مثل مراپی و کرکاتوا در اندونزی، جزیره سفید در نیوزلند و چندین آتشفشان در کامچاتکـا، غنـی‌شـدگی ایـزوتوپ‌های آب‌های ولکانیکی (δD>-40) به حضور آب ماگمایی نسـبت داده شـده است. دو دلیل برای غنی‌شدگیδD آب‌های ماگمایی در آتشفشان‌ها نسبت بـه آب‌هـای ماگمایـی اولـیه ذکرشده است *(Giggenbach,1992:495)*. دلیل اول، این پدیده مـربوط بـه آب‌زدایـی رسوباتی می‌باشد که به‌وسیله‌ی فرآیند فرورانش به زیر کشیده شده‌اند. آب آزاد شـده از ایـن رسـوبات اگـر در تشـکیل ماگمـا نقـش داشته باشند باعث δD بالاتری مـی‌شود که حدود ۳۰- در هزار است *(Giggenbach, 1992: 495)*. دلیل دوم جدا شدن فاز بخـار از مـذاب سـیلیکاته است که باعث غنی‌شدگی قابل ملاحظه‌ای از δD می‌شود بطوریکه اگـر در ماگمایـی آبی با δD ۶۰- در هزار وجود داشته باشد و حدود صفر تا چهل درصد آن را به‌صور ت بخار از دست دهد باعث تولید گازهایی خواهد شد که δD آنها نزدیک به۲۰- تا ۴۰ - در هـزارخواهد بـود. مخصوصاً که چشمه‌های اسیدی را در کوه‌های آتشفشانی نتیجه میعان گازهـای ولکانیکی در اعماق سطحی می‌دانند. این گازهای ولکانیکی در مناطق عمیق‌تر بر اثر جدایش مایع و بخار از یک سیال گرم حاصل شده‌اند.

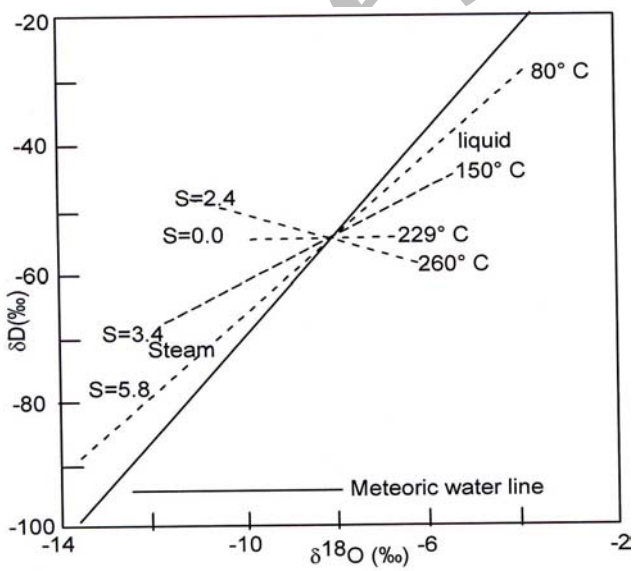


شکل۶: دایره‌های خالی برای چشمه‌های گرمی فرض شده‌اند که از اختلاط آب ماگمایی با δD حدود ۲۰- با آب‌های جوی محلی (دایره‌های توپر) در اعماق مناطق آتشفشانی منشاء گرفته‌اند(شکل بر اساس Craig, 1963: 17).

www.SID.ir

۳- تبخیرزیر زمینی

یکـی از عوامل مهم که باعث غنی‌شدگی آب‌های جوی از ایزوتوپ‌های سنگین می‌شود تبخیر اسـت. مقادیـر ایزوتوپـی آب‌هـای جوی سطحی تبخیر شده در دیاگرام اکسیژن ۱۸ در مقابل دوتـریم در امـتدا خـط آب جـوی قـرار مـی‌گـیرند (شکل۴). مقادیر ایزوتوپی آب‌های جاری سطحی درکوه تفتان نیز کاملاً منطبق با خط آب جوی است. اما همان‌طور که در شکل دیده مـی‌شـود مقادیـر ایزوتوپـی چشـمه‌های گرم تفتان بر روی خط جهانی آب جوی قرار ندارند. آب‌هـای گـرم تفتان آب‌هایی هستند که از اعماق زمین می‌آیند و با توجه به اینکه نمونه‌های گرفـته شـده از محل خروج آنها به سطح زمین است بنابراین تبخیر سطحی تأثیری بر مقادیر ایزوتوپی آنها ندارد. علاوه بر این تبخیر سطحی هرگز باعث ایجاد آب‌های اسیدی نخواهد شد. تبخـیر زیرزمینی باعث غنی‌شدگی‌هایی در مقادیر ایزوتوپی آنها می‌شود. تغییر ایزوتوپی بر اثر تبخـیر زیرزمینـی توسـط *(Giggenbach, 1971: 959)* و *(Truesdell et al, 1977: 3694)* بطور مفصل بحث شده است.



شکل ۷ مقادیر ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن بخار و مایع که از یک سیستم بسته در حرارت‌های نشان داده شده در شکل از مایعی با δD=54.0 و $\delta^{18}O$=-8.0 جدا شده‌اند.(اصلاح شده از (*Truesdell et al.,1977: 3694*).

در سیستم‌های طبیعی صعود آب گرم به سطح باعث تولید بخار در اعماقی خواهد شد که فشـار سـریعاً کاهش پیدا کند. به این پدیده جوشش زیرزمینی نیز می‌گویند. مقادیر ایزوتوپی بخـار و آب حاصـله بـه نحوه جدا شدن آنها از یکدیگر مرتبط است. این پدیده در حرارت‌های

www.SID.ir

کمتر از ۲۲۰ درجه سانتیگراد غالباً باعث غنی‌شدگی فاز مایع و خالی‌شدگی فاز بخار می‌شود (شکل۷).

بـا اسـتفاده از ایزوتوپ‌های پایدار آب و محاسبات موازنه جرمی غنی‌شدگی آب‌های جوی زیرزمینی از δD و $\delta^{18}O$ برای مناطق متعددی مشخص شده است*(Kusakabe,2001:10-4)* به نظر می‌رسد بخش عمده آب‌های زیرزمینی در زیر مخروط کوه تفتان قبل از رسیدن به سطح زمین به بخار تبدیل می‌شود و بخش کوچکی از آن به شکل آب گرم ظاهر شده است.

کانی‌سازی در کوه تفتان

وجـود چشـمه‌هـای گـرم اسیدی و بخارات گوگردی در کنار مناطق گسترده دگرسانی در کـوه تفـتان نشان‌دهنده یک میدان زمین‌گرمایی بزرگ است که از اوایل فعالیت کوه تفتان در آنجـا وجـود داشته است (*Ghasban,2004:43*؛ *بومری،۱۳۸۳:۱۵)* اخیراً تشکیل درصد بالایی از کانسـارهای طلا را از چشمه‌های گرم اسیدی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی می‌دانند که به کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون بالا یا اسید- سولفات معروفند *(Hayab et a.,1985:129; Sawkins, 1990: 52; Hedenquist et al 1996:1)* پژوهشگران ضمن حفاری جهت اکتشاف انرژی زمین گرمایی با این دسته از کانسارها مواجه شدند. این کانسارها به چشمه‌های آب گرم نسبت داده شد. مسلماً علاوه بر طلا عناصر ارزشمند دیگری نیز در این محیط‌ها تشکیل می‌شود

دماسنجی میدان زمین گرمایی تفتان

غنـی‌شـدگی ایزوتوپ‌های سنگین در آب‌های گرم بر اثر تبخیر زیرزمینی حاکی از حرارتی بیـن ۱۵۰ تـا ۲۲۹ درجـه‌ی سانتیگراد است (شکل۷) که نشان‌دهنده‌ی وجود آب‌های گرم در اعماق مناسب در کوه تفتان (از محل چشمه آب گرم تا اعماق حدود ۶۰۰ متر) می‌باشد.

ترکیـب شیمیایی آب‌های گرم تفتان بر اساس دماسنجی Na-K-Mg، در محدوده آب‌های نابـالغ قـرار مـی‌گـیرند. *(Giggenbach,1988:2749)* هرچـند چنیـن آب‌هـای نابالغـی بـرای دماسـنجی اعتـبار ندارنـد ولـی بعضـی محققـان، دماسـنجی Na-K را بـرای مناطق عمیق و منشـاء دماسـنجی K-Mg را بـرای مـناطق نـزدیک بـه محل خروج چشمه در نظر گرفته‌اند *(Gemici and Tarcan,2001:831)*.

استفاده از دماسنجی غلظت پتاسم - منیزیم در آب‌های گرم تفتان حرارتی حدود ۱۰۴ و ۱۰۸درجه را به دست می‌دهد در حالیکه با استفاده از دماسنجی غلظت Na Kدر آب‌های گرم تفـتان حرارتـی بیـن ۳۶۳ و ۳۴۵ درجـه سانتیگراد به دست می‌آید. فرمول‌های استفاده شده عبارتند از: $T(°C)=[1390/(1.75+\log(Na/K))]-273.15$ برای دماسنجی با جفت کاتیون Na-K

Archive of SID

www.SID.ir

T(°C)=[4410/(14-log(K2/Mg))]-273.1 و *(Giggenbach,1988:2749)* بـرای دماسـنجی بـا جفت کاتیون K-Mg (*Giggenbach,1988:2749*).

غضـبان نیز دماهایی تاحدود ۱۸۰ درجه سانتیگراد را برای محل منشاء چشمه‌های معدنی اطراف کوه تفتان معرفی کرده است. *(Ghasban, 2004: 43)*

بحث

همـان‌طـور کـه ذکر شد، خروج گاز و بخارات از دهانه‌های کوه تفتان،وجود چشمه‌های گرم نشـانه‌هایـی از وجـود یـک سیسـتم هـیدروترمال در اعمـاق اسـت.علاوه بر این دگرسانی‌های گسترده هیدروترمالی، وجود رگه‌های ریز بلور و مخفی بلور سیلیسی و وجود ناهنجاری‌هایی از جیوه، ارسنیک و طلا در کوه‌تفتان نیزنشان‌دهنده یک‌میدان زمین‌گرمایی فعال از گذشته‌های دور تاکـنون اسـت *(Ghasban,2004:43 و بومـری، ۱۳۸۳:۱۵)*. اگر وجود آب‌های گرم بالاتر از ۱۵۰ درجـه ثابـت شود می‌تواند در تولید الکتریسیته در منطقه قابل استفاده باشد.چون امکان سـاخت نـیروگاه بـرق در همـان محل کوه تفتان وجود دارد و انتقال برق به مناطق دور دست مشـکل نیست. علاوه بر این آب‌هایی با حرارت کمتر از ۱۵۰ درجه سانتیگراد نیز برای تأمین آب گـرم شهری ارزش دارند. متأسفانه شهرهای مصرف‌کننده آب‌های گرم کوه تفتان، همچون زاهدان و خاش، در فاصله نسبتاً دوری از آن واقع شده‌اند. بنا براین امکان استفاده از این آب‌ها به عنوان آب گرم شهری وجود ندارد چون اولاً دوری راه با عث می‌شود که دمای آب‌ها هنگام رسـیدن بـه شـهر شـدیداً کـاهش یـابد و ثانـیاً به دلیل اینکه آب‌های‌گرم تفتان کاملاً اسیدی هستند با عث خوردگی سیستم لوله کشی خواهند شد.

به نظر می‌رسد در عمقی مناسب (اعماق حدود ۶۰۰ متر از محل خروج چشمه آب گرم) آب‌های گرم با حرارت بالا(بالاتر از ۱۵۰ درجه سانتیگراد) در کوه تفتان وجود دارد. چشمه‌های گرم، دگرسانی‌های هیدروترمالی، خروج گازهای سولفوری، غلظت بالای جیوه و ارسنیک غالباً حاکی از وجود آب‌های فوق‌العاده گرم دراعماق کوه‌تفتان است.برای اطمینان و کسب اطلاعات بیشتر به حفر چاه نیاز است. بطور کلی مدل تشکیل چشمه‌های گرم در کوه تفتان را می‌توان اینطور فرض کرد که آب‌های جوی از طریق درز و شکاف، سنگ‌های نفوذپذیر آذر آواری و دودکش‌های برشی آتشفشانی به اعماق زمین نفوذ می‌کنند تا به یک منبع حرارتی می‌رسند. این منبع حرارتی احتمالاً یک مذاب سیلیکاته ماگمایی یا مواد جامد بسیار داغ است. حرارت این منبع باعث گرم شدن آب‌ها می‌شود. قابلیت انحلال کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها به وسیله آب‌های گرم نسبت به آب‌های سرد خیلی بیشتر است. علاوه بر این اسید کلریدریک، گوگرد و دیگر عناصر فرار از توده ماگما یا سنگ‌های داغ در زیر کوه تفتان خارج شده و در آب‌های گرم حل شده‌اند. به‌دلیل اینکه تراکم آب گرم کم است، در نتیجه به‌صورت جریان‌های

Archive of SID

www.SID.ir

همرفتی به‌سمت بالا حرکت می‌کند. این آب‌ها ضمن صعود به‌طرف بالا و واکنش با سنگ‌های مسیرشان از سیلیس و فلزات غنی می‌شوند. این آب‌ها ضمن صعود به جایی می‌رسند که فشار هیدروستاتیک از روی آنها برداشته می‌شود و متعاقباً جوشش اتفاق می‌افتد که باعث جدایش بخار و گازها از مایع می‌شود. از آنجا که در چشمه‌های آب گرم تفتان مقادیر فراوانی از گوگرد وجود دارد مدل بالا کاملاً قابل توجیه است.

به نظر می‌رسد که با فاصله گرفتن این آب‌های گرم از دهانه‌های تفتان آب‌های جوی سطحی وارد آب‌های ولکانیکی می‌شوند و موجب ایجادچشمه‌های معدنی سرد می‌شوند که از هر نظر حد واسط بین چشمه‌های گرم و آب‌های جاری هستند. مدل بالا برای چشمه‌های گرم به وسیله ایزوتوپ‌های پایدار آب نیز قابل توجیه است. به هر حال امروزه در کمربند بزرگ آلپ- هیمالایا، مناطق آتشفشانی کواترنری بخصوص در ترکیه منابع بزرگ انرژی زمین‌گرمایی می‌باشند *(ناصرنیا، ۱۳۶۲ : ۲۳)*.

ارتفاعات کوه تفتان تأمین‌کننده سفره‌های آب زیر زمینی زیادی در منطقه است. وجود بخارات گوگردی و تولید نهشته‌های عظیم گوگودی در این کوه، باعث شده که نه تنها چشمه‌های گرم بلکه آب‌های جاری در تفتان نیز دارای غلظت بالایی از عناصر مضر و سمی باشند. مخصوصاً آب‌های جاری ضمن گذر از نهشته‌های گوگردی بر اثر واکنش با آنها تولید اسید سولفوریک می‌کنند که باعث انحلال عناصر سنگین در آب‌ها می‌شوند. به این دلیل لازم است مطالعاتی نیز در این زمینه انجام شود تا اثرات زیست‌محیطی کوه تفتان نیز مشخص شود.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- چشمه‌های گرم تفتان فوق العاده اسیدی (pH<2) است و نسبت مقادیر عناصری چون Ca, Mg, Al, S, Na, K و Fe در آب‌های گرم به مقدار آنها در آب‌های سطحی خیلی بالا و به ترتیب حدوداً ۳۰، ۵۰، ۲۵، ۵۰۰، ۲۰، ۵ و ۳۰۰۰ برابر است.

۲- چشمه‌های آب گرم تفتان نسبت به آب‌های جوی جاری در آنجا دارای مقادیر δD و $\delta^{18}O$ بالاتری هستند.. مقادیر δD آب‌های جاری ۳۰- و ۳۵- در هزار و مقادیر $\delta^{18}O$ آنها ۵/۴- و ۶/۴ - درهزار می‌باشد. مقادیر δD چشمه‌های آبگرم ۲۵- و ۲۶- در هزار و مقادیر $\delta^{18}O$ آنها ۲- در هزار می‌باشد.

۳- علت غنی‌شدگی چشمه‌های آب گرم تفتان از مقادیر δD و $\delta^{18}O$ به دلیل تبخیر زیر زمینی است.

Archive of SID

www.SID.ir

۴- آب‌های گرم غنی از املاح و گاز در زیر استراتوولکان تفتان ضمن صعود به طرف سطح زمین به جایی می‌رسند که فشار و حرارت حاکم بر آنجا باعث جوشش آنها می‌شود و آب و گاز از هم جدا می‌گردد.

۵- وجود چشمه‌های گرم، خروج گاز و مناطق دگرسانی گسترده در کوه تفتان حاکی از میدان زمین گرمایی در کوه تفتان است که اولاً برای اکتشاف کانسارهای اپی ترمال و ثانیاً برای الکتریسته دارای اهمیت است.

۶- دماسنجی از طریق ایزوتوپ‌های پایدار و عناصر موجود در چشمه‌های گرم تفتان حاکی از حضور آب‌های با دمای بین ۱۵۰ تا ۲۲۰ درجه سانتیگراد در اعماق سطحی است.

منابع و مآخذ

۱-اخروی، رسول (۱۳۶۲): *«انرژی زمین گرمایی»*. نشریه انرژی. شماره ۱۱،

۲-بومری، محمد (۱۳۸۳): *«ژئوشیمی، پتروگرافی و نحوه تشکیل آتشفشان تفتان، جنوب شرقی ایران»*. طرح تحقیقاتی بین دانشگاهی. معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۳-دانشور، مسعود (۱۳۶۴): *«کارایی انرژی ژئوترمال در تولید برق»*. نشریه انرژی. سال سوم. شماره ۹ و ۱۰.

۴-داودی‌راد، محمدرضا (۱۳۶۴): *«ساختمان و خصوصیات زمین گرمایی»*. نشریه انرژی. سال سوم. شماره ۵ و ۶.

۵-غفوری، محمدرضا (۱۳۶۶): *«شناخت آب معدنی و چشمه‌های معدنی ایران»*. انتشارات دانشگاه تهران.

٦- ناصرنیا، هرمز (۱۳۶۲): *«گسترش نوین انرژی زمین‌گرمایی در ترکیه»*. نشریه انرژی. شماره ۱۲.

7- Craig, H (1963) The Isotopic Geochemistry of Water and Carbon in Geothermal areas. In: Tongiori E. (ed.), Nuclear Geology in Geothermal Areas, CNR, Pisa.

8- Epstin, S., and Mayda, T (1953) Variations of ^{18}O Content of Waters from Natural Sources. Geochim. Cosmochim. Acta 4.

9- Farhoudi, G. and Karig, D. E (1977) Makran of Iran and Pakistan as an active arc system. Geology 5, 11.

10- Gannser, A (1971) The Taftan volcano (Southeast Iran). Eclo. Geol. Helve. 64, 2.

11- Gemici, U. and Tarcan, G (2001) Hydrogeochemistry of the Saraycik Geothermal Area (Manisa) Western Turky, Water-Rock Interaction, Volume 2.

12- Ghasban, F(2004) Alteration and Geochemistry of Mount Taftan Geothermal Prospect Southeastern Iran. Iranian int. J. Sci. 5 (1).

13- Giggenbach,W.F(1971)Isotopic Composition of Waters of the Broadlands Geothermal field. N. Z. J. Sci., 14.

14- Giggenbach,W. F (1988) Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-k-Mg-Ca Geoindicators. Geochim. Et Cosmochim. Acta. 52.

15- Giggenbach, W. F (1992) Isotopic Shifts in Waters from Geothermal and Volcanic Systems along Convergent Plate Boundaries and their Origin. Earth Planet. Sci. Lett. 113.

Archive of SID

www.SID.ir

16- Hayab, D.O, Bethke, P.M., Heald, P. and Foley, N.K.,(1985), Geologic, Mineralogic, and Geochemical Characteristic of Volcanic - Hosted Epithermal Precious metal Deposits. Reviews in Economic Geology, V.2.
17- Hedenquist, j.w.,Izawa,E,Arribs, A. and White, N.C (1996) Epithermal Gold Deposist :Styles, Charactistice, and Exploration. Resource Geology, Special Publication. Number 1,Japan.
18- Kusakabe, M (2001) Volcanic and Hydrothermal Waters.The Textbook for the Eleventh IHP Training Course.
19- O'Neil, J. R (1986) Theoretical and Experimental Aspects of Isotopic Fractionation. Rev. Mineral., 16.
20- Sawkins, F.J (1990) Metal Deposits in Relation to Plate Tectonic, Springer Verlag.
21- Sheppard, S. M. F, Nielson, R. L. and Taylor, H. P (1969) Hydrogen and Oxygen Isotope Ratios of Clay Minerals from Porphyry Copper Deposits. Econ. Geol. 66.
22- Sheppard, S. M. F (1986) Characterization and Isotopic Variations in Natural Waters, Rev. Mineral., 16.
23- Truesdell, A. H., Nathenson, M. and Rye, R. O (1977) The effects of Subsurface Boiling and Dilution on the Isotopic Compositions of Yellowstone Thermal Waters. Jour. GeopHys. Res. 82.

Archive of SID

www.SID.ir