ژئوشیمی
سال اول، شماره اول (بهار ۱۳۹۱)

Geochemistry
Vol.1, No.1 (Spring 2012)

# ترکیب شیمیایی گازهای خروجی و فعالیت‌های پساآتشفشانی تفتان، جنوب شرق ایران

زهرا مختاری*[۱]، علی احمدی[۲]

۱- دانشجوی دکتری ژئوشیمی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- استادیار پترولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

* عهده‌دار مکاتبات: Zahra.mokhtari1985@gmail.com

دریافت مقاله: ۹۱/۴/۲۷، پذیرش مقاله: ۹۱/۸/۱۲

**چکیده**

آتشفشان تفتان واقع در جنوب شرقی ایران، روزانه مقدار قابل توجهی از گازهای آتشفشانی را در طول فعالیت‌های دودخانی (فومرولی) خود آزاد می‌کند. فعالیت‌های پساآتشفشانی در تفتان بسیار شدید است و به سه شکل دودخانی، سولفاتاری و چشمه‌های آب گرم دیده می‌شود. دودخان‌ها و سولفاتارها در مجموع گازهای خروجی از دهانه تفتان را شامل می‌شوند که درجه حرارت بالایی دارند. فعالیت‌های دودخانی باعث دگرسانی گدازه‌های قدیمی و سنگ‌های آذراواری نیز شده است. ترکیب شیمیایی آب در چشمه‌های خروجی از این آتشفشان متأثر از این گازها است و عامل اصلی آلودگی در آنها نیز به‌شمار می‌رود. گوگرد رایج‌ترین عنصر در گازهای دودخانی است و غلظت آن در یک نمونه تجزیه شیمیایی شده برابر با ۸۶۰ میلی‌گرم بر لیتر است. pH شدیداً اسیدی (۱/۶۵) در گازهای خروجی از آتشفشان تفتان، ناشی از وجود اسید سولفوریک در این گازهاست. حضور اسید سولفوریک در گازهای آتشفشانی حاکی از وجود فوگاسیته بالای اکسیژن در اتاق ماگمایی تفتان است که هورنبلندهای اوپاسیتی شده در ایگنیمبریت‌ها، داسیت‌ها، آندزیت‌ها و توف‌ها این موضوع را تایید می‌کند. غلظت نسبتاً بالای بور در گازهای خروجی از آتشفشان تفتان نشان‌دهنده حضور یک سیستم زمین‌گرمایی نسبتاً جوان در منطقه است. علاوه بر این گازهای ماگمایی تفتان حاوی ۰/۶۷۲ میلی‌گرم بر لیتر ارسنیک می‌باشند. بررسی نمودار Eh-pH برای عناصر گوگرد و ارسنیک مشخص می‌کند که آنیون $HSO_4^-$ و As (III) به ترتیب فراوان‌ترین گونه این دو عنصر در گازهای خروجی از تفتان است. As (III) خطرناک‌ترین گونه ارسنیک از لحاظ زیست‌محیطی است.

**واژه‌های کلیدی:** آتشفشان تفتان، گاز آتشفشانی، چشمه‌ی آب گرم، هیدروژئوشیمی

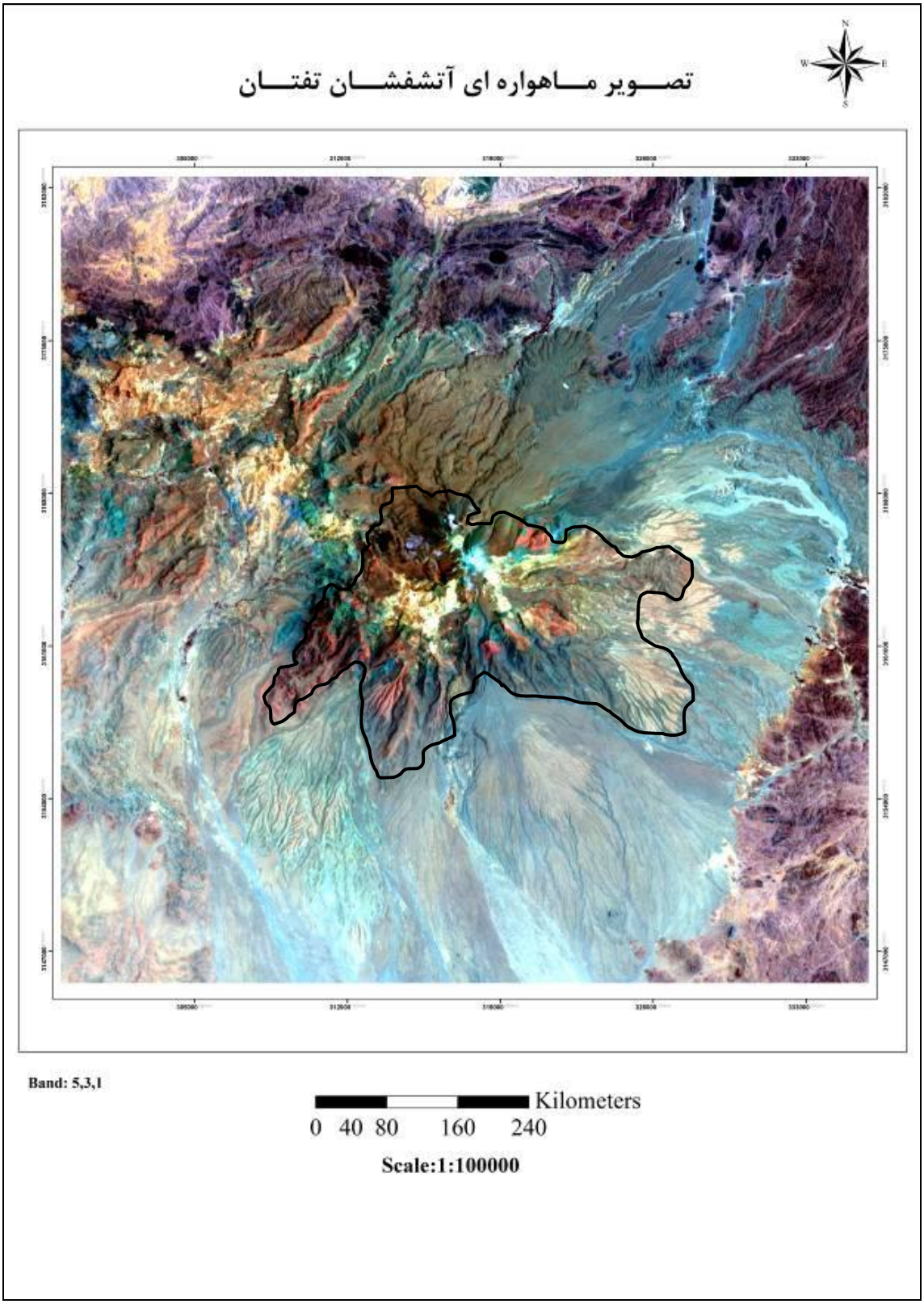
## ۱- مقدمه

آتشفشان‌ها و فعالیت‌های مربوطه آنها تأثیرات جهانی (global) قابل توجهی بر محیط زیست دارند (قربانی، ۱۳۸۲)، اما تأثیرات محلی آنها چشمگیرتر است. تفتان یک آتشفشان مرکب لایه‌ای (استراتوولکان) است که از میوسن پسین شروع به فعالیت کرده (بیابانگرد، ۱۳۸۷) و هم اکنون در مرحله فعالیت‌های پساآتشفشانی است. شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای آتشفشان تفتان را با مقیاس ترسیمی نشان می‌دهد که از ترکیب باندهای ۵، ۳، ۱ تصاویر $ETM^+$ به شماره گذر ۱۵۷ و ردیف ۴۰ ماهواره لندست در تاریخ ۲۰۰۴ با استفاده از نرم افزار ENVI-4 به دست آمده است. همان طور که در تصویر دیده می‌شود، رنگ زرد در اطراف منافذ خروجی دودخان‌ها در نتیجه خروج گوگرد و رسوب آن است.

در نتیجه این فعالیت‌های دودخانی مقادیر زیادی از مواد فرار و گازهای ماگمایی مانند $H_2O$، $CO_2$، $SO_2$ و $H_2S$ در مدت زمانی کوتاه به سطح زمین آورده می‌شوند. این مواد که از اعماق زمین منشا گرفته‌اند، با افزوده شدن به محیط‌های جوی و نیز محیط‌های آبی - خاکی زمینه‌های پیدایش خطرات زیست محیطی بالقوه را فراهم می‌آورند، زیرا در کوتاه مدت بر اتمسفر و در دراز مدت بر منابع آب و خاک که دو رکن اساسی رشد جمعیت‌های انسانی هستند، تأثیر می‌گذارند. مهم‌ترین فرض در این مقاله این است که تفتان به عنوان فعال‌ترین مرکز آتشفشانی در ایران، به دلیل فعالیت‌های دودخانی، منبع بالقوه آلودگی در منطقه است. خروج گازها و آمیختگی آنها با آب‌های سطحی و زیرزمینی باعث آلوده شدن منابع آب می‌شود. چشمه‌های متعددی در دامنه‌های این آتشفشان در جریان هستند که بعضی از آنها منشا ماگمایی (juvenile) دارند (Shakeri et al, 2008). pH آب در بیشتر چشمه‌های معدنی و آب گرم تفتان بسیار اسیدی است. این امر در نتیجه اثر متقابل بین گاز و آب (water – gas interaction) حاصل می‌شود. غلظت برخی از عناصر در این چشمه‌ها بسیار بالاست، به گونه‌ای که در اطراف برخی از آنها شاهد رسوب گوگرد هستیم (شکل ۲). این رسوبات از چشمه‌های مختلف در سال ۹۰ توسط کریمی تجزیه و بررسی شده‌اند.

تراکم جمعیت در اطراف آتشفشان‌ها به دلیل رونق داشتن کشاورزی از یک سو و آلودگی خاک‌ها و آب‌های منطقه بر اثر خروج گازهای آتشفشانی از سوی دیگر اهمیت مطالعه این منطقه را روشن می‌سازد. با در نظر گرفتن این مطالب و همچنین با توجه به اینکه تاکنون هیچ داده‌ای از ترکیب شیمیایی گازهای خروجی از آتشفشان تفتان وجود ندارد، مطالعه ترکیب شیمیایی گازهای خروجی از این آتشفشان بسیار مهم جلوه می‌نماید.

Archive of SID
www.SID.ir




شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای از آتشفشان تفتان حاصل از ترکیب باند های ۵، ۳، ۱ ماهواره لندست ۷.

www.SID.ir

## ۲- زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی آتشفشان تفتان

آتشفشان تفتان در ۵۰ کیلومتری شمال شرق شهر خاش و در حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب- جنوب شرق زاهدان، جنوب شرق ایران واقع است. موقعیت این آتشفشان در شکل ۳ نشان داده شده است.

فعالیت‌های گسترده آتشفشانی از ترکیه تا بلوچستان پاکستان، از کرتاسه تا کواترنری ادامه داشته (Glennie, 2000) و سبب تشکیل آتشفشان‌های جوان کواترنری چون آرارات در ترکیه (مجاور مرز ایران)، سهند، سبلان، دماوند، بزمان و تفتان در ایران و کوه سلطان در پاکستان (مجاور مرز ایران) شده است (امامی، ۱۳۷۹؛ درویش‌زاده، ۱۳۶۵؛ Allenbach, 1966). این آتشفشان‌ها در کمربند ساختاری عظیم تتیس قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد که این کمربند محل برخورد دو ابر قاره قدیمی اوراسیا و گندوانا باشد. در ایران این کمربند به زون‌های زمین‌ساختی متعددی تقسیم شده است (stocklin, 1968). کوه‌های آتشفشانی تفتان و بزمان در ایران و کوه سلطان در پاکستان خود یک کمان آتشفشانی مستقلی را با نام کمان آتشفشانی بلوچستان می‌سازند (بومری، ۱۳۸۳). آتشفشان تفتان همانند آتشفشان‌های بزمان و کوه سلطان، محصول فرورانش پوسته اقیانوسی عمان به زیر بلوک‌های لوت و هلمند از محل زون مکران ایران و پاکستان است (Farhoudi and Karig, 1977). تفتان دارای دو قله اصلی است، یکی در شمال غرب که مرتفع‌تر است و نرکوه نام دارد و دیگری در جنوب شرق قرار دارد که ارتفاع کمتری داشته، مادرکوه یا تفتان نامیده می‌شود. این دو کوه به وسیله یک بخش زین مانند باریک به هم متصل شده‌اند (Gansser, A., 1971) (شکل ۴). قله جنوب شرقی تا اندازه‌ای شکل مخروطی خود را حفظ کرده و به وسیله جریان‌های ضخیم و جوان‌تر گدازه پوشیده شده است (معین وزیری و امین سبحانی، ۱۹۷۷).

محصولات آتشفشانی تفتان شامل گدازه و سنگ‌های آذرآواری است که آذرآواری‌ها شامل نهشته‌های ریزشی و جریانی هستند. سنگ‌های آتشفشانی تفتان شامل گدازه‌ها و توف‌های به شدت دگرسان شده، سنگ‌های آذرآواری و لاهار مانند است و تنوعی از گدازه‌های آندزیتی- داسیتی و ریولیتی و حتی بازالت در تناوب با آنها دیده می‌شود (بومری، ۱۳۸۳). واحدهای چینه‌ای موجود در منطقه اطراف تفتان عبارتند از رخساره‌های رسوبی کربناتی- آتشفشانی با سن مزوزوییک و مجموعه به شدت تکتونیزه آمیزه رنگین که حاوی بلوک‌هایی از واحدی با سن کرتاسه پسین است. در ائوسن رخساره‌های رسوبی عمدتاً نهشته‌های تخریبی-کربناته فلیش‌گونه به همراه سنگ‌های آتشفشانی است که در بخش‌های گوناگون منطقه پراکنده شده‌اند، و در پلیوسن شامل نهشته‌های کنگلومرایی ماسه‌سنگی و مارن است. در بخش‌های جنوب شرقی منطقه واحدهای مذکور به طور گسترده توسط سنگ‌های آتشفشانی کوه تفتان پوشیده شده است که جوان‌ترین واحدهای سنگی در منطقه را تشکیل می‌دهد (مهرپرتو و همکاران، ۱۳۸۲). جزئیات چینه‌شناسی آتشفشان تفتان توسط بیابانگرد، (۱۳۸۷) مورد مطالعه قرار گرفته است.

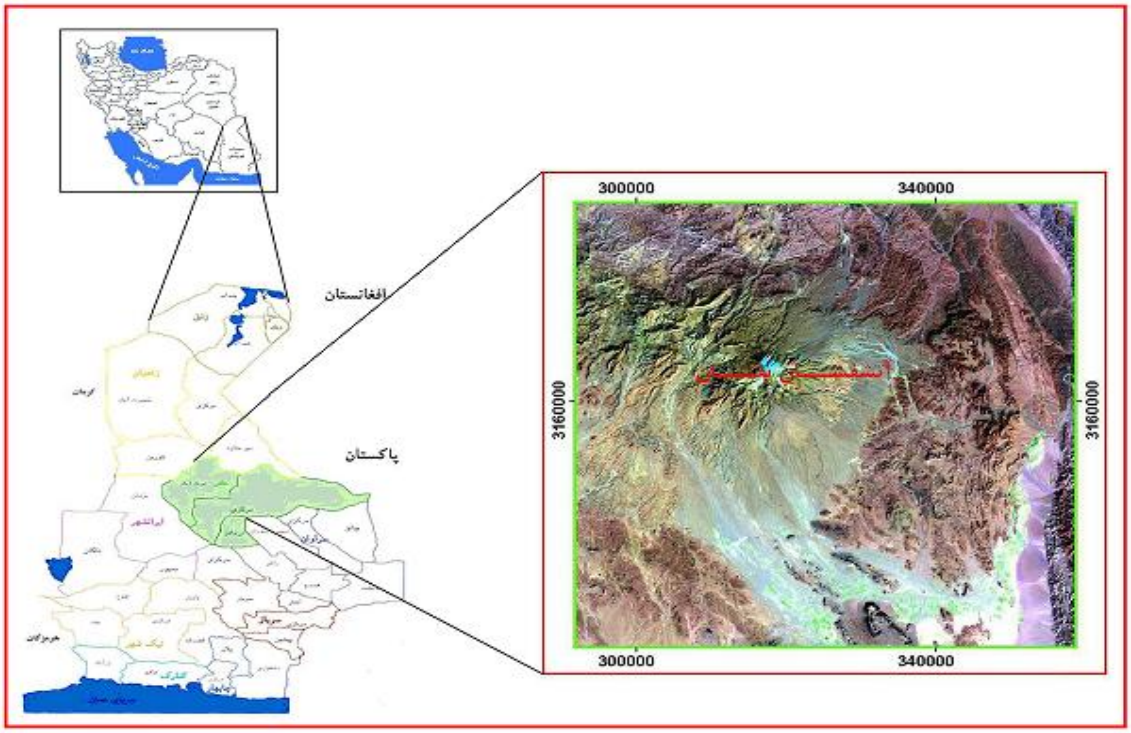
شکل ۲- رسوب گوگرد در اطراف چشمه $SP_2$ از آتشفشان تفتان.

## ۳- روش تحقیق

تعیین ترکیب شیمیایی گازهای آتشفشانی و غلظت ذرات در ستون‌های آتشفشانی کار بسیار مشکلی است، چرا که مشاهده مستقیم و نمونه‌برداری از بخارهای آتشفشانی با مخاطرات زیادی همراه است. علاوه بر این گازهای آتشفشانی دارای دمای بسیار بالایی هستند و ترکیب‌های مختلف از گازهای آتشفشانی در این دما با یکدیگر به تعادل رسیده‌اند. زمانی که این ترکیب‌ها به منظور نمونه‌برداری در صحرا تقطیر می‌شوند تا هنگامی که نمونه مورد نظر برای تجزیه به آزمایشگاه فرستاده می‌شود، دمای خود را از دست می‌دهد و تعادل شیمیایی بین گونه‌های مختلف گازی در این نمونه از بین می‌رود. از این رو نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمی‌تواند نشان‌دهنده غلظت واقعی اجزای تشکیل دهنده گازهای آتشفشانی باشد. همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، در این مطالعه یک نمونه از گازهای خروجی از آتشفشان تفتان توسط یک دستگاه تقطیر ساده، تقطیر شده است. ترکیب شیمیایی این نمونه به روش ICP-AES در آزمایشگاه ALS-Chemex کشور جمهوری چک (پراگ) تعیین شده است. جدول ۱ نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی گازهای خروجی از تفتان را نشان می‌دهد که با دقت ±۱۰٪ تجزیه شده اند.

Archive of SID

www.SID.ir




شکل ۳- موقعیت آتشفشان تفتان.

شکل ۴- نمایی از آتشفشان تفتان (دید به سمت شمال).

www.SID.ir

شکل ۵- نمونه‌برداری از گازهای خروجی از آتشفشان تفتان.

شکل ۶- فعالیت‌های دودخانی در آتشفشان تفتان.

## ۴- بحث و بررسی

### ۴-۱- فعالیت‌های پساآتشفشانی در آتشفشان تفتان

همان گونه که قبلاً گفته شد، تفتان فعال‌ترین مرکز آتشفشانی در ایران است. زمین‌شناسی تفتان نشان می‌دهد که فعالیت آتشفشانی آن از سمت شمال‌غربی تفتان شروع شده و سپس به سمت جنوب غرب جابه‌جا شده و در نهایت به سمت شرق، جایی که در حال حاضر دو مرکز (قله) فعال کنونی آتشفشان تفتان در آن واقع هستند، منحرف شده است (Gansser, 1971). زمان دقیق هر یک از این فعالیت‌های آتشفشانی و زمان معین هر دوره آتشفشانی مشخص نیست. بر این اساس برخی از جریان‌های گدازه‌ای تفتان می‌توانند شاهدی بر حوادث زمان‌های گذشته باشند. فعالیت‌های پساآتشفشانی چه در گذشته و چه حال حاضر در تفتان بسیار شدید است (شکل ۶). بر این اساس فوران مجدد آن در آینده‌ای نزدیک را نمی‌توان مستقیماً رد کرد. فعالیت‌های دودخانی در تفتان به سه شکل دودخانی، سولفاتارا و چشمه‌های آب گرم وجود دارند. ظاهراً این فعالیت‌ها در تفتان با گذشت زمان تغییر کرده‌اند. مشاهدات محققان در طول ۱۵ سال اخیر نشان داده است که نوسانات در شدت فعالیت‌های دودخانی فصلی هستند، چرا که برخی از پارامترها مانند فشار هوا، رطوبت، دما و تغییرات آب و هوایی بر شدت انتشار بخارهای آتشفشانی مؤثر هستند. با توجه به اینکه نوسانات فصلی هستند، آب‌های جوی ممکن است اصلی‌ترین نقش را در تشکیل این بخارها داشته باشند. فروپاشی ارتفاعات در برخی از مراکز، اثرات فعالیت‌های دودخانی هستند، زیرا این فروپاشی‌ها می‌تواند نتیجه توقف و یا حتی کاهش فعالیت‌های دودخانی باشند.

#### ۴-۱-۱- دودخان‌ها و سولفاتاراها

دودخان‌ها و سولفاتاراها در گازهای آتشفشانی شامل بخار آب همراه با $CO_2$، $SO_2$، $H_2S$، $H_3BO_3$، $NH_3$، $CH_4$ و $H_2$ می‌شوند. همچنین این دودخان‌ها ممکن است حاوی گازهای سمی آتشفشانی مانند HF، $BO_3$، CO و CN باشند (قربانی، ۱۳۸۲). دودخان‌ها و سولفاتاراها در مجموع گازهای خروجی از آتشفشان تفتان را شامل می‌شوند که از دهانه خارج می‌شوند و دمای بالایی دارند. سولفاتاراها در تفتان حاوی بخار آب و گازهای گوگردی هستند. دمای آنها حداکثر به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این دودخان‌ها در واقع همان گازهای خروجی هستند که می‌توان آنها را از فاصله دور از دهانه تفتان تشخیص داد. فعالیت‌های دودخانی از نوع سولفاتارا در بخش‌های متعددی در سمت شرقی دهانه جوان در دامنه‌های آتشفشان وجود دارد و فرایندهای گرمابی مقادیر زیادی گوگرد را بر جای گذاشته‌اند. خود دهانه نیز مجراهای دودخانی مجزا دارد، که یکی از آنها فعال‌تر است. در دیگر دهانه‌ها فعالیت‌های دودخانی از بین رفته، به وضوح مشخص هستند. در جوان‌ترین دهانه، مجرایی با فعالیت‌های دودخانی شدید و همراه با صدا وجود دارد. همچنین مقادیر قابل‌توجهی گوگرد در اطراف دیگر دهانه‌های قدیمی نیز موجود است. فعالیت‌های دودخانی باعث دگرسان شدن گدازه‌های قدیمی و سنگ‌های آذرآواری می‌شوند. گاه ممکن است گازهای مفید و با ارزش اقتصادی خاصی مانند اسید بوریک با گاز-های آتشفشانی همراه باشند (قربانی، ۱۳۸۲ و Giggenbach & Goguel, 1989). وجود بور در گازهای خروجی از آتشفشان تفتان (جدول ۱) می‌تواند نشان‌دهنده حضور یک سامانه زمین‌گرمایی نسبتاً جوان در منطقه باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

### ۴-۱-۲- چشمه‌های آب گرم

در بخش شرقی تفتان در ارتفاعات پایین تر دهانه‌های فرو ریخته شده و جایی که گدازه‌ها پایان یافته‌اند، چشمه آب گرم سنگان فعال است که از توف‌ها خارج می‌شود. دمای آب آن حدود ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد است. گوگرد خالص و مواد گوگرددار در اطراف چشمه گسترش یافته‌اند. این مواد که نسبتاً به خوبی متبلور شده‌اند، سفید تا نارنجی روشن هستند. چشمه‌های کوچکی در ارتفاعات بالاتر بخش‌های شرقی آتشفشان وجود دارد که توسط بادیه نشینان محلی گزارش شده‌اند (Gansser,1971). به گفته این افراد، این چشمه‌های داغ پیش از این هرگز وجود نداشته‌اند، و در سال ۱۹۸۵ پس از یک فوران آبفشان مانند ( geyser-like eruption) تشکیل شده‌اند. علاوه بر این یک چشمه آب گرم دیگر در ارتفاع پایین‌تر و در نزدیکی پناهگاه وجود دارد که چشمه آب گرم جانپناه نامیده می‌شود. این چشمه از میان سنگ‌های آندزیتی خارج می‌شود و دمای آب در این چشمه بین ۳۵ تا ۴۰ درجه است. تبلور گوگرد نیز در اطراف این چشمه جالب توجه می‌باشد (شکل ۷).

شکل ۷- تبلور گوگرد در اطراف چشمه آبگرم تفتان.

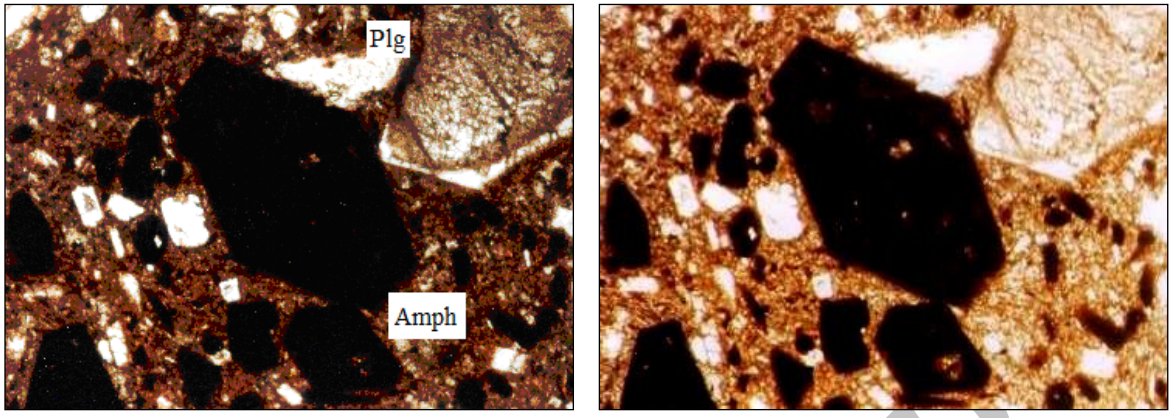
### ۴-۲- ترکیب شیمیایی گازهای خروجی از آتشفشان تفتان

نتایج حاصل از تجزیه نمونه گاز تقطیر شده از دهانه آتشفشان تفتان توسط دستگاه ICP-AES در جدول ۱ ارائه شده است. دمای این گاز در هنگام نمونه‌برداری بین ۷۰ – ۸۵ درجه سانتی‌گراد و pH آن ۱/۶۵ تعیین شده است. همان‌طور که داده‌ها در جدول نشان می‌دهد، غلظت عنصر گوگرد نسبت به دیگر عناصر فراوانی قابل ملاحظه‌ای دارد. علاوه بر این، غلظت عناصر خطرناک زیست‌محیطی مانند ارسنیک نیز ۰/۶۷۲ میلی‌گرم بر لیتر است. pH بسیار اسیدی حاکی از حضور ترکیب $H_2SO_4$ در گازهای آتشفشانی تفتان است. حضور این ترکیب در گازهای خروجی گویای فوگاسیته بالای اکسیژن در انباشتگاه ماگمایی تفتان است. وجود این چنین فوگاسیته بالایی از اکسیژن برای ماگماهای آندزیتی دور از انتظار است که این امر از دو منظر قابل توجیه می‌باشد. طی تفریق یک ماگمای بازالتی و ایجاد سنگ‌های حدواسط و اسیدی‌تر از آن مانند آندزیت و داسیت، میزان $SiO_2$ در ماگما افزایش می‌یابد. ماگماهای حدواسط و اسیدی نسبت به ماگماهای بازالتی، گاز بیشتری دارند (Schmincke, H.-U., 2006). هر چه مقدار گاز در ماگما افزایش یابد، فوگاسیته اکسیژن نیز بالا می‌رود و شرایط اکسنده در انباشتگاه ماگمایی حاکم می‌شود. اگر این گاز در انباشتگاه ماگمایی باقی بماند، باعث اکسایش کانی‌ها می‌شود. از جمله کانی‌هایی که به اکسایش حساس هستند، هورنبلند و بیوتیت است، که طی دگرسانی دوتریک به اوپاسیت تبدیل می‌شود. هورنبلندهای اوپاسیتی شده در مقاطع نازک در ایگنیمبریت‌های تفتان شاهدی بر فوگاسیته بالای اکسیژن در انباشتگاه ماگمایی هستند (شکل ۸). عامل بعدی در افزایش فوگاسیته انباشتگاه ماگمایی تفتان نوع پی‌سنگ تشکیل‌دهنده آن است. پی‌سنگ آتشفشان تفتان سنگ‌های فلیشی است. این سنگ‌ها، از دسته سنگ‌های شکل پذیر می‌باشند. ماگمایی که در این واحدهای سنگی تشکیل می‌شود، به دلیل شکل‌پذیر بودن آنها قادر به خارج شدن از آن نمی‌باشند. هرچه که انباشتگاه ماگمایی از پایین نیز تغذیه شود، سنگ‌های فلیشی باز در برابر این اعمال فشار مقاومت کرده و شکسته نمی‌شوند. اعمال فشار زیاد بر روی این سنگ‌ها فقط تا حد زیادی باعث دگرشکلی و چین خوردگی آنها می‌شود. بنابراین گازها و سیالات ماگمایی قادر به خروج از انباشتگاه ماگمایی نمی‌باشند و در نتیجه فوگاسیته گاز اکسیژن در آنجا افزایش می‌یابد.

همان‌طور که داده‌ها در جدول ۱ نشان می‌دهد، گوگرد بیش از ۹۰٪ ترکیب شیمیایی گازهای خروجی از تفتان را به خود اختصاص می‌دهد. غلظت قابل توجه از گوگرد در گازهای خروجی از یک سو، و بالا بودن فوگاسیته گاز اکسیژن از سوی دیگر باعث اکسید شدن این عنصر به $SO_2$ در گازهای خروجی از آتشفشان می‌شود. دی اکسید گوگرد نیز در اثر واکنش با آب تشکیل اسید سولفوریک می‌دهد. واکنش‌های متقابل بین گاز و آب منجر به اسیدی شدن چشمه‌ها و در بعضی از موارد گرم شدن آنها می‌گردد. اسید سولفوریک نیز یک اسید قوی دو پروتونی در طبیعت است. این عامل همراه با دمای بالا در چشمه‌های آب گرم باعث افزایش آهنگ واکنش‌های بین آب و سنگ می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی گازها و آب‌های تفتان مشخص می‌شود که غلظت برخی از عناصر محلول در این آبها به‌ویژه عناصر لیتوفیل آن در نتیجه تأثیر این گازها و کاهش pH آب به شدت افزایش یافته است. لذا، این واکنش‌ها عامل اصلی آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی در مجاورت تفتان محسوب می‌شوند.

Archive of SID

www.SID.ir




شکل ۸- مقطع میکروسکوپی از ایگنیمبریت با آمفیبول‌های اپاسیتی شده، نور پلاریزه طبیعی و پلاریزه قطبی، بزرگنمایی 10x.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی گازهای خارج شده از آتشفشان تفتان (برحسب میلی‌گرم / لیتر).

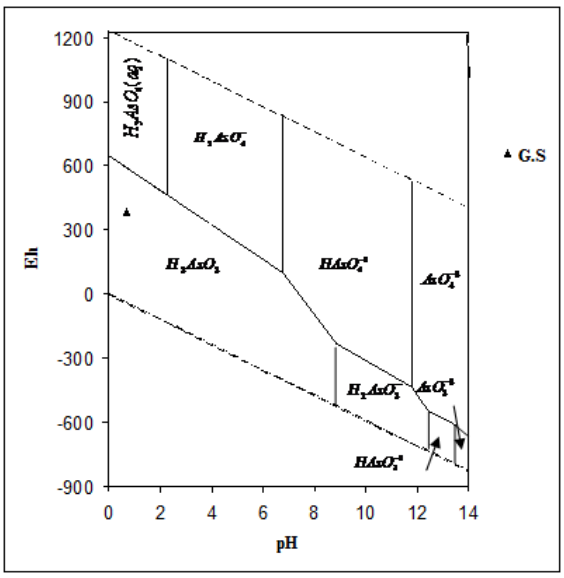
| عنصر | G.S | عنصر | G.S |
|---|---|---|---|
| Ca | ۰/۰۰۵۴ | Cr | ۹/۳۱ |
| Na | ۰/۰۰۶۴ | Cu | ۲/۴۹ |
| Mg | ۰/۰۶۱۲ | Pb | ۱/۶۲ |
| K | ۰/۰۹۵۶ | Mn | ۱۵ |
| Al | ۰/۰۰۰۲ | Hg | ۶/۴۴ |
| Fe | ۰/۰۱۲۷ | Ni | ۳/۲۰ |
| As | ۳/۴۶ | P | ۰/۶۷۲ |
| Sb | ۰/۰۵۳۴ | Sr | ۰/۰۱۲ |
| Ba | ۰/۰۱۷ | Te | ۰/۱۰۹ |
| B | ۰/۱۱۸ | Ti | ۴۰/۵ |
| Cd | ۰/۰۰۵۱ | V | ۰/۰۰۲۱۲ |
| Si | ۰/۰۳۵۲ | Zn | ۵/۹۴ |
| S | ۰/۰۰۱۵ | Zr | ۸۶۰ |

## ۴-۳- گونه‌های گوگرد و ارسنیک در گازهای خروجی از تفتان

همان طور که در بخش‌های بالا عنوان شد، گوگرد از مهم‌ترین عناصر خروجی از تفتان است که رسوب آن در اطراف دهانه اصلی و دهانه‌های فرعی خروج گاز و همچنین چشمه‌های خروجی آتشفشان به فراوانی قابل مشاهده است. پس از گوگرد، غلظت عنصر ارسنیک به عنوان یک عنصر سمی در گازهای تفتان قابل توجه است. ارسنیک یکی از مخاطرات زیست‌محیطی است، به طوری که حتی غلظت‌های اندک آن نیز اثر سمی خود را بر جای می‌گذارد (Hopenhayn and et al.,1996 & Smedley and et al.,1996) غلظت ارسنیک در گازهای خروجی تفتان ۰/۶۷۲ میلی گرم بر لیتر است که این مقدار بیش از ۱۳ برابر پایین‌ترین حد تعیین شده برای مقدار این عنصر در آب آشامیدنی است. غلظت قابل توجه این عنصر در گازهای خروجی تفتان به احتمال زیاد حاکی از منشأ ماگمایی آن است. شیمی ارسنیک به دلیل وجود حالت‌های اکسایشی متعدد آن در محیط زیست بسیار پیچیده است. در بیشتر موارد این عنصر در حالت $As^{+3}$ یا $As^{+5}$ به ترتیب صورت ترکیب ارسنیت ($H_3AsO_3$) و یا ارسنات ($H_2AsO_4^-/HAsO_4^{2-}$) در محیط حضور دارد. علاوه بر این، ارسنیک به صورت جامد As (V) نیز در محیط حضور دارد که از لحاظ کمی دارای اهمیت نیست. رایج‌ترین حالت‌های آلی این عنصر دی‌متیل‌ارسنیک اسید ((DMAA, $(CH_3)_2$ AsO(OH)) و منومتیل‌ارسنیک اسید ($MMAA,CH_3AsO(OH)_2$) است (Smedley et al., 1996). ارسنیک (+۳) ۲۵ تا ۶۰ بار نسبت به ارسنیک ۵+ و چند صد بار نسبت به ارسنیک آلی خطرناک‌تر است (Morrison, 1989). به‌رغم اختلاف درجه سمیت گونه‌های مختلف ارسنیک، تمایزی بین این گونه‌ها در استانداردهای کیفیت آب وجود ندارد. از این رو شناخت گونه‌های مختلف گوگرد و ارسنیک در محیط‌های طبیعی نیز ضروری است. Eh و pH محیط، تعیین‌کننده گونه غالب این دو عنصر در محیط است. با توجه به این مسئله و همچنین غلظت این عناصر در جدول شماره ۱ می‌توان به این مهم دست یافت. شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودار Eh-pH پایداری گونه‌های مختلف برای عنصر ارسنیک و گوگرد را نشان می‌دهد. خطوط نقطه چین در این دو شکل محدوده‌های پایداری آب در طبیعت را مشخص می‌کند.

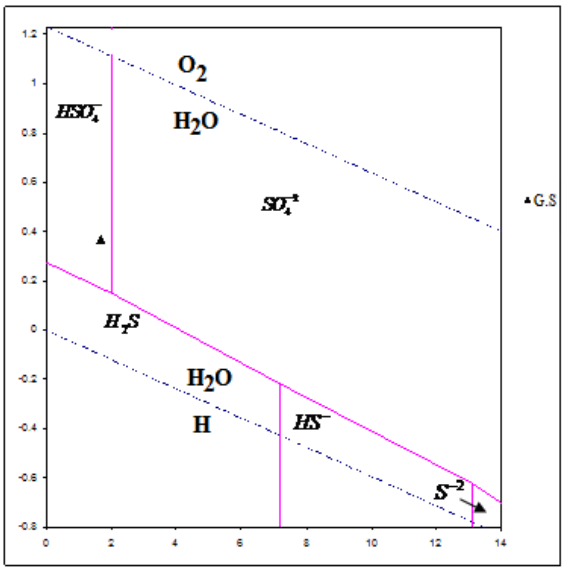
Archive of SID

www.SID.ir




شکل ۹- نمودار Eh-pH پایداری گونه‌های مختلف ارسنیک.

همان طور در شکل ۹ نشان داده شده است، ارسنیک در نمونه گاز تفتان به صورت As (+3) و ترکیب ارسنیت حضور دارد. همان طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، این گونه از لحاظ زیست‌محیطی بسیار خطرناک است. غلظت قابل ملاحظه این عنصر در گازهای خروجی تفتان، تهدیدی برای منابع آب و خاک منطقه به شمار می‌رود و از این رو مطالعات بیشتری را در این زمینه می‌طلبد. گوگرد در ماگماها به صورت سولفید و سولفات حضور دارد، اما در محیط آبی می‌تواند به صورت ترکیب‌های مختلفی ظاهر شود (Albarede, 2003). گاز گوگرد حدوداً بین ۲ تا ۳۰٪ از حجم گازهای خروجی از یک آتشفشان را به خود اختصاص می‌دهد (Schmincke, H - U., 2006). رفتار پیچیده گوگرد در ماگما را می‌توان در نتیجه ظرفیت‌های متعدد این عنصر در دماهای مختلف دانست. فراوان‌ترین گونه‌های S در گازهای ماگمایی $SO_2$ و سولفید هیدروژن ($H_2S$) هستند. انحلال‌پذیری و مقدار نسبی $SO_2$ و $H_2S$ به میزان زیادی وابسته به ترکیب و درجه اکسایش یک ماگما است (Gerlach, 1986 & Schminke, 2006). شکل ۱۰ نیز نمودار Eh-pH پایداری گونه‌های مختلف گوگرد را نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده است، گونه غالب گوگردی در گازهای خروجی از تفتان یون $HSO_4^-$ و علت آن pH بسیار پایین این بخارهاست. غلظت این عنصر در محیط تحت تأثیر تغییر در اسیدیته و دما با دور شدن از دهانه کاهش یافته است. این امر ته‌نشینی گوگرد به صورت عنصری و یا ترکیب‌هایی مانند ژیپس و پیروتیت در اطراف چشمه‌ها را منجر شده است.




شکل ۱۰- نمودار Eh-pH پایداری گونه‌های مختلف گوگرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

آتشفشان تفتان واقع در جنوب شرق ایران، مقدار قابل توجهی گازهای آتشفشانی را در طول فعالیت‌های دودخانی خود آزاد می‌کند. با توجه به مطالب ذکر شده در رابطه با ترکیب شیمیایی گازهای خروجی از آتشفشان تفتان نتایج زیر به دست آمده است:

فعالیت‌های آتشفشانی در تفتان از نوع سولفاتارا بوده و فرایندهای گرمابی مقدار زیادی گوگرد بر جای گذاشته‌اند. pH بسیار اسیدی گازهای تفتان حاکی از حضور ترکیب $H_2SO_4$ در این بخارهاست. حضور این ترکیب در گازهای خروجی دال بر فوگاسیته بالای اکسیژن در اتاق ماگمایی تفتان می‌باشد. هورنبلندهای اوپاسیتی شده در مقاطع نازک در ایگنیمبریت‌های تفتان شاهدی بر این مدعا است. غلظت نسبتاً بالای بور در گازهای خروجی از آتشفشان تفتان نشان دهنده حضور یک سیستم زمین‌گرمایی نسبتاً جوان در منطقه است. گوگرد بیش از ۹۰٪ ترکیب شیمیایی گازهای خروجی از تفتان را به خود اختصاص می‌دهد. توده‌های حجیم از گوگرد متبلور شده در اطراف آتشفشان به‌ویژه اطراف قله در حال حاضر فراوان است. غلظت قابل توجه از گوگرد در گازهای خروجی از یک سو و بالا بودن فوگاسیته گاز اکسیژن از سوی دیگر باعث اکسید شدن این عنصر به $SO_2$ در گازهای خروجی از آتشفشان می‌شود. دی اکسید گوگرد نیز در اثر واکنش با آب تشکیل اسید سولفوریک می‌دهد. واکنش‌های متقابل بین گاز و آب منجر به اسیدی شدن چشمه‌ها و در بعضی از موارد گرم شدن آنها می‌گردد. لذا، این واکنش‌ها عامل اصلی آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی در مجاورت تفتان محسوب می‌شوند و مطالعات بیشتری در این زمینه را می‌طلبند. ارسنیک از مهم‌ترین عناصر با منشا ماگمایی در

Archive of SID

www.SID.ir

بخارهای خارج شده از آتشفشان تفتان و از لحاظ زیست‌محیطی عنصری خطرناک است. غلظت قابل توجه این عنصر در گازهای خروجی تفتان حاکی از منشأ ماگمایی آن می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام شده در رابطه با ارسنیک در منطقه مورد مطالعه مشخص شده است که مهم‌ترین ترکیب محلول این عنصر در گازهای تفتان به صورت ارسنیت است که در آن ارسنیک به صورت As (+3)است. این گونه، خطرناک‌ترین گونه ارسنیک از لحاظ زیست محیطی به شمار می‌آید.

## مراجع


- امامی، م.، ۱۳۷۹، "ماگماتیسم در ایران" سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۱۸: صفحه ۸۲-۸۶.

- بومری، م.، ۱۳۸۳، "ژئوشیمی، پتروگرافی و نحوه‌ی تشکیل آتشفشان تفتان، جنوب شرقی ایران" طرح تحقیقاتی بین دانشگاهی، معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۴ صفحه.

- بیابانگرد، ح.، ۱۳۸۷، "پتروگرافی، ژئوشیمی، ژئوکرنولوژی و نحوه‌ی فعالیت آتشفشانی آتشفشان تفتان واقع در کمربند مکران، استان سیستان و بلوچستان" رساله‌ی دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صفحه ۱-۵۶.

- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۶۵، "اصول آتشفشان‌شناسی" انتشارات دانشگاه تهران، ۸۹ صفحه.

- قربانی، م. ،۱۳۸۲، "مبانی آتشفشان‌شناسی با نگرشی بر آتشفشان‌های ایران" انتشارات آرین زمین، ۲۰۰ صفحه.

- کریمی، ا.، ۱۳۹۰، "ژئوشیمی رسوبات چشمه‌های معدنی آتشفشان تفتان" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زاهدان، ۱۲۰ صفحه.

- معین وزیری، ح.، امین سبحانی، ا.، ۱۹۷۷، "آتشفشان تفتان" انتشارات دانشگاه تربیت معلم، ۳۱ صفحه.

- مهرپرتو، م.، پادیار، ف.، ۱۳۸۲، "شرح نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تفتان" سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

**-Albarede, F., 2003,** "Geochemistry", *AnIntroduction, Cambridge University Press, Cambridge (uk), P.123-202.*

**-Allenbach, p., 1966,** "Geologieund petrologiedes Damavand undseiner Umgeburg (Zentral-Elburz) Iran", *Mitt. Geol. Inst.E.T.H.Zurich, N.F., 63:P.1-144.*

**-Farhoudi, G., Karig, D. E., 1977,** "Makran of Iran and Pakistan as an active arc system*", Geology 5, P.11.*

**-Gansser, A., 1971,** "The Taftan volcano (SE Iran)", *Eclogue Geol, HELV., CHE., 1971, VOL. 64, NUM. 00 02, P.319- 334.*

**-Glennie, K. W., 2000,** "Cretaceous tectonic evolution of Arabia eastern plate margin of two oceanic, in the Middle East models of Jurassic/ Cretaceous carbonates system", *P.414.*

**-Gerlach, T. M., Casadevall, T. J., 1986,** "Fumarole emissions at Mount St. Helens Volcano", *June 1980 to October 1981: Degassing of a magma-hydrothermal system: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 28, P.141-160.*

**-Giggenbach, W. F., Goguel, R. L., 1989,** "Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Discharges", *Report No. CD 2401, Chemistry Division, DSIR, Petone, New Zea land, P.100.*

**-Hopenhayn-Rich, C., Biggs, M. L., Fuchs, A., Bergoglio, R., Tello, E. E., Nico lli, H., Smith, A. H., 1996 ,** "Bladdercan cermortality associated with arsenic in drinking water in Argentina", *Epidemiology 7, P.117–124.*

**-Morrison, G. M. P., Batley, G. E., Florence, T. M., 1989,** "Metal speciation and toxicity", *Chem. Brit, P.25, 791.*

**-Schminke H-U., 2006,** "Volcanism", *Springer-verlag, Berlin, P.101-304.*

**-Shakeri, A., Moore. F., Kompani-zare, M., 2008,** "Geochemistry of thermal spring of mount Taftan, southeastern Iran", *Journal of Volcanology and Geothermal Resarch. Dio, P.200.*

**-Stocklin, J., 1968,** "Structural history and tectonic of Iran, a review, American Association of petroleum Geologists Bulletin", *52 (7), P.1229-1258.*

**-Smedley, P. L., Edmunds, W. M., Pelig-Ba, K. B., 1996,** "Mobility of arsenic in groundwater in the Obuasi gold-mining area Ghana: some implications for human health*", In: Appleton, J. D., Fuge, R., McCall, G. J. H. (Eds.), Environ mental Geochemistry and Health, vol. 113. Geological Society Special Publication, London, P.163 –181.*


Archive of SID

www.SID.ir