



## بررسی ژئوشیمی کانی‌های تبخیری با تأکید بر سولفات‌سدیم در کراترهای توتک راین در استان کرمان

عاطفه قائدی\*، عباس مرادیان، حمید احمدی پور

بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۴/۲/۱، نسخه نهایی: ۹۴/۶/۱)

**چکیده:** سولفات‌سدیم پس از کلریدسدیم یکی از فراوان‌ترین کانی محلول در آب در طبیعت است که در ۱۲۰ کیلومتری جنوب شرقی کرمان در راین، میان کراترهای توتک سولفات‌سدیم به وفور یافت می‌شود. با توجه به اینکه کاملترین زمان شکوفایی سولفات‌سدیم در اواخر تابستان و اوایل مهرماه است؛ نمونه‌برداری در اوایل مهرماه انجام شد. نمونه‌ها از اعماق ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متری زمین برداشت شده و به منظور بررسی‌های XRF و XRD مورد نیاز، به شرکت فرآوری مواد معدنی ارسال شدند. بررسی‌های کانی‌شناسی حاکی از وجود سولفات‌سدیم از نوع تناریدیت بود که با توجه به نتایج XRF و مقایسه‌ی آن‌ها با اکسیدهای اصلی پوسته‌ی زمین،  $\text{Na}_2\text{O}$  بیشترین فراوانی را در بین اکسیدهای اصلی نشان می‌دهد، و فراوانی  $\text{SO}_3$  ارتباط مسقیم به میزان سدیم دارد. بر اساس ضریب همبستگی اسپیرمن که برای داده‌های XRF رسم شد، ضریب همبستگی  $\text{SO}_3$  و  $\text{Na}_2\text{O}$  برابر ۱+ بود که نشان دهنده‌ی غالب بودن کانی تناریدیت است.

**واژه‌های کلیدی:** سولفات‌سدیم، XRD و SEM؛ کراتر توتک؛ راین.

### مقدمه

روش‌های شیمیایی تولید آن، به منابع طبیعی موجود توجه بیشتری شود. براساس بررسی‌های انجام شده، کانسارهای سولفات‌سدیم در رده‌ی تبخیری‌ها قرار می‌گیرند و از این رو برای پی‌جویی سولفات‌سدیم، تمرکز بر مناطق خشک و نیمه خشک، بویژه مناطق پست کویری، حائز اهمیت است [۲]. در ۱۲۰ کیلومتری جنوب شرقی کرمان، و در اطراف دهکده‌های قلعه حسنعلی، قلعه حیدر و توتک، ۱۴ کراتر انفجاری، یافت شد، که نخست بر خورده‌گاه سنگ‌های آسمانی [۳] و بعدها کراترهای آتشفشانی در آنها شناسایی شدند. این کراترها در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن، یا در نهشته‌های آذرآواری الیگومیوسن، و یا در نهشته‌های تخریبی شیمیایی کواترنر پدید آمده‌اند [۳].

سولفات‌سدیم پس از کلریدسدیم یکی از فراوان‌ترین کانی محلول در آب است که در طبیعت یافت می‌شود. تناژ بزرگی از سولفات‌سدیم در صنایع شیمیایی کاربرد دارد و احتمالاً یکی از اولین کانی مورد استفاده‌ی بشر در حدود ۵۰۰۰ سال قبل بوده است. از جمله استفاده‌های آن در مصر باستان برای مومیایی کردن جسد مردگان بود که برای این منظور از مخلوطی از سولفات‌سدیم و کربنات‌سدیم استفاده می‌شد [۱]. در ایران قدیم به آن مهره افسون یا جج‌السولوان می‌گفتند که کاربرد دارویی داشته است. از دیگر استفاده‌های آن در گذشته استفاده در رنگرزی، شیشه‌گری و دباغی است. سولفات‌سدیم یک ماده‌ی شیمیایی بسیار مهم در صنعت است. مصرف رو به رشد این ماده در صنایع مختلف باعث شده است که علاوه بر

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۷۸۸۳۰۵۸۳، پست الکترونیکی: Atefeh\_gh19@yahoo.com

ی آن ۱۳ درجه و میانگین بارندگی ۷۳ میلی‌متر است [۵]. منطقه‌ی مورد نظر درون کراترهای آتشفشانی توتک قرار گرفته‌است و کراترها نیز حاصل انفجارهای آتشفشانی هستند و سن آن‌ها به کواترن می‌رسد (شکل ۲). تشکیلات مشرف بر این منطقه به دو گروه تقسیم می‌شوند.

الف) تشکیلات آتشفشانی ائوسن که کراترها درون آن‌ها قرار گرفته‌اند و شامل ماسه‌سنگ‌های توفی، توفیت‌ها، ریولیت توف، گدازه‌ها و پیروکلاستیک‌های اسیدی وابسته به همبافت آتشفشانی هزار [۳] و در کوه زاغ و کوه پایین واقع شده‌اند. ب) تشکیلات جنوب غربی که بازم به گدازه‌ها و مواد آذرآواری نوار دهج - ساردوئیه وابسته بوده و کمی قدیمی‌ترند (ائوسن میانی هستند). این تشکیلات شامل گدازه‌ها و توف‌های اسیدی آگلومرا- برش‌های آتشفشانی و توفاند و به صورت یک مجموعه متناوب از گدازه و پیروکلاستیک رخنمون دارند.

این آتشفشان در مراحل آخر فوران خود ماگما نداشت و فوران آن به آب‌های سطحی وابسته بوده و گل و لای بیرون می‌ریخته‌است. بیشتر منطقه از مارن پوشیده شده‌است. وجود دودکش گلی در کراترهای توتک بسیار جوان بودن این آتشفشان صحه می‌گذارد (شکل ۳).

#### روش بررسی

به منظور بررسی رسوب‌های کراترهای توتک راین، نخست اطلاعات وابسته به هدف پژوهش؛ شامل مقالات، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰؛ خانه‌خاتون جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به اینکه کاملترین زمان تبلور و رشد رسوب‌های سولفات‌سدیم در در اواخر تابستان و اوایل مهرماه صورت می‌گیرد، نمونه‌برداری در اوایل مهرماه انجام شد. حدود ۴۰ نمونه‌ها از اعماق ۳۰ تا ۵۰ سانتی متری زمین برداشت شدند. در نمونه‌برداری نخست نمونه‌ها را از دورترین نقطه‌ی کراتر، نمونه‌های بعدی را به ترتیب از تمام جهات دیواره‌های کالدر، دهانه‌ی دودکش و پشت دیواره برداشت شدند و موقعیت نمونه‌ها با استفاده از GPS ثبت شدند.

در این مناطق سولفات‌سدیم به صورت لایه‌های نازک (حداکثر به ضخامت ۵ سانتی متر) و بریده بریده دیده می‌شوند و در زیر ۱۰ تا ۲۰ سانتی متری خاک پوک و متورم قرار گرفته‌است (شکل ۴). نمونه‌های جمع‌آوری شده به منظور آزمایش‌های مورد نیاز به آزمایشگاه شرکت فرآوری مواد معدنی ایران ارسال شدند در این آزمایشگاه نمونه‌ها به روش‌های فلورسانس نی پرتو

سولفات‌سدیم نوعی ترکیب شیمیایی رایج است که در طبیعت به فراوانی یافت می‌شود، کانسارهای سولفات‌سدیم معمولاً از تبخیر آب‌های سطحی اشباع شده از نمک در دریاچه‌های قلیائی و سواحل تشکیل می‌شوند و در نتیجه تبخیر آب‌های سطحی مقداری سولفات‌سدیم همراه با نمک‌های دیگر در اینگونه از دریاچه‌ها به اشباع می‌رسد، به طوری که بخش بزرگی از سولفات‌سدیم طبیعی از شورابه‌های غیر دریایی و رسوبات تبخیری به دست می‌آید که در دریاچه‌های کویری وجود دارد. بر این اساس بیشتر کانسارهای تجاری سولفات‌سدیم دارای خاستگاه تبخیری هستند و بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک یافت می‌شوند [۴].

به طور کلی مناطقی را که برای پی‌جویی این ماده‌ی معدنی مناسب‌اند می‌توان به چند گروه رده‌بندی کرد و پی‌جویی‌ها را در این مناطق متمرکز کرد [۲].

الف - دشت‌ها و دامنه‌های پست کوه‌های آتشفشانی جوان، مظهر آب‌های زیرزمینی و شور و کنار رودخانه‌های شور و نیز کرانه‌های دریاچه‌های شور و پلایاها و شورابه‌های لب شور حاشیه سواحل.

ب - سازندهای تبخیری، تپه‌های رسی و ماسه‌ای مجاور دریاچه‌های آب شور و سواحل.

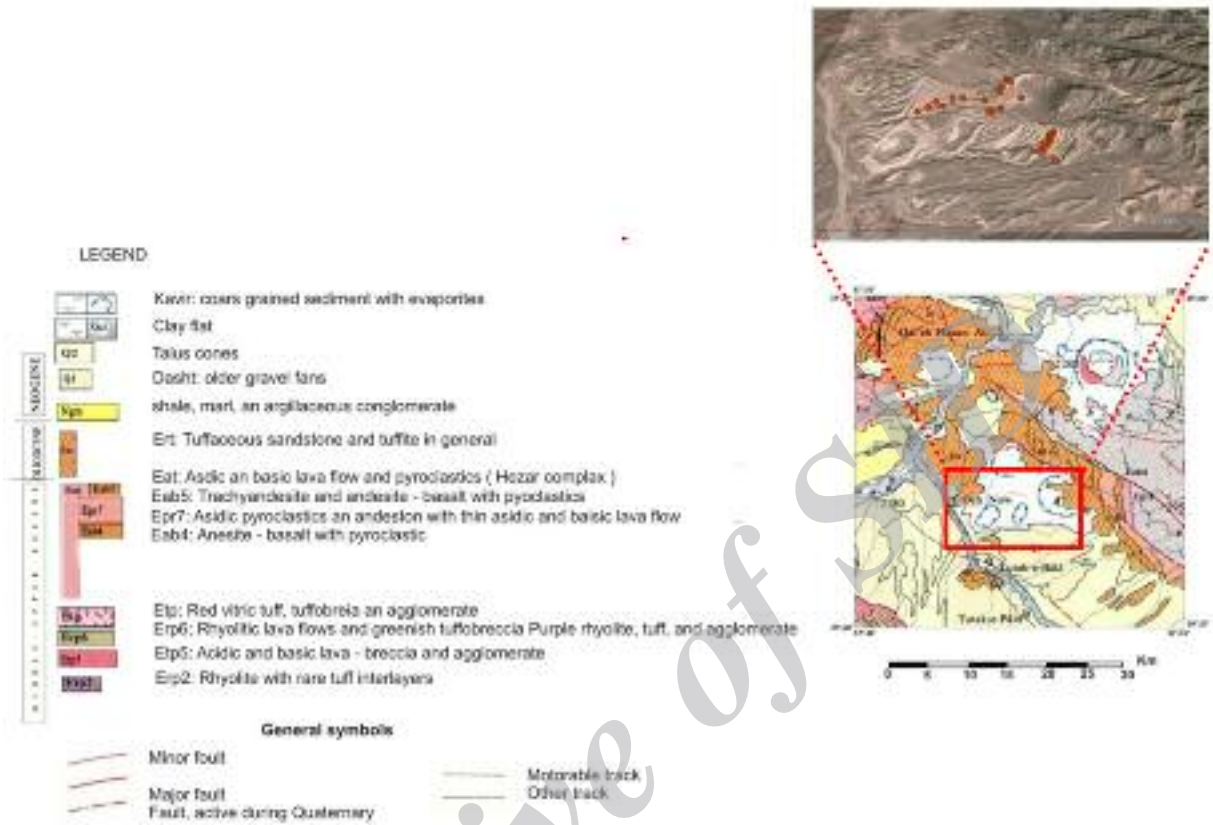
ج - آتشفشان‌های جوان، توف‌ها و خاکسترهای آتشفشانی و چشمه‌های آب گرم شور مجاور بخارهای آتشفشانی و حواشی دامنه‌ی سنگ‌های آتشفشانی جوان. سولفات‌سدیم موجود در خاکسترهای آتشفشانی کراترهای قلعه‌ی حسنعلی و منطقه‌ی توتک راین کرمان بر این اساس مورد پی‌جویی قرار گرفتند که سنگ‌های درونگیر کراترهای این منطقه، عموماً از مجموعه‌های آتشفشانی، رسوبی و نفوذی ائوسن میانی و بالایی تا الیگوسن تشکیل شده و سولفات‌سدیم در خاکسترهای ریز دانه اطراف کراترها وجود دارند که سولفات‌سدیم در منطقه‌ی توتک از خلوص بیشتری نسبت به قلعه‌ی حسنعلی برخوردار است.

#### موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

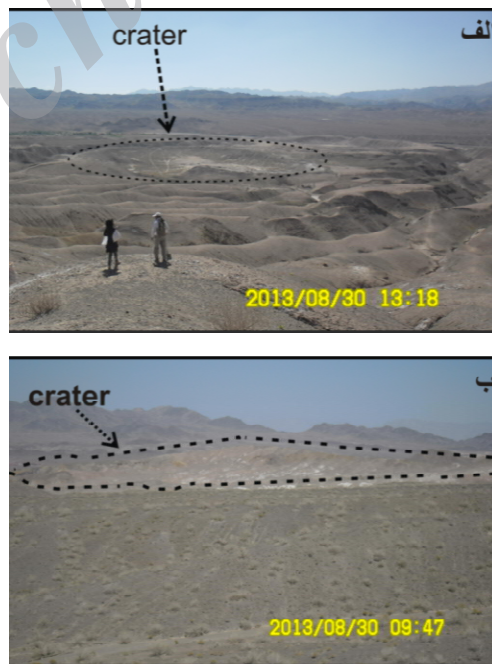
این منطقه در ۲۰ کیلومتری جنوب راین و در غرب خانه خاتون نزدیک راین استان کرمان و بین طول‌های ۳۵'، ۵۷ تا ۳۰'، ۵۷ شرقی و عرض‌های ۲۰'، ۲۹ تا ۲۵'، ۲۹ شمالی قرار گرفته و مساحت تقریبی آن ۲۰ کیلومتر مربع است (شکل ۱). آب و هوای راین معتدل کوهستانی است با زمستان‌های سرد و تابستان‌های خنک و دلپذیر. دمای میانگین سالانه-

الکترونی (SEM) برای مطالعات کانی‌شناسی مورد بررسی قرار گرفتند.

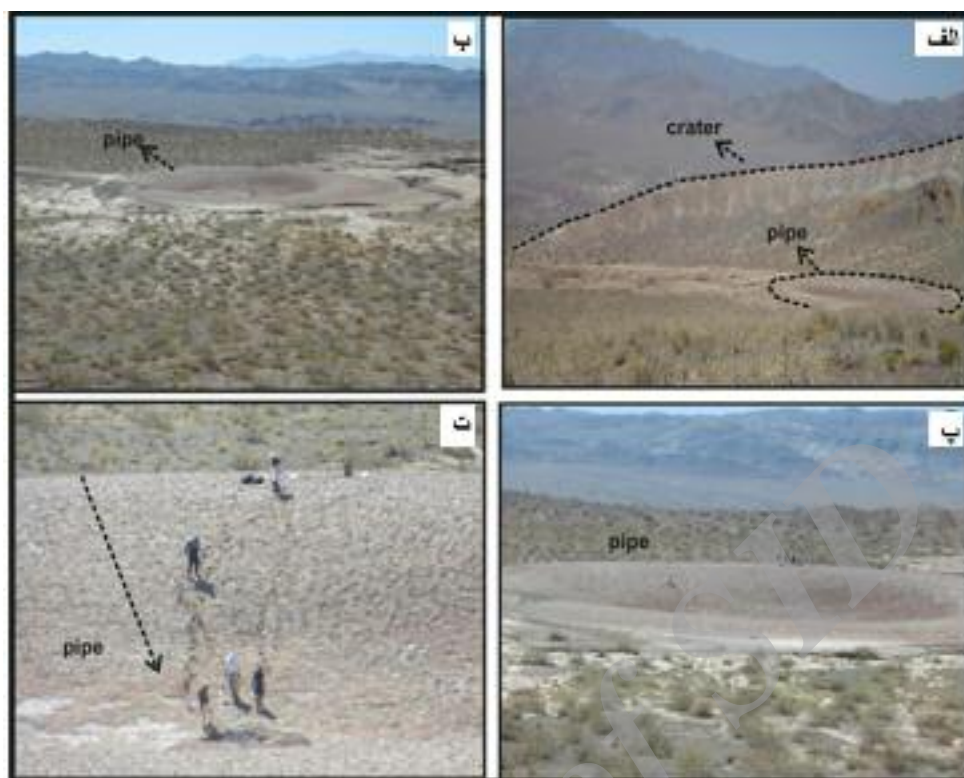
ایکس (XRF) برای اندازه‌گیری مقدار اکسیدهای عناصر اصلی و کم‌یاب، پراش پرتو ایکس (XRD) و بررسی با میکروسکوپ



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی [۶] در شکل مشخص شده است.



شکل ۲ کراترهای منطقه توتک در راین.



شکل ۳ دهانه‌ی گلی در بزرگترین دهانه از دهانه‌های توتک که نشان دهنده ی برخورد آب های سطحی با یک ماگمای گرم و در نتیجه انفجار گل و لای بوده است دیواره های این دهانه فرسایش کمی داشته و دیواره های دودکش نیز کاملا سالم است . الف - نمایی از دهانه توتک و دودکش گلی آن، ب و پ- دودکش تقریبا در وسط دهانه قرار ، ت- تصاویری از داخل دودکش گلی.



شکل ۴ الف- سولفات سدیم در عمق ۴۰ تا ۳۰ سانتیمتری، ب و پ در قسمت های سطحی.

#### بحث

بررسی‌های با پرتو ایکس حاکی از وجود سولفات سدیم از نوع تناردیت بود (شکل ۵) همچنین در SEM علاوه بر سولفات‌های سدیم، سولفات‌های کلسیم - سدیم (یوگستریت) نیز مشاهده می‌شوند. مقدار خلوص تناردیت به سمت مرکز کراتر و سپس دیواره‌های جنوبی و غربی بیشتر می‌شود. در واقع تناردیت کانی اصلی محسوب می‌شود. از دیگر کانی‌های مهم تبخیری در منطقه می‌توان از کلسیت، ژپس، هالیت،

آفتیتالیت (Aphthitalite)، دولومیت و سیلویت نام برد. کانی‌های غیر تبخیری نیز شامل کوارتز، کامینیت، پیرولیت و ایلیت هستند.

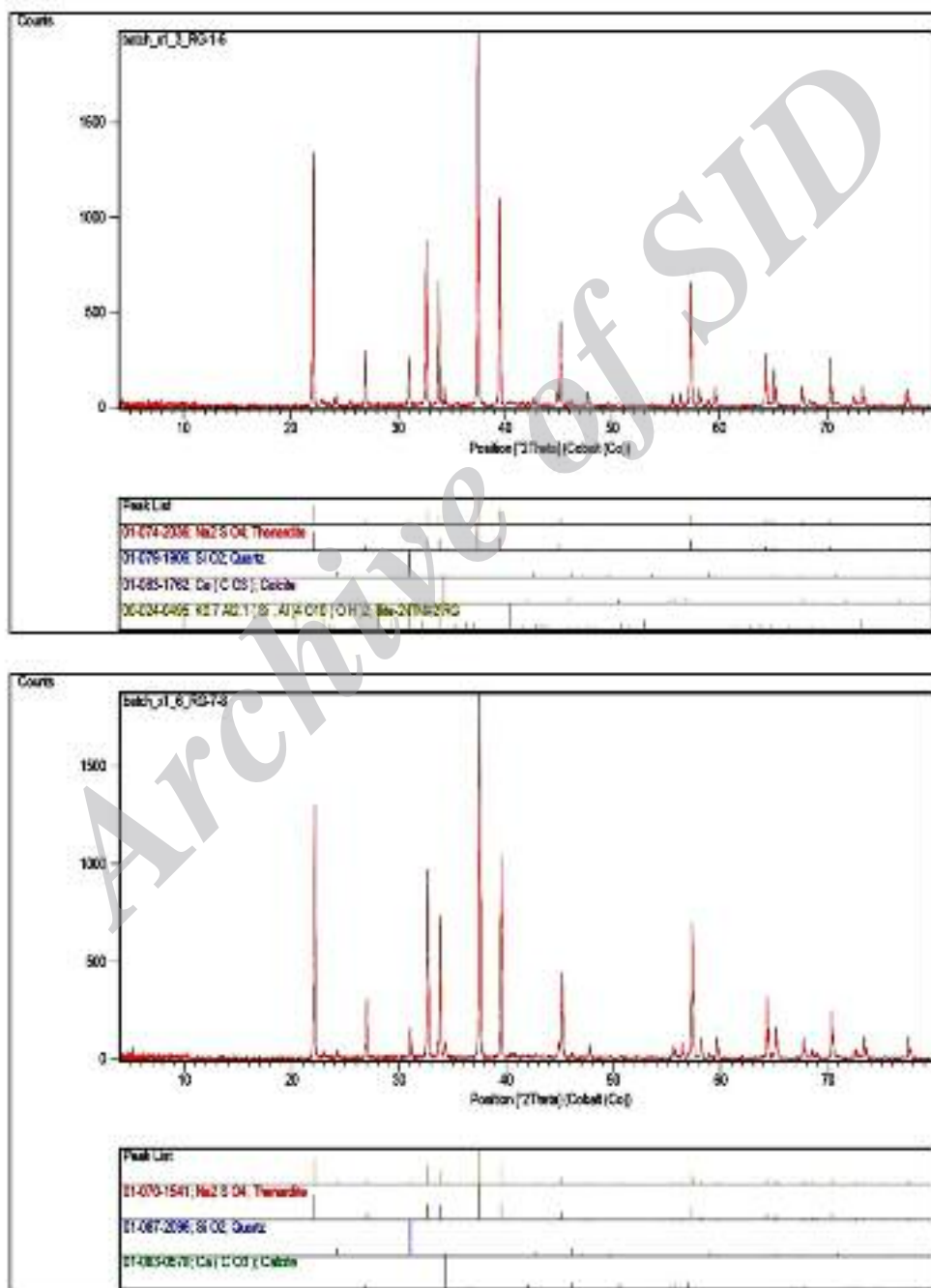
#### کانی شناسی منطقه‌ی مورد بررسی

سولفات‌سدیم نمکی است با رنگ سفید که بر حسب ناخالصی‌های موجود و نیز آب متبلور سفید روشن تا سفید شیری تغییر می‌کند [۷] که در مناطق مورد بررسی به این صورت مشاهده شده و به صورت ترکیبات گوناگون و کانی‌های



سدیم - پتاسیم) است، نیز یافت می‌شود و به طور کلی اغلب همراه است با ترکیب یا مخلوط با دو یا بیشتر نمک‌های همگن است. به هر حال بیش از ۴۰ کانی برای سولفات‌سدیم با ترکیبات مختلف و میزان درصد سولفات‌سدیم متفاوت شناخته شده است که اغلب در یک محیط همگن تشکیل شده و هر یک دارای ویژگی جالب توجهی هستند که این فرایند بر اساس پایداری آنهاست [۸].

مختلفی یافت می‌شوند، حالت جامد سولفات‌سدیم در منطقه‌ی مورد بررسی اغلب به صورت سولفات‌سدیم بدون آب (تناردیت) یافت می‌شود و در بسیاری موارد نیز نمک‌های دیگر به صورت ناخالصی همراه آنها هستند و در نتیجه کانی‌های سولفات-سدیم دارای عیارهای مختلفی هستند، این ماده‌ی معدنی به صورت ترکیبات دیگری از قبیل گلوبریت و یوگستریت که نمک مضاعف سولفات‌سدیم و سولفات کلسیم و آفتیتالیت (سولفات-



شکل ۵ نمونه ای از پیک گراف XRD مربوط به تناردیت.

تمام نمونه‌های رایج که XRD و SEM شده‌اند، به عنوان کانی اصلی منطقه وجود دارد.

**میرابیلیت ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ):** این کانی همراه با تناردیت در بعضی نمونه‌ها یافت می‌شود. سیستم تبلور آن تک‌میل، رده  $2/m$  است. بلورهای کوتاه تا منشورهای بلند، بارشده به شکل‌های پیچیده، همچنین تا بالغ تا ۱۰ سانتی متر در توده‌های به هم پیوسته، بلوری، دانه‌ای تا فشرده و نیز به صورت شوره دیده می‌شوند [۱۰]. این کانی در هوای خشک در اثر از دست دادن آب، به تناردیت تبدیل می‌شود. در آب به خوبی حل می‌شود و مزه آن شور و تلخ است. کانی‌های همراه آن عبارتند از گچ، تناردیت، هالیت، آفتیتالیت، گلوبریت، یوگستریت، و معمولاً در کفه‌ی نمکی، کرانه‌های اقیانوسی کم عمق، دریاچه‌های شور، که در آنها رسوب شدن به صورت ذخایر لایه‌ای به صورت فصلی ممکن باشد تشکیل می‌شود.

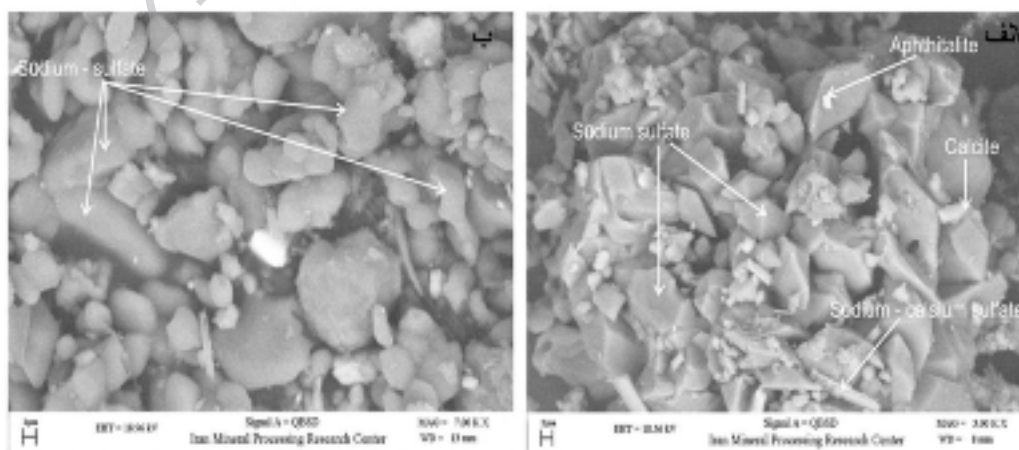
**یوگستریت ( $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ):** در بسیاری از نمونه‌ها هم در XRD و هم SEM تشخیص داده شده‌اند. سیستم تبلور آن سیستم تک‌میل (؟) به صورت خوشه‌هایی از الیاف نازک با  $40 \mu\text{m}$  است [۱۱] که در تصاویر مربوط به SEM این سرشتی‌ها به خوبی مشاهده می‌شوند. سختی آن ۲، محلول در  $\text{H}_2\text{O}$  و شفاف است که به صورت بیرنگ تا سفید و همراه کانی‌های دیگر تبخیری به صورت پودر مشاهده می‌شود. انباشت در نمونه‌های مورد بررسی شامل تناردیت، هالیت، ژپس، گلوبریت، کلسیت است که همراه با دیگر کانی‌های تبخیری یافت می‌شوند. یوگستریت یک کانی فرعی دیگر است که همراه با تبخیری‌های منطقه یافت می‌شود.

**تناردیت ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ):** تناردیت در نمونه‌های توتک، یک کانی اصلی است که در بعضی نمونه‌ها دارای خلوص بسیار بالایی است. سیستم بلوری آن راست لوزی رده  $2/m 2/m 2/m$ ، بلورها دی‌پرامیدال {111} یا مسطح {010} یا به طور عمد {101} هستند [۹]. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی، تناردیت بیشتر به صورت بی‌شکل دیده می‌شود که البته در بعضی نمونه‌ها نیز شکل دوهرمی آن مشخص است همین‌طور در سطح‌زمین بیشتر به صورت پوسته پوسته و شوره دیده می‌شوند. سختی آن نسبتاً شکننده و در حدود ۲،۵ - ۳ و شکنندگی آن به صورت ناهموار (ناصاف) است [۹].

محلول در  $\text{H}_2\text{O}$  است، طعم آن کمی شور که هنگام نمونه برداری برای تشخیص از گچ به کار می‌رود. رنگ نمونه‌های مورد بررسی بیرنگ تا سفید است.

**تشخیص تناردیت در SEM:** در بعضی نمونه‌ها تناردیت کاملاً بی‌شکل و در بعضی از نمونه‌ها نیمه‌شکدار تا یوهدرال هستند (شکل ۶). در بعضی نمونه‌ها اندازه‌ها بزرگ تر در حدود ۴۰ تا ۳۰ میکرون و نیز تا حد ۱۰ میکرون هستند. در بقیه نمونه‌ها اندازه‌ها کوچکتر و در حد ۱،۵ تا ۰،۵ میکرون هستند. شکل الف - ۶ سولفات سدیم‌های درشت بلور و تقریباً یوهدرال (بلور پرامیدال) با اندازه‌ای برابر ۶ تا ۷ میکرون دیده می‌شوند آنالیز SEM - EDS نتایج بسیار خوبی برای هر یک از مکان‌ها نشان می‌دهد. تمام نمونه‌ها از نظر کانی‌شناسی، اندازه و ترکیب تا حدودی رفتارهای مشابهی نشان می‌دهند.

در نمونه‌های مورد بررسی، همراه با میرابیلیت گلوبریت؛ گچ، هالیت، یوگستریت، کلسیت، باسانیت معمولاً در خاکسترها و کراترهای آتشفشان توتک رایج یافت می‌شود. تناردیت در



شکل ۶ الف- بلورهای خود شکل (یوهدرال) تناردیت همراه با دیگر سولفات‌های سدیم، ب- سولفات سدیم‌های بی شکل (آنهدرال).

میراییلیت، هالیت، گچ دیده شده‌اند. در نمونه‌های دیگر به صورت کانی فرعی نیز دیده می‌شود.

#### ژئوشیمی کانی‌های بررسی شده

#### مقایسه‌ی اکسیدهای اصلی با میانگین اکسیدهای پوسته‌ی زمین و پوسته‌ی قاره‌ای

نمونه‌های منطقه مورد بررسی تجزیه XRF شدند. بنابراین نتایج (جدول ۱) و مقایسه‌ی آن‌ها با اکسیدهای اصلی پوسته‌ی زمین (شکل ۸) چنین نتیجه می‌شود که  $\text{Na}_2\text{O}$ : بیشترین فراوانی را بین کاتیون‌ها نشان می‌دهد. این مقدار در نمونه‌های توتک بالاتر از میانگین پوسته‌ی قاره‌ای و کل پوسته است. فراوانی  $\text{SO}_3$  ارتباط مسقیم با میزان سدیم دارد که نشان دهنده‌ی غالب بودن کانی سولفات‌سدیم (تنداردیت) است. در مقایسه با  $\text{Na}_2\text{O}$ ، کاتیون‌های  $\text{CaO}$ ،  $\text{K}_2\text{O}$ ،  $\text{MgO}$ ، مقدار کمتری را نشان می‌دهند همچنین در مقایسه با فراوانی  $\text{SO}_3$ ، آنیون  $\text{Cl}$  به مقدار کمتری دیده می‌شود که نشان دهنده‌ی کمتر و یا نادر بودن کانی‌های کلریدی و دیگر کانی‌های تبخیری رایج در منطقه است.

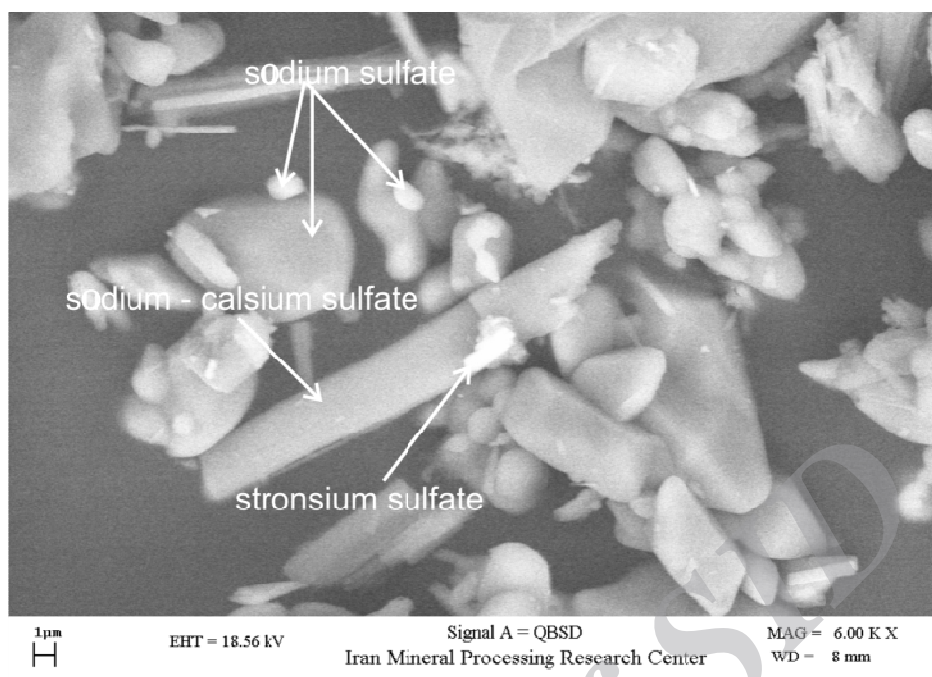
$\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در منطقه‌ی مورد بررسی مقدار بسیار کمتری را نسبت به میانگین پوسته‌ی زمین نشان می‌دهد. که نشان دهنده‌ی کم بودن میزان کانی‌های سیلیکاتی و رسی در حوضه‌های تبخیری مورد بررسی است. بقیه‌ی اکسیدها مقداری برابر یا کمتر از میانگین پوسته‌ی زمین و قاره‌ای نشان می‌دهند.

**تشخیص یوگستریت در SEM:** یوگستریت در SEM به صورت سوزنی یوهدرال تا نیمه شکل‌دار دیده می‌شود که نشان دهنده‌ی خلصت تک‌میل آن است [۱۱، ۱۲]. این کانی به صورت الیاف نازک (فیبری) دارای ضخامتی حدود ۰٫۵ تا ۱٫۵ و طول ۱۰ تا ۴ میکرون در نمونه‌ها دیده می‌شود. تشخیص دو کانی گلوبیت و یوگستریت دشوار است و تنها با استفاده از SEM-EDS امکان پذیر است [۱۳] بلورهای سولفات‌سدیم مضاعف سدیم - کلسیم در این بررسی به صورت یوهدرال با بلورهای منشوری است که بیشتر همراه با تنداردیت در متن دیده می‌شود (شکل ۷). بررسی SEM-EDS مربوط به آن برای تمام نمونه‌ها از نظر ترکیب مشابه است. در نمونه‌های راین سولفات-های سدیم - کلسیم به صورت فرعی در متن سنگ همراه با تنداردیت دیده می‌شوند.

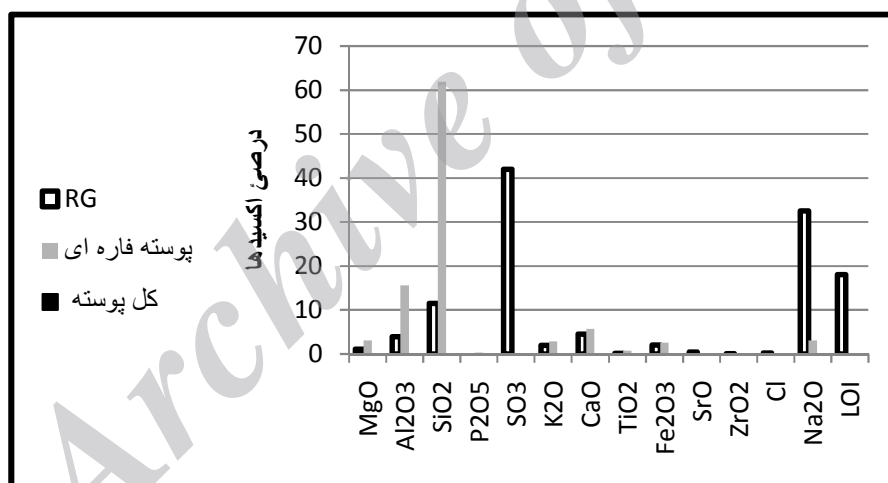
**آفتینالیت  $(\text{K, Na})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ :** این کانی در نمونه‌های مورد بررسی مثل بقیه به صورت پودر است و با XRD شناسایی شده است. سیستم تبلور آن سیستم هشت‌گوشی رده‌ی  $32/m$ ، بلورهای مسطح در  $\{0001\}$  با ظاهری سه‌گوشه و نیز به شکل شبه راست لوزی دیده می‌شود. در انباشت تیغه‌دار به صورت پستانی ناقص در پوسته خاک نیز دیده می‌شود. ترد و شکننده با سختی ۳ بیرنگ، و رنگ‌های سفید، خاکستری، آبی، سبز است. جلای شیشه‌ای تا صمغی دارد و شفاف تا مات است [۱۴]. در  $\text{H}_2\text{O}$  حل می‌شود و دارای طعم شور است [۱۵]. انباشت در نمونه‌های مورد بررسی به صورت تنداردیت، سیلویت،

جدول ۱ نتایج آنالیز XRF منطقه‌ی راین

	RG-1-4	RG-1-10	RG-1-13	RG-1-16	RG-1-21	RG-1-23	RG-1-28	RG
MgO	۱٫۰۴	۱٫۶۲	۱٫۱۶	-	۰٫۷۵	۱٫۷۷	۱٫۱۴	۱٫۰۷
$\text{Al}_2\text{O}_3$	۱٫۹۸	۶٫۴۷	۳٫۷۸	۲٫۰۵	۳٫۰۲	۶٫۱۱	۳٫۷۰	۳٫۸۷
$\text{SiO}_2$	۵٫۴۱	۱۹٫۲۹	۱۱٫۱۹	۶٫۲۰	۸٫۵۴	۱۹٫۰۰	۱۰٫۸۹	۱۱٫۵
$\text{P}_2\text{O}_5$	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{SO}_3$	۴۹٫۹۵	۳۰٫۹۶	۴۳٫۲۹	۴۸٫۷۰	۴۶٫۲۰	۳۲٫۷۱	۴۱٫۹۸	۴۱٫۹۷
$\text{K}_2\text{O}$	۰٫۳۸	۳٫۵۵	۱٫۱۱	۱٫۵۸	۰٫۹۷	۳٫۸۳	۱٫۹۱	۱٫۹
CaO	۱٫۲۴	۷٫۶۶	۳٫۶۷	۲٫۵۵	۲٫۹۴	۷٫۸۹	۵٫۲۷	۴٫۴۶
$\text{TiO}_2$	۰٫۱۳	۰٫۳۵	-	-	-	۰٫۲۶	-	۰٫۱۱
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	۱٫۲۰	۴٫۶۸	۱٫۲۶	۱٫۰۶	۱٫۴۶	۲٫۳۶	۱٫۸۸	۱٫۹۸
SrO	-	۰٫۴۸	۰٫۲۳	۰٫۱۴	۰٫۲۹	۳٫۶۲	۰٫۶۶	۰٫۳۵
$\text{ZrO}_2$	-	۰٫۰۹	۰٫۰۵	-	۰٫۰۵	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۰۶
Cl	-	۰٫۹۰	۰٫۸۱	-	-	-	-	۰٫۲۴
$\text{Na}_2\text{O}$	۳۸٫۶۸	۲۳٫۹۸	۳۳٫۴۶	۳۷٫۷۲	۳۵٫۷۸	۲۵٫۳۴	۳۲٫۴۹	۳۲٫۴۹
LOI	۲۰٫۹۰	۱۳٫۲۳	۲۰٫۹۳	۱۸٫۴۵	۱۸٫۸۸	۱۳٫۱۹	۲۰٫۷۲	۱۸٫۰۳



شکل ۷ تصویر SEM بلورهای تک میل یوگستریت.



شکل ۸ مقایسه‌ی نمونه‌های رایج با پوسته‌ی قاره‌ای و کل پوسته

همبستگی  $\text{Na}_2\text{O}$  با  $\text{Cl}$   $0.535-$  است که همبستگی وجود ندارد. همین‌طور  $\text{K}_2\text{O}$  با  $\text{Cl}$  دارای همبستگی  $0.223-$  است. این موارد نشان دهنده‌ی کمبود کانی‌های کلریدی مانند هالیت و سیلویت در مناطق مورد بررسی است. نمونه‌های توتک در مقایسه با پوسته‌ی قاره‌ای و کل پوسته،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  بسیار کمتری دارد. همین‌طور مقدار  $\text{CaO}$ ،  $\text{K}_2\text{O}$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ، کمتر از پوسته است. در عوض مقدار  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{SO}_3$  آن از میانگین پوسته بسیار بیشتر است (شکل ۸).

بررسی همبستگی اکسید کاتیون‌های اصلی با اکسید آنیون‌های اصلی تشکیل دهنده‌ی مناطق مورد مطالعه بر اساس جدول ۲ ضریب همبستگی اسپیرمن که برای داده‌های XRF رسم شده است: ضریب همبستگی  $\text{SO}_3$  و  $\text{Na}_2\text{O}$  برابر  $+1$  است. مقدار ضریب همبستگی  $+1$  مویده همبستگی کامل و مستقیم متغیرهاست در حالی که مقدار ضریب همبستگی  $-1$  نشانگر همبستگی کامل و غیر مستقیم است و ضریب همبستگی صفر، عدم ارتباط بین دو متغیر را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی  $\text{CaO}$  با  $\text{SO}_3$   $-0.964-$  و ضریب



**خاستگاه تبخیری‌ها در منطقه توتک راین**

بر اساس آن چه گفته شد، به عقیده‌ی نظری که قطبی [۱۶] در سال ۱۳۶۳ بیان کرد، خاستگاه سولفات‌سدیم به دلیل دگرسانی فلدسپات‌های سنگ‌های آتشفشانی جوان و کربنات-سدیم موجود در خاکسترهای آتشفشانی است. سبزه‌ای [۱۷] در سال ۱۳۶۴ رسوب‌های تبخیری از نوع سولفات‌سدیم در کراترهای قلعه حسنعلی راین (کرمان) را حاصل واکنش سنگ-های آتشفشانی با گاز  $CO_2$  و  $Cl$  می‌داند که ته‌نشینی آن‌ها باعث به وجود آمدن سولفات‌سدیم و کلریدسدیم شدند. بنابراین، تبخیری‌ها را می‌توان در ارتباط با فعالیت آتشفشان‌های جوان، دگرسانی و آب‌های گرمابی دانست. بر اساس نقشه‌ی زمین-شناسی منطقه (شکل ۱) آبراهه‌هایی به کراتر توتک و منطقه‌ی تبخیری آن می‌ریزند از تشکیلاتی سرچشمه می‌گیرند که

جنس بیشتر آن‌ها از پیروکلاستیک‌های اسیدی با جریان‌های لاوای اسیدی و بازی و نیز ماسه‌های توفی اسیدی و توف‌های دیگر هستند. در اثر دگرسانی این سنگ‌ها آنیون‌های سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) و کلرید ( $Cl^-$ ) و کاتیون‌های  $Na^+$  و  $K^+$  و  $Ca^{2+}$  آزاد می‌شوند و نقش مهمی در تشکیل تبخیری‌های این منطقه به خصوص سولفات‌های سدیم بازی می‌کنند. در این میان نمی‌توان نقش گسل‌های موجود در منطقه و جریان‌های گرماب‌های این آتشفشان جوان را نادیده گرفت.

توپوگرافی دهانه‌های توتک که پایین‌تر از ارتفاعات اطراف است و نیز شرایط آب و هوایی منطقه در تشکیل تبخیری‌های منطقه مؤثرند. با توجه به این که زمان نمونه برداری در فصل گرم (نیمه‌ی مه‌ماه) صورت گرفت، سولفات‌سدیم‌های موجود در منطقه بیشتر از نوع تناردیت‌اند.

**جدول ۲** ضریب همبستگی اکسیدها در منطقه‌ی مورد بررسی

		MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	ZrO <sub>2</sub>	Cl	Na <sub>2</sub> O	LOI
MgO	Correlation Coefficient	۱٫۰۰۰												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Correlation Coefficient	۰٫۸۵۷*	۱٫۰۰۰											
SiO <sub>2</sub>	Correlation Coefficient	۰٫۸۵۷*	۱٫۰۰۰**	۱٫۰۰۰										
SO <sub>3</sub>	Correlation Coefficient	-۰٫۸۲۱*	-۰٫۹۶۴**	-۰٫۹۶۴**	۱٫۰۰۰									
K <sub>2</sub> O	Correlation Coefficient	۰٫۶۷۹	۰٫۷۸۶*	۰٫۷۸۶*	-۰٫۸۵۷*	۱٫۰۰۰								
CaO	Correlation Coefficient	۰٫۸۵۷*	۰٫۹۲۹**	۰٫۹۲۹**	-۰٫۹۶۴**	۰٫۸۹۳**	۱٫۰۰۰							
TiO <sub>2</sub>	Correlation Coefficient	۰٫۶۷۰	۰٫۵۱۲	۰٫۵۱۲	-۰٫۵۱۲	۰٫۴۷۳	۰٫۴۷۳	۱٫۰۰۰						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Correlation Coefficient	۰٫۷۸۶*	۰٫۸۵۷*	۰٫۸۵۷*	-۰٫۹۲۹**	۰٫۷۱۴	۰٫۸۹۳**	۰٫۶۱۱	۱٫۰۰۰					
SrO	Correlation Coefficient	۰٫۵۷۱	۰٫۶۷۹	۰٫۶۷۹	-۰٫۸۲۱*	۰٫۷۵۰	۰٫۸۵۷*	-۰٫۱۵۸	۰٫۸۲۱*	۱٫۰۰۰				
ZrO <sub>2</sub>	Correlation Coefficient	۰٫۷۳۴	۰٫۷۵۳	۰٫۷۵۳	-۰٫۸۶۳*	۰٫۷۷۱*	۰٫۹۱۸**	۰٫۲۸۴	۰٫۸۶۳*	۰٫۹۷۳**	۱٫۰۰۰			
Cl	Correlation Coefficient	۰٫۴۹۰	۰٫۶۶۸	۰٫۶۶۸	-۰٫۵۳۵	۰٫۲۲۳	۰٫۳۵۶	۰٫۳۶۹	۰٫۴۰۱	۰٫۰۴۵	۰٫۱۱۴	۱٫۰۰۰		
Na <sub>2</sub> O	Correlation Coefficient	-۰٫۸۲۱*	-۰٫۹۶۴**	-۰٫۹۶۴**	۱٫۰۰۰**	-۰٫۸۵۷*	-۰٫۹۶۴**	-۰٫۵۲۱	-۰٫۹۲۹**	-۰٫۸۲۱*	-۰٫۸۶۳*	-۰٫۵۳۵	۱٫۰۰۰	
LOI	Correlation Coefficient	-۰٫۳۲۱	-۰٫۴۶۴	-۰٫۴۶۴	۰٫۵۳۶	-۰٫۷۵۰	-۰٫۵۱۷	-۰٫۵۱۷	-۰٫۵۳۶	-۰٫۴۲۹	-۰٫۴۰۴	۰٫۰۴۵	-۰٫۵۳۶	۱٫۰۰۰

## برداشت

بر اساس بررسی‌های SEM و XRD، کانی‌های سولفاتی اصلی و مهم منطقه‌ی مورد بررسی عبارتند از: سولفات‌های کلسیم (گچ، انیدریت، باسانیت)، سولفات‌های سدیم (تناردیت) سولفات‌های سدیم - کلسیم (یوگستریت و گلوبریت) ، سولفات‌های سدیم - پتاسیم (آفتیتالیت)، سولفات‌منیزیم (کامینیت) که تناردیت از کانی‌های اصلی منطقه به حساب می‌آیند.

با توجه به نتایج XRF و مقایسه‌ی آن‌ها با اکسیدهای اصلی پوسته‌ی زمین،  $\text{Na}_2\text{O}$  بیشترین فراوانی را بین کاتیون‌ها نشان می‌دهد. فراوانی  $\text{SO}_3$  ارتباط مسقیم با میزان سدیم دارد که نشان دهنده‌ی غالب بودن کانی سولفات‌سدیم (تناردیت) است. در مقایسه با  $\text{Na}_2\text{O}$ ، کاتیون‌های  $\text{CaO}$ ،  $\text{K}$ ،  $\text{MgO}$ ، و در مقایسه با  $\text{SO}_3$ ، آنیون  $\text{Cl}$  فراوانی کمتری را نشان می‌دهد که نشان دهنده‌ی کمتر و یا نادر بودن کانی‌های کلریدی و دیگر کانی‌های تبخیری رایج در منطقه است. بر اساس جدول ضریب همبستگی اسپیرمن که برای داده‌های XRF رسم شده است، ضریب همبستگی  $\text{SO}_3$  و  $\text{Na}_2\text{O}$  برابر +۱ است. مقدار ضریب همبستگی +۱ موید همبستگی کامل و مستقیم متغیرهاست.

بین  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{SO}_3$  همبستگی کامل و مستقیمی وجود دارد در حالی که بین بقیه اکسیدها با  $\text{SO}_3$  و نیز  $\text{Cl}$ ، این همبستگی وجود ندارد. همه‌ی این موارد نشان دهنده‌ی تشکیل تناردیت (سولفات سدیم) هستند.

## قدردانی

از شرکت فرآوری مواد معدنی ایران به خاطر انجام آنالیزها سپاسگزاری می‌کنم.

## مراجع

- [1] Garrett D. E., "Sodium sulfate: Handbook of Deposits", perossesing & use. Academic Press (2001).
- [2] Mcilveen S. Jr., R.L. Cheek Jr., "Sodium sulfate resources". Edited by D.D. Carr. Littleton, CO: SME, (1994) 959-971.
- [3] Dimitrijevic M. D., "Geology of Kerman region. Geological survey of Iran". Report, Yu. 59. (1973).
- [4] Low R., Anderson D.M., Boak R.A., Nkala G., "An investigation of solar evaporation pond leakage and possible remedial measures at Sua

Pan", Botswana Eighth World Salt Symposium, vol. 1, (2000) pp. 523-528.

[۵] "فرهنگ جغرافیایی آبادی های استان کرمان"، سازمان

جغرافیایی و وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح (۱۳۸۴).

[۶] دیمتریویچ و همکاران، "نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ خانه خاتون،

انتشارات سازمان زمین شناسی کشور"، (۱۹۵۹).

[7] Warren, J. K., "Evaporites through time: Tectonic", climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, (2010) 217-268.

[8] Austin G. S., "Sodium Sulfate Resources. *Industrial Minerals and Rocks, SME*" (Soc. Mining Metallurgy and Exploration), (2006).

[9] Nord A. G., "Refinement of the crystal structure of thenardite,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (V)". *Acta Chemica Scandinavica*, 27 (1973) 814-822.

[10] Ericksen, G.E., M.E. Mrose, J.J. Fahey, "Ice-clear mirabilite from Salar de Pintados, northern Chile". *Mineral. Record*, 1 (1970) 12-25.

[11] Vergouwen L., "Eugsterite, a new salt mineral", *American Mineralogist*, 66 (1981) 632-636.

[12] Buck B. J., King J., Etyemezian V., "Effects of salt mineralogy on dust emissions, Salton Sea," California. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5) (2011) 1971-1985.

[13] Mees F., T.V. Tursina, "Salt minerals in saline soils and salt crusts". Ch. 20. In G.V. Stoops et al. (ed.) *The interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Elsevier, Amsterdam (2010).

[14] Moore P. B., "Bracelets and pinwheels-topological geometrical approach to calcium orthosilicate and alkali sulfate structures". *American Mineralogist*, 58(1-2) (1973) 32-42.

[15] Okada K., Oosaka J., "Structures of potassium sodium sulphate and tripotassium sodium disulphate". *Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 36(4) (1980) 919-921.

[۱۶] قطبی ح، "اکتشاف و بررسی مقدماتی سولفات سدیم و

کانیهای همراه"، گزارش داخلی سازمان زمین شناسی (۱۳۶۳).

[۱۷] سبزه‌ای م، و دیگران. "اکتشافات تفصیلی سولفات سدیم

موجود در خاکسترهای آتشفشانی منطقه قلعه حسنعلی راین

کرمان"، گزارش داخلی سازمان زمین شناسی (۱۳۶۴).