

# بررسی برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی ذخایر سپیولیت شمال خاور ایران

سعید حجتی<sup>۱\*</sup> و حسین خادمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۱/۲۳

## چکیده

تا به حال گزارشی در رابطه با شناسایی و مطالعه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ذخایر سپیولیت در کشور منتشر نشده است. بنابراین این مطالعه با هدف شناسایی و بررسی برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی ذخایر سپیولیت الیاتو در شمال خاور ایران انجام شد. به این منظور ۱۰ نمونه سپیولیت که از نقاط مختلف معدن الیاتو به صورت تصادفی گردآوری شده بود برای انجام مطالعات ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی شامل مطالعات سطح ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی، پراش پرتو ایکس، مطالعات میکروسکوپ الکترونی عبوری و روبشی، فلورسانس پرتو ایکس، تجزیه حرارتی و طیف‌سنجی فرسوخ بررسی شدند. نتایج حاصل از مطالعه پراش نگاهت‌های پرتو ایکس در ذخایر مورد مطالعه حضور کانی سپیولیت را به عنوان فاز اصلی (۷۰ تا ۸۰ درصد) همراه با مقادیر کم کانی‌های کوارتز (۲۰-۱۰ درصد) و دولومیت (۱۰-۵ درصد) اثبات کرد. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی عبوری و روبشی نیز وجود رشته‌های طولی و درهم تابیده کانی سپیولیت را در این ذخایر تأیید کرد که نشان از تشکیل درجای این کانی از محلول‌های غنی از منیزیم و/یا پس از ته‌نشست دولومیت در آنها دارد. همچنین بر پایه تجزیه عنصری ذخایر مورد مطالعه، فرمول ساختمانی پیشنهادی برای این کانی عبارت است از:  $(\text{Si}_{11.97}\text{Al}_{0.03})(\text{Mg}_{7.20}\text{Al}_{0.11}\text{Fe}_{0.15})\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  که نشان‌دهنده جانثینی کم آلومینیم به جای سیلیسیم و منیزیم به ترتیب در لایه‌های تتراهدرال و اکتاهدرال کانی و وجود بار لایه‌ای به نسبت کم در کانی است. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که در منحنی حرارتی ذخایر سپیولیت مورد مطالعه ۴ پیک گرمگیر به ترتیب در ۱۳۴، ۳۳۶، ۵۴۶ و ۸۱۸ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شوند که به ترتیب با ۸/۶۹، ۳/۳۱، ۲/۶۵ و ۱۰/۱۹ درصد کاهش وزن در ساختمان کانی همراه است و بیشتر به دلیل حذف تدریجی آب از ساختمان کانی در منحنی حرارتی کانی ظاهر می‌شوند. همچنین مقایسه سطح ویژه کانی با نمونه مشابه اسپانیایی، استفاده از آن را برای کاربردهای صنعتی تأیید می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** سپیولیت، منیزیم، کانی‌شناسی، تجزیه حرارتی، بار لایه‌ای، تجزیه عنصری

\*نویسنده مسئول: سعید حجتی

E-mail: s.hojati@scu.ac.ir

## ۱- پیش‌گفتار

کانی سپیولیت (Sepiolite) از کانی‌های فراوان در مناطق خشک دنیا است. پراکنندگی زمانی و جغرافیایی این کانی‌ها نشان می‌دهد که فراوانی کانی یادشده در رسوبات جوان‌تر از کرتاسه پسین افزایش می‌یابد (Khademi & Mermut, 1998; Singer, 1989; Singer et al., 1995; Akbulut & Kadir, 2003; Hojati & Khademi, 2011). همچنین بیشترین فراوانی حضور این کانی در عرض‌های جغرافیایی ۳۰ تا ۴۰ درجه در نیمکره‌های شمالی و جنوبی دیده می‌شود (Yalcin & Bozkaya, 1995; Hojati & Khademi, 2011).

به دلیل ویژگی‌های ساختاری، کانی سپیولیت ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که از آن میان می‌توان به تخلخل و سطح ویژه زیاد، جذب‌کنندگی قوی و ویژگی‌های رئولوژیکی (Rheological) خاص این کانی اشاره کرد. فرمول ساختمانی ایده‌آل این کانی که از کانی‌های سیلیکاتی تری اکتاهدرال (Tri-octahedral) و آب‌دار است، به صورت  $\text{Mg}_8\text{Si}_{12}\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  می‌باشد (Galan, 1996). هر واحد ساختمانی در این کانی از دو صفحه چهاروجهی (Tetrahedral) در اطراف و یک صفحه هشت‌وجهی (Octahedral) غنی از منیزیم در مرکز تشکیل شده است. جایگزینی هم‌شکل سیلیسیم به وسیله یون‌های آلومینیم در لایه‌های چهاروجهی این کانی، با ایجاد بار منفی مکان‌های مناسبی را برای جذب کاتیون‌ها به وجود می‌آورد. همچنین به دلیل ناپیوستگی صفحات سیلیکاتی بیرونی تعداد قابل توجهی گروه‌های عامل سیلانول (Si-OH) در سطح این کانی دیده می‌شود.

سپیولیت همچنین از کانی‌های مهم صنعتی است. از مهم‌ترین استفاده‌های این کانی می‌توان به تهیه گل‌های حفاری، رنگ‌ها، شوینده‌های مایع، چسب‌ها، مواد براق‌کننده اتومبیل، لوازم آرایشی و بهداشتی، جاذب‌های کف ساختمان و مواد تمیزکننده آلودگی‌های نفتی اشاره کرد (Galan, 1996; Murray, 2007).

مهم‌ترین ذخایر کانی سپیولیت در دنیا می‌توان به ذخایر اسکیشهر (Eskisehir) و پولاتی (Polatti) ترکیه، ال-بور (El-Bur) سومالی، نوادای آمریکا، مونفراتو (Monferato) ایتالیا، لئیانگ (Leiyang) چین، ویکالوارو (Vicalvaro) و وایکاس (Vallecas) اسپانیا اشاره کرد. بزرگ‌ترین ذخایر سپیولیت دنیا در کشور اسپانیا قرار دارد و این کشور را می‌توان به عنوان بزرگ‌ترین صادرکننده این کانی در دنیا به شمار آورد (Murray, 2007). در رابطه با حضور کانی سپیولیت در ایران گزارشی وجود دارد که تعداد آنها بسیار محدود است. برای نمونه می‌توان به مطالعه Khademi & Mermut (1998) اشاره کرد که مقادیر ناچیزی از این کانی را در سنگ‌آهک‌های الیگوسن-میوسن در ایران مرکزی گزارش کردند. حجتی (۱۳۸۹) نیز حضور مقدار کمی کانی سپیولیت را در مارن‌های پلیوسن ایران مرکزی گزارش کرد. ولی تا به حال گزارشی که ذخایر کانی سپیولیت را در کشور معرفی کرده باشد موجود نیست. همچنین، با وجود اطلاعات زیادی که در رابطه با انواع خارجی این کانی در دنیا وجود دارد، هیچ گزارشی تاکنون در رابطه با بررسی ویژگی‌های انواع ایرانی کانی سپیولیت منتشر نشده است. از این رو، این مطالعه با هدف شناسایی و بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی ذخایر سپیولیت شمال خاور ایران انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های سپیولیت مورد استفاده در این پژوهش از معدنی در پیرامون روستای الیاتو از توابع شهرستان فریمان در شمال خاور ایران گردآوری شد (شکل ۱). از نظر جغرافیایی معدن مورد مطالعه در محدوده طول‌های جغرافیایی ۵۹ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۲ دقیقه خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی قرار دارد. شهرستان فریمان از نظر اقلیمی زمستان‌های

ویژگی‌های ریخت‌شناختی کانی سیپولیت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری فیلیم مدل CM10 در دانشکده دامپزشکی دانشگاه شیراز بررسی شد. برای مطالعه ویژگی‌های ساختمانی کانی سیپولیت در ذخایر مورد مطالعه، ابتدا قرص‌هایی از نمونه کانی و برمید پتاسیم با نسبت تقریبی ۱:۲۰۰ (کانی: برمید پتاسیم) در شرایط خلاء و با فشار معادل ۸ تن بر سانتی‌متر مربع تهیه و سپس طیف فرسرخ (Infrared) نمونه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج Bruker مدل 27 Tensor در دامنه اعداد موجی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ بر سانتی‌متر در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان بررسی شد. همچنین منحنی تغییرات حرارتی (Thermo-gravimetric Analysis) کانی سیپولیت مورد استفاده در این مطالعه، با استفاده از دستگاه تجزیه حرارتی Bahr مدل STA Type 503 در محدوده حرارتی ۲۵ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان رسم شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱. مطالعات پراش پرتو ایکس

معمول‌ترین روش شناسایی کانی‌های رسی استفاده از پراش پرتو ایکس است (Moore & Reynolds, 1989; Singer, 2002). شکل ۲ پراش‌نگاشت‌های (Diffraction patterns) پرتو ایکس نمونه سیپولیت مورد مطالعه را نشان می‌دهد. سیپولیت در پراش‌نگاشت‌های پرتو ایکس یک پیک قوی ناشی از پراش مقدار  $d$  معادل  $1/2$  نانومتر نشان می‌دهد و دیگر پیک‌های این کانی با شدت متوسط ناشی از پراش مقادیر  $d$  معادل  $0/427$ ،  $0/374$ ،  $0/344$ ،  $0/318$  نانومتر هستند (Singer, 1989; Singer, 2002) (جدول ۱). از این رو، پراش‌نگاشت‌های پرتو ایکس در ذخایر مورد مطالعه نشان از حضور کانی سیپولیت به عنوان فاز اصلی و کانی‌های کوارتز ( $0/426$  و  $0/334$  نانومتر) و دولومیت ( $0/287$  نانومتر) به عنوان فاز فرعی دارند (شکل ۲). Singer et al. (1998) هم با مطالعه ذخایر سیپولیت ال-بور در کشور سومالی حضور کانی‌های کوارتز و کلسیت را به صورت همراه و به عنوان فاز فرعی در این ذخایر گزارش کردند.

همچنین مطالعه پراش‌نگاشت‌های پرتو ایکس در نمونه‌های اشباع شده با منیزیم، اشباع از منیزیم و اتیلن گلیکول، اشباع از پتاسیم، و حرارت دادن نمونه اشباع از پتاسیم تا  $550$  درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند که کانی سیپولیت موجود در ذخایر منطقه فریمان در اثر اعمال تیمار اتیلن گلیکول منبسط نشده و در اثر اعمال حرارت تا  $550$  درجه سانتی‌گراد ساختار کانی از حالت بلورین به بی‌شکل تغییر می‌یابد. این نتایج با یافته‌های دیگر دانشمندان که تغییر نکردن ستبرای بلور این کانی‌ها را با افزایش رطوبت نسبی و یا در نتیجه افزایش ملکول‌های آلی قطبی، و متلاشی شدن ساختار آنها در اثر اعمال حرارت گزارش کرده‌اند (Singer, 2002) هماهنگی دارد.

نتایج مربوط به برآورد میزان حضور کانی سیپولیت در ذخایر مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. از این رو، میزان حضور کانی سیپولیت در ذخایر منطقه فریمان  $70$  تا  $80$  درصد بوده و کانی‌های کوارتز و دولومیت نیز به ترتیب  $15$  -  $10$  و  $10$  -  $5$  درصد از ترکیب کانی‌شناسی ذخایر مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند.

#### ۳-۲. مطالعات ژئوشیمیایی

ترکیب ژئوشیمیایی و عنصری ذخایر مورد مطالعه به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. از این رو، دیده می‌شود که ذخایر سیپولیت شمال خاور کشور قلیایی و شور بوده و میانگین pH و هدایت الکتریکی عصاره اشباع در آنها به ترتیب میان  $7/38$  تا  $8/05$  و  $4/1$  تا  $7/9$  دسی ژیمنس بر متر متغیر است. همچنین بر پایه ترکیب عنصری این ذخایر دیده می‌شود که میزان آلومینیم، آهن، سدیم، پتاسیم و تیتانیم در این ذخایر ناچیز است، حال آنکه مقادیر قابل توجهی سیلیسیم و منیزیم در این ذخایر دیده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از مطالعه پراش‌نگاشت‌های پرتو ایکس در نمونه‌های مورد مطالعه، بخشی از کلسیم موجود احتمالاً به واسطه وجود

سرد و به نسبت طولانی و تابستان‌های معتدل و کوتاه دارد. میانگین درجه حرارت سالانه در منطقه فریمان  $14/7$  درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه در شهرستان فریمان از  $150$  تا  $200$  میلی‌متر تغییر می‌کند. ارتفاع متوسط منطقه نیز از سطح دریا  $1940$  متر است. از نظر زمین‌شناسی، برکه فریمان در مرز برخورد صفحه‌های ایران و توران قرار دارد و بیشتر رخنمون نهشته‌های محدوده نقشه فریمان مربوط به دوران سنوزویک است. این نهشته‌ها بیشتر شامل ماسه‌سنگ، کنگلومرا، مارن، گچ، نمک و سنگ‌آهک است (واعظی‌پور و سهیلی، ۱۳۸۷). بر پایه نقشه زمین‌شناسی  $1:100000$  فریمان ذخایر سیپولیت مورد مطالعه در این پژوهش سن پلیوسن - کواترن دارند (واعظی‌پور و سهیلی، ۱۳۸۷).

به منظور شناسایی و بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ذخایر مورد مطالعه،  $10$  نمونه که از نقاط مختلف معدن الیاتو به صورت تصادفی گردآوری شده بود برای انجام آزمایشات بعدی مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه ابتدا در معرض هوا خشک و پس از آسیاب شدن از الک  $0/1$  میلی‌متر ( $140$  مش) عبور داده شدند. در نمونه‌های مورد مطالعه کربن آلی به روش اکسایش تر و مقدار آهک با استفاده از روش عیارسنجی برگشتی تعیین شد (USDA-NRCS, 1996). اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی در عصاره اشباع انجام شد. سطح ویژه نمونه‌های مربوط به ذخایر مورد بررسی با استفاده از روش  $N_2$ -BET و ظرفیت تبادل کاتیونی آنها نیز با استفاده از روش استات سدیم تعیین شد (USDA-NRCS, 1996). همچنین به منظور مقایسه نتایج حاصل با یک نمونه استاندارد و از پیش شناسایی شده، سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی یک نمونه کانی سیپولیت منطقه وایکاس اسپانیا نیز اندازه‌گیری شد.

برای تعیین ترکیب کانی‌شناختی ذخایر مورد مطالعه و همچنین تعیین درجه خلوص کانی سیپولیت در این ذخایر، نمونه‌های پودری و جهت یافته از ذخایر مورد مطالعه تهیه و سپس پراش‌نگاشت‌های پرتو ایکس این نمونه‌ها توسط دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس فیلیم مدل PW1840 در محدوده زوایای پراش  $4$  (20) تا  $70$  درجه و سرعت اسکن  $0/5$  درجه در هر دقیقه در شرایط عملیاتی ولتاژ  $40$  کیلوولت و آمپراژ  $20$  میلی‌آمپر توسط لامپ پرتوی ایکس با فلز هدف مس رسم شد. گفتنی است که مطالعه نمونه‌های جهت یافته از ذخایر مورد مطالعه پس از حذف کربنات‌ها انجام شد. برای تعیین درصد خلوص کانی سیپولیت در نمونه‌های مورد مطالعه از روش Ruhe & Olson (1979) استفاده شد. در این روش مقادیر مختلفی از کانی سیپولیت به درصد‌های مشخصی از نمونه استاندارد (نمونه سیپولیت منطقه وایکاس اسپانیا) افزوده شده و سپس نسبت مساحت زیر پیک کانی از پراش‌نگاشت‌های پرتو ایکس در این نمونه‌ها محاسبه می‌شود. با رسم نسبت مساحت زیر پیک کانی در برابر درصد نمونه، درجه خلوص کانی را می‌توان از شیب خط برازش داده شده محاسبه کرد.

برای تعیین فرمول ساختمانی کانی سیپولیت در ذخایر مورد مطالعه، ترکیب عنصری نمونه‌های مورد مطالعه پس از حذف ناخالصی‌های مربوط به حضور کربنات‌ها و برآورد میزان حضور دیگر کانی‌های همراه، از روش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (X-ray Fluorescence Spectrometry) تعیین و سپس فرمول ساختمانی کانی سیپولیت بر پایه مدل پیشنهادی (Brauner & Preisinger 1956) محاسبه شد.

برای مشاهده ریخت‌شناسی (Morphology) کانی سیپولیت در حالت طبیعی، نمونه‌های خیلی کوچک و دست نخورده از ذخایر مورد مطالعه ابتدا با چسب کربن روی پایه‌های آلومینیمی چسبانده شده و سپس با لایه‌ای از طلا پوشش داده شدند. آنگاه نمونه‌های مورد مطالعه توسط میکروسکوپ الکترونی رویشی Leo مدل 1455VP در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید چمران اهواز بررسی شدند. همچنین با استفاده از آب دوبار تقطیر سوسپانسیون رقیقی از نمونه‌های مورد مطالعه تهیه و پس از انتقال و خشک کردن نمونه‌ها روی شبکه‌های مسی با اندازه  $200$  مش ( $0/07$  میلی‌متر)،

کانی دولومیت به عنوان ناخالصی است. از آنجایی که کانی سیپولیت به طور عمدی در محیط‌های شور با pH قلیایی و فعالیت زیاد سیلیسیم ولی فعالیت بسیار کم آلومینیم تشکیل می‌شود (Singer, 1989)، بنابراین به نظر می‌رسد ترکیب شیمیایی ذخایر مورد مطالعه با اطلاعات ارائه شده در منابع همخوانی داشته و بیشتر این ذخایر در شرایط قلیایی و شور که میزان قابل توجهی منیزیم و سیلیسیم در محیط وجود داشته تشکیل شده‌اند. همچنین همان گونه که دیده می‌شود نسبت میزان منیزیم به کلسیم محلول در ذخایر مورد مطالعه بسیار زیاد است و نشان می‌دهد که این ذخایر در محیطی غنی از منیزیم و فقیر از کلسیم ایجاد شده‌اند. در همین ارتباط Yalcin & Bozkaya (1995) نیز نشان دادند که برای تشکیل کانی سیپولیت نسبت به کانی‌های پالیگورسکیت و اسمکتیت در منطقه حکیم خان کشور ترکیه به منیزیم بیشتری نسبت به کلسیم نیاز است. با فرض وجود ۱۵ درصد ناخالصی مربوط به حضور کوآرتز که از مطالعات پراش پرتو ایکس به دست آمد (جدول ۲) و با استفاده از ترکیب عنصری ذخایر مورد مطالعه پس از حذف کربنات‌ها، فرمول ساختمانی کانی سیپولیت در ذخایر مورد مطالعه عبارت است از:

### ۳-۴. طیف‌سنجی فروسرخ (Infrared Spectroscopy)

طیف سنجی فروسرخ در کانی‌های فیبری بیشتر متأثر از وضعیت هیدراتاسیون این کانی‌ها است (Yariv, 1986; Frost et al., 2001). این روش همچنین می‌تواند ترکیباتی را که برای روش پرتو ایکس بی‌شکل (Amorphous) باشند نیز تشخیص دهد. از محاسن دیگر این روش سرعت کم و نیاز به مقدار کم نمونه است (Hayashi et al., 1969). شکل ۶ طیف فروسرخ نمونه سیپولیت مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود در طیف جذبی نمونه سیپولیت منطقه فریمان، ۵ نوار جذبی در محدوده ۳۶۸۱ تا ۳۲۴۸ بر سانتی‌متر وجود دارد که مربوط به نوسان گروه‌های هیدروکسیل، گروه‌های هیدروکسیل-سیلیسیم، هیدروکسیل‌های ساختار هست‌و‌جعی، آب پیوندی و آب زئولیتی است (شکل ۶). باند جذبی در ناحیه ۱۴۴۲ بر سانتی‌متر نیز احتمالاً مربوط به وجود کربنات‌ها (دولومیت) به عنوان ناخالصی در ذخایر مورد مطالعه است.

به طور کلی نوارهای جذبی که در دامنه ۱۳۰۰ تا ۴۰۰ بر سانتی‌متر دیده می‌شوند باندهای ویژه کانی‌های سیلیکاتی هستند که بیشتر به پیوند میان گروه‌های اکسیژن و سیلیسیم در لایه تراهدرال و همچنین نوسانات گروه‌های اکسیژن-منیزیم در صفحه‌های اکتاهدرال کانی مربوط است. از این رو، نوارهای جذبی که در ناحیه ۱۳۰۰ تا ۱۰۰۰ بر سانتی‌متر طیف فروسرخ ذخایر مورد مطالعه دیده می‌شوند مربوط به کشش پیوندهای میان اکسیژن و سیلیسیم و باندهای جذبی موجود در دامنه ۴۲۵ تا ۵۳۵ بر سانتی‌متر حاصل خمش گروه‌های اکسیژن-سیلیسیم-اکسیژن در ساختار کانی هستند (شکل ۶). Erdogan-Alver et al. (2008) و Perraki & Orphanoudaki (2008) نیز با مطالعه طیف فروسرخ ۲ نمونه کانی سیپولیت ترکیه و یونان نتایج مشابهی را گزارش کردند.

### ۳-۵. مطالعات میکروسکوپ الکترونی

این روش برای شناسایی برخی از کانی‌های رسی با ریخت‌شناسی مشخص مانند کانی‌های رشته‌ای پالیگورسکیت و سیپولیت استفاده فراوان دارد. مطالعه ریزنگاش‌های (Micrographs) میکروسکوپ الکترونی عبوری حضور کانی‌هایی با ریخت‌شناسی رشته مانند را در ذخایر مورد مطالعه تأیید می‌کند (شکل ۷). گفتنی است که هر دو کانی پالیگورسکیت و سیپولیت ریخت‌شناسی فیبری دارند و تشخیص آنها با میکروسکوپ الکترونی تا حدودی مشکل است (Singer, 2002). بنابراین برای تشخیص این که آیا شکل‌های فیبری دیده شده در نمونه‌های مورد مطالعه سیپولیت هستند یا پالیگورسکیت، از اطلاعات ارائه شده در پراش نگاشت‌های اشعه ایکس استفاده شد. از این رو شکل‌های فیبری دیده شده در ریزنگاشت‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری و روبشی سیپولیت تشخیص داده شد. مطالعه ریزنگاشت‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری رشته‌های این کانی را در

همان گونه که در فرمول پیشنهادی و جدول ۵ دیده می‌شود، جانشینی آلومینیم به جای سیلیسیم در لایه تراهدرال کانی (Si<sub>11.97</sub>Al<sub>0.03</sub>) ناچیز بوده و در برابر آن جایگزینی کاتیونی در لایه اکتاهدرال کانی (Mg<sub>7.20</sub>Al<sub>0.11</sub>Fe<sub>0.15</sub>) کم است و بنابراین بار مثبت اضافی حاصل از جانشینی آلومینیم به جای منیزیم تنها بخشی از بار منفی ایجاد شده در لایه‌های اکتاهدرال و تراهدرال را در کانی خنثی می‌کند. همچنین همان گونه که دیده می‌شود در ساختار این کانی، ۳ نوع آب شامل آب زئولیتی (8H<sub>2</sub>O)، آب ساختمانی پیوند یافته با یون‌های منیزیم (OH<sub>2</sub>)، و گروه‌های هیدروکسیل (OH) دیده می‌شود (Murray, 2007).

Garcia-Romero & Suarez (2010) با مطالعه ۲۱ نمونه سیپولیت که از نقاط مختلف دنیا گردآوری شده بود (جدول ۵)، نشان دادند که بر پایه میزان آلومینیم موجود در لایه اکتاهدرال کانی سیپولیت، این کانی را می‌توان به ۲ گروه سیپولیت‌های غنی از آلومینیم و انواع معمولی تقسیم‌بندی کرد. نتایج مطالعه ایشان همچنین نشان داد که در سیپولیت‌های غنی از آلومینیم بیش از ۱۰ درصد از کل موقعیت‌های لایه اکتاهدرال کانی خالی بوده و تعداد اتم‌های آلومینیم موجود در لایه اکتاهدرال کانی بیش از ۰/۵ است. از این رو به نظر می‌رسد که ذخایر سیپولیت منطقه فریمان در شمال خاور کشور بیشتر از گروه سیپولیت‌های معمولی بوده و میزان جانشینی هم‌شکل آلومینیم به جای منیزیم در لایه اکتاهدرال این کانی ناچیز است (شکل ۴).

### ۳-۳. تجزیه‌های حرارتی

شکل ۵ منحنی تفریق حرارتی نمونه سیپولیت مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در نمونه‌های رس معمولاً ۲ نوع آب ساختمانی و جذب سطحی (Adsorbed water) وجود دارد. با توجه به اینکه از دست دادن این آب‌ها در هر کانی رسی کم و بیش در دمای ثابتی صورت می‌گیرد از این ویژگی برای شناسایی کانی‌های رسی استفاده می‌شود (Singer, 2002; Frost et al., 2009).

از این رو، در منحنی حرارتی ذخایر مورد مطالعه ۴ پیک گرم‌گیر (Endotherm) به ترتیب در ۱۳۴، ۳۳۶، ۵۴۶ و ۸۱۸ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شوند که به ترتیب با ۸/۶۹، ۳/۳۱، ۲/۶۵ و ۱۰/۱۹ درصد کاهش وزن همراه هستند. مقایسه واکنش حرارتی نمونه سیپولیت مورد استفاده در این پژوهش با ذخایر سیپولیت منطقه وایکاس اسپانیا و ال-بور سومالی نشان از وجود شباهت زیاد میان رفتار حرارتی این ذخایر و ذخایر سیپولیت یاد شده در بالا دارد و خلوص به نسبت زیاد کانی سیپولیت را در ذخایر مورد مطالعه ثابت می‌کند (جدول ۶). اولین پیک که در حرارت ۱۳۶ درجه سانتی‌گراد ظاهر شده است مربوط به حذف آب زئولیتی و جذب سطحی روی این کانی است (Erdogan-Alver et al., 2008; Perraki & Orphanoudaki, 2008).

را برای کانی سیپولیت میان ۲۰ تا ۴۵ سانتی‌مول در هر کیلوگرم کانی گزارش کرد. ولی در مطالعه حاضر مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی در ذخایر مورد مطالعه معادل ۱۱/۸ سانتی‌مول بار در هر کیلوگرم کانی به دست آمد که تقریباً با میزان اندازه‌گیری شده برای نمونه اسپانیایی یکسان است (جدول ۶). اگر چه ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش از میزان گزارش شده توسط Singer (1989) کمتر است، ولی گزارش‌هایی نیز وجود دارند که ظرفیت تبادل کاتیونی کانی سیپولیت را کمتر از میزان پیشنهادی توسط Singer (1989) ارائه کرده‌اند. Alvarez-Ayuso & Garcia-Sanchez (2003) ظرفیت تبادل کاتیونی یک نمونه کانی سیپولیت منطقه وایکاس اسپانیا را ۹/۵ سانتی‌مول بار در هر کیلوگرم کانی گزارش کردند. از این رو به نظر می‌رسد که ظرفیت تبادل کاتیونی ارائه شده برای ذخایر سیپولیت منطقه فریمان با مقادیر گزارش شده در منابع همخوانی دارد و چندان دور از ذهن نیست.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بر پایه نتایج این مطالعه ذخایر مورد مطالعه در شمال خاور کشور دارای مقادیر قابل توجهی سیپولیت (۷۰ تا ۸۰ درصد) هستند که تبلور خوبی نیز دارند. مطالعات میکروسکوپ الکترونی هم حضور رشته‌های طولی و درهم تابیده کانی سیپولیت را که گاه به صورت پوششی بلورهای کانی دولومیت را در بر گرفته بودند اثبات کرد و نشان داد که تنشت کانی سیپولیت در ذخایر مورد مطالعه احتمالاً در شرایطی که غلظت زیادی از منیزیم و سیلیسیم محلول وجود داشته انجام شده است. همچنین بر پایه تجزیه عنصری ذخایر مورد مطالعه، فرمول ساختمانی پیشنهادی برای این کانی عبارت است از:  $(\text{Si}_{11.97}\text{Al}_{0.03})(\text{Mg}_{7.203}\text{Al}_{0.109}\text{Fe}_{0.151})\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{OH}_2)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  که نشانگر جانشینی کم آلومینیم به جای سیلیسیم و منیزیم به ترتیب در لایه‌های تراهدرال و اکتاهدرال کانی و وجود بار لایه‌ای به نسبت کم در کانی است. مطالعه منحنی حرارتی ذخایر سیپولیت مورد بررسی نیز نشان داد که حذف آب از ساختمان این کانی تدریجی بوده و بسته به قدرت پیوند در ۴ مرحله (۱۳۴، ۳۳۶، ۵۴۶ و ۸۱۸ درجه سانتی‌گراد) انجام می‌شود. همچنین مقایسه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های سیپولیت مورد مطالعه با انواع خارجی این کانی نیز نشان داد که کیفیت کانی سیپولیت ایران در حد نمونه‌های خارجی بوده و بنابراین می‌تواند برای استفاده‌های صنعتی مورد توجه قرار گیرد.

#### سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از دانشگاه‌های شهید چمران اهواز و صنعتی اصفهان به دلیل تأمین هزینه‌های لازم برای انجام این پژوهش و همچنین از پرسنل محترم شرکت معدنی درکاو بویژه آقایان مهندس توسی و رضایی که در نمونه‌برداری و بازدید از منطقه با نویسندگان همکاری کردند سپاسگزاری کنند.

ذخایر مورد مطالعه با طولی در حدود ۱۰ تا ۲۰ میکرون و عرض میان ۱۵ تا ۴۰ نانومتر نشان می‌دهند. Singer et al. (1998) نیز با مطالعه ذخایر سیپولیت ال-بور سومالی طول رشته‌های این کانی را بین ۲ تا ۶ میکرون و عرض آنها را ۲۰ تا ۴۰ نانومتر گزارش کردند.

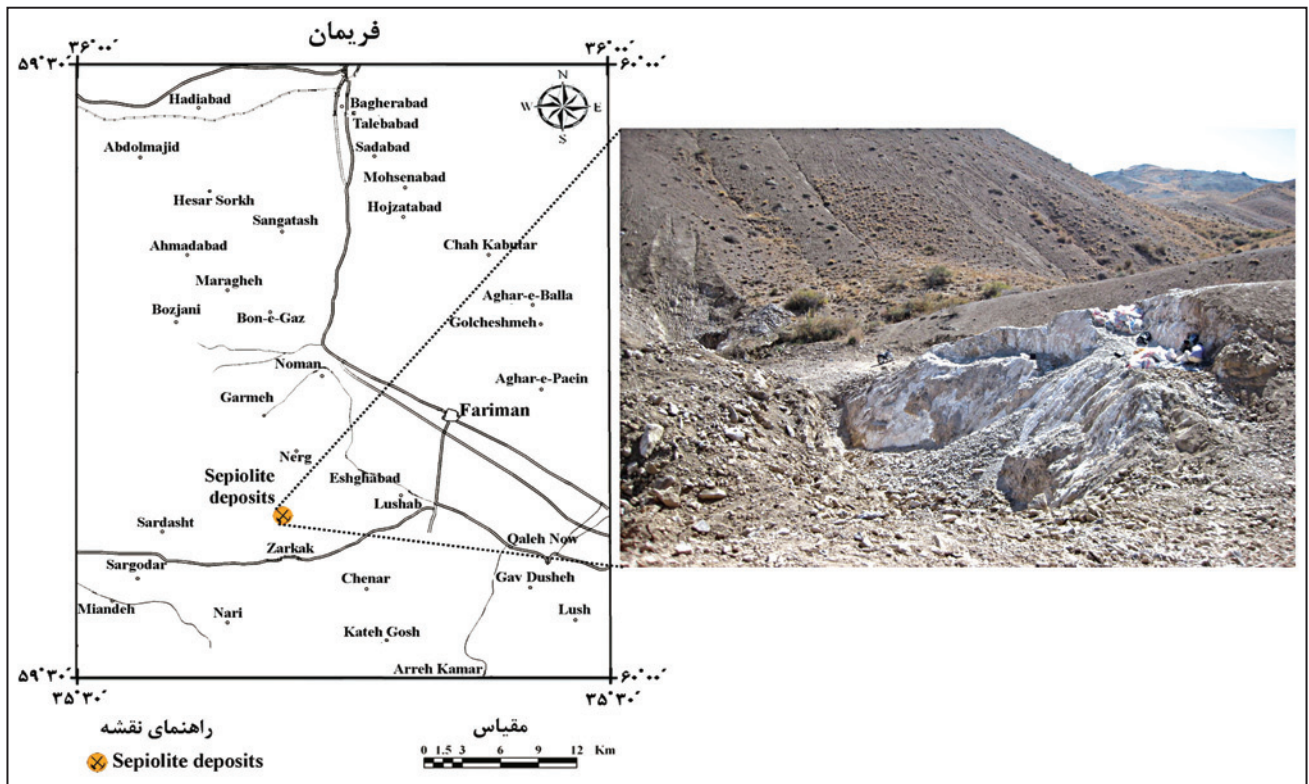
ریزننگشت‌های گرفته‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی در این پژوهش نشان می‌دهند که رشته‌های این کانی را به صورت رشته‌های طولی در هم تابیده شده (Interwoven) و موازی یکدیگر که به سوی منافذ گسترده شده‌اند و گاه به صورت پوششی بلورهای کانی دولومیت را در بر می‌گیرند، می‌توان دید. در همین ارتباط حضور دولومیت در ذخایر مورد مطالعه با استفاده از دستگاه تجزیه عنصری که روی میکروسکوپ الکترونی روبشی نصب شده بود ثابت شد. تشکیل کانی سیپولیت روی دولومیت همچنین نشان می‌دهد که کانی سیپولیت در رسوبات مورد مطالعه پس از تشکیل دولومیت ایجاد شده است (شکل ۷). در واقع در چنین شرایطی تشکیل دولومیت سبب می‌شود که فعالیت منیزیم محلول افزایش یابد. این شرایط به همراه pH زیاد رسوبات مورد مطالعه که فعالیت سیلیسیم محلول را نیز افزایش می‌دهد محیط مناسبی را برای تشکیل کانی سیپولیت فراهم کرده است (Singer, 1989; Hojati et al., 2010). این مشاهدات به همراه ریخت‌شناسی کشیده و بلند کانی سیپولیت به تشکیل درجای این کانی‌ها از محلول‌های غنی از منیزیم و یا پس از تنشت کانی دولومیت اشاره دارند و البته این احتمال را که حضور کانی سیپولیت در ذخایر مورد بررسی با منشأ آواری باشد رد می‌کند (Singer, 1989; Singer et al., 1995).

#### ۳-۶. سطح ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی

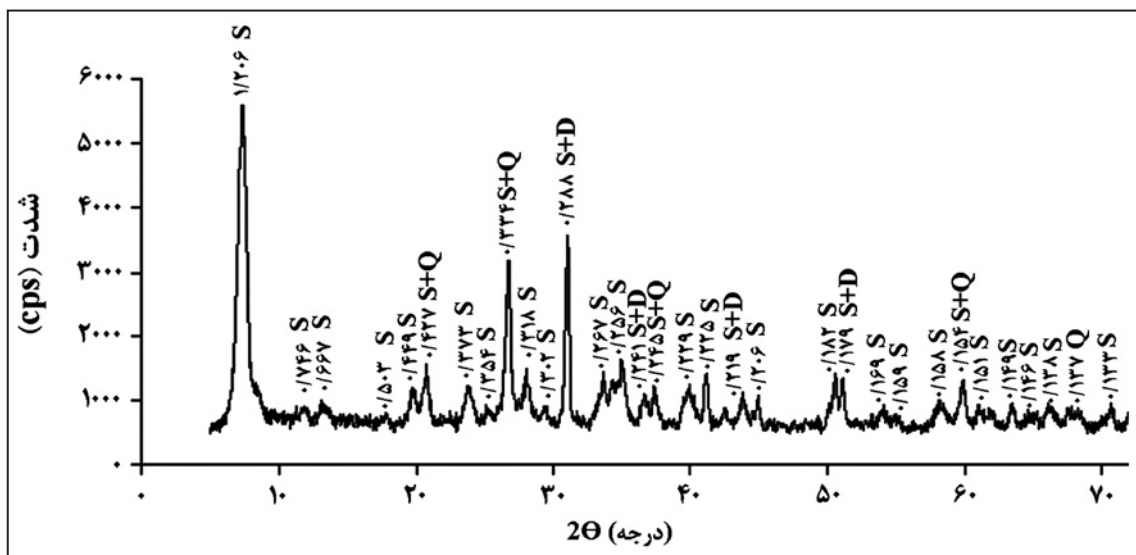
کانی‌های مختلف مقادیر متفاوت و مشخصی از سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی دارند که از این ویژگی‌ها می‌توان در شناسایی آنها استفاده کرد. برای نمونه کانی کائولینیت و برخی از کانی‌های خانواده میکا تنها سطوح ویژه خارجی دارند و مقدار سطح ویژه در آنها از ۱۰ تا ۷۰ متر مربع بر گرم بیشتر نمی‌شود. در مقابل کانی‌هایی مانند پالیکورسکیت، سیپولیت و اسمکتیت‌ها سطوح ویژه داخلی نیز دارند و میزان سطح ویژه در آنها به مراتب بیشتر از دیگر کانی‌ها است (Singer, 1989). در همین ارتباط سطح ویژه کانی سیپولیت از میزان گزارش شده برای پالیکورسکیت بیشتر بوده و از ۲۳۰ تا ۳۸۰ متر مربع در هر گرم کانی تغییر می‌کند (Serratos, 1979). البته باید توجه داشت که میزان سطح ویژه وابسته به اندازه ذرات بوده و با اندازه ذرات تغییر می‌کند. از همین رو سطح ویژه ذخایر سیپولیت مورد مطالعه کمتر از مقادیر ارائه شده در منابع و در محدوده ۱۷۵ تا ۱۸۹ مترمربع در هر گرم کانی به دست آمد. ولی مقایسه سطح ویژه ذخایر سیپولیت منطقه وایکاس اسپانیا با پراکندگی اندازه ذرات مشابه با نمونه‌های مطالعه شده از ذخایر سیپولیت شمال خاور ایران (جدول ۷) نشان می‌دهد که سطح ویژه هر دو کانی تقریباً مشابه یکدیگر بوده و بنابراین کانی سیپولیت مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند برای استفاده‌های صنعتی مورد توجه قرار گیرد.

Singer (1989) نیز از ظرفیت تبادل کاتیونی به عنوان شاخص حضور کانی‌های فیبری سیپولیت و پالیکورسکیت استفاده کرد و میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی

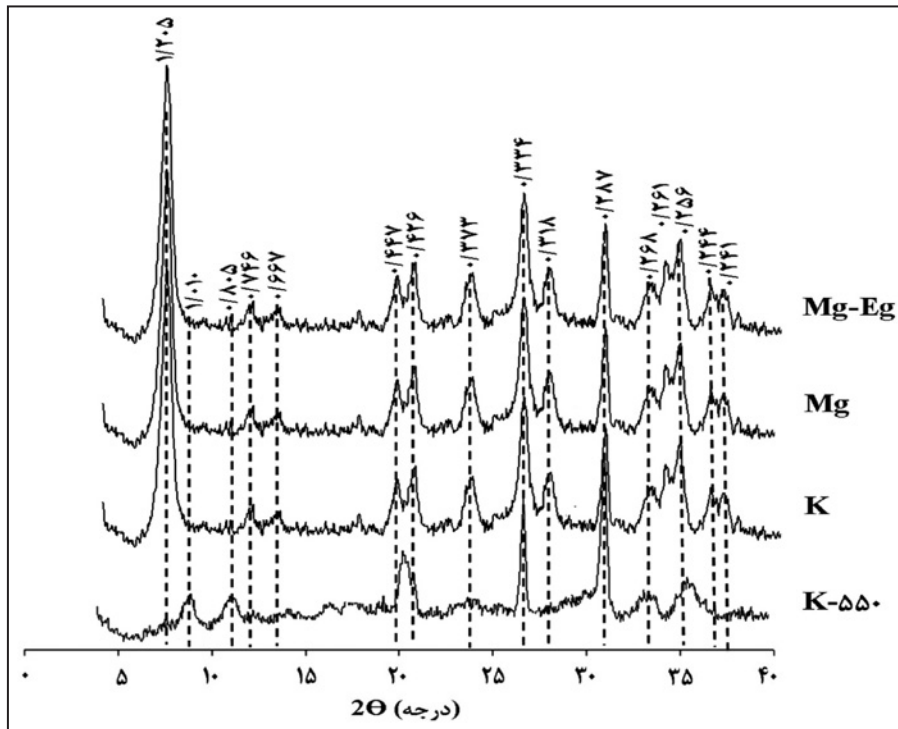




شکل ۱- موقعیت ذخایر سیپولیت مورد مطالعه در پیرامون شهرستان فریمان، شمال خاور کشور.

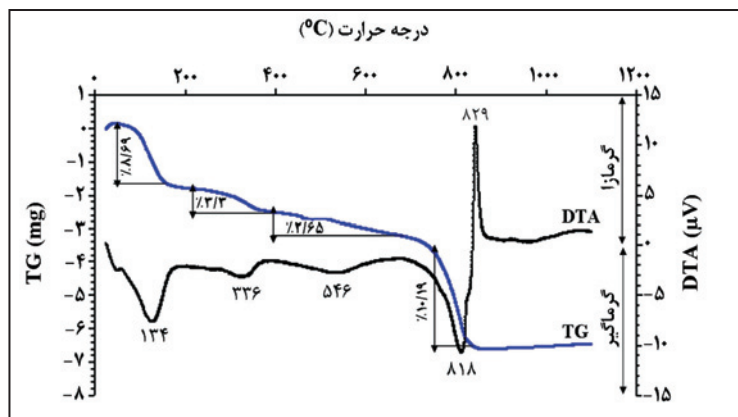
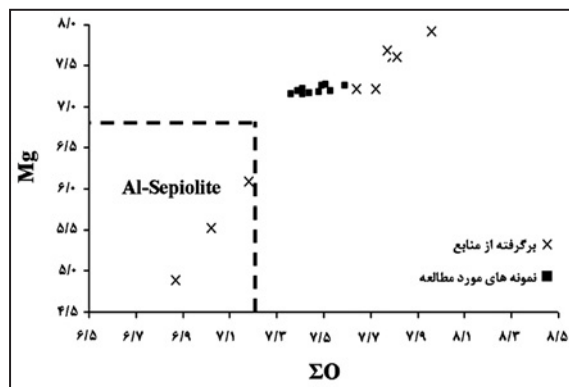


شکل ۲- پراش نگاشت پرتو ایکس نمونه پودری ذخایر سیپولیت شمال خاور ایران که در شرایط متعارف آزمایشگاهی و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد گرفته شده است. (S= سیپولیت، Q= کوارتز، D= دولومیت). اعداد قله‌ها (مقادیر d کانی‌ها) بر حسب نانومتر ارائه شده است.

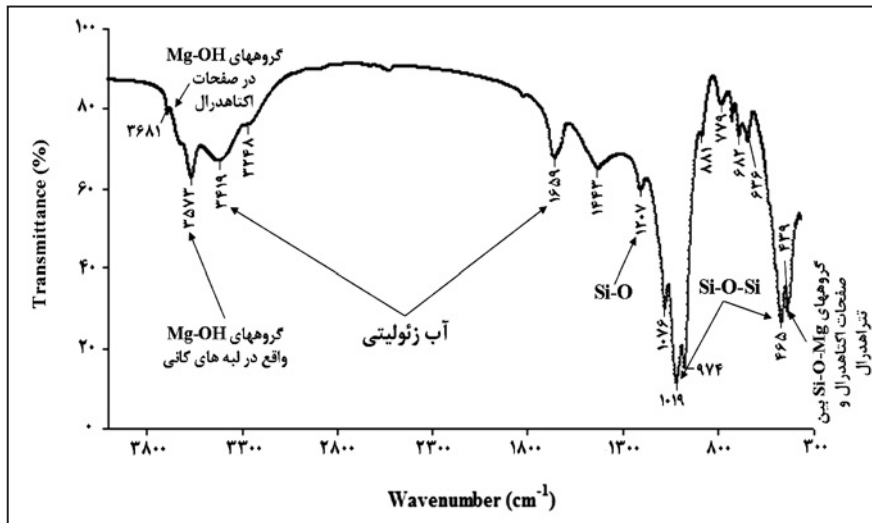


شکل ۳- پراش نگاشت‌های پرتو ایکس ذرات کوچک‌تر از ۰/۱ میلی‌متر ذخایر سپیولیت شمال خاور ایران. Mg-Eg = نمونه اشباع شده با منیزیم و اتیلن گلیکول، Mg = نمونه اشباع شده با منیزیم، K = نمونه اشباع شده با پتاسیم و K-550 = نمونه اشباع شده با پتاسیم پس از گرما دادن تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد. اعداد قله‌ها (مقادیر d کانی‌ها) بر حسب نانومتر ارائه شده‌اند.

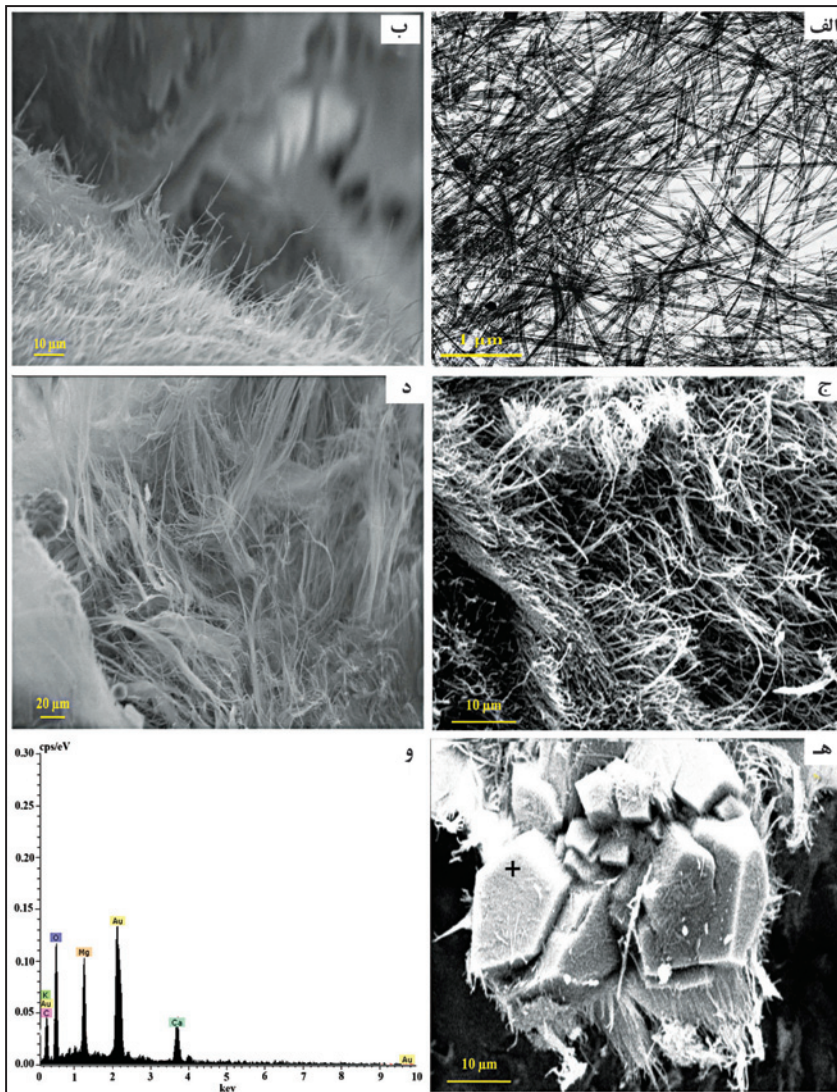
شکل ۴- نمودار میزان منیزیم در واحد فرمولی (apfu) در برابر مجموع کاتیون‌های لایه اکتاهدرال (ΣO) نمونه‌های سپیولیت مورد مطالعه در این پژوهش در مقایسه با انواع خارجی. اطلاعات مربوط به نمونه‌های خارجی از Garcia-Romero & Suarez (2010) برگرفته شده است.



شکل ۵- منحنی تجزیه حرارتی کانی سپیولیت ایران (مشهد)



شکل ۶- نمونه‌های از طیف فرسرخ ذخایر سپیولیت شمال خاور ایران



شکل ۷- رشته‌های طولی و در هم تابیده کانی سپیولیت در ریز نگاشت‌های میکروسکوپ الکترونی (الف) عبوری؛ ب تا ه) روشی ذخایر سپیولیت شمال خاور ایران که تشکیل در جای کانی را از محلول خاک و/یا پس از ته‌نشست دولومیت در این ذخایر نشان می‌دهند؛ و) تجزیه کیفی عنصری کانی دولومیت در ذخایر مورد مطالعه.

جدول ۱- نتایج بلورشناختی حاصل از بررسی پراش نگاشت پرتو ایکس یک نمونه پودری گرفته شده از ذخایر مورد مطالعه

نمونه سیپولیت ایران		
$I/I_0$	d (nm)	hkl
۱۰۰	۱/۲۰۶	۱۱۰
۱۳	۰/۷۴۶	۱۳۰
۱۴	۰/۶۶۶	۰۴۰
۲۵	۰/۴۴۷	۰۳۱
۳۶	۰/۴۲۷	۱۳۱
۳۲	۰/۳۷۳	۲۶۰
۶۵	۰/۳۳۴	۰۸۰
۲۵	۰/۳۱۸	۱۳۳
۷۷	۰/۲۸۹	۳۷۰
۹	۰/۲۶۸	۴۶۰
۱۱	۰/۲۵۶	۵۳۰
۲۵	۰/۲۴۴	۲۰۲
۱۹	۰/۲۴۱	۴۶۱
۲۲	۰/۲۲۹	۳۱۲
۱۲	۰/۲۱۳	۶۴۰
۱۱	*۰/۲۱۸	
۱۲	۰/۲۰۶	۴۰۲
۱۵	۰/۱۷۹	
۹	۰/۱۶۹	
۱۲	۰/۱۵۸	
	۰/۱۵۴	
	۰/۱۵۲	

\* مربوط به حضور دولومیت

جدول ۲- فراوانی نسبی کانی‌های سیپولیت، کوارتز و دولومیت معدن الیاتو در شمال خاور ایران

نمونه	سیپولیت	دولومیت	کوارتز
۱	۷۶	۱۰	۱۴
۲	۷۵	۱۰	۱۵
۳	۷۱	۹	۲۰
۴	۷۸	۵	۱۷
۵	۸۰	۱۰	۱۰
۶	۷۴	۸	۱۸
۷	۷۳	۱۰	۱۷
۸	۷۷	۸	۱۵
۹	۷۷	۱۰	۱۳
۱۰	۷۹	۵	۱۶
<b>میانگین</b>	۷۶	۸/۵	۱۴/۵
<b>انحراف معیار</b>	۲/۶۴	۱/۹۱	۲/۶۷

جدول ۳- مقایسه تجزیه عنصری نمونه سیپولیت ذخایر شمال خاور ایران و نمونه‌های سیپولیت از برخی کشورهای جهان

نمونه	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	کل
اسپانیا (والدمور)	۵۲/۹۰	۲/۵۶	۱/۲۲	۲۳/۶۰	۰/۰۰۱	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۲۰/۸	۱۰۱/۲۴
اسپانیا (ویکالوارو)	۵۵/۲۱	۰/۴۳	۰/۱۵	۲۴/۲۶	۰/۰۵۰	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۵	۱۹/۲۱	۹۹/۷۸
ترکیه (اسکیشهر)	۵۴/۱۳	۰/۲۵	۰/۱۳	۲۳/۷۵	۰/۰۲۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۲۰/۳۳	۹۸/۸۹
آمریکا (نوادا)	۵۴/۰۰	۰/۵۰	۰/۸۱	۲۳/۳۰	۰/۰۰۱	۱/۲۵	۲/۱۰	۰/۱۵	۱۹/۲	۱۰۱/۳۱
چین (لنیانگ)	۴۶/۹۲	۲/۸۵	۱/۲۵	۱۴/۱۳	۰/۰۲	۱۰/۴۴	۰/۱۵	۰/۳۳	۱۴/۸۰	۹۹/۶۵
سومالی (ال بور)	۵۶/۷۰	۱/۰۰	۰/۵۰	۲۰/۸	۰/۱۲	۱/۳	۰/۰۰	۰/۴۷	۱۹/۰۰	۹۹/۸۷
فریمان- بدون تیمار	۵۵/۳۲	۰/۳۰	۰/۶۱	۱۵/۷۳	۰/۰۲	۲/۷۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۲۵/۱۱	۹۹/۸۶
فریمان- پس از حذف کربنات‌ها	۵۵/۵۲	۰/۴۰	۰/۶۸	۱۶/۲۹	۰/۰۲	۱/۳۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۲۴/۸۹	۹۹/۱۳

اعداد ارائه شده برای تجزیه عنصری ذخایر سیپولیت مورد مطالعه در این پژوهش میانگین به دست آمده از مطالعه ۱۰ نمونه است.

جدول ۴- برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی ذخایر سیپولیت شمال خاور ایران

شماره نمونه	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	Ca <sup>++</sup> (mmol lit <sup>-1</sup> )	Mg <sup>++</sup> (mmol lit <sup>-1</sup> )	(Mg/Ca)	pb (g cm <sup>-3</sup> )
۱	۷/۹۱	۴/۲	۲/۲	۱۴/۲	۶/۴۵	۱/۶۳
۲	۷/۷۹	۵/۷	۱/۸	۱۲/۴	۶/۸۸	۱/۶۰
۳	۷/۳۸	۴/۱	۲/۴	۱۳/۸	۵/۷۵	۱/۶۱
۴	۷/۸۳	۴/۸	۲/۰	۱۲/۸	۶/۴۰	۱/۶۵
۵	۸/۰۵	۶/۱	۱/۸	۱۱/۸	۶/۵۵	۱/۶۰
۶	۷/۷۷	۷/۹	۲/۴	۱۴/۴	۶/۰۰	۱/۶۳
۷	۷/۷۲	۶/۸	۲/۶	۱۵/۰	۵/۷۷	۱/۶۲
۸	۷/۴۰	۶/۴	۲/۰	۱۳/۲	۶/۶۰	۱/۶۳
۹	۷/۵۸	۴/۸	۱/۸	۱۱/۸	۶/۵۵	۱/۶۵
۱۰	۷/۸۵	۶/۸	۱/۸	۱۲/۰	۶/۶۷	۱/۶۰
<b>میانگین</b>	۷/۷۳	۵/۵۳	۲/۱	۱۳/۱	۶/۳۶	۱/۶۲
<b>انحراف معیار</b>	۰/۲۰	۱/۵۱	۰/۲۹	۱/۱۰	۰/۳۷	۰/۰۲



جدول ۵- فرمول ساختمانی پیشنهادی برای نمونه سپیولیت ایران در مقایسه با فرمول‌های ساختاری گزارش شده از برخی نقاط جهان (Garcia-Romero &amp; Suarez, 2010)

Na	K	Ca	ΣO	Mg	Fe <sup>3+</sup>	<sup>IV</sup> Al	Στ	<sup>IV</sup> Al	Si	نمونه
۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۸۲۴	۷/۴۶۳	۷/۲۰۳	۰/۱۵۱	۰/۱۰۹	۱۲/۰۰	۰/۰۳	۱۱/۹۷	سپیولیت ایران
SD=۰/۰۵	SD=۰/۰۵	SD=۰/۱۶	SD=۰/۲۶	SD=۰/۱۳	SD=۰/۰۴	SD=۰/۰۴	SD=۰/۱۷	SD=۰/۰۲	SD=۰/۱۹	
۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۶	۷/۷۹	۷/۶۱	۰/۰۷	۰/۱۱	۱۲/۰۰	۰/۰۵	۱۱/۹۵	هنان چین
-	۰/۰۴	۰/۰۷	۷/۶۴	۷/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۲	۱۲/۰۰	۰/۰۳	۱۱/۹۷	مونفاتو ایتالیا
۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۶	۷/۷۷	۷/۶۹	۰/۰۶	۰/۰۲	۱۲/۰۰	-	۱۲/۰۰	سانتا کروز آمریکا
۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۵	۷/۸۱	۷/۶۱	۰/۰۷	۰/۱۳	۱۲/۰۰	۰/۰۸	۱۱/۹۲	ال بور سومالی
-	۰/۰۱	۰/۰۱	۷/۹۶	۷/۹۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۲/۰۰	۰/۰۱	۱۱/۹۹	اسکیشهر ترکیه
۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱۰	۷/۷۲	۷/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۷	۱۲/۰۰	۰/۲۳	۱۱/۷۷	ویکالوارو اسپانیا

اعداد ارائه شده در محاسبه فرمول ساختمانی ذخایر سپیولیت مورد مطالعه در این پژوهش میانگین به دست آمده از مطالعه ۱۰ نمونه است.

جدول ۶- مقایسه واکنش حرارتی ذخایر سپیولیت منطقه فریمان و ذخایر سپیولیت وایکاس اسپانیا و البور سومالی

سپیولیت ال-بور سومالی*	سپیولیت وایکاس اسپانیا*	سپیولیت فریمان	
<b>دمای واکنش (درجه سانتیگراد)</b>			
۱۰۴/۹	۱۰۴/۲	۱۳۴	اولین پیک گرمایر
۳۱۶/۵	۳۱۱/۸	۳۳۶	دومین پیک گرمایر
۵۰۸/۶	۵۱۱/۷	۵۴۶	سومین پیک گرمایر
۸۱۵/۶	۸۲۳/۳	۸۱۸	چهارمین پیک گرمایر
۸۳۱/۱	۸۳۴/۹	۸۲۹	پیک گرمایر

\* اطلاعات واکنش حرارتی نمونه‌های سپیولیت اسپانیا و سومالی از منبع Singer et al. (1998) گرفته شده است.

جدول ۷- مقایسه سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی ذخایر سپیولیت منطقه فریمان و ذخایر سپیولیت وایکاس اسپانیا

نمونه	سطح ویژه (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol kg <sup>-1</sup> )
سپیولیت فریمان	۱۷۹/۹	۱۱/۸
سپیولیت وایکاس اسپانیا	۱۸۶/۴	۱۳/۱

اعداد ارائه شده برای سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی، میانگین به دست آمده از مطالعه ۳ تکرار هستند.

## کتابنگاری

حجتی، س.، ۱۳۸۹- الگوی توزیع، تشکیل و پایداری کانی‌های فیبری در خاک‌های تشکیل شده بر روی برخی رسوبات دوران سوم زمین‌شناسی و مواد مادری آنها در بخشی از ایران مرکزی و زاگرس، رساله دکترای خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.  
واعظی‌پور، م. ج. و سهیلی، م.، ۱۳۸۷- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فریمان، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

## References

- Akbulut, A. & Kadir, S., 2003- The geology and origin of sepiolite, palygorskite and saponite in Neogene lacustrine sediments of the Serinhisar-Acipayam Basin, Denizli, SW Turkey. *Clays and Clay Minerals*, 51: 279-292.
- Álvarez-Ayuso, E. & Garcia-Sanchez, A., 2003- Sepiolite as a feasible soil additive for the immobilization of cadmium and zinc. *The Science of the Total Environment*, 305: 1-12.
- Brauner, K. & Preisinger, A., 1956- Struktur und Entstehung des sepioliths. *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*. 6: 120-140.

- Brigatti, M. F., Lugli, C. & Poppi, L., 2000- Kinetics of heavy-metal removal and recovery in sepiolite. *Applied Clay Science*, 16, 45-57.
- Erdogan-Alver, E., Sakici, M., Yorukogullari, E., Yilmaz, Y. & Guven, M., 2008- Thermal behavior and water adsorption of natural and modified sepiolite having dolomite from Turkey. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 94: 835-840.
- Frost, R. L., Kristof, J. & Horvath, E., 2009- Controlled rate thermal analysis of sepiolite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 98: 423-428.
- Frost, R. L., Locos, O. B., Ruan, H. & Klopogge, J. T., 2001- Near-infrared and mid-infrared spectroscopic study of sepiolites and palygorskites. *Vibrational Spectroscopy*, 27: 1-13.
- Galan, E., 1996- Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. *Clay Minerals*, 31: 443-453.
- Garcia-Romero, E. & Suarez, M., 2010- On the chemical composition of sepiolite and palygorskite. *Clays and Clay minerals*, 58: 1-20.
- Hayashi, H., Otsuka, R. & Imai, N., 1969- Infrared study of sepiolite and palygorskite on heating. *American Mineralogist*, 54: 1613-1624.
- Hojati, S. & Khademi, H., 2011- Genesis and distribution of palygorskite in Iranian soils and sediments. in: Galan, E. & Singer, A. (eds.) *Developments in Palygorskite-Sepiolite Research: A New Look at These Nanomaterials*. Elsevier, Amsterdam, PP. 201-218.
- Hojati, S., Khademi, H. & Faz Cano, A., 2010- Palygorskite formation under the influence of saline and alkaline groundwater in central Iranian soils. *Soil Science*, 175: 303-312.
- Khademi, H. & Mermut, A. R., 1998- Source of palygorskite in gypsiferous Aridisols and associated sediments from central Iran. *Clay Minerals*, 33: 561-578.
- Moor, D. M. & Reynolds, R. C., 1989- *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford Press, New York, 332 p.
- Murray, H. H., 2007- *Applied Clay Mineralogy: Occurrence, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays*, Elsevier, Amsterdam, 180 p.
- Perraki, T. & Orfanoudaki, A., 2008- Study of raw and thermally treated sepiolite from the Mantoudi area, Euboea, Greece. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91: 589-593.
- Ruhe, R. V. & Olson, C. G., 1979- Estimate of clay–mineral content: additions of proportions of soil clay to constant standard. *Clays and Clay Minerals* 27: 322–326
- Serratos, J. M., 1979- Surface properties of fibrous clay minerals (palygorskite and sepiolite). in: Mortland, M. M. & Farmer, V. C. (eds.) *Proc. Intl. Clay Conf.* Elsevier, Amsterdam, PP. 99-109.
- Singer, A., 1989- Palygorskite and sepiolite group minerals. in: Dixon, J. B. & Weed, S. B. (eds.) *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison, WI, PP. 829–872.
- Singer, A., 2002- Palygorskite and sepiolite. in: Dixon, J. B. & Schulze, D. G. (eds.) *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science Society of America, Madison, PP. 555-583.
- Singer, A., Kristen, W. & Böhmann, C., 1995- Fibrous clay minerals in the soils of Namaqualand, South Africa: characteristics and formation. *Geoderma*, 66: 43-70.
- Singer, A., Stahr, K. & Zarei, M., 1998- Characteristics and origin of sepiolite (Meerschaum) from Central Somalia. *Clay Minerals*, 33: 349-362.
- USDA-NRCS, 1996- *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report, No. 42, Version 3.0, Nebraska.
- Yalcin, H. & Bozkaya, O., 1995- Sepiolite-palygorskite from the Hekimhan region (Turkey). *Clays and Clay Minerals*, 43: 705-717.
- Yariv, S., 1986- Infrared evidence for the occurrence of SiO groups with double-bond character in antigorite, sepiolite and palygorskite. *Clay Minerals*, 21: 925-936.

# Physicochemical and Mineralogical Characteristics of Sepiolite Deposits of Northeastern Iran

S. Hojati<sup>1\*</sup> & H. Khademi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 2011 October 05

Accepted: 2012 April 11

## Abstract

There is no information about the occurrence and characteristics of sepiolite deposits in Iran. Thus, to identify and characterize the physicochemical and mineralogical properties of Eliyato deposits in northeastern Iran, 10 samples from different locations were taken and studied by powder X-ray diffraction, scanning and transmission electron microscopy, X-ray fluorescence, thermal analysis, infrared spectroscopy, specific surface area and cation exchange capacity. The results indicated that these deposits consist of well-crystallized sepiolite (70–80%), with minor amounts of quartz (10–20%) and dolomite (5–10%). The electron micrographs of the samples showed sepiolite as a long interwoven fibrous mat, pore-filling and coating material. This textural evidence suggests direct chemical precipitation of sepiolite from an Mg-rich solution and/or after the precipitation of dolomite. The chemical composition, determined by X-ray fluorescence, indicated a Mg-rich mineral with the structural formula  $(\text{Si}_{11.97}\text{Al}_{0.03}) (\text{Mg}_{7.20}\text{Al}_{0.11}\text{Fe}_{0.15}) \text{O}_{30} (\text{OH})_4 (\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . This suggests low isomorphous substitutions of Al for Si and Mg in the tetrahedral and octahedral sheets of the mineral, respectively. In addition, thermal analysis indicated four endothermic reactions at 134, 336, 546 and 818 °C which are associated with the gradual elimination of adsorbed and zeolitic water from the mineral structure. The associated weight losses are 8.69, 3.31, 2.65 and 10.19%, respectively. The high surface area of the material, compared to that of the Vallecas sepiolite deposit in Spain, suggests its suitability for industrial applications.

**Keywords:** Sepiolite, Magnesium, Mineralogy, Thermal Analysis, Layer Charge, Chemical Composition

For Persian Version see pages 165 to 174

\*Corresponding author: S. Hojati; E-mail: s.hojati@scu.ac.i