

## رخداد سپیولیت در فرامافیک‌های شمال نائین

شهزاد شرافت<sup>۱\*</sup>، زهرا ترک‌زاده<sup>۱</sup>، محمدعلی مکی‌زاده<sup>۲</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۹، نسخه نهایی: ۹۶/۵/۱۶)

**چکیده:** در این پژوهش، رخداد کانی سپیولیت برای نخستین بار از سنگ‌های فرامافیک توالی افیولیتی شمال نائین گزارش می‌شود. سپیولیت کانی رسی آبدار با ساختار الیافی است که به واسطه ویژگی‌های منحصر به فرد خود در صنایع مختلف کاربرد دارد. تشکیل سپیولیت، پیامد واکنش‌های متعددی است که در سنگ‌های فرامافیک توالی افیولیتی شمال نائین رخ داده است. این فرایند طی سه مرحله اصلی انجام شده است. ابتدا سیالات گرمایی با تأثیر بر سنگ‌های فرامافیک، آنها را به سرپانتینیت تبدیل کرده‌اند. هجوم سیالات دارای  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  در امتداد سطوح ضعف سرپانتینیت‌های برشی و خرد شده، باعث انحلال سرپانتینیت و کربناته شدن آن شده‌اند. طی کربناته شدن سرپانتینیت‌ها، واکنش بین سنگ‌های فرابازی با محلول‌های گرمایی سبب تشکیل محلولی غنی از Mg و Si یا در دمای پائین شده و سرانجام، کانی سپیولیت در نتیجه فعالیت سیالات گرمایی غنی از  $\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{CO}_2$  شکل گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** سپیولیت؛ سنگ‌های فرامافیک؛ لیستونیت؛ سیالات گرمایی؛ افیولیت نائین؛ ایران مرکزی.

### مقدمه

بزرگ‌ترین صادر کننده سپیولیت است [۳]. سپیولیت اغلب در محیط‌های دریایی، دریاچه‌ای شور و روزاد و در سنگ‌های غنی از فسفات، نمک، سولفات، کربنات، زئولیت و سیلیس متعلق به ترشیری تشکیل می‌شود [۶].

پژوهش‌های انجام شده پیرامون رخداد سپیولیت در ایران، منحصر به بررسی‌هایی است که بر سپیولیت‌های سنوزوئیک ایران مرکزی با سنگ میزبان رسوبی انجام گرفته [۵، ۷، ۸] و تاکنون گزارشی پیرامون رخداد سپیولیت در سنگ‌های فرابازی ایران منتشر نشده است.

سنگ‌های فرابازی شمال نائین، بخشی از توالی افیولیتی پیرامون خردقاره ایران مرکزی هستند که در امتداد گسل نائین-دهشیر رخنمون یافته‌اند. بخش فرابازیک این دنباله افیولیتی، در اثر دگرسانی ناشی از سیالات گرمایی (سرپانتینیتی و کربناته‌شدن)، به سنگی به نام لیستونیت (افی کربنات) تبدیل شده است. اصطلاح لیستونیت برای سنگ‌ها

سپیولیت ( $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) کانی رسی آبدار با ساختار الیافی است که به صورت نهان‌بلور و بی شکل (آمورف) و به رنگ‌های سفید متمایل به خاکستری، سفید متمایل به زرد و آبی-سبز دیده می‌شود [۱]. این کانی دارای جلای مات و شکستگی صدفی بوده و اغلب با کانی‌های دولومیت و اپال همراه است. تخلخل فراوان، سطح ویژه قابل توجه و قدرت جذب بالای سپیولیت سبب شده این کانی از نظر صنعتی حائز اهمیت فراوانی باشد [۳، ۲]. به دلیل قدرت جذب بالای سپیولیت، از این کانی می‌توان برای کاهش انتقال عناصر سمی ناشی از پساب‌های صنعتی (پساب‌های صنایع معدنکاری، آبکاری فلزات، تولید کودهای شیمیایی، صنایع تولید وسایل الکترونیکی، صنایع دارویی و رنگریزی، [۴]) به آب‌های زیرزمینی استفاده نمود [۵]. ذخایر مهم سپیولیت از کشورهای ترکیه، روسیه، سومالی، چین و ایتالیا گزارش شده و اسپانیا

آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان تعیین شد. برای مشاهده ریخت‌شناسی کانی سپیولیت، نمونه‌های طبیعی پس از چسباندن بر پایه‌های آلومینیومی، توسط لایه‌ای از طلا پوشش داده شده و بوسیله میکروسکوپ الکترونی فیلیپس مدل XI30 در آزمایشگاه دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان بررسی شدند. برای تعیین میانگین ترکیب شیمیایی سپیولیت، دو نمونه خالص سپیولیت پس از آماده‌سازی به نسبت مساوی مخلوط شدند و توسط دستگاه طیف‌سنجی فلورسانس پرتوایکس (XRF) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان مورد تجزیه قرار گرفتند (جدول ۱).

### بحث

گستره مورد پژوهش واقع در فاصله تقریبی ۱۵۰ کیلومتری شمال اصفهان، بخشی از توالی افیولیتی ایران مرکزی به سن کرتاسه پسین- پالئوسن است که در کرانه غربی خردقاره ایران مرکزی و در امتداد گسل نائین- بافت رخمون یافته است [۱۱]. مجموعه درهم ریخته افیولیتی شمال نائین (شکل ۱) از پریدوتیت‌های هارزبورژیتی سرپانتینی‌شده، دایک‌های دیابازی، اسپیلیت‌ها، سنگ‌های تونالیتی، قطعات چرت رادیولاریتی و آهک‌های پلاژیک تشکیل شده است [۱۲].

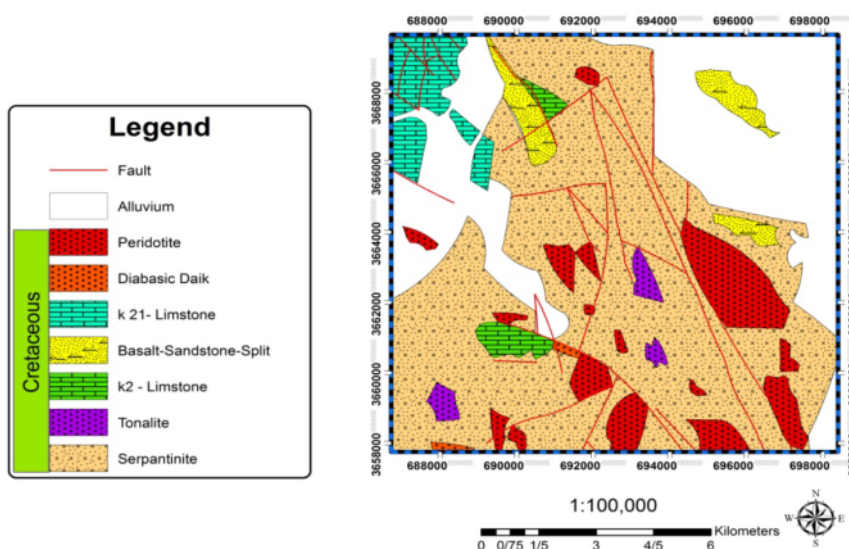
سرپانتینیته دگرسان که با مجموعه کانی‌های کوارتز، تالک، سرپانتین، کلریت، کانی‌های کربناته، اکسیدهای آهن و سولفیدهای Ni-Fe-Co مشخص می‌شوند به کار می‌رود [۱۰، ۹]. از آنجا که لیستونیت‌ها در اثر دگرتهادی شدید با محوریت سیالات حاوی CO<sub>2</sub> بوجود می‌آیند، تشکیل آنها در طول و محل تقاطع گسل‌ها با شدت بیشتری انجام می‌شود. این لیستونیت‌های مورد مطالعه درون پریدوتیت‌های سرپانتینی و در امتداد گسل‌ها رخمون یافته و میزبان بلورهای رشته‌ای تا الیافی کانی سپیولیت هستند. بررسی سازوکار و شرایط تشکیل سپیولیت در سنگ‌های فرامافیک شمال نائین، موضوع اصلی این پژوهش است.

### روش بررسی

در این پژوهش پس از بررسی‌های تفصیلی، مکان‌های مورد نظر برای پی‌جویی صحرایی انتخاب شد و با هدف دستیابی به کانی سپیولیت، نمونه‌برداری دقیق انجام شد. پس از برداشت‌های صحرایی، از نمونه‌های مناسب مقاطع نازک میکروسکوپیکی تهیه شد. بررسی کانی‌شناسی سنگ‌ها با استفاده از میکروسکوپ قطبشی المپوس مدل BH-2 صورت گرفت. فازهای کانیایی موجود در نمونه‌های مورد نظر با روش پراش پرتو ایکس (XRD) و در شرکت کانساران بینالود تهران و

جدول ۱ میانگین ترکیب شیمیایی سپیولیت نائین.

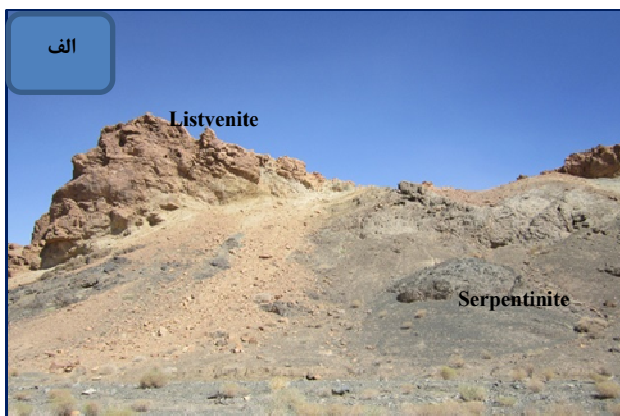
Sample	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	NiO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
NS	۴۸٫۴۱	۰٫۲۷	۰٫۵۴۵	۳٫۶۶	۰٫۱۷۳	۲۵٫۰۳	۳٫۰۲	۰٫۱۱۱	۰٫۰۹۹	۰٫۰۲۳



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده مجموعه افیولیتی شمال نائین، بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰ عشین [۱۰].

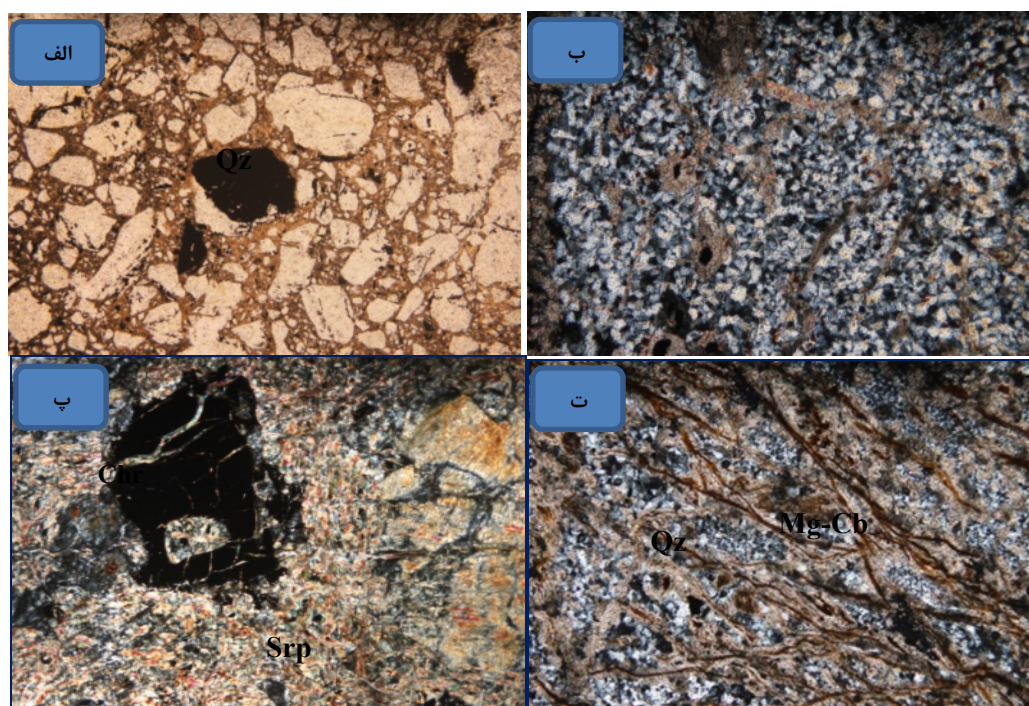
لیستونیت‌ها در مقاطع میکروسکوپی، دارای بافت‌های متنوع ریزدانه‌ای تا تنش‌آوری و گاهی غربالی (شکل‌های ۳ الف و ب) هستند و بیشتر از کانی‌های کربناته (منیزیت، کلسیت، دولومیت، آنکريت، برونریت، سیدریت)، کانی‌های خانواده سیلیس (کوارتز، کلسدوئن، سیلیس بی‌شکل و ژاسپیروئید)، بقایای سرپانتین، بلورهای کرومیت با بافت گسیخته و کلریت تشکیل شده‌اند (شکل ۳ پ). محفوظ ماندن بافت سرپانتینیت اولیه پس از لیستونیتی شدن (بافت شبی)، نشان دهنده خاستگاه پریدوتیتی لیستونیت‌ها است (شکل ۳ ت). پیدایش رگچه‌ای سپیولیت بیانگر تاخیری بودن آن در محیط تشکیل است. با در نظر گرفتن سرپانتینیت-لیستونیت به عنوان سنگ میزبان و توجه به روابط پاراژنتیکی کانی‌ها می‌توان ترادف شکل‌گیری آن را به صورت جدول ۲ نشان داد.

پریدوتیت‌های هارزبورژیتی گوشته (اصلی‌ترین واحد سنگی آمیزه‌ی رنگین شمال نائین)، تحت تاثیر سیالات گرمابی، به سنگی به نام لیستونیت (افی کربنات) تبدیل شده‌اند. لیستونیت‌ها در امتداد خطواره‌های گسلی تشکیل شده‌اند و در بعضی قسمت‌ها دارای مرز تدریجی با سرپانتینیت‌ها هستند (شکل ۲ الف). لیستونیت‌های مورد نظر، توده‌های زرد متمایل به قهوه‌ای با روند غالب شمال غربی- جنوب شرقی را تشکیل می‌دهند که به‌صورت تپه‌های ناممتد کشیده با ریخت‌شناسی صخره‌ای رخمون یافته‌اند و به سبب سختی نسبی در میان سرزمین‌های پست همجوار خودنمایی می‌کنند (شکل ۲ ب). بلورهای الیافی تا رشته‌ای سپیولیت با رنگ سفید متمایل به زرد و رخداد توده‌ای و رگچه‌ای در لیستونیت‌ها دیده می‌شوند (شکل‌های ۲ پ و ت). رشته‌های کانی سپیولیت کاملاً دگرشکل بوده و در رگچه‌ها عمود بر دیواره شکل گرفته‌اند.



شکل ۲ الف: مرز تدریجی لیستونیت با هارزبورژیت‌های سرپانتینی، ب: ریخت‌شناسی صخره مانند لیستونیت، پ: بلورهای الیافی و رشته‌ای سپیولیت در نمونه دستی، ت: نمونه دستی سپیولیت‌های توده‌ای.





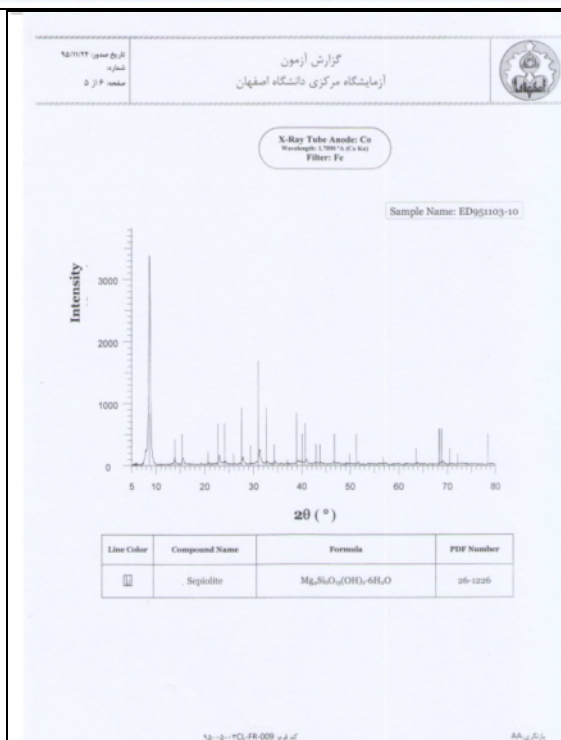
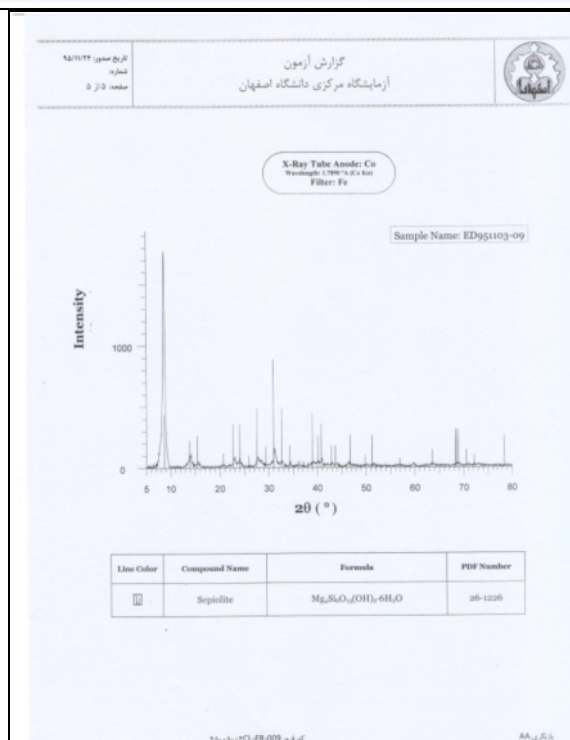
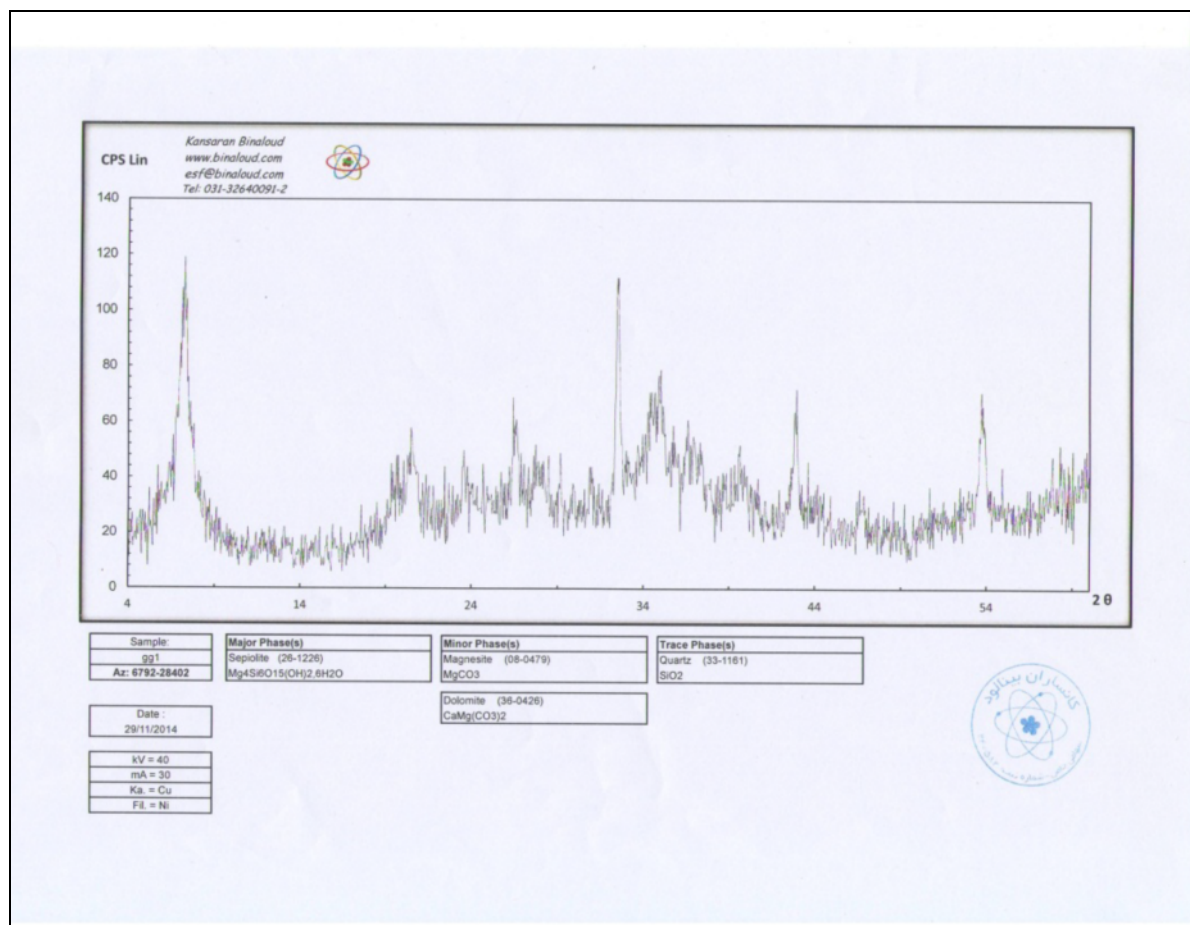
شکل ۳ الف: بافت ریزدانه‌ای و ب: بافت تنش آواری در لیستونیت‌ها، پ: حضور کروم اسپینل در لیستونیت‌ها، ت: بقایای بافت سرپانتینیت پس از لیستونیتی شدن، تصاویر میکروسکوپی در نور قطبشی با پهنای دید ۳ میلیمتر برداشت شده‌اند (Chr = کرومیت، Srp = سرپانتین، Qz = کوارتز، Mg-Cb = کربنات‌های منیزیم‌دار، علائم اختصاری برگرفته از مرجع [۱۳] هستند).

جدول ۲ روابط پاراژنتیکی کانی‌ها در سنگ‌های فراپازی دگرسان شمال نائین.

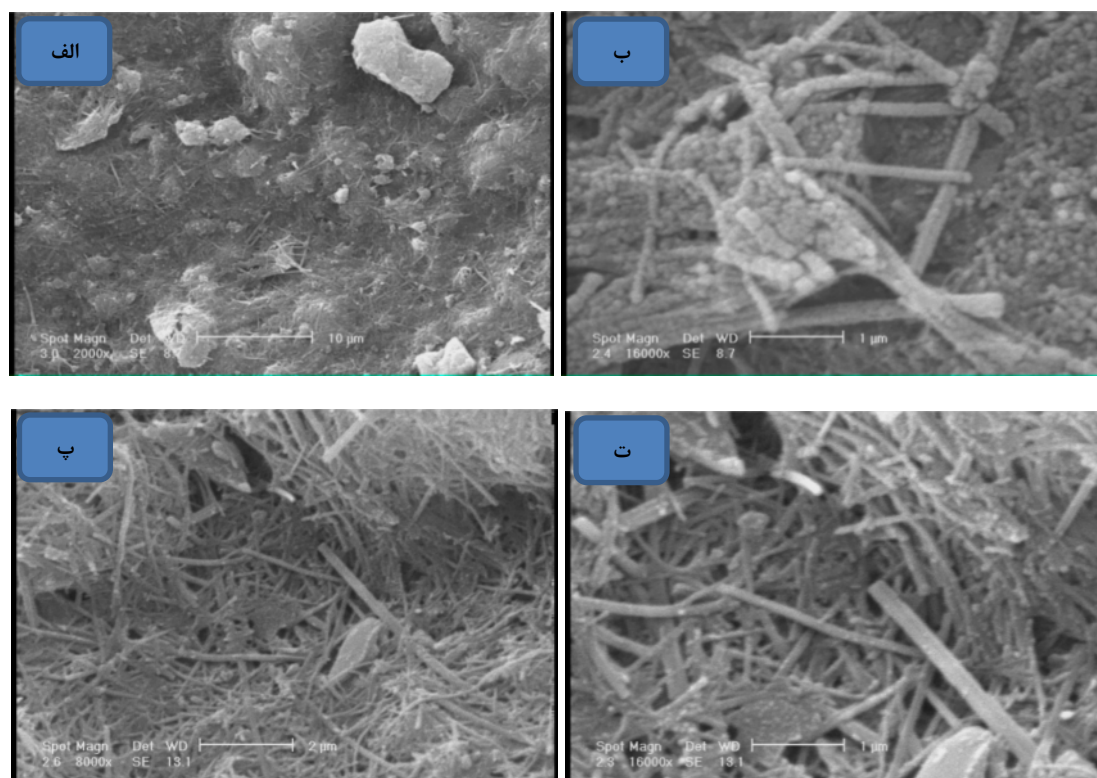
	Magmatic Stage	Hydration	Carbonatization	Clay Mineralization
Olivine	████████████████████			
Orthopyroxene	████████████████████			
Chromite	████████████████████			
Serpentine		████████████████████		
Magnetite		████████████████████		
Magnesite			████████████████████	
Calcite/Aragonite			████████████████████	
Dolomite			████████████████████	
Sepiolite				████████████████████

فرعی و کوارتز ( $\text{SiO}_2$ ) فاز کمیاب همراه هستند. مطالعه ریزنگاشت‌های میکروسکوپ الکترونی دو نمونه سپیولیت، وجود ساختار ریختی رشته‌مانند را در این کانی تایید می‌کند. در این دو نمونه، الیاف درهم تابیده و همراستای کانی سپیولیت با طول تقریبی ۲ تا ۱۰ نانومتر، بر دولومیت و منیزیت رشد کرده‌اند (شکل ۵).

از آنجا که متداول‌ترین روش شناسایی کانی‌های رسی، پراش پرتو ایکس است [۱۴]، حضور سپیولیت در سرپانتینیت-های کربناته شمال نائین، با این روش تایید شد. چنان که در الگوهای XRD نمونه‌ها (شکل ۴) دیده می‌شود سپیولیت ( $(\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ )، کانی اصلی است و در نمونه‌های ناخالص، دولومیت ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) و منیزیت ( $\text{MgCO}_3$ )، فاز



شکل ۴ طیف‌های پراش پرتو X نمونه‌های مورد بررسی که نشان دهنده حضور سپیولیت در آنهاست، الف- نمونه ناخالص سپیولیت در سنگ میزبان لیستونی، ب- نمونه خالص سپیولیت رشته‌ای و پ- نمونه خالص سپیولیت توده‌ای.



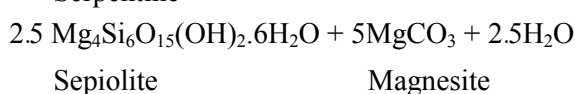
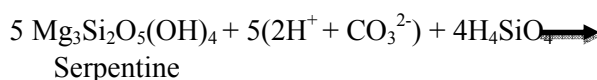
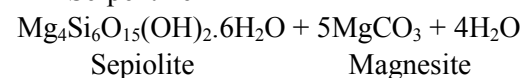
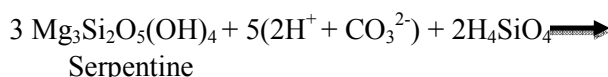
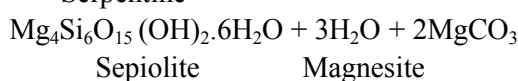
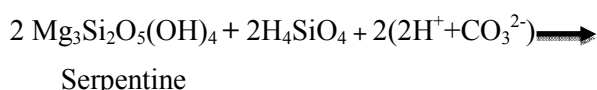
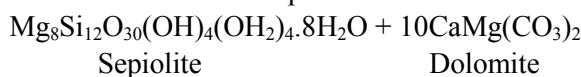
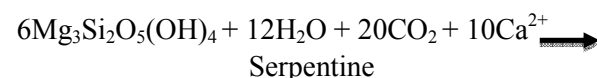
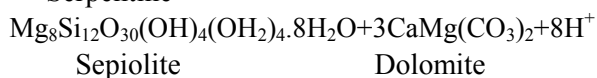
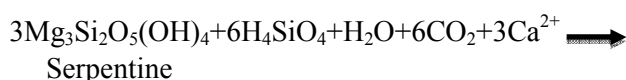
شکل ۵ رشته‌های طویل و نازک کانی سپیولیت در ریزنگاشت SEM. الف: بافت شبکه‌ای رشته‌های سپیولیت، ب: رشته‌های ریز و پراکنده سپیولیت روی سنگ بستر، پ: همیافتی دولومیت رومبئودری همراه با سپیولیت و ت: بازمانده دولومیت و منیزیت

موارد متعددی از همراهی سپیولیت با کربنات‌ها در محیط‌های فرامافیک گزارش شده است [۱۵-۱۹]. در بیشتر موارد، کانی سپیولیت با منیزیت همراه است و شکل‌گیری آن در پی انحلال سرپانتین رخ می‌دهد. به نظر برخی از پژوهشگران [۱۹-۲۱]، سپیولیت در این موارد، ناشی از دگرسانی سرپانتین است. پژوهشگران مختلف به تشکیل سپیولیت ضمن کربناته شدن طبیعی [۱۷] و آزمایشگاهی [۲۱] کانی‌های منیزیم‌دار مانند الیوین و سرپانتین اشاره کرده‌اند. حضور کانی‌های کربناته در پریدوتیت‌های توالی افیولیتی نشان‌دهنده دگرنهادی  $\text{CO}_2$  یا کربناته‌شدن سنگ (افزایش  $\text{CO}_2$ ) است که در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد [۲۲]. کانی‌های تشکیل شده در این مرحله شامل تالک + کربنات، کوارتز-کربنات و بقایای سرپانتین هستند [۲۳، ۲۴].

به نظر یالچین و بوزیکا، تشکیل سپیولیت در سنگ‌های فرامافیک، به واسطه چندین واکنش زنجیره‌ای صورت می‌گیرد که با سرپانتینی‌شدن الیوین در حضور آب آغاز می‌شود [۱۷].

سپیولیت در محیط‌های دریایی و دریاچه‌ای، به صورت رگچه‌های گرمابی و درون سرپانتینیت‌ها، دولواستون‌ها و سنگ‌های آتشفشانی هوازده تشکیل می‌شود. بر این اساس، سپیولیت‌ها را به سه دسته رسوبی (محیط‌های دریایی و دریاچه‌ای)، خاکزاد (Pedogenic) و گرمابی تقسیم می‌کنند [۱۵]. سپیولیت‌های رسوبی در تالاب‌های کم عمق ساحلی تشکیل می‌شوند. انواع سپیولیت‌های خاکزاد، کانی‌های درج‌ازاد نوظهور (حاصل تبلور مستقیم از محلول) و یا کانی‌های ناشی از تغییر شکل کانی‌های فیلسیلیکاته و کربناته منیزیم‌دار هستند. سپیولیت‌های گرمابی بیشتر به صورت رگچه‌های پرکننده درز و شکاف سنگ‌های آتشفشانی و سرپانتینیت‌ها دیده می‌شوند و فراوانی عناصر  $\text{Ba}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Mn}$ ،  $\text{Ti}$ ،  $\text{V}$ ،  $\text{Zr}$  در آنها بیشتر است. سپیولیت‌های گرمابی از عمق اقیانوس و در ارتباط با سیستم‌های گرمابی مناطق گسترش کف اقیانوس نیز گزارش شده‌اند [۱۶]. این سپیولیت‌ها حاصل واکنش محلول‌های گرمابی دمای پائین با سنگ‌های فرامافیک هستند.

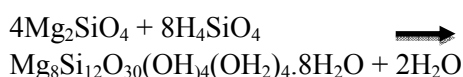




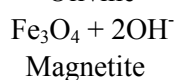
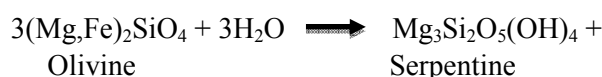
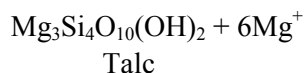
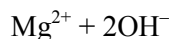
براساس بررسی‌های بیرسوی، نوع کانی همراه سپیولیت، بوسیله فعالیت  $\text{Mg}^{2+}/\text{H}^+$  و  $\text{H}_2\text{SiO}_4$  و به‌طور غیر مستقیم با pH محیط (بین ۷٫۶ تا ۸٫۳) کنترل می‌شود [۱۹].

در واکنش‌های بالا، سرپانتین در حضور دی‌اکسیدکربن به مجموعه‌ای از سپیولیت و منیزیت یا دولومیت تبدیل می‌شود. برای توجیه همراهی این دو کانی با سپیولیت، چنانچه فرمول سرپانتین  $2\text{MgO}$ ،  $6\text{MgO}$ ،  $4\text{SiO}_2$ ،  $4\text{H}_2\text{O}$  و سپیولیت  $3\text{SiO}_2$ ،  $2\text{H}_2\text{O}$  در نظر گرفته‌شود تبدیل سرپانتین به سپیولیت، با خروج Mg از آن و یا ورود سیلیس به ساختار کانی انجام می‌شود. اگر منیزیم از ساختار کانی خارج شود اثر آنرا بصورت همراهی دولومیت و منیزیت با کانی سپیولیت می‌توان ردیابی کرد.

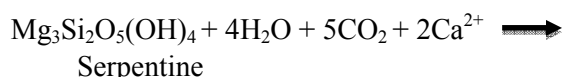
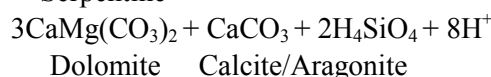
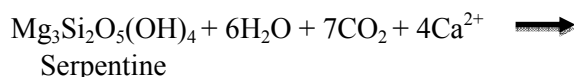
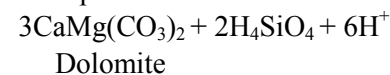
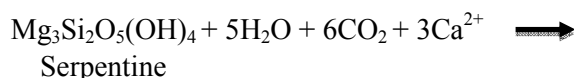
سپیولیت در محیط بازیک (با pH بالا) می‌تواند از دگرسانی مستقیم الیوین با واکنش زیر تشکیل شود [۲۶]:



این مرحله می‌تواند طبق واکنش‌های زیر با تولید تالک و مگنتیت نیز همراه باشد:



مرحله دوم فرایند دگرسانی، دارای انحلال سرپانتین توسط آب‌های جوی یا زیرزمینی شامل  $\text{CO}_2$  یا  $\text{H}_2\text{CO}_3$  است که همزمان و یا پس از تشکیل آمیزه افیولیتی در گسل‌ها به حرکت در می‌آیند. طی این مرحله، دگرسانی سرپانتین در اثر واکنش‌های دگرنهادی زیر صورت می‌گیرد [۲۵]:



در سومین مرحله دگرسانی، علاوه بر سپیولیت، با توجه به نسبت  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Ca})$  (منیزیت ۱٫۰۰، دولومیت ۰٫۵ و کلسیت/آراگونیت ۰٫۰۰)،  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$  (کلسیت/آراگونیت ۴٫۰۰، دولومیت ۰٫۸۳ و منیزیت ۰٫۶۷) و  $\text{MgO}/\text{SiO}_2$  (سرپانتین ۱٫۵۰، تالک ۰٫۷۵، سپیولیت ۰٫۶۷ و کوارتز ۰٫۰۰) کانی‌های متفاوتی تشکیل می‌شوند [۱۷]. سپیولیت آخرین فاز کانیایی است که در محیط دگرسانی با شرایط بازی بوجود آمده است. زایش سپیولیت بر پایه واکنش‌های زیر امکان‌پذیر است:

شواهد کانی‌شناسی و بافتی سنگ میزبان سپیولیت در منطقه مورد بررسی، وقوع چنین واکنشی را نشان نمی‌دهد. یالچین و بوزیکا با بهنجارش عناصر خاکی نادر سپیولیت نسبت به سرپانتینیت‌ها و پریدوتیت‌های سرپانتینیتی میزبان در افیولیت‌های الماداک ترکیه، نشان دادند که سپیولیت از روند معمول سنگ‌های میزبان پیروی نمی‌کند و دارای غنی‌شدگی چند برابری از Rb, Pb, Ba, Sr, Zr نسبت به سرپانتین میزبان است [۱۷]. این واقعیت نشان می‌دهد که توزیع عناصر در سپیولیت با فرایندهای دگرسانی کنترل می‌شود و از ویژگی‌های سنگ میزبان پیروی نمی‌کند.

در سرتاسر افیولیت نائین، سپیولیت‌ها تنها داخل سنگ‌های فرابازی دگرسان تشکیل شده‌اند. دگرسانی این سنگ‌ها (سرپانتینیتی و لیستونیتی شدن) بیشتر در امتداد گسل‌ها و در اثر سیالات گرمایی صورت گرفته است. از دو سیستم گسله اصلی در منطقه، روند غالب کنترل‌کننده دگرسانی، دارای راستای شمال غربی- جنوب شرقی است. گسل‌ها و شکستگی‌های موجود، ضمن برشی و خرد کردن سنگ میزبان، به عنوان گذرگاه‌هایی برای صعود سیالات عمل می‌کنند و هجوم سیالات و تأثیرگذاری محلول‌های گرمایی را سهولت می‌بخشند. چرخش سیالات در سطوح مختلف پوسته سبب انحلال Ca, Mg و CO<sub>2</sub> و عناصر دیگر از سنگ‌های مسیر می‌شود. صعود محلول‌های گرمایی غنی از H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> و SiO<sub>2</sub> ضمن عبور از سنگ‌های فرابازی در شرایط ویژه‌ای از دما، فشار، Eh, Ph و گریزندگی CO<sub>2</sub>، مجموعه لیستونیتی را به وجود می‌آورند. همراهی سپیولیت با لیستونیت‌ها نشان می‌دهد که واکنش‌های تشکیل سپیولیت متأثر از رخداد لیستونیت‌زایی هستند. از آنجا که مجموعه لیستونیتی نائین در امتداد گسل‌ها و در اثر سیالات گرمایی توسعه یافته پس زمین‌ساخت در بوجود آوردن لیستونیت‌های نائین و زایش سپیولیت نقش اساسی داشته است.

در مورد تشکیل سپیولیت در سنگ‌های فرابازی شمال نائین می‌توان گفت که ضمن کربناته‌شدن سرپانتینیت‌ها، واکنش بین سنگ‌های فرابازی با آب‌های جوی یا گرمایی باعث تشکیل محلولی غنی از Mg و/یا Si با دمای پائین شده و تأثیر

محلول‌های غنی از سیلیس بر سرپانتین، سبب تشکیل منیزیت و سپیولیت می‌شود. نسبت Mg و Si در محلول، عاملی تعیین‌کننده در تشکیل سپیولیت و یا دیگر سیلیکات‌های منیزیم (مثل چندریخت‌های سرپانتین) است [۲۷].

از آنجا که مجموعه افیولیتی شمال نائین در کرتاسه پسین- پالئوسن تشکیل شده است می‌توان فرایندهای به وجود آورنده سپیولیت‌ها و لیستونیت‌های میزبان آن را وابسته به فرایندهای زمین‌ساختی جوانتر از پالئوسن دانست. سیالات گرمایی مسبب دگرسانی، حاصل فعالیت ماگمایی نوزا هستند که شواهدی از آن به صورت توده‌های شبه‌آتشفشانی در بخش‌های شمال و جنوب منطقه دیده می‌شود [۲۸].

### برداشت

سنگ‌های فرابازی سرپانتینیتی شده بخش مرکزی افیولیت نائین تحت اثر سیالات دارای CO<sub>2</sub>، H<sub>2</sub>O و SiO<sub>2</sub> و عناصر Mg و Ca به لیستونیت تبدیل شده‌اند. دگرسانی پریدوتیت به سرپانتینیت باعث ایجاد سنگی سبک و متخلخل می‌شود و در نتیجه شرایط مناسبی را برای چرخش آب‌های گرم فراهم می‌آورد. صعود محلول‌های گرمایی دارای CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O، یون‌های Ca<sup>2+</sup>، Mg<sup>2+</sup> و عناصر کانساز در امتداد سطوح ضعف سنگ‌های میزبان، باعث کربناته‌شدن سرپانتینیت و تشکیل لیستونیت می‌شود. لیستونیت‌های منطقه از کانی‌های کربناته (منیزیت و دولومیت، آنکريت، برونریت، سیدریت و کلسیت)، کانی‌های سیلیسی و بقایایی از کانی‌های گروه سرپانتین و کروم اسپینل تشکیل شده‌اند. کانی نادر سپیولیت داخل لیستونیت‌ها و به واسطه انحلال سرپانتین توسط سیالات گرمایی دارای دی اکسید کربن یا اسید کربنیک که در طول شکستگی‌های سنگ ضمن و یا پس از تشکیل آمیزه متحرک شده‌اند به وجود آمده‌است. واکنش سنگ‌های فرابازی با محلول‌های گرمایی ضمن کربناته‌شدن سرپانتینیت‌ها باعث تشکیل محلولی غنی از Mg و/یا Si با دمای پائین می‌شود و سپیولیت را به وجود می‌آورد. تشکیل سپیولیت طی چند مرحله انجام می‌شود. مرحله نخست فرایند، سرپانتینیتی‌شدن البوین در واکنش با آب است، پس از آن، سرپانتین در نتیجه تأثیر سیالات گرمایی غنی از اسید کربنیک یا دی اکسید کربن که از میان گسل‌ها و سطوح برشی حرکت می‌کنند حل می‌شود. رخداد همایندهای کربناته با سپیولیت در مرحله سوم دگرسانی رخ می‌دهد.



- [9] Halls C., Zhao R., "Listvenite and related rocks: perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo", Republic of Ireland, Mineralium Deposita 30 (1995) 303-313.
- [10] Plissart G., Féménias O., "Mineralogy and geothermometry of gabbro-derived listvenite in the Tisovita-Iuti ophiolite, Southwestern Romania", The Canadian Mineralogist 47 (2009) 81-105.
- [11] Darvishzadeh A., "Geology of Iran : Stratigraphy, Lithology, Tectonic, Metamorphism and Magmatism", Amirkabir, Tehran, (2003) 434 pp.
- [12] V/O Technoexport, "Geological map of Ashin (1/100,000)", Geological Survey of Iran (1984).
- [13] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American Mineralogist 95 (2010) 185-187.
- [14] Singer A., "Palygorskite and sepiolite". in: J.B. Dixon, and D.G. Schulze (Editors), "Soil Mineralogy with Environmental Applications", Soil Science Society of America, Madison, 2002, 555-583.
- [15] Yeniol M., "Vein-like sepiolite occurrence as a replacement of magnesite in Konya, Turkey", Clays and Clay Minerals 34 (1986) 353-356.
- [16] Bach W., Banerjee N.R., Dick H.J.B., Baker E.T., "Discovery of ancient and active hydrothermal systems along the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge 10°-16°E", Geochemistry, Geophysics, Geosystems 3 (2002) 1-14.
- [17] Yalcin H., Bozkaya O., "Ultramafic-rock-hosted vein sepiolite occurrences in the Ankara Ophiolitic Mélange, Central Anatolia, Turkey", Clays and Clay Minerals 52(2) (2004) 227-239.
- [18] Yan J., Munnecke A., Steuber T., Carlson E.H., "Marine sepiolite in middle Permian carbonates of South China: implications for secular variation of Phanerozoic seawater chemistry", Journal of Sedimentary 75(3) (2005) 328-338.
- [19] Birsoy R., "Formation of sepiolite-palygorskite and related minerals from solution", Clays and Clay Minerals 50(6) (2002) 736-745.
- [20] Jones B. F., Gala'n E., "Sepiolite and palygorskite". In: S.W. Bailey (Editor), "Hydrous phyllosilicates (Exclusive of Micas) reviews in mineralogy", 19. Mineralogical Society of America, Washington, (1988) 631-674.

مجموعه کانیایی لیستونیت‌های شمال نائین نشان‌دهنده رخداد فرایندهای دگرسانی سرپانتینی و سیپولیتی شدن سنگ‌های فراپازی در دماها و زمان‌های مختلف و در شرایط فشار پائین محیط است. همراهی سیپولیت با انواع کانی‌های کربناته مانند دولومیت، و مقادیر کمی کلسیت، منیزیت و آراگونیت وابسته به نسبت‌های  $MgO/SiO_2$ ،  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Ca^{2+})$ ،  $H_2O/CO_2$  با فعالیت  $Mg^{2+}/H^+$  و  $H_4SiO_4$  و pH محیط کنترل می‌شود. از آنجا که سیپولیت به صورت کانی رشته‌ای در رگه‌ها تشکیل شده است، علاوه بر محیط شیمیایی مناسب (سنگ مادر) و سیالات دارای  $CO_2$ ، زمین‌ساخت نیز نقش بنیادی در تشکیل آن دارد.

#### مراجع

- [1] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "An Introduction to the Rock-forming Minerals", 2nd ed. Longman Scientific and Technical; New York: Wiley, (1992) 696 pp.
- [2] Gala'n, E., "Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays", Clay Minerals 31(1996) 443-453.
- [3] Murray H.H., "Applied Clay Mineralogy: Occurrence, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Polygorskite-Sepiolite, and Common Clays", Elsevier, Amsterdam, (2007) 180 pp.
- [4] Potgieter J.H., Potgieter-Vermaak S.S., Kalibantonga P.D., "Heavy metals removal from solution by palygorskite clay", Minerals Engineering 19 (2006) 463-470.
- [5] Khademi H., Hojati S., "Genesis and distribution of palygorskite in Iranian soil and sediments", In: E. Galan and A. Singer (Editors) "Developments in Palygorskite-Sepiolite Research: A New Look at These Nanomaterials". Elsevier, Amsterdam, (2011) 201-218.
- [6] Singer A., Gala'n E., "Palygorskite-Sepiolite: Occurrences, Genesis and Uses. Development in Sedimentology", 37 (1984) Elsevier, Amsterdam, 352 pp.
- [7] Khademi H., Mermut A.R., "Source of palygorskite in gypsiferous Aridisols and Associated sediments from central Iran", Clay Minerals 33 (1998) 561-578.
- [8] Hojati H., Khademi H., "Physicochemical and Mineralogical Characteristics of Sepiolite Deposits of Northeastern Iran", Geosciences, 90 (2013) 165-174.

- [25] Ulrich M., Munoz M., Guillot S., Cathelineau M., Picard C., Quesnel B., Boulvais P., Couteau C., "Dissolution- precipitation processes governing the carbonation and silicification of the serpentinite sole of the New Caledonia ophiolite", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 167 (2014) 933-952.
- [26] Peters E.K., "D-<sup>18</sup>O enriched waters of the Coast Range mountains, northern California, connate and ore-forming fluids", *Geochemical et Cosmochemica Acta* 57 (1993) 1093-1104.
- [27] Bonnati E., Craig Simmons E., Breger D., Hamlyn P.R., Lawrence J., "Ultramafic rock/seawater interaction in the oceanic crust: Mg-silicate (sepiolite) deposit from the Indian Ocean floor", *Earth and Planetary Science Letters* 62 (1983) 229-238.
- [28] Goorang M., Khalili M., Torabi Gh., Akbari K., "Petrographical and petrological investigation of Soheile- Pakuh and Golshekanan intrusive rocks, North of Nain" 3<sup>rd</sup> Symposium of Geological Society of Iran, Shiraz, (1999).
- [21] Andrani M., Luquot L., Gouze P., Godard M., Hoise E. Gibert B., "Experimental study of carbon sequestration reactions controlled by the percolation of CO<sub>2</sub>-rich brine through peridotites", *Environmental Science Technology* 43(4) (2009) 1226-1231.
- [22] Schandl E.S., Wicks F.J., "Carbonates and associated alteration of ultramafic and rhyolitic rocks at the Hemingwat property, Kidd Creek volcanic complex, Timmins, Ontario", *Economic Geology* 88 (1993) 1615-1635.
- [23] Peabody C.E., Einaudi M.T., "Origin of petroleum and mercury in the Culver-Baercinnabar deposit, Mayacmas district, California", *Economic Geology* 87 (1992) 1078-1103.
- [24] Lambert S.J., Epstein S., "Stable-isotope studies of rocks and secondary minerals in a vapor-dominated hydrothermal system at The Geysers, Sonoma County, California", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 53 (1992) 199-226.