

Mineralogy, geochemistry and genesis of carbonate – silica serpentines (listwaenite) in north of Nain ophiolite (west of central Iran)

M. Saidi^{1*}, S. Falahati¹, M. Noghreyan¹, M. Khalili¹, M. Ghahraipour²

1- Department of Geology, University of Isfahan

2- Geological Survey of Iran

(Received: 20/11/2008, in revised form: 5/5/2009)

Abstract: The mantle sequence serpentinitized peridotites of north of Nain have been converted to carbonate- silica assemblage known as listwaenite at various temperature and pH in response to CO₂ and SiO₂ bearing fluids. On the basis of carbonate and silica minerals content, three types of listwaenite have been recognized: carbonate, carbonate- silica and silica listwaenites. Generally carbonate minerals are magnesite, dolomite, ferrite-dolomite and ankerite. Calcite and other carbonate minerals are rare. Silica minerals (including quartz, chalcedony and chert) accompanied by accessory Cr-spinel, chlorite, sulfide minerals also occur in listwaenites. Silica matrix in silica listwaenite containing high amounts of Hg, Ag and As elements and shows that these elements have transported by SiO₂ bearing hydrothermal fluids as arsenide complexes.

KeyWords: *peridotites, Listwaenite, Nain ophiolite, mercury*

* Corresponding author, Tel.: +98 (0311) 3247709, E-mail: scisaidi@yahoo.com



کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و چگونگی تشکیل سرپانتینیت‌های کربناتی - سیلیسی (لیستونیت) شمال نایین (باختر ایران مرکزی)

معصومه سعیدی^{۱*}، سمیه فلاحتی^۱، موسی نقره‌بیان^۱، محمود خلیلی^۱، مهرداد قهرایی پور^۲

۱- اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

۲- تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

(دریافت مقاله: ۸۷/۸/۳۰، نسخه نهایی: ۸۸/۲/۱۶)

چکیده: پریدوتیت‌های سرپانتینی شده دنباله گشته‌ای افیولیت شمال نایین (باختر ایران مرکزی) تحت تاثیر آبگون‌های حاوی CO_2 و SiO_2 در شرایط دما و pH متفاوت به مجموعه کربناتی - سیلیسی تحت عنوان لیستونیت تبدیل شده‌اند. بر اساس فراوانی کانی‌های کربناتی (دولومیت، منیزیت، آنکريت، کلسیت) و سیلیس سه نوع لیستونیت کربناتی، کربناتی - سیلیسی و سیلیسی حاصل شده‌اند. به طور کلی کانی کربناتی غالب در لیستونیت‌ها، منیزیت، دولومیت، دولومیت آهن‌دار و آنکريت بوده و کلسیت و کربنات‌های دیگر در مقادیر کم‌تر حضور دارند. فازهای سیلیس (شامل کوارتز، کلسدونی و چرت) همراه با مقادیر نادر کروم اسپینل، کلریت، همتایت، گوتیت، اکتینولیت و پیریت نیز در لیستونیت‌ها حضور دارند. زمینه سیلیسی در لیستونیت سیلیسی حاوی مقادیر بالایی جیوه، نقره و آرسنیک است که نشان می‌دهد که این عناصر به صورت مجموعه‌های آرسنیدی در گرمابی‌های حاوی SiO_2 حمل شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: پریدوتیت، لیستونیت، افیولیت نایین، جیوه.

مقدمه

کانی‌های سیلیس در نتیجه عملکرد آبگون‌های غنی از SiO_2 حاصل شده‌اند. فاز ماگمایی ائوسن که پس از جای‌گیری افیولیت رخ داده است، با افزایش دمای زمین گرمایی در پوسته قاره‌ای ایران مرکزی منجر به تشکیل و فعال شدن سیستم‌های شکستگی و درز و ترک در پوسته و فعالیت دوباره گسل‌های قدیمی شد، و انرژی لازم برای تشکیل سلول‌های همرفتی و چرخش آبگون‌های ماگمایی - دگرگونی - جوی را در پوسته فراهم کرده است. چرخش آبگون‌ها در سطوح مختلف پوسته سبب انحلال Ca ، Mg ، CO_2 و عناصر دیگر از سنگ‌های مسیر شده است. شاره غنی از CO_2 - H_2O با عبور از کانال‌های شکستگی در واکنش با پریدوتیت‌های سرپانتیزه سست و دگرسان پوسته آقیانوسی که بخش عمده دنباله افیولیتی شمال نایین را تشکیل داده‌اند، همراه با کاهش فشار، کربنات‌ها

واژه لیستونیت را اولین بار رز [۱] برای توصیف سنگ‌های الترامافیک و مافیک دگرسان حاوی کربنات - سرسیت - پیریت که در اثر فرایند دگرسانی کوارتز-کربنات شکل گرفته‌اند، به کار برد. در اروپا و آمریکای شمالی برای توصیف چنین سنگ‌هایی از دگرسانی سیلیکا - کربنات استفاده می‌شود. جریان شاره‌های حاوی Ca^{2+} ، Mg^{2+} و CO_2 در طول شکستگی‌های سرپانتینیت، باعث تشکیل لیستونیت می‌شود. دگرسانی گرمابی پریدوتیت‌های سرپانتینیتی شده افیولیت ملانژ شمال نایین پس از جای‌گیری آن سه نوع مشخص لیستونیت ایجاد کرده است: لیستونیت‌های کربناتی، لیستونیت‌های کربناتی - سیلیسی و لیستونیت‌های سیلیسی. گرمابی‌های حاصل از تشکیل لیستونیت‌های کربناتی از Ca^{2+} ، Mg^{2+} و CO_2 غنی بوده‌اند، در حالی که لیستونیت‌های حاوی

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۲۴۷۷۰۹ (۰۳۱۱) ۹۸، پست الکترونیکی: scisaidi@yahoo.com

مدل sp sfor pioner در دانشگاه اصفهان و شرکت کانساران بینالود تهران به انجام رسید.

زمین‌شناسی منطقه

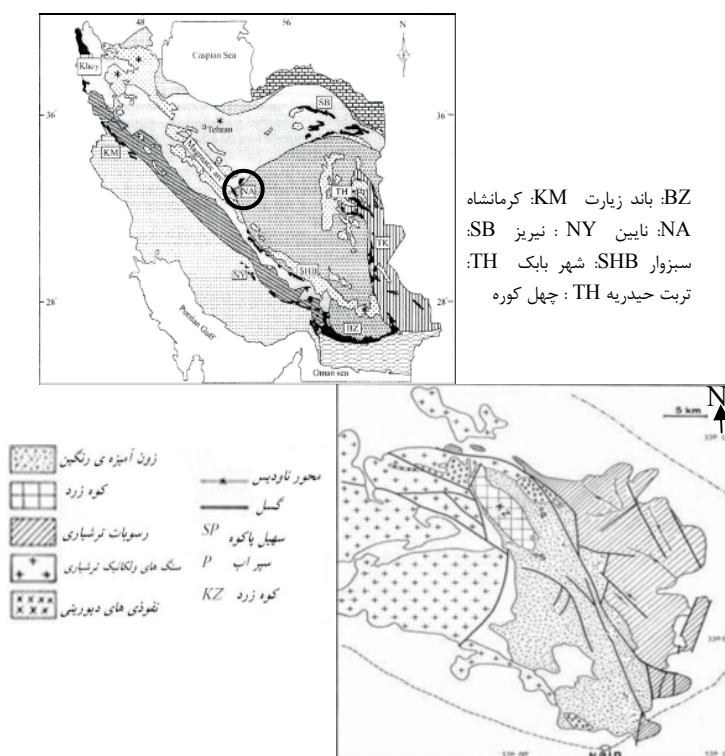
افیولیت ملانژ شمال نایین بخشی از مجموعه افیولیتی نوار حلقوی خرده قاره ایران مرکزی است که در باختر این زون واقع شده است (شکل ۱). دنباله سنگ‌شناختی این مجموعه افیولیتی در بخش گوشته‌ای خود شامل هارزبورژیت، دونیت، لرزولیت، ورلیت و پیروکسنیت است که در حجم گسترده‌ای سرپانتینیتی شده‌اند. سنگ‌های الترامافیک و مافیک کومولایی، گابروی ایزوتروپ، پلاژیوگرانیت، دایک‌های صفحه‌ای، گدازه‌های بالشی، رادیولاریت و واحد آهک پلاژیک نیز بخش پوسته‌ای این دنباله را تشکیل داده‌اند [۴ تا ۱۳]. در شمال نایین لیستونیت‌ها در ده کیلومتری شمال شهر نایین، جنوب و باختر روستای گل گنگو، جنوب روستای سپر آب و شمال روستای سهیل پاکوه بیشترین گستردگی را دارند [۱۴].

لیستونیت‌ها در برخی مناطق مانند جنوب سپر آب به دلیل به هم ریختگی زمین‌ساختی واحدها در مجاورت سنگ آهک-های کرتاسه فوقانی قرار گرفته‌اند.

و عناصر دیگر را در سنگ میزبان بر جای گذاشته و منجر به تشکیل لیستونیت‌ها شده است. بررسی لیستونیت‌ها از دیدگاه نظری و عملی سودمند است، زیرا این سنگ‌ها میزبان نهشته-های طلا، آرسنیک، کبالت، نیکل، تنگستن، نقره و جیوه خواهند شد (برای مثال [۲، ۳]).

روش کار

به دنبال چندین پی‌جویی صحرایی منطقه، مشاهده رخمون‌های لیستونیتی و نمونه برداری هدفدار، تعیین فازهای مختلف لیستونیتی شدن در صحرای در پی داشت. بررسی‌های میکروسکوپی و سنگ‌شناختی؛ تهیه مقطع نازک و نازک صیقلی از نمونه‌های پریدوتیتی (بیشتر هارزبورژیت)، سرپانتینیت و لیستونیت، سپس بررسی آن‌ها گام بعدی این کار پژوهشی بوده است. فازهای کانی ایجاد شده در جریان لیستونیتی شدن به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در دانشگاه اصفهان و استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM - EDX) مدل XL30 در دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس تهران شناسایی شدند. شناخت ترکیب شیمی لیستونیت‌ها و سنگ مادر آن‌ها به روش فلورسانسی پرتو ایکس (XRF)



شکل ۱ الف) موقعیت افیولیت شمال نایین با توجه به کمربندهای افیولیتی اصلی در ایران [۱۵] ب) نقشه ساده شده واحدهای سنگی و زمین-ساختی منطقه مورد بررسی [۴].

کانی‌شناسی لیستونیت‌ها

لیستونیت‌های شمال ناپین به لحاظ کانی‌شناسی و بنا بر تقسیم‌بندی [۱۷] در سه گروه ۱ (کربناتی)، ۲ (کربناتی - سیلیسی) و ۳ (سیلیسی) قرار می‌گیرند. بر اساس فراوان‌ترین نوع کانی کربناتی موجود، لیستونیت‌های کربناتی در شمال ناپین به زیر گروه‌های منیزیتی و دولومیتی تقسیم می‌شوند. این گروه از لیستونیت‌ها در نمونه‌دستی دارای سطح شکست سفید تا نخودی رنگ بوده و سطوح خشنی را تشکیل داده‌اند. رخنمون لیستونیت به دلیل انحلال مواد کربناتی توپوگرافی هموار داشته و دارای حفره‌های انحلالی (شکل ۲a) است. به همراه منیزیت و دولومیت، انواع دیگر کانی‌های کربناتی مانند آنکریت - فریت دولومیت - کلسیت نیز در بررسی‌های XRD و SEM-EDX تشخیص داده شده‌اند. از رشد کانی‌های کربناتی بافت‌های موزائیکی گرانوبلاستیک، گلوله‌ای (شکل ۲b)، شکاف پرکن^۱، نواری، گلوله‌ای و برشی حاصل شده است. در سنگ‌هایی که درجه لیستونیتی شدن شدید نیست، بقایای الیوین و ارتوپیروکسن سرپانتینیتی شده که بافت شبکه‌ای را در سنگ به وجود آورده‌اند، مشهود است. کروم اسپینل با بافت کشتی^۲ و خرد شده به ندرت در مقاطع دیده می‌شود که تنها کانی اولیه در مقاطع لیستونیتی است و نشانه سنگ با خاستگاه الترامافیک است. رگچه‌های سیلیس و بلوردان‌های کلسدونی در بعضی مقاطع دیده می‌شوند و نشان از فاز سیلیسی شدن پس از کربناتی شدن دارند. کلسیت گرمایی به صورت خودشکل در رگه‌های سیلیسی که بعداً سنگ را مورد تهاجم قرار داده است، دیده می‌شود (شکل ۲c). رگه کلسدونی شعاعی به صورت میان روزنه‌ای^۳ میان کانی‌های کربناتی جای گرفته است. لیستونیت کربناتی - سیلیسی که فراوان‌ترین نوع لیستونیت را در شمال ناپین تشکیل داده است، از انباشت کانی‌های کربنات و سیلیس به وجود آمده است. در این سنگ‌ها بقایای بافت شبکه‌ای سرپانتین قابل مشاهده است و نیز کلریت و اکتینولیت که از دگرسانی کانی‌های مافیک سنگ مادر حاصل شده‌اند، در این دسته از لیستونیت‌ها حضور دارند. کروم اسپینل در

این نوع از لیستونیت فراوان‌تر از انواع دیگر است. کانی یادشده تحت شرایط اکسایش ناشی از هجوم آبگون‌های سیلیسی به سنگ در حواشی به فریت کرومیت دگرسان شده است (شکل ۲d). خورده شدگی در کانی‌های کروم اسپینل قابل مشاهده است (شکل ۲e). کانی کربناتی در این نوع از لیستونیت بیشتر از نوع منیزیم‌دار است. دولومیت شبه لوزی رخ و منطقه‌ای در بعضی از مقاطع قابل مشاهده است (شکل ۲f). کانی‌های سیلیس و کربنات همزاد نیستند و در شرایط متفاوت pH و Eh و دمای گرماب‌ها ته نشین شده‌اند. در بعضی مقاطع هجوم آبگون‌های سیلیسی به سنگ باعث انحلال حواشی کربنات شده و تشکیل بافت جزیره‌ای را داده است (شکل ۲g). تناوب و تقاطع رگه‌های سیلیس - کربنات نشانه تغییر تناوبی شرایط و ماهیت گرماب‌هاست (شکل ۲h). لیستونیت سیلیسی شمال ناپین که در آن بیش از ۵۰ درصد حجم سنگ را سیلیس تشکیل داده است، به لحاظ فراوانی در درجه دوم اهمیت قرار دارد. زمینه سنگ از سیلیس ریز دانه تشکیل شده است. کروم اسپینل تحت شرایط اکسایش که آبگون‌های سیلیسی به سنگ تحمیل کرده‌اند، تماماً به فریت کرومیت تبدیل شده‌اند. در آنالیز SEM-EDX از این سنگ‌ها در زمینه سیلیسی مقادیر قابل توجهی Ag، Hg و As تشخیص داده شدند (جدول ۱).

ژئوشیمی

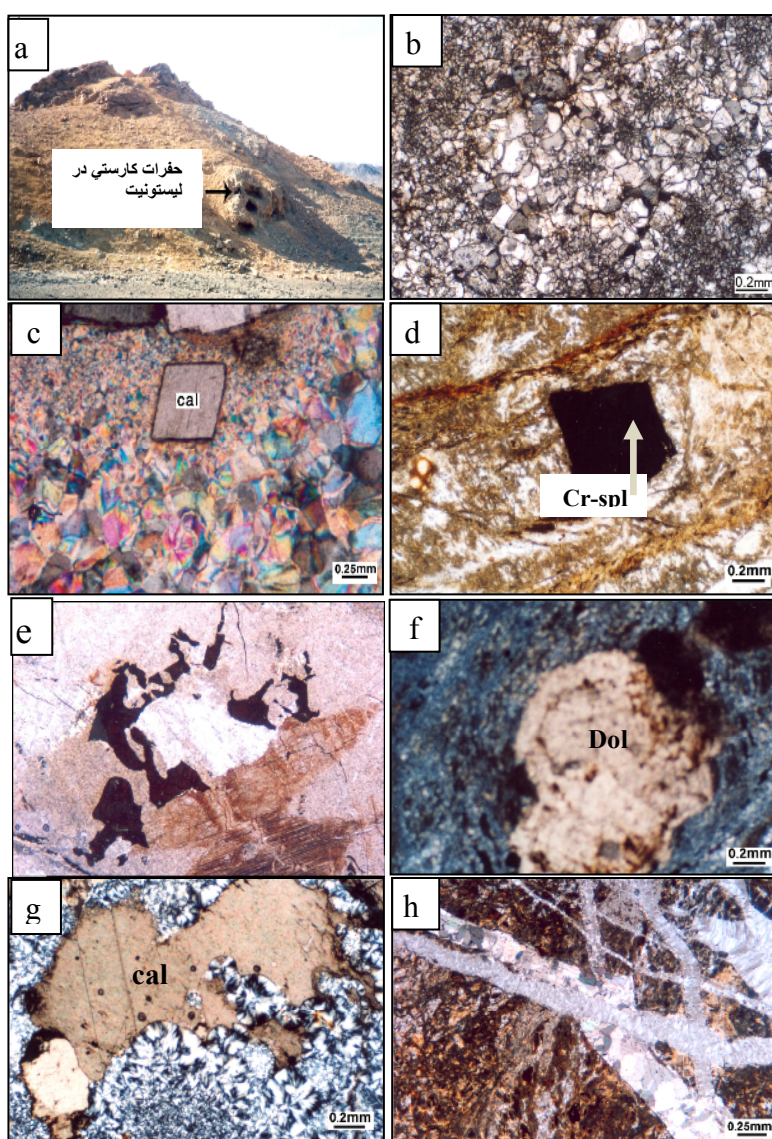
نتایج تجزیه شیمیایی هارزبورژیت، سرپانتینیت و انواع لیستونیت‌های شمال ناپین همراه با تجزیه شیمیایی کربنات‌های ته‌نشستی [۱۸] در جدول ۲ آمده‌اند. در تعیین انواع لیستونیت، مهم‌ترین پارامترها میزان SiO_2 و LOI در این سنگ‌هاست. بر این اساس در لیستونیت‌های کربناتی میزان SiO_2 پایین (در نوع منیزیتی پایین تر از دولومیتی)، ولی به دلیل مقادیر فراوان CO_2 و گونه‌های فرار دیگر، میزان LOI بالاست. در لیستونیت‌های سیلیسی روند وارون مشاهده می‌شود، به طوری که میزان LOI پایین و درصد SiO_2 بالاست. لیستونیت‌های کربناتی - سیلیسی هم به لحاظ میزان SiO_2 و هم مقدار LOI حد واسط دو نوع دیگر دیده می‌شوند (شکل ۳). لیستونیت کربناتی نوع منیزیتی از MgO بالاتر و SiO_2 و CaO ی پایین‌تر نسبت به لیستونیت-

- 1- Open Space Filling
- 2- pull - apart
- 3- Interstitial

های کربناتی - سیلیسی به قطب SiO_2 نزدیک‌تر و لیستونیت‌های سیلیسی بسیار نزدیک به قطب SiO_2 (با بیش از ۵۰ درصد SiO_2) قرار می‌گیرند.

لیستونیت‌های کربناتی دولومیتی با بیش از ۳۰ درصد CaO نزدیک‌تر به قطب کلسیم قرار می‌گیرند. لیستونیت‌های کربناتی - سیلیسی در میانه خط SiO_2 - MgO و لیستونیت‌های سیلیسی نزدیک قطب SiO_2 دیده می‌شوند.

های نوع دولومیتی برخوردار است. در لیستونیت‌های کربناتی نوع دولومیتی مقادیر CaO و MnO بالا و میزان Fe_2O_3 و MgO پایین است. دانه‌های سیاه روی سطوح کلسیت در لیستونیت کربناتی به دلیل وجود اکسیدهای منگنز است. رنگ سرخ قهوه‌ای این سنگ‌ها به دلیل حضور اکسیدها یا هیدروکسیدهای آهن است. در نمودار سه تایی SiO_2 - Fe_2O_3 - $\text{CaO} + \text{MgO}$ (شکل ۴)، لیستونیت‌های کربناتی در راستای خط SiO_2 - $\text{CaO} + \text{MgO}$ ($>50\%$) قرار می‌گیرند.



شکل ۲ (a) تشکیل حفره‌های انحلالی در لیستونیت کربناتی. (b) کربنات‌های گلوله‌ای در لیستونیت کربناتی (PPL). (c) کلسیت گرمابی در رگه سیلیسی (PPL). (d) فریت کرومیت در لیستونیت (PPL). (e) کروم اسپینل با بافت گسیخته در لیستونیت (XPL). (f) دولومیت منطقه‌ای در لیستونیت کربناتی - سیلیسی (PPL). (g) بافت جزیره‌ای در لیستونیت سیلیسی - کربناتی (PPL). (h) تقاطع رگه‌های کربنات و سیلیس در لیستونیت (PPL). علامت اختصاری کانی‌ها بر اساس [۱۹]، Cal برای کلسیت، Dol برای دولومیت و Cr-spl برای کروم اسپینل است.

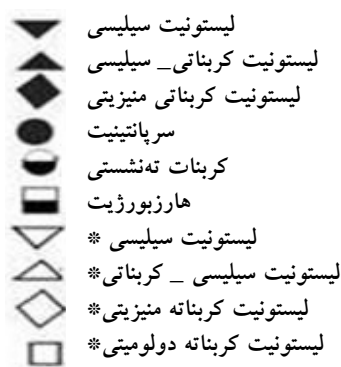
جدول ۱ تجزیه SEM - EDX از سیلیس و زمینه‌ی سیلیسی در لیستونیت شمال ناین b.d (below detection limit).

کربناته - سیلیسی	کربناته - سیلیسی	سیلیسی	کربناته - سیلیسی	سیلیسی	سیلیسی	تیپ لیستونیت
۷۷٫۴۴	۸۰٫۸۴	۹۴٫۲۲	۹۵٫۲	۹۷٫۴	۸۷٫۵۵	SiO ₂ (wt%)
۰٫۳۴	۰	۰	۰٫۲۲	۰٫۱۷	۰٫۵۴	TiO ₂
۳٫۵۹	۳٫۴۷	۲٫۲۴	۲٫۱۹	۱٫۴۴	۳٫۴۷	Al ₂ O ₃
۰٫۱۹	۰٫۲۵	b.d.	۰٫۱۶	۰٫۲۵	۰٫۸	Cr ₂ O ₃
۰٫۱۶	۲٫۵۵	b.d.	۰٫۴۵	۰	۱٫۸۹	Fe ₂ O ₃ ^T
۰٫۱۶	۰٫۱۱	b.d.	۰٫۲	۰٫۰۴	۰٫۷۹	MnO
۶٫۴۵	۶٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۸۱	۰	۱٫۰۲	MgO
۳٫۱۹	۲٫۴۸	۰٫۱۹	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۱٫۲۷	CaO
۲٫۵۳	۱٫۱۴	۰٫۲۲	b.d.	b.d.	b.d.	Na ₂ O
۰٫۳	۰٫۲	۰٫۱۵	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۲۶	K ₂ O
۰٫۵۲	۰٫۲۴	b.d.	۰٫۳۲	۰٫۳۲	۱٫۲۱	ZnO
۰٫۳۸	۰٫۲۴	b.d.	۰٫۳۳	۰٫۱۸	۱٫۲	NiO
۰٫۱۴	۰٫۱۱	۰٫۲۹	b.d.	b.d.	b.d.	AgO
۰٫۹۶	۰٫۹۷	۱٫۰۱	b.d.	b.d.	b.d.	HgO ₂
۰٫۵۸	۰٫۴۱	۰٫۶۹	b.d.	b.d.	b.d.	As ₂ S ₃
۹۶٫۹۳	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰٫۰۱	۹۹٫۸۶	۱۰۰	total

جدول ۲ ترکیب شیمیایی هارزبورژیت، سرپانتینیت و انواع لیستونیت در شمال ناین به روش XRF و NAA. ترکیب شیمیایی کربنات‌های ته - نشستی [۱۸] برای مقایسه داده شده است. (اعداد داخل پرانتز تعداد نمونه‌ها در میانگین‌اند).

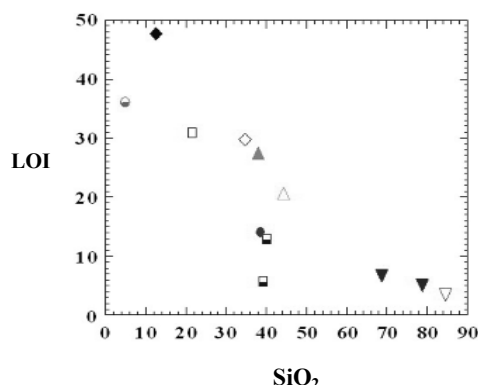
متوسط کربناته سنگ	متوسط لیستونیت* سیلیسی (۳)	متوسط لیستونیت - کربناته* سیلیسی (۴)	متوسط لیستونیت کربناته* دولومیتی (۳)	متوسط لیستونیت کربناته* منیزیتی (۲)	متوسط سرپانتینیت (۲)	لیستونیت کربناته منیزیتی	لیستونیت سیلیسی	لیستونیت سیلیسی	لیستونیت کربناته - سیلیسی	تیپ سنگ
۵٫۱۳	۸۴٫۵۴	۴۴٫۱۳	۲۱٫۹۵	۳۴٫۶۴	۳۹٫۵۶	۳۹٫۳۸	۱۲٫۵	۷۸٫۶۳	۶۸٫۵۹	۳۷٫۸۶
۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۲	۰٫۰۵	b.d.	۰٫۰۳	b.d.	TiO ₂
۰٫۷۹	۰٫۷۷	۰٫۷۷	۲	۰٫۳۸	۰٫۶۲	۱٫۳۹	۰٫۴۳	۰٫۹۲	۰٫۶۸	Al ₂ O ₃
۷٫۴۴	۵٫۰۲	۵٫۶۷	۶٫۷۰	۶٫۱۲	۹٫۳	۷٫۷۱	۱٫۷۱	۵٫۷۶	۱۸٫۴۷	Fe ₂ O ₃
۰٫۱۴	۰٫۰۳	۰٫۰۸	۰٫۱۲	۰٫۰۸	۰٫۱۲	۰٫۰۹	۰٫۰۳۳	۰٫۱۸	b.d.	MnO
۷٫۷۹	۲٫۳۲	۱۶٫۲۱	۱۲٫۱۶	۲۴٫۸۱	۴۲٫۹	۳۴٫۸۹	۳۶٫۸۱	۳٫۸۵	۰٫۹۹	MgO
۴۲٫۲۹	۲٫۱۱	۱۱٫۲۵	۲۴٫۷۴	۲٫۶۵	۱٫۶۵	۰٫۸۴	۰٫۵۱	۴٫۹۲	۰٫۵۷	CaO
۰٫۳۲	۰٫۵۲	۰٫۵	۰٫۷۵	۰٫۶۷	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۱۴	۰٫۱۵	K ₂ O
۳۵٫۸۲	۳٫۴۷	۲۰٫۶۶	۳۰٫۶۵	۲۹٫۶۶	۵٫۵۴	۱۳٫۸۱	۴۷٫۶۶	۵٫۰۶	۶۶۰	LOI
۰٫۰۳	۰٫۳۷	۰٫۵۵	۰٫۷۲	۱٫۰۸	۰٫۸۸	۲٫۹۴	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۵۸	MgO / SiO ₂
b.d	۱۰٫۶۲	۹٫۴۲	۲۲٫۲۱	۴۰٫۱	۶	b.d	b.d.	b.d.	۱۳۲۰۰	As(ppm)
۱۱	۵۲۹۰	۲۸۴۰	۲۳۲۲٫۵	۳۴۴۵	۳۵۶۸	b.d	b.d.	۵۳۶	۵۰۲۰	Cr
۲۰	۲۲۸۰	۱۵۹۰	۱۳۱۷٫۰۷	۲۲۸۸	۲۶۲۸	b.d	b.d.	b.d.	۱۱۱۰	Ni
۶۱۰	۱۵۲	۲۷۳٫۷۵	۴۲۴٫۷	۱۸۵	۳	b.d	b.d.	b.d.	b.d.	Sr
b.d	۵۵٫۸۸	۷۰٫۵۰	۶۹٫۷۹	۷۸٫۸۲	۱۲۰	b.d	b.d.	b.d.	b.d.	Co

* قهرایی پور (۱۳۸۰)

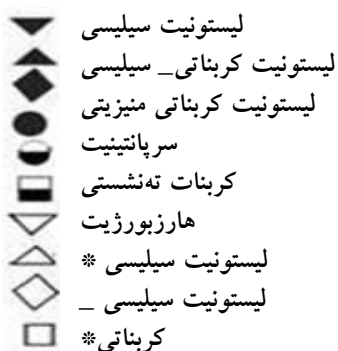


داده‌ی کربنات رسوبی [۱۸]

نمونه‌های با علامت توخالی از قهرایی پور [۷]

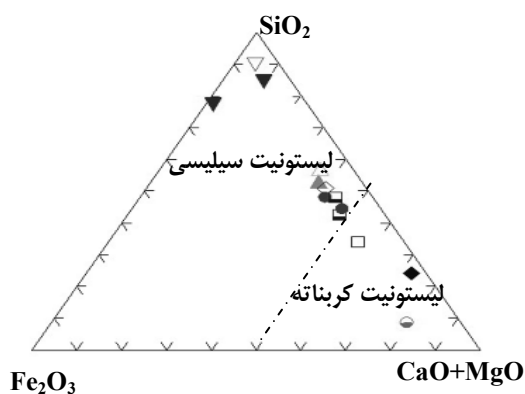


شکل ۳ نمودار LOI بر حسب SiO_2 . در این نمودار می‌توان انواع لیستونیت را بر حسب مقادیر SiO_2 و LOI تمیز داد.

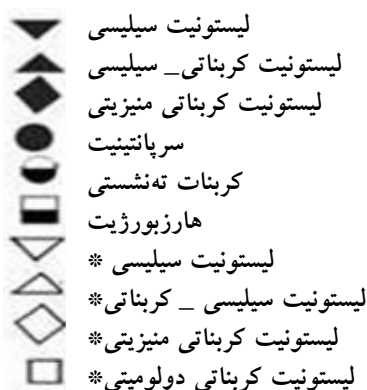


داده‌ی کربنات رسوبی [۱۸]

نمونه‌های با علامت توخالی از قهرایی پور [۷]

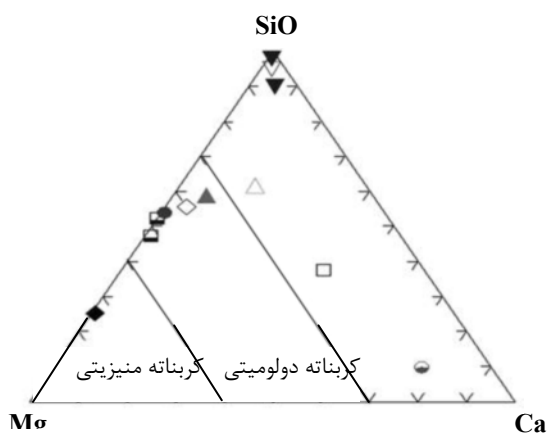


شکل ۴ نمودار سه تایی $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO} + \text{MgO}$ [۲۰]. در این نمودار می‌توان لیستونیت‌های کربناتی، سیلیسی و کربناتی-سیلیسی را بر حسب مقدار درصد SiO_2 , Fe_2O_3 , $\text{CaO} + \text{MgO}$ تمیز داد.



داده‌ی کربنات رسوبی [۱۸]

نمونه‌های با علامت توخالی از قهرایی پور [۷]



شکل ۵ نمودار $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ [۲۰] لیستونیت‌های سیلیسی نزدیک قطب SiO_2 و لیستونیت‌های کربناتی گونه‌ی منیزیتی در راستای خط $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ و نزدیک MgO قرار می‌گیرند. لیستونیت‌های کربناتی گونه‌ی دولومیتی در میانه مثلث، و لیستونیت‌های کربناتی-سیلیسی در میانه خط MgO-SiO_2 قرار می‌گیرند.

نمودارهای افزایشی - کاهش

جانشینی هارزبورژیت برای تشکیل لیستونیت با کانی-شناسی و شیمی متفاوت مستلزم تغییر در غلظت اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب در سنگ است. برای محاسبه لگاریتم افزایشی - کاهش عناصر به طریق زیر عمل کردیم [۲۱].

درصد کاهش یا افزایش = (درصد سازنده در هارزبورژیت سالم / درصد همان سازنده در سنگ دگرسان - درصد سازنده در هارزبورژیت سالم)

تجزیه شیمیایی هارزبورژیت سالم و سنگ‌های دگرسان افیولیت شمال نایین در جدول ۲ آمده‌اند. از عدد حاصل، بدون در نظر گرفتن علامت، لگاریتم گرفته و سپس با مقایسه درصد سازای مورد نظر در دو سنگ نا دگرسان

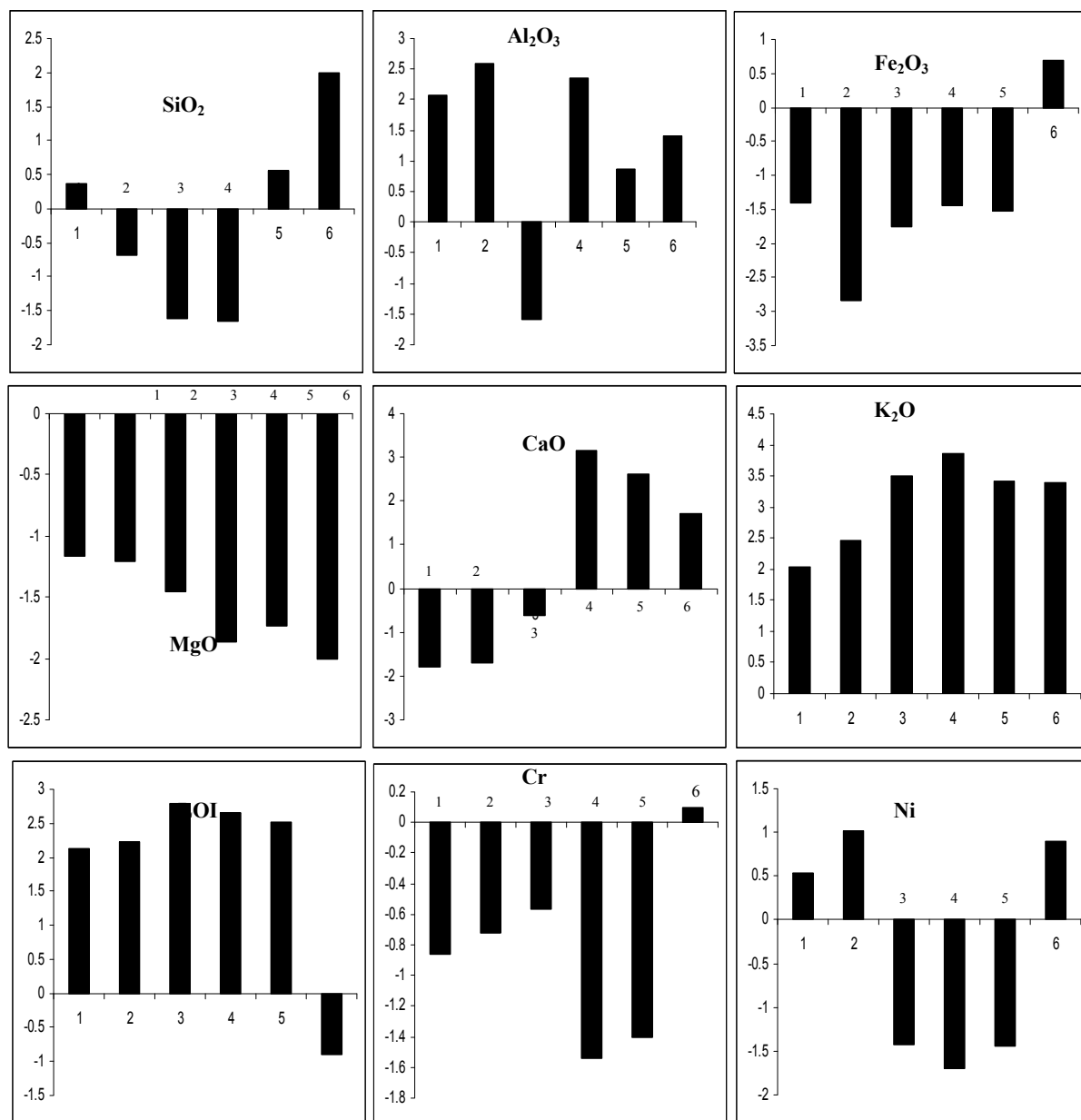
(هارزبورژیت تقریباً سالم در جدول ۳) و دگرسان علامت مثبت (افزایش) یا منفی (کاهش) را قبل از عدد قرار داده و نتایج را روی نمودار نشان داده‌ایم (جدول ۳ و ۴ و شکل ۶). چنانکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، SiO_2 ، Al_2O_3 ، CaO ، MgO و Cr در لیستونیت‌های کربناتی نوع منیزیتی کاهش یافته است. کاهش MgO در این دسته از لیستونیت‌ها نسبت به انواع دیگر کم‌تر است. کاهش میزان Al_2O_3 در لیستونیت‌های کربناتی منیزیتی را می‌توان به مقادیر کم‌تر کروم اسپینل در این دسته از سنگ‌ها نسبت داد. بیشترین میزان SiO_2 و Fe_2O_3 در لیستونیت‌های سیلیسی مشاهده می‌شود. در مقابل میزان MgO و LOI در این دسته از لیستونیت‌ها نسبت به هارزبورژیت و سرپانتینیت به شدت کاهش یافته است.

جدول ۳ میانگین ترکیب شیمی انواع لیستونیت و سنگ منشأ آن‌ها در افیولیت شمال نایین (اعداد داخل پرانتز تعداد نمونه‌ها در میانگین است).

اکسید	هارزبورژیت تقریباً سالم (۱)	هارزبورژیت سرپانتینیزه (۱)	سرپانتینیت کربناته (۳)	میانگین لیستونیت تیپ کربناته منیزیتی (۳)	میانگین لیستونیت تیپ کربناته دولومیتی (۳)	میانگین لیستونیت تیپ ۲ (۵)	میانگین لیستونیت تیپ ۳ (۵)
$\text{SiO}_2(\text{wt}\%)$	۳۹٫۵۶	۴۰٫۴۷	۳۷٫۶	۲۳٫۵۷	۲۱٫۹۵	۴۱	۷۷٫۲۵
Al_2O_3	۰٫۶۲	۱٫۳۶	۳٫۰۲	۰٫۴	۲	۰٫۶۶	۰٫۷۹
Fe_2O_3^T	۹٫۳۰	۶٫۹۴	۷٫۰۱	۳٫۹۱	۶٫۷	۶٫۱۹	۹٫۷۵
MgO	۴۲٫۹۰	۳۶٫۷۱	۳۵٫۸۹	۳۰٫۸۱	۱۲٫۱۶	۱۹٫۱۶	۲٫۴
CaO	۱٫۶۵	۰٫۶۲	۰٫۸۱	۱٫۵۸	۲۴٫۷۴	۷٫۸۴	۲٫۵۳
K_2O	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۳۳	۰٫۷۵	۰٫۲۷	۰٫۲۷
LOI	۵٫۵۴	۱۲٫۸	۱۴٫۷۹	۳۸٫۶۶	۳۰٫۶۵	۲۴٫۰۵	۵٫۰۵
$\text{Cr}(\text{ppm})$	۳۵۶۸	۳۳۱۰	۳۳۸۰	۳۴۳۵	۲۳۲۲٫۵	۲۶۸۰	۳۶۱۵٫۳
Ni	۲۶۲۸	۲۷۲۰	۲۹۰۰	۱۹۱۵	۱۳۱۷٫۰۶	۱۹۱۰	۲۸۳۵

جدول ۴ لگاریتم افزایش - کاهش عناصر اصلی، کروم و نیکل در هارزبورژیت سرپانتینیزه، سرپانتینیت و انواع لیستونیت نسبت به هارزبورژیت سالم افیولیت شمال نایین (ر.ک. جدول ۲).

نمونه دگرسان	هارزبورژیت سرپانتینیتی شده	سرپانتینیت کربناته	میانگین لیستونیت تیپ کربناته منیزیتی	میانگین لیستونیت تیپ کربناته دولومیتی	میانگین لیستونیت تیپ ۲	میانگین لیستونیت تیپ ۳
SiO_2	۰٫۳۶	-۰٫۶۹	-۱٫۶۱	-۱٫۶۵	۰٫۵۶	۲
Al_2O_3	۲٫۰۷	۲٫۵۹	-۱٫۶	۲٫۳۵	۰٫۸۶	۱٫۴
Fe_2O_3^T	-۱٫۴	-۲٫۸۵	-۱٫۷۶	-۱٫۴۵	-۱٫۵۲	۰٫۶۸
MgO	-۱٫۱۶	-۱٫۲۱	-۱٫۴۵	-۱٫۸۶	-۱٫۷۴	-۲
CaO	-۱٫۸	-۱٫۷	-۰٫۶۱	۳٫۱۵	۲٫۶	۱٫۷
K_2O	۲٫۰۴	۲٫۴۷	۳٫۵۱	۳٫۸۷	۳٫۴۲	۳٫۴
LOI	۲٫۱۲	۲٫۲۲	۲٫۷۸	۲٫۶۶	۲٫۵۲	-۰٫۹
Cr	-۰٫۸۶	-۰٫۷۲	-۰٫۵۷	-۱٫۵۴	-۱٫۴	۰٫۱
Ni	۰٫۵۴	۱٫۰۱	-۱٫۴۳	-۱٫۷	-۱٫۴۴	۰٫۹
کاهش	-۵٫۲۲	-۷٫۱۷	-۹٫۰۳	-۸٫۲	-۶٫۱	-۲٫۹
افزایش	۷٫۱۳	۸٫۵۶	۶٫۲۹	۱۲٫۰۳	۹٫۹۶	۱۰٫۱۸
کاهش + افزایش	۱٫۹۱	۱٫۳۹	۲٫۷۴	۳٫۸۳	۳٫۸۶	۷٫۲۸



شکل ۶ لگاریتم افزایش - کاهش عناصر اصلی، LOI ، Cr و Ni برای سرپانتینیت، سرپانتینیت کربناتی و انواع لیستونیت نسبت به هارزبورژیت سالم افیولیت شمال نایین (۱=سرپانتینیت ۲=سرپانتینیت کربناتی ۳=لیستونیت کربناتی منیزیتی، ۴=لیستونیت کربناتی دولومیتی، ۵=لیستونیت کربناتی - سیلیسی، ۶=لیستونیت سیلیسی).

سیلیسی به ترتیب ۷/۰۳، ۴/۹۶، ۳/۳ و ۹/۲ درصدوزنی است.

این محاسبات نشان می‌دهند که هارزبورژیت‌های شمال نایین در جریان تبدیل به سرپانتینیت، مقادیر زیادی CaO ، MgO از دست داده‌اند، در حالی که فقط

افزایش مطلق عناصر اصلی در لیستونیت ۶/۲۹ درصد وزنی برای گونه کربناتی منیزیتی، ۱۲/۰۳ درصد وزنی برای گونه کربناتی دولومیتی، ۹/۶۹ و ۹/۱۸ درصد وزنی به ترتیب برای لیستونیت‌های کربناتی-سیلیسی و سیلیسی است. کاهش عناصر در سرپانتینیت، لیستونیت کربناتی، لیستونیت کربناتی-سیلیسی و لیستونیت

افزایش نسبی مقادیر Al_2O_3 و Ni در آن‌ها دیده می‌شود.

الگوی REE در لیستونیت‌ها

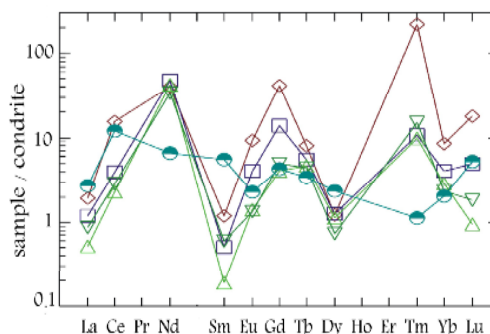
عناصر کمیاب خاکی جزء عناصری هستند که دارای کم‌ترین قابلیت انحلال بوده و در طول فرایندهای هوازدگی، دگرگونی درجه پایین و دگرسانی نسبتاً نامتحرکند [۲۲]. لذا الگوی REE در سنگ دگرسان می‌بایست تقریباً مشابه سنگ خاستگاه آن باشد. متوسط غلظت عناصر کمیاب خاکی در انواع لیستونیت شمال نایین [۷] و کربنات‌های ته نشستی [۱۸] در جدول ۵، متوسط

غلظت‌های REE هنجار شده به کندریت و پوسته قاره‌ای فوقانی در شکل ۷ و ۸ آمده‌اند. الگوی REE برای کربنات‌های ته‌نشستی [۱۸] برای مقایسه آورده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، عناصر نادر خاکی در لیستونیت‌ها غلظت پایین دارند. تهی‌شدگی عناصر نادر خاکی در لیستونیت‌ها در مقایسه با پوسته قاره‌ای فوقانی بیشتر است. از آنجا که این سنگ‌ها از گوشته سرچشمه گرفته‌اند، روند REE نسبت به کندریت نیز کمی تهی‌شدگی نشان می‌دهد که به دلیل درجه بالای ذوب بخشی سنگ خاستگاه آن‌هاست.

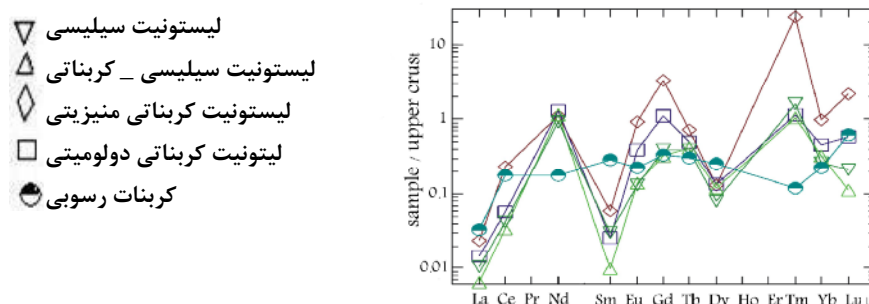
جدول ۵ متوسط REE در انواع لیستونیت افیولیت شمال نایین [۷] و کربنات‌های ته‌نشستی [۱۸].

نوع سنگ REE (ppm)	لیستونیت کربناته نوع منیزیتی [۷]	لیستونیت کربناته نوع دولومیتی [۷]	لیستونیت کربناته - سیلیسی [۷]	لیستونیت سیلیسی [۷]	کربنات رسوبی [۱۸]
La	۰٫۷۱	۰٫۴۴	۰٫۱۹	۰٫۳۱	۱
Ce	۱۵	۳٫۷۳	۲٫۲	۲٫۷۳	۱۱٫۵
Nd	۲۸٫۵	۳۳٫۶۶	۳۰	۲۴	۴٫۷
Sm	۰٫۲۷	۰٫۱۲	۰٫۰۴	۰٫۱۴	۱٫۳
Eu	۰٫۸۱	۰٫۳۵	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۲
Gd	۱۲٫۵۵	۴٫۲۷	۱٫۲۴	۱٫۵	۱٫۳
Tb	۰٫۴۷	۰٫۳۲	۰٫۲۷	۰٫۲۵	۰٫۲
Dy	۰٫۴۶	۰٫۴۸	۰٫۴۲	۰٫۲۸	۰٫۹
Tm	۷٫۸۴	۰٫۳۸	۰٫۳۵	۰٫۵۳	۰٫۰۴
Yb	۲٫۱۵	۱٫۰۲	۰٫۷۲	۰٫۵۹	۰٫۵
Lu	۰٫۷	۰٫۱۹	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۲
Ce/Yb	۶٫۹۸	۳٫۶۶	۳٫۰۷	۴٫۶۵	۲۳

- ▽ لیستونیت سیلیسی
- △ لیستونیت سیلیسی - کربناتی
- ◇ لیستونیت کربناتی منیزیتی
- لیستونیت کربناتی دولومیتی
- کربنات رسوبی



شکل ۷ الگوی REE در انواع لیستونیت شمال نایین هنجار شده به متوسط کندریت [۲۳] الگوی REE کربنات ته‌نشستی [۱۸] برای مقایسه داده شده است.



شکل ۸. الگوی REE انواع لیستونیت، هنجار شده به ترکیب پوسته فوقانی از تیلور و مک لنن [۲۴]. الگوی REE کربنات ته‌نشستی [۱۸] برای مقایسه داده شده است.

کنترل‌های ساختاری به درون سنگ دربرگیرنده گسترش می‌یابد. بنابراین علاوه بر وجود ساختارهای درزه، گسل و شکستگی، عوامل موثر دیگری در تشکیل لیستونیت نقش دارند.

دمای موثر: فعالیت‌های آذرین وابسته به بعد از جایگزینی افیولیت (فعالیت‌های ماگماتیسم ترشیاری) در ایران مرکزی باعث افزایش درجه زمین گرمایی، گرم شدن آب‌های سطحی و نفوذی و در نتیجه افزایش قابلیت حلالیت آن‌ها شده است. لذا نقش ماگماتیسم ائوسن در تشکیل لیستونیت به عنوان موتور گرمایی بسیار اهمیت دارد.

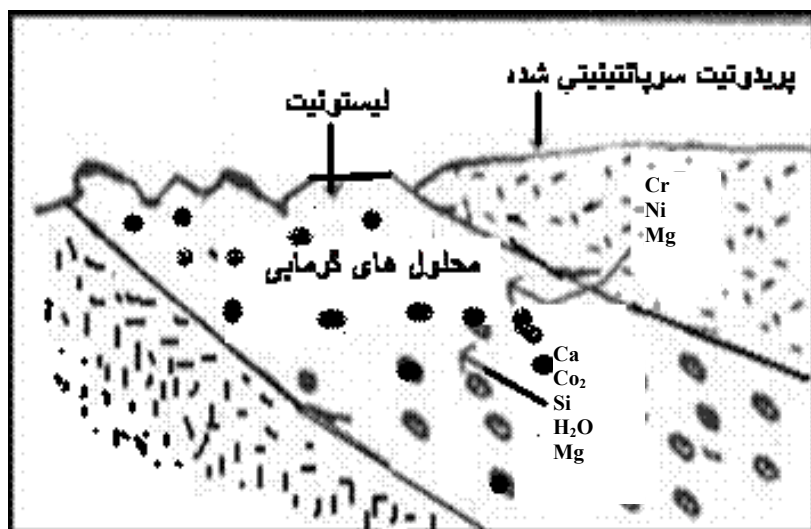
ماهیت آبگون‌های لیستونیت‌ساز: آبگون‌های سازای لیستونیت، دارای XCO_2 ی بالا هستند. چنانکه گفته شد، فعالیت ماگمایی ائوسن در ایران مرکزی باعث افزایش درجه زمین گرمایی شده است. خاستگاه احتمالی CO_2 را می‌توان کربن ماگمایی حل شده در شاره ناشی از فعالیت آذرین دانست. شاره غنی از CO_2 تحت تاثیر انرژی زمین گرمایی زیادی در اعماق گرم شده و قابلیت حل‌کنندگی آن بالا رفته و کلریدها، سولفیدها و آرسنیدها را همراه با کلسیم، منیزیم و فلزات کمیایی نظیر Ag, Hg, As, Sb, Ni, Cr و... از سنگ‌های حاوی این عناصر شسته و از طریق زون‌های گسلشی و شکستگی با خود به سطوح کم فشار حمل کرده است. با توجه به این که پریدوتیت‌های سرپانتینیده و سرپانتینیت‌ها حجم گستره‌ای از سنگ‌ها را در افیولیت شمال ناین تشکیل داده‌اند و این سنگ‌ها بسیار خرد شده و دگرسانند، مکان مناسبی برای نفوذ آبگون‌ها به شمار می‌روند.

REE همگرا لیستونیت‌های کربناتی شمال ناین کم‌اند و الگوی REE در آن‌ها خیلی شبیه به الگوی کربنات‌های ته‌نشستی است. به دلیل محیط احیای لیستونیت کربناتی میزان Eu در این دسته از لیستونیت‌ها نسبت به انواع دیگر لیستونیت غنی شده است. در مقابل در محیط اکسایشی، لیستونیت‌های سیلیسی میزان Eu کاهش می‌یابد. از سوی دیگر میزان نابهنجاری Eu با فوگاسیته CO_2 نسبت مستقیم دارد. در لیستونیت‌های کربناتی که دارای مقادیر فراوان CO_2 هستند، Eu نابهنجاری مثبت شدیدتری نشان می‌دهد. در حالی که در لیستونیت‌های سیلیسی که دارای پایین‌ترین میزان CO_2 هستند، Eu کاهش می‌یابد.

بحث

عوامل موثر در تشکیل لیستونیت شمال ناین بدین شرح است:

زمین ساخت فعال: جایگزینی سنگ‌های الترامافیک کف اقیانوس و در پی آن گسل خوردگی در راستای برقراری تعادل ایزوستازی [هم فشاری]، شرایط ساختاری مناسب برای نفوذ آبگون‌های لیستونیت ساز را فراهم کرده است. علاوه بر این فاز کششی ترشیاری که پس از جایگزینی افیولیت در ایران مرکزی رخ داد، سبب ایجاد شکستگی‌های جدید و یا تجدید فعالیت زون‌های گسل‌های موجود شده است. سیستم‌های درز و شکستگی به عنوان مجاری اولیه نفوذ آبگون‌های لیستونیت ساز عمل می‌کنند و یک فاکتور اولیه و لازم برای تشکیل لیستونیت به شمار می‌روند. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهند که دگرسانی نافذ لیستونیتی از چندین سانتی‌متر تا ده‌ها متر خارج از



شکل ۹. شکل نموداری فرایند لیستونیتی شدن [۲۰].

REE نشان دهنده پروتولیت پریدوتیتی با درجه ذوب بخشی بالاست. زمین‌ساختی فعال و کنترل‌های ساختاری مناسب برای انتقال آبگون‌های لیستونیت‌ساز، افزایش دمای ناشی از ماگماتیسم ائوسن در باختر منطقه را می‌توان از عوامل موثر در تشکیل لیستونیت در نظر داشت. خاستگاه CO_2 ی لازم برای واکنش‌های لیستونیتی شدن را می‌توان آبگون‌های ماگمایی - متئوریک دانست.

قدردانی

از تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان برای مساعدت در تدوین این مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

[1] Rose G., "Mineralogisch – geognostische Reise nach dem Ural, dem Altai und dem kaspischen Meere". Volume 2: "Reise nach dem sudlichen Urals und dem kaspischen Meere, Uebersicht der Mineralien und Gebirgsarten des Ural. Berlin, G. E. Reimer (Verlag der sanderschen Buchhandlung)", XV plus 606p and paltes I-V. (1873).

با کاهش دما و فشار جزیی CO_2 ، قابلیت حل شوندگی کلسیم افزایش می‌یابد. در این شرایط کرانه‌های کربنات-ها حل می‌شوند و سیلیس به صورت کوارتز و کلسدونی جانشین آن‌ها می‌شود. بدین ترتیب بافت جزیره‌ای در کانی‌های کربنات شکل می‌گیرد. آبگون‌های تاخیری حاوی CO_2 و SiO_2 و عناصر دیگر به صورت رگه‌ای، شکستگی‌های موجود در سنگ را پر می‌کنند. شکل نموداری فرایند لیستونیتی شدن [۲۰] در شکل ۹ آمده است.

برداشت

سرپانتینیت‌های شمال نایین در برخی بخش‌ها تحت تاثیر آبگون‌های حاوی CO_2 ، SiO_2 و عناصر Ca_{2+} ، Mg_{2+} و ... به لیستونیت تبدیل شده‌اند. بنابر بررسی -های صحرائی و میکروسکوپی، لیستونیت‌های شمال نایین به انواع کربناتی، کربناتی - سیلیسی و سیلیسی تقسیم می‌شوند. لیستونیت‌های کربناتی - سیلیسی فراوان ترین نوع لیستونیت در شمال نایین‌اند. به طور کلی همه لیستونیت‌ها شامل مقادیر کمی از عناصر نادر خاکی هستند و الگوی بهنجار شده این عناصر نسبت به کندریت تقریباً مسطح است. تهی شدگی لیستونیت‌ها از

- [۱۳] سعیدی م.، "مطالعه پتروژنز لیستونیت‌ها در سنگ‌های الترامافیک شمال ناین (ایران مرکزی)"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۶) ۱۲۰ صفحه.
- [۱۴] نقره‌نایان م.، مکی زاده م. ع.، شرافت ش.، "پتروگرافی و ژئوشیمی لیستونیت‌ها در مجموعه‌های افیولیتی ایران مرکزی"، گزارش پایانی طرح پژوهشی، دانشگاه اصفهان، (۱۳۷۷) ۶۶ صفحه.
- [15] Emami M. H., Sadegi M. M., Omrani S. J., "Magmatic Map of Iran", Scale 1:1,000,000, Geological Survey of Iran. (1993).
- [۱۶] علایی‌مهابادی س.، فودازی م.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ناین"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی- کشور (۱۳۸۳)
- [17] Aydal s., "Gold – bearing listwaenites in the Arac Massif, Kastamonu, Turkey, Terra Nova", vol. 2 No. 1. 1990, Pp. 43-51.
- [18] Turekian K. K., Wedepohl K. W., "Distribution of the elements in some major units of the earths crust", Geological Society of America Bulletin, 72, (1961) 175 192.
- [19] Kretz R, "Symbols for rock-forming minerals", American Mineralogists, v. 68, (1983) p. 277-279.
- [20] Nasir S., Al Sayigh A.R., Al Harthy A., Al-Khribash S., Al- Jaaid O., Musllam A. A., Al Mishwat A., Saidi S., Al- Bu, "Mineralogical and Geological characterization of listwaenite from the Semail ophiolite", Oman, Chemie der Erde-Geochemistry, Article in press.
- [۲۱] زرین کوب م. ح.، امینی ص.، آفتابی ع.، کریم پور م. ح.، "کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، موقعیت ساختمانی و ارائه‌ی مدل ژنتیکی برای لیستونیت‌های خاور ایران"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال سیزدهم، شماره ۲، (۱۳۸۴) ۳۶۳-۳۷۸.
- [۲۲] رولینسون ه. ر.، "کاربرد داده‌های ژئوشیمیایی: ارزیابی، نمایش، تفسیر"، ترجمه‌ی علی رضا کریم زاده‌ی ثمرین، ۱۳۸۱، چاپ و انتشارات دانشگاه تبریز، (۱۳۸۴) ۵۵۷ صفحه.
- [2] Buisson G., M. Leblanc, "Gold in carbonatized ultramafic rocks from ophiolite complexes", Economic Geology, 80, (1983) 2026-2029.
- [3] Henderson F. B., "Hydrothermal alteration and ore deposition in serpentinite- type mercury deposits", Economic Geology, 64(1969) 489-499.
- [4] Davoudzadeh M., "Geology and Petrography of the area north of Nain Central Iran", Geological Survey of Iran, Report No.14. (1972) 89p.
- [۵] جباری ع.، "زمین‌شناسی و پترولوژی افیولیت‌های شمال ناین"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، (۱۳۷۶) ۱۶۲ صفحه.
- [۶] منوچهری ش.، "بررسی پتروگرافی و پترولوژی افیولیت‌های شمال ناین"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی تهران، (۱۳۷۶) ۱۹۰ صفحه.
- [۷] قهرایی‌پور م.، "پترولوژی فرایندهای لیستونیتی شدن در افیولیت ملانژ شمال ناین"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم، (۱۳۸۰) ۱۵۴ صفحه
- [۸] رحمانی ف.، "پترولوژی دایک‌های صفحه‌ای افیولیت ناین (ایران مرکزی)"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان (۱۳۸۰)، ۱۲۷ صفحه.
- [۹] رضایی ز.، "مطالعه پترولوژی پلاژیوگرانیت‌ها و سنگ‌های وابسته در افیولیت ناین (ایران مرکزی)"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان (۱۳۸۵) ۱۳۹ صفحه..
- [۱۰] پیرنیا نایینی ت.، "پترولوژی پریدوتیت‌های گوشته‌ی افیولیت ناین (استان اصفهان)"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۶) ۱۹۱ صفحه.
- [۱۱] شیردشت زاده ن.، "پترولوژی سنگ‌های دگرگونی افیولیت ناین (استان اصفهان)"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۶) ۱۹۲ صفحه.
- [۱۲] فلاحی س.، "بررسی کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی رودنژیت‌های مرتبط با افیولیت ناین"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۶) ۱۲۹ صفحه.

composition and evolutions of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks, Phil. Trans. R. Soc., (1981) A 301381 – 399.

[23] Taylor S. R., Mc Lennan S. M., *The continental crust: its composition and evolution*, Blackwell, Oxford (1985).

[24] Taylor S. R., Mc Lennan S. M., *The*