

IRANIAN SOCIETY of
CRYSTALLOGRAPHY
and MINERALOGY

No. 2, 1386/2007 Fall & Winter



Petrography and petrology of listwaenites in the east of Khoosf

M. H. Yousefzadeh¹, M. Sabzehei²

1-Research department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Birjand Univ,
Birjand, Iran.

2- Geological survey of Iran

E-mail: mhyousefzadeh@Yahoo.Com

(Received: 6/11/2006, received in revised form: 7/5/2007)

Abstract: The studied area is situated in southwestern Birjand (South Khorasan). Lithologic units which are studied contains part of the late Cretaceous coloured melange, Cretaceous and Paleogen flysh sediments, Neogen conglomerate and Tertiary volcanic rocks. The listwaenite of this area often appears along fault zone, boundary of units, bedding planes and schistosity as yellow and brownish vein. The effect of CO₂ bearing hydrothermal solutions on mentioned units, in suitable physico - chemical and thermodynamic conditions, caused Listwaenitization reactions. Field and microscopic studies revealed that alteration process comprises pre-stage reactions (specially serpentine and talc forming reactions in ultrabasic rocks) and main reactions of listwaenitization which in primary mineral paragenesis is changed to silicic - carbonate assemblages listwaenite). Abundance and type of minerals is depended on composition of primary rock, PH, Eh, T, P_{CO_2} and P_{H_2O} . Microscopic studies and XRD analysis show presence of magnesite, breunerite, dolomite, calcite, smithsonite, quartz, clinocllore, talc, muscovite, chromite, pyrite and magnetite. Also SEM analysis and polished section studies represents Fe, Ni, Fe-Ni-Co sulphur that must be considered as pathfinder minerals for prospecting of Au, Ag, Hg,....

Keywords: listwaenite, Ultrabasic, Hydrothermal, Khoosf.



انجمن باورشناسی و کانی شناسی ایران

شماره ۲، پاییز و زمستان ۸۶، از صفحه ۲۷۱ تا ۲۹۲

مجله
باورشناسی
و کانی شناسی
ایران

سنگ نگاری و سنگ شناسی لیستونیت های شرق خوسف

محمد حسین یوسف زاده، مسیب سبزه ئی

۱- گروه پژوهشی علوم زمین دانشگاه بیرجند.

۲- پژوهشکده علوم زمین سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

پست الکترونیکی: mhyousefzadeh@yahoo.com

(دریافت مقاله ۱۳۸۵/۸/۱۵، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۶/۲/۱۷)

چکیده: منطقه مورد مطالعه، در جنوب غربی شهرستان بیرجند (خراسان جنوبی) واقع است. واحدهای لیتولوژیکی مورد بحث، شامل بخشهایی از افیولیت ملانژ شرق کشور، با سن اواخر کرتاسه، تهنشستهای فلیش کرتاسه و پالئوژن، کنگلومرای نفوژن و سنگهای آتشفشانی ترسیر است. لیستونیتهای منطقه غالباً به صورت رگهای و به رنگ زرد و قهوه‌ای و در راستای سطوح گسلها، مرز واحدها، سطوح لایه‌بندی، و برگوارگی دیده می‌شود. تأثیر گرمابیهای حاوی CO₂ بر واحدهای یاد شده، تحت شرایط فیزیکوشیمیایی و ترمودینامیکی مناسب، باعث واکنشهای لیستونیت زائی شده است. بررسیهای صحرایی و میکروسکوپی مبین آن است که فرایندهای دگرسانی شامل واکنشهای پیش‌درآمد لیستونیت زائی (به ویژه واکنشهای مربوط به تشکیل سرپانتینیت و تالک در سنگهای اولترابازیک) و واکنشهای اصلی لیستونیت زائی است که طی آن، پاراژنز کانیاپی اولیه سنگها تبدیل به مجموعه سیلیسی-کربناتی (لیستونیت) شده‌اند. فراوانی و نوع کانیهایی تشکیل دهنده لیستونیتها به ترکیب سنگ اولیه، PH و Eh محیط، دما و فوگاسیته CO₂ و H₂O بستگی دارد. بررسیهای میکروسکوپی و XRD مؤید حضور منیزیت، برونزیت، دولومیت، کلسیت، اسمیت زونیت، کوارتز، کلینوکلر، تالک، موسکویت، کرومیت، پیریت، و مگنتیت است. داده‌های SEM و بررسی مقاطع صیقلی نیز وجود سولفورهای آهن، نیکل و آهن-نیکل-کبالت را نشان می‌دهد که می‌تواند به عنوان کانیهایی همراه، برای پی‌جویی عناصری مثل طلا، نقره، جیوه و... مورد نظر باشد.

واژه‌های کلیدی: لیستونیت، اولترابازیک، گرمابی، خوسف.

مقدمه

با توجه به گسترش نسبتاً زیاد لیستونیت‌ها در شرق کشور و به ویژه در مناطق بیرجند-خوسف [۱] و سهل آباد [۲]، و نیز توجه کمتر به آنها در این کار پژوهشی سعی شده است که تا حد امکان، ویژگی‌های لیتولوژیکی، سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی آنها، مورد بررسی قرار گیرد. در واکنشهای لیستونیت‌زائی کانیهای سیلیکاته اولیه سنگ به وسیله کربناتهای مختلف، کوارتز و مسکویت کرومدر (فوشسیت) جانشین می‌شوند که در سنگهای اولترابازیک با بقایای کرومیت و مقادیر جرئی پیریت و سولفیدهای دیگر همراه است. برای تشکیل مجموعه‌های لیستونیتی از سیلیکاتهای مافیک، اضافه‌شدن CO_2 و الکالی، در شرایط مزوترمال ضروری است [۳ تا ۵].

روش کار

در راستای انجام این کار، در حدود ۲۰۰ مقطع نازک و یا صیقلی تهیه و مورد مطالعه قرار گرفتند. سپس به منظور مقایسه، سنگهای اولیه و سنگهای لیستونیتی به تعداد لازم از نمونه‌ها آنالیز XRF و نیز برای تشخیص کانیها از برخی نمونه‌ها آنالیز XRD و SEM به عمل آمد. این آنالیزها در مرکز نسوز آذر اصفهان انجام گرفته است.

روابط صحرایی

با عنایت به اینکه منطقه مورد مطالعه، در گستره زون سیستان و بلوک لوت قرار دارد، واحدهای سنگی مختلفی در آن دیده می‌شود. بخش گسترده‌ای از منطقه، در برگیرنده افیولیت ملائز جنوب بیرجند است. این واحدها، شامل سنگهای اولترا بازیک و بازیک، کم و بیش دگرسان بوده و غالباً با مرزهای گسلی نسبت به هم وجود دارند. سنگهای فلیشی، تا حدودی دستخوش دگرگونی ناحیه‌ای با درجه ضعیف شده و به اسلیت و فلیت تبدیل گشته‌اند. کنگلومرای نئوزن نیز، که در برگیرنده قطعاتی از سنگهای آمیزه رنگین است در بخش جنوبی منطقه وجود دارد. سنگهای آتشفشانی حدواسط نیز در بخشهای شرقی و غربی منطقه، به صورت توده‌های گنبدی یافت می‌شوند [۶، ۷]. واکنشهای لیستونیت‌زائی، بیشتر در سرپانتینیتها و به مقدار کمتر، در سنگهای مرتبط و یا مجاور با آن صورت پذیرفته است. سنگهای حاصل، با توجه به ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خود (سیلیسی-کربناتی)، نسبت به سنگ اولیه، از استحکام بیشتری برخوردار بوده، و این باعث می‌شود که رگه‌های لیستونیتی به صورت برجسته‌تری تظاهر نمایند. این رگه‌ها، اغلب دارای رنگ زرد، زرد مایل به قهوه‌ای و برخی از آنها با سطح تیره دیده می‌شوند که ناشی از آزاد شدن ترکیبهای آهن در طول دگرسانیهای سوپرژن بعدی است [۱].

سنگ‌نگاری

بنابر تقسیم‌بندی ارائه شده توسط [۸]، لیستونیت‌های منطقه در سه گروه ارتولیستونیت (ناشی از دگرسانی متاسوماتیک سنگهای آذرین مافیک و اولترامافیک)، پارالیستونیت (ناشی از دگرسانی سنگهای تهنشستی) و اپی لیستونیت (ناشی از دگرسانی سنگهای دگرگون) جای می‌گیرند [۱]:

۱- سنگهای اولترابازیک لیستونیتی شده (ارتولیستونیت)

سنگهای اولترابازیک (هارزبورژیت و لرزولیت) در مرحله نخست، یعنی پیش و یا همزمان با جایگیری بر پوسته قاره‌ای، به سرپانتینیت و سرپانتینیت شیست و در مراحل بعدی، به لیستونیت تبدیل شده‌اند (شکل ۱). عمده‌ترین بافتی که در این گروه از لیستونیتها دیده می‌شود، برگوارگی به جا مانده از سرپانتینیت شیستهاست که در مواردی چینهای ظریفی را نشان می‌دهند. فراوان‌ترین کانیهای کربناته تشخیص داده شده با میکروسکوپ و داده‌های XRD، منیزیت ($MgCO_3$)، برونریت ($(Mg,Fe)CO_3$)، کلسیت ($CaCO_3$)، دولومیت ($(Ca,Mg)(CO_3)_2$)، سیدریت ($FeCO_3$) و اسمیت زونیت ($ZnCO_3$) هستند. این کانیها، اغلب به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و یا مجموعه‌های ریزدانه و درشت‌دانه و نیز نوارهای متناوب کربنات قهوه‌ای رنگ و کوارتز روشن (شکل ۲) ملاحظه می‌شوند. آثار برش‌خوردگی در برخی از رگچه‌های کربناتی، حاکی از آن است که اعمال تنشهای زمین‌ساختی، پس از تشکیل رگه‌ها و رگچه‌ها ادامه داشته است (شکل ۳). بقایای بافت مشبک (mesh texture) مربوط به سرپانتینیت‌ها، در بعضی از لیستونیت‌های حاصل از آن، نشان می‌دهد که این گروه از سنگها، احتمالاً پیش و پس از تشکیل لیستونیت، کمتر دستخوش دگرشکلی شده‌اند [۱]. پورفیروکلاستهای کروم اسپینل و کرومیت که نشان دهنده خاستگاه اولترامافیک سنگ اولیه است نیز وجود دارند. بلورهای کوارتز در مواردی، بافت اسفرولیتی نشان می‌دهند (شکل ۴). از دیگر کانیهای مشخص شده از داده‌های XRD می‌توان کلینوکلر، تالک، موسکویت کروم‌دار (فوشسیت) رانام برد (شکل ۵). سیمای کانیاپی دگرنهادی پتاسیم معمولاً در تشکیل موسکویت کروم‌دار (فوشسیت یا ماریپوسیت) یافت می‌شود که کروم آن، همان کروم دوباره متحرک شده وابسته به کرومیت و یا سیلیکاتهای کروم‌دار است. وقتی مقدار کروم کمتر باشد، موسکویت زرد رنگ (سریسیت) تشکیل خواهد شد [۴، ۹].

بنابر شواهد بافتی و ساختی، واکنشهای دگرسانی در سنگهای اولترابازیک منطقه، حداقل در سه مرحله رخ داده است [۱]: در مرحله اول، سنگهای اولترابازیک به سرپانتینیت و یا سرپانتینیت شیست تبدیل شده‌اند که احتمالاً طی آن، بخشی از گرماییهای حاوی CO_2 در اثر

واکنشهای دگرگونی پیشرونده CO_2 زا، حاصل شده است. در مرحله دوم، با تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی و ترمودینامیکی، سرپانتینیتها و سرپانتینیت شیستها به لیستونیت تبدیل شده‌اند. در این مرحله، سرپانتینیتها با حفظ بافت مشبک و سرپانتینیت شیستها در راستای سطوح شیستوزیته خود، لیستونیتی شده‌اند. در مرحله سوم، تکرار واکنشهای لیستونیت‌زایی صورت گرفته که طی آن، رگچه‌های کوارتز و کربناتی جدیدتر، زمینه سیلیسی- کربناتی قدیم‌تر و یا برگوارگی اولیه را قطع می‌کنند. ریز دانه‌های پیریت نیز به صورت پراکنده در زمینه سیلیسی- کربناتی ملاحظه می‌شود [۱]. داده‌های SEM حضور سولفورهای آهن نیکل و نیکل - آهن - کبالت را نشان می‌دهد.



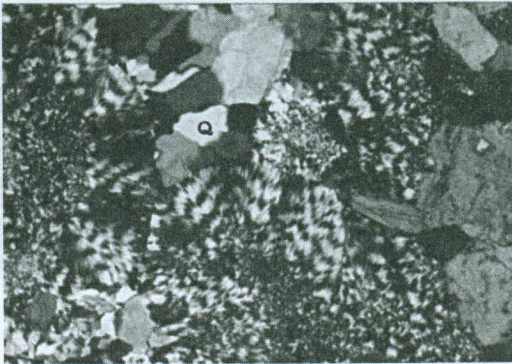
شکل ۱. نمایی از رگه لیستونیتی درون سرپانتینیت‌های شرق روستای چشمه‌زرد.



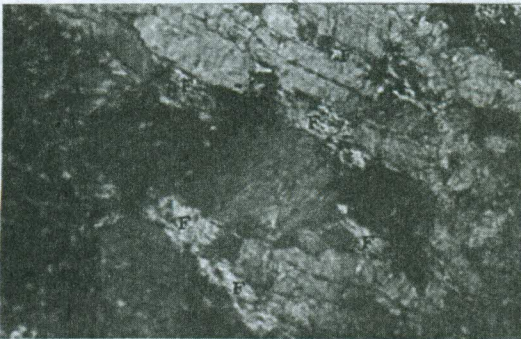
شکل ۲. لیستونیت‌زایی در راستای سطوح شیستوزیته سرپانتینیت‌ها (XPL, 12.5x). انواع کربنات (دولومیت، منیزیت، کلسیت، برونریت و اسمیت زونیت)، کوارتز و موسکویت با XRD در این نمونه تأیید شده است.



شکل ۳ برش خوردگی رگچه‌های کربناتی در ارتولیستونیت‌ها (XPL, $\times 12/5$).



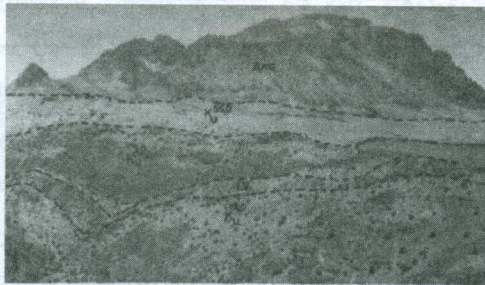
شکل ۴ بافت اسفرولیتی بلورهای کوارتز در ارتولیستونیت‌ها (XPL, $\times 20$).



شکل ۵ بلورهای موسکویت کروم‌دار (فوشسیت) در زمینه سیلیسی - کربناتی (منیزیت، دولومیت و برونیت) (XPL, $\times 50$).

۲- سنگ‌های بازیک لیستونیتی شده (ارتول‌لیستونیت)

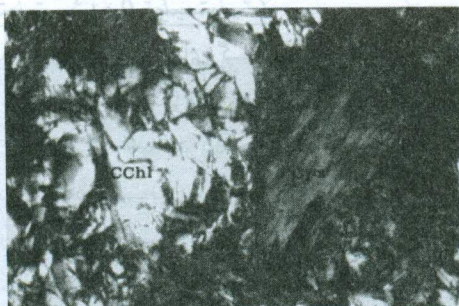
رگه‌های طویل لیستونیت، در راستای زون‌های گسلی و غالباً با روند شرقی- غربی، درون توده‌های بازالتی منطقه تظاهر می‌کند (شکل ۶). در دیابازها و بازالت‌هایی که کمتر تحت تاثیر واکنش‌های لیستونیت‌زائی قرار گرفته‌اند، آثار بافت‌های دیابازی و واریولیتی تا حدودی بجا مانده است. اما در نمونه‌های کاملاً لیستونیتی، کربنات و کوارتز، به صورت انباشت ریزدانه و درشت‌دانه و رگچه‌ای دیده می‌شوند. بررسی مقاطع نازک و داده‌های XRD، مؤید حضور آل‌بیت، اولیوین کلریتی شده، کلسیت، کوارتز، اپیدوت، و کانی‌های تیره، در سنگ‌های کمتر دگرسان و کلسیت، آراگونیت، دولومیت، سیدریت، فایرچیلدیت ($K_2Ca(CO_3)_2$)، برونریت، کوارتز، کلریت، و کانی‌های تیره، در نمونه‌های کاملاً لیستونیتی، است [۱]. حضور رگچه‌های نسبتاً خالص کلسیت و آراگونیت و نیز بلوردهانه‌های کربناته با بافت گل‌رزی (بیشتر دولومیت، برونریت، سیدریت، و کلسیت) که در مرحله جدیدتر، درون رگه‌های لیستونیت متعلق به مرحله قدیم‌تر، به وجود آمده‌اند، مؤید تکرار این واکنش‌ها است (شکل ۷). در شرایطی که X_{CO_2} پائین بوده است به جای لیستونیت، مجموعه‌ای از سیلیکات‌های کلسیم‌دار به وجود آمد که تشکیل رودینگیت را داده‌اند (شکل ۸) [۱].



شکل ۶ رگه لیستونیتی (LV) درون بازالت اسپیلیتی (شمال روستای اجگ).



شکل ۷ ژئودهای کربناتی (بیشتر از دولومیت، برونریت، سیدریت، کلسیت) در بازالت لیستونیتی شرق روستای چشمه زرد.



شکل ۸ کلینوکلر (به رنگ روشن) و کلینوپیروکسن فراوانترین کانی‌های تشکیل دهنده رودینگیت (XPL, $\times 200$)

۳- مجموعه فلیشی لیستونیته شده (پارالیستونیت‌ها و اپی لیستونیت‌ها)

فلیش‌های منطقه، که بیشتر به کرتاسه فوقانی مربوط می‌شوند، شامل شیل، شیل‌های رادیولاریتی، ماسه سنگ و سیلتستون بوده و در بعضی از بخشها، همراه با سنگ‌های اولترابازیک و بازیک، از سازهای آمیزه رنگین محسوب می‌شوند. برخی از سنگ‌های فلیشی، تا حد اسلیت و فیلیت دگرگون شده‌اند. لذا، بر حسب اینکه سنگ اولیه ته‌نشستی و یا دگرگونی باشد به ترتیب، پارالیستونیت و اپی لیستونیت‌ها به وجود آمده‌اند. رگه‌های لیستونیته معمولاً در راستای زون‌های گسلی، مرز واحدها، سطوح لایه‌بندی، و شیستوزیته تشکیل شده‌اند (شکل ۹). با توجه به داده‌های میکروسکوپی، XRD، کلسیت، دولومیت، و کوارتز به عنوان سازهای پارالیستونیت، به صورت انباشت ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها، زمینه سیلیسی-کربناتی این گروه از سنگ‌ها را به وجود می‌آورند. در اپی لیستونیت‌ها نیز، کلسیت، دولومیت، سیدریت، کوارتز، اوژیت و موسکویت، زمینه سنگ ریزدانه را شامل شده که به وسیله رگچه‌های کلسیت، دولومیت و کوارتز قطع شده‌اند [۱].



شکل ۹ رگه لیستونیته درون اسلیت‌ها و فیلیت‌ها، واقع در غرب روستای چاهکلک پائین.

۴- کنگلومرای لیستونیتی شده (پارالیستونیت)

رخمون‌های بسیار گسترده و جالبی از کنگلومرای نئوژن منطقه، که در راستای زون‌های گسلی و شکستگی‌ها، لیستونیتی شده‌اند نیز، وجود دارند (شکل ۱۰). اجزای سازای این کنگلومرا، از سنگ‌های اولترابازیک و بازیک آمیزه رنگین تشکیل شده‌اند. در راستای شکستگی‌های موجود در رگه‌های کنگلومرای لیستونیتی، تکرار واکنش‌های لیستونیت‌زایی صورت گرفته است. اصلی‌ترین کانیهای مشخص شده با میکروسکوپ، XRD، کوارتز، دولومیت، کلسیت، کائولینیت، دیکیت، کلینوکلر، و موسکویت است. مجموعه کانیایی این سنگ‌ها، بافت کنگلومرایی اولیه سنگ را به نمایش می‌گذارند [۱].

۵- آندزیت‌ها و داسیت‌های لیستونیتی شده

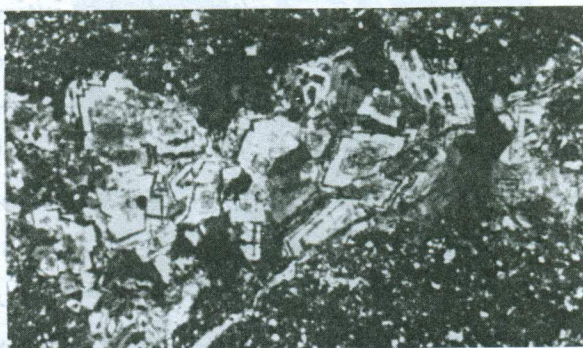
سنگ‌های آندزیتی و داسیتی منطقه به علت جوان‌تر بودن و تأثیر کمتر عوامل دگرسانی بر آن، فقط در بخش‌های حاشیه‌ای برخی توده‌ها و در زون‌های گسلی، تحت تأثیر واکنش‌های لیستونیت‌زایی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۱). در نمونه‌هایی که کمتر دگرسان شده‌اند آثار کانیها و بافت اولیه این سنگ‌ها، با حفظ قالب بلوری درشت بلورهای هورنبلند، پلاژیوکلاز و بیوتیت، کاملاً مشخص است. در نمونه‌های کاملاً دگرسان، غالباً بلورهای منطقه‌ای دولومیت، در زمینه‌ای از کانیهای سیلیسی و کربناتی دیده می‌شوند (شکل ۱۲) [۱].



شکل ۱۰ دورنمایی از کنگلومرای لیستونیتی در شمال روستای چاهکلک (نگاه رو به شمال).



شکل ۱۱ نمایی از پدیده لیستونیت‌زایی درون سنگهای حدواسط (آندزیت)، شمال روستای چاهکلک.



شکل ۱۲ بلورهای منطقه‌ای دولومیت در زمینه سیلیسی-کربناتی آندزیت‌های لیستونیتی (XPL, $\times 12.5$).

موقعیت لیستونیت‌های منطقه در تقسیم‌بندی‌های مختلف

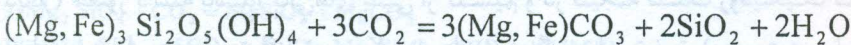
در جدول ۱ انواع لیستونیت‌های منطقه در تقسیم‌بندی‌های مختلف نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ جایگاه لیستونیت‌های منطقه در تقسیم‌بندی‌های مختلف.

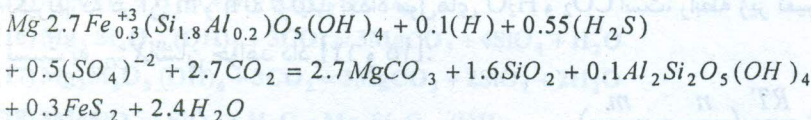
تقسیم‌بندی بر اساس ماهیت سنگ اولیه [۸].			تقسیم‌بندی بر اساس حضور یا فقدان پتاسیم [۱۷].	تقسیم‌بندی بر اساس نوع فیلوسیلیکات‌های تولید شده [۵].	تقسیم‌بندی بر اساس مقدار کانی‌های سیلیسی-کربناتی [۱۸].
پارالیستونیت‌ها	رسوبی‌های لیستونیتی شده (ماسه لیستونیت‌های سنگ، سیلتستون و کنگلومرای لیستونیتی شده)	اپی لیستونیت‌ها دگرگونی‌های لیستونیتی شده (اسلیت و فلیت‌های لیستونیتی شده)	لیستونیت‌های آلوماتورفیک حاوی پتاسیم (لیستونیت واقعی) [۲۰ و ۱۹]. اولترامافیک و مافیک‌های لیستونیتی شده حدواسط‌های لیستونیتی شده	لیستونیت اولترامافیک‌های لیستونیتی شده حاوی میکای کروم دار برسیت-لیستونیت مافیک‌های لیستونیتی شده برسیت حدواسط‌های لیستونیتی شده	سیلیسی کربناتی سیلیسی-کربناتی

واکنش‌های لیستونیت‌زائی و شرایط انجام آن

واکنش‌های لیستونیت‌زائی، دربرگیرنده جانشینی کانی‌های سیلیکاته سنگ‌های اولترامافیک، از قبیل سرپانتین و در موارد نادرتری، جانشینی مستقیم اولیوین و پیروکسن به وسیله کربنات‌هاست. برای تشکیل کربنات‌ها، کاتیون‌های Fe و Mg به وسیله کانی‌های سیلیکاته فراهم می‌شود. مقدار Ca در کربنات، به فراوانی نسبی سیلیکات کلسیم‌دار اولیه و نفوذ کلسیم به درون گرماب بستگی دارد. به عنوان محصول دگرسانی سیلیکات‌ها و تثبیت Fe-Mg - Ca در کربنات، سیلیس برای تشکیل کوارتز به صورت زیر به کار می‌رود:



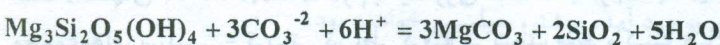
آب سیلیس کربنات آهن و منیزیم سرپانتین چنانچه گرمایی که حالت احیا دارد، حاوی سولفوری به صورت مجموعه‌های HS^- باشد، پیریت و سولفیدهای دیگر از قبیل گرسدورفیت، میلریت، و پنتلاندیت نیز ممکن است تشکیل شوند [۱۰]:



بنابر نظر [۱۱] تشکیل لیستونیت واقعی (فوشسیت لیستونیت) ارتباط نزدیکی با تشکیل سولفیدهای ریزدانه در سنگ‌های دگرسان دارد و لذا این مرحله از دگرسانی می‌تواند با کانی‌سازی طلا همراه باشد [۱۱]. آب‌هایی که باعث سرپانتینی شدن سنگ‌های اولترابازیک می‌شوند قلیایی بوده و دارای PH حدود ۱۰ تا ۱۲ و منیزیم بسیار کم و در حدود ۱ppm هستند. اگر میزان X_{CO_2} بیش از ۵ درصد مولی باشد لیزاردیت و کریزوتیل پایدار نخواهد بود ولی آنتی گوریت در شاره‌هایی با $X_{CO_2} = 20\%$ درصد مولی هنوز پایدار است. با این توضیحات، واضح است شاره‌هایی که باعث سرپانتینی شدن می‌شوند ضرورتاً از CO_2 فقیرند [۱۲].

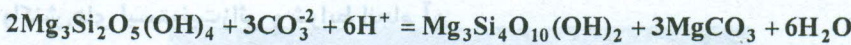
چنانچه X_{CO_2} در شاره افزایش یابد (مثلاً در اثر واکنش‌های شاره‌زایی) علاوه بر آن که مانع سرپانتینی شدن می‌شود، باعث ناپایداری سرپانتین شده و در این شرایط لیستونیت تشکیل می‌شود [۱۰].

بنا بر عقیده سازانوف [۱۳] با کاهش PH و افزایش X_{CO_2} سرپانتین ناپایدار شده و بر اثر واکنش زیر دگرسان می‌شود [۱۳]:



آب سیلیس منیزیت سرپانتین

در صورتی که مقدار کاتیون منیزیم برابر 3^{-10} باشد واکنش زیر انجام خواهد گرفت.



سرپانتین

تالک

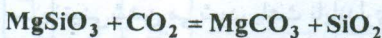
منیزیت

آب

با کاهش شدید PH، سرپانتین و تالک هر دو می‌توانند تجزیه شده و سیلیس آزاد نمایند. از آنجا که در ساختار بلوری سرپانتین، جایی برای کلسیم وجود ندارد، لذا آزاد شدن یون Ca^{+2} مربوط به پیروکسن‌های سنگ‌های اولترابازیک طی سرپانتینی شدن، باعث ابر اشباع غلظت آن در گرمابها خواهد شد. در این شرایط، چنانچه X_{CO_2} کم و سنگ‌های بازیک (مثل بازالت و دیاباز) حضور داشته باشند، کانی‌های غنی از کلسیم و در نتیجه سنگ رودینگیت تشکیل خواهد شد. ولی در صورت افزایش X_{CO_2} ، به جای رودینگیت، لیستونیت (مجموعه سیلیسی-کربناتی)، در سنگ‌های بازیک به وجود خواهد آمد [۱۳]. از نظر ترمودینامیکی براساس تغییرات دما در مقابل X_{CO_2} (در فشار ثابت)، واکنش‌های دربرگیرنده CO_2 و H_2O به پنج گروه تقسیم می‌شوند. اگر رابطه کلی $A = B + m\text{H}_2\text{O} + n\text{CO}_2$ را برای واکنش‌های شاره‌زا در نظر بگیریم که در آن m و n به ترتیب تعداد مول‌های H_2O و CO_2 است، رابطه زیر تغییرات دما را نسبت به X_{CO_2} نشان خواهد داد [۱۴ و ۱۵]:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x_{\text{CO}_2}}\right) = \frac{RT}{\Delta S_r} \left(\frac{n}{x_{\text{CO}_2}} - \frac{m}{x_{\text{H}_2\text{O}}}\right)$$

که در آن (R) ثابت گازها، (T) دما، (ΔS_r) آنتروپی واکنش (X_{CO_2}) مول جزیی CO_2 و ($X_{\text{H}_2\text{O}}$) مول جزیی H_2O است. در واکنش‌های لیستونیت‌زائی که واکنش‌هایی کربن‌گیر-آب‌زا هستند ($m > 0$ و $n < 0$)، رابطه $A + n\text{CO}_2 = B + m\text{H}_2\text{O}$ برقرار است. لذا، منحنی دارای شیب منفی، ولی کمتر از واکنش‌های آب‌زای ساده است (شکل ۱۳). این بدان معناست که با افزایش X_{CO_2} دمای لازم برای انجام واکنش کاهش می‌یابد. امکان دارد واکنش‌های لیستونیت-زائی، فقط کربن‌گیر باشد، بدون اینکه آب آزاد نماید. به عنوان مثال می‌توان تبدیل مستقیم ارتوپیروکسن به منیزیت و سیلیس را نام برد.



انستاتیت

سیلیس منیزیت

سازانوف [۱۳]، تمامی این تغییرات و واکنش‌ها را به صورت نمودارهای ترمودینامیکی ارائه کرده است (شکل‌های ۱۴ تا ۱۹) [۱۳]. لازم به یادآوری است که با توجه به این که لیستونیت‌ها، مجموعه‌های سیلیسی-کربناتی در نظر گرفته می‌شوند، فقط واکنش‌های ۱ و ۲ و ۱۳ و ۱۶ و ۱۷، مرحله نهایی لیستونیت‌زائی را نشان می‌دهند و واکنش‌های دیگر در برگیرنده تالک و سرپانتین و... نشان دهنده مراحل آغازین این پدیده‌اند:

- (1) $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 3\text{CO}_3^{2-} + 6\text{H}^+ = 3\text{MgCO}_3 + 4\text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$
- (2) $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3\text{CO}_3^{2-} + 6\text{H}^+ = 3\text{MgCO}_3 + 2\text{SiO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$
- (3) $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 3\text{Mg}^{2+} + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+$
- (4) $2\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3\text{CO}_3^{2-} + 6\text{H}^+ = \text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 3\text{MgCO}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$
- (5) $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 6\text{H}^+ = 4\text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{Mg}^{+2}$
- (6) $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ = 2\text{SiO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} + 3\text{Mg}^{+2}$
- (7) $\text{MgCO}_3 = \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
- (8) $2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Mg}(\text{OH})_2$
- (9) $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{CO}_2 = \text{MgSiO}_3 + \text{MgCO}_3$
- (10) $4\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 5\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 5\text{MgCO}_3$
- (11) $2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{MgCO}_3$
- (12) $4\text{MgSiO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{MgCO}_3$
- (13) $\text{MgSiO}_3 + \text{CO}_2 = \text{MgCO}_3 + \text{SiO}_2$
- (14) $2\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3\text{CO}_2 = \text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 3\text{MgCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$
- (15) $\text{MgCO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2$
- (16) $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 3\text{CO}_2 = 3\text{MgCO}_3 + 4\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- (17) $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3\text{CO}_2 = 3\text{MgCO}_3 + 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- (18) $3\text{MgSiO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

(شکل ۱۴) نشان می‌دهد که

- الف) با افزایش تدریجی فوگاسیته CO_2 ، سرپانتین، نخست به تالک + منیزیت (واکنش ۴) و سپس تالک، به منیزیت + سیلیس تبدیل می‌شود (واکنش ۱). در حالیکه با افزایش سریع فوگاسیته CO_2 ، سرپانتین، مستقیم به منیزیت + سیلیس تبدیل خواهد شد (واکنش ۲).
- ب) با کاهش تدریجی PH، سرپانتین نخست به تالک (واکنش ۳) و سپس کانی اخیر به مجموعه سیلیس $\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}^{2+}$ تبدیل خواهد شد (واکنش ۵). در حالیکه با کاهش سریع PH، سرپانتین، مستقیم به این مجموعه تبدیل می‌شود (واکنش ۶).
- پ) با کاهش فوگاسیته CO_2 و کاهش PH، منیزیت به Mg^{+2} و CO_3^{2-} دگرسان خواهد شد (واکنش ۷).

ت) چنانچه PH، اسیدی تا خنثی و فوگاسیته CO_2 بالا باشد. لیستونیت‌های سیلیسی - کربناتی ($\text{SiO}_2 + \text{MgCO}_3$)، تشکیل خواهد شد. در حالیکه اگر فوگاسیته CO_2 پائین و محیط اسیدی باشد، لیستونیت‌های بوجود آمده بیشتر، سیلیسی خواهند بود.

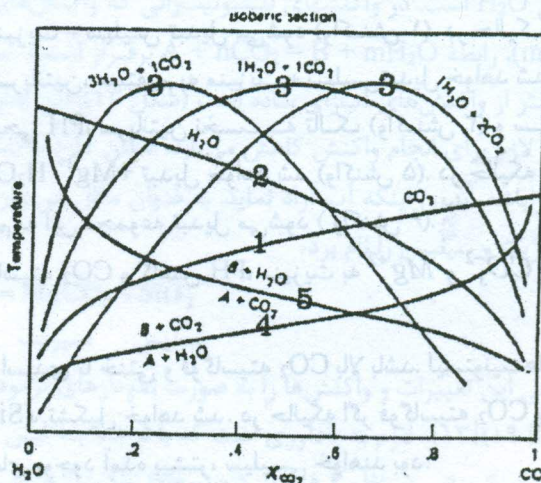
(شکل ۱۵) نشان می‌دهد:

- ۱- با افزایش دما، PH کمتر و فوگاسیته CO_2 بیشتری برای انجام واکنشها لازم است.

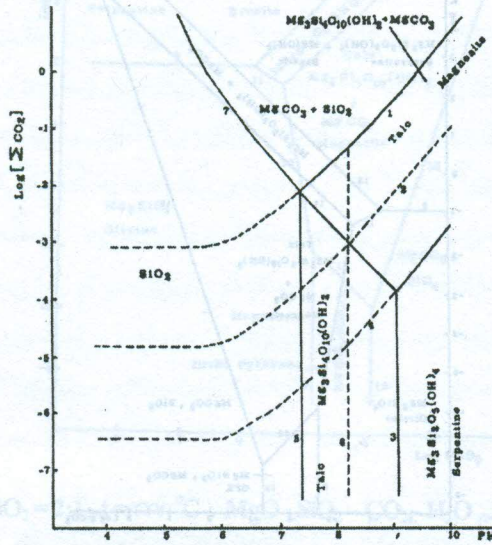
۲- با افزایش دما گستره پایداری سرپانتین، تالک + منیزیت + SiO_2 افزایش خواهد یافت.

۳- با افزایش دما، دامنه تغییرات PH برای میدان پایداری تالک کاهش و دامنه تغییرات CO_2 برای آن افزایش می‌یابد.

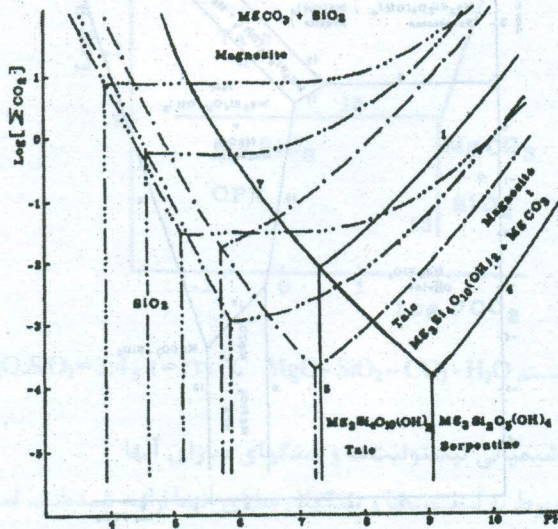
از مقایسه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ درمی‌یابیم که در صورت ثابت بودن نسبت $\text{MgO}:\text{SiO}_2$ ، با افزایش دما، واکنش‌ها در فشارهای CO_2 و H_2O کمتری صورت می‌گیرد و در نتیجه میدان پایداری الیوین و ارتوپروکسن کم و گستره کانی‌های حاصل از دگرسانی آنها فزونی خواهد یافت. هر دو شکل نشان می‌دهند که با افزایش $p_{\text{H}_2\text{O}}$ به تنهایی، الیوین به سرپانتینیت و بروسیت تبدیل خواهد شد (واکنش ۸) و با افزایش $p_{\text{H}_2\text{O}}$ به تنهایی، الیوین به ارتوپروکسن و منیزیت (واکنش ۹) و سپس با ادامه افزایش CO_2 این مجموعه به منیزیت و سیلیس تبدیل می‌شوند. اگر CO_2 و H_2O با هم اضافه شوند و برتری با CO_2 باشد، واکنش‌های ۱۰ و ۱۲ صورت می‌گیرد که محصول آنها تالک و منیزیت است، ولی چنانچه برتری با مقدار H_2O باشد، الیوین مستقیماً به سرپانتین و منیزیت تبدیل می‌شود (واکنش ۱۱). در هر حالت با افزایش P_{CO_2} محصول نهایی منیزیت و سیلیس خواهد بود (واکنش‌های ۱۳ و ۱۶). نهایت اینکه مقایسه شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان می‌دهد که در دما ثابت، با کاهش نسبت $\text{MgO}:\text{SiO}_2$ از مقدار ۲:۱ به ۳:۴ بجای واکنش ۱۲، واکنش ۱۸ صورت می‌گیرد؛ یعنی، منیزیت (MgCO_3) از دو گستره مربوطه حذف می‌شود.



شکل ۱۳ نمودار کلی از منحنی‌های T بر حسب X_{CO_2} نقل از [۱۵]، اقتباس از [۱۴].

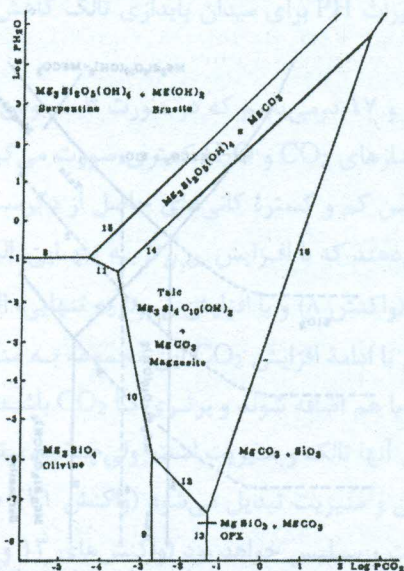


شکل ۱۴ سیستم $\text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ، در صورتیکه $[\text{Mg}^{+2}] = 10^{-3}$ باشد [۱۳]

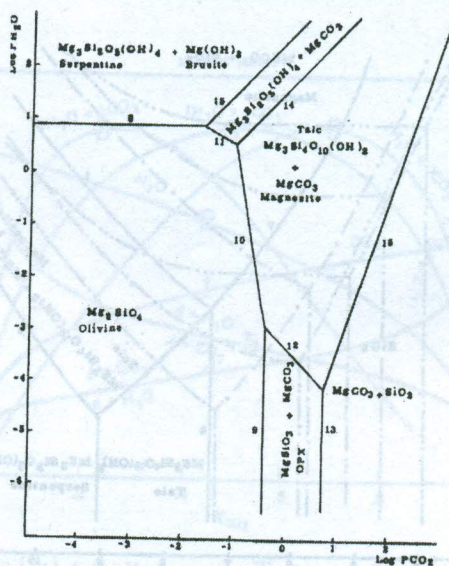


شکل ۱۵ سیستم $\text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ، در صورتیکه $[\text{Mg}^{+2}] = 10^{-3}$ و دما 25°C تا 300°C باشد

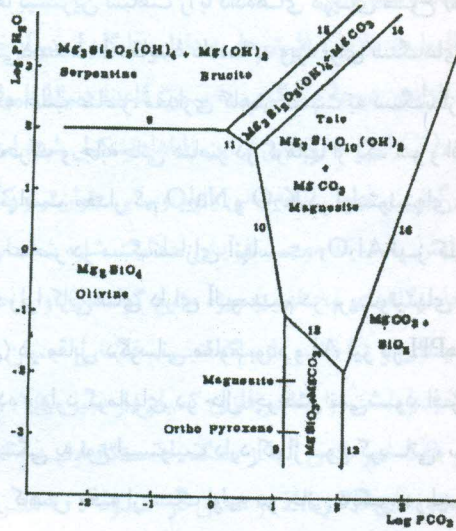
[۱۳]



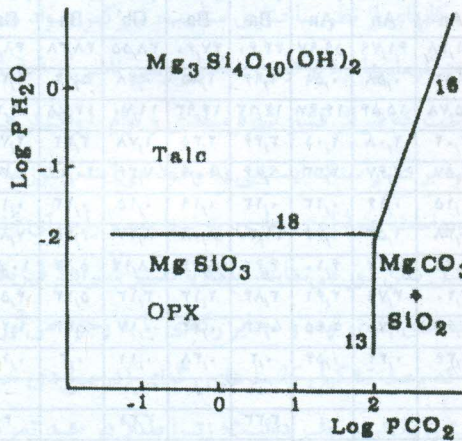
شکل ۱۶ سیستم $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ، $\text{MgO}:\text{SiO}_2=2:1$ ، $t=227^\circ\text{C}$.



شکل ۱۷ سیستم $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ، $\text{MgO}:\text{SiO}_2=2:1$ ، $t=177^\circ\text{C}$.



شکل ۱۸ سیستم $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ، $t=327^\circ\text{C}$ ، $\text{MgO}:\text{SiO}_2=2:1$



شکل ۱۹ سیستم $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ، $t=327^\circ\text{C}$ ، $\text{MgO}:\text{SiO}_2=3:4$

مقایسه داده‌های ژئوشیمیایی لیستونیت‌ها و سنگهای سازای آنها

در جدول ۲ داده‌های مربوط به لیستونیت‌ها و سنگهای سازای آنها ارائه شده‌اند. سنگهای بازیک و اولترابازیک منطقه که متعلق به افیولیت ملانژ آن منطقه هستند روند تولییتی را نشان می‌دهند. از این میان، بازالتها به گروه بازالت‌های رشته‌های میان اقیانوسی تا حدودی غنی شده (E-MORB)

شباهت دارند. پریدوتیت‌ها بیشترین شباهت را با داده‌های دریای سرخ (مرحله پیش از اقیانوس زائی) و MORB نشان می‌دهند [۱]. مقایسه داده‌ها به ویژه برای سنگ‌های اولترابازیک لیستونیتی شده، حاکی از آن است که اغلب عناصر، مقداری کاهش نسبت به سنگ‌سازی خود نشان می‌دهند. دلیل اصلی این کاهش، تحرک و جابه‌جایی عناصر در گرمابه‌ها از یک سو و افزایش مقادیر L.O.I از قبیل CO_2 و H_2O در آنهاست. مقدار کم Na_2O و K_2O در لیستونیت‌های ناشی از اولترابازیک‌ها به دلیل کم بودن مقدار این عناصر در سنگ‌سازی آنهاست. Al_2O_3 نیز کاهش خیلی شدیدی در لیستونیت نشان می‌دهد؛ زیرا کانی‌های دارای آلومینیم در پریدوتیت‌های سرپانتینی شده (کروم اسپینل و کلینوپیروکسن) در مقابل دگرسانی مقاوم بوده و Al نیز در PHهای ۵ تا ۸ عنصری کاملاً نامتحرک و نامحلول بوده و وارد گرمابه‌ای در حال چرخش نمی‌شود. افزایش و یا کاهش SiO_2 ، CaO ، FeO و MgO بستگی به نوع لیستونیت دارد که از نوع کربناتی، سیلیسی و یا سیلیسی-کربناتی باشد، زیرا عناصر کاهش یافته از سنگ اولیه در جایی دیگر، در لیستونیت قابل پی‌گیری است [۱].

جدول ۲ تجزیه‌های شیمیایی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه.

نمونه اکسید	y 263 Ub	y373 Ub-list	y 64 An	y160 An	y165 An	y346 Ba	y362 Ba	y377 Gb'	y 339 Ba	y 323 Ba	y 307 Ba	y 297 An-list	y 166 An
SiO_2	۴۴٫۸۲	۳۳٫۰۹	۶۱٫۴۸	۶۱٫۷۹	۵۹٫۹۷	۴۴٫۶۰	۴۷٫۶۰	۳۸٫۵۵	۴۸٫۳۸	۴۸٫۹	۴۶٫۲۸	۵۷٫۱۷	۵۸٫۱۷
TiO_2	۰٫۱۷	-	۰٫۵۲	۰٫۵۸	۰٫۵۱	۱٫۹۶	۱٫۸۵	۰٫۲۸	۱٫۹۲	۱٫۲۳	۱٫۶۴	۰٫۷۱	۰٫۵۷
Al_2O_3	۳٫۴۴	۰٫۱۶	۱۵٫۷۸	۱۵٫۵۴	۱۶٫۶۷	۱۲٫۹۳	۱۴٫۹۳	۱۱٫۷۰	۱۴٫۷۸	۱۲٫۲۳	۱۲٫۵۶	۱۷٫۳۰	۱۷٫۱۰
Fe_2O_3	۱٫۶۷	۱٫۵	۲٫۰۲	۲٫۰۸	۲٫۰۱	۳٫۴۶	۲٫۳۵	۱٫۷۸	۳٫۲۲	۲٫۷۸	۳٫۱۴	۲٫۲۱	۳٫۶۸
FeO	۶٫۹	۴٫۴۴	۲٫۵۷	۲٫۶۷	۲٫۳۳	۹٫۶۶	۱۰٫۹	۷٫۳۶	۱۰٫۰۷	۶٫۳۷	۷٫۵	۱٫۸۹	۱٫۶۹
MnO	۰٫۲۰	۰٫۱۲	۰٫۱۵	۰٫۱۶	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۹	۰٫۱۵	۰٫۲۳	۰٫۱۸	۰٫۱۳	۰٫۰۷	۰٫۱۴
MgO	۲۶٫۶۳	۲۷٫۸۵	۲٫۳۸	۱٫۵۳	۱٫۴۴	۱۱٫۲۰	۸٫۰۸	۸٫۲۷	۶٫۱۵	۷٫۸۳	۷٫۳۴	۲٫۱۱	۲٫۰۹
CaO	۵٫۳۸	۲٫۷۶	۵٫۷۵	۵٫۹۷	۶٫۱۰	۴٫۶۲	۸٫۴۲	۱۸٫۱۴	۵٫۸۴	۱۰٫۵۹	۸٫۰۴	۵٫۳۰	۵٫۹۲
Na_2O	۰٫۳۸	۰٫۲۵	۳٫۲۰	۳٫۷۹	۳٫۶۱	۳٫۸۴	۲٫۱۳	۳٫۱۳	۵٫۱۳	۴٫۵۰	۶٫۱۵	۰٫۴۷	۳٫۲۴
K_2O	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۲٫۶۰	۲٫۷۵	۲٫۶۵	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۱۷	۰٫۳۴	۰٫۲۳	۰٫۱۰	۳٫۲۴	۲٫۶۲
P_2O_5	۰٫۰۶	۰٫۱۰	۰٫۳۶	۰٫۴۲	۰٫۵۴	۰٫۲	۰٫۳۸	۰٫۱۱	۰٫۳	۰٫۱۵	۰٫۲۲	۰٫۲۱	۰٫۲۹
Cr_2O_3	۰٫۳۳	۰٫۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO_2	-	۲۹٫۴۲	-	-	-	۳٫۳۳	-	۳٫۳۱	-	۴	۶٫۶۷	-	-
H_2O	۹٫۸۷	-	۲٫۷۹	۲٫۰۴	۳٫۴۱	۳٫۳۲	۳٫۳۷	۶٫۶۱	۳٫۲۲	۱٫۴۶	-	۹٫۱۹	۳٫۶
Rb	<۱۰	-	۶۴	۷۷	۸۰	-	-	<۲۰	۲۴	<۱۰	<۲۰	۱۴۸	۷۲
Sr	<۲۰	۱۸۰	۷۲۱	۸۰۰	۷۴۶	۱۱۸	۱۱۹	۱۴۵	۱۱۸	۲۸۱	۱۸۹	۱۵۸۲	۸۴۹
Nb	-	-	۱۰	۱۹	-	۱۹	-	-	-	<۱۰	-	۲۱	-
Zr	-	<۳۰	۱۴۵	۱۵۸	۱۸۰	۱۱۷	۱۰۶	<۳۰	۱۰۰	۷۱	۱۰۰	۳۰۲	۱۴۴
Y	<۲۰	<۲۰	<۲۰	۱۰	۱۲	۲۴	۳۰	۱۶	۲۹	۳۶	۲۹	۳۶	۱۱

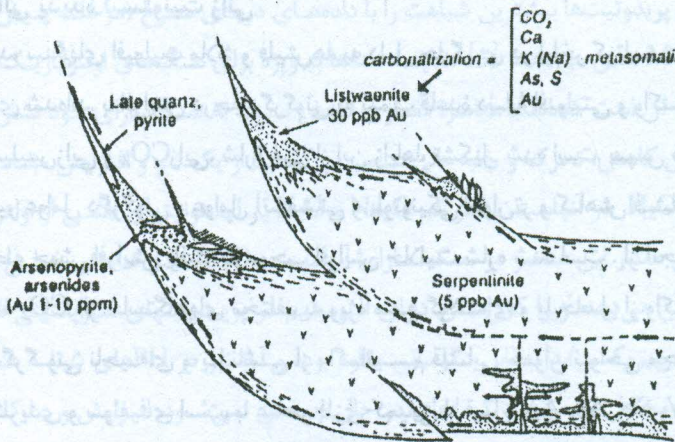
Ub= اولترابازیک، Ub-list= اولترابازیک لیستونیتی شده، An= آندزیت، Ba= بازالت، An-list= آندزیت لیستونیتی

شده، Gb = گابرو.

مدل‌های احتمالی پدیده لیستونیت زائی

چنانکه اشاره شد، سنگ‌های افیولیت ملانژ و فلیش‌ها، به دلیل جایگیری در اواخر کرتاسه دستخوش دگرگونی ناحیه‌ای شده‌اند. با افزایش درجه دگرگونی به سمت قاعده دنباله افیولیتی و واکنش‌های پی در پی آبزایی، سیلیس‌زایی و CO_2 زایی، شاره غنی از این زایاها، تشکیل شده است. سپس دمای این آبگون، تحت تاثیر عوامل دگرگونی و عوامل آتشفشانی و پلوتونیکی جوان‌تر و کاهش فشار ناشی از صعود، تا حد نقطه جوش افزایش یافت که موجب افزایش حلالیت شاره شده است. از آنجا که این شاره، دربرگیرنده CO_2 (از خاستگاه‌های مختلف به ویژه منبع گوشته‌ای و یا حاصل از واکنش‌های پیشرونده در دگرگونی ناحیه‌ای و یا ناشی از ماگماتیسم قلیایی جوان نواحی مجاور) و یا کمپلکس‌های کلریدی و سولفیدی است، با عناصر فلزی کمیابی از قبیل Ni, Cr, W, Sb, As, Ag, Au تشکیل کمپلکس داده و باعث دور شدن آنها از سنگ خاستگاه اولیه و انتقال آنها به سمت سطح می‌شود؛ در حالیکه سولفورهای Pb و Zn در عمق در حدود ۲۰۰ متر ته نشین می‌شود. هنگام ورود آبگونها‌های اسیدی حاوی طلا به محیط قلیایی و احیای سنگ‌های کربناتی، سیلیس - پیریت - آرسنیدها و طلا ته نشین خواهد شد. با تشکیل گرمابیها و جابه‌جائی آنها در اثر پدیده‌های دگرگونی، امکان دارد که در مکان‌های از نظر ساختاری مناسب، تمرکز مواد معدنی صورت پذیرد. مناسبترین مسیرها برای صعود گرمابیها - دگرگونی، مناطق برشی ناشی از فعالیتهای زمین‌ساختی و یا شکستگیهای هیدرولیکی است که در اثر فشار شاره منفذی و توام با واکنش‌های آزاد شدن مواد فرار و به دلیل غلبه فشار شاره بر فشار سنگ ایستایی به وجود می‌آیند. مرز واحدهای سنگی نیز مکان مناسبی برای عبور آبگونهاست. همه این مجاری، نه تنها مسیر را برای انتقال شاره‌ها فراهم کرده و آنها را از محیط تشکیل شان دور می‌نمایند، بلکه با تغییر شرایط فیزیکوشیمیائی، محیط مناسبی برای نهشته شدن کانه‌های فلزی بوده و ذخایر رگه‌ای را به وجود می‌آورند.

علاوه بر واکنش‌های آبزا که باعث تشکیل کانسارهای رگه‌ای (در مواردی حاوی طلا) می‌شوند، نقش فرایند گرمابی آب دریا را باید در نظر داشت؛ زیرا طلا در حد تمرکزهای اقتصادی در افیولیت‌هائی دیده می‌شود که بیشتر با سرپانتینیت‌های به شدت دگرسان شده، سیلیسی و کربناتی شده در ارتباط است. این کانسارها که توسط زمین‌شناسان روسی، لیستونیت نامیده می‌شوند، معمولاً در کناره‌های مرز گسله بلوک‌های سنگ‌های اولترامافیک افیولیتی تشکیل می‌شوند [۱۶]. عدسی‌های لیستونیتی در برخوردگاهها زمین‌ساختی ظاهر شده و به طور جانبی با یک منطقه تالک - کربنات، به سنگ‌های اولترامافیک سرپانتینی شده تغییر می‌یابند (شکل ۲۰) [۱۶].



شکل ۲۰. غنی‌شدگی پیش‌رونده طلا به عنوان تابعی از دگرسانی توده‌های سرپانتینیته شده [۱۶].

برداشت

۱- سنگ‌های منطقه، به ویژه سنگ‌های اولترابازیک، تحت تأثیر گرمایی‌های ناشی از شارهای آزاد شده طی واکنش‌های متعدد دگرگونی، آبهای اقیانوسی و آبهای به دام افتاده و نیز گرمایی‌های با خاستگاه گوشته‌ای یا موتورهای گرمایی ماگماتیک کم‌قلیایی مناطق همجوار و در شرایط مناسبی از PH ، Eh ، X_{CO_2} ، T و P به مجموعه‌های سیلیسی-کربناتی (لیستونیتی) تبدیل شده‌اند.

۲- لیستونیت‌زائی معمولاً در مکان‌هایی رخ داده که محل مناسبی برای انتقال آب‌گونها باشد. لذا از مهمترین کنترلهای ساختاری بایستی زون‌های گسلی، شکستگی‌ها، مناطق برشی، مرز واحدها، و یا سطوح لایه‌بندی و شیستوزیته را نام برد که روند خطی رگه‌های لیستونیت بیانگر آن است.

۳- در شرایط X_{CO_2} پائین، سنگ‌های اولترابازیک به سرپانتینیته و سنگ‌های بازیک همجوار با اولترابازیک‌ها به رودینگیت تبدیل شده‌اند.

۴- براساس ماهیت سنگ‌های اولیه، لیستونیت‌های منطقه در سه گروه، ارتولیستونیت‌ها (اولترامافیک‌ها، مافیک‌ها و حد واسط‌های لیستونیتی شده)، پارالیستونیت (ماسه سنگ، سیلتستون و کنگلومرای لیستونیتی شده) و اپی‌لیستونیت (اسلیت‌ها و فیلیت‌های لیستونیتی شده) قرار می‌گیرند. همچنین براساس مقدار کانی‌های سیلیسی-کربناتی، لیستونیت‌های منطقه، بیشتر در گروه سیلیسی-کربناتی و به ندرت در گروه‌های کربناتی و یا سیلیسی جای می‌گیرند.

۵- شواهد میکروسکوپی نشان می‌دهند که واکنشهای لیستونیت‌زائی شامل واکنشهای پیش درآمد و واکنشهای اصلی است. واکنشهای پیش درآمد، طی دگرگونی ناحیه‌ای رخ داده و طی آن سنگهای اولترابازیک به سرپانتینیت شست تبدیل شده‌اند. این واکنشها در X_{CO_2} کم و یا صفر انجام گرفته‌اند. واکنشهای اصلی در X_{CO_2} زیاد و در دو نوبت صورت پذیرفت. طی این واکنش‌ها، مجموعه کانی‌های سیلیکاته سنگ، در راستای سطوح برگوارگی به مجموعه سیلیسی - کربناتی (لیستونیت) تبدیل شده‌اند.

۶- حضور سولفورهای آهن، نیکل و نیکل - کبالت - آهن می‌تواند احتمال وجود عناصر طلا، نقره، جیوه، آرسنیک، آنتی موان و ... را در لیستونیت‌های منطقه افزایش دهد.

۷- CO_2 با خاستگاه گوشته‌ای، به تنهایی و یا تداخل آن با مواد پوسته‌ای و یا آب دریا، CO_2 آزاد شده و طی دگرگونی ناحیه‌ای پیشرونده و نیز CO_2 ناشی از ماگماتیسیم قلیایی نشوون - کواترن مناطق همجوار (بازالت‌های سربیشه) را شاید بتوان به عنوان تامین کننده‌های اصلی CO_2 در نظر گرفت [۴].

مراجع

[۱] یوسف‌زاده محمدحسین، "پترولوژی پدیده‌های لیستونیتی شدن در مجموعه‌های آذرین و رسوبی شرق خوسف (جنوب غربی بیرجند)"، دانشگاه اصفهان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۲۹۱ صفحه. (۱۳۷۵).

[۲] زرین‌کوب محمدحسین، "بررسی مواد معدنی با تأکید بر واکنشهای آب‌زا و پدیده لیستونیتی شدن در منطقه سهل آباد - بیرجند"، دانشگاه کرمان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۳۰۴ صفحه. (۱۳۷۲).

[3] Ivan P., "Hydrothermally- metasomatic alterations of ultramafic rocks", In: Ivan P., Jaros, J., kratochvil, M., Reichwalder, P., Rojko, I., Spisiak, J., Turanova, L. Ultramafic rocks of the western Carpathians, Czechoslovakia. Geologicky Ustav Dionyza Stura, Bratislava, pp 171-181. (1985)

[4] Halls c., zhao R., Shine C., Cooper C., Harrington K., "listvernites and related rocks associated with gold mineralization in Co. mayo", Ireland. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland Winter Conference, Cardiff, December 16-18, 199. Industrial and Environmental Mineralogy, Programme and Abstracts, 25p(1991).

[5] Spiridonov E.M., "Listvenites and zodites", International Geology Review (334): 397 - 407. (1991)

[6] Ohanian T., Tatvosian Sh., "Geological map of Birjand sheet No. 7855", Scale 1:100000, Geological survey of Iran. (1978) (Final revision Eftekharneshad, 1986)

- [7] Vahdati F., Kholghi M.H., "Geological map of khusf", sheet No. 7755, Scale 1: 100000, Geological survey of Iran. (1989)
- [8] Kashkai M.A., Allakhverdiev Sh.I., "Listvenites, their origin and classification.", (Listventy, ikh genezis klaaifikatssia: Akad. Nauk Azerbaidzhanskoi SSR), Institut Geologii, im, akad, I.M. Gubkina; Izdat . Akad. Nauk Azerbaidzhanskoi SSR, Baku, 142P. (1965)
- [9] Halls C., Zhao R., "listvernites and related rocks: Perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at cregganbaun", CO. Mayo, Republic of Ireland. Mineral Deposita, 303-313
- [10] Henderson F.B., "Hydrothermal alteration and ore deposition in serpentinite- type mercury deposits", Econ . Geol. 64: 489-499. (1969)
- [11] Zhao R., "Paragenetic and geochemical evolution of the Cregganbaun gold prospect", Co. Mayo, Republic of Ireland. PhD thesis, University of London, 327p. (1994).
- [۱۲] هوشمندزاده عبدالرحیم، "پتروژنرسنگ‌های دگرگونه (ترجمه)"، انتشارات دانشگاه شیراز، ۴۰۸ صفحه. (۱۳۷۱)
- [13] Sazanov V.N., "Listvenitization and mineralization.", (Listveniti zaciya i orudneniye.) Izdatelistvo Nauka Moskva(Science publisher, Moscow), 171p.(1975).
- [14] Gerenwood H.J., "Mineral Equilibria in the system Mgo- SiO₂ – H₂O-CO₂. In Abelson", P.H., ED., Researches in Geochemistry, V.2, John Wiley & Sons, New york, P.542- 567. 1967.
- [15] Philpotts A.R., "principles of igneous and metamorphic petrology. Prentice Hall", Englewood Cliffs. New Jersey. 498 Pages. 1991,
- [16] Buisson G., Leblance M., "Gold in carbonatized ultramafic rocks from ophiolite complexes", Econ. Geol. 80: 2026 – 2029. (1985b)
- [17] Ploshkko V.V., "listvenitization and carbonatization at terminal stages of Urushten igneous complex", North Caucasus. Internat. Geol. Rev. 7(3) 446- 463. (1963)
- [18] Aydal D., "Gold bearing listwaenites in the Irac massif", Kastamonu, Turkey, Vol, 2, No.1, PP.43-51. 1990
- [19] Rose G., "Mineralogisch- geognostische Reise nach dem Ural", dem Altai und dem kaspischen Meere. Volume 1: Reise nach dem nordlichen ural und dem Altai. Berlin, C.W. Eichhoff (Verlage der sanderschen Buchhandiung) , XXX puls 641p. and plates I-VII. (1837).
- [20] 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, Uebericht der Mineralien und Gebirgsarten des Ural. Berlin, G.E.Reimer (Verlage der sanderschen Buchhandlung) , XV puls 606P. and plates I-V. (1842).