



کانی‌شناسی و ژئوشیمی اسپینل‌ها در هارزبورژیت‌ها، سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌های جنوب افیولیت ناین

حمید کریمزاده*

۱- دانشجوی دکتری پترولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

* عهده‌دار مکاتبات: HamidKarimzadeh73@yahoo.com

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۵/۱۲، پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۷/۴

چکیده

سنگ‌های پریدوتیتی موجود در ملائز افیولیتی ناین نزدیک به ۷۰ درصد از حجم آن را تشکیل می‌دهند. این سنگ‌ها پریدوتیت‌های گوشته‌ای مربوط به یک سنگ اقیانوسی هستند که در کرتاسه پسین تا اوایل ترشیری جایگیری شده است. مجموعه‌های افیولیتی در بخش گوشته‌ای خود شامل هارزبورژیت، دونیت، لرزولیت، ورلیت و پیروکسنیت است. هارزبورژیت‌ها نسبت به بقیه حجم بسیار بالایی دارند. هارزبورژیت‌های سرپانتینیتی‌شده، در محیط‌های با pH و Eh مناسب به لیستونیت تبدیل می‌شوند. هارزبورژیت‌ها، سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌ها دارای کانی‌های اسپینل هستند. اسپینل‌ها مهم‌ترین کانی از نظر تغییرات ترکیبی در سنگ‌ها هستند. همین‌طور کانی‌های گروه اسپینل، کاربردهای فراوانی در صنعت دارند. از عناصر Cr و Al این کانی‌ها به‌عنوان نشانگر در تعیین منشأ واحدهای سنگی مختلف استفاده می‌شود. ترکیب اسپینل‌های کروم‌دار متبلور شده در محیط‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. در حقیقت محیط تبلور و دگرسانی‌ها، مهم‌ترین عامل مؤثر بر ترکیب اسپینل‌های کروم‌دار است. تغییرات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی اسپینل‌ها در طی فرایند سرپانتینیتی‌شدن و به‌دنبال آن لیستونیتی‌شدن نشان می‌دهند که از اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها به سمت اسپینل‌های موجود در لیستونیت‌های سیلیسی میزان Cr_2O_3 ، Cr#، TiO_2 ، Fe^{3+} افزایش و میزان MgO، Mg# و Al_2O_3 کاهش یافته است. که این خود نشان‌دهنده تشکیل اسپینل‌ها در شرایط متفاوت فشار و دماست.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی، ژئوشیمی، اسپینل، لیستونیت، افیولیت ناین

۱- مقدمه

Bullen, 1984; Dick & Fisher, 1984; Dick, 1989; Deer et al., 1991; Maurel & Maurel, 1983

در بلورهای مختلف اسپینل، دو نوع ساختار را بر حسب توزیع کاتیون‌های موجود در موقعیت‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی می‌توان تشخیص داد که عبارتند از: اول اسپینل‌هایی که ساختار عادی دارند. در آنها کاتیون‌های دوظرفیتی تمام موقعیت‌های چهاروجهی را اشغال کرده‌اند. دوم اسپینل‌های وارونه که در آنها کاتیون‌های دوظرفیتی بخشی از موقعیت‌های هشت‌وجهی را اشغال و کاتیون‌های سه‌ظرفیتی که همه آنها در موقعیت چهاروجهی قرار می‌گیرند (Rumble, 1981).

۲- زمین‌شناسی منطقه

آمیزه افیولیتی ناین بخشی از مجموعه افیولیتی خردقاره ایران مرکزی است که در باختر این زون قرار دارد. توالی افیولیتی یادشده بین طول جغرافیایی ۰۰° تا ۵۳° ، $۱۰'$ تا ۵۳° شرقی و عرض جغرافیایی $۷۰'$ تا ۳۲° شمالی واقع است (شکل ۱). دنباله سنگ‌شناختی این مجموعه افیولیتی در بخش گوشته‌ای خود شامل هارزبورژیت، دونیت، لرزولیت، ورلیت و پیروکسنیت است. هارزبورژیت‌ها نسبت به بقیه، حجم بسیار بالایی دارند و در حجم گسترده‌ای سرپانتینیتی شده‌اند. سنگ‌های اولترامافیک و مافیک انباشتی (کومولایی)، گابروی همسانگرد، پلاژیوگرانیت، دایک‌های صفحه‌ای، گدازه‌های بالشی، رادیولاریت و واحد آهک پلاژیک نیز بخش پوسته‌ای این دنباله را تشکیل داده‌اند. در افیولیت ناین لیستونیت‌ها در ده

مباحث مربوط به سرزمین‌های افیولیتی و از جمله بررسی کاربردی کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی اسپینل‌ها به دلیل اهمیت ژئودینامیکی، سنگ‌شناختی، ظرفیت‌های اقتصادی و کاربردهایی که در صنعت دارند مورد علاقه زمین‌شناسان است (Allan et al., 1988; Leblanc & Nicolas 1992; Roeder, 1994; Arai, 1994 & 2013; Barnes & Roeder, 2001; Matsukage & Kubo, 2003; Arai & Akizawa, 2014; Payot et al., 2014; Miura et al., 2014) دگرسانی لیستونیتی‌شدن در افیولیت‌ها نیز از این قاعده مستثنی نیست (نقره‌نیا و همکاران، ۱۳۷۶، کریمزاده، ۱۳۹۳). هدف از این پژوهش بررسی تغییرات کانی‌شناسی-ژئوشیمیایی اسپینل‌ها در طی فرایندهای سرپانتینیتی‌شدن هارزبورژیت‌ها و به‌دنبال آن لیستونیتی‌شدن سرپانتینیت‌هاست. اسپینل‌ها اکسیدهایی هستند که در سیستم کوبیک متبلور می‌شوند و چهاروجهی‌ها حاوی ۳۲ اکسیژن در برابر ۲۴ کاتیون هستند. فرمول ساختاری آنها به‌طور عمومی $T(M_2)O_4$ است که T نشان‌دهنده کاتیون‌های موجود در موقعیت چهاروجهی و M بیانگر کاتیون‌های واقع در موقعیت هشت‌وجهی است. بیش از ۹۸ درصد از کاتیون‌های موجود در ساختار اسپینل طبیعی را، Mg^{2+} ، Al^{4+} ، Cr^{4+} ، Fe^{2+} و Ti^{4+} تشکیل می‌دهند.

افزون بر این، برخی از عناصر فرعی دیگر مانند Zn^{2+} ، Mn^{2+} ، Ni^{2+} ، Co^{2+} ، Fe^{3+} و V^{3+} می‌توانند به این مجموعه اضافه شوند (Dick &

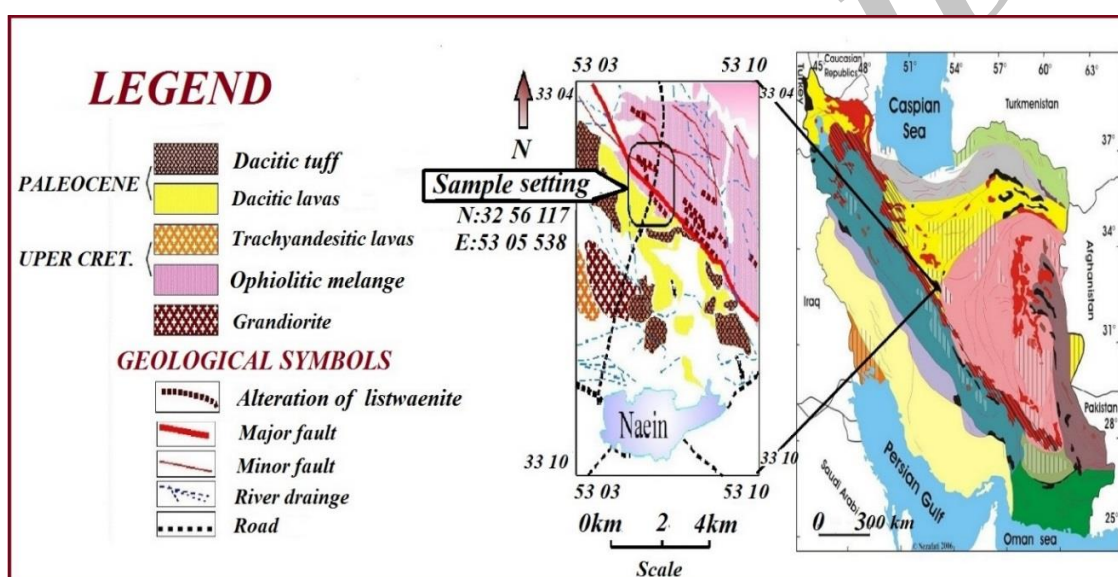
فشارهای کم به راحتی آمیزه‌های سرپانتینیتی را ایجاد می‌کنند. بنابراین آگیری دما پایین پریدوتیت‌های نسبتاً توده‌ای و ایجاد سرپانتینیت‌های ضعیف خردشده، تأثیر قوی بر زمین دماسنجی توالی افیولیتی در مناطق کوهزایی دارند. حضور سنگ‌های اولترامافیک دما پایین در طبیعت نشان می‌دهد که شرایط مساعد برای کربناتی شدن کانی‌ها در سطوح کم‌عمق پوسته وجود داشته است (Coleman, 1971). لیستونیت‌ها از نظر ساختار شبکه‌ای به وسیله گسل‌ها و شکستگی‌های قدیمی کنترل می‌شوند. که به عنوان مسیرهایی با تراوایی بالا برای نفوذ محلول‌های حاوی CO_2 به شمار می‌روند. گرادیان زمین گرمایی، گرمای ناشی از اصطکاک در پهنه‌های برشی و فعالیت‌های آذرین ترشیری شرایط مناسبی برای گرم شدن آب‌های نفوذی فراهم می‌آورد (کریمزاده، ۱۳۹۳).

کیلومتری شمال شهر ناین، جنوب و باختر روستای گل‌گنگو، جنوب روستای سپرآب و شمال روستای سهیل پاکوه بیشترین گستردگی را دارند. لیستونیت‌ها در برخی مناطق مانند جنوب سپرآب به دلیل به هم ریختگی زمین‌ساخت واحدها در مجاورت سنگ آهک‌های کرتاسه بالایی قرار گرفته‌اند. در منطقه مورد مطالعه نیز که در جنوب افیولیت ناین قرار دارد تحت تأثیر واکنش‌های گسترده، به طور بخشی یا کامل، به سرپانتینیت و سپس بر اثر هجوم سیالات، لیستونیتی شده‌اند (شکل ۲). سرپانتینیت‌ها در جنوب افیولیت ناین به دو صورت یافت شده‌اند:

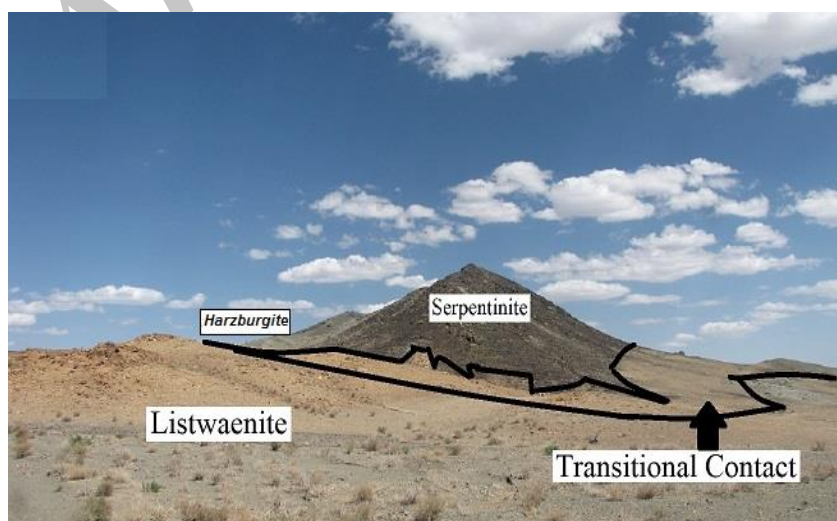
۱- سرپانتینیت توده‌ای به رنگ سیاه زیتونی (حجم گسترده)

۲- سرپانتینیت تکتونیزه و برشی به رنگ سبز

ماهیت سست سرپانتینیت تکتونیزه همراه با چگالی پایین آن نشان می‌دهد که حرکت‌های زمین‌ساختی توسط جریان‌های پلاستیکی در



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی افیولیت ناین در ایران و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب افیولیت ناین



شکل ۲- موقعیت صحرایی هارزبورژیت‌ها، سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌ها جنوب افیولیت ناین رو به شمال نشان داده شده است

۳- روش تحقیق

کوهزایی رخ می‌دهد (Mizukami et al., 2014). فقدان تأثیر دمای سرپانتینیت‌ها بر روی سنگ‌های دربرگیرنده و همراهی آنها با گسل‌های راندگی نشان‌دهنده جایگزینی زمین‌ساختی به صورت توده‌های جامد است. سرپانتین در مقاطع نازک ساختار شبکه‌ای واضحی دارد (ترابی، ۱۳۹۱). نبود رخ یا ناهمسانگرد بودن ساختار بلوری در الیون، تأثیر مهمی بر نحوه پیشرفت سرپانتینیت شدن دارد (Deer et al., 1991). سرپانتینیت شدن ارتوپروکسن کمتر از الیون است. در نتیجه ارتوپروکسن بافت مقاوم هوب‌نیل^۱ را بر روی سطوح هوازده هارزبورژیت تشکیل می‌دهد (Coleman, 1971). مجموعه کانی‌های سرپانتینیت‌ها شامل کریزوتیل، لیزاردیت، کروم اسپینل و مگنتیت هستند. در مقطع نازک به رنگ سبز رنگ پریده (به دلیل غنی بودن از آهن) و یا بی‌رنگ مشاهده می‌شوند. مگنتیت و برخی کانی‌های اکسید آهن نیز در اواخر سرپانتینیت شدن به دلیل آزاد شدن آهن تشکیل می‌شوند. در روند آزادسازی آهن، اسپینل‌ها نیز با جذب آهن از حاشیه تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. اسپینل‌های موجود در سرپانتینیت‌ها به رنگ سرخ تیره بوده و از نظر بلوری نیز حالت دندردیتی دارند (شکل ۳- C, D).

۴-۳- اسپینل در لیستونیت‌های کربناتی

این دسته از لیستونیت‌ها از نظر کانی‌شناختی از کانی‌های کربناتی تشکیل شده‌اند. در لیستونیت‌های کربناتی ناپین، افزون بر کلسیت و دولومیت، کانی‌های کربناتی دیگری مانند آنکرایت، فریت دولومیت، برونزیت، سیدریت و متیزیت نیز تشخیص داده شده است (سعیدی، ۱۳۸۶). در لیستونیت‌های کربناتی کانی‌های فرعی مانند اسپینل‌ها نیز وجود دارند که منشأ فرامافیکی این سنگ‌ها را تأیید می‌کنند. در دمای پایین‌تر از ۳۰۰°C کانی‌های سیلیکاتی به آراهی حل می‌شوند. هنگامی که کانی‌های کربناتی در سنگ‌های اولترامافیکی جانشین می‌شوند، تجزیه سیلیکات‌ها موجب تولید آهن، منیزیم، کلسیم و منگنز می‌شود و سنگ دیواره، کاتیون دوزرفیتی کلسیم آزاد می‌کند (Kerrich, 1989). مجموع این فرایندها موجب تشکیل کانی‌های کربناتی می‌شود. اما اسپینل‌ها نیز تحت تأثیر این فرایندها قرار می‌گیرند درصد حجمی این کانی‌ها نسبت به سرپانتینیت‌ها بسیار پایین آمده و از نظر اندازه بلوری نیز ریزتر و از نظر رنگ تیره‌تر شده‌اند. که در این حالت بهتر است از واژه فریت کرومیت استفاده شود (شکل ۳- E, F).

این مطالعه بر اساس بررسی‌های صحرایی و مشاهده رخنمون‌های لیستونیتی و نمونه‌برداری هدفمند و تعیین فازهای مختلف لیستونیتی شدن در صحرای طراحی شد. تهیه مقاطع نازک از نمونه‌های پریدوتیتی (بیشتر هارزبورژیت‌ها)، سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌ها انجام شد. سپس نمونه‌ها با میکروسکوپ پلاریزان OLYMPUS مدل BH-2 از نظر سنگ‌نگاری و سنگ‌شناختی بررسی شدند. پس از انتخاب نمونه‌ها، تجزیه شیمیایی اسپینل‌ها در دستگاه ریزکاو Cameca مدل SX100 با ولتاژ ۱۵ کیلوولت در دانشگاه ناسی فرانسه انجام شد. سپس فرمول ساختاری کانی‌ها و تفکیک Fe^{2+} و Fe^{3+} با استفاده از روش ارائه شده با دروپ انجام شد (Droop, 1987).

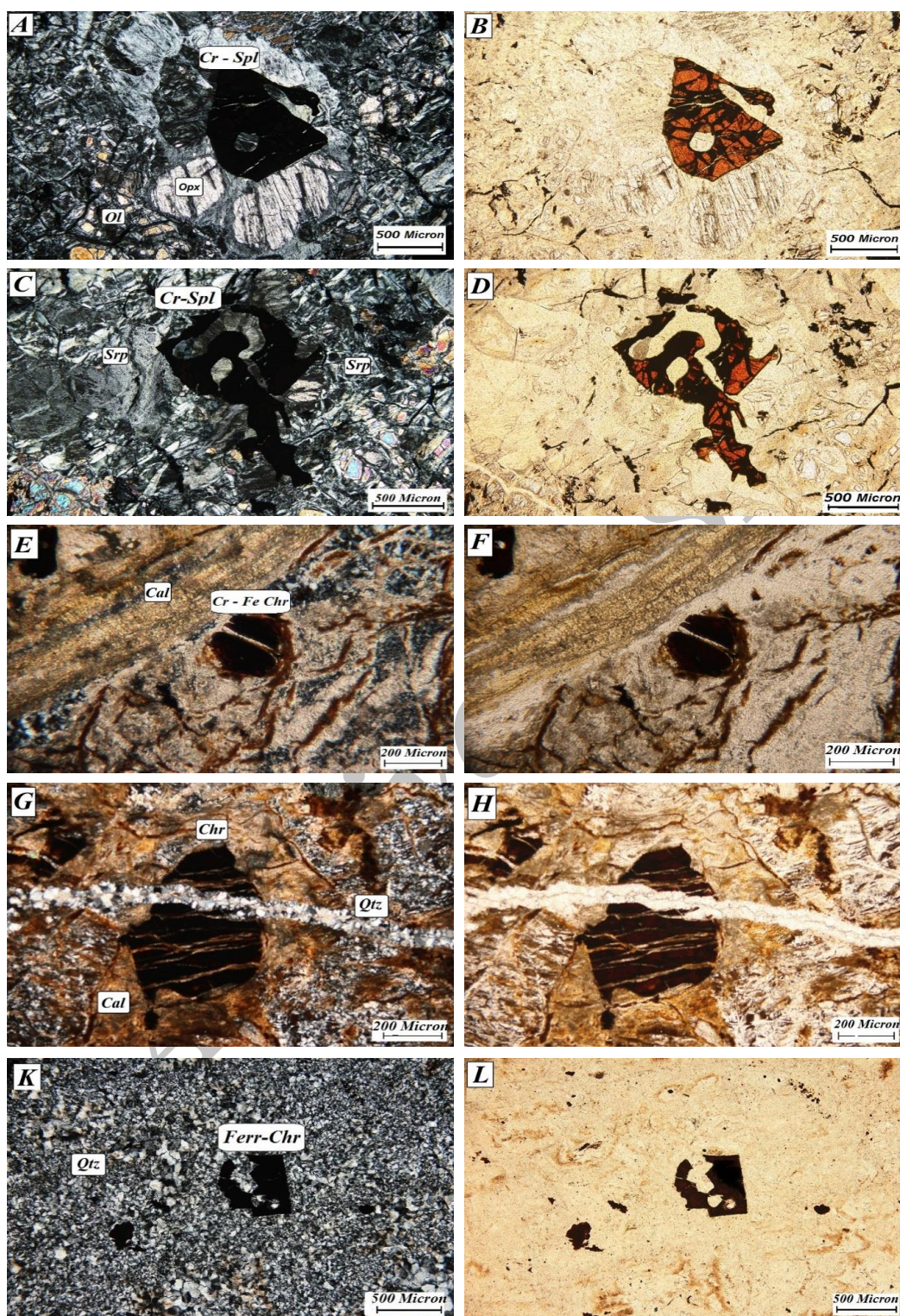
۴-۲- کانی‌شناسی

۴-۱- اسپینل در هارزبورژیت‌ها

هارزبورژیت‌ها بیشترین حجم پریدوتیت‌های گوشته افیولیتی ناپین را به خود اختصاص داده‌اند (Davoudzadeh, 1972). هارزبورژیت‌ها از الیون‌های ریزدانه و بلورهای زرد براق تا برنزی ارتوپروکسن تشکیل شده‌اند، از دونیت به هارزبورژیت مقادیر ارتوپروکسن و کلینوپروکسن به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار کلینوپروکسن هرگز از ۵ درصد حجمی و مقدار ارتوپروکسن از ۳۰ درصد حجمی فراتر نمی‌رود (Coleman, 1977). اسپینل‌ها نیز به صورت کانی‌های فرعی هستند که گاهی تا بالای ۲ درصد حجمی می‌رسند. اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها سرخ تیره با بلورهای خودشکل هستند که عموماً توسط کانی‌های دیگر مانند ارتوپروکسن و گاه الیون در بر گرفته شده‌اند و با این کانی‌ها همزیست هستند که از این موضوع می‌توان در زمین‌داسنجی استفاده کرد (شکل ۳- A, B).

۴-۲- اسپینل در سرپانتینیت‌ها

سنگ‌هایی که تمام یا بخش زیادی از آنها از کانی‌های گروه سرپانتین تشکیل شده باشد، سرپانتینیت خوانده می‌شوند. سرپانتینیت شدن در مجموعه‌های اولترامافیکی معمولاً در مناطق



شکل ۳- A) کروم اسپینل‌ها موجود در هارزبورژیت‌ها خودشکل و با ارتوپروکسن و گاه الیون همزیست هستند (XPL). B) کروم اسپینل‌ها در هارزبورژیت‌ها به رنگ سرخ تیره بوده (PPL) و در سرپانتینیت حالت دندریتی دارند (XPL). D) کروم اسپینل‌ها در سرپانتینیت‌ها با جذب آهن از حاشیه تحت‌تأثیر گرفته‌اند (PPL). E) کروم اسپینل‌ها در لیستونیت‌های کربناتی ریزتر شده‌اند (XPL). F) کروم اسپینل موجود در لیستونیت‌های کربناتی از نظر رنگ تیره‌تر شده‌اند و به فریت کرومیت تبدیل شده‌اند (PPL). G) کروم اسپینل‌ها در لیستونیت‌های کربناتی - سیلیسی توسط رگه‌های سیلیسی شکسته شده‌اند (XPL). H) کروم اسپینل‌ها در لیستونیت‌های کربناتی - سیلیسی با جذب آهن از حاشیه رنگ آنها تیره‌تر شده است (PPL). K) کروم اسپینل‌ها موجود در بیربریت‌ها با بافت کششی (pull-apart) و خورده‌شدگی (Resorbe Margine) مشخص هستند (XPL). L) کروم اسپینل‌ها در بیربریت‌ها در شرایط اکسایش ناشی از هجوم سیال‌های سیلیسی به فریت کرومیت‌های کامل با رنگ تیره (PPL).

۴-۴- اسپینل در لیستونیت‌های کربناتی- سیلیسی

فراوان‌ترین نوع لیستونیت در افیولیت‌های کربناتی- سیلیسی است. کانی‌های اصلی این گروه شامل کوارتز، سیلیس نامتبلور، ژاسپروید، کلسدونی و کانی‌های کربناتی شامل کلسیت، دولومیت، آنکرایت و غیره است (کریم‌زاده، ۱۳۹۳). کانی فرعی، کروم اسپینل‌ها هستند. گاهی رگه‌های کربناتی و سیلیسی در تناوب قرار می‌گیرند. گاهی به صورت متقاطع هستند که نشان‌دهنده هجوم مکرر سیالات کربناتی و سیلیسی به این لیستونیت‌ها است. شاهد این پدیده بافت آنول^۱ در این گروه از لیستونیت‌ها است که کربنات‌ها در نتیجه هجوم سیالات سیلیسی انحلال یافته است. یک سیال اسیدی اشباع از سیلیس می‌تواند باعث انحلال کربنات و نهشته شدن سیلیس شود. شرایط تشکیل کربنات‌ها با سیلیس متفاوت است به گونه‌ای که وقتی محیط اسیدی و اکسایشی است سیلیس پایدار و کربنات ناپایدار است. برعکس وقتی محیط قلیایی و کاهنده است، کربنات پایدار و سیلیس ناپایدار است (کریم‌زاده، ۱۳۹۳). شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل لیستونیت‌های کربناتی- سیلیسی متفاوت با لیستونیت‌های کربناتی است. این تغییرات pH و Eh خود معلول تغییراتی از قبیل کاهش فوگاسیته CO₂ است که این خود نیز تحت‌تأثیر کاهش مقدار CO₂ موجود در منبع تغذیه‌کننده است. در این شرایط است که سیلیس می‌تواند تشکیل شود. می‌توان نتیجه گرفت که شرایط عدم تعادل در محیط، حاکم است. لیستونیت‌های کربناتی- سیلیسی حالتی بینابین دارند. اسپینل‌ها یا فریت کرومیت‌ها نیز تحت‌تأثیر این فرایندها توسط رگه‌های سیلیسی شکسته شده‌اند. همین‌طور با جذب آهن از حاشیه رنگ آنها تیره‌تر شده است (شکل ۳- H, G). فریت کرومیت‌ها در این نوع از لیستونیت‌ها فراوان‌تر از انواع دیگر لیستونیت‌ها هستند.

۴-۵- اسپینل در لیستونیت‌های سیلیسی یا بیبریریت‌ها

کانی‌های سیلیس (کوارتز، ژاسپروید و چرت، کلسدونی، اپال) تشکیل‌دهنده اصلی این دسته از لیستونیت‌ها هستند. سیلیس اغلب به صورت ژاسپروید و دانه‌ریز است. کانی‌های کربناتی موجود در این لیستونیت‌ها بسیار کم هستند و حاشیه‌های خورده شده و اکسیده دارند. که این امر نشان‌دهنده فاز اکسایش است که در سنگ رخ داده است (کریم‌زاده، ۱۳۹۳).

رشد کانی‌های سیلیسی با بافت‌های شکاف پرکن (Open Space Filling) گرانوبلاستیک، شبکه‌ای (Mesh texture) مشخص هستند. اسپینل‌ها در شرایط اکسایش ناشی از هجوم سیال‌های سیلیسی به فریت کرومیت‌های کامل با رنگ تیره و بافت کششی (pull-apart) و خورده‌شدگی (resorbed Margin) تبدیل می‌شوند (شکل ۳- K, L).

۵- ژئوشیمی**۵-۱- ترکیب شیمیایی اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت، سرپانتینیت و لیستونیت‌های جنوب افیولیت‌های نایین**

در هارزبورژیت، سرپانتینیت و لیستونیت‌های جنوب افیولیت‌های نایین چندین نوع اسپینل‌های کروم‌دار با ترکیب متفاوت وجود دارد. البته لازم به ذکر است که برای تجزیه شیمیایی اسپینل‌های کروم‌دار در نمونه‌های مختلف سنگی، کانی‌های سالم (نادگرسان) اسپینل انتخاب شده‌اند. و نتایج تجزیه شیمیایی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی کروم اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت، سرپانتینیت و لیستونیت‌های جنوب اقیولیت ناین براساس درصد وزنی و محاسبه فرمول ساختاری آنها

نمونه‌ها	HS	HS	SS	SS	CLS	CLS	CSLS	CSLS	CSLS	SLS	SLS	LS
اکسیدها	(۱)	(۲)	(۱)	(۲)	(۱)	(۲)	(۱)	(۲)	(۳)	(۱)	(۲)	(۳)
Wt%												
SiO ₂	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸
TiO ₂	۰/۰۳۰	۰/۰۳۲	۰/۰۶۰	۰/۰۶۲	۰/۲۳۰	۰/۲۳۴	۰/۲۴۰	۰/۲۴۱	۰/۲۶۰	۰/۲۸۰	۰/۲۷۱	۰/۲۸۰
Al ₂ O ₃	۳۰/۹۰۰	۳۰/۱۵۶	۲۳/۰۹۰	۲۳/۰۰۱	۱۹/۳۴۰	۱۹/۱۹۹	۱۸/۵۲۰	۱۸/۴۶۲	۱۸/۳۷۰	۱۵/۷۴۰	۱۵/۴۶۲	۱۵/۴۵۱
Cr ₂ O ₃	۴۰/۲۹۱	۴۰/۵۶۰	۴۴/۷۰۰	۴۴/۸۳۰	۴۷/۵۸۰	۴۷/۶۶۵	۴۸/۰۷۰	۴۸/۰۶۳	۴۸/۰۴۰	۵۰/۶۹۰	۵۱/۰۰۱	۵۱/۱۰۰
FeO*	۱۳/۰۳۵	۱۳/۱۴۵	۱۶/۱۴۰	۱۶/۱۳۸	۱۷/۱۱۳	۱۷/۰۳۵	۱۸/۳۰۰	۱۸/۷۶۶	۱۸/۹۰۰	۱۹/۳۱۰	۱۹/۰۹۶	۲۰/۱۹۰
MnO	۰/۲۰۷	۰/۲۳۱	۰/۲۰۰	۰/۲۱۲	۰/۱۹۰	۰/۱۸۶	۰/۲۴۰	۰/۲۴۴	۰/۳۱۰	۰/۳۲۰	۰/۲۶۶	۰/۲۴۰
MgO	۱۵/۱۰۷	۱۵/۵۵۱	۱۴/۸۰۱	۱۴/۵۶۴	۱۴/۴۹۰	۱۴/۳۰۷	۱۳/۳۴۷	۱۳/۲۳۶	۱۳/۵۰۰	۱۳/۲۷۰	۱۲/۳۱۷	۱۲/۵۶۰
CaO	۰/۰۱۲	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۰۶۰	۰/۰۸۶	۰/۰۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
ZnO	۰/۰۵۰	۰/۰۵۴	۰/۰۶۰	۰/۰۵۸	۰/۰۶۰	۰/۰۵۱	۰/۰۸۰	۰/۰۸۶	۰/۱۰۰	۰/۱۱۰	۰/۱۱۶	۰/۱۱۰
PtO ₂	۰/۰۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۱۱۰	۰/۱۴۴	۰/۱۵۰
NiO	۰/۲۱۰	۰/۲۰۱	۰/۱۹۰	۰/۱۸۴	۰/۱۴۰	۰/۱۳۹	۰/۱۵۰	۰/۱۴۶	۰/۱۷۰	۰/۰۸۸	۰/۱۱۲	۰/۱۱۰
Total	۹۹/۶۶۳	۹۹/۸۴۹	۹۹/۴۶۴	۹۹/۴۶۱	۹۹/۲۳۰	۹۹/۶۹۳	۹۹/۵۲۰	۹۹/۶۸۴	۹۹/۸۱۰	۹۹/۸۹۰	۹۹/۶۴۳	۹۹/۸۷۰
Oxygen#=۳۲												
Si	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱۸
Ti	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	۰/۰۶۴	۰/۰۶۶	۰/۰۶۸	۰/۰۶۹	۰/۰۷۵	۰/۰۸۱	۰/۰۷۸	۰/۰۸۱
Al	۹/۴۶۷	۹/۰۳۷	۷/۷۸۱	۷/۶۶۵	۷/۲۹۸	۷/۱۲۶	۶/۸۵۶	۶/۸۴۱	۶/۸۰۱	۵/۵۶۴	۵/۴۵۷	۵/۳۵۶
Cr	۶/۱۲۵	۶/۳۸۶	۶/۹۹۵	۷/۰۶۷	۷/۶۷۷	۷/۷۵۷	۷/۷۷۱	۷/۷۷۳	۷/۷۷۶	۸/۴۷۳	۸/۵۶۷	۸/۵۸۹
Fe ²⁺	۲/۵۸۹	۲/۶۰۴	۳/۴۰۵	۳/۴۰۴	۳/۸۰۰	۳/۶۹۴	۴/۰۹۱	۴/۱۶۸	۴/۲۱۵	۴/۳۴۷	۴/۲۲۵	۴/۷۰۲
Fe ³⁺	۰/۴۴۱	۰/۴۶۹	۰/۵۴۶	۰/۵۴۵	۰/۵۹۹	۰/۵۷۴	۰/۶۸۹	۰/۶۹۵	۰/۷۰۱	۰/۷۴۶	۰/۷۲۹	۰/۷۹۴
Mn	۰/۰۴۰	۰/۰۴۵	۰/۰۳۸	۰/۰۴۳	۰/۰۳۵	۰/۰۳۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۵	۰/۰۵۲	۰/۰۵۳	۰/۰۴۷	۰/۰۴۳
Mg	۵/۲۷۶	۵/۳۲۱	۵/۱۷۵	۵/۰۷۹	۵/۰۶۴	۵/۰۰۴	۴/۷۰۲	۴/۶۹۶	۴/۷۰۵	۴/۶۲۴	۴/۳۲۱	۴/۳۷۶
Ca	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
Zn	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۶	۰/۰۲۳	۰/۰۱۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹	۰/۰۳۱	۰/۰۲۹
Pt	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴
Ni	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶	۰/۰۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹
Total	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰
Mg#	۰/۶۷۰	۰/۶۸۳	۰/۶۰۳	۰/۵۹۹	۰/۵۷۱	۰/۵۵۹	۰/۵۳۴	۰/۵۳۱	۰/۵۲۷	۰/۵۱۵	۰/۴۷۸	۰/۴۸۲
Cr#	۰/۳۹۲	۰/۴۰۲	۰/۴۷۳	۰/۴۸۶	۰/۵۳۳	۰/۵۲۷	۰/۵۴۰	۰/۵۴۳	۰/۵۴۷	۰/۵۹۷	۰/۶۱۰	۰/۶۱۵

۵-۱-۱- اسپینل در هارزبورژیت (HS)

اسپینل در هارزبورژیت ۱ که میزان اکسید Cr_2O_3 آن به مقدار ۴۰/۲۹۱ درصد است و $\text{Cr}\#$ ، Al_2O_3 و $\text{Mg}\#$ این کانی به ترتیب ۰/۳۹۲، ۳۰/۹۰۰ درصد و ۰/۶۷۰ است و اسپینل در هارزبورژیت ۲ که میزان اکسید Cr_2O_3 آن ۴۰/۵۶۰ درصد است و $\text{Cr}\#$ ، Al_2O_3 و $\text{Mg}\#$ این کانی به ترتیب ۰/۴۰۲، ۳۰/۱۵۶ درصد و ۰/۶۸۳ است مقدار اکسید Cr_2O_3 در اسپینل موجود در هارزبورژیت نسبت به بقیه اسپینل‌ها در واحدهای سنگی دیگر کمتر است. بین اسپینل‌های ۱ و ۲ در مقدار آلومینیم و کروم و منیزیم مقداری کمی تفاوت دیده می‌شود. که این امر نشان می‌دهد که عمق و فشار حاکم بر تشکیل هارزبورژیت ۱ از هارزبورژیت ۲ کمی متفاوت بوده است (Arai, 2013).

۵-۱-۲- اسپینل‌ها در سرپانتینیت‌ها (SS)

اسپینل در سرپانتینیت ۱ که میزان اکسید Cr_2O_3 آن ۴۴/۷۰۰ درصد است و $\text{Cr}\#$ ، Al_2O_3 و $\text{Mg}\#$ این کانی به ترتیب ۰/۴۷۳، ۲۳/۰۹۰ درصد و ۰/۶۰۳ است. اسپینل در سرپانتینیت ۲ که میزان اکسید Cr_2O_3 آن ۴۴/۸۳۰ درصد است و $\text{Cr}\#$ ، Al_2O_3 و $\text{Mg}\#$ این کانی به ترتیب ۰/۴۸۶، ۲۳/۰۰۱ درصد و ۰/۵۹۹ است. تفاوت مؤلفه‌های مختلف بین دو اسپینل در این واحد خیلی کم است. مقدار اکسید Cr_2O_3 در اسپینل‌های موجود در سرپانتینیت‌ها نسبت به اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها بیشتر و میزان Al_2O_3 کمتر هستند. که تأثیر سرپانتینیتی شدن را روی اسپینل‌ها نشان می‌دهد (Mizukami et al., 2014).

۵-۱-۳- اسپینل موجود در لیستونیت (CLS)

اسپینل موجود در لیستونیت کربناتی ۱ دارای میزان اکسید Cr_2O_3 ۴۷/۵۸۰ درصد است و $\text{Cr}\#$ ، Al_2O_3 و $\text{Mg}\#$ این کانی به ترتیب ۰/۵۳۳، ۱۹/۳۴۰ درصد و ۰/۵۷۱ است. مقدار اکسید Cr_2O_3 اسپینل موجود در لیستونیت کربناتی ۲، ۴۷/۶۶۵ درصد است و $\text{Cr}\#$ ، Al_2O_3 و $\text{Mg}\#$ این کانی به ترتیب ۰/۵۳۷، ۱۹/۱۹۹ درصد و ۰/۵۵۹ است. فریت کرومیتی شدن اسپینل‌های موجود در این لیستونیت‌ها که در بخش کانی‌شناسی مطرح شد با افزایش FeO^* تأیید می‌شود. مقدار اکسید Cr_2O_3 در اسپینل‌های موجود لیستونیت‌های کربناتی نسبت به اسپینل موجود در هارزبورژیت و سرپانتینیت بیشتر و میزان Al_2O_3 کمتر هستند. این تغییرات در عناصر به دلیل این است که فرایند دگرسانی لیستونیتی شدن در عمق، فشار و دمای پایین‌تری نسبت به هارزبورژیت‌ها رخ می‌دهند. این موضوع با زمین‌فشارسنجی که روی این لیستونیت‌ها انجام شده همخوانی دارد (کریم‌زاده، ۱۳۹۳).

۵-۱-۴- اسپینل‌های موجود در لیستونیت کربناتی-سیلیسی (CSLS)

اسپینل‌های موجود در لیستونیت‌های کربناتی-سیلیسی دارای میزان اکسید Cr_2O_3 به صورت میانگین ۴۸/۵۳ درصد هستند. $\text{Cr}\#$ این کانی‌ها به صورت میانگین ۰/۴۴۳ و میانگین Al_2O_3 آنها نیز ۱۸/۵۲۰ درصد است. اما مطلبی که در اینجا مهم جلوه می‌کند، میزان بالای Fe^{3+} است که تعیین‌کننده افزایش فوگاسیته اکسیژن و فاز اکسایش حاکم بر تشکیل لیستونیت‌های کربناتی-سیلیسی است (کریم‌زاده، ۱۳۹۳). در اینجا نیز فریت کرومیتی شدن اسپینل‌ها با افزایش FeO^* مطرح است. مقدار اکسید Cr_2O_3 در اسپینل‌های موجود لیستونیت کربناتی-سیلیسی نسبت به اسپینل موجود در هارزبورژیت و سرپانتینیت و لیستونیت کربناتی بیشتر و میزان Al_2O_3 کمتر هستند.

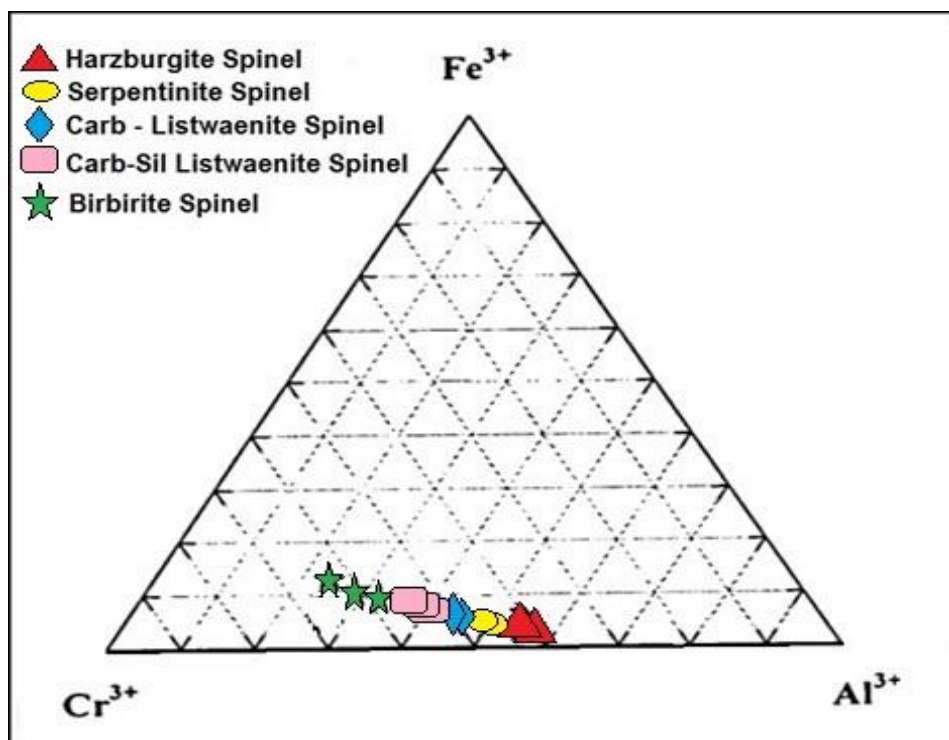
۵-۱-۵- اسپینل‌های موجود در لیستونیت‌های سیلیسی یا بیریریت‌ها (SLS)

میانگین اکسید Cr_2O_3 اسپینل‌های موجود در لیستونیت‌های سیلیسی یا بیریریت‌ها ۵۰/۹۰۰ درصد است. میانگین $\text{Cr}\#$ این کانی‌ها ۰/۶۰۷ و میانگین اکسید Al_2O_3 آنها نیز ۱۵/۴۵۰ درصد است. همچنان افزایش میزان Fe^{3+} ادامه دارد. افزایش فوگاسیته اکسیژن و فاز اکسایش در بیریریت‌زایی و سیلیسی شدن به اوج خود می‌رسد (کریم‌زاده، ۱۳۹۳). با افزایش FeO^* فریت کرومیتی شدن اسپینل‌ها نیز تثبیت می‌شود. مقدار اکسید Cr_2O_3 در اسپینل‌های لیستونیت‌های سیلیسی نسبت به اسپینل سایر لیستونیت‌ها بیشتر و میزان Al_2O_3 کمتر است. براساس این داده‌ها و همین‌طور مطالعات کانی‌شناسی و صحرایی که انجام شده است، همه گواه بر این موضوع هستند که دما، فشار و عمق تشکیل لیستونیت‌های سیلیسی از بقیه لیستونیت‌ها، کمتر هستند.

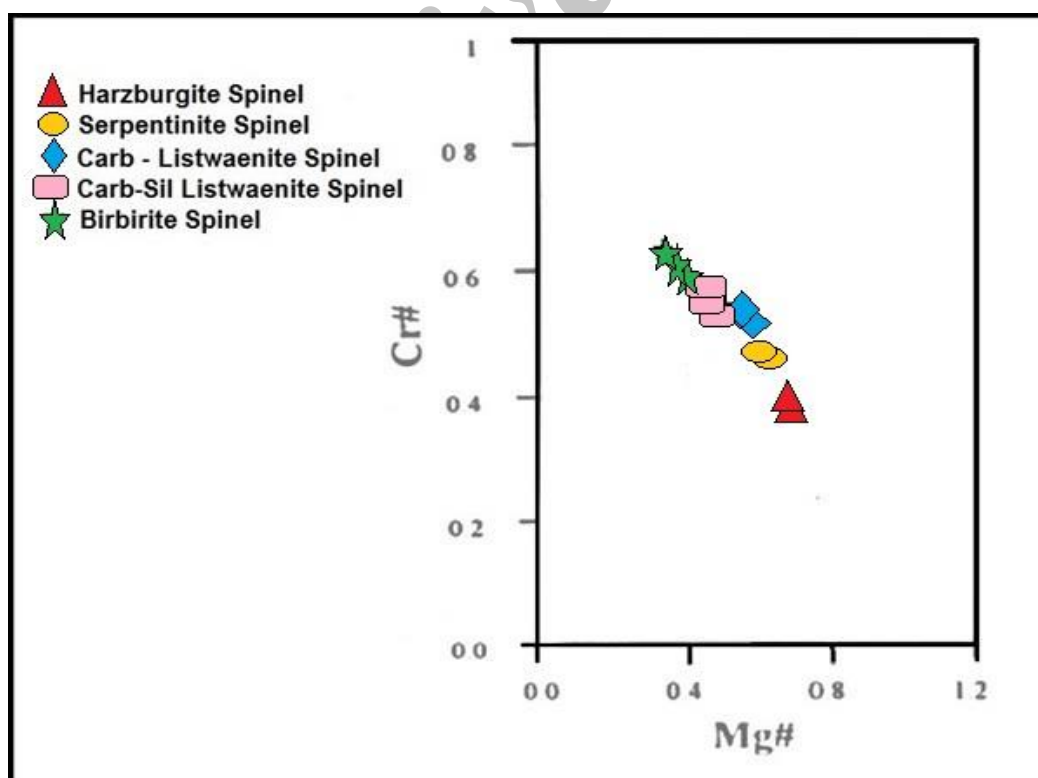
در صحرا لیستونیت‌های سیلیسی در قله تشکیل می‌شوند و صخره‌ساز هستند. لیستونیت‌های کربناتی در دامنه این قله‌ها تشکیل می‌شوند و حالت خردشدگی نشان می‌دهند. لیستونیت‌های کربناتی-سیلیسی نیز بین این دو قرار می‌گیرند. این ترتیب جایگیری لیستونیت‌ها، مشخص‌کننده موقعیت مکانی این واحدها نسبت به منبع تغذیه‌کننده گرمایی و دمایی خود هستند. از نظر کانی‌شناسی نیز حضور سیلیس از نوع کلسدونی در لیستونیت‌های دارای سیلیس نیز نشان از دمای پایین تشکیل این واحدهای سنگی است. شکل ۴ مثلث کاتیون‌های سه‌ظرفیتی Fe^{3+} ، Cr^{3+} و Al^{3+} است و تغییرات این عناصر را در اسپینل‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز $\text{Cr}\#$ در برابر $\text{Mg}\#$ اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها، سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌های جنوب افیولیت ناپین نشان می‌دهد.

۵-۲- کاربرد فرمول ساختاری اسپینل‌ها در تفسیر ژنتیکی

فرمول ساختاری اسپینل‌ها در واحدهای هارزبورژیتی، سرپانتینیتی و لیستونیت‌ها پس از محاسبه در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۴- ترکیب کروم اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت، سرپانتینیت و لیستونیت‌های جنوب افیولیت نایین در مثلث کاتیون‌های سه‌طرفیتی Fe^{3+} , Cr^{3+} و Al^{3+}



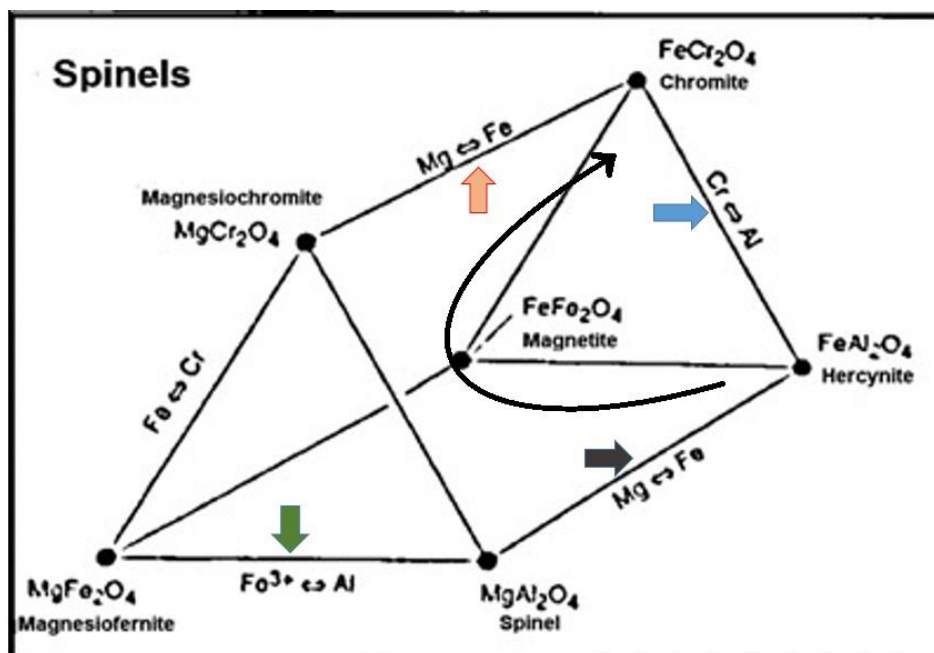
شکل ۵- ترکیب کروم اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت، سرپانتینیت و لیستونیت‌های جنوب افیولیت نایین نسبت به $Mg\#$ و $Cr\#$ آنها

جدول ۲- فرمول ساختاری کروم اسپینل‌ها در هارزبورژیت، سرپانتینیت و لیستونیت‌های جنوب اقیانوس تینین

واحد سنگی	نام کانی	فرمول ساختاری بر اساس ۳۲ اتم اکسیژن
هارزبورژیت (۱)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{2.589}\text{Mg}_{5.276}\text{Mn}_{0.040})(\text{Cr}_{6.125}\text{Fe}^{3+}_{0.441}\text{Al}_{9.467})\text{O}_{32}$
هارزبورژیت (۲)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{2.604}\text{Mg}_{5.321}\text{Mn}_{0.045})(\text{Cr}_{6.386}\text{Fe}^{3+}_{0.469}\text{Al}_{9.037})\text{O}_{32}$
سرپانتینیت (۱)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{3.405}\text{Mg}_{5.175}\text{Mn}_{0.038})(\text{Cr}_{6.995}\text{Fe}^{3+}_{0.546}\text{Al}_{7.781})\text{O}_{32}$
سرپانتینیت (۲)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{3.404}\text{Mg}_{5.079}\text{Mn}_{0.043})(\text{Cr}_{7.067}\text{Fe}^{3+}_{0.545}\text{Al}_{7.665})\text{O}_{32}$
لیستونیت کربناتی (۱)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{3.800}\text{Mg}_{5.065}\text{Mn}_{0.035})(\text{Cr}_{7.757}\text{Fe}^{3+}_{0.599}\text{Al}_{6.298})\text{O}_{32}$
لیستونیت کربناتی (۲)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{3.694}\text{Mg}_{5.004}\text{Mn}_{0.034})(\text{Cr}_{7.771}\text{Fe}^{3+}_{0.574}\text{Al}_{7.126})\text{O}_{32}$
لیستونیت کربناتی - سیلیسی (۱)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{4.091}\text{Mg}_{4.702}\text{Mn}_{0.044})(\text{Cr}_{7.773}\text{Fe}^{3+}_{0.689}\text{Al}_{6.856})\text{O}_{32}$
لیستونیت کربناتی - سیلیسی (۲)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{4.215}\text{Mg}_{4.705}\text{Mn}_{0.052})(\text{Cr}_{7.776}\text{Fe}^{3+}_{0.701}\text{Al}_{6.841})\text{O}_{32}$
لیستونیت کربناتی - سیلیسی (۳)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{4.215}\text{Mg}_{4.705}\text{Mn}_{0.052})(\text{Cr}_{7.771}\text{Fe}^{3+}_{0.701}\text{Al}_{6.801})\text{O}_{32}$
بیربیریت (۱)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{4.347}\text{Mg}_{4.624}\text{Mn}_{0.053})(\text{Cr}_{8.473}\text{Fe}^{3+}_{0.746}\text{Al}_{5.564})\text{O}_{32}$
بیربیریت (۲)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{4.702}\text{Mg}_{4.376}\text{Mn}_{0.043})(\text{Cr}_{8.567}\text{Fe}^{3+}_{0.794}\text{Al}_{5.457})\text{O}_{32}$
بیربیریت (۳)	اسپینل	$(\text{Fe}^{2+}_{4.702}\text{Mg}_{4.376}\text{Mn}_{0.043})(\text{Cr}_{8.589}\text{Fe}^{3+}_{0.794}\text{Al}_{5.356})\text{O}_{32}$

برابر دگرسانی‌ها است. افزایش مؤلفه Fe^{+3} نیز به دلیل فازهای اکسایشی است که در طی دگرسانی‌های لیستونیتی شدن وجود داشته‌اند. بر مبنای نمودار اسپینل‌ها در شکل ۶ که نمونه‌ها را باید به صورت سه‌بعدی در فضای داخل این نمودار در نظر گرفت، تبادل عناصر مختلف با علامت پیکان‌ها مشخص شده‌اند. روند کلی همه تبادلات عناصر در اسپینل‌ها نیز با پیکان بزرگ خمیده، مشخص شده است که نشان می‌دهد جایگزینی در بین عناصر مختلف رخ داده است. مهم‌ترین جایگزینی مربوط به آلومینیم و کروم است. از داده‌های ترکیبات شیمیایی می‌توان نتیجه گرفت که اسپینل‌ها همه کروم اسپینل یا کرومیت هستند. اما تغییراتی که در کروم اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت به سمت کروم اسپینل‌های موجود در لیستونیت سیلیسی رخ داده است، در جهت کرومیتی شدن بوده است. به گونه‌ای که از نزدیکی قطب‌های منیزوکرومیت و هرسینیت به سمت قطب‌های کرومیت و مگنتیت متمرکز شده‌اند.

اسپینل‌ها در هارزبورژیت‌ها دارای مؤلفه‌های MgO ، Mg\# و Al_2O_3 بالایی هستند. هنگامی که هارزبورژیت‌ها به سرپانتینیت تبدیل می‌شوند به دنبال آن در سرپانتینیت‌ها، لیستونیتی شدن رخ می‌دهد. از میزان این مؤلفه‌ها کاسته و به میزان مؤلفه‌های Cr\# ، Cr_2O_3 و TiO_2 و Fe^{+3} افزوده می‌شود. این روندهای کاهش و افزایش مؤلفه‌های یادشده در طی مراحل مختلف فرایند لیستونیتی شدن از لیستونیت‌های کربناتی به کربناتی - سیلیسی و در آخر بیربیریت‌ها ادامه می‌یابد، کاهش میزان مؤلفه‌های MgO ، Mg\# و Al_2O_3 و افزایش به‌ویژه مؤلفه‌های Cr_2O_3 ، Cr\# در طی روند فرایند‌های سرپانتینیتی شدن و لیستونیتی شدن نشان‌دهنده آن است که فشار یا عمق قرارگیری اسپینل‌ها در این فرایندها کاهش یافته است (Ballhaus et al., 1991; Zhou & Robinson, 1994; Arai, 2013 & 1994). می‌توان این موضوع را حتی به دما نیز تعمیم داد، به گونه‌ای که با کاهش فشار، کاهش دما نیز مؤثر بوده است (کریم‌زاده، ۱۳۹۳). افزایش مؤلفه TiO_2 نیز به دلیل پایداری بالای تیتان در



شکل ۶- ترکیبات اعضای پایانی گروه اسپینل که منشور ترکیب اسپینل آمده است (Spear, 1995)

نتیجه‌گیری

خوی- خان گلی (شمال غرب ایران) "پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۴۶ صفحه.

نقره‌ئیان، م.، مکی‌زاده، م. ع.، شرافت، ش.، ۱۳۷۷، "پتروگرافی و ژئوشیمی لیستونیت‌ها در مجموعه‌های افیولیتی ایران مرکزی" گزارش پایانی طرح پژوهشی، دانشگاه اصفهان، ۶۶ صفحه.

Allan, J.F., Sack, R.O., Batiza, R., 1988, "Cr-rich spinels as petrogenetic indicators; MORB-type lavas from the Lamont seamount chain, eastern Pacific", *American Mineralogist* 73, P.741-753.

Arai, S. and Akizawa, N., 2014, "Precipitation and dissolution of chromite by hydrothermal solutions in the Oman ophiolite: new behavior of Cr and chromite", *American Mineralogist*, 99, P.28-34.

Arai, S., 2013, "Conversion of low-pressure chromitites to ultrahigh-pressure chromitites by deep recycling: A good inference", *Earth and Planetary Science Letters*, 379, P.81-87.

Arai, S., 1994, "Compositional variation of olivine-chromian spinel in Mg-rich magmas as a guide to their residual spinel peridotites", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 59, P.279-293.

Ballhaus, C., Berry, R.F., Green, D.H., 1991, "High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle", *contributions to Mineralogy and Petrology* 107, P.27-40.

Barnes S.J., Roeder P.L., 2001, "The range of spinel compositions in terrestrial mafic and Itramafic rocks", *Journal of Petrology*, P.2279-2302.

Coleman, R.G., 1971, "Petrologic and Geophysical nature of serpentinites", *Geological Society of America Bulletin*, P.897-918.

از اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها به سمت اسپینل‌های موجود در لیستونیت‌های سیلیسی میزان Fe^{+3} ، TiO_2 ، $Cr\#$ ، Cr_2O_3 و افزایش میزان $Mg\#$ ، MgO و Al_2O_3 کاهش یافته است. اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها در مناطقی عمیق، دارای دما و فشار بالا نسبت به سرپانتینیت‌ها و از آن بیشتر نسبت به لیستونیت‌ها تشکیل شده‌اند. پس دگرسانی لیستونیتی در اسپینل‌ها به ازای کاهش آلومینیم، افزایشی در عناصر آهن و کروم دارند. در صنعت آلیاژ، عنصر کروم به صورت فراوانی مورد استفاده است. منبع اصلی تأمین‌کننده کروم همین کرومیت‌ها هستند.

تشکر و قدردانی

از اساتید محترم جناب آقای دکتر محمدعلی مکی‌زاده و جناب آقای دکتر موسی نقره‌ئیان از گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان برای مساعدت‌های ارزشمندشان نهایت تشکر را دارم.

مراجع

ترابی، ق.، ۱۳۹۱، "افیولیت‌های ایران مرکزی" انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اصفهان، چاپ اول، ۴۴۳ صفحه.

سعیدی، م.، ۱۳۸۶، "مطالعه پتروژنز لیستونیت‌ها در سنگ‌های اولترامافیک شمال نائین (ایران مرکزی)" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۲۰ صفحه.

کریمزاده، ح.، ۱۳۹۳، "مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمی دگرسانی لیستونیتی شدن بخش جنوبی افیولیت نائین (ایران مرکزی) و افیولیت

- Coleman, R.G., 1977**, "Ophiolites: ancient oceanic lithosphere?" *New York, Springer-Verlag*, P.229.
- Davoudzadeh, M., 1972**, "Geology and Petrography of the area north of Nain central Iran", *Geological Survey of Iran, Report No. 14.*, P.89.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1991**, "An introduction to the rock forming minerals", *Longman Scientific & Technical*, P.528.
- Dick, H.J.B., Bullen, T., 1984**, "Chromian spinel as a Petrogenetic indicator in abyssal and alpine type peridotites, and spatially associated lavas", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 96, P.54-76.
- Dick, H.J.B., 1989**, "Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism", In: *Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), Magmatism in the Ocean Basins. Special Publication Geological Society vol. 42*, P.71-209.
- Dick, H.J.B., Fisher, R.L., 1984**, "Mineralogic studies of the residues of mantle melting: abyssal and alpine-type peridotites", In: *Kornprobst, J. (Ed.), Kimberlites II. The Mantle and Crust-Mantle Relationships. Elsevier, Amsterdam*, P.295-308.
- Droop, G.T.R., 1987**, "A general equation for estimating Fe⁺³ concentration in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses", *using stoichiometric criteria. Mineralogical Magazine*, V. 51, P.63-71.
- Kerrick, R.W., 1989**, "Geochemical evidence on the source of fluids and solutes for shear zone hosted mesothermal Au deposits, in minearalization in shear zones", *J.T. Bursnal, Editor, Geological association of Canada, Short Course Notes*, P.129-197.
- Leblanc M., Nicolas A., 1992**, "Les chromitites ophiolitiques: Chronique de la Recherche Minière", P.3-25.
- Matsukage, K.N., Kubo, K., 2003**, "Chromian spinel during melting experiments of dry peridotites at 1.0-2.5 GPa", *American Mineralogist* 88, P.1271-1278.
- Maurel, C., Maurel, P., 1983**, "Étude expérimentale de l'équilibre Fe²⁺-Fe³⁺ dans les spinelles chromifères et les liquides silicatés basiques coexistants", à 1 atm. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 295, P.209-212.
- Mizukami, T., Yokoyama, H., Hiramatsu, Y., Arai, S., Kawahara, H., Nogaya, T. and Wallis, S.R., 2014**, "Two types of antigorite serpentinite controlling heterogeneous slowslip behaviours of slab-mantle interface", *Earth and Planetary Science Letters*, P.148-158.
- Miura, M., Arai, S. and Tamura, A., 2014**, "Formation of discordant chromitite as the initiation of sub-arc mantle process: Observations from northern Oman ophiolite", *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 109, P.38-43.
- Payot, B. D., Arai, S., Dick, H.J.B., Abe, N. and Ichiyama, Y., 2014**, "Podiform chromitite formation in a low-Cr/high-Al system: An example from the Southwest Indian Ridge (SWIR)", *Mineralogy and Petrology*, P.533-549.
- Roeder, P.L., 1994**, "Chromite: from the fiery rain of chondrules to Kilauea Iki lava lake", *Canadian Mineralogist*, P.729-746.
- Rumble, D., 1981**, "Oxide Minerals, Reviews in mineralogy", *Mineralogical Society of America, Monograph 3, Washington, D.C.*, P.395.
- Spear, F.S., 1995**, "Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths", *Mineralogical Society of America, Monograph 1, Washington, D.C.*, P.799.
- Zhou M.-F., Robinson P.T., 1994**, "High-Cr and high-Al podiform chromitites, western China, Relationship to partial melting and melt/rock reaction in the upper mantle", *International Geology Review*, P.678-686.