

شیمی و دماسنجی کلریت در پهنه‌های کانی‌سازی و سنگ‌های دگرگونی معدن سنگ آهن گل‌گهر (شماره ۱)، سیرجان، کرمان

افسانه جعفری، محمدحسن کریم‌پور*، سید احمد مظاهری، آزاده ملک‌زاده شفارودی، مینوآرن

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۹۶/۹/۵، نسخه نهایی: ۹۶/۱۲/۲)

چکیده: مجموعه معدنی گل‌گهر در ۵۵ کیلومتری جنوب‌غرب سیرجان در پهنه دگرگونی سندنچ- سیرجان واقع است. بر اساس مجموعه کانی‌های همراه با مگنتیت، ۵ پهنه کانی‌سازی تشخیص داده شد. کانی‌های باطله شامل پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت، سیدریت، آپاتیت، سرپنتین، طلق، کلریت، آمفیبول، کلسیت، دولومیت و کوارتز است. همه کلریت‌ها از نوع سه‌هشت‌وجهی (کلینوکلر-شاموزیت) هستند. کلریت‌های پهنه مگنتیت+پیریت+پیروتیت+کالکوپیریت (MPPC) و پهنه مگنتیت+تالک+کلریت+آمفیبول (MTCA) به ترتیب پنین و پنین-کلینوکلر هستند. کلریت‌های موجود در کلریت شیست‌ها گستره ترکیبی گسترده‌تری از پنین، کلینوکلر، پیکنوکلریت تا رپیدولیت را نشان می‌دهند. کلریت در میکا شیست‌ها و آمفیبولیت از نوع رپیدولیت هستند. کلریت‌هایی که مستقیم از سیال کانه‌ساز تشکیل می‌شوند بیشترین مقدار Mg را دارند. با کاهش نسبت سیال به سنگ، Mg کاهش و Al^{IV} افزایش می‌یابند. افزایش نسبت $Mg(Mg+Fe)$ از سنگ‌های میزبان به سمت پهنه کانی‌سازی متفاوت با کلریت سازند آهن است. مقدار عناصر فرعی در ساختار کلریت به ترکیب سیال، سایر کانی‌های متبلور شده از سیال، نسبت واکنش سنگ/آب و ترکیب سنگ میزبان وابسته است. گستره دمایی تشکیل کلریت از $245^{\circ}C$ تا $415^{\circ}C$ متغیر است (گستره دمایی شیست سبز). پهنه کانی‌سازی MPPC با دمای متوسط $301^{\circ}C$ کمترین دمای تشکیل را داراست، بنابراین کلریت‌های غنی از منیزیم در دمای کمتری نسبت به کلریت‌های غنی از آهن تشکیل شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: کلریت؛ شیمی کانی؛ دماسنجی؛ کانی‌سازی؛ آهن؛ گل‌گهر؛ سندنچ- سیرجان.

مقدمه

کلریت کانی معمول در انواع سنگ‌ها و محیط‌های مختلف زمین‌شناسی شامل سنگ‌های رسوبی، دگرگونی درجه پایین، و دگرسان شده به صورت گرمایی است [۱-۳]. این کانی از جانشینی کانی‌های اولیه (فرومنیزین) در سنگ و یا به طور مستقیم از تبلور محلول به دست می‌آید [۱، ۴]. تغییرات ترکیبی کلریت اطلاعات مفیدی در مورد شرایط فیزیکوشیمیایی هنگام تشکیل فراهم می‌کند [۵-۷]. کانی‌های گروه کلریت، فیلوسیلیکات‌های آبدار با ساختاری بر اساس

تناوب منظم لایه‌های چاروجهی-هشت‌وجهی ۲:۱ و کاتیون-های هشت‌وجهی بین لایه‌های هستند [۸]. فرمول بلور شیمی کلریت بر اساس ۱۴ اکسیژن عبارت است از $(R_X^{2+} R_Y^{3+} \square_{6-x-y})_6^{VI} (Si_Z R_4^{+3} Z)_4^{IV} O_{10} (OH)_8$ که در آن $R_2^{2+} = Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}, Co^{2+}, Zn^{2+}$ ، $R_3^{3+} = Al^{3+}, Fe^{3+}, Cr^{3+}, V^{3+}, Cu^{2+}$ ، $R_X^{2+} = Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}, Co^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}$ ، $R_Y^{3+} = Al^{3+}, Fe^{3+}, Cr^{3+}, V^{3+}$ جای خالی اکتاهدرال؛ $R_Z^{3+} = Al^{3+}, B^{3+}, Fe^{3+}$ است [۹]. گروه

کلریت از آنجاکه در ساختار بلوری خود دو صفحه هشت‌وجهی دارد، بر اساس لایه ۲:۱ و صفحه‌های بین لایه‌ای می‌تواند به ۴ زیر گروه (i) کلریت سه‌هشت‌وجهی، (ii) کلریت دو هشت‌وجهی، (iii) کلریت دو-سه هشت‌وجهی و (iv) کلریت سه-دو هشت‌وجهی تقسیم شود [۱۰].

مجموعه معدنی گل‌گهر شامل ۶ حوزه معدنی به مساحت 40 km^2 است که تاکنون نظرهای مختلفی برای تشکیل کانسار گل‌گهر ارائه شده است [۱۱-۲۵]. نسبت‌های ایزوتوپی U-Pb در زیرکن‌های واحد اورتوگنیسی منطقه کرسفید در غرب ناحیه گل‌گهر، سن کامبرین پیشین را برای سنگ مادر آن‌ها نشان داده است [۲۶]. سن دگرگونی، براساس نسبت‌های ایزوتوپی آرگون بر بیوتیت و هورنبلند شیت‌ها ژوراسیک است [۲۷]. حاج قنبری و همکاران [۲۸] با استفاده از روش ایزوتوپ سرب، سن کربنیفر پیشین را برای کانه‌زایی تعیین کردند. سنگ‌های به عنوان میزبان کانی‌سازی آهن در حد رخساره شیت سبز و آمفیبولیت دگرگون شده‌اند. کلریت از جمله کانی‌های فرومنیزنی است که علاوه بر سنگ‌های دگرگونی منطقه در پهنه‌های کانی‌سازی نیز وجود دارد با توجه به حضور کلریت در طیف وسیعی از سنگ‌های منطقه، در این پژوهش تفاوت‌های ترکیبی و دماسنجی کلریت بررسی می‌شود. تغییرات ترکیبی و روند این تغییرات در کانی کلریت از سنگ‌های دگرگونی به سمت کانی‌سازی در بررسی خاستگاه کانسار گل‌گهر و رد برخی نظریه‌ها بسیار مفید و کمک کننده است.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی در گوشه‌ی جنوب‌شرق ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گل‌گهر، ۵۰ کیلومتری جنوب‌غربی سیرجان در طول جغرافیایی $15^{\circ} 55'$ تا $24^{\circ} 55'$ شرقی و عرض جغرافیایی $29^{\circ} 3'$ تا $29^{\circ} 7'$ شمالی قرار دارد و متعلق به بخش شرقی پهنه ساندج-سیرجان است (شکل ۱). این منطقه بیشتر از آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده است و رخنمون‌های محدودی از سنگ‌های دگرگونی در جنوب و جنوب‌غرب، سنگ‌های رسوبی در شرق و توده نفوذی گرانیت میلونیتی به‌شکل گنبد کم ارتفاعی در جنوب معدن برونزد دارند [۲۹]. از ویژگی‌های عمده این منطقه معدنی، وفور

مجموعه‌های دگرگونی پالئوزوئیک و تریاس میانی است که توده‌های بازی و گرانیتی تریاس پسین در آن نفوذ کرده‌اند. این ناحیه بیشتر از سنگ‌های دگرگونی شامل مجموعه گل‌گهر در بخش‌های بالایی و مجموعه کر سفید، سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و آبرفت‌های کواترنر تشکیل شده است [۲۹]. رخنمون‌های شرقی و جنوب‌شرقی ناحیه که میزبان کانسار آهن گل‌گهر هستند بیشتر سنگ‌های دگرگونی درجه متوسط در حد رخساره آمفیبولیت با سن پالئوزوئیک پیشین هستند.

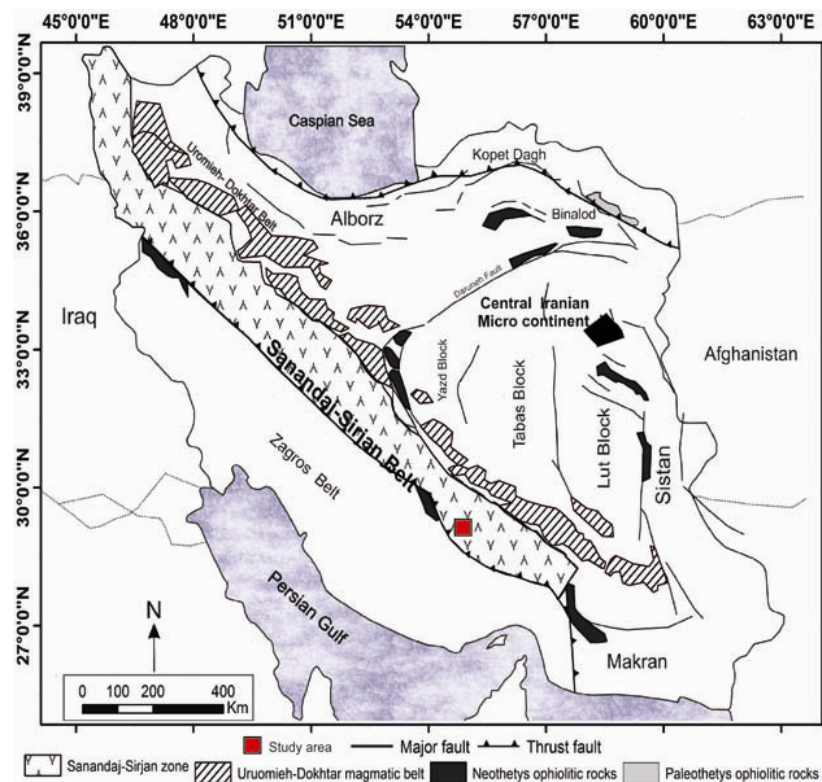
نمونه‌برداری و روش بررسی

بیش از ۳۲۵ نمونه سطحی از گودال معدن و ۵۰۰ نمونه از مغزه‌های حفاری (نمونه‌های کانی‌سازی و دگرگونی) به منظور بررسی‌های کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانی‌نگاری و تجزیه بار ریزپردازش الکترونی (EMP) جمع آوری شد. در این پژوهش، ۲۱۱ تجزیه EMP مربوط به کانی کلریت در ۲۷ مقطع نازک صیقل مربوط به سنگ‌شناسی‌های مختلف انجام شد. ترکیب شیمیایی بیشتر نمونه‌ها (۱۵۰ نقطه) توسط ابرپردازنده الکترونی مدل JEOL JXA8900 در دانشگاه نوادا، لاس‌وگاس آمریکا، به دست آمد. تجزیه عناصر در شرایط ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ kV، جریان ۱۰ nA و قطر باریکه $10 \mu\text{m}$ و زمان شمارش ۱۰ تا ۵۰ ثانیه انجام شد. بخشی از تجزیه‌ها (۶۱ نقطه) در موسسه تحقیقاتی زمین‌شناسی اورانیوم پکن با استفاده از دستگاه ریزپردازنده الکترونی JEOL JXA-8100، با ولتاژ شتاب دهنده ۲۰ kV، جریان باریکه ۱۰ nA و قطر باریکه $2 \mu\text{m}$ انجام شد. زمان شمارش برای همه عناصر ۲۰ ثانیه و حد آشکار سازی ۰/۰۱ درصد بود.

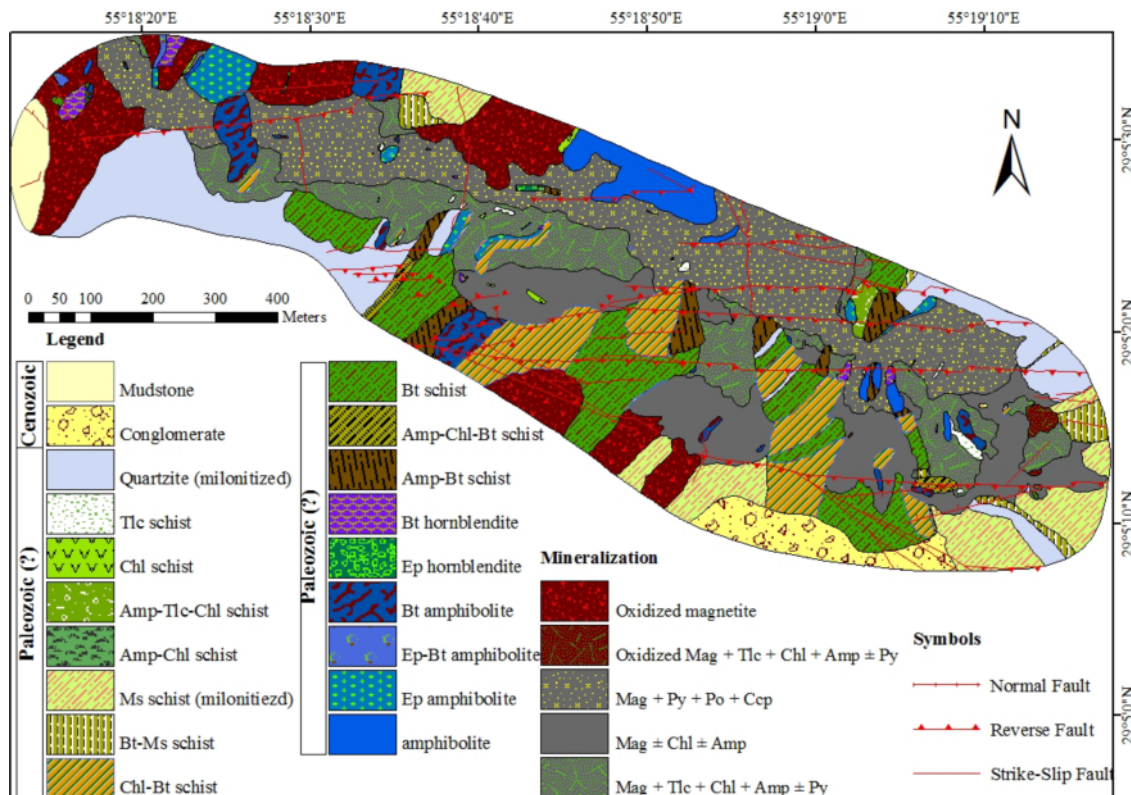
سنگ‌نگاری مجموعه سنگ‌های دربردارنده کلریت در منطقه

معدنی گل‌گهر

از آنجاکه کلریت در طیف وسیعی از انواع سنگ‌های منطقه شامل انواع پهنه‌های کانی‌سازی، کلریت شیت، آمفیبولیت فاقد فلدسپار و میکا شیت‌ها حضور دارد، برای درک بهتر ترکیب شیمیایی کلریت، این سنگ‌ها به اختصار بررسی می‌شوند. بر اساس مجموعه کانیایی همراه با مگنتیت، پهنه‌بندی کانی‌سازی در منطقه صورت گرفت (شکل ۲). این پهنه‌ها عبارتند از:



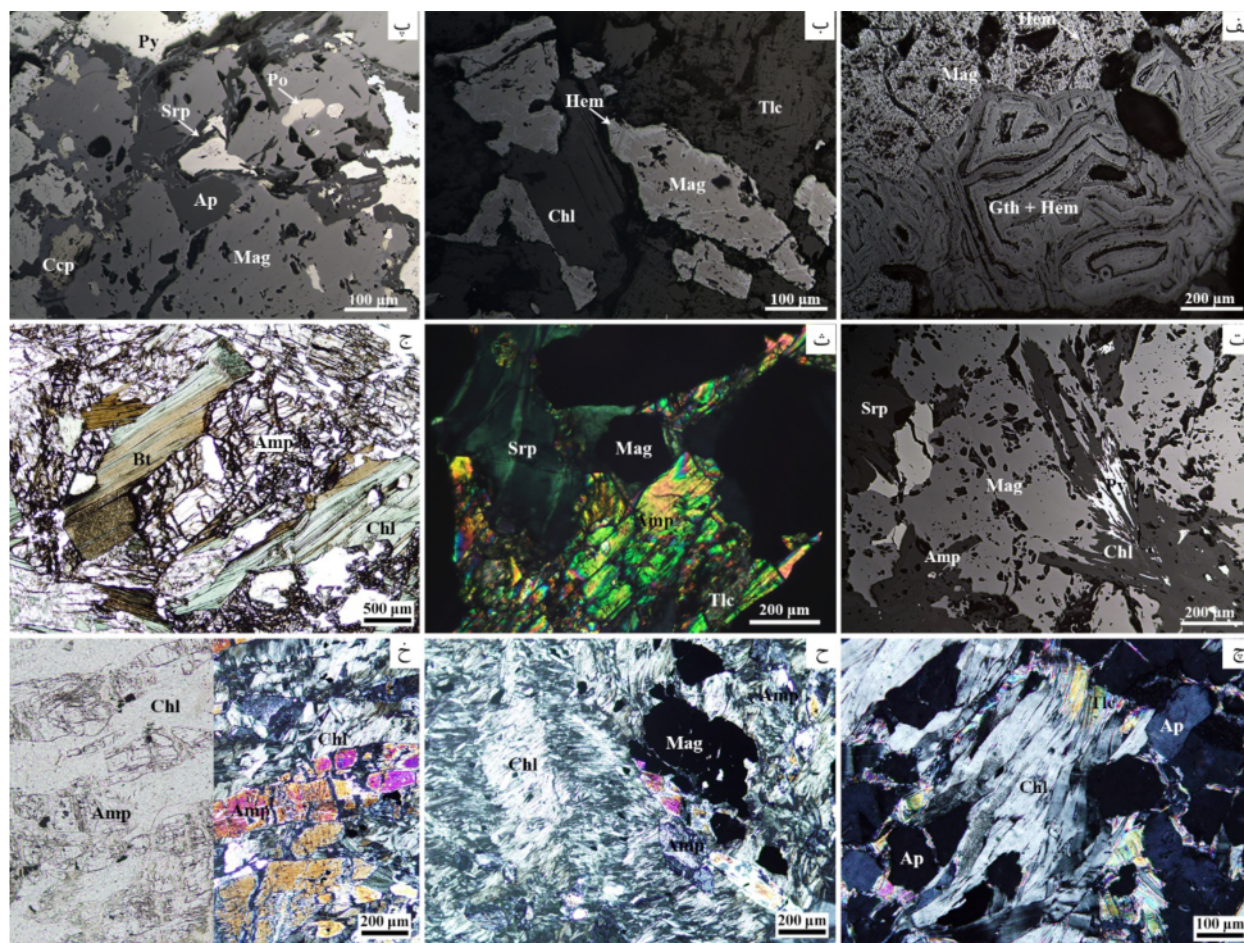
شکل ۱ موقعیت معدن گل‌گهر در پهنه سنندج-سیرجان [۱۱].



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی و کانی‌سازی تهیه شده از گودال معدن شماره ۱ گل‌گهر با مقیاس ۱:۵۰۰. Tlc = طلق، Chl = کلریت، Amp = آمفیبول، Ms = مسکویت، Bt = بیوتیت، Ep = اپیدوت، Mag = مگنتیت، Py = پیریت، Po = پیروتیت، Ccp = کالکوپیریت (علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۳۰]).

۲- پهنه کانی‌سازی مگنتیت اکسید شده + طلق + کلریت + آمفیبول \pm پیریت که با وسعت خیلی کم تنها در قسمت شرقی گودال (پله ۱۳) رخنمون دارد (شکل ۲). مگنتیت اکسید شده به صورت توده‌ای یا پراکنده داخل باطله است. این پهنه شامل کانه‌های اولیه‌ی مگنتیت (به‌طور متوسط ۴۰-۴۵٪) و به مقدار کم پیریت است. کانه‌های ثانویه شامل هماتیت و گوتیت هستند. تبدیل مگنتیت به هماتیت (مارتیت) تا حدود ۳۰٪ است. باطله‌ها به‌طور متوسط شامل ۳۰-۳۵٪ طلق، ۱۰-۱۵٪ کلریت، و ۱۰-۱۵٪ آمفیبول است. سرپانتین و کلسیت نیز در مقادیر متفاوت وجود دارند. بافت‌های مشاهده شده شامل بافت مارتیتی و دانه‌ای است (شکل ۳ ب).

۱- پهنه کانی‌سازی مگنتیت اکسید شده: که به صورت پهنه گوسان با گسترش نسبتاً قابل ملاحظه در بخش غربی معدن رخنمون دارد. این کانی‌سازی به صورت توده‌ای است (شکل ۲). کانه‌های اولیه شامل ۷۵-۸۰٪ مگنتیت و به مقدار بسیار ناچیز پیریت هستند. کانه‌های ثانویه شامل ۱۵-۲۰٪ هماتیت و در حدود ۱۰٪ گوتیت و لیمونیت است. باطله‌های کلریت و طلق با مقادیر متغیر در فضای بین کانه‌ها حضور دارند. در اثر اکسایش، پیریت به هماتیت و مگنتیت به هماتیت (بافت مارتیت) تبدیل شده است. میزان مارتیتی شدن از کمتر از ۱۰٪ تا بیش از ۷۰٪ متغیر است. بافت‌های مشاهده شده در این پهنه شامل بافت، دانه‌ای، مارتیت و کلوفرم است (شکل ۳ الف).



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از پهنه‌های کانی‌سازی. الف) بافت کلوفرم و مارتیت در مگنتیت اکسید شده. ب) مگنتیت مارتیتی شده، کلریت و طلق با بافت دانه‌ای. پ) مگنتیت، پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت و باطله‌ی آپاتیت و سرپنتین. ت) پهنه کانی‌سازی مگنتیت \pm کلریت \pm آمفیبول. ث) ترمولیت، سرپانتین و طلق در فضای بین دانه‌های مگنتیت. ج) تبدیل بیوتیت به کلریت طی دگرگونی برگشتی (PPL). چ) کانی آپاتیت در کلریت شایست در راستای شایست‌وارگی (XPL). ح) حالت موجی در کلریت‌های آمفیبول-کلریت شایست که نشان دهنده دو فاز دگرشکلی D_1 و D_2 است، آمفیبول‌ها پسازمین ساختی هستند (XPL). خ) ستون‌های آمفیبول به موازات شایست‌وارگی کلریت (همزمان با زمین ساخت) در آمفیبول-کلریت شایست (XPL و PPL). Chl = کلریت، Tlc = طلق، Amp = آمفیبول، Mag = مگنتیت (علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۳۰]).

بر اساس بازدیدهای صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، سنگ‌های میزبان کانی‌سازی شامل انواع میکا شیست‌ها، طلق شیست، کلریت شیست، آمفیبولیت و آمفیبولیت فاقد فلدسپار هستند. میکاشیست‌ها بیشتر در پله‌های بالایی معدن رخنمون دارند، در حالی‌که آمفیبولیت‌ها در پله‌های مختلف به‌ویژه در پله‌هایی پایینی معدن به صورت رخنمون‌های کوچک درگیر با کانی‌سازی هستند (شکل ۲) کلریت درسنگ‌های مختلف دگرگونی (شیست و آمفیبولیت فاقد فلدسپار) بیشتر به صورت کانی‌تانویه با چندرنگی ضعیف سبز و رنگ تداخلی غیرعادی گاهی وجود دارد که از تبدیل بیوتیت و آمفیبول شکل‌گرفته است (شکل ۳ ج). در کلریت شیست‌های مرز بین کانی‌سازی و سنگ‌های دگرگونی، کلریت به عنوان کانی اولیه و اصلی وجود دارد. کلریت شیست با شیستوارگی خوب تا ضعیف، به رنگ سبز تا سبز تیره معمولاً به‌صورت هاله‌هایی در مرز کانی‌سازی دیده می‌شود که سنگ‌مادر این شیست‌ها پهنه‌های دگرسان پیش از دگرگونی هستند و گاه به صورت رخنمون‌های کوچک و پراکنده در ماده معدنی دیده می‌شود که تا ۵٪ مگنتیت به‌صورت پراکنده در زمینه وجود دارد و از ویژگی عمده‌ی آن‌ها وجود مقادیر قابل ملاحظه آپاتیت است (شکل ۳ چ). بسته به حضور سایر کانی‌های فرومینیزین کلریت‌شیست‌های منطقه عبارتند از: آمفیبول-کلریت‌شیست، آمفیبول-طلق-کلریت‌شیست و کلریت‌شیست. بافت غالب در این سنگ‌ها ورقه شکستی، نخ شکستی و شکفته بلوری است. کلریت با اندازه ۰/۰۵-۱/۵ میلی‌متر و رنگ تداخلی قهوه‌ای-آبی نفتی دارای جهت‌یافتگی ترجیحی بوده که حالت موجی در آنها نشان دهنده دو فاز دگرشکلی است (شکل ۳ ح). آمفیبول به صورت بلورهای ستونی و کشیده بدون چندرنگی باندازه ۰/۳-۳ میلی‌متر در راستای شیستوارگی (همزمان با زمین ساخت) و یا قطع کننده شیستوارگی (پس از زمین ساخت) از نوع ترمولیت است (شکل ۳ خ). آپاتیت، کلسیت، اپیدوت، مگنتیت و پیریت از سایر کانی‌های موجود در کلریت شیست‌ها هستند.

شیمی کانی کلریت

به منظور بررسی ترکیب شیمیایی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، نمونه‌هایی از پهنه‌های مختلف کانی‌سازی، سنگ‌های دگرگونی و سنگ‌های دگرسان دگرگون شده (مرز کانی‌سازی و دگرگونی) انتخاب به روش ریزپردازش الکترونی تجزیه شد. خلاصه ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های انتخاب شده در (جدول

۳- زون کانی‌سازی مگنتیت + پیریت + پیروتیت + کالکوپیریت (MPPC): (زون پرسولفید با پیریت بیش از ۵٪) با وسعت زیاد در دیواره شمالی معدن (پله ۱۳) رخنمون دارد (شکل ۲). کانی‌سازی آن به‌صورت توده‌ای، متراکم و چگال بوده و مقادیر متغیر پیریت (از ۵٪ تا بیش از ۴۰٪) است. کانه‌های اولیه به‌طور متوسط شامل ۷۰-۷۵٪ مگنتیت، ۱۵-۲۰٪ پیریت، ۳-۵٪ پیروتیت و به مقدار کم (کمتر از ۱٪) کالکوپیریت است. ۵٪ باقیمانده شامل کانی‌های باطله آپاتیت، سرپانتین، کلریت، طلق، کلسیت و دولومیت می‌شود. بافت‌های غالب این پهنه شامل دانه‌ای، جانشینی، کناره‌واکنشی، کناره‌ای، خلیجی و تنش آواری است. پیروتیت در بیشتر موارد به مجموعه پیریت و اکسید آهن تبدیل شده و تنها بقایایی از آن در مرکز باقی مانده است، گاه این تبدیل بسیار ناچیز و تنها در امتداد لبه‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها صورت گرفته است (شکل ۳ پ).

۴- پهنه کانی‌سازی مگنتیت \pm کلریت \pm آمفیبول: که به‌صورت توده‌ای بیشترین برونزد را در دیواره جنوبی بخش شرقی معدن (به‌ویژه پله ۱۳) دارد. کانه‌های اولیه شامل ۸۰-۸۵٪ مگنتیت، و ۱-۴٪ پیریت است. پیروتیت و کالکوپیریت به مقدار کم وجود دارند. به‌طور متوسط ۱۵٪ سنگ را کانی‌های باطله تشکیل می‌دهند که شامل مقادیر متغیر آمفیبول (ترمولیت-اکتینولیت)، کلریت، طلق، سرپانتین، کلسیت و کوارتز است (شکل ۳ ت).

۵- پهنه کانی‌سازی مگنتیت + تالک + کلریت + آمفیبول \pm پیریت (MTCA): که به‌صورت توده‌ای و پراکنده در باطله، بیشترین برونزد را در قسمت مرکزی معدن دارد (شکل ۲). کانه‌های اولیه‌ی به‌طور متوسط شامل ۳۵-۴۰٪ مگنتیت، ۱-۴٪ پیریت، پیروتیت و به مقدار بسیار ناچیز کالکوپیریت است. باطله شامل به طور متوسط ۱۵-۲۰٪ آمفیبول (ترمولیت-اکتینولیت)، ۱۰-۱۵٪ کلریت، ۱۰-۱۵٪ طلق، ۵-۱۰٪ بیوتیت، ۵-۱۰٪ کلسیت و ۲-۳٪ سرپانتین است که البته این مقادیر به شدت در نمونه‌ها متغیر است (شکل ۳ ث).

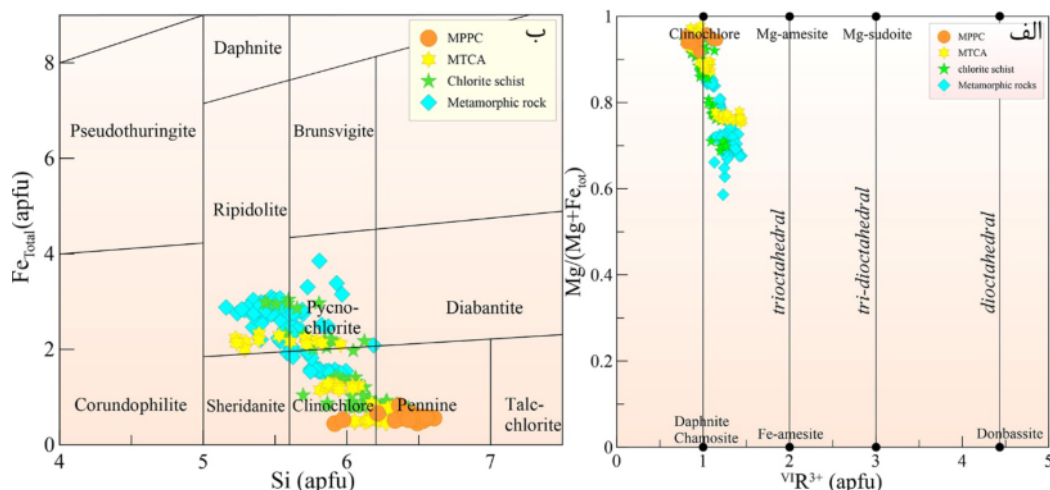
با توجه به اینکه تفاوت پهنه‌های نام برده اغلب در مقدار کانی‌های سولفیدی، سیلیکاتی و یا اکسایش مگنتیت است، به منظور بررسی ترکیب شیمیایی کلریت، انتخاب نمونه‌ها از پهنه‌های کانی‌سازی MPPC و MTCA انجام گرفت که اکسایش در آن‌ها کمتر صورت گرفته است و به ترتیب بیشترین مقدار کانی‌های سولفیدی سیلیکاتی را دارا هستند.

۱) آورده شده است. تا کنون طرح‌های رده‌بندی گوناگونی براساس ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی کلریت ارائه شده است [۹، ۳۱-۳۹]. فرمول شیمیایی کلریت‌ها بر اساس ۱۴ اکسیژن محاسبه شده است. بر اساس رده‌بندی مرجع [۹]، کلریت‌های منطقه از نوع کلریت $(X_{Mg} + X_{Fe_{tot}} < X_{Al})$ و با نام Mg -کلریت هستند. در نمودار رده‌بندی $Mg/(Mg+Fe)$ نسبت به R^{3+} ، کلریت‌ها از نوع سه هشت وجهی هستند که ترکیب آنها می‌تواند به صورت یک ترکیب خطی کلینو کلر-شاموزیت بیان شود (شکل ۴ الف). در نمودار رده‌بندی Fe_{total} نسبت به Si (apfu) [۴۰]، کلریت‌های مربوط به پهنه کانی‌سازی مگنتیت + پیریت + پیروتیت + کالکوپیریت

(MPPC) به جز دو تجزیه که در گستره کلینوکلر واقع شده‌اند، از نوع پننین هستند. کلریت‌های مربوط به پهنه کانی‌سازی مگنتیت + طلق + کلریت + آمفیبول \pm پیریت (MTCA) از نوع پننین و کلینوکلر هستند. تنها در نمونه 1164-86 که از نظر کانی‌شناسی ویژگی‌های اسکارن را نشان می‌دهد، کلریت‌ها از نوع پیکنوکلر و رپیدولیت هستند. کلریت‌های مربوط به کلریت شپست‌ها گستره ترکیبی وسیع‌تری از پننین، کلینوکلر، پیکنوکلریت تا رپیدولیت را نشان می‌دهند و سرانجام کلریت‌های مربوط به سنگ‌های دگرگونی منطقه (شپست‌ها و آمفیبولیت‌های فاقد فلدسپار) از نوع رپیدولیت هستند (شکل ۴ ب).

جدول ۱ خلاصه ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های انتخابی برای تجزیه با ریزپردازنده الکترونی در معدن شماره ۱ گل‌گهر.

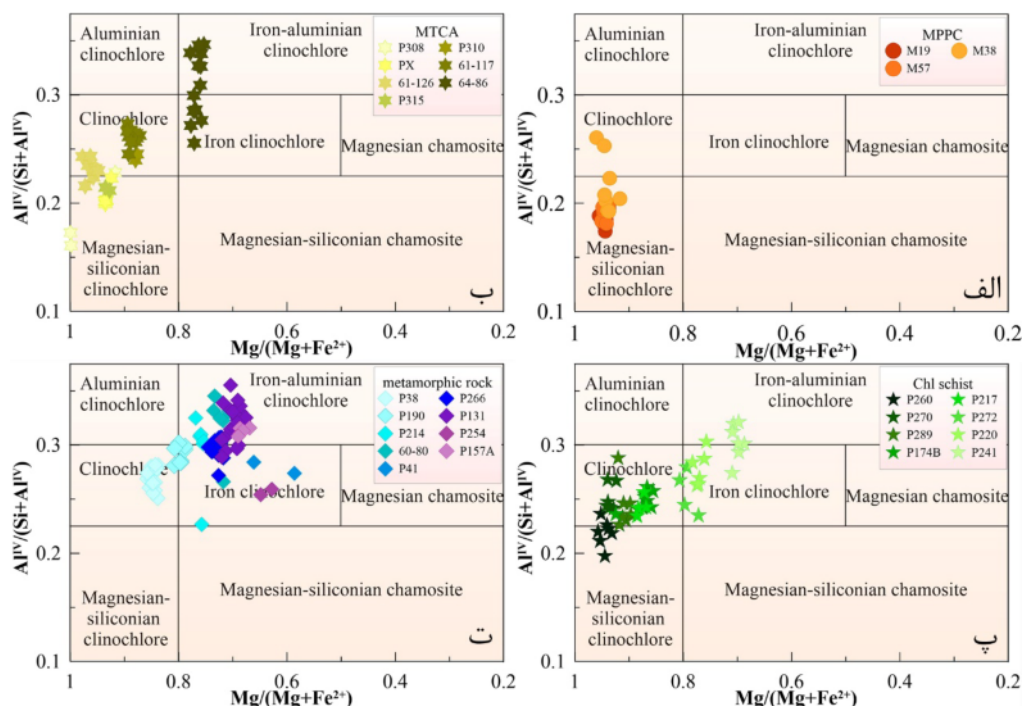
Sample No.	Unit	Mineral assemblage
M19	MPPC	magnetite + pyrrhotite + pyrite + chlorite + serpentine + patite + Althausite
M57	MPPC	magnetite + pyrite + chlorite + serpentine + siderite + pyrrhotite + chalcopyrite + apatite
M38	MPPC	magnetite + pyrite + chlorite + siderite + calcite
P308	MTCA	ilmenite + magnetite + chlorite
PX	MTCA	magnetite + pyrite + chlorite + talc + chalcopyrite + Quartz
1161-126	MTCA	magnetite + chlorite + serpentine + olivine
P315	MTCA	ilmenite + magnetite + chlorite
P310	MTCA	magnetite + tremolite + chlorite
1161-117	MTCA	magnetite + pyrite + ilmenite + chlorite + tremolite + apatite
1164-86	MTCA (Skarn)	magnetite + pyrite + ilmenite + chlorite + Mg-calcite + apatite
P260	Chl schist	chlorite + apatite + magnetite
P270	Chl schist	chlorite + apatite + ilmenite + magnetite
P289	Amp-Chl schist	amphibole + chlorite + apatite + magnetite + ilmenite
P174B	Chl schist	chlorite + talc + magnetite + apatite
P217	Tlc-Chl schist	chlorite + talc + amphibole + magnetite + ilmenite
P272	Tlc-Chl schist	amp + chlorite
P220	Amp-Chl schist	amphibole + chlorite + biotite + Magnetite + ilmenite
P241	Amp-Chl schist	amphibole + chlorite + magnetite
P38	Hornblendite, Chl schist	chlorite + amphibole + magnetite + ilmenite + apatite
P190	Bt hornblendite	amphibole + biotite + chlorite + magnetite + ilmenite + apatite
P214	Bt hornblendite	amphibole + biotite + chlorite + magnetite + tourmaline + apatite
1160-80	Skarn, hornblendite	amphibole + biotite + chlorite + magnetite + calcite + quartz + pyrite + chalcopyrite
P41	Tur hornblendite	amphibole + biotite + tourmaline + epidote + chlorite + ilmenite + rutile
P266	Ep hornblendite	amphibole + epidote + biotite + chlorite + sphene
P131	Amp-Chl-Bt schist	biotite + amphibole + plagioclase + chlorite + rutile + ilmenite + epidote
P254	Bt schist	biotite + K-feldspar + albite + allanite + chlorite + pyrite + tourmaline
P157A	Bt Amphibolite	amphibole + biotite + plagioclase + ilmenite + apatite



شکل ۴ رده‌بندی شیمیایی کلریت‌ها (الف) نمودار $Mg/(Mg+Fe)$ نسبت به IVR^{3+} [۳۵]. کلریت‌های منطقه ماهیت سه هشت وجهی را نشان می‌دهند. (ب) قرارگیری کلریت‌ها در نمودار Fe_{Total} نسبت به Si [۴۰].

این دو نمونه در مرکز کانی‌سازی قرار داشته و گسترش بسیار محدودی دارند. در واقع تشکیل این کلریت‌ها از سیال کانه‌ساز با کمترین دخالت سنگ‌های میزبان باعث شده است که از نظر ترکیبی بیشترین شباهت را با پهنه MPPC داشته باشند. کلریت‌های مربوط به سنگ‌های دگرگونی میزبان کانی‌سازی (بیوتیت‌شست و آمفیبولیت فاقد فلدسپار) بیشترین مقدار Fe و Al را دارا هستند (شکل ۵ الف-ت).

برای درک بهتر تغییرات ترکیب شیمیایی کلریت از نمودار $Al^{IV}/(Si+Al^{IV})$ نسبت به $Mg/(Mg+Fe)$ اصلاح شده [۳۹] استفاده شد. کلریت‌های مربوط به پهنه MPPC بیشترین مقدار Mg و کمترین مقدار Al^{IV} را دارا هستند. با ورود به پهنه MTCA بر مقدار آهن کلریت افزوده شده است. این حالت در کلریت شست‌ها نیز دیده می‌شود. البته نمونه‌های P270 و P260 که از نظر کانی‌شناسی تنها شامل کلریت و آپاتیت هستند مانند پهنه MPPC، مقدار Mg بالاتری دارند.



شکل ۵ نمودار $Al^{IV}/(Si+Al^{IV})$ نسبت به $Mg/(Mg+Fe)$ اصلاح شده [۳۹] برای مقایسه ترکیب کلریت‌ها در نمونه‌های مختلف. (الف) پهنه MPPC، (ب) پهنه MTCA، (پ) کلریت‌شست، (ت) سنگ‌های دگرگونی.

زمین‌دماسنجی کلریت

تغییرات ترکیبی بدون موازنه شیمیایی کلریت اطلاعات بسیار مفیدی در مورد شرایط فیزیکیوشیمیایی به ویژه دمای تشکیل فراهم می‌کند [۴۳]. کلریت گستره وسیعی از تغییرات ترکیبی با سه جانشینی اصلی نشان می‌دهد ($\text{Fe}^{+2} \leftrightarrow \text{Mg}$ ، چرماک $\text{Si}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}) \leftrightarrow \text{Al}^{\text{IV}}\text{Al}^{\text{VI}}$ و دوسه هشت‌وجهی $3(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}) \leftrightarrow 2\text{Al}^{\text{IV}} + \square$ که \square = فضای خالی هشت‌وجهی است) که حساس به شرایط فشار-دما، و همچنین ترکیب کلی و ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی محیط هستند [۵، ۶]. [۴۴] نشان دادند که کاهش اصولی در نسبت فضاهای خالی هشت‌وجهی، افزایش در مقدار Mg و Fe کل و کاهش اندک در مقدار Al چارووجهی (Al^{IV}) منجر به افزایش دمای تشکیل می‌شود. مشخص شده است که Al^{IV} رابطه منفی با فضای خالی هشت‌وجهی و رابطه مثبت با افزایش دمای تشکیل دارد [۴۵]. تاکنون معادلات زمین‌دماسنجی مختلفی توسط پژوهشگران مختلف [۱، ۷، ۳۴، ۴۱، ۴۶-۴۹] ارائه شده است. کریم‌پور و همکارش [۵۰] با توجه به تفاوت دمایی رابطه ارائه شده در مرجع [۴۶] و ریزدماسنجی، رابطه را برای کلریت‌های منطقه اصلاح کردند. برای تعیین دمای تشکیل کلریت‌های منطقه استفاده شد:

$$TX_{97-\text{Al}^{\text{IV}}} (^{\circ}\text{C}) = 160.99 * \left((\text{Al}_{028}^{\text{IV}}) - 1.33 * \left(0.31 - \frac{\text{Fe}}{(\text{Fe} + \text{Mg})} \right) \right) - 61.92 \text{ if } \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg}) < 0.31$$

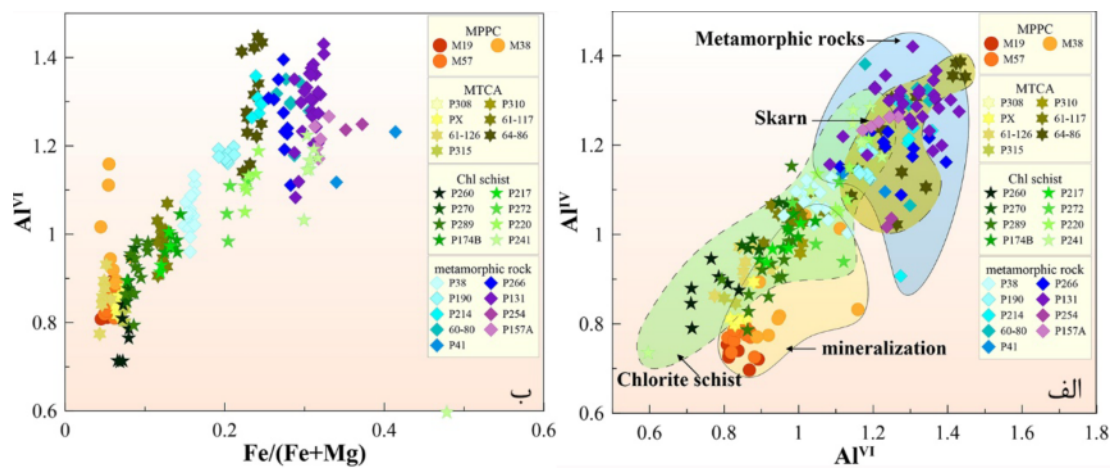
$$TX_{97-\text{Al}^{\text{IV}}} (^{\circ}\text{C}) = 160.99 * \left((\text{Al}_{028}^{\text{IV}}) - 1.33 * \left(\frac{\text{Fe}}{(\text{Fe} + \text{Mg})} - 0.31 \right) \right) - 61.92 \text{ if } \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg}) > 0.31$$

این بر اساس، دمای تشکیل کلریت در پهنه MPPC بین 271°C تا 388°C (متوسط 301°C)، در پهنه MTCA بین 300°C تا 415°C (متوسط 345°C)، در کلریت شایست بین 275°C تا 333°C (متوسط 333°C) و در سنگ‌های دگرگونی بین 245°C تا 397°C (متوسط 345°C) است (شکل‌های ۸ الف، ت). البته در استفاده از داده‌های دماسنجی کلریت به روش تجربی باید بسیار احتیاط کرد. زمین‌دماسنجی‌های کلریت که در آن مقادیر دما از روش‌های تجربی به دست می‌آید ممکن است دمای تشکیل را به درستی به دست ندهند [۱، ۶]. افزایش مقدار Al^{IV} در کلریت می‌تواند به دلیل هم دما و هم به خاطر افزایش نسبت $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ باشد که مشخص نیست در نمونه‌های منطقه کدام عامل غالب است، البته کریندیوتیس و همکارش [۴۲] یادآور شدند که فشار بالا ممکن است تاثیر قابل توجهی بر جانشینی $\text{Al}^{\text{IV}}/\text{Si}$ داشته باشد.

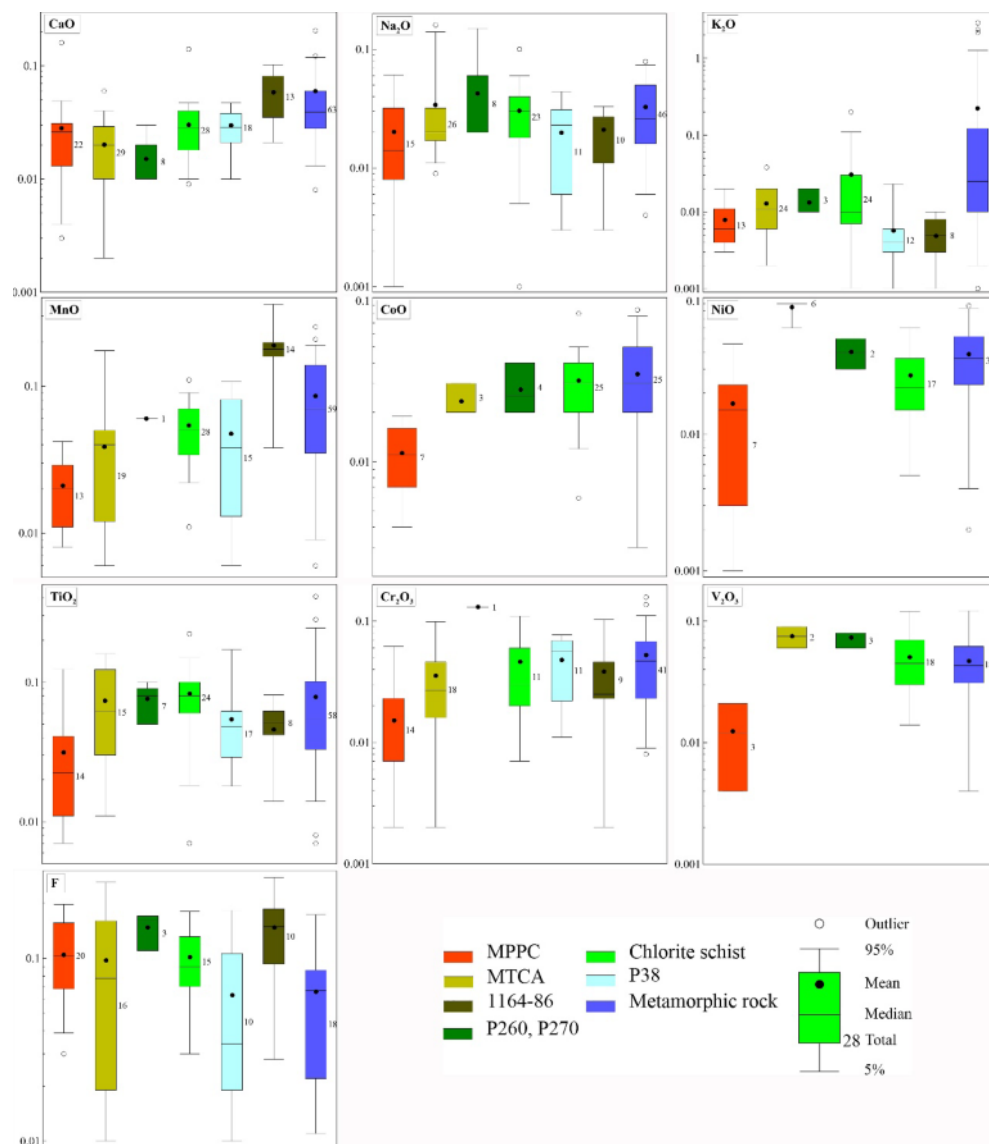
نسبت‌های $\text{Al}^{\text{IV}}/\text{Al}^{\text{VI}}$ در همه نمونه‌ها نزدیک به یک است (شکل ۶ الف) که تعادل بار ناشی از جانشینی $\text{Al}^{\text{IV}}/\text{Si}$ به وسیله جانشینی Al^{VI} یا Fe یا Mg در لایه هشت‌وجهی را مطرح می‌کند [۴۱]. نمودار Al^{IV} نسبت به $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ (شکل ۶ ب) نشان می‌دهد که با افزایش Al^{IV} ، $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ افزایش می‌یابد. این مسئله را می‌توان به تغییر اندازه کاتیون و نزدیکی ساختاری در کلریت نسبت داد [۴۲]. جانشینی Si توسط Al^{IV} جانشینی Mg توسط یون بزرگتر Fe را ممکن می‌سازد.

بررسی عناصر فرعی در ساختار کلریت

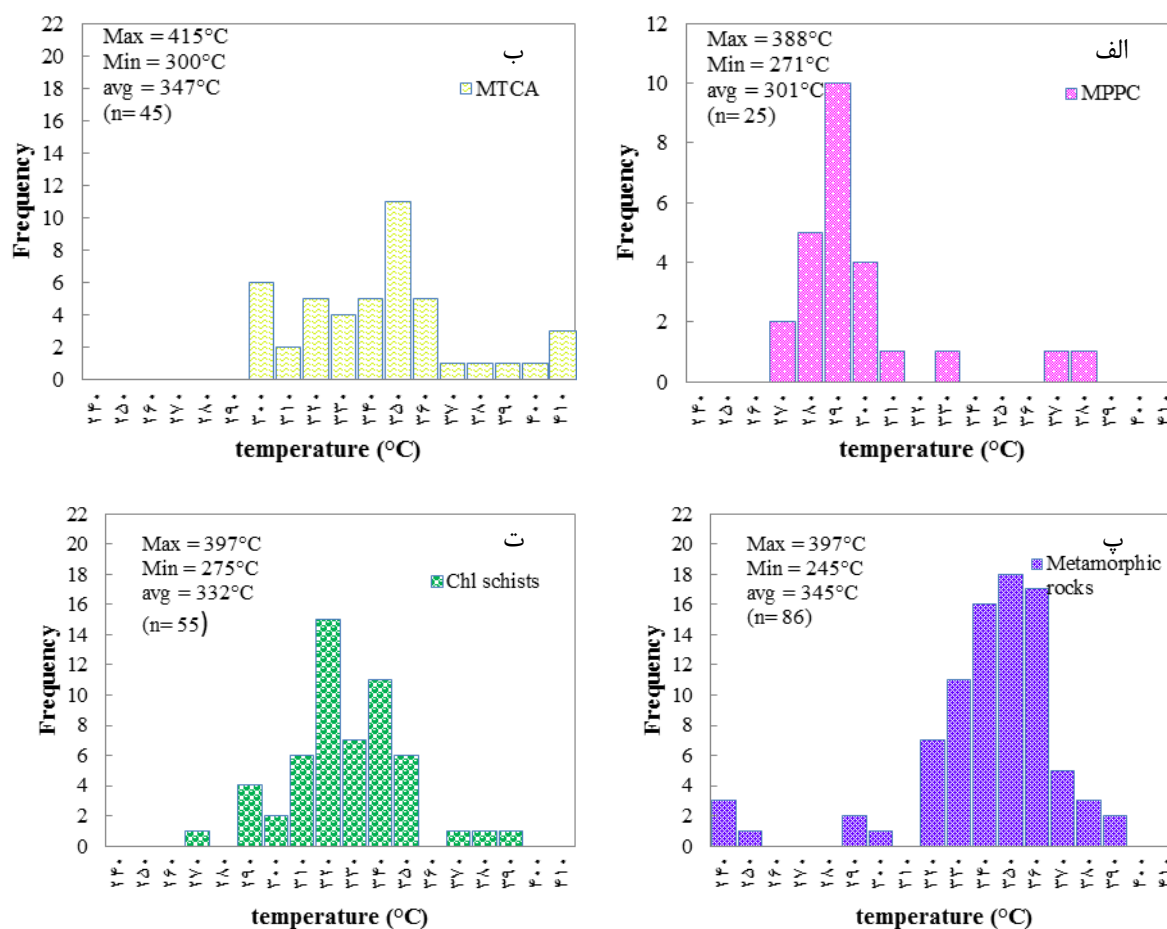
در شکل ۷ عناصری که به صورت فرعی در ساختار کلریت وجود دارند در انواع سنگ‌های منطقه بررسی و مقایسه شده‌اند. باید توجه داشت که به خاطر تفاوت در حد آشکارسازی دو دستگاه تجزیه (آمریکا و چین)، حد پایینی نمونه‌ها چندان قابل اعتماد و گویا نیست و در اینجا بیشتر حد انتهایی و گستره تغییرات مد نظر است. نمونه‌های P260، P270، P38 و 1164-86 به دلیل تفاوت‌هایی که با سنگ‌های هم‌گروهی خود داشتند به طور جداگانه در نمودارها نشان داده شده‌اند. نمونه P270 و P260 کلریت شایست‌هایی هستند که در ماده معدنی قرار دارند و تنها شامل کلریت، آپاتیت، مگنتیت و پیریت هستند. نمونه P38 در مرز کانی‌سازی و سنگ دگرگونی آمفیبولیت فاقد فلدسپار هستند و ویژگی هر دو نوع سنگ را نشان می‌دهند. کانی‌سازی در نمونه 1164-86 به صورت اسکارن است و Mg-کلیست فراوان در آن وجود دارد. تقریباً در همه عناصر به جز F، گستره تغییرات و همچنین میانه و متوسط آن‌ها در سنگ‌های دگرگونی بیشتر از پهنه‌های کانی‌سازی و همچنین کلریت شایست‌هاست و کمترین مقدار مربوط به پهنه کانی‌سازی MPPC است. بالا بودن مقدار CaO و MnO در نمونه 1164-86 ناشی از ترکیب کلسیتی-دولومیتی سنگ اولیه است که دستخوش دگرتهادی سیال‌های کانه‌دار قرار گرفته است. متوسط مقدار TiO_2 ، CoO ، NiO ، V_2O_3 و Cr_2O_3 در پهنه MPPC به ترتیب ۰/۰۱۷، ۰/۰۱۱، ۰/۰۳۱، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۱۲ درصد وزنی (wt%) و در سنگ‌های دگرگونی ۰/۰۳۹، ۰/۰۳۴، ۰/۰۷۸، ۰/۰۵۲ و ۰/۰۴۷ درصد وزنی است. این عناصر با دور شدن از پهنه کانی‌سازی به سمت کلریت شایست و سرانجام میکا شایست و آمفیبولیت افزایش می‌یابند. بیشترین مقدار فلوئور در کلریت مربوط به پهنه MPPC است و با افزایش فاصله از کانی‌سازی کاهش می‌یابد.



شکل ۶ الف) نمودار Al^{IV} نسبت به Al^{VI} . ب) نمودار Al^{IV} نسبت به $Fe/(Fe+Mg)$ مربوط به کلریت‌های معدن گل‌گهر.



شکل ۷ نمودار جعبه و خط برای عناصر فرعی کلریت در انواع سنگ‌های موجود در گودال معدن شماره ۱ گل‌گهر بر حسب درصد وزنی (wt%).



شکل ۸. نمودار ستونی مربوط به دماسنجی کلریت‌های منطقه معدنی گل‌گهر در الف) کلریت‌های پهنه MPPC، ب) کلریت‌های پهنه MTCA، پ) کلریت‌های مربوط به کلریت شیست و ت) کلریت‌های سنگ‌های دگرگونی.

برداشت

آمفیبولیت فاقد فلدسپار اغلب به صورت ثانویه در اثر دگرگونی قهقرایی بیوتیت و کلریت به وجود آمده است. همه کلریت‌ها (پهنه‌های کانی‌سازی، سنگ‌های دگرگونی آمفیبولیت فاقد فلدسپار، شیست و کلریت شیست) از نوع سه هشت وجهی (کلینو کالر - شاموزیت) هستند. کلریت‌های مربوط به پهنه کانی‌سازی MPPC از نوع پنین هستند. کلریت در پهنه کانی‌سازی MTCA بیشتر از نوع پنین و کلینوکلر است. کلریت‌های مربوط به کلریت شیست‌ها گستره ترکیبی وسیعتری از پنین، کلینوکلر، پیکنوکلریت تا رپیدولیت را نشان می‌دهند. سرانجام کلریت‌های سنگ‌های دگرگونی منطقه (شیست‌ها و آمفیبولیت فاقد فلدسپار) از نوع رپیدولیت هستند. در ترکیب شیمیایی کلریت از پهنه‌های کانی‌سازی به سمت سنگ‌های دگرگونی از مقدار Mg کاسته و بر مقدار Al^{IV} و Fe

ذخیره سنگ آهن گل‌گهر در سنگ‌های دگرگونی که در حد رخساره شیست سبز و آمفیبولیت دگرگون شده‌اند قرار دارد. در بررسی‌های کانی‌نگاری، بر اساس مجموعه کانی‌های همراه با کانه اصلی مگنتیت، ۵ پهنه کانی‌سازی تشخیص داده شد، علاوه بر مگنتیت شامل کانه‌های پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت، سیدریت و کانی‌های آپاتیت، سرپنتین، طلق، کلریت، آمفیبول، کلسیت، دولومیت و کوارتز نیز هستند که مقادیر آن‌ها بسته به پهنه‌های مختلف کانی‌سازی متغیر است. کلریت در کلریت‌شیست که در مرز بین کانی‌سازی و سایر سنگ‌های دگرگونی و یا درون کانی‌سازی منطقه معدنی گل‌گهر وجود دارد به صورت اولیه بوده و معمولاً همراه با ترمولیت، طلق، آپاتیت، پیریت و مگنتیت است. کلریت در شیست‌ها و

احتمال تاثیر ترکیب سنگ میزبان بر مقدار Al^{IV} را بیشتر قوت می‌بخشد.

قدردانی

این مقاله در ارتباط با طرح شماره ۳، به شماره ۲۹۲۰۵/۳ مورخ ۹۲/۲/۲۰، دانشگاه فردوسی مشهد است. از شرکت صنعتی و معدنی گل‌گهر به ویژه مهندس مسعود عسکری برای فراهم آوردن شرایط نمونه‌برداری و تهیه بخشی از مقاطع و همچنین جناب فن گوانگ از موسسه تحقیقاتی زمین‌شناسی اورانیوم پکن برای انجام بخشی از تجزیه‌های ریزپردازش الکترونی سپاسگزاریم.

مراجع

- [1] De Caritat P., Hutcheon I., Walshe J., "Chlorite geothermometry: a review", Clays and Clay Minerals 41 (1993).
- [2] Vidal O., Parra T., Trotet F., "A thermodynamic model for Fe-Mg aluminous chlorite using data from phase equilibrium experiments and natural pelitic assemblages in the 100 to 600 C, 1 to 25 kb range", American journal of Science 301(6) (2001) 557-592.
- [3] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "Rock Forming Minerals: Layered Silicates Excluding Micas and Clay Minerals, Volume 3B", Geological Society of London, (2009).
- [4] Barnhisel R.I., Bertsch P.M., "Chlorites and hydroxy-interlayered vermiculite and smectite", Minerals in soil environments (mineralsinsoile) (1989) 729-788.
- [5] Inoue A., Kurokawa K., Hatta T., "Application of chlorite geothermometry to hydrothermal alteration in Toyoha geothermal system, southwestern Hokkaido, Japan", Resource Geology 60(1) (2010) 52-70.
- [6] Bourdelle F., Parra T., Beyssac O., Chopin C., Vidal O., "Clay minerals as geo-thermometer: A comparative study based on high spatial resolution analyses of illite and chlorite in Gulf Coast sandstones (Texas, USA)", American Mineralogist 98(5-6) (2013) 914-926.
- [7] Xie X., Byerly G.R., Ferrell Jr R.E., "Iib trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: crystal structure and rock composition constraints with implications to

افزوده می‌شود. در واقع کلریت‌هایی که مستقیم از سیال کانه‌ساز تشکیل می‌شوند بیشترین مقدار Mg را دارا هستند. با کاهش نسبت سیال به سنگ، Mg کاهش و Fe و Al^{IV} افزایش می‌یابد. نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ در کلریت از سنگ‌های دگرگونی (میزبان) به سمت کانی‌سازی افزایش می‌یابد؛ این روند افزایشی با نزدیک شدن به کانسار در بسیاری از ذخایر به ویژه در ذخایر سولفید توده‌ای در سنگ دیواره گزارش شده است [۵۱، ۵۲]. بالا بودن این نسبت در کلریت‌های منطقه هیچ شباهتی به کلریت‌های سازند آهن (ذخایر رسوبی آهن) ندارد، نسبت‌های پایین $Mg/(Mg+Fe)$ بیشتر در ارتباط با سازند آهن [۴۱، ۵۱، ۵۳] یا سنگ‌های فرامافیک [۵۲] است. بررسی‌های تجربی نشان داده است که نسبت‌های $Mg/(Mg+Fe)$ با افزایش fO_2 و fS_2 افزایش می‌یابد [۵۴، ۵۵] اما این تغییر ناشی از حضور بافرهای قوی اکسیدها و سولفیدها در سیستم‌های گرمایی، ممکن است محدود باشد. تغییرات در نسبت‌های $Fe/(Fe+Mg)$ در کلریت با نسبت‌های ترکیب سنگ ارتباط نزدیکی دارد [۵۶]. پایین بودن مقدار عناصر Co، Cr، Ni، Ti و V در پهنه‌های کانی‌سازی (به ویژه MPPC)، به دلیل شرکت این عناصر در سایر کانی‌های متبلور شده از محلول کانه‌ساز مانند مگنتیت، پیریت و پیروتیت است. تغییرات مقدار این عناصر در کلریت سایر سنگ‌ها به نسبت واکنش سنگ/آب بستگی دارد و تغییرات موضعی ترکیب سنگ میزبان نیز می‌تواند بر آن اثر بگذارد. بالاتر بودن مقدار فلئور در پهنه‌های کانی‌سازی نشان‌دهنده غنی بودن سیال کانه‌ساز از فلئور است. دمای تشکیل کلریت از $245^{\circ}C$ تا $415^{\circ}C$ متغیر است که این گستره دمای در رخساره شیت سبز قرار می‌گیرد. پهنه کانی‌سازی MPPC با دمای متوسط $301^{\circ}C$ کمترین دمای تشکیل را دارد، در سایر نمونه‌ها دمای تشکیل کلریت به طور متوسط $340^{\circ}C$ است. البته دمای به دست آمده با توجه به عوامل مختلفی موثر بر مقدار Al^{IV} قطعی نیست. بر این اساس، می‌توان گفت که کلریت‌های غنی از منیزیم در دمای کمتری نسبت به کلریت‌های غنی از آهن تشکیل شده‌اند. البته وسیع بودن گستره دمایی به دست آمده

- Deposit, Sirjan-Kerman*", Geosciences Scientific Quarterly Journal 61 (2006) 40-59 (in persian).
- [19] Babaki A., "Investigation on the model of iron mineralization at Gol Gohar iron deposit, Sirjan-Kerman" MSc thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran (in persian). (2004).
- [20] Mücke A., Golestaneh F., "The genesis of the Gol Gohar iron ore deposit (Iran)", Institut für Mineralogie und Kristallographie der Technischen Universität Berlin (1982) 193-212.
- [21] Hallaji A., "Mineralogy study of trace elements and the origin of Gol Gohar ore deposit", Tehran Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in persian). (1991).
- [22] Shahabpour J., "Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz", Journal of Asian Earth Sciences 24(4) (2005) 405-417.
- [23] Torabian S., "Mineralization and genesis of Gol Gohar 3 mine in the base of trace element distribution" MSc thesis, Tehran Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in persian). (2007).
- [24] Asghari G., "Genesis and formation of the Gol-Gohar iron ore deposit and its host rocks" MSc thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in persian) (2009).
- [25] Bayati Rad Y., "Evaluating the origin of Gol-Gohar iron ore deposit", MSc thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in persian). (2009).
- [26] Sheikholeslami M.-R., "Évolution structurale et métamorphique de la marge sud de la microplaque de l'Iran central: les complexes métamorphiques de la région de Neyriz (zone de Sanandaj-Sirjan)", PhD thesis, université de Brest, Brest, France (2002).
- [27] Ghalamghash J., Mirnejad H., "Dating report of Gol Gohar metamorphic complex", Tehran Padir Consulting Engineers Company, (2008).
- [28] Hajghanbari J., Mirnejad H., ghalamghash J., "age determination of Gol-Gohar iron deposit, based on Pb-Pb isotope method", 1th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Lorestan University, Iran (2011).
- [29] Sabzehi M., "Gol Gohar geological map 1:100000, Geological survey of Iran, Tehran" (1997).
- geothermometry*", Contributions to Mineralogy and Petrology 126(3) (1997) 275-291.
- [8] Krivovichev S.V., Armbruster T., Organova N.I., Burns P.C., Seredkin M.V., Chukanov N.V., "Incorporation of sodium into the chlorite structure: the crystal structure of glagolevite, Na (Mg, Al) 6 [Si3AlO10](OH, O) 8", American Mineralogist 89(7) (2004) 1138-1141.
- [9] Zane A., Weiss Z., "A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data", Rendiconti Lincei 9(1) (1998) 51-56.
- [10] Guggenheim S., Adams J., Bain D., Bergaya F., Brigatti M.F., Drits V., Formoso M.L., Galán E., Kogure T., Stanjek H., "Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) Nomenclature Committee for 2006", (2006).
- [11] Alavi M., "Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran", Geological Society of America Bulletin 103(8) (1991) 983-992.
- [12] Ljung S., "Geological report, Gole-e-Gohar iron ore project", Private report. Granges International Mining, Stockholm, (1976).
- [13] Valeh N., "Gol-e-Gohar iron ore project: an outline study of the Gol-e-Gohar iron ore area", National Iranian Steel Industries, excursion of the 2nd Geological Symposium of Iran, (1977).
- [14] Moxham R., "Geology and characteristics of the Gol-e-Gohar iron deposit", Gol-e-Gohar iron project. Report of the ADM Company, (1990), p.27.
- [15] Pourkhak F., "Paragenesis, petrogenesis and petrochemistry of Gol Gohar ore deposit (anomaly No. 3)", Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran (in persian) (2003).
- [16] Khalili Mobarhan S., "The genesis of the Gole Gohar iron ore deposit", MSc thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran (in persian) (1993).
- [17] Yaghoubi A., "The study of geochemistry and genesis of Gol Gohar ore deposit (No. 2)", MSc thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran (in persian) (1999).
- [18] Babaki A., Aftabi A., "Investigation on the Model of Iron Mineralization at Gol Gohar Iron

- [42] Kranidiotis P., MacLean W., "Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec", *Economic Geology* 82(7) (1987) 1898-1911.
- [43] Inoue A., Meunier A., Patrier-Mas P., Rigault C., Beaufort D., Vieillard P., "Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctahedral chlorites", *Clays and Clay Minerals* 57(3) (2009) 371-382.
- [44] McDowell S.D., Elders W.A., "Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore 1, Salton Sea geothermal field, California, USA", *Contributions to mineralogy and petrology* 74(3) (1980) 293-310.
- [45] Cathelineau M., Nieva D., "A chlorite solid solution geothermometer the Los Azufres (Mexico) geothermal system", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 91(3) (1985) 235-244.
- [46] Cathelineau M., "Cation site occupancy in chlorites and illites as function of temperature", *Clay minerals* 23(4) (1988) 471-85.
- [47] Kavalieris I., Walshe J., Halley S., Harrold B., "Dome-related gold mineralization in the Pani volcanic complex, North Sulawesi, Indonesia; a study of geologic relations, fluid inclusions, and chlorite compositions", *Economic Geology* 85(6) (1990) 1208-1225.
- [48] Jowett E., "Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer", GAC/SEG Joint Annual Meeting, Toronto, Program with Abstracts, (1991), p.A62.
- [49] El-Sharkawy M., "Talc mineralization of ultramafic affinity in the Eastern Desert of Egypt", *Mineralium Deposita* 35(4) (2000) 346-363.
- [50] Karimpour M.H., Khin Z., "Geochemistry and physicochemical condition of Qaleh-Zari Cu-Ag-Au ore bearing solution based on chlorite composition", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 8(1) (2000) 3-22.
- [51] Large R., "Zonation of hydrothermal minerals at the Juno mine, Tennant Creek goldfield, central Australia", *Economic Geology* 70(8) (1975) 1387-1413.
- [52] Costa U., Barnett R., Kerrich R., "The Matagami Lake Mine Archean Zn-Cu sulfide deposit, Quebec; hydrothermal coprecipitation of talc and sulfides in a sea-floor brine pool; evidence from geochemistry, 18 O/16 O, and
- [30] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American mineralogist* 95(1) (2010) 185-187.
- [31] Hey M.H., "A new review oi the chlorites", *Min. Mag* 30 (1954).
- [32] Forster M., "Interpretation of the composition and a classification of the chlorites: USGS Prof", Paper 414-A (1962).
- [33] Wiewióra A., Weiss Z., "Crystallochemical classifications of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition: II. The chlorite group", *Clay Minerals* 25(1) (1990) 83-92.
- [34] Hillier S., Velde B., "Octahedral occupancy and the chemical composition of diagenetic (low-temperature) chlorites", *Clay Minerals* 26 (1991) 149-168.
- [35] Plissart G., Féménias O., Mărunțiu M., Diot H., Demaiffe D., "Mineralogy and geothermometry of gabbro-derived listvenites in the Tisovita-Iuti ophiolite, Southwestern Romania", *The Canadian Mineralogist* 47(1) (2009) 81-105.
- [36] Curtis C., Hughes C., Whiteman J., Whittle C., "Compositional variation within some sedimentary chlorites and some comments on their origin", *Mineralogical Magazine* 49(352) (1985) 375-386.
- [37] Chabu M., "The geochemistry of phlogopite and chlorite from the Kipushi Zn-Pb-Cu deposit, Shaba, Zaire", *The Canadian Mineralogist* 33(3) (1995) 547-558.
- [38] Cruz M.D.R., Nieto J.M., "Chemical and structural evolution of "metamorphic vermiculite" in metaclastic rocks of the Betic Cordillera, Málaga, Spain: A synthesis", *The Canadian Mineralogist* 44(1) (2006) 249-265.
- [39] Moazzen M., "Chlorite-chloritoid-garnet equilibria and geothermometry in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, southern Iran", *Iranian Journal of Science and Technology (Sciences)* 28(1) (2004) 65-78.
- [40] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "Rock-forming Minerals. Vol. 1 Ortho-and Ring Silicates", Longman(1965).
- [41] Zang W., Fyfe W., "Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil", *Mineralium Deposita* 30(1) (1995) 30-38.

- [55] Bryndzia L.T., Scott S.D., "*Application of chlorite-sulfide-oxide equilibria to metamorphosed massive sulfide ores, Snow Lake area, Manitoba*", Economic Geology 82(4) (1987) 963-970.
- [56] Bevins R., Robinson D., Rowbotham G., "*Compositional variations in mafic phyllosilicates from regional low-grade metabasites and application of the chlorite geothermometer*", Journal of Metamorphic Geology 9(6) (1991) 711-721.
- mineral chemistry", Economic Geology 78(6) (1983) 1144-1203.
- [53] Laird J., "*Chlorites; metamorphic petrology*", Reviews in Mineralogy and Geochemistry 19(1) (1988) 405-453.
- [54] Bryndzia L.T., Scott S.D., "*The composition of chlorite as a function of sulfur and oxygen fugacity; an experimental study*", American Journal of Science 287(1) (1987) 50-76.