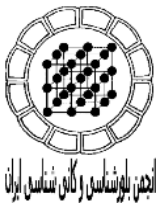
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال هجدهم، شماره‌ی ۲، تابستان ۸۹، از صفحه‌ی ۲۲۳ تا ۲۳۲



بررسی شیمی کانی کلریت به‌عنوان روشی در زمین دماسنجی دگرسانی گرمابی در نهشته سولفیدی قزل داش خوی، شمال باختری ایران

علی امامعلی پور[*۱] ، ایرج رساء[۲]

۱- گروه مهندسی معدن دانشگاه ارومیه

۲- گروه زمین شناسی دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت مقاله: ۸۸/۶/۲۸ ، نسخه نهایی: ۸۸/۱۰/۲۸)

چکیده: کانی‌های گروه کلریت دارای دامنه‌ی گسترده‌ای از ترکیب شیمیایی هستند که بازتابی از شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور آن‌ها است. مدل محلول جامد (جانشینی کاتیونی) در شبکه بلوری کلریت به‌صورت موفقیت آمیزی در تعیین دمای تبلور این کانی در محیط‌های گوناگون زمین‌شناسی همچون نهشته‌های معدنی، دگرسانی‌های گرمابی، دگرگونی درجه ی پایین و دیاژنز توسط برخی از پژوهشگران به‌کار رفته است. در این پژوهش، از روش زمین دماسنجی کانی کلریت در تعیین دمای دگرسانی گرمابی و کانه‌زایی نهشته ی سولفید توده‌ای ناحیه قزل داش شمال باختر شهرستان خوی استفاده شده است. برای این کار، نمونه برداری سطحی و عمقی (از مغزه‌های حفاری) انجام گرفت و پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری (میکروسکوپی) و کانی‌شناسی به روش پرتو ایکس (XRD)، تعداد ۱۱ بلور کلریت که به بخش‌های مختلف سیستم دگرسانی وابسته‌اند، انتخاب و تجزیه شیمیایی نقطه‌ای با دستگاه ریزکاوالکترونی روی آن-ها انجام گرفت. فرمول ساختاری کلریت‌های انتخابی بر مبنای تعداد ۱۴ اکسیژن محاسبه شد. کلریت‌ها دارای تغییرات ترکیبی و جانشینی‌های اتمی مشخصی هستند که بازتابی از دمای تبلور آن‌هاست. تشکیل کلریت‌های موجود در بخش‌های گوناگون سنگ‌های کانه‌دار در گستره‌ی دمایی ۳۱۸-۳۶۸ درجه سانتی‌گراد، و برای کلریت‌های موجود در سنگ‌های دگرسان بی‌کانه ۲۰۲-۲۱۰ درجه سانتی‌گراد روی داده است. کلریت‌های با دمای بالا محتوی Si کمتری نسبت به کلریت‌های متبلور شده در دماهای پایین دارند.

واژه‌های کلیدی: *کلریت، زمین‌دماسنجی، جانشینی اتمی، دگرسانی، کانه‌زایی، سولفید توده‌ای، قزل داش، خوی.*

مقدمه

فرمول عمومی کلریت‌ها به‌صورت $(Mg,Fe^{+2}, Fe^{+3}, Mn, Al)_6((Si, Al)_4O_{10})(OH)_8$ است. رخداد اصلی این کانی‌ها در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با درجه‌ی پایین تا متوسط و نیز به‌عنوان فراورده‌ی دگرسان کانی‌های فرومنیزین همچون پیروکسن‌ها، آمفیبول‌ها و بیوتیت در سنگ‌های آذرین است که در دمای ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار چند کیلوبار روی می‌دهند[۱، ۲]. بررسی‌های انجام گرفته توسط پژوهشگران مختلف نشان داده است که برخی از متغیرهای شیمیایی این کانی به شدت به دمای تبلور آن وابسته‌اند[۳- ۵]؛ برای مثال،

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۳۴۶۰۲۱۸، نمابر: ۲۷۷۷۰۲۲ (۰۴۴۱)، پست الکترونیکی: a.imamalipour@urmia.ac.ir

در شبکه‌ی بلوری کانی کلریت کاتیون Al دو جایگاه چهاروجهی (تترائدری) و هشت وجهی (اکتائدری) را اشغال می‌کند. بررسی کلریت‌های میدان زمین گرمایی "لوس آزوفرس" در کمربند آتشفشانی کواترنری مکزیک نشان داده است که همبستگی مثبت بسیار جالب توجهی بین میزان Al در جایگاه چهار وجهی و دمای تبلور کلریت‌ها وجود دارد، به‌گونه‌ای که مقدار Al(IV) با افزایش دما به‌طور منظم افزایش می‌یابد. اعتبار داده‌های دمایی به‌دست آمده از روش زمین-دماسنجی کلریت از طریق داده‌های به‌دست آمده به‌روش زمین دماسنجی شاره‌های درگیر تایید شده است[۵]. پژوهش‌های انجام گرفته توسط پژوهندگان دیگر در حوضه‌های زمین-شناسی گوناگون دال بر آن است که رابطه‌ی پسرفتی و نمودار اصلاح شده‌ی T-Al(IV) که کتلینئوا (۱۹۸۸) ارائه کرده است، می‌تواند به گونه‌ای موفقیت آمیز ولی با احتیاط برای تعیین دمای تبلور کانی کلریت در مواردی همچون بررسی ژنز نهشته-های معدنی، دگرگونی‌های با درجه‌ی پایین، دگرسانی گرمابی و دیاژنز به کار رود[۲، ۶].

در این پژوهش، شیمی کانی کلریت‌های انتخابی از هاله‌ی دگرسانی وابسته به کانه‌زایی سولفید توده‌ای در سنگ‌های آتشفشانی زیردریایی ناحیه ی قزل داش خوی مورد بررسی قرار گرفته و با تعیین تغییرات موجود در متغیرهای شیمیایی ساختار کلریت‌های انتخابی، دمای تبلور این کانی‌ها و در نتیجه دمای دگرسانی گرمابی وابسته به کانه‌زایی ارزیابی شده است.

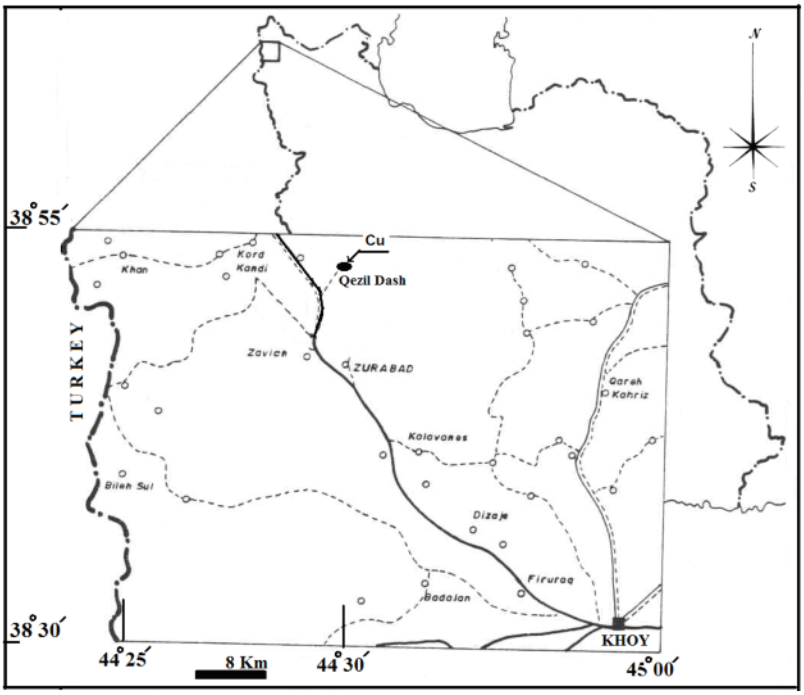
در منطقه‌ی قزل داش واقع در ۵۷ کیلومتری شمال باختری شهرستان خوی، نهشته‌های سولفیدی متعددی یافت می‌شوند که در نتیجه‌ی عملکرد چرخه‌های گرمابی در گدازه-های آتشفشانی زیردریایی پدیدار شده‌اند (شکل۱). از نظر زمین‌شناسی، این ناحیه در پهنه اوفیولیتی شمال باختری ایران موسوم به اوفیولیت خوی واقع شده است. این پهنه در واقع بقایای لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس (به سن کرتاسه بالایی-پالئوسن) است که با راستای NNW خود، ناحیه‌ی گسترده‌ای را در مرز مشترک ایران و ترکیه می‌پوشاند. پهنه‌ی یاد شده از جنوب به کمربند جنوبی اوفیولیت‌های نئوتتیس ترکیه (اوفیولیت‌های محور تاروس) و از سوی شمال به رشته‌ی شمالی (اوفیولیت‌های محور آناتولی) می‌پیوندد. واحدهای سنگی تشکیل دهنده‌ی این مجموعه اوفیولیتی شامل سنگ-های اولترامافیکی (هارزبورژیت، دونیت، اندکی پیروکسنیت و سرپانتینیت)، گابرو، دایک‌های رودنگیتی، مقدار کمی پلاژیوگرانیت، دایک‌های صفحه‌ای، گدازه‌های بازالتی و آندزیتی با ساختارهای بالشی و صفحه‌ای- توده‌ای، آهک پلاژیک و چرت‌های رادیولاریتی است. سنگ‌های آتشفشانی زیردریایی میزبان نهشته‌های سولفیدی به‌بخش بالایی ردیف اوفیولیت خوی (شمال باختر ایران) وابسته‌اند. این نهشته‌ها، پیشتر، به-عنوان کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد نوع قبرسی معرفی شده‌اند[۷، ۸].

روش بررسی

در این کار پژوهشی، از بخش‌های مختلف منطقه‌ی دگرسان که میزبان نهشته‌های سولفید توده‌ای هستند، نمونه برداری شد. ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌های دگرسان به روش‌های سنگ-نگاری میکروسکوپی (۳۰ نمونه) و پراش سنجی پرتو ایکس (XRD) (۱۵ نمونه)، مورد بررسی قرار گرفت. تعداد۱۱ بلور کلریت درشت دانه روی تیغه‌های نازک میکروسکوپی برای تجزیه شیمیایی نقطه‌ای انتخاب شدند. به‌منظور اجتناب از گزینش نمونه‌هایی که دستخوش هوازدگی سطحی بوده‌اند، نمونه‌ها از مغزه‌های حفاری و اعماق زیر منطقه هوازده به‌ویژه سنگ‌های بلافصل واقع در پایین و بالای کانسنگ‌های توده‌ای برداشته شدند. در میان این نمونه‌ها، نمونه‌های شماره‌ی , 6.3 16.1 , 16.2, 6.2 و BH1-4 از بخش استرینگر (منطقه‌ی داربستی)، نمونه‌های شماره‌ی 23.1 , 23.2, BH3-3 و BH3-4 از کانسنگ توده‌ای، و نمونه‌های شماره‌ی 26/1 و 26/2 نیز از سنگ میزبان نهشته‌ی معدنی ولی از فاصله‌ای نسبتاً دورتر از آن انتخاب شده‌اند. تجزیه‌ی شیمیایی نقطه‌ای کلریت‌های

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

انتخابی با استفاده از ریزکاو الکترونی (Electron Microprob) در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام گرفته است (جدول۱).



شکل۱ موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی قزل داش خوی. در نقشه سمت راست موقعیت گستره افیولیت خوی (شمال باختر کشور و مرز ایران و ترکیه) و منطقه قزل داش(مربع توپر) نشان داده شده است. و در نقشه سمت چپ نیز نقشه زمین شناسی منطقه قزل داش آمده است.

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی نقطه‌ای (به روش ریز پردازشی)، محاسبه فرمول ساختار بلوری و دمای تبلور کلریت‌های انتخابی از منطقه‌ی دگرسان و کانه‌زای قزل داش خوی.

Sample No	16/1	16/2	23/1	23/2	6/2	6/3	BH1-4	BH3-4	BH3-3	26/1	26/2
SiO_2	۲۶٫۱۶	۲۴٫۷۱	۲۴٫۴۷	۲۳٫۷۶	۲۶٫۰	۲۴٫۷	۲۵٫۵۷	۲۵٫۹۳	۲۴٫۸۲	۳۱٫۲۵	۳۰٫۱۷
Al_2O_3	۱۹٫۳۳	۲۰٫۳۳	۱۹٫۷	۱۹٫۰۷	۱۸٫۶	۱۸٫۹	۱۶٫۶۸	۱۷٫۸۳	۱۹٫۳۱	۱۷٫۸۴	۱۷٫۳۵
FeO	۱۸٫۶۸	۱۸٫۸۴	۲۳٫۰۷	۲۴٫۱۹	۱۶٫۰	۱۹٫۲	۲۱٫۱۵	۱۹٫۸۴	۱۹٫۵۱	۸۴٫۳۰	۲۲٫۱۸
MnO	۰٫۵۸	۰٫۵۶	۰٫۷۴	۰٫۸۷	۰٫۵۴	۰٫۶۲	۰٫۶۶	۰٫۴۲	۰٫۵۳	۰٫۷۹	۰٫۷۴
MgO	۱۸٫۱۹	۱۸٫۷۳	۱۶٫۷۵	۱۷٫۲۳	۲۰٫۹	۱۹٫۸	۱۹٫۳۸	۱۹٫۰۴	۱۹٫۶۵	۱۷٫۳۹	۱۵٫۱۳
CaO	۰٫۱۵	-	-	۰٫۱۸			۰٫۳۹	۰٫۸	۰٫۱۹	۰٫۸۰	۰٫۷۲
Na_2O	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۰۸	-	۰٫۰۱	۰٫۰۱
K_2O	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۰۹	-	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Total	۸۴٫۱۳	۸۳٫۱۷	۸۴٫۷	۸۶٫۱۶	۸۲	۸۳٫۱	۸۳٫۸	۸۳٫۰۳	۸۴٫۰۱	۸۶٫۴۰	۸۴٫۲۶
Si (Iv)	۲٫۸۲	۲٫۶۸	۲٫۶۶	۲٫۶۸	۲٫۷۷	۲٫۷۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۶۶	۳٫۱۸	۳٫۱۵
Al	۲٫۴۵	۲٫۵۹	۲٫۵۳	۳٫۳۵	۳٫۳۴	۲٫۴۳	۲٫۱۱	۲٫۲۸	۲٫۴۵	۲٫۱۳	۲٫۱۴
Al (IV)	۱٫۱۸	۱٫۳۲	۱٫۳۳	۱٫۳۲	۱٫۲۲	۱٫۳۰	۱٫۲۰	۱٫۲۰	۱٫۳۴	۰٫۸۲	۰٫۸۵
T Site	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
Al(Vl)	۱٫۲۷	۱٫۲۷	۱٫۱۹	۱٫۰۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۰٫۹۰	۱٫۰۸	۱٫۱۱	۱٫۳۱	۱٫۲۹
Fe^{+2}	۱٫۶۸	۱٫۷	۲٫۰۹	۲٫۱۶	۱٫۴۳	۱٫۷۰	۱٫۹۰	۱٫۷۹	۱٫۷۵	۱٫۵۵	۱٫۵۴
Mn^{+2}	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۴	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۰۶
Mg	۲٫۹۲	۳٫۰۱	۲٫۷۱	۲٫۷۴	۳٫۳۳	۳٫۲	۳٫۱۶	۳٫۰۶	۳٫۱۶	۲٫۶۴	۲٫۳۹

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

Ca	۰٫۰۱	-	-	۰٫۰۲	-	-	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۰۶	۰٫۰۷
Total	۹٫۹۳	۱۰	۱۰	۱۰٫۰۱	۹٫۹۲	۱۰٫۰۷	۱۰٫۰۵	۱۰٫۰۸	۱۰٫۰۸	۹٫۸۱	۹٫۸۳
Fe/(Fe+Mg)	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۴۳	۰٫۴۴	۰٫۳	۰٫۳۴	۰٫۳۷	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۷	۰٫۳۷
Fe/Mg	۰٫۵۷	۰٫۵۶	۰٫۷۷	۰٫۷۸	۰٫۴۳	۰٫۵۳	۰٫۶۰	۰٫۵۸	۰٫۵۵	۰٫۵۸	۰٫۸۱
T	۳۱۸	۳۶۴	۳۶۸	۳۶۳	۳۳۲	۳۵۶	۳۲۵	۳۲۴	۳۷۰	۲۰۲	۲۱۱

بحث و بررسی

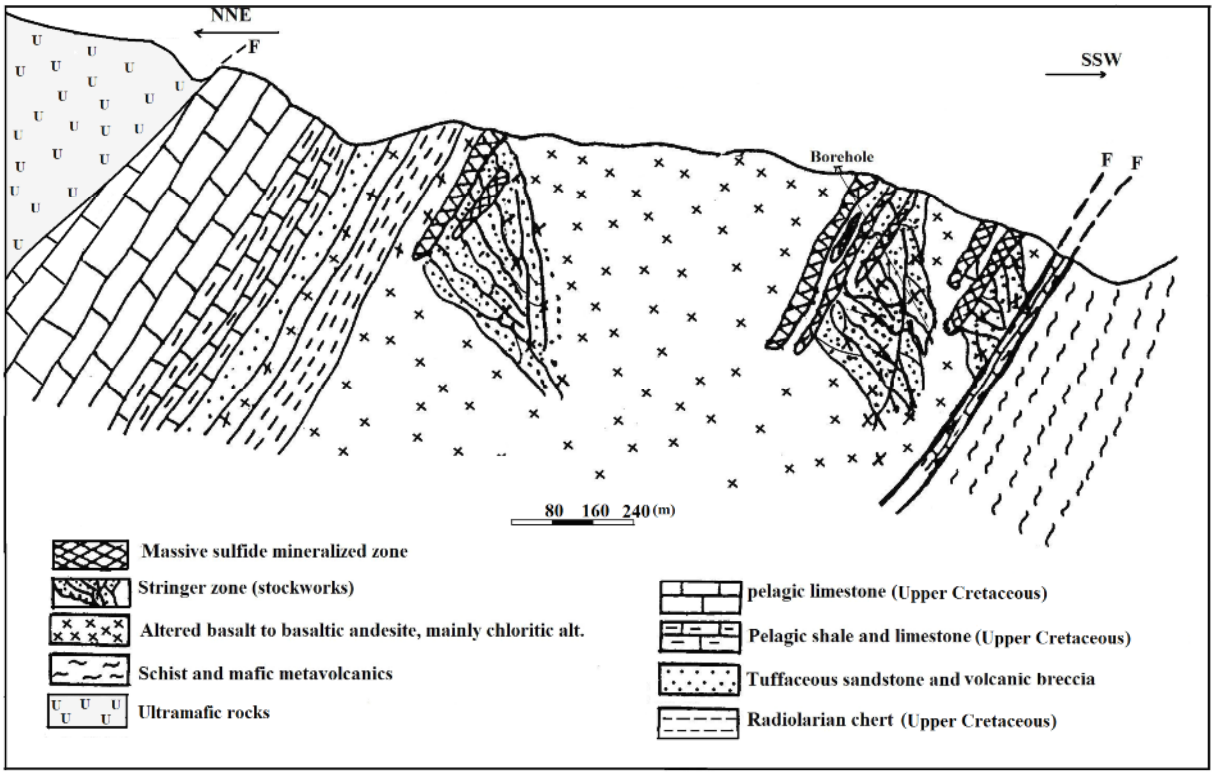
ماهیت کانه‌زایی و دگرسانی سنگ میزبان

بالاترین بخش ردیف اوفیولیتی ناحیه‌ی خوی را سنگ‌های آتشفشانی زیردریایی می‌سازند که از گسترشی گسترده برخوردارند. در ناحیه‌ی قزل داش، این سنگ‌ها که ساخت صفحه‌ای- توده‌ای دارند، دربردارنده‌ی مناطق کانه‌دار پرشماری در خود هستند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که ترکیب سنگ‌شناسی این سنگ‌ها در گستره‌ی بازالت و آندزیت بازالتی بوده و از نظر ژئوشیمیایی از نوع تولئیت‌های با پتاسیم کم (LKT) هستند[۹]. به‌سوی شمال، سنگ‌های آهکی و شیلی پلاژیک به گونه‌ای هم شیب بر روی آن‌ها قرار می‌گیرند(شکل۲). گذار میان آن دو تدریجی و شامل یک واحد آتشفشانی- رسوبی است. مجموعه‌ی این واحدهای سنگی شیبی در حدود ۴۰-۴۵ درجه به‌سوی شمال دارند[۸]. مناطق کانه‌دار شامل دو بخش توده‌های کوچک عدسی شکل (چینه-سان) و استرینگر (با ساخت و بافت داربستی) می‌شوند.

کانسنگ‌های توده‌ای از ساختار اولیه سنگ درونگیر پیروی می‌کنند و با آن هم شیب‌اند. پاراژنز کانسنگ ساده است و از پیریت (به‌عنوان کانی باطله اصلی) و کالکوپیریت (به‌عنوان کانه‌ی مس) تشکیل شده است. مقدار پیریت بسیار بیشتر از کالکوپیریت است و نسبت پیریت به کالکوپیریت بالاست. اسفالریت در مقادیر بسیار کم حضور دارد. کوولین در مقادیر بسیار کم تنها در محل گذار بخش اکسایشی به‌بخش سولفیدی اولیه حضور دارد که در مغزه‌های حفاری شناسایی شده است. ژرفای بخش هوازده در پنج گمانه‌ی اکتشافی حفاری شده از ۱۱٫۳ تا ۳۲٫۱ متغیر بوده و به‌طور متوسط به ۱۸ متر می‌رسد[۸]. دگرسانی همراه با کانه‌زایی از نوع کلریتی است که به‌گونه‌ای فراگیر سنگ میزبان پیرامون مناطق کانه‌دار را تحت تاثیر قرار داده است (شکل‌های۳ و۴). مناطق استرینگر به شکل رگه-رگچه‌ای و انتشاری، بیشتر در بخش‌های پایینی عدسی‌های سولفیدی یافت می‌شوند. این رگه- رگچه‌ها سنگ درونگیر را قطع کرده و شیبی مخالف با عدسی‌ها دارند. در زون استرینگر مقدار کانی‌های سیلیس و سرسیت زیاد می‌شود. مناطق کانه‌دار زیر تاثیر فرآیندهای هوازده و اکسایش واقع شده‌اند که فرجام آن گسترش گوسان روی آن‌هاست. به دلیل حضور فراوان هیدروکسیدهای آهن ثانوی، مناطق گوسان به رنگ‌های قهوه‌ای روشن دیده می‌شوند و به‌خوبی قابل شناسایی هستند (شکل۳).

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

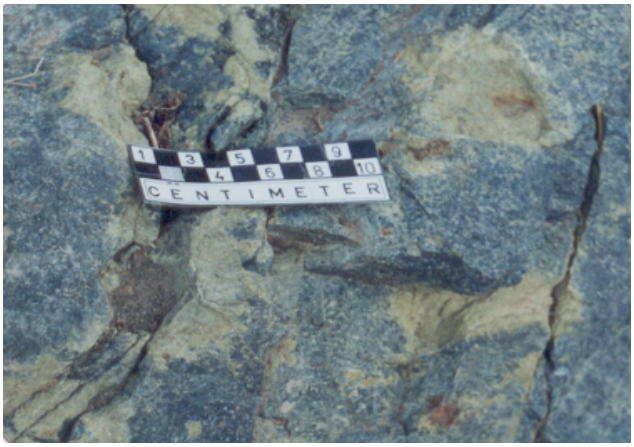
[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]



شکل۲ برش زمین‌شناسی ساده شده از منطقه‌ی کانه دار قزل داش خوی.

شکل۳ نمایی از منطقه‌ی کانه‌دار قزل داش، زون هوازدگی نهشته‌ی سولفید توده‌ای با رنگ روشن‌تر در میان سنگ‌های میزبان دگرسان دیده می‌شود، نگاه به سوی باختر.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]



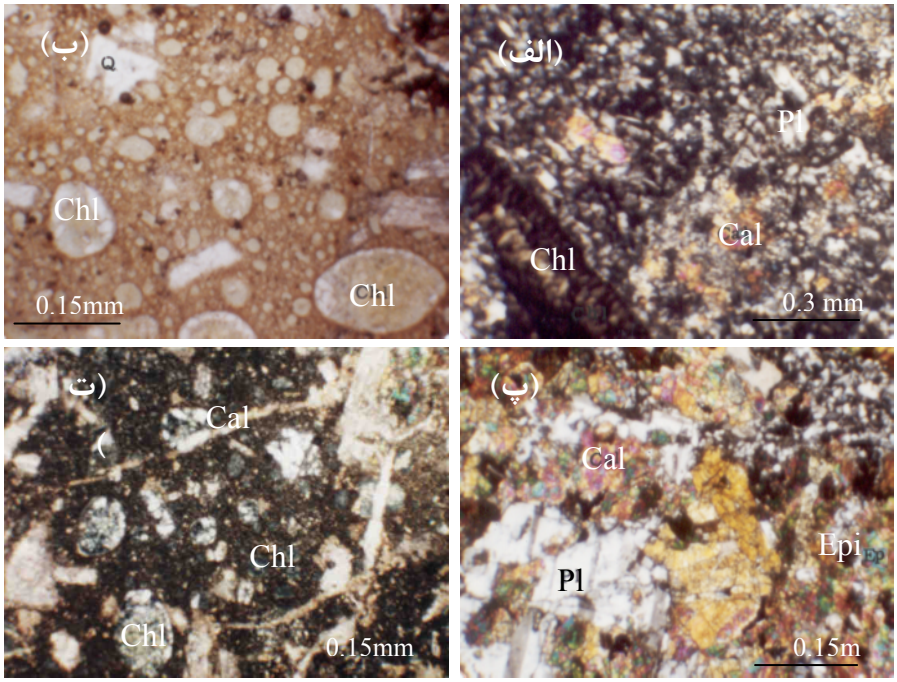
شکل۴ دگرسانی فراگیر سنگ میزبان کانه‌دار، بخش عمده‌ی کانی‌های سازنده‌ی سنگ به کانی‌های اپیدوت (به رنگ سبز روشن) و کلریت (به رنگ آبی تیره) دگرسان شده‌اند.

از آنجا که کانه‌زایی ماهیت سین ژنتیک داشته و رخدادهای کانه‌زایی و دگرسانی سنگ میزبان همزمان با هم و طی تکاپوی فرایندهای بروندمی گرمابی زیردریایی پدیدار شده‌اند، از این رو دمای تبلور کلریت‌ها، به‌عنوان یکی از فراورده‌های دگرسانی سنگ میزبان می‌تواند بیانگر دمای دگرسانی گرمابی و نهشتگی کانه‌های سولفیدی باشد.

بررسی سنگ‌نگاری گدازه‌های زیردریایی میزبان کانه‌زایی، گویای آن است که این سنگ‌ها تحت تاثیر گرمابی‌ها دگرسان شده و کانی‌های اولیه سازنده آن‌ها به مجموعه‌ای از کانی‌های دگرسان تبدیل شده‌اند. بافت این سنگ‌ها از نوع پورفیری، میکروپورفیری، گلومروپورفیری، جریانی و در مواردی برشی است. از ویژگی‌های بارز این سنگ‌ها حضور فراوان اپیدوت، کلریت و کلسیت به‌صورت دانه‌های بی‌شکل، پراکنده یا مجتمع در زمینه‌ی بادامکی‌ها، رگچه‌ها و قالب کانی‌های اولیه است (شکل‌های ۵-الف تا ت). وجود رگچه‌های کلسیتی و کوارتز گویای پیدایش آن‌ها در یک مرحله تاخیری است. زمینه‌ی بیشتر این سنگ‌ها ریز بلوری و ریز دانه‌ای است و بیشترشان انبوهه‌ای از اپیدوت، کلریت و کوارتز هستند که در آن تنها آثاری از فنوکریست و کانی‌های مافیک اولیه برجای مانده است.

بادامک‌ها اغلب به وسیله‌ی کلریت، اپیدوت، کوارتز و به ندرت کلسیت پر شده‌اند. در بادامک‌ها آثاری از کانی‌های مافیک اولیه باقی نمانده است. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در بیشتر موارد دگرسان شده‌اند، ولی بخش‌های نسبتاً سالم هنوز به چشم می‌خورند. فراوانی اپیدوت بیش از کلریت است و در مواردی بیش از ۶۰ درصد سنگ را اپیدوت تشکیل می‌دهد. دگرسانی سنگ میزبان از نوع فراگیر است، به‌طوری‌که هم متن سنگ (میکرولیت‌ها و فنوکریست‌ها) و هم حفره‌ها و رگچه‌های آن با کانی‌های حاصل از دگرسانی اشغال شده‌اند. بررسی‌های کانی‌شناسی به روش پرتو ایکس (XRD) نیز گویای آن است که دگرسانی همراه با کانه‌زایی از نوع کلریتی است و کانی‌های کلریت، اپیدوت، کوارتز، آلبیت، پیریت، کلسیت و ژیپس، کانی‌های اصلی موجود در سنگ‌های میزبان کانه‌زایی هستند (جدول۲ و شکل۶). به نظر می‌رسد که دگرسانی پلاژیوکلاز کلسیک در حضور گرمابی پرمایه از Na به پلاژیوکلاز سدیک (آلبیت)، دگرسانی هورنبلند در حضور شاره‌ی پرمایه از Fe و Mg به کلریت، اپیدوت و اکسید آهن، و دگرسانی پیروکسن در حضور محلول پرمایه از CO_2 به کلسیت و سیلیس از فرآیندهای اصلی در دگرسانی سنگ میزبان هستند.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

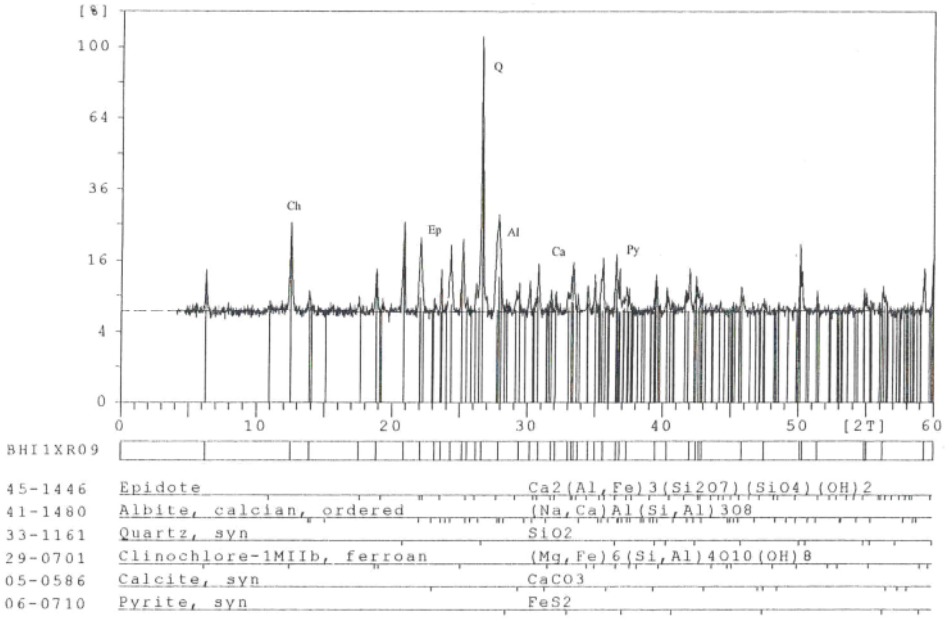


شکل۵ تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های آتشفشانی دگرسان؛ کلریت به صورت رگچه‌ای در سنگ با بافت میکروپورفیری(الف)، آمیگدال‌های پر شده با کلریت و کوارتز (ب)، کانی‌های دگرسان کلریت، اپیدوت، کلسیت و کوارتز به صورت پراکنده در متن سنگ دگرسان با بافت پورفیری (ج)، و کانی‌های دگرسان (کلریت، کلسیت و کوارتز) به صورت رگچه‌ای، پراکنده و پرکننده‌ی آمیگدال‌ها (د). علایم اختصاری: کلریت(Chl)، اپیدوت (Epi)، کلسیت (Cal)، کوارتز (Q) و پلاژیوکلاز نوع آلبیت (Pl).

جدول ۲ ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های انتخابی از سنگ‌های دگرسان و کانه‌دار منطقه قزل داش خوی به روش بررسی پرتو مجهول (XRD) .

شماره نمونه	کانی های اصلی	کانی های فرعی
BH1-XR-03	کوارتز، کلریت، آلبیت	اپیدوت، کلسیت
BH1-XR-05	کلریت، اپیدوت، آلبیت	کوارتز، پیریت، ژیپس، کلسیت
BH1-XR-09	کلریت، اپیدوت، آلبیت	کوارتز، پیریت، کلسیت، سرسیت
BH2-XR-03	کلریت، آلبیت	اپیدوت، پیریت، کلسیت
BH2-XR-05	کوارتز، کلریت، آلبیت	اپیدوت، پیریت، کلسیت، تالک
BH2-XR-07	کوارتز، کلریت، آلبیت	اپیدوت، پیریت، کلسیت
BH3-XR-03	کلریت، آلبیت، کوارتز	اپیدوت، سرسیت، کلسیت
P1-XR-03	کوارتز، کلریت، اپیدوت، پیریت	مالاکیت
P2-XR-01	کوارتز، کلریت، اپیدوت	
T5-XR-04	کوارتز، کلریت، آلبیت	اپیدوت، مالاکیت
KH-XR-11	کلریت، کوارتز، پیریت، اپیدوت	بورنیت، سرسیت

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]



شکل۶ طرح پراش پرتو ایکس وابسته به یکی از نمونه‌های برداشته از منطقه‌ی دگرسانی با مجموعه کانی‌شناسی اپیدوت، آلبیت، کوارتز، کلینوکلر، کلسیت و پیریت.

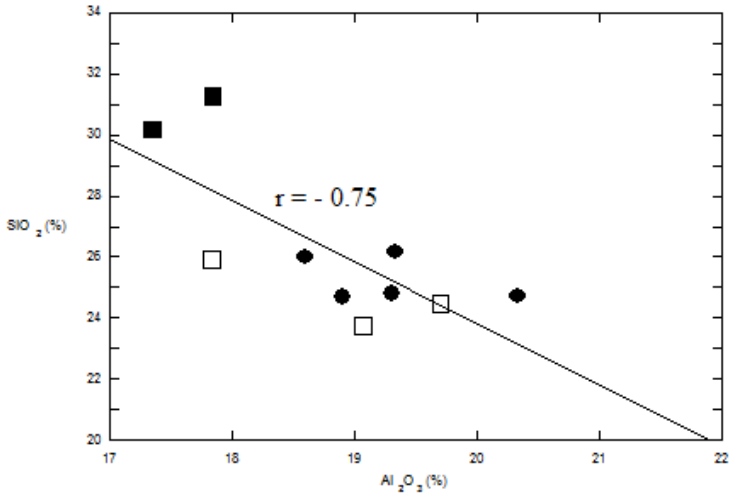
شیمی کانی کلریت‌های انتخابی

فرمول ساختاری کلریت‌های تجزیه شده بر مبنای تعداد ۱۴ اکسیژن محاسبه شده است. برای این کار، نخست نسبت‌های مولکولی بر اساس درصد وزنی اکسیدها به‌دست آمد و سپس به‌ترتیب نسبت‌های کاتیونی و تعداد اکسیژن مربوط به هر اکسید محاسبه شد. با در نظر گرفتن این نسبت‌ها و بر مبنای تعداد ۱۴ اکسیژن تناسب کاتیونی برای هر کدام از کاتیون‌ها به‌دست آمد. سرانجام، مقدار Al موجود در جایگاه چاروجهی شبکه‌ی بلوری کلریت‌های انتخابی (Al(IV)) محاسبه شد. فرمول ساختاری کلریت‌های انتخابی در جدول۱ ارائه شده است

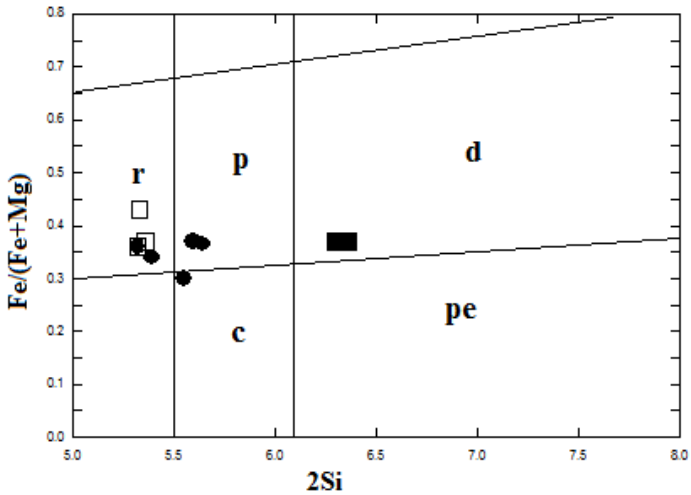
در ساختار بلور کلریت، بین کاتیون Al^{3+} با کاتیون Si^{4+} از یک طرف، و بین کاتیون Al با کاتیون‌های Fe^{2+} و Mg^{2+} از طرف دیگر جانشینی‌های گسترده‌ی اتمی روی می‌دهد، به‌گونه‌ای که کاتیون Al می‌تواند در دو موقعیت چاروجهی و هشت وجهی وارد شود. در جایگاه چاروجهی Al جانشین Si می‌شود و از این رو افزایش مقدار Al در این جایگاه، با کاهش مقدار Si همراه خواهد بود. مقادیر Al_2O_3 با SiO_4 در کلریت‌ها دارای همبستگی وارونند که این خود نشانگر جانشینی کاتیونی Al^{3+} با Si^{4+} است (شکل۷). نسبت کاتیونی Al کل موجود در شبکه‌های بلوری کلریت‌ها بین ۲٫۰۳ تا ۳٫۳۴۸ تغییر می‌کند. نسبت کاتیونی Si(IV) در جایگاه چاروجهی در گستره‌ی ۲٫۶۶۵ -۳٫۰ به‌دست آمد، از این رو مقادیر Al(IV) در گستره‌ی ۱٫۳۳۵- ۱٫۰ خواهد بود. مقادیر Al(IV) در کلریت‌های انتخابی از سنگ‌های کانه‌دار و سنگ‌های مجاور کانسنگ‌های سولفیدی در گستره‌ی ۱٫۳۹-۱٫۰ و در سنگ‌های دگرسان بی‌کانه در گستره‌ی ۰٫۸۴-۰٫۸۲ قرار می‌گیرند. مقدار آلومینیمی که وارد جایگاه هشت وجهی کانی‌های کلریت شده‌اند، به‌طور نسبی کمتر از مقدار جانشین شده در جایگاه چاروجهی است.

کلریت‌های وابسته به سنگ‌های منطقه‌ی کانه‌دار بر اساس نمودار $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg^{2+})$ نسبت به 2Si [۱۰] بیشتر از نوع رپیدولیت و کلریت‌های وابسته به سنگ‌های دگرسان بی‌کانه از نوع دیابانتیت هستند (شکل۸). لازم به یادآوری است که در بررسی‌های میکروسکوپی و کانی‌شناسی (XRD) کلریت‌های نوع کلینوکلر و پنینیت نیز شناسایی شده‌اند. نسبت‌های $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg^{2+})$ در کلریت‌های بررسی شده با دامنه‌ی ۰٫۴۴-۰٫۳ تغییر می‌کند که در مقایسه با مقادیر آن در کلریت‌های نهشته‌ی سولفیدی "زوها" در ناحیه‌ی اوفیولیتی عمان دامنه‌ای، پایین‌تر است[۱۱]. به‌سخن دیگر، کلریت‌های ناحیه‌ی قزل داش در مقایسه با کلریت‌های ناحیه‌ی "زوها" از منیزیم کمتری برخوردارند؛ در حالی‌که مقادیر این نسبت در کلریت‌های انتخابی با مقادیر آن در کلریت‌های واقع در هاله‌ی دگرسانی نهشته‌ی سولفیدی "کوکینوپزولا" (اوفیولیت قبرس) قابل مقایسه است (۰٫۴-۰٫۲۵)[۱۲].

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]



شکل۷ نمودار پراکنش SiO_2 نسبت به Al_2O_3 ، علایم: بخش داربستی (دایره توپر)، کانسنگ سولفیدی یا سنگ‌های مجاور (مربع توخالی)، سنگ میزبان دگرسان در فاصله دورتر از منطقه کانه‌دار (دایره توپر).



شکل۸ ترکیب کلریت‌های بررسی شده در نمودار ارائه شده توسط [۱۰]؛ علایم: رپیدولیت (r)، پیکنوکلریت (p)، دیابانتیت (d) و کلینوکلر (c).

دمای تبلور کلریت‌ها

یکی از عواملی که رخداد جانشینی اتمی بین کاتیون‌های مختلف را تعیین می‌کند، دمای رخداد جانشینی است. به‌طور کلی در دماهای بالاتر، گنجایش جانشینی اتمی بیشتر است، زیرا در این دماها، ارتعاش‌های گرمایی (کل ساختار) بیشتر بوده و اندازه‌ی مواضع اتمی موجود بزرگتر است. بنابراین در یک ساختار خاص، در دماهای بالاتر انتظار تغییرات ترکیبی بیشتری می‌رود تا در دماهای پایین‌تر [۱]. خاصیت افزایش جانشینی اتمی در دماهای بالا، وسیله‌ای برای تعیین دمای تشکیل کانی‌ها فراهم می‌آورد که خود روشی را در بررسی‌های زمین- دماسنجی تشکیل می‌دهد. اگر درجه‌ی جانشینی اتمی برای یک کانی خاص در دماهای گوناگون تعیین شده باشد، ترکیب طبیعی کانی می‌تواند دمای تشکیل آن را مشخص کند. برای مثال، مقدار Ti موجود در مگنتیت (به‌صورت محلول جامد) به‌عنوان تابعی از دما از روی تجربیات آزمایشگاهی مشخص شده است[۱]. در رابطه با جانشینی‌های اتمی صورت گرفته در کلریت‌ها نیز مقدار Al(IV) با افزایش دما به‌طور منظم افزایش می‌یابد و از این رو رابطه‌ی T-Al(IV) برای تعیین دمای تشکیل (تبلور) کلریت‌ها پیشنهاد شده است. مقایسه‌ی داده‌های دمایی به‌دست آمده از این روش با داده‌های حاصل از روش‌های دیگر از جمله اندازه‌گیری مستقیم دما در حوضه‌های زمین گرمایی، بررسی‌های شاره‌های درگیر برازش خوبی را بین آن‌ها نشان داده است، به‌گونه‌ای که خطای محاسبه شده کمتر از ۱۰ درجه سانتیگراد بوده است [۴].

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

معادله‌ی زیر رابطه پسروی ارائه شده در اثر کتلینئوا را نشان می‌دهد:

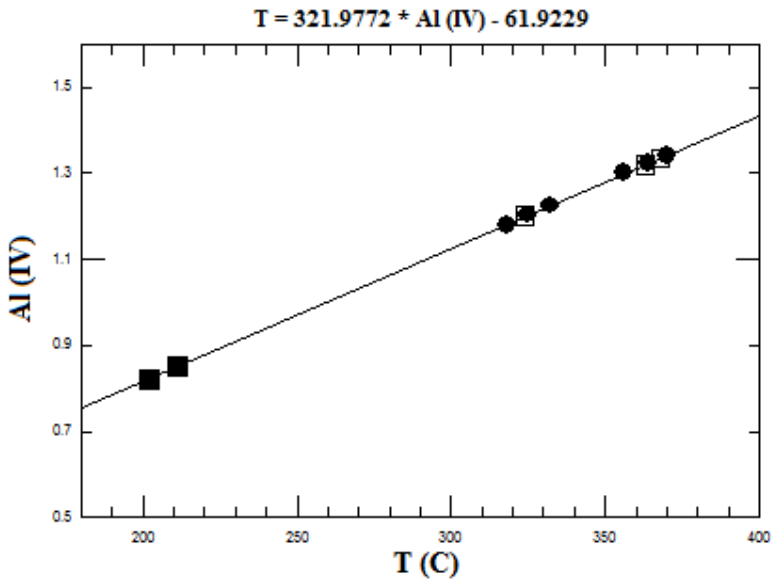
$$T\ (^{o}C) = -61.92 + 321.98\ (Al_{IV}) \qquad (۱)$$

دمای دگرسانی و کانه‌زایی در نهشته‌ی سولفید توده‌ای قزل داش ناحیه‌ی خوی با استفاده از زمین دماسنج کلریت تعیین شده است. با استفاده از رابطه‌ی پسروی T-Al(IV) و نمودار اصلاح شده کتلینئوا [۴] دمای تبلور کلریت‌های انتخابی از سنگ‌های مجاور کانسنگ سولفیدی در گستره ی ۳۲۴-۳۷۰ درجه‌ی سانتیگراد و در مورد کلریت‌های انتخابی از بخش داربستی در گستره‌ی ۳۱۸-۳۶۸ درجه‌ی سانتیگراد به‌دست می‌آید (شکل۹)، از این رو می‌توان گفت که تغییر چندانی در دمای تبلور کلریت‌های این سنگ‌ها وجود ندارد. میانگین دمای تبلور این کلریت‌ها حدود ۳۵۰ درجه‌ی سانتیگراد است. کلریت‌های وابسته به سنگ‌های دگرسان بی‌کانه که در فاصله‌ی دورتری نسبت به منطقه‌ی کانه دار قرار گرفته‌اند، دمای کمتری را نشان می‌دهند. دمای تبلور دو بلور کلریت انتخابی از این سنگ‌ها ۲۰۲-۲۱۱ درجه‌ی سانتیگراد به دست آمده است (جدول۱).

برداشت

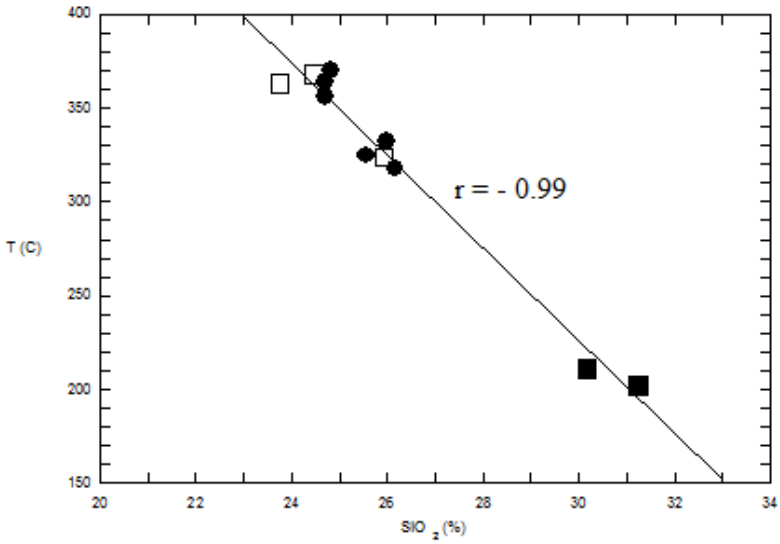
کلریت یکی از محصولات دگرسانی سنگ‌ها در اثر گرماب کانه-دار، شاره‌های سیستم‌های زمین گرمایی یا دگرگونی‌های با درجه پایین است. از آنجا که ارتباط بین مقدار Al(IV) در جایگاه چاروجهی ساختار بلوری کانی کلریت و دمای تبلور آن به‌خوبی شناخته شده است، از این رو با تجزیه‌های شیمیایی (به ویژه تجزیه‌های نقطه‌ای) دقیق و محاسبه‌ی فرمول ساختاری آن می‌توان دمای تبلور کانی را به‌دست آورد. در گستره‌ی مورد بررسی، کلریت یکی از کانی‌های فراوان تشکیل شده طی فرآیندهای دگرسانی (و کانه‌زایی) بوده است. میانگین دمای دگرسانی (و کانه‌زایی) در منطقه‌ی قزل داش بر پایه‌ی زمین دماسنجی کلریت، ۳۳۴ درجه سانتیگراد به دست آمد. به نظر می‌رسد که با دور شدن از سنگ‌های کانه‌دار (کانون اصلی چرخش محلول‌های کانه‌دار) دمای دگرسانی کاهش یافته و به حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد رسیده است. بررسی روابط بین اکسیدهای تشکیل دهنده کلریت‌ها و دمای تبلور آن‌ها گویای آن است که میان محتوای SiO_2 و دمای تبلور آن‌ها همبستگی وارون و شدیدی وجود دارد؛ به گونه ایکه با افزایش سیلیس، دمای تبلور کاهش می‌یابد (شکل۱۰). به دیگر سخن می‌توان گفت که کلریت‌هایی که در دماهای بیشتری تشکیل می‌شوند، سیلیس کمتری در ترکیب خود دارند و بر عکس. از این رو محتوای سیلیس کلریت‌ها می‌تواند شاخصی از دمای تبلور آن‌ها باشد.

گستره‌ی دمایی یاد شده با گستره‌های دمایی به دست آمده از نهشته‌های سولفید توده‌ای مشابه در نقاط دیگر جهان، قابل مقایسه است؛ برای مثال، دمای کانه‌زایی در نهشته‌ی سولفید توده‌ای قبرس بر اساس داده‌های شاره‌های درگیر در گستره‌ی ۲۲۰-۳۵۰ درجه‌ی سانتیگراد گزارش شده است [۱۲].



[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

شکل۹ دمای تبلور کلریت‌های انتخابی از سیستم دگرسانی و کانه زایی ناحیه ی قزل داش خوی بر اساس نمودار Al (IV)-T ارائه شده توسط [۴].



شکل۱۰ نمودار SiO_2 نسبت به T، کلریت های تشکیل شده در دماهای بالا محتوای Si کمتری دارند و بر عکس.

این پژوهش، کاربرد شیمی کانی را در بررسی‌های زمین دماسنجی نشان می‌دهد. استفاده از زمین دماسنج کانی کلریت به ویژه آنجا که امکانات لازم و یا شرایط مناسب برای بررسی شاره‌های درگیر وجود ندارد، روشی بسیار سودمند است. همچنین از این روش می‌توان به‌عنوان مکملی در کنار روش-های مرسوم دیگر زمین دماسنجی استفاده کرد.

مراجع

[1] Klein C., Hurlbut C.S., *"Manual of mineralogy"*, John Wiley and Sons, 1999.

[2] Caritat P., Hutcheon I., Walshe J.L., *"Chlorite geothermometry: a review"*, Clays and clay minerals, Vol. 41, 1993, pp.219-239.

[3] McDowell S.D., Elders W.A., *"Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore 1"*, Salton sea geothermal field, California, USA, Contrib. Mineral. Pet., Vol. 74, 1980, pp. 293-310.

[4] Cathelineau M., *"Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature"*, Clay minerals, Vol. 23, 1988, pp. 471-485.

[5] Cathelineau M., Nieva D., *"A chlorite solid solution geothermometer, the los Azufres geothermal system (Mexico)"*, Contrib. Mineral. Pet., Vol. 91, 1985, pp. 235-244.

[6] Inoue A., Meunier A., Patrier-Mas P., Rigault C., Beaufort D., Vieillard P., *"Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctaedral chlorites"*, Clays and clay minerals,Vol. 57, 2009, pp.371-382.

[۷] امامعلی پور ع.، مسعودی ج.، *"معرفی نهشته‌های مس قزل داش به‌عنوان کانه‌زایی ماسیوسولفاید تیپ قبرس در زون اوفیولیت ملانژ خوی"*، اولین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران ۴-۶ شهریور۱۳۷۶.

[۸] امامعلی پور ع.، *"متالوژنی افیولیت خوی با نگرشی ویژه بر انباشته‌های سولفیدی در آتشفشانی‌های زیردریایی قزل داش خوی"*، رساله دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۰ .

[۹] امامعلی پور ع.، *"بررسی ژئوشیمی و خاستگاه زمین‌ساختی پیدایش انباشته‌های سولفوری در ناحیه قزل داش خوی"*، پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، شهریور ۱۳۸۰.

[10] Pflumio C., *"Evidences for polyphased oceanic alteration of the extrusive sequence of the Semail ophiolite from the Salahi Block (Oman)"*, in: Peters, T.J.(Eds), Ophiolite genesis and evolution in the oceanic lithosphere, 1991, pp. 313-351.

[11] Richards H.G, *"Mineralogical and metasomatic zonation of alteration pipes of yprus sulfide deposits"*, J .Geophys, Res., 1989, 84: 91-115.

[12] Heaton T. H. E., Sheppard S. M. F., *"Hydrogen and oxygen isotope evidence for sea*

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]

water hydrothermal alteration and ore deposition", Troodos complex Cyprous, Geol ., Soc., lord., spec., pub 1, Vol. 7 , 1977, pp. 42-57 .

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-11]