



کانی‌شناسی و زمین‌شیمی دگرسانی‌های گرمابی در رخدادهای یارالوجه، (شمال غرب اهر - آذربایجان شرقی)

زهره جبارزاده^{*}، محمدرضا حسین‌زاده^۱، محسن مؤید^۱، رزگار فرامرزی^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

(دریافت مقاله: ۹۲/۷/۶، نسخه نهایی: ۹۲/۱۰/۱۵)

چکیده: رخداد‌های رگه‌ای یارالوجه در ۴۰ کیلومتری شمال غرب اهر، استان آذربایجان شرقی واقع شده است. سنگ میزبان رگه‌های کانه‌سازی شده، مجموعه‌ای از سنگ‌های نیمه‌آتشفشانی حدواسط دگرسان شده است. کانی‌سازی اسفالریت-گالن-کالکوپیریت به صورت رگه-رگچه‌ای تداخلی است. براساس مشاهدات صحرایی، بافتی و کانی‌شناسی ۴ مرحله کانی‌سازی تشخیص داده شده‌اند. سنگ‌های نیمه‌آتشفشانی به وسیله دگرسانی فراگیر سریسیتی و کربناتی، که با مجموعه کانی‌های برونزاد هم‌پوشانی دارد، تحت تأثیر قرار گرفته است. ترسیم شاخص دگرسانی ایشیکاوا (AI) نسبت به شاخص کلریت-کربنات-پیریت (CCPI)، موسوم به نمودار جعبه‌ای دگرسانی، انواع اصلی دگرسانی را نشان می‌دهد. مجموعه‌ی کوارتز، سریسیت، ایلیت، آلبیت، کائولینیت، لوکوکسن، پیریت و کانی‌های کربناتی تأخیری، نشانگر حضور سیالات گرمابی (گرماب) با pH نزدیک به خنثی و دمای تقریبی ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. ویژگی‌های کانی‌شناسی، دگرسانی و زمین‌شیمیایی منطقه‌ی مورد بررسی و مقایسه آن با دیگر کانسارهای گرمابی نشان دهنده‌ی این است که اندیس‌های رگه‌ای یارالوجه مشابه با کانسارهای وراگرما نوع سولفیدی شدن حدواسط و رگه‌های چند فلزی با دمای متوسط وابسته به کانسارهای مس پورفیری است.

واژه‌های کلیدی: وراگرما؛ مس پورفیری؛ دگرسانی گرمابی؛ شاخص دگرسانی؛ سولفیدی شدن حدواسط؛ یارالوجه.

مقدمه

کانسارهای گرمابی یکی از مهم‌ترین انواع کانسارها هستند که تقریباً ۱۰۰ درصد فلزاتی چون سرب، روی، مولیبدن، نقره و ۶۰ الی ۹۰ درصد مس، طلا و اورانیوم مورد نیاز جهان را تأمین می‌کنند [۱]. موضوع جالب توجه در این کانسارها، دگرسانی گرمابی وابسته به کانی‌سازی است، که به طور معمول دارای منطقه‌بندی کانیاپی و زمین‌شیمیایی است [۲]. شناسایی رابطه‌ی بین کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و شدت دگرسانی در سیستم‌های دگرسانی دارای منطقه‌بندی به عنوان ابزاری سودمند برای پی‌جویی این کانسارها به کار می‌رود [۳]. از آنجا

که این دگرسانی‌ها با تغییرات کانی‌شناسی، شیمیایی و بافتی سنگ دیواره مشخص می‌شوند، با تشکیل کانی‌های گرمابی متنوعی همراهند که اغلب به تغییرات دما و pH حساس بوده [۴] و می‌توانند اطلاعات مفیدی را درباره ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال گرماب ارائه کنند [۵]. برای آگاهی بهتر دگرسانی گرمابی و شدت آن می‌توان علاوه بر بررسی‌های کانی‌شناسی از داده‌های زمین‌شیمیایی نمونه‌های دگرسان شده سنگ میزبان و نمودار جعبه‌ای دگرسانی استفاده کرد [۶].

اندیس رگه‌ای یارالوجه با موقعیت جغرافیایی $38^{\circ}42'00''$ تا $38^{\circ}43'37''$ عرض $46^{\circ}55'00''$ طول شرقی و $46^{\circ}55'00''$ تا $46^{\circ}53'54''$ عرض

شمالی در فاصله‌ی ۴۰ کیلومتری شمال‌غرب اهر و ۱۷ کیلومتری شمال‌شرقی معدن سونگون آذربایجان شرقی قرار دارد. بررسی‌های انجام شده روی این منطقه شامل تهیه‌ی نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان [۷] است. از اینرو اطلاعات جامع و دقیقی درباره ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زائی این شاخص وجود ندارد و روی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، کانی‌شناسی و بافتی آن تاکنون مطالعه‌ای انجام نگرفته است. در این مقاله ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی و دگرسانی گرمابی بر پایه‌ی مشاهدات صحرایی، بررسی‌های میکروسکوپی و زمین‌شیمی کل سنگ انجام گرفته و درباره الگوی کانی‌سازی اظهار نظر شده است.

روش بررسی

برای بررسی ماهیت کانی‌سازی و دگرسانی گرمابی در منطقه یارالوجه، بررسی‌ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفت. در بخش صحرایی، زمین‌شناسی منطقه، تغییرات ریخت‌شناسی رگه‌ها و دگرسانی گرمابی سنگ دیواره مورد بررسی قرار گرفت و از رخنمون رگه‌ها و سنگ دیواره‌ی دگرسان شده در دیواره دره‌ها نمونه برداری شد. بررسی‌های

آزمایشگاهی شامل بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی کانسنگ و سنگ‌دیواره، مجموعه‌های دگرسانی و تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌ها بوده است. بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی به روش میکروسکوپی روی ۲۸ عدد مقطع نازک و ۹ مقطع صیقلی انجام شد. کانی‌های مجهول در ۳ نمونه به روش پراش پرتو مجهول (XRD) توسط شرکت زراژما شناسایی شد (جدول ۱). با ترکیب نتایج حاصل از این بررسی‌ها دنباله‌ی پاراژنزی کانی‌سازی و مجموعه‌های دگرسان گرمابی تعیین شد. برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و تعیین مقادیر عناصر اصلی، فرعی و کمیاب، تعداد ۳ نمونه از رگه و اطراف آن (نمونه‌های Jb-6-2، Jb-6-9 و Jb-7) و ۵ نمونه از سنگ میزبان دگرسان شده (نمونه‌های Jb-1-1، Jb-1-2، Jb-2، Jb-3، Jb-5) به روش (ICP-MS) در آزمایشگاه Amdel استرالیا مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند که نتایج آن در (جدول ۲) آورده شده‌اند. مقادیر L.O.I نمونه‌های تجزیه شده، نیز در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و پی جویی‌های مواد معدنی استان آذربایجان-شرقی مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

جدول ۱ شناسایی کانی‌های مجهول و جدا کردن آن‌ها به روش (XRD).

ردیف	شماره نمونه	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی
۱	Jb-1-1	کوارتز-کانولینیت-سریسیت-ایلپیت	دولومیت-پیریت-آلیت
۲	Jb-3	کوارتز-سریسیت-ایلپیت	کانولینیت-پیریت-آکتریت
۳	Jb-11	کوارتز-سریسیت-کانولینیت-ایلپیت	کلسیت

جدول ۲ تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های سنگ نیمه‌آتشفشانی دگرسان شده به روش (ICP-MS).

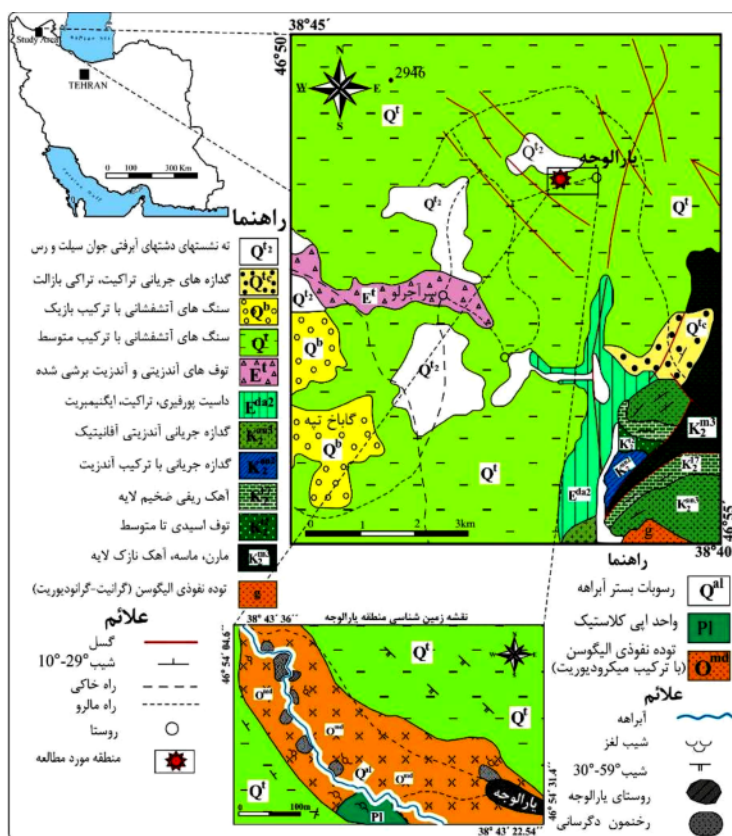
شماره نمونه	DL	Jb-1-1	Jb-1-2	Jb-2	Jb-3	Jb-5	Jb-6-2	Jb-6-9	Jb-7
عناصر اصلی بر حسب درصد می‌باشند و SiO_2 بر اساس LOI محاسبه شده است.									
SiO_2	-	۵۸٫۰۳	۵۹٫۵۷	۵۲٫۲۴	۵۷٫۰۰	۴۰٫۰۲	۲۳٫۴۲	۴۲٫۵۱	۴۸٫۹۱
TiO_2	۱۰	۰٫۸۷	۰٫۸۳	۰٫۷۴	۰٫۷۰	۰٫۴۶	۰٫۵۳	۰٫۷۶	۰٫۹۱
Al_2O_3	۱۰	۱۶٫۰۸	۱۴٫۰۰	۱۵٫۷۰	۱۴٫۷۰	۷٫۹۰	۹٫۰۱	۱۲٫۰۰	۱۴٫۰۰
MgO	۱۰	۱٫۷۳	۱٫۶۶	۲٫۱۹	۲٫۱۹	۳٫۴۷	۳٫۲۶	۲٫۲۶	۲٫۵۱
MnO	۲	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۷	۰٫۱۶	۰٫۴۲	۰٫۴۳	۰٫۱۹	۰٫۲۴
xFe_2O_3	۱۰۰	۵٫۲۲	۵٫۸۵	۵٫۲۵	۴٫۵۷	۷٫۴۷	۱۶٫۵۶	۱۲٫۰۰	۸٫۰۰
CaO	۱۰	۲٫۹۳	۲٫۸۰	۶٫۹۰	۴٫۶۰	۱۳٫۳۰	۸٫۳۸	۳٫۶۴	۳٫۶۴
Na_2O	۱۰	۰٫۱۹	۰٫۲۰	۰٫۳۰	۰٫۱۶	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۱۲
K_2O	۱۰	۳٫۶۰	۳٫۱۸	۳٫۱۶	۴٫۰۲	۰٫۷۵	۲٫۰۹	۲٫۷۲	۳٫۰۲
P_2O_5	۵	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۶
S	۵۰	۲٫۳۷	۲٫۷۶	۲٫۹۲	۲٫۶۸	۲٫۳۰	۱۶٫۲۸	۹٫۵۰	۴٫۶۵
L.O.I	-	۸٫۷۰	۸٫۹۰	۱۰٫۳۰	۹٫۱۰	۲۳٫۸۰	۱۹٫۸۰	۱۴٫۲۰	۱۳٫۲۰
Total%	-	۹۹٫۹۹	۱۰۰٫۰۱	۹۹٫۹۹	۹۹٫۹۶	۱۰۰٫۰۵	۱۰۰٫۰۴	۹۹٫۹۷	۹۹٫۳۶

بحث و بررسی

زمین شناسی

منطقه‌ی یارالوجه به عنوان بخشی از نوار ماگمایی البرز-آذربایجان [۸]، در ورقه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰/۱ ورزقان در شمال غرب اهر واقع شده است (شکل ۱). فعالیت‌های ماگمایی در این منطقه بیشتر شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی متوسط تا فلسیک است. سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی بازالتی و آندزیتی به سن پلیوکواترنری، توده‌های آتشفشانی داسیتی و نفوذی گرانودیوریتی، کوارتزمونزونیتی و میکرومونزونیتی به سن الیگوسن را پوشانده است. باتولیت گرانیتوئیدی شیور، توده‌ی نفوذی در نزدیکی گستره‌ی مورد بررسی است که با کانی‌سازی نوع اسکارنی در حواشی مشخص می‌شود که به درون سنگ‌های کربناتی و فیلیشوئیدی کرتاسه فوقانی و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن تزریق شده است و در جنوب شرق گستره‌ی مورد بررسی رخنمون دارد. توده‌ی پورفیری علی جواد در جنوب شرقی این توده که حاوی کانی-سازی مس-طلا‌ی پورفیری است به درون توده‌ی گرانیتوئیدی شیور تزریق شده است. با توجه به نشانه‌های دگرسانی و بافتی

بین توده نیمه‌آتشفشانی یارالوجه با توده‌ی علی جواد احتمال دارد سن نفوذ آن‌ها مشابه هم باشد [۷]. شکل جایگیری سنگ‌های یاد شده بیشتر به صورت مجموعه‌های آتشفشانی و توده‌های نیمه‌آتشفشانی است که در بخش‌های شمال‌غربی منطقه‌ی مورد بررسی رخنمون‌هایی از توده‌های شبه‌آتشفشانی دگرسان شده در اثر زمین لغزش دیواره دره‌ها قابل مشاهده است (شکل ۲). دگرسانی‌های گرمایی در منطقه‌ی یارالوجه حدود ۱ کیلومتر مربع وسعت دارد و رخنمون آن‌ها در منطقه محدود به دیواره‌ی دره‌هاست. این دگرسانی‌ها تمام واحدهای سنگی منطقه را جز واحدهای آتشفشانی دوران چهارم، تحت تأثیر قرار داده و تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی گسترده‌ای در آن‌ها ایجاد کرده است. سنگ‌های شبه‌آتشفشانی این منطقه به صورت فراگیر دگرسان شده و با شبکه‌ی نامنظمی از رگه-رگچه‌های کربناتی، کوارتزی و سولفیدی قطع شده است. از میان کانی‌های سولفیدی، پیریت از فراوانی بیشتری برخوردار بوده و علاوه بر رخنمون رگه-رگچه‌ای به صورت پراکنده و داربستی نیز در سنگ‌های دگرسان شده دیده می‌شود.



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی (۷ با تغییرات).



شکل ۲ رخنمون‌هائی از سنگ‌های نیمه آتشفشانی منطقه یارالوجه که به طور فراگیر دگرسان شده‌اند، (دید به سمت شمال غرب).

ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی کانسنگ

کانی‌شناسی کانسنگ نسبتاً ساده بوده و بیشتر از مجموعه کانی‌های فلزی سولفیدی شامل پیریت، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت تشکیل شده است. براساس بررسی‌های سنگ-نگاری، پیریت کانی سولفیدی اصلی بوده و به صورت درشت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با اندازه‌ی بسیار ریز تا ۲ سانتی‌متر در رگه‌ها و سنگ میزبان دگرسان شده دیده می‌شود. از نظر بافتی پیریت‌ها به دو نسل قابل تفکیک‌اند، در مرحله‌ی اصلی دگرسانی پیریت‌های نسل اول در نتیجه فعالیت‌های فراگیر سیال گرمایی تشکیل شده و به صورت بلورهای ریز و درشت افشان (شکل ۳-الف) و رگه-رگچه‌های داریستی (شکل ۳-ب) در توده نیمه آتشفشانی دگرسان شده دیده می‌شوند. نسل دوم پیریت‌ها رگه-رگچه‌ای بوده و به صورت مجموعه‌های پیریت-اسفالریت-گالن-کالکوپیریت-کوارتز-کربنات، پیریت‌های داریستی نسل اول را قطع کرده و دارای سطح تماس مشخص با سنگ دیواره دگرسان شده هستند (شکل ۳-پ). از دیگر ویژگی‌های بافتی پیریت‌های پرکننده فضاهای خالی و رگه-رگچه‌ای، می‌توان به بافت کاتاکلاستی و جاننشینی اکسیدهای آهن در شکستگی‌های آن اشاره کرد (شکل ۳-ت و ث).

اسفالریت با تظاهر رگه‌ای و به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار با اندازه ۰/۲ تا ۴ میلی‌متر همراه با گالن، کالکوپیریت، پیریت، کوارتز و کربنات‌ها دیده می‌شود (شکل ۳-پ). از ویژگی‌های چشمگیر اسفالریت‌ها در مقاطع میکروسکوپی، می‌توان به رشد تماسی اسفالریت با گالن و بافت برونرستی کالکوپیریت از آن اشاره کرد (شکل ۳-ج)، که بیماری کالکوپیریت نیز نامیده می‌شود [۹، ۱۰]. در این بافت ناآمیختگی‌های کالکوپیریت به

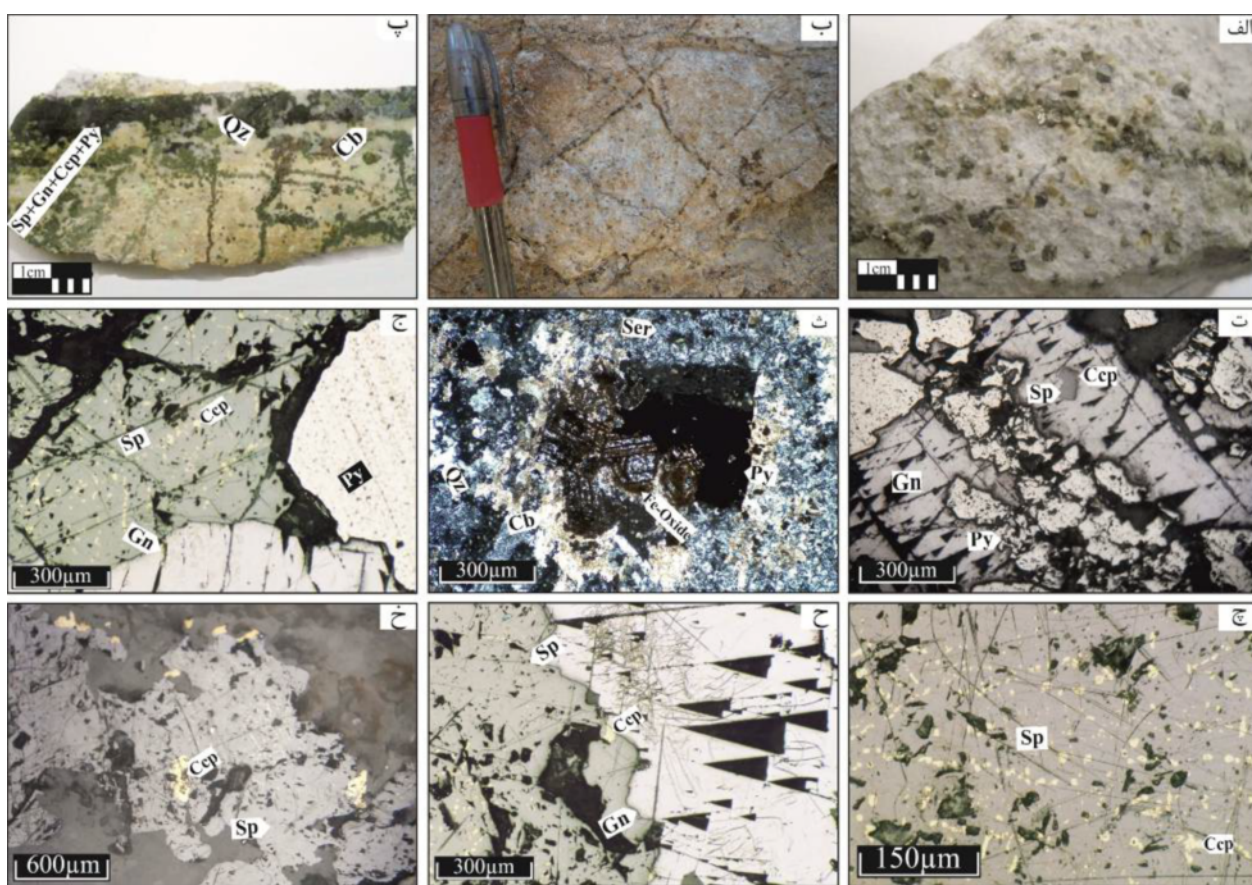
صورت ادخال‌های پراکنده در متن و اطراف اسفالریت قابل مشاهده‌اند (شکل ۳-چ)، که براساس [۱۱]، این پدیده‌ی بافتی در دمای کمتر از 400°C آغاز شده و می‌توان آن را معیار مناسبی برای دمای کانی‌سازی در نظر گرفت.

گالن به صورت بلورهای بی‌شکل با اندازه‌ی ۰/۵-۲/۵ میلی-متر، حضور دارد که با رنگ سفید مایل به خاکستری روشن، و رخ مثلثی و فاقد چند رنگی در رگه‌ها همراه با دیگر کانه‌های سولفیدی و کوارتز قابل تشخیص است. بررسی‌های بافتی روی رگه‌های دربردارنده‌ی گالن نشان دهنده‌ی رشد تماسی اسفالریت با گالن است که شاهده‌ی برای تشکیل همزمان این دو کانی در رگه‌هاست (شکل ۳-ح).

کالکوپیریت تنها کانی سولفیدی مس در منطقه‌ی مورد بررسی است و نسبت به دیگر کانی‌های سولفیدی در رگه‌ها از فراوانی کمتری برخوردار است. این کانی به صورت ادخال‌های بی‌شکل در اندازه‌های ۲۶ الی ۱۰۰ μm در متن اسفالریت، و نیز به صورت بلورهای با اندازه‌ی متوسط ۳۰۰ μm در تماس با اسفالریت و دیواره‌ی رگچه‌ها دیده می‌شود (شکل ۳-خ).

کانی‌شناسی و زمین‌شیمی دگرسانی‌های گرمایی

بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی در این منطقه نشان دهنده‌ی دگرسانی گرمایی به دو صورت جاننشینی در بطن کانی‌های قبلی و نهشت مستقیم در فضاهای خالی و شکستگی‌هاست. کانی‌های کوارتز، سیریسیت، ایلیت، کائولینیت، کلسیت، دولومیت، آنکريت، لوکوکسن و آلبيت از مهم‌ترین کانی‌های شناسایی شده در مجموعه‌های دگرسانی هستند که به صورت دگرسانی‌های سیریسیتی و کربناتی شدن در منطقه مشخص می‌شوند.



شکل ۳ تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی کانی‌سازی در منطقه یارالوجه؛ (الف) پیریت‌های نسل اول با بافت افشان، (ب) پیریت با بافت رگه-رگچه‌ای و داربستی، (پ) پیریت‌های رگه‌ای نسل دوم همراه با اسفالریت، گالن، کالکوپیریت، کوارتز و کربنات که رگچه‌های داربستی و کانه‌های افشان را قطع کرده‌اند، (ت) بافت کاتاکلاستی پیریت‌های نسل دوم درون رگه‌ها، (ث) تجزیه‌ی پیریت‌ها به اکسید آهن و نهشته شدن آن‌ها در رخ-های کانی‌های کربناته، (ج) رشد تماسی اسفالریت، گالن و پیریت همراه با بافت برونرستی کالکوپیریت در اسفالریت، (چ) ناآمیختگی کالکوپیریت به-صورت ادخال‌های پراکنده در متن اسفالریت، (ح) رشد تماسی گالن با اسفالریت که شهادی بر تشکیل همزمان آن‌هاست، (خ) بلورهای کالکوپیریت در متن و اطراف اسفالریت، از تصاویر میکروسکوپی شکل ث، در نور (XPL) و بقیه در نور (PPL) گرفته شدند. Py= Pyrite, Ccp=Chalcopyrite, Gn=Galena, Sp=Sphalerite, Cb=Carbonate mineral, Qz=Quartz, Ser=Sericite. [۱۲].

۴-ج) تا ۱ میلی‌متر با بافت اسفرولیتی (شکل ۴-ج)، در زمینه-ی سنگ، سطح فلدسپارها و اطراف کانی‌های فرومنیزین دیده می‌شوند (شکل ۴-ح). برای کنترل نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌شناسی، از داده‌های زمین‌شیمیایی عناصر اصلی استفاده شد. براساس این داده‌ها مقدار حداقل و حداکثر اکسیدهای Fe_2O_3 ، CaO ، Na_2O ، K_2O و MgO در این دگرسانی به ترتیب از ۲/۷۵ تا ۴/۰۲ درصد برای K_2O ، ۰/۷۲ تا ۰/۱۹۹ درصد برای Na_2O ، ۲/۸ تا ۴/۶ درصد برای CaO ، ۱/۶۶ تا ۲/۵ درصد برای MgO و ۲/۵۷ تا ۱۲ درصد برای Fe_2O_3 در تغییر

دگرسانی سریسیتی در منطقه‌ی مورد بررسی به رنگ سفید مایل به خاکستری روشن همراه با شبکه‌ی بهم پیوسته‌ای از رگه-رگچه‌های داربستی مشخص می‌شود. این دگرسانی که بیشتر از کانی‌های سریسیت، ایلیت، کوارتز، پیریت، لوکوکسن و کربنات‌ها تشکیل شده است (جدول ۳)، رگه‌هایی با محتوای پیریت (شکل ۴-الف)، پیریت-کوارتز (شکل ۴-ب)، پیریت-کوارتز-کربنات‌های تأخیری (شکل ۴-پ) و اسفالریت-گالن-پیریت-کالکوپیریت-کوارتز-کلسیت (شکل ۴-ت-ث) را دربرگرفته است. سریسیت کانی غالب این دگرسانی بوده (۲۰ تا ۳۵ درصد) و به صورت پولک‌های سفید رنگ ریز دانه (شکل

است که با نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌شناسی همخوانی دارد (شکل ۵).

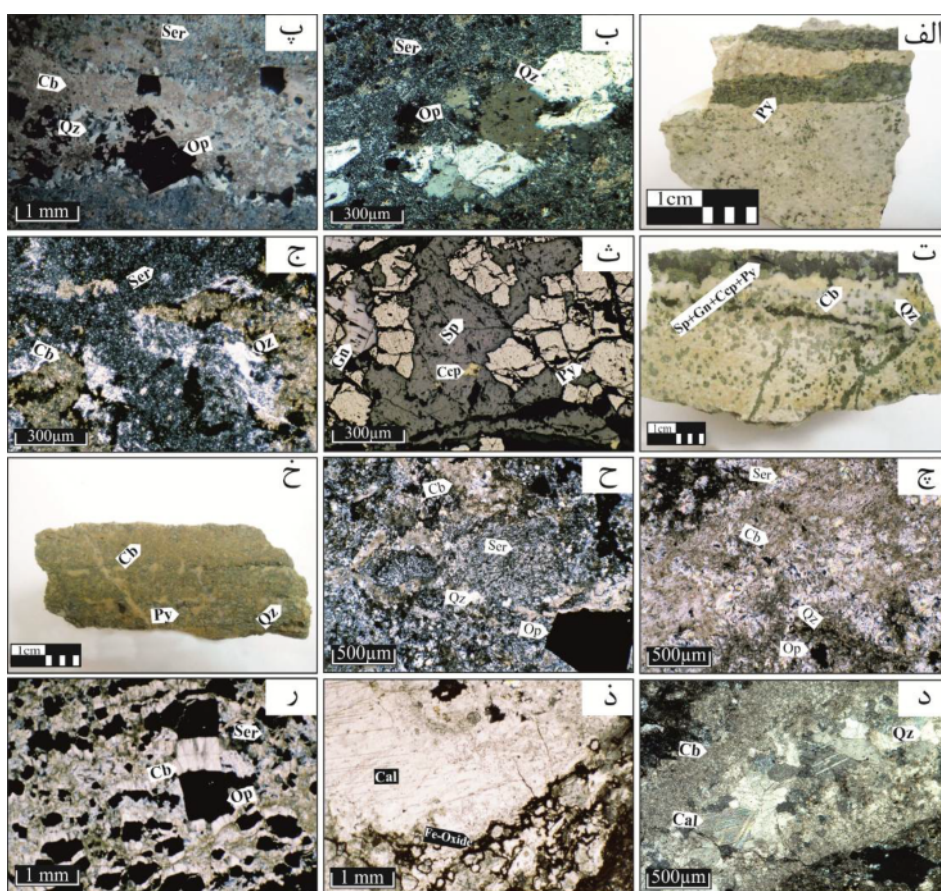
با ادامه فرآیند دگرسانی، کربناتی شدن دگرسانی غالب در منطقه بوده و در بیشتر موارد با دگرسانی سریسیتی هم‌پوشی دارد و به رنگ‌های سفید مایل به زرد، زرد کم‌رنگ و قهوه‌ای روشن دیده می‌شود (شکل ۴-خ). براساس نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی و پراش پرتو ایکس (XRD) این دگرسانی با اجتماع کانیایی کلسیت، دولومیت، آنکريت، آلبیت و کوارتز مشخص می‌شود (جدول ۳). کلسیت و دولومیت به عنوان فراوان‌ترین کانی کربناتی این دگرسانی به صورت پرکننده فضای خالی (شکل ۴-د تا ذ)، جانشینی در پلاژیوکلاز، زمینه‌ی سنگ و در حاشیه‌ی پیریت‌ها (شکل ۴-ر) دیده می‌شوند. بررسی روند تغییرات اکسیدهای اصلی در این دگرسانی نشانگر افزایش فراوانی CaO (۶/۹ تا ۱۳/۳ درصد)، MgO (۲/۱۹ تا ۳/۴۷ درصد) و Na_2O (۰/۰۷۱ تا ۰/۳۰۷ درصد) است.

که با حضور کانی‌های کلسیت، دولومیت و آلبیت همخوانی دارد (شکل ۵) [۱۳].

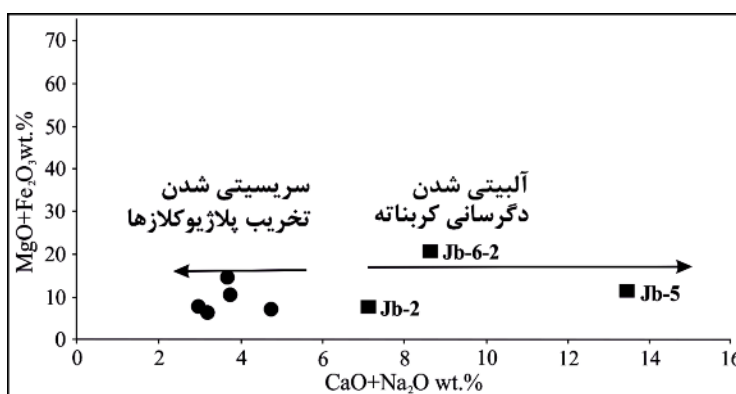
در منطقه‌ی مورد بررسی بخش‌های فوقانی توده‌ی نیمه-آتشفشانی دگرسان شده، تحت تأثیر هوازدگی و دگرسانی برونزاد قرار گرفته است (شکل ۶). براساس نتایج حاصل از پراش پرتو X (XRD) و مشاهدات صحرایی این بخش از کانی‌های کائولینیت، ایلیت، همتایت، لیمونیت، سریسیت و کوارتز تشکیل شده (جدول ۳)، و به رنگ‌های سفید، زرد و قهوه‌ای دیده می‌شود. با توجه به گسترش سطحی این کانی‌ها و اکسید شدن پیریت‌ها، احتمالاً محلول اسیدی حاصل از اکسایش پیریت [۱۴] سبب تشکیل اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن شده و این واکنش بر اسیدی شدن گرماب افزوده است و در اثر فعالیت این شاره‌ی اسیدی کائولینیت و سایر کانی‌های رسی روی دگرسانی برونزاد تحمیل شده است.

جدول ۳ کانی‌شناسی انواع مختلف منطقه‌های دگرسان موجود در منطقه‌ی بارالوجه.

توضیحات	فراوانی کانی‌ها			کانی‌شناسی	دگرسانی
	رایج	متوسط تا کم	کمیاب		
دگرسانی رایج در منطقه که سنگ‌های نیمه آتشفشانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در منطقه مورد بررسی به رنگ سفید مایل به خاکستری روشن همراه با شبکه بهم‌پیوسته‌ای از رگه-رگچه‌های داربستی مشخص می‌شود. این دگرسانی به طور عمده از کانی‌های سریسیت، ایلیت، کوارتز، پیریت، لوکوکسن و کربنات‌ها تشکیل شده است	+	+	+	سریسیت کوارتز پیریت کربنات ایلیت لوکوکسن	سریسیتی
با ادامه فرآیند دگرسانی، کربناتی شدن دگرسانی غالب در منطقه بوده و در بیشتر موارد با دگرسانی سریسیتی هم‌پوشانی دارد و به رنگ‌های سفید مایل به زرد، زرد کم‌رنگ و قهوه‌ای روشن دیده می‌شود.	+	+	+	کلسیت دولومیت کوارتز آنکريت آلبیت	کربناتی
در منطقه مورد بررسی بخش‌های فوقانی توده نیمه آتشفشانی دگرسان شده، تحت تأثیر هوازدگی و دگرسانی برونزاد قرار گرفته است و به رنگ‌های سفید، زرد و قهوه‌ای مایل به قرمز دیده می‌شود. با توجه به گسترش سطحی این کانی‌ها و اکسید شدن پیریت‌ها به نظر می‌رسد احتمالاً محلول اسیدی حاصل از اکسایش پیریت عامل اصلی تحمیل دگرسانی برونزاد می‌باشد.	+	+	+	کائولینیت ایلیت همتایت لیمونیت سریسیت کوارتز کلسیت	هوازدگی سوپرژن



شکل ۴ تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی از دگرسانی‌های گرمابی مشاهده شده در شاخص رگه‌ای یارالوجه؛ (الف) رگه‌های پیریتی، (ب) رگچه‌های کوارتز-پیریت، (پ) رگچه‌های کوارتز-پیریت-کربنات، (ت، ث) رگه حاوی اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت، کوارتز و کربنات، (ج) سریسیت-های ریز دانه در زمینه‌ی سنگ به همراه کانی‌های کوارتز و کربنات، (چ) هم‌پوشی سریسیت‌های درشت بلور با کانی‌های کربناتی، (ح) سریسیت‌های تشکیل شده در سطح و اطراف کانی‌های فلدسپار، (خ) دگرسانی کربناتی با رنگ قهوه‌ای روشن تا زرد کم رنگ، (د) تشکیل کربنات‌ها در شکستگی-ها و فضاهای خالی که در وسط رگچه‌ها کلسیت‌های خاکستری رنگ با بلورهای ریزتر نهشته شده‌اند، (ذ) کلسیت‌های با رنگ روشن و بلورهای درشت‌تر نهشته شده درون رگه-رگچه‌ها، که از حاشیه با اکسید آهن پوشیده شده‌اند، (ر) کلسیت‌های نهشته شده در اطراف پیریت. از تصاویر میکروسکوپی شکل ث، در نور (PPL) و بقیه در نور (XPL) گرفته شده‌اند. Cal=Calcite, Cb=Carbonate mineral, Qz=Quartz, Pl=Plagioclase, Ser=Sericite, Op=Opaque, Py= Pyrite, Ccp=Chalcopyrite, Gn=Galena, Sp=Sphalerite (علائم اختصاری کانی‌ها از، [۱۲]).



شکل ۵ تفکیک رخساره‌های دگرسان بر حسب $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ در برابر $\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ در نمونه‌های مورد بررسی، (نمودار پایه از [۱۳]).



شکل ۶ هوازدگی بخش‌های فوقانی توده‌ی نیمه‌آتشفشانی دگرسان شده الیگوسن که به وسیله بازالت‌های پلیوکواترنری پوشیده شده است، (دید به سمت شمال شرق).

از فشار گرماب موجود در بلورهای پیریت را پر کردند. سرانجام مرحله‌ی چهارم شامل کانی‌های برونزاد (هماتیت، لیمونیت و کائولینیت) است.

زمین‌شیمی کانسنگ

نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب در ۸ نمونه از رگه‌ها و سنگ میزبان دگرسان شده نشان می‌دهد که مقدار میانگین غلظت عناصر Cu , Zn , Pb و Ag به ترتیب ۵۳۰، ۶۶۹۰، ۱۱۴/۳ و ۳/۶۷ بخش در میلیون (ppm) است، که حداکثر غلظت آن‌ها در رگه‌ی حاوی کانه‌زایی است. بررسی همبستگی پیرسون بین این عناصر نشان‌دهنده‌ی بیش‌ترین همبستگی مثبت بین عناصر As-Ag , Zn-Cu , Ag-Zn , Ag-Cu , As-Zn , Cu , Cd-Ag , Cd-Cu , Cd-Zn , Cd-As , Rb-Ta ، Nb-Ta و Nb-Rb به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۹۹، ۰/۹۹، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۸ و ۰/۸۶ است (جدول ۵). همبستگی خوب بین فلزات مس، سرب و روی با کانی‌های شناخته شده در این شاخص رگه‌ای سازگار بوده و نشان‌دهنده‌ی این است که این فلزات در کانی‌های سولفیدی حضور دارند (مانند کالکوپیریت، اسفالریت و گالن). همبستگی مثبت Ag ، As ، Cd با Cu و Zn پیشنهاد می‌کند که این عناصر احتمالاً در کانی‌های مشابهی همراه با هم تشکیل شده‌اند.

دنباله‌ی پاراژنری

کانی‌های تشکیل دهنده‌ی کانسنگ و سنگ میزبان کاملاً دگرسان شده اندیس رگه‌ای یارالوجه در ۵ گروه شامل کانی-های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن)، کانی-های سیلیکاتی (سریسیت، ایلیت، کائولینیت، آلبیت و کوارتز)، کربنات‌ها (کلسیت، دولومیت و آنکريت)، کانی‌های تیتانیوم‌دار (لوکوکسن) و اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن‌دار (هماتیت و لیمونیت) قرار می‌گیرند. براساس بررسی‌های صحرایی، روابط بافتی و کانی‌شناسی چهار مرحله کانی‌سازی در این شاخص شناسایی شدند (جدول ۴). مرحله‌ی اول (I) با کانی‌سازی پیریت‌های افشان و داربستی، همراهی پیریت و کوارتز در رگه‌ها و تشکیل کانی‌های گرمایی از قبیل سریسیت، ایلیت، آلبیت، لوکوکسن، کوارتز و کربنات‌ها مشخص می‌شود. در مرحله‌ی دوم (II) تشکیل کوارتز، کربنات‌ها و پیریت ادامه یافته و منجر به تشکیل رگه‌های دربردارنده‌ی کانه‌زایی اصلی شده است. این مرحله از نظر کانی‌سازی سولفیدی دارای اهمیت است و به ترتیب فراوانی با حضور اسفالریت، پیریت، گالن و کالکوپیریت مشخص می‌شود. مرحله‌ی سوم (III) با کانی‌سازی رگه‌ای کربنات‌ها مشخص می‌شود. در این رگه‌ها کانی‌های کربناتی به صورت جریان‌ی، پیریت‌های تشکیل شده در مرحله اول کانی‌سازی را در بر گرفته و در بعضی از موارد شکستگی‌های ناشی

جدول ۴ توالی پاراژنزی برای شکل‌گیری کانها و کانی‌های دگرسانی موجود در شاخص رگه‌ای یارالوجه.

تأخیری	اولیه			مرحله
	درونزاد			کانی ها
	مرحله III	مرحله II	مرحله I	
برونزاد				
				دگرسانی
				سریسیتی
				کربناتی شدن
				کانی سازی
				اسفالریت
				گالن
				کالکوپیریت
				کانی های باطله
				کوارتز گرمابی
				پیریت
				کانی های رسی
				لوکوکسن
				اکسید و هیدرواکسید Fe

جدول ۵ ماتریس همبستگی پیرسون بین عناصر جزئی و کمیاب اندازه‌گیری شده در نمونه‌های منطقه‌ای مورد بررسی، همبستگی مثبت در سطح اطمینان ۹۵٪ و اعداد برجسته در سطح اطمینان ۹۹٪ اندازه‌گیری شده‌اند.

Nb	Ta	Sr	Rb	Cd	Ti	Ni	Sb	As	Pb	Zn	Cu	Ag
												۱
											۰٫۹۹	۱
										۰٫۹۸	۰٫۹۹	۱
									۰٫۳۷	۰٫۲۹	۰٫۳۸	۱
								۰٫۵۰	۰٫۹۸	۰٫۹۶	۰٫۹۸	۱
							۰٫۴۵	۰٫۴۲	۰٫۴۳	۰٫۳۸	۰٫۴۳	۱
						۰٫۲۴	۰٫۵۵	۰٫۶۰	۰٫۶۲	۰٫۶۳	۰٫۵۹	۱
					۰٫۱۵	-۰٫۱۹	-۰٫۴۲	۰٫۲۲	-۰٫۴۸	-۰٫۴۸	-۰٫۴۴	۱
				۱	-۰٫۴۸	۰٫۵۲	۰٫۴۴	۰٫۹۸	۰٫۳۸	۱٫۰	۰٫۹۸	۰٫۹۹
			۱	-۰٫۷۴	۰٫۶۳	-۰٫۲۳	-۰٫۰۶	-۰٫۷۷	-۰٫۳۹	-۰٫۷۴	-۰٫۷۱	-۰٫۷۰
		۱	۰٫۲۱	-۰٫۲۶	۰٫۱۰۵	-۰٫۷۷	-۰٫۲۸	-۰٫۳۰	-۰٫۴۹	-۰٫۲۶	-۰٫۲۸	-۰٫۲۹
	۱	۰٫۵۹	۰٫۸۳	-۰٫۵۰	۰٫۵۹	-۰٫۲۶	-۰٫۱۶	-۰٫۵۷	-۰٫۵۸	-۰٫۵	-۰٫۴۶	-۰٫۴۷
۱	۰٫۹۸	۰٫۵۲	۰٫۸۶	-۰٫۵۲	۰٫۴۹	-۰٫۳۶	-۰٫۱۹	-۰٫۵۸	-۰٫۵۰	-۰٫۵۲	-۰٫۴۹	-۰٫۴۹

شاخص دگرسانی گرمابی

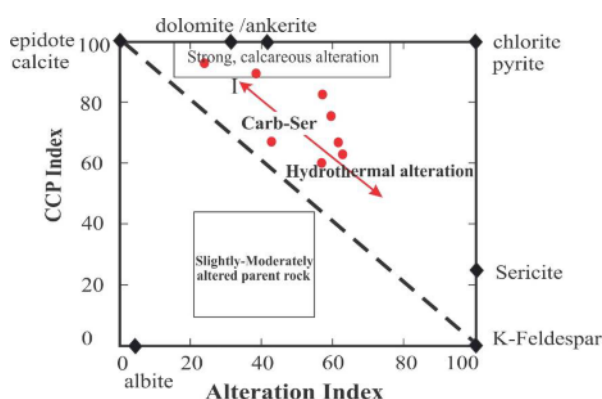
برای درک بهتر دگرسانی گرمابی و تغییرات زمین‌شیمیایی ایجاد شده در شاخص رگه‌ای مورد بررسی، از داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ دیواره و نمودار جعبه‌ای دگرسانی که به نمایش ترسیمی دگرسانی با استفاده از شاخص دگرسانی ایشیکاوا و شاخص دگرسانی کلریت-کربنات-پیریت می‌پردازد، استفاده شد [۳، ۶]. شاخص AI اولین بار توسط [۱۵]، برای کانسارهای سولفید توده‌ای مطرح شد و سپس همراه با شاخص دگرسانی CCPI توسط [۳، ۱۶] برای کانسارهای گرمابی مورد استفاده قرار گرفت. شاخص ایشیکاوا ($CaO + Na_2O + MgO$) به بیان کمی شدت دگرسانی‌های سریسیتی و کلریتی با استفاده از نسبت عناصر

سنگ ساز افزوده شده به مجموع عناصر کاسته و افزوده شده طی این نوع دگرسانی‌ها می‌پردازد [۳]، این شاخص از ۲۰ تا ۶۰ در سنگ‌های دگرسان نشده، ۵۰ تا ۹۹ برای سنگ‌های دگرسان شده و ۱۰۰ در سنگ‌های کاملاً دگرسان شده تغییر می‌کند [۶]. از آنجا که شاخص دگرسانی ایشیکاوا در محاسبه‌ی دگرسانی کربناتی و جدا سازی دگرسانی کلریتی و سریسیتی از یکدیگر ناتوان است، از شاخص دگرسانی کلریت-کربنات-پیریت ($CCPI = 100(MgO + FeO) / (MgO + FeO + K_2O + Na_2O)$) برای تعیین شدت دگرسانی‌های کلریتی، کربناتی و پیریتی استفاده می‌شود [۳]. این شاخص قادر به تعیین FeO و MgO

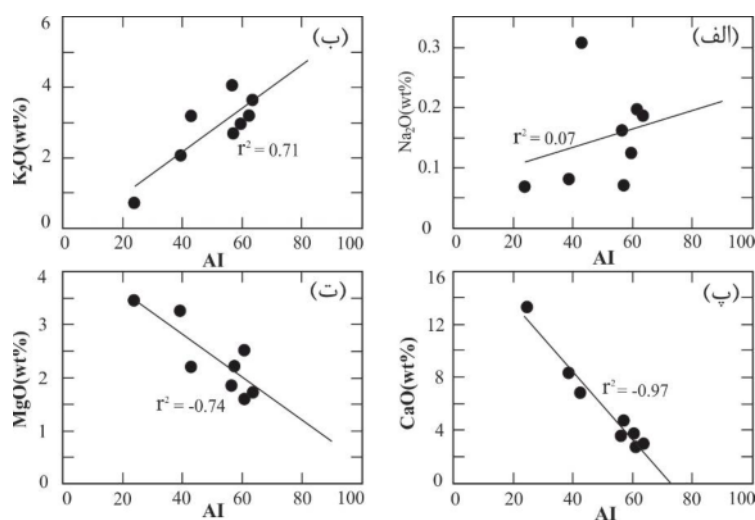
افزوده شده به سنگ طی جانشینی کلریت به جای آل بیت، فلدسپار پتاسیم و سیریسیت است.

محاسبه‌ی شاخص‌های دگرسانی در ۸ نمونه از سنگ میزبان دگرسان شده و پیاده کردن آن‌ها روی نمودار جعبه‌ای دگرسانی نشان دهنده‌ی قرارگیری نمونه‌ها در قلمرو دگرسانی گرمابی با $AI=23-63$ و $CCPI=60-92$ است (شکل ۷). این سنگ از نظر سنگ‌نگاری دارای پلاژیوکلازهای با بیشترین شدت دگرسانی است. با توجه به موقعیت کانی‌های آل بیت، سیریسیت، پتاسیم فلدسپار، کلریت، پیریت، دولومیت، آنکریت، کلسیت و اپیدوت روی نمودار جعبه‌ای دگرسانی [۳]، نمونه‌های مورد بررسی در قلمرو دگرسانی گرمابی قرار گرفته و با افزایش پیشرونده دگرسانی گرمابی به سمت دگرسانی‌های سیریسیتی و کربناتی متمایل شده‌اند که با شواهد سنگ‌نگاری مبنی بر ظهور و فراوانی کانی‌های گرمابی سیریسیت، ایلیت و

کربنات‌ها همخوانی دارد. بررسی روندهای دگرسانی‌ها در این نمودار نشان دهنده‌ی یک روند اصلی دگرسانی شامل دگرسانی گرمابی سیریسیتی - کربناتی است که با نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی و کانی‌شناسی نیز همخوانی دارد. برای کنترل این نتایج، تغییرات اکسیدهای CaO ، K_2O ، Na_2O و MgO نسبت به AI مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی تغییرات Na_2O و K_2O نسبت به AI (شکل ۸-الف-ب)، همبستگی مثبت معنی داری را بین این دو متغیر نشان می‌دهند که بیانگر غنی‌شدگی پتاسیم و اندکی سدیم با پیشرفت دگرسانی و تشکیل کانی‌های ایلیت، سیریسیت و آل بیت است. برعکس، تغییرات CaO و MgO (شکل ۸-پ-ت)، نسبت به AI نشان دهنده‌ی همبستگی منفی بین آن‌هاست که دلالت بر شستشوی منیزیم و کلسیم از کانی‌های فرومنیزین و پلاژیوکلاز با پیشرفت دگرسانی گرمابی و تشکیل کربنات‌ها، دارد.



شکل ۷ نمودار جعبه‌ای دگرسانی [شاخص دگرسانی ایشیکاوا (AI) نسبت به شاخص دگرسانی کلریت-کربنات-پیریت ($CCPI$)] برای داده‌های تجزیه‌ی شیمیایی منطقه‌ی مورد بررسی. روند اصلی دگرسانی با روند I (دگرسانی سیریسیتی-کربناته) نشان داده شده است.

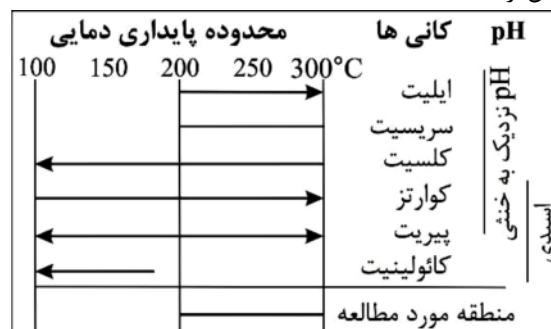


شکل ۸ نمودار تغییرات Na_2O ، K_2O ، CaO ، MgO نسبت به شاخص دگرسانی ایشیکاوا.

برآورد دمای سیال گرمابی دگرسان‌کننده

بسیاری از کانی‌های دگرسانی در گستره‌ی خاصی از دما و pH پدیدارند، که با بررسی گستره پایداری آن‌ها می‌توان اطلاعات مفیدی را از دمای تشکیل و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیالات کانی‌ساز و سیستم‌های گرمابی قدیمی به دست آورد [۴]. کوارتز یکی از محصولات دگرسانی گرمابی در منطقه‌ی مورد بررسی است. این کانی در محیط‌های دگرسان از دمای ۱۰۰ تا بیش از ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در شرایط pH خنثی تا اسیدی تشکیل می‌شود. فراوانی زیاد این کانی در رگه‌ها و رگچه‌های دربردارنده‌ی پیریت با افزایش نفوذپذیری ثانویه ناشی از عملکرد نیروهای زمین‌ساختی و فشار گرمابی‌ها همخوانی دارد. ایلیت می‌تواند همراه با سیالاتی با دمای ۳۵۰ تا ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و pH نزدیک به خنثی یافت شود [۱۷، ۱۸]. تشکیل سریسیت در مجموعه‌ی کانی‌های دگرسان سنگ دیواره که به فراوانی در منطقه‌ی یارالوجه دیده می‌شوند نشان دهنده‌ی pH خنثی گرماب و دمای بین ۳۰۰ الی ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد سیستم زمین‌گرمابی است [۱۹]. کلسیت در دماهای متفاوت کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در شرایط pH خنثی تا قلیایی پدیدار است [۴]. حضور کائولینیت در بخش‌های فوقانی توده‌ی نیمه آتشفشانی دگرسان شده به روش پراش پرتو X شناسایی شد. این کانی نشان دهنده‌ی شرایط نسبتاً اسیدی بوده و می‌توان تشکیل آن را به فرآیندهای برونزاد نسبت داد [۲۰]. بر این اساس بررسی دگرسانی‌های گرمابی در منطقه‌ی یارالوجه نشانگر حضور گرماب‌های با pH نزدیک به خنثی و دمای تقریبی ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است (جدول ۶).

جدول ۶ دمای تخمینی برآورد شده گرماب کانی‌ساز و دگرسان‌کننده‌ی منطقه‌ی یارالوجه براساس گستره‌ی پایداری کانی‌های گرمابی مشاهده شده. (pH و گستره پایداری دمایی کانی‌های گرمابی اقتباس از [۱۷، ۱۹، ۴، ۱۸]).



برداشت

براساس بررسی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی شاخص رگه-ای یارالوجه از مجموعه‌های دگرسان آشکاری شامل دگرسانی سریسیتی، کربناتی و برونزاد برخوردار است که معیار پی‌جویی مفیدی را در اختیار قرار می‌دهد. کانی‌های مشخص‌کننده هر یک از این دگرسانی‌ها عبارتند از: (۱) سریسیت، کوارتز، پیریت، کربنات، ایلیت و لوکوکسن برای دگرسانی سریسیتی، (۲) کلسیت، دولومیت، آنکرایت، کوارتز و آلپیت برای دگرسانی کربناتی و (۳) کائولینیت، ایلیت، همتایت، لیمونیت، سریسیت، کوارتز و کلسیت برای دگرسانی برونزاد که به‌صورت پوششی وسیع در بخش بالایی شاخص گرمابی تظاهر دارد. دگرسانی گرمابی در منطقه‌ی مورد بررسی از گسترش زیادی برخوردار است و کانی‌های اولیه‌ی سنگ دیواره به وسیله‌ی کانی‌های گرمابی جانشین شده‌اند که می‌تواند نشانگر نفوذپذیری بالای سنگ باشد.

ترکیب یافته‌های زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری و زمین-شیمیایی نشان دهنده‌ی این است که رگه‌ها و مجموعه کانی-های دگرسان گرمابی مشاهده شده در منطقه‌ی مورد بررسی قابل قیاس با کانسارهای وراگرمایی نوع سولفیدی شدن حدواسط و رگه‌های چند فلزی با دما متوسط وابسته به کانسارهای مس پورفیری است.

مراجع

- [1] Arndt N., Ganino C., "Metals and Society: an Introduction to Economic Geology", Springer, (2012) 160p.
- [2] Pirajno F., "Hydrothermal Processes and Mineral Systems", Springer, (2009) 1250p.
- [3] Large R.R., Gemmell J.B., Paulick H., Huston D., "The alteration box plot: a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with VHMS deposits", Economic Geology, 96 (2001) 957-972.
- [4] White N.C., Hedenquist J.W., "Epithermal gold deposits: styles, characteristics and Exploration", Society of Economic Geologists, Newsletter, 23 (1995) 9-13.
- [5] Warren I., Simmons S.F., Mauk J.L., "Whole-rock geochemical techniques for evaluating hydrothermal alteration, mass changes, and compositional with epithermal Au-Ag mineralization", Economic Geology, 102 (2007) 923-948.

- [14] Rose A.W., "Zonal relations of wallrock alteration and sulfide distribution at porphyry copper deposits", *Economic Geology*, 65 (1970) 920-936.
- [15] Ishikawa Y., Sawaguchi T., Iwaya S., Horiuchi M., "Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos", *Mining Geology*, 26 (1976) 105-117.
- [16] Gemmell J.B., Large R.R., "Stringer system and alteration zones underlying the Hellyer volcanic-hosted massive sulfide deposit, Tasmania, Australia", *Economic Geology*, 87 (1992) 620-649.
- [17] Reyes A.G., "Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43 (1990) 279-309.
- [18] Simmons S.F., White N.C., John D.A., "Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits", *Economic Geology* 100th Ann (2005) 485-522.
- [19] Comsti M.E.C., Villones R.I., Dejesus C.V., Natividad A.R., Rollan L.A., Duroy A.C., "Mineralization at the Kelly gold mine; Baguio District, Philippines: fluid-inclusion and wall-rock alteration studies", *Geochemical Exploration*, 35 (1990) 341-362.
- [20] Vikre P.G., "Precious metal vein systems in the National district, Humbolt County, Nevada". *Economic Geology*, 80 (1985) 360-393.
- [6] Gemmell J.B., "Hydrothermal alteration associated with the Gosongwng epithermal Au-Ag deposit Halmahera, Indonesia; Mineralogy, geochemistry, and exploration implications", *Economic Geology*, 102 (2007) 893-922.
- [۷] مهرپرتو م.، امینی‌افضل ع.، "نقشه زمین‌شناسی ورزقان با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۱).
- [8] Alavi M., "Sedimentary and structural characteristics of the paleo-Tethys remnants Iran", *Geol. Soc. Of Amer. Bull*, 103 (1991) 983-992.
- [9] Ixer R.A., Duller P.R., "Virtual atlas of opaque and ore minerals in their associations", internet digital atlas, sponsored by SEM (1998).
- [10] Maclellan K.L., Lemtz D.R. McClenaghan S.H., "Petrology, Geochemistry and Genesis of the copper zone at the Burnswick No. 6 volcanogenic massive sulfide deposit, Bathurst mining camp, New Brunswick, Canada", *Exploration and Mining Geology*, 15 (2007) 53-75.
- [11] Edwards A.B., "Textures of the ore minerals and their significance", 2nd ed, Melbourne: Austrasian Inst. Min. Metal (1965) 242p.
- [12] Whitney L., Evans W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist*, 95 (2010) 185-187.
- [13] Karakaya M.C., Karakaya N., Küpeli S., Yavuz F., "Mineralogy and geochemical behavior of trace elements of hydrothermal alteration types in the volcanogenic massive sulfide deposits, NE Turkey", *Ore Geology Reviews*, 48 (2012) 197-224.