

کانه‌زایی مس هندی‌کندی، شمال شرق زنجان

حسین رستمی^۱، ابراهیم نوذری‌پاک^۲، موسی‌الرضا توری^۳، فاطمه آقامرادی^۲، محمد ابراهیمی^{۱*}

۱- دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

۲- دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

۳- شرکت توسعه فولاد رازمان

ebrahimi@znu.ac.ir

چکیده

منطقه هندی‌کندی در فاصله حدود ۸۰ کیلومتری شمال شرق زنجان واقع می‌باشد. این منطقه بر اساس پهنه‌بندی‌های زمین‌شناسی ساختاری-رسوبی ایران در پهنه البرز قرار دارد. در این منطقه مجموعه واحدهای آتشفشانی-آذرآواری اتوسن که معادل سازند کرج می‌باشند (نشته‌های بخش کردکند)، به طور گسترده برونزد دارند. این مجموعه آتشفشانی-آذرآواری شامل گدازه‌های آندزیتی و بازالتی و سنگ‌های آذرآواری منجمله انواع مختلف توف، توفیت، لاپیلی سنگ و برش آتشفشانی هستند. کانه‌زایی مس در این منطقه داخل گدازه‌های آندزیتی و به مقدار کمتر در سنگ‌های آذرآواری به صورت رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و یا آغشگی مشاهده می‌گردد. کانه‌زایی در این منطقه در دو مرحله هیپوژن (کانه‌زایی سولفیدی) و سوپرژن اتفاق افتاده است. در مرحله هیپوژن کانه‌های سولفیدی اولیه مانند کالکوسیت اولیه و پیریت تشکیل شده‌اند. سپس بر اثر فرایندهای بروزد و هوازدگی کالکوسیت اولیه به کالکوسیت ثانویه، کولین و مالاکیت و پیریت به گوتیت تبدیل شده است. کانی‌های باطله در این کانه‌زایی شامل کوارتز، اپیدوت، کلریت و کلسیت هستند.

کلیدواژه‌ها: کانه‌نگاری، کانه‌زایی مس، سنگ‌های آتشفشانی، هندی‌کندی، زنجان.

Hendikandi copper mineralization, northeast of Zanjan

Hosein Rostami¹, Ebrahimi Nouzaripak², Moosarrez Toori³, Fatemeh Aghamoradi³, Mohammad Ebrahimi^{1*}

¹ University of Zanjan, Faculty of Sciences, Department of Geology

¹ University of Zanjan, Faculty of Sciences, Department of Physics

³ Tosee Foolad-e Razhman Company

Abstract

Hendikandi area is located about 80 km northeast of Zanjan. Based on the sedimentary-structural classification of Iran, this area belongs to the Alborz zone. In this area, volcanic-pyroclastic sequence of Karaj Formation (Kordkand member) is widely exposed. This volcanic-pyroclastic sequence is composed of andesitic and basaltic lava flows along with pyroclastic rocks including lapillistone, pyroclastic breccia, tuffite and various kinds of tuffs. The copper mineralization has occurred as open space filling and vein-veinlets in the andesitic lava flows and the pyroclastic rocks. The mineralization has occurred in two stages: 1. Hypogene stage (sulfide mineralization), and 2. Weathering and supergene stage. During the hypogene stage sulfide minerals such as chalcocite and pyrite have been generated. Subsequently, weathering and supergene processes have changed chalcocite into secondary chalcocite, covellite and malachite, and pyrite into goethite. The gangue minerals in the mineralization are quartz, epidote, chlorite and calcite.

Keywords: Mineralography, copper mineralization, volcanic rocks, Hendikandi, Zanjan.

۱- مقدمه

منطقه هندی‌کندی در ۸۰ کیلومتری شمال شرق زنجان قرار دارد. با توجه به نقشه پهنه‌بندی ساختاری - رسوبی ایران، منطقه هندی‌کندی در پهنه البرز قرار دارد (علوی، ۱۹۹۱). منطقه مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ زنجان (اشتوکلین و افتخارنژاد، ۱۹۶۹) واقع است. در ضمن بخشی از این منطقه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رودبار (حیدری و همکاران، ۱۹۸۸) و بخش دیگر آن در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم (امینی و امینی چهرق، ۱۳۷۹) قرار دارد.

۲- زمین‌شناسی منطقه

نهشته‌های سنگی و رسوبی دارای برونزد در منطقه هندی‌کندی متنوع نبوده و شامل سنگ‌های آتشفشانی - آذرآواری ائوسن معادل سازند کرج می‌باشند. در این منطقه یک مجموعه آتشفشانی - آذرآواری متشکل از انواع مختلف توف، توفیت، لاپیلی سنگ، برش آتشفشانی و جریان‌های گدازه منجمله جریان‌های گدازه آندزیتی و بازالتی (قسمت زیرین بخش کرکند از سازند کرج) برونزد دارند. دشت‌ها و بخش‌های کم ارتفاع و هموار توسط رسوبات آبرفتی عهد حاضر پوشیده شده‌اند.

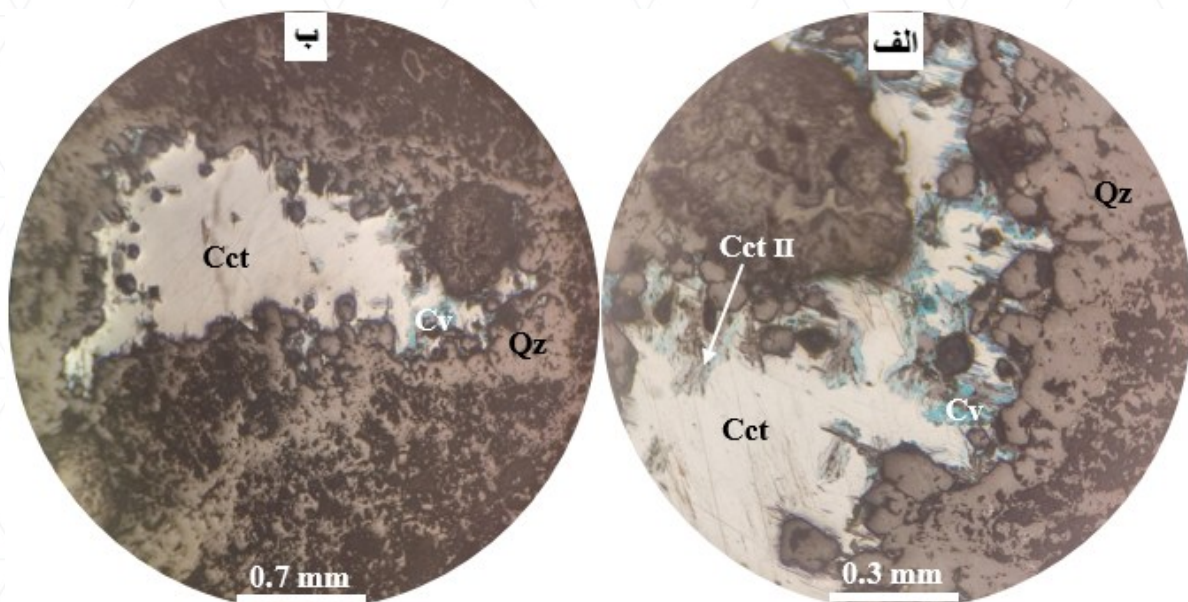
۳- کانه‌نگاری

کانه‌زایی مس در منطقه هندی‌کندی داخل سنگ‌های آندزیتی و آذرآواری اتفاق افتاده است. تصویر نمای نزدیک از کانه‌زایی مس در سنگ‌های آندزیتی در شکل ۱ نمایش داده شده است. کانه سولفیدی اصلی در این کانه‌زایی کالکوسیت است که با مقادیری پیریت همراه است. تحت تاثیر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی کالکوسیت به کالکوسیت ثانویه و کولین تجزیه شده است (شکل ۲). مالاکیت یکی دیگر از محصولات هوازدگی و دگرسانی است که عمدتاً بصورت آغشتگی (شکل ۱) و در مواردی به صورت رگه-رگچه‌ای (Ineson, 1989) در سنگ‌های میزبان تشکیل شده است. در زیر میکروسکوپ رگچه‌های کوارتز به وفور در سنگ‌های آندزیتی میزبان وجود داشته و در بخش‌هایی به صورت داربستی (استوک‌ورک) هستند (شکل ۳). رگچه‌های داربستی (Guilbert and Park, 1997) کوارتز دارای کالکوسیت می‌باشند (شکل ۳). کوارتز موجود در رگچه‌ها و حفرات سنگ دارای اندازه‌های مختلف از ریز تا متوسط بوده و به صورت ناخودشکل تا نیمه‌خودشکل هستند. پیریت کانی دیگر سولفیدی موجود در این کانه‌زایی است. این کانه به صورت نیمه‌خودشکل تا ناخودشکل بوده و در رگه-رگچه‌های کوارتز به مقدار نسبتاً کم وجود دارد (شکل ۳). در مواردی پیریت از حاشیه به گوتیت دگرسان شده است (شکل ۴).

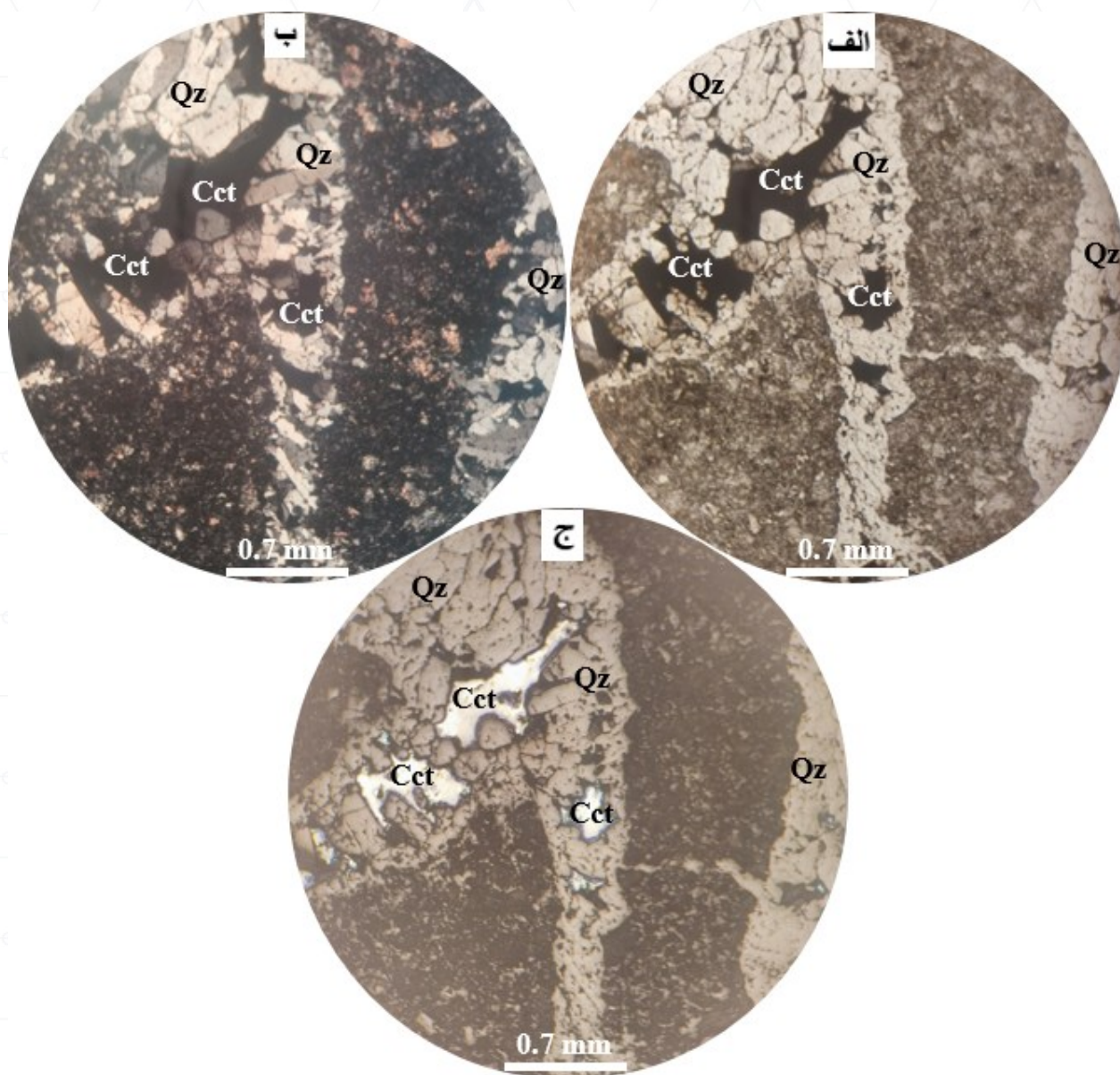
علاوه بر این، سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی میزبان توسط رگچه‌هایی از اپیدوت و یا رگچه‌های اپیدوت و کوارتز قطع شده است (شکل ۵ الف و ب). در مواردی رگچه‌هایی از کلسیت رگچه‌های کوارتز + اپیدوت، رگچه‌های اپیدوت و یا رگچه‌های کوارتز موجود در سنگ را قطع نموده‌اند (شکل ۴ الف و ب). رگچه‌های کلسیت موجود در این سنگ‌ها تاخیری بوده و دارای کانه‌زایی نیستند.



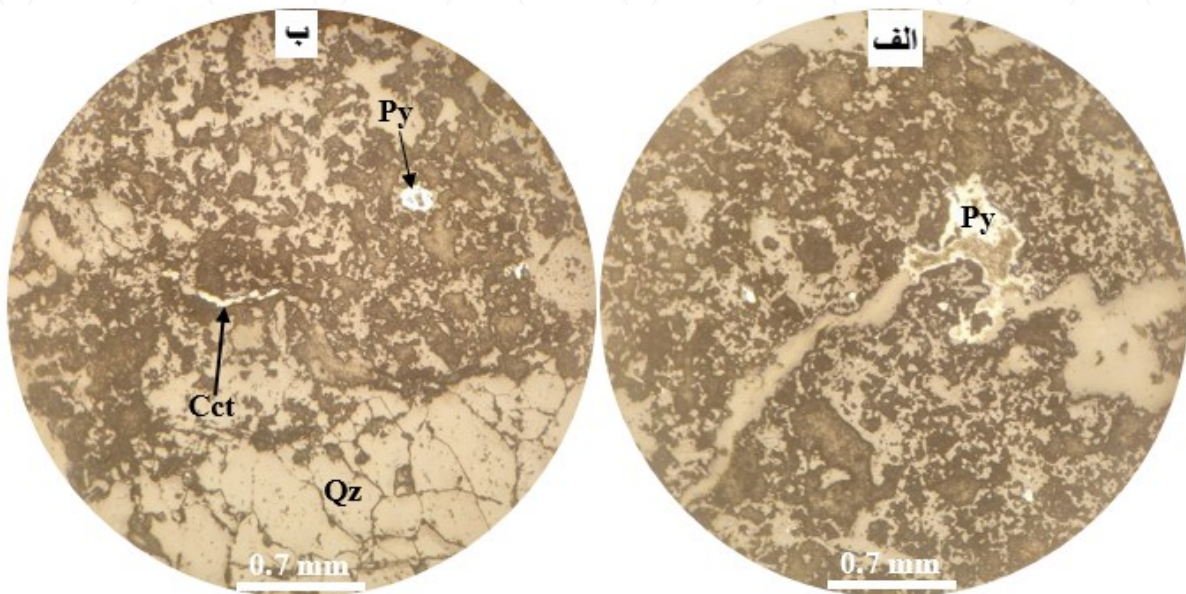
شکل ۱ تصویر نمای نزدیک از ملاکیت (بخش‌های سبز رنگ) در سنگ‌های میزبان آندزیتی.



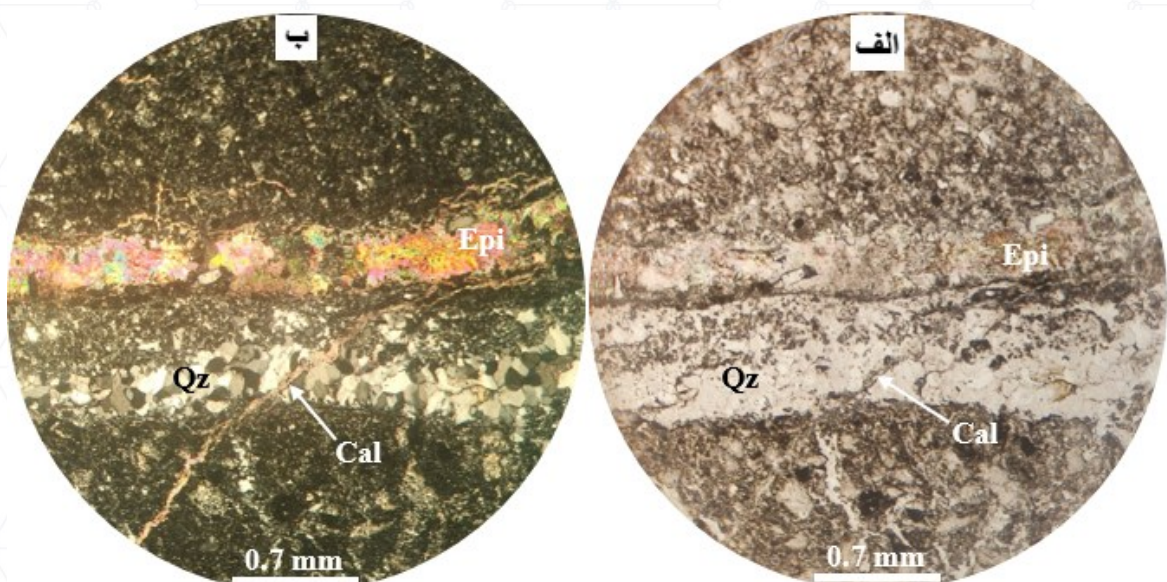
شکل ۲ الف و ب- تصاویر میکروسکوپی نور انعکاسی یک بار پلاریزه از رگچه کوارتز-کالکوسیت در سنگ‌های آندزیتی. تصویر الف بخشی از تصویر ب با بزرگنمایی بالاتر است. علائم اختصاری کانی‌ها عبارتند از: Cct کالکوسیت، Cct II کالکوسیت ثانویه و Cv کولین. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans 2010) گرفته شده‌اند.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از رگچه‌های داربستی کوارتز-کالکوسیت در سنگ‌های میزبان آندزیتی. الف- نور یک بار پلاریزه عبوری. ب- نور دو بار پلاریزه عبوری. ج- نور یک بار پلاریزه انعکاسی. علائم اختصاری کانی‌ها علایم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans گرفته شده و عبارتند از: Qz کوارتز و Cct کالکوسیت).



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی نور انعکاسی یک با پلاریزه از سنگ‌های میزبان آندزیتی. الف- بلور پیریت که در حال تجزیه به گوتیت است. ب- رگچه کالکوسیت و بلوری از پیریت. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010 گرفته شده و عبارتند از: Qz کوارتز Py پیریت و Cct کالکوسیت.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از سنگ‌های آندزیتی میزبان که توسط رگچه‌های اپیدوت، کوارتز و کلسیت قطع شده است. الف- نور یک بار پلاریزه. ب- نور دو بار پلاریزه. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010 گرفته شده و عبارتند از: Qz کوارتز، Epi اپیدوت و Cal کلسیت.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- منطقه هندی‌کندی در پهنه رسوبی - ساختاری البرز قرار دارد.
- در این منطقه یک مجموعه آتشفشانی- آذرآواری متشکل از انواع مختلف توف، توفیت، لاپیلی سنگ، برش آتشفشانی و جریان‌های گدازه منجمله جریان‌های گدازه آندزیتی و بازالتی برونزد دارند.
- کانه‌زایی در این منطقه در دو مرحله هیپوژن (کانه‌زایی سولفیدی) و سوپرژن اتفاق افتاده است. در مرحله هیپوژن کانه‌های سولفیدی اولیه مانند کالکوسیت اولیه و پیریت تشکیل شده‌اند. سپس بر اثر فرایندهای بروزاد و هوازدگی کالکوسیت اولیه به کالکوسیت ثانویه، کولین و مالاکیت و پیریت به گوتیت تبدیل شده است.
- کانی‌های باطله در این کانه‌زایی شامل کوارتز، اپیدوت، کلریت و کلسیت هستند.

۵- تقدیر و تشکر

از مسئولین محترم حوزه پژوهش دانشگاه زنجان به جهت حمایت مالی از این تحقیق در طی اجرا و ارایه مقاله در سی و سومین همایش ملی انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

- امینی ب. و امینی چهرق م. ر.، ۱۹۷۹، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. شماره ۵۷۶۳.
- Alavi, M., 1991, Sedimentary and Structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103: 983-992.
- Guilbert, J.M. and Park Jr, C.F., 1997. The Geology of ore deposits. W.H. Freeman and Company, 884 pp.
- Heidari E., Ziraksari Gh., Alavi M., Lotfi M., Partoazar H., Shahidi A.R., Nazari H. and Salamati R., 1998, 1:100000 geological map of Rudbar. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. Sheet No. 5863.
- Ineson, P., 1989, Introduction to practical ore microscopy, Longman Scientific & technical, 181 pp.
- Stocklin J., Eftekharneshad J., Zahedi M., Alavi M., Nabavi M.H., Samimi M., Hirayama K., Hushmandzadeh A., Valeh N., Haghipour A. and Hajian J., 1969, 1:250000 geological map of Zanjan. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. Sheet No. D4.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010, Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95: 185-187.

سنگ‌نگاری ایگنیمبریت‌های منطقه دیزج‌آباد، جنوب شرق زنجان

ایوب ویسی‌نیا^۱، حسین رستمی^۲، ابراهیم نوذری‌پاک^۳، موسی‌الرضا توری^۴، فاطمه آقامرادی^۴، محمد ابراهیمی^{۲*}

۱- دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب

۲- دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

۳- دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

۴- شرکت توسعه فولاد رازمان

ebrahimi@znu.ac.ir

چکیده

منطقه مورد مطالعه در جنوب شرق زنجان و حوالی روستای دیزج‌آباد واقع است. این منطقه در پهنه ایران مرکزی و نزدیک به پهنه البرز قرار دارد. در جنوب و جنوب شرق زنجان یک مجموعه آتشفشانی-آذرآواری به سن ائوسن گسترش دارد که معادل سازند کرج می‌باشد. در این توالی آتشفشانی-آذرآواری سنگ‌های آذرآواری فراوانی بیشتری در قیاس با گدازه‌ها داشته و شامل توف بلورین، توف خرده‌سنگی، لاپیلی توف، توف شیشه‌ای و توف جوش‌خورده (ایگنیمبریت) می‌باشند. ترکیب سنگ‌های آذرآواری از اسیدی تا حد واسط متغیر بوده و ایگنیمبریت‌های مورد مطالعه ترکیب داسیتی دارند. در این منطقه گدازه‌ها شامل ریولیت، داسیت، آندزیت و آندزی‌بازالت هستند. سنگ‌های ایگنیمبریتی منطقه دیزج‌آباد دارای بافت پورفیروکلاستیک بوده و به وفور حاوی بلورهای درشت خرد شده پلاژیوکلاز می‌باشند. علاوه بر این، سنگ‌های مذکور دارای بافت نواری و تا حدودی بافت جریان‌ی هستند. پلاژیوکلازها دارای منطقه‌بندی، ماکل تکراری و در مواردی ماکل آل‌بیت-کارلسباد می‌باشند. قطعات ترکش‌های شیشه‌ای تجدید تبلور یافته و همچنین انکوزیون‌هایی از سنگ‌های دیگر در ایگنیمبریت‌ها مشاهده می‌گردند.

کلیدواژه‌ها: سنگ‌های آذرآواری، ایگنیمبریت، ائوسن، سازند کرج، دیزج‌آباد، زنجان.

Petrography of the Dizajabad ignimbrites, southeast of Zanjan

Ayoub Veisinia¹, Hosein Rostami², Ebrahimi Nouzaripak³, Moosarreza Toori⁴, Fatemeh Aghamoradi⁴,
Mohammad Ebrahimi^{2*}

¹ University of Shahid Beheshti, Faculty of Earth Sciences, Department of Mineral Resource and Groundwater

² University of Zanjan, Faculty of Sciences, Department of Geology

³ University of Zanjan, Faculty of Sciences, Department of Physics

⁴ Tosee Foolad-e Razhman Company

Abstract

The study area is located in southeast of Zanjan and around the Dizajabad village. This area is placed in the Central Iran zone and it is closed to the Alborz zone. In south and southeastern part of Zanjan an Eocene volcanic-pyroclastic sequence equal to the Karaj Formation is extended. In this sequence, pyroclastic rocks are much more frequent than the lava flows. The pyroclastic rocks are composed of crystal tuff, lithic tuff, lapilli tuff, vitric tuff

and welded tuff (ignimbrite). In the Dizajabad area the composition of the pyroclastic rocks vary from acidic to intermediate and the study ignimbrites have dacitic composition. In the study area lava flows including rhyolite, dacite, andesite and andesitic basalt are also exposed. The Dizajabad ignimbrites have porphyroclastic texture and they have relatively high amount of crushed crystals of plagioclase. Meanwhile, they also show banded and flow textures. In the study ignimbrites plagioclase phenocrysts are usually zoned and they have polysynthetic and albite-Carlsbad twinning. There exist some shard fragments and inclusions of other rocks in the study ignimbrites.

Keywords: Pyroclastic rocks, ignimbrite, Eocene, Karaj Formation, Dizajabad, Zanjan.

۱- مقدمه

منطقه مورد مطالعه در جنوب شرق شهر زنجان واقع بوده و تصویر گوگل ارث آن در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی ساختاری-رسوبی ایران (اشتوکلین، ۱۹۶۸) منطقه دیزج‌آباد در پهنه ایران مرکزی و نزدیک به مرز پهنه البرز قرار دارد. از مطالعات انجام شده قبلی در این منطقه و یا بخش‌های مجاور می‌توان به هاشمی و حاج‌ابوالفتح (۱۳۹۷)، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵) و صفری (۱۳۸۹) اشاره نمود.

ایگنیمبریت‌ها در بین سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. این سنگ‌ها معمولاً از ته‌نشت مواد پرتابی و به ویژه خاکستر آتشفشانی از ابرهای سوزان حاصل می‌شوند. مواد ته‌نشت یافته از ابرهای سوزان به دلیل دمای بالایی که دارند به هم جوش خورده و در جهت شیب توپوگرافی به آرامی حرکت نموده و بافت جریان‌ی در آنها شکل می‌گیرد. ایگنیمبریت‌ها معمولاً اختصاص به فوران‌های انفجاری خشکی دارند.



شکل ۱ تصویر گوگل ارث از محدوده جنوب شرق زنجان که منطقه مورد مطالعه با چهارگوش قرمز رنگ بر روی آن مشخص شده است.

۲- روش مطالعه

به منظور انجام تحقیق حاضر در جریان انجام بازدید صحرایی از سنگ‌های دارای برونزد و به ویژه ایگنیمبریت‌ها نمونه‌برداری شد. همچنین برداشت‌های صحرایی و عکس‌برداری از واحدهای سنگی صورت گرفت. متعاقباً از نمونه‌های برداشت شده مقاطع نازک تهیه گردید. مقاطع نازک در گروه زمین‌شناسی دانشگاه زنجان با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان عبوری مطالعه و عکس‌برداری شدند. در نهایت اطلاعات صحرایی و میکروسکوپی حاصله در تدوین مقاله استفاده گردیدند.

۳- زمین‌شناسی

در منطقه دیزج‌آباد توالی آتشفشانی- آذرآواری ائوسن گسترش وسیعی دارند. این توالی در منطقه زنجان توسط هیرایامایا و همکاران (۱۹۷۹) به دو بخش کردکند (بخش زیرین) و آمند (بخش بالایی) تفکیک شده است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ زنجان (اشتوکلین و همکاران، ۱۹۶۹) و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم (امینی و همکاران، ۱۳۷۶) نهشته‌های آتشفشانی- آذرآواری ائوسن (معادل سازند کرج) و رسوبات کواترنری در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند. در این منطقه به ویژه نهشته‌های آذرآواری و بیشتر ایگنیمبریت برونزد دارند (شکل ۲). سنگ‌های ایگنیمبریتی دارای بافت نواری بوده و این بافت در برونزدهای صحرایی (شکل ۳) و نمونه‌های دستی به وضوح مشهود است.



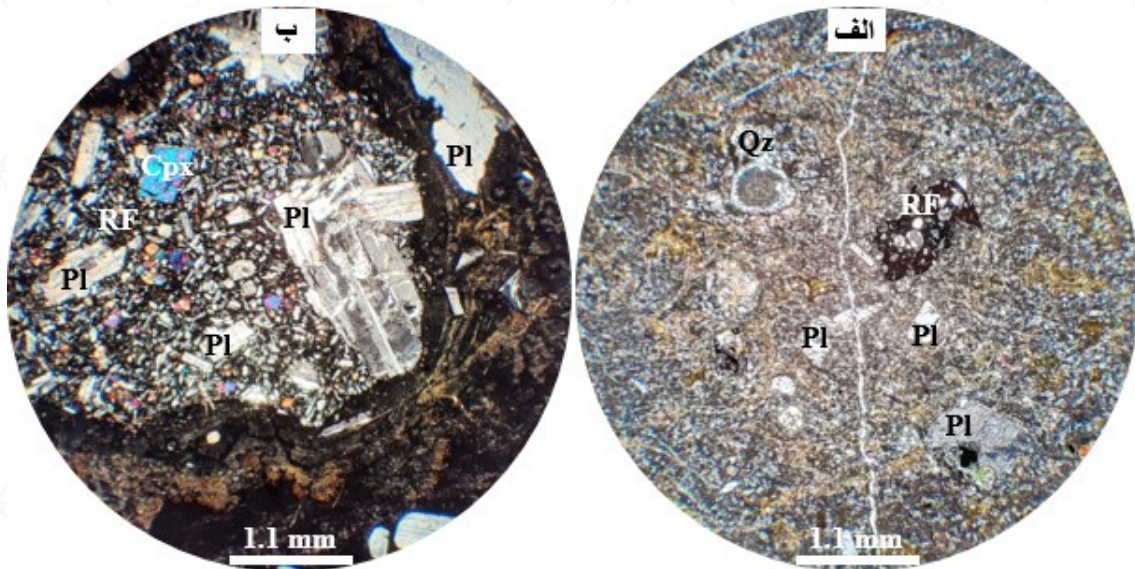
شکل ۲ تصویر صحرایی از ایگنیمبریت‌های مورد مطالعه (دید تصویر به سمت جنوب).



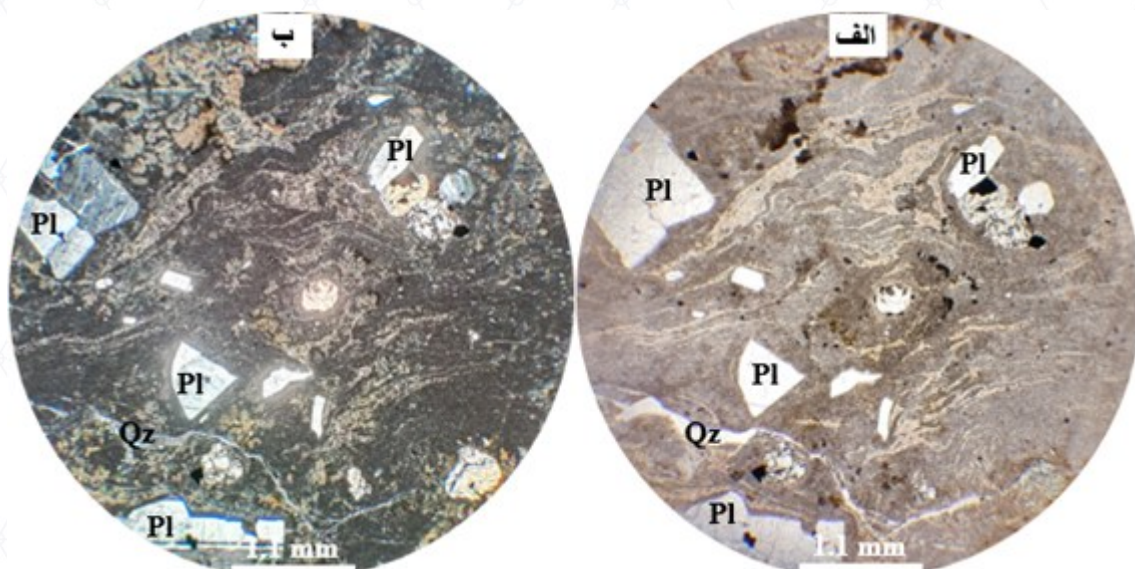
شکل ۳ نمای نزدیک از ایگنیمبریت‌های مورد مطالعه.

۴- سنگ‌نگاری

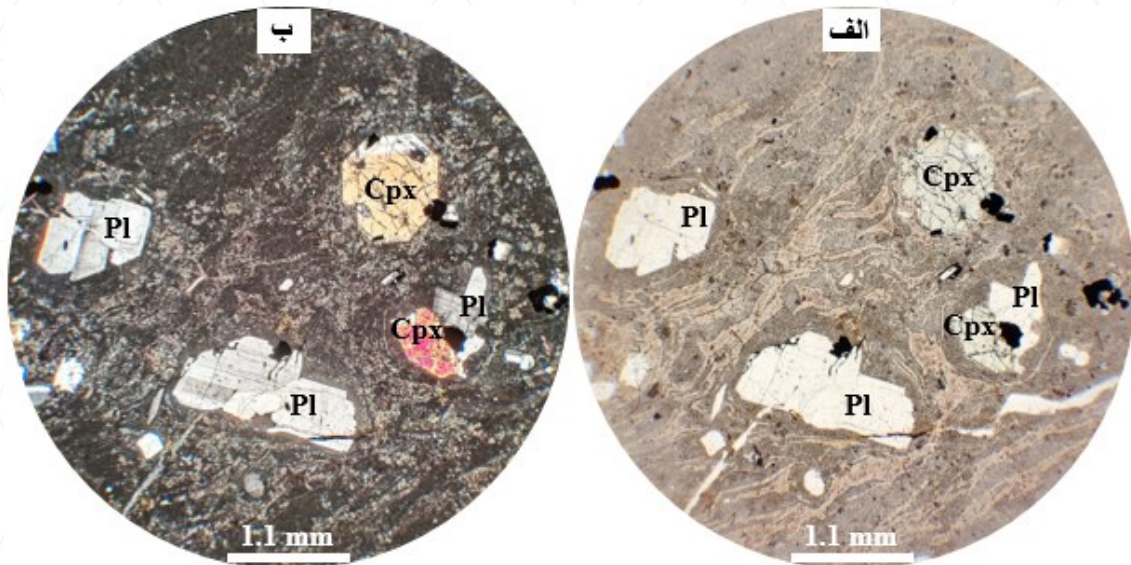
در تحقیق حاضر سنگ‌نگاری سنگ‌های ایگنیمبریتی منطقه دیزج‌آباد مورد توجه قرار گرفته است. این سنگ‌ها در برونزدها و در نمونه‌های دستی به طور واضح بافت نواری داشته و متشکل از نوارهای تیره و روشن هستند (شکل ۳). این نوارها در واقع حاصل لایه‌بندی ظریف موجود در این سنگ‌ها است. در زیر میکروسکوپ سنگ‌های مورد مطالعه دارای انکلوزیون‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی (شکل ۴ الف) و سنگ‌های دولریتی (شکل ۴ ب) و بلورهای درشت و خرد شده فراوانی از پلاژیوکلاز هستند (شکل‌های ۵، ۶ و ۷). بلورهای پلاژیوکلاز اغلب نیمه‌خودشکل بوده و حداکثر طول آنها ۴ میلی‌متر است. پلاژیوکلازها غالباً دارای ماکل تکراری و گاهی اوقات ماکل آلبیت-کارلسباد هستند. علاوه بر این بلورهای درشتی از کلینوپیروکسن که اغلب نیمه‌خودشکل می‌باشند، در ایگنیمبریت‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شوند. کلینوپیروکسن‌ها در مواردی ماکل ساده دارند (شکل ۶). همچنین قطعات ترکش‌های شیشه‌ای که غالباً درجاتی از تجدید تبلور را متحمل شده‌اند در این سنگ‌ها مشاهده می‌گردند (شکل‌های ۵، ۶ و ۷). در مواردی رگچه‌هایی از کوارتز سنگ‌های ایگنیمبریتی را قطع کرده و یا کوارتز حفرات سنگ را پر نموده است (شکل ۵). علاوه بر این حفرات مدور یا بیضی‌شکل موجود در این سنگ‌ها توسط کلسیت و کوارتز پر شده و ایجاد بافت بادامکی یا آمیگدالوئیدال نموده‌اند (شکل ۷).



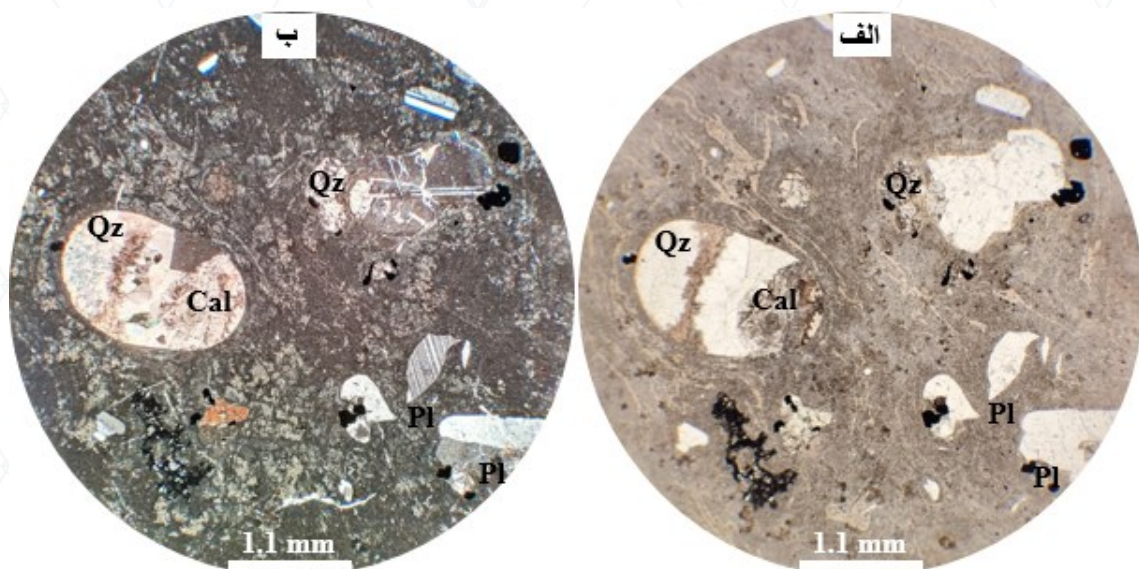
شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی نور عبوری دو بار پلاریزه از سنگ‌های ایگنیمبریتی مورد مطالعه. الف- حاوی قطعه خرده‌سنگی آتشفشانی (RF) و کوارتز به صورت رگچه‌ای و پر کننده فضای خالی. ب- حاوی قطعه خرده‌سنگی دولریتی. علایم اختصاری کانی‌ها از (2010) Whitney and Evans گرفته شده و عبارتند از: PI پلاژیوکلاز و Qz کوارتز.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از سنگ‌های ایگنیمبریتی مورد مطالعه که حاوی بلورهای خرد شده پلاژیوکلاز و ترکش‌های شیشه‌ای تجدید تبلور یافته هستند. الف- نور یک بار پلاریزه. ب- نور دو بار پلاریزه. علایم اختصاری کانی‌ها از (2010) Whitney and Evans گرفته شده و عبارتند از: PI پلاژیوکلاز و Qz کوارتز.



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از سنگ‌های ایگنیمبریتی مورد مطالعه که حاوی بلورهای خرد شده پلاژیوکلاز و ترکش‌های شیشه‌ای تجدید تبلور یافته هستند. الف- نور یک بار پلاریزه. ب- نور دو بار پلاریزه. علایم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans 2010) گرفته شده و عبارتند از: Cpx پیروکسن و Pl پلاژیوکلاز.



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از سنگ‌های ایگنیمبریتی منطقه دیزج‌آباد که حاوی بلورهای خرد شده و ماکل‌دار پلاژیوکلاز و حفرات مدور پر شده با کلسیت و کوارتز (بافت بادامکی یا آمیگدالوئیدال) هستند. الف- نور یک بار پلاریزه. ب- نور دو بار پلاریزه. علایم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans 2010) گرفته شده و عبارتند از: Pl پلاژیوکلاز، Qz کوارتز و Cal کلسیت.

۵- نتیجه‌گیری

سنگ‌های آذرآواری و به ویژه ایگنیمبریت در منطقه دیزج‌آباد گسترش زیادی دارند. سنگ‌های ایگنیمبریتی در این منطقه دارای بافت‌های پورفایروکلاستیک، نواری، جریان‌ی و آمیگدالوئیدال هستند. این سنگ‌ها حاصل ته‌نشست مواد پرتابی از ابر سوزان حاصل از یک فعالیت آتشفشانی اسیدی انفجاری می‌باشند. از ویژگی‌های این سنگ‌ها دارا بودن انکلوژیون‌های سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های دولریتی، حضور ترکش‌های شیشه‌ای تجدید تبلور یافته و فراوانی بلورهای خرد شده پلاژیوکلاز همراه با پیروکسن است. با توجه به دمای بالای مواد پرتابی انباشته شده در روی زمین، این مواد به هم جوش خورده و تحت تاثیر نیروی جاذبه زمین در جهت شیب توپوگرافی به آرامی و با جریان موازی حرکت نموده و بافت جریان‌ی ایجاد نموده است. اهمیت ایگنیمبریت‌ها در مشخص نمودن فعالیت‌های آتشفشانی انفجاری خشکی می‌باشد.

۶- تقدیر و تشکر

از مسئولین محترم حوزه پژوهش دانشگاه زنجان به جهت تامین بخشی از هزینه‌های انجام این پژوهش و ارایه آن سی و سومین همایش ملی انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

- ابراهیمی م.، صفری ص.، ویسی‌نیا، ا. و فرزادیان، ح.، ۱۳۹۵، کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری منطقه سلمان‌لو، جنوب زنجان. اولین همایش ملی منابع طبیعی و توسعه پایدار در زاگرس مرکزی، صفحات ۶-۱.
- امینی، ب.، هیرایاما، ک.، امینی، م.ر.، اشتوکلین، ج.، افتخارنژاد، ج.، حاجیان، ج.، زاهدی، م.، علوی، م.، نبوی، م.ح.، صمیمی، م.، هیرایاما، ک.، هوشمندزاده، ع.ر.، واله، ن. و حق‌پور، ا.، ۱۳۷۶، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- صفری ص.، ۱۳۸۹، مطالعه پترولوژی و ژئوشیمیایی سنگ‌های آذرین بخش فوقانی سازند کرج در جنوب زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش پترولوژی، دانشگاه زنجان، ۱۱۵ صفحه.
- هاشمی م. و حاج‌ابولفتح ع.، ۱۳۹۷، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی در توالی آتشفشانی-رسوبی جنوب زنجان. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و ششم، صفحات ۱۰۲-۹۳.
- Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran: A review. AAPG bulletin, 52(7): 1229-1258.
- Stocklin, J., Eftekhari-nezhad, J., Haghipour, A., Hajian, J., Hirayama, K., Hushmand-zadeh, A., Nabavi, M.H., Samimi, M., Valeh, N. and Zahedi, M., 1969, explanatory text of the Zanjan quadrangle map 1:250000. Geological quadrangle No. D 4, the Geological Survey and Mineral exploration of Iran.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010, Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185-187.

سنگ‌نگاری سنگ‌های آتشفشانی منطقه بقم، جنوب غرب اردستان

موسی‌الرضا توری^۱، فاطمه آقامرادی^۱، قاسم نباتیان^۲، افشین زهدی^۲، محمد ابراهیمی^{۲*}

۱- شرکت توسعه فولاد رازمان

۲- دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

ebrahimi@znu.ac.ir

چکیده

منطقه مورد مطالعه در فاصله حدود ۳۵ کیلومتری جنوب غرب اردستان و جنوب غرب روستای بقم واقع است. این منطقه در پهنه آتشفشانی ارومیه-دختر قرار دارد. در جنوب غرب روستای بقم یک مجموعه آتشفشانی-آذرآواری به سن ائوسن گسترش دارد که توسط دایک‌های متعدد بازیک (بازالتی و دولریتی) قطع شده‌اند. این توالی آتشفشانی-آذرآواری شامل انواع مختلف توف و دیگر انواع سنگ‌های آذرآواری به همراه گدازه‌های کوارتز آندزیتی و ریولیتی می‌باشد. سنگ‌های ریولیتی دارای بافت پورفیریتییک بوده و درشت‌بلورهای سانیدین و پلاژیوکلاز در یک خمیره دانه ریز متشکل از کوارتز و فلدسپار همراه با کانی‌های اپک قرار دارند. سنگ‌های کوارتز آندزیتی دارای بافت‌های پورفیریتییک، گلومروپورفیریتییک، و آمیگدالویدال هستند. بلورهای درشت پلاژیوکلاز تا حدودی غربالی بوده و در یک زمینه از بلورهای باریک و کشیده پلاژیوکلاز همراه با کانی‌های اپک قرار دارند. پلاژیوکلازهای خمیره سنگ جهت یافته و دارای بافت جریان‌ی هستند. حفرات موجود در سنگ اغلب توسط کلریت یا کلسیت پر شده و ایجاد بافت آمیگدالویدال نموده‌اند.

کلیدواژه‌ها: سنگ‌های آتشفشانی، کوارتز آندزیت، ریولیت، ائوسن، بقم، اردستان.

Petrography of the volcanic rocks in Bagham area, southwest of Ardestan

Moosarreza Toori¹, Fatemeh Aghamoradi¹, Ghasem Nabatian², Afshin Zohdi², Mohammad Ebrahimi^{2*}

¹ Tosee Foolad-e Razhman Company

² University of Zanjan, Faculty of Sciences, Department of Geology

Abstract

The study area is located 35 km southwest of Ardestan and southwest of Bagham village. This area is placed in the Orumieh-Dokhtar volcanic zone. In southwest of Bagham village an Eocene volcanic-pyroclastic sequence is widely exposed which is cut by various basic dikes (doleritic and basaltic dikes). This volcanic-pyroclastic sequence is composed of various tuffs, other kinds of pyroclastic rocks along with rhyolitic and quartz andesitic lava flows. The rhyolitic rocks show porphyritic texture with sanidine and plagioclase phenocrysts in a fine grain

groundmass consisting of quartz, feldspar and opaque minerals. Quartz andesitic rocks show porphyritic, glomeroporphyritic and amygdaloidal textures. Plagioclase phenocrysts are often sieved textured and placed in a plagioclase microlites and opaque minerals. Plagioclase microlites in the groundmass are oriented and show flow texture. The cavities of quartz andesitic rocks are filled with chlorite or calcite and amygdaloidal texture has been formed.

Keywords: Volcanic rocks, quartz andesite, rhyolite, Eocene, Bagham, Ardestan.

۱- مقدمه

منطقه مورد مطالعه در ۳۵ کیلومتری جنوب شهر اردستان و در جنوب غرب روستای بقم قرار دارد. واقع بوده و تصویر گوگل ارث آن در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی ساختاری-رسوبی ایران (اشتوکلین، ۱۹۶۸) منطقه بقم در پهنه ارومیه دختر واقع است. از مطالعات انجام شده قبلی در این منطقه می‌توان به مطالعات مربوط به تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان (زاهدی و همکاران، ۱۳۵۷) و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان (رادفر و همکاران، ۱۳۷۸) اشاره نمود.



شکل ۱ تصویر گوگل ارث از روستای بقم و مناطق مجاور که منطقه مورد مطالعه با چهارگوش قرمز رنگ بر روی آن مشخص شده است.

۲- روش مطالعه

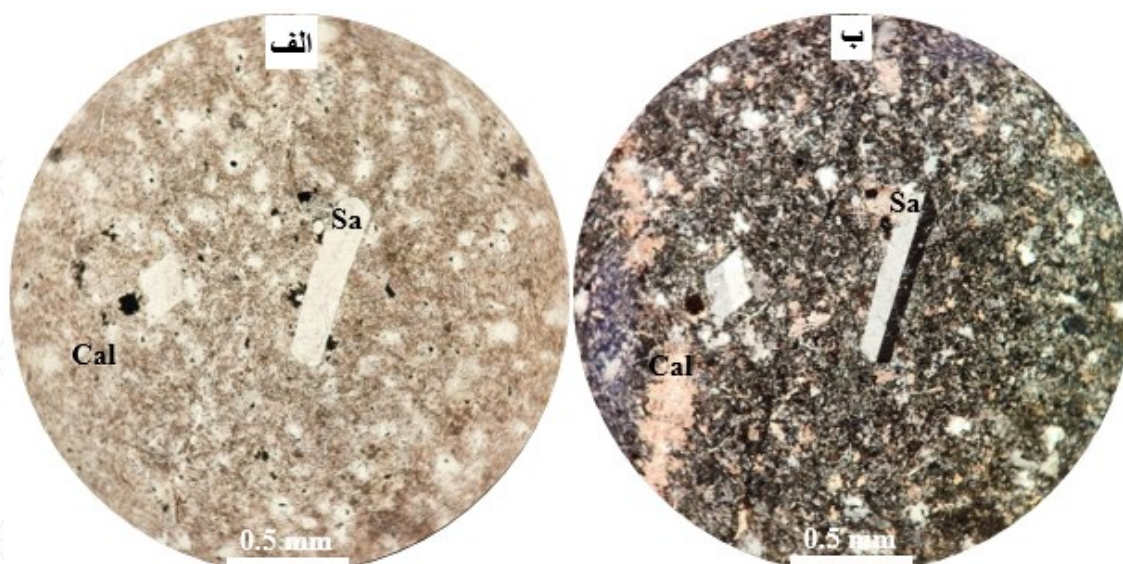
به منظور انجام تحقیق حاضر در جریان انجام بازدید صحرایی از سنگ‌های دارای برونزد و به ویژه گدازه‌های ریولیتی و کوارتز آندزیتی نمونه‌برداری شد. سپس از نمونه‌های برداشت شده مقاطع نازک تهیه گردید. مقاطع نازک در گروه زمین‌شناسی دانشگاه زنجان با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان عبوری لایکا مطالعه و عکس‌برداری شدند. در نهایت این مقاله تدوین گردید.

۳- زمین‌شناسی

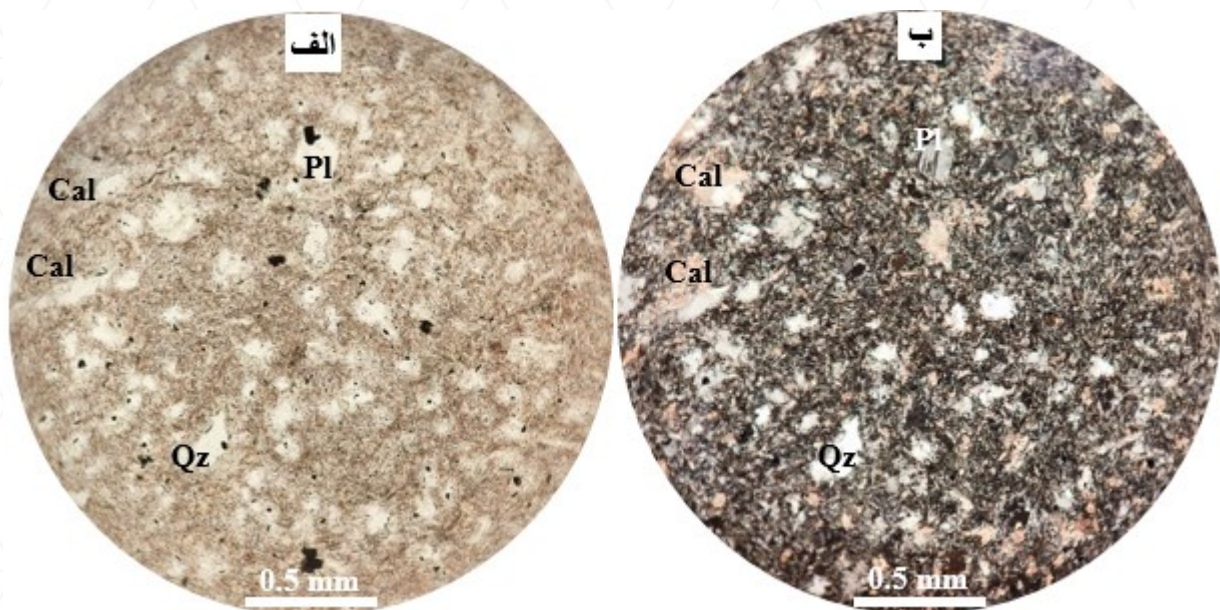
در منطقه بقم توالی آتشفشانی- آذرآواری ائوسن گسترش زیادی دارد. این توالی آتشفشانی- آذرآواری شامل انواع مختلف توف، لاپیلی سنگ، برش آتشفشانی و ایگنیمبریت به همراه گدازه‌های کوارتز آندزیتی و ریولیتی می‌باشد. در این منطقه توالی آتشفشانی- آذرآواری مذکور توسط دایک‌های متعدد بازیک (دولریتی و بازالتی) قطع شده‌اند. رسوبات آبرفتی و نهشته‌های کواترنری به ویژه در دشت‌ها، توالی آتشفشانی- آذرآواری ائوسن و دایک‌های بازیک را پوشانده‌اند.

۳- سنگ‌نگاری

همانطور که اشاره گردید، در منطقه بقم توالی آتشفشانی- آذرآواری ائوسن گسترش زیادی دارد. این توالی آتشفشانی- آذرآواری شامل انواع مختلف توف، لاپیلی سنگ، برش آتشفشانی و ایگنیمبریت به همراه گدازه‌های کوارتز آندزیتی و ریولیتی می‌باشد. در این منطقه توالی آتشفشانی- آذرآواری مذکور توسط دایک‌های متعدد بازیک (دولریتی و بازالتی) قطع شده‌اند. در تحقیق حاضر سنگ‌نگاری گدازه‌های ریولیتی و کوارتز آندزیتی مورد بحث قرار گرفته است. سنگ‌های ریولیتی دارای بافت پورفیریتیک بوده و درشت‌بلورهای سانیدین (شکل ۲) و پلاژیوکلاز در یک خمیره دانه ریز متشکل از کوارتز و فلدسپار همراه با کانی‌های اپک قرار دارند. بلورهای درشت سانیدین نیمه‌خودشکل تا خودشکل بوده و حداکثر طول آنها به ۱ میلی‌متر می‌رسد. درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز اغلب نیمه‌خودشکل و دارای ماکل تکراری (شکل ۳) هستند. حداکثر طول پلاژیوکلاز تا ۱/۵ میلی‌متر است. کوارتز غالباً به صورت بلورهای ناخودشکل در خمیره سنگ وجود داشته و حداکثر طول آنها تا ۰/۴ میلی‌متر است. کانی‌های فرعی سنگ شامل کانی‌های اپاک با حداکثر طول ۰/۲ میلی‌متر می‌باشند. کلسیت بصورت کانی ثانویه در سنگ قابل مشاهده است. کانی‌های مافیک سنگ اغلب اپاسیته شده‌اند.

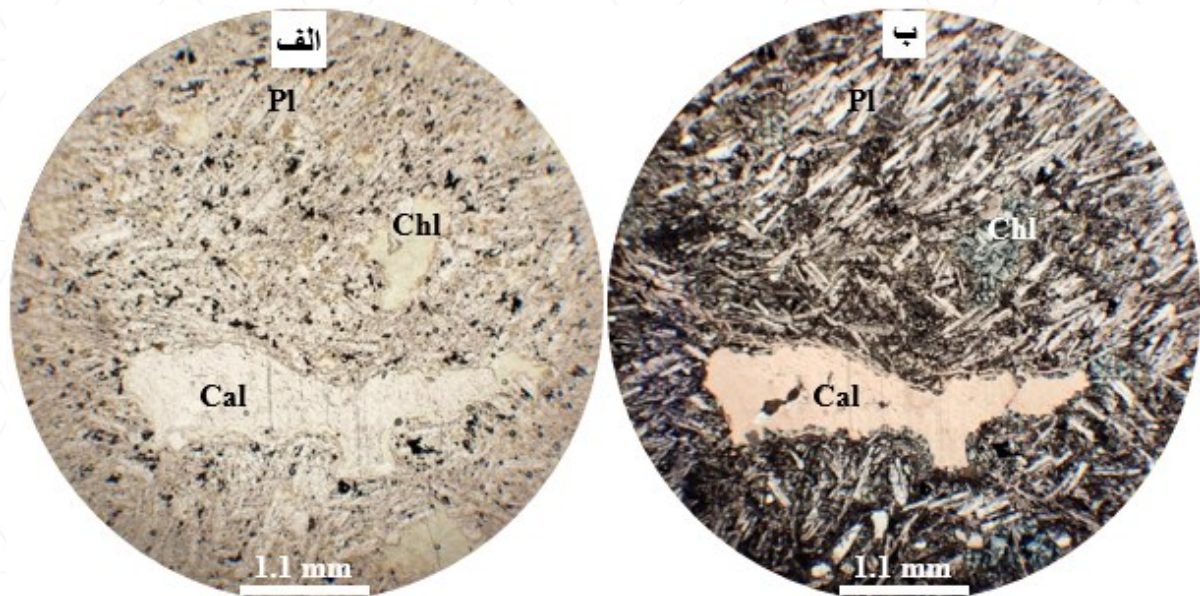


شکل ۲ بلور درشت خودشکل سانیدین با ماکل کارلسباد در ریولیت با بافت پورفیریتیک. کلسیت بصورت کانی ثانویه در سنگ وجود دارد. تصویر الف در نور یک بار پلاریزه و تصویر ب در نور دو بار پلاریزه گرفته شده‌اند. علایم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans 2010) اخذ شده و عبارتند از: Sa سانیدین و Cal کلسیت.

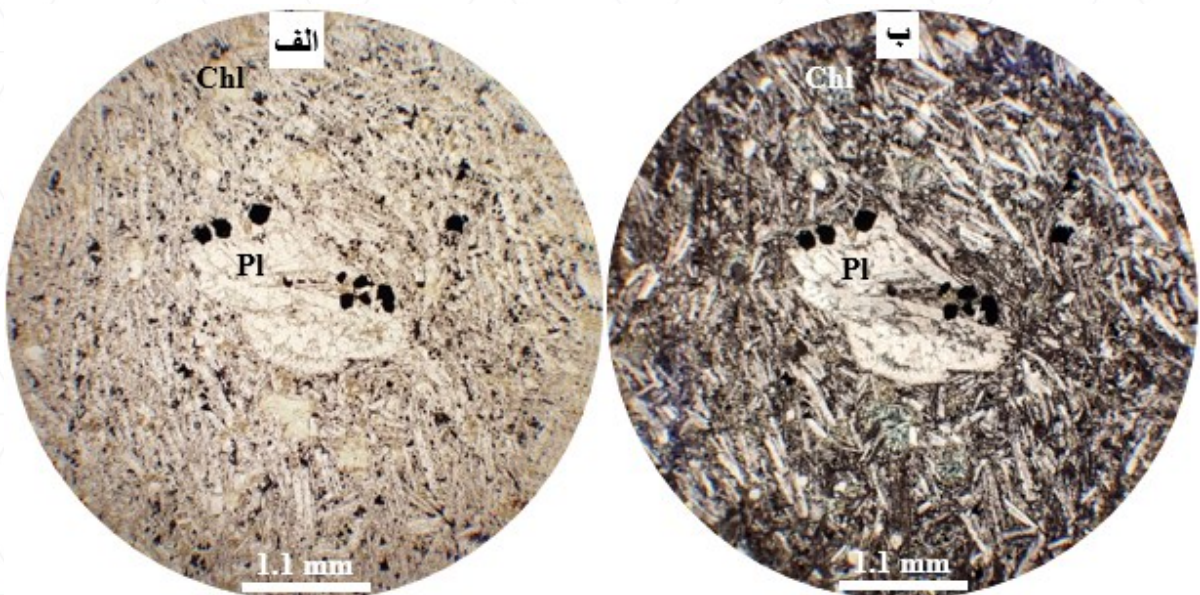


شکل ۳ زمینه دانه ریز سنگ‌های ریولیتی متشکل از پلاژیوکلاز، سانیدین و کوارتز به همراه کلسیت به عنوان کانی ثانویه. تصویر الف در نور یک بار پلاریزه و تصویر ب در نور دو بار پلاریزه گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) اخذ شده و عبارتند از: Pl پلاژیوکلاز، Qz کوارتز و Cal کلسیت.

سنگ‌های کوارتز آندزیتی دارای بافت‌های پورفیریتیک، گلومروپورفیریتیک و آمیگدالوئیدال با یک خمیره متشکل از بلورهای باریک و کشیده و تقریباً جهت یافته پلاژیوکلاز هستند. برخی حفرات موجود در این سنگ‌ها کشیده بوده و حداکثر طول آنها به ۴ میلی‌متر می‌رسد. حفرات سنگ‌های کوارتز آندزیتی غالباً نامنظم بوده و توسط کلریت یا کلسیت پر شده‌اند (شکل ۴). در این سنگ‌ها بلورهای درشت پلاژیوکلاز بصورت مجزا (بافت پورفیریتیک) و یا به صورت تجمعاتی (بافت گلومروپورفیریتیک) در خمیره متشکل از بلورهای باریک و کشیده پلاژیوکلاز به همراه کانی‌های اپاک قرار دارند (شکل ۵). بلورهای درشت پلاژیوکلاز سنگ‌های کوارتز آندزیتی دارای ماکل تکراری و در مواردی منطقه‌بندی داشته و حداکثر طول آنها به ۲/۵ میلی‌متر می‌رسد. پلاژیوکلازهای خمیره سنگ جهت یافته و دارای بافت جریانی هستند. درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز این سنگ‌ها اغلب نیمه‌خودشکل و تا حدودی غربالی شده‌اند (شکل ۵). بافت غربالی پلاژیوکلازها می‌تواند ناشی از اختلاط ماگمایی (Hibbard, 1981)، تغییرات فشار بخار آب (Renjith, 2014) و یا بر اثر کاهش فشار ناشی از صعود سریع ماگما و یا صعود سریع ماگما باشد (Nelson and Montana, 1991). بلورهای کوارتز موجود در سنگ اغلب ناخودشکل و حداکثر طول آنها به ۰/۳ میلی‌متر می‌رسد. کانی‌های اپاک اغلب به صورت بلورهای ریز و فراوان هستند. کانی‌های اپاک اغلب نیمه خودشکل و دارای اندازه‌های متنوع بوده و حداکثر طول آنها به ۰/۴ میلی‌متر می‌رسد. رگچه‌هایی از کلسیت سنگ را قطع کرده‌اند.



شکل ۴ بافت بادامکی ناشی از پر شدن حفرات سنگ با کلسیت یا کلریت در کوارتز آندزیت. تصویر الف در نور یک بار پلاریزه و تصویر ب در نور دو بار پلاریزه گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010) اخذ شده و عبارتند از: Pl پلاژیوکلاز، Chl کلریت و Cal کلسیت.



شکل ۵ درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز غربالی در کوارتز آندزیت. حفرات کوچک موجود در تصویر با کلریت پر شده‌اند. تصویر الف در نور یک بار پلاریزه و تصویر ب در نور دو بار پلاریزه گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010) اخذ شده و عبارتند از: Pl پلاژیوکلاز و Chl کلریت.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر هستند:

- منطقه مورد مطالعه در پهنه آتشفشانی ارومیه-دختر واقع است.
- در جنوب غرب روستای بقم یک مجموعه آتشفشانی- آذرآواری به سن ائوسن گسترش دارد که توسط دایک‌های متعدد بازیک (بازالتی و دولریتی) قطع شده‌اند. این توالی آتشفشانی- آذرآواری شامل انواع مختلف توف و دیگر انواع سنگ‌های آذرآواری به همراه گدازه‌های کوارتز آندزیتی و ریولیتی می‌باشد.
- سنگ‌های ریولیتی مورد مطالعه دارای بافت پورفیریستیک بوده و درشت‌بلورهای سانیدین و پلاژیوکلاز این سنگ‌ها در یک خمیره دانه ریز متشکل از کوارتز و فلدسپار همراه با کانی‌های اپک قرار دارند.
- سنگ‌های کوارتز آندزیتی دارای بافت‌های پورفیریستیک، گلوپروپورفیریستیک و آمیگدالوئیدال با یک خمیره متشکل از بلورهای باریک و کشیده و تقریباً جهت یافته پلاژیوکلاز هستند.
- درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز سنگ‌های کوارتز آندزیتی اغلب نیمه‌خودشکل و تا حدودی غربالی شده‌اند. بافت غربالی پلاژیوکلازها می‌تواند ناشی از اختلاط ماگمایی، تغییرات فشار بخار آب و یا بر اثر کاهش فشار ناشی از صعود سریع ماگما باشد.

۵- تقدیر و تشکر

از مسئولین محترم سازمان زمین‌شناسی کشور و پژوهشکده علوم زمین به جهت تامین هزینه‌های مالی این پژوهش و مسئولین محترم حوزه پژوهش دانشگاه زنجان به جهت تامین هزینه‌های شرکت و ارایه این مقاله در سی و سومین همایش ملی انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

- رادفرج، امینی چهرق م.ر. و امامی م.ه.، ۱۳۷۸، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- زاهدی م.، عمیدی س.م.، امامی م.ه.، زهره‌بخش ع.م.، ۱۳۵۷، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Hibbard, M.J., 1981, The magma mixing origin of mantled feldspars. Contribution to Mineralogy and Petrology, 76: 158-170.
- Nelson, S.T. and Montana, A., 1992, Sieve textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. American Mineralogist, 77: 1242-1249.
- Renjith, M.L., 2014, Micro-textures in plagioclase from 1994-1995 eruption, Barren Island Volcanoe: Evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone. Geoscience Frontiers, 5: 113-126.
- Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran: A review. AAPG bulletin, 52(7): 1229-1258.

اولین گزارش از حضور کانی‌های مونازیت و آپاتیت حامل عناصر نادر خاکی REEs در سنگ‌های آذرین در منتهی‌الیه پهنه جبالبارز، جنوب استان کرمان بر پایه داده‌های Raman و SEM-EDX

محمدعلی رجب‌زاده^{۱*}، زهرا سلیمانی^۲

۱- استاد بخش علوم زمین دانشگاه شیراز، mrajibzadeh@shirazu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی بخش علوم زمین دانشگاه شیراز، soleimani.geo94@gmail.com

چکیده

فسفات‌های REE دار نظیر آپاتیت و مونازیت از مهم‌ترین کانی‌های میزبان عناصر نادر خاکی‌اند و شناسایی آن‌ها در پهنه‌های ماگمایی-گرمايي می‌تواند در تبیین فرآیندهای دگرسانی و نیز غربالگری اکتشافی REEs اهمیت داشته باشد. در این مقاله اولین گزارش از حضور کانی‌های آپاتیت حامل REEs و مونازیت در منتهی‌الیه پهنه جبالبارز در استان کرمان ارائه شده و ارزیابی کارایی رویکرد تلفیقی Raman و SEM-EDX برای تفکیک این دو فاز انجام شده است. پس از تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی بر روی ۱۶۹۵ نمونه سنگی و انجام مطالعات میکروسکوپی بر روی ۵۰ نمونه تکمیلی از مناطق هدف، کانی‌های مورد نظر با استفاده از تصویربرداری و آنالیز عنصری موضعی با SEM-EDX (TESCAN Vega 3) روی نمونه‌های پوشش داده‌شده مورد آنالیز قرار گرفتند. برای شناسایی قطعی فازهای فسفات‌ها از رامان کانفوکال (Horiba LabRAM HR) استفاده شد. نتایج نشان داد آپاتیت و مونازیت به‌صورت ریزفازهای قابل تشخیص در نمونه‌های سنگ آذرین منطقه حضور دارند. داده‌های رامان معیار طیفی مشخصی برای تفکیک دو فاز ارائه کرد، به‌گونه‌ای که پیک اصلی فسفات‌ها در آپاتیت در بازه $960-965\text{ cm}^{-1}$ و در مونازیت در بازه $965-972\text{ cm}^{-1}$ مشاهده شد و با شواهد SEM-EDX پشتیبانی گردید. همخوانی داده‌های Raman و SEM-EDX نشان می‌دهد رویکرد تلفیقی به‌کاررفته ابزار مناسبی برای شناسایی سریع و قابل اتکای فسفات‌های REE دار در محیط‌های دگرسانی و ریزدانه می‌باشد. یافته‌های این مطالعه، حضور حامل‌های کلیدی REE در نگیسان-جبالبارز را مستند کرده و می‌تواند مبنایی برای مطالعات تکمیلی (مانند EPMA/LA-ICP-MS و نقشه‌برداری رامان) و نیز غربالگری اکتشافی دقیق‌تر REE در این پهنه باشد.

کلیدواژه‌ها: آپاتیت، جبالبارز، کرمان، مونازیت، REE

First Report of REE-Bearing Monazite and Apatite in Igneous Rocks from the Terminal Jebalbarez Belt, Southern Kerman Province (SE Iran), Based on Raman and SEM-EDX Data

MohammadAli, Rajabzadeh¹; Zahra, Soleimani²

¹ Professor of Earth science at Shiraz university, mrajibzadeh@shirazu.ac.ir

² Ph.D. student of Economic Geology, soleimani.geo94@gmail.com

Abstract

REE-bearing phosphates such as apatite and monazite are among the most important host minerals for rare earth elements (REEs). Identifying these phases in magmatic-hydrothermal belts is valuable for interpreting alteration processes and for exploration screening of REEs. This paper presents the first report of REE-bearing apatite and monazite from the terminal Jebalbarez belt in Kerman Province (SE Iran) and evaluates the

performance of an integrated Raman + SEM-EDX workflow for discriminating these two phases. Following geochemical analysis of 1,695 rock samples and petrographic investigation of 50 additional samples from target areas, the minerals of interest were examined using SEM-EDX imaging and in situ elemental spot analyses (TESCAN Vega 3) on gold-coated mounts. Phase identification of the phosphate minerals was confirmed by confocal Raman spectroscopy (Horiba LabRAM HR). The results indicate that apatite and monazite occur as discernible micro-phases in the studied samples. Raman spectra provided a clear diagnostic criterion: the main phosphate band occurs at $960-965\text{ cm}^{-1}$ for apatite and $965-972\text{ cm}^{-1}$ for monazite, consistent with and supported by SEM-EDX observations. The agreement between Raman and SEM-EDX data demonstrates that this integrated approach is a practical tool for rapid and reliable identification of REE-bearing phosphates in altered and fine-grained settings. These findings document key REE hosts in the Negisan-Jebalbarez area and provide a basis for follow-up studies (e.g., EPMA/LA-ICP-MS and Raman mapping) as well as more targeted REE exploration screening in this belt.

Keywords: Apatite, Jebalbarez, Kerman Province, Monazite, REE

۱- مقدمه

عناصر نادر خاکی (REE) به دلیل نقش کلیدی در فناوری‌های انرژی پاک، الکترونیک و صنایع پیشرفته، در سال‌های اخیر در ادبیات «مواد خام بحرانی» جایگاه برجسته‌ای یافته‌اند (Gosh, 2025). این عناصر در فهرست «کانی‌ها و مواد معدنی بحرانی» منتشرشده توسط USGS برای سال ۲۰۲۵ قرار گرفته و بر اهمیت REEs و ریسک اختلال در زنجیره تأمین آن‌ها تأکید شده است (USGS, 2025). هم‌زمان، چارچوب‌های سیاستی جدید مانند مقرر «Critical Raw Materials Act» اتحادیه اروپا (۱۲۵۲/۲۰۲۴) نشان می‌دهد که ارزیابی و ردیابی منابع بالقوه (REE حتی به صورت محصول جانبی در سامانه‌های کانه‌زایی متداول) اهمیت عملی و راهبردی دارد (EUR-Lex, 2024). در این میان، کانی‌های فسفات‌های مانند آپاتیت و مونازیت از میزبان‌های اصلی و شاخص REE به‌شمار می‌روند و می‌توانند ردپای تکامل ماگمایی-گرمایی، آلیش پوسته‌ای و رخداد‌های سیال‌زاد را در مقیاس ریزکانی ثبت کنند (Skrzypek, 2025).

با وجود این اهمیت، یکی از چالش‌های اصلی در مطالعات REE به‌ویژه در کمرندهای ماگمایی-گرمایی، ریزدانی و پراکندگی ناهمگن فازهای REE دار و نیز همپوشانی بافتی آن‌ها با کانی‌های دگرسانی است؛ بنابراین اتکا به روش‌های میکروسکوپی و میکروآنالیزی ضروری می‌شود. رهیافت تلفیقی Raman و SEM-EDX از یک سو امکان تشخیص «اثر انگشت ارتعاشی» فازهای فسفات (مثلاً باند $\nu_1(\text{PO}_4)$ در آپاتیت نزدیک $\sim 960\text{ cm}^{-1}$ و تغییرات آن با جانشینی‌ها) و از سوی دیگر تعیین ترکیب عنصری موضعی را فراهم می‌کند. مطالعات رامان روی مونازیت نیز نشان داده‌اند که جایگاه و پهنای باندهای فسفات می‌تواند با ساختار و ترکیب تغییر کند و در بازه‌ای نزدیک به ~ 962 تا $\sim 981\text{ cm}^{-1}$ گزارش می‌شود؛ بنابراین استفاده از رامان برای تمایز مونازیت از فازهای مشابه (و نیز کنترل اثرات ترکیبی و ساختاری) اهمیت دارد. از دیدگاه زمین‌ساخت و کانه‌زایی، کمرند کرمان یکی از پهنه‌های شاخص پورفیری ایران است و بخش جبال‌بارز به‌عنوان یکی از بخش‌های اصلی کانه‌زایی پورفیری در جنوب‌شرق این کمرند معرفی شده است؛ با این حال، گزارش‌های ریزکانی‌شناسی مبتنی بر داده‌های همبسته (Raman and SEM-EDX) از فسفات‌های REE دار در برخی زیرپهنه‌ها هنوز محدود است (Schulz, 2019).

هدف این مقاله، ارائه اولین گزارش و مستندسازی حضور فسفات‌های REE دار (آپاتیت و مونازیت) در منتهی‌الیه جبال‌بارز (استان کرمان، جنوب‌شرق ایران) و در موقعیت مطالعاتی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ نگيسان است؛ در داده‌های این پژوهش، تمایز طیفی با اتکا به اختلاف چند واحدی در پیک اصلی (حدود $960-965\text{ cm}^{-1}$ برای آپاتیت در برابر $972-975\text{ cm}^{-1}$ برای مونازیت) و نیز تفاوت در باندهای فرعی به‌عنوان معیار کلیدی گزارش شده است، و هم‌زمان شواهدی از تشکیل و هم‌زیستی آپاتیت و مونازیت روی پلاژیوکلازهای دگرسان‌شده و ارتباط با دگرسانی کلریتی ارائه می‌شود. افزون بر آن، داده‌های SEM-EDX برای شناسایی عنصری نقطه‌ای و بررسی غنی‌شدگی REE در ریزفازها به‌کار گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری صحرایی از منتهی‌الیه جبالبارز در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ (استان کرمان، جنوب شرق ایران) طی دو مرحله انجام شد. در مرحله نخست تحلیل آماری بر روی داده‌های ژئوشیمیایی ۱۶۹۵ نمونه سنگی که توسط شرکت معدنی-صنعتی گهر زمین در اختیار نویسندگان این مقاله قرار گرفته بود، انجام شد و پس از تعیین مناطق هدف، در مرحله دوم ۵۰ نمونه سنگی از مناطق دارای اولویت برداشت گردید. پس از آماده‌سازی اولیه، همه نمونه‌ها تحت مطالعات میکروسکوپی قرار گرفتند تا فازهای مستعد کانی‌های فسفات و ریزفازهای احتمالی REE دار مشخص شوند؛ سپس نمونه‌های شاخص (و نیز نقاط هدف درون نمونه‌ها) برای آنالیزهای میکروآنالیزی انتخاب شدند. این رویکرد انتخاب هدفمند، امکان تمرکز بر ریزفازهای کمیاب و ناهمگن را فراهم کرد و از تفسیرهای مبتنی بر داده‌های پراکنده جلوگیری نمود. برای ریزبررسی بافتی و تعیین ترکیب عنصری موضعی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به EDX (SEM-EDX) با دستگاه Tescan Vega 3 در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز استفاده شد و نمونه‌ها پیش از آزمون با پوشش طلا آماده‌سازی شدند. آنالیزهای EDX به صورت نقطه‌ای روی فازهای منتخب انجام گرفت و نتایج به صورت درصدهای وزنی عناصر و الگوی حضور و غنی‌شدگی عناصر گزارش شد. برای تأیید کانی‌شناسی و تفکیک دقیق فسفات‌ها، از طیف‌سنجی رامان کانفوکال با دستگاه Horiba LabRAM HR نیز بهره گرفته شد. در تفسیر داده‌ها، تطبیق هم‌زمان شواهد بافتی (SEM)، ترکیب عنصری (EDX) و اثر انگشت طیفی (Raman) مبنای شناسایی آپاتیت و مونازیت قرار گرفت و پیک‌های شاخص ارتعاشات PO₄ به عنوان معیار اصلی تفکیک فازهای فسفات استفاده شد.

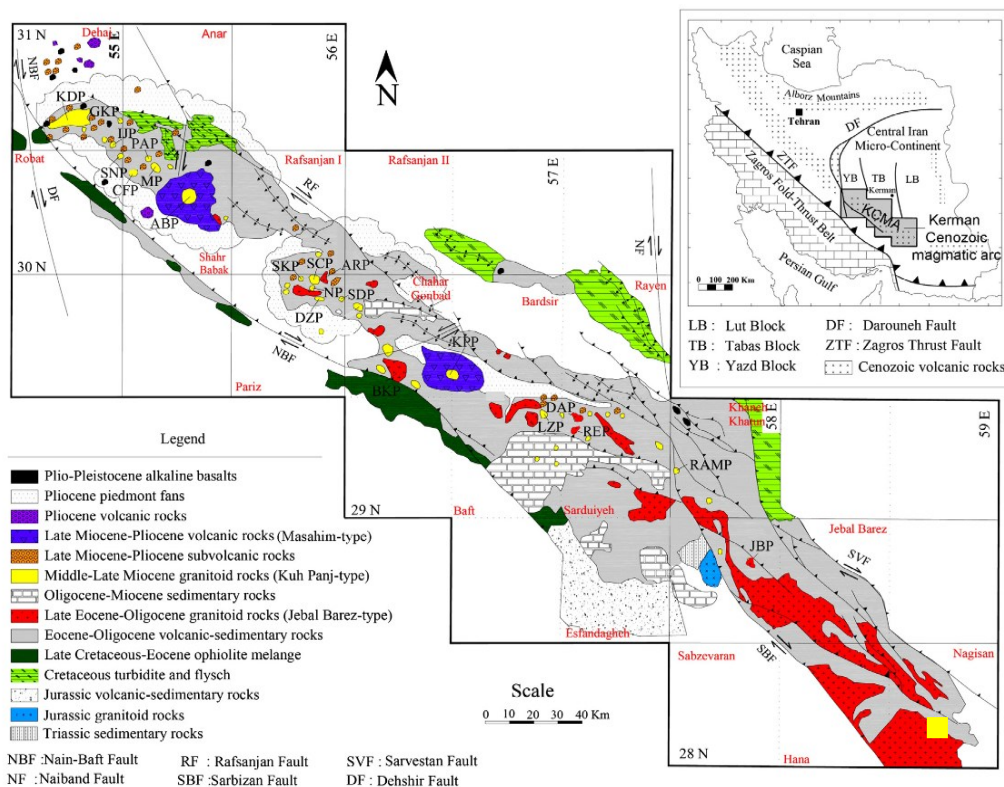
۳- موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در منتهی‌الیه رشته‌کوه جبالبارز و در جنوب شرق شهرستان جیرفت (استان کرمان) قرار دارد (شکل ۱) و از دیدگاه زمین‌ساختی بخشی از پهنه ماگمایی-کانه‌زایی جنوب شرق ایران محسوب می‌شود. این ناحیه در گستره‌ای قرار گرفته که فعالیت ماگمایی سنوزوئیک آن به طور عمده به فروانش نئوتتیس و تکامل کمان ماگمایی مرتبط با آن نسبت داده می‌شود. در مقیاس پهنه‌ای، «کمر بند مس کرمان» بخشی از همین سامانه کمانی است و پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که این کمر بند دست کم به دو بخش اصلی کان‌زایی پورفیری تقسیم می‌شود: بخش کوه پنج در شمال غرب و بخش جبالبارز در جنوب شرق. بنابراین، نگیسان در یک موقعیت فلززایی قرار می‌گیرد که از نظر رخدادهای ماگمایی-گرمایی، هم‌پوشانی زمانی و مکانی با سامانه‌های پورفیری و رگه‌ای در بخش جنوب شرقی کمر بند کرمان دارد. از دیدگاه سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن (به‌ویژه طیف آندزیتی تا داسیتی و واحدهای پیروکلاستیک مرتبط) در بخش‌هایی از جبالبارز گسترش قابل توجهی دارند و در بسیاری از مناطق توسط توده‌ها و دایک‌های نفوذی جوان‌تر قطع شده‌اند. مجموعه‌های نفوذی الیگوسن تا میوسن در این بخش فراوان‌اند و در قالب توده‌ها و کمپلکس‌های پلوتونی (از کوارتز دیوریت تا گرانودیوریت و گرانیت، همراه با انکلوهای ماگمایی) رخمون دارند؛ این مجموعه‌ها در زمین‌شناسی منطقه با عنوان «کمپلکس پلوتونی جبالبارز» نیز شناخته می‌شوند و به عنوان بخشی از تکامل کمان ماگمایی و شرایط فرورانشی تفسیر شده‌اند. از نظر ساختاری، روندهای غالب گسلی و شکستگی‌ها در این پهنه، مسیرهای مناسب برای گردش سیالات گرمایی فراهم کرده و به همین دلیل، همراهی زون‌های دگرسانی (پتاسیک، فلیک، پروپیلیتیک و گاه دگرسانی‌های اکسیداسیون و سوپرژن سطحی) با رخدادهای مس‌دار و چندفلزی در بخش جبالبارز بارها مورد اشاره قرار گرفته است (Mahmoodi et al., 2013; Taghipour et al., 2008).

در مقیاس محلی (ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ نگیسان و پیرامون آن)، داده‌های سنگی و میکروآنالیزی این پژوهش نشان می‌دهد که واحدهای حدواسط تا بازیک و رخدادهای دگرسانی در نمونه‌ها برجسته‌اند؛ به‌طور مشخص، در اولویت‌بندی واحدهای سنگی، دیوریت (تازه و نیز دیوریت دگرسان شده) به عنوان واحدی با پتانسیل بالاتر برای تمرکز REE و عناصر ارزشمند معرفی شده و حضور فازهای متمرکزکننده REE مانند مونازیت و آپاتیت به همراه شواهد دگرسانی گرمایی در آن گزارش شده است. همچنین واحدهایی مانند میکروگابرو و داسیت (و نمونه‌های داسیت دگرسان شده) نیز در مجموعه نمونه‌ها دیده می‌شوند و از دیدگاه

ژئوشیمیایی، ناهمگنی‌های موضعی و نقش سیالات گرمایی در تمرکز برخی عناصر در کانی‌های فرعی و سولفیدها مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، شواهد رامن و SEM-EDX بیانگر آن است که بخشی از کانی‌سازی و تمرکز عناصر، همزمان با دگرسانی پروپیلیتیک و کلریتی و تشکیل سولفیدهایی مانند پیریت رخ داده و در مراحل پیشرفته‌تر، تشکیل فازهای ثانویه و ریزکانی نیز محتمل است. مهم‌تر اینکه، در محدوده نگیسان حضور همزمان آپاتیت و مونازیت به‌صورت ریزفاز و گاه روی پلاژیوکلازهای دگرسان شده گزارش شده که از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی می‌تواند بازتابی از برهم‌کنش سیالات ماگمایی-گرمایی با سنگ میزبان و آزادسازی و بازرسوب‌گذاری فسفر و REE باشد (Rasouli et al., 2023).

بر این اساس، موقعیت زمین‌شناسی نگیسان را می‌توان در قالب یک زیرپهنه از بخش جبال‌بارز در کمربند کرمان در نظر گرفت که طی تکامل ماگمایی سنوزوئیک، هم واحدهای آتشفشانی ائوسن و هم نفوذی‌های جوان‌تر را در بر می‌گیرد و تحت تأثیر شبکه شکستگی‌ها و دگرسانی‌های گرمایی، ظرفیت مناسبی برای رخداد کانی‌های حامل REE (به‌ویژه فسفات‌ها) در مقیاس ریزکانی نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی کمربند ماگمایی سنوزوئیک کرمان و وضعیت آن در کمربند ماگمایی ارومیه- دختر (Asadi et al., 2014). موقعیت منطقه با مربع زرد نشان داده شده است.

۴- بحث

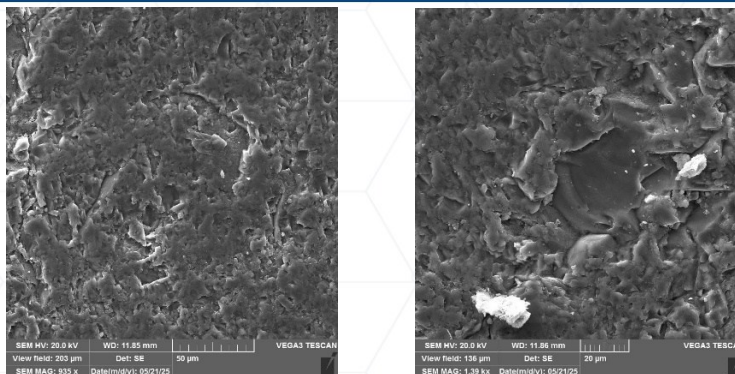
یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در منتهی‌الیه جبال‌بارز، دو فاز فسفات REE دار یعنی آپاتیت و مونازیت به‌صورت ریزفازهای قابل تشخیص حضور دارند و با رویکرد تلفیقی Raman + SEM-EDX می‌توان آن‌ها را با اطمینان بالاتری از فازهای مشابه تفکیک کرد. معیار کلیدی در بخش رامن، اختلاف ۳ تا ۷ واحد موجی در پیک اصلی فسفات‌ها است؛ به‌طوری‌که پیک اصلی آپاتیت در بازه $960-965 \text{ cm}^{-1}$ و پیک اصلی مونازیت در بازه $965-972 \text{ cm}^{-1}$ گزارش شده و باندهای فرعی نیز به‌عنوان شاخص‌های مکمل استفاده شده‌اند. این تمایز طیفی، همراه با شواهد SEM-EDX، ستون اصلی نتیجه‌گیری است و

از نظر کاربردی اهمیت دارد؛ زیرا در محیط‌های دگرسانی و نمونه‌های ریزدانه، صرفاً با میکروسکوپ نوری یا حتی SEM بدون طیف‌سنجی و میکروآنالیز ممکن است موناژیت با فازهای REE دار دیگر (مانند برخی فسفات‌های ثانویه یا برتلویت) اشتباه شود. از منظر زمین‌شناسی اقتصادی، نکته مهم این است که شواهد تشکیل و تمرکز REE را در قالب "ریزفازهای جانبی" داخل یک سامانه ماگمایی-گرمابی نشان می‌دهد؛ یعنی REE احتمالاً به صورت محصول جانبی در کنار کانه‌زایی‌های تیپ پورفیری منطقه قابل پیگیری است. این جمع‌بندی با بخش تفسیر اکتشافی داده‌های رامان در گزارش هم‌خوان است.

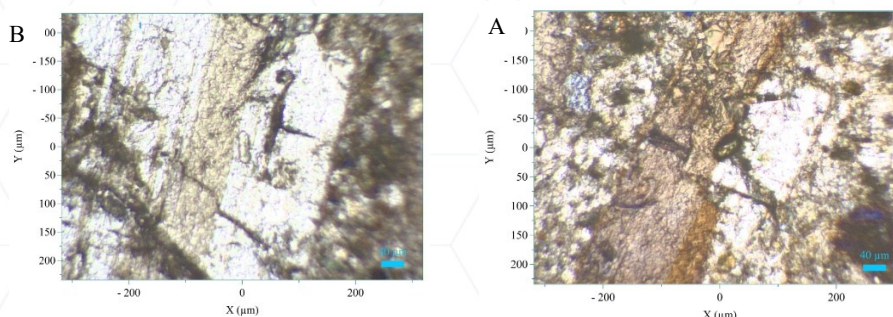
در بسیاری از سامانه‌های پورفیری، فسفات‌ها (به‌ویژه آپاتیت) نقش «ثبت‌کننده» ترکیب سیال و ماگما و گاهی نقش (منبع REE) را دارند و حضور موناژیت می‌تواند بیانگر شرایط ویژه (تفریق پیشرفته، آلاش، یا بازرسوب‌گذاری گرمابی) باشد. در بخش SEM-EDX نیز «وجود ریزفاز هدف» با تصویر و طیف‌ها مستند شده است: موناژیت در دیوریت با تصاویر SEM شکل‌های ۲A و آپاتیت در دیوریت با شکل‌های ۲B گزارش شده است. علاوه بر آن، نمایش رخداد‌های کانیاپی موناژیت و آپاتیت روی میزبان‌های مختلف در بخش رامان (موناژیت روی کوارتز، موناژیت روی پلاژیوکلاز و آپاتیت روی پلاژیوکلاز)؛ شکل‌های ۳ نشان می‌دهد که این فازها فقط «در یک نقطه منفرد» دیده نشده‌اند، بلکه در چند موقعیت کانیاپی تکرارپذیرند. این تکرارپذیری، ارزش نتیجه را بالا می‌برد؛ زیرا از دام «مشاهده تصادفی یک دانه» فاصله می‌گیرد.

ترکیب داده‌ها به‌ویژه ناهمگنی الگوی REE و رخداد کانی‌ها روی کانی‌های دگرسان‌شده بیش از یک سناریو را محتمل می‌کند، اما دو مسیر اصلی قابل دفاع است: (الف) مسیر ماگمایی و تفریق پیشرفته: در نمونه JB21-1 (موناژیت در دیوریت پورفیری تازه)، الگوی گزارش‌شده HREE-dominant و نسبت بالای HREE/LREE در کنار رخداد آنومالی مثبت Eu، به‌عنوان نشانه‌ای از تفریق پیشرفته و یا ورود سیال‌های ویژه تفسیر شده است. از نظر مفهومی، موناژیت در بسیاری از محیط‌ها بیشتر LREE غالب است و HREE-dominant بودن می‌تواند غیرمعمول تلقی شود؛ همین «غیرمعمول بودن» می‌تواند نشان دهد که یا فاز مورد آنالیز با فازهای HREE دار دیگر هم‌رخداد بوده، یا شرایط سیال و ماگما باعث تمرکز انتخابی HREE شده است. (در داده‌ها نیز به همراهی Nb و احتمال وجود فازهای Nb-Ta اشاره شده است). در چنین چارچوبی، می‌توان فرض کرد که در مراحل پایانی تبلور، عناصر ناسازگار P و REE و احتمالاً Nb در فازهای فرعی متمرکز شده‌اند و موناژیت به‌عنوان یکی از گیرنده‌های این عناصر ظاهر شده است. (ب) مسیر گرمابی/دگرسانی و بازرسوب‌گذار: تشکیل ثانویه آپاتیت و موناژیت روی پلاژیوکلازهای دگرسان‌شده و ارتباط آن با دگرسانی کلریتی و پروپیلیتیک. همچنین رخداد موناژیت روی پلاژیوکلاز (شکل A۳) و آپاتیت روی پلاژیوکلاز (شکل B۳) با این سناریو سازگار است؛ زیرا در بسیاری از سامانه‌های گرمابی، فسفات‌های REE دار به صورت پرکننده ریزفضاها، روی کانی‌های دگرسانی و میزبان یا در امتداد ریزشکستگی‌ها دیده می‌شوند.

در بخش رامان، علاوه بر پیک اصلی، به تفاوت‌های شکل باند و جابه‌جایی‌ها اشاره شده است (پیک باریک‌تر در آپاتیت در برابر پیک پهن‌تر در موناژیت که می‌تواند با حضور REE و اثرات ساختاری و ترکیبی مرتبط باشد). از نظر ادبیات علمی، وجود باند شاخص $\nu_1(\text{PO}_4)$ نزدیک $\sim 960 \text{ cm}^{-1}$ برای آپاتیت به‌خوبی شناخته شده و تغییرات کوچک آن می‌تواند با جانمایی‌ها و اختلال ساختاری مرتبط باشد. برای موناژیت نیز گزارش A، است که باند $\nu_1(\text{PO}_4)$ معمولاً نزدیک 970 cm^{-1} قرار می‌گیرد و پهن شدن باند می‌تواند نسبت به ترکیب (Th, U, Ca, Pb) و میزان بی‌نظمی ساختاری حساس باشد. همچنین دامنه جابه‌جایی این باند در نمونه‌های طبیعی و فرآورده‌های آزمایشگاهی می‌تواند نسبتاً گسترده باشد (تقریباً 962 تا 1981 cm^{-1}) بنابراین این راهبرد برای «تفکیک آپاتیت و موناژیت با تکیه بر اختلاف چند واحدی پیک اصلی» وقتی مستدل‌تر می‌شود که با SEM-EDX پشتیبانی گردد؛ دقیقاً همان کاری که انجام شده است.



شکل ۲. (A) تصاویر حاصل از SEM مربوط به کانی مونازیت در سنگ دیوریت (B) تصاویر حاصل از SEM مربوط به کانی آپاتیت در سنگ دیوریت



شکل ۳. (A) تصویر Raman و فاز کانیایی مونازیت روی پلاژیوکلاز، (B) تصویر Raman و فاز کانیایی آپاتیت روی پلاژیوکلاز از دیدگاه ادبیات پژوهشی، سازوکار انحلال-رسوب‌گذاری همزمان (coupled dissolution-precipitation) برای تبدیل و جایگزینی آپاتیت و تشکیل فازهای REE دار (از جمله مونازیت یا مراحل واسطه مانند رایدوفان) هم در مطالعات آزمایشگاهی و هم در شواهد طبیعی گزارش شده است. بنابراین، تفسیر «رابطه ژنتیکی» یعنی امکان اینکه انحلال آپاتیت توسط سیالات، فسفر و REE را برای تشکیل مونازیت ثانویه فراهم کند، از نظر نظری قابل پشتیبانی است.

قرارگیری محدوده نگیسان در بخش جبالبارز کمر بند کرمان، از نظر مقایسه با پژوهش‌های پیشین اهمیت دارد؛ زیرا مطالعات منطقه‌ای اخیر نیز بر وجود دو بخش متفاوت پورفیری در کمر بند کرمان (کوه پنج و جبالبارز) تأکید کرده‌اند. در چنین پهنه‌هایی، انتظار می‌رود که ماگماهای کالک‌آلکالن تا حدی تکامل یافته و رخداد گسترده دگرسانی، امکان جابه‌جایی و تمرکز عناصر ناسازگار (از جمله REE) را در مقیاس ریز فراهم کند. نتیجه که «تمرکز REE می‌تواند در قالب محصول جانبی سامانه پورفیری-سولفیدی دنبال شود» با این نگاه منطقه‌ای هم‌جهت است. همچنین حضور پیریت در واحدهای دگرسان شده می‌تواند به عنوان یک شاخص همراه دگرسانی و ورود سیالات گرمایی دیده شود و از این رو، هم‌نشینی رخدادهای سولفیدی با فسفات‌های REE دار را تقویت کند. از نظر نظری، داده‌ها یک مدل چندمرحله‌ای قابل طرح می‌کند: در مراحل ماگمایی، آپاتیت می‌تواند به عنوان مخزن اولیه P و بخشی از REE عمل کند؛ سپس در طی دگرسانی و ورود سیالات، بخشی از REE و فسفر آزاد شده و در ریزمحیط‌های مناسب، مونازیت (و احتمالاً سایر فازهای همراه) رسوب می‌کند. این نگاه با مفهوم «انحلال آپاتیت و تأمین P+REE برای مونازیت ثانویه» سازگار است. و از سوی دیگر با سازوکارهای گزارش شده برای جایگزینی هیدروترمال آپاتیت-مونازیت همخوانی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف گزارش و مستندسازی حضور فسفات‌های REE دار (آپاتیت و مونازیت) در منتهی‌الیه جبالبارز (استان کرمان، جنوب شرق ایران)، رویکرد تلفیقی Raman و SEM-EDX به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که دو کانی هدف

به صورت ریزفازهای قابل تشخیص در نمونه‌های منطقه حضور دارند و ترکیب شواهد طیفی و عنصری امکان تفکیک مطمئن‌تر آن‌ها را فراهم می‌کند. در داده‌های رامان، باندهای شاخص فسفات‌ها (به‌ویژه اختلاف پیک اصلی در بازه‌های $960-965\text{ cm}^{-1}$ برای آپاتیت و $965-972\text{ cm}^{-1}$ برای مونازیت) به عنوان معیار کلیدی شناسایی استفاده شد و با داده‌های SEM-EDX (تصویربرداری ریزساختاری و آنالیز عنصری نقطه‌ای) همخوانی نشان داد. از منظر علمی و کاربردی، این یافته‌ها دو پیام اصلی دارند: نخست اینکه در بخش جبالبارز، حتی در مقیاس ریزکانی و در نمونه‌های دگرسان‌شده، می‌توان حامل‌های مهم REE را شناسایی و به عنوان شاخص‌های فرآیندهای ماگمایی-گرمایی دنبال کرد؛ دوم اینکه بسته روش‌شناسی Raman+SEM-EDX یک ابزار سریع و کم‌هزینه برای غربالگری اکتشافی REE به عنوان محصول جانبی در پهنه‌های ماگمایی-کانه‌زایی فراهم می‌کند. شواهد رخداد آپاتیت و مونازیت روی کانی‌های دگرسان‌شده (از جمله پلاژیوکلاز) نیز نشان می‌دهد که بخشی از تمرکز REE می‌تواند با دگرسانی و بازتوزیع عناصر در مقیاس میکرو مرتبط باشد. در مجموع، این مطالعه با ارائه شواهد میکروآنالیزی از حضور آپاتیت و مونازیت در نگيسان، جبالبارز، گامی در جهت تکمیل شناخت کانی‌شناسی عناصر نادر خاکی در جنوب شرق ایران و فراهم کردن مبنایی برای برنامه‌ریزی اکتشافی دقیق‌تر در این پهنه به شمار می‌رود.

۶- تقدیر و تشکر

از شرکت معدنی-صنعتی گهرزمین که داده‌ها و نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها را در اختیار نویسندگان این مقاله قرار دادند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

- Asadi, S., Moore, F., & Zarasvandi, A. (2014). Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: A review. *Earth-Science Reviews*, 138, 25–46. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.001>
- Ghosh, B., Vapnik, H., Kim, H.-E., Kim, Y., Ruchitha Birawat, Lu, Y., Su, X., & Yang, H. (2025). Electrochemical Separation and Clean Energy Applications of Rare Earth Elements. *Chemical Reviews*. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5c00103>
- Mahmoodi, M. Y., Bahroudi, A., Ghorbani, M., & Arian, M. (2013). Preliminary Exploration of Copper Minerals in Jebal Barez Mountains, Iran. *Open Journal of Geology*, 03(03), 201–208. <https://doi.org/10.4236/ojg.2013.33023>
- Nader Taghipour, Alijan Aftabi, & Mathur, R. (2008). Geology and Re-Os Geochronology of Mineralization of the Miduk Porphyry Copper Deposit, Iran. *Resource Geology*, 58(2), 143–160. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00054.x>
- Rasouli, J., Ghorbani, M., Ahadnejad, V., & Poli, G. (2016). Calk-alkaline magmatism of Jebal-e-Barez plutonic complex, SE Iran: implication for subduction-related magmatic arc. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2124-9>
- Schulz, B., Merker, G., & Gutzmer, J. (2019). Automated SEM Mineral Liberation Analysis (MLA) with Generically Labelled EDX Spectra in the Mineral Processing of Rare Earth Element Ores. *Minerals*, 9(9), 527. <https://doi.org/10.3390/min9090527>
- Skrzypek, E., Gallhofer, D., Balen, D., Schneider, P., & Hauzenberger, C. A. (2025). “Dry” and “wet” alteration of magmatic monazite in Variscan crystalline rocks from Mt. Papuk (Croatia). *Geologica Carpathica*, 76(3). <https://doi.org/10.31577/geolcarp.2025.10>

بررسی منشأ سیال کانه‌زا در کانسار آهن زاگرس صفاشهر، استان فارس با تأکید بر داده‌های کانی‌شناسی و میانبارهای سیال

زهرا سلیمانی^{۱*}، محمدعلی رجب‌زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی بخش علوم‌زمین دانشگاه شیراز، soleimani.geo94@gmail.com

۲- استاد بخش علوم‌زمین دانشگاه شیراز، mrjabzadeh@shirazu.ac.ir

چکیده

کانسار آهن زاگرس یکی از ذخایر آهنی است که در قسمت جنوبی زون سنندج-سیرجان و در ۱۹ کیلومتری شمال شرق شهرستان صفاشهر در کمپلکس دگرگونی کولی‌کش، درون سنگ میزبان دولومیت سیلیسی شده سازند شتری تریاس واقع شده است. کانسنگ‌های آهن به شکل عدسی‌ها و رگه-رگچه‌های مگنتیت و هماتیت درون مناطق گسلی و شکسته دیده می‌شوند. مطالعات کانی‌شناسی نشانگر این است که کانی‌های هماتیت، مگنتیت، گوتیت همراه با باطله‌های باریت و کوارتز در سنگ‌های معدنی غالب می‌باشند. میزان مگنتیت در کانسار با عمق افزایش می‌یابد. مطالعات پتروگرافی نشانگر وجود انواع میانبارهای سیال اولیه در کانی باریت در گروه‌های تک فازی گازی، دوفازی غنی از مایع، دو فازی غنی از گاز و سه فازی است. داده‌های حاصل از بررسی‌های میانبارهای سیال اولیه در باریت‌های همراه با کانسنگ آهن نشان می‌دهد که کانسنگ آهن زاگرس از نوع نهشته‌های آهن گرمابی میان‌دمایی بوده و میانبارهای سیال بیشتر از نوع دو فازی مایع-گاز با دمای ۱۶۵ - ۴۲۵ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳/۵۵ - ۱۶/۲۴ درصد وزنی معادل NaCl هستند. کانه زایی آهن در اعماق بین ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ متر رخ داده است.

کلیدواژه‌ها: استان فارس، کانسار آهن گرمابی، میانبار سیال، مگنتیت، هماتیت

Origin of the ore-forming fluids of the Zagros iron deposit, Safashahr, Fars province: Constraints from mineralogy and fluid inclusions

MohammadAli, Rajabzadeh¹; Zahra, Soleimani²

¹ Professor of Earth science at Shiraz university, mrjabzadeh@shirazu.ac.ir

² Ph.D. student of Economic Geology, soleimani.geo94@gmail.com

Abstract

Zagros iron deposit as one of the iron ore occurrences in the study area is located at the southern part of the Sanandaj-Sirjan zone, 19 km northeast of Safashahr, in the kolikosh metamorphic complex. Ore mineralization occurred in the form of lenses and veins/veinlets along fault and brecciated zones in silicified dolomite belonging to the Triassic Sotori Formation. Mineralogical data indicated that hematite, magnetite, goethite with barite and quartz as gangues are the predominant mineral phases in the iron ores. Magnetite increases in the ore deposit with depth. Primary fluid inclusions of barite are classified in 1) gas single phase, 2) liquid-rich two phase, 3) gas-rich two phase and 4) three phase groups. Petrographic investigation on primary fluid inclusions showed that Zagros iron ore deposit is classified in mesothermal ores clan. Most of the fluid inclusions were of liquid-gas type, indicating 165-425 °C and 3.55- 16.24 wt% NaCl. Iron mineralization occurred in a depth from 300 to 1500 meters.

Keywords: Fars Province, Hydrothermal Iron deposits, Fluid inclusion, Magnetite, Hematite

۱- مقدمه

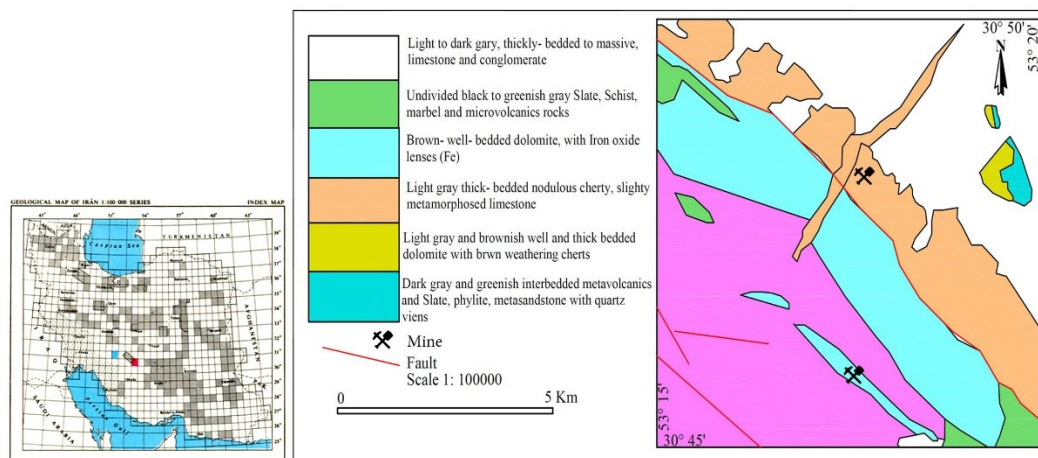
سیال‌های به دام افتاده در فضاهای میکروسکوپی بین سطوح بلوری در بعضی از کانی‌ها می‌توانند به عنوان یکی از بهترین و ساده‌ترین روش‌های تعیین ماهیت سیال کانه‌زا و شرایط کانه‌زایی در مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی مورد توجه قرار گیرند (Robb, 2005). میانبرهای سیال در ۳ گروه اصلی اولیه، ثانویه و ثانویه دروغین تقسیم می‌شوند. میانبرهای سیال اولیه در واقع مقداری از سیال کانی‌ساز می‌باشند که بلور از آن تشکیل شده است. این سیال‌ها در درون نقص‌های بلوری به دام افتاده و بصورت یک سامانه بسته (ایزوله) در تعیین شرایط فشار (P)، دما (T)، حجم (V) و ترکیب شیمیایی (X) سیال کانسنگ‌ساز استفاده می‌شوند (Hitzman, 2000; Asadi and Rajabzadeh, 2014). در این مطالعه از کانی‌های باریت همراه با کانسنگ آهن استفاده شده است. این ذخیره آهن یکی از چندین ذخیره‌ای است که بر گرمایی بودن آن تاکید شده است (Rajabzadeh and Rasti, 2017). هدف اصلی از مطالعات میانبرهای سیال در کانسار آهن زاگرس استفاده از ویژگی‌های PTVX همراه با داده‌های کانی‌شناسی برای شناخت منشا و ویژگی‌های سیال کانسنگ‌ساز و شرایط تشکیل کانسار آهن زاگرس می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور انجام پژوهش‌های کانی‌شناسی و ریزدماسنجی، در دو مرحله عملیات صحرایی تعداد ۴۴ نمونه سنگی برداشت شد. مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی بر روی تعداد ۱۸ مقطع نازک صیقلی و ۶ مقطع صیقلی از نمونه‌های سنگ معدنی و سنگ‌های میزبان با استفاده از روش‌های میکروسکوپ نوری انعکاسی و انعکاسی انجام شد. از نمونه‌های شاخص باریت همراه با کانسنگ آهن، تعداد ۴ مقطع دوبر صیقل به ضخامت حدود ۱ میلی‌متر تهیه و پس از بررسی‌های پتروگرافی میانبرهای سیال اولیه در ۶۶ مورد بررسی ریزدماسنجی قرار گرفتند و نتایج حاصل با استفاده از نرم افزارهای تخصصی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

۳- موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کانسار آهن زاگرس به عنوان یکی از ذخایر آهن منطقه مورد مطالعه در ۱۹ کیلومتری شمال‌شرق شهر صفاشهر و ۱۷۵ کیلومتری شمال‌شرقی شیراز در بین روستای گوشتی و هنشک در مجموعه سنگ‌های دگرگونی کولی‌کش در حاشیه جنوبی زون سنندج سیرجان واقع شده است. کمر بند سنندج- سیرجان یک کمر بند دگرگونی است که دارای ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر عرض و بیش از ۱۵۰۰ کیلومتر طول است و از شمال غربی (سنندج) تا جنوب شرقی (سیرجان) در جنوب شرقی ایران امتداد دارد (Sarkarinejad, 1999). منطقه مورد مطالعه از نظر تکتونیکی در قلمرو جنوب غربی این کمر بند واقع شده و دارای ویژگی‌هایی نظیر گسل‌ها و چین‌خوردگی‌های فراوان بزرگ و کوچک مقیاس و دگرسانی‌های شدید است. اصلی‌ترین واحدهای رخنمون‌یافته در محدوده مورد مطالعه شامل واحدهای سنگ‌های ماسه‌سنگی و دگرگونی‌های شیبستی، فیلیتی و اسلیتی به همراه آهک‌های دولومیتی دگرگون‌شده‌ی کمپلکس دگرگونی کولی‌کش می‌شوند که در برخی از مناطق سنگ‌های ولکانیک ریوداسیتی در آن‌ها نفوذ کرده‌اند. از نظر ریخت‌شناسی، مرکز و جنوب محدوده دارای شیب زیاد و صخره‌ای بوده و در بخش شمالی منطقه تپه ماهورهایی با شیب ملایم وجود دارد که در انتهای قسمت شمالی به ارتفاعات بلند می‌رسند. در این منطقه به صورت پراکنده و جزئی کانی‌های سولفید مس مانند مالاکیت مشاهده می‌شود. همچنین در نقشه‌های زمین‌شناسی در شمال شرق منطقه معدنی توده‌های اسیدی مشاهده می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه ساده شده سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه، بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ دهیید. دولومیت‌های تریاس میانی میزبان ذخایر آهن هستند.

۴- بحث

کانی‌شناسی

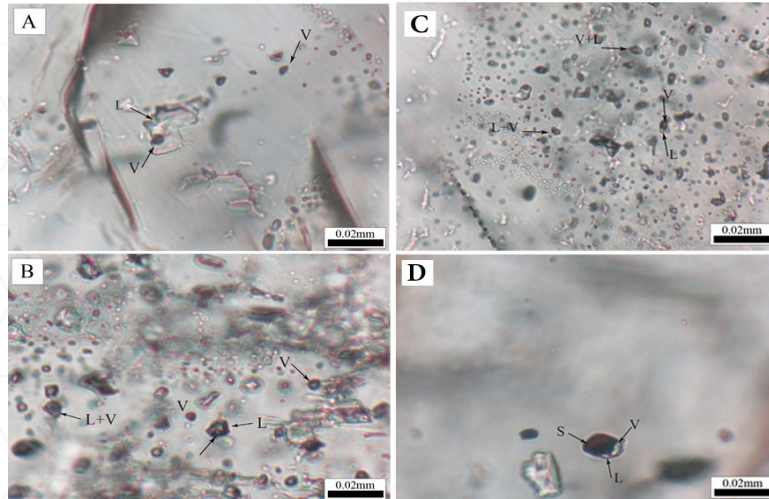
داده‌های میکروسکوپی نشانگر غالب بودن به ترتیب کانی‌های هماتیت، گوتیت، مگنتیت، باریت، کوارتز، دولومیت در کانسنگ‌های معدنی است. کانی هماتیت به دو شکل دیده می‌شود: ۱- هماتیت اولیه که توسط عملکرد سیال‌های گرمابی تشکیل شده‌اند. در این نوع هماتیت محصولات اکسیدی حدواسط دیده می‌شوند و برخی به صورت تیغه‌های اسپیکولاریت بوده و نشانگر تشکیل در شرایط اسیدی و اکسیدی (فوگاسیته بالای اکسیژن و محدوده دمایی وسیع) می‌باشند ۲- هماتیت ثانویه که توسط فرایند ماریتی شدن از کانی مگنتیت در دماهای پایین و محیط سطحی بوجود آمده‌اند. گوتیت که یک کانی ثانویه است، از دگرسانی نهایی مگنتیت و هماتیت در مناطق بسیار سطحی و با دخالت آب‌های جوی در زون سوپرژن تشکیل شده است و با افزایش عمق به شدت کاهش می‌یابد. کانی مگنتیت با عملکرد سیالات گرمابی در گسل‌ها و شکستگی‌های چین‌خوردگی‌های موجود در منطقه نهشته شده‌اند. میزان کانی مگنتیت با افزایش عمق در نمونه‌های معدنی افزایش می‌یابد. باریت باطله اصلی در کانسنگ آهن است که در مراحل آخر کانه‌زایی از سیال گرمابی با حرارت کم در رگه‌ها و به صورت شکافه‌پرکن تشکیل شده است. کوارتز نیز فراوان‌ترین کانی سیلیکاتی در کانسنگ‌های هماتیتی است که در چندین نسل ایجاد شده است. در منطقه مورد مطالعه دولومیتی شدن و سیلیسی شدن بصورت زمینه‌سازی کانه‌زایی عمل کرده‌اند. دولومیت‌های زین اسبی (Saddle Dolomite) نشانگر تشکیل آنها از محلول‌های گرمابی است. منیزیم مورد نیاز برای تشکیل این دولومیت‌ها از سنگ‌های آذرین بازیک تامین می‌شود که احتمالاً در زیر منطقه قرار دارند.

پتروگرافی

مطالعات پتروگرافی نشانگر وجود انواع میانبارهای سیال در گروه‌های تک فاز گاز، دوفازی غنی از مایع، دوفازی غنی از گاز و سه فاز است. در میانبارهای تک فاز گاز حباب تنها فاز تشکیل دهنده می‌باشد، بنابراین از این نوع میانبارهای سیال جهت اندازه‌گیری میکروترمومتری نمی‌توان استفاده کرد. فراوانی این نوع از میانبارهای سیال نشانگر شرایط جوشش در نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد (شهاب‌پور، ۱۳۸۶). این نوع میانبار سیال با فراوانی زیاد و در اندازه‌های حدوداً ۱۰ میکرون در سطح کانی باریت وجود دارد. اشکال مشاهده شده بیشتر به صورت بیضوی و نامنظم می‌باشد.

نوع دیگر از میانبارهای مشاهده شده، دوفازی غنی از مایع است. به این صورت که در این نوع میانبار سیال، فاز مایع همراه با فاز حباب گاز وجود دارد. بیشترین حجم این نوع میانبارهای سیال را فاز مایع دربرمی‌گیرد و فاز گازی تنها ۱۰ تا ۴۰٪ حجم

میانبارهای سیال مطالعه شده را دربردارد. بیشترین نوع میانبارهای سیال مطالعه شده از این نوع می‌باشند. در این حالت میانبارهای دو فاز غنی از مایع از ۲ میکرون تا ۱۵ میکرون در سراسر نمونه‌ها و با فراوانی نسبتاً زیاد پراکنده می‌باشند. اشکال مشاهده شده در میانبارهای دو فاز غنی از مایع بیشتر به صورت نامنظم و بیضوی می‌باشد.



شکل ۲: تصاویر میانبارهای سیال. A و B: سیال‌های دو فاز غنی از مایع به همراه تک فاز گاز، C: سیال‌های دو فاز غنی از گاز به همراه دو فاز غنی از مایع از مایع تک فاز گاز و D: سیال درگیر سه فاز

گروه سوم میانبارهای سیال موجود در نمونه‌ها شامل نوع دو فاز غنی از گاز می‌باشد. در این نوع از میانبارهای سیال حباب گاز بیشترین حجم سیال را دربردارد، به طوری که حتی در بعضی موارد بیش از ۷۰ درصد حجم میانبار را حباب گاز فراگرفته است، در این نوع از میانبارها همگن‌شدگی همراه با تشکیل بخار می‌باشند. فراوانی این نوع از میانبارهای سیال به همراه میانبارهای سیال دوفاز غنی از مایع نشانگر فرایند جوشش است. در این نمونه میانبارهای دو فاز غنی از گاز از ۵ میکرون تا ۱۰ میکرون با فراوانی کم، نسبت به دو نوع دیگر وجود دارد. اشکال مشاهده شده به صورت نامنظم و بیضوی می‌باشد. نوع دیگر از میانبارها، میانبارهای سه فاز هستند، در این نوع از میانبارهای سیال علاوه بر حباب گاز یک کانی اپک در حجمی از مایع احاطه شده است. میانبارهای سه فاز از ۱۰ میکرون تا ۱۵ میکرون با فراوانی کم قابل تشخیص می‌باشند. این نوع میانبارهای سیال بیشتر به شکل منفی بلور به چشم می‌خورند (شکل ۳). بلور منفی Negative crystal shape زمانی شکل می‌گیرد که میانبار سیال از سیستم تبلور بلوری که در آن به دام افتاده تبعیت کند (Robb, 2005).

ریزدماسنجی

برای انجام مطالعات ریزدماسنجی از سه گروه میانبارهای اولیه استفاده شده است:

گروه A: دو فاز مایع گاز با حجم بیشتر مایع L-V

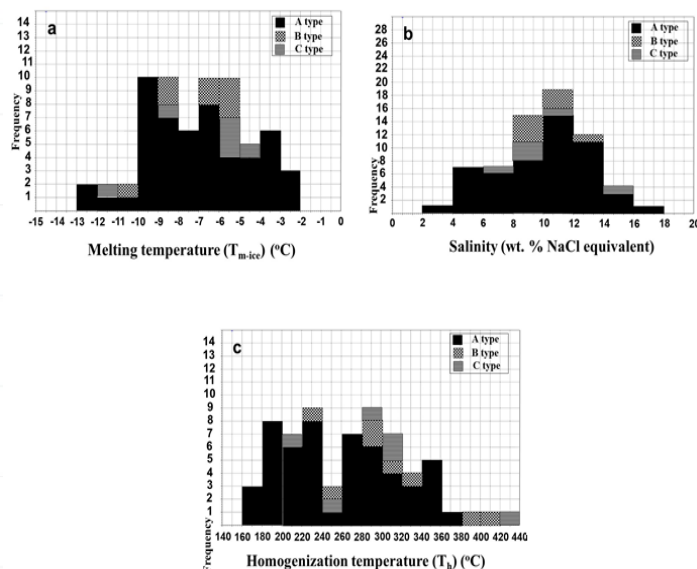
گروه B: دو فاز گاز-مایع با حجم بیشتر از ۶۰ درصد گاز V+L

گروه C: سه فاز مایع-گاز-جامد L-V-S

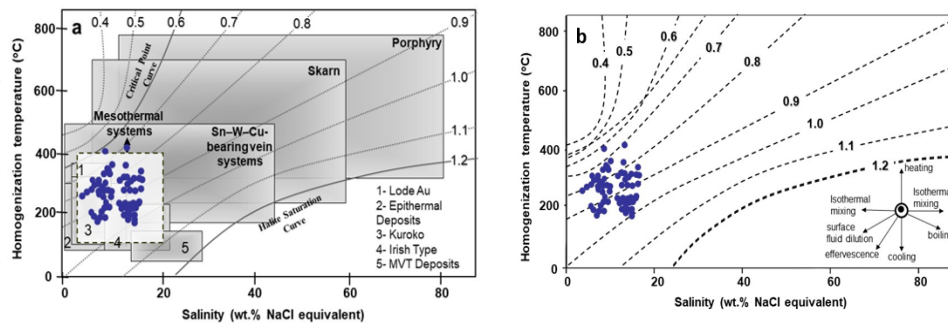
از ۶۶ نقطه مورد مطالعه ۵۲ مورد از گروه A، ۸ مورد از گروه B و ۶ مورد از گروه C اندازه‌گیری شده‌اند.

برای بررسی درجه حرارت همگن‌شدگی میانبارها و تعیین ترکیب شیمیایی سیال‌ها از روش حرارت سنجی استفاده می‌شود. حرارت سنجی یک روش غیرمخرب برای مطالعه میانبارها است که در آن نمونه‌ها را با استفاده از صفحات مخصوص حرارت می‌دهند و یا انجماد می‌کنند. این روش بیشتر از دیگر روش‌ها برای تعیین درجه حرارت سیال به کار می‌رود، هم‌چنین با استفاده از نقطه‌ی یوتکتیک (T_{im})، ترکیب شیمیایی سیال کانسنگ‌ساز را تا حدودی تعیین می‌کند. نقطه‌ی یوتکتیک برای سامانه‌ی $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ برابر -20.8°C درجه‌ی سانتی‌گراد است. در این مطالعه کمترین دمای یوتکتیک به دست آمده -54.4°C درجه

سانتی‌گراد و بیشترین دمای یوتکتیک ۴۸.۲- درجه سانتی‌گراد می‌باشد، از آنجایی که دمای یوتکتیک نمونه‌ها از ۲۰.۸- کمتر است نمک‌های دیگر در کانه‌زایی نقش دارند. دمای ذوب اولین بلور یخ نشان‌دهنده این است که ترکیب سیال کانسنگ ساز معادل $H_2O - CaCl_2$ بوده علاوه بر آن چون دمای یوتکتیک در بعضی از نمونه‌ها به دماهای کمتر می‌رسد نمک‌های دیگر نظیر KCl هم در ترکیب سامانه حضور دارند یعنی سامانه به صورت ترکیب $H_2O - KCl - CaCl_2$ با فاز جامد $ice + CaCl_2 \cdot 6H_2O$ است و پس از آن نمک $MgCl_2$ نیز وارد سامانه شده و ترکیب سامانه به $H_2O - MgCl_2 - CaCl_2$ تغییر می‌کند. با توجه به نمودار دمای همگنی (شکل ۳. c) بیشترین گستره‌های دمایی بین ۱۸۰ تا ۲۴۰ و ۲۶۰ تا ۳۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است، از بین تمامی میانبارهای سیال مورد بررسی فقط ۴ نمونه دمایی بیشتر از ۳۶۰ درجه را نشان می‌دهند، این دماها به علت عدم تصحیح فشار بر روی آن‌ها می‌توانند دمای حداقل تشکیل کانی‌ها باشند. با توجه به نمودار شکل ۳. a دامنه تغییرات دمای ذوب آخرین قطعه یخ بین ۲- تا ۱۲.۵- با بیشترین فراوانی بین ۸- تا ۱۰- و ۵- تا ۷- درجه سانتی‌گراد است، از آنجایی که در هیچ کدام از نمونه‌ها مقدار این دما مثبت نشده پس هیچ کلاتریتی تشکیل نشده است. کمترین شوری به دست آمده ۳/۵۵ درصد وزنی برای دمای ۲۶۵ درجه و بیشترین شوری ۱۶/۲۴ درصد وزنی در دمای ۲۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است، بیشترین فراوانی مربوط به شوری‌های ۸ تا ۱۲ درصد وزنی است (شکل ۳. b). طبق محاسبات انجام شده کانه‌زایی در فشارهایی بین ۲۶۹ تا ۴۸۷۵ بار، با چگالی‌های ۰/۹۴۸ تا ۱/۰۳۶ اتفاق افتاده است. با توجه به موقعیت داده‌های میانبارهای سیال مورد مطالعه بر روی نمودار عمق برحسب دمای همگن‌شدگی (Cunningham, 1978)، کانه‌زایی ترکیبات آهن اولیه در عمق ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ متری برآورد می‌شود. براساس نمودارهای شوری درمقابل دمای همگن‌شدگی، این کانساز در محدوده‌ی کانسازهای میان‌دمایی (mesothermal) قرار می‌گیرد و در شکل‌گیری آن جوشش (boiling) و کف جوشی (effervescence) نقش داشته‌اند.



شکل ۳: نمودارهای ستونی میانبارهای سیال. a. میزان شوری برحسب درصد وزنی معادل NaCl. b. دمای همگن‌شدگی یا یکنواختی، c. دمای ذوب آخرین قطعه یخ.



شکل ۴. تعیین نوع سیال‌های کانساز با استفاده از میزان شوری نسبت به دمای همگن شدگی. a. داده‌های میانبار سیال منطقه مورد مطالعه در محدوده کانسارهای میان‌دمایی قرار می‌گیرد. b. براساس الگو قرارگیری داده‌های میانبار سیال منطقه مورد مطالعه، پدیده‌های جوشش و کف جوشی در کانسازایی شرکت داشته‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

- میانبارها بیشتر از نوع مایع- گاز بوده و در میانبارهای سه فاز مایع- جامد- گاز، فاز جامد به دام افتاده هماتیت است. این موضوع نشانگر غنی بودن آهن در سیال کانساز و شرایط اکسایشی سیال است.
- این کانسار در محدوده دمایی کانسارهای میان‌دمایی قرار می‌گیرد و عمق کانسازایی ترکیبات اولیه آهن بین ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ متر می‌باشد.
- با توجه به دمای یونکتیک، نمک‌های موجود در سیال کانساز شامل CaCl_2 ، KCl ، MgCl_2 و FeCl_2 می‌باشند که با دولومیتی‌شدن گسترده در منطقه و کانسازایی آهن متناسب است.
- باتوجه به حضور کانی هماتیت اولیه به عنوان کانی اصلی، نقش اختلاط آب‌های جوی در فرایند کانسازایی مهم است. دمای همگن شدگی کمتر از ۲۰۰ درجه، تاییدی بر این موضوع است.
- باتوجه به داده‌های شوری و دمای همگن شدگی میانبارهای سیال، فرایندهای جوشش و کف جوشی نقش مهمی در کانسازایی داشته‌اند.

۶- مراجع

- شهاب‌پور، ج.، ۱۳۸۶. زمین‌شناسی اقتصادی، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۵۴۳ صفحه.
- Asadi, S., Rajabzadeh, M., 2014. Geochemistry, paragenesis, and wall-rock alteration of the Qatruyeh iron deposits, southwest of Iran: implication for a hydrothermal-metasomatic genetic model. *Journal of geological research* 25, 1-25.
- Cunningham, C., 1978. Pressure gradients and boiling as mechanisms for localizing ore in porphyry system. *Journal Research U.S. Survey*. 6: 745-754.
- Hitzman, M. W., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when, and why, in Porter, T. M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits A Global Perspective*. Australian Mineral Foundation 17, 9-26.
- Rajabzadeh, M., Rasti, S., 2017. Investigation on mineralogy, geochemistry and fluid inclusions of the Goushti hydrothermal magnetite deposit, Fars Province, SW Iran: A comparison with IOCGs. *Ore Geology Reviews*, Vol. 82, 93-107.
- Robb, L. J., 2005. *Introduction to ore-forming processes*, Blackwell publishing, 382p.
- Sarkarinejad, K., 1999. Tectonic finite strain analysis using Ghouri deformed conglomerate, Neyriz area, Southwestern Iran. *Iranian Journal of Science and Technology* 23, 352-63.

مطالعه کانی شناسی و ژئوشیمی زون اسکارنی یکه بید رزگ، شمال غرب تربت حیدریه، خراسان رضوی

مسلم یزدانی^۱

۱- دانش آموخته دکتری علوم زمین، دانشگاه اشفورد امریکا. ایمیل: yazdani.moslem@yahoo.com

چکیده

زون اسکارن یکه بید رزگ در شمال غرب تربت حیدریه و در بخش مرکزی کمربند ماگمایی خواف-کاشمر- بردسکن واقع شده است. زون اسکارنی یکه بید رزگ در مرز کنتاکت آهک های کرتاسه و توده های نفوذی و دایک هایی با ترکیب گرانیت تا دیوریت قرار گرفته است. دگرسانی های فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک از دگرسانی های غالب در منطقه مورد مطالعه می باشند. سنگ های مورد بررسی در محدوده شامل توده نفوذی دگرسان شده اسکارن و سنگ هایی با کانه زایی آهن می باشد که بیشتر به صورت مگنتیت، هماتیت و لیمونیت می باشد. زون اسکارنی یکه بید رزگ در محدوده ای واقع شده که توده های نفوذی با ترکیب گابرو تا گرانیت با طیف سنی پالئوسن، سنگ های قدیمی تر، این کمربند را قطع کرده است. سنگ های نفوذی جای گرفته در این محدوده، از نظر ترکیبی در گستره ای از دیوریت تا گرانودیوریت و گرانیت با سن ائوسن تا میوسن قرار داشته و سنگ های آتشفشانی آن ترکیبی از بازالت تا رپولیت و سنی از ائوسن تا پلیوسن دارند. در محدوده مورد مطالعه، کانی های سیلیکاته که در مرحله هیپوژن تشکیل می شود شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت می باشد. از کانی های اصلی فاز اسکارن زایی می توان به گارنت، ترمولیت و اکتینولیت اشاره کرد. در فاز اکسیدی کانی اصلی فلزی مگنتیت و کانی های سولفیدی همانند پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت در مراحل آخر اسکارن زایی تشکیل می شود. کانی های ثانویه فاز سوپرژن شامل هماتیت، لیمونیت و مالاکیت می باشد که در مراحل تاخیری یا در اثر فرآیندهای سوپرژن تشکیل شده اند.

کلیدواژه ها: کانی شناسی، ژئوشیمی، زون اسکارن، یکه بید رزگ

Mineralogy and Geochemical Study of the Yekeh-e Bid Razg Skarn Zone, Northwest of Torbat Heydariyeh, Khorasan Razavi

Moslem Yazdani¹

¹ Ph.d at Earth Science, US. e-mail: yazdani.moslem@yahoo.com

Abstract

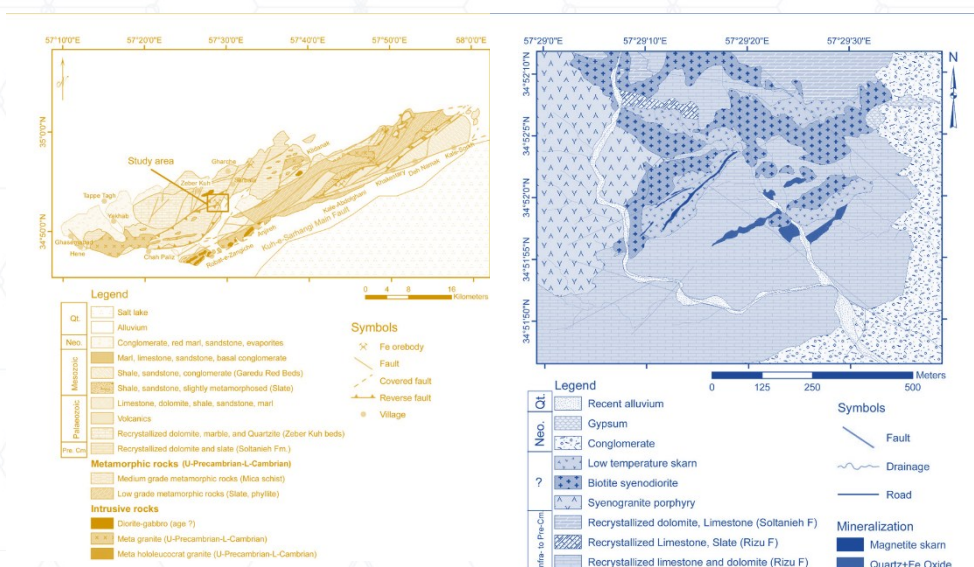
The Yekeh-Bid-Razg skarn deposit is located northwest of Torbat-e Heydariyeh and in the central part of the Khaf-Kashmar-Bardskan magmatic belt. The Yekeh-Bid-Razg skarn zone is located at the contact boundary of Cretaceous limestones and intrusive masses and dykes with granite to diorite composition. Phyllic, argillic and propylitic alterations are the dominant alterations in the study area. The rocks studied in the deposit area include altered skarn intrusive masses and rocks with iron mineralization, which are mostly in the form of magnetite, hematite and limonite. The Yekeh-Bid-Razg skarn zone is located in an area where intrusive masses with a composition of gabbro to granite with a Paleocene age range, older rocks, have cut this belt. The intrusive rocks emplaced in this area range in composition from diorite to granodiorite and granite with an age of Eocene to Miocene, and its volcanic rocks have a composition of basalt to rhyolite and an age of Eocene to Pliocene. In the studied area, silicate minerals formed in the hypogene stage include plagioclase, amphibole and biotite. The main minerals of the skarnogenic phase include garnet, tremolite and actinolite. In the oxide phase, the main metallic

mineral magnetite and sulfide minerals such as pyrite, chalcopyrite, bornite, and chalcocite are formed in the late stages of skarnogenesis. Secondary minerals of the supergene phase include hematite, limonite, and malachite, which are formed in late stages or as a result of supergene processes.

Keywords: Mineralogy, Geochemistry, Skarn Zone, Yekeh-e Bid Razg

۱- مقدمه

از نظر ساختمانی اندیس یکه بید رزگ شامل تاقدیسی با روند شمال غرب - جنوب شرق می باشد که بخش رخنمون یافته هسته این تاقدیس متشکل از سنگ های آهک های کرتاسه می باشد که البته این بخش بطور کامل رخنمون یافته است در مرکز این محدوده قابل مشاهده می باشد که در مجاورت آن توده نفوذی با ترکیبی در گستره ای از دیوریت تا گرانودیوریت و گرانیت با سن ائوسن تا میوسن قرار داشته و سنگ های آتشفشانی آن ترکیبی از بازالت تا ریولیت و سنی از ائوسن تا پلیوسن دارند. بطور کلی کانی سازی در اندیس یکه بید رزگ شامل تشکیل اسکارن در کنار گسل و نیز در کنار دایک های موازی با آن در بخش جنوب شرق اندیس و نیز کانی سازی سولفیدی بصورت رگچه ای و اندکی نیز پراکنده می باشد. (Momenzadeh, 1983). در شکل (۱)، نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه زمین شناسی و واحدهای رسوبی و آذرین اندیس یکه بید رزگ برگرفته از واحد ۲۵۰۰۰۰:۱ (Vaezipour, 1991)

سری آتشفشانی رسوبی ائوسن به طور دگرشیب بر روی آهک های کرتاسه زیرین جای گرفته است. بخش های رسوبی و آذر آواری، لایه بندی کامل و مشخصی نشان می دهند، در حالی که گدازه ها و توف ها، بیشتر بصورت توده ای دیده می شوند. این واحد دارای ترکیب گدازه های ریو داسیتی خاکستری رنگ، سنگ های با سن ائوسن می باشد. فعالیت ماگمایی در کاشمر- تربت، یک سری توده های نفوذی با ترکیب گرانو دیوریت در بخش مرکزی و غربی اندیس کاشمر- تربت و تعدادی دایک با ترکیب داسیت تا آندزیت را شامل می شود. توده ی نفوذی مسبب تشکیل اسکارن شده است. سن این توده را میوسن در نظر گرفته اند. این توده دارای بافت گرانولار می باشد (Ramezani, 2003).

از نظر کانی شناسی حاوی پلاژیوکلاز از نوع آندزین تا الیگوکلاز می باشد. آمفیبول ها از نوع هورنبلند قهوه ای که حاشیه بعضی از آن ها به ترمولیت و اکتینولیت در حال تبدیل می باشند. کانی های دیگر شامل پیروکسن نوع اوزیت - دیوپسید، کوارتز و

کانی‌های فرعی اسفن - روتیل و مقداری اپیدوت اولیه تشکیل شده است. کانی‌های ثانویه شامل کلسیت، کلریت می‌باشند که گاهی به طور کامل جانشین آمفیبول‌ها شده اند (Momenzadeh, 1983).

۵t این واحد که بیشترین ابعاد نقشه زمین‌شناسی را در بر می‌گیرد در بخش‌های شرقی و شمالی قرار دارد. جنس این لایه متاتوف‌های سیلیسی خاکستری و سبز رنگ، توف برش، شیل، مارن و سنگ‌های آذر آورای با سن ائوسن میانی است.

d_a این سنگ‌ها معمولاً به صورت دایک و گنبدی شکل بوده و از گسترش نسبتاً زیادی برخوردار است. ترکیب اصلی این سنگ‌ها داسیتی تا ریو داسیتی و آندزیت است که نتیجه فعالیت آتشفشانی جوان، در منطقه است (Ramezani, 2003).

بخش‌های حاشیه‌ای توده، بافت دانه‌ای ریز و گاهی میکرو پگماتیته دارند. تبلور این توده نباید در عمق زیادی صورت گرفته باشد، زیرا اولاً تمام پلاژیوکلازها ساختمان منطقه‌ای دارند و ثانیاً تشکیل همزمان بلورهای کوارتز و آلکالی‌فلدسپار در مراحل پایانی تبلور ماده مذاب صورت گرفته است و اغلب حالت میکرو پگماتیته به خود گرفته است. کانی‌های اصلی سنگ، شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت، هورنبلند سبز و کمتر از ۱۰ درصد آلکالی‌فلدسپار و کلینوپیروکسن است (Rusk, 2009 and Nadoll, 2012). ترکیب کانی‌شناسی این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، فلدسپات آلکالن، آمفیبول و بیوتیت است (Morata, 2005). کانی‌های فرعی شامل اوپک، اسفن، زیرکن و کانی‌های ثانویه شامل اپیدوت، ترمولیت - اکتینولیت، سرپسیت، کربنات و کانی‌های رسی هستند (Nozaem, 2013).

۱: آهک‌های اربیتولین دار کرتاسه به صورت دگر شیب (در اثر حرکات کمپرسیونی کیمیرین پسین) بر روی تشکیلات ژوراسیک قرار می‌گیرد. که در محدوده اندیس با کنگلومرای قاعده‌ای که نشانه پیشروی دریای کرتاسه است شروع می‌شود البته این بخش کنگلومرای بدلیل حضور واریزه‌ها و ضخامت کم در محدوده مورد مطالعه بخوبی قابل مشاهده و تعقیب نمی‌باشد (Momenzadeh, 1983).

۲- مواد و روش‌ها

مطالعه به صورت تجربی، بررسی‌های صحرایی، تهیه مقاطع میکروسکوپی و استفاده از روش‌های زمین‌شناسی و نتایج آزمایشگاهی تجزیه آنالیز دستگاهی (ICP - MS) نمونه‌ها انجام شده است.

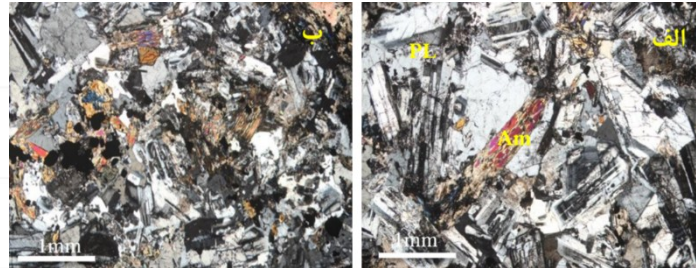
۳- بحث

زون اسکارن یکه بید رزگ در شمال غرب تربت حیدریه و در بخش مرکزی کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن واقع شده در مجاورت توده نفوذی با ترکیب گابرو تا گرانیت با طیف سنی پالئوسن، سنگ‌های قدیمی‌تر این کمربند را قطع کرده است. سنگ‌های نفوذی جای گرفته در این محدوده، از نظر ترکیبی در گستره‌های از دیوریت تا گرانودیوریت و گرانیت با سن ائوسن تا میوسن قرار داشته و سنگ‌های آتشفشانی آن ترکیبی از بازالت تا ریولیت و سنی از ائوسن تا پلیوسن دارند.

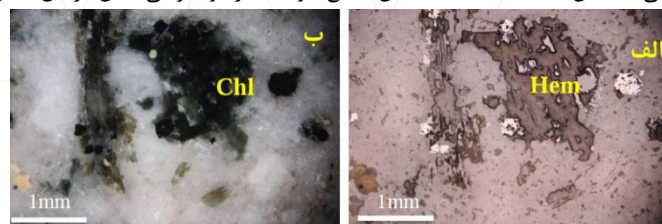
معمول‌ترین نوع گرانودیوریت‌ها انواع غنی از بیوتیت آنها هستند، که نسبت بیوتیت به هورنبلند در این سنگ‌ها با کاهش میزان کوارتز کاهش پیدا می‌کند. این سنگ‌ها با رنگ خاکستری روشن و بافت‌های پورفیری و دانه‌ای مشخص می‌شود که کانی‌های کوارتز، فلدسپار و بیوتیت به وضوح در نمونه دستی یافت می‌شود. بر اساس بافت، این سنگ‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند: ۱- توده‌ی گرانودیوریت با بافت پورفیروئیدی و ۲- توده‌ی گرانودیوریت با بافت دانه‌ای (گرانولار) (Middlemost, 1975 and Hart, 1989).

این سنگ‌ها از کوارتز (۴۳-۱۶ درصد)، پلاژیوکلاز عموماً با ترکیب الیگوکلاز و گاهی آندزین (۵۹-۳۰ درصد)، آلکالی‌فلدسپار شامل اورتوکلاز، مسکویت (۱۷-۰ درصد) و از کانی‌های فرومنیزیم‌دار شامل بیوتیت، هورنبلند و کمی پیروکسن تشکیل

شده‌اند. اسفن، زیرکن، آپاتیت، مگنتیت، ایلمنیت کانی‌های فرعی و سریسیت، کائولن، کلسیت، همتیت، اپیدوت کانی‌های دگرسانی این سنگ‌ها را شامل می‌شوند.



شکل ۲- الف) این مقطع کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز دارد که آمفیبول دچار دگرسانی کلریتی شده است و پلاژیوکلاز دارای ماکل و زونینگ می‌باشد که به خوبی مشخص است. (XPL) (ب) این مقطع بیوتیت دارد و کلریتی شدن در این مقطع مشهود است



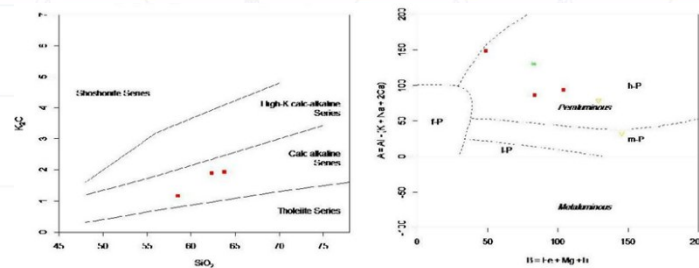
شکل ۳- الف) مقطع دارای کانی‌های پیریت و همتیت نوع ثانویه می‌باشد و دارای بافت جانشینی است که همتیت نوع ثانویه به جای پیریت نشسته است. (PPL) (ب) دارای دگرسانی پروپیلیتیک می‌باشد

در این منطقه کانی‌های سیلیکاته که در مرحله هیپوزن تشکیل می‌شود شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت است که پلاژیوکلاز از کانی‌های سیلیکاته ای است که تشکیل آن در ابتدای مرحله هیپوزن است ولی آمفیبول و بیوتیت می‌توانند تا مرحله اسکارن زایی هم پیش بروند. از کانی‌های اصلی فاز اسکارن زایی می‌توان به گارنت، ترمولیت و اکتینولیت اشاره کرد. طبق جدول (۱) روابط پاراژنتیکی کانی‌های مختلف در اسکارن یک‌به‌یکه مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- روابط پاراژنتیکی کانه نگاری پهنه‌های مختلف در کاناسر اسکارن یک‌به‌یکه رزگ

کانی‌ها	فاز هیپوزن	فاز اسکارن زایی	فاز سوپوزن
کانی‌های سیلیکاته	پلاژیوکلاز آمفیبول بیوتیت	پلاژیوکلاز آمفیبول بیوتیت	پلاژیوکلاز آمفیبول بیوتیت
کانی‌های اصلی اسکارن	گارنت ترمولیت اکتینولیت ایسود کلریت	گارنت ترمولیت اکتینولیت ایسود کلریت	گارنت ترمولیت اکتینولیت ایسود کلریت
کانی‌های فلزی (اکسید)	مگنتیت	مگنتیت	مگنتیت
کانی‌های سولفیدی	کالکوپریت سولفید	کالکوپریت سولفید	کالکوپریت سولفید
کانی‌های نمکی	گالیت کربنات	گالیت کربنات	گالیت کربنات

بر اساس شاخص اشباع آلومینیوم، سنگ‌های اسکارن یک‌به‌یکه رزگ، در محدوده پرآلومین قرار می‌گیرند. در نمودار پسریللو و تیلور، (۱۹۷۶) مشخص گردیده، سنگ‌های مورد مطالعه در بازه سری کالک آلکن قرار می‌گیرند که نشان دهنده پتاسیم بالای نمونه‌ها می‌باشد. در شکل (۴) ماگمای تشکیل دهنده سنگ‌های مورد مطالعه از لحاظ نسبت عناصر آکالی به آهک، از نوع کلسیک و کالک آکالی می‌باشد و ماگمای نمونه‌های مورد مطالعه از نوع منیزمی و آهنی است.



شکل ۴- سمت راست نمودار B-A Plot بر اساس مودیفاید و ویلاسکا (۱۹۹۸). چپ K₂O در مقابل SiO₂ بر اساس پسریللو و تیلور، (۱۹۷۶) (Wiesheu and et al, 1998)

به ترتیب ۶ و ۹ نمونه گرفته شده از زون اسکارن، حداکثر خلوص آهن ۶-۶۳ درصد را نشان دادند و البته موارد دیگری نیز در این زون قابل بررسی هستند که از این آنالیز می توان بهره برد. نتایج در جداول (۲) و (۳) اشاره شده است.

جدول ۲- نتایج آنالیز نمونه‌های سیستماتیک لیتو ژئوشیمیایی مرحله اول (برحسب ppm)

Name	Co	Pb	Ag	Cu	Fe ₂ O ₃ %	Zn	Cd	Ni
S 2	13	528	12.2	709	37.49	2018	2.9	26
S7	4	2680	4.4	342	10.84	1668	30.2	33
S9	5	376	0.2	656	20.23	1829	6.8	27
S11	6	790	2.5	501	23.62	5582	6.5	25
S25	1	107	0.4	120	9.60	54	0.2	24
S28	2	498	0.2	37	9.39	138	0.6	25
S31	1	94	0.1	148	11.15	36	0.3	69
S35	5	97600	11.8	488	33.45	1118	10.1	34
S40	3	819	3.7	13	3.35	47	0.5	21

جدول ۳- نتایج آنالیز نمونه‌های سیستماتیک لیتو ژئوشیمیایی سنگی مرحله دوم برحسب (ppm)

Name	Ag	As	Co	Cr	Fe	Cu	Ni	Pb	S	Sb	Zn
KM-01	1	35.3	2.3	19	66.76	1181	21	66	389	8.8	2323
KM-02	4.3	19.3	8.5	120	51.51	1288	29	133	1127	10.8	3322
KM-03	0.8	13	9.6	19	3.21	182	16	10	150	2.3	1997
KM-04	1.5	86.8	28.1	25	26.84	3152	17	46	250	5.6	750
KM-05	0.5	8.4	8.6	19	3.01	598	19	15	179	1.5	93
KM-06	0.05	5.1	15.6	20	5.18	32	21	7	157	1.7	79

۴- نتیجه‌گیری

سنگ‌های مورد بررسی در زون اسکارنی یکه بید رزگ شامل توده نفوذی دگرسان شده اسکارن و سنگ‌هایی با کانه‌زایی آهن (سنگ آهن مگنتیت) می باشد. کانه زایی آهن بیشتر به صورت مگنتیت، هماتیت و لیمونیت می باشد که مگنتیت به صورت توده‌های مشاهده شد. همچنین در منطقه کانی‌های سولفیدی مانند پیریت و کالکوپیریت دیده شد. نمونه‌های اسکارنی با رنگ کرم روشن تا زرد لیمویی، شامل کانی‌های گارنت، مگنتیت و فلدسپار می باشد. بافت عمده ی اسکارن های منطقه مورد مطالعه، بافت توده‌های و رگه‌ای می باشد. بر اساس شواهد صحرایی و پتروگرافی محدوده مورد مطالعه، سنگ‌های منطقه شامل سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی می‌باشند. سنگ‌های آذرین شامل سنگ‌های درونی مانند گرانودیوریت و گرانودیوریت

پورفیری، سنگ‌های رسوبی شامل ماسه سنگ و آهک و سنگ‌های دگرگونی مشتمل بر اسکارن و مرمر است. معمولترین نوع گرانودیوریت‌ها انواع غنی از بیوتیت آنها هستند که نسبت بیوتیت به هورنبلند در این سنگها با کاهش میزان کوارتز کاهش پیدا می‌کند. این سنگ‌ها با رنگ خاکستری روشن و بافت‌های پورفیری و دانه‌ای مشخص می‌شود. توده گرانودیوریتی دارای بافت دانه‌ای شامل کانی‌های پلاژیوکلاز، بیوتیت، آمفیبول و کوارتز است که دارای کانی‌های دگرسانی همچون کلریت، کلسیت و آمفیبول به کلریت می‌باشد. توده گرانودیوریتی با بافت پورفیری از ویژگی‌های سنگ‌های نیمه عمیق است که نشان دهنده سرد شدن توده در سطوح بالاتر و یا با سرعت بیشتر است که می‌توان به عنوان حاشیه توده نفوذی در نظر گرفت و کانی‌های اصلی در این نمونه شامل: پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز و کانی‌های ثانویه شامل کلسیت و کلریت می‌باشد. عیار آهن حداکثر به ۶۷ درصد می‌رسد. با توجه به نتایج آنالیز و داده‌های ژئوشیمیایی، این زون اسکارنی قابلیت اکتشاف مس، طلا و عناصر دیگر را نیز خواهد داشت.

۵- مراجع

- Hart, W. K., Wolde, G. C., Walter, R. C. and Mertzman, S. A. (1989) Basaltic volcanism in Ethiopia: constraints on continental rifting and mantle interactions. *Journal of Geophysical Research* 94(B6).
- Middlemost, E. A. K. (1975) The basalt clan. *Earth Science Reviews* 11: 3337-364. (geotraverse) in Iran (Ed. Almassi, A.) 185-204. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Morata, D., Oliva, C., Cruz, R. and Suarez, M. (2005) The Bandurrias gabbro: Late Oligocene alkaline magmatism in the Patagonian Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences* 18: 147-162.
- Nadoll, P., Mauk, J. L., Hayes, T. S., Koenig, A. E. and Box, S. E. (2012) Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States.
- Ramezani, J. and Tucker, R. D. (2003) The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science* 303: 622-665. (in Persian).
- Rusk, B. G., Oliver, N. H. S., Zhang, D., Brown, A., Lilly, R. and Jungmann, D. (2009) Compositions of magnetite and sulfides from barren and mineralized IOCG deposits in the eastern succession of the Mt Isa Inlier. 10th Biennial SGA Meeting, Townsville, Australia.
- Momenzadeh, M. and Wauschkuhn, A. (1983) The Allahabad iron deposit and iron, lead, and turquoise occurrences in the Zeber-Kuh Sarhangi mountains SW Kashmar (NE Iran). In: *Geodynamic project (geotraverse) in Iran* (Ed. Almassi, A.) 185-204. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian).
- Nozaem, R. (2013) Deformation analysis of Kuh-e-Sarhangi in the SW Lut block. PhD thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran (in Persian).
- Vaezipour, M. J., Behrouzi, A., Khalqi, M. H. (1991) Geological map 1:250,000 of Torbat Heydariyeh, Quadrangle No. K5. Publications of the Geological Organization of Iran (in Persian).
- Wiesheu, R., Hein, U.F., 1998. The history of fluid inclusion studies. In: Fritscher, B., Henderson, F., (eds.), *Toward a history of mineralogy, petrology and geochemistry*. Heft 23, Munchen, Institut fur Geschichte der Naturwissenschaften, 309-326.

ژنز و گستردگی ذخایر ید ترکمن صحرا و آسیای میانه

مسلم یزدانی^{۱*}، فریبا فروغی^۲

* دانش آموخته دکتری علوم زمین، دانشگاه اشفورد امریکا. ایمیل: yazdani.moslem@yahoo.com

^۲ استادیار چینه‌شناسی و فسیل‌شناسی دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران. ایمیل: f.foroughi@ut.ac.ir

چکیده

ذخایر ید ترکمن صحرا و آسیای میانه در شورابه‌های سازندهای رسوبی کاسپین به سن پلیوسن-پلیستوسن تا هولوسن تشکیل شده‌اند و این جریان‌های شورابه‌ای تا محل کنتاکت زون کپه داغ، ادامه می‌یابند. عنصر ید، یک هالوژن به رنگ بنفش بوده و در سیستم ارتورومبیک متبلور می‌شود و در زمره عناصر ارزشمند و کمیاب قرار دارد. بزرگترین ذخایر ید جهان در رسوبات دریایی کم عمق و نسبتاً شور حوضه‌های غنی از اسفنج‌ها و جلبک‌های پلانکتونیک، تشکیل شده است که پس از تدفین و دیاژنز، تحت تأثیر فعالیت تجزیه ناقص باکتری‌های بی‌هوازی، قرار گرفته‌اند و محتوای ید اسفنج‌ها و جلبک‌ها پس از تجزیه باکتریایی و افزایش غلظت ید شورابه در شرایط احیایی به لایه‌های بالاتر، مهاجرت کرده و در قسمت تحتانی سنگ پوشش یک سازند غیر متخلخل، تمرکز می‌یابند، این تمرکز عمدتاً با افزایش غلظت عنصر برم نیز، همراه است. آسیای میانه و ترکمن صحرا دارای سکانس کاملی از رسوبات پلیوسن-پلیستوسن شامل سازند‌های آپشرون، آگچاگیل و چلکن، می‌باشد که توسط سازند باکو به عنوان سنگ پوشش، احاطه شده است. این سازندها، دارای شورابه‌های غنی از ید و برم می‌باشند که عموماً در نقاط تحتانی سازند باکو تجمع یافته‌اند. غلظت و عیار ید در سازندهای آپشرون، آگچاگیل و چلکن در حدود ۱۳۰۰ برابر آب دریاست و عیاری شامل ۶۰-۱۸۰ ppm، ید را شامل می‌شود. فرآیندهای تشکیل و ژنز ید و سپس نحوه گسترش این ذخایر در سازندهای رسوبی کاسپین، نقش کلیدی در حفاری چاه‌های اکتشافی و استخراجی ید، ایفا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ید ترکمن صحرا، سازند آپشرون، سازند آگچاگیل، سازند باکو، کاسپین

Genesis and Extent of The Turkmen Sahra and Central Asian Iodine Deposits

Moslem Yazdani¹

¹ Ph.d at Earth Science, US. e-mail: yazdani.moslem@yahoo.com

Fariba Foroughi²

² Assistant Professor of Stratigraphy and Paleontology, Faculty of Geology, University of Tehran. Email: f.foroughi@ut.ac.ir

Abstract

The Turkmen Sahra and Central Asia iodine deposits were formed in the brines of the Caspian sedimentary formations of Pliocene-Pleistocene to Holocene age, and this brine flow continues to the contact zone of Kopeh Dag. The element iodine has a purple color and crystallizes in the orthorhombic system, and is among the valuable and rare elements. The world's largest iodine deposits are formed in shallow and relatively saline marine sediments of basins rich in sponges and algae, which, after burial and diagenesis, are affected by the incomplete decomposition activity of anaerobic bacteria, and the iodine content of sponges and algae, after decomposition and increasing in concentration, migrates to higher layers and is concentrated in the lower part of the cover rock of a non-porous formation. This concentration is mainly accompanied by an increase in the concentration of the element bromine. Central Asia and the Turkmen Desert have a complete sequence of Pliocene-Pleistocene

sediments containing iodine- and bromine-rich brines, including the Apsheron, Akchagyl, and Chelken formations, which are surrounded by the Baku Formation as a cover rock. Iodine- and bromine-rich brines have accumulated in the lower parts of the Baku Formation. The concentration and grade of iodine in the Apsheron, Akchagyl, and Chelken formations is about 1300 times that of seawater and the grade includes 60-180 ppm iodine. The processes of iodine formation and genesis and then the way in which these deposits are distributed in the Caspian sedimentary formations play a key role in drilling iodine exploration and extraction wells.

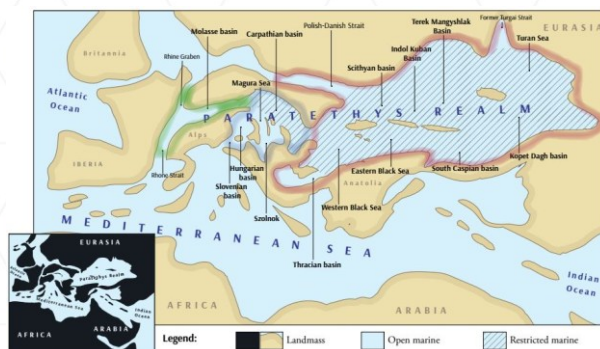
Keywords: Turkmen Sahra Iodine, Apsheron Formation, Akchagyl Formation, Baku Formation, Caspian

۱- مقدمه

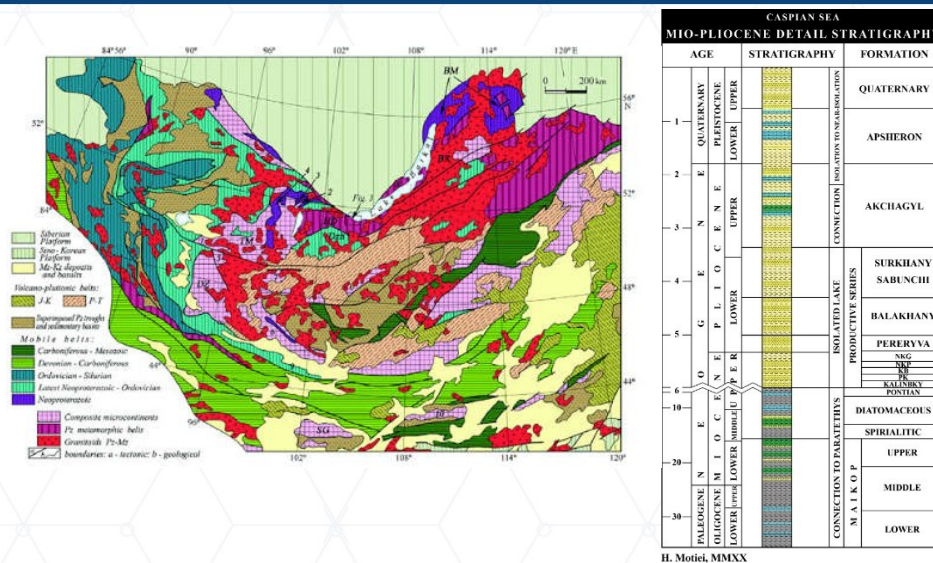
حوضه پاراتیس با برخورد صفحات عربستان و آناتولی در زمان بوردیگالین پسین، توسعه یافت. در زمان لانگین ساحل به سمت خشکی، پسروری نموده و در نهایت در زمان سرراوالین، حوضه به طور کامل بسته شده است. این دریا در مناطق وسیعی از جلگه و گودال پانونین تا دریای آرال را می پوشانده است. در ۱۱/۵ میلیون سال پیش، دریا لب شور پانونین به صورت مستقل تشکیل شده است و جانداران بومی ویژه آب های با شوری ۱۲ تا ۱۵ گرم بر لیتر بسیار سریع در این دریا ظاهر شده اند. پس از ۵/۱ میلیون سال، شوری دریای سارماسین، کمی کمتر و در ۱۰ میلیون سال قبل به حدود ۶ تا ۱۷ گرم بر لیتر رسیده و جانداران بومی محیط های لب شور مختص این دریا که ترکیب گونه های جانوری متفاوتی از دریای پانونین داشت در این محیط ساکن شده اند. (پالوسکا و همکاران، ۱۳۷۱).

حدود ۳ میلیون سال پیش، آب و هوای مرطوب و افزایش ورود روان آب های سطحی به دریا بالاخانی منجر به پیدایش دریا لب شور «آگچاگیل» با شوری ۵ تا ۱۲ گرم بر لیتر شده است. دریا آگچاگیل در چندین مرحله در حوضه کاسپین به شکلی متوالی با چندین محدوده آبی که کم و بیش جاندارانی را در خود جای داده بودند جایگزین شده است. حدود ۱/۷ میلیون سال قبل دریا «باکو» جایگزین دریا آپشرون شده که باز محدوده شوری یکسانی داشته است. پس از آن و در حدود ۴۰۰ هزار سال قبل، حوضچه کاسپین با شوری ۵ تا ۱۲ گرم بر لیتر ایجاد گردیده است. حوضچه کاسپین حدود ۱۰۰ هزار سال قبل جای خود را به دریا «خوالین» داده که شوری کمتری در محدوده ۳ تا ۸ گرم بر لیتر داشته و در نهایت دریای کاسپین موجود که در واقع همان محیط کنونی دریای کاسپین است، تشکیل گردیده است. در حقیقت، این دریا از ۵۰۰ تا ۷۰۰ سال پیش از آغاز هولوسن شروع به تکوین نموده است (Lascarev, 1920).

در شکل (۱) و (۲)، حوضه پاراتیس و ستون چینه شناسی زون کاسپین و نقشه زمین شناسی آسیای میانه و ترکمن صحرا، نشان داده شده است.



شکل ۱- حوضه رسوبی پاراتیس و تکامل آسیای میانه (Aladin, 2000)



شکل ۲- ستون چینه ای سازندهای کاسپین در ناحیه ترکمن صحرا و نقشه زمین شناسی آسیای میانه (Ksenzenko, 1995)

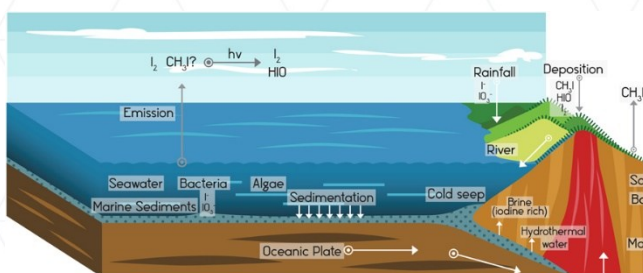
ید عنصری غیر فلزی جامد و برنگ بنفش است که در سیستم ارتورومبیک متبلور می شود. ید در کانی خاصی متمرکز نمی شود، اما در اکثر کانی های کلر دار، مانند سودالیت و ائودالیت، جایگزین کلر می شود. ید در کانی های سنگ های آذرین و دگرگونی، تمرکز کمتری داشته اما در کانی های رسوبی دارای عیار بالاتر و در سنگ های رسی دارای بالاترین عیار می باشد. تمرکز ید در سنگ های رسوبی غنی از مواد آلی بیشتر است (غضبان، ۱۳۸۱). ید را از شورابه ها و گیاهان دریایی (جلبک ها) تولید می کنند (کاکس، ترجمه مر و زائری، ۱۳۸۲). مقدار کل فراوانی این عنصر در پوسته زمین 8.6×10^{12} تن برآورد می شود (کاکس، ترجمه مر و زائری، ۱۳۸۲). ید برخلاف هالوژن های دیگر، به وسیله اکسیژن جو به یون یدات (IO_3^-) اکسید می شود. عنصر ید، شدیداً بیوفیلیک است و تمایل زیادی به اتصال به مواد آلی دارد، مواد آلی می توانند با حالت های مختلف ید واکنش نشان داده و کامپاندهای ید را تشکیل دهند (پران و همکاران، ۲۰۰۰). حتی ذرات ید موجود در آب های شیرین در داخل خرده های مواد آلی متمرکز می شوند (پران و همکاران، ۲۰۰۰).

۲- مواد و روش ها

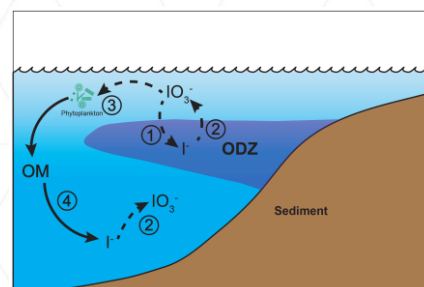
مطالعه به صورت تجربی، بررسی های صحرایی، و استفاده از روش های زمین شناسی و نتایج آزمایشگاهی تجزیه آنالیز دستگاهی (ICP - MS) نمونه ها انجام شده است.

۳- بحث

ید در جلبک ها و اسفنج ها، بالاترین، غلظت را دارد. رسوبات دانه ریز و غنی مواد آلی دارای ید در کف دریا، پس از حمل، ته نشین می شوند و تحت تاثیر فرآیند تدفین در مراحل اولیه دیاژنز، برخی از ترکیبات ید دار به آب های زیرزمینی و فضاهای بین ذره ای می پیوندند و در آنجا تحت تاثیر فعالیت باکتری ها و میکروارگانیسم های بی هوازی در محیط های احیایی شورابه ها، تمرکز می یابند. در شکل (۳) و (۴)، تشکیل کامپاندهای ید و تدفین و دیاژنز آنها در حضور ترکیبات شیمیایی دیگر، نشان داده شده است.



شکل ۴- تدفین و دیاژنز ترکیبات ید دار (Worden, 2018)

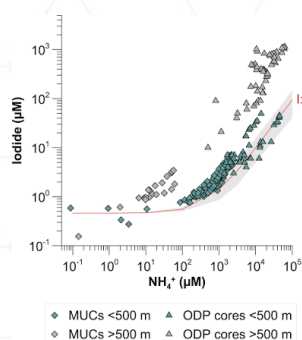


شکل ۳- چرخه کامپاندهای ید (Harkness, 2015)

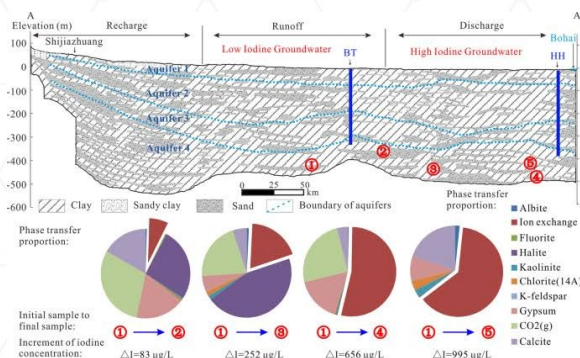
غلظت بالای یدید و برمید در آب‌های زیرزمینی به ندرت گزارش شده است. پارامترهای کلیدی زمین‌شناسی که بر غلظت کلرید، برمید و فلوئورید تأثیر می‌گذارند، شامل وجود نمک در حوضه، سن مخزن و نوع کروژن موجود در سنگ‌های حوضه رسوبی است. ید به شدت در مواد آلی موجود در محیط‌های دریایی تغلیظ می‌گردد، از این رو سنگ‌های غنی از منابع آلی I/Br و I/Cl بالایی نسبت به آب دریا یا آب دریای تبخیر شده دارند. از این رو افزایش غلظت ید در آب‌های زیرزمینی عمیق به تجزیه میکروبی مواد آلی در شرایط بی‌هوازی نسبت داده می‌شود. بر این اساس، از طریق نسبت‌های I/Br و I/Cl، می‌توان منشأ آب را مشخص کرد. بسیاری از میدان‌های نفتی دنیا علاوه بر پتانسیل نفتی، آنومالی‌هایی از برخی عناصر کمیاب مانند ید را نشان می‌دهند.

پارامترهای کلیدی زمین‌شناسی که بر غلظت کلرید، برمید و فلوئورید تأثیر می‌گذارند، شامل فراوانی نمک در حوضه، سن مخزن و نوع کروژن سنگ‌های حوضه رسوبی است. وجود نمک در یک حوضه نشان می‌دهد که آب دریا تا اشیاع هالیت تبخیر شده و در چنین شرایطی آب با غلظت بالای Br و Cl تشکیل می‌شود، همچنین وجود نمک باعث افزایش شوری آب از طریق برهم‌کنش آب-نمک در هنگام دفن و دیاژنز می‌شود. سن مخزن تا حدودی منعکس‌کننده مدت زمان تعادل آب سازند با نمک است، از طرفی نفوذ کروژن تیپ II دریایی در یک حوضه منجر به افزایش غلظت Br می‌شود که خود منعکس‌کننده اثر فرآیندهای دریایی است. غلظت ید مستقل از همه این پارامترها است و سایر پارامترهای زمین‌شناسی مانند عمق دفن، دما، ساز و کار تشکیل حوضه و سنگ‌شناسی مخزن تأثیری بر غلظت این هالوژن ندارند. فرآیندهای کلیدی که بر غلظت ید تأثیر می‌گذارند، تبخیر و رقیق شدن آب دریا، تعادل آب-نمک و ورود مواد آلی از منابع مختلف است (Duan, 2016).

در شکل های (۵) توزیع کامپاندها و ترکیبات ید در شورابه‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل (۶) نیز غلظت ید و یون NH_4^+ در حضور فیتوپلانکتون‌ها، نشان داده شده است.



شکل ۶- نقش فیتوپلانکتون‌ها در جذب ید (Chen, 2016)



شکل ۵- توزیع یدات‌ها در شورابه‌ها (Han, 2014)

در محدوده ترکمن صحرا آب های زیر زمینی شامل آب چاه های عمیق، گل فشان ها و چشمه ها به صورت رندوم، نمونه برداری شد. تجزیه کامل نمونه های آب در آزمایشگاه جهت شناخت بیشتر نوع و منشأ انجام شد. میزان ید موجود در هر نمونه بوسیله انحلال ید در آب در آزمایشگاه جهت شناخت بیشتر نوع و منشأ انجام شد. میزان ید موجود در هر نمونه بوسیله انحلال ید در محلول کلروفرم و تیتراسیون آن توسط محلول ۰/۰۰۱ (یک هزارم نرمال) تیوسولفات سدیم انجام گردید. تعیین سایر عناصر نیز بوسیله دستگاه آنالیزور کامل آب انجام گردید. محاسبه میزان ذخیره نیز با در نظر گرفتن ضخامت زون های آب دار، برآورد میزان نفوذ پذیری بر اساس خرده های حفاری (Cutting)، نرخ عیار متوسط و محدوده حریم چاه ها می باشد. با توجه به مطالعات پی جویی، بالاترین میزان عیار ید در چاه تخریب شده اینچه و گل فشان، بیش از سایر نواحی است. میزان ید در آگچاگیل و چلکن در عیار اقتصادی موجود است. اگر چه عیار ماده معدنی در این سازندها به تفاوت های رسوب آگچاگیل مشاهده می شود. نتایج آزمایش های انجام شده متوسط عیار ید در آب های درون سازندی باکو سازندهای میزبان را نشان می دهد. بر اساس نتایج آنالیزهای انجام شده بطور متوسط آب های ید دار سازندهای میزبان دارای یون هایی مختلف می باشد. در جدول (۱) و (۲)، غلظت کاتیون ها و آنیون ها در آب های ید دار، نشان داده شده است.

جدول ۱- غلظت کاتیون ها در آب های ید دار

ردیف	کاتیون	غلظت (Mlg/li)
۱	Ca^{2-}	5003
۲	Mg^{2-}	4010
۳	NH_4^+	170
۴	Na^+	23880

جدول ۱- غلظت آنیون ها در آب های ید دار

ردیف	آنیون ها	غلظت (Mlg/li)
۱	CO_3^{2-}	4.5
۲	HCO_3^-	92.5
۳	Cl^-	61245
۴	SO_4^{2-}	42.1
۵	I^-	78
۶	Br^-	302

۴- نتیجه گیری

سازند های آپشرون، آگچاگیل و چلکن به سن پلیوسن- پلیستوسن در آسیای میانه و ترکمن صحرا واقع شده اند. این سازندها دارای ذخایر ید محلول در شورابه های عمقی هستند و عیار بسیار بالایی را مخصوصا در حاشیه مرزهای تکتونیکی و زون های نابرجا نشان می دهند. سازند های آپشرون، آگچاگیل و چلکن که همگی مربوط به حوضه پاراتتیس و کاسپین می باشند. سازند باکو بر روی مجموعه رسوبات پلیوسن- پلیستوسن کاسپین، به صورت سنگ پوشش، حضور دارد. میزان I^- ، Br^- و NH_4^+ در اثر تجزیه باکتریایی مواد آلی افزایش می یابد. در آب های ید دار سازند آپشرون و آگچاگیل نیز غلظت برخی از یون ها مانند Br^- ، NH_4^+ و I^- افزایش یافته و برخی از یون ها مانند SO_4^{2-} تنزل پیدا کرده است. این مهم خود نقش باکتری ها در شرایط احیایی را نشان می دهد. یون NH_4^+ نیز بیشتر در اثر تجزیه بی هوازی مواد آلی تولید می شود. برم در پوسته زمین نسبتا

کمیاب است اما از آنجا که این عنصر در آب دریا به اندازه کافی وجود دارد و یک هالوژن محسوب می شود در کنار ید در ساختار جلبک های پلانکتونیک، متمرکز و جذب می شود از این رو در بسیاری از مناطق تولید ید، علاوه بر استخراج این ماده معدنی، برم نیز از همان شورابه ها استخراج می شود. تغییرات غلظت یون های فوق به همراه وجود گاز متان در ارتباط با تشکیل شورابه از آب های درون حفره ای در رسوبات غنی از مواد آلی است که در معرض شرایط احیایی به خاطر تجزیه میکروبیال، قرار گرفته اند. غنی شدگی یون های I^- ، Br^- و NH_4^+ و کاهش یون SO_4^{2-} ، نشان دهنده وجود شرایط احیایی است. لیتولوژی سازندهای کاسپین نیز از نوع دانه ریز بوده که معرف حوضه رسوبی آرام و تجمع مواد آلی و تمرکز و جذب ید در آنهاست. رسوبات احیا شده ی حاوی بقایای پلانکتونیک، منشا ید موجود در سازندهای آپشرون، آگچاگیل و چلکن می باشد که توسط سنگ پوشش سازند باکو احاطه شده است. سازند باکو دارای لیتولوژی رس چسبنده و سیلت به صورت هم شیب می باشد. غلظت متوسط و عیار ید در سازندهای آپشرون، آگچاگیل و چلکن ترکمن صحرا (چاه ها و زون های تکتونیک نابرجا) در حدود ۷۸ ppm، است.

۵- مراجع

- Hummel, S. (2011), "The Use of Iodine to Characterize Formation Waters in Oil and Gas Fields", MSc Thesis, Syracuse University, New York, USA.
- Aladin N.V., I.S. Plotnikov, A.A. Filippov, V.A. Petukhov. 2000. Results of hydrobiological and palaeolimnological explorations at the Northern Caspian. Final Session on the results of 1999 researches. Zoological Institute RAS, 4-6 of April 2000. Book of abstracts. St. Petersburg, 2000: 3-4. (in Russian)
- Kendrick, M., Phillips, D., Wallace, M., & Miller, J. M. (2011), "Halogens and noble gases in sedimentary formation waters and Zn-Pb deposits: A case study from the Lennard Shelf, Australia", *Applied Geochemistry*, 26(12), 2089-2100.
- Ksenzenko, V., & Stasinevich, D. (1995), "Chemistry and Technology of Bromine, Iodine, and Their Compounds", M: Chemistry.
- ÖZDEMİR, A) (2018), Relationship between petroleum and iodine in southeastern Anatolia basin", *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 159(159), 145-183.
- Saenko, G., Kravtsova, Y., Ivanenko, V., & Sheludko, S. (1978), "Concentration of Iodine and bromine by plants in the seas of Japan and Okhotsk", *Marine Biology*, 47(3), 243-250.
- Temizel, C., Sari, M. M., Canbaz, C. H., Saputelli, L. A., & Torsaeter, O. (2021), "Sustainable Materials for Oil and Gas Applications", Gulf Professional Publishing.
- Worden, R. H. (1996), "Controls on halogen concentrations in sedimentary formation waters", *Mineralogical Magazine*, 60(399), 259-274.
- Andersen, M. S., Nyvang, V., Jakobsen, R., & Postma, D. (2005), "Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(16), 3979-3994.
- Andersen, S., Guan, H., Teng, W., & Laurberg, P. (2009), "Speciation of iodine in high iodine groundwater in China associated with goitre and hypothyroidism", *Biological trace element research*, 128(2), 95-103.
- Boschetti, T., Toscani, L., Shouakar-Stash, O., Iacumin, P., Venturelli, G., Mucchino, C., & Frape, S. K. (2011), "Salt waters of the Northern Apennine Foredeep Basin (Italy): origin and evolution", *Aquatic Geochemistry*, 17(1), 71-108. Burns, R., 1979. Manganese oxides, marine minerals, *Reviews in mineralogy*.

- Chen, J., Liu, D., Ning, C., Xiaolin, H., Baoshou, Z., & Zhongyao, X. (2016), "Iodine-129 chronological study of brines from an Ordovician paleokarst reservoir in the Lunnan oilfield, Tarim Basin", *Applied Geochemistry*, 65, 14-21.
- Collins, A. G. (1969), "Chemistry of some Anadarko basin brines containing high concentrations of iodide", *Chemical Geology*, 4(1- 2), 169-187.
- Davis, S. N., Whittemore, D. O., & Fabryka- Martin, J. (1998), "Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water", *Groundwater*, 36(2), 338-350.
- Duan, L., Wang, W., Sun, Y., & Zhang, C. (2016), "Iodine in groundwater of the Guanzhong Basin, China: sources and hydrogeochemical controls on its distribution", *Environmental Earth Sciences*, 75(11), 1-11.
- Elderfield, H., & Truesdale, V. W. (1980), "On the biophilic nature of iodine in seawater", *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1), 105-114.
- Fontes, J. C., & Matray, J. (1993), "Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts", *Chemical Geology*, 109(1-4), 149-175.
- Han, D., Song, X., Currell, M. J., Yang, J., & Xiao, G. (2014), "Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China", *Journal of Hydrology*, 508, 12-27.
- Harkness, J. S., Dwyer, G. S., Warner, N. R., Parker, K. M., Mitch, W. A., & Vengosh, A. (2015), "Iodide, bromide, and ammonium in hydraulic fracturing and oil and gas wastewaters: environmental implications", *Environmental science & technology*, 49(3), 1955-1963.
- Worden, R. H. (2018), "Halogen elements in sedimentary systems and their evolution during diagenesis", In *The Role of Halogens in Terrestrial and Extraterrestrial Geochemical Processes* (pp.185-260 :Springer.
- Price, N.,B., and Calvert, S., E.1973. The geochemistry of iodine in oxidized and reduced recent marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 37, Issue. 9,p. 2149-2158.
- Muramatsu, Y.f., Udo, and Yoshida, S., 2001. Recycling of iodine in fore-arc areas: evidence from the iodine brines in Chiba, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 192, Issue 4, p. 583-593.
- Cook, P.L.M., Carpenter, P.D., Butler, E.C.V., 2000. Speciation of dissolved iodine in the waters of a humic-rich estuary. *Marine Chemistry*, vol. 69, Issues 3-4,p. 179-192.
- Malcolm, S.,J., and Price, N.,B., 1984. The behaviour of iodine and bromine in estuarine surface sediments. *Marine Chemistry*, vol. 15, Issue 3, p. 263-271.

منطقه بندی شیمیایی آمفیبول، کلیدی برای بررسی فرآیند دگرگونی: مطالعه موردی از منطقه‌ی همدان

میرمحمد میری^{*}، زینب سادات فیض، اندیشه زمان

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایمیل: m.miri@scu.ac.ir

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

تغییرات دما و فشار در طی رخداد دگرگونی بر ترکیب شیمیایی کانی‌ها تأثیر گذار هستند. کانی‌های خانواده آمفیبول، یکی از مهمترین کانی‌ها در سنگ‌های متابازیک و کالک‌سیلیکات هستند که به خوبی با این تغییرات سازگاری می‌یابند. منطقه بندی شیمیایی در آمفیبول‌های پارآمفیبولیت‌های منطقه همدان نشان دهنده شکل‌گیری آنها در طی افزایش دما می‌باشد. مقادیر دمای محاسبه شده برای این نمونه‌ها از ۴۹۰ درجه سانتیگراد در مرکز تا ۵۶۰ درجه سانتیگراد در حاشیه تغییر می‌نماید اما در فشار نسبتاً ثابت حدود ۵ کیلو بار. این شرایط با یک رویداد دگرگونی همبری در نتیجه نفوذ توده گرانیتی الوند و سیالات مرتبط با آن سازگاری دارد.

کلیدواژه‌ها: آمفیبول، منطقه بندی شیمیایی، پارآمفیبولیت، دگرگونی همبری، همدان

Amphibole zoning as a key to investigate metamorphism process: case study from the Hamedan area

Mirmohammad Miri^{1*}; Zeinab Sadat Feiz², Andishe Zaman

¹ Geology department, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, email: m.miri@scu.ac.ir

² Geology department, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad

³ Geology department, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz

Abstract

Temperature and pressure changes during metamorphic events affect the chemical composition of minerals. Amphibole minerals are one of the most important minerals in metabasic and calc-silicate rocks that are well adapted to these changes. Chemical zoning in amphiboles and para-amphibolites from the Hamedan area indicates their formation during increasing temperatures. The calculated temperature values for these samples vary from 490°C in the center to 560°C at the periphery, but at a relatively constant pressure of about 5 kbar. These conditions are consistent with a contact metamorphic event resulting from the intrusion of the Alvand granite massif and its associated fluids.

Keywords: Amphibole, chemical zoning, Para-amphibolite, Contact Metamorphism, Hamedan

۱- مقدمه

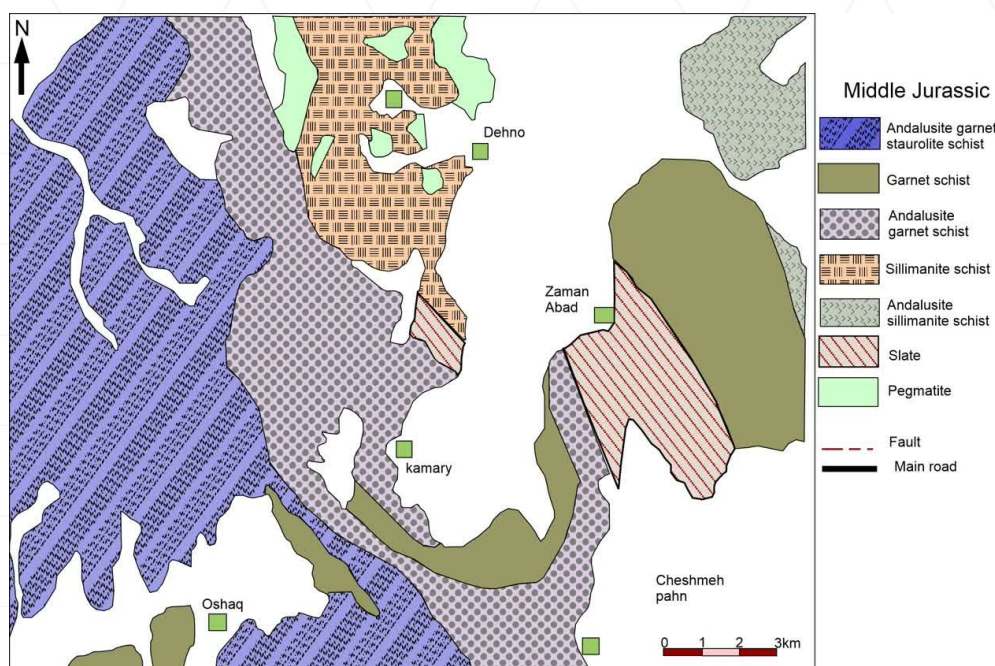
این پژوهش به و تفسیر منطقه‌بندی شیمیایی آمفیبول‌های کلسیم‌دار در لایه‌های آمفیبولیتی مجموعه دگرگونی منطقه‌ی همدان، واقع در پهنه‌ی سندرچ-سیرجان در غرب ایران می‌پردازد. این تحقیق با تمرکز بر سنگ‌نگاری، شیمی کانی‌ها و داده‌های دما و فشارسنجی این آمفیبول‌های، سعی در پی بازسازی شرایط دگرگونی و فرایندهای کنترل‌کننده‌ی تکامل ترکیبی آمفیبول‌ها دارد.

۲- مواد و روش‌ها

مقاطع نازک نمونه‌های برداشت شده از منطقه در طی بازدیدهای صحرایی مورد بررسی قرار گرفته و چند مورد مناسب جهت پردازش به روش ریزکاونده الکترونی به دانشگاه نیوبرانسویک کشور کانادا ارسال گشت. منطقه بندی شیمیایی آمفیبول‌ها توسط دستگاه JEOL JXA-733 با ولتاژ 15 kV، شدت جریان 30 nA و قطر پرتو 0.02 mm مورد آنالیز قرار گرفتند.

۳- زمین‌شناسی منطقه

منطقه‌ی همدان بخشی از پهنه‌ی سندانج-سیرجان، به‌عنوان یک کمربند مهم آذرین-دگرگونی مرتبط با فروانش نفوتتیس و برخورد قاره‌ای متعاقب آن، محسوب می‌شود (Hassanzadeh and Wernicke, 2016). این ناحیه شامل توالی ضخیمی از سنگ‌های رسوبی پالئوزوئیک تا مزوزوئیک است که به‌طور ناحیه‌ای دگرگون شده و انواع مختلفی از شیست‌ها (حاوی آندالوزیت، استاورولیت، گارنت و سیلیمانیت) را دربر می‌گیرد (Sepahi et al., 2004). این واحدها در برخی بخش‌ها تحت تأثیر دگرگونی مجاورتی ناشی از نفوذ مجموعه‌ی پلوتونیکی الوند قرار گرفته‌اند. لایه‌های باریکی از آمفیبولیت در میان شیست‌های آندالوزیت-گارنت-استاورولیت‌دار و موازی با فولیاسیون آنها رخداد دارند که نشان می‌دهد سرشت دگرگونی مشابهی دارند.

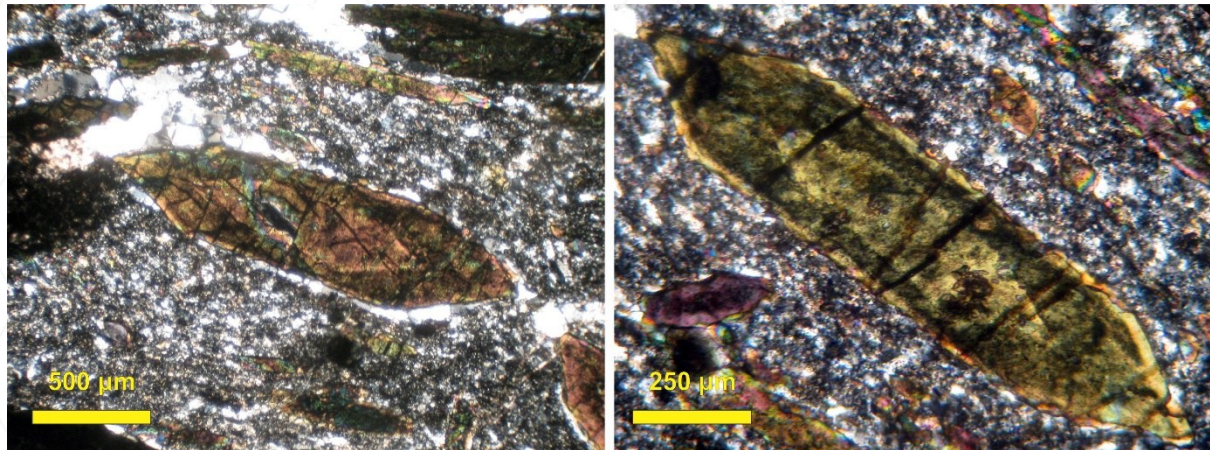


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از Eghlimi, 1999)

۴- سنگ‌نگاری

آمفیبولیت‌ها شامل بلورهای آمفیبول خودشکل تا سوزنی هستند که در زمینه‌ای ریزدانه از کوارتز و پلاژیوکلاز جای گرفته‌اند. کانی‌های فرعی شامل گارنت، اپیدوت، کلینوزوئیت، تیتانیت و فیبرولیت است. آمفیبول‌های نمونه‌های برداشت‌شده از نزدیکی دایک‌های پگماتیته، منطقه‌بندی نوری مشخصی با مرزهای واضح هسته-حاشیه نشان می‌دهند که با تغییر رنگ تداخلی و زاویه‌ی خاموشی همراه است (شکل ۲). ریزشکستگی‌های پر شده از میکروکلین شواهد مستقیمی از برهم‌کنش دیر هنگام با سیالات غنی از پتاسیم، احتمالاً با منشأ پگماتیته، ارائه می‌نمایند.

ویژگی‌های سنگ‌نگاری مانند حضور اپیدوت، کلینوزوئیزیت، تیتانیت همراه با فراوانی کوارتز و کمیابی پلاژیوکلاز نشان می‌دهد که این آمفیبولیت‌ها منشأ رسوبی (پارا-آمفیبولیت) داشته و احتمالاً از سنگ مادرهای مارنی یا شیل‌های آهکی غنی از کلسیم مشتق شده‌اند. همچنین، شرایط دگرگونی را به رخساره‌ی آمفیبولیت، به‌ویژه زیررخساره‌ی آمفیبولیت میانی، محدود می‌کنند.

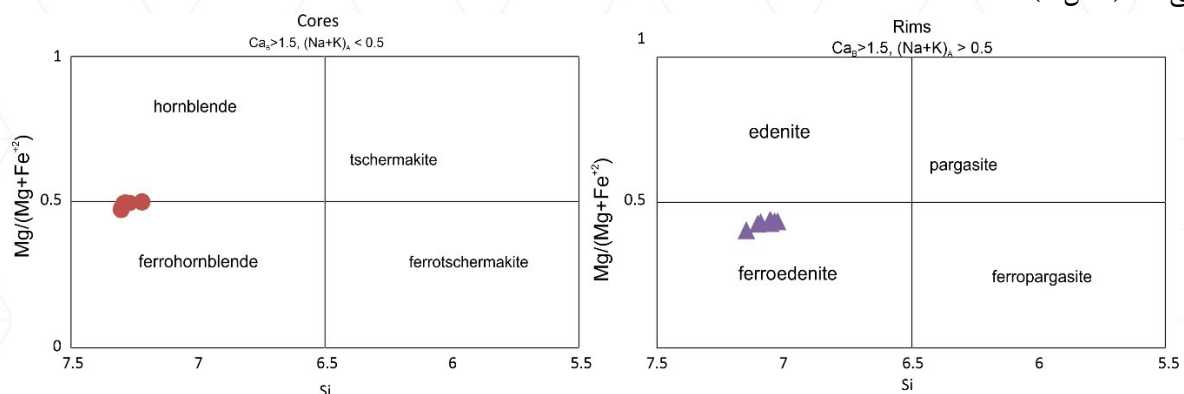


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی آمفیبول‌های دارای منطقه بندی شیمیایی در نور XPL.

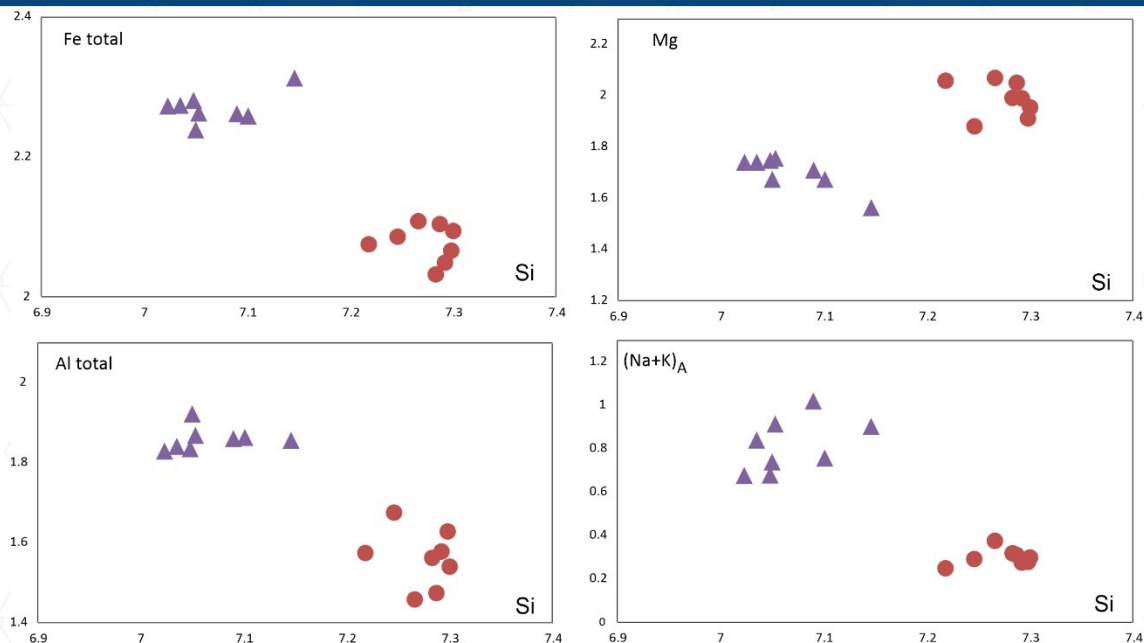
۵- بحث

۵-۱- شیمی کانی‌ها

آنالیزهای ریزپروب الکترونی نشان می‌دهد که آمفیبول‌ها ترکیب کلسیک دارند و کلسیم بیش از ۱/۵ واحد اتمی فرمولی جایگاه B را اشغال کرده است. بر اساس نام‌گذاری آمفیبول‌ها، هسته‌ها فروهورنبلند و حاشیه‌ها فروادینیت هستند که بیانگر تغییرات منظم شیمیایی در طول رشد بلور است (شکل ۳). زون‌بندی شیمیایی با افزایش Al، Fe، Na و K و کاهش Si و Mg از هسته به حاشیه مشخص می‌شود که با جانشینی‌های ادینیتی و تا حدی چرماکیتی سازگار است و افزایش درجه‌ی دگرگونی را نشان می‌دهد (شکل ۴).



شکل ۳ - رده‌بندی شیمیایی (Hawthorne and Oberti, 2007) آمفیبول‌های مورد مطالعه



شکل ۴- تغییرات آمفیبول‌ها از مرکز به حاشیه.

۲-۵- دما و فشارسنجی

نتایج روش دما و فشارسنجی زنک و شولتز (Zenk and Schulz, 2004) بر مبنای ترکیب آمفیبول دماهای حدود ترتیب ۵۰۰ درجه سانتیگراد و فشار حدود ۴/۳ تا ۴/۷ کیلو بار برای هسته‌های و ۵۴۸ تا ۵۶۷ درجه سانتیگراد و ۵/۵ تا ۵/۹ کیلو بار برای حاشیه‌ها نشان می‌دهد. تخمین‌های فشار با این روش با نتایج به دست آمده بر مبنای Al در ساختار آمفیبول اشمیت (Schmidt, 1992) که مقادیر ۳/۹ تا ۴/۹ کیلو بار برای هسته‌های داخلی، و ۵/۶ تا ۵/۹ کیلو بار برای حاشیه‌ها را ارائه می‌دهد مطابقت دارد. با این حال، زنک و شولتز (Zenk and Schulz, 2004) با سنگ‌های دگرگونی کالبره شده و می‌تواند برای نمونه‌ها قابل اعتمادتر باشد.

۶- نتیجه‌گیری

برآوردهای فشار-دما نشان‌دهنده‌ی افزایش معنی‌دار دما از هسته به حاشیه آمفیبول‌ها در فشار نسبتاً ثابت است که در یک مسیر دگرگونی پیش‌رونده همبری رخ می‌دهد. علاوه بر افزایش دما، نقش سیالات غنی از پتاسیم مرتبط با دایک‌های پگماتیتهی در تغییرات شیمیایی تاخیری آمفیبول‌ها و تقویت منطقه‌بندی آن‌ها برجسته است. این مطالعه اهمیت منطقه‌بندی شیمیایی آمفیبول‌ها را به‌عنوان شاخص حساس برای بازسازی تکامل فشار-دما-سیال در دگرگونی منطقه‌ی همدان و پهنه‌ی ساندج-سیرجان نشان می‌دهد.

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز برای تامین بخشی از هزینه‌های این پژوهش سپاسگزاری می‌نمایند.

- Eghlimi, B., 1999. Geological map of the Hamedan area (1:100000). Geology survey of Iran, Tehran
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj–Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35, 586–621
- Hawthorne, F.C., Oberti, R., 2007. Classification of the amphiboles. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 67, 55–88
- Schmidt, M.W., 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110, 304–310
- Sepahi, A.A., Whitney, D.L., Baharifar, A.A., 2004. Petrogenesis of andalusite-kyanite-sillimanite veins and host rocks, Sanandaj- Sirjan metamorphic belt, Hamadan, Iran. *Journal of Metamorphic Geology* 22, 119–134
- Zenk, M., Schulz, B., 2004 Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland. *Mineralogical Magazine* 68, 769–786.

محصولات دگرسانی لویکوگرانیت خضرآباد - غرب یزد

مهناز خدای^۱، شهرزاد شرافت^۲

*۱- گروه زمین شناسی، دانشگاه یزد، یزد

۲- گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران

Khodami_m@yazd.ac.ir

چکیده

رخنمون‌های لویکوگرانیتی در حاشیه گرانیت شیرکوه، واقع در بلوک یزد بروزند دارند و شواهد بارزی از دگرسانی و متاسوماتیسم را نشان می‌دهند. مطالعات پتروگرافی بیانگر حضور گسترده کوارتز، آکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی نظیر مسکویت، بیوتیت و تورمالین است. فرایندهای دگرسانی منجر به تشکیل سریسیت، ایلیت، مونت‌موریونیت، آلبیت ثانویه و کوارتز ثانویه شده‌اند. این مجموعه کانی‌شناسی همراه با بقایای غنی از کوارتز و فلدسپار، قابلیت استفاده در صنایع سرامیک، چینی و شیشه را دارد. مطالعات ژئوشیمیایی و اندیس‌های دگرسانی نشان می‌دهند که این سنگ‌ها درجه دگرسانی ضعیف تا متوسط را متحمل شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: لویکوگرانیت، دگرسانی، متاسوماتیسم، بلوک یزد

Alteration production of leucogranite, Khezrabad, west of Yazd

Mahnaz Khodami ¹; Shahrzad Serafat ²

¹ department of geology, Yazd university, Yazd, Iran, Khodami_m@yazd.ac.ir

² Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

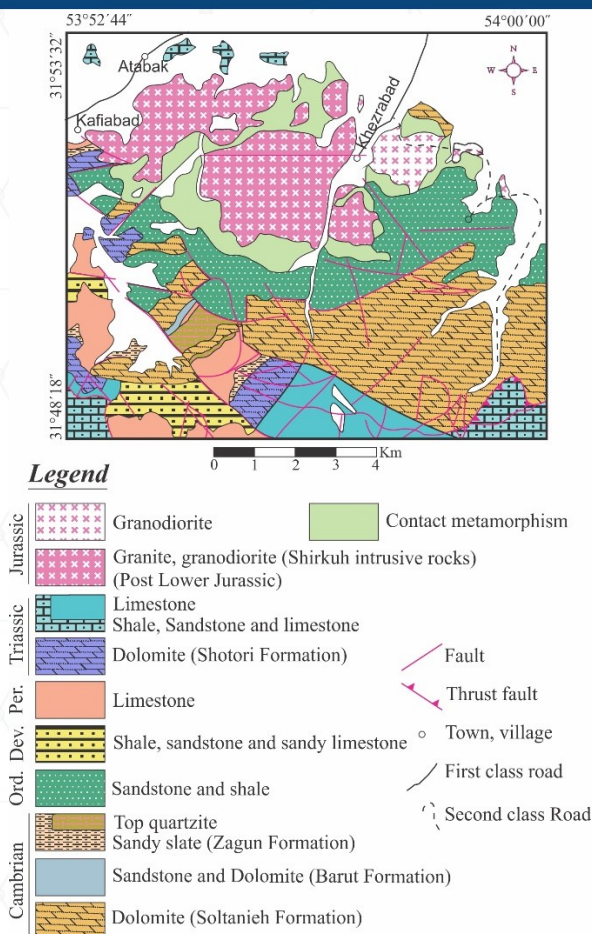
Abstract

Leucogranitic outcrops occur along the margin of the Shirkuh Granite within the Yazd Block and show clear evidence of alteration and metasomatism. Petrographic investigations reveal the widespread presence of quartz, alkali feldspar, plagioclase, and accessory minerals such as muscovite, biotite, and tourmaline. Alteration processes have produced sericite, illite, montmorillonite, secondary albite, and quartz. This mineral assemblage, together with relic quartz-feldspathic components, indicates potential applicability in the ceramic, porcelain, and glass industries. Geochemical studies and alteration indices show that these rocks have undergone weak to moderate degrees of alteration.

Keywords: Leucogranite, Alteration and metasomatism, Yazd Block

۱- مقدمه

لویکوگرانیت خضرآباد در فاصله ۴۰ کیلومتری غرب یزد و در حاشیه توده گرانیتی شیرکوه رخنمون دارند. این سنگ‌ها به صورت توده‌های روشن‌رنگ با پورفایروکلاست‌های درشت کوارتز و فلدسپار قابل شناسایی هستند. گرانیتوئیدهای واقع در پهنه‌های تکتونوماگمایی معمولاً تحت تأثیر رخدادهای پس از ماگماتیسم مانند دگرگونی، دگرشکلی و دگرسانی قرار می‌گیرند. منطقه خضرآباد در غرب یزد، بخشی از بلوک یزد در خرده‌قاره ایران مرکزی است و در نئوپروتروزوییک بخشی از حاشیه شمالی گندوانا بوده است. هدف این پژوهش، بررسی محصولات دگرسانی لویکوگرانیت‌های خضرآباد و کاربردهای صنعتی بالقوه آنهاست.



شکل ۱: نقشه زمین شناسی منطقه (با تغییرات از علوی و حاج ملاعلی، ۱۹۹۳)

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌ها در حین مطالعات صحرایی برداشت و پس از تهیه مقاطع نازک، مطالعات پتروگرافی و پراش اشعه ایکس XRD جهت شناسایی کانی‌های اولیه و ثانویه انجام شد. از نتایج آنالیز فلورسانس اشعه ایکس XRF نیز برای شناخت ترکیب شیمیایی سنگ استفاده شد.

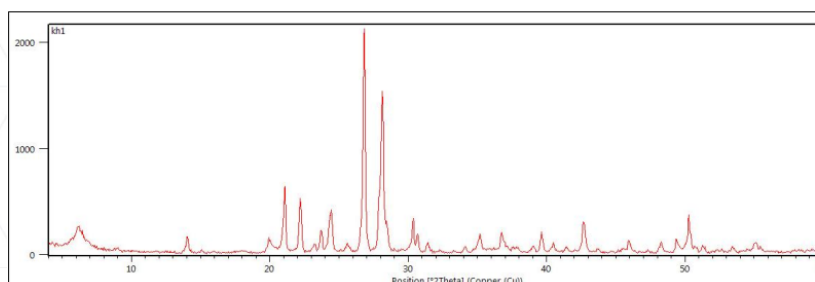
۳- بحث

کانی‌های اصلی توده گرانیتی شامل کوارتز، آلکالی فلدسپار (میکروکلین و ارتوکلاز)، پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی شامل مسکویت، بیوتیت، تورمالین می‌باشند. در اثر دگرسانی گرمایی و متاسوماتیسم، مجموعه‌ای از کانی‌های ثانویه تشکیل شده است که مهم‌ترین آنها عبارتند از: سریسیت (مسکویت ریزبلور) حاصل دگرسانی فلدسپارها، اپلیت و مونتموریونیت محصول دگرسانی دما پایین آلکالی فلدسپارها، آل بیت ثانویه ناشی از آل بیتی شدن پلاژیوکلاز و کوارتز ثانویه حاصل انحلال و ته‌نشینی مجدد و همچنین تیتانیت و اپیدوت. پلاژیوکلازهای اولیه در اثر دگرسانی به سریسیت و آل بیت تبدیل شده‌اند. یکی از مهم‌ترین شواهد متاسوماتیسم، جانشینی جهت‌دار بیوتیت به مسکویت است که در طول کلیواژها رخ داده و نشان‌دهنده نفوذ سیالات غنی از Si و Al می‌باشد. این فرآیند موجب خروج Mg، Fe و Ti از شبکه بیوتیت شده است. که در تشکیل فازهای سیلیکات ثانویه از جمله تیتانیت و اپیدوت نقش داشته است. فرآیندهای دگرسانی و هوازدگی منجر به تجزیه کانی اولیه و سپس جابجایی یون‌ها با توجه به دما و سیالات موجود می‌شود و نهایتاً منجر به تشکیل کانی‌های ثانویه می‌گردد. فلدسپات پتاسیم و پلاژیوکلاز در محیط اسیدی ابتدا به سریسیت و

سپس در حضور آب به کائولینیت تبدیل می‌شود، اما در صورت وجود آب کافی و شستشوی پتاسیم و سیلیس، کائولینیت مستقیماً تشکیل می‌شود. در شرایط شستشوی کمتر سدیم و یا کمبود H^+ برای جانشینی با سدیم، مونت‌موریلونیت تشکیل می‌شود. ایلیت از کانی‌های رسی متداول نهشته‌های دگرسانی از کانی‌هایی مانند مسکویت و فلدسپات تشکیل می‌شود. این دگرسانی احتمالاً با تشکیل فاز حدواسط سریسیت رخ داده و شستشوی پتاسیم سدیم و کلسیم کامل انجام نشده است، این عناصر بترتیب در فازهای ایلیت، مونت‌موریلونیت و آنورتیت در نمونه‌های مورد مطالعه وارد شده‌اند (Ding et al 2016).



شکل ۲: الف و ب) تصاویر صحرایی لوپکوگرنیت‌های مورد مطالعه پ) بلورهای آلکالی فلدسپار (میکروکلین) و کوارتز ت) بلورهای پلازیوکلاز سریسیتی شده در لوپکوگرنیت



Sample	Major Phase(s)	Minor Phase(s)	Trace Phase(s)
KH1 KD97-1079	Montmorillonite (13-0135) $Ca_{0.2}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$ Albite (09-0466) $NaAlSi_3O_8$ Quartz (33-1161) SiO_2	Muscovite - illite (26-0911) $KAl_2Si_2AlO_{10}(OH)_2$	--
kV = 40 mA = 30 Ka = Cu Fil = Ni			

شکل ۳: نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه تجزیه شده لوپکوگرنیت

مطالعات ژئوشیمیایی و شاخص شیمیایی دگرسانی، هوازدگی و شاخص تغییرات ترکیبی که برای بررسی وضعیت دگرسانی سنگ و خاک استفاده می‌شود (Harnois, 1988; Fedo et al, 1995; Nesbit & Young, 1996) نشان می‌دهند که این سنگ‌ها درجه دگرسانی ضعیف تا متوسط را متحمل شده‌اند. مقادیر PIA و CIW محصولات دگرسانی درجه دگرسانی ضعیف تا

متوسط را از خود نشان می‌دهند. و با توجه به مقادیر PIA شدت دگرسانی پلاژیوکلازها بیش از دگرسانی کل سنگ است. نمودارهای سه‌تایی مولی عناصر اصلی سازنده سنگ‌های دگرسان شده، فراوانی و تحرک آلومینیوم، سیلیس، سدیم کلسیم و پتاسیم را نشان می‌دهند (شکل الف ۴). نمودار مثلثی مولی A-CN-K ($Al_2O_3-CaO+Na_2O-K_2O$) ترکیب کانی‌شناسی و ارتباط آن با CIA را مشخص می‌کند. نمونه‌ها با درجه دگرسانی شیمیایی ضعیف تا متوسط در این نمودار نزدیک به میانه ضلع A-CN و ترکیب بین پلاژیوکلاز و اسمکتیت (از خانواده مونتوریونیت) قرار می‌گیرند. نمونه‌ها در نمودار مثلثی A-CN-K-FM در سمت A-CN-K و کانی مسکویت قرار می‌گیرند که حاکی از مقادیر پائین آهن و منیزیم و فراوانی سربست است. همچنین در نمودار مثلثی A-S-F بسیار نزدیک به قطب سیلیس قرار می‌گیرند که با فراوانی کوارتز در سنگ همخوانی دارد.

شاخص شیمیایی دگرسانی $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$

شاخص شیمیایی دگرسانی پلاژیوکلاز $PIA = (Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 - K_2O + CaO + Na_2O)$

شاخص شیمیایی هوازدگی $CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \times 100$

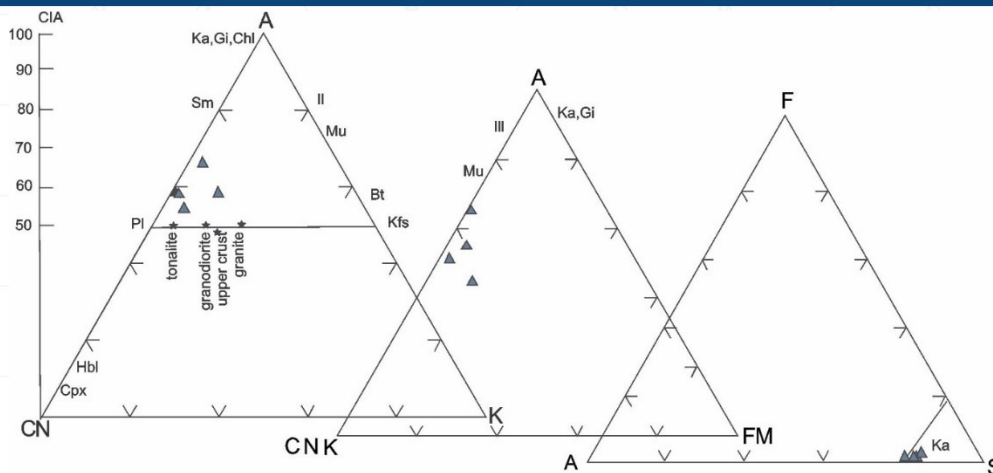
شاخص تغییرات ترکیبی $ICV = (Fe_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$

سنگ‌های فلسیک دگرسان شده حاوی کوارتز، فلدسپارهای آلبیتی شده، سربست، ایلیت و مونتوریونیت برای استفاده در صنایع خاصی مناسب هستند. این سنگ‌ها قادر به تأمین SiO_2 و Al_2O_3 مورد نیاز بدنه صنایع سرامیک و چینی هستند و در صنعت شیشه‌سازی بخاطر وجود کوارتز و فلدسپارهای سدیم دار مناسب هستند. فراوانی فلدسپار در این سنگ‌ها اهمیت اقتصادی آنها را بیشتر می‌کند. از فلدسپار سدیم در تهیه لعاب و شیشه و از فلدسپار پتاسیم بعنوان کمک ذوب و ماده اصلی در تولید سرامیک استفاده می‌شود. همچنین فلدسپار بعنوان پرکننده در صنایع رنگ‌سازی و لاستیک و در مواردی ساینده کاربرد دارد. این ویژگی‌ها سبب شده است که محصولات دگرسانی لویکوگرانیت‌های خضرا باد برای تأمین مواد اولیه صنایع کاشی، سرامیک و شیشه استخراج شوند.

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF نمونه‌های مورد مطالعه

	KHAB1	KHAB2	KHAB3	KH1
SiO ₂	69.78	72.07	64.59	76.20
TiO ₂			0.06	0.15
Al ₂ O ₃	12.63	13.81	15.21	12.94
Fe ₂ O ₃ *	0.78	0.88	0.84	1.73
MnO	0.02	0.01	0.05	0.01
MgO	0.05	0.98	1.44	0.42
CaO	3.41	1.84	2.47	0.57
Na ₂ O	6.12	7.75	5.62	5.44
K ₂ O	1.17	0.24	2.80	0.65
P ₂ O ₅	0.02	0.10	0.09	0.14
L.O.I.	5.58	2.00	6.66	1.85
Total	99.56	99.68	99.83	100.10
CIA	54.14	58.42	58.28	66.02
CIW	56.99	59.02	65.28	68.28
PIA	54.60	58.59	60.54	67.16

Fe₂O₃*: Total Iron as Fe₂O₃; L.O.I.: Loss on ignition



شکل ۴: نمودارهای مثلثی دگرسانی سنگ‌های مورد مطالعه بر اساس مول (C:CaO, N:Na₂O,)
(A:Al₂O₃, K:K₂O, F:Fe₂O₃, M:MgO, S:SiO₂)

۴- نتیجه‌گیری

لویکوگرانیت‌های خضرآباد شواهدی از دگرسانی گرمایی و متاسوماتیسم گسترده را نشان می‌دهند. تشکیل سریسیت، ایلیت، مونتموریونیت، آلبیت و کوارتز ثانویه حاصل واکنش‌های سیال است. کوارتز، ایلیت، مونتموریونیت، آلبیت، سریسیت (مسکویت) کانی‌های حاصل از دگرسانی سنگ آذرین اسیدی خضرآباد می‌باشند که درجه دگرسانی ضعیف تا متوسط را متحمل شده‌اند. محصولات دگرسانی این لویکوگرانیت‌ها از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی و صنعتی دارای اهمیت ویژه‌ای هستند و بعنوان ماده اولیه سرامیک، چینی و شیشه برداشت می‌شوند.

۵- مراجع

علوی، م.، حاج ملاعلی، ع. ۱۹۹۳ نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضرآباد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

Ding H., Ma D., Yao Ch., Lin Q., Jing L., 2016. Implication of the chemical index of alteration as a paleoclimatic perturbation indicator: an example from the lower Neoproterozoic strata of Ksu, Xinjiang, NW China, *Geosciences Journal* 20,3-26.

Fedo C. M., Nesbitt H. W., Young G. M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance, *Geology* 23,921-924.

Harnois L., 1988. The CIW index: a new Chemical Index of Weathering, *Sedimentary Geology* 55,319-322.

Nesbitt H.W., Young G.M., 1996. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical-weathering: effect of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy, *Sedimentology*, 43, 341-358.

واکنش‌های فازی و شیمیایی در فرآیند پخت آجر حاوی سرباره فولاد

مهدی ترابی کاوه^۱، مهناز خدایی^{۱*}، منصوره سادات ناظم^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، یزد

Khodami_m@yazd.ac.ir*

چکیده

واکنش‌های فازی و شیمیایی در فرآیند پخت آجر رسی حاوی سرباره فولاد مشابه فرآیندهای دگرگونی است. پخت آجر با اضافه کردن سرباره فولاد به خاک رس انجام گردید. مواد اولیه شامل خاک حاوی کوارتز، فنزیت، آلبیت، کلسیت، دولومیت، کانی‌های رسی و سرباره فولاد دارای فازهای ماگنتیت، ژپس، ماگنیوفریت و کوپرواسپینل بودند. پس از خردایش، اختلاط، قالب‌گیری و خشک کردن، نمونه‌ها در کوره با دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد پخته و به آجر تبدیل شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن ۱۵ درصد وزنی سرباره فولاد به مواد اولیه تولید آجر موجب تشکیل فازهای جدید آنورتیت و پیروکسن در کنار هماتیت و فاز شیشه‌ای سیلیکاتی شده که نقش مؤثری در بهبود استحکام و پایداری حرارتی آجر دارد.

کلیدواژه‌ها: آجر، سرباره فولاد، آنورتیت، پیروکسن

Phase and chemical reactions in the baking process of bricks containing steel slag

Mehdi Torabi Kaveh¹; Mahnaz Khodami¹; Mansoureh Sadat Nazem¹

¹ Department of Geology, Yazd university, Yazd, Iran

Khodami_m@yazd.c.ir

Abstract

The phases and chemical reactions involved in the firing process of clay bricks containing steel slag are similar to those found in metamorphic processes. The bricks were created by incorporating steel slag into the clay. The raw materials included soil containing quartz, phengite, albite, calcite, and dolomite, as well as clay minerals and steel slag, which contained magnetite, gypsum, magnesioferite, and cuprospinel phases. After grinding, mixing, molding, and drying, the samples were baked in an electric furnace at 950°C. The results of this study indicated that incorporating 15% of steel slag into the raw materials for brick production led to the formation of new phases, including anorthite, pyroxene, hematite, and a silicate glass phase. These additions significantly enhance the strength and thermal stability of the bricks.

Keywords: Clay brick, Steel slag, Anorthite, Pyroxene

۱- مقدمه

آجر یکی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی است که از ترکیب خاک رس، ماسه، آب و مواد افزودنی تهیه می‌شود. مواد افزودنی بمنظور بهبود کیفیت یا رنگ به مواد اولیه اضافه می‌شود. خواص نهایی آجر به ترکیب شیمیایی مواد اولیه و فرآیند پخت بستگی دارد. یافتن کاربردهای جدید برای استفاده از ضایعات صنعتی نظیر سرباره فولاد در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

زیرا علاوه بر کاهش هزینه تولید، سبب کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شوند. سرباره فولاد حاوی اکسیدهای آهن، سیلیس، کلسیم و منیزیم است و می‌تواند به عنوان افزودنی در تولید آجر استفاده شود. بررسی واکنش‌های فازی در حضور این مواد افزودنی برای بهینه‌سازی تولید آجر ضروری است. واکنش‌های فازی و شیمیایی تا دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد همانند فرآیندهای دگرگونی است و به شناخت بهتر واکنش‌های دگرگونی در فشار ثابت کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

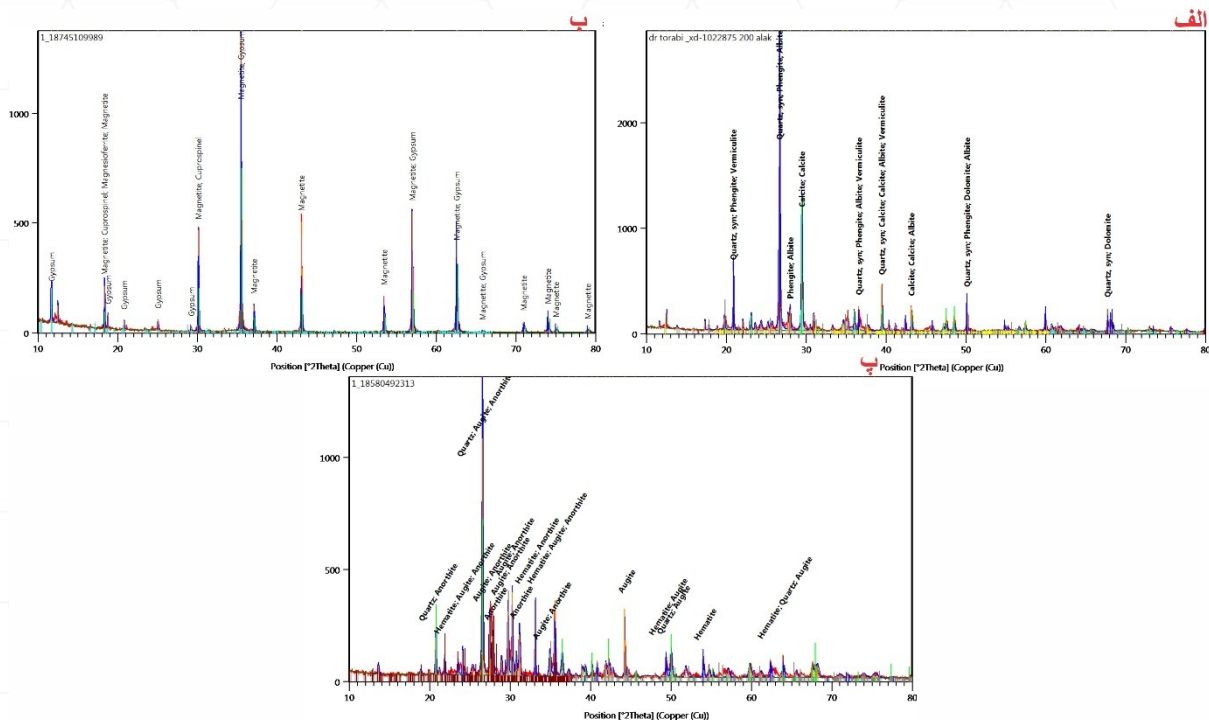
مخلوط خاک رس و سرباره با نسبت‌های مشخص پس از خردایش اولیه، آسیاب شدند تا مخلوطی از ذرات همگن و یکنواخت بدست آید. در ساخت آجر ۰/۵ کیلوگرم از مخلوط با نسبت‌های وزنی مناسب تهیه و سپس قالب‌گیری شد. نمونه‌ها در آون آزمایشگاهی خشک و پس از آن در کوره الکتریکی تا دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمادهی کنترل‌شده پخته شدند. فازهای موجود در مواد اولیه و آجر پخته شده با آزمایش پراش اشعه ایکس XRD شناسایی و تحلیل شدند.

۳- بحث

افزودن درصد معینی از سرباره فولاد به خاک مورد استفاده در فرآیند پخت آجر منجر به تشکیل فازهای کانیایی جدید می‌شود. با توجه به نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس فازهای کوارتز، فنزیت (مسکویت)، آلبیت، کلسیت، ورمیکولیت، دولومیت و کانی‌های رسی مانند اسمکتیت، ایلیت یا کائولینیت در نمونه خاک مصرفی شناسایی شدند (شکل ۱الف). همچنین نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه سرباره فولاد، حاکی از حضور فازهای بلورین مگنتیت Fe_3O_4 ، ژپس $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، کوپروسپینل CuFe_2O_4 و مگنزیوفریت MgFe_2O_4 است (ناظم، ۱۴۰۴) (شکل ۱ب).

نتایج آنالیز XRD نشان می‌دهد که افزودن ۱۵ درصد سرباره فولاد به خاک مورد استفاده در مخلوط و پخت آن منجر به تشکیل فازهای جدیدی در ساختار آجر شده است. بر اساس رفتار حرارتی و شیمیایی فازهای مذکور، مجموعه‌ای از واکنش‌های فازی در طول پخت انتظار می‌رود. در آجر حاصل از این مواد، فازهای غالب شناسایی شده شامل آنورتیت، پیروکسن (اوژیت)، همتایت و شیشه سیلیکاتی هستند (شکل ۱پ). این فازهای جدید معمولاً ساختار بلوری قویتری دارند و می‌توانند به اتصال بهتر ذرات و افزایش استحکام آجر کمک کنند. در طول فرآیند پخت آجر ژپس ابتدا آب تبلور خود را از دست داده و سپس در دماهای بالاتر به اکسید کلسیم و گازهای گوگردی تجزیه می‌شود. کلسیت و دولومیت نیز در دماهای بین ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه شده و به اکسیدهای کلسیم، منیزیم و دی اکسید کربن تبدیل می‌شوند. خروج گازی اکسید کربن ممکن است منجر به تخلخل در ساختار آجر شود و اکسید کلسیم در صورت باقی ماندن در آجر و واکنش با رطوبت هوا، می‌تواند باعث انبساط و ترک خوردگی آجر شود. درحالی‌که این اکسیدها در واکنش با آلبیت و سایر سیلیکات‌ها، فازهای جدیدی از جمله پلاژیوکلاز نوع آنورتیت ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) و پیروکسن (اوژیت $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Mn}, \text{Ti})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$) تشکیل می‌دهند که استحکام آجر را بالا می‌برند (Dunham, 1992; Li, et al. 2017). کوارتز در حدود ۵۷۳ درجه سانتی‌گراد دچار تغییر پلی‌مورفی شده و به فازهای حرارت بالا تبدیل می‌شود و نهایتاً با افزایش بیشتر دما در تشکیل سیلیکات‌های حرارت بالا شرکت کند. کانی‌های ورقه‌ای از جمله فنزیت (موسکویت) و ورمیکولیت در دماهای پایین آب بین‌لایه‌ای خود را از دست داده، تجزیه می‌شوند و در دماهای بالاتر به فازهای آلومینوسیلیکاتی تبدیل می‌شوند یا آلومینیوم و سیلیس لازم برای تشکیل آنورتیت و پیروکسن را فراهم می‌کنند. حضور اکسیدهای قلیایی از جمله Na_2O حاصل از آلبیت و K_2O آزادشده از تجزیه فنزیت (مسکویت)، موجب کاهش نقطه ذوب بخشی و تشکیل فاز شیشه‌ای سیلیکاتی را تسهیل می‌کنند. فاز شیشه‌ای نقش مهمی در کاهش دمای ذوب، تسریع فرآیند جوش خوردگی و افزایش چسبندگی بین ذرات دارد. K_2O در صورت وجود مقادیر بیشتر آلومینیوم حتی می‌تواند

ارتوز تشکیل دهد که در این پژوهش تشکیل نشده است. مگنتیت در فرآیند پخت در شرایط اکسیداسیون به هماتیت (Fe_2O_3) تبدیل می‌شود که موجب رنگ قرمز تا قهوه‌ای آجر می‌شود. مقادیری از آهن نیز وارد ساختار آنورتیت و پیروکسن می‌شود. اسپینل‌ها (ماگنیوفریت و کوپرواسپینل) معمولاً تا دماهای بالا پایداری دارند و می‌توانند به عنوان فازهای مقاوم در زمینه باقی بمانند یا با سیلیس، کلسیم و آهن واکنش داده و به تشکیل پیروکسن‌های آهن‌دار کمک می‌کنند (Dunham, 1992; Li et al, 2017; Abdrakhimov, 2025).



شکل ۱: الف) نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه خاک، ب) سرباره و پ) آجر پخته

۴- نتیجه‌گیری

شناسایی فازهای آنورتیت، پیروکسن و هماتیت در آجر تولیدی در این پژوهش نشان می‌دهد که محصولات تجزیه کانی‌های خاک مورد استفاده وارد ساختار آنورتیت و پیروکسن شده‌اند، اکسیدهای قلیایی نقطه ذوب را کاهش داده و در تشکیل شیشه سیلیکاتی نقش داشته‌اند ولی مقدار آنها برای ساخت فلدسپار پتاسیم کافی نبوده است. هماتیت حاصل از اکسیداسیون ماگنتیت سرباره، باعث رنگ قرمز تا قهوه‌ای آجر شده است. عدم حضور اسپینل‌ها در آجر نیز نشان‌دهنده دخالت این فازها در ساخت و افزایش محتوای آهن پیروکسن است. همچنین با توجه به نتایج این پژوهش استفاده از ۱۵ درصد سرباره فولاد به عنوان افزودنی در تولید آجر رسی، سبب تغییر ترکیب فازی و تشکیل فازهای آنورتیت، پیروکسن و شیشه سیلیکاتی می‌شود که به بهبود استحکام مکانیکی، مقاومت سایشی و پایداری حرارتی آجر کمک می‌کند. از سوی دیگر خروج گاز و آب ناشی از تجزیه دولومیت، کلسیت، ژئپس و ورمیکولیت ممکن است موجب افزایش تخلخل شود.

۵- تقدیر و تشکر

از شرکت فولاد مبارکه اصفهان که در انجام این پژوهش حمایت مالی را به عهده داشتند سپاسگزاری می‌شود.

۶- مراجع

ناظم، م.، ۱۴۰۴. بازیافت سرباره فولاد در تولید آجرهای رسی پخته شده (مطالعه موردی سرباره فولاد شرکت فولاد مبارکه)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ۹۳ صفحه.

Abdrakhimov, V.Z., 2025. The Effect of Metallurgical Iron-Containing Slag on the Technical Properties and Physicochemical Processes During the Firing of Ceramic Bricks. Theoretical Foundations of Chemical Engineering 59, 142–150.

Dunham A.C., 1992. Developments in industrial mineralogy: I. The mineralogy of brick-making, Proceedings of the Yorkshire Geological Society, 49, 95 – 104.

Li, B., He, M., Hwang, JY., et al. 2017. Characteristics of Anorthite-Pyroxene Ceramics Made from Hot-Poured Steelmaking Slag. JOM 69, 173–177.

تشکیل اشپوریت سولفات‌ها در سیکلون‌های پیش گرمکن کارخانه‌های سیمان

شهزاد شرافت^{۱*}، علیرضا جعفری خضرآباد^۱، مهناز خدای^۲

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یزد، یزد، ایران

sh_sherafat@pnu.ac.ir

چکیده

اشپوریت سولفات‌ها یک نام تجربی- صنعتی و بیانگر تشکیل کانی اشپوریت همراه با فازهای سولفات‌ها در کارخانه‌های تولید سیمان است که عمدتاً در سیکلون‌های میانی و پایینی پیش گرمکن رخ داده و منجر به افزایش چسبندگی، رشد سریع و پایداری رسوبات در سیکلون‌ها می‌شود. اگر فشار جزئی CO_2 باندازه کافی بالا باشد، حلقه‌های اشپوریت از طریق وا جذب CO_2 به آهک آزاد (CaO) تازه تشکیل شده ایجاد می‌شوند. در محدوده دمایی ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد، سولفات‌ها و نمک‌های مضاعف قلیایی به صورت نیمه فرار در سیکلون‌ها گردش کرده و بر روی هسته‌های اولیه اشپوریت رسوب و موجب پایداری اشپوریت و افزایش خاصیت چسبندگی آن به نسوز می‌شوند. اشپوریت به دلیل چسبندگی بالا به نسوز، به صورت لایه‌ای رشد کرده و منجر به کاهش سطح مقطع عبور گاز، افت شدید فشار سیکلون‌ها و ناپایداری فرآیند تولید سیمان می‌گردد. وجود خوراک مارنی یا سنگ آهک سیلیسی با SiO_2 فعال، رطوبت بالای مواد خام، وجود نواحی سرد و زمان بالای ماند مواد در بازه دمایی بحرانی، مقدار بالای قلیائی‌های فعال، توزیع نامناسب گاز و ایجاد نواحی مرده و افت یا نوسان بار حرارتی سیستم، از مهمترین عوامل تولید اشپوریت سولفات‌ها به شمار می‌آیند. از اقدامات قابل انجام جهت کنترل تشکیل اشپوریت در سیکلون‌های پیش گرمکن کارخانه‌های تولید سیمان می‌توان به اصلاح خوراک، بهبود توزیع گاز، استفاده از نسوز کم چسبندگی مقاوم در برابر سولفات، پایش مستمر فشار، افزایش سرعت عبور گاز، جلوگیری از کاهش ناگهانی بار و عبور سریع از بازه دمایی بحرانی اشاره نمود.

کلیدواژه‌ها: اشپوریت سولفات‌ها، سیکلون‌های پیش گرمکن، ناپایداری فرآیند تولید سیمان

Formation of Sulphospurrite in preheater cyclones in Cement Factory

Shahzad, Sherafat¹; Alireza, Jafari Khezrabad¹; Mahnaz, Khodammi²

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran,

sh_sherafat@pnu.ac.ir

² Department of Geology, Faculty of Sciences, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract

Sulphospurrite is an experimental-industrial name that indicates the formation of spurrite with sulfate phases in cement production plants, which occurs mainly in the middle and lower cyclones of the preheater and leads to increased adhesion, rapid growth and stability of deposits in the cyclones. If the partial pressure of CO_2 is high enough, spurrite rings are formed by desorption of CO_2 into the newly formed free lime. In the temperature range of 700 to 900 °C, sulfates and alkali double salts circulate in cyclones in semi-volatile form and precipitate on the initial spurrite nuclei, stabilizing the spurrite and increasing its adhesion to the refractory. Due to its high adhesion to the refractory, spurrite grows in a layered manner, leading to a reduction in the gas flow area, a sharp drop in cyclone pressure, and instability in the cement production process. The presence of marly or siliceous limestone feed with active SiO_2 , high humidity of raw materials, the presence of cold areas and long retention time of materials in the critical temperature range, high amount of active alkalis, improper gas distribution and creation of dead areas and drop or fluctuation of the thermal load of the system are considered to be the most important

factors in the production of sulphospurrite. Among the measures that can be taken to control the formation of sporite in preheater cyclones of cement production plants are feed modification, improvement of gas distribution, use of low-adhesive refractory resistant to sulfate, continuous monitoring of ΔP , increasing the gas flow rate, preventing sudden load reduction and rapid passage through the critical temperature range.

Keywords: Sulphospurrite, preheater cyclones, Cement Factory, Instability of the cement production process.

۱- مقدمه

کانی اشپوریت با فرمول شیمیایی $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{CO}_3$ در سیستم منوکلینیک پریسماتیک متبلور شده و اغلب به شکل بلورهای نیمه شکل‌دار تا بی شکل شفاف تا نیمه شفاف دیده می‌شود. این کانی دارای سختی پنج، جلای شیشه‌ای و خاصیت لومینسانس بوده و در جهت رخ به راحتی به قطعات کوچکتر تقسیم می‌شود. کانی اشپوریت به رنگ سفید، خاکستری تا خاکستری مایل به بنفش دیده شده و به دلیل رنگ جذاب خود به عنوان کانی جواهری و نیمه قیمتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کانی در طبیعت در محل تماس توده نفوذی بازیک حرارت بالا با سنگ‌های آهکی بوجود می‌آید (Grice, 2005). کانی اشپوریت را می‌توان یکی از فازهای میانی سیستم $\text{CaO-SiO}_2\text{-CO}_2$ دانست که در محدوده دمایی ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و در شرایط فشار جزئی بالای CO_2 بوجود می‌آید. تشکیل حلقه‌های اشپوریت سولفات $(\text{Ca}_5\text{Si}_2(\text{SO}_4)\text{O}_8, 2\text{C}_2\text{S})$ در دیواره‌های کوره دوار، یک عامل ناخواسته و مضر در صنعت سیمان بوده و تشکیل این کانی در سیکلون‌های کارخانه‌های تولید سیمان اغلب سبب گرفتگی سیکلون و بروز مشکلات عدیده‌ای می‌شود که در این مقاله به بررسی نحوه تشکیل و اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی جهت جلوگیری از تشکیل آن پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

نگارش مقاله بر اساس مطالعات تجربی در کارخانه سیمان ساروج بوشهر انجام شده است.

۳- بحث

سیمان، از مهمترین مواد مورد استفاده در مصالح ساختمانی و از ترکیبات اصلی بتن بوده و به منظور اتصال اجزای مختلف یک سازه نیز به کار می‌رود. سیمان، از حرارت دادن مخلوط مواد معدنی، تبدیل این مخلوط به کلینکر، آسیاب کردن و افزودن ترکیباتی نظیر گچ به آن تولید می‌شود. مراحل تولید سیمان به طور خلاصه عبارتست از: استخراج، خردایش و آسیاب مواد اولیه (سنگ آهک و ماسه یا رس)، مخلوط‌سازی و همگن‌سازی، پیش‌گرم‌کن و کوره دوار (تشکیل کلینکر)، خنک‌سازی و آسیاب کلینکر، آسیاب نهایی و تولید سیمان.

مواد خام مورد نیاز برای تولید سیمان شامل سنگ آهک، ماسه یا رس (سیلیسیم، آلومینیوم، آهن)، شیل، خاکستر بادی و بوکسیت، پس از استخراج بوسیله سنگ شکن به قطعاتی با ابعاد حدود ۷ سانتی‌متر درآمده و پس از اضافه کردن افزودنی‌های مورد نظر، یک مخلوط همگن کوچک‌تر تشکیل و فرآیند خشک کردن مخلوط مواد تا رسیدن رطوبت به زیر ۱ درصد صورت می‌گیرد. پس از خردایش مواد خام توسط غلتک‌های بزرگ و میزهای گردان، پودر ریزی به دست می‌آید که برای انتقال به کوره آماده است. قبل از ورود به کوره، مواد خام به محلی با چندین سیکلون انتقال داده می‌شوند تا با استفاده از گازهای داغ تولید شده از کوره، به مواد اکسیدی تبدیل شده و آماده پخت در کوره شوند. پخت مواد خام در کوره، طی انجام چندین واکنش شیمیایی بین ترکیبات کلسیم و سیلیس (شامل تبخیر آب آزاد و آب موجود در ترکیبات رسی، تبدیل کربنات کلسیم به اکسید

کلسیم طی فرآیند کلسیناسیون، تشکیل دی کلسیم سیلیکات، تشکیل فاز مایع بر اثر واکنش CaO با آلومینیوم و ترکیبات دارای آهن، تشکیل دانه‌های کلینکر و تبخیر مواد فرار نظیر سدیم، پتاسیم، کلریدها و سولفات‌ها و تشکیل تری کلسیم سیلیکات بر اثر واکنش CaO اضافی با دی کلسیم سیلیکات) منجر به تولید ماده‌ای به نام کلینکر می‌شود. با خروج کلینکر از درون کوره و تماس با هوای آزاد، دمای آن به سرعت از ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. سپس ضمن آسیاب کردن مجدد کلینکر، چندین ماده مختلف به ترکیب اضافه می‌شود تا سیمان به دست آید. ترکیبات شیمیایی مورد استفاده در ساخت سیمان نظیر CaO ، SiO_2 ، Al_2O_3 ، MgO ، Fe_2O_3 ، CaSO_4 ، SO_3 و Na_2O یا K_2O (نمک قلیایی) خواص شیمیایی و فیزیکی آن را تعیین می‌کنند.

اصطلاح اشپوریت سولفات در کارخانه‌های تولید سیمان، یک نام تجربی- صنعتی و بیانگر تشکیل کانی اشپوریت همراه با فازهای سولفات $(\text{Ca}_5\text{Si}_2(\text{SO}_4)_8, 2\text{C}_2\text{S} \cdot \text{CaSO}_4)$ است که منجر به افزایش چسبندگی، سرعت رشد و پایداری رسوبات در سیکلون‌ها می‌شود. مطالعات متعددی درخصوص نحوه تشکیل و کنترل رینگ‌های اشپوریتی در کوره‌های دوار انجام شده است (فرازمند و نایب‌لی، ۱۳۹۴). تشکیل اشپوریت سولفات عمده‌تاً در سیکلون‌های میانی و پایینی پیش‌گرمکن رخ می‌دهد. هر زمان که فشار جزئی CO_2 به اندازه کافی زیاد باشد تا واکنش کلسیناسیون را معکوس کند، حلقه‌های اشپوریت از طریق واجذب CO_2 به آهک آزاد تازه تشکیل شده ایجاد می‌شوند. این حلقه‌های سخت، لایه لایه بوده و شیمی مشابهی با کلینکر معمولی نشان می‌دهند. از آنجا که در مخلوط‌های خام غنی از سیلیس و آسیاب شده درشت، آهک آزاد منطقه کلسیناسیون، زمان کافی برای واکنش با سیلیس ندارد، احتمال رسوب اشپوریت افزایش می‌یابد.

هنگامی که کربنات موجود در اشپوریت با گوگرد جایگزین می‌شود ماده معدنی جدید، اشپوریت سولفات نامیده می‌شود. سولفات‌ها (شامل CaSO_4 ، K_2SO_4 ، Na_2SO_4) و نمک‌های مضاعف قلیایی، در محدوده دمایی ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به صورت نیمه فرار در سیکلون‌ها گردش کرده و بر روی هسته‌های اولیه اشپوریت رسوب و موجب پایدارسازی اشپوریت و افزایش خاصیت چسبندگی آن به نسوز می‌شوند. این فاز به دلیل چسبندگی بالا به نسوز، به صورت لایه‌ای رشد کرده و منجر به کاهش سطح مقطع عبور گاز، افت شدید فشار (ΔP) سیکلون‌ها، تکرار سریع گرفتگی پس از تمیزکاری و ناپایداری فرآیند می‌گردد. از مهم‌ترین نشانه‌های تولید اشپوریت می‌توان به تشکیل توده‌های سخت سفید تا خاکستری و نتایج XRD شامل فازهای اشپوریت، لارنیت و کلسیت باقیمانده اشاره نمود.

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده، تاثیر واضح حضور فلئوئر و به میزان کمتر کلر در کانی‌سازی اشپوریت در کوره را نشان داده اما سنتر مستقیم اشپوریت بدون کانی‌سازها تنها در صورتی انجام می‌شود که Ca_3SiO_5 به عنوان واکنش‌دهنده استفاده شود. هر دو نوع واکنش در کوره‌ها امکان‌پذیر بوده و گرد و غبار کوره، منبع احتمالی Ca_3SiO_5 منتقل شده است. بخار آب وارد شده به همراه CO_2 تاثیر قابل توجهی در افزایش تشکیل اشپوریت ندارد (Bolio-Arceo and Glasser, 1990). بنابراین عناصری مانند کلر باعث تشکیل کانی‌های ناخواسته «چسبنده» مانند اشپوریت در طول پخت یا کلسیناسیون شده و می‌توانند کوره سیمان، پیش‌گرمکن یا کلسینه را مسدود کنند (Broekmans and Pollmann, 2012).

وجود خوراک مارنی یا سنگ آهک سیلیسی با SiO_2 فعال، رطوبت بالای مواد خام، وجود نواحی سرد و زمان بالای ماند مواد در بازه دمایی بحرانی، مقدار بالای قلیائی‌های فعال، توزیع نامناسب گاز و ایجاد نواحی مرده و افت یا نوسان بار حرارتی سیستم، از مهمترین عوامل تولید اشپوریت سولفات به شمار می‌آیند.

افزایش سرعت گاز، جلوگیری از کاهش ناگهانی بار و عبور سریع از بازه دمایی بحرانی از اقدامات فوری اپراتوری و اصلاح خوراک، بهبود توزیع گاز، استفاده از نسوز کم چسبنده مقاوم در برابر سولفات و پایش مستمر تغییرات فشار از اقدامات بلندمدت در کنترل تشکیل اشپوریت در سیکلون‌های پیش‌گرمکن کارخانه‌های تولید سیمان می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

تشکیل اشپوریت سولفات‌ه عمده‌تاً در سیکلون‌های میانی و پایینی پیش‌گرمکن کارخانه‌های تولید سیمان رخ می‌دهد. از مهم‌ترین عوامل تولید اشپوریت سولفات‌ه می‌توان به وجود خوراک مارنی یا سنگ آهک با SiO_2 فعال، رطوبت بالای مواد خام، زمان بالای ماند مواد در بازه دمایی بحرانی، مقدار بالای قلیائی‌های فعال، توزیع نامناسب گاز و نوسان بار حرارتی سیستم اشاره نمود. اصلاح خوراک، بهبود توزیع گاز، استفاده از نسوز کم چسبنده مقاوم در برابر سولفات، جلوگیری از کاهش ناگهانی بار و عبور سریع از بازه دمایی بحرانی از اقدامات شناخته شده جهت جلوگیری از تشکیل اشپوریت در سیکلون‌های پیش گرمکن کارخانه‌های تولید سیمان می‌باشند. اشپوریت سولفات‌ه یک عامل شناخته‌شده معدنی-فرآیندی در گرفتگی سیکلون‌ها بوده و کنترل آن نیازمند مدیریت همزمان پارامترهای خوراک، دما و جریان گاز است. عدم توجه به این موضوع می‌تواند منجر به توقف‌های مکرر، کاهش راندمان و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری گردد.

۵- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از مدیریت و پرسنل محترم شرکت سیمان ساروج به جهت مساعدت‌های بی‌دریغ تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- مراجع

فرازمند، ر. و نایبالی، م. ۱۳۹۷، بررسی نحوه تشکیل رینگ های اشپوریتی و سولفو اشپوریتی در کوره های دوار و نقش آجرهای آلومینایی اشباع شده از SiO_2 در جلوگیری از تشکیل آنها، ماهنامه فناوری سیمان، ۹۳.

H. Bolio-Arceo, F.P. Glasser, 1990, Formation of spurrite, $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{CO}_3$, Cement and Concrete Research, 20 (2), 301-307.

Grice, J.D., 2005, The structure of spurrite, tilleyite and scawtite, and relationships to other silicate-carbonate minerals, Locality: Cornet Hill, Apuseni Mountains, Romania. The Canadian Mineralogist, 43, 1489-1500.

Sedawie, R., 2023, Spurrite Gemstone: Properties, Meanings, Value and More, modified 2025, from <https://www.gemrockauctions.com>.

Broekmans, MATM., Pollmann, H., 2012. Applied mineralogy of Cement and Concrete. The Mineralogical Society of America, Volume 74 of Reviews in Mineralogy and Geochemistry.

بررسی منشأ رنگ و کاربردهای جواهری کونزایت و هیدنیت (اسپودومن‌های رنگی) با بهره‌گیری از نمونه‌های شاخص معادن نورستان، افغانستان

فاطمه شفیع‌زاده برمی^۱، رضا ظهیری^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

^۲ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

*نویسنده مسئول: fafa.shafizadeh@gmail.com

چکیده

اسپودومن یکی از مهم‌ترین کانی‌های حاوی لیتیم است که در برخی پگماتیت‌های گرانیتی به‌صورت گونه‌های رنگی با ارزش گوهرشناسی ظاهر می‌شود. کونزایت و هیدنیت به‌ترتیب گونه‌های صورتی-بنفش و سبز این کانی هستند که در شرایط زمین‌شیمیایی خاص و در ارتباط با پگماتیت‌های نوع (LCT لیتیم-سزیم-تانتال) تشکیل می‌شوند. افغانستان، به‌ویژه ناحیه نورستان، یکی از مناطق شاخص جهان از نظر پگماتیت‌های لیتیم‌دار و گوهرسنگ‌های مرتبط محسوب می‌شود.

در این پژوهش، منشأ رنگ، ویژگی‌های گوهرشناسی و کاربردهای جواهری کونزایت و هیدنیت با تمرکز بر نمونه‌های شاخص معادن نورستان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور عناصر جزئی نظیر منگنز و کروم، همراه با شرایط تبلور و فرآیندهای پس‌ماگمایی، نقش اصلی در ایجاد رنگ این گوهرها دارد. همچنین کیفیت مناسب شفافیت و قابلیت تراش، نمونه‌های افغانستان را به گزینه‌هایی قابل توجه در بازار گوهرسنگ‌ها تبدیل کرده است.

کلیدواژه‌ها: اسپودومن، کونزایت، هیدنیت، منشأ رنگ، گوهرشناسی، نورستان، افغانستان

Investigation of the Color Origin and Gemological Applications of Kunzite and Hiddenite (Colored Spodumene) Using Representative Samples from the Nuristan Mines, Afghanistan

Abstract

Spodumene is one of the most important lithium-bearing minerals and, under specific geological conditions, occurs as colored gem-quality varieties within granitic pegmatites. Kunzite and hiddenite represent the pink-violet and green varieties of spodumene, respectively, and are commonly associated with LCT-type (lithium-cesium-tantalum) pegmatites. Afghanistan, particularly the Nuristan region, is recognized as one of the notable areas hosting lithium-rich pegmatites and high-quality gem materials.

In this study, the origin of color, gemological characteristics, and jewelry applications of kunzite and hiddenite are investigated with emphasis on representative samples from the Nuristan mines, Afghanistan. The results indicate that trace elements such as manganese and chromium, together with crystallization conditions and post-magmatic processes, play a key role in the development of the characteristic colors of these gemstones. In addition, favorable transparency, attractive natural color, and suitability for faceting make Afghan kunzite and hiddenite promising materials for jewelry use. The findings highlight the gemological significance and economic potential of colored spodumene from the Nuristan region in the global gemstone market.

Keywords: Spodumene, Kunzite, Hiddenite, Gemological Properties, Nuristan, Afghanistan

۱- مقدمه

اسپودومن با فرمول شیمیایی $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ یکی از کانی‌های مهم گروه پیروکسن‌ها و منبع اصلی لیتیم در پگماتیت‌های گرانیته است. در برخی از این پگماتیت‌ها، اسپودومن به صورت گونه‌های رنگی شفاف و مناسب برای کاربردهای جواهری ظاهر می‌شود. کونزایت و هیدنیت شناخته‌شده‌ترین انواع رنگی این کانی هستند که به دلیل رنگ جذاب، اندازه بلور مناسب و شفافیت، جایگاه ویژه‌ای در گوهرشناسی دارند.

افغانستان به عنوان بخشی از کمربند زمین‌ساختی آلپ-همالیا، دارای پگماتیت‌های غنی از لیتیم است. ناحیه نورستان یکی از مناطق مهم این کشور به شمار می‌رود که نمونه‌های باکیفیت کونزایت و هیدنیت از آن گزارش شده است. هدف این مقاله، بررسی منشأ رنگ و ویژگی‌های گوهرشناسی این گوهرها و ارزیابی کاربردهای جواهری آن‌ها با تمرکز بر نمونه‌های نورستان است.

۲- زمین‌شناسی و محیط تشکیل

پگماتیت‌های حاوی اسپودومن رنگی عمدتاً به پگماتیت‌های نوع LCT تعلق دارند که در مراحل پایانی تبلور ماگماهای گرانیته تکامل یافته تشکیل می‌شوند. این پگماتیت‌ها با غنی‌شدگی عناصر ناسازگار و رشد بلورهای درشت مشخص می‌شوند. در نورستان افغانستان، پگماتیت‌ها در ارتباط با واحدهای دگرگونی و توده‌های گرانیته نفوذی توسعه یافته‌اند. حضور سیالات غنی از لیتیم و عناصر جزئی، همراه با شرایط مناسب فشار و دما، امکان تشکیل بلورهای بزرگ و شفاف اسپودومن را فراهم کرده است.

۳- منشأ رنگ در اسپودومن‌های رنگی

۳-۱- کونزایت

رنگ صورتی تا بنفش کونزایت عمدتاً به حضور یون‌های منگنز (Mn^{2+}) و (Mn^{3+}) در ساختار بلوری اسپودومن نسبت داده می‌شود. این یون‌ها با ایجاد باندهای جذب در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیسی، رنگ مشخص کونزایت را ایجاد می‌کنند. شدت رنگ به غلظت منگنز و شرایط پرتودهی طبیعی وابسته است.

۳-۲- هیدنیت

رنگ سبز هیدنیت ناشی از حضور یون کروم (Cr^{3+}) است. کروم با جایگزینی در شبکه بلوری اسپودومن، باعث جذب انتخابی نور و ایجاد رنگ سبز می‌شود. یکنواختی توزیع کروم در بلور نقش مهمی در کیفیت رنگ این گوهر دارد.

۳-۳- مقایسه کونزایت و هیدنیت

کونزایت و هیدنیت اگرچه هر دو به عنوان گونه‌های رنگی اسپودومن شناخته می‌شوند، اما از نظر منشأ رنگ، فراوانی، ویژگی‌های گوهرشناسی و جایگاه اقتصادی تفاوت‌های قابل توجهی دارند. منشأ رنگ کونزایت عمدتاً به حضور یون‌های منگنز در ساختار بلوری اسپودومن نسبت داده می‌شود، در حالی که رنگ سبز هیدنیت ناشی از حضور یون‌های کروم است. این تفاوت در عنصر عامل رنگ، موجب ایجاد رفتار طیفی متفاوت و جلوه بصری متمایز در این دو گوهر می‌شود.

از نظر فراوانی، کونزایت نسبت به هیدنیت گسترده‌تر بوده و معمولاً بلورهای بزرگ‌تر و فراوان‌تری از آن در پگماتیت‌های لیتیم‌دار یافت می‌شود. در مقابل، هیدنیت به طور قابل توجهی کمیاب‌تر است و همین عامل نقش مهمی در افزایش ارزش اقتصادی آن

ایفا می‌کند. از دیدگاه گوهرشناسی، هر دو گوهر دارای سختی مشابه و رخ کامل هستند، اما به دلیل تفاوت در شدت رنگ و یکنواختی آن، ارزیابی کیفیت آن‌ها در بازار متفاوت انجام می‌شود.

در بازار جهانی گوهرسنگ‌ها، هیدنیت به‌عنوان یک گوهر خاص و لوکس شناخته می‌شود و اغلب در جواهرات محدود و کلکسیونی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که کونزایت به دلیل فراوانی نسبی و قابلیت تراش در ابعاد بزرگ‌تر، کاربرد گسترده‌تری در طراحی‌های متنوع جواهری دارد. این تفاوت‌ها سبب شده است که هر یک از این گوهرها جایگاه خاص خود را در بازار و صنعت جواهرسازی داشته باشند. (Nassau, 2001; Rossman, 2009).



شکل ۱- نمونه‌های خام و تراش‌خورده اسپودومن‌های رنگی نورستان: کونزایت، هیدنیت.

۴- ویژگی‌های گوهرشناسی

کونزایت و هیدنیت به‌عنوان گونه‌های رنگی اسپودومن، از نظر ویژگی‌های گوهرشناسی شباهت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. هر دو کانی دارای سختی ۶.۵ تا ۷ در مقیاس موس، جلای شیشه‌ای و رخ کامل در دو جهت هستند. وجود رخ کامل باعث

می‌شود این گوهرها در فرآیند تراش نیازمند دقت بالا باشند، زیرا شکست در امتداد سطوح رخ می‌تواند کیفیت نهایی گوهر را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، در صورت رعایت اصول صحیح تراش، نمونه‌های باکیفیت کونزایت و هیدنیت قابلیت ارائه جلای مناسب و جلوه بصری مطلوب را دارند.

از نظر شفافیت، نمونه‌های مرغوب هر دو گوهر معمولاً شفاف تا نیمه‌شفاف بوده و میزان ناخالصی‌ها و ترک‌های داخلی نقش مهمی در کاهش یا افزایش ارزش گوهرشناسی آن‌ها ایفا می‌کند. رنگ یکنواخت و خلوص بصری از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی کیفیت این گوهرها به‌شمار می‌رود. در کونزایت، رنگ صورتی تا بنفش با شدت‌های مختلف مشاهده می‌شود که یکنواختی رنگ و عدم وجود نواحی کم‌رنگ یا بی‌رنگ، ارزش نمونه را افزایش می‌دهد.

در هیدنیت، رنگ سبز که منشأ آن حضور یون‌های کروم در ساختار بلوری اسپودومن است، عامل اصلی جذابیت گوهرشناسی محسوب می‌شود. هرچه رنگ سبز زنده‌تر و یکنواخت‌تر باشد، ارزش گوهر بالاتر خواهد بود. در مقایسه با کونزایت، هیدنیت معمولاً کمیاب‌تر بوده و همین موضوع سبب شده است که در بازار جهانی از ارزش اقتصادی بیشتری برخوردار باشد.

از نظر کاربرد جواهری، هر دو گوهر به‌دلیل سختی مناسب و قابلیت ایجاد سطوح صیقلی، در ساخت جواهرات تزئینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کونزایت به‌علت اندازه بلور بزرگ‌تر و فراوانی نسبی، بیشتر در جواهرات با ابعاد بزرگ‌تر و طراحی‌های تزئینی کاربرد دارد، در حالی که هیدنیت به‌سبب کمیابی و رنگ سبز جذاب، اغلب در جواهرات خاص و لوکس مورد توجه قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، ترکیب ویژگی‌های فیزیکی مناسب، رنگ طبیعی و شفافیت قابل قبول، کونزایت و هیدنیت نورستان افغانستان را در زمره گوهرسنگ‌های ارزشمند قرار می‌دهد.

۵- کاربردهای جواهری و بازار

کونزایت به دلیل رنگ ملایم و اندازه بلور بزرگ، بیشتر در جواهرات تزئینی و کلکسیونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقابل، هیدنیت به‌علت کمیابی و رنگ سبز جذاب، در جواهرات خاص و لوکس کاربرد دارد. نمونه‌های با منشأ افغانستان، به‌ویژه از نورستان، در بازار جهانی به‌عنوان گوهرهایی با رنگ طبیعی و کیفیت مناسب شناخته می‌شوند. استخراج اصولی و فرآوری مناسب می‌تواند ارزش اقتصادی این گوهرها را افزایش دهد.

۶- نتیجه‌گیری

بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد که کونزایت و هیدنیت از مهم‌ترین گونه‌های رنگی اسپودومن هستند که در ارتباط مستقیم با پگماتیت‌های گرانیتی نوع LCT تشکیل می‌شوند. شرایط زمین‌شناسی ویژه ناحیه نورستان افغانستان، شامل تبلور ماگماتیک تکامل‌یافته و حضور سیالات غنی از عناصر جزئی، نقش اساسی در رشد بلورهای بزرگ و شفاف این گوهرها داشته است. منشأ رنگ این کانی‌ها به حضور عناصر جزئی نظیر منگنز در کونزایت و کروم در هیدنیت وابسته است که موجب ایجاد رنگ‌های شاخص و جذاب در آن‌ها می‌شود. تفاوت در عنصر عامل رنگ، علاوه بر ایجاد جلوه‌های بصری متفاوت، بر رفتار طیفی، ارزش گوهرشناسی و جایگاه اقتصادی این دو گوهر تأثیر مستقیم دارد.

از نظر گوهرشناسی، هر دو گوهر دارای ویژگی‌های فیزیکی مناسب برای کاربردهای جواهری هستند، اگرچه وجود رخ کامل نیازمند دقت بالا در فرآیند تراش است. نمونه‌های با کیفیت بالا، به‌ویژه آن‌هایی که از یکنواختی رنگ و شفافیت مطلوب برخوردارند، قابلیت استفاده در جواهرات تزئینی و لوکس را دارند.

در بازار جهانی، هیدنیت به دلیل کمیابی و رنگ سبز جذاب، معمولاً ارزش اقتصادی بالاتری نسبت به کونزایت دارد، در حالی که کونزایت به سبب فراوانی نسبی و اندازه بلور بزرگ‌تر، کاربرد گسترده‌تری در صنعت جواهرسازی دارد. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ذخایر اسپودومن‌های رنگی نورستان افغانستان از پتانسیل بالایی برای توسعه گوهرشناسی و بهره‌برداری اقتصادی پایدار برخوردار بوده و می‌توانند به‌عنوان منابع ارزشمند در بازار جهانی گوهرسنگ‌ها مورد توجه قرار گیرند.

۷-منابع

- Černý, P., & Ercit, T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2005–2026.
- London, D. (2018). Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, Special Publication 10.
- Nassau, K. (2001). *The Physics and Chemistry of Color*. Wiley-Interscience.
- Rossman, G. R. (2009). The colors of minerals. *Elements*, 5, 159–164.
- Sinkankas, J. (1964). *Gemstones of North America*. Van Nostrand.
- Schumann, W. (2013). *Gemstones of the World* (5th ed.). Sterling Publishing.
- Tacker, R. C. (2010). Reconsidering the definition of hiddenite. *Gems & Gemology*, 46, 160–175.
- Lyckberg, P. (2017). Gem-quality spodumene from miarolitic pegmatites. *The Mineralogical Record*, 48, 611–630.
- GIA (2020). *Spodumene (Kunzite and Hiddenite)*. *Gems & Gemology Reference Guide*.

بررسی طیف‌های FTIR، XRD و فرابنفش-مرئی (UV-Vis) کانی‌های کونزایت و هیدنیت از

نورستان، افغانستان و ارزیابی پتانسیل جواهری آن‌ها

فاطمه شفیق‌زاده برمی^۱، رضا ظهیری^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

^۲ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fafa.shafizadeh@gmail.com

چکیده

اسپودومن یکی از مهم‌ترین کانی‌های سیلیکاته‌ی غنی از لیتیوم است که گونه‌های رنگی آن، شامل کونزایت و هیدنیت، از نظر گوهرشناسی و اقتصادی اهمیت ویژه‌ای دارند. افغانستان، به‌ویژه منطقه نورستان، یکی از نواحی شناخته‌شده برای تشکیل اسپودومن‌های گوهری با کیفیت بالا محسوب می‌شود. در این پژوهش، نمونه‌های طبیعی کونزایت و هیدنیت از پگماتیت‌های غنی از لیتیوم نورستان به‌منظور بررسی ویژگی‌های ساختاری، طیفی و گوهرشناسی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای این منظور، از روش‌های پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) و آزمون‌های گوهرشناسی کلاسیک استفاده شد. نتایج XRD تطابق کامل نمونه‌ها با ساختار بلوری مونوکلینیک اسپودومن را نشان داد. طیف‌های FTIR باندهای جذبی شاخص مربوط به پیوندهای Si-O را آشکار کردند و نتایج UV-Vis نقش عناصر منگنز و کروم را در ایجاد رنگ کونزایت و هیدنیت تأیید نمود. آزمون‌های گوهرشناسی نیز نشان دادند که ویژگی‌های فیزیکی و نوری نمونه‌ها در بازه استاندارد گزارش‌شده برای اسپودومن قرار دارند. نتایج این پژوهش بیانگر پتانسیل مناسب اسپودومن‌های رنگی نورستان برای کاربردهای گوهرشناسی و جواهری است.

کلیدواژه‌ها: اسپودومن، کونزایت، هیدنیت، FTIR، XRD، UV-Vis، نورستان، افغانستان

Investigation of FTIR, XRD, and UV-Visible (UV-Vis) Spectra of Kunzite and Hiddenite from Nuristan, Afghanistan, and Evaluation of Their Gemological Potential

Abstract

Spodumene is one of the most important lithium-bearing silicate minerals, and its colored varieties, namely kunzite and hiddenite, are of considerable gemological and economic significance. Afghanistan, particularly the Nuristan region, is recognized as an important source of high-quality gem-grade spodumene. In this study, natural kunzite and hiddenite samples from lithium-rich granitic pegmatites of Nuristan, Afghanistan, were investigated to characterize their structural, spectroscopic, and gemological properties. X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis), and standard gemological tests were employed. XRD results confirmed that all samples correspond to monoclinic spodumene with no detectable secondary phases. FTIR spectra revealed characteristic absorption bands related to Si-O vibrations of the silicate framework, while UV-Vis spectra indicated that manganese and chromium are the primary chromophoric elements responsible for the pink to violet color of kunzite and the green color of hiddenite, respectively. Gemological examinations showed that the physical and optical properties of the samples fall within the standard ranges reported for spodumene. The results demonstrate that colored spodumene from Nuristan possesses favorable gemological characteristics and significant potential for gemstone applications.

۱. مقدمه

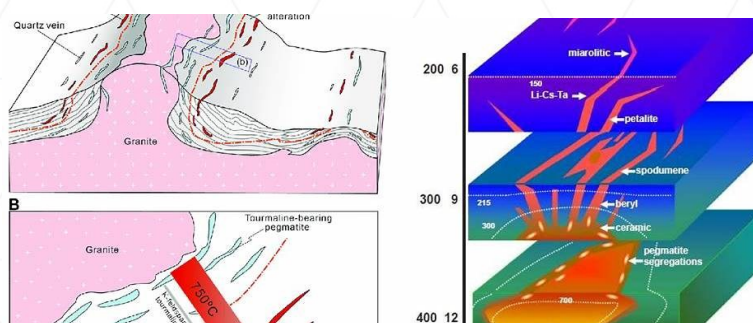
اسپودومن یکی از کانی‌های مهم گروه پیروکسن و از سیلیکات‌های غنی از لیتیوم با فرمول شیمیایی $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ است که عمدتاً در محیط‌های پگماتیتهای گرانیتی تشکیل می‌شود. این کانی به دلیل حضور لیتیوم در ساختار بلوری خود، علاوه بر اهمیت زمین‌شناسی اقتصادی، از دیدگاه گوهرشناسی نیز جایگاه ویژه‌ای دارد. اسپودومن معمولاً به صورت بی‌رنگ یا کم‌رنگ یافت می‌شود، اما گونه‌های رنگی آن شامل کونزایت با رنگ صورتی تا بنفش و هیدنیت با رنگ سبز، به عنوان گوهرهای ارزشمند شناخته می‌شوند (Deer et al., 2013; Nassau, 2001).

رنگ در اسپودومن‌های گوهری نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزش‌گذاری آن‌ها ایفا می‌کند و منشأ آن به حضور عناصر جزئی در ساختار بلوری نسبت داده می‌شود. منگنز عامل اصلی ایجاد رنگ صورتی تا بنفش در کونزایت است، در حالی که کروم نقش غالبی در ایجاد رنگ سبز هیدنیت دارد. این عناصر با جایگزینی محدود در شبکه بلوری اسپودومن، موجب ایجاد جذب‌های نوری مشخص در ناحیه مرئی می‌شوند، بدون آنکه چارچوب بلوری کانی به طور اساسی تغییر کند (Nassau, 2001; Rossman, 2009). مطالعه منشأ رنگ و ویژگی‌های ساختاری اسپودومن‌های رنگی نیازمند استفاده از روش‌های آزمایشگاهی دقیق است. پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی فاز معدنی و بررسی ساختار بلوری، طیف‌سنجی FTIR برای مطالعه پیوندهای سیلیکاتی و ویژگی‌های ارتعاشی، و طیف‌سنجی UV-Vis برای بررسی جذب‌های نوری مرتبط با عناصر رنگ‌زا به کار می‌روند. ترکیب این روش‌ها با آزمون‌های گوهرشناسی کلاسیک، رویکردی جامع برای بررسی اسپودومن‌های رنگی فراهم می‌کند. افغانستان، به ویژه نورستان، یکی از مناطق مهم تشکیل پگماتیت‌های غنی از لیتیوم است که اسپودومن‌های گوهری با کیفیت بالا در آن یافت می‌شوند (Schmetzer & Bank, 1981; Yin et al., 2020).

۲. زمین‌شناسی و منشأ نمونه‌ها

نمونه‌های مورد مطالعه از پگماتیت‌های گرانیتی غنی از لیتیوم ولایت نورستان افغانستان برداشت شده‌اند. این پگماتیت‌ها عمدتاً از نوع LCT (غنی از لیتیوم، سزیم و تانتال) بوده و در مراحل پایانی تبلور ماگماهای گرانیتی تشکیل می‌شوند. غنی‌شدگی عناصر ناسازگار در این مرحله، شرایط مناسبی برای رشد بلورهای درشت و شفاف کانی‌های گوهری فراهم می‌کند (Černý & Ercit, 2005; London, 2018).

نورستان از نظر زمین‌شناسی بخشی از کمربندهای تکتونیکی فعال منطقه را در بر می‌گیرد که طی تاریخ زمین‌شناسی خود رویدادهای ماگمایی و دگرگونی متعددی را تجربه کرده است. نفوذ توده‌های گرانیتی و تبلور تدریجی آن‌ها، زمینه تشکیل پگماتیت‌های غنی از عناصر کمیاب را فراهم کرده است. این پگماتیت‌ها معمولاً دارای زون‌بندی مشخصی هستند که تمرکز کانی‌ها در بخش‌های مختلف آن‌ها مشاهده می‌شود. اسپودومن عمدتاً در زون‌های میانی تا مرکزی پگماتیت‌های غنی از لیتیوم تشکیل می‌شود؛ جایی که تمرکز لیتیوم و عناصر جزئی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. حضور منگنز و کروم در محیط تشکیل، عامل اصلی ایجاد رنگ‌های متمایز کونزایت و هیدنیت در این منطقه محسوب می‌شود.

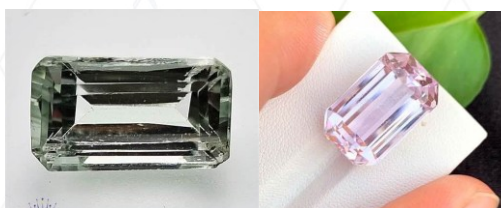


شکل ۱- دیاگرام شماتیک زون‌بندی پگماتیت‌های گرانیتی غنی از لیتیوم (LCT) و جایگاه تمرکز اسپودومن، کونزایت و هیدنیت

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. نمونه‌های مورد مطالعه

در این پژوهش، نمونه‌های طبیعی کونزایت و هیدنیت از پگماتیت‌های گرانیته غنی از لیتیوم ولایت نورستان افغانستان انتخاب شدند. معیار انتخاب نمونه‌ها شامل شفافیت مناسب، یکنواختی رنگ، نبود شکستگی‌های گسترده و حداقل میزان درون‌بار قابل مشاهده بود تا تأثیر عوامل ساختاری ناخواسته بر نتایج آزمایشگاهی به حداقل برسد. پیش از انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها تمیز شده و برای هر روش آزمایشگاهی آماده‌سازی مناسب انجام گرفت؛ به‌طوری که بخشی از نمونه‌ها به‌صورت پودر ریزدانه برای آزمایش XRD و بخش دیگر به‌صورت سطح صیقلی برای آزمون‌های FTIR، UV-Vis و گوه‌رشناسی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۲- نمونه‌های گوه‌ری کونزایت و هیدنیت مورد مطالعه با منشأ نورستان، افغانستان

۳-۲. پراش پرتو ایکس (XRD)

آزمایش پراش پرتو ایکس به‌منظور شناسایی فاز معدنی، بررسی خلوص فازی و تعیین ساختار بلوری نمونه‌ها انجام شد. الگوهای پراش ثبت‌شده در بازه زاویه‌ای مناسب مورد تحلیل قرار گرفتند و موقعیت و شدت پیک‌های اصلی با داده‌های مرجع اسپودومن مقایسه شد. این روش امکان تفکیک اسپودومن از سایر کانی‌های همراه پگماتیتی را فراهم کرده و به‌عنوان یکی از معتبرترین روش‌ها برای تأیید هویت معدنی نمونه‌ها شناخته می‌شود. بررسی الگوهای XRD همچنین برای اطمینان از نبود فازهای ثانویه یا ناخالصی‌های قابل توجه انجام گرفت (Deer et al., 2013; White & Nelen, 1973).

۳-۳. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

طیف‌سنجی FTIR به‌منظور بررسی ویژگی‌های ارتعاشی شبکه بلوری و شناسایی پیوندهای سیلیکاتی نمونه‌ها انجام شد. طیف‌ها در بازه عدد موجی مناسب ثبت شده و باندهای جذبی شاخص مربوط به ارتعاشات پیوندهای Si-O و Al-O مورد بررسی قرار گرفتند. این روش اطلاعات ارزشمندی درباره چارچوب سیلیکاتی اسپودومن و تأثیر عناصر جزئی بر رفتار ارتعاشی شبکه بلوری فراهم می‌کند. مقایسه طیف‌های کونزایت و هیدنیت امکان بررسی تفاوت‌های جزئی ناشی از ترکیب شیمیایی و عناصر رنگ‌زا را فراهم ساخت (Schmetzer & Bank, 1981; Yin et al., 2020).

۳-۴. طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis)

طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی به‌منظور بررسی جذب‌های نوری و تعیین منشأ رنگ در نمونه‌های مورد مطالعه انجام شد. طیف‌های ثبت‌شده امکان شناسایی باندهای جذبی مرتبط با انتقالات الکترونی عناصر رنگ‌زا را فراهم کردند. این روش به‌ویژه برای بررسی نقش منگنز در ایجاد رنگ صورتی تا بنفش کونزایت و نقش کروم در ایجاد رنگ سبز هیدنیت اهمیت دارد. تحلیل داده‌های UV-Vis به درک بهتر تفاوت‌های رنگی میان این دو گونه اسپودومن کمک می‌کند (Nassau, 2001; Rossman, 2009).

۳-۵. آزمون‌های گوه‌رشناسی کلاسیک

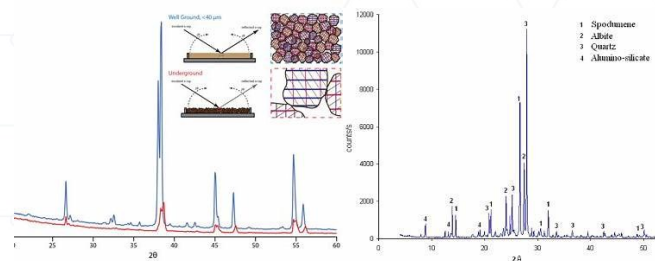
به‌منظور تکمیل داده‌های آزمایشگاهی، آزمون‌های گوه‌رشناسی شامل اندازه‌گیری ضریب شکست، بررسی چندرنگی با استفاده از ابزارهای نوری، تعیین سختی نسبی بر اساس مقیاس موس و مشاهده رخ انجام شد. این آزمون‌ها علاوه بر تأیید نتایج

آزمایشگاهی، اطلاعات کاربردی مهمی درباره قابلیت تراش، دوام و ارزش جواهری نمونه‌ها ارائه می‌دهند. بررسی رخ کامل در دو جهت متقاطع به‌ویژه از نظر گوهرشناسی اهمیت بالایی دارد، زیرا می‌تواند بر نحوه برش و فرآوری گوهر تأثیر بگذارد.

۴. نتایج

۴-۱. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD)

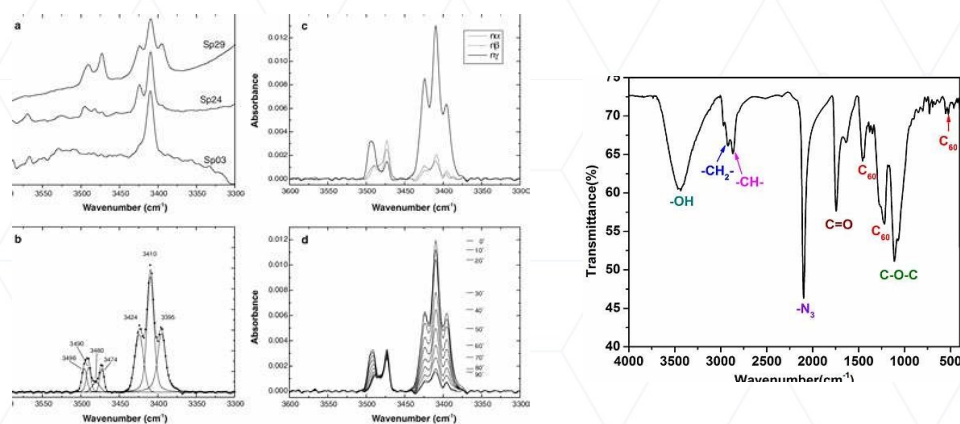
الگوهای پراش پرتو ایکس ثبت‌شده برای تمامی نمونه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده تطابق کامل با ساختار بلوری مونوکلینیک اسپودومن هستند. موقعیت و شدت پیک‌های اصلی با داده‌های مرجع گزارش‌شده برای اسپودومن همخوانی دارد و هیچ پیک اضافی مربوط به فازهای ثانویه یا ناخالصی‌های قابل توجه مشاهده نشد. این موضوع بیانگر خلوص فازی مناسب نمونه‌ها و طبیعی بودن آن‌هاست. شباهت الگوهای XRD کونزایت و هیدنیت نشان می‌دهد که تفاوت این دو گونه عمدتاً به ترکیب شیمیایی و حضور عناصر جزئی مربوط بوده و چارچوب بلوری آن‌ها یکسان است.



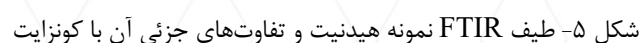
شکل ۳- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه اسپودومن و تطابق پیک‌ها با ساختار بلوری مونوکلینیک

۴-۲. نتایج طیف‌سنجی FTIR

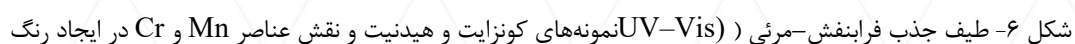
طیف‌های FTIR نمونه‌های کونزایت و هیدنیت باندهای جذبی مشخص و قوی در نواحی عدد موجی مربوط به ارتعاشات پیوندهای Si-O را نشان دادند که مشخصه اصلی چارچوب سیلیکاتی اسپودومن محسوب می‌شود. علاوه بر این، باندهای ضعیف‌تری مربوط به ارتعاشات پیوندهای Al-O نیز مشاهده شد. مقایسه طیف‌های کونزایت و هیدنیت تفاوت‌های جزئی در شدت و پهنای برخی باندها را نشان می‌دهد که می‌تواند به حضور و توزیع متفاوت عناصر جزئی در شبکه بلوری نسبت داده شود. با این حال، این تفاوت‌ها منجر به تغییر ساختار کلی کانی نشده‌اند.



شکل ۴- طیف FTIR نمونه کونزایت با نمایش باندهای جذبی شاخص پیوندهای Si-O



طیف‌های جذب فرابنفش-مرئی ثبت‌شده برای نمونه‌های کونزایت دارای باندهای جذبی مشخص در ناحیه مرئی هستند که به انتقالات الکترونی یون منگنز نسبت داده می‌شوند. این باندها عامل اصلی ایجاد رنگ صورتی تا بنفش در کونزایت محسوب می‌شوند. در مقابل، طیف‌های UV-Vis نمونه‌های هیدنیت جذب‌های مشخص مرتبط با یون کروم را نشان دادند که منشأ رنگ سبز این گونه اسپودومن است. تفاوت‌های آشکار در الگوهای جذب نوری میان کونزایت و هیدنیت بیانگر منشأ متفاوت رنگ در این دو گونه است.



نتایج آزمون‌های گوهرشناسی انجام‌شده بر روی نمونه‌های کونزایت و هیدنیت مورد مطالعه نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی و نوری این نمونه‌ها به‌خوبی با مقادیر استاندارد گزارش‌شده برای کانی اسپودومن مطابقت دارند. اندازه‌گیری ضریب شکست نمونه‌ها مقادیری در بازه ۱.۶۶۰ تا ۱.۶۷۶ را نشان داد که با داده‌های مرجع اسپودومن‌های گوهری همخوانی دارد و بیانگر خلوص و طبیعی بودن نمونه‌هاست.

بررسی چندرنگی نمونه‌ها نشان داد که کونزایت چندرنگی قوی‌تری نسبت به هیدنیت از خود نشان می‌دهد. در کونزایت، تغییر رنگ از صورتی کم‌رنگ تا بنفش پررنگ در زوایای مختلف مشاهده شد که این ویژگی یکی از شاخص‌های مهم تشخیصی این گوهر محسوب می‌شود. در مقابل، هیدنیت چندرنگی ضعیف‌تری داشته و تغییرات رنگی آن عمدتاً در طیف سبز کم‌رنگ تا سبز تیره محدود می‌شود. این تفاوت در شدت چندرنگی را می‌توان به نوع و غلظت عناصر رنگ‌زا و نحوه جایگزینی آن‌ها در شبکه بلوری نسبت داد.

آزمون سختی بر اساس مقیاس موس نشان داد که هر دو گونه کونزایت و هیدنیت دارای سختی نسبی بین ۶.۵ تا ۷ هستند که این مقدار برای کاربردهای جواهری مناسب ارزیابی می‌شود. با این حال، وجود رخ کامل در دو جهت متقاطع که از ویژگی‌های

شاخص اسپودومن است، می‌تواند بر دوام مکانیکی نمونه‌ها تأثیرگذار باشد و در هنگام برش و تراش نیازمند دقت ویژه است. این ویژگی رخ، اگرچه از نظر گوهرشناسی یک شاخص تشخیصی مهم محسوب می‌شود، اما می‌تواند عامل محدودکننده‌ای در انتخاب نوع تراش و کاربرد نهایی گوهر باشد.

بررسی شفافیت نمونه‌ها نشان داد که بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه دارای شفافیت مناسب، از شفاف تا نیمه‌شفاف، هستند که این ویژگی نقش مهمی در کیفیت نهایی گوهر و ارزش‌گذاری آن دارد. نبود شکستگی‌های گسترده و میزان کم درون‌بارهای قابل مشاهده، شرایط مطلوبی را برای تراش و استفاده جواهری فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها به‌ویژه در نمونه‌های کونزایت نورستان، که اغلب به‌صورت بلورهای درشت و شفاف یافت می‌شوند، بارزتر است.

در مجموع، نتایج آزمون‌های گوهرشناسی نشان می‌دهد که نمونه‌های کونزایت و هیدنیت نورستان از نظر ویژگی‌های فیزیکی و نوری دارای کیفیت مناسب برای کاربردهای جواهری هستند. تفاوت‌های مشاهده‌شده میان این دو گونه، به‌ویژه در شدت چندرنگی و رفتار نوری، علاوه بر اهمیت تشخیصی، می‌تواند در تعیین نوع کاربرد جواهری و ارزش اقتصادی آن‌ها نیز نقش مهمی ایفا کند.

بر اساس مجموعه نتایج به‌دست‌آمده، ویژگی‌های گوهرشناسی نمونه‌های مورد مطالعه در بازه استاندارد اسپودومن‌های گوهری قرار داشته و با گزارش‌های پیشین مطابقت دارد (Fritsch et al., 1987; Palke et al., 2019).

۵. بحث

نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اسپودومن‌های رنگی نورستان افغانستان از نظر ساختار بلوری، ویژگی‌های طیفی و خواص گوهرشناسی با نمونه‌های گزارش‌شده از سایر مناطق شناخته‌شده جهان قابل مقایسه هستند. تطابق کامل الگوهای XRD با ساختار بلوری مونوکلینیک اسپودومن و نبود فازهای ثانویه بیانگر شرایط زمین‌شناسی پایدار و مناسب در محیط تشکیل این نمونه‌هاست.

داده‌های FTIR نشان‌دهنده پایداری چارچوب سیلیکاتی اسپودومن بوده و تفاوت‌های جزئی مشاهده‌شده میان کونزایت و هیدنیت را می‌توان به حضور عناصر جزئی و تأثیر آن‌ها بر محیط پیوندی شبکه بلوری نسبت داد. این تغییرات محدود، بدون ایجاد اختلال در ساختار کلی کانی، بر رفتار طیفی و ویژگی‌های نوری نمونه‌ها تأثیر گذار هستند.

نتایج طیف‌سنجی UV-Vis نقش کلیدی عناصر رنگ‌زا را در ایجاد رنگ اسپودومن‌های مورد مطالعه تأیید می‌کند. منگنز عامل اصلی رنگ صورتی تا بنفش در کونزایت و کروم عامل ایجاد رنگ سبز در هیدنیت است. این یافته‌ها با مدل‌های پذیرفته‌شده منشأ رنگ در اسپودومن‌های رنگی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که تفاوت رنگی این دو گونه عمدتاً ناشی از تفاوت در نوع عناصر جزئی و انتقالات الکترونی آن‌هاست، نه تغییر در ساختار بلوری.

نتایج آزمون‌های گوهرشناسی کلاسیک نیز نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های فیزیکی و نوری در محدوده استاندارد اسپودومن قرار دارند و از کیفیت مناسبی برای کاربردهای جواهری برخوردارند. چندرنگی مشخص، شفافیت مناسب و اندازه بلورهای این نمونه‌ها، به‌ویژه برای کونزایت، پتانسیل بالای آن‌ها را برای استفاده در صنعت جواهرسازی نشان می‌دهد.

در مجموع، ترکیب داده‌های ساختاری، طیفی و گوهرشناسی در این مطالعه چارچوبی جامع برای شناسایی و ارزیابی اسپودومن‌های رنگی فراهم کرده و اهمیت منطقه نورستان افغانستان را به‌عنوان یکی از منابع مهم این گوهرها تأیید می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اسپودومن‌های رنگی شامل کونزایت و هیدنیت با منشأ پگماتیت‌های غنی از لیتیوم ولایت نورستان افغانستان به‌صورت جامع و با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌های آزمایشگاهی و گوهرشناسی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از

آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای ساختار بلوری مونوکلینیک مشخص اسپودومن بوده و از نظر خلوص فازی با داده‌های مرجع تطابق کامل دارند. نبود فازهای ثانویه در الگوهای XRD بیانگر شرایط زمین‌شناسی پایدار در محیط تشکیل و طبیعی بودن نمونه‌هاست.

بررسی‌های طیف‌سنجی FTIR باندهای جذبی شاخص مربوط به پیوندهای Si-O و Al-O را آشکار کرد که ویژگی اصلی چارچوب سیلیکاتی اسپودومن محسوب می‌شود. تفاوت‌های جزئی مشاهده‌شده در شدت و موقعیت برخی باندها میان کونزایت و هیدنیت را می‌توان به حضور و توزیع عناصر جزئی در شبکه بلوری نسبت داد. این تغییرات هرچند منجر به تغییر ساختار کلی کانی نشده‌اند، اما نقش مهمی در رفتار طیفی و ویژگی‌های نوری نمونه‌ها ایفا می‌کنند.

نتایج طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) به‌روشنی نشان داد که منشأ رنگ در اسپودومن‌های مورد مطالعه به عناصر رنگ‌زا مرتبط است. منگنز به‌عنوان عامل اصلی ایجاد رنگ صورتی تا بنفش در کونزایت و کروم به‌عنوان عامل ایجاد رنگ سبز در هیدنیت شناسایی شد. این یافته‌ها با مدل‌های پذیرفته‌شده منشأ رنگ در اسپودومن‌های رنگی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که تفاوت رنگی این دو گونه عمدتاً ناشی از نوع و حالت اکسیداسیون عناصر جزئی است، نه تغییر در چارچوب بلوری.

آزمون‌های گوهرشناسی کلاسیک نتایج آزمایشگاهی را تکمیل کرده و نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی و نوری نمونه‌ها در بازه استاندارد گزارش‌شده برای اسپودومن قرار دارند. چندرنگی قوی‌تر کونزایت نسبت به هیدنیت و وجود رخ کامل در دو جهت متقاطع، علاوه بر اهمیت تشخیصی، در ارزیابی کاربرد جواهری و فرآیند تراش این گوهرها نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اسپودومن‌های رنگی نورستان افغانستان از نظر ویژگی‌های ساختاری، طیفی و گوهرشناسی با نمونه‌های شناخته‌شده جهانی قابل مقایسه هستند و از پتانسیل بالایی برای کاربردهای علمی، گوهرشناسی و جواهری برخوردارند. ترکیب روش‌های XRD، FTIR، UV-Vis و آزمون‌های گوهرشناسی ارائه‌شده در این مطالعه، چارچوبی قابل اعتماد برای شناسایی، تفکیک و ارزیابی اسپودومن‌های رنگی فراهم می‌کند و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مطالعات آینده و توسعه دانش گوهرشناسی مورد استفاده قرار گیرد.

۷. منابع

- Černý, P., & Ercit, T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2005–2026.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals* (3rd ed.). Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- Fritsch, E., Rossman, G. R., & Shigley, J. E. (1987). Optical properties of spodumene. *Gems & Gemology*, 23, 141–152.
- Hughes, R. W. (2017). *Ruby & sapphire: A gemologist's guide*. RWH Publishing.
- London, D. (2018). *Pegmatites*. The Canadian Mineralogist, Special Publication 10.
- Nassau, K. (2001). *The physics and chemistry of color* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Palke, A. C., Renfro, N. D., & Berg, R. B. (2019). Gemological characterization of spodumene-group minerals. *Gems & Gemology*, 55, 40–57.
- Rossman, G. R. (2009). The colors of minerals. *Elements*, 5, 159–164.
- Schmetzer, K., & Bank, H. (1981). Natural and synthetic spodumene: An investigation by spectroscopy. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 140, 273–288.
- Tacker, R. C. (2010). Reconsidering the definition of hiddenite. *Gems & Gemology*, 46, 160–175.
- White, J. S., & Nelen, J. A. (1973). Crystal chemistry of spodumene. *American Mineralogist*, 58, 639–648.
- Yin, S., Wang, J., & Chen, Z. (2020). Spectroscopic study of spodumene minerals using FTIR and UV-Vis techniques. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 229, 117944.

مطالعه زینولیت‌های ارتوگنیس و ارتوآمفیبولیت تیتانیت‌دار گرانیتوئیدهای

منطقه خواجه مراد (مشهد)

مبیناسعدتی^{۱*}، علی اصغر سپاهی^۲، فاطمه سپیدبر^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

saadati.mobina@mail.um.ac.ir

چکیده: منطقه مورد مطالعه (خواجه مراد) در جنوب شرق مشهد واقع شده است. در درون گرانیتوئیدهای این منطقه انکلاوهای باترکیب و اندازه متفاوت وجود دارد که در میان آن‌ها زینولیت‌هایی از ارتوگنیس و ارتوآمفیبولیت قدیمی به چشم می‌خورد. مجموعه کانی‌های سازنده این زینولیت‌ها شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند، بیوتیت و تیتانیت (اسفن) می‌باشد. یکی از ویژگی‌های بارز در این سنگ‌ها فراوانی کانی تیتانیت در آن‌ها می‌باشد که معمولاً در سنگ‌ها به صورت کانی فرعی یا جزئی یافت می‌شود؛ اما در این زینولیت‌ها کانی مذکور آنقدر فراوان است که حتی می‌توان آن را به عنوان کانی اصلی به حساب آورد. این کانی همانند کانی‌های بیوتیت و هورنبلند تا حدودی از خود جهت یافتگی ترجیحی نیز نشان می‌دهد. گاهی بافت پوئیکیلیتی در بلورهای این کانی دیده می‌شود. فراوانی این کانی به اثبات منشا آذرین ارتوگنیس‌ها و ارتوآمفیبولیت‌ها کمک می‌کند زیرا معمولاً این کانی در پاراگنیس‌ها و پاراآمفیبولیت‌ها یا وجود ندارد و یا مقدار آن بسیار اندک است.

کلیدواژه‌ها: تیتانیت، ارتوگنیس، ارتوآمفیبولیت، گرانیتوئید، خواجه مراد

A Study of Titanite-bearing Orthogneiss and Ortho-amphibolite Xenoliths in the Granitoids of Khajeh Morad Area (Mashhad)

Mobina Saadati^{1*}, Ali Asghar Sepahi², Fatameh Sepidbar³

1. M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2. Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

saadati.mobina@mail.um.ac.ir

Abstract: The study area (Khajeh Morad) is located southeast of Mashhad. Within the granitoids of this area, enclaves with varying compositions and sizes are present, among which xenoliths of old orthogneiss and ortho-amphibolite can be observed. The mineral assemblage constituting these xenoliths includes plagioclase, quartz, hornblende, biotite, and titanite (sphene). One of the prominent features in these rocks is the abundance of titanite, which is typically found as an accessory or minor mineral in rocks; however, in these xenoliths, this mineral is so abundant that it can even be considered a main constituent. This mineral, similar to biotite and hornblende, also exhibits a preferred orientation to some extent. Poikilitic texture is sometimes observed in the crystals of this mineral. The abundance of this mineral helps to prove the igneous origin of the orthogneisses and ortho-amphibolites, as this mineral is usually absent or very scarce in paragneisses and para-amphibolites.

Keywords: Titanite, Orthogneiss, Ortho-amphibolite, Granitoid, Khajeh Morad

مقدمه: گرانیتوئیدها به عنوان یکی از اجزای اصلی پوسته قاره‌ای، حاوی اطلاعات ارزشمندی در مورد فرآیندهای ماگمایی، دگرگونی و تحول پوسته‌ای هستند. انکلاوها و زینولیت‌های موجود در این توده‌های نفوذی، پنجره‌ای منحصر به فرد به سوی سنگ‌های دیواره یا منابع ماگمایی عمیق‌تر فراهم می‌کنند و نقش مهمی در رمزگشایی تاریخچه پیچیده تکتونوماگمایی یک منطقه ایفا می‌نمایند. از میان این انکلاوها، زینولیت‌های سنگ‌های دگرگونی، به ویژه انواعی که منشأ اولیه آذرین داشته (ارتوگنیس و ارتوآمفیبولیت)، می‌توانند شواهد کلیدی از ماهیت و ترکیب پوسته زیرین در زمان نفوذ گرانیتوئیدها ارائه دهند.

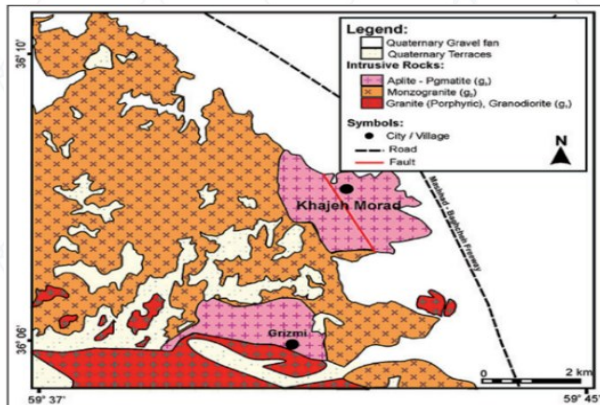
تیتانیت یک کانی تیتانیوم‌دار فراوان در بسیاری از سنگ‌های آذرین و دگرگونی است. رفتار این کانی به شدت تحت تأثیر شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل سنگ از قبیل دما، فشار، فعالیت سیال و فوگاسیته اکسیژن قرار دارد. در سنگ‌های دگرگونی، حضور و فراوانی تیتانیت می‌تواند یک شاخص تشخیصی مهم بین سنگ‌های با منشأ رسوبی (پاراگنیس، پارا آمفیبولیت) و سنگ‌های با منشأ آذرین (ارتوگنیس، ارتوآمفیبولیت) باشد، زیرا این کانی در سنگ‌های مادر اولیه آذرین غنی از تیتانیوم معمولاً فراوان‌تر است. از این رو، بررسی سیستماتیک تیتانیت در زینولیت‌های دگرگونی می‌تواند به طور مستدلی در تعیین خاستگاه آنها به کار رود. توده‌های گرانیتوئیدی این منطقه حاوی انکلاوهای متنوعی هستند. در میان این انکلاوها، حضور زینولیت‌های ارتوگنیس و ارتوآمفیبولیت قدیمی، پرسش‌هایی در مورد ماهیت پوسته زیرین و تعامل آن با ماگمای گرانیتوئیدی مطرح می‌سازد. ویژگی قابل توجه این زینولیت‌ها، فراوانی غیرمعمول کانی تیتانیت است که به صورت یک کانی اصلی در مجموعه کانی‌شناختی آنها ظاهر شده و حتی در برخی نمونه‌ها دارای جهت‌یافتگی ترجیحی و بافت‌های خاصی مانند بافت پوئیکلیتی می‌باشد. این مشاهدات اولیه، اهمیت مطالعه این زینولیت‌ها را دوچندان می‌نماید.

اهداف این پژوهش عبارتند از:

۱. توصیف پتروگرافی و بافت‌شناسی زینولیت‌های ارتوگنیس و ارتوآمفیبولیت در گرانیتوئیدهای خواجه‌مراد با تأکید ویژه بر کانی تیتانیت، ۲. استفاده از شواهد کانی‌شناختی، به ویژه شواهد مرتبط با تیتانیت، برای تعیین خاستگاه آذرین (ارتو) این زینولیت‌ها و تمایز آنها از انواع با منشأ رسوبی (پارا).

موقعیت زمین‌شناسی: زون ساختاری بینالود واقع در شمال شرق ایران و در جنوب خط درز تتیس کهن (آق‌ناباتی، ۱۳۸۳)، باروندی شمال غربی - جنوب شرقی، حد فاصل واحدهای ساختمانی کپه داغ در شمال، ایران مرکزی در جنوب و البرز در غرب محصور شده است (نبویان، ۱۳۵۵). ساختارهای تکتونیکی این منطقه مرتبط با تحولات تکتونیکی کوهزایی سیمیرین و کوهزایی آلپی است (علوی، ۱۹۹۲). مطالعات نشان می‌دهد که این منطقه عمدتاً متشکل از سنگ‌های دگرگونی با سن پالئوزوئیک تا مزوزوئیک است. سنگ‌های غالب منطقه شامل شیستهای سبز، اسلیت، فیلیت و مرمرهای دگرگون شده می‌باشد. همچنین توده‌های نفوذی گرانیتی و دیابازی مربوط به دوران مزوزوئیک در این منطقه رخنمون دارند. سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی با ترکیب حدواسط تا بازیک نیز یافت می‌شود. این منطقه تحت تأثیر چندین فاز دگرگونی قرار گرفته است. همچنین در بخش‌هایی از محدوده، سنگ‌های آذرین بیرونی با ترکیب متوسط تا اسیدی مشاهده می‌شود که با واحدهای دگرگونی درجه کم نیز همراه هستند. مجموعه پگماتیت-آپلیت مورد مطالعه در این پژوهش، در چارچوب همین تحولات زمین‌ساختی و در ارتباط با توده‌های نفوذی مزوزوئیک زون بینالود تشکیل شده است.

خواجه مراد در جنوب شرقی مشهد و در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های بینالود قرار دارد. این منطقه بخشی از کمربند زمین‌شناسی شرق ایران است که به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی و ماگمایی گسترده در طول زمان‌های زمین‌شناسی، از تنوع سنگ‌شناسی و ساختاری بالایی برخوردار است.



شکل ۱. نقشه زمین شناسی محدوده خواجه مراد در جنوب خاوری مشهد و موقعیت گرانیتوئیدهای مورد مطالعه (برگرفته از (Samadi et al (2014).

سنگ‌های آذرین: گرانیتوئیدها : توده‌های گرانیتوئیدی خواجه مراد از مهم‌ترین سنگ‌های آذرین منطقه هستند. این گرانیتوئیدها معمولاً از نوع S-type یا I-type هستند و نشان دهنده فرآیندهای ماگمایی مرتبط با فروران‌ش یا برخورد قاره‌ای هستند. انکلاوهای مافیک: درون گرانیتوئیدها، انکلاوهای مافیک به‌وفور یافت می‌شوند که نشان دهنده اختلاط ماگمایی بین ماگماهای اسیدی و مافیک و یا قطعات بیگانه سنگ گرانیتوئیدهای قدیمی‌تر و شیست‌ها و گنیس‌های منطقه هستند. سنگ‌های دگرگونی: در منطقه خواجه مراد، سنگ‌های دگرگونی مانند شیست، گنیس و آمفیبولیت به‌صورت پراکنده دیده می‌شوند. این سنگ‌ها معمولاً مربوط به

سازندهای زمین‌شناسی قدیمی‌تر از گرانیتوئیدها هستند و حاصل فرآیندهای دگرگونی ناحیه‌ای می‌باشند. سنگ‌های رسوبی: سنگ‌های رسوبی مانند ماسه‌سنگ، شیل و سنگ‌آهک نیز در منطقه یافت می‌شوند. این سنگ‌ها معمولاً مربوط به دوره‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک هستند.

پتروگرافی: در این مطالعه، تعداد ۴۳ مقطع میکروسکوپی نازک از سنگهای منطقه خواجه مراد (مشهد) تهیه و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مورد بررسی قرار گرفت. سنگ‌های مورد مطالعه شامل واحدهای میزبان (لوکوگرانیت و آپلیت و گارنت-تورمالین آپلیت) و انکلاوهای متنوع درون آنها (گرانودیوریت، مونزوگرانیت، کوارتز دیوریت، میکروکوارتز مونزودیوریت و ارتوگنیس) می‌باشند.

سنگ‌های میزبان: لوکوگرانیت: بافت گرانولار انهدرال با دانه‌بندی متوسط تا درشت. کانی‌شناسی اصلی شامل کوارتز، ارتوکلاز، پلاژیوکلاز (با زونینگ نوسانی) مسکوویت و مقدار کم بیوتیت است. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، اسفن و تیتانیت. بافت‌های پرتیت، پریکلین و میرمکیتی دیده می‌شود. نشانه‌های دگرسانی شامل سریسیتی شدن پلاژیوکلاز و کلریتی شدن جزئی بیوتیت است. بافت، حاکی از سرد شدن آهسته در اعماق است.

آپلیت: دارای بافت آپلیتی ریزدانه‌تر از لوکوگرانیت. ترکیب کانی‌شناسی مشابه اما با دانه‌بندی ریز تا متوسط. بافت گرانولار فشرده نشان‌دهنده تبلور نسبتاً سریع‌تر است. کانی‌های فرعی مشابه (آپاتیت، اسفن، تیتانیت) به مقدار کم حضور دارند. دگرسانی سریسیتی رایج است.

گارنت-تورمالین آپلیت: بافت آپلیتی با ترکیب اصلی کوارتز و فلدسپات. ویژگی متمایز، حضور گارنت (ایزومتریک، بیرنگ تا صورتی) و تورمالین (منشوری، با پلئوکروئیسم قوی) به عنوان کانی‌های فرعی است که نشان‌دهنده غنی‌شدگی ماگما از Al و B و احتمالاً تأثیر سیالات غنی از عناصر نادر می‌باشد.

انکلاوها:

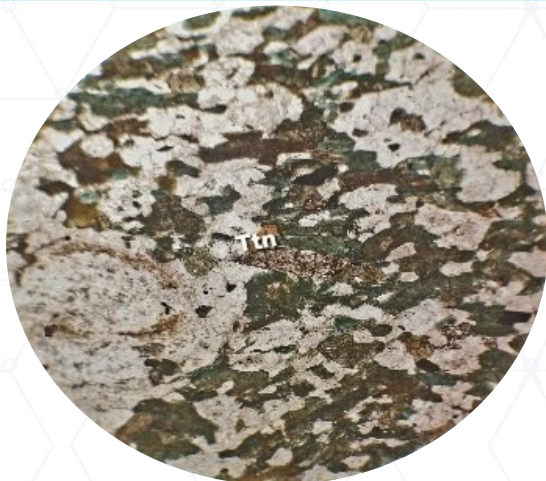
گرانودیوریت: بافت گرانولار سابه‌درال تا انهدرال با دانه‌بندی متوسط. کانی‌های اصلی: پلاژیوکلاز (اغلب با زونینگ نوسانی)، کوارتز، بیوتیت (فراوان‌تر از سنگ میزبان) و ارتوکلاز. دارای بافت‌های میرمکتی، پرتیت و گاهی پوئیکیلیتیک. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، اسفن و تیتانیت هستند. دگرسانی سریسیتی مشاهده شده است.

ارتوگنیس: دارای بافت لپیدونماتوبلاستیک/گرانوبلاستیک و شامل پلاژیوکلاز، کوارتز (گاهی با بافت ریبون)، بیوتیت و ارتوکلاز است. بیوتیت‌ها جهت‌دار و موازی، ایجادکننده فولیاسیون ضعیف تا متوسط. حضور پورفایروکلاست‌های فلدسپات در ماتریکس ریزدانه نشان‌دهنده دگرشکلی و باز تبلور ناکامل. کانی‌های فرعی: آپاتیت، اسفن و تیتانیت. دگرسانی شامل سریسیتی شدن فلدسپات و کلریتی شدن بیوتیت. این زینولیت‌ها قطعاتی از سنگ‌های دگرگونی قدیمی پوسته هستند که توسط ماگمای میزبان حمل شده‌اند.

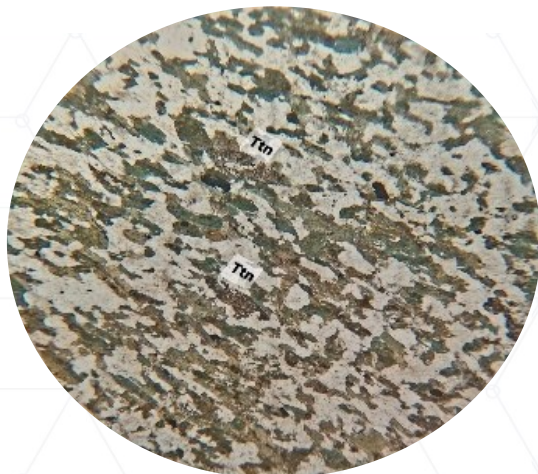
ارتوآمفیبولیت: دارای بافت گرانولار تا گرانونماتوبلاستیک با کانی‌شناسی اصلی هورنبلند و پلاژیوکلاز، اغلب همراه با کوارتز و بیوتیت. ویژگی کلیدی، فراوانی غیرمعمول کانی تیتانیت به عنوان یک کانی اصلی است که به صورت بلورهای مشخصی حضور دارد. جهت‌یافتگی هورنبلندها و امکان وجود بافت پوئیکیلیتی در تیتانیت دیده می‌شود. این مجموعه کانی‌شناختی و به‌ویژه غنای تیتانیت، شاهد قاطعی بر منشأ آذرین اولیه (ارتو) این سنگ بوده و آن را از انواع با منشأ رسوبی (پارا) متمایز می‌کند. این انکلاوها نیز به عنوان زینولیت‌های دگرگونی پوسته زیرین تفسیر می‌شوند.

بحث: وجود زینولیت‌های ارتوگنیس و ارتوآمفیبولیت با فراوانی کانی

تیتانیت در گرانیتوئیدهای منطقه خواجه‌مراد، پیامدهای پتروژنزی و دینامیک ماگمایی مهمی را مطرح می‌سازد. این بخش، یافته‌های پتروگرافی را در چارچوب منشأ و تحول این زینولیت‌ها و رابطه‌شان با توده میزبان تفسیر می‌کند.

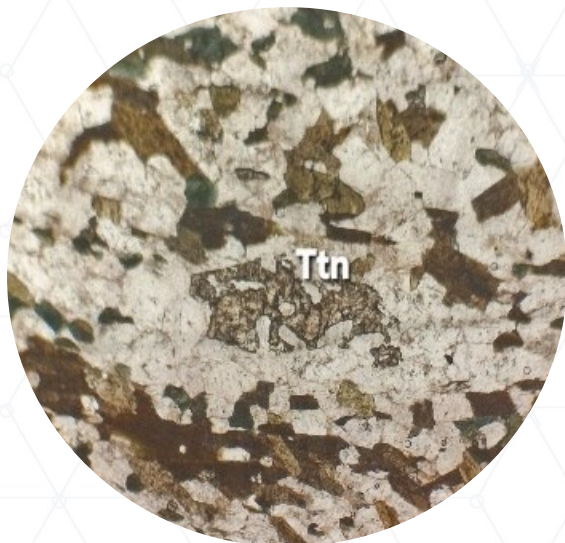


شکل ۲. مقطع میکروسکوپی از یک ارتوگنیس دارای کانی تیتانیت.



شکل ۳. مقطع میکروسکوپی از یک ارتوآمفیبولیت دارای کانی‌های تیتانیت که جهت‌یافتگی موازی دارند.

خاستگاه آذرین زینولیت ها: (شواهد کانی شناختی): مهم‌ترین شاهد برای منشأ آذرین (ارتو) این زینولیت‌ها، فراوانی غیرمعمول کانی تیتانیت است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، تیتانیت در سنگ‌های دگرگونی با پروتولیت (سنگ مادر) رسوبی (پارا) معمولاً غایب یا بسیار نادر است، زیرا سیستم‌های رسوبی اولیه فقیر از تیتانیوم می‌باشند. در مقابل، سنگ‌های آذرین بازیک تا حدواسط (مانند بازالت‌ها، گابروها و دیوریت‌ها) که پروتولیت احتمالی ارتوآمفیبولیت‌ها و ارتوگنیس‌های این مطالعه هستند، غنی از تیتانیوم بوده و شرایط مناسب برای تشکیل تیتانیت را در طی فرآیند دگرگونی فراهم می‌کنند. حضور تیتانیت به عنوان یک کانی اصلی، همراه با مجموعه کانی‌شناختی متشکل از پلاژیوکلاز + کوارتز + هورنبلند + بیوتیت، به شدت



شکل ۴. مقطع میکروسکوپی از یک ارتوگنیس دارای کانی تیتانیت که دارای بافت پوئیکلیتیکی است.

از یک منشأ اولیه آذرین برای این سنگ‌ها حمایت می‌کند. علاوه بر این، جهت‌یافتگی ترجیحی مشترک تیتانیت با بیوتیت و هورنبلند، حاکی از رشد یا بازبلوری همزمان این کانی‌ها تحت تأثیر تنش جهت‌دار (فولیاسیون) در طی یک رویداد دگرگونی ناحیه‌ای است که سنگ‌های آذرین اولیه را به ارتوگنیس و ارتوآمفیبولیت تبدیل کرده است.

اهمیت بافت پوئیکلیتیکی در تیتانیت: مشاهده بافت پوئیکلیتیکی در بلورهای تیتانیت، که در آن بلورهای ریز پلاژیوکلاز یا کوارتز به صورت میانبار درون تیتانیت محصور شده‌اند، از نکات قابل توجه این مطالعه است. این بافت عموماً نشان‌دهنده رشد بلور میزبان (تیتانیت) در شرایطی است که بلورهای مهمان (مثلاً پلاژیوکلاز) از پیش موجود بوده و توسط رشد پیشرونده تیتانیت محاط شده‌اند. این امر می‌تواند دو تفسیر اصلی داشته باشد: ۱) رشد تیتانیت در طول مرحله دگرگونی اصلی (پیک متامورفیزم) در شرایطی که سنگ هنوز دارای بخشی ذوب‌نشده یا مذاب بین‌دانه‌ای بوده است، یا ۲) رشد تیتانیت در طی یک مرحله متاسوماتیک دیررس ناشی از عبور سیالات غنی از Ca و

Ti از سنگ. با توجه به هم‌زمانی جهت‌یافتگی تیتانیت با فولیاسیون اصلی سنگ، سناریوی اول محتمل‌تر به نظر می‌رسد. این مشاهدات نشان می‌دهد که تیتانیت یک فاز دگرگونی پایدار در پیک دگرگونی این سنگ‌ها بوده است.

جایگاه تکتونیکی و مدل پتروژنزی: با در نظر گرفتن موقعیت منطقه خواجه‌مراد در کمربند آتشفشانی-آذرین پهنه ایران مرکزی، حضور این زینولیت‌های دگرگونی قدیمی در یک توده گرانیتوئیدی جوان‌تر، گویای یک تاریخچه پوسته‌ای پیچیده است. یک مدل پتروژنزی سازگار با این مشاهدات می‌تواند به شرح زیر باشد:

تشکیل پروتولیت آذرین: در یک مرحله تکتونیکی قدیمی‌تر، سنگ‌های آذرین بازیک تا حدواسط در پوسته زیرین منطقه تبلور یافتند.

دگرگونی ناحیه‌ای: این سنگ‌های آذرین در طی یک رویداد کوه‌زایی تحت شرایط دگرگونی آمفیبولیت قرار گرفته و به ارتوآمفیبولیت و با افزایش درجه دگرشکلی و بازبلوری، به ارتوگنیس تبدیل شدند. در طی این دگرگونی، تیتانیت به عنوان یک فاز پایدار اصلی از بازپخت پروتولیت غنی از Ti متبلور شد.

گیرافتادن به عنوان زینولیت: در دوره‌ای جوان‌تر، ماگمای گرانیتوئیدی حین صعود از پوسته، این سنگ‌های دگرگونی قدیمی را از دیواره‌های مسیر خود جدا کرده و به صورت زینولیت با خود به سطوح بالا آورده است. حفظ بافت‌های دگرگونی در

زینولیت‌ها نشان می‌دهد زمان توقف آنها در ماگمای داغ میزبان کوتاه بوده یا اختلاف دمای زیادی بین زینولیت‌های سرد و ماگمای میزبان وجود نداشته است تا باعث همجوشی یا دگرگونی مجدد گسترده شود.

نتیجه‌گیری:

زینولیت‌های مورد مطالعه از نوع ارتوگنیس و ارتوآمفیبولیت بوده و مجموعه کانی‌شناختی اصلی آن‌ها شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند، بیوتیت و تیتانیت می‌باشد. فراوانی غیرمعمول کانی تیتانیت، که در این زینولیت‌ها به عنوان یک کانی اصلی ظاهر شده است، قوی‌ترین شاهد کانی‌شناختی برای تعیین منشأ آذرین (ارتو) این سنگ‌ها محسوب می‌شود. این امر با فقر تیتانیت در سنگ‌های دگرگونی با پروتولیت رسوبی (پارا) در تضاد است. تیتانیت در این سنگ‌ها دارای جهت‌یافتگی ترجیحی هم‌راستا با فولیاسیون سنگ است و بافت پوئیکلیتی نیز در آن مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که این کانی در طی رویداد متامورفیزم ناحیه‌ای و تحت تأثیر تنش جهت‌دار رشد یا بازبلوری یافته است. بر اساس شواهد فوق، یک مدل پتروژنزی ارائه گردید که بر اساس آن، پروتولیت این زینولیت‌ها سنگ‌های آذرین قدیمی (بازیک تا حدواسط) هستند که در طی یک رویداد کوه‌زایی قدیمی‌تر تحت دگرگونی رخساره آمفیبولیت قرار گرفته و متحول شده‌اند. در مرحله‌ای جوان‌تر، این سنگ‌های دگرگونی به صورت قطعات جامد (زینولیت) توسط ماگمای گرانیتوئیدی جدا شده و به سطوح بالاتر پوسته حمل شده‌اند. این مطالعه بر کارایی تیتانیت به عنوان یک شاخص پترولوژیک کلیدی در تمایز سنگ‌های دگرگونی با خاستگاه آذرین از رسوبی تأکید می‌نماید.

پیشنهاد برای مطالعات آینده:

۱. آنالیزهای ژئوشیمیایی سنگ کل و میکروپروب کانی‌ها (به ویژه تیتانیت) و سن سنجی ایزوتوپی (مثلاً U-Pb روی تیتانیت یا زیرکن) برای تعیین سن دقیق رویداد دگرگونی و مقایسه آن با سن توده گرانیتوئیدی میزبان.
۲. مطالعه دقیق‌تر روابط فاز و شیمی تیتانیت برای بازسازی فوگاسیته اکسیژن و فعالیت سیال در طی دگرگونی.

مراجع:

- الف- یک نظر، م، رحیمی، ب، قائمی، ف (۲۰۱۴) تحلیل شکستگی‌های سیستماتیک در گرانیت خواجه مراد، سی و دومین گرد همایی و نخستین کنگره بین‌المللی علوم زمین
- ب- خسروی چنار، ع، حسین زاده، س، ر، فتاحی، م، خانه باد، م (۱۳۹۸) ژئوشیمی نهشته‌های کوارترنری رودخانه کال شور بینالود، پژوهش‌های دانش زمین، سال دهم، شماره (۳۷)، صفحات (۳۹-۴۹)
- پ- صمدی، ر، شیردشت زاده، ن، کلاواتا، ه (۱۳۹۴) سنگ نگاری و خاستگاه دایک‌های آپلیت - پگماتیت و گرانیتوئید خواجه مراد (جنوب خاوری مشهد، ایران)، علوم زمین، سال بیست و پنجم، شماره (۹۷)، صفحات (۴۹-۶۰)
- ت- سعادت، م، سپاهی، ع، سپیدبر، ف (۱۴۰۴) مطالعه انکلاوهای مجموعه پگماتیت-آپلیت منطقه خواجه مراد (مشهد) و تنوع بافتی آنها، هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران
- ث- Hashemi, S, M, Samadi, R, (2017) Petrology and geochemistry of pegmatite dikes in the Grizmi and Khajeh Morad granitoids (south of Mashhad, northeastern Iran), Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie – Abhandlungen, Volume 284, Issue 1, Pages 1-14
- ج- Samadi, R, Miller, N, R, Mirnejad, H, Harris, Ch, Kawabata, H, Shirdashtzadeh, N, (2014) Origin of garnet in aplite and pegmatite from Khajeh Morad in northeastern Iran: A major, trace element, and oxygen isotope approach, Lithos, Volumes 208-209, Issue 11, Pages 378-392
- چ- Karimpour, M, H, Stern, C, R, Farmer, G, L (2010) Zircon U-Pb geochronology, Sr-Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran, Asian Earth Sciences, Volume 37, Issue 4, Pages 384-393
- ح- Mirnejad, H, Lalonde, A, E, Obeidi, M, Hassanzadeh, J (2013) Geochemistry and petrogenesis of Mashhad granitoids: An insight into the geodynamic history of the Paleo-Tethys in northeast of Iran, Lithos, Volumes 170-171, Issue 6, Pages 105-116
- خ- Mobasheri, M, Arndt, N, Cordier, C, Sobolev, A, Ghasemi, H, Marchesi, C, Sabzehei, M, Garrido, C (2025) Petrogenesis and geochemistry of upper Paleozoic Komatiites (Mashhad, NE Iran), Petrology, Volume 66, Issue 1, ega131

تحلیل بلور شناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی در کانسار اپی ترمال فلدسپات (شمال غرب سطوه) با شواهد هیپوژن و سوپرژن بر اساس مطالعات مقاطع صیقلی

عباس رحمانی^۱، فرج‌الله فردوست

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود Abbas137901@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

کانسارهای اپی ترمال به دلیل تنوع کانی‌شناسی و پیچیدگی فرآیندهای کانه‌زایی، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی و اکتشافی برخوردارند. در این پژوهش، ویژگی‌های بلورشناسی، کانی‌شناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی در کانسار اپی ترمال فلدسپات واقع در شمال غرب سطوه، در جنوب نوار آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه شیرین با هدف تفکیک فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های مورد مطالعه شامل مجموعه‌ای از نمونه‌های سطحی و نمونه‌های برداشت‌شده از گمانه‌های اکتشافی بوده که هر دو زون هیپوژن و سوپرژن را پوشش می‌دهند. به منظور انجام مطالعات، ۲۰ مقطع صیقلی و نازک-صیقلی تهیه شد که از میان آن‌ها ۸ نمونه شاخص برای بررسی‌های تفصیلی انتخاب گردید. مطالعات میکروسکوپی و آنالیزهای شیمیایی (ICP-OES, XRD) نشان‌دهنده حضور کانی‌های سولفیدی و ثانویه‌ای نظیر پیریت، کالکوپیریت، گالن، کالکوسیت، کولین، مالاکیت، گوتیت و هماتیت است. بافت‌های متنوعی شامل رگه-رگچه‌ای، دیسپیمینه، نواری سولفیدی-سیلیسی، پرشدگی فضا‌های خالی (سیمان‌شدگی) و بافت‌های برشی در نمونه‌ها مشاهده شد که بیانگر کانه‌زایی چندمرحله‌ای در منطقه می‌باشد. پیریت‌های خودشکل مکعبی که گالن را قطع می‌کنند، همراه با کالکوپیریت اولیه، معرف مرحله هیپوژن کانه‌زایی هستند که همزمان با دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیکی در سنگ‌های میزبان ریولیتی تا ریوداسیتی و سندی توف تشکیل شده‌اند. در مقابل، حضور کالکوسیت، کولین تیغه‌ای، رگه-رگچه‌های مالاکیت و پرشدگی شکستگی‌ها توسط گوتیت و هماتیت، شواهد روشنی از فرآیندهای سوپرژن و غنی‌شدگی ثانویه مس را ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: اپی ترمال، پیریت، کالکوپیریت، گالن، سوپرژن، هیپوژن

Crystallographic and Textural Analysis of Sulfide Minerals in the Feldspat Epithermal Deposit (Northwest of Satveh) Based on Polished Section Studies with Evidence of Hypogene and Supergene Processes

Abbas Rahmani¹; Farajollah Fardoost²

¹ M.Sc Student in Economic Geology, Shahrood University of Technology, Abbas137901@gmail.com

² Ph.D in Economic Geology-Geochemistry, Moscow State University, Associate Professor, Faculty of Earth Science, Shahrood University of Technology

Abstract

Epithermal deposits are of particular importance in economic geology and mineral exploration studies due to their mineralogical diversity and the complexity of ore-forming processes. In this study, the crystallographic, mineralogical, and textural characteristics of sulfide minerals in the Feldspat epithermal deposit, located northwest of Sotveh in the southern part of the Torud-Chah Shirin volcanic-sedimentary belt, were investigated with the aim of distinguishing hypogene and supergene processes. The studied samples include a combination of surface samples and drill core samples, covering both hypogene and supergene mineralization zones. For this purpose, a total of 20 polished and polished thin sections were prepared, from which eight representative samples were

selected for detailed investigations. Microscopic studies and geochemical analyses (ICP-OES and XRD) indicate the presence of sulfide and secondary minerals including pyrite, chalcopyrite, galena, chalcocite, covellite, malachite, goethite, and hematite. Various ore textures such as vein-veinlet, disseminated, sulfide-siliceous banded, open-space filling (cementation), and brecciated textures were identified, reflecting a multistage mineralization history in the study area. Euhedral cubic pyrite crystals cutting galena, together with primary chalcopyrite, represent the hypogene stage of mineralization, which formed contemporaneously with silicic and argillic alterations within rhyolitic to rhyodacitic and sandy tuff host rocks. In contrast, the occurrence of chalcocite, bladed covellite, malachite veinlets, and the infilling of fractures by goethite and hematite provide clear evidence for supergene processes and secondary copper enrichment.

Keywords: Epithermal, Pyrite, Chalcopyrite, Galena, supergene, hypogene

۱- مقدمه

کانسارهای اپی‌ترمال یکی از مهم‌ترین انواع کانسارهای فلزی به‌ویژه از نظر تمرکز عناصر طلا، مس، سرب، روی و فلزات گران‌بها محسوب می‌شوند و به دلیل ارتباط مستقیم با فعالیت‌های هیدروترمال کم‌عمق، از پیچیدگی‌های کانی‌شناسی و بلورشناسی قابل توجهی برخوردارند (White and Hedenquist, 1995; Corbet and Leach, 1997). در این کانسارها، تغییرات فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌دار در طی مراحل مختلف زمین‌زایی، منجر به تشکیل مجموعه‌ای متنوع از کانی‌های سولفیدی شده و فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن نقش اساسی در تکامل کانه‌زایی ایفا می‌کنند. مطالعات بلورشناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای بازسازی توالی تبلور، تشخیص نسل‌های مختلف کانی‌سازی و تفکیک فرآیندهای اولیه (هیپوژن) از دگرسانی‌ها و کانه‌زایی‌های ثانویه (سوپرژن) به شمار می‌رود (Craig and Vaughan, 1994). بررسی روابط پاراژنتیکی، بافت‌های جانشینی، روابط برشی و ویژگی‌های نوری کانی‌ها در مقاطع صیقلی، اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط تشکیل کانسار و تحولات پس از آن فراهم می‌سازد (Barton and Bethke, 1987). افزون بر این، به‌کارگیری آنالیزهای شیمیایی می‌تواند در تفسیر دقیق‌تر منشأ کانی‌ها و روندهای دگرسانی و سوپرژن مؤثر واقع شود (Reed, 1997). کانسار اپی‌ترمال فلدسپات واقع در شمال غرب سطوه، در استان سمنان و در جنوب نوار آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه‌شیرین در شمال ایران مرکزی (آق‌آبانی، ۱۳۸۳، علوی ۱۳۷۵) با حضور کانی‌های سولفیدی متنوعی نظیر پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت و گالن، نمونه‌ای مناسب برای مطالعه همزمان فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن به شمار می‌رود. با وجود اهمیت این کانسار، تاکنون مطالعات جامعی با تمرکز بر ویژگی‌های بلورشناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی و ارتباط آن‌ها با مراحل مختلف کانه‌زایی در این منطقه انجام نشده است. هدف از این پژوهش، تحلیل بلورشناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی در کانسار اپی‌ترمال فلدسپات بر اساس مطالعات مقاطع صیقلی و آنالیزهای شیمیایی، به‌منظور شناسایی توالی پاراژنتیکی و تفکیک شواهد هیپوژن و سوپرژن است. نتایج این مطالعه می‌تواند علاوه بر افزایش شناخت زمین‌شناسی کانسار، در تفسیر فرآیندهای کانه‌زایی و کاربردهای اکتشافی در کانسارهای اپی‌ترمال مشابه مؤثر واقع شود.

۲- مواد و روش‌ها

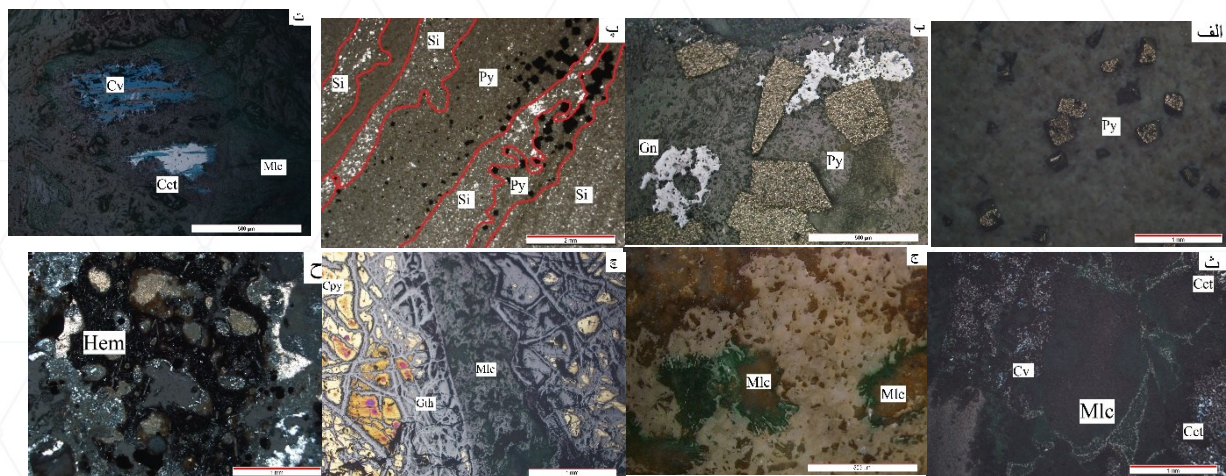
در این پژوهش، نمونه‌های مورد مطالعه به‌صورت ترکیبی از نمونه‌های سطحی و نمونه‌های برداشت‌شده از گمانه‌های اکتشافی در کانسار اپی‌ترمال فلدسپات (شمال غرب سطوه) جمع‌آوری شدند. نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انجام شد که هر دو زون کانه‌زایی هیپوژن و سوپرژن به‌خوبی پوشش داده شود. مجموعه نمونه‌ها شامل کانی‌های سولفیدی و اکسیدی متنوعی از جمله کالکوسیت، کولین، مالاکیت، گوتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت و گالن است که نشان‌دهنده چندمرحله‌ای بودن فرآیندهای کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به‌منظور انجام مطالعات کانی‌شناسی، بلورشناسی و بافتی، در مجموع ۲۰ مقطع شامل مقاطع

صیقلی کانه‌ای و مقاطع نازک-صیقلی از نمونه‌های منتخب تهیه شد. از میان این مجموعه، ۸ نمونه (GFA-08-1, GFA-08-۲, BHF2-79-1, BHF4-189-1, BHF8-1, BHF14-22-1, BHF14-22-3, GFA-01) شاخص بر اساس تنوع کانی‌شناسی، موقعیت در زون‌های مختلف کانه‌زایی و کیفیت بافت‌های بلوری برای مطالعات تفصیلی انتخاب گردیدند. مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع صیقلی با استفاده از میکروسکوپ نور بازتابی انجام شد و ویژگی‌های نوری، شکل بلورها، اندازه دانه‌ها و روابط فضایی کانی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در مقاطع نازک-صیقلی نیز علاوه بر بررسی کانی‌های سولفیدی، ارتباط آن‌ها با کانی‌های اکسیدی و سنگ میزبان مورد توجه قرار گرفت. شناسایی کانی‌ها و تشخیص نسل‌های مختلف کانه‌زایی بر اساس ویژگی‌های نوری، بافتی، روابط برشی و شواهد جانشینی صورت پذیرفت. به‌منظور تکمیل مطالعات میکروسکوپی و تأیید نتایج کانی‌شناسی، آنالیزهای شیمیایی بر روی نمونه‌های منتخب انجام شد. داده‌های حاصل از این آنالیزها در کنار شواهد بافتی و بلورشناسی، برای تفکیک فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن و تفسیر توالی پاراژنتیکی کانی‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

۳- بحث

بررسی بلورشناسی، بافتی و روابط پاراژنتیکی کانی‌های سولفیدی در کانسار اپی‌ترمال فلدسپات نشان‌دهنده کانه‌زایی چندمرحله‌ای و تأثیر هم‌زمان فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن است. حضور بافت‌های متنوعی نظیر رگه-رگچه‌ای، دیسیمینه، نواری سولفیدی-سیلیسی، پرشدگی فضاهای خالی (سیمان‌شدگی) و بافت‌های برشی، بیانگر نقش ساختارهای تکتونیکی و مسیرهای نفوذ سیالات هیدروترمال در کنترل کانه‌زایی منطقه می‌باشد. چنین مجموعه‌ای از بافت‌ها به‌طور گسترده در کانسارهای اپی‌ترمال گزارش شده و معرف رسوب‌گذاری کانی‌ها در اعماق کم و تحت نوسانات فشار-دما است (White & Hedenquist, 1995; Corbett & Leach, 1997). وجود پیریت‌های خودشکل با بلورهای مکعبی و بافت دیسیمینه در سنگ میزبان، که شامل ریولیت تا ریوداسیت‌های سیلیسی‌شده و واحدهای سندی‌توف می‌باشد، نشان‌دهنده مرحله اولیه کانه‌زایی هیپوژن است. این پیریت‌ها احتمالاً هم‌زمان با دگرسانی سیلیسی و ارژیلیکی و در اثر گردش سیالات هیدروترمال اسیدی تا خنثی تشکیل شده‌اند. شکل‌دار بودن بلورها و عدم شواهد جانشینی گسترده در این مرحله، مؤید تبلور اولیه در شرایط نسبتاً پایدار فیزیکوشیمیایی سیال است (Craig & Vaughan, 1994). وجود پیریت‌های خودشکل با بلورهای مکعبی که به‌طور واضح کانی گالن را قطع می‌کنند، نشان‌دهنده تبلور پیریت در مرحله‌ای دیرتر نسبت به گالن است و احتمالاً در ادامه تکامل سامانه هیپوژن است. این رابطه برشی بیانگر چندمرحله‌ای بودن کانه‌زایی هیپوژن بوده و نشان می‌دهد که پس از رسوب اولیه گالن، شرایط فیزیکوشیمیایی سیال هیدروترمال دچار تغییر شده و زمینه برای تبلور مجدد پیریت فراهم شده است. شکل‌دار بودن بلورهای پیریت و رشد آن‌ها در امتداد شکستگی‌ها و فضاهای خالی، مؤید تبلور در مرحله‌ای متأخرتر و تحت شرایط نسبتاً پایدارتر نسبت به مرحله تشکیل گالن می‌باشد (Craig & Vaughan, 1994; Corbett & Leach, 1997). این توالی پاراژنتیکی که در آن پیریت متأخرتر از گالن تشکیل شده است، در برخی از سامانه‌های اپی‌ترمال گزارش شده و معمولاً با تغییر ترکیب شیمیایی سیالات، افزایش نسبت گوگرد و نوسانات شرایط اکسایش-کاهش همراه است (Hedenquist et al., 2000). چنین شواهدی نقش مهم مطالعات بلورشناسی و روابط برشی را در بازسازی تاریخچه کانه‌زایی کانسارهای اپی‌ترمال برجسته می‌سازد. شواهد قوی سوپرژن در کانسار مورد مطالعه شامل حضور کالکوسیت، کولین تیغه‌ای درون کالکوسیت، رگه-رگچه‌های مالاکیت و پرشدگی فضاهای بین کالکوپیریت‌های برشی توسط گوتیت است. بافت تیغه‌ای کولین در کالکوسیت و جانشینی کانی‌های اولیه مس‌دار، نشان‌دهنده شرایط اکسیدان و غنی از آب‌های سطحی در مرحله سوپرژن می‌باشد. چنین بافت‌هایی معمولاً در زون‌های اکسیداسیون و غنی‌شدگی ثانویه کانسارهای اپی‌ترمال گزارش شده و معرف بازتوزیع مس در اثر نفوذ آب‌های جوی است (Sillitoe, 2005; Reich et al., 2013). پرشدگی فضاهای خالی و شکستگی‌ها توسط گوتیت و هماتیت، همراه با دگرسانی هماتیتی و کربناتی، بیانگر نقش فرآیندهای پس‌رسوبی و اکسیداسیون شدید در بخش‌های بالایی کانسار است. این ویژگی‌ها، در کنار دگرسانی ارژیلیکی و سیلیسی گسترده، با الگوی کلاسیک کانسارهای اپی‌ترمال سازگار بوده و نشان می‌دهد که سیالات

هیدروترمال اولیه پس از صعود و سرد شدن، تحت تأثیر شرایط سطحی دچار تغییرات شیمیایی قابل توجهی شده‌اند (Hedenquist et al., 2000). در مجموع، ترکیب شواهد بلورشناسی، بافتی و پاراژنتیکی نشان می‌دهد که کانسار اپی‌ترمال فلدسپات حاصل برهم‌کنش یک سامانه هیپوژن اولیه، کنترل شده توسط ساختارها و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی، و یک مرحله سوپرژن متأخر است که منجر به غنی‌شدگی ثانویه مس و تشکیل کانی‌های اکسیدی و کربناتی شده است. این نتایج اهمیت مطالعات بلورشناسی و کانی‌شناسی دقیق را در تفسیر فرآیندهای کانه‌زایی و کاربردهای اکتشافی در کانسارهای اپی‌ترمال مشابه نشان می‌دهد. تفکیک زون‌های هیپوژن و سوپرژن در کانسار اپی‌ترمال فلدسپات بر اساس مجموعه‌ای از شواهد بلورشناسی، بافتی و کانی‌شناسی انجام شد. زون هیپوژن عمدتاً با حضور پیریت‌های خودشکل مکعبی و گالن، همراه با بافت‌های دیسیمین، نواری سولفیدی-سیلیسی و رگه‌ای مشخص می‌شود که بیانگر تبلور کانی‌ها از سیالات هیدروترمال اولیه در شرایط دمایی و فشاری بالاتر است. این کانی‌ها اغلب در ارتباط مستقیم با سنگ‌های میزبان ریولیتی تا ریوداسیتی سیلیسی شده و دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیکی تشکیل شده‌اند که ویژگی‌های شاخص سامانه‌های اپی‌ترمال هیپوژن محسوب می‌شوند (White & Hedenquist, 1995; Hedenquist et al., 2000). در مقابل، زون سوپرژن با حضور کانی‌های ثانویه نظیر کالکوسیت، کولین تیغه‌ای، مالاکیت، گوتیت و هماتیت، به همراه بافت‌های جانشینی، پرشدگی شکستگی‌ها و سیمان‌شدگی فضاهای خالی شناخته می‌شود. جانشینی کانی‌های اولیه مس‌دار توسط کالکوسیت و تشکیل رگه-رگچه‌های مالاکیت، نشان‌دهنده نفوذ آب‌های سطحی اکسیدان و غنی‌شدگی از CO_2 در بخش‌های بالایی کانسار است. همچنین پرشدگی فضاهای بین کالکوپیریت‌های برشی توسط گوتیت و توسعه دگرسانی هماتیتی و کربناتی، مؤید شدت فرآیندهای اکسیداسیون و غنی‌شدگی ثانویه در زون سوپرژن می‌باشد. این مجموعه شواهد با الگوهای کلاسیک تفکیک زون‌های سوپرژن و هیپوژن در کانسارهای اپی‌ترمال مشاهده گردیده است (Sillitoe, 2005; Reich et al., 2013).



شکل ۱- الف) بلورهای پیریت (Py) و بافت دیسیمین (BHF14-22-1) (ب) قطع شدن گالن (Gn) توسط پیریت (BHF4-189) (1) پ) بافت نواری سولفیدی-سیلیسی (Si) (BHF8-1) ت) کالکوسیت (Cct) ثانویه و تیغه‌های کولین (Cv) (GFA-08-1) (ث) رگه-رگچه‌های مالاکیت (Mlc) به همراه کالکوسیت و کولین سوپرژن (BHF2-79-1) (ج) رگچه‌های مالاکیت (BHF14-22-3) (چ) بافت برشی در کالکوپیریت (Cpy) با گوتیت (Gth) (GFA-08-2) (ح) سیمان هماتیتی (Hem) (GFA-01)

۴- نتیجه‌گیری

بررسی‌های بلورشناسی، کانی‌شناسی و بافتی انجام شده بر روی مقاطع صیقلی و نازک-صیقلی کانسار اپی‌ترمال فلدسپات (شمال غرب سطوه) نشان می‌دهد که کانه‌زایی در این منطقه ماهیتی چندمرحله‌ای داشته و حاصل برهم‌کنش فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن است. حضور پیریت‌های خودشکل مکعبی، کالکوپیریت اولیه و گالن، همراه با بافت‌های دیسیمین، نواری

سولفیدی-سیلیسی و رگه‌ای، معرف مرحله هیپوژن کانه‌زایی و تبلور کانی‌ها از سیالات هیدروترمال اولیه در ارتباط با سنگ‌های میزبان ریولیتی تا ریوداسیتی سیلیسی‌شده و سندی‌توف می‌باشد. در مقابل، توسعه کانی‌های ثانویه‌ای نظیر کالکوسیت، کولین تیغه‌ای، مالاکیت، گوتیت و هماتیت، به همراه بافت‌های جانشینی، پرشدگی شکستگی‌ها و سیمان‌شدگی فضاهای خالی، شواهد روشنی از فعالیت فرآیندهای سوپرژن و غنی‌شدگی ثانویه عناصر فلزی به‌ویژه مس را ارائه می‌دهد. روابط برشی میان کانی‌ها، به‌ویژه قطع‌شدن گالن توسط پیریت و پرشدگی فضاهای بین کالکوپیریت‌های برشی توسط گوتیت، نقش مهم ساختارها و شکستگی‌ها را در کنترل مسیر حرکت سیالات و تمرکز کانی‌سازی نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که مطالعات دقیق بلورشناسی و بافتی، در کنار آنالیزهای شیمیایی، ابزاری کارآمد برای بازسازی توالی پاراژنتیکی و تفکیک زون‌های هیپوژن و سوپرژن در کانسارهای اپی‌ترمال است. یافته‌های حاصل می‌تواند به‌عنوان مبنایی مناسب برای تفسیر فرآیندهای کانه‌زایی و برنامه‌ریزی‌های اکتشافی در کانسارهای اپی‌ترمال مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

۵- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت زرکاوان کیان به‌دلیل حمایت‌های فنی و فراهم‌سازی شرایط مناسب جهت انجام مطالعات میدانی و نمونه‌برداری صمیمانه قدردانی نمایند. همچنین از افراد و کارشناسان محترم معدن گندی که با همکاری و راهنمایی‌های ارزشمند خود در مراحل مختلف برداشت نمونه‌ها و بازدیدهای صحرایی نقش مؤثری ایفا کردند، کمال تشکر و امتنان به‌عمل می‌آید.

۶- مراجع

- آقاباتی، س.ع، 1383. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- علوی، م.، ۱۳۷۵. تکتونیک ایران مرکزی و نوارهای ساختاری وابسته. فصلنامه علوم زمین، ۵(۲)، ۲۸-۱.
- Barton, P. B., Bethke, P. M., 1987. Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology. *American Mineralogist*, 72, 451-467.
- Corbett, G. J., & Leach, T. M., 1997. Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization. Society of Economic Geologists Special Publication.
- Craig, J. R., & Vaughan, D. J., 1994. Ore Microscopy and Ore Petrography.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13, 245-277.
- Reich, M., et al., 2013. Supergene enrichment processes in copper deposits. *Economic Geology*, 108, 1471-1488.
- Sillitoe, R. H., 2005. Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. *Economic Geology*, 100, 1649-1661.
- John Wiley & Sons. Reed, M. H., 1997. Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition. *Reviews in Economic Geology*, 10, 303-365
- White, N. C., & Hedenquist, J. W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, 23, 1-13.

بررسی ریزساختارهای بلوری مؤثر بر پدیده لابرادورسنس در کانی لابرادوریت

فاطمه پیربک درویشوند*، رضا ظهیری

*دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

استادیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

چکیده

کانی لابرادوریت یکی از اعضای میانی سری پلاژیوکلازهاست که به دلیل نمایش پدیده نوری شاخصی موسوم به لابرادورسنس، جایگاه ویژه‌ای در کانی‌شناسی نوری و گوهرشناسی دارد. این پدیده به صورت بازی رنگ‌های متنوع در سطح کانی ظاهر می‌شود و برخلاف رنگ‌های ناشی از ناخالصی‌های شیمیایی، منشأ آن به ریزساختارهای بلوری داخلی نسبت داده می‌شود. در این پژوهش، نمونه‌های لابرادوریت با استفاده از آنالیزهای XRD، XRF و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند تا ارتباط میان ساختار بلوری، ترکیب شیمیایی و رفتار نوری نمونه‌ها تبیین شود. نتایج XRD حضور فاز پلاژیوکلاز در محدوده ترکیبی لابرادوریت را تأیید می‌کند. داده‌های XRF نسبت سدیم به کلسیم متناسب با موقعیت لابرادوریت در سری آل‌بیت-آنورتیت را نشان می‌دهد. تصاویر SEM وجود لایه‌های exsolution و ریزساختارهای منظم در مقیاس نانومتری را آشکار می‌سازد که نقش اساسی در ایجاد تداخل نور و بروز پدیده لابرادورسنس دارند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ضخامت، نظم و جهت‌گیری این لایه‌ها عوامل اصلی کنترل‌کننده شدت و طیف رنگ مشاهده‌شده در لابرادوریت هستند.

واژه‌های کلیدی: لابرادوریت؛ لابرادورسنس؛ پلاژیوکلاز؛ ریزساختار بلوری؛ exsolution

Investigation of Crystal Microstructures Affecting the Labradorescence Phenomenon in the Mineral Labradorite

Abstract

Labradorite is a plagioclase feldspar mineral well known for its distinctive optical phenomenon known as labradorescence, characterized by a vivid play of colors on the crystal surface. Unlike coloration caused by chemical impurities, labradorescence originates from internal crystal microstructures. In this study, labradorite samples were investigated using X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), and scanning electron microscopy (SEM) in order to elucidate the relationship between crystal structure, chemical composition, and optical behavior. XRD results confirm the presence of plagioclase feldspar within the compositional range of labradorite. XRF analyses indicate sodium-to-calcium ratios consistent with intermediate members of the albite-anorthite series. SEM observations reveal well-developed nanoscale exsolution lamellae, which play a critical role in light interference and the development of labradorescence. The results demonstrate that the thickness, periodicity, and orientation of these lamellae are the primary factors controlling the intensity and wavelength of the observed colors.

Keywords: Labradorite; Labradorescence; Plagioclase; Crystal microstructure; Exsolution

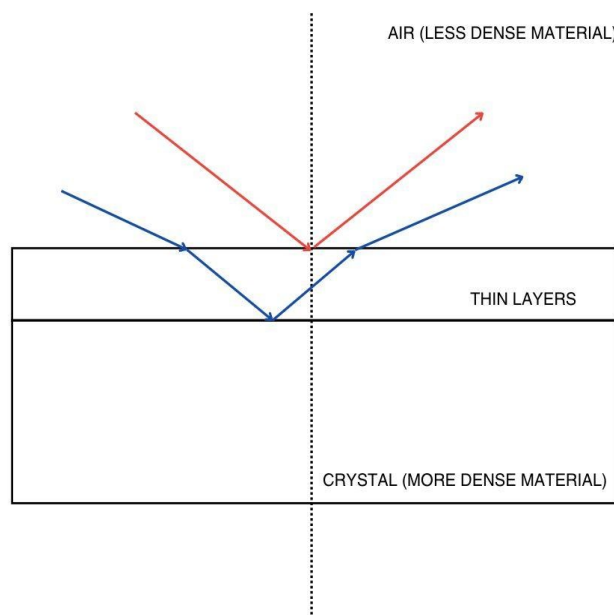
۱. مقدمه

پلاژیوکلازها به عنوان یکی از فراوان‌ترین گروه‌های کانی‌های سیلیکاته در پوسته زمین، نقش مهمی در کانی‌شناسی سنگ‌های آذرین و دگرگونی ایفا می‌کنند. لابرادوریت، عضو میانی سری پلاژیوکلازها، به دلیل ویژگی نوری خاص خود موسوم به لابرادورسنس، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این پدیده به صورت بازی رنگ‌های آبی، سبز، زرد و گاه قرمز در سطح کانی مشاهده می‌شود و از دیرباز موضوع مطالعات کانی‌شناسی نوری بوده است.

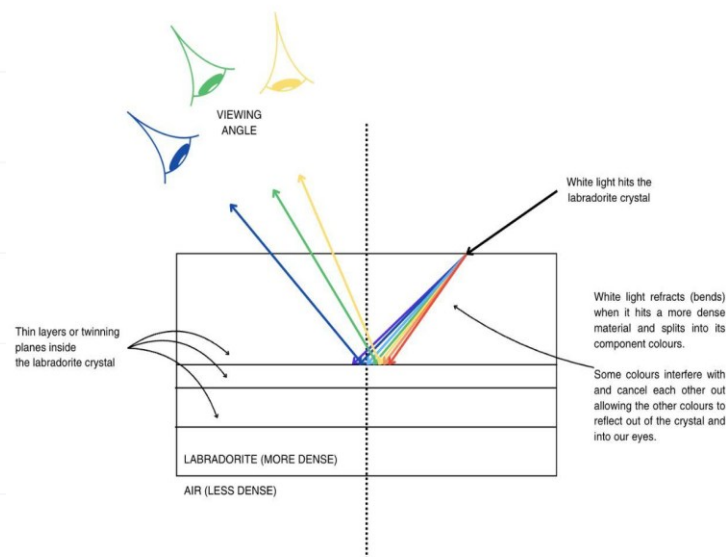
مطالعات اولیه نشان داده‌اند که منشأ لابرادورسنس نه به حضور عناصر رنگ‌زا، بلکه به ساختارهای درونی بلور و پدیده‌های ریزساختاری مانند exsolution و دوقلوبی‌های منظم مرتبط است. با این حال، ارتباط دقیق میان ویژگی‌های ریزساختاری و شدت و طیف رنگ مشاهده‌شده همچنان نیازمند بررسی‌های آزمایشگاهی دقیق‌تر است. هدف از این پژوهش، بررسی هم‌زمان ساختار بلوری، ترکیب شیمیایی و ریزساختارهای لابرادوریت و تبیین نقش آن‌ها در ایجاد پدیده لابرادورسنس است.

۲. مواد و روش بررسی

نمونه‌های مورد مطالعه شامل قطعات سنگی، راف و نمونه‌های نگینی لابرادوریت بودند. برای شناسایی فازهای بلوری، آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه ... و در محدوده زاویه‌ای 2θ انجام شد. به منظور تعیین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، آنالیز XRF صورت گرفت و درصد اکسیدهای اصلی محاسبه شد. بررسی ریزساختارها و مشاهده لایه‌های exsolution با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. همچنین تصاویر ماکروسکوپی از نمونه‌ها جهت مستندسازی بازی رنگ و ارتباط آن با ساختار داخلی ثبت گردید.



شکل ۱. تصویر ماکروسکوپی از نمونه لابرادوریت که بازی رنگ‌های آبی و سبز ناشی از پدیده لابرادورسنس را در اثر تغییر زاویه تابش نور نشان می‌دهد.

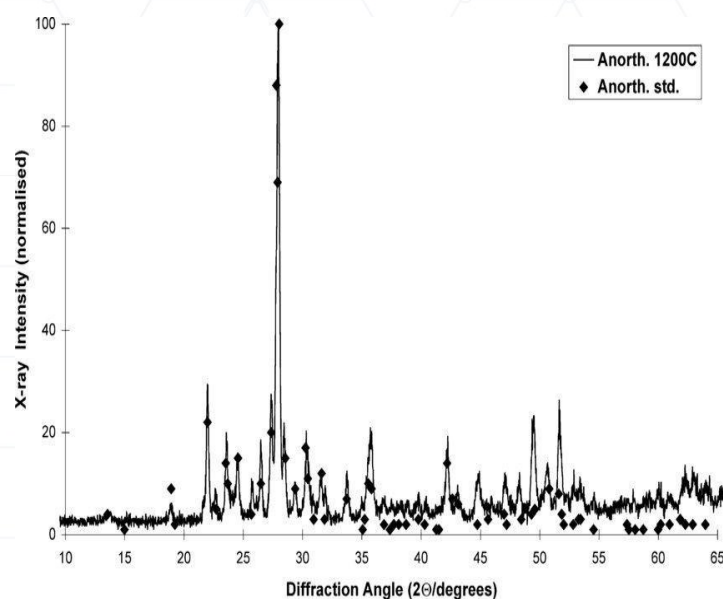


شکل ۲. تصویر ماکروسکوپی از نمونه لابردوریت که بازی رنگ‌های آبی و سبز ناشی از پدیده لابردورسنس را در اثر تغییر زاویه تابش نور نشان می‌دهد.

۳. نتایج

۳-۱. نتایج XRD

الگوهای پراش پرتو ایکس نشان‌دهنده حضور فاز پلاژیوکلاز با ساختار تری‌کلینیک هستند. موقعیت و شدت پیک‌ها با داده‌های استاندارد لابردوریت تطابق خوبی دارد و فاز ثانویه قابل توجهی مشاهده نشد.



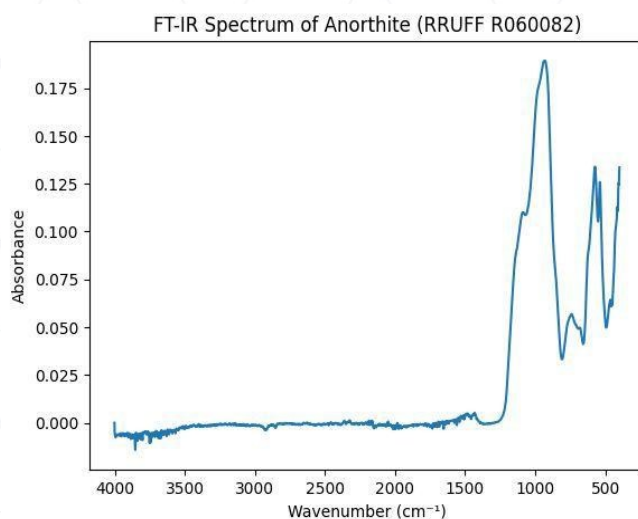
شکل ۳. الگوی XRD نمونه، نشان‌دهنده ساختار تری‌کلینیک پلاژیوکلاز و عدم حضور فازهای ثانویه قابل توجه.

۳-۲. نتایج XRF

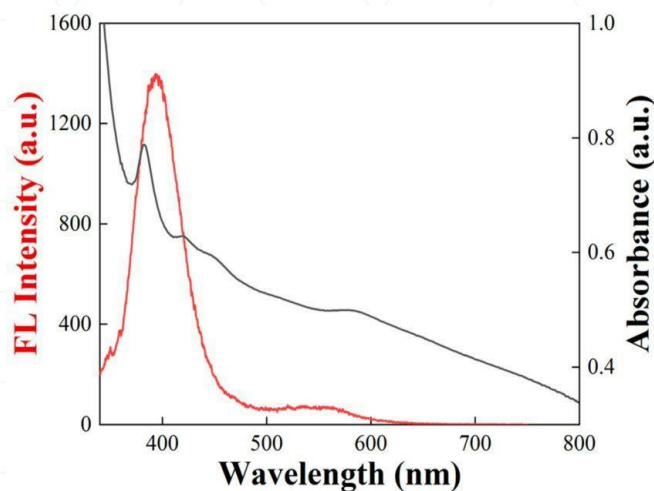
آنالیز XRF نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی نمونه‌ها در محدوده میانی سری آل‌بیت-آنورتیت قرار دارد. نسبت CaO به Na_2O مؤید جایگاه لابرادوریت و عدم انحراف ترکیبی قابل توجه است.

۳-۳. نتایج SEM

تصاویر SEM وجود لایه‌های موازی و منظم در مقیاس نانومتری را نشان می‌دهد. این لایه‌ها به صورت تناوبی از نواحی غنی از سدیم و کلسیم تشکیل شده‌اند و به عنوان ساختارهای exsolution شناخته می‌شوند.



شکل ۴. طیف FT-IR



شکل ۵.

UV-Vis-absorption-black-line-and-fluorescence-emission-spectra-red-line-of-recolored.tif (850×616)

۴. بحث

وجود لایه‌های exsolution با ضخامت هم‌مرتبه با طول موج نور مرئی، شرایط لازم برای تداخل و پراش نور را فراهم می‌کند. این لایه‌ها مانند شبکه‌های پراش عمل کرده و باعث تقویت یا تضعیف طول موج‌های خاص می‌شوند. تغییر زاویه دید منجر به تغییر مسیر نور بازتابی و در نتیجه تغییر رنگ مشاهده‌شده می‌شود. نتایج این مطالعه با مدل‌های کلاسیک ارائه‌شده توسط Bøggild و مطالعات بعدی بر روی فلدسپارها هم‌خوانی دارد و نقش ریزساختارهای منظم را به عنوان عامل اصلی لابردورسنس تأیید می‌کند.



شکل ۶. نمونه نگین پولیش خورده لابراتوریت

۵. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آنالیزهای XRF، XRD و SEM نشان می‌دهد که پدیده لابردورسنس در لابردوریت مستقیماً با ریزساختارهای بلوری داخلی و به‌ویژه لایه‌های exsolution مرتبط است. ضخامت، نظم و جهت‌گیری این لایه‌ها مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده شدت و طیف رنگ هستند. این یافته‌ها در درک بهتر رفتار نوری پلاژیوکلازها و کاربردهای گوهرشناسی لابردوریت اهمیت دارد.

۶. قدردانی

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب قدردانی و تشکر خود را از گروه شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان به‌دلیل فراهم‌سازی امکانات و همکاری در انجام آزمایش‌های FTIR اعلام می‌دارند. همچنین از جناب آقای دکتر فدوی، استاد فیزیک دانشگاه دامغان به‌سبب راهنمایی‌های ارزشمند در تعبیر و تفسیر نتایج آزمایش‌های نوری مرئی و فرابنفش (UV-VIS)، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

۷. منابع

- * Bøggild, O. B. (1924). On the labradorization of feldspars. *Mineralogical Magazine*, 20, 345–358.
- * Smith, J. V., & Brown, W. L. (1988). *Feldspar Minerals*. Springer.
- * Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *Rock-Forming Minerals: Feldspars*. Geological Society.

* Nassau, K. (2001). *The Physics and Chemistry of Color*. Wiley.

* Fleet, M. E. (2003). Optical phenomena in plagioclase feldspars. *American Mineralogist*, 88, 135–148.

بررسی ساختمانی و مطالعه پدیده لابرادورسنس در فاز دوتایی Albite–Anorthite تحت آزمایشات FTIR، XRD و UV–VIS

فاطمه پیربک درویشوند*، رضا ظهیری

دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

استادیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

چکیده

سیستم دوتایی آلبیت–آنورتیت (Albite–Anorthite) به عنوان چارچوب اصلی سری پلاژیوکلازها، نقش کلیدی در تعیین ویژگی‌های ساختاری و نوری این گروه از کانی‌ها ایفا می‌کند. یکی از پدیده‌های نوری شاخص مرتبط با ترکیب‌های میانی این سیستم، پدیده لابرادورسنس است که به صورت بازی رنگ‌های متنوع در برخی پلاژیوکلازها، به‌ویژه لابرادوریت، مشاهده می‌شود. در این پژوهش، رفتار ساختاری و نوری فازهای میانی سیستم Albite–Anorthite با استفاده از آنالیزهای XRD، FTIR و UV–VIS مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج XRD تغییرات پارامترهای شبکه بلوری و گذارهای ساختاری وابسته به ترکیب را نشان می‌دهد. داده‌های FTIR بیانگر تغییر در ارتعاشات پیوندی Si–O و Al–O در اثر جانشینی یونی هستند. طیف‌های UV–VIS نیز تفاوت‌های قابل توجهی در رفتار جذب و بازتاب نور در ترکیب‌های مختلف سیستم دوتایی را آشکار می‌سازند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پدیده لابرادورسنس نتیجه برهم‌کنش پیچیده میان ساختار بلوری، نظم شیمیایی و پاسخ طیفی فازهای میانی Albite–Anorthite است.

واژه‌های کلیدی: سیستم دوتایی آلبیت–آنورتیت؛ پلاژیوکلاز؛ لابرادورسنس؛ UV–VIS؛ FTIR؛ XRD

Structural Investigation and Study of the Labradorescence Phenomenon in the Albite–Anorthite Binary Phase under XRD, FTIR, and UV–VIS Analyses

Abstract

The albite–anorthite binary system represents the fundamental compositional framework of plagioclase feldspars and plays a critical role in controlling their structural and optical properties. Labradorescence, a distinctive optical phenomenon observed in intermediate plagioclase compositions, is particularly associated with labradorite-rich phases. In this study, the structural and optical behavior of intermediate compositions within the albite–anorthite system was investigated using X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and UV–visible spectroscopy (UV–VIS). XRD results reveal systematic variations in lattice parameters and structural ordering as a function of composition. FTIR spectra show compositional-dependent changes in Si–O and Al–O vibrational modes, reflecting cation substitution and framework distortion. UV–VIS analyses indicate significant variations in light absorption and reflectance behavior across the binary system. The results

suggest that labradorescence arises from the combined effects of crystal structure, chemical ordering, and wavelength-dependent optical response in intermediate albite–anorthite compositions.

Keywords: Albite–Anorthite system; Plagioclase; Labradorescence; XRD; FTIR; UV–VIS

۱. مقدمه

پلاژیوکلازها گروهی از کانی‌های سیلیکاته با ترکیب شیمیایی پیوسته بین دو عضو انتهایی آلبیت ($8\text{NaAlSi}_3\text{O}$) و آنورتیت ($8\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}$) هستند. این سری جامد محلول، یکی از مهم‌ترین سیستم‌های کانی‌شناسی در سنگ‌های آذرین و دگرگونی به شمار می‌رود. تغییرات تدریجی ترکیب شیمیایی در سیستم Albite–Anorthite منجر به تغییرات قابل توجهی در ساختار بلوری، نظم شیمیایی و خواص فیزیکی و نوری این کانی‌ها می‌شود.

یکی از پدیده‌های نوری خاص مرتبط با ترکیب‌های میانی این سیستم، لابرادورسنس است که عمدتاً در ترکیب‌های نزدیک به لابرادوریت مشاهده می‌شود. اگرچه این پدیده از دیرباز شناخته شده است، اما تبیین دقیق ارتباط میان ساختار بلوری، ترکیب شیمیایی و پاسخ طیفی نور همچنان موضوع پژوهش‌های فعال است. هدف این مطالعه بررسی نقش ساختار و رفتار طیفی فازهای میانی سیستم Albite–Anorthite در ایجاد پدیده لابرادورسنس با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی و پراش پرتو ایکس است.

۲. مواد و روش بررسی

نمونه‌های مورد مطالعه شامل ترکیب‌های میانی سیستم Albite–Anorthite بودند که به‌صورت طبیعی یا آزمایشگاهی تهیه شدند. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای بررسی ساختار بلوری و تعیین پارامترهای شبکه انجام شد. طیف‌سنجی FTIR در محدوده عدد موج ۴۰۰ تا 4000 cm^{-1} به منظور بررسی ارتعاشات پیوندی شبکه سیلیکاتی به کار رفت. همچنین، طیف‌های UV–VIS جهت بررسی رفتار جذب و بازتاب نور در محدوده طول موج مرئی و فرابنفش ثبت گردید.

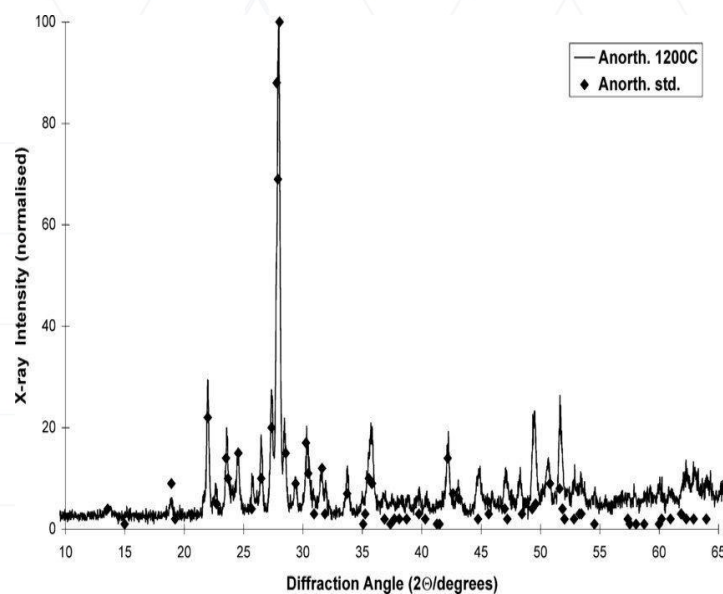


شکل ۱- نمونه نگین پولیش خورده لابرادوریت ماداگاسکار

۲. نتایج

۳-۱. نتایج XRD

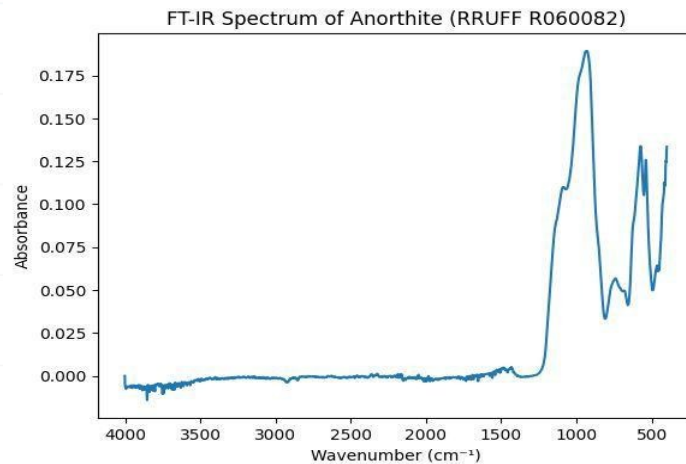
الگوهای XRD تغییرات تدریجی در موقعیت و شدت پیک‌ها را با تغییر ترکیب از آلبیت به آنورتیت نشان می‌دهند. این تغییرات بیانگر جانشینی یونی Na^+ با Ca^{2+} و افزایش میزان آلومینیوم در چارچوب بلوری است. نتایج حاکی از تغییرات ظریف در نظم ساختاری و اعوجاج شبکه‌ای در فازهای میانی هستند که می‌توانند بر خواص نوری تأثیرگذار باشند.



شکل ۲- نمونه پراش پرتو XRD

۳-۲. نتایج FTIR

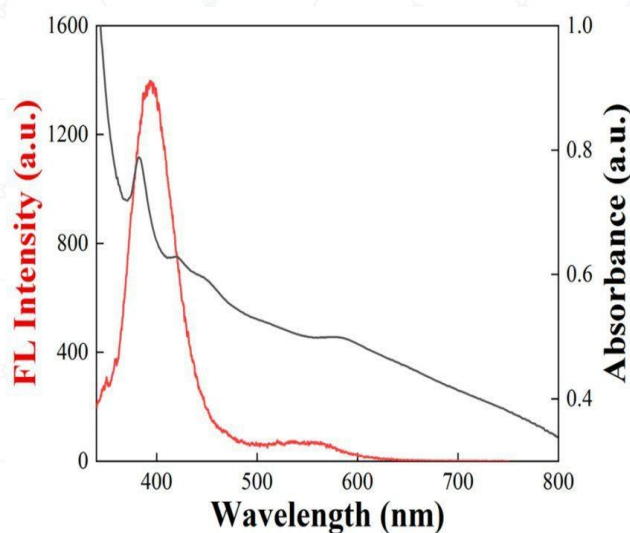
طیف‌های FTIR تغییرات قابل توجهی در باندهای ارتعاشی مربوط به پیوندهای Si-O-Si و Si-O-Al نشان می‌دهند. افزایش سهم آنورتیت منجر به جابه‌جایی باندها و تغییر شدت آن‌ها می‌شود که نشان‌دهنده تغییر در نظم شیمیایی و محیط پیوندی یون‌ها در شبکه بلوری است.



شکل ۳- نمونه طیف FT-IR

۳-۳. نتایج UV-VIS

طیف‌های UV-VIS تفاوت‌های آشکاری در رفتار جذب نور میان ترکیب‌های مختلف سیستم دوتایی نشان می‌دهند. ترکیب‌های میانی، که بیشترین تمایل به بروز لابرادورسنس دارند، الگوهای جذب و بازتابی متفاوتی نسبت به اعضای انتهایی آلبيت و آنورتیت از خود نشان می‌دهند.



شکل ۴- نمونه طیف UV

۴. بحث

نتایج حاصل از XRD، FTIR و UV-VIS نشان می‌دهد که پدیده لابرادورسنس را نمی‌توان صرفاً به یک عامل منفرد نسبت داد. تغییرات ساختاری ناشی از جانشینی یونی، نظم شیمیایی Al-Si و پاسخ طیفی شبکه بلوری همگی در شکل‌گیری این پدیده نقش دارند. فازهای میانی سیستم Albite-Anorthite شرایط ساختاری مناسبی برای ایجاد برهم‌کنش پیچیده نور با

شبکه بلوری فراهم می‌کنند. این نتایج با مطالعات پیشین بر روی فلدسپارها و مدل‌های تداخل نور در ساختارهای بلوری سازگار است.

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان می‌دهد که پدیده لابرادورسنس در سیستم دوتایی Albite-Anorthite نتیجه تعامل هم‌زمان ساختار بلوری، ترکیب شیمیایی و رفتار طیفی نور است. فازهای میانی این سیستم به دلیل ویژگی‌های ساختاری خاص خود، بیشترین پتانسیل را برای بروز این پدیده نوری دارند. استفاده هم‌زمان از XRD، FTIR و UV-VIS امکان درک جامع‌تری از این رفتار نوری فراهم می‌کند.

۶. قدردانی

بدین‌وسیله از گروه شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان بابت همکاری در انجام آزمایش‌های FTIR و فراهم نمودن زیرساخت‌های آزمایشگاهی لازم تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان مراتب سپاس خود را از دکتر فدوی، استاد فیزیک دانشگاه دامغان به‌دلیل ارائه توضیحات تخصصی و تفسیر علمی داده‌های مربوط به آزمایش‌های نوری مرئی و UV-VIS ابراز می‌دارند.

۷. منابع

- * B. Boggild, O. B. (1924). On the labradorization of feldspars. *Mineralogical Magazine*, ۲۰, ۳۴۵-۳۵۸.
- * Smith, J. V. (1974). Feldspar Minerals. *Springer-Verlag*.
- * Brown, W. L., & Parsons, I. (1989). Alkali feldspars: ordering rates and structural states. *Mineralogical Magazine*, 53, 25-42.
- * Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *Rock-Forming Minerals: Feldspars*. Geological Society.
- * Heaney, P. J. (1994). Structure and chemistry of feldspars. *Reviews in Mineralogy*, 28, 1-49.
- * Fleet, M. E. (2003). Optical phenomena in plagioclase feldspars. *American Mineralogist*, 88, 135-148.

مطالعه میانبارهای سیال کانسار سلسیت در منطقه پایکوه، شهرستان رامهرمز، استان خوزستان، جنوب غربی ایران

سید جواد مقدسی^{۱*}، غلامعلی ویسمرادیان^۲، محمدجواد عبدالمهی^۳

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران sjmoghad@pnu.ac.ir

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

چکیده

کانسار سلسیت پایکوه در جنوب شرقی شهرستان رامهرمز و در کنار روستایی با همین نام در استان خوزستان واقع شده است. این منطقه بخشی از تاق‌دیس بنگستان در زون چین خورده زاگرس است. کانی‌سازی سلسیت بر روی بالاترین بخش سازند مارنی پابده و در زیر انیدریت پایه آسماری تشکیل شده است. پارائز کانیایی شامل کانی‌های سلسیت، کلسیت، دولومیت، ژپس و انیدریت با ساخت و بافت‌های لایه‌ای، نواری، دانه شکری، رگه‌ای، ژئودی و شعاعی است. مطالعات پتروگرافی وجود پنج نوع میانبار سیال شامل میانبارهای دو فاز غنی از مایع، میانبارهای دو فاز غنی از گاز، میانبارهای سه فاز حاوی بلور جامد، میانبارهای سه فاز غنی از CO₂ و میانبارهای تک فاز حاوی یک فاز مایع یا یک فاز گاز را نشان داد. شوری میان‌بارها از ۲/۴ تا ۱۵/۲۷ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر و بیشترین فراوانی معادل با ۸/۵ تا ۹/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است. محدوده دمای همگن‌شدن میانبارها بین ۱۷۹ تا ۵۳۹ درجه سانتی‌گراد و بر اساس نمودار فراوانی، دو فاز اصلی کانی‌سازی، یکی در محدوده ۲۵۹ تا ۲۷۹ درجه سانتی‌گراد و دیگری ۲۹۹ تا ۳۱۹ درجه سانتی‌گراد شناسایی شد. شواهد صحرایی، کانی‌شناختی، ساخت و بافت و ریزدماسنجی نشان می‌دهد که احتمالاً شورابه‌های سیخی در شکل‌گیری مرحله کانی‌سازی سین‌ژنتیک و شورابه‌های درون‌سازندی در شکل‌گیری مرحله اپی‌ژنتیک کانی‌سازی نقش داشته‌اند.

کلیدواژه‌ها: کانی‌سازی سلسیت، کانی‌شناسی، میانبار سیال، پایکوه

Fluid Inclusion Investigation of the Payekuh Celestite Deposit, Ramhormoz County, Khuzestan Province, Southwestern Iran.

Seyed Javad, Moghaddasi ^{1*}; Gholamali, Veismoradian ²; Mohammad Javad, Abdollahi ³

¹ Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email: sjmoghad@pnu.ac.ir

² Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran.

³ Department of Geology, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

Abstract

The Payekuh celestite deposit is located in the southeastern part of Ramhormoz County, adjacent to a village of the same name, in Khuzestan Province. The study area constitutes part of the Bangestan Anticline within the Folded Zagros Zone. Celestite mineralization has developed at the uppermost part of the marly Pabdeh Formation, directly beneath the basal anhydrite of the Asmari Formation. The mineral paragenesis comprises celestite, calcite, dolomite, gypsum, and anhydrite, exhibiting a variety of structures and textures, including layered, banded, fine-grained, vein-type, geodic, and radial forms. Petrographic investigations reveal the presence of five types of fluid inclusions, including liquid-rich two-phase inclusions, vapor-rich two-phase inclusions, three-phase inclusions containing a solid crystal, CO₂-rich three-phase inclusions, and single-phase inclusions containing either liquid or vapor. The salinity of the fluid inclusions ranges from 4.2 to 27.15 wt.% NaCl equivalent, with the highest

frequency occurring between 8.5 and 9.5 wt.% NaCl equivalent. The homogenization temperatures vary from 179 to 539 °C, and frequency distribution diagrams indicate the presence of two main mineralization stages, one within the temperature range of 259–279 °C and the other between 299–319 °C. Field observations, mineralogical characteristics, structural and textural features, and microthermometric data suggest that sabkha-type brines likely played a significant role in the formation of the syngenetic mineralization stage, whereas intraformational brines were involved in the development of the epigenetic mineralization stage.

Keywords: Celestite mineralization, Mineralogy, Fluid inclusions, Payekuh

۱- مقدمه

رخدادهای بزرگ سلسیت، همواره دارای سنگ میزبان کربناتی و تبخیری ساحلی هستند. سنگ‌های میزبان از نظر سنی از سیلورین تا پلیوسن متغیر هستند. این نهشته‌ها معمولاً چینه‌سان هستند و شواهد متغیری از فعالیت هیدروترمال مرتبط وجود دارد (Scholle et al., 1990). برخی از نهشته‌ها، مانند نهشته‌های پرمین تحتانی در اتحاد جماهیر شوروی سابق، نهشته‌های کرتاسه در مکزیک و نهشته‌های ائوسن در ترکیه، با باریت همراه هستند، اما بسیاری دیگر این ویژگی را ندارند. در حال، منشأ این نهشته‌ها همچنان مورد توجه است زیرا سلسیت یک کالای معدنی مهم اقتصادی به عنوان منبع اصلی ترکیبات شیمیایی استرانسیم مورد استفاده در آهنرباهای سرامیکی، رنگدانه‌ها، شیشه و متالورژی است (Ober, 1999). اسپانیا، مکزیک، چین، ترکیه و ایران تولیدکنندگان اصلی سلسیت هستند. دو فرضیه اصلی برای منشأ این ذخایر ارائه شده است: (۱) نهشته‌شدن هم‌زاد (سین‌ژنتیک) سلسیت از تبخیر آب دریا و (۲) جانشینی دیرزاد (اپی‌ژنتیک) کربنات‌ها و سولفات‌های کلسیم توسط سلسیت (Hanor, 2004). سلسیت یک کانی دیاژنتیکی فرعی رایج در نهشته‌های کربناتی دریایی است که تصور می‌شود در حین تبدیل آراگونیت یا کلسیت بیوژنیک حاوی Sr، به کلسیت یا دولومیت کم Sr تشکیل می‌شود. با این حال، رخدادهای بزرگ سلسیت رسوبی حاوی چندین میلیون تن ذخیره هستند و به راحتی قابل توضیح نیستند.

رخدادهای سلسیت ایران در دو ناحیه ایران مرکزی و زاگرس یافت می‌شوند. مهمترین کانسارهای سلسیت ایران مرکزی شامل کانسارهای طلحه، لشکر آباد، ابردژ، سیاه کوه و اختر هستند، که عمدتاً در سازند تبخیری قم قرار دارند (کریمی و راستاد، ۱۳۷۶). رخدادهای سلسیت زاگرس شامل سلسیت های یافت شده در گنبدهای نمکی و سازندهای آغاجاری، گچساران، پابده و آسماری است.

کانسار سلسیت پایکوه در جنوب شرقی شهرستان رامهرمز و در کنار روستایی با همین نام واقع شده است. منطقه پایکوه را می‌توان بخشی از تاقدیس بنگستان دانست که در مجاورت یال جنوبی این تاقدیس قرار دارد. در این مقاله، زمین‌شناسی و خصوصیات سیال کانی‌ساز کانسار سلسیت پایکوه بررسی می‌شود.

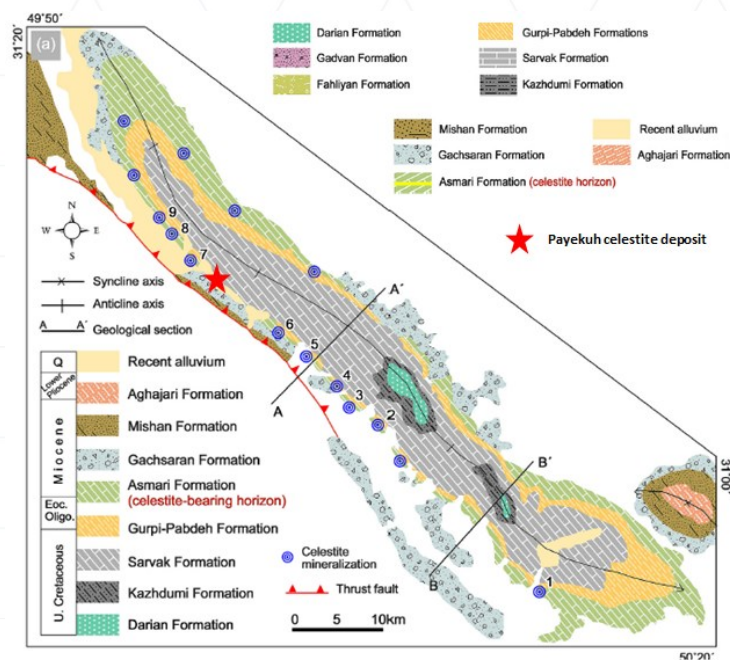
۲- مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، ضمن مطالعه کتابخانه‌ای، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای صحرایی، تعداد ۱۸ نمونه از ماده معدنی به روش کلوخه‌ای برداشت گردید. برای مطالعه پتروگرافی و ریزدماسنجی میانبارهای سیال، از سه نمونه کانی‌سازی سلسیت منطقه مورد مطالعه، مقطع دوروصیقلی تهیه و توسط میکروسکوپ پلاریزان نور عبوری Nikon مدل Ep200 بررسی گردید. پس از پتروگرافی و انتخاب نمونه‌های میانبار سیال مناسب، اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی به وسیله صفحه گرم و سردکننده مدل MDS600 ساخت شرکت Linkam با دامنه تغییرات دمایی از ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام گردید. دقت اندازه‌گیری طی عملیات سرمایش در حدود $1 \pm 0^{\circ}\text{C}$ و طی عملیات گرمایش حدود $1 \pm 0^{\circ}\text{C}$ اکتشافات معدنی کشور انجام گردید. نرخ عملیات سرمایش و گرمایش به ترتیب ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد و ۵ تا ۸ درجه سانتی‌گراد در دقیقه متغیر بود.

برای تعیین درصد شوری و چگالی میانبرهای سیال از نرم‌افزار مدل‌سازی PVTX ویرایش ۲.۶ طراحی شده توسط شرکت لینکام استفاده شد.

۳- بحث

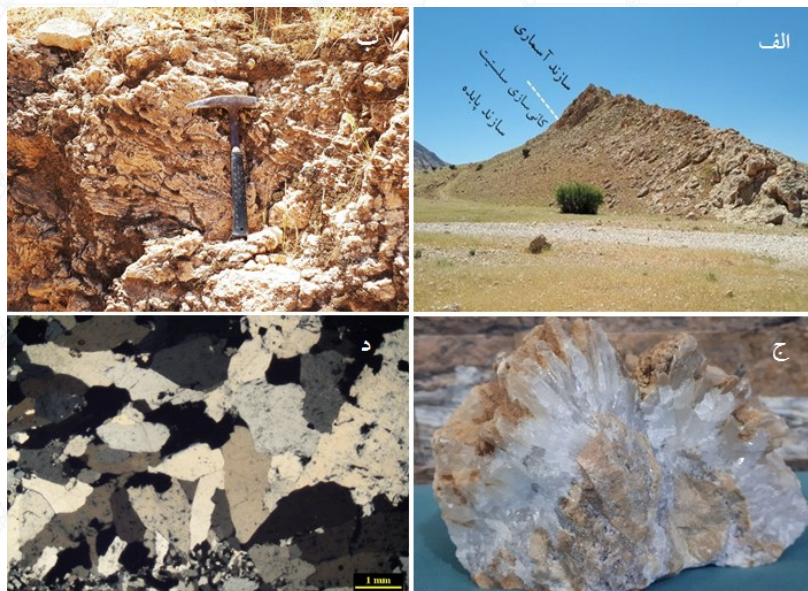
کانسار سلسیت پایکوه، بخشی از تاقدیس بنگستان به طول ۱۰۰ کیلومتر در حاشیه جنوبی زون ایزه (در مرز شمالی فروافتادگی دزفول) و بخشی از زون چین خورده زاگرس است. در این تاقدیس رخنمون‌هایی از سازندهای کرتاسه زیرین (سازند داریان) تا پلیوسن (سازند بختیاری) مشاهده می‌شود (شکل ۱). کانی‌سازی سلسیت بر روی بالاترین بخش سازند مارنی پابده و در زیر انیدریت پایه آسماری با سن چاتین پسین (معادل بخش زیرین آسماری میانی) یافت می‌شود. این انیدریت در مرکز حوضه پابده (لرستان و بخشی از خوزستان) گسترش دارد و به طور هم‌شیب بر روی سازند پابده و در زیر کربنات‌های دولومیتی دانه‌ریز بخش بالایی آسماری میانی قرار می‌گیرد. بعد از تشکیل این کانسارها، پیشروی دریای بوردیگالین همراه با نهشته‌شدن سازندهای دیگر این منطقه، موجب محفوظ ماندن این کانسار از فرسایش شده است. کوهزاد میوسن میانی موجب چین‌خوردگی و خروج از آب سازندهای این ناحیه شده است. نتیجه خروج از آب و فرسایش سازندهای واقع بر روی آنها، پدیدار شدن این کانسارها بر روی سطح بوده است.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی تاقدیس بنگستان و موقعیت کانسار سلسیت پایکوه که با علامت ستاره مشخص شده است (اقتباس از Hashempour et al., 2025).

افق حاوی کانی‌سازی سلسیت بر روی بالاترین بخش سازند مارنی پابده و در زیر انیدریت پایه آسماری به صورت لایه‌ای و عدسی شکل یافت می‌شود (شکل ۲). ماده معدنی نسبت به سنگهای دربرگیرنده موازی و لایه‌ای است. اندازه و ضخامت لایه‌ها و عدسی‌های سلسیتی بسیار متفاوت است. در بعضی از بخش‌ها کانسار از ضخامت تقریباً دو متر و طولی معادل ۱۰ متر از جوانب به لایه‌هایی با ضخامت بیست سانتیمتر تبدیل می‌شود که بیش از ۱۰۰ متر طول دارند. در بخشی‌هایی نیز ماده معدنی به صورت عدسی‌های کوچکی رخنمون دارد و پدیده بودیناژشدگی به خوبی قابل مشاهده است. رنگ ماده معدنی کرم رنگ و در بعضی از قسمت‌های افق معدنی به دلیل حضور اکسید آهن به رنگ قرمز، تغییر رنگ می‌دهد. بعضی از ساخت‌ها

و بافت‌هایی که در سلسیت‌های منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود عبارتند از: ساخت لایه‌ای، نواری، دانه شکری، رگه‌ای، ژئودی، شعاعی و تقریباً شعاعی (شکل ۲). پاراژنز کانیایی کانسار سلسیت پایکوه همانند بسیاری دیگر از ذخایر سلسیت ساده و شامل کانی‌های سلسیت، کلسیت، دولومیت، ژپس و انیدریت است.



شکل ۲ الف) موقعیت افق کانی‌سازی سلسیت پایکوه در توالی رسوبی سازندهای پابده و آسماری، ب) بافت زیر (مخطط) در کانسار سلسیت پایکوه، ج) بافت شعاعی کانی سلسیت، د) بافت موزائیکی کانی سلسیت در نور عبوری پلاریزه متقاطع.

مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع نازک سلسیت‌های کانسار پایکوه دلالت بر ته‌نشست سلسیت طی فرآیندهای سین‌دیاژنتیک دارد. سلسیت طی فرآیندهای سین‌دیاژنتیک تشکیل شده است و سپس فرآیندهای دیاژنز تاخیری و اپی ژنتیک باعث ایجاد بافت‌های ثانویه گسترده همراه با کانی‌سازی مرحله دوم شده است. وجود ساخت‌های جانشینی، وجود ادخال‌هایی از انیدریت، ژپس و کلسیت در بلورهای سلسیت، جانشینی به جای سنگ‌آهک و ریز بلور بودن ماده معدنی درحالی که همراه با انیدریت و ژپس ریز بلور است، نشان دهنده جانشینی سلسیت به جای ژپس، انیدریت و سنگ‌آهک و تشکیل سلسیت به صورت سین‌دیاژنتیکی است. وجود بلورهای سلسیت خردشده که توسط سلسیت ثانویه و کلسیت اسپاری پر شده‌اند، بلورهای موزائیکی سلسیت با زوایای ۱۲۰ درجه، به دام افتادن بلورهای ریز خودشکل درون بلورهای بزرگتر و بی‌شکل، همراهی بلورهای درشت با بلورهای ریز، قطع‌شدگی بلورهای سلسیت نسل اول توسط آهک اسپاری و سلسیت رگه‌ای در مقیاس میکروسکوپی، اثرات دیاژنز تاخیری و فرآیندهای اپی ژنتیک را بر سلسیت‌ها نشان می‌دهند. برای مطالعه پتروگرافی و ریزدماسنجی میانبارهای سیال، از سه نمونه کانی‌سازی سلسیت منطقه مورد مطالعه، مقطع دوروصی‌لی تهیه و مطالعه گردید. از نظر منشاء، میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه بر اساس یرماکوف (Yermakov, 1965) به سه نوع اولیه، ثانویه و کاذب تقسیم می‌شوند. میانبارهای سیال اولیه به صورت مجزا و بزرگ در زمینه کانی‌های سلسیت پراکنده هستند. میانبارهای سیال ثانویه و کاذب اکثراً بصورت ادخال‌های ریز و به صورت خطی مشاهده می‌شوند. میانبارهای انتخاب شده جهت مطالعات ریزدماسنجی، از نوع اولیه می‌باشند. میانبارهای مطالعه شده بیشتر به شکل گرد یا بی‌شکل و گاهی کشیده و اندازه آنها از ۱۰ میکرون تا ۵۰ میکرون متغیر است. میزان درجه پرشدگی میانبارهای

سیال حاوی فاز مایع- گاز و نمونه‌های حاوی فازهای مایع- گاز- جامد بر اساس شفرد و همکاران (Shepherd et al., 1985) محاسبه شد. مطالعات پتروگرافی حاکی از وجود ۵ نوع میانبار سیال به شرح زیر می‌باشد:

میانبارهای نوع I که غنی از مایع بوده و حاوی دو فاز مایع و گاز (L+V) می‌باشند (شکل ۳ الف). در این نوع میانبارها، فاز گازی تنها ۱۰ تا ۳۵ درصد حجم میانبارهای سیال مطالعه شده را شامل می‌شود. این نوع میانبار، بیشترین فراوانی را در بین میانبارهای مطالعه شده دارد و میزان شوری بین ۲/۷ تا بیش از ۱۵ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر است.

میانبارهای نوع II که غنی از گاز بوده و حاوی دو فاز گاز و مایع (V+L) می‌باشند (شکل ۳ ب). در بعضی موارد بیش از ۷۰ درصد حجم میانبار را حباب گاز فراگرفته است. دمای همگن شدن در این نوع میانبارها بالا، درصد شوری کم و چگالی پایین است. این میانبارها اغلب به فاز گازی همگن می‌شوند.

میانبارهای نوع III که حاوی سه فاز مایع، گاز و جامد (هالیت) (L+V+S) می‌باشند (شکل ۳ ج). در این نوع میانبار، فاز جامد بصورت بلورهای شکل‌دار مشاهده شد ولی هیچ کدام در محدوده دمایی مورد مطالعه ذوب نشدند. در تعدادی نیز قبل از ذوب شدن فاز جامد، همگن شدن به بخار روی داد و در نتیجه دمای ذوب برای فاز جامد ثبت نشد.

میانبارهای نوع IV که غنی از CO_2 بوده و شامل فاز گاز و مایع CO_2 دار (L+Vco₂+ Lco₂) می‌باشند (شکل ۳ د). در تعدادی از نمونه‌های میانبارهای سیال مطالعه شده، حضور مقادیر بالای CO_2 در فاز گازی موجب شده تا $ThCO_2$ و $TmCO_2$ قابل اندازه‌گیری باشد. در این نوع میانبارها بین ۵۶/۵- تا ۵۵/۵- درجه سانتی‌گراد است. تعدادی از این میانبارها، در طی همگن شدن، به دلیل وجود بیش از ۴۰ درصد CO_2 ، قبل از رسیدن به دمای همگن شدن دچار ترکیدگی شدند. دمای همگن شدن فاز CO_2 دار ($ThCO_2$) بین ۲۶ تا ۲۹/۸+ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد.

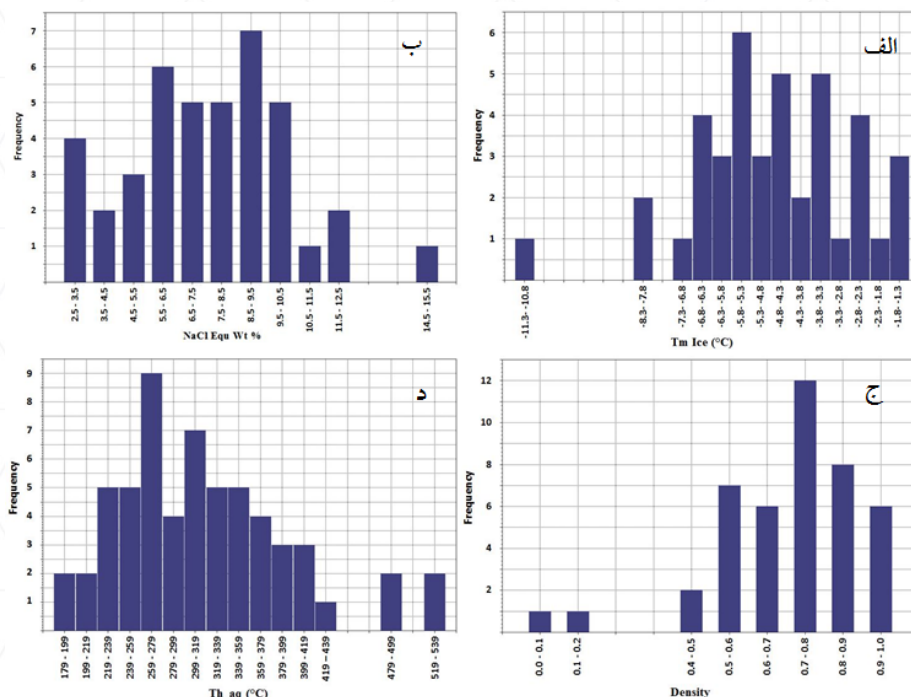
میانبارهای نوع V که حاوی یک فاز مایع (L) یا یک فاز گاز (V) هستند. این نوع میانبارها به دلیل وجود یک فاز، برای مطالعات ریزدماسنجی مناسب نبوده و در نتیجه اندازه‌گیری انجام نشد.



شکل ۳ طبقه‌بندی میانبارهای سیال کانسار سلسیت پاپکوه. الف) میانبار سیال نوع I (L+V)، ب) میانبار سیال نوع II (V+L)، ج) میانبار سیال نوع III (L+V+S) و د) میانبار سیال نوع IV (L+Vco₂+ Lco₂).

اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی بر روی میانبارهای نوع I، II و IV انجام گردید. بیشتر میانبارهای مطالعه شده در نمونه‌های محدوده معدن پاپکوه، از نوع گاز- مایع (نوع I) بوده و درجه پرشدگی آنها بین ۵۷ تا ۹۵ درصد متغیر است. با استفاده از روش انجماد، دمای ذوب آخرین بلور یخ (Tm) از ۱/۵- تا ۱۱/۸- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. شوری این میانبارها از ۲/۴ تا ۱۵/۲۷ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد.

در شکل ۴ الف نمودار ستونی نقطه ذوب آخرین بلور یخ در مقابل فراوانی برای معدن سلسیت پایکوه نشان داده شده است. بیشترین فراوانی نقطه ذوب آخرین بلور مربوط به دماهای $-5/3$ تا $-5/8$ می‌باشد که به ترتیب معادل با $8/5$ تا $9/5$ درصد وزنی معادل نمک طعام است (شکل ۴ ب). حداکثر شوری سیال کانی‌ساز معادل $15/5$ درصد وزنی معادل نمک طعام است. شکل ۴ ج نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها دارای چگالی ۷ تا ۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند. در میانبراهایی که درجه پرشدگی از ۴۵ درصد بیشتر است، همگن‌شدن به فاز مایع و در میانبراهای با درجه پرشدگی کمتر از ۴۵ درصد، همگن‌شدن به فاز گاز صورت گرفت.



شکل ۴ نتایج ریزدماسنجی میانبراهای سیال کانسار سلسیت پایکوه. الف) نمودار ستونی نقطه ذوب آخرین بلور یخ، ب) نمودار ستونی شوری میانبراهای سیال، ج) نمودار ستونی چگالی میانبراهای سیال و د) نمودار دمای همگن‌شدن میانبراهای سیال.

اطلاعات بدست آمده نشان می‌دهد که محدود دمای همگن‌شدن میانبراهای بین ۱۷۹ تا ۵۳۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۴ د). بر این اساس، دو فاز اصلی کانی‌سازی، یکی در محدوده ۲۵۹ تا ۲۷۹ درجه سانتی‌گراد و دیگری ۲۹۹ تا ۳۱۹ درجه سانتی‌گراد رخ داده است.

۴- نتیجه‌گیری

افق حاوی کانی‌سازی سلسیت بر روی بالاترین بخش سازند مازنی پابده و در زیر انیدریت پایه آسماری به صورت لایه‌ای و عدسی شکل تشکیل شده است. بعضی از ساخت‌ها و بافت‌هایی که در سلسیت‌های منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود عبارتند از: ساخت لایه‌ای، نواری، دانه شکری، رگه‌ای، ژئودی، شعاعی و تقریباً شعاعی. پاراژنز کانیایی کانسار سلسیت پایکوه شامل کانی‌های سلسیت، کلسیت، دولومیت، ژپس و انیدریت است.

از نظر منشأ، میانبراهای سیال منطقه مورد مطالعه به سه نوع اولیه، ثانویه و کاذب تقسیم می‌شوند. مطالعات پتروگرافی حاکی از وجود ۵ نوع میانبر سیال به شرح زیر می‌باشد: میانبرهای دو فاز غنی از مایع، میانبرهای دو فاز غنی از گاز، میانبرهای سه فاز حاوی بلور جامد، میانبرهای سه فاز غنی از CO_2 و میانبرهای تک فاز حاوی یک فاز مایع یا

یک فاز گاز. اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی نشان داد که شوری این میان‌پارها از ۲/۴ تا ۱۵/۲۷ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر و بیشترین فراوانی معادل با ۸/۵ تا ۹/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است. همچنین بیشتر نمونه‌ها دارای چگالی ۷ تا ۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند. محدود دمای همگن‌شدن میانبارها بین ۱۷۹ تا ۵۳۹ درجه سانتی‌گراد و بر اساس نمودار فراوانی، دو فاز اصلی کانی‌سازی، یکی در محدوده ۲۵۹ تا ۲۷۹ درجه سانتی‌گراد و دیگری ۲۹۹ تا ۳۱۹ درجه سانتی‌گراد رخ داده است.

شواهد صحرایی، کانی‌شناختی، ساخت و بافت و ریزدماسنجی در کانسار سلسیت پاپیکه نشان می‌دهد که احتمالاً شورابه‌های سبخایی در مرحله کانی‌سازی سین‌ژنتیک و شورابه‌های درون‌سازندی در مرحله اپی‌ژنتیک کانی‌سازی نقش داشته‌اند.

۵- مراجع

کریمی، ع.، راستاد، ا.، ۱۳۷۸. رخساره‌های کانهدار کانسار سلسیت نخجیر کوه ورامین؛ تحول دیاژنری و محیط رسوب‌گذاری. مجله علوم زمین، جلد ۹، شماره ۳۳-۳۴، صفحات ۲۰-۳۳.

Hanor, J.S., 2004. A model for the origin of large carbonate- and evaporite-hosted celestine deposits. *Journal of Sedimentary Research* 74, 168–175.

Hashempour, S.S., Maghfouri, S., Rastad, E., 2025. Metallogeny of celestite deposits in Iran; implications for future explorations. *Ore Geology Reviews*, 184, 106735.

Ober, J.A., 2016. Mineral commodity summaries 2016. In: *Mineral Commodity Summaries*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, 205 pp.

Scholle, P.A., Stemmerik, L., Harpoth, O., 1990. Origin of major karst-associated celestite mineralization in Karstryggen, central East Greenland. *J. Sediment. Res.* 60 (3), 397–410.

Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, New York. 239 pp.

Yermakov, N.P., 1965. Research on the nature of mineral-forming solutions. Translated by V. P. Sokoloff and edited by E. Roedder. Pergamon Press, Oxford, 743 pp.

مطالعه میانبارهای سیال کانسار سلسیت قلعہ‌بلند، جنوب شرقی ورامین، ایران

سید جواد مقدسی^{۱*}، نیکا دانیالی^۲، رضا صادقی^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. Email: sjmoghad@pnu.ac.ir

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

کانسار سلسیت قلعہ‌بلند در فاصله ۲۴ کیلومتری جنوب شرقی ورامین در جنوب استان تهران واقع شده است. منطقه مورد مطالعه در زون ایران مرکزی قرار داشته و کانی‌سازی سلسیت در سازند قم رخ داده است. کانی‌سازی بصورت هم‌شیب و به موازات لایه‌های رسوبی سازند قم رخ داده است. مطالعات پتروگرافی وجود بافت‌های اولیه رسوبی، دیاژنزی و دیرزاد را نشان می‌دهد. این بافت‌ها شامل بافت‌های لایه‌ای، افشان، دانه‌ای، نواری، پرکننده فضای خالی، رگه‌ای و ریتمیک می‌باشند. مطالعات پتروگرافی نشان داد که بیشتر میانبارهای سیال موجود در کانی سلسیت از نوع غنی از مایع هستند. شوری این میانبارها از ۵/۷۱ تا ۲۱/۵۴ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد و بیشترین فراوانی شوری در حدود ۵ تا ۷/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است. محدوده دمای همگن‌شدن میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه بین ۸۶ تا ۳۰۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. بررسی نتایج ریزدماسنجی نشان داد که مقدار CaCl_2 سیال بین ۰/۳ تا ۱۰/۹۹ درصد وزنی و نسبت $\text{NaCl}/(\text{NaCl}+\text{CaCl}_2)$ بین ۰/۰۳ تا ۰/۹۵ متغیر است، که نشان‌دهنده اهمیت سیالات کلسیم (و منیزیم) دار در تشکیل این کانسار می‌باشد. شواهد صحرایی، کانی‌شناختی، ساخت و بافت و ریزدماسنجی نشان می‌دهد که کانسار سلسیت قلعہ‌بلند با توجه به ویژگی‌های رخساره‌ای سنگ‌های میزبان، در محیط‌های کم عمق تبخیری نهشته شده‌اند. احتمالاً شورابه‌های سبخایی در مرحله کانی‌سازی هم‌زاد (سین‌ژنتیک) و شورابه‌های درون‌سازندی در مرحله کانی‌سازی دیاژنتیک و دیرزاد (اپی‌ژنتیک) نقش داشته‌اند.

کلیدواژه‌ها: کانی‌سازی سلسیت، پتروگرافی، میانبار سیال، قلعہ‌بلند ورامین

Fluid Inclusion Investigation of the Ghale Boland Celestite Deposit, Southeastern Varamin, Iran.

Seyed Javad, Moghaddasi ^{1*}; Nika, Daniali ²; Reza, Sadeghi ²

¹ Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email: sjmoghad@pnu.ac.ir

² Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Abstract

The Ghale Boland celestite deposit is located in 24 km southeastern of Varamin. The study area is located in the Central Iran Zone and the celestite mineralization is occurred in Qom Formation. Celestite mineralization is developed as syngenetic deposit along with the layering of the sedimentary units of the Qom Formation. Petrographic investigations reveal the presence of syngenetic, diagenetic and epigenetic textures, including layered, granular, disseminated, banded, open-space filling, veins and rhythmic textures. Petrographic investigations reveal that most of the fluid inclusions are liquid-rich two-phase inclusions. The salinity of the fluid inclusions ranges from 5.71 to 21.54 wt.% NaCl equivalent, with the highest frequency occurring between 5 and 7.5 wt.% NaCl equivalent. The homogenization temperatures vary from 86 to 305°C. Microthermometric investigations display that CaCl_2 content of mineralizing fluid vary between 0.3 to 10.99 wt.% and the $\text{NaCl}/(\text{NaCl}+\text{CaCl}_2)$ ratio ranges from 0.03 to 0.95, showing the importance of Ca- (and Mg-) bearing fluids in the formation of Ghale Boland deposit. Field observations, mineralogical characteristics, structural and textural features,

and microthermometric data suggest that Ghale Boland deposit is formed in a shallow evaporate environment. Sabkha-type brines likely played a significant role in the formation of the syngenetic mineralization stage and intra-formational brines were involved in the development of the diagenetic and epigenetic mineralization stages.

Keywords: Celestite mineralization, Petrography, Fluid inclusions, Ghale Boland of Varamin

۱- مقدمه

استرانسیم یکی از اجزای رایج در بسیاری از کانی‌های کربناته (مانند کلسیت) و سولفات (مانند ژپس) است. به دلیل شباهت شعاع یونی، یون Sr^{2+} می‌تواند به جای Ca^{2+} و Ba^{2+} در گستره وسیعی از کانی‌ها جانشین شود. استرانسیم فقط در دو کانی با عیار اقتصادی وجود دارد: سلسیت ($SrSO_4$) با ۵۶/۴ درصد SrO و استرانسیانیت ($SrCO_3$) با ۷۰/۱ درصد SrO . هر دو کانی به وفور در سنگ‌های رسوبی مانند نهشته‌های نمکی، ژپس و کربنات‌ها یافت می‌شوند، اما ممکن است به صورت بخشی از رگه‌های گرمایی (همراه با باریت، فلوئوریت و سولفیدها) و نیز توده‌های متاسوماتیک در رس‌ها، سنگ‌های کربناته و توالی‌های آتشفشانی-رسوبی نیز تشکیل شوند (Dill, 2010). سلسیت و کانی‌های مشابه آن، به علت کاربردهای خاصی که در صنعت دارند، همیشه مورد توجه معدنکاران بوده و سالها است که فعالیت‌های اکتشافی برای اکتشاف منابع جدید فلز استرانسیم صورت می‌پذیرد. نتایج عملیات اکتشافی در چندین منطقه از کشورمان از جمله در جنوب شرق ورامین و استان کهگیلویه و بویراحمد و خوزستان، پتانسیل‌ها و ذخایر نسبتاً خوبی را در سازندهای رسوبی شناسایی کرده و بعضاً به بهره‌برداری رسیده‌اند (Ehya et al., 2013; Hashempour et al., 2025).

معدن سلسیت قلعه‌بلند در جنوب شرقی استان تهران و در فاصله ۲۴ کیلومتری جنوب شرقی ورامین واقع شده است. بزرگترین ذخایر سلسیت کشف شده در ایران در منطقه‌ی دشت کویر ورامین قرار دارند. نهشته سلسیت قلعه‌بلند به علت قرار گرفتن در سطح، شیب کم لایه‌ها و تناژ بالای ماده معدنی، از سال‌ها قبل مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، مطالعه زمین‌شناسی، خصوصیات کانی‌سازی و مطالعه میانبارهای سیال کانسار سلسیت قلعه‌بلند است.

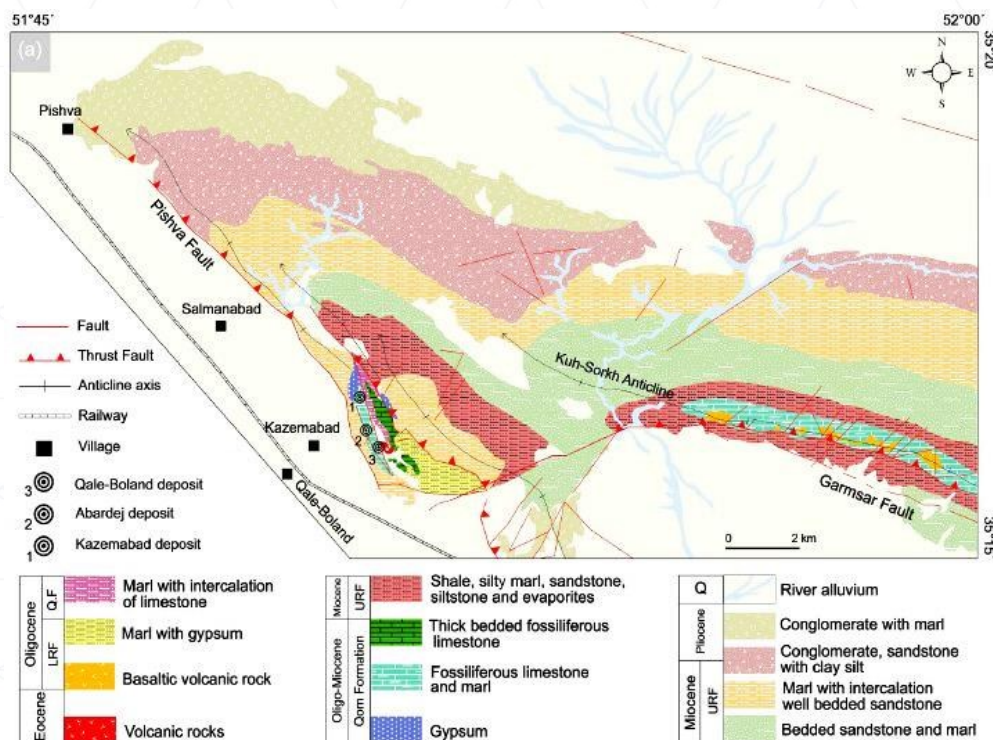
۲- مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، ضمن مطالعه کتابخانه‌ای و بازدید صحرایی، حدود ۴۰ نمونه از رخنمون‌های سنگی مختلف و کانسنگ سلسیت در امتداد نیمرخ توده‌ی معدنی به صورت تصادفی از ماده‌ی معدنی، و سنگ میزبان به روش‌های کلوخه‌ای و لب‌پری برداشت شد. از نمونه‌های برداشت شده، ۱۲ مقطع نازک تهیه و جهت تعیین کانی‌شناسی، بافت و ساخت ماده‌ی معدنی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین ۳ نمونه برای مطالعه میانبارهای سیال انتخاب شد. مقاطع دوروصیقلی توسط میکروسکوپ پلاریزان نور عبوری المپوس مدل BX52 بررسی گردید. پس از پتروگرافی و انتخاب نمونه‌های میانبار سیال مناسب، اندازه-گیری‌های ریزدماسنجی به وسیله صفحه منجمدکننده و گرم‌کننده Linkam مدل THMS600 با دامنه تغییرات دمایی ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد که بر روی میکروسکوپ ZEISS مدل Axioplan2 نصب شده است، در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران انجام گردید. این دستگاه مجهز به دو کنترل گر گرمایش (TP94) و سرمایش (LNP)، مخزن ازت (جهت پمپ نیتروژن برای انجماد) و مخزن آب (جهت خنک کردن دستگاه در دمای بالا) است.

۳- بحث

معدن سلسیت قلعه‌بلند در جنوب شرقی استان تهران و در زون ایران مرکزی واقع شده است. این زون یکی از بزرگ‌ترین زون‌های زمین‌شناسی در منطقه خاورمیانه است و در آن از قدیمی‌ترین رسوبات دگرگون‌شده از پرکامبرین تا آتشفشان‌های فعال و نیمه‌فعال امروزی وجود دارد (آقانباتی، ۱۳۸۵). کانی‌سازی سلسیت قلعه‌بلند در سازند قم صورت پذیرفته است. این

سازند شامل ترکیبی عمدتاً مارنی همراه با نهشته‌های آهکی، انیدریت و ژپس می‌باشد که بین دو سازند قرمز پائینی و بالایی قرار دارند (آقانباتی، ۱۳۸۵) (شکل ۱). واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه در قاعده با سنگهای آتشفشانی ائوسن شروع شده، سپس با توالی سازند قرمز زیرین، سازند قم، سازند قرمز بالایی و رسوبات آبرفتی ادامه می‌یابد. سازند قرمز زیرین شامل مارن‌های رنگارنگ، شیل، ماسه‌سنگ، لایه‌های تبخیری و سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی است. سازند قم به سن الیگومیوسن شامل مارن، آهک، انیدریت و ژپس، و نهشته‌های آواری ماسه‌ای است (صادقی و همکاران، ۱۳۸۵). سازند قم شامل ۶ عضو a, b, c, d, e و f است و کانی‌سازی سلسیت در عضوهای d و e رخ داده است (Hashempour et al., 2025).

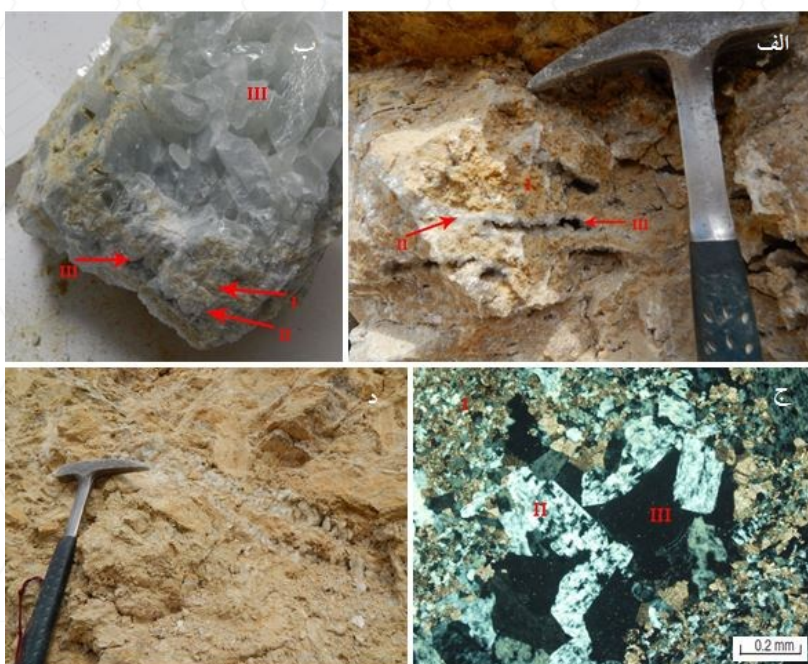


شکل ۱ قسمتی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورامین که موقعیت معدن سلسیت قلعه‌بلند و واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد (Hashempour et al., 2025).

کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه در سه معدن کاظم‌آباد، ابردژ و قلعه‌بلند یافت می‌شود. واحد تبخیری (عضو d) سازند قم که شامل سولفات‌های کلسیم (ژپس و انیدریت) است، کم و بیش در هر سه معدن یافت می‌شود. این واحد بصورت یک افق با ضخامت حدود ۵ متر در معدن کاظم‌آباد، دو افق با ضخامت حدود ۱/۵ متر در معدن قلعه‌بلند و یک افق با ضخامت ۲ متر در معدن ابردژ یافت می‌شود (سپهوند و همکاران، ۱۴۰۳؛ Hashempour et al., 2025). عضو e شامل ترکیب مارن خاکستری مایل به سبز و مارن ماسه‌ای با میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک است و در هر سه معدن یافت می‌شود. افق کانی‌سازی سلسیت معدن قلعه‌بلند به ضخامت تقریبی ۲ تا ۵ متر در سنگ میزبان مارن و سنگ‌آهک مارنی سازند قم قرار دارد (Hashempour et al., 2025).

کانی‌شناسی نهشته قلعه‌بلند ساده و شامل سلسیت، ژپس، انیدریت، کلسیت و آراگونیت است. بافت‌های اصلی کانی‌سازی شامل بافت‌های لایه‌ای، نواری، افشان، دانه‌ای، حفره‌ای و تبلور دیاژنتیک ریتیمیک است (شکل ۲). تبلور دیاژنتی نقش زیادی در تعیین مراحل مختلف تشکیل سنگ‌ها و کانسارهای رسوبی دارد و دستیابی به توالی آن در تعیین ژنز مواد معدنی مهم می‌باشد. بافت ریتیمیک معمولاً در نهشته‌های چینه‌کران و همچنین در تبخیری‌ها و دیگر سیستم‌های تبلور تفریقی آهسته مشاهده

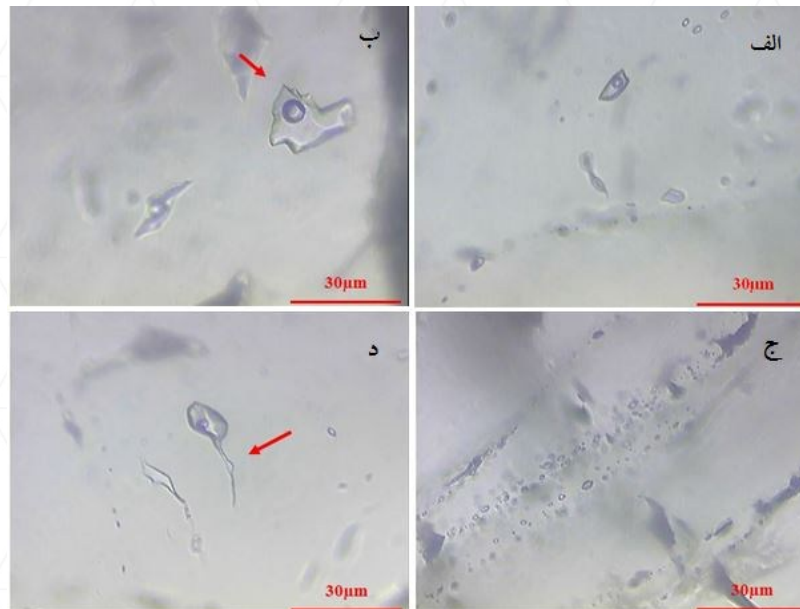
می‌شود. از نظر ژئومتری، نواربندی ریتمیک در مقیاس میلی‌متری از مشخصات بافت ریتمیک تبلوری دیاژنزی است. نواربندی ریتمیک نتیجه‌ی تکرار عناصر ژئومتری سه‌تایی است که طی دیاژنز دفنی یک شورا به غنی از استرانسیم، علاوه بر محو قسمت عمده سیمای همزمان رسوبی و دیاژنز آغازین، باعث تشکیل ریتمیک‌های تبلوری دیاژنزی و جانشین شدن سلسیت به جای ژپس شده است. این بافت دارای سه نسل تبلوری در کانسار می‌باشد (دانیالی و مقدسی، ۱۴۰۳: ۱) نسل I که ترکیب کانیایی آن شامل سلسیت، ژپس، میکریت، میکرواسپاریت و اکسید آهن، با بلورهای متوسط تا ریزدانه بوده و شواهد رسوب‌گذاری اولیه در این نسل از بلورها قابل مشاهده می‌باشد، (۲) نسل II که شامل سلسیت، اسپاریت و ژپس بوده، اندازه بلورهای سلسیت درشت و عمدتاً ساب‌هدرال و تخته‌ای، با رشد دو قطبی از طرفین نسل I هستند، و (۳) نسل III که فضاهای خالی باقیمانده بین دو لایه از نسل II هستند و همیشه دیده نمی‌شود و فقط در مواردی این حفرات خالی با بلورهای درشت سلسیت پر شده است (شکل ۲).



شکل ۲ الف) تصویر بافت ریتمیک در کانسار سلسیت قلعه‌بلند در مقیاس رخنمون. ب) نمای نزدیک از بافت ریتمیک و نواربندی سلسیت در مقیاس نمونه دستی، ج) تصویر میکروسکوپی بافت ریتمیک در نور پلاریزه عبوری متقاطع، و د) کانی‌سازی اپی-ژنتیک (دیرزاد) سلسیت در سنگ آهک مارنی روی افق اصلی کانی‌سازی منطقه قلعه‌بلند. هر نسل از کانی‌سازی با حروف یونانی I، II و III نمایش داده شده‌اند.

برای مطالعه پتروگرافی و ریزدماسنجی میانبارهای سیال، از سه نمونه کانی‌سازی سلسیت منطقه مورد مطالعه، مقطع دوروصی‌لی تهیه و مطالعه گردید. از نظر منشاء، میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه بر اساس یرماکوف (Yermakov, 1965) به سه نوع اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب تقسیم می‌شوند. میانبارهای سیال اولیه به صورت مجزا در زمینه کانی‌های سلسیت پراکنده هستند (شکل ۳ الف و ب). میانبارهای سیال ثانویه و ثانویه کاذب اکثراً بصورت میانبارهای ریز و خطی مشاهده می‌شوند (شکل ۳ ج). میانبارهای انتخاب شده جهت مطالعات ریزدماسنجی، از نوع اولیه می‌باشند. میانبارهای مطالعه شده بیشتر بی‌شکل هستند و اندازه آنها از چند میکرون تا حدود ۳۰ میکرون متغیر است. مطالعات پتروگرافی نشان داد که بیشتر میانبارهای سیال موجود در کانی سلسیت از نوع غنی از مایع بوده و حاوی دو فاز مایع و گاز (L+V) می‌باشند (شکل ۳). در این نوع میانبارها، فاز گازی تا ۳۰ درصد حجم میانبارهای سیال مطالعه شده را شامل می‌شود. میانبارهای حاوی یک فاز مایع (L) نیز مشاهده

گردید که به دلیل وجود یک فاز، برای مطالعات ریزدماسنجی مناسب نبوده و در نتیجه اندازه‌گیری انجام نشد. در برخی نمونه‌ها نیز آثار باریک‌شدگی مشاهده گردید (شکل ۳ د).

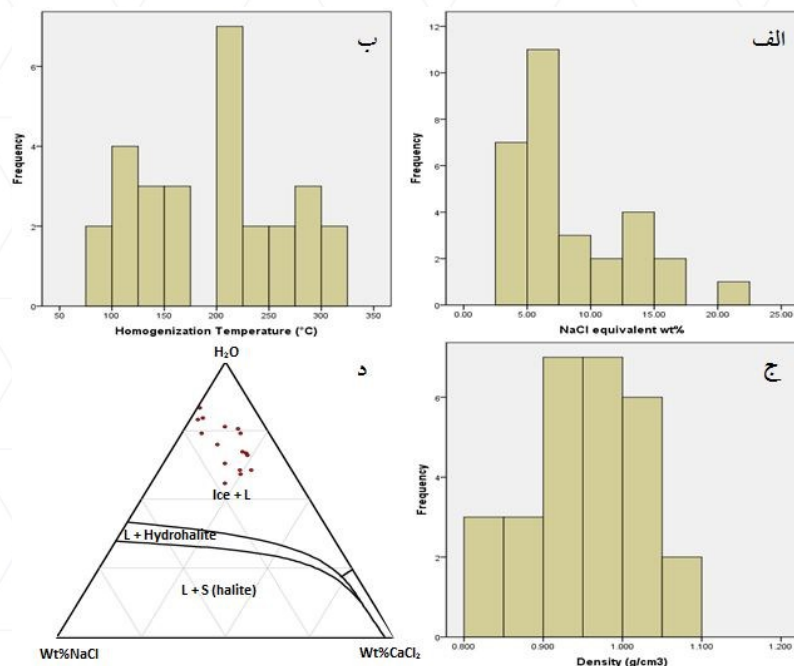


شکل ۳ انواع میانبارهای سیال کانسار سلسیت قلع‌بلند. الف و ب) میانبارهای سیال اولیه غنی از مایع (L+V)، ج) میانبارهای سیال ثانویه و د) پدیده باریک‌شدگی در میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه.

اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی بر روی میانبارهای سیال اولیه غنی از مایع (L+V) انجام گردید. با استفاده از روش انجماد، دمای ذوب آخرین بلور یخ (Tm ice) از ۱۸/۸- تا ۳/۵- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. شوری این میانبارها از ۵/۷۱ تا ۲۱/۵۴ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد. شکل ۴ الف، نمودار ستونی شوری میانبارهای سیال کانسار سلسیت قلع‌بلند را نشان می‌دهد. بیشترین فراوانی شوری در حدود ۵ تا ۷/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است. حداکثر شوری سیال کانی‌ساز معادل ۲۱/۵۴ درصد وزنی معادل نمک طعام است. نتایج مطالعات ریزدماسنجی نشان می‌دهد که محدوده دمای همگن‌شدن میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه بین ۸۶ تا ۳۰۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. بر این اساس، دو فاز اصلی کانی‌سازی، یکی در محدوده دمای ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و دیگری ۲۰۰ تا ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد رخ داده است (شکل ۴ ب). چگالی میانبارهای سیال از ۰/۸۰۰ تا ۱/۰۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است. نمودار ستونی چگالی، فراوانی مشخصی را نشان نمی‌دهد (شکل ۴ ج).

شوری میانبارهای سیال، اغلب بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه می‌شود و این موضوع به‌ویژه وقتی دمای ذوب اولین بلور یخ (T_{FM}) بیشتر از ۲۰/۸- درجه سانتی‌گراد است نشان می‌دهد که سدیم کلرید تنها نمک موجود در سیال است. اضافه‌شدن نمک‌های دیگر به سیستم H₂O-NaCl می‌تواند نقطه ذوب اولین بلور یخ را کاهش دهد. نمک‌های کلسیم و منیزیم، دو ترکیب مهمی هستند که اغلب در سیالات کانی‌ساز یافت شده و خصوصیات مشابهی نیز دارند و به همین دلیل برای بررسی ترکیب شیمیایی سیال کانی‌ساز در منطقه مورد مطالعه از نمودار سه‌تایی سیستم H₂O-NaCl-CaCl₂ (Shepherd et al., 1985) و مدل عددی ارائه شده توسط استیل - مک‌اینیس و همکاران (Steele-MacInnis et al., 2010) استفاده شد (شکل ۴ د). دمای ذوب هیدروهالیت در ۱۶ میانبار سیال بین ۲۲- تا ۳۰- درجه سانتی‌گراد متغیر است که براساس محاسبات انجام شده (شکل ۴ د) مقدار CaCl₂ بین ۰/۳ تا ۱۰/۹۹ درصد وزنی متغیر است. درصد وزنی NaCl+CaCl₂ در این میانبارها بین ۶/۶۵ تا ۱۶/۳۵ و نسبت NaCl/(NaCl+CaCl₂) بین ۰/۰۳ تا ۰/۹۵ متغیر است که نشان دهنده اهمیت سیالات کلسیم (و منیزیم) دار

در تشکیل این کانسار است.



شکل ۴ نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال کانسار سلسیت قلع‌بلند. الف) نمودار ستونی شوری میانبارهای سیال، ب) نمودار ستونی دمای همگن شدن میانبارهای سیال، ج) نمودار ستونی چگالی میانبارهای سیال و د) نمودار سه‌تایی سیستم H₂O-NaCl-CaCl₂ (Shepherd et al., 1985) که ترکیب شیمیایی سیال کانی‌ساز در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

کانی‌سازی سلسیت منطقه قلع‌بلند ورامین در سازند قم متعلق به الیگومیوسن تشکیل شده است. الیگومیوسن در شمال ایران مرکزی عمدتاً با محیط‌های کم‌عمق دریایی مشخص می‌شود و در برخی از افق‌ها کانی‌های سولفاتی رسوبی- دیاژنتیکی، به‌ویژه سلسیت نهشته می‌شود. کانی‌سازی از نوع هم‌شیب و به موازات لایه‌های رسوبی سازند قم از نوع مارن و سنگ‌آهک مارنی رخ داده است. مطالعات پتروگرافی حاکی از وجود بافت‌های اولیه رسوبی، دیاژنتزی و دیرزاد است. این بافت‌ها شامل بافت‌های لایه‌ای، افشان، دانه‌ای، نواری، پرکننده فضای خالی، رگه‌ای و ریتمیک می‌باشند. لایه‌های حاوی سلسیت از بلورهای سلسیت دانه‌ریز تا دانه‌درشت با مورفولوژی‌های متغیر در یک ماتریس کربناته تشکیل شده‌اند.

از نظر منشاء، میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه به سه نوع اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب تقسیم می‌شوند. مطالعات پتروگرافی نشان داد که بیشتر میانبارهای سیال موجود در کانی سلسیت از نوع غنی از مایع بوده و حاوی دو فاز مایع و گاز (L+V) می‌باشند. اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی بر روی این میانبارها نشان داد دمای ذوب آخرین بلور یخ از ۱۸/۸- تا ۳/۵- درجه سانتی‌گراد متغیر است. شوری این میانبارها از ۵/۷۱ تا ۲۱/۵۴ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد و بیشترین فراوانی شوری در حدود ۵ تا ۷/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است. محدوده دمای همگن شدن میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه بین ۸۶ تا ۳۰۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و دو فاز اصلی کانی‌سازی، یکی در محدوده دمای ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و دیگری ۲۰۰ تا ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد شناسایی شد. بررسی نتایج ریزدماسنجی در نمودار سه‌تایی سیستم H₂O-NaCl-CaCl₂ نشان داد که مقدار CaCl₂ سیال بین ۰/۳ تا ۱۰/۹۹ درصد وزنی و نسبت NaCl/(NaCl+CaCl₂) بین ۰/۰۳ تا ۰/۹۵ متغیر است، که نشان دهنده اهمیت سیالات کلسیم (و منیزیم) دار در تشکیل این کانسار می‌باشد.

شواهد صحرایی، کانی‌شناختی، ساخت و بافت و ریزدماسنجی نشان می‌دهد که کانسار سلسیت قلع‌بلند با توجه به

ویژگی‌های رخساره‌ای سنگ‌های میزبان، در محیط‌های کم عمق تبخیری نهشته شده‌اند. احتمالاً شورابه‌های سبخایی در مرحله کانی‌سازی هم‌زاد (سین‌ژنتیک) و شورابه‌های درون‌سازندی در مرحله کانی‌سازی دیاژنتیک و دیرزاد (اپی‌ژنتیک) نقش داشته‌اند.

۵- مراجع

- آقاباتی، س، ع.، (۱۳۸۵)، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- دانیالی، ن.، مقدسی، س.ج.، ۱۴۰۳. زمین‌شناسی و پتروگرافی کانی‌سازی سلسیت قلعه‌بلند در منطقه پیشوای ورامین. نهمین همایش ملی انجمن رسوب‌شناسی ایران، ژئوپارک جهانی طبس، طبس، ایران.
- سپه‌وند، ع.، مغفوری، س.، موسیوند، ف.، ۱۴۰۳. زمین‌شناسی، جایگاه چینه‌ای، کانه‌زایی و کانی‌شناسی ماده معدنی در کانسار سلسیتین ابردژ، جنوب‌شرق ورامین. شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- صادقی، ا.، فنودی، م.، ۱۳۸۵. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورامین. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران
- Dill, H. G. 2010. The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*: 100, 1–420.
- Ehya, F., Shakouri, B., Rafi M., 2013. Geology, mineralogy, and isotope (Sr, S) geochemistry of the Likak celestite deposit, SW Iran. *Carbonates Evaporites*: 28, 419–431.
- Steele-MacInnis, M., Bodnar, R.J., Naden, J., 2010. Numerical model to determine the composition of H₂O-NaCl-CaCl₂ fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*: 98, 223-231.
- Hashempour, S.S., Maghfouri, S., Rastad, E., 2025. Metallogeny of celestite deposits in Iran; implications for future explorations. *Ore Geology Reviews*, 184, 106735.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, New York. 239 pp.
- Yermakov, N.P., 1965. Research on the nature of mineral-forming solutions. Translated by V. P. Sokoloff and edited by E. Roedder. Permagon Press, Oxford, 743 pp.

کانی‌شناسی و شیمی کانی تورمالین در لوکोगرانیت شاولی (شمال ازنا، استان لرستان)

اسماعیل درویشی^{۱*}، سیدوحید شاهرخی^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، واحد الیگودرز، دانشگاه آزاد اسلامی، الیگودرز، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

*Corresponding Author, Email: Esmail.Darvishi@iau.ac.ir

چکیده

تورمالین به عنوان یک کانی فرعی در لوکोगرانیت‌های شاولی واقع در شمال ازنا حضور دارد که این توده‌ها بخشی از پهنه زمین‌ساختی سنندج-سیرجان را تشکیل می‌دهند. از نظر خاستگاه، سه نوع تورمالین شامل تورمالین‌های اولیه، ثانویه و حدواسط در این توده‌ها قابل تشخیص است. تورمالین‌های اولیه که نشان‌دهنده غنی بودن خاستگاه ماگما از عنصر بور (B) هستند، عمدتاً در زمینه لوکोगرانیت‌ها مشاهده می‌شوند. نوع دوم تورمالین‌ها در مراحل پس از تبلور ماگما و طی فرایندهای هیدروترمال، تحت تأثیر نفوذ محلول‌های غنی از بور تشکیل شده‌اند. افزون بر این، نوع سوم از تورمالین‌ها نیز وجود دارد که از نظر ویژگی‌ها حدواسط بین تورمالین‌های ماگمایی و هیدروترمال به شمار می‌روند. تورمالین‌ها اغلب بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار بوده، دارای اندازه متوسط تا درشت هستند و ترکیب آن‌ها در گستره شورلیت-دراویت قرار می‌گیرد؛ از این‌رو در گروه تورمالین‌های قلیایی طبقه‌بندی می‌شوند. بر اساس ترکیب شیمیایی، تورمالین‌ها (شورلیت و دراویت) به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: تورمالین‌های ماگمایی با نسبت بالای $Fe/(Fe+Mg)$ و مقدار بالای Al، و تورمالین‌های هیدروترمال با $Fe\#$ پایین‌تر. بررسی شیمی کانی‌های گارنت و تورمالین نشان‌دهنده S-type بودن ماگمای لوکोगرانیت‌های منطقه شاولی است.

کلیدواژه‌ها: تورمالین، لوکोगرانیت، کانی‌شناسی، شاولی، ازنا.

Mineralogy and Mineralchemistry of Tourmaline in Shavali leucogranite (North Azna, Lorestan Province)

Esmail Darvishi¹; Seyed Vahid Shahrokhi²

¹ Department of Geology, Aligudarz Branch, Islamic Azad University, Aligudarz, Iran

² Department of Geology, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

*Corresponding Author, Email: Esmail.Darvishi@iau.ac.ir

Abstract

Tourmaline occurs as an accessory mineral in the Shavali leucogranites located north of Azna, within the Sanandaj-Sirjan tectonic zone. Based on textural relationships and paragenesis, three generations of tourmaline are distinguished: primary, secondary, and transitional types. Primary (magmatic) tourmalines, which reflect a boron-rich magma source, are predominantly distributed within the leucogranitic matrix. Secondary tourmalines formed during post-magmatic stages through hydrothermal processes, associated with the infiltration of B-rich fluids. In addition, a third group of tourmalines exhibits intermediate characteristics between magmatic and hydrothermal origins. The tourmalines are mostly anhedral to subhedral, medium- to coarse-grained, and chemically range from schorl to dravite, belonging to the alkali tourmaline group. Geochemically, the tourmalines (schorl-dravite) can be classified into two distinct groups: magmatic tourmalines characterized by high $Fe/(Fe+Mg)$ ratios and elevated Al contents, and hydrothermal tourmalines with relatively low $Fe\#$. The chemical compositions of tourmaline and associated garnet minerals indicate an S-type affinity for the parental magma of the Shavali leucogranites.

Keywords: Tourmaline, Leucogranite, Mineralogy, Shavali, Azna.

۱- مقدمه

لوپکوگرانیت‌های پرآلمین شاخص پهنه‌های کوهزایی بوده و حاوی تورمالین می‌باشند (Clemens and Wall, 1981; Guo et al., 2017). تورمالین کانی رایج و فرعی انواع سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی است و به عنوان یک کانی ماگمایی اولیه و گاهی گرمابی در سنگ‌های گرانیتی و پگماتیستی متبلور می‌شود (Slack et al, 1996). این کانی به دلیل پایداری در گستره وسیعی از تغییرات دما، فشار و ترکیب شیمیایی پیچیده و متنوع، در بررسی‌های سنگ‌شناسی از اهمیت خاصی برخوردار است (London and Maning, 1995; Speer, 2016; Baxter et al, 2017). کانی تورمالین دارای ساختار کانیایی پیچیده و ترکیب شیمیایی متنوع بوده و همین امر باعث شده تا در طیف گسترده‌ای از تغییرات نظیر فشار، دما مقاوم باشد. همین تنوع ترکیبی باعث گردیده که کانی تورمالین در پی جویی کانسارهای نظیر قلع و تنگستن و در بررسی‌های سنگ‌شناسی و متالورژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد (London and Maning, 1995). هدف از این مقاله استفاده از ویژگی‌های کانی‌شناسی و شیمی در لوکوگرانیت شاولی به منظور تعیین نوع و شرایط تشکیل این کانی می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

پس از انجام مطالعات صحرایی، آزمایشگاهی و میکروسکوپی از کلیه رخنمون‌های سنگ‌های منطقه و برداشت بیش از ۲۰۰ نمونه، تعداد یکصد و بیست مقاطع نازک تهیه و مطالعات دقیق کانی‌شناسی و روابط بافتی به کمک میکروسکوپ پلاریزان (Olympus) انجام شده و سپس ۱۰ نقطه از ۵ مقطع جهت انجام تجزیه الکترونی انتخاب گردید. تعیین ترکیب و مقادیر اکسیدهای کانی تورمالین با استفاده از دستگاه تجزیه الکترونی (الکترون مایکروپروب) مدل Cameca Sx-50 با ولتاژ شتاب دهنده 20 KeV (کیلو الکترون ولت) و شدت جریان 20 nA (نانو آمپر) در دانشگاه دولتی مسکو کشور روسیه به روش آنالیز نقطه‌ای صورت گرفت (جدول ۱). محاسبه فرمول ساختاری بر پایه ۳۱ آنیون (O, OH) و آهن کل دوزلفیتی انجام شد. سرانجام جهت محاسبه فرمول ساختاری تورمالین و ترسیم نمودارها از نرم افزارهای Minpet, Mineral structural formulae, excel استفاده گردید.

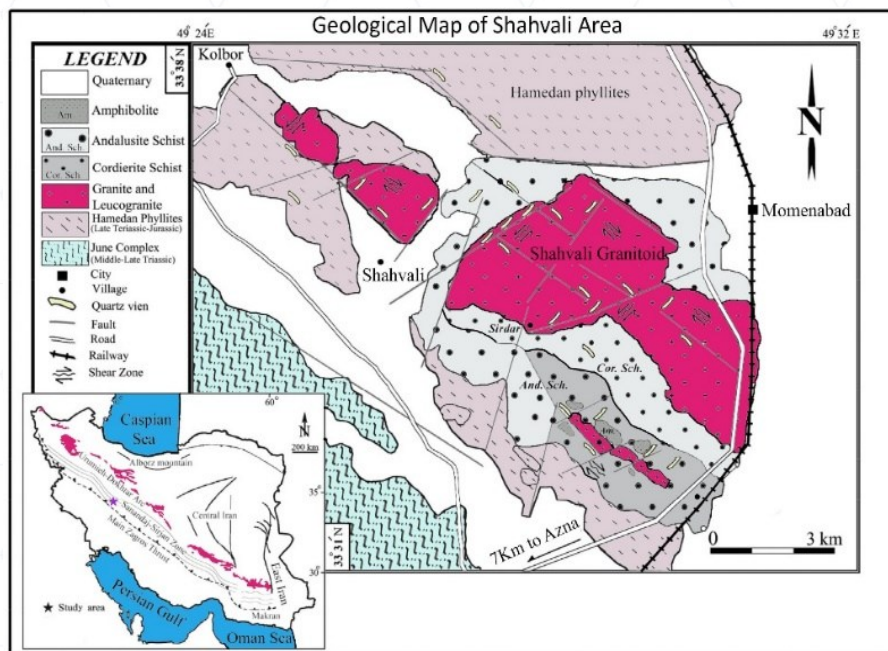
۳- بحث

۳-۱-زمین‌شناسی

ناحیه شاولی در محدوده‌ی بین عرض جغرافیایی ۳۱° ۳۳' تا ۳۳° ۳۸' شمالی و طول جغرافیایی ۴۹° ۲۴' تا ۴۹° ۳۲' شرقی، در ۷ کیلومتری شمال ازنا، استان لرستان در جنوب محدوده نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شازند (سهندی و همکاران، ۱۳۸۵) و در نوار دگرگونی سهندج-سیرجان واقع شده است (شکل ۱). پهنه زمین ساختی سهندج-سیرجان به صورت یک نوار کشیده با ۱۵۰۰ کیلومتر طول و ۲۰۰ کیلومتر عرض با روند شمال غرب-جنوب شرق، شامل مجموعه‌ای از واحدهای رسوبی-ماگمایی است (Sheikholeslami et al., 2008). توده‌ی لوکوگرانیتی شمال ازنا تقریباً به موازات برگوارگی سنگ میزبان (آندالوزیت - میکاشیست) نفوذ کرده که این ویژگی می‌تواند یکی از دلایل سین-تکتونیک بودن توده‌ی گرانیتوئیدی باشد. تورمالین، فراوان‌ترین کانی فرعی در این لوکوگرانیت‌ها است که در نمونه دستی به صورت درشت بلورهایی به رنگ سیاه دیده می‌شود. همچنین پیرامون هاله مجاورتی توده اصلی مرزبان (آندالوزیت و کردیریت شیست) گستره‌ای از لوکوگرانیت‌های تورمالین‌دار، آپلیت‌ها و پگماتیت‌ها، میگماتیت‌ها و میلونیت‌ها رخنمون دارند. مرزبندی بین دو دگرگونی با توجه به شواهد بافتی و تغییرات کانی‌شناسی صورت گرفته است. دگرگونی ناحیه‌ای شامل اسلیت‌ها و فیلیت‌ها می‌باشد که تغییرات بافتی محسوسی را نشان نمی‌دهند.

جدول ۱: نتایج آنالیز مایکروپروب کانی تورمالین موجود در سنگ‌های گرانیتی منطقه شاولی

Sample	M-40	M-40	M-40	M-40	M-40	M-40	S-20	S-20	S-20	S-20
Mineral	Tur	Tur	Tur	Tur	Tru	Tur	Tur	Tur	Tur	Tur
SiO ₂	35.83	36.28	36.11	35.92	36.12	36.28	35.95	36.15	35.2	35.17
TiO ₂	0.94	0.69	0.92	0.85	1.02	0.99	1.10	0.97	1	0.99
Al ₂ O ₃	34.91	35.31	35.5	35.1	34.62	35.22	34.86	35.42	35.1	35.35
FeO _t	8.77	7.59	7.89	8.9	10.09	10.56	9.98	10.76	11	10.98
MnO	-	-	-	-	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	4.67	5.04	4.88	4.55	3.95	3.20	3.17	3.1	2.9	2.05
CaO	0.27	0.19	0.17	0.22	0.29	0.15	0.18	0.12	0.15	0.14
Na ₂ O	2	2.01	1.92	2	1.95	1.99	1.92	2	1.9	1.95
K ₂ O	0.06	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Total	87.47	87.15	87.44	87.59	88.07	88.45	88.12	88.58	87.31	87.09
O	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Si	5.76	5.81	5.77	5.79	5.819	5.82	5.83	5.83	5.75	5.79
Ti	0.11	0.08	0.11	0.09	0.124	0.119	0.134	0.118	0.123	0.121
Al	6.62	6.68	6.69	6.67	6.57	6.659	6.66	6.68	6.76	6.72
Fe ⁽²⁺⁾	1.13	1.1	1.10	1.14	1.36	1.42	1.35	1.43	1.50	1.48
Mn	-	-	-	-	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Mg	1.11	1.20	1.17	1.08	0.94	0.76	0.76	0.75	0.706	0.72
Ca	0.05	0.03	0.03	0.04	0.050	0.026	0.031	0.025	0.026	0.026
Na	0.63	0.63	0.6	0.62	0.61	0.619	0.603	0.6	0.6	0.6
K	0.12	0.008	0.01	0.11	0.008	0.010	0.010	0.01	0.010	0.01
Xsite	0.712	0.629	0.611	0.705	0.625	0.598	0.585	0.581	0.550	0.56
Xvac	0.2	0.332	0.36	0.25	0.332	0.345	0.356	0.348	0.361	0.355
Mg/Mg+Fe	0.49	0.51	0.5	0.48	0.41	0.35	0.36	0.34	0.34	0.34
Fe/Fe+Mg	0.50	0.48	0.49	0.525	0.53	0.65	0.64	0.66	0.7	0.68



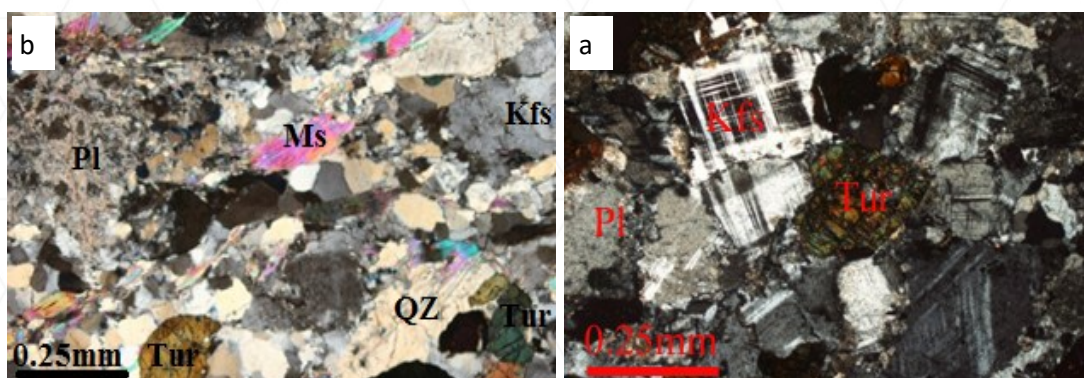
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ناحیه شاولی برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شازند (سهندی و همکاران، ۱۳۸۵) همراه با اندکی

تغییر.

۳-۲- کانی‌شناسی

از نظر ترکیب کانی‌شناسی، کانی‌های اصلی لوکوگرانیت‌ها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم بیوتیت و کانی‌های فرعی شامل تورمالین، موسکویت و گارنت است. براساس مطالعات پتروگرافی بافت اصلی این سنگ‌ها گرانولار است که دانه‌ها از هم بعد دانه تا سری‌ایت تغییر می‌کند و مرز بین دانه‌ها پلی‌گونال تا اینترلوبیت می‌باشد. کوارتزها در اندازه‌های مختلف قابل رؤیت و اکثراً دارای خاموشی موجی وصله‌ای و صفحه شطرنجی می‌باشند. پلاژیوکلازها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و دارای ماکل آلبیت و آلبیت پریکلین هستند. همچنین، این کانی به صورت درشت بلورهای پورفایر و کلاست تا ریزدانه‌های بازتبلور یافته دیده می‌شود. فلدسپار پتاسیم به صورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل در اندازه‌های بزرگ تا ریز بلور و برخی مواقع به صورت میکروکلین پرتیتی دیده می‌شود. تورمالین‌ها در ابعاد درشت تا متوسط، در مقطع طولی بدون شکل ولی در مقطع عرضی شکل‌دار و نیمه شکل‌دار دیده می‌شوند. این کانی چند رنگی معکوس سبز-آبی تا کرم و اینترفرانس درجه بالا دارد (شکل ۶). بر پایه مطالعات پتروگرافی متنوع‌ترین کانی فرومینیزین موجود در لوکوگرانیت‌های شاولی تورمالین است که به اشکال مختلف نودول، پراکنده، سوزنی، تجمعی و برشی مشاهده می‌گردد.

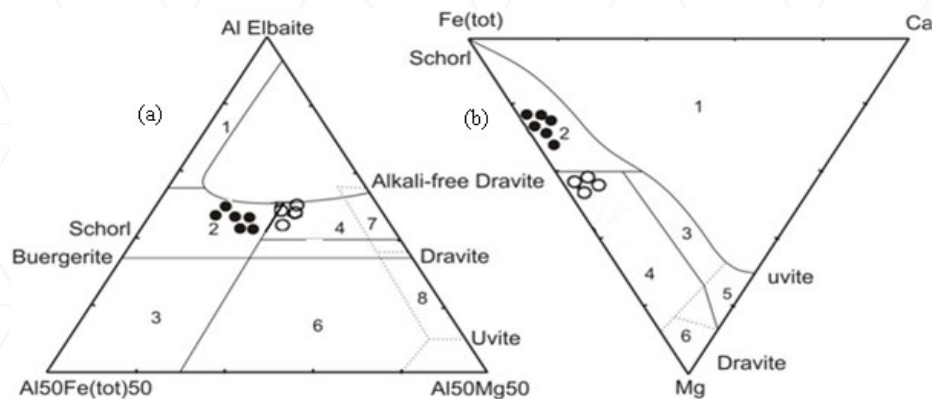
این کانی در نور طبیعی دارای پلئوکروئیسم سبز متمایل به سیاه (سبز لجنی) تا قهوه‌ای بوده و به‌صورت رگه‌ای و یا همراه با کانی‌های حاصل از دگرسانی دیده نمی‌شود. سه نوع تورمالین به‌صورت اولیه، ثانویه و حدواسط در سنگ‌های مورد تحقیق شناسایی شد. تورمالین‌های اولیه (ماگمایی) که نشانه بارز غنی بودن خاستگاه آنها از B است (London and Maning, 1995) و اکثراً در متن توده‌های لوکوگرانیت‌های منطقه مشاهده می‌شوند، نوع دوم تورمالین‌هایی که در مراحل بعد از تبلور ماگما و در مراحل هیدروترمال و تحت تأثیر نفوذ محلول‌های سرشار از بور به‌وجود آمده است. این نوع از تورمالین‌ها به ویژه در حاشیه توده نفوذی بیشتر از مرکز توده است (شکل ۲-ا). در مقاطع میکروسکوپی نیز به صورت رگه‌های نازک و پراکنده و گاه به‌صورت جانشینی در درون کانی‌های پلاژیوکلاز و به‌ویژه فلدسپار پتاسیم دیده می‌شود. همچنین نوع سوم از تورمالین‌ها نیز وجود دارد که در واقع حدواسط ماگمایی و هیدروترمال است (شکل ۲-ب). تورمالین‌هایی که در مطالعات صحرایی و میکروسکوپی حالتی جهت دارد از خود به نمایش می‌گذارد به احتمال بسیار زیاد بعد از تبلور و انجماد ماگما در اثر تحمل استرس حاصل از نیروهای تکتونیکی جهت‌دار فابریک‌های میلونیتی مانند بافت دومینو در آنها ایجاد شده است. همچنین، شکل‌دار بودن برخی از آنها بیانگر تشکیل در مراحل اولیه و احتمالاً قبل از تبلور کوارتز است که دلالت بر نوع ماگمایی آنها دارد (Pesquera et al., 2013).



شکل ۲-ا: تورمالین‌های تجمعی همراه با میکروکلین ماگمایی با ماکل مشبک در لوکوگرانیت‌های شاولی (تصویر XPL). b: تورمالین بصورت پراکنده همراه با موسکویت در لوکوگرانیت‌ها (تصویر XPL).

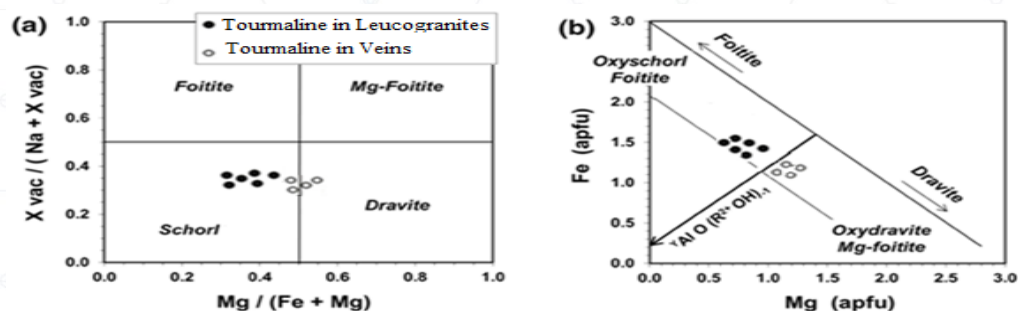
۳-۳- شیمی کانی

فرمول پایه تورمالین به صورت $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$ است (London and Maning, 1995) و در ساختار آن حداقل ۱۲ عنصر فرعی و کمیاب جانشین می‌شوند. بر اساس نمودار $Mg/(Mg+Fe)$ در مقابل $X-vac/(X-vac+Na)$ و Fe در مقابل Mg تورمالین‌های منطقه مورد تحقیق به طور عمده‌ای از نوع شورل می‌باشد (شکل ۳). تورمالین‌های مورد مطالعه براساس نمودار $Xvac/(Na + Xvac)$ در مقابل $Mg/(Fe + Mg)$ در محدوده شورلیت تا دراویت قرار دارند که حاکی از زیاد بودن مقدار آهن در مقایسه با منیزیم در ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه است (شکل ۳). در این نمودار سنگ منشأ تورمالین‌ها در قلمرو متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های هم‌زیست با یک فاز اشباع از آلومینیم قرار می‌گیرند (شکل ۳). مقدار Ti در تورمالین‌های شاولی بین ۰/۰۸ تا ۰/۱۴ و مقدار $Mg^\#$ بین ۰/۳۵ تا ۰/۵۱ می‌باشد و میزان تغییرات این ارقام نیز جزئی است (جدول ۱). مقادیر پایین این عناصر نشانگر عدم زونینگ و ترکیب تقریباً هموزن و ماگمایی بودن تورمالین‌های مورد بحث است (London, 2011). همچنین با توجه به مقدار کم تیتانیوم ($Ti = 0.01-0.15$) و نیز $Mg^\# (0.19-0.50)$ که توسط Ribeiro da Costa et al (۲۰۱۴) برای تورمالین‌های گرانیتهای دو میکابی نوع S گزارش شده است، می‌تواند به خوبی دلالت بر S تایپ بودن ماگمای گرانیته شاولی داشته باشد.



شکل ۳- (a) قرارگیری تورمالین‌های منطقه شاولی در محدوده شورلیت تا دراویت در نمودار $Xvac/(Na + Xvac)$ در مقابل $Mg/(Fe + Mg)$ و (b) در نمودار Fe در مقابل Mg .

ترسیم تورمالین‌های منطقه مورد تحقیق در گستره ۴ نمودارهای سه‌تایی $Ca-Fe-Mg$ و $Al-Fe_{50}-Mg_{50}$ (شکل ۴) (Henry and Guiditti, 1985)، بیانگر آنست که بر (B) مورد نیاز تورمالین‌های مورد مطالعه احتمالاً از متاپلیت و پسامیت‌های منطقه شاولی (فیلیت‌های همدان؟) تامین شده است.



شکل ۴- موقعیت تورمالین‌های منطقه شاولی بر روی نمودارهای سه‌تایی (a) $Al-Fe-Mg$ و (b) $Ca-Fe-Mg$ (Henry and Guiditti, 1985)؛ (۲-) گرانیتهای فقیر از لیتیم، پگماتیت‌ها و آپلیت‌های وابسته به آنها، ۴- متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های هم‌زیست با یک فاز اشباع از آلومینیم.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی شیمی کانی‌های سنگ‌های گرانیتی شاولی نشان می‌دهد که تورمالین‌های منطقه در محدوده شورلیت تا دراویت قرار دارند که حاکی از زیاد بودن مقدار آهن در مقایسه با منیزیم در ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه است و با توجه به مقدار $\#Fe$ تورمالین‌های منطقه ($0/48 - 0/7$) در یک سیستم ماگمایی با نسبت بالای $Fe/Fe+Mg$ و Al و هیدروترمالی با $\#Fe$ پایین رده‌بندی می‌شوند. و نیز مقدار کم تیتان در تورمالین‌های منطقه می‌تواند به خوبی دلالت بر S تایپ بودن ماگمای گرانیت شاولی داشته باشد. وجود تورمالین ماگمایی دلالت بر پرآلومینه لوکوگرانیت‌های منطقه دارد.

۵- مراجع

- سهندی، م، ا، رادفر، ج، حسینی دوست، محجل، م، ۱۹۸۵. نقشه زمین‌شناسی سازند به مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰.
- Baxter, E.F. Caddick, M.J., Dragovic, B., 2017. Garnet: A Rock-Forming Mineral Petrochronometer, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 83, 469–533.
- Clemens, J.D., Wall, V.J., 1981. Origin and crystallization of some peraluminous (S-type) granitic magmas, *Canadian Mineralogist* 19, 111-131.
- Henry, D.J. and Guiditti, C.V., 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite grade metapelites of NW-Marine. *American Mineralogist* 70, 1-15.
- London, D. and Manning, D., 1995. Chemical variation and significance of tourmaline from SW England. *Economic Geology* 495-519.
- London, D., 2011. Experimental synthesis and stability of tourmaline: a historical perspective. *The Canadian Mineralogy* 49, 117-136.
- Pesquera A, Torres-Ruiz J, Garcí'a-Casco A, Gil-Crespo P.P., 2013. Evaluating the controls on tourmaline formation in granitic systems: a case study on peraluminous granites from the Central Iberian Zone (CIZ), Western Spain, *Journal of Petrology* 54, 609-634.
- Ribeiro da Costa, I., Mourao, C., Re'cio, C., Guimara'es, F., Antunes, I.M., Farinha Ramos, J., Barriga, F.J.A.S., Palmer, M.R., Milton, J.A., 2014. Tourmaline occurrences within the Penamacor-Monsanto granitic pluton and host-rocks (Central Portugal): genetic implications of crystal-chemical and isotopic feature, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167, 979-993.
- Sheikholeslami, M.R., Pique, A., Mobayen, P., Sabzehei, M., Bellon, H. and Hashem Emami, M., 2008. Tectono-metamorphic evolution of the Neyriz metamorphic complex, Quri-Kor-e-Sefid area (Sanandaj-Sirjan Zone, SW Iran). *Journal of African Earth Sciences* 31, 504–521.
- Slack, J.F., 1996. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. *Review Mineralogy* 33, 559-643.

مطالعات کانی‌شناسی، دگرسانی و میانبارهای سیال رخداد کانه‌زایی ییلاق قره‌چی، شمال باختر

اهر، شمال باختر ایران

رزگار فرامرزی^{۱*}، صمد علیپور^۱، علی عابدینی^۱، زهره جبارزاده^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، پست الکترونیکی: Rz_63@yahoo.com

۲- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

چکیده

نشانه معدنی ییلاق قره‌چی به عنوان بخشی از کمربند فلزآیی ارسباران در ۲۵ کیلومتری شمال باختر اهر، استان آذربایجان شرقی، شمال باختر ایران واقع شده است. سنگ‌های درونگیر این نشانه شامل توده‌های نفوذی مرکب با ترکیب سنگ‌شناسی گرانیت، کوارتز مونزونیت، گرانودیوریت و دیوریت به سن الیگومیوسن می‌باشند. پهنه‌های دگرسانی در این منطقه به طور عمده شامل پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک، سیلیسی و کربناته هستند. پیریت کانی سولفیدی عمده درونزاد است که با کانی‌های مگنتیت، کالکوپیریت، مولیبدنیت، اسفالریت و گالن همراهی می‌شود. مهمترین کانی‌های برونزاد در این منطقه شامل هماتیت، گوتیت و لیمونیت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت و مالاکیت هستند که مجموعه کانی‌های درونزاد را همراهی می‌کنند. در بررسی محتویات درونی میانبارهای سیال، پنج نوع میانبار سیال شناسایی شد: تک فاز مایع (L)، تک فاز بخار (V)، دو فاز غنی از مایع (L+V)، دو فاز غنی از بخار (V+L) و چند فاز جامد (L+V+S). دمای همگن شدن میانبارهای سیال مورد بررسی در گستره ۱۹۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند و ذوب آخرین بلور یخ در میانبارهای سیال دو فاز و ذوب هالیت در میانبارهای سیال چند فاز نشان دهنده شوری ۰/۴ تا ۵۹/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از ریزدماسنجی میانبارهای سیال، جوشش دوره‌ای و رقیق‌شدگی توسط آب‌های زیرزمینی با منشأ جوی سازوکار اصلی در گسترش و تکامل این نشانه محسوب می‌شود. مشخصات و الگوی منطقه‌بندی دگرسانی، کانه‌زایی و میانبارهای سیال بیانگر این است که نشانه معدنی ییلاق قره‌چی دارای بیشترین شباهت با ذخایر مس پورفیری و رگه‌های چند فلزی مرتبط با آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی؛ دگرسانی؛ میانبارهای سیال؛ ییلاق قره‌چی؛ اهر.

Mineralogical, alteration and fluid inclusion studies of the mineralization index at Yeylaghe Gharachi, northwest of Ahar, NW Iran

R. Faramarzi^{1*}, S. Alipour¹, A. Abedini¹, Z. Jabarzadeh²

¹Geology Department, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran, Rz_63@yahoo.com

²Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz

Abstract

The mineralization index of Yeylaghe Gharachi, as part of Arasbaran metallogenic belt, is located ~25 km northwest of Ahar, East-Azarbaidjan Province, NW Iran. The host rocks of this index consist of composite intrusive rocks with lithologic compositions of granite, quartz monzonite, granodiorite and diorite of Oligocene and Oligo-Miocene age. The alteration zones in this area are mainly potassic, phyllic, argillic, propylitic, silicic and carbonate. Pyrite is the major hypogene sulfide mineral accompanied by magnetite, chalcopyrite, molybdenite, sphalerite and galena. The main supergene minerals in this area include hematite, goethite, limonite, bornite, chalcocite, covellite and malachite that accompany the hypogene mineral assemblage. In investigation the phase contents of fluid, five types of fluid inclusions have been recognized: mono-phase liquid (L), mono-phase vapor (V), liquid-rich two-phase (L+V), vapor-rich two-phase (V+L), and multiphase (L+V+S). Homogenization temperatures of the studied fluid inclusions vary from 190 to 530 °C. Considering the last ice-melting temperature of aqueous two-phase inclusions and halite melting temperature in the aqueous multiphase inclusions, the salinity range is between 0.4 to 59 wt.% NaCl equivalent. Based on the microthermometric results of fluid inclusions, it can be conceived that episodic boiling and dilution by underground water of meteoric origin were the main mechanisms in development and evolution of this index. The zonation pattern of the alteration, mineralization and fluid inclusion data indicate that the Yeylaghe Gharachi mineral index is the most similar to porphyry copper deposits and the associated metallic veins.

Keywords: Mineralization, Alteration, Fluid inclusions, Yeylaghe Gharachi, Ahar.

۱- مقدمه

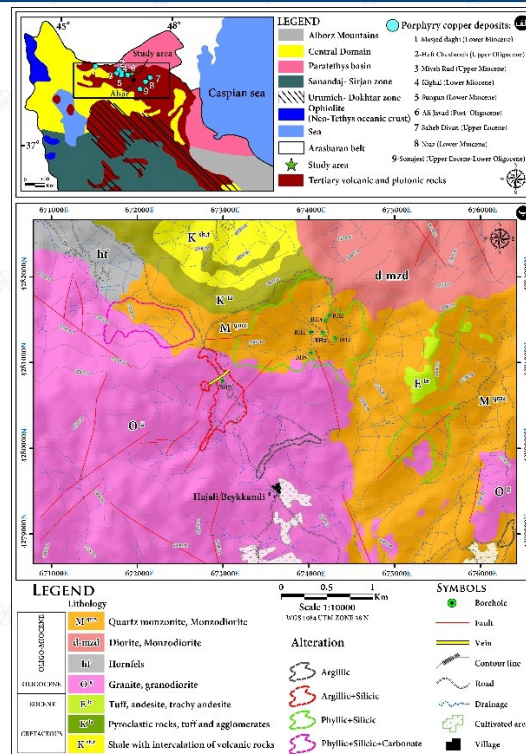
نشانه معدنی ییلاق قره‌چی به عنوان بخشی از کمربند مس پورفیری ارسباران با مختصات جغرافیایی $47^{\circ} 0' 7''$ طول خاوری و $38^{\circ} 39' 48''$ عرض شمالی در ۲۵ کیلومتری شمال باختر شهرستان اهر و ۹ کیلومتری خاور کانسار مس- طلا پورفیری علی‌جواد واقع شده است. بررسی‌های انجام شده بر روی این نشانه و مناطق پیرامون آن تنها شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان و کلیبر، حفر ترانشه و حفاری ۷ گمانه اکتشافی به روش مغزه‌گیری با مجموع مترای ۱۸۱۸ متر به عمق حد بیشینه ۴۶۱ متر توسط شرکت مهر اصل می‌باشد و اطلاعات جامع و دقیقی درباره ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌نگاری آن وجود ندارد. در پژوهش حاضر میانبارهای سیال موجود در رگه- رگچه‌های کوارتز- سولفیدی همراه با دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک و آرژیلیک مورد بررسی قرار گرفتند و بر اساس نتایج حاصل از مطالعات ریزدماسنجی آن‌ها، شرایط دما، فشار و ترکیب شیمیایی سیال ماگمایی- گرمابی مسئول کانه‌زایی و دگرسانی در طول عمر سیستم گرمابی بازسازی شد. در نهایت با استفاده از تلفیق نتایج حاصل از مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال و بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌نگاری، شرایط فیزیکو- شیمیایی، خاستگاه و روند تکامل سیالات گرمابی مسئول کانه‌زایی فلزات پایه مشخص شد.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه میانبارهای سیال، تعداد ۲۰ عدد نمونه از رگه- رگچه‌های سطحی و عمقی کوارتز- سولفیدی پرکننده شکستگی‌ها و فضاهای خالی توده‌های نفوذی گرانودیوریتی، کوارتز مونزونیتی و دیوریتی دگرسان شده که کانی کوارتز مهم‌ترین همبرزاد با کانه‌زایی است، انتخاب گردید و مقطع دوبر صیقل آن‌ها با ضخامت حدودی ۱۰۰ میکرون تهیه شد. سپس با انجام بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری، تعداد ۱۰ مقطع جهت مطالعه ریزدماسنجی در آزمایشگاه دانشگاه پیام نور واحد تبریز انتخاب شدند. در این آزمایشگاه پارامترهای دمایی به کمک استیج مدل THMS600 گرم کننده و منجمد کننده لینکام که بر روی میکروسکوپ المپیوس BX60 نصب شده، مطالعه شدند. جهت تنظیم دستگاه از استانداردهای نیترا سدیم با نقطه ذوب 308°C و تتراکلریدکربن با نقطه ذوب $22/99^{\circ}\text{C}$ استفاده شد.

۳- بحث

کمربند مس پورفیری ارسباران در شمال باختری ایران و بخش‌های مرکزی کمربند کوهزایی و فلزایی آلپ- هیمالیا واقع شده است (شکل ۱ الف و ب). این کمربند با عرض تقریبی ۸۰ کیلومتر و طولی بالغ بر ۴۰۰ کیلومتر، از سنگ‌های رسوبی- آتشفشانی کرتاسه و توده‌های نفوذی سنوزوئیک تشکیل شده است. نفوذ طیف گسترده‌ای از توده‌های نفوذی با ماهیت و سن‌های متفاوت در طول ائوسن- میوسن (Simmonds et al., 2017; Castro et al., 2013) منجر به تشکیل دگرسانی‌های وسیع با کانه‌زایی مختلف از قبیل کانسارهای پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال در طول این کمربند شده است (آقازاده، ۱۳۸۸). در کمربند ارسباران فعالیت‌های ماگمایی با توده‌های نفوذی کالک- آلکالن به سن ائوسن پایانی آغاز شده (Hassanpour and Sohrabi., 2018) و با توده‌های نفوذی شوشونیتی به سن اولیگوسن پایانی- میوسن زیرین ادامه می‌یابد (Aghazadeh et al., 2011; Castro et al., 2013). میوسن پایانی در این کمربند با گنبدی‌های آداکیتی مشخص می‌شود (Aghazadeh et al., 2011). کانه‌زایی مس پورفیری در این کمربند اساساً با توده‌های نفوذی ائوسن میانی- میوسن زیرین همراه است و از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کانسارهای مس پورفیری سونگون، هفت چشمه، مسجد داغی، سوناجیل، صاحب‌دیوان، کیقال، نیاز و علی‌جواد اشاره کرد (شکل ۱ الف).



شکل ۱ الف) نقشه پهنه‌های ساختاری شمال باختر ایران (نبوی، ۱۳۵۵؛ Stocklin., 1968) و جایگاه کمربند مس پورفیری ارسباران بر آن (Aghazadeh et al., 2015، ب) نقشه زمین‌شناسی تهیه شده با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ برای منطقه ییلاق قره‌چی به همراه پروتزد پهنه‌های دگرسانی.

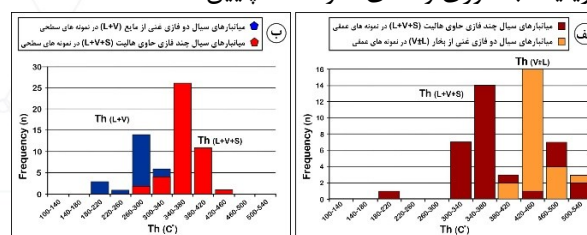
۳-۱ سنگ‌نگاری میانبارهای سیال

با توجه به حضور کانی کوارتز در انواع رگه- رگچه‌های حاوی کانه‌زایی سولفیدی فلزات پایه در پهنه دگرسانی‌های پتاسیک، فیلک و آرژیلیک منطقه ییلاق قره‌چی، نمونه‌های سطحی و عمقی از رگه-رگچه‌های سیلیسی با ضخامت متغیر ۰/۵ تا ۵۰ سانتی‌متر، جهت مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شدند و مشخصات سنگ‌نگاشتی میانبارهای سیال درون آن‌ها از قبیل شکل و اندازه، رده‌بندی زایشی (اولیه، ثانویه و شبه ثانویه)، نسبت حجمی سیال به بخار، شناسایی نوع کانی‌های نوزاد با توجه به شکل بلوری و با در نظر گرفتن دمای همگن شدن و حضور پدیده‌های تغییر ثانویه میانبارهای سیال بعد از به دام افتادن مانند نش و باریک شدگی مورد بررسی قرار گرفتند. در بررسی محتویات درونی میانبارهای سیال، پنج نوع شامل تک فاز مایع (L)، تک فاز بخار (V)، دو فاز غنی از مایع (L+V)، دو فاز غنی از بخار (V+L)، و میانبار سیال چند فاز (S+L+V) شناسایی شدند.

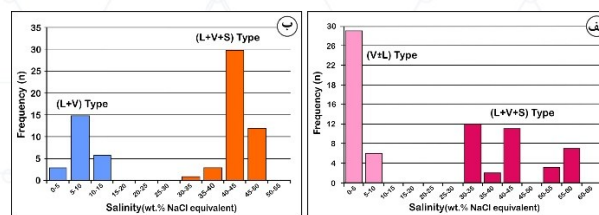
۳-۲ دمای همگن شدن و شوری نسبی

دمای همگن شدن میانبارهای سیال دو فاز غنی از بخار (V±L)، بین ۳۸۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده و با شوری ۰/۴ تا ۸/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام، اغلب به حالت بخار همگن شدند (شکل‌های ۲ الف و ۳ الف). در گروه میانبارهای سیال چند فاز (L+V+S)، دمای همگن شدن میانبارها از ۲۱۵ تا ۵۱۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است (شکل ۲ الف). محدوده شوری آن‌ها بین ۳۱/۸ تا ۵۹/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد (شکل ۳ الف) که با میزان شوری میانبارهای سیال کانسارهای پورفیری قابل قیاس است (Morales et al., 2002). در میانبارهای سیال چند فاز، فازهای نوزاد اصلی هالیت و سیلیت بوده که گاهی اوقات با مقادیر جزئی انیدریت، هماتیت و یک فاز کدر همراه می‌باشند. در نمونه‌های سطحی، میانبارهای سیال بیشتر از نوع دو فاز غنی از مایع (L+V) و چند فاز حاوی هالیت (L+V+H) بوده و برای آن‌ها دو گستره دمایی متفاوت قابل تشخیص است (شکل ۲ ب). گستره اول مربوط به میانبارهای سیال دو فاز غنی از مایع بوده که محدوده دمایی همگن شدن آن‌ها بین ۱۹۰ تا ۳۳۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در طول سرمایش محدوده دمای ذوب نهایی آخرین بلور یخ برای این میانبارها

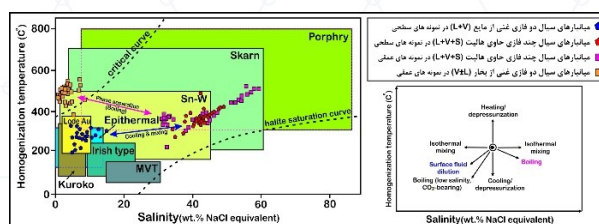
۳- تا ۱۱- سانتی گراد بدست آمده است که با استفاده از آن میزان شوری میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع ۴/۹۴ تا ۱۴/۹۸ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد (شکل ۳ ب). در گستره دمایی دوم، مجموعه میانبارهای سیال حاوی فاز نوزاد هالیت قرار می‌گیرند که دمای همگن شدن آن‌ها از ۲۷۱ تا ۴۶۰ درجه سانتی گراد متغیر است (شکل ۲ ب). به منظور تعیین تیپ نشانه معدنی ییلاق قره‌چی از نمودار دوتایی شوری در برابر دمای همگن شدن میانبارهای سیال (Wilkinson., 2001) استفاده شد (شکل ۴). تجزیه و تحلیل یافته‌ها نشان دهنده دو گروه جداگانه قابل تشخیص است که گروه اول، معرف سیالی با شوری بالا و دمای متوسط تا بالا است که این ویژگی در سیالات ماگمایی مسئول دگرسانی پتاسیک و فلیک کانسارهای پورفیری دیده می‌شود (Richards., 2011; Kouszmanov and Pokrovski., 2011; Wilkinson., 2001). گروه دوم، معرف سیالات جوی تشکیل دهنده کانسارهای اپی‌ترمال و رگه‌های پیرامونی مرتبط با کانسارهای مس پورفیری در دگرسانی آرژلیک درونزاد و مرز انتقالی دگرسانی فلیک به آرژلیک با شوری و دمای متوسط تا پایین است.



شکل ۲ الف) توزیع فراوانی دمای همگن شدن میانبارهای سیال مورد بررسی در نمونه‌های عمقی، و ب) سطحی به تفکیک نوع میانبار سیال.



شکل ۳ الف) توزیع فراوانی شوری میانبارهای سیال مورد بررسی در نمونه‌های عمقی، و ب) سطحی به تفکیک نوع میانبار سیال.

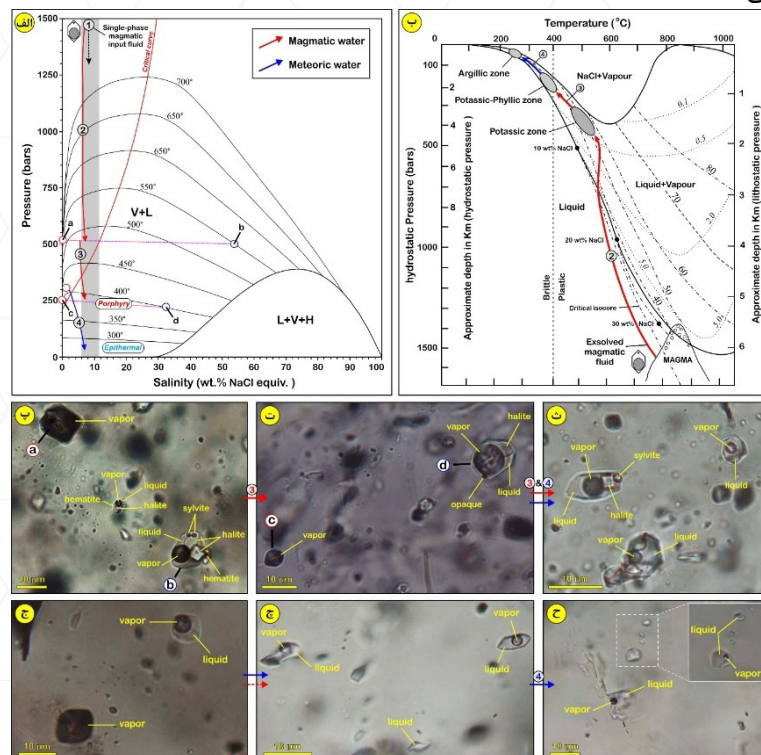


شکل ۴ الگوی توزیع و جایگاه میانبارهای سیال مورد بررسی در نمودار دو متغیره دمای همگن شدن در برابر شوری، همراه با مسیرهای نظری تغییرات شوری و دمای همگن شدن برای تعیین سازوکار تشکیل ذخایر مختلف فلزی (Wilkinson., 2001).

۳-۴ تکامل سیال گرمابی در کانه‌زایی بر اساس شواهد میانبارهای سیال

میانبارهای سیال موجود در رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفیدی مرتبط با دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک و آرژلیک، تکامل سیالات گرمابی در منطقه ییلاق قره‌چی را ثبت نموده‌اند، که به طور شماتیک مسیر تکامل احتمالی آن در شکل (۵ الف تا ج) ارائه شده است. در این اندیس سیال ماگمایی تک فاز صعودی در دمای ۵۳۰ درجه سانتی گراد با اولین رخداد جوشش به دو فاز غنی از بخار با شوری پایین و محلول غنی از نمک با شوری ۵۹ درصد وزنی معادل نمک طعام تفکیک شده است. فاز مایع از کلریدهای سدیم و پتاسیم غنی شده و باعث شوری ۵۹ درصد وزنی معادل نمک طعام شده است، در حالیکه فاز بخار با چگالی و شوری پایین شامل ترکیبات فرار اسیدی از جمله CO_2 ، SO_2 ، H_2S و HCl می‌باشد. فازهای سیال دارای شوری زیاد و غنی از بخار در میانبارهای سیال $\text{L-V-H}\pm\text{S}$ و $\text{V}\pm\text{L}\pm\text{H}$ به دام افتاده و با کاهش حلالیت فلزات و مواد محلول، کانه‌زایی پراکنده و رگچه‌ای کوارتز، پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت به صورت ناپیوسته با مرز نامنظم در بخش‌های میانی دگرسانی پتاسیک در

شرایط فشار لیتواستاتیک ۵۰۰ بار و عمق حدودی ۲ کیلومتر تشکیل داده‌اند. اولین جوشش در شرایط فشار لیتواستاتیک دگرسانی پتاسیک، باعث ناپایداری کمپلس کلریدی و ته‌نشینی سولفیدهای آهن و مس به صورت پراکنده و رگچه‌ای شده است. با کاهش تدریجی شوری و دمای سیال به زیر ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد، فشار از لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک تغییر یافته و باعث تغییر رفتار سیستم از خمیری به شکننده می‌شود. با این تغییر رفتار، فشار به طور ناگهانی کاهش یافته و با دومین رخداد جوشش و اختلاط اندک با آب‌های زیرزمینی با منشأ جوی در بازه دمایی بین ۴۲۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، مرحله اصلی کانه‌زایی پورفیری با ته‌نشست پیریت، کالکوپیریت، مولیبدنیت و اسفالریت با بافت رگه- رگچه‌ای متقاطع و پراکنده در مرز انتقالی دگرسانی پتاسیک به فیلیک و دگرسانی فیلیک با فشار هیدرواستاتیک ۱۲۵ تا ۲۵۰ بار و عمق معادل ۱/۲۵ تا ۲/۵ کیلومتر اتفاق افتاده است. دگرسانی آرژلیک درون‌زاد نیز در بازه دمایی ۱۹۰ تا ۳۳۷ درجه سانتی‌گراد از سیالی با شوری ۲ تا ۱۵ درصد وزنی معادل نمک طعام در فشار هیدرواستاتیک ۱۰۰ بار و عمق حدودی ۱ کیلومتری تشکیل شده است. چگالی سیالات مسئول کانه‌زایی و دگرسانی آرژلیک کمتر از ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده که در مقایسه با مقادیر بالاتر از ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای دگرسانی‌های پتاسیک و فیلیک، نشان دهنده اختلاط آن‌ها با آب‌های جوی و رقیق شدن سیالات مسئول این دگرسانی می‌باشد.



شکل ۵ الف) نمودار فشار- شوری، ب) نمودار فشار- دما- عمق در سیستم $H_2O-NaCl$ بر گرفته از مرجع (Sourirajan and Kennedy, 1962; Fournier, 1999; Wilkinson, 2001)، نمایش مسیر صعود سیالات ماگمایی- گرمابی (خطوط قرمز رنگ) و اختلاط آن با آب‌های جوی (خطوط آبی رنگ) در اندیس معدنی ییلاق قره‌چی به همراه انواع دگرسانی‌های ایجاد شده و پ تا ح) میانبارهای سیال به دام افتاده در طول مسیر تکامل.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از مطالعات سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری و ریز دماسنجی میانبارهای سیال موجود در رگه-رگچه‌های کوارتز- سولفیدی، تکامل گرمابی و شرایط فیزیکو-شیمیایی سیالات ماگمایی- گرمابی مسئول کانه‌زایی در نشانه معدنی ییلاق قره‌چی بازسازی شد. منطقه‌بندی دگرسانی، کانه‌زایی و میانبارهای سیال در گستره مورد مطالعه به صورت همراهی میانبارهای سیال غنی از فاز بخار با میانبارهای چند فازی با شوری بین ۳۱/۸ تا ۵۹/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام در رگه- رگچه‌های

کوارتز- سولفیدی حاوی کانه‌زایی مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت، مولیبدنیت و اسفالریت در دگرسانی پتاسیک و بازنهشت آن با دگرسانی فیلیک، همراهی میانبارهای دو فازی غنی از مایع با میانبارهای غنی از فاز بخار و چند فازی حاوی هالیت با شوری ۳۴/۱۷ تا ۴۸/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام در دگرسانی فیلیک انتقالی با کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای کوارتز، کلسیت، پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن و در نهایت، فراوانی میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع با شوری ۴/۹۴ تا ۱۴/۹۸ درصد وزنی معادل نمک طعام در رگه- رگچه‌ای کوارتز- سولفیدی موجود در دگرسانی آرژیلیک درونزاد، نشان دهنده این است که نشانه معدنی ییلاق‌قره‌چی دارای بیشترین شباهت با ذخایر مس پورفیری و رگه‌های چند فلزی پیرامون مرتبط با آن می‌باشد.

۵- مراجع

آقازاده م.، ۱۳۸۸. پترولوژی و ژئوشیمی گرانیتوئیدهای انزان، خان‌کندی و شیور داغ (شمال و شرق اهر، آذربایجان شرقی) با نگرشی بر کانی‌زایی وابسته، پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵. مقدمه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۱۱۰ صفحه.

- Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z., Vogt, K., 2011, Post-Collisional Polycyclic Plutonism from the Zagros Hinterland: The Shaivar Dagh Plutonic Complex, Alborz Belt, Iran, *Geological Magazine*, 148, 980-1008.
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z., Zhou, L., 2015, Temporal-Spatial Distribution and Tectonic Setting of Porphyry Copper Deposits in Iran: Constraints from Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Geochronology, *Ore Geology Reviews* 70, 385-406.
- Castro, A., Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z., Chichorro, M., 2013, Late Eocene-Oligocene Post-Collisional Monzonitic Intrusions from the Alborz Magmatic Belt, NW Iran. An Example of Monzonite Magma Generation from a Metasomatized Mantle Source, *Lithos* 180-181, 109-127.
- Fournier, R.O., 1999, Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment, *Economic Geology*, 94, 1193-1211.
- Hassanpour, S., Sohrabi, Gh., 2018, Major-trace elements geochemical characterization, geochronology and radiogenic isotopes of Eocene magmatic rocks in Anique, Qaradagh pluton, NW Iran, *Periodico di Mineralogia* 87, 173-191.
- Kouzmanov, K., Pokrovski, G.S., 2012, Hydrothermal Controls on Metal Distribution in Porphyry Cu (-Mo-Au) Systems, *Society of Economic Geologists, Special Publication* 16, 573-618.
- Morales, S.R., Both R.A., Golding S.D., 2002, A fluid inclusion and stable isotope study of the Moonta copper-gold deposits, South Australia: evidence for fluid immiscibility in a magmatic hydrothermal system, *Geology* 192, 211-226.
- Richards, J.P., 2011, Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins, *Ore Geology Reviews* 40, 1-26.
- Simmonds, V., Moazzen, M. Mathur, R., 2017, Constraining the timing of porphyry mineralization in northwest Iran in relation to Lesser Caucasus and Central Iran; Re-Os age data for Sungun porphyry Cu-Mo deposit, *International Geology Review*, 59, 1561-1574.
- Sourirajan, S., and Kennedy, G.C., 1962, The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures, *American Journal of Science*, 260, 115-141.
- Stocklin J., 1968, Structural history and tectonics of Iran; a review, *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 1229-1258.
- Wilkinson, J.J., 2001, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, *Lithos* 55, 229-272.

ارزیابی دولومیت های غنی از منیزیم شهرستان اردل

(استان چهارمحال و بختیاری)

خدیجه خلیلی^{۱*}، علی خسروی بختیاری^۲

۱- *استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. ۱۹۳۹۵-۴۶۹۷ khalilikhadijeh@pnu.ac.ir

۲- شرکت زمین کاوان بردین، پارک علم و فناوری

چکیده

شهرستان اردل واقع در بخش مرکزی استان چهارمحال و بختیاری، بخشی از رشته کوههای زاگرس می‌باشد که از نظر زمین‌شناسی، تکتونیکی و چینه‌شناسی از ویژگی‌های ساختاری و زمین‌شناسی زاگرس پیروی می‌کنند. این منطقه به دلیل حضور دولومیت های غنی از منیزیم اهمیت زمین شناسی و اقتصادی دارد. بررسی‌های صحرایی و نتایج حاصل از آنالیز XRF و XRD نمونه های آهکی در منطقه مورد مطالعه نشان داده است که در منطقه مورد مطالعه سنگ‌های آهکی از نوع کلسیت، کلسیت دولومیتی، دولومیت و دولومیت غنی از منیزیم می باشند. دولومیت‌هایی با میزان ($28 < \text{Mg} < 21.7 \text{ Wt } \%$) در دسته دولومیت‌های غنی از منیزیم تقسیم‌بندی گردید. شواهد صحرایی نشان می دهد که تمرکز آن ها در مجاورت گسل های اصلی بوده و تشکیل آنها بصورت اپی ژنتیک تحت تاثیر سیالات غنی از منیزیم صورت گرفته است. این دولومیت‌های شیری تا سفید رنگ به شکل توده‌ای و یا رگه‌ای سایر سنگ‌های آهکی منطقه را قطع نموده اند. بررسی عناصر اصلی این دولومیت ها بیانگر پتانسیل کاربرد دولومیت های منطقه در صنایع شیشه، سرامیک، داروسازی، کشاورزی و مصالح ساختمانی است. گرچه مقدار بالای SO_3 استفاده از آنها را در صنعت فولاد محدود می سازد. این مطالعه با بررسی شیمی دولومیت های غنی از منیزیم بر اهمیت اقتصادی این ذخایر تاکید می نماید.

کلیدواژه‌ها: دولومیت ، دولومیت های غنی از منیزیم، اردل، استان چهارمحال و بختیاری

Evaluation of magnesium-rich dolomites in Ardal City (Chaharmahal and Bakhtiari Province)

Khadijeh, Khalili^{1*}; Ali, Khosravi Bakhtiary²

¹ *1Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Payam Noor University, Tehran, Iran.
19395-4697 khalilikhadijeh@pnu.ac.ir

² Kavan Bardin Earth Company, Science and Technology Park

Abstract

Ardal County, located in the central part of Chaharmahal and Bakhtiari Province, is a part of the Zagros Mountains that follow the structural and geological characteristics of the Zagros in terms of geology, tectonics, and stratigraphy. This area is of geological and economic importance due to the presence of magnesium-rich dolomites. Field surveys and the results of XRF and XRD analysis of limestone samples in the study area have shown that the limestone rocks in the study area are calcite, dolomitic calcite, dolomite, and magnesium-rich dolomite. Dolomites with a content of ($28 < \text{Mg} < 21.7 \text{ Wt } \%$) were classified as magnesium-rich dolomites. Field evidence shows that they are concentrated in the vicinity of major faults and their formation was epigenetically influenced by magnesium-rich fluids. These milky to white dolomites are massive or veined and cut through other limestones in the region. The study of the main elements of these dolomites indicates the potential for the application of dolomites in the glass, ceramic, pharmaceutical, agricultural and construction materials industries. However, the high SO_3 content limits their use in the steel industry. This study, by examining the chemistry of Mg-dolomites, emphasizes the economic importance of these deposits.

Keywords: Dolomite, Magnesium-rich dolomites, Ardal, Chaharmahal and Bakhtiari Province,

مقدمه

شهرستان اردل واقع در بخش مرکزی استان چهارمحال و بختیاری، بخشی از رشته کوه‌های زاگرس می‌باشد که از نظر زمین‌شناسی، تکتونیک و چینه‌شناسی از ویژگی‌های ساختاری و زمین‌شناسی زاگرس پیروی می‌کنند. فعالیت‌های تکتونیک، به ویژه گسل‌های امتداد لغز و گسل‌های عادی، نقش مهمی در تکامل زمین‌شناسی این منطقه ایفا نموده است. فعالیت گسلی می‌تواند منجر به افزایش تخلخل و نفوذپذیری، فراهم کردن مسیر برای مهاجرت سیالات، و ایجاد گرادیان‌های فشاری و دمایی مناسب برای واکنش‌های دیاژنزی شود. بررسی‌های صحرایی در این منطقه نشان داده است که میزان قابل توجهی از دولومیت‌های غنی از منیزیم در نزدیکی گسل‌های اصلی و شکستگی‌های منطقه‌ای رخنمون داشته است. این امر نشان‌دهنده نقش سیالات غنی از منیزیم است که از طریق این ساختارهای گسلی به درون رسوبات کربناته نفوذ کرده و فرآیند دولومیتی شدن را تسهیل نموده‌اند. مطالعات قبلی در زاگرس نیز بر اهمیت کنترل زمین‌ساختی در فرآیند دولومیتی شدن تأکید نموده‌اند (Mohajjel *et al.*, 2023). دولومیت‌ها به دلیل اهمیت اقتصادی، پتروفیزیکی و نقش بالقوه آن‌ها در مخازن هیدروکربنی، همواره مورد توجه محققان بوده‌اند. در مناطق مختلف ایران، از جمله زاگرس، سازندهای دولومیتی نقش مهمی در ژئوتوریسم و ذخایر معدنی ایفا می‌کنند. مشکل اصلی در مطالعه این نهشته‌ها، تعیین دقیق محیط تشکیل و منشأ سیالات غنی از منیزیم است که فرآیند دولومیتی شدن را کنترل می‌کند؛ این فرآیند می‌تواند به صورت دیاژنتیک (در حین دفن اولیه) یا اپی‌ژنتیک (در اثر نفوذ سیالات حرارتی-آب گرم پس از دفن) رخ دهد. تشکیل دولومیت‌های ثانویه، که از طریق جایگزینی حجمی کلسیت توسط سیالات غنی از منیزیم صورت می‌گیرد، همچنان یک چالش پتروژنتیک پیچیده است که نیازمند ایزوتوپ‌شناسی دقیق است (Mazzoli *et al.*, 2023). مطالعات جدید نشان می‌دهند که تخلخل اولیه و نرخ نفوذ سیالات ابر اشباع شده از منیزیم در رسوبات کربناته، کنترل‌کننده اصلی در توزیع و کانی‌سازی نهائی دولومیت‌های اپی‌ژنتیک در حوضه‌های رسوبی هستند. (Turner *et al.*, 2024). اهمیت مطالعه منطقه اردل در چهارچوب زمین‌شناسی زاگرس، ناشی از قرارگیری آن در یک حوزه تکتونیک فعال و وجود چندین سازند رسوبی با پتانسیل قابل توجه کربناته است. مطالعاتی که در شهرستان اردل تا کنون انجام گرفته است بر روی گنبد‌های نمکی و همچنین بر روی سنگ‌های تزئینی مرمر بوده است و تاکنون مطالعه‌ای در زمینه این دولومیت‌ها صورت نگرفته است. این مقاله برای اولین بار به بررسی شیمی و ارزیابی کیفی دولومیت‌های غنی از منیزیم در شهرستان اردل پرداخته است.

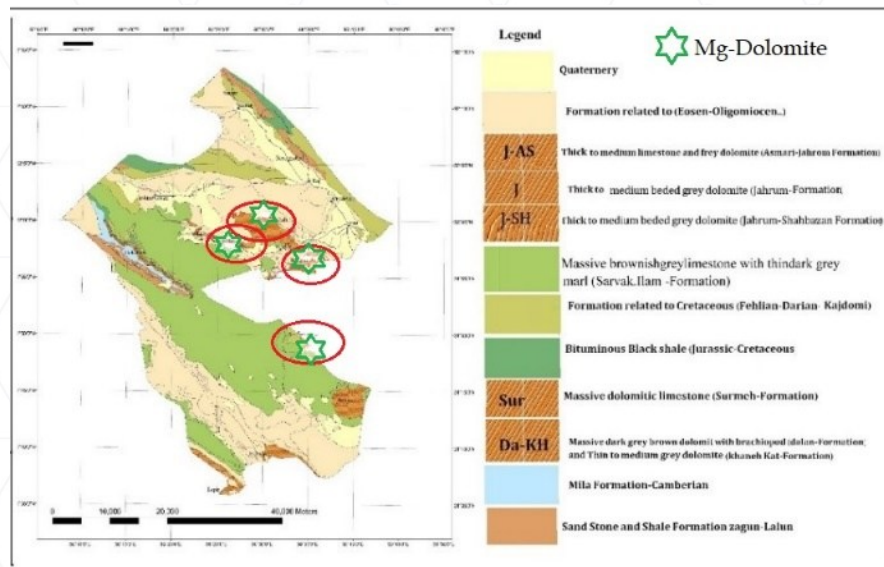
مواد و روش‌ها

نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ شهرکرد، ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرکرد، دهدز و اردل رقومی شد و بر اساس آن نقشه زمین‌شناسی شهرستان اردل در نرم‌افزار ARC-GIS ترسیم شد و مهم‌ترین منبع اطلاعاتی برای زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱). (دولومیت‌ها با رنگ قهوه‌ای هاشور خورده نمادین شده است). در مرحله نخست بررسی و مطالعات صحرایی به صورت گسترده در منطقه انجام گرفت. طی بازدیدهای صحرایی از منطقه مورد مطالعه، نمونه‌هایی برداشت شد و بعد از مطالعات پتروگرافی توسط میکروسکوپ پلاریزان BX در آزمایشگاه تعداد ۳۰ نمونه جهت انجام آنالیز XRD و XRF به کانساران بینالود ارسال گردید و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

بحث:

فرآیند دولومیتی شدن توسط عواملی از جمله محیط تشکیل و منشأ سیالات غنی از منیزیم کنترل می‌شود. این فرآیند می‌تواند به صورت دیاژنتیک (اولیه) یا اپی‌ژنتیک (ثانویه) رخ دهد (Hollis., 2024). تخلخل اولیه و نرخ نفوذ سیالات ابر اشباع شده از

منیزیم در رسوبات کربناته، کنترل‌کننده اصلی در توزیع و کانی‌سازی نهائی دولومیت‌های اپی‌ژنتیک در حوضه‌های رسوبی هستند (Turner et al., 2024). بررسی صحرایی، پتروگرافی و شیمی سنگ‌های کربناته در شهرستان اردل نشان داده است که سنگ‌های آهکی شهرستان اردل شامل: کلسیت، کلسیت دولومیتی، دولومیت خالص و دولومیت‌های غنی از منیزیم می‌باشند. بر اساس نقشه زمین‌شناسی دولومیت‌ها در منطقه مورد مطالعه در سازند دالان، خانه کت، سازند نیریز، سازند جهرم و شهبازان و سازند آسماری تشکیل شده اند (شکل ۱).



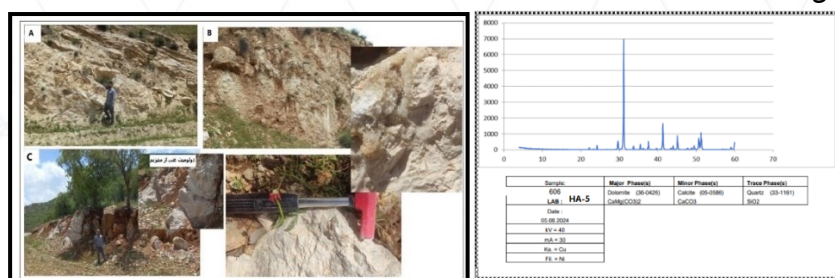
شکل (۱): نقشه زمین‌شناسی شهرستان اردل ARC-GIS بر اساس نقشه ۱/۲۵۰۰۰ ورقه شهرکرد و ۱/۱۰۰۰۰ ورقه شهرکرد، اردل و دهدز

فعالیت‌های تکتونیکی، به ویژه گسل‌های امتداد لغز و گسل‌های عادی، نقش مهمی در تکامل زمین‌شناسی این منطقه ایفا کرده‌اند (آدابی). مطالعات زمین‌شناسی ناحیه اردل نشان می‌دهد که منطقه عمدتاً تحت تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی زاگرس بوده و سازندهای کربناته مزوزوئیک تا سنوزوئیک بخش عمده‌ای از توپوگرافی آن را تشکیل می‌دهند. در بررسی‌های صحرایی و نتایج حاصل از آنالیز XRF و XRD نمونه‌های آهکی در منطقه مورد مطالعه مشخص شد در منطقه مورد مطالعه سنگ‌های آهکی از نوع دولومیت، دولومیت غنی از منیزیم و دولومیت کلسیتی و کلسیت می‌باشند. دولومیت‌هایی با میزان $(28 > \text{Mg} > 21.7 \text{ Wt } \%)$ در دسته دولومیت‌های غنی از منیزیم تقسیم‌بندی گردید. براساس بررسی‌های صحرایی و بررسی نتایج حاصل از آنالیز دولومیت‌های مورد مطالعه، مشخص شد که دولومیت‌های غنی از منیزیم در منطقه مورد مطالعه در سازندهای جهرم، سازند جهرم-شهبازان و سازند سورمه تشکیل شده است. در بررسی‌های صحرایی این دولومیت‌ها به رنگ شیری تا سفید رنگ در امتداد گسل‌های اصلی و شکستگی‌ها قرار گرفته‌اند و گاهی این دولومیت‌ها بصورت رگه‌های سفید رنگی سایر دولومیت‌ها و سنگ‌های آهکی را در منطقه قطع نموده‌اند. تجمع قابل توجهی از دولومیت‌های غنی از منیزیم در نزدیکی گسل‌های اصلی و شکستگی‌ها نشان‌دهنده نقش سیالات غنی از منیزیم است که از طریق این ساختارهای گسلی به درون رسوبات کربناته نفوذ کرده و فرآیند دولومیتی شدن را تسهیل نموده‌اند (Warren, 2000). فعالیت گسلی می‌تواند منجر به افزایش تخلخل و نفوذپذیری، فراهم کردن مسیر برای مهاجرت سیالات، و ایجاد گرادیان‌های فشاری و دمایی مناسب برای واکنش‌های دی‌انرژی شود. محجل و همکاران (۲۰۲۳) نیز در مطالعات خود در زاگرس بر اهمیت کنترل زمین‌ساختی در فرآیند دولومیتی شدن تأکید کرده‌اند. مطالعات زهدی و همکاران (۲۰۱۴) نشان داده است که حضور گسترده دولومیت‌های غنی از منیزیم، می‌تواند حاکی از وجود گنبد‌های نمکی در منطقه و هجوم سیالات غنی از منیزیم به کلسیت‌ها و تشکیل دولومیت‌های ثانویه غنی از منیزیم باشد. همچنین، بالا رفتن میزان منیزیم در دولومیت‌های خالص نشان دهنده وجود رگه‌های منیزیت و

پیشرفت به سمت منیزیته شدن می باشد که در آهک‌های چهارم در منطقه قم نیز چنین پدیده‌ای مشاهده شده است. بررسی و شواهد صحرایی نشان می دهد که در منطقه مورد مطالعه، دولومیت‌های غنی از منیزیم، توسط نفوذ سیالات غنی از منیزیم حاصل از گنبد‌های نمکی اطراف به دولومیت‌های اولیه تشکیل شده اند. بنظر می‌رسد که این پدیده در طی سالیان متمادی تشکیل شده است. وجود بلورهای زیبای ژئوپس در کنار دولومیت‌های غنی از منیزیم شرایط تشکیل این دولومیت‌ها را تایید می نماید.

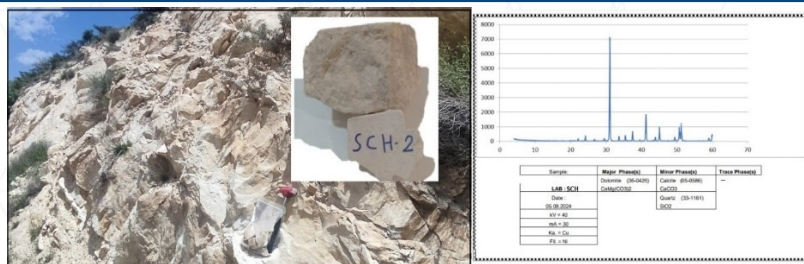
در شهرستان اردل، دولومیت‌های مناطقی از جمله منطقه روستای هفت پیران و پیرامون آن (HA)، محدوده سرچاه (SHA)، محدوده لیرایی و کری (L-K)، منطقه بره مرده (BK)، از نوع دولومیت‌های غنی از منیزیم می باشند (شکل ۱ مناطق ستاره دار) که در ادامه به بررسی این نمونه‌ها می‌پردازیم.

منطقه هفت پیران: این منطقه از نظر لیتولوژی شامل دولومیت و سنگ آهک دولومیتی سازند چهارم به سن ائوسن میانی تا پسین می باشد که بصورت دگرشیب بر روی سازند ساچون قرار گرفته است. تماس بالایی این سازند در این منطقه با آهک‌های آسماری با یک ناپیوستگی فرسایشی و یک افق کنگلومرایی قرمز رنگ مشاهده می شود. شواهد صحرایی نشان داد که دو نوع دولومیت در این منطقه دیده می شود. دولومیت‌های کرم‌رنگ و دولومیت‌های شیری تا سفیدرنگ و گاهی این دولومیت‌های شیری تا سفید بصورت رگه‌های دولومیت‌های دیگر را قطع نموده اند (شکل B-۳). بررسی نتایج حاصل از آنالیز XRF این نمونه‌ها نشان می دهد که در نمونه‌های دولومیت‌های شیری تا سفید رنگ، میزان $Mg = 24.742-25.09$ می باشد، که نشان دهنده میزان بالای منیزیم در این نمونه‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از XRD این نمونه‌ها پیک دولومیت با میزان کمی کلسیت و کوآتز را نشان می دهد (شکل ۲).



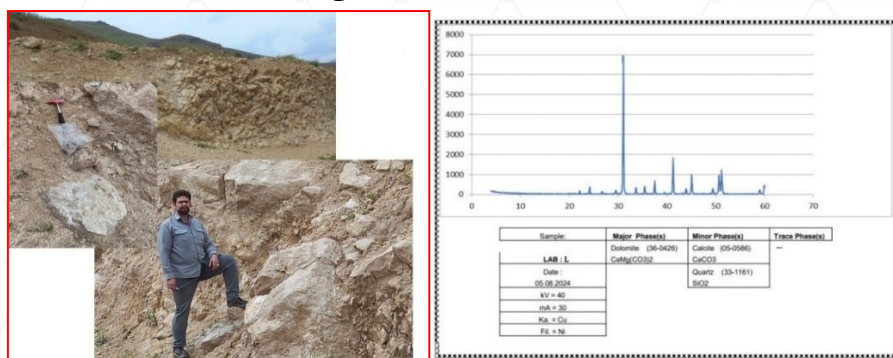
شکل (۲). تصویر نمای کلی واحد دولومیتی منطقه هفت پیران. A. دولومیت‌های خالص منطقه پیرات B. رگه‌های دولومیت‌های غنی از منیزیم در میان دولومیت‌ها. C. دولومیت‌های غنی از منیزیم منطقه پیرات D. بلورهای زیبای ژئوپس که در کنار دولومیت‌های غنی از منیزیم تشکیل شده است. E. نتایج آنالیز XRD محدوده سرچاه

منطقه غرب سرچاه (SCH): از نظر لیتولوژی، این منطقه شامل دولومیت‌های به رنگ کرم تا صورتی (واحد E_{shj}^d سازند شهبازان) (شکل A ۳)، که بصورت بین انگشتی با آهک‌های سازند چهارم دیده می شوند و توسط آهک‌های آسماری پوشیده شده‌اند. نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌ها در این منطقه نشان داد که دولومیت‌ها در این منطقه از نوع دولومیت‌های غنی از منیزیم می‌باشند و برخی از نمونه‌ها نیز از نوع کربنات‌های آهکی می باشند. بررسی نتایج حاصل از آنالیز XRF این نمونه‌ها نشان می دهد که در نمونه‌های دولومیت‌های شیری تا سفید رنگ، میزان $Mg = 24.742-25.09$ می باشد، که نشان دهنده میزان بالای منیزیم در این نمونه‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از XRD این نمونه‌ها پیک دولومیت با میزان کمی کلسیت و کوآتز را نشان می دهد (شکل B ۳).

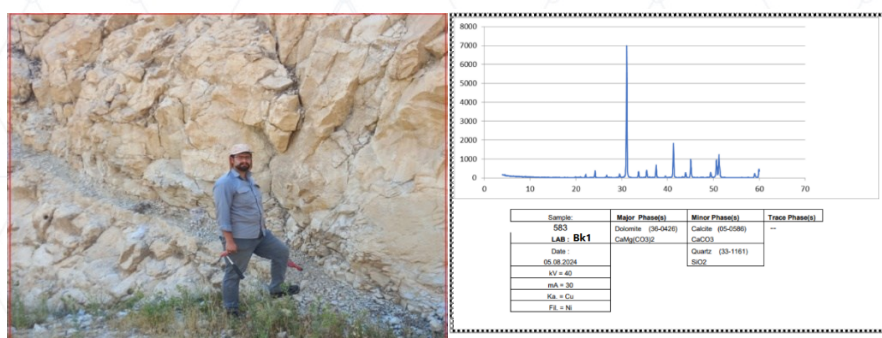


شکل (۳): A. تصویر آهک‌های غنی از منیزیم منطقه سرچاه شکل. B. آنالیز XRD محدوده سرچاه

منطقه شمال غرب تا شمال شرق لیرابی (L) و کری (K): براساس بررسی‌های صحرایی در منطقه مورد مطالعه، لیتولوژی محدوده شامل سنگ‌های آهکی می باشد که بطور دگرشیب بر روی ماسه سنگ‌ها و کنگلومراهای قرمز قرار گرفته است. در این منطقه بلورهای ژپس سازند ساچون به وضوح در لابلای سنگ‌های آهکی قابل مشاهده می باشد (شکل A ۴). بررسی نتایج آنالیزهای XRF در نمونه‌های منطقه لیرابی نشان داد که این نمونه‌ها با میزان ($MgO=24.986-27.962$ Wt%) بالاتر از حد یک دولومیت خالص منیزیم داشته که نشان دهنده تاثیر سیالات غنی از منیزیم بر روی دولومیت‌های منطقه می باشد. نتایج حاصل از آنالیز XRD نشان داد که این نمونه‌ها دارای دولومیت و میزان کمی کلسیت و کوارتز هستند (شکل B ۴).



شکل (۴): A. تصویر صحرایی دولومیت‌های منیزیتی شده محدوده لیرابی و کری. B. آنالیز XRD منطقه لیرابی و کری. روستای بره مرده (BK1): لیتولوژی این منطقه شامل دولومیت و سنگ آهک دولومیتی سازند جهرم می باشد (شکل A ۵). نتایج حاصل از آنالیزهای XRF در نمونه‌های این منطقه نشان می دهد که این نمونه‌ها با میزان ($MgO=28.2$ Wt%) از نوع دولومیت غنی از منیزیم می باشند و نتایج آنالیز XRD این نمونه‌ها پیک دولومیت و میزان کمی کلسیت و کوارتز را نشان داده است (شکل A ۵).



شکل (۵): A. دولومیت‌های محدوده بره مرده. B. آنالیز XRD منطقه بره مرده

کاربرد دولومیت‌ها در صنایع مختلف با توجه به میزان عناصر اصلی می باشد. در جدول (۱) ویژگی‌های ژئوشیمیایی دولومیت‌های کاربردی در صنایع فولاد (Flux, Refiac)، صنایع شیشه و سرامیک ذکر گردیده است.

جدول (۱) میانگین ترکیب شیمیایی دولومیت‌های کاربردی در صنعت (Dickinson 2017)

کاربرد صنعت	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	LOI	MnO	S
Glass	<1	<0.04	<0.06(0.25-0.35)	.....	.....	....	.....	.....
Ceramic	.....	<0.02	<0.03	>0.30	>21.4	.....	...	.....
Flux	<0.75	....	<1-1.5	.....	....	....	....	<0.05
Reflac	0.35	0.23	0.35	30.73	20.8	47.3	....	...

براساس برداشت‌های صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی، نمونه سنگ‌های دولومیتی غنی از منیزیم در این منطقه ارزیابی گردید و کاربرد صنعتی این دولومیت‌ها مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲).

جدول (۲): کاربرد دولومیت‌های غنی از منیزیم شهرستان اردل در صنعت

سرچاه	بره مرده	کری	لیرایی	هفت پیرات	
*	*		*	*	دی‌رگداز
---	---	---	---	---	صنعت فولاد (Flux)
---	*		*	*	شیشه
---	*		*	*	سرامیک
*	*	*	*	*	تولید هیدروکسید منیزیم

به دلیل میزان بالای آهن و آلومینیوم در نمونه‌های دولومیت‌های غنی از منیزیم منطقه بره مرده، این نمونه‌ها در صنعت سرامیک و شیشه سازی مورد استفاده نمی شود.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های صحرایی، و شیمی سنگ‌های کربناته در شهرستان اردل نشان داده است که این سنگ‌ها شامل کلسیت، کلسیت-دولومیتی، دولومیت خالص و دولومیت‌های با میزان منیزیم بالا می باشند. بررسی‌های صحرایی نشان داده است که دولومیت‌های غنی از منیزیم در امتداد گسل‌های اصلی و شکستگی‌ها در منطقه تشکیل شده اند و نشان دهنده شرایط تشکیل اپی ژنتیک برای این دولومیت‌ها می‌باشد. بنظر می رسد با توجه به وجود گنبد‌های نمکی در مناطق اطراف، نفوذ سیالات غنی از منیزیم در دولومیت‌های اولیه موجب تشکیل و گسترش این دولومیت‌ها گردیده است. بررسی عناصر اصلی این دولومیت‌ها نشان داد که این دولومیت‌ها می‌توانند در صنایع مختلف از جمله در شیشه سازی، سرامیک و تولید هیدروکسید منیزیم نقش بسزایی ایفا نمایند.

تقدیر و تشکر

با تشکر از اداره صنعت، معدن و تجارت که همکاری‌های لازم را در اجرای این طرح مبذول فرمودند.

منابع

آدابی، م.ح.، ۱۳۸۳. ژئوشیمی رسوبی، آرین زمین.

Dickinson, J. A., 2017. Industrial minerals and rocks: Commodities, markets, and uses (8th ed.). Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
Mazzoli, S., Środoń, J., & Jarvie, D., 2023. Advances in the genetic models of dolomitization: A review. Earth-Science Reviews, 236, 104289.

- Mohajjel, M., Sari, A., & Fergusson, C. L., 2023. Tectonic control on dolomitization in the Zagros Fold-Thrust Belt: Implications for reservoir distribution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 248, 105654.
- Qian, Y., Zhu, J. and Li, Q., 2009. Using in situ REE analysis to study the origin and diagenesis of dolomite of Lower Paleozoic, *Science in China Series D: Earth Sciences*, v. 52(5), p. 681-693.
- Turner, J. A., Whitaker, F. F., & Hollis, C., 2024. Epigenetic dolomitization in carbonate platforms: The role of early porosity and fluid flux. *Sedimentology*, 71(1), 123-145.
- Warren, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1-3), 1-81.
- Zohdi, A., Moallemi, S.A., Moussavi- Harami, R. and Mahboubi, A., 2014. Shallow burial dolomitization of an Eocene carbonate platform, Southeast Zagros Basin: *Iran GeoArabia*, v. 19(4), p. 17-54.

کاربرد آنالیز پیشرفته ICP-MS در شناسایی گوهر سنگ زمرد

(مطالعه موردی: زمردهای سوات پاکستان و پنجشیر افغانستان)

خدیجه خلیلی

استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. ۱۹۳۹۵-۴۶۹۷

khalilikhadijeh@pnu.ac.ir

چکیده

زمرد (بریل سبز) به عنوان یکی از گوهرسنگ‌های گرانبهای جهان، همواره مورد توجه گوهرشناسان و زمین‌شناسان بوده است. تعیین خاستگاه جغرافیایی زمردها به دلایل ارزش‌گذاری، اصالت و اخلاقیات در تجارت گوهرسنگ‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تعیین خاستگاه زمردها عمدتاً بر پایه مشاهدات گوهرشناسی، بررسی اینکلوزن‌ها استوار بوده است. این مشاهدات بسیار ارزشمند هستند، اما در مواردی که نمونه‌ها فاقد اینکلوزن‌های خاصی هستند یا کانسارهای مختلف دارای اینکلوزن‌های مشابهی می‌باشند، تعیین منشأ بسیار چالش برانگیز می‌شود. این چالش به‌ویژه در مورد کانسارهایی که از نظر جغرافیایی نزدیک اما از نظر زمین‌شناسی متفاوت هستند، آشکارتر است. با توجه به اینکه میزان عناصر کمیاب و ردیابی این عناصر، فاکتورهای مهمی جهت تعیین منشأ جغرافیایی و محیط تکتونیکی تشکیل این گوهرسنگ‌ها می‌باشد، بنابراین استفاده از روش‌های آنالیز پیشرفته از جمله روش ICP-MS روشی مطمئن و مورد اعتماد جهت تعیین و بررسی این نمونه‌ها می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز ICP-MS زمردهای سوات پاکستان با دارا بودن محتوای بسیار بالای منیزیم (میانگین ۳۴۲۶۳ ppm)، آهن (میانگین ۹۲۶۵ ppm) و اسکاندیم (میانگین ۶۳۳ ppm) و همچنین اینکلوزن‌های سه فاز، از زمردهای پنجشیر که دارای ترکیب شیمیایی مشابه زمردهای کلمبیایی و اینکلوزن‌های چندفازه پیچیده هستند، به وضوح قابل تشخیص می‌باشند. این مطالعه نشان می‌دهد تلفیق داده‌های حاصل از مطالعات گوهرشناسی و ژئوشیمیایی (ICP-MS)، چارچوبی قدرتمند برای تعیین خاستگاه و شناخت زمردها فراهم می‌نماید.

کلیدواژه‌ها: ICP-MS، اینکلوزن، زمرد، سوات، پاکستان

Application of Advanced ICP-MS Analysis in Emerald Gemstone Identification, (Case Study: Emeralds from Swat, Pakistan and Panjshir, Afghanistan)

Khadijeh, Khalili

Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Payam Noor University, Tehran, Iran.
19395-4697 khalilikhadijeh@pnu.ac.ir

Abstract

Emerald (green beryl) as one of the world's precious gemstones has always been of interest to gemologists and geologists. Determining the geographical origin of emeralds is of particular importance in the gemstone trade for reasons of valuation, authenticity and ethics. Determining the origin of emeralds has been mainly based on gemological observations and inclusion studies. These observations are very valuable, but in cases where samples lack specific inclusions or different deposits have similar inclusions, determining the origin becomes very challenging. This challenge is especially evident in the case of deposits that are geographically close but geologically different. Given that the amount of trace elements and their trace elements are important factors in determining the geographical origin and tectonic environment of the formation of these gemstones, the use of advanced analysis methods, including the ICP-MAS method, is a reliable and trustworthy method for determining and examining these samples. Based on the results of ICP-MS analysis, Swat emeralds from Pakistan, with their very high magnesium (average 34,263 ppm), iron (average 9,265 ppm), and scandium (average 633 ppm) contents, as well as three-phase inclusions containing magnesite, are clearly distinguishable from Panjshir emeralds, which have a similar chemical composition to Colombian emeralds and complex multiphase inclusions. This study

shows that combining data from gemological and geochemical studies (ICP-MS) provides a powerful framework for determining the origin and identification of emeralds.

Keywords: ICP-MS, Inclusion, Emerald, Swat, Pakistan

مقدمه

زمرد (Emerald) که گرانبهاترین گونه از خانواده کانی بریل است، دارای فرمول شیمیایی اصلی $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ می‌باشد. رنگ سبز مشخصه این گوهر گرانبها عمدتاً به دلیل حضور ناخالصی‌های عناصر کروم (Cr^{3+}) و یا وانادیوم (V^{3+}) در شبکه بلوری آن است که به عنوان کروموفور عمل می‌کنند. از نظر بلورشناسی، زمرد در سیستم هگزاگونال متبلور می‌شود و سختی آن در مقیاس موهس بین 7.5-8 است که آن را در کنار دوام نسبی، به دلیل رخ ناقص، گوهری حساس به ضربه می‌سازد (Anthony and et al., 2001). چگالی این کانی بین ($\text{SG}=2.67\text{-}2.78 \text{ g/cm}^3$) متغیر است که این تغییر عمدتاً به میزان و نوع عناصر جایگزین شده در ساختار آن بستگی دارد. ویژگی‌های نوری متمایز زمرد شامل ضریب شکست دوگانه ($\text{RI}=1.565\text{-}1.602$) و پلئوکروئیسم قوی است که در میکروسکوپ، سایه‌های مختلفی از سبز تا سبز-آبی را نمایش می‌دهد. از دیدگاه زمین‌شناسی، زمردها معمولاً در دو محیط اصلی شکل می‌گیرند: محیط‌های هیدروترمال مرتبط با سنگ‌های دگرگونی شیبستی (مانند کانسارهای کلمبیا) و محیط‌های متاسوماتیک مرتبط با توده‌های اولترامافیک سرپانتینی شده (مانند کانسار سوات پاکستان). این تفاوت در شرایط تشکیل، تأثیر مستقیمی بر ترکیب شیمیایی، الگوی عناصر کمیاب و همچنین مجموعه اینکلوزن‌های موجود در زمردها می‌گذارد و ضرورت استفاده از روش‌های تحلیلی پیشرفته مانند طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) را برای تعیین دقیق خاستگاه جغرافیایی آنها فراهم می‌نماید (Giulian et al., 2019). روش‌های سنتی تعیین زمردهای مناطق مختلف، عمدتاً بر پایه مشاهدات گوهرشناسی و بررسی اینکلوزن‌ها استوار بوده‌اند (Gübelin, 1982). اگرچه این مشاهدات بسیار ارزشمند هستند، اما در مواردی که نمونه‌ها فاقد اینکلوزن‌های خاصی هستند یا کانسارهای مختلف دارای اینکلوزن‌های مشابهی می‌باشند، با محدودیت مواجه می‌شوند. این چالش به‌ویژه در مورد کانسارهایی که از نظر جغرافیایی نزدیک اما از نظر زمین‌شناسی متفاوت هستند، آشکارتر است. در دو دهه اخیر، ظهور تکنیک‌های تحلیلی پیشرفته، به ویژه طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی با لیزر (LA-ICP-MS)، انقلابی در عرصه گوهرشناسی تحلیلی ایجاد کرده است. این تکنیک با قابلیت آنالیز مستقیم و همزمان طیف وسیعی از عناصر کمیاب نادر خاکی با حد تشخیصی بسیار پایین، "اثرائگشت شیمیایی" منحصربه‌فردی را برای گوهرهای هر کانسار فراهم می‌آورد (Saeseaw et al., 2019). داده‌های حاصل از این روش، امکان تمایز قطعی بین زمردهای کانسارهای مختلف را فراهم می‌سازد. این پژوهش بر این اساس که تلفیق داده‌های پیشرفته شیمیایی با مشاهدات گوهرشناسی کلاسیک، دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین چارچوب را برای ردیابی خاستگاه زمردها ارائه می‌دهند به بررسی نقش آنالیز پیشرفته LA-ICP-MS در تعیین خاستگاه و شناسایی این زمردها بر اساس ترکیب عناصر کمیاب و اینکلوزن‌ها پرداخته است.

روش پژوهش:

این پژوهش به روش توصیفی-تحلیلی و با مرور سیستماتیک داده‌های منتشرشده انجام شد. داده‌های شیمیایی عناصر کمیاب زمردهای سوات (پاکستان) و پنجشیر (افغانستان) از مقالات معتبر استخراج گردید. در این راستا، داده‌های زمردهای سوات عمدتاً از Guo et al. (2020) و داده‌های پنجشیر از Bowersox et al. (1991) و Saeseaw et al. (2019) استخراج

شد. تحلیل داده‌ها با استفاده از آمار توصیفی و نمودارهای باینری انجام پذیرفت. در نهایت، الگوهای شیمیایی به دست آمده در چارچوب زمین‌شناسی کانسارها تفسیر شدند تا شاخص‌های تشخیصی برای تعیین منشأ استخراج شوند

بحث و نتیجه‌گیری

زمرد (بریل سبز) به عنوان گران‌بهارترین عضو خانواده بریل، از دیرباز به دلیل رنگ سبز سیر و درخشندگی استثنایی، جایگاهی منحصر به فرد در میان گوهرسنگ‌های رنگی داشته است. اهمیت این گوهر تنها به ویژگی‌های زیبایی‌شناختی محدود نمی‌شود؛ بلکه خاستگاه جغرافیایی آن به عنوان یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در ارزش‌گذاری علمی و تجاری محسوب می‌شود (Giuliani et al., 2019) به طوری که زمردهای کانسارهایی همچون موزو (Muza) و چیور (Chivor) در کلمبیا به دلیل کیفیت استثنایی رنگ و خلوص، همواره جایگاه ممتازی در بازارهای جهانی داشته‌اند. (Kazmi & O'Donoghue, 1990) این تمایز ارزشی، ریشه در تفاوت‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی ذاتی کانسارها دارد که بر خواص نوری، میزان خلوص و حتی پایداری رنگ زمرد تأثیر مستقیم می‌گذارند (Saeseaw et al., 2019).

تعیین خاستگاه زمردها امروزه فراتر از یک نیاز بازاریابی، به ضرورتی علمی در حوزه‌های گوهرشناسی تحلیلی، باستان‌شناسی مواد و تجارت اخلاقی گوهرها تبدیل شده است، چرا که کانسارهای زمرد، با توجه به شرایط خاص فشار، دما، ترکیب سیالات کانساری و سنگ میزبان، ترکیب شیمیایی منحصر به فردی را دارا هستند (Groat et al., 2014). این ویژگی، به ویژه در مورد کانسارهایی که از نظر جغرافیایی نزدیک اما از نظر زمین‌شناسی متفاوت هستند - مانند زمردهای سوات پاکستان و پنجشیر افغانستان در کمربند هیمالیا - اهمیت بالایی دارد (Guo et al., 2020; Bowersox et al., 1991). روش‌های سنتی تعیین خاستگاه، عمدتاً بر پایه مشاهدات گوهرشناسی کلاسیک (نظیر رنگ، ضریب شکست و چگالی) و بررسی اینکلوزن‌های شاخص استوار هستند (Gübelin & Koivula, 2008). گرچه این مشاهدات در شناخت این گوهر سنگ‌ها تأثیر گذار می‌باشد، اما در مواردی که نمونه‌ها فاقد اینکلوزن‌های شاخص می‌باشند یا کانسارهای متفاوت دارای اینکلوزن‌های مشابهی هستند استفاده از این روش با محدودیت‌های جدی مواجه می‌شود (Saeseaw et al., 2019).

زمردهای سوات پاکستان و زمرد پنجشیر افغانستان، از جمله کانسارهای مهم و گاهی چالش‌برانگیز در کمربند کوهزایی هیمالیا، هستند. کانسار زمرد سوات پاکستان و پنجشیر افغانستان هر دو در کمربند کوهزایی هیمالیا واقع شده‌اند و تشکیل آنها با فرآیندهای تکتونیکی برخورد قاره‌ای مرتبط است (Giuliani et al., 2019). علیرغم موقعیت جغرافیایی نسبتاً نزدیک، از منظر شرایط زمین‌شناسی، ژنز و شیمی سیالات کانساری تفاوت‌های بنیادینی را نشان می‌دهند که مستقیماً بر الگوی عناصر کمیاب و نوع اینکلوزن‌ها در زمردهای حاصل تأثیر گذاشته است (Bowersox et al., 1991; Giuliani et al., 2019). زمردهای سوات در یک محیط اولترامافیک-کربناتی تشکیل شده‌اند که ارتباط آن با توده‌های سرپانتینی شده، سبب غنی‌شدگی زیاد در عناصری از جمله: منیزیم (Mg)، آهن (Fe) و اسکندیم (Sc) گردیده است (Guo et al., 2020). این در حالی است که زمردهای پنجشیر در یک محیط هیدروترمال مرتبط با دگرگونی و در مجاورت رگه‌های کوارتز-آنکريت تشکیل شده و از نظر شیمیایی، شباهت قابل توجهی به زمردهای کلمبیا از خود نشان می‌دهند (Bowersox et al., 1991). چنین تفاوت‌های ساختاری در منشأ و محیط تشکیل، نه تنها در ویژگی‌های میکروسکوپی، بلکه به طور دقیق‌تری در ترکیب شیمیایی نیز تأثیر گذار می‌باشد. بنابراین، تنها با بررسی میکروسکوپی این نمونه‌ها و مطالعات گوهرشناسی ساده تشخیص و تمایز قطعی بین چنین کانسارهایی با چالش مواجه است (Saeseaw et al., 2019).

ویژگی های گوهر شناسی زمرد های سوات و پنجشیر

بررسی ویژگی نوری این زمرد ها نشان داده است که زمرد های سوات با رنگ سبز متمایل به آبی تا سبز خاکستری و همچنین میزان ضریب شکست ($RI=1.580-1.600$) و چگالی ($SG=2.70-2.82$) می باشند. این نوع زمرد ها نسبت به زمرد های پنجشیر که اغلب دارای رنگ سبز زنده (Vivid Green) و خالص تر و دارای چگالی ($SG=2.68-2.74$) و ضریب شکست ($RI=1.588-1.574$) می باشند دارای ساختمان اتمی فشرده تر و میزان عناصر چگال بالاتری مانند آهن هستند (Bowersox et al., 1991; Guo et al., 2020). هر دوی این نوع زمرد ها پلی کروئیسیم قوی (سبز مایل به آبی / سبز مایل به زرد)، از خود نشان می دهند. اما شدت آن می تواند متفاوت باشد.

بررسی و مطالعه این نوع زمرد ها با میکروسکوپ های گوهر شناسی نشان داده است که نوع اینکلوزن های موجود در این زمرد ها فاکتور مهمی در شناسایی آنها محسوب می شود. بررسی زمرد های سوات در زیر میکروسکوپ نشان می دهد که این زمرد ها دارای اینکلوزن های سه فازه با اشکال منظم و شامل فاز مایع (آب شور)، فاز گازی (مخلوطی از CH_4, N_2, CO_2)، و فاز جامد (کانی مکعبی شفاف، عمدتاً منیزیت $MgCO_3$) می باشد. معمولی ترین اینکلوزن های جامد در این زمرد ها هماتیت، مگنتیت، گرافیت، سیدریت و گاهی روتیل های سوزنی شکل می باشند (Guo et al., 2020). این در حالی است که در زمرد های پنجشیر افغانستان اینکلوزن های سیال از دو فاز (گاز+مایع) که گاز موجود از نوع CO_2 خالص می باشد تشکیل شده است.

ویژگی های طیف سنجی: طیف جذبی مرئی (VS) زمرد پنجشیر، معمولاً الگوی جذبی قوی مرتبط با کروم (Cr^{3+}) را نشان می دهد (خطوط جذب در ~ 683 نانومتر و ~ 680 نانومتر). در حالیکه زمرد سوات: ممکن است علاوه بر باندهای کروم (در صورت وجود)، باندهای جذبی مرتبط با آهن (Fe^{2+}/Fe^{3+}) نیز آشکار باشند.

در نهایت، بررسی طیفی پیشرفته (مانند طیف سنجی رامان یا مادون قرمز) نیز می تواند در شناسایی کانی های اینکلوزن شده (مانند تشخیص مگنیزیت در سوات در مقابل کلسیت در پنجشیر) و مطالعه ترکیب سیالات درگیر مفید واقع شود. بنابراین، تلفیق مشاهدات گوهرشناسی کلاسیک (رنگ، چگالی، ضریب شکست) با تحلیل اینکلوزن ها و در نهایت داده های کمی-ICP-MS، یک رویکرد چندلایه و مستحکم برای تعیین خاستگاه فراهم می آورد که در آن هر روش، یافته های روش دیگر را اعتبارسنجی و تکمیل می نماید.

نتایج آنالیز LA-ICP-MS

بررسی و تحلیل های نتایج حاصل از آنالیز LA-ICP-MS در زمرد های سوات پاکستان و زمرد های پنجشیر افغانستان نشان می دهد که زمرد های سوات دارای محتوای بسیار بالای منیزیم (میانگین 34263 ppm)، آهن (میانگین 9265 ppm) و اسکاندیم (میانگین 633 ppm) هستند (جدول ۱) (Guo et al., 2020). همچنین این زمرد ها غنی از فلزات قلیایی از جمله لیتیم، روبیدیم و سزیم می باشند. در مقابل، زمرد های پنجشیر دارای مقادیر پایین تری از این عناصر بوده و از نظر ترکیب شیمیایی بیشتر شبیه به زمرد های کلمبیا می باشند (Bowersox et al., 1991).

جدول ۱. مقایسه عناصر کمیاب و شاخص‌های تشخیصی در زمرد های منطقه سوات پاکستان و پنجشیر افغانستان

ویژگی	زمرد سوات (پاکستان)	زمرد پنجشیر (افغانستان)
محیط زمین شناسی	اولترامافیک کربناتی (سرپانتینی)	متاسوماتیک - هیدروترمال (دگرگونی - شیبستی)
عناصر اصلی (میانگین ppm)		
Mg منیزیم	۳۴.۲۶۳ppm	پایین (معمولا زیر ۱۰۰۰ ppm)
Fe آهن	۹.۲۶۵ppm	پایین تر (مقادیر معمول بریل)
Sc اسکاندیم	۶۳۳ppm (بسیار بالا)	بسیار پایین (اغلب < ۱۰ ppm)
Cr کروم	۷.۴۷۱ ppm (متغیر)	معمولا غلظت بالا (رنگ زایی غالب)
V وانادیوم	مقادیر متوسط	معمولا غلظت بالا (رنگزایی مکمل)
نسبت های تشخیصی	Mg/Sc بسیار بالا	Mg/Sc بسیار پایین

نتیجه گیری

تلفیق داده‌های حاصل از مطالعات زمین‌شناسی، گوهرشناسی و ژئوشیمیایی امکان ایجاد یک مدل تشخیصی جامع برای تعیین خاستگاه زمردها را فراهم می‌کند. ظهور تکنیک‌های تحلیلی پیشرفته، به ویژه طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی با لیزر (LA-ICP-MS)، انقلابی در عرصه گوهرشناسی تحلیلی ایجاد کرده است. این تکنیک با قابلیت آنالیز مستقیم و همزمان طیف وسیعی از عناصر کمیاب نادر خاکی با حد تشخیصی بسیار پایین، "اثر انگشت شیمیایی" منحصر به فردی را برای گوهرهای هر کانسار فراهم می‌آورد و داده‌های حاصل از این روش، امکان تمایز قطعی بین زمردهای مناطق سوات پاکستان و پنجشیر افغانستان را فراهم می‌آورد.

Refrence:

- Saeseaw et al., (2019) Bowersox, G. W., et al. (1991). *Gems & Gemology*, 27(1), 26-39.
- Giuliani, G., et al. (2019). *Mineralium Deposita*, 54, 631-644.
- Groat, L. A., et al. (2014). *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 79, 89-123.
- Gübelin, E. J., & Koivula, J. I. (2008). *Photoatlas of Inclusions in Gemstones (Vol. 3)*. Opinio Publish
- Guo, J., et al. (2020). *Ore Geology Reviews*, 124, 103526.
- Kazmi, A. H., & O'Donoghue, M. J. (1990). *The Emerald*. Butterworth-Heinemann.
- Saeseaw, S., et al. (2019). *Gems & Gemology*, 55(2), 152-169.
- Schwarz, D., et al. (2016). *Gems & Gemology*, 52(2), 174-191.

راهبردهای بهینه تراش گارنت دمانتوئید کرمان با تأکید بر مدیریت چالش‌های فرآوری

زهرا مختاری^۱، مصطفی ستوده^{۲*}، علیرضا علی‌زاده مقدم^۳، مهدیه رافعی^۴

^۱ استادیار گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فراوری مواد معدنی، دانشکده فناوری‌های نوین بین‌رشته‌ای، دانشگاه نیشابور

^{۲،۳،۴} دانشجوی کارشناسی ارشد گوهرشناسی کاربرد و کانی‌های صنعتی، گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فراوری مواد معدنی، دانشکده فناوری‌های نوین بین‌رشته‌ای، دانشگاه نیشابور

*m.setoode1400@gmail.com

چکیده

گارنت دمانتوئید، یکی از گرانبهاترین گوهرهای ایران، به دلیل رنگ سبز غنی، درخشش استثنایی و پراکندگی نوری بالا شناخته می‌شود و اغلب حاوی ناخالصی‌های مشخصه هورس‌تیل است که فرآیند تراش آن را پیچیده می‌کند. این مطالعه با تلفیق مرور سیستماتیک منابع علمی و تجربیات عملی گوهرتراشان، هفت چالش کلیدی در تراش دمانتوئید کرمان شامل مدیریت هورس‌تیل، تیرگی رنگ، حساسیت حرارتی، سختی متوسط، حفظ حداکثر وزن قیراطی، پولیش‌پذیری دشوار و انتخاب طرح تراش بهینه را شناسایی و تحلیل می‌کند. برای هر چالش، راهکارهای علمی و عملی ارائه شده و تأکید بر ارزیابی هوشمند و یکپارچه ویژگی‌های بلور، به جای حذف ناخالصی‌ها به هر قیمت، شده است. مقاله همچنین سه طرح تراش بهینه (برلیان گرد، استپ کات مربعی و کوشن) را ارزیابی می‌کند تا تعادل میان جلوه نوری، بازدهی وزن و استحکام مکانیکی برقرار شود و ارزش زیبایی‌شناختی و اقتصادی گوهر افزایش یابد.

کلیدواژه‌ها: گارنت دمانتوئید، تراش گوهر، ناخالصی هورس‌تیل، مدیریت فرآوری، پولیش بهینه، ویژگی‌های اپتیک

Optimal Strategies for Faceting Demantoid Garnet from Kerman, with Emphasis on Managing Processing Challenges

Zahra Mokhtari^{1*}; Mostafa Sotoudeh^{2*}, Alireza Alizadeh Moghaddam³, Mahdich Rafei⁴

¹ Assistant Professor, Department of Natural Products and Mineral Processing Technology, Faculty of Novel Interdisciplinary Technologies, University of Neyshabour, Neyshabour, Iran.

^{2,3,4} Master's student in Applied Gemology and Industrial Minerals, Department of Natural Products and Mineral Processing Technology, Faculty of Novel Interdisciplinary Technologies, University of Neyshabour, Neyshabour, Iran.

*m.setoode1400@gmail.com

Abstract

Demantoid garnet, one of Iran's most valuable gemstones, is renowned for its vivid green color, exceptional brilliance, and high optical dispersion. This gemstone, often containing characteristic horsetail (calcite) inclusions, presents significant challenges during cutting that require careful technical management. This review integrates a systematic analysis of scientific literature with practical experience from Iranian gem cutters to identify and evaluate seven major challenges in processing demantoid garnet: management of horsetail inclusions, color darkness, thermal sensitivity, medium hardness, preservation of carat weight, difficult polishability, and optimal cut selection. For each challenge, both scientific and practical strategies are proposed, including a logical decision-making sequence (first managing inclusions, then optimizing color, and finally maximizing carat yield), conservative cutting protocols using fine abrasives, and precise geometric design to minimize undesirable optical phenomena such as windowing and dark zones. Findings highlight that success in processing this gemstone

depends on replacing traditional indiscriminate removal of inclusions with a modern, integrated approach that evaluates, adapts, and strategically positions crystal features. This approach reduces breakage risk while enhancing the aesthetic and economic value of the gemstone. Additionally, the optical characteristics of Kerman demantoid are discussed, and three optimal cutting designs (round brilliant, square step, and cushion) are evaluated to achieve a balance among optical performance, weight retention, and mechanical stability.

Keywords: Demantoid Garnet, Gem Cutting, Horsetail Inclusions, Processing Management, Polishing Optimization, Optical Properties

۱- مقدمه

گارنت دمانتوئید، گرانبهاترین گونه از خانواده گارنت، به دلیل پراکندگی نوری بسیار بالا که بیشترین میزان را در میان گوهرهای رنگین دارد، ارزش فوق‌العاده‌ای دارد. ذخایر این کانی در ایران، به ویژه در ناحیه کرمان، نمونه‌هایی با رنگ سبز ممتاز تولید می‌کنند که اغلب شامل ناخالصی‌های مشخصه هورس‌تیل از جنس کلسیت هستند. این ناخالصی‌ها می‌توانند ویژگی منحصر به فردی ایجاد کنند، اما همزمان چالش‌های فنی قابل توجهی در فرآیند تراش به وجود می‌آورند. فرآوری دمانتوئید همواره با ریسک بالا همراه بوده است، زیرا عواملی مانند حساسیت حرارتی، تیرگی رنگ و سختی متوسط می‌توانند منجر به ترک خوردگی، کاهش درخشش یا اتلاف وزن شوند. هدف این مقاله، یکپارچه‌سازی دانش نوین گوهرشناسی با تجربیات عملی تراشکاران سنتی ایرانی و ارائه راهکارهای عملی برای مدیریت این چالش‌ها است. این مطالعه بر ترکیب یافته‌های پژوهشی بین‌المللی با مشاهدات میدانی تمرکز دارد تا رویکردی جامع برای بهینه‌سازی تراش دمانتوئید ارائه شود. علاوه بر بررسی چالش‌ها، مقاله به ویژگی‌های اپتیکی و نوری دمانتوئید می‌پردازد که نقش کلیدی در ارزش‌گذاری و طراحی تراش دارند. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که با مدیریت هوشمند فرآوری و چالش‌ها، ایران می‌تواند جایگاه خود را در زنجیره ارزش جهانی این گوهر نادر تقویت کند (Freire-Lista et al., 2016; Read, 2005; Giuliani et al., 2019).

۲- ویژگی‌های اپتیکی و نوری دمانتوئید کرمان

دمانتوئید کرمان دارای ویژگی‌های اپتیکی برجسته‌ای است که آن را از سایر گارنت‌ها متمایز می‌کند. ضریب شکست نور آن بین ۱.۸۸۰ تا ۱.۸۸۹ قرار دارد و باعث درخشش بالا می‌شود. پراکندگی نوری برابر با ۰.۰۵۷ است که بالاترین مقدار در میان گوهرها بوده و پدیده "آتش" استثنایی ایجاد می‌کند؛ جایی که نور سفید به رنگ‌های طیفی تجزیه می‌شود. این گوهر از نظر اپتیکی، ایزوتروپ است، به معنای عدم دوشکستی، که تراش را ساده‌تر می‌کند، اما آن را به زوایای تراش حساس می‌سازد. رنگ سبز غنی آن ناشی از حضور کروم (Cr) است، با جذب قوی در نواحی آبی و قرمز طیف مرئی، که منجر به انتقال نور سبز می‌شود. در نمونه‌های کرمان، ناخالصی‌های هورس‌تیل (رشته‌های کلسیتی) می‌توانند پدیده‌های نوری منحصر به فرد ایجاد کنند، مانند پراکندگی اضافی نور در اطراف رشته‌ها، که در موارد استثنایی ارزش زیبایی‌شناختی را افزایش می‌دهد. طیف جذب UV-Vis نشان‌دهنده باندهای جذب در ۴۴۳ و ۵۷۵ نانومتر است، که شدت آن‌ها تیرگی رنگ را تعیین می‌کند. لوستر و شفافیت بالای نمونه‌های باکیفیت امکان نمایش عمق رنگ را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها نیازمند طراحی تراش دقیق هستند تا از نشت نور یا ایجاد سایه جلوگیری شود (Ahadnejad et al., 2022; Giuliani et al., 2025).

۳- چالش‌های عمده تراش و راهکارهای تلفیقی

در فرآیند تراش دمانتوئید کرمان، هفت چالش کلیدی شناسایی شده است که هر یک نیازمند راهکارهای تلفیقی علمی و عملی می‌باشند. این چالش‌ها در جدول ۱ به طور خلاصه ارائه شده‌اند (مشاهدات و مصاحبه‌های میدانی نویسنده با گوهرتراشان ایرانی، ۱۴۰۲). چالش‌ها اغلب به صورت درهم‌تنیده ظاهر می‌شوند و مدیریت مؤثر آن‌ها نیازمند رویکردی یکپارچه است (kiani et al., 2025; Nouri Sandiani et al., 2021).

جدول ۱: چالش‌ها و راهکارهای فرآوری گارنت دمانتوئید کرمان

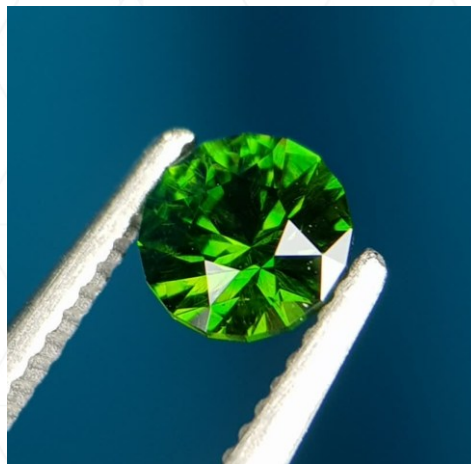
چالش و عنوان	تحلیل علمی	راهکارهای تلفیقی پیشنهادی
۱. مدیریت ناخالصی «هورس‌تیل» و تعیین جایگاه بهینه	ارزیابی ریسک این ناخالصی‌های رشته‌ای بر اساس ترکیب (کلسیت)، تراکم و راستا انجام می‌شود. صفحه‌های تراش موازی با راستای غالب رشته‌ها، تنش را حداقل می‌کند.	الگوریتم تصمیم‌گیری: ابتدا ایمنی ساختاری و سپس ارزش زیبایی‌شناختی ناخالصی ارزیابی شود. برای نمونه‌های استثنایی «خورشیدی»، طراحی باید به گونه‌ای باشد که نقطه کانونی ناخالصی نزدیک کیولت قرار گیرد و رشته‌ها به سمت تبیل باز شوند. در غیر این صورت، استراتژی اصلی حذف یا بی‌خطر سازی با قرارگیری در حاشیه است
۲. تیرگی رنگ و پدیده‌های نوری نامطلوب	رنگ تیره ناشی از جذب قوی نور توسط آهن است. پدیده «پنجره» به دلیل زوایای کم پاولیون و «سایه» به دلیل زوایای زیاد یا جذب شدید نور رخ می‌دهد.	الف) بازرسی با غوطه‌وری در آب و چرخش زیر نور قوی. ب) رعایت زوایای بهینه: پاولیون: ۴۰.۵-۴۲ درجه، تاج: ۳۴-۳۶ درجه. ج) اولویت پاکیزگی مطلق تبیل و هدایت ناخالصی‌های کوچک به بخش‌های پایینی پاولیون
۳. حساسیت به شوک حرارتی	تفاوت ضریب انبساط حرارتی بین دمانتوئید و ناخالصی‌های کلسیتی می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی حرارتی شود.	استفاده از جریان مداوم آب سرد، اعمال فشار کم و ضربه‌های کوتاه، و استراحت دادن به سنگ بین مراحل تراش
۴. سختی متوسط و آسیب‌پذیری در برابر خراش	سختی موس ۶.۵-۷.۵ دمانتوئید را در برابر ذرات ساینده آزاد آسیب‌پذیر می‌کند.	تفکیک چرخ‌های هر مرحله، توالی منظم ساینده‌ها (از ۶۰۰ به ۵۰۰۰ مش)، و پرداخت نهایی با اکسید سریم بر چرخ لاستیکی
۵. حفظ حداکثر وزن قیروطی	بازدهی وزن تابعی مستقیم از انطباق طرح تراش نهایی با هندسه بلور خام است.	توالی تصمیم‌گیری: ۱) مدیریت ناخالصی‌ها، ۲) بهینه‌سازی رنگ، ۳) حداکثر کردن عرض کمربند. شروع تراش با ساینده‌های ریز (مش ۱۰۰۰+) برای کنترل بهتر و حداقل اتلاف ماده
۶. پولیش‌پذیری دشوار	ناهمسان‌گردی سایشی، تفاوت سختی با ناخالصی‌ها و حساسیت حرارتی میکروسکوپی از علل علمی این چالش هستند.	پروتکل بهینه پولیش: پیش‌پرداخت با ۳۰۰۰ مش. پرداخت اولیه با پودر الماسه ۱.۵ میکرون (معادل ۶۰۰۰۰ مش) روی چرخ مسی و روغن. پرداخت نهایی با اکسید آلومینیوم روی چرخ قلع و آب
۷. انتخاب طرح تراش بهینه	طرح تراش باید میان بهینه‌سازی نوری، بازدهی وزن و استحکام مکانیکی تعادل ایجاد کند.	سه طرح کلاسیک پیشنهادی: برلیان گرد (برای حداکثر «آتش»)، استپ کات مربعی (برای حداکثر بازدهی وزن و نمایش رنگ)، و کوسن (برای استحکام ساختاری بالا). انتخاب نهایی مبتنی بر شکل اولیه بلور و معیارهای جدول فوق است

۴- ارزیابی سه تراش بهینه برای دمانتوئید

انتخاب طرح تراش برای دمانتوئید تابعی از تعادل بین به حداکثر رساندن جلوه‌های نوری (درخشش و آتش)، حفظ بیشترین وزن ماده خام و تطبیق با شکل اولیه بلور است.

۴-۱- تراش برلیان گرد

این تراش با هندسه استاندارد و ۷۳ فست، به‌طور ویژه برای نمایش پراکندگی نوری بالا (آتش) دمانتوئید طراحی شده است (شکل ۱). زوایای دقیق تاج و پایه باعث می‌شوند که نور ورودی بهینه تجزیه و بازتاب شود. با توجه به ضریب شکست حدود ۱.۸۸ دمانتوئید، محاسبه دقیق این زوایا برای جلوگیری از نشت نور (پنجره‌ای شدن) ضروری است. این تراش مناسب بلورهای با کیفیت عالی است؛ یعنی نمونه‌های شفاف و با حداقل ناخالصی، که هدف اصلی نمایش حداکثر بازی نور می‌باشد. در چنین شرایطی، تراش برلیان گرد گزینه نخست برای نمایش جلوه‌های اپتیکی دمانتوئید محسوب می‌شود.



شکل ۱: تراش برلیان گرد در دمانتوئید

۴-۲- تراش استپ (امرالد) مربعی

تراش استپ (امرالد) مربعی با نسبت طول به عرض ($L/W = 1$) به دلیل تطبیق ذاتی با سیستم کریستالوگرافی مکعبی (ایزومتریک) دمانتوئید، یک گزینه بهینه جایگزین تراش بیضی محسوب می‌شود. بلورهای خام دمانتوئید اغلب به شکل مکعبی، اکتاهدرال یا دوازده‌وجهی هستند. تراش مربعی استپ با حداقل دورریز ماده بیشترین همخوانی را با این اشکال هندسی اولیه دارد و بازدهی وزن قیراطی را به حداکثر می‌رساند (شکل ۲). اگرچه این تراش نسبت به برلیان گرد میزان «آتش» کمتری نمایش می‌دهد، فست‌های موازی و بزرگ آن یک میدان باز و شفاف ایجاد می‌کنند. این ویژگی امکان نمایش بی‌وقفه عمق و خلوص رنگ سبز را فراهم کرده و بیننده می‌تواند ناخالصی‌های زیبای هورس‌تیل را به وضوح مشاهده کند. این تراش برای نمونه‌هایی با رنگ عالی و شفافیت بالا که هدف نمایش رنگ و وضوح است، ایده‌آل می‌باشد (Bindereif et al., 2020).



شکل ۲: تراش استپ (امerald) مربعی در دمانتوئید

۴-۳- تراش کوسن

این تراش به‌عنوان یک طرح کلاسیک با گوشه‌های گرد و سطوح فست بزرگ، ساختار مکانیکی مستحکم‌تری نسبت به بسیاری از تراش‌ها ایجاد می‌کند. توزیع یکنواخت‌تر تنش در لبه‌ها باعث کاهش خطر ترک‌خوردگی در گوهرهایی با سختی متوسط، مانند دمانتوئید، می‌شود. تراش کوسن معمولاً شکلی بینابین میان گرد و مربعی دارد و از انعطاف‌پذیری بالایی برای تطبیق با باقی‌مانده‌های بلور خام برخوردار است؛ به‌ویژه در مواردی که پس از اجرای یک تراش مربعی اصلی، ماده خام اضافی باقی می‌ماند. اگرچه میزان «آتش» در تراش کوسن معمولاً کمتر از تراش گرد خالص است، اما این طرح با ارائه ترکیبی متعادل از رنگ، درخشش و دوام مکانیکی، گزینه‌ای مناسب برای مدیریت ریسک در فرآوری دمانتوئید محسوب می‌شود (Andradite – Demantoid, GIA).

۵- مقایسه تراش‌های دمانتوئید و معیارهای مؤثر در انتخاب تراش بهینه

به‌منظور تسهیل فرآیند تصمیم‌گیری در انتخاب تراش مناسب دمانتوئید، مقایسه‌ای میان تراش‌های رایج بر اساس معیارهای فنی و فرآوری انجام شده و خلاصه نتایج در جدول شماره ۲ ارائه شده است. در ادامه، ملاحظات پیش‌رو در انتخاب تراش بهینه گارنت دمانتوئید کرمان نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جدول ۲: مقایسه تراش‌های بهینه برای گارنت دمانتوئید کرمان

تراش	مزیت اصلی	بهترین کاربرد	ملاحظات برای دمانتوئید کرمان
برلیان گرد	حداکثر نمایش پراکندگی نوری (آتش)	بلورهای شفاف، بی‌عیب یا با ناخالصی کم برای نمایش "آتش" استثنایی دمانتوئید	ایده‌آل است.
استپ کات مربعی (L/W=1)	حداکثر بازدهی وزن و نمایش عمق رنگ	بلورهای با رنگ غنی، شکل مکعبی اولیه، یا برای نمایش ناخالصی‌های هورس تیل	با سیستم بلوری دمانتوئید هماهنگی ذاتی دارد. رنگ سبز نمونه‌های کرمان را به خوبی نمایش می‌دهد.
کوسن	استحکام ساختاری بالا و کاهش تنش در لبه‌ها	بلورهای با شکل نامنظم یا دارای ترک‌های ریز حاشیه‌ای	برای نمونه‌های حساس‌تر که نیازمند احتیاط هستند، ایمن‌ترین انتخاب است.

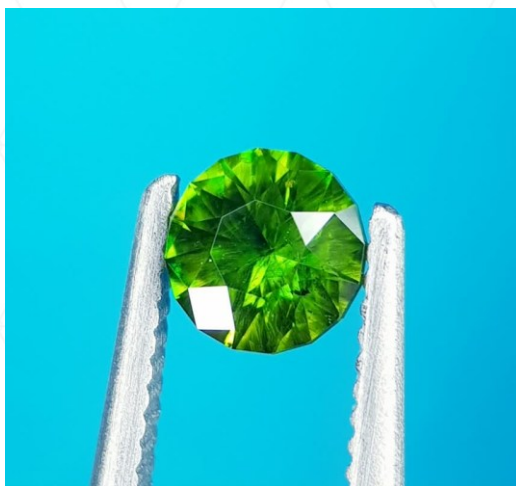
۵-۱- حفظ حداکثری وزن قیراطی

حفظ حداکثری وزن قیراطی در تراش دمانتوئید به معنای حداکثر کردن وزن نهایی سنگ بدون قربانی کردن کیفیت است و مستقیماً به هندسه بلور خام و تطبیق طرح تراش نهایی با آن وابسته است. مطالعات نشان می‌دهد انتخاب تراش‌هایی با انطباق هندسی بالا، بازدهی وزنی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد و حفظ بیشترین عرض در کمر بند سنگ، تأثیر مستقیمی بر وزن قیراطی نهایی دارد. تراشکاران باتجربه بر اهمیت احترام به شکل اصلی بلور تأکید می‌کنند و معتقدند جهت تراش باید بیشترین قطر ممکن را حفظ کند، ضمن اینکه جهت ناخالصی‌ها و رنگ بهینه نیز مدنظر قرار گیرد. آغاز تراش با ساینده‌های نرم (مش بالا) از برداشت غیرضروری ماده در مراحل اولیه جلوگیری می‌کند و به حفظ وزن کمک می‌کند.

در انتخاب نهایی طرح تراش، ابتدا ناخالصی‌های بحرانی مانند هورس تیل‌های شکاف‌زا مدیریت می‌شوند تا سنگ ایمن باقی بماند، سپس جهت‌هایی که بهترین رنگ را نمایش می‌دهند انتخاب می‌شوند و در نهایت جهتی برگزیده می‌شود که حداکثر عرض کمر بند را حفظ کند. این رویکرد اغلب منجر به پذیرش نسبت‌هایی در تراش بیضی یا کوسن می‌شود که با شکل طبیعی بلور هماهنگ بوده و بازدهی حجمی و وزنی را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، تطبیق طرح کلاسیک با هندسه بلور خام، شامل سه گزینه بهینه یعنی استپ کات مربعی، برلیان گرد و کوسن، با اعمال تغییرات جزئی در نسبت‌ها، امکان حداقل اتلاف ماده و حفظ حداکثری وزن قیراطی را فراهم می‌آورد (Adamo et al., 2009).

۵-۲- مدیریت ناخالصی «هورس تیل» و جایگاه بهینه آن در سنگ تراش خورده

مدیریت ناخالصی‌های هورس تیل در دمانتوئید اهمیت بالایی دارد، زیرا این رشته‌های کلسیتی می‌توانند تنش‌های تراش را افزایش داده و کیفیت نهایی سنگ را تحت تأثیر قرار دهند. در ابتدا، هورس تیل‌ها بر اساس ترکیب کانی‌شناسی، تراکم و راستای نسبی طبقه‌بندی می‌شوند تا ریسک‌های بالقوه شناسایی گردد. تراشکاران با توجه به راستای غالب رشته‌ها، صفحات تراش را طوری طراحی می‌کنند که تنش عمود بر رشته‌ها به حداقل برسد و قرارگیری ناخالصی‌ها زیر فست‌های پاپیلیون، قابلیت مشاهده آن‌ها را کنترل کند (شکل ۳). در بیشتر موارد، هورس تیل به‌عنوان مانع محسوب می‌شود و ارزش سنگ را کاهش می‌دهد؛ با این حال، در نمونه‌های نادر که رشته‌ها تک‌شاخه، بازشونده و از نظر بصری زیبا هستند، می‌توان از آن‌ها به عنوان نقطه کانونی طراحی استفاده کرد. بهترین نمایش چنین ناخالصی‌هایی زمانی حاصل می‌شود که نقطه مرکزی هورس تیل نزدیک به کیولت و رشته‌ها به سمت تیبل گسترش یافته باشند، ضمن اینکه پرداخت با کیفیت بالا، وضوح آن‌ها را حفظ می‌کند. این رویکرد تنها برای کمتر از ۵٪ نمونه‌ها توصیه می‌شود. در سایر موارد، مدیریت ریسک و حداقل‌سازی تأثیر منفی اولویت دارد (Hanco) Zwaan, 2022; Sorokina et al., 2023).



شکل ۳- ناخالصی هورس تیل در تراش برلیان گرد

۵-۳- مدیریت تیرگی رنگ و طراحی دقیق زوایا برای حداقل سازی سایه و پنجره

تیرگی رنگ در دمانتوئید ناشی از جذب قوی نور توسط یون‌های آهن (Fe^{3+}) است که باعث عمق رنگ می‌شود، اما مشاهده جزئیات داخلی را دشوار کرده و ریسک ایجاد سایه و پنجره را افزایش می‌دهد. پنجره زمانی رخ می‌دهد که نور از پاولیون فرار می‌کند و سایه زمانی شکل می‌گیرد که نور بازتاب کامل می‌شود اما به سمت ناظر هدایت نمی‌گردد. در سنگ‌های تیره، این مناطق مرده با رنگ اصلی ادغام می‌شوند و ضرورت طراحی دقیق زوایا را برجسته می‌کنند. برای مدیریت این چالش‌ها، ابتدا سنگ خام با غوطه‌وری در آب و نور قوی بررسی می‌شود تا ناخالصی‌ها و ترک‌های پنهان شناسایی شده و نقشه‌برداری شوند. ناخالصی‌های بزرگ و پرریسک باید در مرحله پیش‌فرم حذف شوند، در حالی که ناخالصی‌های کوچک و کم‌تعداد می‌توانند حفظ شده و به قسمت‌های پایین پاولیون یا نزدیک کمر بند هدایت شوند تا تأثیر آن‌ها بر تیرگی و سایه حداقل شود. تیبل باید کاملاً پاک و عاری از هرگونه ناخالصی باشد، زیرا مرکز توجه بیننده بوده و هر عیبی ارزش ادراکی سنگ را کاهش می‌دهد. همزمان با مدیریت ناخالصی‌ها، طراحی دقیق زوایا حیاتی است. کوچک‌ترین انحراف از زاویه بهینه می‌تواند باعث ایجاد مناطق مرده یا نشت نور شود، بنابراین زوایای پاولیون و تاج باید در محدوده‌های مشخصی قرار گیرند و در تمام مراحل تراش کنترل شوند. اجرای این رویکرد مرحله‌ای با ساینده‌های نرم و پیش‌فرم محافظه‌کارانه، همراه با جای‌دهی آگاهانه ناخالصی‌ها، موجب کنترل تیرگی، کاهش سایه و پنجره و نمایش بهینه رنگ و جزئیات داخلی سنگ می‌شود (Ahadnejad et al., 2022; Giuliani et al., 2025).

۵-۴- پولیش‌پذیری دشوار و مدیریت خطر خراش‌های ریز

پولیش دمانتوئید کرمان با چالش‌هایی نظیر سختی متوسط، حساسیت حرارتی، و اختلاف سختی بین ماتریس و ناخالصی‌ها همراه است که می‌تواند باعث ایجاد خراش‌های ریز و سطوح ناهموار شود. سایش ناهمسان‌گرد در جهات مختلف شبکه بلوری، حضور ناخالصی‌هایی مانند کلسیت و حرارت موضعی ناشی از اصطکاک، از علل اصلی این دشواری‌ها به شمار می‌روند. گوهر تراشان باتجربه برای مدیریت این چالش‌ها پروتکل‌هایی طراحی کرده‌اند که شامل شکل‌دهی اولیه محافظه‌کارانه با صفحات ساینده ریز (مش ۱۰۰۰-۱۵۰۰)، آماده‌سازی سطح با ساینده‌های ۳۰۰۰ مش، و پرداخت مرحله‌ای با چرخ مسی و روغن همراه با پودر الماسه ۱.۵ میکرون و در نهایت چرخ قلع با سوسپانسیون اکسید آلومینیوم است. اجرای مرحله‌ای با فشار کم، حرکت مداوم سنگ و شستشوی بین مراحل، خطر گرمایش موضعی و خراش‌های ریز را به حداقل می‌رساند. انتخاب چرخ و روان‌ساز مناسب در هر مرحله، توالی دقیق ساینده‌ها و کنترل اندازه ذرات (۱.۵ میکرون ≈ 60000 مش، ۰.۱ میکرون ≈ 150000 مش) از اصول کلیدی این رویکرد هستند. این پروتکل امکان مدیریت پولیش‌پذیری دشوار و دستیابی به جلای نهایی یکنواخت، فاقد خراش و با حداکثر وضوح رنگ و جزئیات را فراهم می‌کند (Stockton and Vincent Manson, 1983; Hirt et al., 2022).

۶- بحث و نتیجه‌گیری

چالش‌های تراش دمانتوئید کرمان درهم‌تنیده هستند، به طوری که تصمیم درباره جهت تراش همزمان بر مدیریت ناخالصی، نمایش رنگ و بازدهی وزن اثر می‌گذارد. از این رو، روش‌های خطی و غیرانعطاف‌پذیر محکوم به شکست‌اند. راهبرد موفق، اتخاذ یک چرخه تصمیم‌گیری تطبیقی است که در آن، تراشکار پس از هر مرحله از ارزیابی و شکل‌دهی، موقعیت را بازبینی می‌کند. نکته حائز اهمیت دیگر، لزوم سرمایه‌گذاری زمانی در مراحل ابتدایی (بازرسی و پیش‌فرم) است. همان‌طور که در راهکار چالش پولیش مشاهده شد، شروع با ساینده‌های ریزگرید اگرچه زمان‌بر است، ولی در نهایت با جلوگیری از شکست و اتلاف ماده، کارایی کلی را افزایش می‌دهد. ویژگی‌های اپتیک منحصربه‌فرد دمانتوئید کرمان، مانند پراکندگی بالا و ضریب شکست، نقش کلیدی در انتخاب تراش دارند و می‌توانند با مدیریت صحیح، ارزش گوهر را چند برابر کنند. این مقاله نشان می‌دهد که فرآوری دمانتوئید کرمان دیگر یک هنر محض یا یک فن نیست، بلکه دانشی بین‌رشته‌ای است که از زمین‌شناسی، مهندسی مواد، اپتیک و تجربه عملی سیراب می‌شود. تلفیق این دانش‌ها در قالب راهکارهای نظام‌مند ارائه‌شده، می‌تواند سهم ایران را در زنجیره ارزش این گوهر نادر از استخراج خام به فرآوری نهایی و باارزش، ارتقاء بخشد. پیشنهاد

می‌شود تحقیقات آینده بر شبیه‌سازی‌های کامپیوتری برای پیش‌بینی رفتار نوری و مکانیکی تمرکز کنند تا ریسک را بیشتر کاهش دهند. در نهایت، با پیاده‌سازی این استراتژی‌ها، تراشکاران می‌توانند از پتانسیل کامل دمانتوئید کرمان بهره‌برداری کنند و جایگاه ایران را در بازار جهانی گوهرها تقویت نمایند.

۷- منابع

- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J. (2016). Thermal stress-induced microcracking in building granite. *Engineering Geology* 206(3).
- Read, P. G. (2005). *Gemmology*. Butterworth-Heinemann.
- Giuliani, G., Groat, L., Ohnenstetter, D., Fallick, A.E., Feneyrol, J. (2019). THE GEOLOGY OF GEMS AND THEIR GEOGRAPHIC ORIGIN. *Geology of Gem Deposits Second Edition* (pp.113-134).
- Ahadnejad, V., Krzemnicki, M.S., Hirt, A.M. (2022). Demantoid from Kerman Province, South-east Iran: A Mineralogical and Gemmological Overview. *The Journal of Gemmology*, 38(4):329–347.
- Giuliani, G., Pignatelli, I., Feneyrol, J., Fallick, A.E., Andriamamonjy, A. (2025). Demantoid Garnet Deposits: Review and Geological Classification, *The Canadian Journal of Mineralogy and Petrology* (2025) 63 (5): 421–465.
- مشاهدات و مصاحبه‌های میدانی نویسنده با گوهرتراشان ایرانی (۱۴۰۲).
- kiani, M., Saki, S., Keyvani, F., Sadeghi, H. (2025). Demantoids from south Kerman, Iran: Gemological and Mineralogical Characterization. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, Volume 33, Issue 3 - Serial Number 99, Pages 561-572.
- Nouri Sandiani, F., Stern, B., Azizi, H. (2021). A review of garnet deposits in western and southern Iran. *International Geology Review*, Taylor & Francis, 64(1):1-28.
- Bindereif, S.G., Rüll, F., Schwarzing, S., Schwarzing, C. (2020). Chemometric Modeling of Trace Element Data for Origin Determination of Demantoid Garnets. *Minerals*, 10(12), 1046.
- Andradite - Demantoid | Iran, Kerman Province. GIA.
- Adamo, I., Bocchio, R., Diella, V., Pavese, A., Vignola, P., Prosperi, L., Palanza, V. (2009). Demantoid from Valmalenco, Italy: Review and Update. *Gems & Gemology* 45(4).
- (Hanco) Zwaan, J.C. (2022). Demantoid Garnet from Antetozambato, Northern Madagascar—Internal Characteristics and Their Use in Deciphering Geographic Origin, *The Journal of Gemmology* 38(1):64-79.
- Sorokina, E.S., Albert, R., Botcharnikov, R.E., Häger, T. (2023). Origin of Uralian andradite (var. demantoid): Constraints from in situ U-Pb LA-ICP-MS dating and trace element analysis, *Lithos* 444-445(107091).
- Stockton, C.M., Vincent Manson, D. (1983). Gem Andradite Garnets. *Gems & Gemology*, Vol. 19, No. 4, GIA.
- Hirt, A.M., Krzemnicki, M.S., Ahadnejad, V. (2022). Demantoid from Kerman Province, South-east Iran: A Mineralogical and Gemmological Overview, *The Journal of Gemmology*, 38(4), 329–347.

مطالعه بر روی حضور کانی جاروسیت در یک افق شبه سولفوریک در یک خاک اینسپتی سول: مطالعه موردی در جنگل سوزنی برگ سرو زربین، مرزن آباد، استان مازندران

علیرضا صیامی^{۱*}، محسن شکل آبادی^۲

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

alireza.siami1989@hotmail.com

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

خاک‌های آهکی، که از مواد مادری آهکی تشکیل شده‌اند، به دلیل ویژگی‌هایی نظیر pH بالا، کمبود مواد آلی با تشکیل لایه های سولفوریکی خاک در تناقض هستند. در مطالعه صورت گرفته بر روی این گونه اراضی تحت پوشش گیاهی سوزنی برگ در منطقه مرزن آباد مازندران اقدام به بررسی پتانسیل تشکیل لایه های اسیدی و حداقل شبه سولفوریکی و حضور کانی های سولفات دار به سبب مشاهده رنگ زرد لایه زیرین خاکرخ و استعداد بیشتر این خاک ها به سبب پوشش گیاهی همیشه سبز سوزنی برگ کردیم. در این مطالعه یک خاکرخ شاهد که خصوصیات مورفولوژیکی و رنگ ویژه و متفاوت زرد نسبت به سایر خاکرخ ها داشت انتخاب و تشریح و نمونه برداری و جهت آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی و کانی شناسی به آزمایشگاه انتقال داده شد. نتایج آنالیز ها حکایت از غیر اسیدی و خنثی بودن pH خاک ها مورد مطالعه با مقادیر نسبتا اندک آهن و آلومینیوم پدوزنیک و آمورف می باشد. مقدار کربن آلی قابل قبول بوده است و کربنات کلسیم معادل خاک بالا و در حدود ۴۰ درصد می باشد و طبقه بندی خاکرخ مورد مطالعه در رده خاک های جوان اینسپتی سول قرار گرفت. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برغم نتایج آنالیز های شیمیایی بیانگر حضور بالای کانی جاروسیت با پیک ۰/۳۰۸ نانومتر و کانی های اکسید مگنز همچون مانگانیت و رامسدلایت و همچنین وجود کوآرتز و کلسیت و نهایتا کانی های غیر بلورین در مقادیر اندک است. به سبب تشکیل و حضور کانی سولفات دار جاروسیت عمده تا در خاک ها و تشکیلات اسیدی حضور آن در خاک مورد مطالعه خارج از پژوهش های تاکنون صورت گرفته است. حضور اکسیدهای مگنز می تواند به وجود شرایط احیایی و رژیم رطوبتی اکوتیک خاک در منطقه و ارتباط معنا دار بین این شرایط و pH خاک در مطالعات سایر پژوهشگران شاید بتوان ارتباط هرچند مبهمی برای تشکیل کانی جاروسیت در یک خاک آهکی برقرار کرد. در نهایت احتمال وجود یک ماده مادری و زمین شناسی متفاوت و خاص در منطقه و عدم مطالعه آن تاکنون به سبب موضعی بودن آن و همچنین شارژ این کانی به خاک جدا از هرگونه فرایند خاکشناختی دلیل دیگری بر حضور کانی جاروسیت باشد.

کلیدواژه‌ها: جاروسیت، کانی شناسی، مانگانیت و رامسدلایت، افق سولفوریک، اینسپتی سول

Investigation on the Presence of Jarosite in a Semi-Sulfuric Horizon of an Inceptisol: A Case Study in the Fir-Dominated Coniferous Forest, Marzanabad, Mazandaran Province

Alireza Siami^{1*}; Mohsen Shekabaladi²

¹ Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

alireza.siami1989@hotmail.com*

² Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract

Calcareous soils, originating from calcareous parent materials, are generally characterized by high pH, which typically contradicts the formation of organic matter horizons and the development of sulfuric soil layers. In a study conducted on such land under fir-dominated coniferous vegetation in the Marzanabad region of Mazandaran, we investigated the potential for acidic and at least sulfuric-like horizon formation and the presence of sulfate minerals. This investigation was prompted by the observation of a distinct yellow color in the subsurface horizon and the increased susceptibility of these soils due to the evergreen coniferous cover.

A representative pedon exhibiting distinct morphological characteristics and a unique yellow hue, differentiating it from adjacent soil profiles, was selected, described, sampled, and transferred to the laboratory for physicochemical and mineralogical analyses. The analytical results indicated that the studied soils were non-acidic to neutral in pH, with relatively low amounts of pedogenic amorphous iron and aluminum oxides. The organic carbon content was acceptable, and the soil exhibited a high equivalent calcium carbonate content, approximately 40%, leading to the classification of the studied pedon within the young soil order, Inceptisols. Despite the chemical analyses, X-ray Diffraction (XRD) results revealed a high presence of the sulfate mineral Jarosite, identified by a characteristic peak at 0.308 nm along with manganese oxide minerals such as Manganite and Ramsdellite. Quartz and Calcite were also present, alongside minor amounts of amorphous minerals. The formation and presence of the sulfate mineral Jarosite are typically associated with acidic soils; therefore, its occurrence in the studied soil is noteworthy and deviates from previous research findings in this context.

The presence of manganese oxides suggests the possibility of reducing conditions and an Aquic moisture regime in the region. A tentative correlation might be established between these conditions and the soil pH, possibly linking them, through connections made in other researchers' studies, to the formation of Jarosite within a calcareous soil. Ultimately, the possibility of an underlying, distinct, and unstudied parent material or specific geological substrate in the region, or the charging of this mineral into the soil independently of any pedogenetic process, could be another reason for the presence of Jarosite.

Keywords: Jarosite, Mineralogy, Manganite and Ramsdellite, Sulfuric Horizon, Inceptisol

۱- مقدمه

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها تا حد زیادی توسط کانی‌های خاک کنترل می‌شود. شناسایی و درک خصوصیات کانی‌های مختلف کمک زیادی به ارزیابی خاک‌ها در ارتباط با طبقه‌بندی خاک و فعالیت زراعی و خصوصیات مهندسی آن‌ها خواهد داشت. خاک‌های آهکی، که از مواد مادری آهکی تشکیل شده‌اند، به دلیل ویژگی‌هایی نظیر pH بالا، کمبود مواد آلی، و محدودیت در دسترس‌پذیری مواد مغذی، اغلب چالش‌هایی را برای بهره‌وری کشاورزی و مدیریت پایدار ایجاد می‌کنند. در این میان، نقش پوشش گیاهی، به‌ویژه گونه‌های همیشه‌سبز مانند سرو زربین (*Cupressus sempervirens*)، در تغییر ویژگی‌های خاک و فرآیندهای تکامل خاک کمتر مورد بررسی سیستماتیک قرار گرفته است. رضاپور و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی خاک‌های مناطق مختلف آذربایجان غربی، نشان دادند که اقلیم و پوشش گیاهی تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص‌های تکامل خاک مانند تجمع رس و کانی‌های حاوی اکسیدهای آهن دارند. خاک‌های رده اسپودوسول که عمدتاً در اراضی جنگلی درختان همیشه‌سبز تشکیل می‌شوند و همچنین خاک‌های متأثر از شرایط احیایی به سبب سطح بالای آب زیر زمینی در بین انواع خاک‌ها بیشترین مقادیر کانی‌های آمورف و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم و همچنین کانی‌های احیایی همچون جاروسایت و لپیدوکروسایت را دارا می‌باشند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که جاروسیت در محدوده پایداری بسیار محدود تشکیل می‌شود و فقط از محلول‌های آبی به‌شدت اسیدی ($pH < 3$) و اکسیدکننده در سامانه‌های گوگرد دار نهشته می‌شود (Baron و Palmer، ۱۹۹۶؛ Bigham و همکاران، ۱۹۹۶). چنین شرایطی در زهکشی‌های اسیدی معادن نسبتاً معمول است (Chapman و همکاران، ۱۹۸۳؛ Alpers و همکاران، ۱۹۸۹، ۱۹۹۲) ولی در دیگر محیط‌های طبیعی زمین به‌سختی تحقق می‌یابد. بنابراین، محیط‌های تشکیل و پایداری کانی جاروسیت در زمین محدودند. در هندوستان، لایه‌های وسیع سولفات‌های آبدار با بازالت‌های هوازده در دامنه‌ی آتشفشانی دکن در منطقه‌ی Matanumadh از ایالت گجرات در غرب هند ارتباط دارند

(Shukla و همکاران، ۱۹۸۳؛ Das Gupta، ۱۹۸۴؛ Chitale و Guven، ۱۹۸۷). در این منطقه، سولفات‌های آبدار مانند ناترالونیت $(\text{NaAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ و کانی‌های رسی مانند کائولینیت پیش‌تر از افق‌های لاتریتی در استان آتشفشانی دکن گزارش شده‌اند (Chitale و Guven، ۱۹۸۷).

تشکیل افق مشخصه سولفوریک گاه‌ها از کانی همچون پیریت در آب‌های راکد تالاب صورت می‌گیرد. که طی یک واکنش ۱۴ مرحله‌ای و در طی آن پیریت در خاک‌هایی با شرایط احیایی و خصوصیات گلی تبدیل به کانی جاروسیت می‌شود. این خاک‌ها که با خاک‌های شوم (cat clay) مرتبط‌اند به شدت اسیدی و سولفات‌ها و با حاصلخیزی بسیار اندک می‌باشند. این قبیل خاک‌ها اکثراً در رسوبات آبرفتی سواحل دریا یا مسیل تشکیل می‌شوند.

هدف از انجام این مطالعه، بررسی حضور کانی جاروسیت در لایه یک خاک با شباهت به افق سولفوریک و شبه سولفوریکی که ذاتاً باید دارای pH اسیدی و گاهی رنگ نارنجی (زرد) حاصل از کانی‌های سولفات‌دار باشند در اراضی تحت پوشش گیاهی همیشه سبز در یک ناحیه با مواد مادری عمدتاً آهکی (مارن) و همچنین بررسی علت و فرضیه حضور و مشاهده این کانی در یک خاک غیر اسیدی است.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور این پژوهش یک خاکرخ شاهد از بین چند خاکرخ حفر و تشریح شده در منطقه مرزن آباد در استان مازندران به مختصات ۵۱ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱۵ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۹ دقیقه و ۲۴ ثانیه عرض شمالی تحت پوشش گیاهی درختان همیشه سبز از گونه سرو زربین (*Cupressus sempervirens*) و تحت مواد مادری آهکی و سازند مارن و اقلیم نیمه خشک و سرد و با رژیم رطوبتی خاک زریک و حرارتی مزیک که توسط نرم افزار نیوهال تعیین گردید مورد مطالعه قرار گرفت. از خاکرخ شاهد، از هر افق و لایه نمونه جمع‌آوری و جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی شیمیایی و کانی‌شناسی به آزمایشگاه منتقل گردید. در مرحله تجزیه‌های آزمایشگاهی، ویژگی‌های مرسوم خاک از قبیل بافت، واکنش خاک (pH)، کربنات کلسیم معادل خاک، کربن آلی و آهن و آلومینیوم پدوژنیک (عصاره‌گیری شده به روش سیترا-دی تیونیت-بی کربنات) و نهایتاً آهن و آلومینیوم بی‌شکل و آمورف (عصاره‌گیری با اگزالات آمونیوم) طبق دستورالعمل آزمایش ستاد نقشه برداری خاک آمریکا (وزارت کشاورزی آمریکا، ۲۰۲۲) انجام گرفت. شناسایی خاک‌ها، با توجه به نتایج تجزیه‌های آزمایشگاهی و مطالعات صحرایی و براساس نسخه سیزدهم کلید رده‌بندی خاک آمریکایی (USDA Soil Taxonomy) صورت گرفت.

برای انجام آزمایش کانی‌شناسی یک نمونه تهیه شده از لایه آخر خاکرخ شاهد (لایه C) به روش پودری با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD) برند و مدل (PANalytical (XPert PRO MPD) و با لامپ مس مورد مطالعه قرار گرفت و تحلیل و تفسیر کیفی کانی‌شناسی بر اساس تجربه نویسنده و تعیین فاصله لایه ای (d) و با استفاده از معادله قانون براگ در صفحه (۰۰۱) صورت گرفت.

۳- بحث

طبقه بندی خاکرخ مذکور با توجه حضور یک افق ژنتیکی سطحی A (افق مشخصه اکریک ایپی پدون) و یک افق ژنتیکی Bk تحت الارضی (کلسیک) تحت تاثیر نوسانات آب زیر زمینی و شرایط احیایی و نهایتاً لایه انتهایی و زیرین Cgkz (مشاهده کربنات کلسیم و کانی جاروسیت) و رژیم رطوبتی اکوتیک و زریک مطابق با سامانه طبقه بندی خاک آمریکایی در رده اینسپتی سول و تحت رده اکوتپت (Aquept) و گروه بزرگ (Endoaquepts) و زیر گروه Typic Endoaquepts قرار می‌گیرد. سطح فامیل خاک این خاکرخ در زیر آورده شده است:

Fine-loamy, carbonatic, mesic, Typic Endoaquepts

نتایج خصوصیات مورفولوژی، آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی و تصویر این خاکرخ در جداول ۱ و ۲ و شکل ۱ آورده شده است.



شکل شماره ۱- تصویر خاکرخ شاهد مورد مطالعه و لایه های نواری زرد رنگ ناشی از حضور کانی جاروسیت در لایه زیرین خاکرخ

جدول شماره ۱- خصوصیات مورفولوژیکی خاکرخ مورد مطالعه

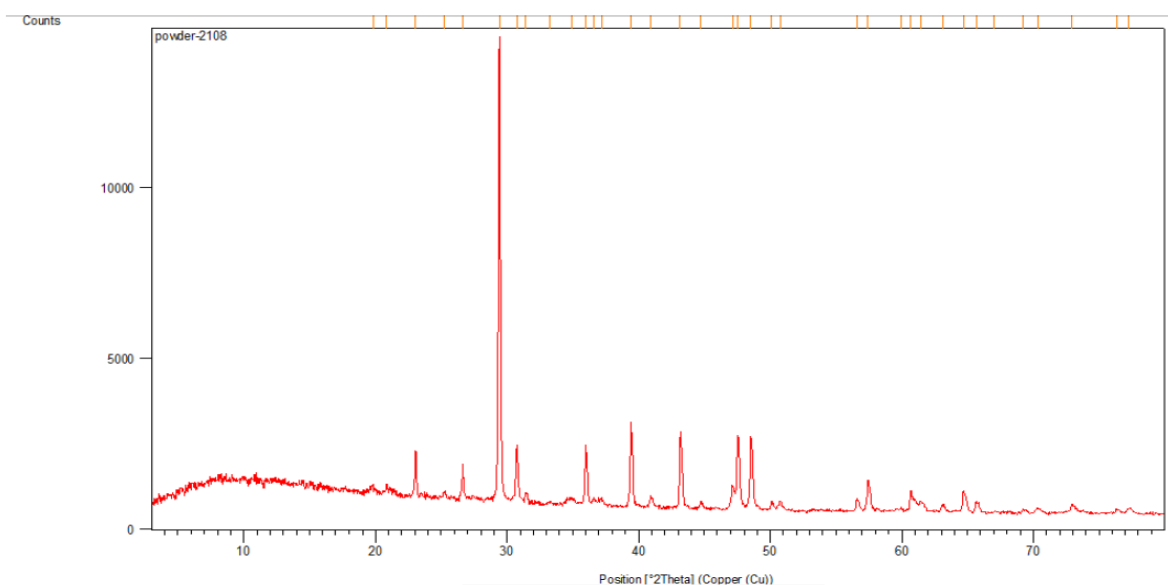
ملاحظات	ریشه	ساختمان خاک	رنگ خاک	ضخامت (سانتی متر)	افق
	متوسط و نسبتاً زیاد	دانه ای و مدور	10YR5/4 قهوه ای مایل به زرد	۰-۲۳	A
تجمع آهک پدوژنیک بیش از ۱۰ درصد به فرم پودری و رشته ای	متوسط و ریز کم	مکعبی بدون گوشه	10YR6/4 قهوه ای مایل به زرد روشن	۲۳-۷۰	Bk
حضور لکه و لایه های موازی و موجی نارنجی و زرد رنگ و شرایط گلی و احیایی	متوسط و ریز کم	مکعبی بدون گوشه	2.5Y7/6 زرد	۷۰-۱۵۰	Cgkj

جدول شماره ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاکرخ مورد مطالعه

درصد آلومینیوم پدوژنیک میلی گرم بر لیتر ppm	درصد آهن پدوژنیک میلی گرم بر لیتر ppm	درصد آهک	درصد کربن آلی	pH	کلاس بافت خاک	افق و لایه خاک
۱۴/۴۳	۳۷/۴۱	۴۸/۵۰	۴/۷۹	۷/۲۲	لوم	A
۲۳/۱۱	۴۷/۷۲	۴۹/۴۰	۱/۱۸	۷/۱۵	لومی رسی	Bk
۲۸/۴۵	۵۶/۵۸	۴۹/۳۸	۰/۷۴	۷/۳۶	لومی رسی شنی	Cgkj

بررسی الگوی پراش پرتو ایکس (شکل شماره ۲) لایه سوم خاکرخ مورد مطالعه بیانگر حضور کانی جاروسیت با فاصله لایه ای (پیک ۰/۳۰۸ نانومتر) با شدت و پراکندگی بالا و کلسیت و مانگانیت و رامسدلایت از اکسیدهای منگنز (پیک های ۰/۲۲۸-۰/۱۶۰ نانومتر) کوارتز (پیک ۰/۲۲۸ نانومتر) و اندکی حضور کانی های غیر بلورین آلفان (پیک های ۰/۱۹۱ و ۰/۱۸۷ نانومتر) می باشد. رنگ زرد لایه سوم با توجه به نتایج بدست آمده مربوط به کانی سولفات دار جاروسیت که احتمالا از اکسیداسیون سولفیدها در حضور یون های پتاسیم و سدیم می باشد. طبق بررسی منابع ((خاک های شوم)) دارای مقادیر مواد آلی قابل توجه بوده ولی کربنات کلسیم بر خلاف آنچه ما در این پژوهش یافتیم بسیار جزئی است. فرایند شناخته شده تشکیل این گونه از خاک از سولفات موجود در آب دریا با سولفید هیدروژن و کانی پیریت که در منطقه مورد مطالعه مشاهده نشده است احیا شده و گل سیاه یا آبی رنگی ایجاد می کند که پس از برقراری زهکشی اکسیداسیون سولفات تولید شده که معمولا به سبب حضور اندک کربنات کلسیم در خاک واکنش خاک بسیار کاهش پیدا کرده و لکه های زرد رنگ سولفات کانی جاروسیت در خاک مشاهده و تشکیل میشود. (بایبوردی، ۱۳۸۷)

ش



شکل شماره ۲- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه لایه سوم و زیرین (لایه Cgkz) خاکرخ شاهد

با توجه به داده های بدست آمده همچون واکنش خاک در محدوده خنثی و حضور بالای کربنات کلسیم (۰/۴۹/۳۸) و تشخیص کانی کلسیت در الگوی پراش پرتو ایکس علت حضور و تشکیل کانی جاروسیت در خاکرخ را باید در عوامل و فرضیه دیگری جستجو کنیم. قرار گیری منطقه مورد مطالعه با مواد مادری مارن آهکی در ناحیه شمالی البرز در استان مازندران و نزدیکی تقریبی به ساحل می تواند آنچه باشد که طبق مطالعه منابع سنتی، مکان مناسب برای تشکیل این کانی ذکر شده است. حال آنکه عدم حضور شرایط اسیدی در منطقه را به نظر میرسد در مقادیر آهن و آلومینیوم و همچنین حضور اکسیدهای منگنز که خود می تواند تحت تاثیر پوشش گیاهی ویژه منطقه و درختان گونه سرو (زربین) جستجو کرد. لایه زیرین و سومی این خاکرخ طبق نتایج بدست آمده از اندازه گیری آهن و آلومینیوم پدوژنیک (خاکساخت) به روش سیترا- دی تیونیت- بی

کربنات بیانگر ۰/۰۰۵۶ درصد آهن و ۰/۰۰۲۸ درصد آلومینیوم می باشند که مقادیر نسبتاً پایینی بوده و نشان دهنده ی تکامل اندک خاک می باشد و همچنین با توجه به مقدار بالاتر آن نسبت به دو لایه بالاتر حتی در مورد مقادیر آهن و آلومینیوم بی شکل و آمورف شاید بتوان تا حدودی آن را تحت تاثیر فرایندهای کلاته شدن توسط مواد آلی حاصل از ریشه درختان سوزنی برگ سرو زربین دانست. تنها احتمال به شرایط اسیدی تر را می توان در حضور کانی های اکسید منگنز (مانگنیت و رامسدالیت) دانست که طبق مطالعات راهب و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی شرایط اکوئیک در خاک رابطه مستقیمی بین مواد آلی و pH خاک بدست آوردن و همچنین این رابطه با حضور شرایط اکوئیک و pH خاک ارتباط معناداری دارد. بنابراین حضور منگنز و کانی های آن در مطالعه کانی شناسی خاک می تواند تا حدودی شرایط اسیدی تر برای حضور کانی جاروسایت در خاکرخ را توجیه کند. حضور این کانی در خاک های غیر آهکی که با نتایج ما مطابقت ندارد را باید در ارائه فرضیه ای همچون عدم مطالعه گسترده بر فرایند های تشکیل کانی جاروسیت در خاک های آهکی ایران دانست. علیرغم مقادیر زیاد کربنات کلسیم معادل خاک مورد مطالعه اما pH خاک هنوز در محدوده خنثی بوده و شرایط قلیایی ویژه ای را فراهم نکرده است و همچنین وجود مواد مادری و سنگ بستری مطالعه نشده دارای ترکیبات این نوع کانی و شارژ آن در خاک جدا از هر گونه فرایند پدوژنیکی را بتوان محتمل دانست.

طبقه بندی خاک این خاکرخ به رغم مشاهده و حضور مقدار بالای کانی سولفات دار و به سبب ظاهر نشدن خصوصیات دیگر همچون pH در محدوده بسیار اسیدی هیچکدام از لایه های این خاک معادل تعریف افق و مواد سولفوریک قرار نمی گیرد و تنها هیو رنگ نارنجی (زرد) خاک و مشاهده پیک مخصوص کانی جاروسیت برای تعریف و قرار گیری در این افق و طبقه بندی خاک کافی نبوده است.

جدا از احتمال خطا در مراحل مختلف که در تمام مطالعات علمی اجتناب ناپذیر است در انتها مطالعه بیشتر بر روی خاک های شناخته شده به نام خاک های شوم یا cat clay که رنگ هایی همچون نارنجی به سبب حاوی بودن از کانی جاروسیت تحت شرایط مختلف به ویژه در ایران با سازند های زمین شناسی عمدتاً مارن و آهکی را پیشنهاد می کنیم.

۴- نتیجه گیری

عدم ارتباط مشخص و مطالعه شده بین حضور یک کانی مخصوص خاک های اسیدی در یک منطقه آهکی را می توان به عدم مطالعه صورت گرفته بر روی ارتباط و فرایندهای ناشناخته دیگر در تشکیل جاروسیت و خاک های اسیدی سولفوریک اشاره کرد و همچنین وجود یک تشکیلات زمین شناسی ویژه با مقادیر بالای کانی مذکور و یا آزاد شدن آن تحت فرایندهای هوازدگی چه فیزیکی و چه شیمیایی را نباید نادیده بگیریم. هرچند نقش پوشش گیاهی ویژه منطقه که از گیاهان غیر بومی ایران است و عمدتاً در عرض های شمالی رشد می کند در انجام فرایند منتهی به حضور کانی جاروسیت را نباید نادیده گرفت.

۵- مراجع

- راهب، ع.، حیدری، ا.، محبی صادقی، م.ج.، ۲۰۱۴. بررسی تأثیر شرایط اکوئیک بر شکل های مختلف آهن و منگنز در خاک های اینسپتی سول زیر کشت برنج و کیوی. "پژوهش های خاک جلد ۲۸، شماره ۲، صفحات ۳۵۱-۳۶۲.
- صیامی، ع.، ۱۴۰۴. مطالعه مدل و شاخص تکامل خاک بر روی تاثیر پوشش گیاهی همیشه سبز با تمرکز بر گونه سرو زربین بر روی یک توالی زیستی و توپوگرافی (topo-biosequenc) در خصوصیات فیزیکی شیمیایی و تکامل خاک تشکیل یافته از مواد مادری آهکی در منطقه مرزن آباد استان مازندران، رساله دکتری، دانشگاه بوعلی سینای همدان، بایبوردی، م.، ۱۳۸۷. خاک: پیدایش و رده بندی، انتشارات دانشگاه تهران،

Alpers, C. N., D. K. Norstrom, and J. M. Buchard (1992), Compilation and interpretation of water-quality and discharge data for acid mine waters at Iron Mountain, Shasta County, California 1940–1991, U.S. Geol. Surv., Water-Resour. Invest. Rep. 91-4160, 173

Alpers, C. N., D. K. Norstrom, and J. W. Ball (1989), Solubility of jarosite solid solution precipitated from acid mine water, Iron Mountain, California, U.S.A, Sci. Géol. Bull., 42, 281–298

Baron, D., and C. D. Palmer (1996), Solubility of jarosite at 4–35°C, Geochim. Cosmochim. Acta, 60, 185–195

Bigham, J. M., U. Schwertmann, S. J. Traina, R. L. Winland, and M. Wolf (1996), Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters, Geochim. Cosmochim. Acta, 60, 2111–2121

Chapman, B. M., D. R. Jones, and R. F. Jung (1983), Processes controlling metal ion attenuation in acid mine drainage streams, Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 1957–1973

Chitale, D. V., and N. Guven (1987), Natroalunite in a laterite profile over Deccan Trap basalt at Matanumadh Kachchh India, Clays Clay Miner., 35, 196–202

Das Gupta, S. K. (1984), Bauxite and aluminum ore resources in India, in Bauxite, edited by L. Jacob, pp. 451–485, Am. Inst. Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York

.Dixon, J.B. , and Schulze , D.G(2002) , Soil Mineralogy with Environmental Applications

Shukla, R. T., K. S. Balasubramaniam, and N. Madhukara (1983), Paleoenvironment, stratigraphy and genesis of bauxite deposits of Gujarat state, India, in Proceedings of the 2nd International Seminar on Lateritisation Processes, edited by A. J. Melfi and A. Carvalho, pp. 209–224, I.A.G.C., Silo, Paulo, Brazil

نقش فرایند منیزی می شدن ثانویه کلسیت در لایه سخت سطحی آهکی در مخفی ماندن فروچاله های زیر سطحی دشت آبرفتی ابرکوه در استان یزد

محمد اخوان قالیباف^{۱*}، مرضیه لاری^۲

۱- عضو پژوهشی، دانشیار گروه کنترل بیابان زایی انسانی و کویر شناسی پژوهشکده مناطق خشک دانشگاه یزد،

makhavanghalibaf@gmail.com , makhavan@yazd.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری بیابان گروه مدیریت و احیای بیابان دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی دانشگاه یزد

چکیده

در حاشیه شمال غرب تا شمال شرق شهر ابرکوه در حاشیه کویر ابرکوه در استان یزد پدیده نشست زمین و رخداد فروچاله ها به یک چالشی بزرگ مبدل شده است. در این ناحیه، محل تشکیل فروچاله های عمدتاً مخفی، عوامل گوناگونی در پیدایش و تشدید آن نقش داشته اند. از جمله این عوامل می توان به ترکیب نوع کانی های رسی با کانی های انبساط پذیر در رسوبات آبرفتی ریز دانه در حاشیه کویر یا چاله ابرکوه اشاره نمود که با پایین رفتن سطح آب زیر زمینی و نوسانات آب در دوره های فصلی تر و خشک سال فرونشست و به دنبال آن فروچاله ها را به دنبال داشته است. هدف از این تحقیق دلایل مخفی ماندن چاله ها یا کارست های زیر زمینی از دید مستقیم تا زمان وقوع حادثه با آشکار شدن چاله ها در ابعاد مختلف بوده است. چاله های زیر سطحی در مراحل اولیه و یا حتی پیشرفته با یک لایه نسبتاً سخت آهکی پوشیده شده است. با آزمایشاتی که از این لایه سخت آهکی به عمل آمد نشان داده شد که در مراحل اولیه و رسوب آهک ثانویه که می تواند زمانی باشد که سطح آب زیر زمینی نزدیک سطح زمین در حاشیه کویر بوده است هسته های اولیه این سخت لایه تشکیل شده است. سپس به تدریج به دلیل غلظت بالای یون منیزیم در آب زیر زمینی و یا آبی که توسط چاه کشاورزی اراضی را غرقاب نموده است، زمینه جانشینی منیزیم با کلسیم در کلسیت و منیزی می شدن آن صورت گرفته که در محل به سرشک (Sershak) معروف است. این لایه آهکی منیزیم دار به اندازه لازم سختی را در لایه سطحی پروفیل خاک فراهم نموده است تا کارست رسوبی فرصت کافی را برای رشد و توسعه داشته باشد. با توسعه چاله ها و با انجام و عملیات سازه ای و کشاورزی بر روی سطح نهایتاً در زمانی که نیروی مقاوم سرشک غلبه کند به ناگاه محدوده ای به وسعت چند ده متر مربع تا چند صد متر مربع دچار نشست و چاله در بخش های متفاوت ناحیه شده است. این روند توسعه چاله های زیر زمینی با جریان های آب سطحی و سیلاب های مدیریت نشده همچنان در حال توسعه است.

کلیدواژه‌ها: ابرکوه، فروچاله، سرشک، آهک منیزیم دار، آب های سطحی.

The role of magnesium – calcite procedure in surface lime layer in hiding subsurface sinkholes of Abarkooh Alluvial plain, in Yazd province

Mohammad Akhavan Ghalibaf^{1*}, Marzieh Lari²

1- Research Member, Associate Professor, Human Desertification Control and Desertification Group, Arid Regions Research Institute, Yazd University, makhavanghalibaf@gmail.com , makhavan@yazd.ac.ir

2- PhD Student in Desert Management and Restoration Department, Faculty of Natural Resources and Desertification, Yazd University

Abstract

On the northern outskirts of northwest to the northeast of Abarkooh city, on the edge of Abarkooh desert in Yazd province, the phenomenon of land subsidence and the occurrence of sinkholes has become a major challenge. In this area, where sinkholes are mostly hidden, various factors have played a role in their emergence and intensification. Among these factors, we can mention the combination of clay minerals with expandable minerals in fine-grained hydrophlogistic sediments on the edge of the desert or Abarkooh pit, which subsided with

the lowering of the groundwater level and fluctuations in the wet and dry seasons of the year, and followed by sinkholes. The purpose of this research was to find out the reasons why underground pits or karsts remained hidden from direct view until the incident occurred when the pits of various sizes were revealed. Subsurface pits are covered with a relatively hard limestone layer in the early or even advanced stages. Tests conducted on this hard limestone layer showed that the initial cores of this hard layer were formed in the early stages and secondary lime deposition, which could be when the groundwater level was close to the ground surface on the edge of the desert. Then, gradually, due to the high affinity of magnesium ions in groundwater or water that flooded the land from agricultural wells, the replacement of magnesium with calcium in lime and its dolomite formation took place, which is known locally as Sershak. This magnesium lime layer has provided the necessary hardness in the surface layer of the soil profile so that sedimentary karst has enough opportunity to grow and develop. With the development of pits and with the implementation of structural and agricultural operations on the surface, eventually, when the force of gravity overcomes the force of resistance of the sershak, an area of several tens of square meters to several hundred square meters suddenly subsided and pits formed in different parts of the region. This trend of development of underground pits with surface water flows and unmanaged floods is still developing

Keywords: Abarkouh, sinkhole, magnesium lime, Sershak, surface waters.

۱- مقدمه

اقلیم شهرستان ابرکوه با دو بخش عمده مهرآباد و بهمن از یک ژئومرفولوژی بیابانی شامل چاله نمکی، بخشهای حاشیه چاله رسی و دشت‌سر‌ها و کوهستان بهره‌مند بوده و تابعی از آب و هوای گرم و خشک فلات مرکزی ایران است. طبق آمار آب منطقه‌ای یزد، از ویژگی اقلیمی این ناحیه، ناچیز بودن میزان بارش با میانگین سالانه در حدود ۷۵ میلیمتر است. در عوض میانگین سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل آن به بیش از ۲۰ برابر بارش و به حدود ۱۵۰۰ میلیمتری بالغ می‌شود. دامنه تغییرات درجه حرارت میانگین مطلق سالانه در این ناحیه از کمینه زیر ۱۰ درجه سانتیگراد تا بیشینه ۴۳ درجه سانتیگراد از یک دامنه ۵۳ درجه سانتیگراد برخوردار است (اخوان قالیباف و همکاران، ۱۳۹۸). افزایش نسبی منیزیم اکسید نسبت به کلسیم اکسید در نمونه‌های مربوط به ابرکوه است. بنابراین ترکیبات آهکی در رسوبات دشت ابرکوه به جای کل‌یت از دولومیت است. از دلیل دولومیتی بودن رسوبات دشت ابرکوه میتوان به سازنده‌های زمین شناسی مجاور راس مخروط افکنه در ارتفاعات اقلید اشاره نمود که با توجه به شکل ۵، از سازنده‌های تریاس مانند سازند شتری تشکیل شده است که آن بستری ضخیم تا متوسط‌دار دولومیت خاکستری تیره با رکه‌هایی کلسیمی است. آنچه که ماده سازنده دشت آبرفتی را پدید آورده است می‌تواند آبرفت‌هایی باشند که بیشتر از ارتفاعات شمال غرب و غرب از کوه‌های آباده و اقلید و بخشی نیز از رسوبات دوران سوم زمین‌شناسی مانند نئوژن از شمال ناحیه همراه شده باشد تا آبرفت ابرکوه را پدید آورده است. بنابراین نسبت دادن پدیده کارست از نوع انحلالی آن در تشکیل فروچاله‌ها که بیشتر در سازنده‌های کلسیتی محتمل است، درون چنین رسوباتی اهمیت کمتری دارد و پدیده فروچاله را بیشتر به یک نوع زمین رانش زیر سطحی با حضور رس‌های فعال می‌توان نسبت داد. متداول‌ترین کانی رس، غالبیت ایلایت از ۷۴ تا ۷۸ درصد تغییر کرده است. میزان نسبی کائولینیت و کلریت در افق‌های سطحی ۱۶ درصد و در افق‌های زیر سطحی به ۷ درصد رسیده است. مقدار اسمکتیت که از کانیهای انبساط پذیر است از مقدار حداقل ۱۰ درصد در افق‌های سطحی به میزان ۱۵ درصد در افق‌های زیرین بالغ گردیده است. افزایش کانیهای اسمکتیت به دلیل میل به پراکندگی و کلوئیدی شدن در آب توانسته است به افق‌های زیرین حرکت کند. کانیهای کائولینیت بر خلاف اسمکتیت این قابلیت را ندارد. و از این رو مقدار نسبی آن در مقایسه با سایر کانیها در افق‌های زیرین کمتر شده است (اخوان قالیباف و همکاران، ۱۳۹۲). ریدر (۱۹۸۳) در خصوص کربتات‌های رومبوه‌درال، انتشار یافته در انجمن کانی‌شناسی آمریکا، نشان داد که کلسیت منیزیمی^۱ دارای همان ساختار بلورین کلسیت هست که به دلیل جانشینی منیزیم به جای کلسیم در حداقل یک‌دهم جز مولی منیزیم کربتات ایجاد شده است. بیشهوف و همکاران (۱۹۸۳) در خصوص تشکیل

¹ Magnesium - Calcite

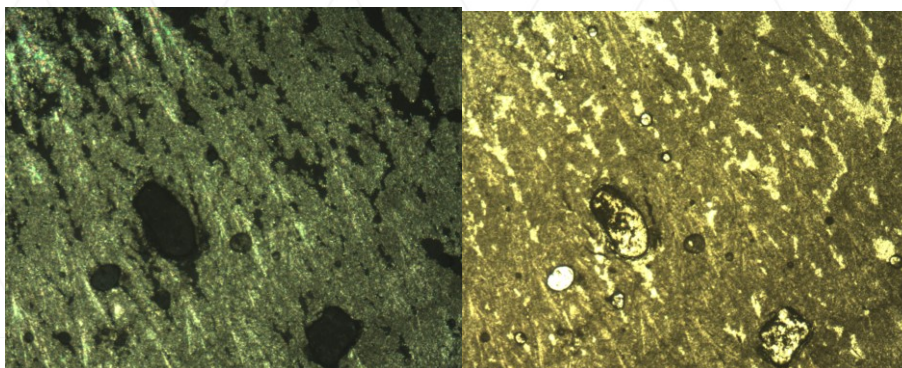
بیوژنیک کلسیت منیزیمی نشان دادند که با افزایش این جایگزینی منیزیم محور های a و c در ساختار رومبوهدرال کلسیت منیزیمی کاهش یافته است.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور بررسی نقش سخت لایه آهکی سطحی در مقاومت موقت لایه سطحی و پس از خروج مواد رسی - سیلتی از زیر و مخفی ماندن چاله ها از آن نمونه برداری شد تا آزمایشات تکمیلی بر روی آن صورت گیرد. بر روی نمونه های سخت لایه که در ناحیه ابرکوه محلی سرشک نامیده می شود ضمن انجام آزمایش پراش اشعه ایکس جهت تشخیص نوع کانی ها از آن مقطع نازک تهیه شد تا بررسی میکروسکوپ نوری پلاریزان بر روی آن انجام گیرد. همچنین بر روی نمونه های مقطع نازک به روش اسکنر میکروسکوپ الکترونی^۲ تصویر برداری شد.

۲- بحث

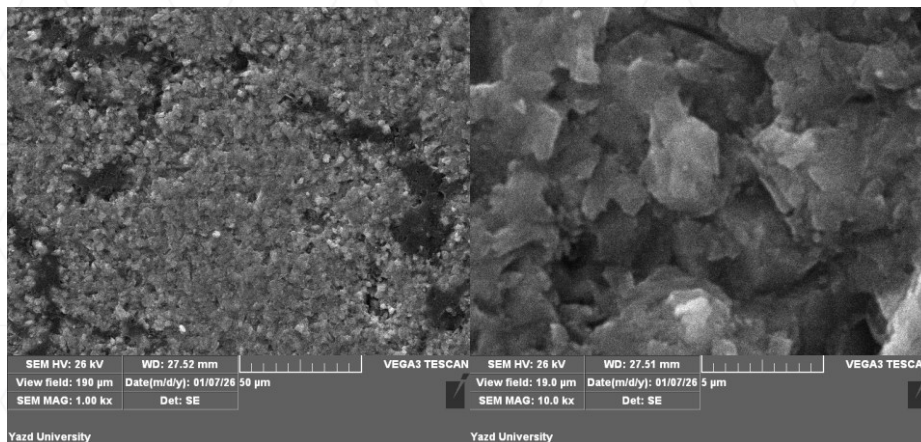
نمونه های سرشک با دارا بودن نسبت رس کمتر و ترکیبات آهکی دولومیتی بیشتر از سایر افق های پروفیل خاک و رسوب قابل تفکیک بودند. نوع رس در این سخت لایه با همان نسبت فراوانی سایر لایه های خاک و رسوب از بیشترین کانی رسی تا کمترین به ترتیب کلریت - ایلایت - کائولینیت بود. کلسیت منیزیمی به با پیک های غالب از ۳/۰۴ تا ۲/۹۷ انگسترم در پراش اشعه ایکس تشخیص داده شد. نسبت یونی کلسیم به منیزیم بر حسب میلی اکی والان بر لیتر در نمونه هضم شده در اسید، بیشتر از یک تا کمتر از دو تغییر بود که دلالت بر وجود کلسیت منیزیمی در نمونه ها داشت. در شکل یک نمونه مقطع نازک از سرشک در تصویر میکروسکوپ نوری پلاریزان را نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه مقطع نازک از سرشک (سمت راست با یک نیکول و سمت چپ با دونیکول و بزرگ نمایی ۴۰X).

در نمونه مقطع نازک وجود خلل و فرج که با یک و یا دونیکول به رنگ سیاه است، می تواند به دلیل جانشینی ثانویه یون منیزیم به جای کلسیم در لایه های کلسیت در نمونه سرشک باشد. در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی همان نمونه در شکل یک نشان داده شده است. همانطور که در تصویر نشان داده شده است در مقیاس ۵۰ میکرون حفره هایی در نمونه لایه سخت آهکی دولومیتی مشهود است. در دیواره این حفره ها در تصویر با مقیاس ۵ میکرون بلور های دولومیت یک میرونی ثانویه تشکیل شده است که می تواند به دلیل جانشینی یون منیزیم از آب های زیر ریمینی منیزیمی در حاشیه کویر ابرکوه بوده باشد که یکی از عوارض آن نیز تشکیل حفره در این لایه ضمن افزایش سختی و مقاومت بیشتر لایه دولومیتی در برابر حلالیت آن در کوتاه مدت باشد.

² SEM



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونک سرشک در مقیاس های ۵۰ میکرون (سمت چپ) و ۵ میکرون (سمت راست).

۳- نتیجه گیری

وجود لایه های رسی از نوع کلریت می تواند در آماس پذیری نقش داشته باشد که شرایط را برای روان شدن رس و سیلت و ایجاد فروچاله فراهم کرده باشد (اخوان قالیباف و همکاران، ۱۳۹۲). البته میزان ناچیز کانی های اسمکتیت نیز هرگاه به صورت منظم و یا تصادفی مابین لایه های رسی با آماس پذیری کمتر قرار گیرند مانند آنچه در خصوص ابرکوه گزارش شده است شرایط تشکیل فروچاله را تشدید نموده است (اخوان قالیباف و همکاران، ۱۳۹۴). در کنار آن آنچه در ابرکوه شاهد آن هستیم وجود حفره ها است که مستقیم قابل مشاهده نیست و آن با پوشش سخت سرشک مخفی نگهداشته شده تا اینکه چاله ها به اندازه ای بزرگ شود که دیگر لایه سخت سطحی قادر به نگهداشتن پوشش سطحی نباشد. از این رو لازم است تا مناطق حساس به نشست و فروچاله را از هرگونه عملیات ساخت و ساز و کاربری های مسکونی و تجاری مستثنی نمود تا از خطرات آن اجتناب گردد که در تحقیقات اخوان قالیباف و مجتبی رضوی (۱۳۹۸) نیز پیش بینی شده بود. آنچه را می توان به عامل مخفی ماندن چاله های زیر زمینی تا زمان ریزش سطح و آشکار شدن آن نسبت داد می تواند مرتبط به همین لایه سطحی نسبتا سخت کلسیت منیزیمی باشد که به نحو ثانویه لایه کلسیتی یا تراورتنی موجود در مجاورت آب های زیر زمینی عنی از منیزیم بوجود آمده باشد.

۴- تقدیر و تشکر

در انجام تحقیقات، شناسایی و تفکیک مناطق خطر فروچاله لازم است تا از همکاری اداره کل راه و شهرسازی واحد راه و زیرساخت و نیز بخشدار و فرماندار وقت ابرکوه تشکر و قدر دانی گردد.

۵- مراجع

- ۱- اخوان قالیباف، محمد، حمید مهرنهاد، نصرت ا... امانیان، حمید رضا عظیم زاده و محمد حسین مختاری، (۱۳۹۲)، پهنه بندی گسیختگی و نشست زمین در دشت سیلابی یزد- اردکان بر اساس شاخص های فیزیکی و کریستالو شیمی با توجه به جنبه های کانی شناسی رس در مقیاس

۲۵۰۰۰:۱ (فاز اول: مقیاس اکتشافی اولیه با خروجی نقشه ۱:۴۰۰۰۰۰)، طرح پژوهشی سازمان

جهاد کشاورزی استان یزد، معاونت بهبود تولیدات گیاهی، محل اجرا در دانشگاه یزد. ۲۹ ص

۲- اخوان قالیباف، محمد، هستی بیدکی و اسماعیل علی بابایی. ۱۳۹۴. مقایسه کانی شناسی رس
تعدادی از خاک ها بر روی رسوبات کربناته در بخش مرکزی و باختری ایران. انجمن بلورشنایی و
کانی شناسی ایران . بیست و سومین همایش. دانشگاه دامغان.

۳- اخوان قالیباف محمد و مجتبی رضوی. ۱۳۹۸ . معیاری ساده برای پهنه بندی حساسیت زمین به
رخداد فروچاله در مطالعات پایه شبکه های خطوط ریلی و انتقال نیرو در ابرکوه یزد مجله کاوش
های جغرافیایی دانشگاه یزد ۳ (۱): ۲۰۷-۲۲۸.

4-Bischhoff, W.D., L.C. Bishop and LG Mackenzie. 1983. Biogenically produced magnesium – calcite:
In homogenetics in chemical and physical properties; comparison with synthetic phases. Am. Mineral.
681183 – 1188.

5-Reeder, R.J. 1983. Crystal chemistry and the rhombohedral carbonates, p. 1-47. In R.J. Reeder (ed.):
Carbonates: Mineralogy and Chemistry. Vol. 11. Reviews in mineralogy. Mineralogical Soc. Am.
Washington, DC.

مطالعه پیامدهای معدن‌کاری در یک ناحیه کوهستانی حاشیه شهر بهاباد در استان یزد

محمد اخوان قالیباف^{۱*}، مرضیه لاری^۲

۲- عضو پژوهشی، دانشیار گروه کنترل بیابان‌زایی انسانی و کویر شناسی پژوهشکده مناطق خشک دانشگاه یزد،

makhavanghalibaf@gmail.com , makhavan@yazd.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری بیابان‌گروه مدیریت و احیای بیابان دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی دانشگاه یزد

چکیده

در بیابان‌های ایران در موقعیت کوهستانی اکتشاف معدن به دلیل عریان بودن سطح زمین عاری از جنگل و پوشش‌های بوته‌ای با سهولت و سرعت بیشتری انجام گرفته است. در عین حال کوهستان‌ها در غالب سطح کشور ایران از تنها منابع زیستی و تامین آب به دلیل اقلیم‌های وابسته به ارتفاع به شمار می‌روند. از این رو لازم است تا با بررسی و تعیین برآیند سود از منابع اقتصادی معدن‌کاری و خسارت‌های احتمالی به محیط زیست تصمیم‌گیری نمود. لازم است تا الویت‌های بهره‌برداری از معادن را در کنار حفاظت از محیط زیست از نظر دور نگردد. ناحیه بهره‌برداری معدن سنگ آهن در ناحیه کوهستانی همیجان با مجموعه روستاهای وابسته به آن در جنوب شهر بهاباد در استان یزد از چنین موارد در عرصه معدن‌کاری کشور است. به منظور بررسی اثرات محیطی ناشی از آغاز معدن‌کاری مطالعه و بررسی خاک ناحیه همیجان از جنبه‌های خاکشناسی، وجود عناصر سنگین و رادیونوکلئیدها در رسوبات در شرایط طبیعی به روش‌های معمول صورت گرفت. نتایج نشان داد که در ناحیه مطالعاتی به دلیل ارتفاع بیشتر از شهر مجاور آن زمینه مناسبی را برای کسب بارش‌های جوی و افزایش تراکم مناسب پوشش گیاهی که حاصل آن ترسیب بیشتر کربن است، فراهم کرده است. همچنین تعدیل در اقلیم بیابانی با فراهم نمودن آب بیشتر و تغذیه قنوات شهر بهاباد از نقش بدیهی ناحیه کوهستانی مشرف به شهر بود. رسوبات آبرفتی ناحیه مورد مطالعه به دلیل معدن‌خیز بودن ناحیه با کنسارهای سنگ آهن و کانی‌های همراه آن میزان فلزات سنگین چند برابری از حدود کلارک نشان داد که از آن موارد، می‌توان سرب و یا روی را نام برد. همچنین وجود تشعشعات نامتعرف رادیواکتیو در بخش‌های اکتشاف معدن پتانسیل‌های آلاینده‌گی را در ناحیه نشان داد. هرچند ساکنین ناحیه با این سطح آلاینده‌گی اولیه سازگار شده‌اند و بیماری خاصی در اهالی وجود نداشت، ولی با توسعه عملیات اکتشافی و به دنبال آن بهره‌برداری از کان‌سنگ‌های آن ناحیه بدیهی است با تشدید آلودگی‌ها می‌تواند اثرات مخرب زیست محیطی برای ساکنین ناحیه کوهستانی و شهر بهاباد به دنبال داشته باشد. از این رو تناسب بهره‌برداری از کنسارهای همیجان در شرایط کنونی و با تکنولوژی‌های حاضر نامناسب تشخیص داده شد.

کلیدواژه‌ها: معدن‌کاری، عواقب زیست محیطی، ناحیه کوهستانی، بهاباد.

Studying the consequences of mining in a mountainous area nearby the city of Bahabad in Yazd province

Mohammad Akhavan Ghalibaf^{1*}, Marzieh Lari²,

1- Research Member, Associate Professor, Human Desertification Control and Desertification Group, Arid Regions Research Institute, Yazd University, makhavanghalibaf@gmail.com , makhavan@yazd.ac.ir

2- PhD Student in Desert Management and Restoration Department, Faculty of Natural Resources and Desertification, Yazd University

Abstract

In the deserts of Iran, mining exploration has been carried out more easily and quickly in mountainous areas due to the bareness of the land surface, free from forests and shrub cover. At the same time, mountains are considered the only biological resources and water supply in most of the country due to the altitude-dependent climate. Therefore, it is necessary to examine and determine the benefits of mining economic resources and possible environmental damage, and not to lose sight of the exploitation priorities in the final mining exploitation decisions, along with the protection of the environment. The exploitation area of the iron ore mine in the

mountainous area of Homijan with its dependent villages in the south of Bahabad city in Yazd province is one of such cases in the mining field of the country. In order to investigate the environmental effects resulting from the start of mining, a study and examination of the soils of Homijan in terms of soil chemistry, the presence of heavy etals and radionuclides in sediments under natural conditions was carried out using conventional methods. The results of the study showed that the study location, due to its higher altitude than the neighboring city, provided a suitable basis for obtaining atmospheric precipitation and increasing the appropriate density of vegetation, which resulted in more carbon sequestration. Also, the adjustment in the desert climate by providing more water and feeding the neighboring city's water supply was due to the obvious role of the area overlooking the city. The alluvial sediments of the studied area, the reason for the area being a good mine with iron ore deposits and its associated minerals, showed the amount of heavy metals several times the Clark limits, which can be called lead or zinc. Also, the presence of unusual radioactive radiation in the mine exploration areas has shown the potential for pollution in the area. Although the residents of the area have adapted to this initial level of pollution and there is no specific disease in the residents, but with the development of exploration operations and the subsequent exploitation of the deposits of that area, it is obvious that the intensification of pollution can have destructive environmental effects for the residents or the city of Bahabad. Therefore, the suitability of exploiting the Homijan deposits under current conditions with current technologies was determined to be inappropriate.

Keywords: Mining, environmental consequences, mountainous area, Bahabad.

۱- مقدمه

در گزارش اخوان قالیباف و همکاران (۱۳۸۹) و اخوان قالیباف و رضایی پور باغدر (۱۳۹۲) به نقش آلودگی های معدن و تاثیر آن در جذب عناصر سنگین مانند کادمیم و سرب در خاک و گیاه در اندازه های بیشتر از حد آستانه تعریف شده در حاشیه معدن کوشک که در مسیر بافق به بهاباد قرار گرفته است اشاره شده است. اخوان و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه ای که در حاشیه معدن چغارت بافق، که تنها چند کیلومتر با معدن همیجان فاصله دارد، پراکندگی عناصری مانند وانادیم، سلنیم، سرب و کادمیم به عمل آوردند. آنها در این مطالعه افزایش وانادیم را به نجو معنی داری در نمونه های خاک و گیاه اطراف باطله های چغارت در مقایسه با نمونه های شاهد با اختلاف معنی داری و با اطمینان ۹۵ درصد گزارش نمودند. بر اساس گزارش رئوف امیرخانی و همکاران (۱۳۹۶) منطقه معدن کاری همیجان که در این نوشتار با عنوان کانه زایی مگنتیت - آپاتیت همیجان معرفی شده، بخشی از بلوک پشت بادام در پهنه ایران مرکزی است که در فاصله حدود ۱۲ کیلومتری جنوب باختر شهر بهاباد جای دارد. رخنمون های سنگی این منطقه عبارت از واحدهای آتشفشانی - رسوبی و توده های نفوذی اسیدی تا بازیک به سن پرکامبرین و کامبرین هستند. کانه زایی مگنتیت - آپاتیت به صورت عدسی هایی در مجاورت جنوب باختری روستای همیجان و درون سنگ میزبان توفی حدواسط - اسیدی و دولومیت ها رخنمون یافته است. مگنتیت، اولیژیست (هماتیت)، پیریت و کالکوپیریت کانه های اصلی تشکیل دهنده کانه زایی آهن منطقه همیجان و آپاتیت، پیروکسن، ترمولیت - اکتینولیت، کلسیت و کوارتز کانی های اصلی مواد باطله در این کانه زایی هستند. مطالعات صحرایی و میکروسکوپی نشان از این دارد که ساخت و بافت های موجود در کانه زایی مگنتیت - آپاتیت منطقه همیجان شامل توده ای، برشی، رگه - رگچه ای و جانشینی است. نتایج تجزیه نمونه ها بیانگر این است که این کانه زایی دارای تمرکز بالایی از عناصر خاکی کمیاب است و عیار مجموع عناصر خاکی کمیاب (ΣREE) در بلورهای آپاتیت به ۲/۵ درصد می رسد. مطالعات ژئوشیمیایی نشان می دهد که Fe دارای همبستگی منفی قوی با P_2O_5 ، SiO_2 و ΣREE و P_2O_5 دارای همبستگی مثبت قوی با ΣREE است. تجزیه کیفی و بررسی طیف های تهیه شده به روش SEM - EDS نمونه های آپاتیت دار نشانگر وجود ۲ نوع کانی با عناصر خاکی کمیاب شامل مونازیت و آلانیت در داخل آپاتیت است. مقایسه الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب در کانه زایی مگنتیت - آپاتیت منطقه همیجان با دیگر کنسارهای اکسیدی آهن - آپاتیت بلوک پشت بادام و کنسارهای آهن

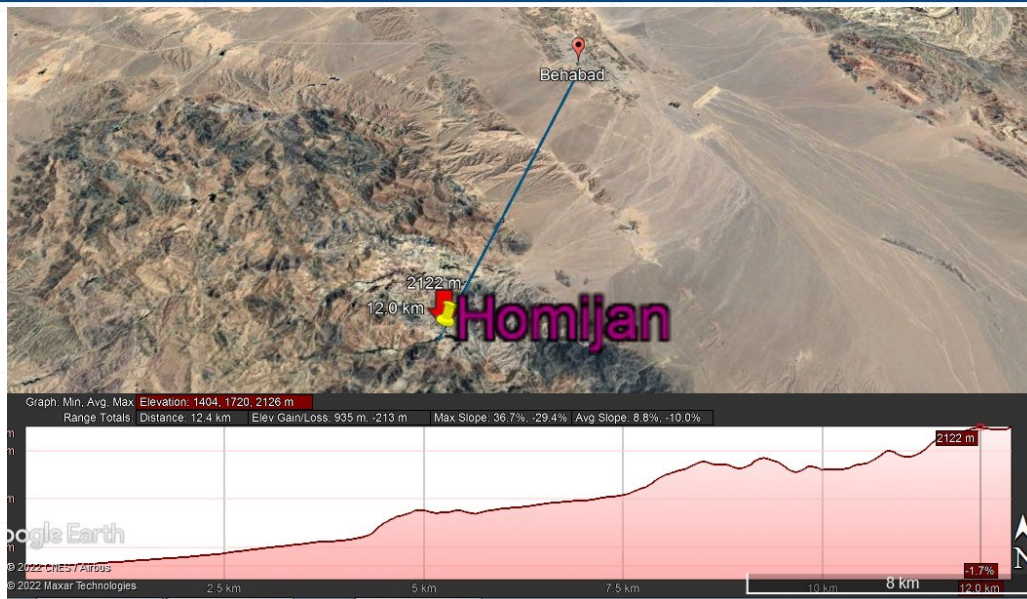
تیپ کایرونا، همانندی میان این الگوها را نشان می‌دهد. به طور کلی، با توجه به شواهد مطالعات صحرایی و ژئوشیمیایی می‌توان کانه‌زایی مگنتیت - آپاتیت منطقه همیجان را در گروه کانسارهای آهن نوع کایرونا رده‌بندی کرد (جمشیدی و همکاران، ۱۳۷۰).

۲- مواد و روش‌ها

بر اساس درخواست ساکنین شهر بهاباد در استان یزد و اهالی روستای همیجان شامل کشاورزان و دامپروران ساکن در محل معدن‌کاری همیجان، در تاریخ چهارم خرداد ماه سال ۱۴۰۱ ه. ش. از ناحیه معدنی فلزی همیجان بازدید میدانی به عمل آمد. جمع بازدید کننده متشکل از یک هیئت از کارشناسان در حوزه های استخراج معدن، محیط زیست، منابع طبیعی، اقتصاد و علوم اجتماعی از دانشگاه یزد بود. هدف از این بازدید بررسی های خاکشناسی، ارزیابی منابع خاک و استعداد کاربری اراضی، ارزیابی اقتصادی، ارزیابی اثرات زیست محیطی و توان اکولوژیک ناحیه مورد بود. نتیجه بررسی های انجام شده در بخش فیزیکی شامل خاک و منابع اراضی و تناسب اراضی در این گزارش ارائه گردید. در شکل های یک و دو موقعیت روستای همیجان نشان داده شده است.



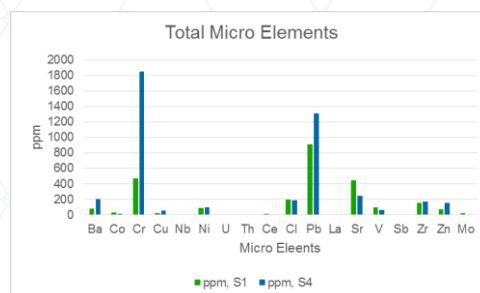
شکل ۱- تصویر گوگل ارث از موقعیت روستای آباد همیجان که اکتشاف پیشنهادی و در مرحله شروع کار در مجاورت آن (متصل به روستا) در بالادست مکان یابی شده است.



شکل ۲- موقعیت روستای همیجان و فاصله مستقیم آن تا شهر بهاباد

۳- بحث

روستای همیجان یک روستای کوهستانی - دره ای است که ارتفاعی بیشتر از ۷۰۰ متر نسبت به بهاباد دارد. همچنین شیب نزدیک به ۹ درصد از همیجان به بهاباد نشان دهنده تاثیر این بخش در آبدهی قنات بهاباد است و از طرفی دیگر بدیهی است که با هرگونه آلودگی به سرعت ناحیه بهاباد را آلوده خواهد نمود. در شکل ۳ فراوانی بعضی از عناصر میکرو در خاک های بالادست (شماره ۱) و آبرفت های همان ناحیه در پایین دست (شماره ۴) نشان داده شده است. در مقایسه این دو نمونه افزایش فلزاتی مانند سرب در آبرفت های پایین دست مشهود است. البته این وضعیت غلظت عناصر در خاک و رسوب، طی زمان نسبتاً طولانی، حاصل هوازدگی سنگ و کانی ها در بالادست و انتقال آن توسط جریان های سطحی آب صورت گرفته است.



شکل ۳- توزیع عناصر کل میکرو در خاک های نمونه ۱ و ۴

جدول یک میزان رادیونوکلیئید های دو نمونه از سنگ ها در ناحیه اکتشافی همیجان (نمونه ۱) و نمونه مجاور روستای همیجان نشان داده شده است. در نمونه های اکتشافی معدن رادیونوکلیئیدهایی مانند پتاسیم-

۴۰ و اورانیوم - ۲۳۸ با افزایش نسبت به میانگین های جهانی احتمال آلوده سازی محیط را با گسترش عملیات اکتشافی و بهره برداری از معدن نشان داد.

جدول ۱: رادیونوکلئید ها در نمونه ۱ (حاشیه ناحیه اکتشافی) همیجان و نمونه ۲ (حاشیه روستای همیجان).

ایزوتوپ رادیواکتیو	نمونه ۱	نمونه ۲
	Bq/kg	
K-40	1340	3.94
Cs-137	<MDA ³	1.28
Bi-214	64.00	41.18
Th-232	66.00	23.31
U-235	8.72	2.57
Th-234	50.78	26.93
U-238 ⁴	57.39	34.05

میانگین جهانی پتاسیم ۴۰، ۴۰۰ بکرل بر کیلوگرم، اورانیوم ۲۳۸، ۳۵ بکرل بر کیلوگرم و توریم ۲۳۲، ۴۰۰ بکرل بر کیلوگرم است.

۴- نتیجه گیری

بخش ییلاقی همیجان بهاباد با برخورداری از شرایط آب و هوایی خاص در یک اقلیم بیابانی ضمن برخورداری از جاذبه های طبیعی گردشگری دارای استعداد رویش گیاهان دارویی بعضاً انحصاری و یا در معرض انقراض است. بر اساس بررسی های اولیه کاربری اراضی همیجان برای اکتشاف و بهره برداری معدنی نامناسب در حال N1 (Not Suitable) به دست آمد. زیرا با هرگونه بهره برداری معدنی منجر به نابودی پوشش های خاکی و گیاهی ارزشمند خواهد شد. همچنین مناطق مسکونی و روستا های اطراف آن به دلیل انفجار و باطله برداری در حوزه بهره برداری معدنی محو خواهد شد. حجم باطله های ایجاد شده و بیرون کشیدن رگه های معدنی همراه با عناصر و ترکیبات نادر که امروزه در کشور توان جداسازی و کسب درآمد تعریف شده از آن غیر ممکن به نظر می رسد، باعث آلودگی آب و خاک اراضی بهاباد خواهد شد. از طرفی با معدن کاری موجب نابودی صنایع تولیدی کشاورزی و منابع طبیعی شهر بهاباد نیز خواهد شد. به موارد فوق می توان آلودگی به فلزات سمی و سنگین و نیز پراکندگی رادیونوکلئید ها نیز در بهداشت جوامع انسانی و توسعه بیماری های لاعلاج اشاره نمود که تمامی این موارد حداقل معدن کاری را تا آینده ای نسبتاً دور نمی تواند توجیه نماید.

۵- تقدیر و تشکر

از ساکنین روستای همیجان، شهردار بهاباد، بخشدار و دهیاران همیجان و سایر روستا ها در بخش همیجان که با وسواس و دقت در زمینه مطالعه و بررسی برآیند منافع اقتصادی و یا آسیب های احتمالی استخراج معدن در انجام این مطالعه تلاش نمودند و مقدمه این تحقیق را فراهم کردند تشکر و تقدیر می نماید.

Minimum Activity Detection³
Calculated⁴

۶- مراجع

- ۱- اخوان قالیباف، م.، دشتی، ج. و حیدری ا.م. ۱۳۸۹. بررسی پراکندگی فلزات سرب، روی و کادمیم در محیط خاک پیرامون یک معدن سولفیدی سرب و روی در بافق یزد و پهنه‌بندی آلودگی خاک با استفاده پتانسیل اسید زایی خاک. هیجدهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران. انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران. ۲۴ و ۲۵ شهریورماه.. دانشگاه تبریز.
- ۲- اخوان قالیباف، م.، رضایی پور باغدر. a1392. تأثیر اشکال زیستی گیاهی در جذب و دفع فلزات سنگین در اکوسیستم خشک ناحیه کوشک در استان یزد. مجله علمی پژوهشی مرتع، جلد ۷، شماره ۱، صفحات: ۳۹-۳۰.
- ۳- اخوان قالیباف، م.، رئوف، س. رضایی پور، ع.ج. b1392. بررسی پراکندگی چهار عنصر سرب، کادمیم، سلنیم و وانادیم در حاشیه سنگ آهن مرکزی بافق با شاخص گیاهی. سیزدهمین کنگره علوم خاک ایران، پایش خاک، آلودگی های نفتی و صنعتی. بهمن ماه. گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۴- امیرخانی، ر.، ابراهیمی، م.، مختاری، م. و عظیم زاده، ا. ۱۳۹۶. مطالعه کانی شناسی، ژئوشیمی میانبر های سیال و ژنز کانه زایی مگنیتیت و آپاتیت در همیجان، جنوب باختر بهاباد در استان یزد. فصل نامه علمی علوم زمین. دوره ۲۶، شماره ۱۰۳، صفحات: ۸۳-۱۰۰.
- ۵- جمشیدی، خ.، افشاریان زاده، ع. و منوچهری م. ۱۳۷۰. نقشه اسفوردی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، شماره ۷۱۵۳. سازمان زمین شناسی کشور.

تشکیل ژاروسیت در محیط به عنوان شاخص نشت آلودگی های صنعتی از فیلتر های صنایع فولاد در شهر یزد

محمد اخوان قالیباف^{۱*}، سعید مسعودی^۲

^۳- عضو پژوهشی، دانشیار گروه کنترل بیابان زایی انسانی و کویر شناسی پژوهشکده مناطق خشک دانشگاه یزد،

makhavanghalibaf@gmail.com , makhavan@yazd.ac.ir

^۲- دانشجوی دکتری بیابان گروه مدیریت و احیای بیابان دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی دانشگاه یزد

چکیده

هرچند تشکیل کانی ثانویه ژاروسیت بیشتر در حوزه های معدنی سولفیدی و اسید زایی حاصل از تشکیل سولفات اسیدی و همچنین در شرایط و محیط های طبیعی در روند اکسیداسیون ترکیبات سولفیدی گزارش شده است، در این تحقیق تشکیل آن در صنایع مورد بحث است. با بررسی های انجام شده در محیط پیرامون صنایع فولاد در یزد وجود و تشکیل جدید ژاروسیت ثابت شد. برای این منظور ضمن انجام آزمایشات شیمیایی و فیزیکی لازم اندازه گیری غلظت ذرات معلق هوا در قطر های کمتر از ۱۰، ۲.۵ و ۱ میکرون با دستگاه پرتابل هاز داست و نیز بر روی نمونه های رسوب با استفاده از تجزیه و تحلیل عناصر کل با میکروسکوپ انتشار روبشی همراه با طیفسنجی پرتو ایکس با پراکندگی انرژی وجود ژاروسیت در خاک های اطراف صنایع فولاد تشخیص داده شد. از آنجا که صنایع فولاد با خوراک کوره های آهن اسفنجی و یا ضایعات آهنی همچنین استفاده از گوگرد در فرایند های ساخت استیل به دلیل نشت آلاینده های فلزی به ویژه آهن همراه با گوگرد و شرایط اکسیداسیون گوگرد در تشکیل سولفات اسیدی این کانی ثانوی (ژاروسیت) را تشکیل داده است. از این رو می توان از حضور این کانی در محیط را به عنوان شاخص آلاینده های واحد صنعتی مورد استفاده قرار داد.

کلیدواژه ها: ژاروسیت، صنایع فولاد، محیط اسیدی، آلودگی فلزی.

The neo-formation of jarosite in the environment as an indicator of industrial pollution leakage from steel industry filters in Yazd city

Mohammad Akhavan Ghalibaf^{1*}, Saeid Masoodi²,

1- Research Member, Associate Professor, Human Desertification Control and Desertification Group, Arid Regions Research Institute, Yazd University, makhavanghalibaf@gmail.com , makhavan@yazd.ac.ir

2- PhD Student in Desert Management and Restoration Department, Faculty of Natural Resources and Desertification, Yazd University

Abstract

Although the formation of secondary jarosite minerals has been reported mostly in sulfide mineral fields and acidification resulting from the formation of acidic sulfate, as well as in natural conditions and environments in the oxidation process of sulfide compounds, in this study its presence in the industries in question was confirmed. With the investigations carried out in the environment around the industries, especially steel in Yazd, the existence and new formation of jarosite was confirmed. For this purpose, in addition to conducting the necessary chemical and physical tests, measuring the concentration of airborne particles in diameters of less than 10, 2.5 and 1 micron with a portable Haz Dust device and also on sediment samples using total element analysis with scanning emission microscopy combined with energy dispersive X-ray spectroscopy, the presence of jarosite was detected in the soils around the steel industries. Since the steel industry, with the feed of sponge iron furnaces or iron scrap, also uses sulfur in steelmaking processes due to the leakage of metal pollutants, especially iron with sulfur, and the conditions of sulfur oxidation in the formation of acidic sulfate, this secondary mineral (jarosite) has formed. Therefore, the presence of this mineral in the environment can be used as an indicator of industrial unit pollution.

Keywords: Jarosite, steel industries, acidic environment, metal pollution.

۱- مقدمه

ژاروسیت (Jarosite) کانی هیدراتی سولفات پتاسیم و آهن است؛ که فرمول شیمیایی آن عبارت است از $KFe^{3+}_3(OH)_6(SO_4)_2$. این کانی از رسوبات حاصل از اکسید شدن سولفید آهن در سنگ معدنش به دست می‌آید. همچنین ژاروسیت محصول دوم عمل خالص‌سازی روی می‌باشد [4]. رقیمی (۱۳۹۴) در گزارش خود از کانی ژاروسیت به عنوان یک کانی ثانویه با شاخص زیست محیطی یاد نمود که در محیط‌های اسیدی با حضور اکسیدهای آهن و گوگرد تشکیل شده است. سلطانی (۱۳۹۶) حضور ژاروسیت را به صورت میکرومتری بر روی نمونه‌ها در حضور گوگرد و اکسیدهای آهن بر روی کنسارهای مس شمال عرب درون‌ه نشان داد. زولوتوف و شوک (۲۰۰۵) از وضعیت تشکیل عامل اولیه تشکیل ژاروسیت برای اثبات فرضیه خود در گرمایش منطقه‌ای در پلانوم مریدیانی که باعث آزاد شدن گرمایی‌های غنی از سولفید شده و منجر به تشکیل رسوبات منطقه‌ای غنی از پیریت در یک فرورفتگی شده است، استفاده نمودند. دیکسون و وید (۱۹۹۲) تشکیل ثانویه ژاروسیت را در اندازه‌های یکدهم تا یک میکرون بر روی بسته‌های رس و یا خاکدانه‌ها به روش اسکنر میکروسکوپی الکترونی در محیط‌های اکسیداسیون سولفاتی با اسیدیته کمتر از ۳ نشان دادند.

۲- مواد و روش‌ها

ضمن مشاهده و نمونه برداری از خاک‌های پیرامون صنایع فولاد و در مقایسه با معادن شن و ماسه در فاصله تا ۳۰ کیلومتری غرب شهر یزد خاک‌ها بر اساس دستور العمل WRB، (۲۰۱۵) بر اساس مرجع جهانی جهت منابع خاک^۵ رده‌بندی شد. با مقایسه خاک‌ها و اختلاف در گروه‌های خاک در نواحی متفاوت بر روی نمونه‌های خاک آزمایشات معمول فیزیکی و شیمیایی همراه با اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق هوا در قطرهای کمتر از ۱۰، ۲.۵ و ۱ میکرون با دستگاه پرتابل هاز داست^۶، ساخت شرکت دستگاه‌های زیست محیطی اندازه‌گیری گردید. سرعت مکش هوا در نمونه بردار هاز داست ۵ لیتر در دقیقه بود. میانگین‌گیری با هر فیلتر با قطرهای معین ذرات معلق، جهت هر موقعیت اندازه‌گیری شده تا یک ساعت ادامه یافت. هرچند نمونه برداری‌ها در یک هوای آرام بدون گرد و غبار فرا ناحیه‌ای ادامه یافت ولی جریان باد غالب در ناحیه مورد مطالعه شمال غربی بود. دقت دستگاه هاز داست، آنالایزر ذرات معلق، برای گرد و غبار ریز طبق آزمون اس‌آی^۷ گرانی سنجی فیلتر در سطح ۱۰٪ استاندارد شده بود. بر روی گرد و غبار جمع‌آوری شده از خاک‌های سطحی، تصاویر اشعه ایکس و تجزیه و تحلیل عناصر کل با میکروسکوپ انتشار روبشی تسکان^۸ همراه با نقشه برداری طیف سنجی اشعه ایکس پراکنش انرژی^۹ EDX، از شرکت بروکر ایکس فلاش^{۱۰} انجام شد.

۳- بحث

برای مقایسه دو نوع گرد و غبار حاصل از صنایع فولاد و معادن استخراج و دانه بندی شن و ماسه، تصویر میکروسکوپ الکترونی انتشار روبشی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین ضمن عکس برداری میکروسکوپ الکترونی، آنالیز طیف سنجی اشعه ایکس پراکنش انرژی (EDX) بر روی ذرات معلق انجام گرفت که در شکل ۲ نشان داده شده است. میزان نسبی آهن به سیلیسیم با ضریب ۱۰۰ در کنار غلظت ذرات معلق به تفکیک قطر ذرات نشان داده شده است. بر روی محور افقی

⁵ WRB 2015

⁶ Haz-Dust, model : epam-5000

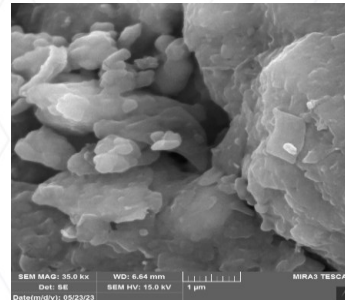
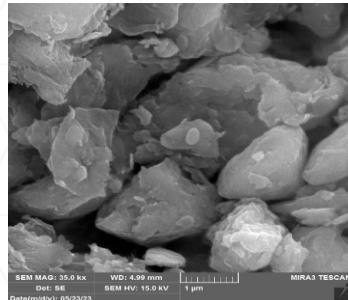
⁷ SAE

⁸ SEM, TESCAN

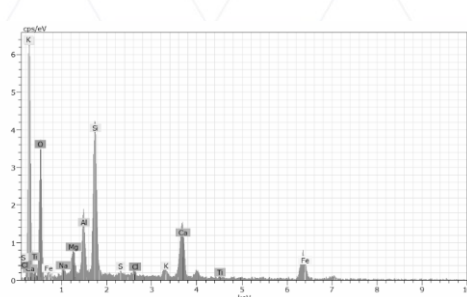
⁹ Electron Dispersive X – ray Analysis

¹⁰ Bruker X Flash

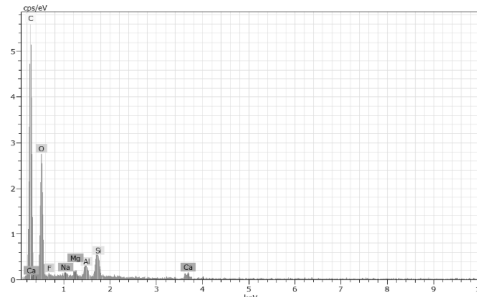
شکل ۳، شش موقعیت نمونه برداری برای مقایسه نشان داده شده است که به ترتیب عبارتند از: شهرک صنعتی یزد، جاده نیوک (موقعیتی در ۲۵ کیلومتری شمال غرب ناحیه مورد مطالعه)، کارخانه فولاد آلیاژی یزد، دانشگاه یزد، معادن شن و ماسه در محدوده مرد مطالعه و شهرک فولاد یزد. در موقعیت‌های مورد بررسی ذرات معلق تشکیل شده در نزدیکی صنایع فلزی فولاد با میزان آهن بیشتر نسبت به سیلیسیم در مقایسه با معادن شن ماسه که سیلیسیم بیشتری داشتند، قابل تفکیک بود (شکل ۲). همچنین تجزیه کمی غلظت گرد و غبار، انجام شده با استفاده از دستگاه پرتابل هازداس، افزایش میزان ذرات معلق کمتر از یک میکرون را در نزدیکی صنایع فولاد در مقایسه با سایر موقعیت‌ها تایید نمود.



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از گرد و غبار در حاشیه غرب شهر یزد از بخش‌های توسعه فولاد (سمت چپ) و معادن شن و ماسه (راست) با مقیاس یک میکرون روی عکس



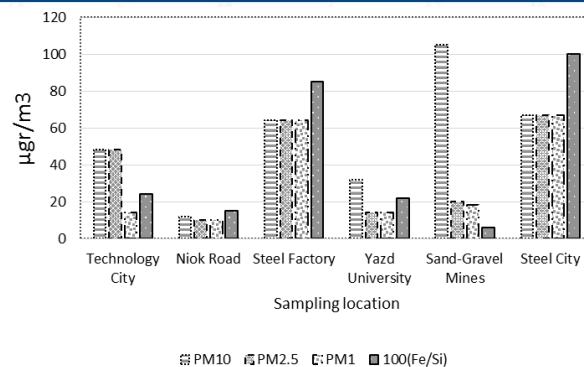
El AN Series	unn. C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
C 6 K-series	54.50	54.50	62.10
O 8 K-series	41.96	41.96	35.89
F 9 K-series	1.59	1.59	1.15
Si 14 K-series	0.78	0.78	0.38
Ca 20 K-series	0.73	0.73	0.25
Al 13 K-series	0.32	0.32	0.16
Mg 12 K-series	0.06	0.06	0.03
Na 11 K-series	0.06	0.06	0.03
Total: 100.00 100.00 100.00			



El AN Series	unn. C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
C 6 K-series	69.40	49.16	60.22
O 8 K-series	51.67	36.60	33.65
Ca 20 K-series	4.75	3.37	1.24
Fe 26 K-series	4.72	3.34	0.88
Si 14 K-series	4.70	3.33	1.74
Al 13 K-series	2.57	1.82	0.99
Mg 12 K-series	1.49	1.06	0.64
K 19 K-series	0.71	0.50	0.19
Na 11 K-series	0.67	0.48	0.30
Cl 17 K-series	0.24	0.17	0.07
S 16 K-series	0.21	0.15	0.07
Ti 22 K-series	0.03	0.02	0.01

Total: 100.00 100.00 100.00

شکل ۲- آنالیز EDS از گرد و غبار با دو منبع صنایع فولاد (راست) و شن (چپ).



شکل ۳- نتایج حاصل از اندازه گیری کمی غبار در هوا توسط غبارسنج هاز-داست و نسبت درصد های جرمی آهن به سیلیسیم در نمونه های متفاوت حاصل از آنالیز طیف پخشیدگی الکترونی .

تشریح خاک در بررسی میدانی، شامل پارامترهای مورفولوژیکی و تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی معمول مانند وضعیت پوشش گیاهی، رنگ خاک، ساختمان خاک، بافت خاک، واکنش اسیدیته و درصد مواد آلی خاکها به منظور رده بندی خاک بود. با توجه به تغییرات ترکیب شیمیایی رسوبات حاصل از گرد و غبار صنایع فلزی یا معادن شن و ماسه، رنگ سطح خاک نیز تغییر کرده بود. همه خاک ها در سطح دارای رنگ مانسل زمینه^{۱۱} یکسان داشتند. تمام خاک های طبیعی دارای رنگ مانسل قهوه ای کم رنگ^{۱۲} بودند. در منطقه تحت تاثیر معادن شن و ماسه، شاخص روشنی رنگ ۱ درجه افزایش یافت و رنگ مانسل به قهوه ای بسیار کم رنگ^{۱۳} تغییر کرده بود. صنایع فولاد و مجتمع شهرک فولاد رنگ مانسل خاک سطحی را به خاکستری روشن^{۱۴} تغییر دادند. پوشش گیاهی نیمه بیابانی از حالت طبیعی در شرایط تاثیر فعالیت های صنعتی و معدنی، به ۵۰ درصد کاهش یافت (از ۳۰ درصد در خاک های طبیعی به ۱۵ درصد در تکنوسل ها). درصد مواد آلی در افق سطحی خاک های تحت تاثیر صنایع و یا معادن به کمتر از ۰.۱ درصد در مقایسه با محتوای مواد آلی در افق سطحی خاک های طبیعی بیابانی همان ناحیه که حدود ۰.۶-۰.۸ درصد بود کاهش یافت. بافت کلیه خاک های سطحی از نوع لومی شنی بود و تغییرات محسوسی در آنها مشاهده نشد. ساختار خاک در مناطق تحت تاثیر صنعت از کلوخه ای اندازه متوسط (گردویی) ضعیف به خاک های بدون ساختمان به صورت توده های درشت (>۲۰ سانتیمتری) تغییر کرده است. بیشتر گروه های بزرگ خاک طبیعی عبارت بودند از فلوویسولز (خاک های آبرفتی)^{۱۵} در رسوبات آبرفتی در منطقه بیابانی با شیب ملایم (۴-۸٪). و در دامنه های بالا: لپتو سول ها^{۱۶} که خاک های جوان در ارتفاعات به سمت پدیمونت ها^{۱۷} یا کوهپایه ها در ناحیه یه سمت نیمه بیابانی^{۱۸} با شیب متوسط (۸-۱۲٪) بودند. در منطقه مورد مطالعه، موادی جدید و نسبتاً پیوسته، ناشی از فرآیند صنعتی یافت شد. این مواد به عنوان ماده سخت، که مشخصه خاک های صنعتی در WRB (۲۰۱۵) تعریف شده بود شناسایی گردید.

¹¹ MUNSEL Hue 10YR

¹² 10YR6/3

¹³ 10YR7/3

¹⁴ 10YR7/1

¹⁵ Fluvisols

¹⁶ Leptosols

¹⁷ Pedimonts

¹⁸ Sirezems

۴- نتیجه‌گیری

افق سطحی خاکهای نزدیک به صنایع فلزی واکنش خاک، اسیدی را نشان داد ($pH < 3.0$) برخلاف واکنش خاک سایر مناطق معدنی طبیعی و یا متأثر از معادن شن و ماسه که خنثی با قلیائیت ضعیفی داشتند ($pH = 7$). این تفاوت در غلظت یون هیدروژن خاک می تواند ناشی از باران اسیدی یا وجود ترکیبات شیمیایی فلزی در گرد و غبار صنایع فولاد در مقایسه با معادن شن و ماسه که بیشتر غبار های آهنی را تولید نموده اند باشد. همین اختلاف در اسیدیته خاک های سطحی و نیز فراوانی فلز آهن در نمونه ها که در شکل ۲ نشان داده شده است زمینه تشکیل ثانوی ژاروسیت را فراهم نموده است که در اینجا به عنوان شاخصی برای آلودگی های فلزی صنایع فولاد از آن نام برده شده است.

تقدیر و تشکر

از اداره کل محیط زیست یزد به دلیل مساعدت و همکاری در انجام مشاهدات میدانی و نمونه برداری از هوا و خاک تشکر و تقدیر می نماید.

۵- مراجع

- ۱- رقیمی، م. ۱۳۹۴. بررسی کانی زیست محیطی جاروسیت و نشانگرهای زیست محیطی آن در خاک های سولفاته و باطله های معدنی. بیست و سومین همایش بلورشناسی و کانی شناسی ایران. دانشگاه گلستان.
- ۲- سلطانی، ا. ۱۳۹۶. کانی شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار مس ابری، رهبری و چشمه مرضیه، شمال غرب درونه. پایان نامه کارشناسی ارشد در دانشکده علوم زمین، گرایش زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه صنعتی شاهرود. ۲۱۲ص.

- 3- Dixon, J.B. and Weed, S.B. 1992. Minerals in Soil Enviromnents. Soil Science Society of America Book Series. 2th Edition, Madison Wisconsin, USA, 1244p.
- 4- Wikipedia/Jarosite. 2026. www.wikipedia/jarosite
- 5- WRB, World Reference Base for soil resources, (2015), International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, FAO, Rome, 203 p.
- 6- Zolotov, M. Y. and E. L. Shock. 2005. Formation of jarosite-bearing deposits through aqueous oxidation of pyrite at Meridiani Planum, Mars. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 32, L21203, doi:10.1029/2005GL024253

کانی‌شناسی کانسنگ و باطله در رگه‌های مگنتیتی جنوب غرب نیر، استان اردبیل

توحید نوری^{۱*}، زهرا حسنی سوقی^۲، فاطمه حسنی سوقی^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۸۲۰۸۹۰۸، پست الکترونیکی: t.nouri@uma.ac.ir

چکیده

منطقه مورد مطالعه در فاصله تقریباً ۲۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان نیر، استان اردبیل، شمال غرب ایران واقع شده است. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی- ساختمانی ایران، بخشی از پهنه البرز- آذربایجان در نظر گرفته می‌شود. مهم‌ترین واحدهای سنگی در منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری ائوسن تا الیگوسن هستند که این مجموعه‌های آتشفشانی- آذرآواری توسط توده‌های پس از میوسن قطع شده‌اند. انواع دگرسانی‌های سیلیسی، سریستی، آرژلیک و پروپیلیتی در این منطقه توسعه یافته‌اند. کانی‌سازی در این منطقه عمدتاً به صورت رگه‌های مگنتیتی رخ داده است. کانی‌های کانسنگ از قبیل مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت در طول مرحله درون‌زاد درون رگه- رگچه‌های کاندار تشکیل شده‌اند. کانی‌های فلزی برون‌زاد شامل کانی‌های گوتیت، هماتیت و ژاروسیت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت هستند. مهم‌ترین کانی باطله در این منطقه کلسیت می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: کانی‌شناسی، کانسنگ و باطله، رگه‌های مگنتیتی، نیر، اردبیل.

Ore and gangue mineralogy in magnetite veins of southwest of Nir, Ardabil province

Tohid Nouri^{1*}; Zahra Hassani soughi²; Fatemeh Hassani Soughi²

¹ Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Mohaghegh Ardebili University, Ardebil, Iran

*Corresponding author, Tel: 09148208908, E-mail: t.nouri@uma.ac.ir

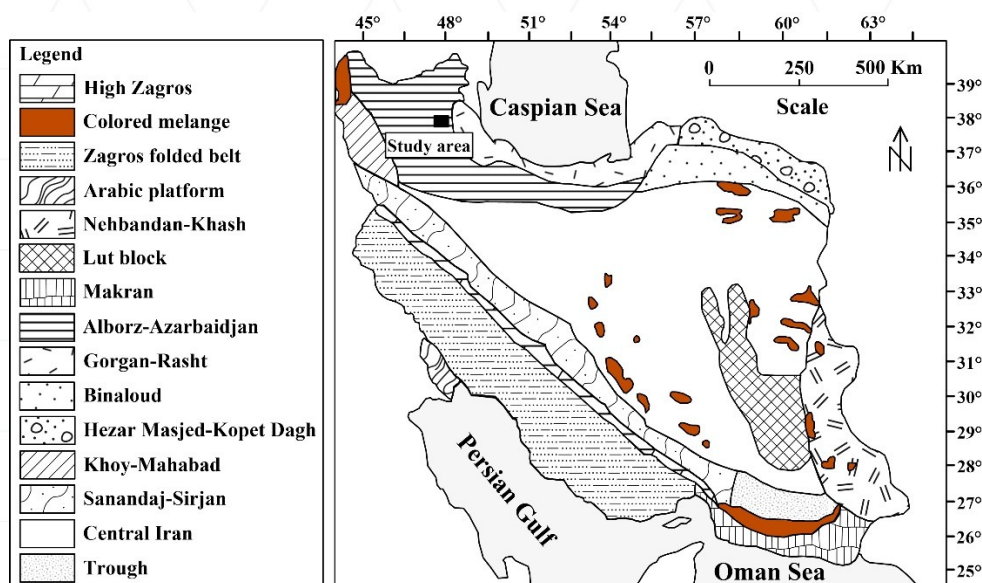
Abstract

The study area is located approximately 20 km southwest of Nir city, Ardabil Province, northwestern of Iran. Based on the division of sedimentary-structural zones of Iran, this area is considered a part of the Alborz-Azarbaidjan zone. The most important rock units in the study area include Eocene to Oligocene volcanic-pyroclastic rocks, which are cut by post-Miocene bodies. Types of silicic, sericitic, argillic, and propylitic alterations have developed in this area. Mineralization in this area has occurred mainly in the form of magnetite veins. Ore minerals such as magnetite, pyrite, and chalcopyrite formed during the hypogene stage within the ore-bearing veins. Supergene metal minerals contain goethite, hematite, jarosite, bornite, chalcocite, covellite, and digenite. The most important gangue mineral in this area is calcite.

Keywords: Mineralogy, Ore and gangue, Magnetite veins, Nir, Ardabil.

۶- مقدمه

منطقه مورد مطالعه در فاصله تقریباً ۲۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان نیر، استان اردبیل، شمال غرب ایران واقع شده است. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی- ساختاری ایران (نبوی، ۱۳۵۵)، بخشی از پهنه البرز- آذربایجان در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱). در آذربایجان ذخایری از سرب، روی، آهن، مس و مولیبدن از مهم‌ترین مواد معدنی شناخته شده‌اند. با توجه به پدیده‌های فلززایی، پهنه‌های فلززایی تکاب، اهر- ارسباران و طارم- هشتجین در آذربایجان قابل شناسایی هستند. منطقه مورد بررسی در بخش شرقی آذربایجان قرار گرفته است. از جمله کارهای پژوهشی صورت گرفته در منطقه می‌توان به انجام عملیات اکتشافی از قبیل مطالعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و زمین‌شیمی توسط سازمان صنعت، معدن و تجارت استان اردبیل (۱۳۹۱) اشاره کرد. بر اساس این مطالعات، بیشترین و کمترین مقدار اکسید آهن (مگنتیت) در این منطقه به ترتیب در حدود ۹۳/۲۹ و ۳/۲۷ درصد با میانگین تقریبی ۵۴/۴۷ درصد مشخص شده است. بر اساس موقعیت زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه سراب (بهریزی و امینی‌آذر، ۱۳۷۱) قرار دارد. قدیمی‌ترین واحد رخنمون‌یافته در این منطقه مربوط به سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن شامل توف، برش‌های آتشفشانی و توف‌های آندزیتی و ریولیتی به همراه گدازه‌های بازالتی و آندزیت بازالتی است که توسط واحد مارنی و کنگلومرای الیگوسن و سپس با فوران‌های آندزیتی (به صورت توف و گدازه) میوسن پوشانده شده‌اند. تمامی این مجموعه‌های آتشفشانی- آذرآواری توسط توده‌های نیمه‌عمیق، دایک و استوک دیوریتی پس از میوسن قطع شده‌اند.



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی پهنه‌های ساختاری- رسوبی ایران (نبوی، ۱۳۵۵).

۷- مواد و روش‌ها

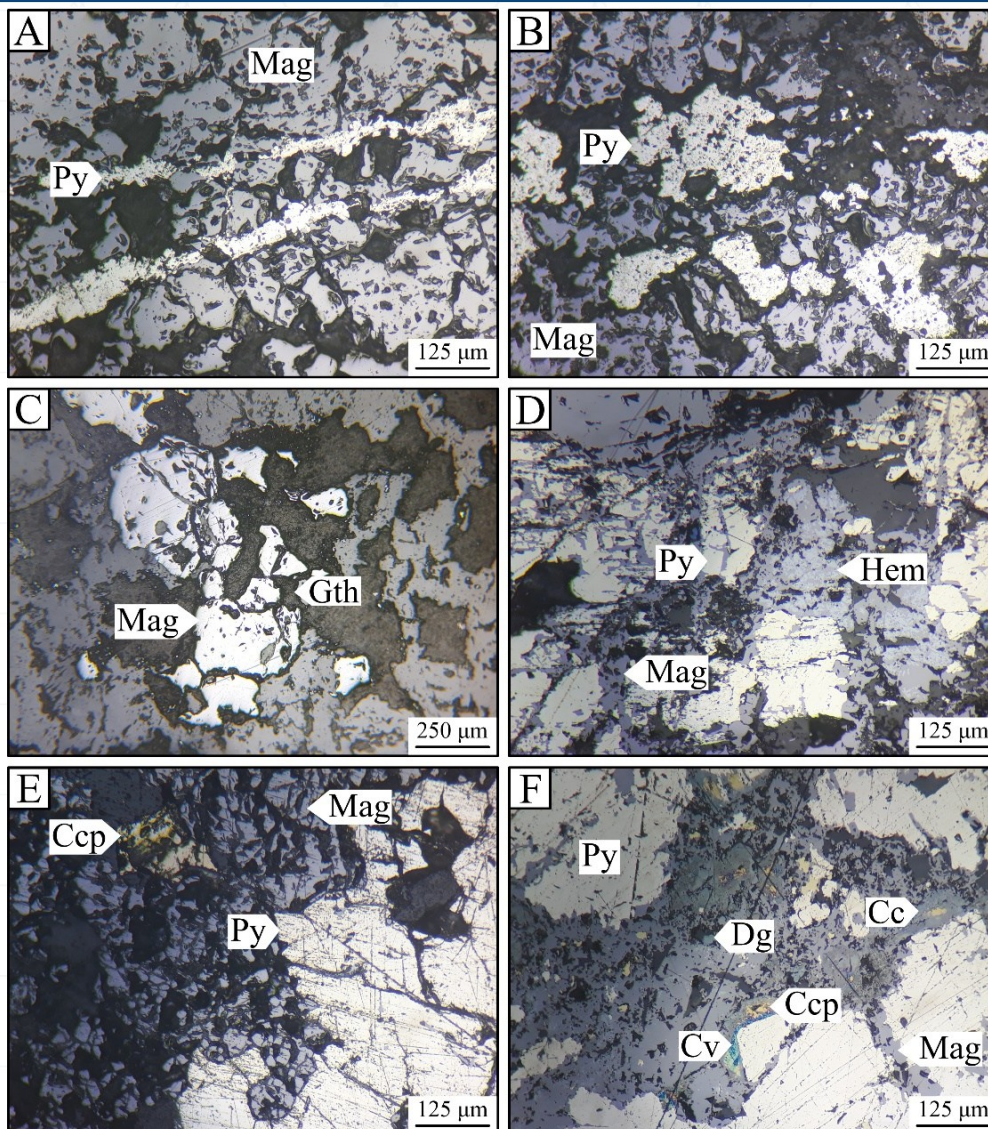
در این تحقیق، نخست نمونه‌برداری از پهنه‌های کانه‌دار صورت گرفت و در مرحله بعد تعدادی مقطع نازک و مقطع نازک- صیقلی جهت انجام مطالعات کانی‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند.

۸- بحث

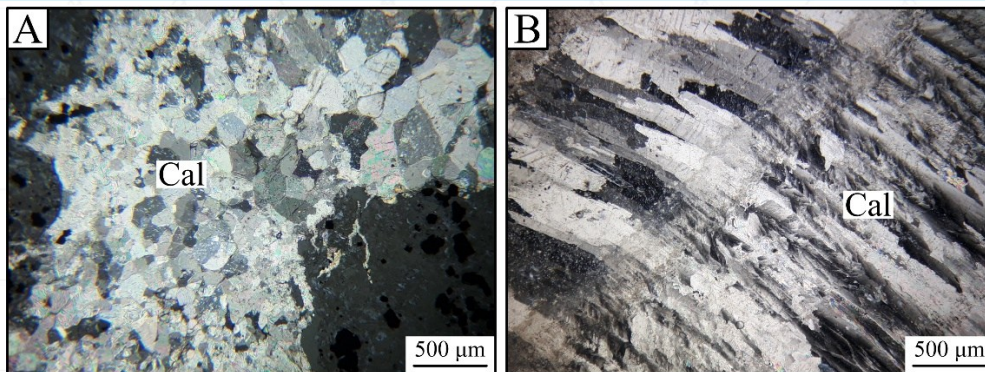
بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی انجام‌شده، کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه طی دو مرحله درون‌زاد و برون‌زاد رخ داده است. طی مرحله درون‌زاد در نتیجه فعالیت سیالات گرمابی، رگه- رگچه‌های مگنتیتی در منطقه تشکیل شده و انواع دگرسانی‌های گرمابی (سیلیسی، سربیتی، آرژیلیک و پروپیلیتیک) در اطراف رگه‌های کانه‌دار توسعه یافته‌اند. کانی‌های کانسنگی از قبیل مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت در طول این مرحله از کانه‌زایی درون رگه- رگچه‌های کانه‌دار تشکیل شده‌اند. طی مرحله برون‌زاد، واکنش سیالات جوی پایین‌رونده با کانی‌های اولیه (مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت) در منطقه باعث ایجاد کانی‌های ثانویه از جمله اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، همتایت و ژاروسیت) و سولفیدهای ثانویه مس (بورنیت، کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت) شده است (شکل ۲).

کانی‌های کانسنگی در منطقه مورد مطالعه اغلب مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت را شامل می‌شوند. مگنتیت فراوان‌ترین کانی کانسنگی در منطقه بوده و در مقاطع میکروسکوپی معمولاً بافت‌های توده‌ای، رگچه‌ای و دانه‌پراکنده را نشان می‌دهد. ابعاد بلورهای مگنتیت به‌طور معمول از کمتر از ۰/۵ میلی‌متر تا بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر تغییر می‌کند (شکل ۲-۱). این بلورها اکثراً به‌صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار در زمینه کلسیتی دیده می‌شوند. این کانی در بیشتر موارد به‌صورت هم‌رشد با پیریت قابل مشاهده است (شکل ۲-۲). گاهی اوقات به‌صورت هم‌رشد با کالکوپیریت نیز یافت می‌شود. در برخی بخش‌ها، مگنتیت از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به همتایت و گوتیت تبدیل شده است (شکل ۲-۳ و ۲-۴). پیریت عمدتاً به‌صورت بلورهای بی‌شکل تا شکل‌دار و در ابعاد ریز تا درشت قابل رؤیت می‌باشد. این کانی معمولاً به‌صورت رگچه‌ای و دانه پراکنده در زمینه کلسیتی حضور داشته و در اغلب موارد به‌همراه مگنتیت مشاهده می‌شود (شکل ۲-۵ و ۲-۶). پیریت به‌طور عمده از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به همتایت، گوتیت و ژاروسیت دگرسان شده است. کالکوپیریت اکثراً به‌صورت بلورهای ریز تا متوسط بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار و به‌حالت دانه‌پراکنده همراه با پیریت و مگنتیت در زمینه کلسیتی حضور دارد (شکل ۲-۷). در بعضی موارد بلورهای کالکوپیریت به‌صورت ادخال درون پیریت و مگنتیت یافت می‌شوند. این کانی عمدتاً از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به گوتیت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت تبدیل شده است (شکل ۲-۸). گوتیت، همتایت، ژاروسیت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت غالباً به‌صورت جانشرینی بر روی کانی‌های اولیه (مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت) دیده می‌شوند.

با توجه به بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی صورت‌گرفته، مهم‌ترین کانی باطله در این منطقه کلسیت می‌باشد. این کانی به‌صورت بلورهای ریز تا درشت درون رگه‌های کانه‌دار یافت می‌شود. بلورهای کلسیت غالباً بی‌شکل تا شکل‌دار بوده و همراه با کانی‌های کانسنگی درون رگه‌های کانه‌دار حضور دارند. این بلورها معمولاً بافت‌های رگچه‌ای، شانه‌ای، پرماند و شکافه پرکن را به نمایش می‌گذارند (شکل ۳). بافت رگچه‌ای در بلورهای کلسیت فراوانی بیشتری نسبت به سایر بافت‌ها نشان می‌دهد (شکل ۳-۱). بافت شانه‌ای بلورهای کلسیت منطقه اغلب در مقیاس میکروسکوپی قابل شناسایی هستند. در این نوع بافت اندازه بلورهای کلسیت از سمت دیواره رگچه‌ها به سمت مرکز افزایش می‌یابد. بافت پرماند کلسیت در نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در مقیاس میکروسکوپی دیده می‌شود (شکل ۳-۲). این نوع بافت عمدتاً در حاشیه و یا در کل بلورهای کلسیت توسعه یافته است. در واقع این نوع بافت از رشد کشیده بلورهای کلسیت حاصل می‌شود.



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی (PPL) از کانه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه. (A) بلورهای مگنتیت به صورت دانه درشت و بلورهای پیریت به صورت رگچه‌ای. (B) هم‌رشدی مگنتیت و پیریت. (C) تبدیل مگنتیت به گوتیت. (D) جانشینی مگنتیت توسط هماتیت. (E) کالکوپیریت به همراه مگنتیت و پیریت. (F) جانشینی کالکوپیریت توسط کوولیت، کالکوسیت و دیژنیت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cc): کالکوسیت، Ccp: کالکوپیریت، Cv: کوولیت، Dg: دیژنیت، Gth: گوتیت، Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت، Py: پیریت).



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از بافت‌های کلسیت در منطقه مورد مطالعه. (A) بلورهای کلسیت با بافت رگچه‌ای. (B) بافت پوسته‌ای در بلورهای کلسیت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت).

۹- نتیجه‌گیری

کانی‌سازی در این منطقه اغلب به صورت رگه‌های مگنتیتی با میزبانی واحدهای آذرآواری ائوسن روی داده است. کانه‌زایی در این منطقه طی دو مرحله درون‌زاد و برون‌زاد صورت گرفته است. در مرحله درون‌زاد، کانی‌های اولیه مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت تشکیل شده‌اند. کانی‌های ثانویه از قبیل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، هماتیت و ژاروسیت) و سولفیدهای ثانویه مس (بورنیت، کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت) طی مرحله برون‌زاد ایجاد شده‌اند. کلسیت مهم‌ترین کانی باطله در این منطقه می‌باشد. بلورهای کلسیت غالباً بافت‌های رگچه‌ای، شانه‌ای، پرماند و شکافه پرکن را نشان می‌دهند.

۱۰- مراجع

- بهروزی، ا.، امینی‌آذر، ر.، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سراب. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سازمان صنعت، معدن و تجارت استان اردبیل، ۱۳۹۱. گزارش پایانی اکتشاف سنگ آهن مگنتیتی سوغانلو، ۱۴۵ صفحه.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ صفحه.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95 (1), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>

کانی‌شناسی و ژئوشیمی زیست‌محیطی فلزات بالقوه سمی در رسوبات رودخانه‌ای و ساحلی رودخانه سیاهرود، استان مازندران

فرزانه شیخی^{۱*}، غلامحسین شمعیان^۲، رضا دهبندی^۳، مجتبی کاویانپور^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

^۳ استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشگاه علم و فناوری مازندران

^۴ پژوهشگر، دانشکده جغرافیا، علوم زمین و محیط زیست، دانشگاه بیرمنگهام، انگلستان

^۵ کارشناس ارشد اداره کل زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی منطقه کاسپین خاوری

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sheikhifar888@gmail.com

چکیده

در این مقاله، کانی‌شناسی و غلظت فلزات بالقوه سمی در رسوبات رودخانه سیاهرود واقع در استان مازندران که در حدفاصل قائم‌شهر و جویبار جریان دارد، بررسی شده است. به علت استقرار مناطق شهری و روستایی و تمرکز واحدهای صنعتی و تخلیه پساب‌های صنعتی، بیمارستانی و رواناب‌های شهری، این رودخانه به شدت در معرض ورود آلاینده‌های مختلف قرار دارد. در این مقاله، کانی‌شناسی و ژئوشیمی زیست‌محیطی رسوبات رودخانه‌ای و ساحلی سیاهرود بررسی شد. کوارتز، فلدسپار، کلسیت و کوارتز از مهمترین اجزای کانیایی رسوبات هستند. مطالعات ژئوشیمیایی نشانگر بالا بودن غلظت کروم، مس، روی و نیکل در این رسوبات است. بررسی ضرایب همبستگی و تحلیل خوشه‌ای بیانگر منشأ مشترک برخی فلزات و نقش فعالیت‌های انسانی در غنی‌شدگی آن‌هاست. بالا بودن غلظت فلزات بالقوه سمی در رسوبات مورد مطالعه احتمالاً ناشی از فعالیتهای صنعتی، ورود فاضلاب و همچنین صنعت کشتیرانی و ماهیگیری است.

کلیدواژه‌ها: کانی‌شناسی، ژئوشیمی زیست‌محیطی، فلزات بالقوه سمی، سیاهرود

Mineralogy and environmental geochemistry of potentially toxic metals in the Siahroud river and beach sediments, Mazandaran province

F. Sheikhi^{1*}, G.H. Shamanian², R. Dehbandi^{3,4}, M. Kavianpour⁵

¹ M.Sc. student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University
sheikhifar888@gmail.com

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of sciences, Golestan University

³ Assistant Professor, Department of Petroleum Engineering, University of science and Technology of
Mazandaran

4. Research Associate, School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham,
Edgbaston, B15 2TT Birmingham, United Kingdom

⁵ Geological survey and mineral exploration of Iran

Abstract

In this paper, the sediments of the Siahroud River, located in Mazandaran Province, were investigated. This river is subjected to extensive pollution due to its proximity to urban and rural areas, industrial activities, and the discharge of industrial and hospital waste, along with urban runoff. This study assessed the mineralogy and the levels of heavy metal contamination in the stream and beach sediments of the Siahroud. Quartz, Feldspar, calcite and dolomite are the main constituents of sediments. Geochemical analysis revealed relatively high concentrations of chromium, copper, zinc, and nickel in the sediments. Correlation coefficients and cluster analysis highlighted human activities as a common source contributing to the enrichment of specific metals. The presence of these pollutants can be attributed to industrial activities, sewage discharge, and influences from shipping and fishing industries.

Keywords: Mineralogy, Environmental geochemistry, Potentially toxic metals, Siahroud

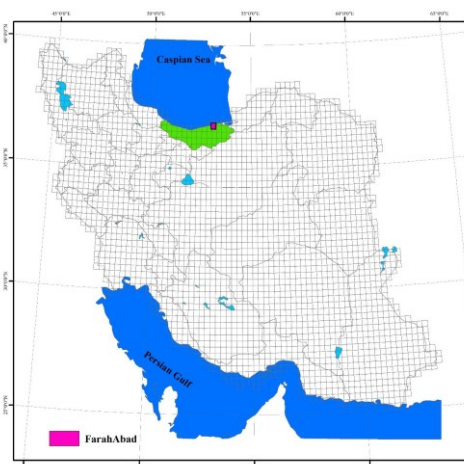
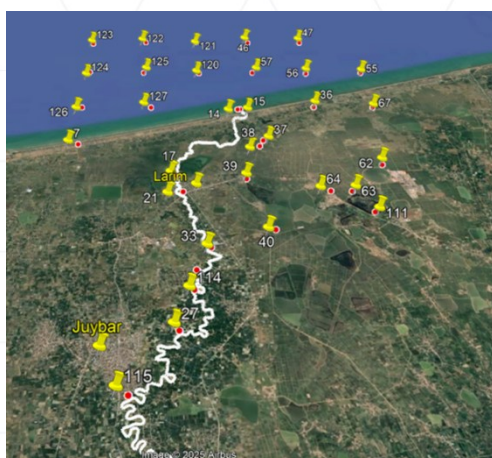
۱- مقدمه

رودخانه‌ها منبع اصلی آب شیرین است و هرگونه آلودگی در آن می‌تواند بر کیفیت زیست‌محیطی سایر بخش‌های طبیعت اثرگذار باشد. امروزه به علت استقرار مناطق شهری و روستایی و تمرکز واحدهای صنعتی در اطراف رودخانه‌ها، این بوم‌سازگان به شدت در معرض ورود آلاینده‌ها به ویژه آلاینده‌های فلزی قرار داشته و اگر ورود آلاینده‌ها از توان خودپالایی رودخانه بیشتر باشد هر دو بخش آب و رسوب را متاثر می‌کند. توانایی تمرکز آلاینده‌های شیمیایی در رسوبات تا ۳ برابر بیشتر از محیط‌های آبی است (بینگ و همکاران، ۲۰۱۹). فلزات بالقوه سمی پایدارترین و پیچیده‌ترین آلاینده‌ها در طبیعت بوده و به واسطه سمیت، ماندگاری بالا و تجزیه‌ناپذیری می‌توانند کیفیت اتمسفر، پیکره‌های آبی و محصولات غذایی را کاهش داده و سلامت انسان و دیگر جانداران را به خطر اندازند. از اینرو، بررسی غلظت فلزات در رسوبات بستر رودخانه از اهمیت زیادی برخوردار است و شدت آلودگی و تاریخچه آنرا بهتر از محیط آبی به نمایش می‌گذارد. از طرفی، کانی‌شناسی رسوبات رودخانه‌ای در بررسی منشأ رسوبات و شناخت شرایط فیزیکی، شیمیایی و زیستی حاکم بر محیط رسوبی از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا رسوبات بستر رودخانه می‌تواند نقش مصرف‌گاه، منشاء و یا هر دو را ایفا نماید (چوی و همکاران، ۲۰۱۱).

رودخانه سیاهرود در استان مازندران، در حدفاصل قائم‌شهر و جویبار جریان دارد (شکل ۱). حوضه آبریز این رودخانه بین محدوده ساری-نکا در شرق و بابل-آمل در غرب قرار گرفته است. شاخه اصلی این رودخانه از شرق روستای پرچینک شروع شده و آبهای سطحی و زیرسطحی منطقه را تغذیه می‌کند و پس از عبور از شهرها و روستاهای متعدد در ناحیه لاریم به دریای مازندران می‌ریزد. رودخانه سیاهرود از نظر شاخص‌های کیفی و بوم‌شناختی شرایط بسیار بدتری نسبت به سایر رودخانه‌های استان مازندران دارد. در این مقاله، کانی‌شناسی و غلظت فلزات بالقوه سمی در رسوبات رودخانه سیاهرود مورد بررسی قرار گرفته و بر پایه این اطلاعات درباره منشأ کانی‌ها و ژئوشیمی زیست‌محیطی رسوبات اظهار نظر شده است.

۲- مواد و روش‌ها

بررسی کانی‌شناسی و ژئوشیمی زیست‌محیطی رسوبات سیاهرود در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی به انجام رسید. در بخش صحرایی، از رسوبات رودخانه‌ای و ساحلی سیاهرود در ۳۴ ایستگاه بر اساس کاربری زمین و منابع آلاینده‌گی (مانند مناطق صنعتی و مزارع کشاورزی) نمونه‌برداری به عمل آمد (شکل ۱). در ادامه، نمونه‌ها توسط الک ۶۳ میکرون الک شد و بخش عبور یافته از الک تحت بررسی‌های آزمایشگاهی قرار گرفت. مطالعات کانی‌شناسی به روش پراش پرتو ایکس (XRD) و اندازه‌گیری غلظت فلزات بالقوه سمی به روش ICP-OES توسط سازمان زمین‌شناسی کشور انجام شد.



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران (سمت راست) و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه سیاهرود (سمت چپ).

۳- بحث

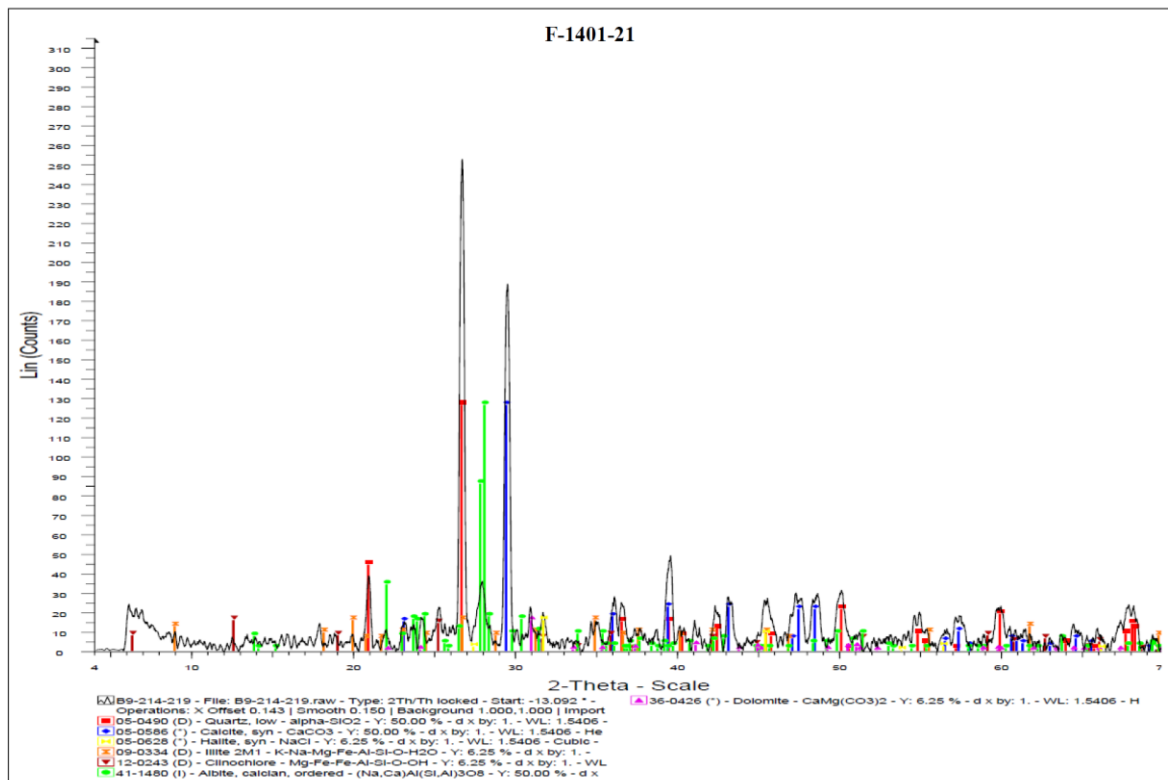
کانی‌شناسی رسوبات سیاه‌رود

ترکیب کانی‌شناختی رسوبات رودخانه‌ای نشانگر شرایط هوازگی سنگ بستر بوده و حضور یا نبود برخی از کانی‌های خاص می‌تواند در درک این شرایط کمک کند. کانی‌های اولیه و مقاوم و کانی‌های ثانویه از مهمترین اجزا تشکیل دهنده رسوبات هستند. کانی‌های اولیه به طور عمده دارای منشا آذرین و دگرگونی و گاه رسوبی می‌باشند، در حالی که کانی‌های ثانویه بر اثر واکنش‌های دما پایین در طی فرآیندهای رسوبی یا بر اثر هوازگی کانی‌های نامقاوم اولیه پدید می‌آیند. این کانی‌ها دارای خواص مغناطیسی متفاوتی بوده و باعث ایجاد حساسیت مغناطیسی متفاوت در رسوبات می‌شوند (پریتر و همکاران، ۲۰۰۹). خصوصیات مغناطیسی رسوبات نشانگر مهمی از اطلاعات زیست محیطی است. برای مثال، رسوبات با خاصیت مغناطیسی بالا می‌توانند واجد مقادیر زیادی از بعضی عناصر سنگین باشند (هو و همکاران، ۲۰۰۷).

بررسی نتایج کانی‌شناسی به روش پراش اشعه ایکس بر روی نمونه‌های رسوبی رودخانه سیاه‌رود نشان می‌دهد که کوارتز، فلدسپار، کلسیت، و دولومیت از مهمترین کانی‌های تشکیل دهنده این رسوبات هستند (جدول ۱، شکل ۲). همچنین کانی‌های رسی از جمله کائولینیت جزو کانی‌های فرعی در بیشتر نمونه‌های مورد اندازه‌گیری بوده است.

جدول ۱ بخشی از نتایج مطالعات کانی‌شناسی به روش پراش اشعه ایکس بر روی رسوبات رودخانه‌ای و ساحلی سیاه‌رود

Sample No.	Identified Minerals
F-401-114	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL.
F-401-115	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL.
F-401-121	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + KAOLINITE (minor).
F-401-122	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + KAOLINITE + CLAY MINERAL (minor).
F-401-17	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL.
F-401-21	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + CLAY MINERAL + DOLOMITE.
F-401-27	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL.
F-401-33	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + CLAY MINERAL + KAOLINITE + DOLOMITE.
F-401-34	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + CLAY MINERAL + KAOLINITE + DOLOMITE.
F-401-37	QUARTZ + CALCITE + HALITE + FELDSPAR + CLAY MINERAL + DOLOMITE + KAOLINITE (minor).
F-401-39	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL.
F-401-40	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL + KAOLINITE.
F-401-47	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL + KAOLINITE (minor).
F-401-55	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL + KAOLINITE (minor).
F-401-57	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL + KAOLINITE (minor).
F-401-62	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL + KAOLINITE.
F-401-63	QUARTZ + CALCITE + FELDSPAR + DOLOMITE + CLAY MINERAL + KAOLINITE.



شکل ۲ نمونه‌ای از نمودارهای پراش پرتو ایکس برای شناسایی کانی‌های مجهول در رسوبات روخانه‌ای و ساحلی سیاه‌رود

کوارتز به عنوان فراوان‌ترین کانی یافت شده در نمونه‌های مورد بررسی یکی از اصلی‌ترین سازنده‌های اغلب رسوبات است، زیرا بعد از فلدسپارها، رایج‌ترین کانی در پوسته زمین است که نسبت به هوازدهی مقاوم می‌باشد. این کانی اغلب در اندازه سیلت و ماسه در رسوبات وجود دارد. از آنجا که واحدهای سنگی حوضه آبریز سیاه‌رود به طور عمده از طبقات ماسه‌سنگی و کنگلومرای تشکیل شده، لذا می‌توان نقش فرسایش آبی را در شسته شدن ذرات کوارتز از این واحدها و حمل به مناطق پست تر و دشت، موثر دانست.

بعد از کوارتز، فلدسپارها بیشترین حضور را در کانی‌های اولیه تشکیل دهنده رسوبات دارند. بیشتر فلدسپارها با اندازه سیلت بر روی سنگ مادرهای با فلدسپار بالا ایجاد می‌شوند (آلن و هاجک، ۱۹۸۹). علاوه بر طبقات ماسه سنگی و کنگلومرای، حضور دایک‌های دیوریتی در سنگ‌های بالادست حوضه آبریز سیاه‌رود نقش مهمی به عنوان سنگ مادر این کانی‌ها بر عهده دارند. از اینرو، وجود مقادیر زیاد پلاژیوکلاز و فلدسپار در رسوبات مورد مطالعه طبیعی به نظر می‌رسد. در نتیجه هوازدهی در این نوع نمونه‌ها، امکان رهاسازی عناصر سنگین زیاد است.

کلسیت و دولومیت رایج‌ترین کانی‌های کربناتی در رسوبات مختلف هستند. یکی از مشکلات اساسی در مورد منشأ کانی‌های کربناتی در رسوبات، تشخیص اولیه و یا ثانویه بودن آن‌ها است (دونر و لین، ۱۹۸۹) که بر اساس مطالعات مورفولوژی میدانی، عناصر ایزوتوپی و میکرومورفولوژی تشخیص آن امکان‌پذیر است. کربنات‌های خاک‌زاد تقریباً همیشه به صورت تجمعی از بلورهای کلسیت در اندازه سیلت هستند و انواع ریز بلور هم به راحتی توسط مطالعات میکروسکوپی مقطع نازک قابل شناسایی اند. برای تشخیص کلسیت خاک‌زاد از نوع زمین زاد (ناشی از واحدهای زمین‌شناسی) می‌توان از میکروسکپ‌های فلورسانس و کاتدولومینسانس استفاده کرد (خرمائی و همکاران، ۲۰۰۶). با توجه به رخمون واحدهای کربناتی در حوضه آبریز سیاه‌رود،

کلسیت و دولومیت از سازنده‌های اصلی رسوبات رودخانه سیاهرود هستند. کانی‌های رسی از دیگر اجزای سازنده رسوبات مورد مطالعه‌اند که با فراوانی کم حضور دارند. (شوارتمن و تیلور، ۱۹۸۹).

ژئوشیمی زیست‌محیطی عناصر بالقوه سمی رسوبات سیاهرود

فلزات بالقوه سمی در زمره خطرناک‌ترین آلاینده‌ها قرار دارند زیرا از پتانسیل سرطان‌زایی، جهش‌زایی، قابلیت انباشت و زیست‌پایستاری ویژه‌ای برخوردارند. فلزات بالقوه سمی از راه‌هایی چون غذا، آب و هوا وارد بدن موجودات می‌شود. فلزات بلعیده شده توسط یک جاندار از راه شبکه غذایی به سطوح غذایی بالاتر می‌رود و طی این مسیر می‌تواند انباشت زیستی یابد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۵). رسوبات به عنوان یکی از مخازن اصلی آلاینده‌ها نقش مهمی در تعیین کیفیت محیط‌زیست دارند به همین دلیل تحلیل غلظت فلزات بالقوه سمی در رسوبات اطلاعات ارزشمندی درباره سطح آلودگی و منابع احتمالی آن فراهم می‌کند. در این بخش داده‌های ژئوشیمیایی فلزات بالقوه سمی شامل کروم (Cr)، مس (Cu)، منگنز (Mn)، نیکل (Ni)، سرب (Pb) و روی (Zn) در رسوبات سیاهرود از طریق آنالیزهای آماری مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۲).

بررسی غلظت کروم در نمونه‌های مورد مطالعه از ۴۴ تا ۱۵۰ بخش در میلیون (ppm) متغیر است و مقدار میانگین آن (۹۰/۷۰ ppm) بیشتر از مقدار زمینه گزارش شده در شیل میانگین جهانی (۴۱/۶ ppm) است که می‌تواند نشانه‌ای از ورود این عنصر از منابع آلاینده باشد.

غلظت فلز مس در رسوبات مورد مطالعه از ۷ تا ۴۵ ppm در تغییر است. میانگین این عنصر در رسوبات مورد مطالعه ppm ۲۵/۳۸ و انحراف معیار آن ppm ۱۱/۴۷ است (جدول ۲).

جدول ۲ آماره‌های توصیفی فلزات بالقوه سمی در رسوبات سیاهرود

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Skewness		Kurtosis	
		Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
Cr	34	44.00	150.00	90.7059	19.93707	.439	.403	1.604	.788
Cu	34	7.00	45.00	25.3824	11.47333	-.139	.403	-1.167	.788
Mn	34	510.00	1391.00	830.3529	282.37026	.687	.403	-1.003	.788
Ni	34	19.00	136.00	47.2353	21.46323	2.252	.403	7.994	.788
Pb	34	20	27	20.65	1.515	2.922	.403	9.289	.788
Zn	34	41.00	140.00	86.0294	27.75159	.352	.403	-.786	.788
Valid N (listwise)	34								

میانگین غلظت منگنز در رسوبات مورد مطالعه برابر ppm ۸۸۲/۵۵ است. مقدار حداقل برابر ppm ۵۱۰ و حداکثر ppm ۱۳۹۱ می‌باشد. انحراف معیار داده‌ها ppm ۲۶۵/۲۷ است که بیانگر پراکندگی نسبتاً زیاد در داده‌ها است. بر اساس داده‌های آماری، میانگین غلظت نیکل در رسوبات مورد مطالعه برابر ppm ۴۵/۳ است.

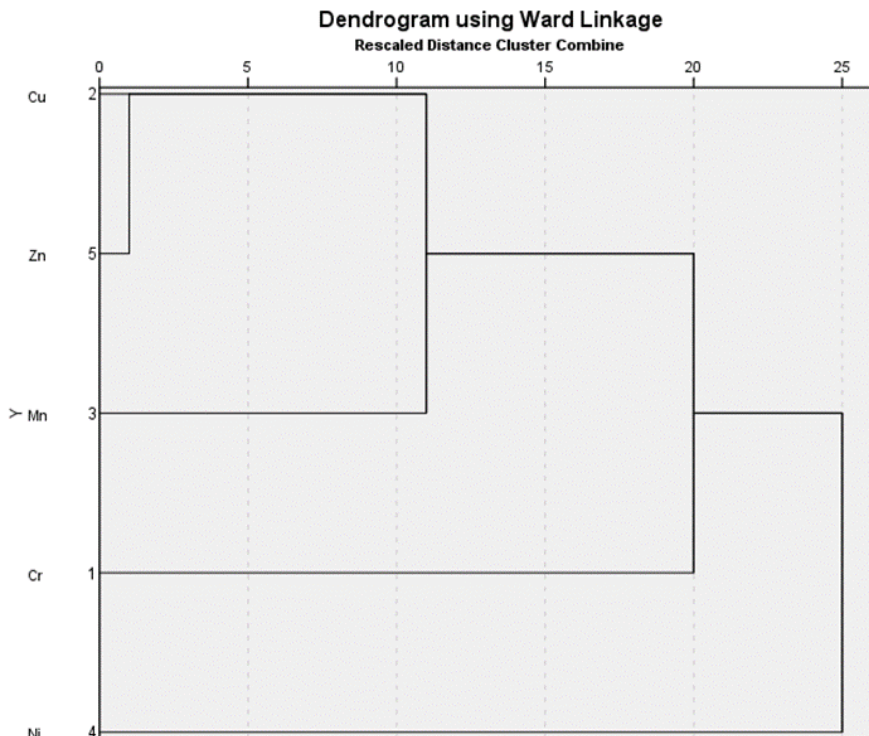
نیکل دارای مقدار حداقل ppm ۱۹ و حداکثر ppm ۱۳۶ بوده و انحراف معیار ppm ۲۳/۶ برای این عنصر نشان دهنده پراکندگی قابل توجه در نمونه‌ها است. بالا بودن غلظت نیکل نسبت به متوسط جهانی می‌تواند ناشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، کانی‌های فرابازی، یا اثرات انسانی باشد.

به طور کلی، غلظت سرب در نمونه‌های مورد مطالعه از حد تشخیص دستگاه (۲۰ ppm) و استانداردهای جهانی کمتر است که بیانگر بی‌اهمیت بودن اثرات زیست‌محیطی آن است. غلظت روی در نمونه‌های مورد مطالعه از ۴۱ تا ۱۳۳ بخش در میلیون تغییر است (جدول ۲). داده‌ها دارای توزیع نسبتاً نرمال بوده و پراکندگی آن‌ها در مقایسه با سایر فلزات پایین است. مقایسه

مقدار روی با استانداردهای زیست‌محیطی سازمان بهداشت جهانی نشان داد که تمامی نمونه‌ها در محدوده مجاز قرار داشته و از نظر آلودگی به روی، در وضعیت منطقه مطلوب ارزیابی می‌شوند.

بررسی ضرایب همبستگی بین داده‌های ژئوشیمیایی نشانگر بیشترین ضریب همبستگی مثبت و معنادار بین مس و روی است که بیانگر منشأ مشترک یا رفتار ژئوشیمیایی مشابه این دو عنصر در محیط مورد مطالعه است. بین کروم و روی نیز همبستگی مثبت و معنادار وجود دارد. منگنز نیز با مس و روی همبستگی معنادار نشان می‌دهد. در مقابل، ضریب همبستگی بین نیکل با سایر فلزات بسیار پایین و فاقد معناداری آماری بوده که ممکن است بیانگر منشأ متفاوت یا رفتار ژئوشیمیایی مستقل آن باشد. به طور کلی، روابط معنادار مشاهده شده بین کروم، روی، مس و منگنز می‌تواند دلالت بر منشأ مشترک، فرآیندهای انتقال مشابه یا منبع آلودگی مشابه برای این فلزات باشد.

بر اساس نتایج تحلیل خوشه‌ای، عناصر بالقوه سمی مورد بررسی در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی شدند (شکل ۳). مس و روی نزدیکترین ارتباط را با یکدیگر نشان داده و در یک خوشه مشترک قرار دارند که بیانگر منشأ مشابه و عمدتاً انسانی (نظیر پساب‌های شهری و فعالیت‌های صنعتی) است. منگنز در مرحله بعد به این خوشه افزوده شده و نشان می‌دهد این عنصر علاوه بر منشأ زمین‌زاد، تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نیز قرار دارد. کروم در فاصله دورتری به این گروه ملحق شده که حاکی از منشأ غالباً زمین‌زاد آن می‌باشد. در نهایت، نیکل در فاصله بیشتری از سایر عناصر قرار گرفته و به عنوان عنصری مستقل‌تر خوشه‌بندی شده که منشأ آن بیشتر به ویژگی‌های زمین‌شناسی و سنگ بستر منطقه وابسته است. این نتایج، بیانگر آن است که تلفیقی از عوامل انسانی و زمین‌زاد در کنترل غلظت فلزات بالقوه سمی نقش دارد. با این حال، عناصر مس و روی بیشتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد و عناصر نیکل و کروم بیشتر تحت کنترل فرایندهای زمین‌زاد قرار گرفته‌اند.



شکل ۳ نمودار خوشه‌ای سلسله مراتبی عناصر بالقوه سمی در رسوبات سیاه‌رود

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، کوارتز، فلدسپارها، کلسیت و دولومیت مهمترین کانی‌های سازنده رسوبات سیاهرود می‌باشند. این کانی‌ها به طور عمده از نوع اولیه بوده و بر اثر هوازدگی و فرسایش آبی سنگ‌های رخنمون یافته در حوضه آبریز سیاهرود به محیط‌های پست و دشت انتقال یافته‌اند. این کانی‌ها به همراه مقادیر کمتری از کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن با توجه به ترکیب شیمیایی خود و نیز تاثیر بر شیمی آب و پدیده‌هایی مانند جذب-واجذب می‌توانند باعث رهاسازی یا جذب فلزات بالقوه سمی در محیط خاک شوند.

از نظر ژئوشیمیایی، غلظت کروم، مس، روی و نیکل بالاتر از مقادیر زمینه جهانی بوده و بیانگر تاثیر منابع انسانی در کنار منشا زمین‌زاد این عناصر است. همبستگی مثبت بین کروم، مس و روی نشان دهنده نقش غالب فرآیندهای انسان‌زاد در غنی‌شدگی این عناصر است. در مقابل، عناصری که همبستگی ضعیف‌تری با سایر فلزات نشان داده‌اند اغلب دارای منشأ زمین‌زاد هستند.

نتایج تحلیل خوشه‌ای بیانگر آن است که عناصر قرار گرفته در یک خوشه، دارای منشأ و الگوی رفتاری مشابهی هستند. به طور مشخص، عناصری مانند کروم، مس و روی که مقادیر بالاتری از شاخص‌های آلودگی را نشان می‌دهند، در یک خوشه مشترک قرار گرفته‌اند. این همپوشانی بیانگر آن است که افزایش غلظت این عناصر احتمالاً تحت تأثیر منابع انسانی مشترک نظیر رواناب‌های شهری، فعالیت‌های کشاورزی و تخلیه پساب‌ها بوده است که در سایر مطالعات مشابه مانند وانگ و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده شده است.

۵- مراجع

- Allen, B.L. and Hajek, B.F., 1989. Mineral occurrence in soil environment, In: Dixon, B & Weed, S.B. (Eds), Mineral in soil environment, Soil Society of America, pp. 199-278.
- Bing, H., Zhou, J., Wu, Y., Wang, X., Sun, H., Li, R., 2019. Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China. Environmental Pollution 214, 485–496.
- Choi, K.Y., Kim, S.H., Hong, G.H., Chon, H.T. 2011. Distributions of heavy metals in the sediments of South Korean harbors. Environ Geochem Health 34. 71–82, doi. org/10.1007/s10653- 011- 9413-3.
- Doner, H.E. and Lynn, W.C., 1989. Sulfate and sulfide minerals, In: Dixon, B & Weed, S.B. (Eds), Mineral in soil environment, Soil Society of America, pp. 279-330.
- Hu, X.F., Su, Y., Ye, L.X.Q., Zhang, G.L., 2007. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implication, Catena, Vol. 70, pp. 428-436.
- Khormali, F., Abtahi, A., Stoops, G., 2006. Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soils of Fars Province, Southern Iran, Geoderma, Vol. 132, pp. 31–46.
- Preetz, H., Altfelder, S., Hennings, V., Igel, J., 2009. Classification of soil magnetic susceptibility and prediction of metal detector performance – case study of Angola, Proc. of SPIE, Vol. 7303 730313, pp. 1-13.
- Schwertmann, U. and Taylor, R.M., 1989. Iron oxides, In: Dixon, B & Weed, S.B. (Eds), Mineral in soil environment, Soil Society of America, pp. 379-438.
- Wang, J., Xu, C., & Li, P. (2021). Multivariate statistical analysis of heavy metals in sediments for sou apportionment. Science of the Total Environment, 750, 142267.

سنگ‌نگاری سنگ‌های گرانودیوریتی در منطقه بلندپرچین، جنوب ماهنشان

فرزاد فرجیان^۱، قاسم نباتیان^{۲*}، محمد ابراهیمی^۲، حافظ مرنگی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، ایران

۳- شرکت زرجویان فلات قاره، پارک علم و فناوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، ایران

* مسئول مکاتبات: قاسم نباتیان - gh.nabatian@gmail.com - ۰۹۱۴۱۷۶۲۲۴۵

چکیده

توده نفوذی بلندپرچین در فاصله ۱۲۰ کیلومتری غرب شهر زنجان و در شهرستان ماهنشان و در پهنه سندنجان-سیرجان واقع شده است. منطقه مورد مطالعه در نقشه چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب و در جنوب غرب نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهنشان واقع است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهنشان، واحدهای رخنمون یافته در این محدوده به سن پراکامبرین-کامبرین بوده که بر روی شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها قرار گرفته و توسط توده‌های نفوذی با ترکیب حد واسط تا فلسیک و رگه‌های سیلیسی-فلدسپاتی نشأت گرفته از آن، قطع شده‌اند. کانی‌های اصلی سنگ‌های گرانودیوریتی مورد مطالعه شامل کوارتز، آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز و بیوتیت می‌باشند. بافت غالب موجود در این سنگ‌ها، بافت دانه‌ای (گرانولار) است. علاوه بر این، بلورهای آلکالی فلدسپار اغلب بافت پرتیتی و همینطور برخی بلورهای پلاژیوکلاز که در مجاورت فلدسپار پتاسیم‌دار قرار دارند، دارای بافت میرمکتیتی می‌باشند. همچنین در برخی بخش‌های سنگ مرز بین بلورهای کوارتز ناهموار بوده و ایجاد بافت کانسریتال نموده است. کانی‌های فرعی موجود در سنگ شامل زیرکن و کانی‌های اپک هستند.

کلیدواژه‌ها: گرانودیوریت، بلندپرچین، ماهنشان، پهنه سندنجان-سیرجان.

Petrography of Bolandparchin granodioritic rocks, south of Mahneshan

Farzad Farajian¹; Ghasem Nabatian^{2*}; Mohammad Ebrahimi²; Hafez Marangi³

¹ Economic Geology MSc. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan

² Associate professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan

³ Zarjuyan Falat ghareh Co.- Science and Technology Park IASBS- Zanjan

Abstract

The Bolandparchin intrusion is located 120 kilometers west of Zanjan city, in Mahneshan County, within the Sanandaj-Sirjan zone. The study area is situated on the geological map of Takab with 1:250,000 scale and in the southwest of the 1:100,000 geological map of Mahneshan. Based on the geological map of Mahneshan, the exposed rock units in this area are of Precambrian-Cambrian age, which overlie schists and amphibolites and are intruded by intermediate to felsic intrusive bodies. The main minerals of the studied granodioritic rocks include quartz, alkali feldspar, plagioclase, and biotite. The predominant texture in these rocks is granular texture. Furthermore, alkali feldspar crystals often exhibit perthitic texture, and some plagioclase crystals adjacent to potassium feldspar display myrmekitic texture. Also, sometimes, the boundaries between quartz crystals are uneven, forming a consertal texture. The accessory minerals present in the studied rocks include zircon and opaque minerals.

Keywords: Granodiorite, Bolandparchin, Mahneshan, Sanandaj-Sirjan zone.

۱- مقدمه

گرانودیوریت‌ها یکی از انواع سنگ‌های آذرین درونی مهم در ایران هستند و نقش برجسته‌ای در زمین‌ساخت، متالورژی و حتی منابع ساختمانی کشور دارند. گرانودیوریت سنگی آذرین درونی با ترکیب اسیدی تا حد واسط است که از نظر ترکیب شیمیایی، بین گرانیت و دیوریت قرار می‌گیرد. این سنگ عمدتاً از پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالی فلدسپار، بیوتیت و هورنبلند تشکیل شده است. بافت گرانودیوریت عمدتاً دانه درشت و گرانولار است. بیشتر گرانودیوریت‌های ایران در ارتباط با زون‌های همگرای صفحه‌ای و فرآیند فروانش تشکیل شده‌اند. این سنگ‌ها عمدتاً به کمربندهای ماگمایی دوران مزوزوئیک تا سنوزوئیک تعلق دارند و نشان دهنده ماگماتیسم کالک‌آلکالن هستند. بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهشان، واحدهای سنگی رخنمون یافته در این منطقه شامل سنگ‌های کربناتی که بر روی شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها قرار گرفته و توسط توده‌های نفوذی با ترکیب حد واسط تا فلسیک و رگه‌های سیلیسی-فلدسپاتی نشات گرفته از آن قطع شده‌اند. همچنین واحدهای سنگی گرانیتی و گرانودیوریتی که در منطقه وجود دارند، سن قبل از دوران اول زمین‌شناسی را نشان می‌دهند. تصویر گوگل‌ارث منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: تصویر گوگل‌ارث از منطقه مورد مطالعه که محل نمونه‌برداری با علامت زرد رنگ نمایش داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای در رابطه با منطقه مورد مطالعه انجام شد و همچنین نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه نیز مورد بررسی قرار گرفت. سپس بازدید میدانی از منطقه و در ادامه برداشت صحرایی صورت پذیرفت. پس از مطالعه و بررسی نمونه‌های دستی، نسبت به تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی اقدام شد و در نهایت مقاطع تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان لایکا مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند.

۳- زمین‌شناسی منطقه

با توجه به نقشه پهنه‌بندی رسوبی-ساختاری ایران منطقه بلندپرچین در پهنه سهند-سیرجان واقع است (Stocklin, 1968). بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهنشان (لطفی، ۱۳۸۰) و نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب (علوی و همکاران، ۱۳۵۵) واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده مورد مطالعه، شامل سنگ‌های کربناتی به سن پرکامبرین- کامبرین بوده که بر روی شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها پرکامبرین قرار گرفته‌اند و توسط توده‌های نفوذی با ترکیب حد واسط تا فلسیک و رگه‌های سیلیسی-فلدسپاتی نشأت گرفته از آن، قطع شده‌اند. سنگ‌های کربناته ضخیم‌لایه بوده و بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهنشان، سن قبل از دوران اول را دارند.

۴- سنگ‌نگاری

سنگ‌های گرانودیوریتی منطقه بلندپرچین دارای بافت دانه‌ای بوده، اندازه بلورها در ابعاد چند میلی‌متری بوده و در برخی موارد به صورت جهت‌یافته (Shelley, 1993) دیده می‌شوند (شکل ۲).



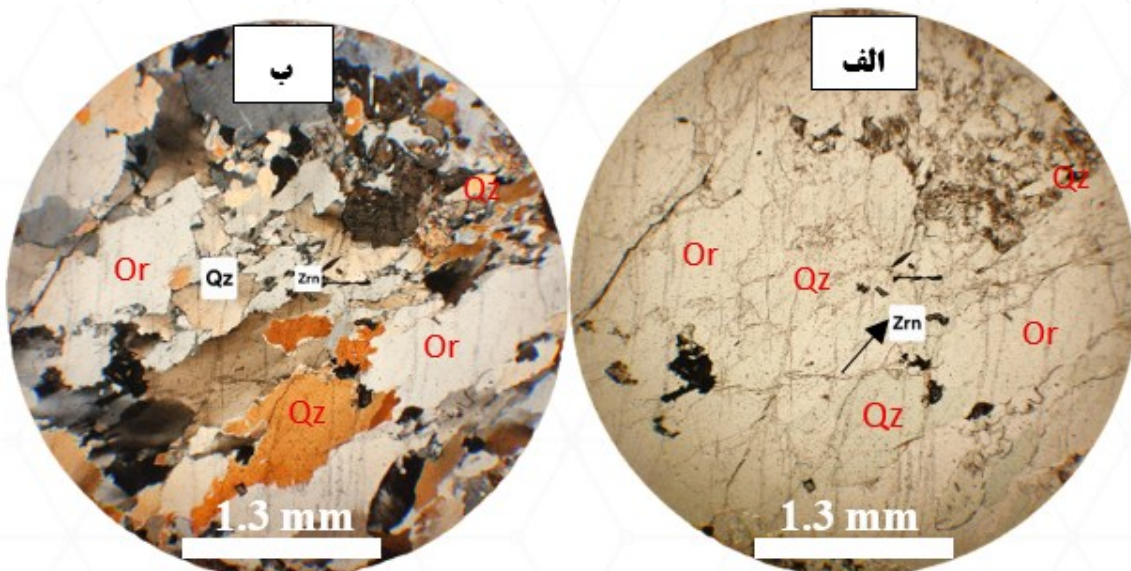
شکل ۲: نمونه دستی برش خورده از سنگ‌های گرانودیوریتی منطقه بلندپرچین.

کانی‌های مافیک سنگ‌های گرانودیوریتی عمدتاً بیوتیت و کانی‌های فلسیک آنها شامل کوارتز و فلدسپارها هستند. نمایی از توده گرانیتوئیدی بلندپرچین در شکل ۳ نشان داده شده است. در زیر میکروسکوپ، کانی‌های اصلی سنگ‌های گرانودیوریتی شامل کوارتز، آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز و بیوتیت هستند. کانی‌های فرعی موجود در این سنگ‌ها کانی‌های اپک و زیرکن می‌باشند (شکل ۴). کانی‌های ثانویه موجود در سنگ شامل کلسیت و کلریت هستند. بلورهای کوارتز موجود در این سنگ‌ها اغلب به صورت ناخودشکل بوده و همچنین اغلب بافت کانسرتال (Mackenzie et al., 1987) نشان می‌دهند. کوارتزها در مواردی خاموشی موحی دارند که تحت تأثیر استرس ایجاد شده‌اند. در مواردی کوارتز به حالت کرمی شکل در حاشیه پلاژیوکلازها با پلاژیوکلاز هم‌رشدی دارد. این نوع هم‌رشدی زمانی اتفاق می‌افتد که در مجاورت پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیم‌دار نیز موجود باشد. فلدسپارهای پتاسیم‌دار سنگ اغلب دارای بافت پرتیتی (Best and Christiansen, 2001) هستند و رشته‌هایی از پلاژیوکلاز سدیک (آلبیت یا الیگوکلاز) از آنها در حالت جامد جدا شده است، به عبارت دیگر اکسلوشن اتفاق افتاده است. بزرگ‌ترین بلورهای موجود در سنگ عمدتاً بلورهای ارتوز بوده و حداکثر اندازه آنها به ۳/۵ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۴). ارتوزها اغلب ناخودشکل هستند. پلاژیوکلازها در مواردی دارای منطقه‌بندی و ماکل تکراری هستند و همچنین اکثراً ناخودشکل و در مواردی نیمه‌خودشکل هستند. حداکثر اندازه پلاژیوکلازها ۲/۵ میلی‌متر است. زیرکن اغلب به صورت انکلوزیون داخل کانی‌های دیگر

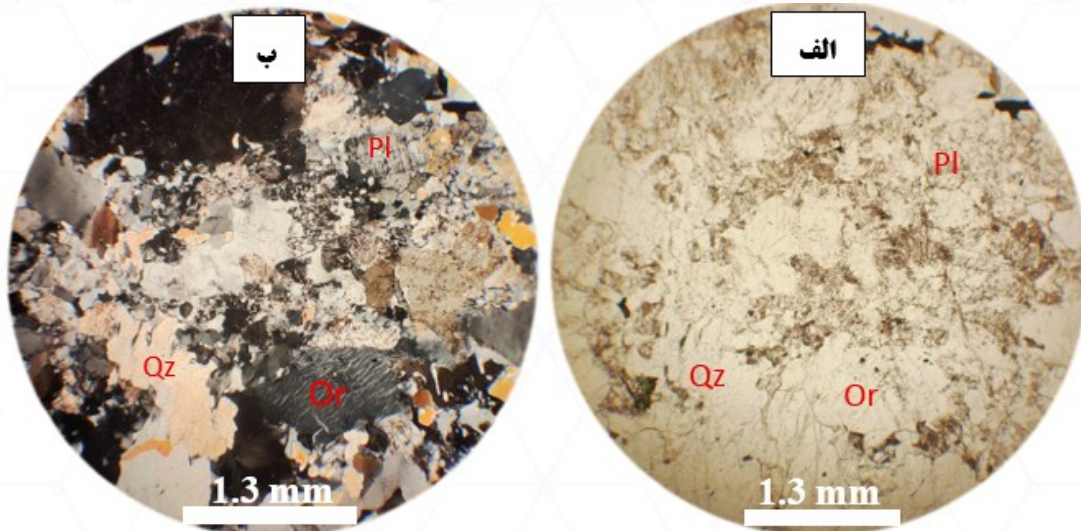
بوده و با برجستگی بسیار قوی و بیرفرنزانس سری چهارم مشخص می‌باشد. بیوتیت‌ها اغلب ناخودشکل تا نیمه‌خودشکل هستند و غالباً به رنگ قهوه‌ای با چند رنگی شدید و در مواردی با رنگ سبز و چندرنگی شدید مشخص می‌باشند در برخی از بلورهای بیوتیت رنگ کانی، رنگ بیرفرنزانس را پوشانده و سبب بروز بیرفرنزانس غیرعادی شده است (فرقانی، ۱۳۶۲). حداکثر طول بلورهای بیوتیت ۲ میلی‌متر می‌باشد. در برخی بخش‌های سنگ بلورهای بیوتیت به صورت تجمعی دیده می‌شوند (شکل ۶).



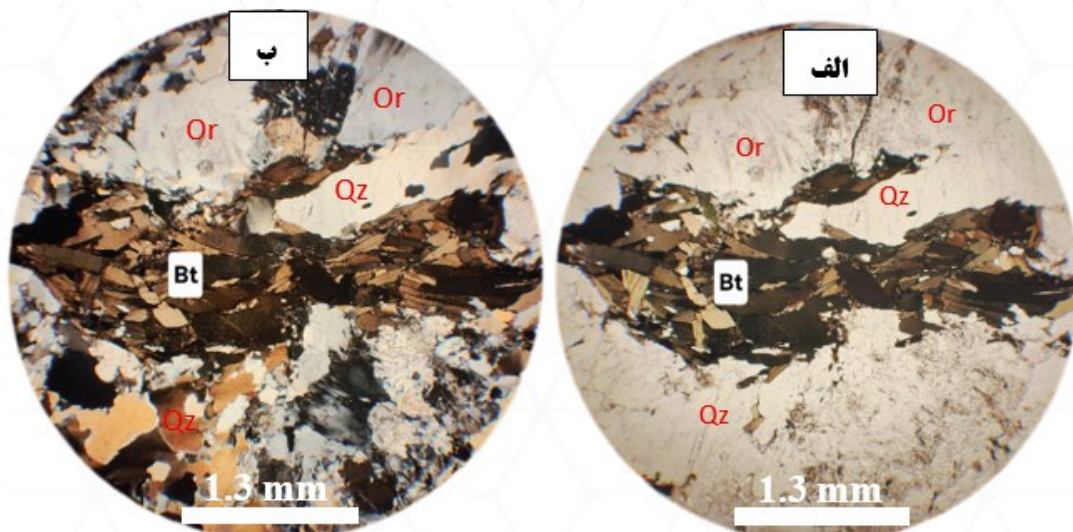
شکل ۳: نمایی نزدیک از توده نفوذی گرانودیوریتی مورد مطالعه.



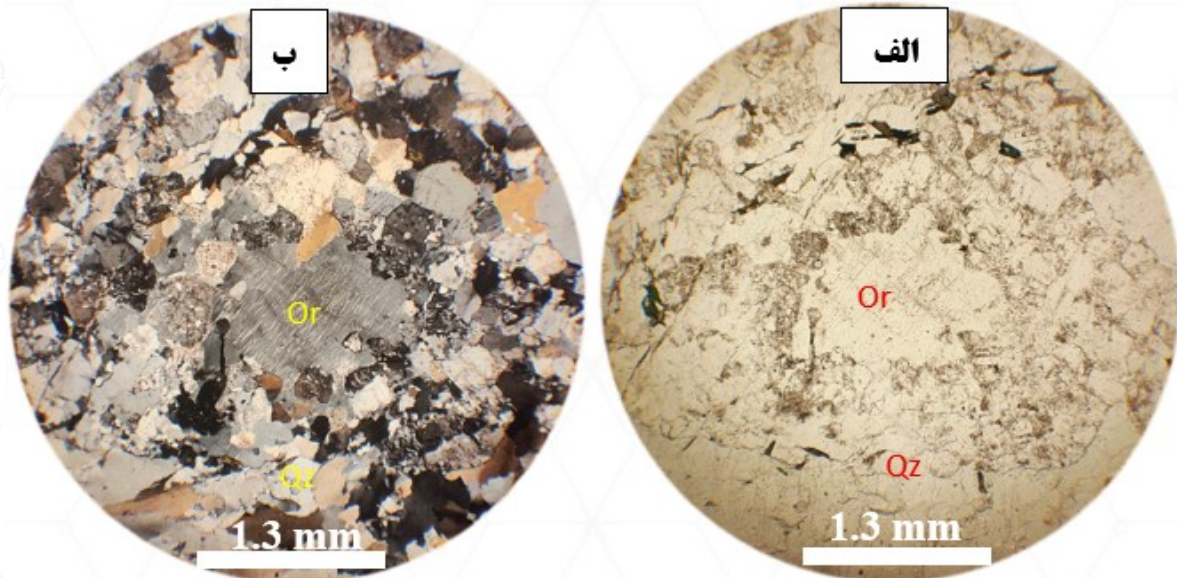
شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از گرانودیوریت. الف- نور یک بار پلاریزه. ب- نور دو بار پلاریزه. در مرکز تصویر بلورهای کوارتز با بافت کانسترال قرار دارند، در بخش بالای تصویر، ارتوز پرتیتی و در مجاور مرکز، پلاژیوکلاز با ماکل تکراری قرار گرفته‌اند. همچنین در مرکز تصویر بلورهای ریز زیرکن نیز مشاهده می‌شوند که با فلش نشان‌دهنده شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010 گرفته شده و عبارتند از: Qz کوارتز و Or ارتوز.



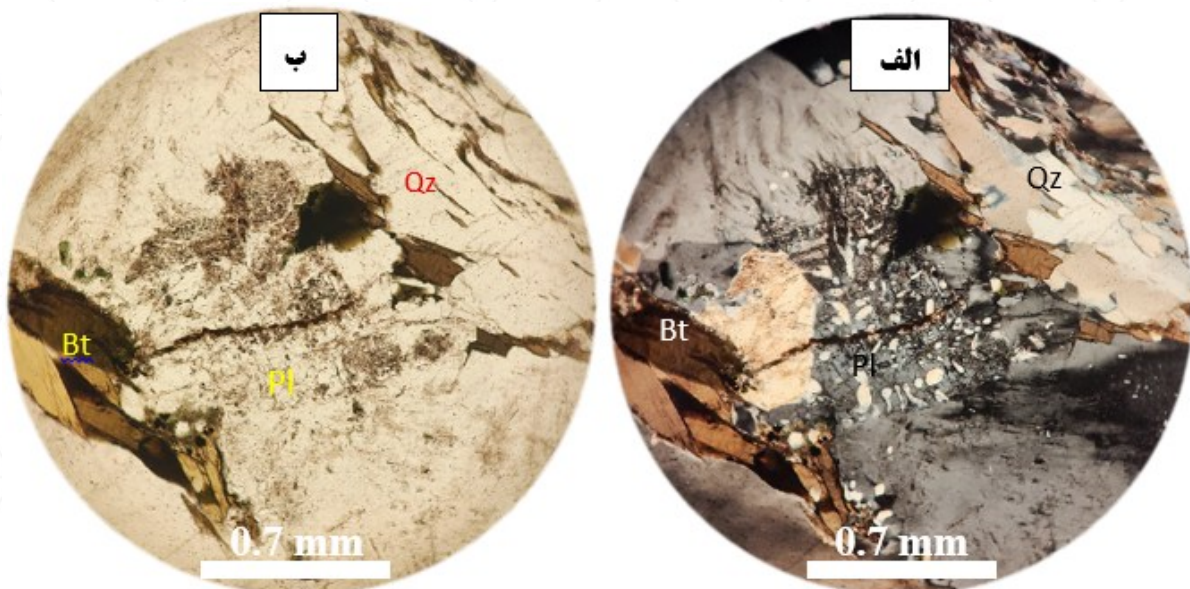
شکل ۵: تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از گرانودیوریت. الف- نور یک بار پلاریزه، ب- نور دو بار پلاریزه. در قسمت پایین مقطع ارتوز پرتیتی داریم و به سمت بالا بلورهای پلاژیوکلاز مشاهده می‌شوند. بافت میرمکیتی هم وجود دارد. علایم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010 گرفته شده و عبارتند از: Qz کوارتز، Pl پلاژیوکلاز و Or ارتوز.



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از گرانودیوریت. الف- نور یک بار پلاریزه، ب- نور دو بار پلاریزه. در مرکز تصویر، تجمع بلورهای بیوتیت وجود دارد. در بالای مقطع، بلورهایی از ارتوز مشاهده می‌شوند، و در قسمت پایینی بلورهای بیوتیت، پلاژیوکلاز با ماکل تکراری را داریم. به دلیل ضخیم بودن مقطع، بلورهای کوارتز، بیفرزئانس بالاتری نشان می‌دهند. علایم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010 گرفته شده و عبارتند از: Qz کوارتز، Bt بیوتیت و Or ارتوز.



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از گرانودیوریت. الف- نور یک بار پلاریزه. ب- نور دو بار پلاریزه. در مرکز تصویر ارتوز با بافت پرتیتی و در مجاور آن، بافت میرمکیتی مشاهده می‌شوند. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010 گرفته شده و عبارتند از: Qz کوارتز و Or ارتوز.



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از گرانودیوریت. الف- نور یک بار پلاریزه. ب- نور دو بار پلاریزه. در این تصاویر بافت پویکلیتیک (حضور بلورهای کوارتز در داخل پلاژیوکلاز) به وضوح مشاهده می‌شود. در سمت چپ تصویر نیز بلورهای بیوتیت قابل مشاهده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010 گرفته شده و عبارتند از: Qz کوارتز، Bt بیوتیت و Or ارتوز.

۵ - نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- منطقه بلندپرچین در پهنه ساختاری سنجندج- سیرجان قرار دارد.
- سن توده نفوذی گرانودیوریتی در دوره پرکامبرین- کامبرین است.
- بافت غالب در سنگ‌های گرانودیوریتی منطقه بلندپرچین بافت دانه‌ای بوده و در برخی نقاط دارای جهت یافتگی می‌باشند.
- کانی‌های مافیک عمدتاً بیوتیت و کانی‌های فلسیک عمدتاً کوارتز و فلدسپارها هستند.
- کانی‌های فرعی موجود در این سنگ‌ها شامل زیرکن و کانی‌های آپک می‌باشند.
- کانی‌های ثانویه شامل کلسیت و کلریت هستند.
- عمده بافت‌های دیده شده در مقاطع میکروسکوپی شامل بافت کانسرتال، بافت میرمکیتی، بافت پرتیتی، بافت و پویکلیتیک می‌باشند.

۶- تقدیر و تشکر

از مسئولین محترم حوزه پژوهش دانشگاه زنجان به جهت حمایت مالی از این تحقیق در طی اجرا و ارایه مقاله در سی و سومین همایش ملی انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران قدردانی می‌گردد. همچنین از مدیریت محترم شرکت زرجویان فلات قاره به جهت حمایت از این پژوهش قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

علوی م.، عمیدی م.، طاطااوسیان ش.، حق‌پور ا.، بلورچی م.ح.، آقانباتی ع.، پلیسه گ. و حاجیان ج.، ۱۳۵۵. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ورقه تکاب. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

فرقانی ع.ح.، ۱۳۶۲، کانی‌شناسی: نزوسیلیکات‌ها تا اینوسیلیکات‌ها. انتشارات دانشگاه تهران، ۵۴۴.

لطفی م.، ۱۳۸۰. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه ماهنشان. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Best, M.G. and Christiansen, E.H., 2001. Igneous petrology. Blackwell Science, Inc., 458 p.

Mackenzie W.S., Donaldson C.H. and Guilford C., 1987. Atlas of igneous rocks and their textures.

Longman Scientific & Technical, 148p.

Shelley, D., 1993. Igneous and metamorphic rocks under the microscope. Chapman and Hall, 445 p.

Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran: A review. AAPG bulletin, 52(7): 1229-1258.

Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010, Abbreviations for names of rock-forming minerals. American mineralogist, 95(1): 185-187.

دما-فشارسنجی سنگ‌های گابرویی منطقه رزق (افیولیت ملانژ جنوب بیرجند)

سید سعید محمدی^{۱*}، سون لین چانگ^۲، ملیحه نخعی^۴

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه پژوهشی علوم زمین، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- انستیتو علوم زمین، آکادمیا سینیکا، تایپه، تایوان

۴- گروه مهندسی معدن، دانشکده عمران، معدن و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

ssmohammadi@birjand.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، شرایط دما و فشار تبلور گابروهای منطقه رزق در افیولیت ملانژ جنوب بیرجند با استفاده از دما-فشارسنجی پیروکسن‌ها بررسی شده است. گابروهای مورد مطالعه عمدتاً دارای بافت گرانولار بوده و از پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و مقادیری الیوین تشکیل شده‌اند. بر اساس نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی، گستره ترکیبی پلاژیوکلازها بین $Ab_{6.78}/An_{93.07}$ تا $Ab_{9.29}/An_{90.48}$ تغییر نموده و از نوع آنورتیت هستند. ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های مورد مطالعه، در محدوده پیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن دار است و دارای ترکیب اوزیت هستند. دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی، ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و فشار در زمان تبلور کلینوپیروکسن، ۵ تا ۶ کیلو بار تعیین گردید.

کلیدواژه‌ها: دما-فشارسنجی، کلینوپیروکسن، گابرو، رزق، افیولیت ملانژ جنوب بیرجند

Thermobarometry of gabbroic rocks from Razgh area (south of Birjand ophiolitic mélange)

Seyyed Saeid, Mohammadi^{1*}; Sun-Lin, Chung^{2,3}; Malihe, Nakhaei⁴

1-Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Earth Sciences Research Group, University of Birjand, Birjand, Iran
ssmohammadi@birjand.ac.ir

3-Institute of earth sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan

4- Department of mining engineering, Faculty of civil, mining and chemistry, Birjand university of technology, Birjand, Iran

Abstract

In this study, the temperature and pressure conditions of crystallization of the Razgh gabbros in the South Birjand ophiolitic mélange were investigated using pyroxene thermobarometry. The studied gabbros are mainly characterized by a granular texture and are composed of plagioclase, clinopyroxene, and minor amounts of olivine. Based on electron microprobe analyses, the compositional range of plagioclase varies from $Ab_{6.78}-An_{93.07}$ to $Ab_{9.29}-An_{90.48}$, indicating an anorthitic composition. The chemical composition of the analyzed pyroxenes falls within the Ca-Mg-Fe pyroxene group and corresponds to augite. The crystallization temperature of the studied clinopyroxenes was determined to be between 1150 and 1200 °C, while the pressure at the time of clinopyroxene crystallization was estimated to be 5–6 kbar.

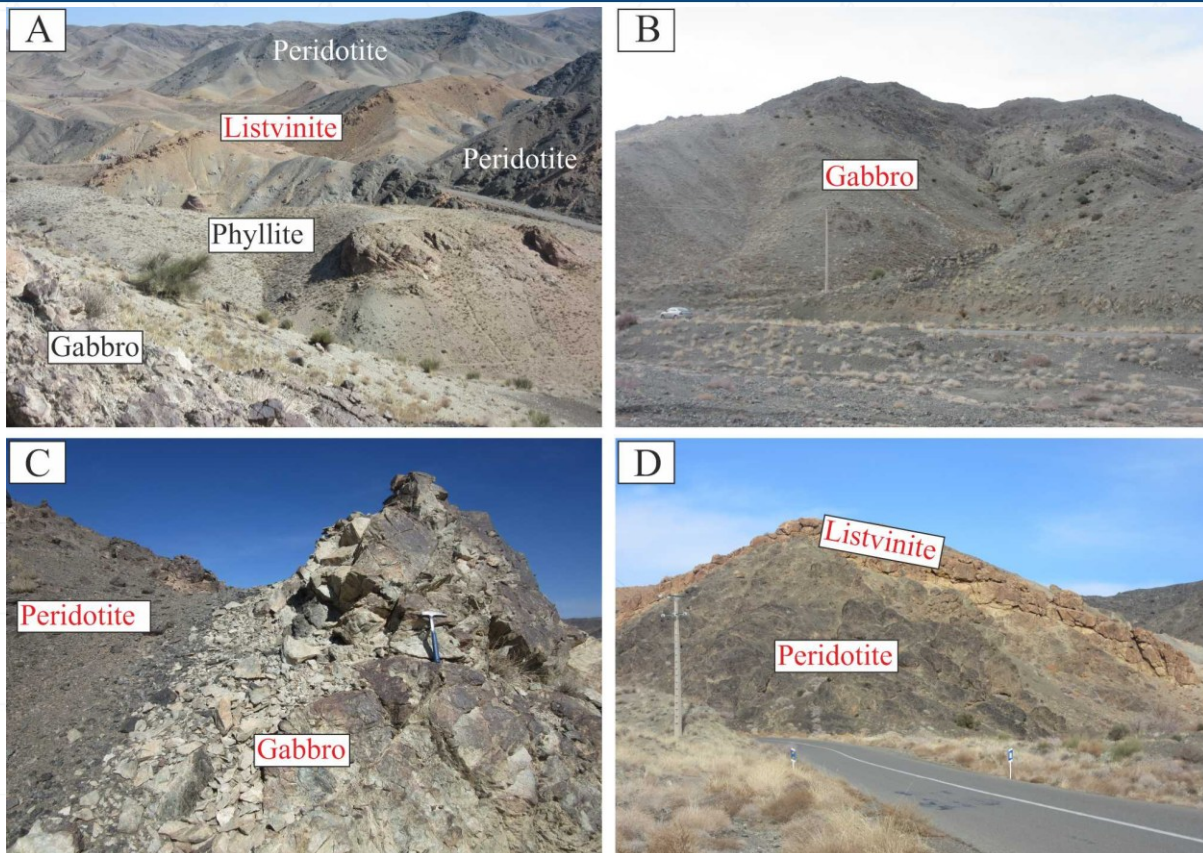
Keywords: Thermobarometry, Clinopyroxene, Gabbro, Razgh, South of Birjand ophiolitic mélange

مقدمه

منطقه مورد مطالعه در ۵۴ کیلومتری جنوب شرق بیرجند در بخش جنوب شرقی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ بیرجند (اوهانیان و طاطاوسیان، ۱۹۷۸) با امتداد شمال غرب-جنوب شرق از جنوب تا غرب روستای رزق رخنمون دارد. از دیدگاه تقسیم‌بندی ساختاری ایران این منطقه در بخش شمالی زون زمین‌درز سیستان (Tirrul et al., 1983) قرار گرفته است. این زون بقایایی از یک باریکه اقیانوسی است که به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های نئوتتیس مطرح بوده و قبل از ۸۶ میلیون سال پیش بسته شده است (Zarrinkoub et al., 2012). زون سیستان در نتیجه برخورد دو بلوک لوت و افغان تشکیل شده و با استفاده از روش‌های متفاوت سن-سنجی، زمان بسته شدن آن را مربوط به کرتاسه پایانی می‌دانند (Brocker et al., 2013; Angiboust et al., 2013; Zarrinkoub et al., 2012). در منطقه رزق، واحدهای مختلف مجموعه افیولیتی متشکل از پریدوتیت، گابرو، دیاباز، شیسست و فیلیت متعلق به کرتاسه فوقانی همراه برونزدهایی از لیستوینیت با روند کلی شمال غرب-جنوب شرق مشاهده می‌شود. کاتیون‌های شرکت‌کننده در ساختار کانی کلینوپیروکسن در تعادل با ماگمای میزبان می‌باشند و می‌تواند منعکس‌کننده منشأ ماگمای والد، تحولات پترولوژیکی، سری ماگمایی، شرایط دما-فشار و موقعیت تکتونوماگمایی ماگمای میزبان باشد (Morimoto et al., 1988; Nimis and Ulmer, 1998; Putirka, 2008; Cheng et al., 2020). این پژوهش با هدف بررسی شیمی کانی‌ها و استفاده از آن جهت تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور سنگ‌های گابرویی منطقه رزق انجام شده است.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه رزق در بخش جنوب شرقی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ بیرجند (اوهانیان و طاطاوسیان، ۱۹۷۸) واقع شده است. واحدهای آمیزه افیولیتی با سن قبل از کرتاسه فوقانی تا کرتاسه فوقانی (اوهانیان و طاطاوسیان، ۱۹۷۸) شامل سنگ‌های اولترامافیک و مافیک به طور گسترده در منطقه جنوب بیرجند پراکنده هستند. سنگ‌های اولترامافیک (پریدوتیت‌ها) عمدتاً دارای ترکیب هارزبورژیت، لیزولیت و سرپانتینیت می‌باشند. سنگ‌های مافیک با ترکیب گابرو، دیاباز و بازالت (گاهی دارای ساخت بالشی) از مهمترین واحدهای سازنده آمیزه افیولیتی جنوب بیرجند هستند. در منطقه رزق در حدفاصل روستاهای رزق تا کلاته سلیمان، رخنمون گسترده‌ای از پریدوتیت و گابرو همراه فیلیت و رگه‌هایی از لیستوینیت رخنمون دارد (شکل ۱-۱A). پریدوتیت‌ها در بسیاری جاها فرآیند سرپانتینی شدن را متحمل شده و رگچه‌های کریزوتیل و آربست تشکیل شده است که بافت مشبک را در سنگ ایجاد کرده است. گابروها دارای ساختار توده‌ای بوده (شکل ۱-۱B) و به رنگ سبز مایل به خاکستری مشاهده می‌شوند (شکل ۱-۱B و C). بافت آن‌ها اغلب دانه‌ای بوده و در برخی نفاط با ریزتر شدن اندازه دانه‌ها به میکروگابرو و دیاباز متمایل شده است. مرز بین پریدوتیت و گابرو اغلب به صورت تدریجی بوده اما گاهی مرز تند بین آن‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۱-۱C). گابروها در برخی نقاط رودنگیتی شده و به صورت عدسی‌های روشن رنگ (سفید مایل به سبز) رخنمون دارند. فلش‌های متعلق به کرتاسه فوقانی از دیگر واحدهای سنگی آمیزه رنگین جنوب بیرجند و منطقه مورد مطالعه هستند. این واحد عمدتاً از شیل‌های سبزرنگ، ماسه سنگ و فیلیت تشکیل شده است. در بعضی موارد، شیل‌ها شدیداً کربناتیزه می‌باشند. در منطقه رزق، فیلیت‌های سبز روشن در مجاورت گابرو و پریدوتیت قرار گرفته است (شکل ۱-۱A). لیستوینیت یکی دیگر از واحدهای سنگی است که در مناطق گسلی به صورت رگه‌ها و عدسی‌های نامنظم، رخنمون دارد. در منطقه مورد مطالعه، لیستوینیت به صورت رگه‌هایی با امتداد کلی شمال غرب-جنوب شرق تا شرقی-غربی با رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز و زرد در امتداد گسل‌ها و درون پریدوتیت مشاهده می‌شود (شکل ۱-۱A و D) که حاوی کانی‌های مختلف از جمله کربنات‌ها (کلسیت، دولومیت، منیزیت)، کوارتز، کلسدوئن، اوپال، تالک، کلریت، سرپانتین و برخی کانی‌های فلزی می‌باشد.



شکل ۱- تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی منطقه رزق؛ (A) نمای کلی از واحدهای سنگی منطقه (دید به شمال شرق)، (B) ساختار توده ای در گابرو (دید به جنوب غرب)، (C) مرز تند بین گابرو و پریدوتیت (دید به شمال غرب)، (D) وجود رگه لیستوینیت درون پریدوتیت (دید به شمال شرق).

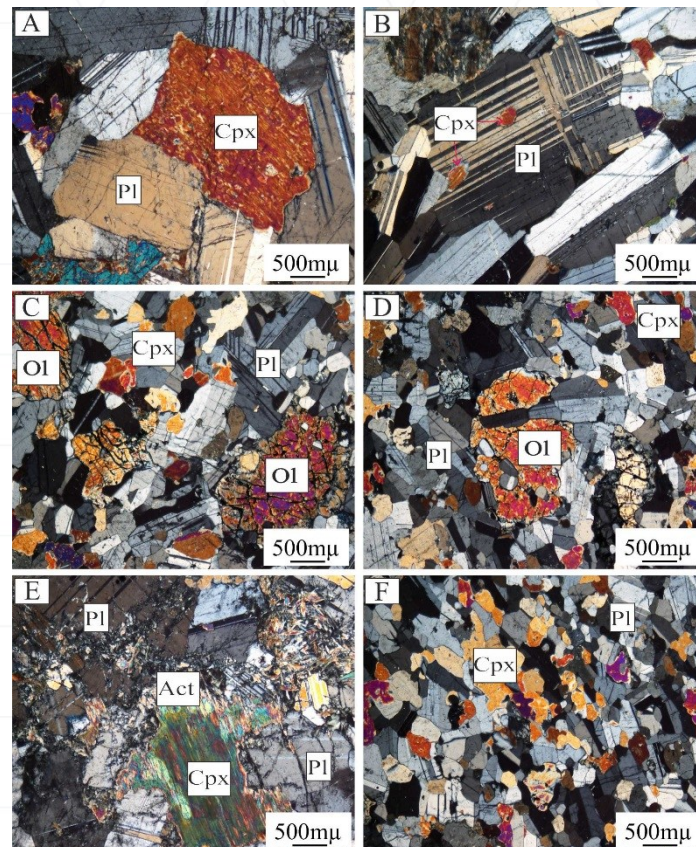
روش انجام پژوهش

برای انجام این پژوهش، طی پیمایش‌های صحرایی، از رخنمون‌های مناسب نمونه‌برداری انجام شد. سپس از نمونه‌های مناسب، مقطع نازک تهیه و مورد مطالعات سنگ‌نگاری قرار گرفت. به منظور بررسی شیمی کانی‌های پیروکسن و پلاژیوکلاز در گابرو، مقاطع نازک صیقلی تهیه و پس از انجام مراحل آماده‌سازی، در انستیتو علوم زمین آکادمی سینیکا در شهر تایپه کشور تایوان مورد مطالعه قرار گرفت. تجزیه ریزپردازشی الکترونی کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن توسط دستگاه مدل JEOL EPMA JXA-8900R مجهز به چهار طیف‌سنج با طول موج انتشاری، با شتاب دهنده‌ای با ولتاژ ۱۵ کیلوولت و جریان پرتوی ۱۲ نانوآمپر انجام شد. پس از آن، نمودارهای لازم با استفاده از نرم افزار Minpet ترسیم گردید.

سنگ‌نگاری

گابروهای منطقه رزق در رخنمون‌های صحرایی و نمونه دستی به صورت درشت بلور و با رنگ سبز مایل به خاکستری مشاهده می‌شوند. مطالعه سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که بافت غالب در گابرو بافت گرانولار است (شکل ۲-A). اما در برخی نمونه‌ها به دلیل وجود بلورهای ریز کلینوپیروکسن درون پلاژیوکلازها، بافت پوئیکلیتیک نیز مشاهده می‌شود (شکل ۲-B). کانی‌های سازنده گابرو شامل پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و الیون هستند. پلاژیوکلاز به صورت بلورهای درشت بی شکل تا نیمه شکل دار (شکل ۲-A و B) عموماً با ماکل پلی سنتتیک، حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. این کانی عموماً سالم بوده اما در برخی نمونه‌ها شواهدی از دگرسانی به سریسیت و اپیدوت نشان می‌دهد. بلورهای درشت کلینوپیروکسن به صورت بی‌شکل (شکل ۲-A)، حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. در برخی نمونه‌ها، الیون به صورت بلورهای بی‌شکل و دارای شکستگی فراوان به میزان حدود ۱۰ درصد وجود دارد (شکل ۲-C و D). درون برخی الیون‌ها،

ادخال‌هایی از پلاژیوکلاز به حالت پوئیکلیتیک دیده می‌شود (شکل ۲- D). برخی بلورهای پلاژیوکلاز به صورت متقاطع با الیوین رشد کرده‌اند (شکل ۲- D) که بیانگر تبلور همزمان آن‌ها می‌باشد. در برخی نقاط، به دلیل رخداد دگرسانی، پیروکسن‌ها به اکتینولیت تبدیل است که به صورت بلورهای رشته‌ای در کناره‌های پیروکسن وجود دارد (شکل ۲- E). به دلیل تشکیل کانی‌های دگرسانی مانند سیریسیت، اپیدوت و اکتینولیت، برخی نمونه‌ها را می‌توان متاگابرو نامید. در برخی قسمت‌ها کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، ریزبلور است که به میکروگابرو و دیاباز متمایل شده است (شکل ۲- F).



(شکل ۲- A) بافت دانه‌ای در گابرو، (B) حضور ادخال‌های پیروکسن درون پلاژیوکلاز، (C و D) حضور بلورهای الیوین در گابرو، (E) تبدیل پیروکسن به آمفیبول (اکتینولیت) و دگرسانی پلاژیوکلاز به سیریسیت و اپیدوت، (F) بافت ریزدانه در میکروگابرو. نور در شکل‌ها XPL است. علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از (Whitney and Evans, 2010).

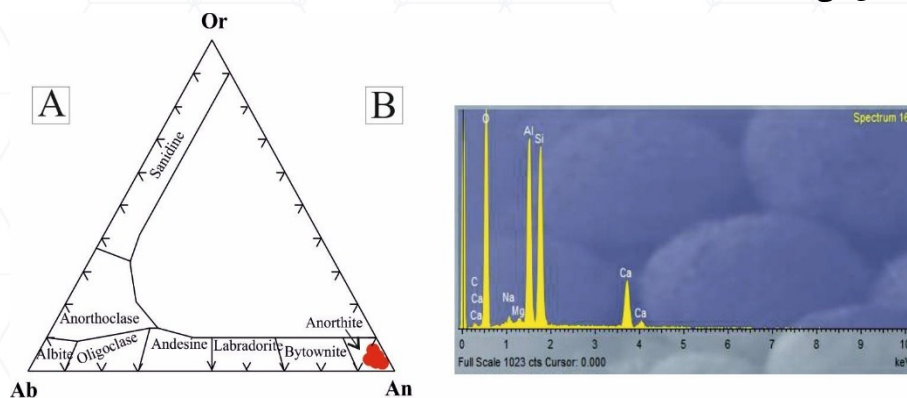
شیمی کانی‌ها

برای پی‌بردن به ترکیب شیمیایی کانی‌ها و شرایط انجماد ماگما، کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن در سنگ‌های گابرویی منطقه رزق مورد تجزیه ریزکاو الکترونی قرار گرفت.

شیمی پلاژیوکلاز

ترکیب پلاژیوکلاز در سنگ‌های گابرویی مورد مطالعه از نوع غنی از کلسیم می‌باشد به طوریکه گستره ترکیبی پلاژیوکلازها در گابروهای رزق بین $An_{93/07}$ ، $Ab_{66/78}$ تا $An_{90/48}$ ، $Ab_{9/29}$ تغییر نموده و از نوع آنورتیت هستند (شکل ۳- A). تصویر برگزیده از آنالیزهای کیفی انجام‌شده بر روی کانی پلاژیوکلاز به روش EDS در شکل ۳- B نشان داده شده است. همانگونه که

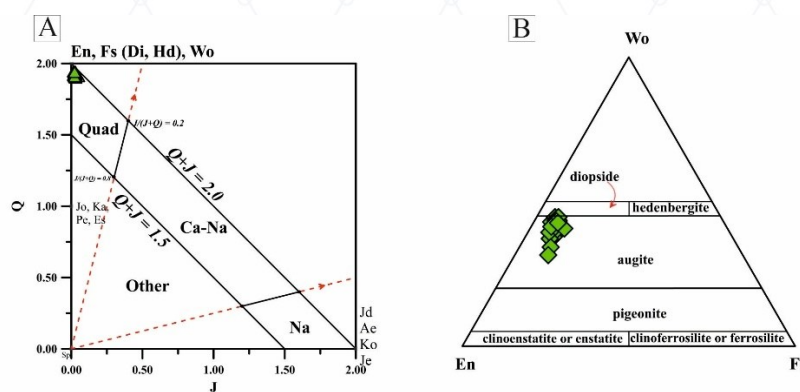
مشاهده می‌شود در ترکیب پلاژیوکلازهای بررسی شده، پیک Ca در مقایسه با Na ، از شدت بالایی برخوردار است که بیانگر ترکیب بازیک برای آن می‌باشد.



شکل ۳- (A) ترکیب پلاژیوکلازهای بررسی شده در نمودار تقسیم‌بندی فلدسپارها (Deer et al., 1991)، (B) تصویر برگزیده از آنالیزهای کیفی انجام‌شده به روش EDS در کانی پلاژیوکلاز.

شیمی پیروکسن

بر طبق نمودار Q-J پیروکسن‌ها به چهار گروه شامل پیروکسن‌های سدیک، پیروکسن‌های سدیک-کلسیک، پیروکسن‌های کلسیم - منیزیم- آهن‌دار (Quad) و پیروکسن‌های دیگر تقسیم می‌شوند (Morimoto et al., 1988; Morimoto et al., 1989). نمودار Q-J بر اساس دو شاخص $Q = Ca + Mg + Fe^{2+}$ و $J = 2Na$ معرفی شده است. ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های مورد مطالعه بر طبق این نمودار، در محدوده پیروکسن‌های کلسیم- منیزیم- آهن‌دار (Quad) قرار می‌گیرند (شکل ۵- A). برای شناسایی نوع پیروکسن، از نمودار مثلثی Wo-En-Fs (Morimoto et al., 1988) استفاده شد. در این نمودار، کینوپيروکسن‌های مورد مطالعه دارای ترکیب اوژیت هستند (شکل ۵- B).

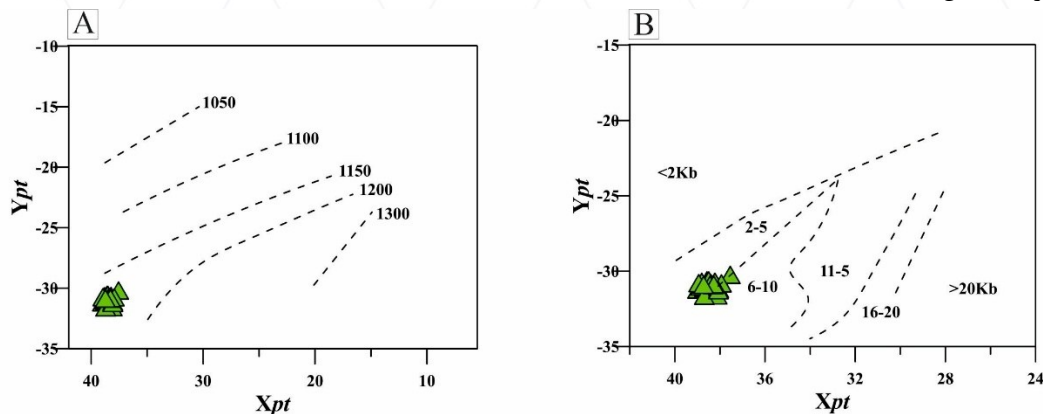


شکل ۵- (A) موقعیت کینوپيروکسن‌های گابرو رزق در نمودار Q-J (Morimoto et al., 1988; Morimoto et al., 1989)، (B) موقعیت کینوپيروکسن‌های گابرو رزق در نمودار نامگذاری پیروکسن‌ها (Morimoto et al., 1988).

دما-فشارسنجی

با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها می‌توان دما و فشار تشکیل سنگ‌های در بر دارنده آنها را تخمین زد. برای بررسی دمای تشکیل پیروکسن‌ها روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در یکی از روش‌ها، تخمین دما بر اساس محاسبه دو شاخص XPT و YPT با کمک داده‌های آنالیز نقطه‌ای انجام می‌شود (Soesoo, 1997). بر اساس این روش، دمای تشکیل کینوپيروکسن‌های مورد بررسی، ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد تعیین گردید (شکل ۶- A). ارزیابی فشار حاکم بر تشکیل

سنگ‌های دارای پیروکسن از روش‌های متعددی امکان‌پذیر است. در روش (Soesoo, 1997) که لازمه تخمین فشار با استفاده از تعیین دو شاخص XPT و YPT است، فشار محاسبه شده در زمان تبلور کلینوپيروكسن در گابروهای رزق، ۵ تا ۶ کیلو بار تعیین گردید (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲ تعیین دمای تبلور پیروکسن با استفاده از نمودار YPT در مقابل XPT (B) تعیین فشار تبلور پیروکسن در گابروهای رزق با استفاده از نمودار YPT در مقابل XPT (Soesoo, 1997).

نتیجه‌گیری

در حفاصل روستاهای رزق تا کلاته سلیمان در جنوب شرق بیرجند، رخنمون گسترده‌ای از پریدوتیت و گابرو همراه فیلیت و رگه‌هایی از لیستونیت رخنمون دارد. پریدوتیت‌ها در بسیاری جاها فرآیند سرپانتینی شدن را متحمل شده و رگچه‌های کریزوتیل و آزبست تشکیل شده است که بافت مشبک را در سنگ ایجاد کرده است. گابروها دارای ساختار توده‌ای بوده و به رنگ سبز مایل به خاکستری مشاهده می‌شوند. بافت آن‌ها اغلب دانه‌ای بوده و در برخی نفاط با ریزتر شدن اندازه دانه‌ها به میکروگابرو و دیاباز متمایل شده است. مرز بین پریدوتیت و گابرو اغلب به صورت تدریجی بوده اما گاهی مرز تند بین آن‌ها مشاهده می‌شود. گابروها در برخی نقاط رودنگیتی شده و به صورت عدسی‌های روشن رنگ (سفید مایل به سبز) رخنمون دارند. در برخی نقاط، به دلیل رخداد دگرسانی، پیروکسن‌ها به اکتینولیت تبدیل است که به صورت بلورهای رشته‌ای در کناره‌های پیروکسن وجود دارد. در برخی قسمت‌ها کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، ریزبلور است که به میکروگابرو و دیاباز متمایل شده است.

مراجع

اوهانیان، ت، طاطاوسی، ش، ۱۹۷۸، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند، ورقه ۷۸۵۵، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Angiboust, S., Agard, P., De Hoog, J.C.M., Omrani, J. and Plunder, A., 2013. Insights on deep, accretionary subduction processes from the Sistan ophiolitic "melange" (Eastern Iran). *Lithos*, 156–159:139–158.

Brocker, M., Fotoohi Rad, Gh.R., Burgess, R., Theunissen, S., Paderin, I., Rodionov, N. and Salimi, Z., 2013. New age constraints for the geodynamic evolution of the Sistan Suture Zone, eastern Iran. *Lithos*, 170–171:17–34.

Cheng, Zh., Guo, Zh., Dingwell, B., Li, X., Zhan, M., Liu, J., Zhao, W., and Lei, M. 2020 "Geochemistry and petrogenesis of the post-collisional high-K calc-alkaline magmatic rocks in Tengchong, SE Tibet", *Journal of Asian Earth Sciences* 193, 104309.

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1991. An introduction to the rock forming minerals. Longman Scientific and Technical, 528 P.

Johannes, W., 1978, Melting of plagioclase in the system Ab-An-H₂O at P H₂O = 5Kbar an equilibrium problem". *Contributions to Mineralogy and Petrology* 66, 295-303.

- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K., Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine* 52, 535-550.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K., Gottardi, G., 1989. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Journal* 14(5), 198-221.
- Morimoto, N., Fabrise, J., Ferguson, A., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Akoi, K.I., Gottardi, G. (1988) Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine* 52: 535 – 55.
- Putirka, K. D. 2008. "Thermometers and Barometers for Volcanic Systems", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 69, 61-120.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation PT estimations., *Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen)* 119, 55-60.
- Tirrul, R. ., Bell, L.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1): 134-150.
- Whitney, D., Evans, B., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y. and Lee, H.Y., 2012. Zircon U-Pb and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 154: 392-405.

مطالعه زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی بنتونیت منطقه اصقول (جنوب شرق بیرجند)

ملیحه نخعی^{۱*}، سید سعید محمدی^{۲،۳}

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده عمران، معدن و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- گروه پژوهشی علوم زمین، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

nakhaei@birjandut.ac.ir
ssmohammadi@birjand.ac.ir

چکیده

منطقه اصقول در جنوب بیرجند بخشی از آمیزه افیولیتی پهنه جوش خورده سیستان بوده و رخنمون‌هایی از سنگ‌های اولترامافیک، مافیک، آتشفشانی و نهشته‌های رسوبی نتوژن تا کواترنر را در بر می‌گیرد. سنگ‌های میزبان بنتونیت شامل دیوریت پورفیری و آندزیت هستند که شواهد گسترده‌ای از دگرسانی کربناتی نشان می‌دهند. نتایج کانی‌شناسی (XRD) بیانگر غالب بودن مونت‌موریونیت همراه با آلبیت و کوارتز در بنتونیت‌های منطقه است. شواهد صحرایی نظیر لایه‌بندی، چین‌خوردگی ملایم و وجود قطعات گردشده آندزیتی، منشأ نابرجا و رسوب‌گذاری در یک حوضه فعال زمین‌ساختی را تأیید می‌کند. داده‌های ژئوشیمیایی، قرارگیری نمونه‌ها در محدوده آندزیت تا داسیت و وابستگی به سری ماگمایی کالک‌آلکالین را نشان می‌دهند. الگوهای عناصر نادر خاکی و عناصر کمیاب بهنجار شده، غنی‌شدگی LREE و LILE و آنومالی منفی Nb و Ti را آشکار می‌سازند که نشان‌دهنده منشأ ماگمایی مرتبط با فروانش است. بنتونیت‌های اصقول حاصل دگرسانی سنگ‌های آتشفشانی حدواسط و تکامل‌یافته در شرایط رسوبی-هیدروترمال می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بنتونیت، مونت‌موریونیت، اصقول، پهنه جوش خورده سیستان

Geological, mineralogical, and geochemical study of the Osghool bentonite deposit (southeast of Birjand)

Malihe Nakhaei^{1*}, Seyyed Saeid Mohammadi^{2,3}

1- Department of mining engineering, Faculty of civil, mining and chemistry, Birjand university of technology, Birjand, Iran

2-Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

3-Earth Sciences Research Group, University of Birjand, Birjand, Iran

*nakhaei@birjandut.ac.ir
ssmohammadi@birjand.ac.ir

Abstract

The Osghool area in southeast Birjand is part of the ophiolitic mélange of the Sistan Suture Zone, exposing ultramafic, mafic, and volcanic rocks, along with Neogene to Quaternary sedimentary deposits. The bentonite-hosting rocks consist mainly of porphyritic diorite and andesite, which exhibit extensive carbonate alteration. Mineralogical analyses (XRD) indicate that montmorillonite is the dominant phase in the bentonites, accompanied by albite and quartz. Field observations, including bedding, mild folding, and the presence of well-rounded andesitic clasts, confirm the allochthonous nature of the deposits and their deposition in an active tectonic basin. Geochemical data classify the host rocks within the andesite-to-dacite range of the calc-alkaline magma series. Rare earth element (REE) patterns and normalized trace element data show LREE and LILE enrichment, along with negative Nb and Ti anomalies, indicating a subduction-related magmatic origin. Overall, the Osghool bentonites formed through hydrothermal alteration of intermediate volcanic rocks, reflecting the interplay of sedimentary-hydrothermal processes.

Keywords: Bentonite, Montmorillonite, Osghool, Sistan Suture Zone

مقدمه

منطقه اصقول در جنوب بیرجند بخشی از آمیزه افیولیتی پهنه جوش خورده سیستان است و رخنمون‌هایی از سنگ‌های اولترامافیک، مافیک، آتشفشانی و نهشته‌های رسوبی نئوژن تا کواترن را در بر می‌گیرد. منطقه مورد مطالعه در فاصله حدود ۴۴ کیلومتری جنوب شرق بیرجند و در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ بیرجند قرار داشته (اوهانیان و طاطاوسی، ۱۹۷۸) و در حوالی روستای اصقول گسترش یافته است. پهنه بنتونیتی اصقول در فاصله حدود یک کیلومتری جنوب غرب این روستا و در حاشیه جاده اصقول-گز واقع شده و بخش مرکزی آن دارای موقعیت جغرافیایی $32^{\circ}36'38''$ عرض جغرافیایی شمالی و $59^{\circ}32'19''$ طول جغرافیایی شرقی می‌باشد. این تنوع زمین‌شناسی و موقعیت تکنیکی ویژه، شرایط مناسبی را برای شکل‌گیری و تمرکز نهشته‌های رسی، به‌ویژه بنتونیت، فراهم آورده است. بنتونیت سنگی رسی با کانی غالب مونتوریونیت است که معمولاً در اثر دگرسانی سنگ‌های آتشفشانی، به‌ویژه خاکسترها و گدازه‌های حدواسط تا اسیدی، در محیط‌های رسوبی، دیاژنتیکی یا هیدروترمال تشکیل می‌شود (Grim and Güven, 1978; Murray, 2007). ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی بنتونیت‌ها به شدت تحت تأثیر ماهیت سنگ مادر، ترکیب سیال دگرسان‌کننده و شرایط زمین‌ساختی منطقه قرار دارد (Christidis and Huff, 2009). بنتونیت‌های منطقه اصقول پیش‌تر نیز به‌صورت محدود مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ به‌طوری‌که یک نمونه از این نهشته در سال ۱۳۸۶ توسط نخعی و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته با این حال، تاکنون بررسی جامعی که به‌طور هم‌زمان زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی بنتونیت‌های این منطقه را تحلیل نماید، ارائه نشده است. از این رو، هدف اصلی پژوهش حاضر، مطالعه جامع بنتونیت‌های منطقه اصقول و تبیین منشأ، شرایط تشکیل و ارتباط آن‌ها با ماگماتیسم قوسی و فرآیندهای تکنیکی شرق ایران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

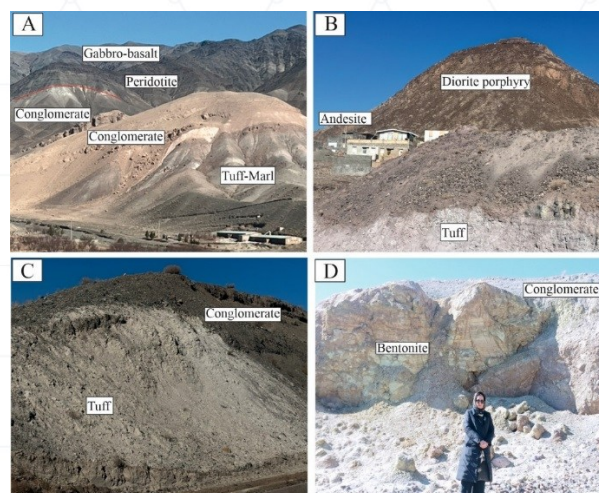
برای انجام این پژوهش، طی پیمایش‌های صحرایی، از رخنمون‌های مناسب سنگ‌های نیمه عمیق-آتشفشانی، نمونه‌برداری انجام شد. سپس از نمونه‌های مناسب، مقطع نازک تهیه و مورد مطالعات سنگ‌نگاری قرار گرفت. علاوه بر این، به منظور پی بردن به ترکیب کانی‌شناسی و زمین‌شیمی بنتونیت جنوب اصقول، دو نمونه مورد آنالیز کانی‌شناسی به روش XRD و چهار نمونه مورد آنالیز ژئوشیمی به روش‌های XRF و ICP-MS (برای عناصر اصلی و کمیاب) قرار گرفت.

بحث

زمین‌شناسی منطقه

منطقه اصقول بخشی از آمیزه افیولیتی جنوب بیرجند است که به شکل کلی کمانی دارای تحدب به سمت شمال شرق به پهنه جوش خورده سیستان (Tirrul et al., 1982) تعلق دارد. رخنمون‌های سنگی در جنوب بیرجند شامل واحدهای پوسته اقیانوسی و گوشته فوقانی همراه رسوبات پلاژیک، نهشته‌های رخساره فلیش، رخساره مولاس، سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ترشیری-کواترنری و نهشته‌های کواترنر هستند. قدیمی‌ترین واحد سنگی در منطقه اصقول، سنگ‌های اولترامافیک متعلق به کرتاسه بالایی بوده که به طور گسترده در شمال روستای اصقول رخنمون دارد. امتداد کلی این واحد شمال غرب-جنوب شرق بوده و عمدتاً از نوع هارزبورژیت است که با درجات مختلف، فرآیند سرپانتینی شدن را تحمل نموده است. در مناطق گسلی موجود در پریدوتیت‌های شمال اصقول، رگه‌های لیستونیت و منیزیت با امتداد تقریباً شرقی-غربی تشکیل شده است. از دیگر واحدهای مجموعه افیولیتی در منطقه مورد بررسی، می‌توان به حضور گابرو، دیاباز و بازالت اسپیلیتی اشاره نمود که به دلیل درهم آمیختگی این واحدها با واحدهای گوشته فوقانی، با عنوان آمیزه رنگین نامیده شده‌اند (شکل ۱- A). سنگ‌های آذرآواری جوانتر از افیولیت در اطراف روستای اصقول از گسترش قابل توجهی برخوردار است. این سنگ‌ها عمدتاً شامل توف و برش همراه مارن بوده و مستقیماً بر روی سنگ‌های آمیزه افیولیتی قرار دارند. این نهشته‌ها با گسترش وسیع در بخش‌های شمال غربی و غرب روستای اصقول مورفولوژی تپه‌ماهوری ایجاد کرده است. در بعضی جاها، عدسی‌هایی از آهک به رنگ خاکستری روشن در توف‌های نئوژن دیده می‌شود. سنگ‌های نیمه عمیق-آتشفشانی نئوژن در حوالی روستای اصقول گسترش نسبتاً وسیعی داشته و

از غرب روستا تا شمال روستای گز رخنمون دارند. این واحدها تشکیل دهنده ارتفاعات بوده و در مجاورت شمال روستای اصقول با نام های قله قلا (شکل ۱- B) و قله استاد حسن و در شمال شرق اصقول (به طرف روستای گز) با نام قله گز نامیده می شوند که بر روی توف ها قرار گرفته اند. بر اساس نقشه زمین شناسی بیرجند، این سنگ ها با نام پیروکسن آندزیت و آمفیبول آندزیت معرفی شده است، در حالیکه بر اساس مطالعات صحرایی و سنگ نگاری این پژوهش، مشخص گردید که به دلیل وجود بافت پورفیری با زمینه ریزدانه، بخش های مرکزی توده ها، ماهیت نیمه عمیق نشان داده و دیوریت پورفیری می باشد. در بخش های حاشیه ای دیوریت پورفیری کمر قلا در شمال غرب روستای اصقول، بافت سنگ کاملاً ریزدانه (میکرولیتی) بوده و دارای ترکیب کلی آندزیتی می باشد. به طور کلی، سنگ های نیمه عمیق و آتشفشانی مورد مطالعه، کم و بیش کربناتیزه شده اند. هیچگونه شواهد فسیلی مبنی بر تعلق این سنگ ها به نئوژن در دست نیست، اما بر اساس تعیین سن های انجام شده در لوت شمالی، سن البیگومیوسن را برای سنگ های معادل آنها تعیین نموده اند (اوهانیان و طاطاوسیان، ۱۹۷۸). از جمله واحدهای جوان در محدوده مورد مطالعه، کنگلومرا است که به علت تأثیر حرکات زمین ساختی، گسل خوردگی و چین خوردگی های ملایمی در آن ایجاد شده است. روند کلی کنگلومرا در شمال روستای اصقول شمال غرب-جنوب شرق و شیب لایه ها NE ۳۰ می باشد. در فاصله یک کیلومتری جنوب روستای اصقول و همچنین در شمال روستا، توالی توف و مارن در زیر واحد کنگلومرای قرار گرفته است (شکل های ۱- C و D). کنگلومرای مذکور حاوی قطعات مختلف از واحدهای آمیزه افیولیتی نظیر پریدوتیت، گابرو، بازالت، سنگ آهک، سنگهای نیمه عمیق-آتشفشانی و لیستونیت می باشد. پهنه بنتونیتی در جنوب روستای اصقول دارای لایه بندی بوده و کمی چین خوردگی نشان می دهد. وجود لایه بندی و همچنین قطعات نسبتاً گرد شده از سنگ های آذرین نیمه عمیق-آتشفشانی در بنتونیت، بیانگر حمل به حوضه رسوبی و نابرجا بودن آن است. وجود قطعات تقریباً درشت با جورشدگی کم، یک توالی درشت شونده به سمت بالا را نشان می دهد که بیانگر برخاستگی منطقه و پسروری آب دریا می باشد. واحدهای متعلق به کواترنر شامل تراس های قدیمی، رسوبات بادبزی و آبرفت های جدید هستند. منطقه اصقول تحت تأثیر گسل های دارای سازوکار راندگی با مؤلفه معکوس قرار دارد (محمدی، ۱۳۹۸) به طوریکه، در فاصله حدود ۲ کیلومتری شمال روستای اصقول، عملکرد گسل معکوس سبب رانده شدن واحدهای افیولیتی (پریدوتیت) بر روی کنگلومرای نئوژن شده است (شکل ۱- A).



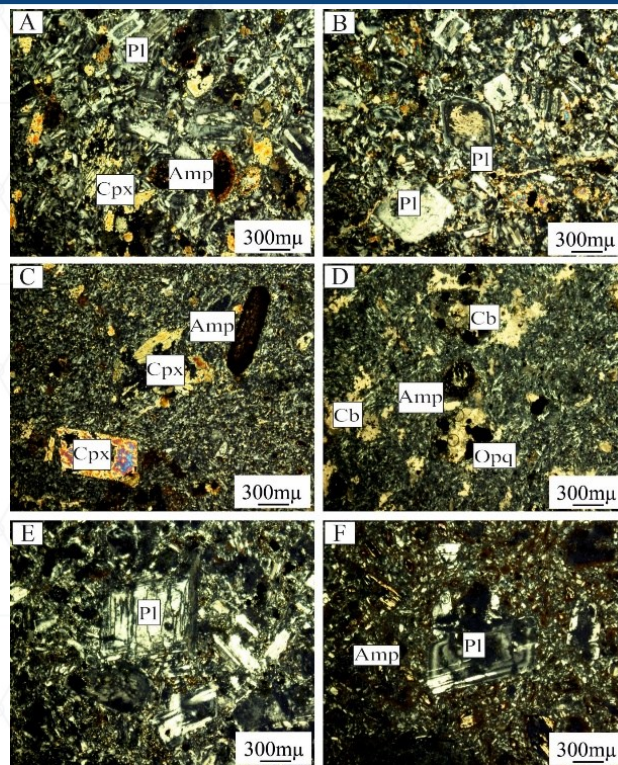
شکل ۱- تصاویری از واحدهای سنگی در محدوده مورد مطالعه (A) واحدهای آمیزه افیولیتی، توف-مارن و کنگلومرا (به راندگی پریدوتیت بر روی کنگلومرای نئوژن توجه شود) (دید به شمال شرق)؛ (B) نمایی از قله قلا در مجاورت شمال روستای اصقول متشکل از دیوریت پورفیری-آندزیت (دید به شمال شرق)؛ (C) کنگلومرا بر روی توف (دید به شمال غرب)؛ (D) قرارگیری کنگلومرا بر روی بنتونیت (دید به غرب).

سنگ‌نگاری

واحدهای سنگی مجاور پهنه بنتونیتی اصقول دارای ترکیب کلی حدواسط بوده و با توجه به بافت، شامل دیوریت پورفیری و آندزیت می باشند.

دیوریت پورفیری: بافت سنگ، پورفیری با زمینه ریزدانه می باشد (شکل ۲- A و B). فراوان‌ترین کانی تشکیل دهنده سنگ پلاژیوکلاز است که به صورت فنوکریست و در زمینه ریزدانه به میزان حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد وجود دارد. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز به صورت بلورهای بی شکل، نیمه شکل دار تا شکل دار و گاهی دارای منطقه بندی هستند (شکل ۲- B). ترکیب پلاژیوکلازها بر مبنای زاویه خاموشی، آندزین تا لابرادوریت می باشد. برخی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در بخش‌های مرکزی، دچار دگرسانی کربناتی شده اند (شکل ۲- B). حضور کربنات نشان دهنده غنی بودن سیال عامل دگرسانی از CO_2 می باشد. سیال از طریق کلیواژ یا شکستگی وارد سنگ شده و بخش مرکزی پلاژیوکلاز که غنی از انورتیت است را تحت تأثیر قرار می دهد. میزان CO_2 سیال باید حداقل ۲۵ درصد باشد واکنش بین سیال غنی از دی اکسید کربن با پلاژیوکلاز انجام شود (Leichmann et al., 2003). آمفیبول به صورت بلورهای نیمه شکل دار تا شکل دار (شکل ۲- A) حدود ۱۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. فنوکریست‌های آمفیبول (هورنبلند) اغلب به طور کامل دچار اکسیداسیون شده و فقط شکل منشوری کانی حفظ شده است (شکل ۲- A). کلینوپیروکسن از دیگر کانی‌های مافیک سنگ است که به صورت بلورهای نسبتاً ریز حدود ۵ تا ۱۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است (شکل ۲- A). بر اساس بافت و ترکیب کانی شناسی، این سنگ را می توان دیوریت پورفیری در نظر گرفت.

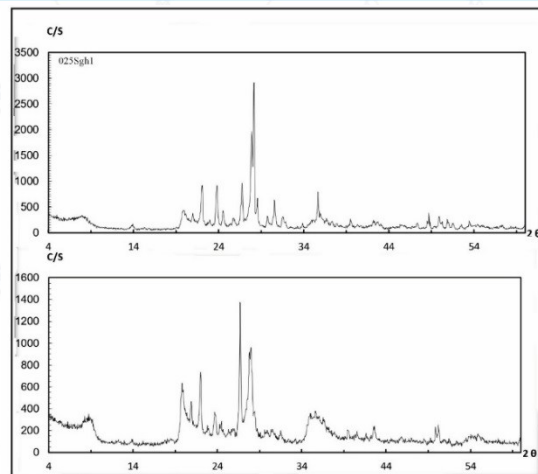
آندزیت: نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های حاشیه‌ای توده اصلی، دارای بافت پورفیری با زمینه میکروولیتی بوده و ماهیت آتشفشانی دارند (شکل ۲- C و D). قسمت عمده این سنگ را میکروولیت‌های پلاژیوکلاز همراه مقدار کمی فنوکریست با فراوانی حدود ۸۰ درصد تشکیل داده است. فنوکریست‌های نیمه شکل دار تا شکل دار آمفیبول که اغلب به طور کامل دچار اکسیداسیون شده و حالت کدر پیدا نموده است (شکل ۲- C)، حدود ۱۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. کلینوپیروکسن دیگر کانی مافیک سنگ است که به صورت فنوکریست‌های نیمه شکل دار تا شکل دار (شکل ۲- C) و بلورهای ریز در زمینه سنگ، حدود ۵ تا ۱۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. دگرسانی کربناتی در نمونه‌های آندزیتی نیز رایج است (شکل ۲- D). به اعتقاد (Robb, 2005)، این دگرسانی زمانی رخ می دهد که سیال با شوری کم و غنی از دی اکسید کربن با سنگ میزبان واکنش انجام دهد. کربناتی شده پلاژیوکلاز عموماً در محدوده دمایی پایین صورت می گیرد (Szeliga and Michalik, 2005). یکی از ویژگی‌های بنتونیت اصقول، وجود قطعات فراوان از سنگ‌های آتشفشانی به رنگ‌های روشن و قرمز است. این قطعات دارای گردشگی بالا هستند که بیانگر حمل از فاصله نسبتاً طولانی به حوضه رسوبی می باشد. مطالعه مقاطع نازک قطعات روشن و قرمز نشان داد که ترکیب کلی آن آندزیتی است، بطوریکه در هر دو نمونه، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در زمینه میکروولیتی قرار گرفته است (شکل ۲- E و F). بلورهای آمفیبول اکسید شده دیگر کانی تشکیل دهنده هر دو نوع قطعات است با این تفاوت که در نمونه قرمز رنگ، فراوانی آمفیبول اکسید شده بیشتر بوده و اکسید آهن در زمینه سنگ نیز پراکنده می باشد.



شکل ۲- ویژگی‌های میکروسکوپی سنگ‌های نیمه عمیق-آتشفشانی منطقه اصقول (A) بافت پورفیری با زمینه ریزدانه، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول اکسیدشده و پیروکسن؛ (B) فنوکریست پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی و کریستالیزه شده؛ (C) فنوکریست آمفیبول سوخته و پیروکسن در آندزیت؛ (D) دگرسانی کریستال در آندزیت؛ (E) فنوکریست پلاژیوکلاز در قطعات آندزیتی روشن رنگ موجود در بنتونیت؛ (F) فنوکریست پلاژیوکلاز و آمفیبول‌های اکسیدشده در قطعات آندزیتی قرمز رنگ موجود در بنتونیت. نور در شکل‌ها XPL است. علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از (Whitney and Evans, 2010).

کانی‌شناسی

نتایج مطالعه کانی‌شناسی به روش اشعه ایکس بر روی دو نمونه از بنتونیت اصقول در شکل ۳ نشان داده شده است. فازهای اصلی سازنده نمونه‌ها شامل مونتموریونیت، آلبیت و کوارتز و فازهای فرعی شامل آلکالی فلدسپار، کائولن و کریستوبالیت هستند. از آنجاییکه در ترکیب کانی‌شناسی این بنتونیت آلبیت وجود دارد، مقداری از درصد Na_2O مربوط به حضور این کانی بوده و بنا بر این، برای تعیین سدیک یا کلسیک بودن آن می‌بایست ابتدا درصد Na_2O مربوط به آلبیت را محاسبه و از مقدار Na_2O نمونه کسر تا درصد Na_2O مونتموریونیت بدست آید. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.



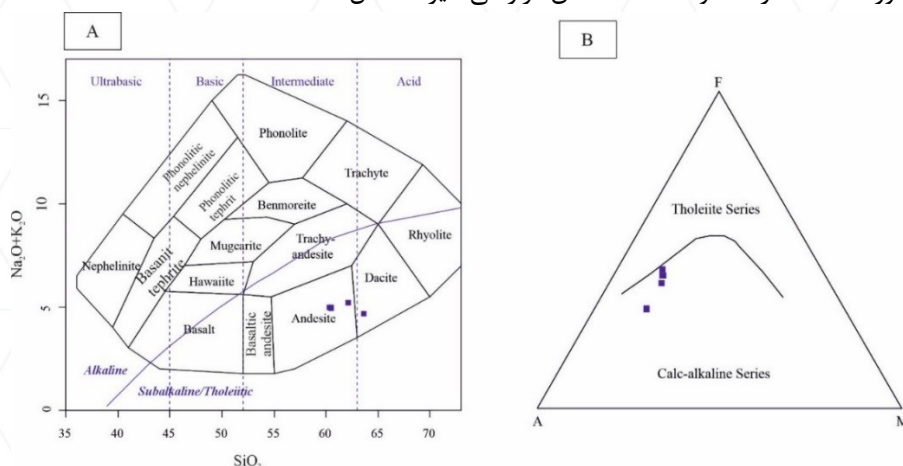
شکل ۳- نتایج مطالعه کانی‌شناسی به روش اشعه ایکس بر روی دو نمونه بنتونیت اصقول

جدول ۱- مشخصات کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت از مناطق مورد مطالعه.

منطقه	شماره نمونه	فاز اصلی	فاز فرعی	فاز کمیاب
اصقول	025Sgh1	آلبیت- مونت موریونیت- کوارتز	میکروکلین	-
اصقول	025Sgh3	مونت موریونیت، آلبیت- کوارتز	میکروکلین- کائولینیت- کریستوبالیت	-

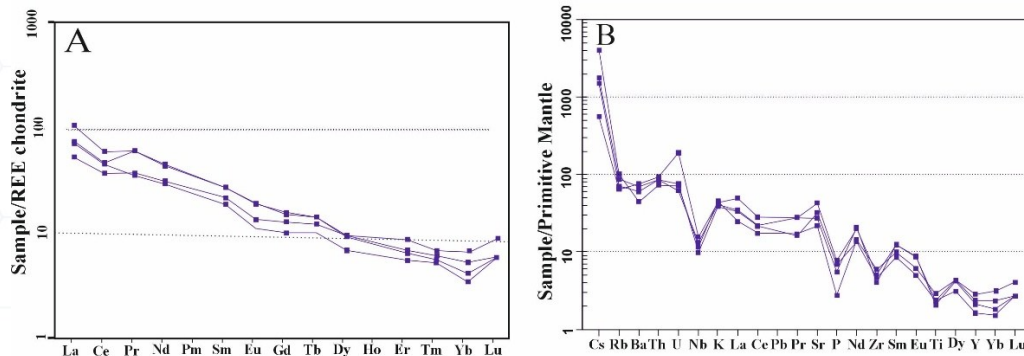
ژئوشیمی

برای نام‌گذاری نمونه‌های مورد مطالعه از نمودار SiO_2 در برابر مجموع آلکالینها (Cox et al., 1979) استفاده شد که بر اساس آن، نمونه‌ها در محدوده آندزیت تا داسیت قرار گرفته‌اند (شکل ۴- A). بر اساس نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971) تمام نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده کالک آلکان قرار می‌گیرند (شکل ۴- B).



شکل ۴- A) نمودار SiO_2 در برابر $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (Cox et al., 1979)، B) نمودار سه تایی FeO - MgO - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (Irvine and Baragar, 1971) جهت تفکیک سری کالک‌آلکان از سری تولیتیتی

نمودارهای عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (Boynton, 1984) و عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های بنتونیتی منطقه اصقول که به ترتیب در شکل‌های (A-5) و (B-5) نمایش داده شده است. به طور کلی، الگوی عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت و عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه در نمونه‌های بنتونیتی منطقه اصقول، بیانگر پراکندگی نسبتاً یکنواخت REE همراه با غنی‌شدگی محسوس عناصر سبک (LREE) نسبت به عناصر سنگین (HREE) است. این ویژگی‌ها، همراه با غنی‌شدگی عناصر بزرگ‌یون لیتوفیل (LILE) و بروز آنومالی منفی Nb و Ti مؤید منشأ ماگمایی مرتبط با محیط‌های فرورانشی یا قوس آتشفشانی است.



شکل ۵- A: نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (Boynton, 1984) و B: نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های بنتونیتی منطقه اصقول

نتیجه‌گیری

بنتونیت‌های منطقه اصقول عمدتاً در سنگهای دیوریت پورفیری و آندزیت حدواسط جای گرفته‌اند و مونتموریونیت کانی غالب آن‌هاست. شواهد میدانی، شامل لایه‌بندی، چین‌خوردگی ملایم و قطعات آندزیتی گردشده، نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در یک حوضه فعال زمین‌ساختی و منشأ نابرجا این نهشته‌ها است. داده‌های ژئوشیمیایی و الگوهای عناصر نادر خاکی نیز ویژگی‌های ماگمایی مرتبط با فرورانش را تأیید می‌کنند. در کل، بنتونیت‌های اصقول محصول دگرسانی هیدروترمال سنگ‌های آتشفشانی حدواسط بوده و فرآیندهای زمین‌ساختی و ماگمایی منطقه نقش مهمی در شکل‌گیری آن‌ها داشته است.

مراجع

۱. اوهانیان، ت، طاطاوسی‌ان، ش، ۱۹۷۸، نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ بزرجند، ورقه ۷۸۵۵، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۲. محمدی، م، ۱۳۹۸، بررسی شواهد ریخت زمین ساختی در پیشانی جنوبی رشته کوه باقران (جنوب بزرجند)، خاور ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بزرجند، ۹۶ صفحه.
۳. نخعی، م، رسا، ا، وثوقی عابدینی، م، محمدی، س.س، ۱۳۸۶، نتایج مقدماتی پی جویی بنتونیت در منطقه جنوب بزرجند (بنتونیت‌های اصقول، زادنبه، شهرستانک و نوکاج)، پانزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

4. Boynton, W.V., 1984. *Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies*. In: Peltier, W.R. (Ed.), *Meteorites and the Early Solar System*, University of Arizona Press, Tucson, pp. 63–114.
5. Christidis, G.E., Huff, W.D., 2009. Geological aspects and genesis of bentonites. *Applied Clay Science* 45, 1–7.
6. Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. George Allen and Unwin, London.

7. Grim, R.E., Güven, N., 1978. *Bentonites: Geology, Mineralogy, Properties and Uses*. Elsevier, Amsterdam.
8. Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 523–548
9. Leichmann, J., Broska, I. and Zachovalova, K., (2003), Low-grade metamorphic alteration of feldspar minerals :a CL study , *journal of petrology* , Vol 15, No. 2.p: 104–108
10. Murray, H.H., 2007. *Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskite–Sepiolite, and Common Clays*. Elsevier, Amsterdam.
11. Robb, L., 2005. *Introduction to Ore-Forming Processes*. 3rd Edition. Blackwell Publishing, Oxford.
12. Sun, S.-S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London Special Publication* 42, 313–345
13. Szeliga, T., Michalik, I., 2005. Carbonate alteration in andesites: petrological and geochemical constraints. *Lithos* 82, 55–73.
14. Tirrul, R. , Bell, L.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1): 134-150.
15. Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187.