

مطالعات زمین‌شناسی، دورسنجی، کانی‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی منطقه اکتشافی نخیلاب (جنوب شرق ایران)

عبدالرحیم باقری^۱، سیداحمد مظاهری^{۲*} و آزاده ملک‌زاده شفارودی^۳

۱- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲ و ۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

نویسنده مسئول: Samazaheri2016@gmail.com *

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۶

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۳

چکیده

منطقه نخیلاب (نخیله) در جنوب شرق ایران و در فاصله ۱۴۵ کیلومتری شمال غرب زاهدان قرار دارد که از نظر سنگ‌شناسی واحدهای رسوبی زون فلیش شرق ایران و سنگ‌های آذرین نفوذی و خروجی را شامل می‌شود. همه واحدهای سنگ‌شناسی موجود در این محدوده تحت تأثیر حرکات برشی دو گسل نصرت‌آباد و کهورک قرار گرفته که سبب ایجاد ساختارهای کششی در محدوده شده و احتمالاً موجبات تسهیل جایگیری توده‌های نفوذی شده‌اند. مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی کانی‌شناسی نشان داد که فراوان‌ترین واحد سنگ‌شناسی محدوده از نوع هورنبلند دیوریت پورفیری می‌باشد. فراوان‌ترین کانی‌های اصلی آن، پلاژیوکلاز نیمه شکل‌دار (۶۰-۷۵ درصد)، هورنبلند (۱۰-۵ درصد)، بیوتیت (۵-۳ درصد)، کوارتز و کلینوپیروکسن (حدود ۵ درصد) هستند. کانه‌های مهم کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت و پیریت در مطالعات مقاطع صیقلی دیده می‌شوند که در توالی پاراژنز، کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت در مراحل اولیه (هیپوژن) و کانی‌های بورنیت، کالکوسیت و کوولیت کانی‌های ثانویه و متعلق به مرحله سوپرژن هستند. مطالعات دورسنجی بیانگر وجود دگرسانی‌های آرژلیک، پروپلیتیک، فیلیک و اکسیدهای آهن می‌باشد. بررسی‌های سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی نشان داد که سنگ‌های آذرین در محدوده گابرو تا گرانودیوریت و ترکیب شیمیایی سنگ‌های آذرین در محدوده سنگ‌های بازیک، متوسط تا اسیدی است که عمدتاً به ترتیب فراوانی از نوع دیوریت، آندزیت، گرانودیوریت و گابرو هستند. مقدار غنی‌سازی LREE نسبت به HREE آشکارتر است، همچنین نتایج تفسیر نمودارهای تعیین محیط تکتونیکی نیز نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های محدوده مورد مطالعه در محیط قوس حاشیه قاره‌ای پس از تصادم قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: نخیلاب، دورسنجی، دگرسانی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی

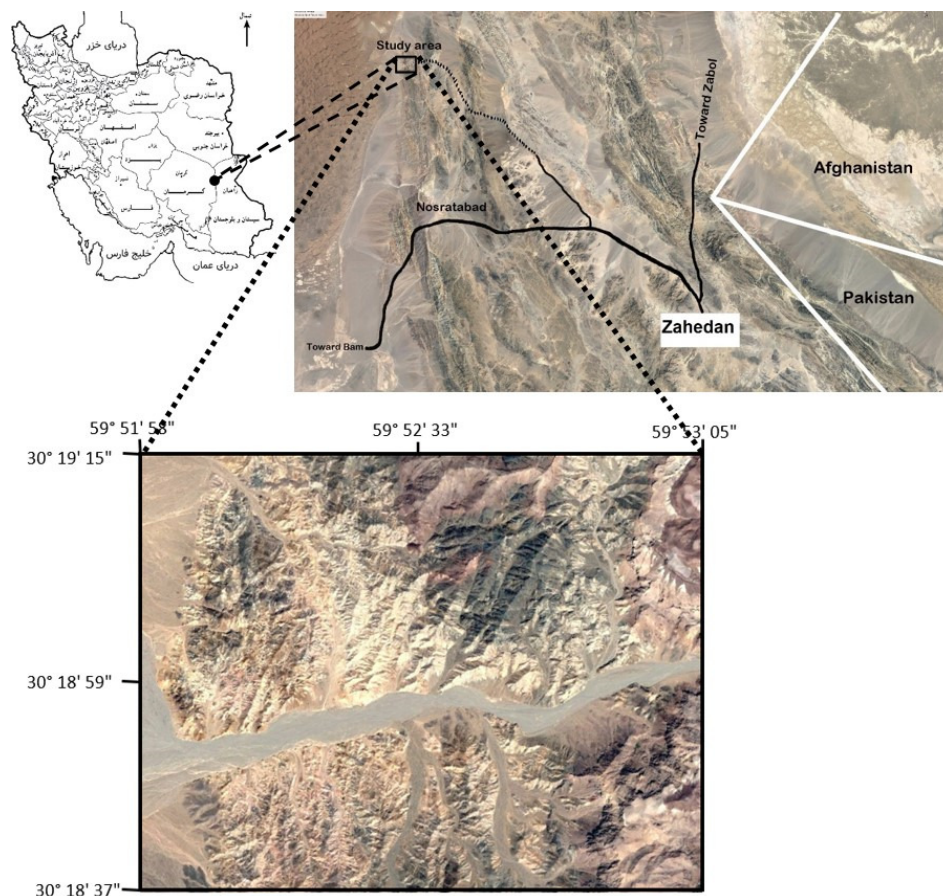
۱- پیشگفتار

محدوده نخیلاب (نخیله) در جنوب شرق ایران، در استان سیستان و بلوچستان و با فاصله ۱۴۵ کیلومتری شمال غرب شهر زاهدان و در موقعیت جغرافیایی $30^{\circ} 18' 37''$ تا $30^{\circ} 19' 15''$ عرض شمالی و $59^{\circ} 51' 58''$ تا $59^{\circ} 53' 05''$ طول شرقی واقع شده است. (شکل ۱). محدوده نخیله از نظر زمین‌ساختی با توجه به تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی- ساختاری عمده ایران (آقاناتی، ۱۳۸۳) در مرز بین زون فلیش شرق ایران و بلوک لوت قرار می‌گیرد. از آنجایی که گسل کهورک (انشعاب جنوب غربی پایانه جنوبی گسل نهبندان) واحدهای سنگ‌شناسی غرب محدوده را به یکباره از بلوک لوت جدا می‌کند، به نظر می‌رسد این محدوده بخشی از زون فلیش شرق ایران باشد. در سالیان اخیر مطالعات اکتشافی زیادی بر روی انواع

کانسارهای اپی‌ترمال و پورفیری در شرق بلوک لوت و خصوصاً در شمال محدوده نخیله صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به مناطق چاه‌شلجمی (ارجمندزاده و همکاران، ۱۳۹۰)، ماهرآباد و خوپیک (ملک‌زاده شفارودی و همکاران، ۱۳۹۳) اشاره کرد. مطالعات پتروژنی و سن‌سنجی ماهرآباد و خوپیک که در شمال محدوده مورد مطالعه انجام شده می‌تواند راهنمای اکتشافی مفیدی برای این منطقه محسوب شود. محدوده کانی‌زایی نخیلاب چون از لحاظ تکتونیکی در محل زون فروورانش بلوک لوت در غرب و بلوک افغان در شرق قرار گرفته و همچنین به دلیل قرار گرفتن در بین دو گسل امتداد لغز نصرت‌آباد (انشعاب جنوب شرقی پایانه جنوبی گسل نهبندان) و کهورک و حرکات جنبشی این دو گسل، کنترل ساختاری شده است (باقری فر و همکاران، ۱۴۰۰). مطالعات کانی‌شناسی و

اقتصادی این پژوهش سعی دارد تا با بهره‌گیری از یافته‌های نوین زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دورسنجی، دگرسانی و ژئوشیمی به اکتشاف بهتر و دقیق‌تر این کانسار کمک شود. قبل از این، مطالعات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای از سوی سازمان زمین‌شناسی و دانشگاه سیستان و بلوچستان در این محدوده انجام شده است (هدایتی و همکاران، ۱۳۹۳؛ یآوری و همکاران، ۱۳۹۲).

پetroگرافی نشان از وجود سنگ‌های آذرین پورفیری دیوریتی و کوارتز دیوریتی در محدوده نخیله می‌باشد. از آنجایی که این محدوده براساس شواهد و مطالعات اولیه و وجود انواع دگرسانی‌های آرژیلیک، پروپلیتیک، سرسیتی و گوسن‌های غنی از کانی‌زایی مس و وجود آنومالی‌هایی از کانی‌زایی طلا، می‌تواند در گروه کانسارهای مس پورفیری قرار گیرد، بنابراین با استفاده از دانش زمین‌شناسی



شکل ۱. راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه

Fig. 1. Access roads to study area

سنگی سالم و کمتر دگرسان شده جهت تعیین اکسیدهای اصلی با روش XRF با حد تشخیص ۰/۵ تا ۰/۰۵ درصد وزنی و عناصر فرعی و ناچیز با روش ICP-MS توسط شرکت آنالیز مواد معدنی زراژما با حد تشخیص برای عناصر کمیاب بین ۰/۰۱ ppm تا ۱ ppm مورد تجزیه قرار گرفت. آنالیز نمونه‌های انتخابی از واحدهای دگرسان شده جهت تفکیک و شناسایی کانی‌های رسی به روش XRD در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی واحد تبریز انجام شد.

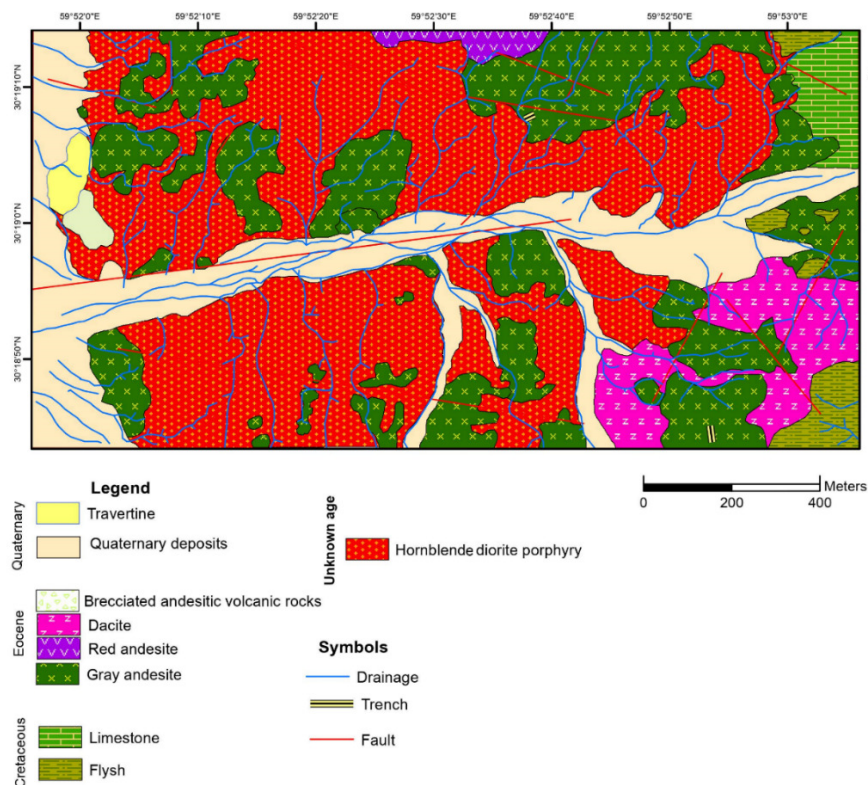
۲- روش مطالعه

با انجام دقیق عملیات صحرایی و تفکیک واحدهای سنگی و بررسی‌های میکروسکوپی و پتروگرافی سنگ‌های آذرین با حداقل دگرسانی، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ از محدوده تهیه شد (شکل ۲). با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER و LANDSAT و نرم‌افزارهای ویژه پردازش نظیر ENVI 4.5 Win و به کمک تکنیک‌های RGB و SAM تفکیک لیتولوژی‌ها و آلتراسیون‌های موجود در محدوده انجام گرفت. همچنین نمونه‌های مناسب از واحدهای

۳- بحث و بررسی

سامانه گسلی نصرت‌آباد و کهورک زمین‌های پست بلوک‌لوت و افغانستان و رشته کوه‌های شرق ایران را قطع می‌کند (والکر و همکاران، ۲۰۰۶). حرکات برشی و امتداد لغز این دو گسل احتمالاً سبب ایجاد محیط تکتونیکی با ساختارهای کششی در محدوده نخيله شده که احتمالاً به دنبال آن رگه‌های پیریتی نیز در امتداد برخی از این ساختارها جهت‌گیری شده‌اند. واحدهای رسوبی فلیش و

سنگ‌آهک‌های کرتاسه قدیمی‌ترین واحدهای زمین‌شناسی محدوده بوده که عمدتاً در نواحی شرقی متمرکز هستند. واحدهای گسترده آندزیتی سبز و قرمز و همچنین نفوذی‌های تونالیتی به سن ائوسن درون واحدهای رسوبی جای گرفته‌اند. جدیدترین واحدهای آذرین محدوده، توده‌های نفوذی دیوریتی هستند که واحدهای آندزیتی را تحت تأثیر قرار داده‌اند (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ محدوده نخيله (باقری‌فر و همکاران، ۱۳۹۸)
Fig. 2. The 1:20000 geological map of Nakhileh area (Baghrifar et al., 2018)

است و یک مرز تدریجی بین این دو نوع سنگ وجود دارد. پس زمینه بیشتر از بلورهای پلاژیوکلاز تشکیل شده و بلورهای درشت بیشتر پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت هستند. پیریت‌های ریز در برخی از نمونه‌های سالم و دگرسان نشده وجود دارند. کانی‌های تشکیل‌دهنده شامل بلورهای بزرگ تا نیمه‌شکل‌دار پلاژیوکلاز (۶۵-۷۵٪) هورنبلند (۵-۱۰٪)، بیوتیت و کلینوپروکسن (حدود ۵-۱۰٪) و کوارتز (حدود ۵٪) هستند. در برخی از نمونه‌ها، ترکیب سنگ نزدیک به کوارتز دیوریت است. حداکثر اندازه فنوکریست‌ها ۰/۵ میلی‌متر است. پیریت

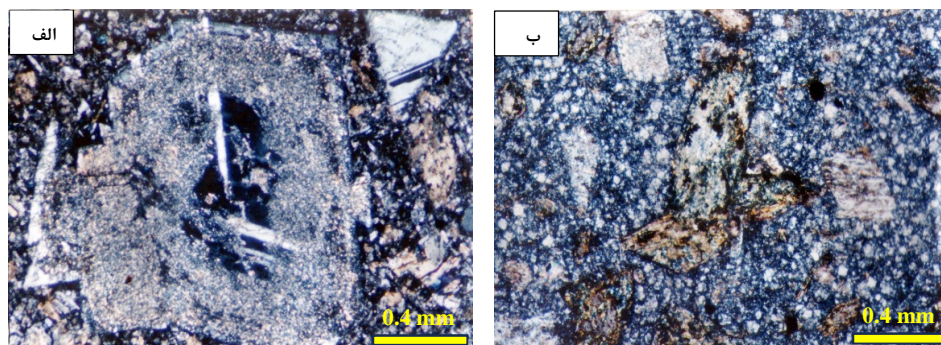
سنگ‌شناسی گسترده و غالب در محدوده، دیوریت پورفیری است. رنگ دیوریت پورفیری در نمونه‌های دستی از خاکستری روشن تا خاکستری تیره متفاوت است. مناطقی که تحت تأثیر آلتراسیون قرار گرفته‌اند، به رنگ خاکستری روشن و مناطق سالم به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند. نمونه‌هایی که دارای پس زمینه بلوری درشت‌تر و دارای حجم بیشتری از بلورهای درشت‌تر هستند، به نام دیوریت پورفیری، با همان نوع کانی‌شناسی با اندازه‌های ریزتر آندزیت‌ها هستند. تشخیص آندزیت‌ها از معادل‌های نفوذی که دارای بافت پورفیری هستند، گاهی اوقات دشوار

و کلریت، و پلاژیوکلازها به سرسیت و کلسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۴). بسیاری از پلاژیوکلازها در مقاطع دیوریتی دارای ماکل، خوردگی و منطقه‌بندی هستند که افزایش نرخ صعود ماگما و کاهش ناگهانی فشار و اختلاط فیزیکی ناقص در سطح پوسته‌های کم عمق باعث ایجاد چنین تغییراتی در ویژگی‌های بافتی پلاژیوکلاز، از جمله خوردگی و منطقه‌بندی می‌شود (فیلیپ و همکاران، ۲۰۰۷) (شکل ۵ ب).

کانی تیره غالب در اکثر دیوریت‌ها بوده که در نمونه‌های دستی و مقاطع میکروسکوپی به عنوان دانه‌های ریز پراکنده دیده می‌شود (شکل‌های ۳ الف و ۵ الف). در مناطقی که آندزیت‌ها در آن حضور دارند، وجود لکه‌های بزرگ اپیدوت باعث ایجاد رنگ سبز در آن محدوده شده است (شکل ۳ ب). مطالعات میکروسکوپی و میدانی نشان می‌دهد که بخش بزرگی از این سنگ‌شناسی در محدوده به شدت دگرسان شده است. فنوکریست‌های آهن و منیزیم‌دار بیوتیت، آمفیبول و پیروکسن عمدتاً به اپیدوت



شکل ۳. الف) ذرات ریز و پراکنده Py درون دیوریت و ب) لکه‌های بزرگ اپیدوت درون آندزیت‌های سبز.
Fig. 3. A) Fine and scattered Py particles inside the diorite. B) Large patches of epidote within green andesites.

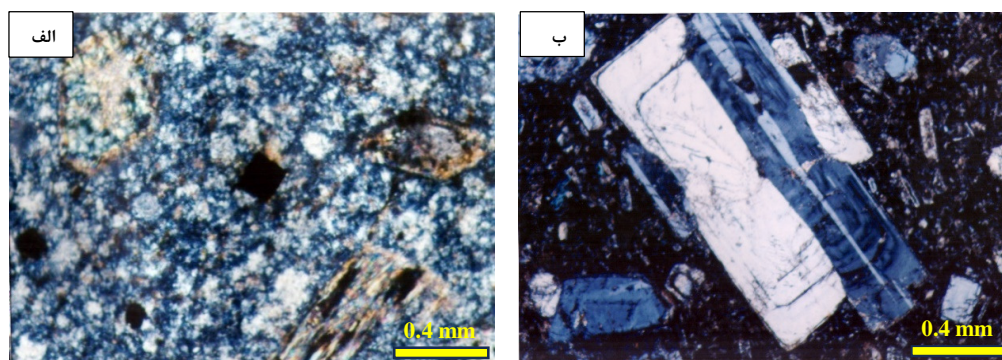


شکل ۴. الف) تبدیل پلاژیوکلازها به سرسیت و کلسیت و ب) تبدیل فرومنیزین‌ها به اپیدوت و کلریت
Fig. 4. A) Transformation of plagioclase into sericite and calcite. B) Conversion of ferromagnesian minerals to epidote and chlorite.

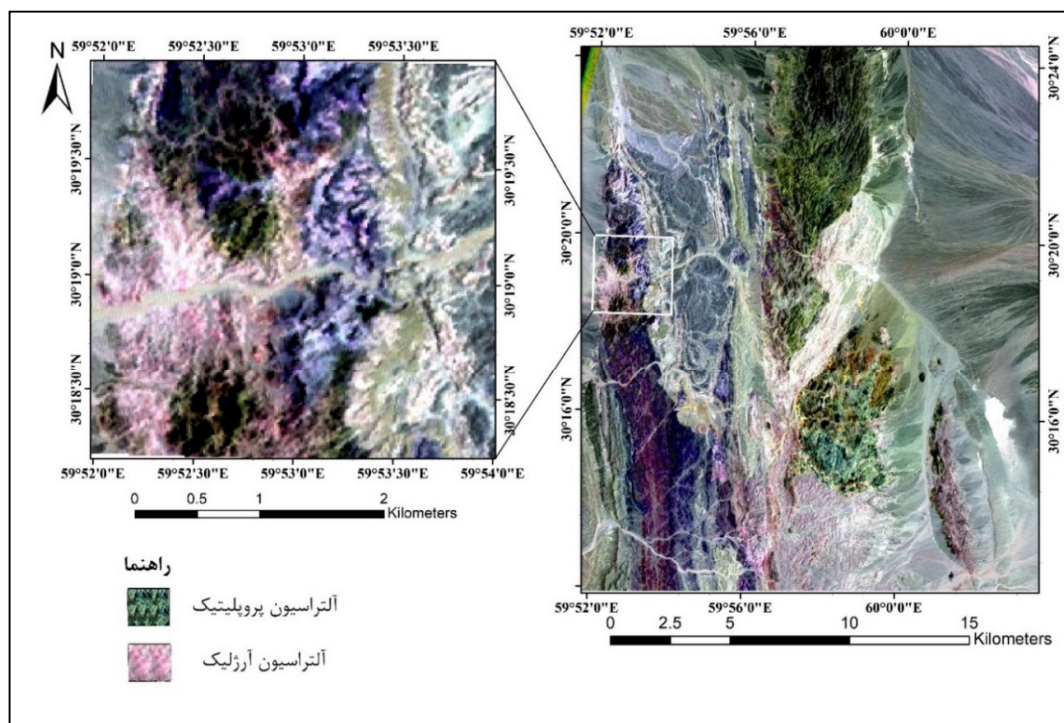
موسکویت در باند ۴ نسبت به باندهای ۶ و ۸ بازتابندگی بالاتری دارند (فرانسیسکو و همکاران، ۲۰۱۸). لذا به منظور مشاهده مناطق دگرسان در این محدوده، ابتدا از ترکیب باندی RGB=468 استفاده شد. در این ترکیب باندی، کانی‌های مربوط به زون پروپلتیک در بخش بالا و پایین محدوده به رنگ سبز تیره و روشن و کانی‌های مربوط به زون آرژیلیکی به رنگ صورتی در بخش مرکزی محدوده و کربنات‌ها به رنگ زرد تا قهوه‌ای مشاهده می‌گردند (شکل ۶).

۳-۱- دورسنجی

بر اساس تحلیل‌های تجربی و مطالعات قبلی برای مشاهده مناطق دگرسان شده، ترکیب باندی RGB = 4, 6, 8 یکی از مناسب‌ترین ترکیب‌های رنگی برای شناسایی مناطق دگرسانی در اغلب کانسارها به ویژه مس پورفیری و طلایابی‌ترمال می‌باشد. با استفاده از باندهای ۶ و ۸ می‌توان کانی‌های آلومینیوم‌دار مانند کانی‌های ایلیت، کائولینیت، آلونیت و یا مسکویت - سرسیت را از کانی‌هایی مانند کلریت، اپیدوت و یا کربنات تشخیص داد (جان‌سی و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین کانی‌های آلونیت، کائولینیت و



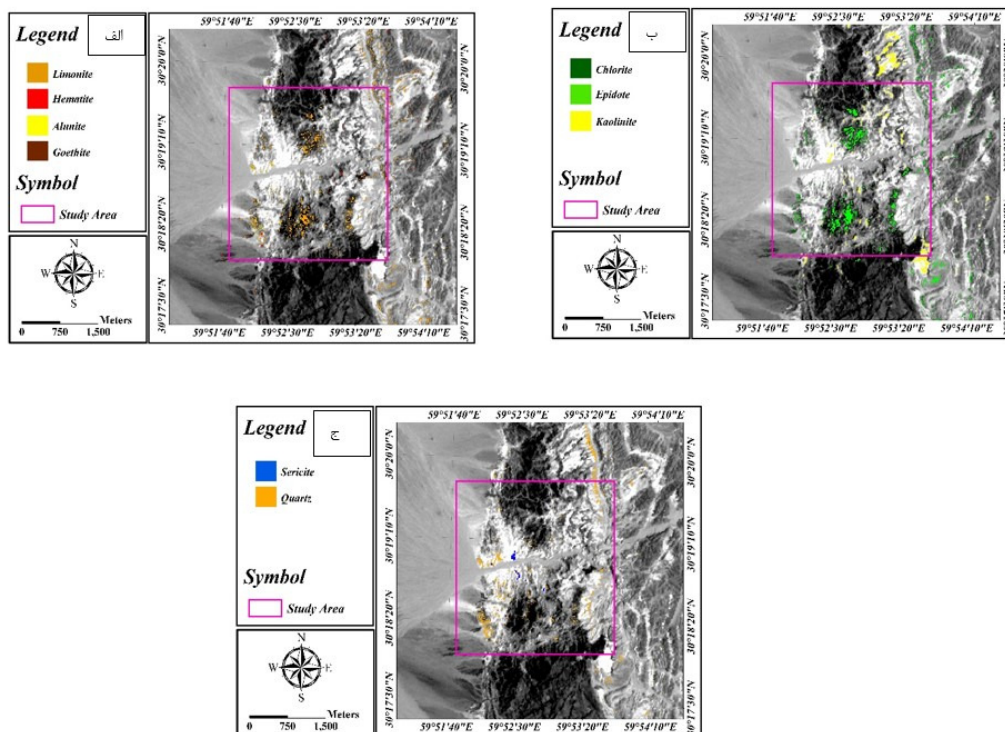
شکل ۵. الف) ذرات ریز و پراکنده Py درون دیوریت‌ها و ب) محدوده‌بندی پلاژیوکلازها در دیوریت‌ها
Fig. 5. A) Fine and scattered Py particles inside the diorites. B) Zoning of plagioclase in diorites.



شکل ۶. RGB: 468، برای تفکیک دگرسانی پروپلیتیک و آرژیلیکی محدوده در تصاویر استر
Fig. 6. RGB: 468, for propylitic and argillic alterations separation at ASTER images.

قابلیت تفکیک و شناسایی بهتری دارند. همچنین با اعمال روش SAM بر روی داده‌های سنجنده ASTER مناطق دارای آلتراسیون‌های فیلیک، پروپلیتیک و آرژیلیک بخوبی آشکارسازی می‌شوند. از روش پهنه‌بندی زاویه طیفی برای کانی‌های شاخص دگرسانی فیلیک (سرستی) و کانی‌های شاخص پروپلیتیک (اپیدوت، کلریت و کلسیت) و کانی‌های شاخص آرژیلیکی (کائولینیتی) از کتابخانه طیفی USGS استفاده شده‌است (شکل ۷).

از روش (SAM) جهت شناسایی دقیق نوع و محل کانی‌ها، گسترش و شدت دگرسانی با تفکیک زون‌های مختلف استفاده می‌شود (کروز و همکاران، ۱۹۹۳). داده‌های سنجنش از دور فراطیفی بهترین ابزار و داده‌های چند طیفی یکی از بهترین ابزارها برای نقشه‌برداری از سنگ‌های دگرسان شده هستند (پنگ‌یی و همکاران، ۲۰۲۱). با اعمال روش‌های نقشه‌برداری زاویه طیفی بر روی داده‌های سنجنده OLI به دلیل بالابودن تعداد باندهای VNIR نسبت به سنجنده ASTER مناطق دارای اکسیدهای آهن



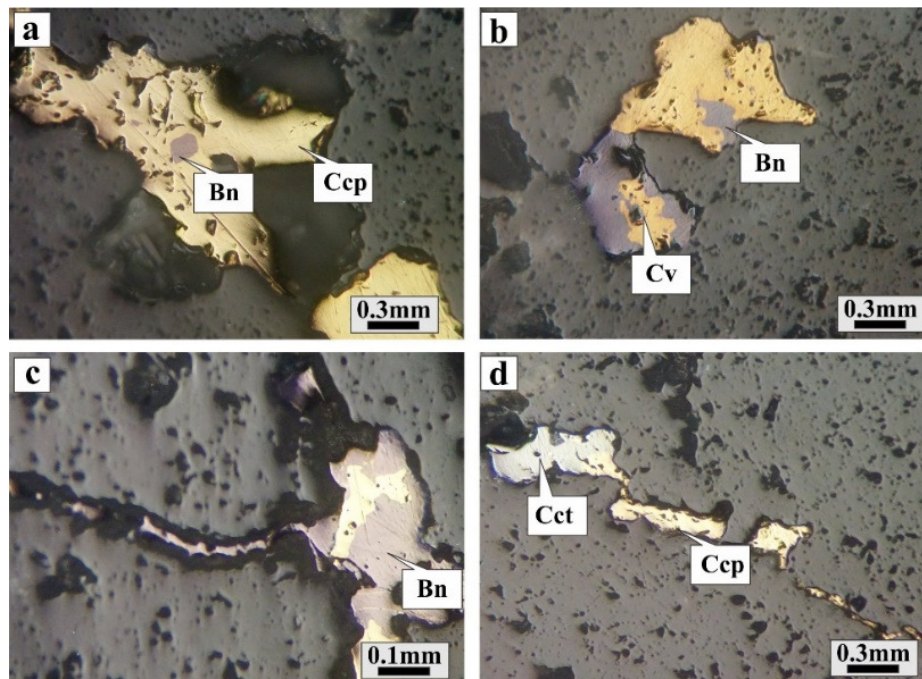
شکل ۷. الف) گسترش اکسیدهای آهن؛ ب) گسترش پروپلیتیکی و ج) گسترش فیلیک

Fig. 7. A) Spread of iron oxides. B) Propylitic spread. C) Phyllic spread.

۲-۳- کانی‌سازی

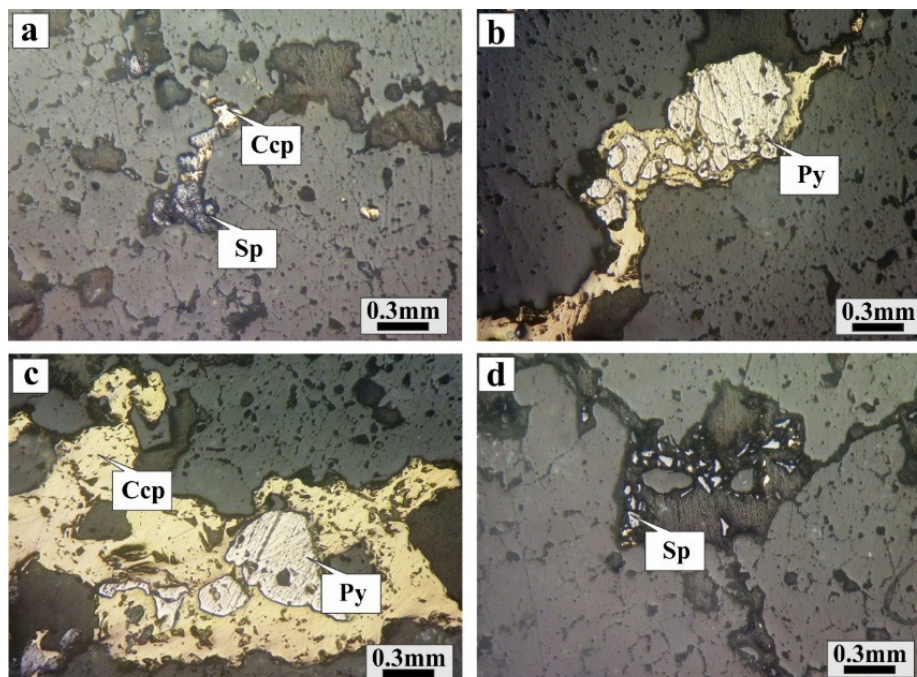
دارند. اندازه آن‌ها بین ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌متر متغیر است. نوع کانی‌سازی بورنیت نیز بصورت پراکنده و رگچه‌ای دیده می‌شود. ضخامت رگچه‌های بورنیتی حدود ۰/۱ میلی‌متر برآورد می‌شود. کانی اسفالریت به صورت پراکنده درون رگچه‌های سیلیسی دیده می‌شود و فراوانی در حدود ۲ درصد دارد. اندازه این کانی بین ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر متغیر است. درصد تبدیل کالکوپیریت به بورنیت از ۰ تا ۳۰ درصد در مقاطع متغیر است. همچنین درصد تغییرات بورنیت به کوولیت بین ۰ تا ۱۰ درصد برآورد می‌شود. کالکوسیت در اکثر مقاطع دیده نمی‌شود و در مقاطعی هم که وجود دارد فراوانی در حدود کمتر از ۲ درصد را به خود اختصاص می‌دهد. اندازه این کانی در حدود ۰/۳ میلی‌متر (میانگین) بوده و از دگرسانی بخشی کانی کالکوپیریت ایجاد شده است. پیریت با فراوانی حدود ۵ تا ۱۰ درصد و اندازه‌های بین ۰/۱ تا ۵ میلی‌متر و به صورت پراکنده در مقاطع دیده می‌شود. در توالی پاراژنز، کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت در مراحل اولیه (هیپوژن) و کانی‌های بورنیت، کالکوسیت و کوولیت از کانی‌های ثانویه و مرحله سوپرژن می‌باشند (شکل‌های ۸ و ۹).

کانی‌سازی عمدتاً در واحدهای دیوریتی و آندزیتی و به دو صورت پراکنده و رگچه‌ای دیده می‌شود. در نمونه‌های مورد مطالعه کانی‌هایی مثل پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت بصورت کانی اولیه و کانی‌هایی نظیر بورنیت، کالکوسیت و کوولیت بصورت کانی‌های ثانویه وجود دارند. پیریت‌ها با ظاهر گردشده و حالت‌های تجزیه شده دیده می‌شوند که بیانگر تقدم تشکیل آن نسبت به سایر کانی‌ها می‌باشد. بر همین اساس کالکوپیریت‌ها در مراحل بعدی و نهایتاً اسفالریت‌ها تشکیل شده‌اند. کوارتزهای خاکستری در اکثر مقاطع وجود دارند. کالکوپیریت کانی سولفیدی غالب در اکثر مقاطع است و فراوانی در حدود ۵ تا ۱۰ درصد دارد. اندازه این کانی بین ۰/۱ تا ۳ میلی‌متر و میانگین حدود ۰/۵ میلی‌متر متغیر است. این کانی به دو صورت پراکنده و رگچه‌ای وجود دارد و ضخامت رگچه‌های آن در حدود ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر برآورد می‌شود. کالکوپیریت‌ها در برخی مقاطع به علت فرآیندهای دگرسانی و جانشینی‌های ثانویه به کالکوسیت و بورنیت تبدیل شده است. بورنیت‌ها هم در ادامه این فرآیند به کوولیت تبدیل شده‌اند. بورنیت‌ها با رنگ بنفش مایل به صورتی، فراوانی در حدود ۲ تا ۵ درصد



شکل ۸. a) کالکوپیریت (Ccp) و بورنیت (Bn). b) بورنیت (Bn) و بورنیت (Bn) و دگرسانی آن به کوولیت (Cv). c) بورنیت (Bn). d) کالکوپیریت رگچه‌ای (Ccp) و کالکوسیت (Cct) که از دگرسانی کالکوپیریت بوجود آمده است (بر اساس ویتنی و اوانس، ۲۰۱۰).

Fig. 8. a) Chalcopyrite (Ccp) and Bornite (Bn). b) Bornite (Bn) and its transformation to Covellite (Cv). c) bornite (Bn). d) Veinlet chalcopyrite (Ccp) and chalcocite (Cct) formed from chalcopyrite alteration (based on Whitney and Evans, 2010).



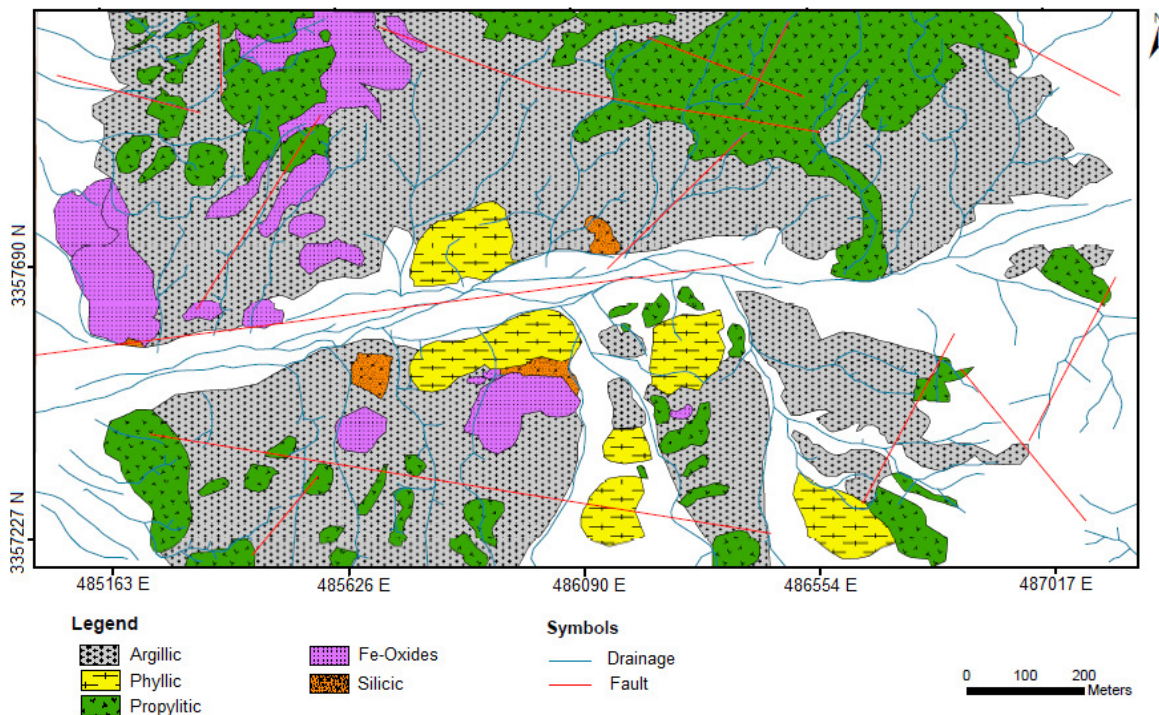
شکل ۹. a) کالکوپیریت (Ccp) و اسفالریت (Sp). b) پیریت (Py). c) پیریت بی‌شکل (Py) درون کالکوپیریت (Ccp). d) اسفالریت (Sp). (بر اساس ویتنی و اوانس، ۲۰۱۰).

Fig. 9. a) Chalcopyrite (Ccp) and sphalerite (Sp). b) Pyrite (Py). c) Amorphous pyrite (Py) within chalcopyrite (Ccp). d) sphalerite (Sp). (based on Whitney and Evans, 2010).

۳-۳- دگرسانی

بر اساس بررسی‌های میدانی و مطالعات آزمایشگاهی و نرم‌افزاری، دگرسانی آرژیلیک و پروپلیتیک گسترده‌ترین آلتراسیون‌های موجود در محدوده مورد مطالعه هستند. پس از آن به لحاظ وسعت، آلتراسیون فیلیک قرار دارد. همچنین به میزان بسیار کمتر اکسیدهای آهن و سیلیسی شدن نیز بصورت پراکنده دیده می‌شوند (شکل ۱۰). آلتراسیون آرژیلیکی واحدهای هورنبلند دیوریت پورفیری

و کوارتز دیوریت پورفیری را تحت تأثیر قرار داده است. در برخی از مناطق خصوصاً در مرکز و غرب پیریت‌های موجود در این واحدها به علت تأثیر عوامل اکسیداسیون، به اکسیدهای آهن نظیر هماتیت، گوتیت و جاروسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۱۱). همچنین در مناطقی که تحت تأثیر آلتراسیون فیلیک قرار گرفته‌اند به علت انحلال کانی‌های سولفیدی، آثار و قالب‌های باقی‌مانده آن‌ها در سطح سنگ بخوبی دیده می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۰. نقشه گستردگی آلتراسیون‌های محدوده نخيله (باقری‌فر و همکاران، ۱۴۰۰)
Fig. 10. The alterations spread map of nakhileh area (Bagherifar et al. 2021)



شکل ۱۱. آثار از جاروسیت و حفرات انحلالی باقی‌مانده از انحلال کانی‌های سولفیدی
Fig. 11. Traces of jarosite and dissolution pores that are left from the dissolution of sulfide minerals

فیلیک دما پایین می‌باشند. در نمونه‌های دیوریت پورفیری دگرسان شده که احتمالاً متعلق به شدت متوسط تا بالای زون فیلیک می‌باشند به علت پیشرفت فرآیندهای آلتراسیون تشخیص بین مرز دیوریت‌ها و آندزیت‌ها دشوار شده است.

۳-۴- ژئوشیمی عناصر اصلی و کمیاب

۲۵ نمونه از سنگ‌های سالم و غیرآلتره برای اندازه‌گیری عناصر اصلی توسط XRF انتخاب شدند. با توجه به تحلیل نتایج ژئوشیمیایی عناصر اصلی، محتوای SiO_2 سنگ‌های نفوذی از ۴۷/۰۵ تا ۷۴/۵۶ درصد وزنی متغیر است. K_2O از ۰/۵۳ تا ۵/۱۵ درصد وزنی متغیر است و نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ بین ۰/۱۹ و ۱/۳۹ است (جدول ۱).

نتایج آنالیزهای XRD از این سنگ‌ها نشان داد که مهم‌ترین کانی‌های رسی تشکیل شده در این دگرسانی عمدتاً از نوع کائولینیت، مونتموریلونیت، ایلیت، پیروفیلیت و مقدار کمتری پالیکورسکیت است. آلتراسیون پروپلیتیکی با حضور کانی‌های شاخص کلریت و اپیدوت‌های بزرگ، منطبق بر واحدهای آندزیتی سبز رنگ دیده می‌شود. حضور اپیدوت و کلریت در سنگ‌های آلتره شده بیانگر دمایی حدود ۲۲۰ تا ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد است (دورا و همکاران، ۲۰۱۵). این واحدها و آلتراسیون پروپلیتیکی مربوط به آن‌ها در این محدوده فاقد کانی‌سازی مهم و ارزشمند می‌باشد. عمده کانی‌زایی‌ها در زون فیلیک مشاهده می‌شود. در نمونه‌های سالم دیوریت پورفیری، کانی‌های سولفیدی به کانی‌های ثانویه (خصوصاً گوتیت) تبدیل نشده‌اند و احتمالاً متعلق به زون استوک‌ورک و یا

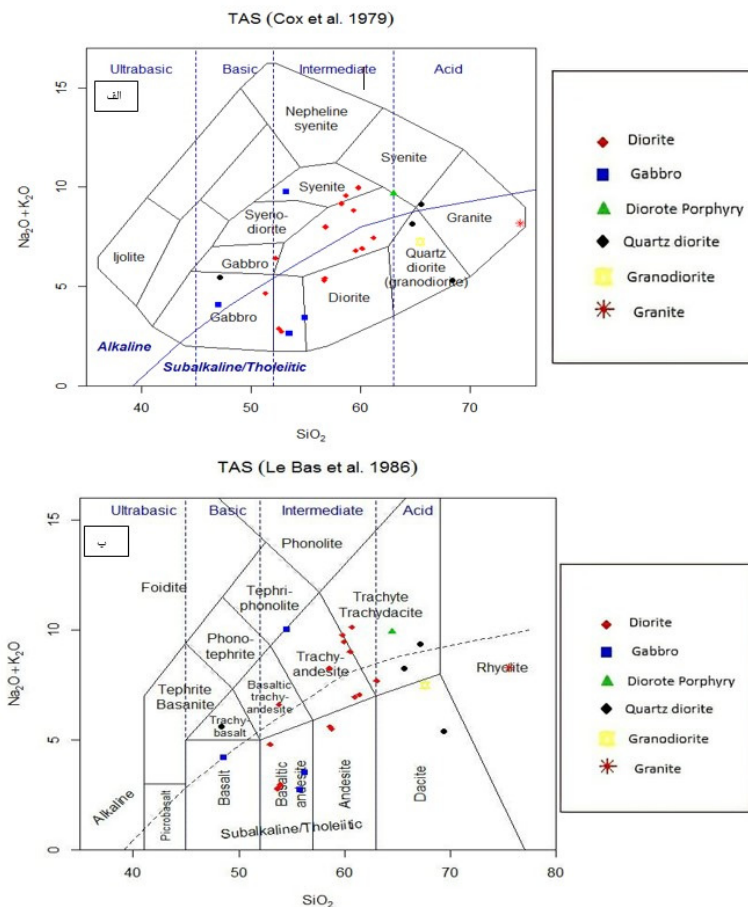
جدول ۱. نتایج آنالیز XRF ۲۵ نمونه از سنگ‌های سالم و غیرآلتره

Table 1. Results of XRF analysis from 25 samples of fresh and non-altered rocks

Sample	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	$^*\text{Fe}_2\text{O}_3$	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	SO_3	Cr_2O_3	LOI	TOTAL	$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$
NKH-1	64.72	17.13	0.8	5.22	0.19	1.56	0.7	3.57	4.57	0.17	0.2	0.01	1.12	99.96	0.78
NKH-2	58.25	18.21	0.72	8.63	0.1	1.13	0.58	3.46	5.72	0.32	0.13	0.01	2.66	99.92	0.6
NKH-3	53.22	17.92	0.55	13.83	0.03	1.55	0.31	3.2	6.57	0.36	0.11	0.01	2.21	99.87	0.48
NKH-4	59.35	17.44	0.85	9.84	0.04	1.12	0.34	5.15	3.68	0.21	0.05	0.01	1.78	99.86	1.39
NKH-5	62.98	17.12	0.55	5.21	0.01	1.75	0.17	2.35	7.33	0.18	0.05	0.01	2.16	99.87	0.32
NKH-6	56.83	17.2	0.55	9.45	0.05	2.17	2.53	3.29	4.71	0.2	0.11	0.01	2.7	99.8	0.69
NKH-7	52.24	19.45	0.64	7.72	0.19	6.94	3.25	1.62	4.79	0.25	0.05	0.01	2.82	99.97	0.33
NKH-8	68.35	12.31	0.23	8.89	0.46	2.27	0.58	1.52	3.77	0.09	0.45	0.01	1	99.93	0.4
NKH-9	65.54	14.72	0.46	3.51	0.05	2.64	1.45	4.83	4.31	0.11	0.15	0.01	2.15	99.93	1.12
NKH-10	47.2	17.29	0.89	11.31	0.24	7.66	7.42	1.12	4.34	0.18	0.05	0.01	2.27	99.98	0.25
NKH-11	61.19	16.51	0.39	4.6	0.13	4.55	1.99	2.51	4.95	0.22	0.05	0.01	2.76	99.86	0.5
NKH-12	65.42	15.5	0.34	2.94	0.08	3.64	1.44	1.82	5.43	0.16	0.95	0.01	3.11	100.8	0.33
NKH-13	74.56	12.62	0.32	1.95	0.02	0.67	0.3	3.11	5.07	0.05	0.09	0.01	1.07	99.84	0.61
NKH-14	52.79	14.47	0.74	10.05	0.18	8.79	8.42	0.53	2.2	0.16	0.24	0.05	1.52	100.1	0.24
NKH-15	47.05	18.47	0.95	9.18	0.18	10.43	6.4	1.02	3.05	0.16	0.05	0.01	2.93	99.88	0.33
NKH-16	51.34	17.14	0.88	8.99	0.17	8.71	4.82	1.18	3.46	0.22	0.05	0.01	2.93	99.9	0.34
NKH-17	54.92	15.98	0.78	9.16	0.18	8.45	4.58	1.08	2.34	0.23	0.05	0.01	2.19	99.95	0.46
NKH-18	53.5	16.21	0.75	9.34	0.21	8.52	4.57	0.53	2.08	0.21	0.11	0.01	3.98	100	0.25
NKH-19	59.55	16.26	0.56	6.62	0.07	4.36	3.26	2.93	3.86	0.22	0.09	0.01	2.19	99.98	0.75
NKH-20	56.74	15.63	0.68	7.1	0.18	7.25	3.61	1.56	3.85	0.19	0.13	0.01	2.85	99.78	0.4
NKH-21	59.8	18.44	0.52	4.51	0.09	2.87	2.03	1.62	8.36	0.29	0.05	0.01	1.36	99.95	0.19
NKH-22	52.56	16.99	0.76	9.64	0.21	8.91	5.34	0.65	2.23	0.17	0.05	0.01	2.31	99.83	0.29
NKH-23	60.15	16.71	0.5	5.54	0.14	5.22	2.51	2.36	4.55	0.23	0.05	0.01	1.97	99.94	0.51
NKH-24	58.68	18.48	0.52	4.93	0.1	3.16	2.31	1.84	7.75	0.3	0.09	0.01	1.8	99.97	0.23
NKH-25	56.7	15.65	0.68	6.9	0.18	7.2	3.65	1.52	3.78	0.19	0.13	0.101	2.8	99.48	0.4

قلیایی-سیلیس (لی‌بس و همکاران، ۱۹۸۶) (TAS)، در محدوده بازالت تا ریولیت قرار دارند (شکل ۱۲ ب). بنابراین ترکیب شیمیایی سنگ‌های آذرین، در محدوده‌ی سنگ‌های بازیک، متوسط تا اسیدی است که به ترتیب فراوانی از نوع دیوریت، آندزیت، گرانودیوریت و گابرو هستند (شکل ۱۲ الف و ب).

نمودار طبقه‌بندی قلیایی سیلیس کل (کاکس و همکاران، ۱۹۷۹) (TAS) برای دسته‌بندی سنگ‌های آذرین استفاده می‌شود. سنگ‌های آذرین نفوذی در محدوده مورد مطالعه دارای محدوده ترکیب شیمیایی گابرو، دیوریت، سینیت تا گرانودیوریت هستند (شکل ۱۲ الف). با توجه به ترکیب شیمیایی نمونه سنگ‌های آذرین خروجی که عمدتاً از سنگ‌های سالم انتخاب شده بودند و نمودار طبقه‌بندی کل



شکل ۱۲. الف) موقعیت سنگ‌های نفوذی محدوده نخيله در طبقه‌بندی کاکس و همکاران، ۱۹۷۹ و ب) موقعیت سنگ‌های خروجی محدوده در طبقه‌بندی لی‌باس و همکاران، ۱۹۸۶.

Fig. 12. A) The position of the intrusive rocks of Nakhileh area in the classification of Cox et al, 1979, B) The position of the extrusive rocks of Nakhileh area in the classification of Le Bas et al, 1986

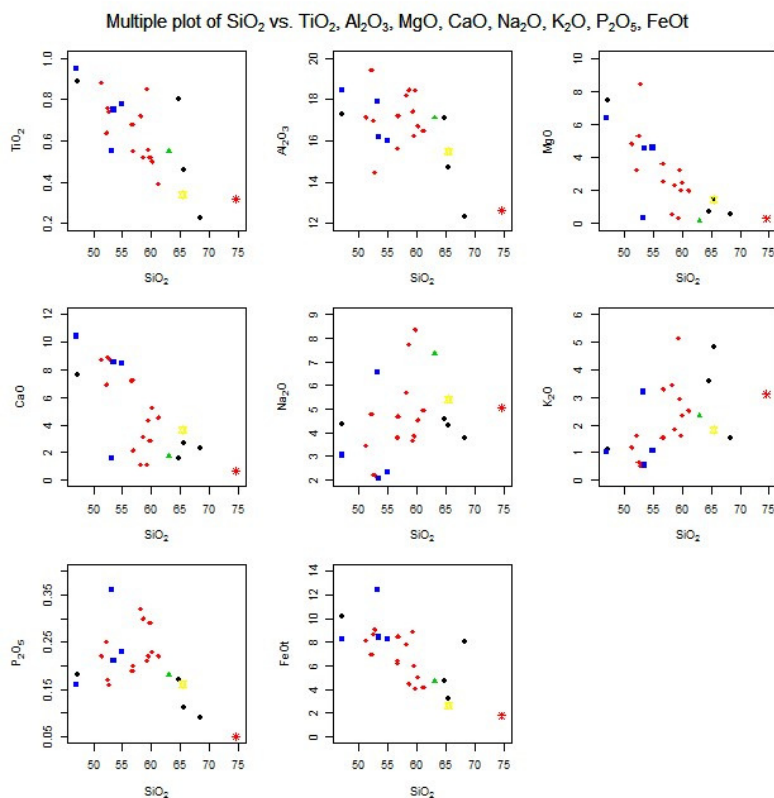
تبلور است (ویلسون و همکاران، ۱۹۸۹). بنا بر این روش، با نزدیک شدن به مراحل نهایی تمایز، پلاژیوکلازهای غنی از سدیم و هورنبلند و بیوتیت ظاهر می‌شوند. کاهش مقدار MgO در مقابل افزایش SiO₂ به دلیل تشکیل کانی‌های حاوی منیزیم مانند اولیوین و پیروکسن در ابتدای فرآیند تبلور است (موراتا و همکاران، ۲۰۰۳).

الگوهای REE در بیشتر سنگ‌های آذرین محدوده نخیلاب تقریباً مشابه است و الگوی متفاوت برخی از عناصر ممکن است به دلیل اشتباه در تحلیل یا اثر دگرسانی باشد. عناصر REE در تمام نمونه‌ها در مقایسه با مقادیر آن‌ها در ترکیب کندریت‌ها غنی‌سازی را نشان می‌دهد و میزان غنی‌سازی LREE نسبت به HREE آشکارتر است (شکل ۱۴ الف و ب). این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که سنگ‌های آذرین به مناطق فرورانش تعلق دارند (مک‌دونا و همکاران، ۱۹۹۷). طیفی از الگوهای REE توزیع نرمال شده با کندریت را

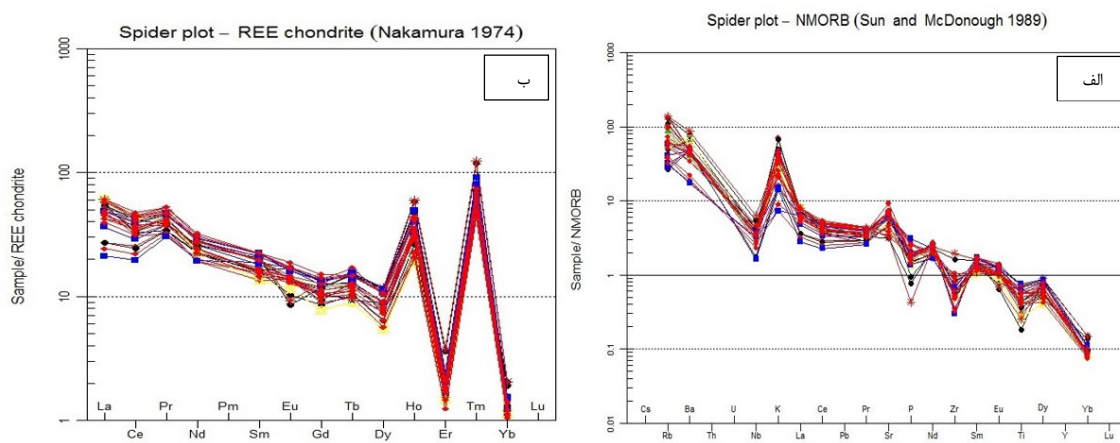
در نمودار تغییرات درصد وزنی SiO₂ در برابر کل K₂O و Na₂O، سنگ‌های آذرین مورد مطالعه عمدتاً در محدوده کالک‌آلکان قرار می‌گیرند. همچنین مقادیر اکسیدهای CaO، MgO، Fe₂O₃، P₂O₅، TiO₂ در مجموعه سنگ‌های آذرین نفوذی و خروجی محدوده نخیلاب با افزایش مقدار سیلیس روند کاهشی نشان می‌دهند. در همین حال، مقادیر K₂O و Na₂O روند افزایشی را نشان می‌دهند (شکل ۱۳). این نشان می‌دهد که در فرآیند تمایز ماگمایی، مقادیر اکسیدهای CaO، MgO، Fe₂O₃، P₂O₅، TiO₂ از ماگمای بازیک به ماگمای اسیدی افزایش می‌یابد. به تدریج، با نزدیک شدن به فرآیند تمایز ماگمایی نهایی، این عناصر ناسازگار، فلدسپات‌های اسیدی بیشتری می‌سازند. کاهش مقدار CaO در مقابل افزایش SiO₂ به دلیل تشکیل پلاژیوکلازهای غنی از کلسیم و کلینوپیروکسن و ناپدید شدن تدریجی CaO از ماگمای مذاب در ابتدای فرآیند

مقادیر GdN/YbN از ۱/۹۸ تا ۰/۹۰ (به طور متوسط ۱/۵۸) متغیر است. این نسبت‌ها عنصر خاکی کمیاب سنگین تقریباً مسطح (HREE) را در الگوهای REE نرمال شده در مقایسه با مقادیر کندریت منعکس می‌کنند (ناکامورا، ۱۹۷۴).

برای ۲۵ نمونه آنالیز شده نشان می‌دهد. نسبت LaN/SmN بین ۷/۲۷ و ۱/۸۳ (به طور متوسط ۴/۲۱) متغیر است که غنی‌سازی در عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) را نشان می‌دهد. مقادیر ناهنجاری Eu از ۱/۴۴ تا ۰/۶۶ (به طور متوسط ۱/۰۸) متغیر است که نشان‌دهنده ناهنجاری Eu منفی برای نمونه‌های مورد مطالعه است و

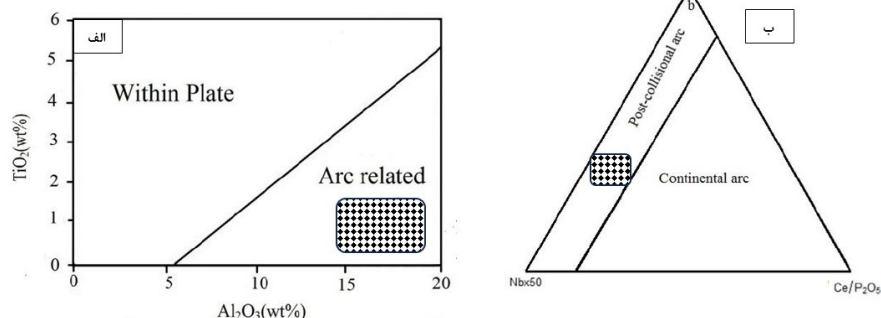


شکل ۱۳. تغییرات برخی از عناصر اصلی و فرعی در برابر تغییرات SiO_2
Fig. 13. Variation of some major and minor elements versus of SiO_2 variations



شکل ۱۴. الف) هنجار شده‌ی عناصر نسبت به مورب و ب) هنجار شده‌ی عناصر نسبت به کندریت
Fig. 14. A) Ratio of the normalized elements compared to MORB. B) Ratio of normalized elements compared to chondrite

(شکل ۱۵ الف و ب). فراوان‌ترین سنگ‌های آذرین در این محدوده دیوریت، آندزیت و داسیت هستند که بیشتر در محیط‌های فروران‌ش حاشیه‌قاره یافت می‌شوند (ویلسون، ۱۹۸۹).



شکل ۱۵. الف) نمودار TiO_2 در مقابل Al_2O_3 برای نشان دادن محیط تکتونیکی و ب) دیاگرام مثلثی تعیین محیط تکتونیکی (مولر و همکاران ۱۹۹۷).

Fig. 15. A) Chart of TiO_2 vs. Al_2O_3 for tectonic setting. B) Triangular diagram for determine of the tectonic environment. (Müller et al. 1997).

تعلق دارند و تمامی نمونه‌های محدوده مورد مطالعه در محیط قوس حاشیه قاره و پس از تصادم قرار دارند.

۵- قدردانی

از راهنمایی‌های ارزشمند و بی‌دریغ اساتید گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد و همچنین داوران محترم دوفصلنامه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

References

- Aghanabati, A (2004) The Geology of Iran, Geological Survey of Iran, Tehran, 586 p. (in Persian)
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M., Homam, S. M (2011) Sr–Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran), Journal of Asian Earth Sciences, 41 (3): 283-296. doi.org/10.1016/j.jseas.2011.02.014.
- Bagherifar, A., Rahimi, B., Boomeri, M (2015) Investigation of structural distribution of gold mineralization in "Sefidsang" area (SE-Zahedan, Iran), Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES) ISSN: 2220-6663 (Print) 2222-3045 (Online) 6 (6): 528-533.
- Cox, K. G., Bell, J. D., and Pankhurst, R. J (1979) The Interpretation of Igneous Rocks, G. Allen &

۳-۵- جایگاه تکتونیکی

استفاده از نمودار TiO_2 در مقابل Al_2O_3 برای نشان دادن محیط تکتونیکی بهترین است. بر اساس این نمودار تمامی نمونه‌های محدوده مورد مطالعه در قوس و محیط حاشیه قاره قرار دارند و متعلق به شرایط بعد از تصادم می‌باشند

۴- نتیجه‌گیری

محدوده نخیلاب (نخیله) در محیط تکتونیکی بین دو گسل امتدادلغز کهورک و نصرت‌آباد قرار دارد. و تحت تأثیر مؤلفه کششی S_1 قرار گرفته که این امر سبب تسهیل نفوذ توده‌های نفوذی در محدوده شده است. ترکیب شیمیایی سنگ‌های آذرین، در محدوده‌ی سنگ‌های بازیک، متوسط تا اسیدی بوده و عمدتاً به ترتیب فراوانی از نوع دیوریت‌ها، آندزیت‌ها، گرانودیوریت و گابرو هستند.

دو واحد هورنبلنددیوریت‌پورفیری و معادل خروجی آن‌ها آندزیت‌های قرمز و سبز فراوان‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی محدوده بوده که آندزیت‌های سبزرنگ متحمل دگرسانی پروپلیتیک شده و فاقد کانی‌سازی مهم و اقتصادی هستند. یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین آلتراسیون‌های موجود در محدوده آلتراسیون آرژیلیکی می‌باشد که عمدتاً بر واحدهای دیوریت پورفیری منطبق بوده و مهم‌ترین کانی‌سازی‌های محدوده را شامل می‌شود. کالکوپیریت و اسفالریت در مرحله هیپوژن و کانی‌های بورنیت، کالکوسیت و کوولیت در مرحله سوپرژن تشکیل شده‌اند. مقدار غنی‌سازی LREE نسبت به HREE آشکارتر است، و تفسیر نمودارهای تعیین محیط تکتونیکی نیز نشان می‌دهد که سنگ‌های آذرین به مناطق فروران‌ش

- Nakamura, N (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38: 757-775.
- Pengyi, L., Li, H., Zhengwei, H., Yansong, L., Hui, D., Rui, Q., Jiaxian, W., Yang, Zh., Yun, W (2021) Research on remote sensing prospecting technology based on multi-source data fusion in deep-cutting areas, *Ore Geology Reviews*, 138, doi. org /10.1016 /j. ore geo rev .2021.104359.
- Philipp, R., Gerhard, W (2007) Variable regimes in magma systems documented in plagioclase zoning patterns: El Misti stratovolcano and Andahua monogenetic cones, *J Volcan Geotherm Res*, 165: 142–162. doi. org /10.1016 /j. j volgeores. 2007.06.002.
- Walker, R. T., Khatib, M. M (2006) Active faulting in the Birjand region of NE Iran, *Advancing earth and apace science*, doi. org /10.1029/2005TC001871.
- Wilson, M (1989) *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*, Unwin Hyman, London, 466 p.
- Yavari, F., Boomeri, M (2013) Petrography and geochemistry of igneous rocks Nakhileh and its relationship with gold mineralization and copper-Zahedan North West, 5th Symposium of Iranian Society of Economic Geology. (in Persian).
- Unwin, London. doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1.
- Dora, M. L., Randive, K. R (2015) Chloritization along the Thanewasna shear zone, Western Bastar Craton, Central India: Its genetic linkage to Cu–Au mineralization, *Ore Geology Reviews*, 70, doi.org/10.1016/j. oregeorev. 2015.03.018.
- Francisco, J. T., Cecilia, V., David, R. C., Lejun, Zh (2018) Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery, *Remote Sens*, 10 (2), doi.org/10.3390/rs10020203.
- Hedayati, N (2014) Investigation of hydrothermal alteration in Nakhilab Cu bearing plutonic-volcanic complex, northwest of Zahedan, 6th Symposium of Iranian Society of Economic Geology. (in Persian)
- John, C. M., Lawrence, C., R (2011) Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals, *Remote Sensing of Environment*, Volume 114, Issue 9, 15 September 2010, 2011-2025. doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.008.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A.T., Barloon, P. J., Goetz, A. F. H (1993) The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data, *Remote Sensing of Environment*, Special issue on AVIRIS, 44: 145 - 163. doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., and Zanettin, B (1986) A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram, *Journal of Petrology*, 27 (3) 745-750. doi.org/10.1093/petrology/27.3.745.
- Malekzadeh shafaroudi, A., Karimpour, M. H., Stern, C. R (2014) The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.04.015.
- McDonough, W. F., and Sun, S. S (1995). Composition of the Earth, *Chemical Geology*, 120: 223-253.
- Morata, D., Aguirre, L (2003) Extensional lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20′-30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis, *Journal of South American Earth Sciences* 16: 459-476. doi. 10.1016/j.jsames.2003.06.001.
- Muller, D., Groves, D. I (1997) Potassic igneous rocks and associated gold - copper mineralization. Springer.

Geology, Remote sensing, Mineralogy, Alteration and Geochemistry studies in the Nakhilab area (southeast of Iran)

A. Bagherifar¹, S. A. Mazaheri^{2*} and A. Malekzadeh shafaroudi³

1- Ph. D. student, Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2, 3- Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

* Samazaheri2016@gmail.com

Recieved: 2023.7.4 Accepted: 2023.11.27

Abstract

Nakhilab (Nakhileh) area is located in the southeast of Iran and 145 km northwest of Zahedan. Sedimentary units of the flysch zone of eastern Iran and porphyry and andesite diorite units are the most important lithological units. All the existing lithological units in this area have been affected by the shearing movements of Nosratabad and Kahorak faults, which have caused the creation of tensile structures in the area and probably facilitated the penetration of diorite units. Field and laboratory studies showed that the most abundant lithology in the area is hornblende diorite porphyry intrusions and the most important mineralization has occurred there, and the most abundant main minerals are semi-shaped plagioclase crystals (60-75 percent), Hornblende (5-10%), biotite (3-5%), quartz and clinopyroxene (about 5%). Chalcopyrite, pyrite, bornite, and covellite are abundant minerals in the mineralography studies. In the paragenesis sequence, pyrite, chalcopyrite, and sphalerite minerals are in the early stages (hypogene) and bornite, chalcocite, and covellite are secondary minerals and supergene stage. RS studies indicate the presence of argillic, propylitic, phyllic, and iron oxide alterations. Geochemical investigations showed that the igneous rocks range from gabbro to granodiorite and the chemical composition of igneous rocks ranges from basic, to medium to acidic, which are mainly diorite, andesite, granodiorite, and gabbro respectively. The amount of LREE enrichment is more obvious than that of HREE, these features indicate that the igneous rocks belong to subduction zones. All the samples studied in this area are located in the arc and the environment of the post-collision of the continental margin.

Keywords: Nakhilab, Remote sensing, Alteration, Mineralogy, Geochemistry

Introduction

The Nakhilab (Nakhileh) area is located in southeastern Iran, in Sistan and Baluchestan Province, 145 kilometers northwest of Zahedan city, at a geographical location of 37°18'30" to 15°19'30" north latitude and 58°51'59" to 05°53'59" east longitude. According to the division of the major sedimentary-structural zones of Iran (Agha Nabati, 2004), this area is located tectonically on the border between the eastern Iranian flysch zone and the Lut block. Since the Kahorak fault (the southwestern branch of the southern part of the Nehbandan fault) separates sharply the lithological units of the western area from the Lut block, it seems that this area is part of the eastern Iranian flysch zone. Mineralogical and petrographic studies indicated the presence of porphyry igneous rocks of diorite and quartz diorite in the Nakhileh area. Since this area, based on preliminary evidence and studies and the

presence of various types of argillic, propylitic, sericite and gossan alteration rich in copper mineralization and the presence of anomalies of gold mineralization, can be classified as a porphyry copper deposit, therefore, using economic geological knowledge, this research tries to help in better and more accurate exploration of this deposit by utilizing new findings in geology, mineralogy, remote sensing, alteration and geochemistry.

Materials and Methods

Using ASTER and LANDSAT satellite images and special processing software such as ENVI 4.5 Win, and with the help of RGB and SAM techniques, the lithologies and alterations in the area were distinguished. Also, suitable samples from fresh and less altered rock units were analyzed by XRF to determine the main oxides with a detection limit of 0.5 to 0.05 weight percent and minor and trace elements with ICP-MS by ZarAzma Mineral Analysis

Company, with a detection limit for trace elements between 0.01 ppm and 1 ppm. Analysis of selected samples from altered units to separate and identify clay minerals was performed by XRD in the laboratory of the Geological Organization of Tabriz Branch.

Results and Discussion

In order to observe the altered zones in this area, the RGB=468 band combination was first used. In this band combination, the minerals related to the propylitic zone are observed in the upper and lower parts of the area in dark and light green, the minerals related to the argillic zone are observed in pink in the central part of the area, and the carbonates are observed in yellow to brown. By applying spectral angle mapping methods to OLI sensor data, areas with iron oxides can be better distinguished and identified due to the higher number of VNIR bands compared to the ASTER sensor. Also, by applying the SAM method to ASTER sensor data, areas with phyllic alteration indicator minerals (sericite), propylitic indicator minerals (epidote, chlorite, and calcite), and argillic indicator minerals (kaolinite) were well revealed.

Mineralization is mainly seen in diorite and andesite units and two forms: disseminated and veinlet. In the studied samples, minerals such as pyrite, chalcopyrite, and sphalerite are present as primary minerals, and minerals such as bornite, chalcocite, and covellite are present as secondary minerals. Pyrites are seen with a rounded appearance and decomposed states, which indicates the priority of their formation over other minerals. Accordingly, chalcopyrites were formed in later stages, and finally, sphalerites.

The results of XRD analyses of these rocks showed that the most important clay minerals formed in this alteration are mainly kaolinite, montmorillonite, illite, pyrophyllite, and a smaller amount of palygorskite. Propylitic alteration with the presence of chlorite and large epidote indicator minerals is seen in green andesite units. The presence of epidote and chlorite in the altered rocks indicates a temperature of about 220 to 340 degrees Celsius. These units and their related propylitic

alteration in this area lack important and valuable mineralization. The main mineralization is observed in the phyllic zone. The chemical composition of igneous rocks ranges from basic to medium to acidic, which are, in order of abundance, diorite, andesite, granodiorite, and gabbro. REE elements in all samples show enrichment compared to their values in the chondrite composition, and the enrichment of LREE is more obvious than that of HREE. These features indicate that the igneous rocks belong to subduction zones. Using the TiO₂ vs. Al₂O₃ diagram, all samples in the study area are located in the arc and continental margin environment and belong to post-collisional conditions.

Conclusions

The Nakhilab (Nakhileh) area is located in the tectonic environment between the two strike-slip faults of Kahorak and Nosratabad. It is under the influence of the S1 tensile component, which has facilitated the penetration of intrusive masses in the area. The chemical composition of igneous rocks in the area is basic, medium to acidic, and is mainly composed of diorites, andesites, granodiorite, and gabbro, in order of abundance. The two hornblende-diorite porphyry units and their output equivalents, red and green andesites, are the most abundant petrological units in the area, with the green andesites undergoing propylitic alteration and lacking significant and economic mineralization. One of the most important and widespread alterations in the area is the argillic alteration, which mainly coincides with the porphyry diorite units and includes the most important mineralizations in the area. Chalcopyrite and sphalerite were formed in the hypogene stage, and bornite, chalcocite, and covellite minerals were formed in the supergene stage. The enrichment of LREE is more obvious than that of HREE, and the interpretation of the tectonic setting diagrams also shows that the igneous rocks belong to subduction zones, and all the samples of the studied area are located in the continental margin arc environment and post-collisional.