

پترولوژی و زمین‌شیمی سنگ‌های دگرگونی جنوب‌غربی نهبندان، شرق بلوک لوت

سیده‌مریم حسینی‌نژاد^۱، زهرا طهماسبی^{۱*}، احمد احمدی‌خلجی^۱، فرزانه سپه‌وند^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

E-mail addresses: tahmasebi.z@lu.ac.ir

تلفن: ۰۶۶۳۳۱۲۰۶۱۹، تاریخ تنظیم: ۱۴۰۵/۳/۱۰

چکیده

سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه در اطراف توده‌های گرانیتوئیدی سفیدکوه، قله‌ریگ و ملک‌چاه‌روئی در جنوب‌غرب شهرستان نهبندان رخنمون دارند. بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی نشان می‌دهد که این سنگ‌ها شامل دو گروه اصلی، ناحیه‌ای و مجاورتی، هستند. کانی‌های اصلی در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای شامل آندالوزیت، گارنت، پلاژیوکلاز، بیوتیت، موسکویت، کوارتز، تورمالین، کلسیت، کانی‌های رسی و کانی‌های کدر است و بافت‌های پورفایروبلاستیک، لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک در آن‌ها مشاهده می‌شود. سنگ‌های دگرگونی مجاورتی نیز دارای بافت گرانولار بوده و عمدتاً از کوارتز، کلریت، موسکویت، بیوتیت، پلاژیوکلاز، اپیدوت و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند. نتایج زمین‌شیمیایی انواع شیست‌ها به عنوان گسترده‌ترین سنگ‌های دگرگونی منطقه، نشان می‌دهد که از نظر ترکیب شیمیایی در گستره‌ای با SiO_2 برابر با ۴۹/۲۹ تا ۸۶/۷۴ درصد وزنی، Al_2O_3 برابر با ۵/۸۹ تا ۲۱/۴۰ درصد وزنی، FeO_t برابر با ۲/۶۰ تا ۱۲/۴۰ درصد وزنی، TiO_2 برابر با ۰/۲۶ تا ۲/۵۹ درصد وزنی و MgO برابر با ۱/۰۹-۷/۶۰ درصد وزنی قرار می‌گیرند که با متاپلیت‌های منشأ گرفته از رسوبات ریزدانه، به‌ویژه شیل و گری‌وک، همخوانی دارند. غنی‌شدگی نسبی LILE و LREE نسبت به HREE و HFSE، همراه با آنومالی منفی در Nb، Ti و P، نشان‌دهنده تکامل این سنگ‌ها در یک محیط فرورانشی و در حاشیه فعال قاره‌ای است. همچنین، ناهنجاری منفی Eu (Eu/Eu^* حدود ۰/۵۳) با ویژگی‌های سنگ‌های کالک‌آلکان در این محیط سازگار است. مقادیر بالای شاخص‌های CIA و CIW بیانگر هوازدهی شیمیایی شدید در محیط منشأ است که با مقادیر مشاهده شده در شیل‌های آرکتن همخوانی دارد. علاوه بر این، مقادیر بالای ICV در اکثر نمونه‌ها نشان‌دهنده رسوبات نابالغ غنی از کانی‌های غیررسی است که در یک حاشیه فعال قاره‌ای رسوب‌گذاری کرده‌اند.

کلمات کلیدی: متاپلیت، سنگ منشأ رسوبی، شیل-گری‌وک، حاشیه فعال قاره‌ای، نهبندان، ایران.

منطقه نه‌بندان یکی از نواحی کلیدی برای واکاوی فرآیندهای تکتونو-ماگمایی و دگرگونی در شرق ایران به شمار می‌رود. سنگ‌های دگرگونی در این منطقه شامل دگرگونی ناحیه‌ای و مجاورتی هستند [۱] که در پیرامون توده‌های گرانیتوئیدی سفیدکوه، قله‌ریگ و ملک‌چاه‌روئی رخنمون دارند (شکل ۱ تا ۴). این توده‌ها به ترتیب در فواصل ۲۳ کیلومتری غرب، ۴۵ کیلومتری جنوب‌غرب و ۷۵ کیلومتری جنوب‌غرب نه‌بندان (در نزدیکی روستای ده‌سلم) جای گرفته‌اند. تمامی این واحدها در حاشیه شرقی بلوک لوت و در حدفاصل این بلوک با کمربند زمین‌درز سیستان واقع شده‌اند (شکل ۳). بلوک لوت بخشی از پلاتفرم پالئوزوئیک ایران است که به‌شدت تحت تأثیر فازهای کوه‌زایی سیمیرین در تریاس فوقانی تا ژوراسیک میانی قرار گرفته است. این رویدادهای تکتونیکی منجر به ماگماتیسم گسترده، نفوذ توده‌های پلوتونیکی بزرگ (مانند توده شاه‌کوه) و دگرگونی نهشته‌های دریایی-تخریبی تریاس فوقانی و ژوراسیک زیرین (معادل سازندهای نابیند و شمشک) شده است. علاوه بر سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین در نواحی کاشمر و فردوس، حضور سنگ‌های دگرگونی ده‌سلم با سن تریاس میانی، گواهی بر این فعالیت‌هاست [۲]. از دیدگاه تکتونیکی، این توده‌های آذرین غالباً در حاشیه فعال صفحات جایگیر شده‌اند. مطالعات متعددی منشأ این ماگماتیسم را با فرآیندهای فروانش پیوند داده‌اند؛ در این راستا، برخی پژوهشگران فروانش پوسته اقیانوسی به سمت غرب و زیر بلوک لوت را پیشنهاد کرده‌اند [۳]، در حالی که بر اساس شواهد توالی‌های افیولیتی در شرق بلوک لوت، مدل فروانش پوسته اقیانوسی به سمت شرق و زیر بلوک افغان نیز مطرح شده است [۴]. مطالعات پیشین متعددی بر توده‌های نفوذی شرق بلوک لوت متمرکز بوده‌اند؛ از آن جمله می‌توان به باتولیت گرانیتی شاه‌کوه [۵]، گرانیتوئید چهارفرسخ [۶]، باتولیت بزمان [۷]، گرانیتوئیدهای منطقه حنار در جنوب بیرجند [۸]، گرانیتوئیدهای منطقه کبیرکوه در جنوب شرقی خواف [۹]، گرانیتوئیدهای ده-سلم [۱۰]، توده‌های گرانیتوئیدی سفیدکوه [۱۱]، قله‌ریگ [۱۱] و ملک‌چاه‌روئی [۱۲] و [۱۳] اشاره کرد.

تعیین زمان وقوع دگرگونی در شرق بلوک لوت با استفاده از سن‌سنجی U-Pb بر روی کانی زیرکن، بازه زمانی ۱۶۰ تا ۱۶۵ میلیون سال را برای این رویداد ارائه داده است [۱۴ و ۱۵]. این نتایج تأیید می‌کند که سنگ‌های دگرگونی ده-سلم در این دوره تحت تأثیر یک رویداد تکتونیکی-دگرگونی شاخص قرار گرفته‌اند. بر اساس یافته‌های [۱۵]، دگرگونی درجه بالا در منطقه به شرایط دمایی لازم جهت ذوب بخشی و میگماتیستی شدن رسیده است که نشان‌دهنده وجود یک گرادیان حرارتی بالا در طی این دوره می‌باشد. این مطالعات در مجموع بیانگر آن است که دگرگونی منطقه با جایگیری گرانیتوئیدهای نوع S هم‌زمان بوده و منعکس‌کننده یک رویداد کوه‌زایی کوتاه‌مدت اما شدید در شرق ایران است. علاوه بر این، نتایج پژوهش‌های دیگر [۱۶]، ضمن تأیید سن ژوراسیک برای اوج

دگرگونی، بر استمرار فرآیند بالاآمدگی و سرد شدن این واحدها تا زمان کرتاسه تأکید دارند. بر این اساس، دو مرحله دگرشکلی و دگرگونی اصلی برای این منطقه تعریف شده است: مرحله نخست (D1) شامل یک رویداد دگرگونی با دمای بالا و فشار متوسط (HT-MP) بوده و مرحله دوم (D2) با دگرگونی پس‌رونده هم‌زمان با دگرشکلی میلونیتی مشخص می‌گردد. در این چارچوب، کمپلکس دگرگونی ده‌سلم و واحدهای مجاور آن به عنوان بخشی از یک کمپلکس هسته دگرگونی معرفی شده‌اند. پژوهش حاضر با هدف بررسی پترولوژی و زمین‌شیمی سنگ‌های دگرگونی در جنوب‌غرب نهبندان (پیرامون توده‌های سفیدکوه، قله‌ریگ و ملک‌چاه‌روئی) تدوین شده است. در این راستا، با بهره‌گیری از مطالعات صحرایی، بررسی‌های میکروسکوپی و تحلیل داده‌های زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب، ویژگی‌های کانی‌شناسی، پروتولیت (سنگ مادر) و محیط زمین‌ساختی تشکیل این واحدها مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفته است.

زمین‌شناسی عمومی

منطقه مورد مطالعه در محدوده ورقه زمین‌شناسی چاه‌داشی (مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰؛ [۱۷]) قرار گرفته که بخشی از نقشه ۱:۲۵۰,۰۰۰ ده‌سلم (چاه‌وک) محسوب می‌شود (شکل‌های ۲، ۳ و ۴) که در محدوده عرض جغرافیایی $31^{\circ}30'$ تا $31^{\circ}00'$ شمالی و طول جغرافیایی $59^{\circ}30'$ تا $60^{\circ}00'$ شرقی قرار دارد. از نظر جایگیری، توده گرانیتوئیدی سفیدکوه در شمال و توده‌های قله‌ریگ و ملک‌چاه‌روئی در جنوب منطقه قرار گرفته‌اند (شکل ۱). رخنمون‌های سنگ‌های دگرگونی منطقه شامل شیل‌های آهکی دگرگون‌شده (TR_{sr}) و آهک‌های دگرگون‌شده (TR_{sh}) متعلق به بازه زمانی تریاس پیشین تا میانی است. بیشترین گستردگی این واحدها در شمال‌غرب منطقه مشاهده می‌شود (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). واحدهای دگرگونی ناحیه‌ای شامل سیلیمانیت‌شیت، گارنت‌میکاشیست (J_s^{sl})، آندالوزیت‌شیت (J_s^{an})، اسلیت، فیلیت، ماسه‌سنگ‌های دگرگونی همراه با رگه‌های کوارتز (J_s^{sl})، گارنت‌شیت (J_s^{gt}) و ماسه‌سنگ‌های دگرگونی و اسلیت با رگه‌های کوارتز (J_s^{sl}) می‌باشند. این واحدها دارای محدوده سنی ژوراسیک پایینی تا میانی بوده و در بسیاری از نواحی مورد مطالعه دارای گستردگی هستند (شکل‌های ۲، ۳ و ۴).

روش انجام پژوهش

در طی مطالعات صحرایی، ۵۰ نمونه از سنگ‌های دگرگونی جنوب‌غربی نهبندان (شامل سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای و مجاورتی) برداشت شد. سپس جهت بررسی‌های پتروگرافی، ۲۵ نمونه انتخاب و از آن‌ها مقطع نازک تهیه گردید و ویژگی‌های پتروگرافی شامل

نوع کانی‌ها، بافت، نام سنگ و دیگر ویژگی‌های پتروگرافی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. پس از بررسی‌های صحرایی و مطالعات پتروگرافی، ۱۰ نمونه از انواع مختلف شیست‌های سالم (۸ نمونه پیرامون گرانیتوئید سفیدکوه و ۲ نمونه پیرامون گرانیتوئید ملک‌چاه‌روئی) که بهترین ویژگی‌های نمایندگی را داشتند، جهت آنالیز شیمیایی انتخاب شدند و به آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزمای تهران ارسال شدند. در این آزمایشگاه، عناصر اصلی به روش ذوب قلیایی و عناصر کمیاب به روش ICP-MS اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل از این آنالیزها در جدول ۱ ارائه شده است.

ویژگی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری

بر اساس مطالعات صحرایی، سنگ‌های دگرگونی جنوب‌غربی نهندان (شکل ۵) به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: ناحیه‌ای و مجاورتی. این سنگ‌ها در پیرامون توده‌های گرانیتوئیدی سفیدکوه، قله‌ریگ و ملک‌چاه‌روئی واقع شده‌اند (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). سنگ‌های دگرگونی پیرامون گرانیتوئید سفیدکوه شامل واحدهای دگرگونی ناحیه‌ای گارنت-آندالوزیت-شیست، آندالوزیت-گارنت-شیست، آندالوزیت-شیست، آمفیبولیت، گنایس، گرانیت-گنایس، کالک‌شیست، ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده هستند (شکل ۵-الف). سنگ‌های دگرگونی مجاورتی عمدتاً شامل هورنفلس‌ها می‌باشند (شکل ۵-ب):

- **گارنت-آندالوزیت شیست‌ها:** این سنگ‌ها در نمونه‌های دستی به رنگ تیره دیده شده و حضور پورفایروبلست‌های آندالوزیت (کیاستولیت) و گارنت در آن‌ها مشهود است (شکل ۶-الف). در بررسی‌های میکروسکوپی، کانی‌های بیوتیت و موسکویت با آرایش موازی، بافت لپیدوبلاستیک را ایجاد کرده‌اند (شکل ۶-ب و پ). در این سنگ‌ها، پورفایروبلست‌های آندالوزیت و گارنت با ایجاد مناطق سایه فشاری موجب تجمع کانی‌های کوارتز و میکا در نواحی کم‌فشار شده‌اند. حضور اذخالی‌های جهت‌یافته در برخی بلورها و ارتباط آن‌ها با برگوارگی زمینه، بیانگر گلوله‌برفی است که تبلور هم‌زمان با دگرگونی این پورفایروبلست‌ها را تأیید می‌کند (شکل ۶-ب و پ).
- **آندالوزیت-گارنت شیست‌ها:** این سنگ‌ها که در نمونه‌های دستی تیره رنگ هستند (شکل ۶-ت)، حاوی پورفایروبلست‌های آندالوزیت و گارنت با ابعاد متغیر هستند (شکل ۶-ث، ج). در بررسی‌های میکروسکوپی، بیوتیت، کوارتز و کانی‌های کدر

برگوارگی سنگ را شکل می دهند که گارنت به صورت پست تکتونیک بر روی این برگوارگی مشاهده می شود (شکل ۶-ث).

- **آندالوزیت شلیست ها:** واحدهای آندالوزیت شلیست نیز در نمونه های دستی تیره رنگ بوده و پورفیروبلست های آندالوزیت (کیاستولیت) با ابعاد متغیر و جهت یافته دیده می شوند (شکل ۶-ج). کانی های زمینه عبارتند از: بیوتیت، کوارتز، موسکوویت و کانی های کدر (شکل ۶-خ و د). پورفیروبلست های کیاستولیت ماکل ضربدری مشخصی را نشان می دهند که ناشی از تمرکز اذخال های ذغالی (گرافیت) در امتداد سطوح بلوری است. در برخی نمونه ها، گرافیت های موجود در گوشه های کانی در حال جایگزینی با بیوتیت، کوارتز و موسکوویت هستند (شکل ۶-ح). یکی از ویژگی های بافتی بارز این سنگ، تجمع دانه های کوارتز به صورت ماهی مانند است (شکل ۶-خ).

- **آمفیبولیت ها:** نمونه های دستی این سنگ ها دارای رنگ خاکستری تیره مایل به سبز بوده و در آن ها بلورهای منشوری هورنبلند به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۷-الف). پلاژیوکلازها با رنگ روشن خود به راحتی قابل تشخیص اند. این سنگ ها دارای بافت گرانوبلاستیک تا نماتوبلاستیک بوده و ترکیب کانی شناسی آن ها شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند و کوارتز است (شکل ۷-ب).

- **گنایس ها:** این سنگ ها در نمونه های دستی به رنگ خاکستری روشن دیده شده و واجد ساختار نواری می باشند (شکل ۷-پ). در بررسی های میکروسکوپی، سنگ شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، موسکوویت و بیوتیت است (شکل ۷-ت) که بافت لپیدوبلاستیک زمینه را می سازند. کانی فرعی شامل بلورهای خودشکل تا نیمه شکل دار تورمالین با چندرنگی مشخص است (شکل ۷-ث). وجود تورمالین در این سنگ ها معمولاً به منشأ رسوبی غنی از بور آن ها نسبت داده می شود.

- **گرانیت گنایس ها:** این واحدها به رنگ روشن بوده و دارای ساختار نواری هستند (شکل ۷-ج تا خ). در مطالعات میکروسکوپی، حضور کانی های میکابی (بیوتیت و موسکوویت) در کنار کوارتز و فلدسپار، ترکیبی از بافت های لپیدو-گرانوبلاستیک را پدید آورده است. پلاژیوکلازها دارای ماکل تکراری و نیمه شکل دار هستند و اغلب دچار دگرسانی شده اند. همچنین، اذخال های فراوانی از بیوتیت و موسکوویت که معمولاً به صورت پولک های ریزشکل اند، در آن ها مشاهده می شود. در پاسخ به تنش های تکتونیکی، پلاژیوکلازها نیز مانند سایر کانی ها جهت یافتگی ترجیحی داشته و هم راستا با برگوارگی سنگ قرار گرفته اند (شکل ۷-چ). کانی های فرعی شامل تورمالین و گارنت های ریزبلور می باشند (شکل ۷-ح، خ).

- **کالک شلیست ها:** این سنگ ها در نمونه های دستی به رنگ خاکستری، با قابلیت تورق زیاد و ساختارهای ریزچین خورده دیده می شوند (شکل ۸-الف). بافت غالب گرانوبلاستیک بوده و کانی های اصلی شامل کلسیت، کانی های رسی و مقادیر اندکی

کوارتز است (شکل ۸-ب). در این سنگ‌ها دو نسل کلسیت مشاهده می‌شود: نوع نخست، کلسیت‌های اولیه با رخ‌های لوزوجهی مشخص و شکل‌دار؛ و نوع دوم، کلسیت‌های ثانوی به‌صورت رگچه‌هایی که متن سنگ را قطع کرده‌اند (شکل ۸-ب) و نشان‌دهنده فعالیت‌های پس‌از دگرگونی هستند.

- **ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده:** این سنگ‌ها در نمونه‌های دستی تیره رنگ و متراکم هستند (شکل ۸-پ). در مطالعات میکروسکوپی، سنگ دارای بافت گرانوبلاستیک (دانه‌ای) بوده و بخش عمده آن را دانه‌های کوارتز تشکیل می‌دهند (شکل ۸-ت). ترکیب کانی‌شناسی شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، موسکویت و کلسیت به همراه کانی‌های کدر است. دانه‌های کوارتز دارای خاموشی موجی بوده و مرز دانه‌ها به صورت دندانه‌دار دیده می‌شود که نشان‌دهنده تبلور مجدد تحت تنش دگرگونی است. پلاژیوکلازها و پولک‌های موسکویت به صورت پراکنده در بین دانه‌های کوارتز قرار گرفته‌اند. حضور کلسیت و کانی‌های رسی در زمینه سنگ، بیانگر وجود ناخالصی‌های کربناته و آواری در پروتولیت است. بر اساس پاراژنز موجود، این واحد را می‌توان یک میکا کوارتزیت در نظر گرفت که از دگرگونی ماسه‌سنگ‌های ناخالص حاصل شده است.
- **هورنفلس‌ها:** این واحدها در حاشیه شرق و جنوب‌شرق توده نفوذی سفیدکوه، به صورت سنگ‌هایی تیره با ظاهر متراکم مشاهده می‌شوند (شکل ۸-ث). در بررسی‌های میکروسکوپی، سنگ واجد بافت گرانوبلاستیک تا لپیدوبلاستیک (به دلیل حضور کانی‌های ورقی) است (شکل ۸-ج). ترکیب کانی‌شناسی آن‌ها شامل کوارتز، کلریت، موسکویت، بیوتیت، پلاژیوکلاز، اپیدوت و کانی‌های کدر است (شکل ۸-ح).

در غرب و جنوب‌غرب گرانیتوئید قله‌ریگ، ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده‌ای به رنگ تیره مشاهده می‌شوند (شکل ۹-الف). این سنگ‌ها دارای بافت گرانوبلاستیک بوده و کانی‌های اصلی آن‌ها شامل کوارتز، سریسیت و کلسیت است (شکل ۹-ب).

در اطراف توده گرانیتوئیدی ملک چاه‌روئی به‌خصوص در بخش‌های غربی و جنوب‌غربی، گارنت-میکاشیست‌ها که در برخی نقاط با توده گرانیتوئیدی آمیختگی نیز پیدا کرده‌اند رخنمون دارند و گرانیت‌های روشن نواری همراه با آن‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۹-پ).

- **گارنت-میکاشیست‌ها:** نمونه‌های دستی این سنگ‌ها دارای رنگ خاکستری روشن تا تیره هستند که در آن‌ها پورفایرولاست‌های گارنت به‌وضوح قابل شناسایی است (شکل ۱۰-الف تا پ). ترکیب کانی‌شناسی شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، بیوتیت، موسکویت و گارنت است که مجموعاً بافت لپیدو-گرانوبلاستیک را پدید آورده‌اند (شکل ۱۰-ب تا ت). جدایش کانی‌های فلسیک (کوارتز و فلدسپار) از کانی‌های مافیک (میکاه‌ها)، منجر به شکل‌گیری ساختار نواری در سنگ شده است (شکل ۱۰-پ).

- **گرانیت‌های روشن نواری:** این سنگ‌ها در نمونه‌های دستی با رنگ روشن و حضور مشخص گارنت و تورمالین مشاهده می‌شوند (شکل ۱۰-ث، ج، چ). بافت سنگ از نوع گرانوبلاستیک، میرمیکیتی و پوئی کیلوبلاستیک است. ترکیب کانی‌شناسی آن‌ها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، موسکویت، تورمالین و گارنت است (شکل ۱۰-ج، چ، ح). تشکیل بافت میرمیکیتی در مرز بین پلاژیوکلاز و فلدسپارها (یا کوارتز)، نشان‌دهنده واکنش‌های نهایی در حضور سیالات است (شکل ۱۰-ح). کانی تورمالین با چندرنگی (پلئوکروئیسزم) قوی و بلورهای منشوری (شکل ۱۰-ج) و همچنین پورفایرولاست‌های گارنت با ساختار پوئی کیلوبلاستیک (حاوی ادخال‌های ریز کوارتز)، از ویژگی‌های بارز این سنگ محسوب می‌شوند (شکل ۱۰-چ). حضور موسکویت‌های ورقه‌ای در کنار کوارتزهای تبلور مجدد یافته، بافت لپیدو-گرانوبلاستیک ثانوی را در بخش‌هایی از سنگ ایجاد کرده است.

زمین‌شیمی

بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز شیمیایی انواع مختلف شیست‌ها، مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی شامل SiO_2 (۴۹/۲۹-۸۶/۷۴ درصدوزنی)، Al_2O_3 (۵/۸۹-۲۱/۴۰ درصدوزنی)، FeO_t (۲/۶۰-۱۲/۴۰ درصدوزنی)، TiO_2 (۲/۵۹-۰/۲۶ درصدوزنی) و MgO (۱/۰۹-۷/۶۰ درصدوزنی) نشان‌دهنده ترکیب رایج سنگ‌های متاپلیتی است (جدول ۱). این متاپلیت‌ها، با توجه به ترکیب شیمیایی، در دسته شیست‌های غنی از آلومینیوم طبقه‌بندی می‌شوند که با ترکیب پوسته قاره‌ای فوقانی همخوانی دارند [۱۸]. جهت بررسی ترکیب شیمیایی سنگ‌های دگرگونی، از نمودارهای سازگاری AFM استفاده شد؛ در این نمودارها، کوارتز، آب، مسکویت یا آلکالی فلدسپار به عنوان فاز اضافی در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱۱). در نمودار AFM (شکل ۱۱)، نمونه‌های مورد مطالعه الگوی مشابهی را نشان داده و در یک مثلث پاراژنتیک قرار گرفته‌اند. این همسانی نشان‌دهنده دستیابی به تعادل شیمیایی در این مجموعه‌ها با توجه به ترکیب سنگ کل است. نمودارهای تغییرات اکسیدهای عناصر اصلی در مقابل SiO_2 (نمودارهای هارکر) در شکل ۱۲ ترسیم شده‌اند [۱۹]. همانطور که مشاهده می‌شود، اکسیدهای Al_2O_3 ، TiO_2 ، K_2O ، MgO ، Fe_2O_3 همبستگی منفی با SiO_2 نشان می‌دهند. این روند در شیست‌ها می‌تواند ناشی از فراوانی متغیر کانی‌هایی نظیر میکاها باشد؛ به طوری که افزایش این کانی‌ها موجب افزایش اکسیدهای MgO ، Fe_2O_3 و Al_2O_3 و در مقابل، کاهش میزان SiO_2 می‌گردد. در مقابل، نمونه‌های با محتوای SiO_2 بالا، مقادیر کمتری Al_2O_3 ، TiO_2 ، MgO ، Fe_2O_3 دارند. این امر بیانگر فراوانی کمتر یا عدم وجود کانی‌های شاخص دگرگونی سنگ‌های رسی مانند کانی‌های فرومنیزین و غنی از آلومینیوم (گارنت، کلدیریت، استارولیت و آلومینوسیلیکات‌ها) در این نمونه‌ها

است. عدم وجود همبستگی مشخص و معنادار بین Na_2O و CaO با SiO_2 می‌تواند ناشی از فرآیندهای دگرسانی و هوازدگی کانی‌های فلدسپار باشد.

برای مقایسه ترکیب عناصر نادر خاکی (REE) سنگ‌های مورد مطالعه، از مقادیر نرمال‌شده نسبت به کندریت (شکل ۱۳-الف؛ [۲۰]) و نمودار عنکبوتی چندعنصری نرمال‌شده با NMORB (شکل ۱۳-ب؛ [۲۱]) استفاده شده است. نمونه‌های مورد مطالعه الگوی یکنواختی از غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) را نشان می‌دهند. میانگین نسبت $(\text{La/Yb})_n$ در نمونه‌ها حدود ۱۸/۷ است که غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE را به خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۳-الف). این الگوی غنی‌شدگی در متاپلیت‌ها، نشان‌دهنده تشکیل آن‌ها در محیط‌های فروران (حاشیه فعال قاره‌ای) است [۲۲ و ۲۳]. علاوه بر این، میانگین نسبت Eu/Eu^* در نمونه‌ها حدود ۰/۵۳ به دست آمده است که بیانگر ناهنجاری منفی Eu است (جدول ۱ و شکل ۱۳-الف). ناهنجاری منفی Eu یکی از ویژگی‌های سنگ‌های کالک‌آلکالن در حاشیه فعال قاره‌ای است [۲۴]. این ناهنجاری می‌تواند ناشی از تبلور تفریقی فلدسپار در جریان ماگما یا حضور فلدسپار به‌عنوان یک فاز باقیمانده در فرآیند ذوب بخشی در شرایط احیایی باشد [۲۵، ۲۳ و ۲۶]. همچنین در نمودار عنکبوتی چندعنصری نرمال‌شده نسبت به NMORB (شکل ۱۳-ب)، سنگ‌های مورد مطالعه غنی‌شدگی نسبی عناصر LILE و LREE را نسبت به HREE و HFSE نشان می‌دهند. این الگوی غنی‌شدگی همراه با آنومالی منفی Nb-Ti-P، بیانگر محیط‌های فروران است [۲۲، ۲۷ و ۲۸]. ناهنجاری منفی Nb را می‌توان به مشارکت پوسته قاره‌ای و همچنین حوضه‌های پشت‌قوسی در حاشیه فعال قاره‌ای نسبت داد [۲۳].

بحث

خاستگاه

تجزیه و تحلیل شیمیایی عناصر اصلی و فرعی سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه، بستری اساسی برای تعیین پروتولیت (سنگ اولیه) آن‌ها فراهم می‌آورد. برای تفکیک ماهیت سنگ اولیه، از نمودار دوتایی MgO/CaO در برابر $\text{P}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ [۲۹] استفاده شد (شکل ۱۴-الف)؛ که نشان داد منشأ این سنگ‌ها در محدوده رسوبی قرار دارد. به منظور تعیین دقیق نوع سنگ رسوبی اولیه، از نمودارهای مثلی وینکلر [۳۰] استفاده گردید (شکل ۱۴-ب). این نمودارها، که بر اساس مقادیر مولار اکسیدهای عناصر اصلی طراحی شده‌اند،

نشان می‌دهند که سنگ رسوبی اولیه سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه، دارای ماهیت پلیتی با گرایش به سمت گریوک است. از ویژگی‌های شیمیایی این سنگ‌ها می‌توان به مقادیر نسبتاً بالای K_2O ، Al_2O_3 و MnO و همچنین مقادیر متغیر FeO ، Fe_2O_3 ، MgO و CaO اشاره کرد [۳۱ و ۳۲]. ترکیب شیمیایی سنگ رسوبی اولیه دگرگون‌شده نیز براساس نمودار لگاریتمی Fe_2O_3/K_2O در برابر SiO_2/Al_2O_3 (شکل ۱۵-الف؛ [۳۳])؛ نمودار مثلثی $Zr-15*Al_2O_3 - TiO_2 *300$ که براساس عناصر اصلی و کمیاب طراحی شده است (شکل ۱۵-ب؛ [۳۴])، نمودار مثلثی MgO ، K_2O ، Na_2O (شکل ۱۵-پ؛ [۳۵]) و نمودار لگاریتمی SiO_2/Al_2O_3 در برابر $(CaO+Na_2O/K_2O)$ (شکل ۱۵-ت؛ [۳۶])؛ شیلی بوده است؛ که همگی نشان‌دهنده پلیتی بودن سنگ رسوبی اولیه سنگ‌های دگرگونی جنوب‌غربی نه‌بندان است. علاوه بر این، در نمودار مثلثی AFM (شکل ۱۵-ث) که ابزاری کارآمد برای تعیین ترکیب شیمیایی سنگ‌های متاپلیتی است، نمونه‌های مورد مطالعه در نزدیکی محدوده غنی از آلومینیوم قرار گرفته‌اند که مجدداً مؤید ماهیت شیلی سنگ رسوبی اولیه است (شکل ۱۵-ث).

هوازگی سنگ منشأ

جهت بررسی درجه هوازگی شیمیایی در ناحیه منشأ، از اندیس‌های CIA (Chemical Index of Alteration) و CIW (Chemical Index of Weathering) با استفاده از نمودارهای مثلثی ACNK و ACN بهره گرفته شد (شکل ۱۵-الف و ب؛ [۳۷ و ۳۸]). به طور کلی افزایش درجه دگرسانی شیمیایی منجر به کاهش مقادیر CaO ، K_2O ، Na_2O و MgO و در مقابل افزایش Al_2O_3 می‌گردد. بر اساس نمودار مثلثی ACNK (شکل ۱۶-الف) [۳۷ و ۳۸]، مقادیر بالای CIA (بین ۹۰ تا ۱۰۰) نشان‌دهنده دگرسانی شدید فلدسپارها و تبدیل آن‌ها به کانی‌های رسی است. این مقادیر به مراتب بالاتر از مقادیر گزارش شده برای شیل‌های فانروزوئیک (۷۰ تا ۷۵) است و نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده دگرسانی بسیار بالا قرار دارند. با توجه به اینکه فرآیندهای دیاژنز می‌تواند منجر به ورود پتاسیم (K) اضافی به سیستم شود، برای رفع این تأثیر، از اندیس CIW استفاده شد (جدول ۲). مقادیر CIW برای شیل‌های پست‌آرکئن و آرکئن به ترتیب در بازه‌های ۸۰-۹۵ و ۹۰-۹۸ قرار دارند [۳۹]. اکثر نمونه‌های مورد

مطالعه مقادیر CIW بالای ۹۰ را نشان می‌دهند (شکل ۱۶-ب و جدول ۲)، که این یافته با ویژگی‌های شیل‌های آرکنن کاملاً مطابقت دارد. علاوه بر اندیس‌های CIA و CIW که نسبت فلدسپار به رس را بدون تأثیر قابل توجه سنگ منشأ اولیه بیان می‌کنند، از اندیس ICV (Index of Chemical Variability) نیز استفاده شد. این اندیس میزان تأثیر سنگ منشأ را از طریق نسبت‌های Fe_2O_3 و MgO ارزیابی می‌کند (جدول ۲). مقادیر بالای ICV (۰/۸۵، PAAS) نشان‌دهنده رسوبات نابالغ، غنی از کانی‌های غیر رسی و نهشته‌شده در حاشیه فعال قاره‌ای است [۴۰]. در مقابل، مقادیر پایین این اندیس، نشان‌دهنده دگرسانی فلدسپار به کانی‌های رسی غنی از آلومینیوم است. مقادیر اندیس ICV برای سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه بین ۰/۶۵ تا ۱/۶۷ متغیر است؛ با این حال، اکثر نمونه‌ها دارای مقادیر ICV بالاتر از ۰/۸۵ هستند (جدول ۲) که مؤید رسوبات نابالغ، غنی از کانی‌های غیر رسی و نهشته‌شده در حاشیه فعال قاره‌ای است.

جایگاه زمین‌ساختی

جهت تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ منشأ رسوبی سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه، از ترکیب عناصر اصلی استفاده گردید. در این میان، عناصری مانند آلومینیوم و تیتانیوم از جمله عناصر نسبتاً مقاوم در برابر دگرسانی به شمار می‌روند؛ در حالی که عناصری مانند سدیم، پتاسیم و کلسیم به سرعت از سیستم خارج می‌شوند. از این‌رو، در تعیین محیط زمین‌ساختی هر سنگ (اعم از آذرین یا دگرگونی) که بر پایه فراوانی عناصر اصلی و متحرک مانند Na، K و Ca استوار است، باید با احتیاط عمل نمود تا خطای ناشی از فرآیندهای دگرسانی و تحرک شیمیایی به حداقل برسد [۴۱]. براساس نمودارهای K_2O/Na_2O در برابر SiO_2 (شکل ۱۷-الف؛ [۴۲]) و SiO_2/Al_2O_3 در برابر K_2O/Na_2O (شکل ۱۷-ب؛ [۴۳])، نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند. در این نمودارها، چهار محیط زمین‌ساختی شامل جزایر قوس اقیانوسی (OIA)، قوس جزایر قاره‌ای (CIA)، حاشیه غیرفعال (PM) و حاشیه فعال قاره‌ای (ACM) قابل تفکیک هستند (شکل ۱۷). به‌طور کلی، در حالی که رسوبات آرکوزی بیشتر در محیط‌های ریف‌ت قاره‌ای تشکیل می‌شوند، شیل‌ها و گریوک‌ها معمولاً در محیط‌های اولاکوژنی، حوضه‌های با فرونشست سریع و حاشیه‌های فعال قاره‌ای رسوب می‌کنند. یکی دیگر از نمودارهای تمایز محیط زمین‌ساختی برای رسوبات دگرگون‌شده، نموداری است که بر پایه عناصر اصلی ارائه شده و در شکل ۱۷-پ نشان داده شده است. در این نمودار نیز بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند. پارامترهای تفکیک‌کننده این نمودار به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{Discriminating function1} = -0.0447 \text{SiO}_2 - 0.972 \text{TiO}_2 + 0.008 \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.267 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.208 \text{FeO} - 3.082 \text{MnO} + 0.140 \text{MgO} + 0.195 \text{CaO} + 0.719 \text{Na}_2\text{O} - 0.032 \text{K}_2\text{O} + 7.510 \text{P}_2\text{O}_5 + 0.303$$

$$\text{Discriminating function2} = -0.4217 \text{SiO}_2 + 1.988 \text{TiO}_2 - 0.526 \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.551 \text{Fe}_2\text{O}_3 - 1.610 \text{FeO} + 2.720 \text{MnO} + 0.881 \text{MgO} - 0.907 \text{CaO} - 0.177 \text{Na}_2\text{O} - 1.840 \text{K}_2\text{O} + 7.244 \text{P}_2\text{O}_5 + 43.57$$

علاوه بر عناصر اصلی، برخی عناصر جزئی و عناصر با قدرت میدانی بالا (HFSE) نیز نقش مهمی در تعیین محیط زمین‌ساختی و خاستگاه رسوبی دارند [۴۴]. از جمله این نمودارها، می‌توان به نمودار La/Yb در برابر La/Ce (شکل ۱۷-ت) [۴۵] اشاره کرد. در این نمودار، دو تیپ سنگ رسوبی معرفی می‌شود: یکی تشکیل شده در حاشیه فعال قاره‌ای (ACMESR) و دیگری در پشته عمیق اقیانوسی (DOBRESR)؛ که نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند. بدین ترتیب بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش و مطالعات انجام شده توسط [۱] بر روی توده‌های گرانیتوئیدی جنوب‌غربی نه‌بندان می‌توان یک مدل ژئودینامیکی برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد نمود (شکل ۱۸).

نتیجه‌گیری

سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه در جنوب‌غربی شهرستان نه‌بندان، در شرق و جنوب روستای چاه‌داشی و در شرق روستای ده‌سلم واقع شده‌اند و بخشی از بلوک لوت می‌باشند. نتایج حاصل از بررسی‌های زمین‌شیمیایی و نمودارهای سازگاری، نشان می‌دهند که ترکیب شیمیایی سنگ اولیه انواع مختلف شیست‌های مورد آنالیز، دارای ماهیت پلیتی بوده و شامل ترکیباتی از شیل‌های غنی از آلومینیوم و گری‌وک است. الگوی غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر سنگین (HREE) با میانگین نسبت (La/Yb)_n حدود ۱۸/۷، ناهنجاری منفی Eu و ناهنجاری‌های منفی Nb-Ti-P در نمودار عنکبوتی نیز به‌وضوح نشان‌دهنده تشکیل این سنگ اولیه رسوبی در محیط حاشیه فعال قاره‌ای (مرتبط با فرورانش) است. از نظر درجه هوازدگی شیمیایی و بلوغ رسوبی در ناحیه منشأ، مقادیر CIA این سنگ‌ها در محدوده دگرسانی با درجه بالا بوده و اکثر نمونه‌ها دارای مقادیر CIW بالای ۹۰ هستند که با مقادیر شیل‌های آرکئن تطابق دارد. علاوه بر این، مقادیر اندیس ICV بین ۰/۶۵ تا ۱/۶۷ متغیر بوده و اکثر نمونه‌ها دارای مقادیر بالای ICV (بالتر از ۰/۸۵) هستند که نشان‌دهنده رسوبات نابالغ، غنی از کانی‌های غیررسی و نهشته‌شده در حاشیه فعال قاره‌ای است.

قدردانی

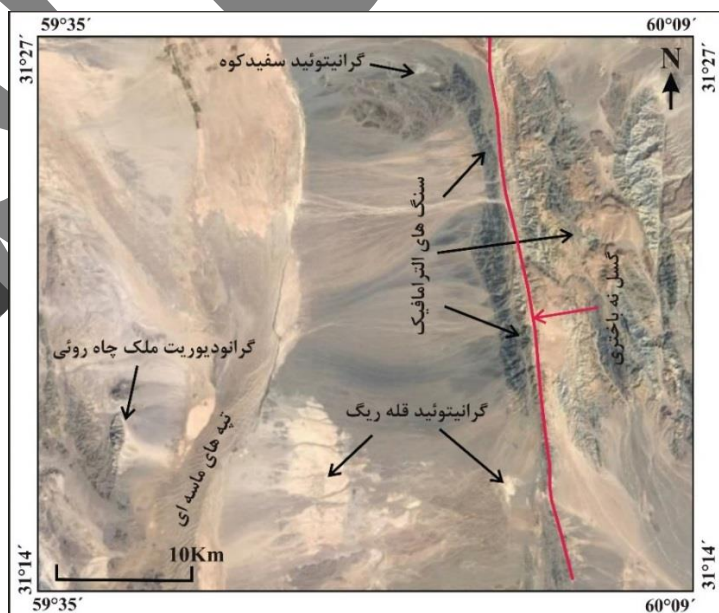
این پژوهش بخشی از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول در دانشگاه لرستان است که با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری این دانشگاه انجام شده است. بدین وسیله، نگارندگان از حمایت های ارزشمند دانشگاه لرستان و همچنین از سردبیر و داوران محترم مجله به دلیل ارائه نظرات و پیشنهادهای سازنده، صمیمانه قدردانی می کنند. همچنین، از آقایان دکتر حبیب الله بیابانگرد، دانشیار دانشگاه سیستان و بلوچستان، و دکتر عبادالله طولابی نژاد، دانش آموخته دکتری دانشگاه لرستان، به خاطر همکاری ارزشمند در نمونه برداری و مطالعات صحرائی، سپاسگزاری می شود.

References

- [1] Toulabi Nejad E., "*Petrology, Geochemistry and Geochronology of granitoid plutons in southwest of Nehbandan, East of Lut block*", Ph.D. thesis, Lorestan university, Khorramabad, Iran, 507p (2021). (In Persian)
- [2] Darvishzadeh A., "*Geology of Iran*", Dissemination of Knowledge Today. Amirkabir Publishing Institute, Tehran, 901p., (1991).
- [3] Eftekharneshad J., "*Division of Different Part of Iran Base on Structural Position in Related to Sedimentary Basins*", Journal of Iranian Petroleum Association 82 (1980), 19-28. (In Persian)
- [4] Saccani E., Delavari M., Beccaluva L., Amini S. A., "*Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan ocean*", Lithos 117 (2010), 209-228.
- [5] Esmaily D., Ne' de'lec A., Valizadeh M.V., Moore F., Cotton J., "*Petrology of the Jurassic Shah-Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization*", Journal of Asian Earth Sciences 25 (2005) 961-980.
- [6] Biabangard H., Najafzadeh Khajoui M., Ahmadi A., "*Mineralogy, geochemistry and origin of Chaharfarsakh intrusive and extrusive rocks, Lut block*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016), 515-530. (In Persian)
- [7] Ghodsi M, R., Boomeri M., Bagheri S., Ishiyama D., Corfu, F., "*Geochemistry, zircon U-Pb age, and tectonic constraints on the Bazman granitoid complex, southeast Iran*", Turkish Journal of Earth Sciences 25 (2016) 311- 340.
- [8] Omidianfar S., Rahgoshay M., Monsef I.; "*Petrography, geochemistry and tectonic setting of Hanar ganitoids (south of Birjand): a signature for magmatism identification of east of Lut block*", Petrological Journal 9 (2018), 55- 78. (In Persian with English Abstract)
- [9] Salati E., Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., Heidarian Shahri M. R., Farmer L., Stern, C., "*Zircon U-Pb geochronology of Sr-Nd isotopes and petrogenesis of I-type reduced granitoids of Keybarkuh (Southwest of Khat)*", Petrological Journal 6 (2015), 139- 160. (In Persian with English Abstract)
- [10] Arjmandzadeh R., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., Santos J.F., Medina J.M., Homam S.M., "*Petrogenesis, Tectonomagmatic Setting and Mineralization Potential of Dehsalm granitoids, Lut block, eastern Iran*", Scientific Quarterly Journal, Geosciences 23 (2013), 49-58. (In Persian with English Abstract)
- [11] Toulabi Nejad E., Ahmadi khalaji A., Biabangard H., Tahmasbi, Z., "*Geochemistry, tectonic setting and petrogenesis of Sefidkuh granitoid rocks and comparison with Shahkuh granitoid, West of Nehbandan, East of Iran*", Journal of New Findings of Applied Geology, 11 (2017) 1-16. (In Persian)
- [12] Ahmadibonakdar S., "*Distribution and petrogenitic application of REE elements in the Biotite-Turmaline Pegmatoid South of Nehbandan*", M.Sc. Thesis, University of Sistan and Baluchestan, (2010). (In Persian)

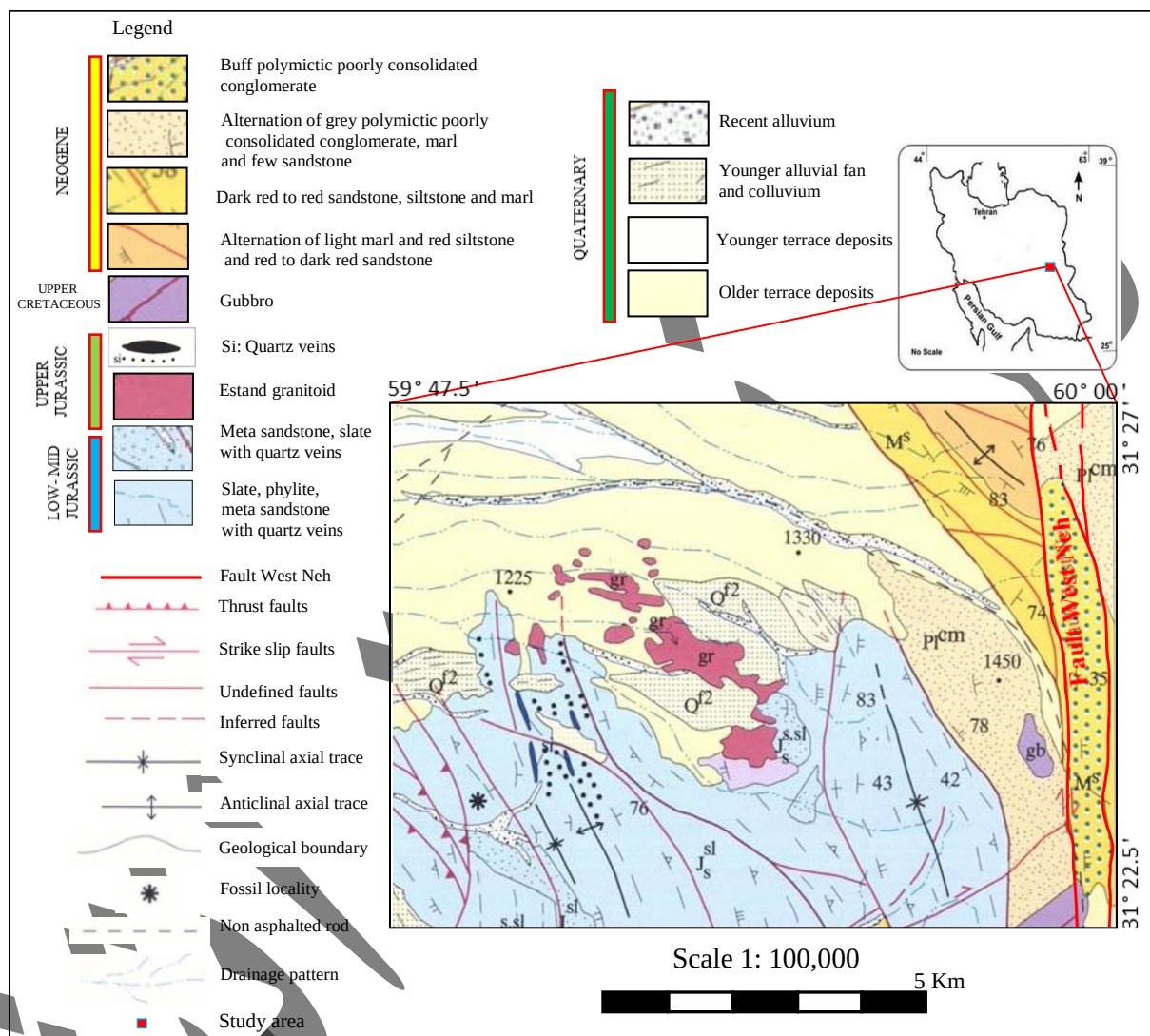
- [13] Toulabi Nejad E., Ahmadi khalaji A., Erahimi M., Biabangard H., Esmaeili R., "*Petrology, geochemistry, source and tectonic setting of Malek Chah Ruii granitoid (East of Lut Block)*", *Petrological Journal* 12 (2021), 63-92. (In Persian with English Abstract)
- [14] Mahmoudi Sh., Masoudi F., Corfu F., Mehrabi B., "*Magmatic and metamorphic history of the Deh-Salm metamorphic Complex, Eastern Lut block, (Eastern Iran), from U–Pb geochronology*", *International Journal of Earth Sciences* 99 (2010), 1153-1165.
- [15] Bröcker M., Fotoohi Rad Gh., Abbaslu F., Rodionov N., "*Geochronology of high-grade metamorphic rocks from the Anjul area, Lut block, eastern Iran Cretaceous*", *Journal of Asian Earth Sciences* 82 (2014), 151-162
- [16] Jentzer M., Agard P., Bonnet G., Monié P., Fournier M., Whitechurch H., Omrani J., Khatib M.M., Kohansal R., Couto D.D., Godbillot C., Ninkabou D., "*The North Sistan orogen (Eastern Iran): Tectono-metamorphic evolution and significance within the Tethyan realm*", *Gondwana Research* 109 (2022), 460-492.
- [17] Naderi Meighan N., Akrami M. A., "*Geological map of Chahdashi*", scale 1/100000, Geological Survey of Iran, (2006).
- [18] McLennan S.M., "*Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust*", *Geochemistry Geophysics Geosystems* 2 (2001) 1021.
- [19] Harker A., "*The Natural History of Igneous Rocks*" Methuen and Co., London, 344 p., (1909).
- [20] Nakamura, N., "*Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na, and K in carbonaceous and ordinary chondrites*", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38 (1974) 757-775.
- [21] Sun, S.S., and McDonough, W.F., "*Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In Magmatism in the ocean basins (eds. A.D. Saunders and M.J. Norry)*", Geological Society of London, London, United Kingdom, pp. 313-345, (1989).
- [22] Wilson M., "*Igneous Petrogenesis, A global tectonic approach*", Unwin Hyman, London, 466p, (1989).
- [23] Rollinson H., "*Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*", Longman: Harlow, (1993).
- [24] Nagudi B., Koeberl C., Kurat G., "*Petrography and geochemistry of the Singo granite, Uganda, and implications for its origin*", *Journal of African Earth Sciences* 36 (2003) 73-87.
- [25] Irber W., "*The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites*", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63 (1999), 489-508.
- [26] Arsalan M., Aslan Z., "*Mineralogy, Petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey*", *Journal of Asian Earth Sciences* 27 (2006) 177-193.
- [27] Rogers G., Hawkesworth C.J., "*A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge*", *Earth and Planetary Science Letters* 91 (1989) 271–285.
- [28] Sajona F.G., Maury R.C., Bellon H., Cotton J., Defant M., "*High field strength elements of Pliocene-Pleistocene island-arc basalts Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines)*", *Journal of Petrology* 37 (1996) 693–726.
- [29] Werner C.D., "*Saxonian granulites-igneous or lithoigneous: a contribution to the geochemical diagnosis of the original rock in high-metamorphic complexes. Zfl-Mitteilungen*", 133 (1987) 221-250.
- [30] Winkler H.G.F., "*Abolition of metamorphic facies*", *Fortress Minerals* 47 (1970) 84-105.
- [31] Barker A. J., "*Introduction to metamorphic textures and micro structures*", Balckie & Son LTD., 162p. (1991).
- [32] Hyndman D.W., "*Petrology of igneous and metamorphic rock*", Mc Graw-Hill New York, 786pp, (1985).
- [33] Herron, M.M., "*Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data*", *Journal of Sedimentary Petrology* 58 (1988) 820-829.
- [34] Garcia D., Fonteilles M., Moutte J., "*Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr and the genesis of strongly peraluminous granites*", *Journal of Geology* 102 (1994) 411-322.
- [35] De La Roche H., "*Sur l'existence de plusieurs facies geochimiques dans les schistes paleozoiques des Pyrenees Luchonnaises*", *Geologische Rundschau* 55 (1966) 274-300.

- [36] Garrels R.M., Mackenzie F.T., "Evolution of sedimentary rocks", W. W. Norton, New York, (1972).
- [37] Nesbitt H.W., Young G.M., "Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48 (1984) 1523-1534.
- [38] Vergara M., Levi B., Nystrom J.O., Cancino A., "Jurassic and Early Cretaceous Island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coat Range of central Chile", *Geology Society of American Bulletin* 107 (1995) 1427-1440.
- [39] Condie K.C., "Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales", *Chemical Geology* 104 (1993) 1-37.
- [40] Long X., Sun M., Yuan C., Xiao W., Cai K., "Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Itai; Implications for its tectonic evolution", *Sedimentary Geology* 208 (2008) 88-100.
- [41] Middelburg J.J., Van Der Weijden C.H., Woittiez J.R.W., "Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks", *Chemical Geology* 68 (1988) 253-273.
- [42] Roser B.P., Korsch R.J., "Discrimination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio", *Journal of Geology* 94 (1986) 635-650.
- [43] Maynard J.B., Valloni, R., Yu H., "Composition of modern deep-sea sands from arc-related basin", *Geology Society of London, Special Publication* 10 (1982) 551-561.
- [44] Cullers R. L., Bock B., Guidotti C., "Elemental distributions and neodymium isotopic compositions of Silurian metasediments, western Maine, USA: Redistribution of the rare earth elements", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61 (1997) 1847-1861.
- [45] Meres S., "Major, trace element and REE geochemistry of metamorphosed sedimentary rocks from the Malé Karpaty Mts. (Western Carpathians, Slovak Republic): Implications for sedimentary and metamorphic processes", *Slovak Geological Magazine* 11 (2005) 107-122.

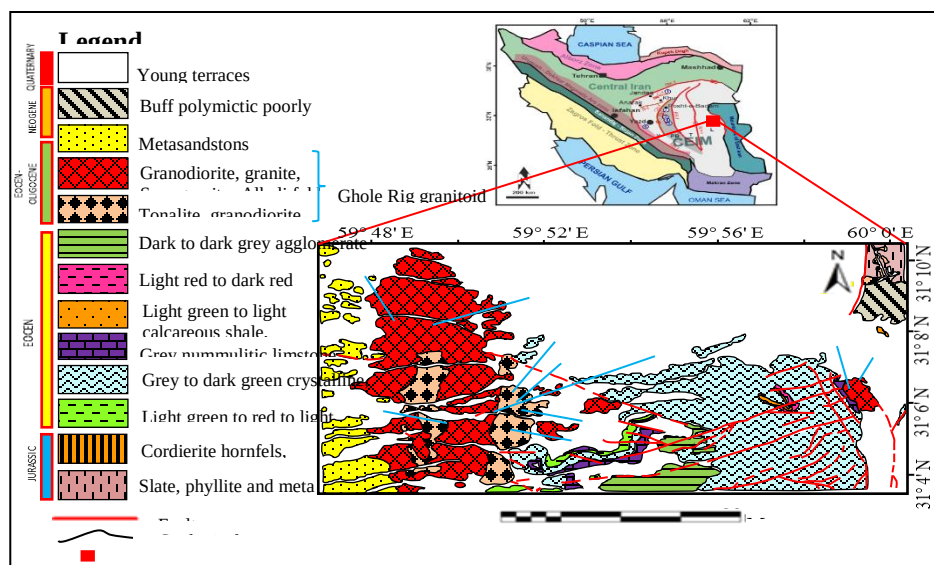


شکل ۱: تصویر ماهواره‌ای از موقعیت توده‌های گرانیتوئیدی سفیدکوه، قله‌ریگ و ملک چاه‌روئی با سنگ‌های دگرگونی پیرامون آن‌ها (گرفته‌شده

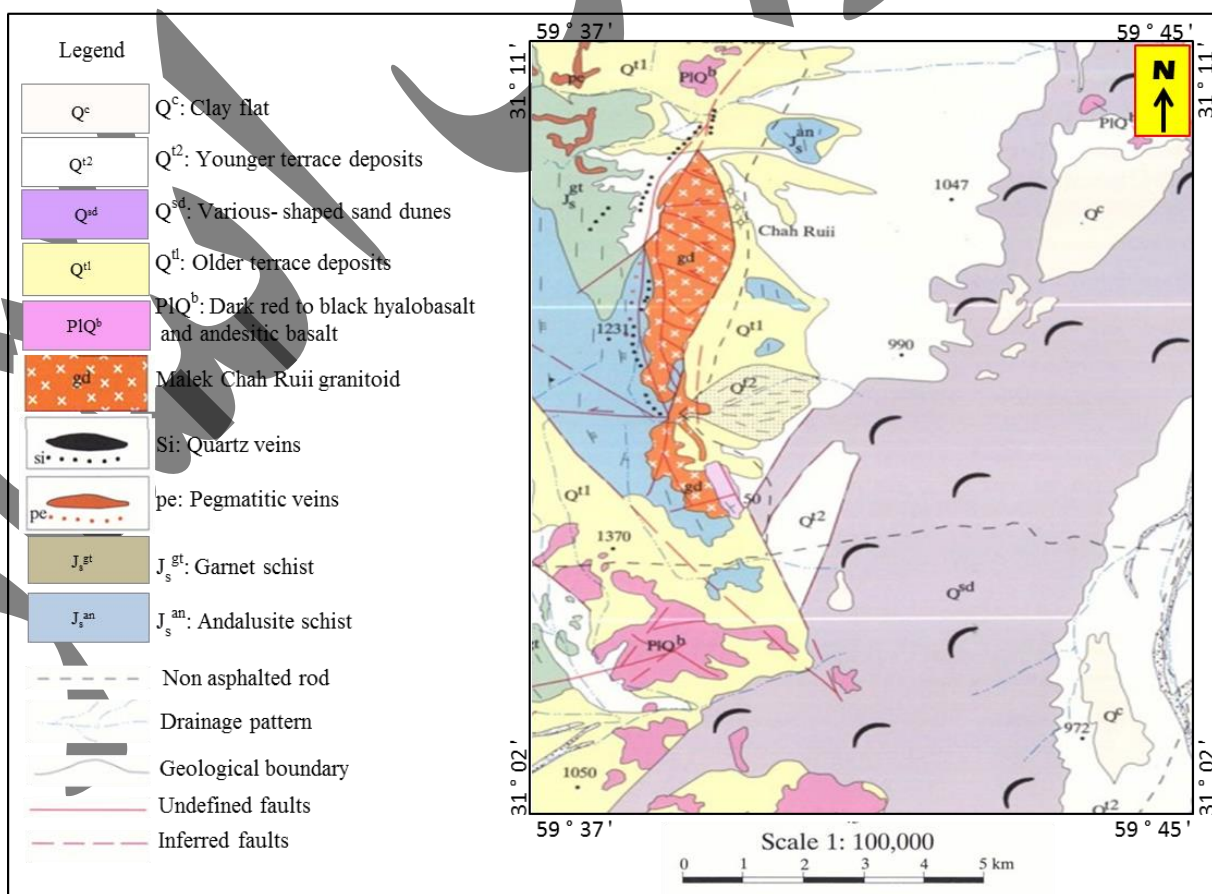
از [۱۸]).



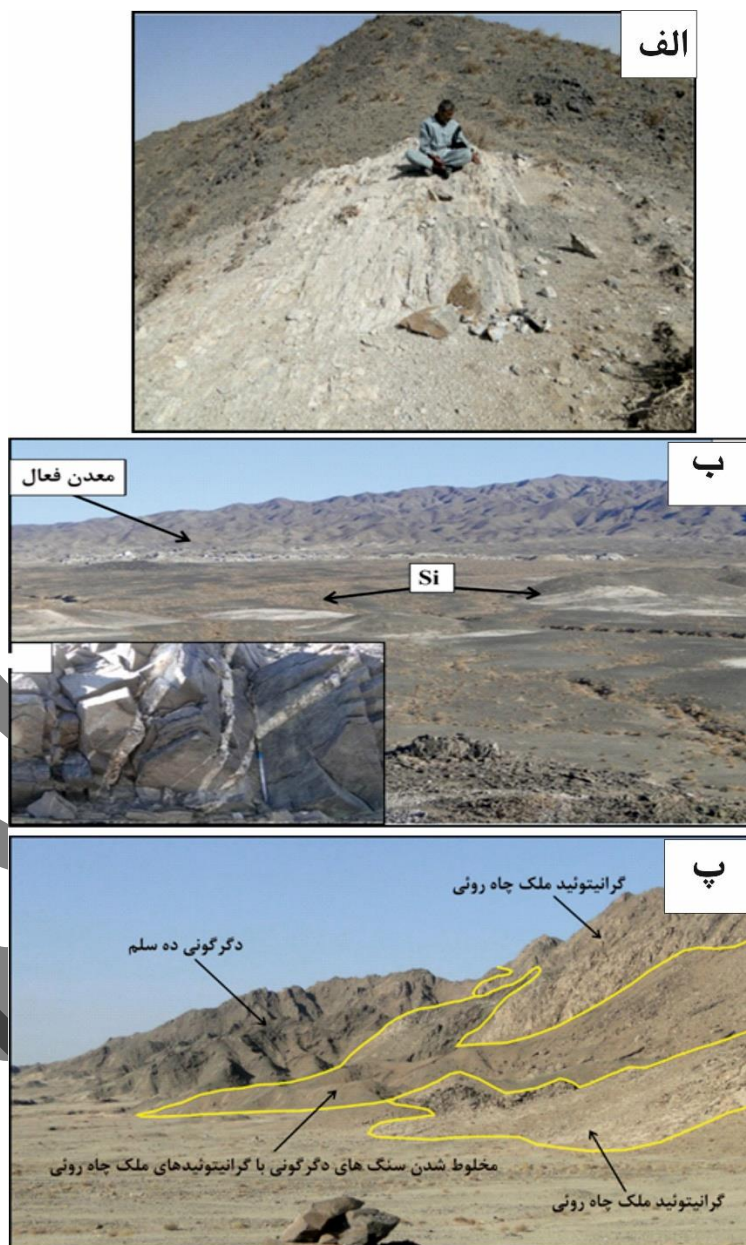
شکل ۲: بخشی از نقشه ساده شده زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ چاه داشی [۱۷] که در آن سنگ های دگرگونی پیرامون توده گرانیتوئیدی سفیدکوه مشخص شده است.



شکل ۳: بخشی از نقشه ساده شده زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ چاهدashi [۱۷] که در آن سنگ های دگرگونی پیرامون توده گرانیتوئیدی قله ریگ مشخص شده است.

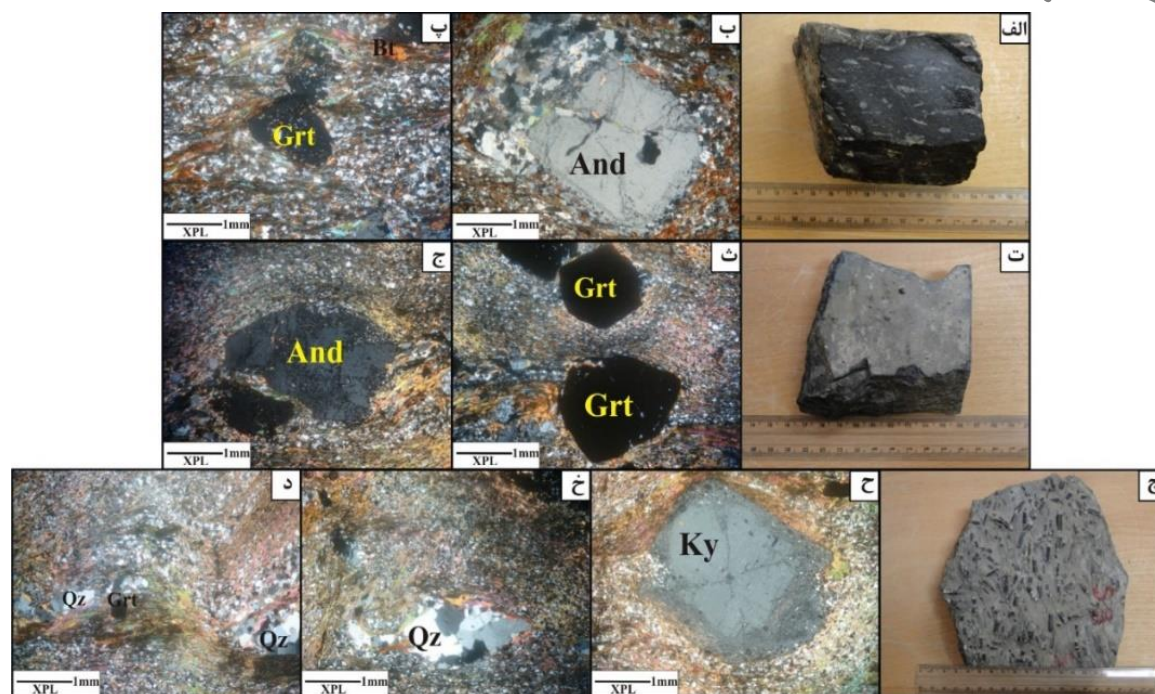


شکل ۴: بخشی از نقشه ساده شده زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ چاه‌داشی [۱۷] که در آن سنگ‌های دگرگونی پیرامون توده گرانیتوئیدی ملک چاه‌روئی مشخص شده است.

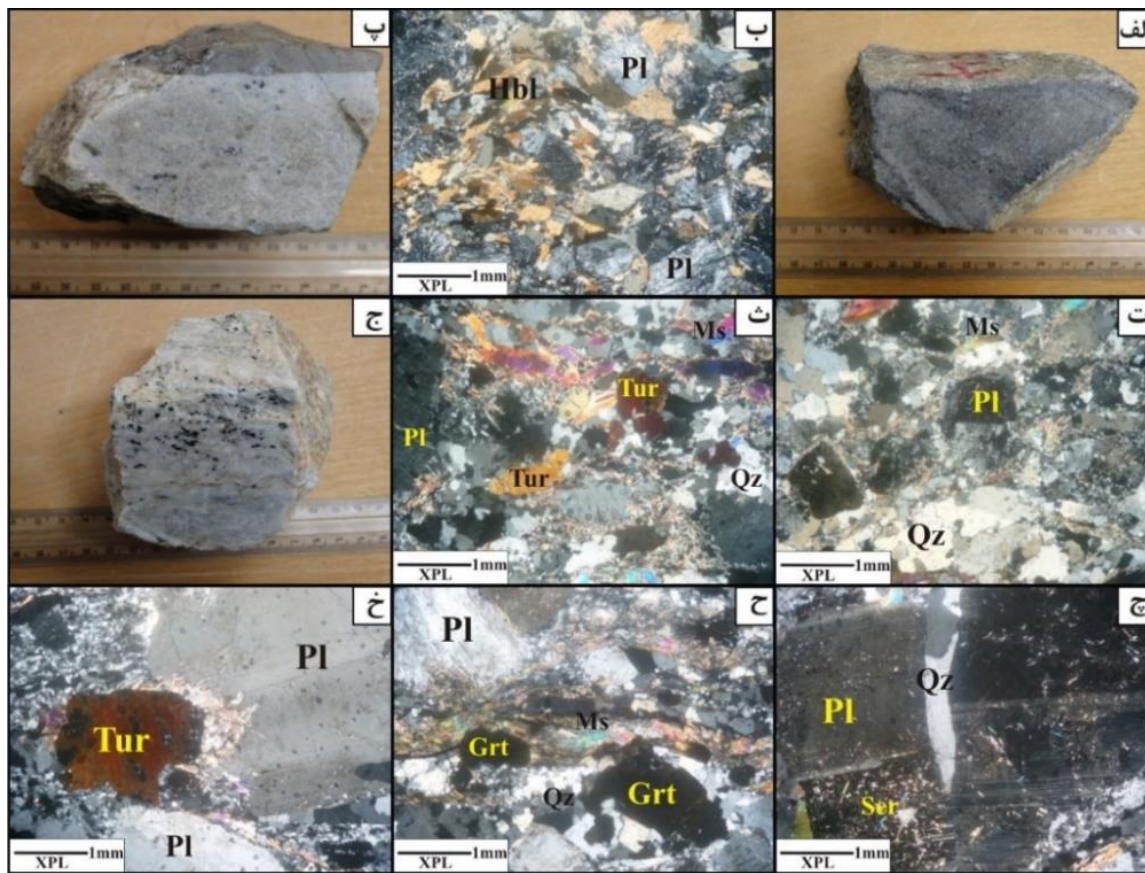


شکل ۵: تصاویر صحرایی از سنگ‌های دگرگونی جنوب غربی نهبندان [۱۸]. الف- دگرگونی‌های پیرامون توده گرانیتوئیدی سفیدکوه شامل گرانیت گنایس با رنگ روشن در جلوی تصویر و آندالوزیت شایسته‌ها با رنگ تیره در انتهای آن؛ ب- نمایی از رگه‌های سیلیسی که سنگ‌های دگرگونی (Jss1) را قطع کرده‌اند. در وسط تصویر معدن فعال و در انتهای آن هورنفلس‌ها دیده می‌شوند (دید به سمت شمال شرقی). همچنین

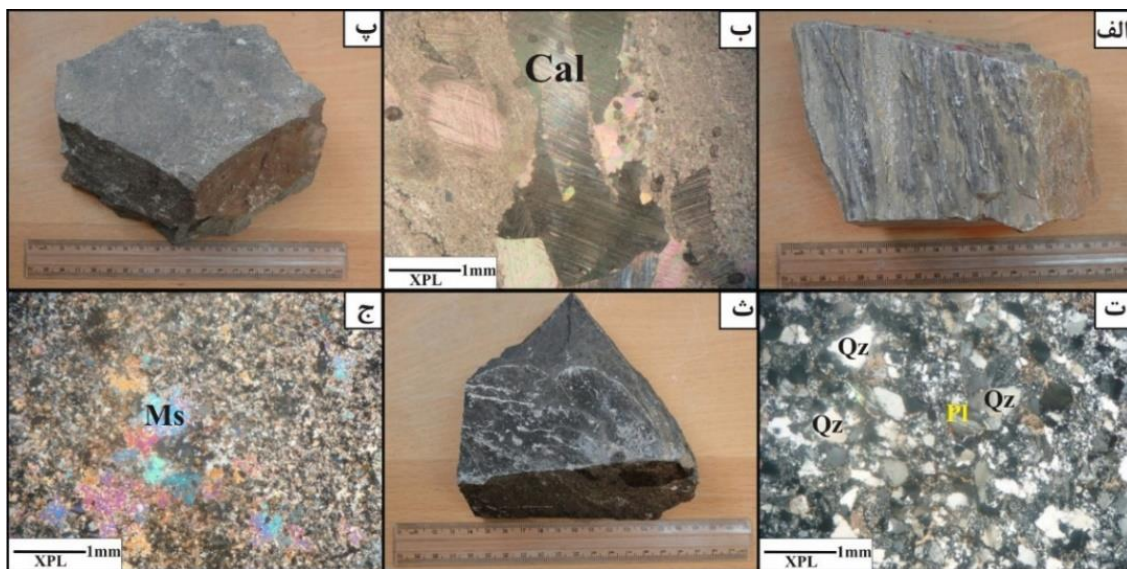
در پایین گوشه سمت چپ تصویر، نمای نزدیک از رگه‌های سیلیسی مشاهده می‌شود؛ پ- دگرگونی‌های پیرامون توده گرانیتوئیدی ملک چاه‌رویی شامل دگرگونی‌های ده‌سلم مخلوط با گرانیتوئید ملک چاه‌روئی در جنوب توده (دید به سمت جنوب‌غربی).



شکل ۶. Error! No text of specified style in document. تصاویر نمونه دستی و میکروسکوپی از گارنت- آندالوزیت‌شلیست، آندالوزیت- گارنت‌شلیست و آندالوزیت‌شلیست پیرامون گرانیتوئید سفیدکوه [۱۸]؛ الف: نمونه دستی گارنت- آندالوزیت‌شلیست؛ ب و پ: تصاویر میکروسکوپی گارنت- آندالوزیت‌شلیست حاوی پورفایروبلست‌های آندالوزیت و گارنت همراه با منطقه سایه‌فشاری؛ ت: نمونه دستی آندالوزیت- گارنت‌شلیست. ث و ج: تصاویر میکروسکوپی آندالوزیت- گارنت‌شلیست حاوی پورفایروبلست‌های گارنت و آندالوزیت در زمینه‌ای جهت‌یافته از کانی‌های میکا و کوارتز؛ چ: نمونه دستی آندالوزیت‌شلیست ح: تصویر میکروسکوپی آندالوزیت‌شلیست حاوی پورفایروبلست کیاستولیت با ماکل‌های ضربدری که ناشی از تمرکز ادخال‌های ذغالی (گرافیت) در امتداد سطوح بلوری است؛ خ: تجمع کانی‌های کوارتز به شکل ماهی د: کانی گارنت همراه با تناوب شلیستوزیته و خمیدگی.



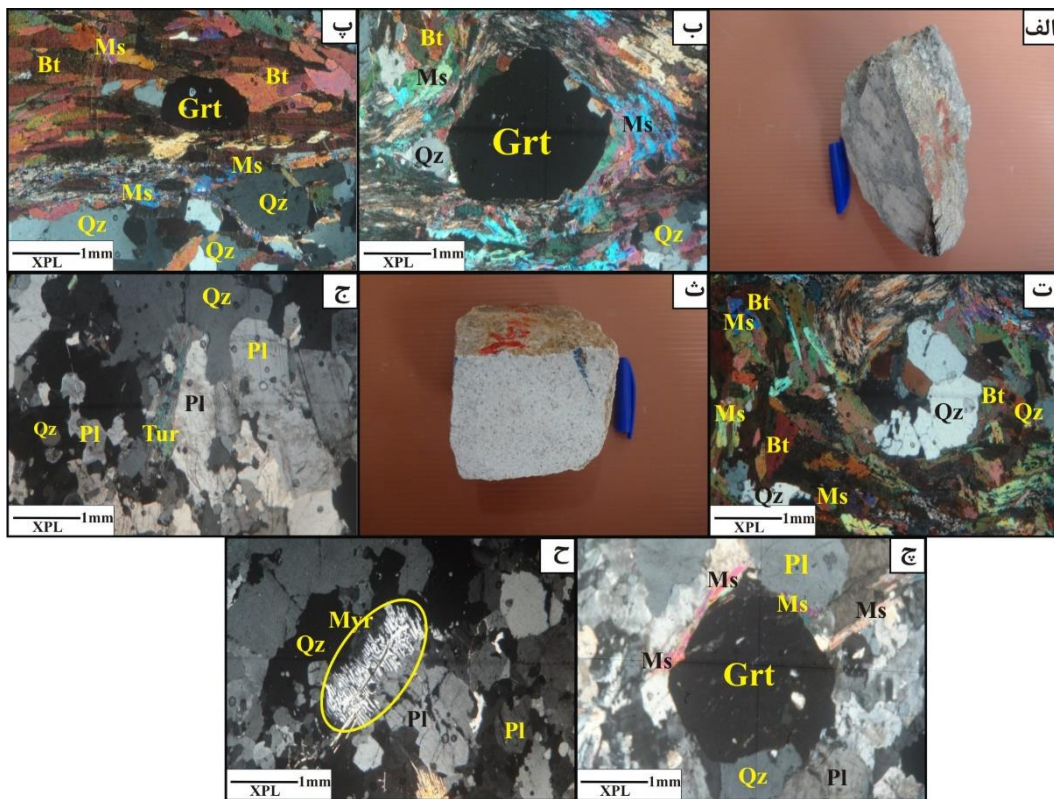
شکل ۷: تصاویر نمونه دستی و میکروسکوپی از آمفیبولیت، گنایس و گرانیت گنایس پیرامون گرانیتوئید سفیدکوه [۱]: الف: تصویر نمونه دستی آمفیبولیت ب: تصویر میکروسکوپی آمفیبولیت حاوی پلاژیوکلاز و هورنبلند؛ پ: نمونه دستی گنایس. ت: تصویر میکروسکوپی گنایس حاوی پلاژیوکلاز با منطقه‌بندی همراه با ماکل‌های صفحه‌شطرنجی و موسکوویت؛ ث: تورمالین و موسکوویت با شکل ماهی‌مانند، ج: تصویر نمونه دستی گرانیت گنایس؛ چ: تصویر میکروسکوپی گرانیت گنایس‌های حاوی پلاژیوکلاز با ماکل‌های تکراری، سریسیتی‌شده و دارای شکستگی‌های پر شده از کوارتز؛ ح: پورفیروبلست‌های گارنت و بافت نواری؛ خ: درشت‌بلور نسبتاً خودشکل تورمالین.



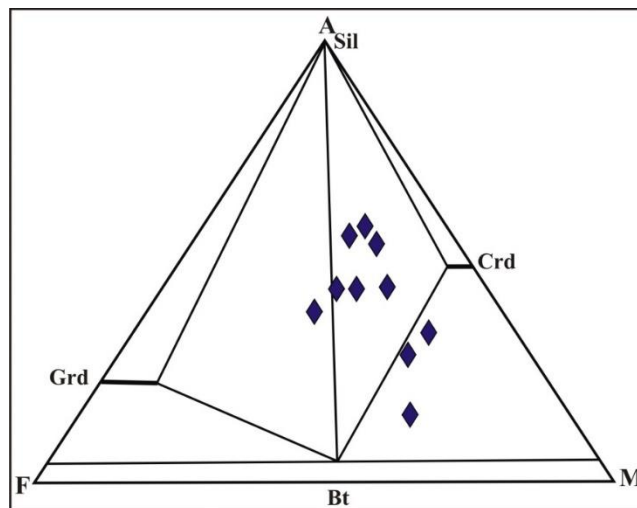
شکل ۸: تصاویر نمونه دستی و میکروسکوپی از کالک‌شیست، ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده و هورنفلس‌های پیرامون گرانیتوئیدهای سفیدکوه [۱]:
 الف: تصویر نمونه دستی کالک‌شیست؛ ب: تصویر میکروسکوپی کالک‌شیست حاوی کلسیت؛ پ: تصویر نمونه دستی ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده؛
 ت: تصویر میکروسکوپی ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده با بافت گرانوبلاستیک حاوی کوارتز و پلاژیوکلاز؛ ث: تصویر نمونه دستی هورنفلس‌ها؛ ج:
 تصویر میکروسکوپی هورنفلس‌های سفیدکوه با بافت گرانوبلاستیک حاوی موسکوویت و کوارتز.



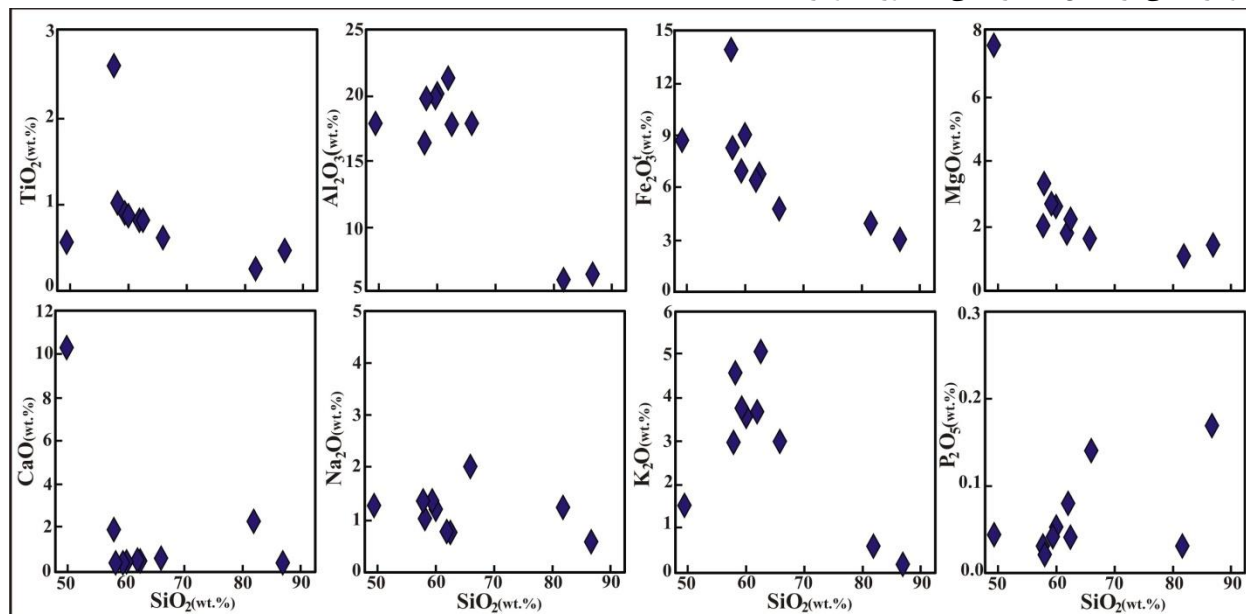
شکل ۹: الف: تصویر نمونه دستی ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده در غرب گرانیتوئید قله‌ریگ [۱]؛ ب: تصویر میکروسکوپی ماسه‌سنگ‌های
 دگرگون‌شده پیرامون گرانیتوئید قله‌ریگ با بافت گرانوبلاستیک غنی از کوارتز [۱].



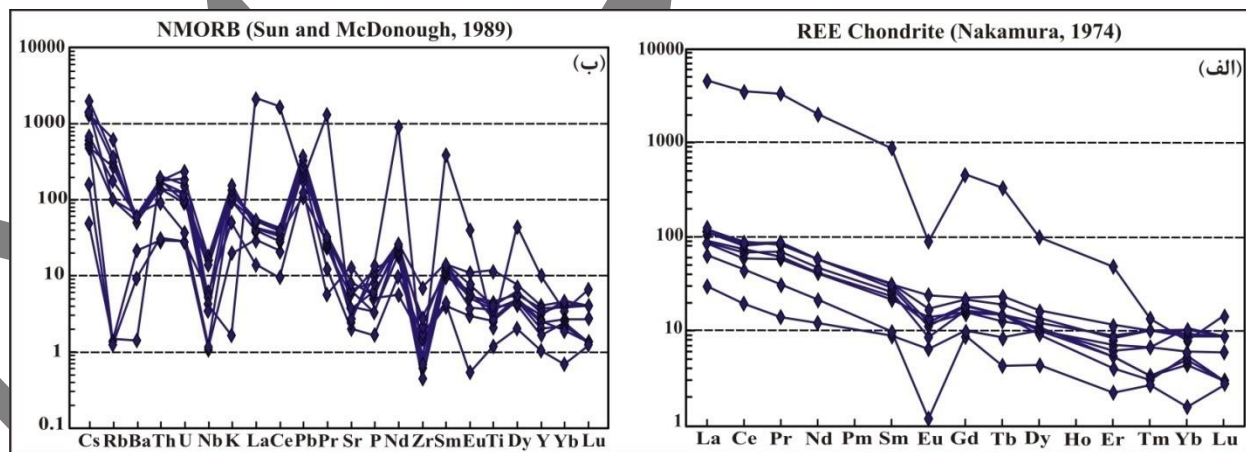
شکل ۱۰: تصاویر نمونه دستی و میکروسکوپی از گارنت-میکاشیست و گرانیت‌های روشن نواری پیرامون گرانیتوئید ملک چاهروئی [۸]: الف: نمونه دستی گارنت-میکاشیست؛ ب، پ: کانی‌های کوارتز، گارنت، بیوتیت و موسکوویت که به این سنگ‌ها بافت نواری و منطقه سایه‌فشاری داده‌اند؛ ت: درشت‌بلورهای کوارتز همراه با کانی‌های بیوتیت و موسکوویت؛ ث: نمونه دستی گرانیت‌های روشن نواری؛ ج: کوارتز و پلاژیوکلاز همراه با کانی تورمالین؛ ح: کوارتز و موسکوویت همراه با کانی گارنت؛ ح: پلاژیوکلاز و کوارتز با تشکیل بافت میرمیکیتی



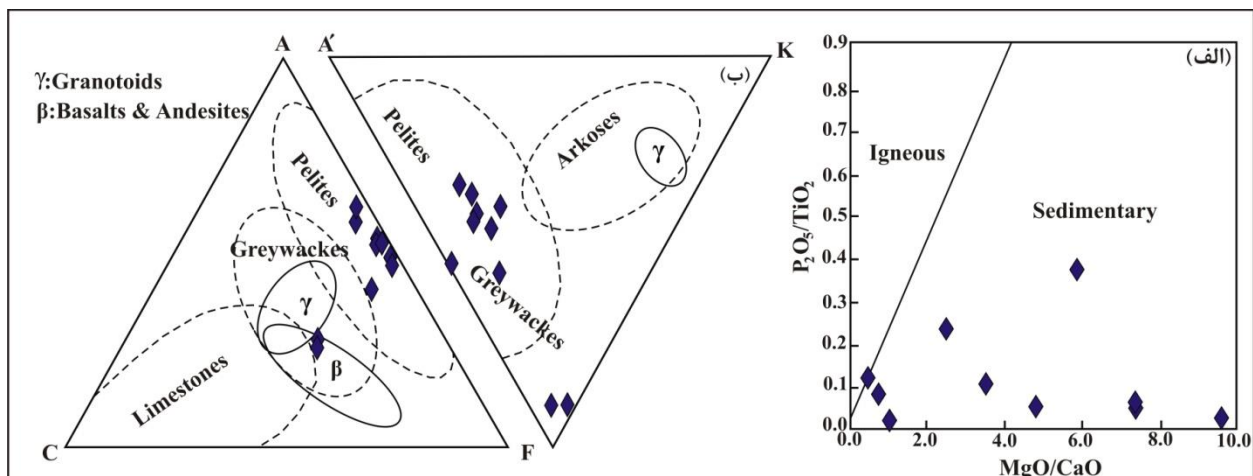
شکل ۱۱: نمودار AFM، ترکیب پارازنز کانیاپی سنگ‌های دگرگونی منطقه‌ی مورد مطالعه را در مثلث Crd-Sil-Bt نشان می‌دهد. ضلع‌های نمودار مثلثی بر اساس عناصر اصلی به صورت مولار ($A=[Al_2O_3]-3[K_2O]$; $F=[FeO]-[TiO_2]-[Fe_2O_3]$; $M=[MgO]$) هستند.



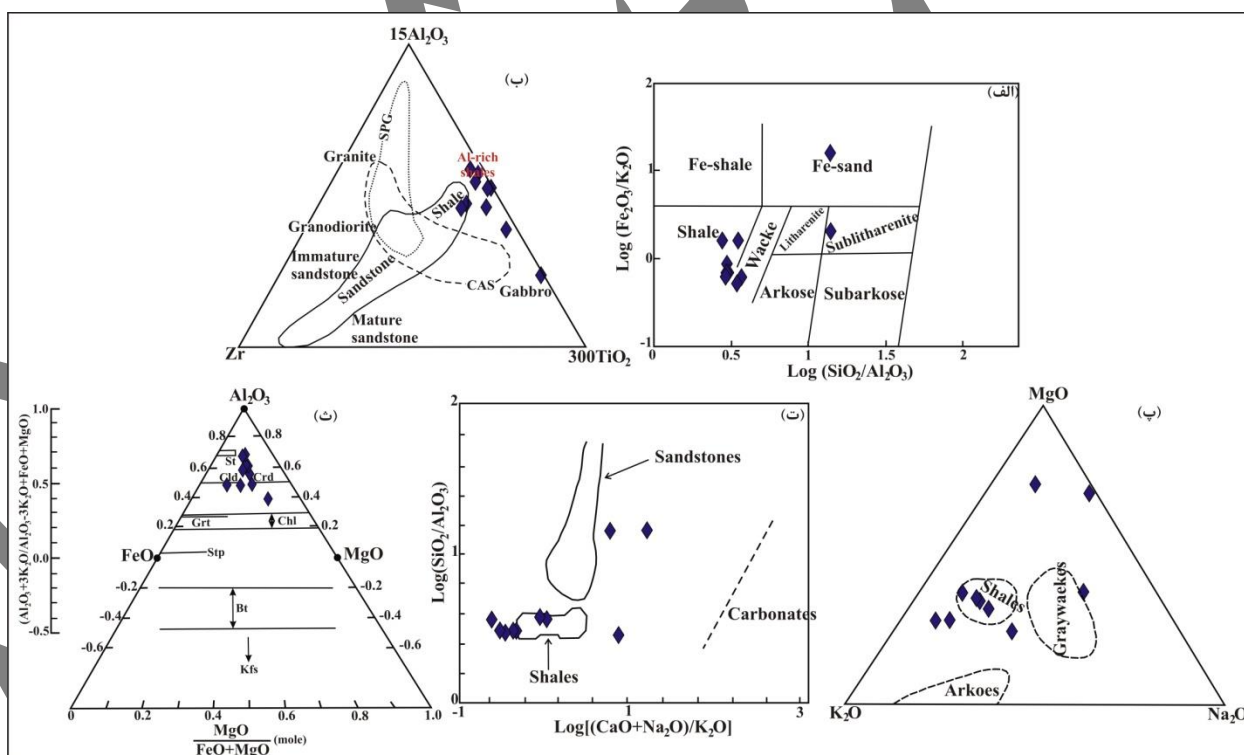
شکل ۱۲: نمودار تغییرات اکسیدهای عناصر اصلی در برابر SiO_2 [۱۹].



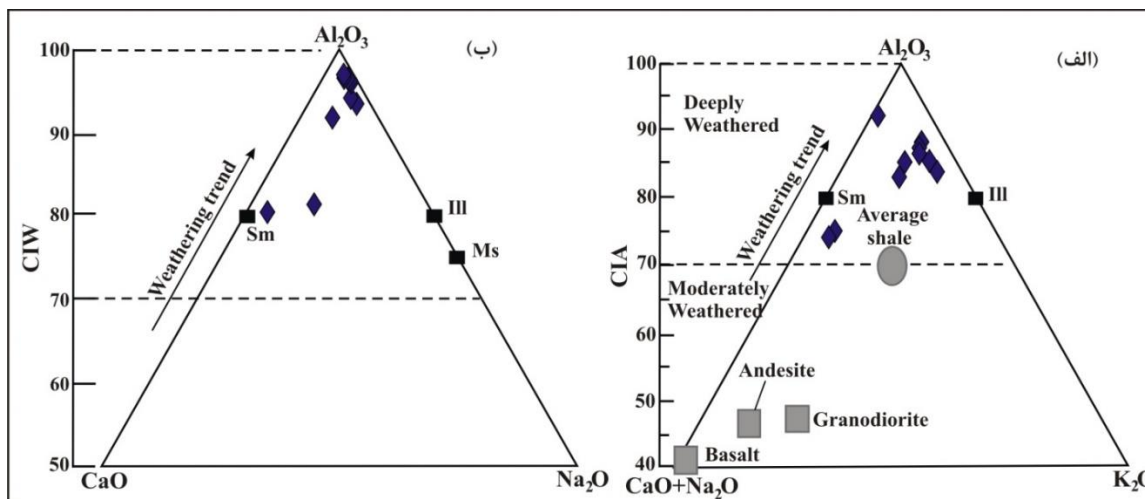
شکل ۱۳: الف: نمودار عناصر نادر خاکی (REE) نمونه‌های مورد مطالعه نرمالیز شده نسبت به کندریت [۲۰]؛ ب: نمودار عنکبوتی چند عنصری بهنجار شده نسبت به NMORB [۲۱].



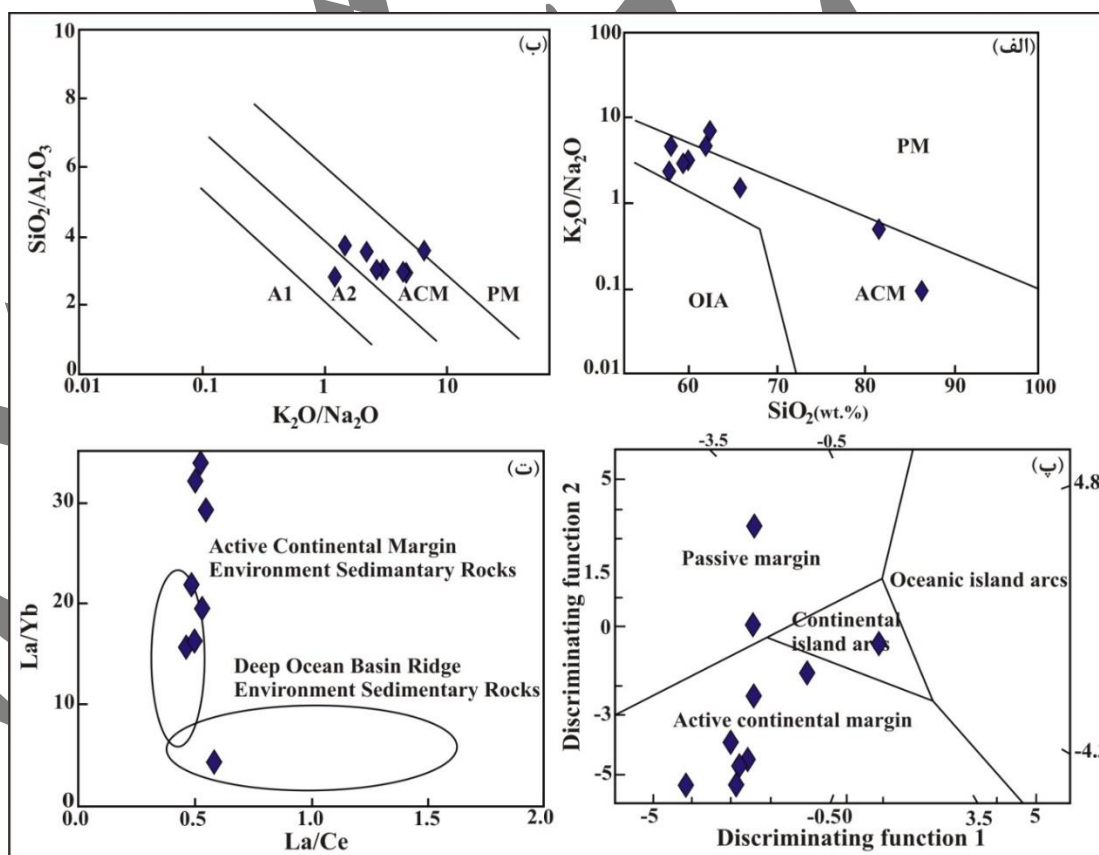
شکل ۱۴: الف: نمودار تفکیک منشأ اولیه آذرین و رسوبی سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه [۲۹]؛ ب: نمایش سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه در نمودارهای ACF و A'FK [۳۰] برای تعیین سنگ اولیه آن‌ها $C = [CaO - 3.3P_2O_5]$, $A = [(Al_2O_3 + Fe_2O_3) - (K_2O + Na_2O)]$, $F = [MgO + FeO + MnO]$, $A' = [(Al_2O_3 + Fe_2O_3) - (K_2O + Na_2O + CaO)]$, $K = [K_2O]$



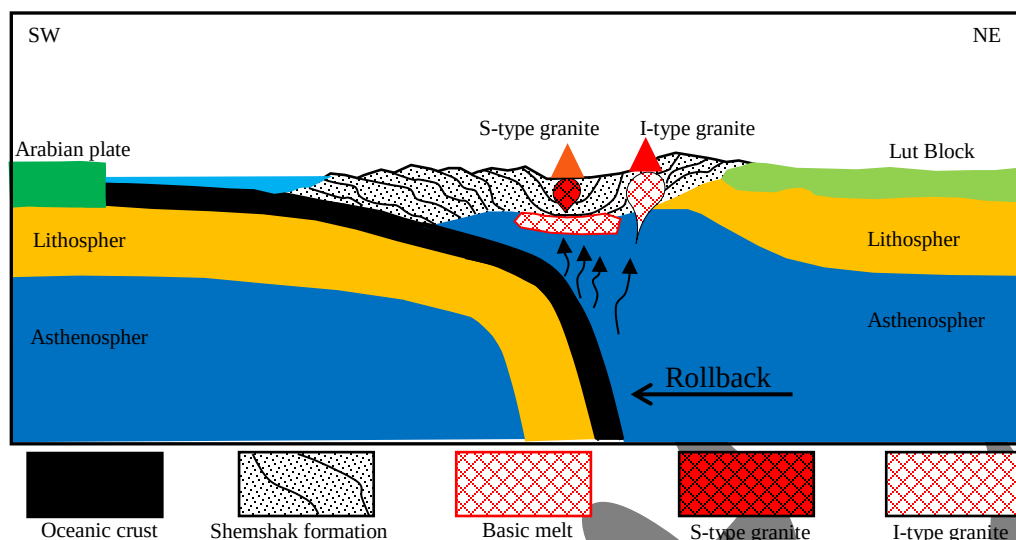
شکل ۱۵: تعیین ترکیب سنگ رسوب اولیه سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه با استفاده از نمودارهای، الف: نمودار لگاریتمی Fe_2O_3/K_2O در برابر SiO_2/Al_2O_3 [۳۳]؛ ب: نمودار مثلثی $Zr-15*Al_2O_3-TiO_2*300$ [۳۴]؛ پ: نمودار مثلثی MgO, K_2O, Na_2O [۳۵]؛ ت: نمودار لگاریتمی SiO_2/Al_2O_3 در برابر $(CaO+Na_2O)/K_2O$ [۳۶] و ث: نمودار مثلثی $(FeO-Al_2O_3-MgO)$ AFM



شکل ۱۶: ارزیابی درجه هوازدگی شیمیایی سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه با استفاده از: الف: نمودار مثلثی ACNK [۳۷ و ۳۸]؛ ب: نمودار مثلثی ACN.



شکل ۱۷: تفکیک محیط زمین‌ساختی سنگ‌مادر رسوبی سنگ‌های دگرگونی جنوب‌غربی نهندان با استفاده از نمودارهای: الف: K_2O/Na_2O در برابر SiO_2 [۴۲]؛ ب: SiO_2/Al_2O_3 در برابر K_2O/Na_2O [۴۳]؛ پ: نمودار DF2 در برابر DF1؛ ت: نمودار La/Yb در برابر La/Ce [۴۵]، که نمونه‌های مورد مطالعه، محدوده حاشیه فعال قاره‌ای را نشان می‌دهند.



شکل ۱۸: مدل پیشنهادی برای جایگیری توده‌های گرانیتوئیدی جنوب‌غربی نهندان در سازند شمشک [۱] و بوجود آمدن سنگ‌های دگرگونی مورد مطالعه.

جدول ۱: نتایج آنالیز ذوب قلیایی برای عناصر اصلی (wt%) و ICP-MS برای عناصر کمیاب (ppm) سنگ‌های دگرگونی جنوب‌غربی نهندان.

Samples	MD-1	MD-2	S1	S2	S4	S50	SS12	SS16	SS17	SS34
Wt%										
SiO ₂	62.52	66.03	62.01	57.77	49.29	59.9	58.09	81.82	59.44	86.74
TiO ₂	0.79	0.61	0.80	2.59	0.56	0.86	1.02	0.26	0.89	0.46
Al ₂ O ₃	17.86	17.90	21.4	16.34	17.84	20.16	19.65	5.89	19.82	6.22
Fe ₂ O ₃ ^t	6.68	4.76	6.49	13.79	8.59	8.95	8.22	3.84	6.87	2.89
MgO	2.22	1.58	1.77	1.97	7.60	2.59	3.28	1.09	2.67	1.41
MnO	0.07	0.07	0.11	0.06	0.17	0.17	0.13	0.08	0.11	0.04
CaO	0.46	0.63	0.50	1.90	10.18	0.35	0.34	2.26	0.36	0.24
Na ₂ O	0.76	2.02	0.79	1.33	1.26	1.19	1.03	1.24	1.35	0.56
K ₂ O	5.03	2.96	3.66	2.97	1.54	3.57	4.56	0.59	3.72	0.05
P ₂ O ₅	0.04	0.14	0.08	0.03	0.045	0.05	0.02	0.03	0.04	0.17
LOI	3.62	3.30	2.39	1.23	2.97	2.26	3.44	2.93	4.72	1.04
Total	100.05	100	100	99.98	100.045	100.05	99.78	100.03	99.99	99.82
ppm										
As	16.40	6.90	38.70	<0.50	7.40	8.90	39.40	7.10	12.20	41.70
Ba	350	364	363	458	152	358	442	67	441	10
Be	3	2.40	1.80	1.70	1	3.90	2.20	0.80	2.70	0.70
Cu	2	18	38	34	4	65	51	42	32	25
Cr	82	79	106	135	113	111	127	108	103	93
Co	15.40	8.30	10.10	27.50	28.60	24.10	29.30	12.20	13.70	5.20

Cs	10.70	4.30	16.40	12.50	5.10	12.10	5.70	1.30	3.90	<0.50
Ce	59	51	70	74	17	77	64	39	75	3050
Cd	0.10	0.20	0.20	0.20	<0.10	0.20	0.20	0.20	0.10	<0.10
Dy	3.60	3.80	3.50	5.70	3.50	3.10	4.20	1.50	4.70	33.80
Eu	0.66	1.09	0.87	1.86	0.5	0.96	0.91	0.09	1.32	6.93
Er	1.40	1.20	1.20	2.60	1.60	0.90	2	0.50	1.90	10.90
Gd	4.56	4.34	5.08	6.21	2.78	5.17	4.32	2.46	5.99	126.57
Hf	2	2	2.40	1.90	2.30	2	2.50	2.10	3.50	2
Li	57	40	62	61	43	89	65	22	43	7
La	29	28	37	37	10	39	30	21	40	1519
Lu	0.20	0.10	0.10	0.30	0.30	0.10	0.30	<0.10	0.30	0.50
Mo	2.70	5.40	6.80	<0.50	2.90	2.80	2.90	10.40	0.70	13.90
Ni	60	61	86	89	41	94	108	110	48	111
Nb	3.80	11.20	12.80	0.90	4.40	2.50	12.90	0.80	9.40	3
Nd	29.80	25.50	36.70	36.80	7.70	36.40	26.10	13.60	36.70	1284.60
Pr	7.84	6.49	9.73	9.79	1.57	9.22	6.96	3.52	9.66	368.39
Pb	8	26	15	20	10	28	19	17	18	13
Rb	409	65	243	64	0.90	207	112	0.80	174	0.95
Sm	5.30	4.40	5.80	6.40	1.80	6.40	4.80	2	6.50	176.80
Sr	77	118.20	60.60	175.80	291.20	137.70	84.50	43.50	139.80	52.50
Sc	16.1	12.1	16.6	21.7	39.9	19.1	17.3	4.3	20	7.9
Ta	1.10	2.40	1.60	0.40	2	0.60	1.70	0.50	1.40	0.50
Tb	0.70	0.60	0.70	1.10	0.40	0.70	0.70	0.20	0.90	15.60
Th	15.20	12.10	15.10	8	2.50	14.90	12	2.70	15.40	17.80
Tm	0.20	0.10	0.10	0.30	0.20	<0.10	0.30	<0.10	0.30	0.40
U	5.30	2.60	4.10	0.80	0.60	2.60	1.90	0.60	2	3.40
V	143	110	159	68	384	168	177	39	174	33
W	<1	2.30	1.30	<1	<1	<1	<1	<1	1.10	<1
Y	11.20	11.60	9.40	18.80	13.90	7.60	17.40	4.80	15.30	45.20
Yb	1.33	0.96	1.09	2.28	2.36	1.21	1.93	0.34	2.05	1.73
Zr	5	5	25	7	17	10	33	19	81	8

جدول ۲: اندیس‌های هوازدگی، دگرسانی و فرمول‌های محاسباتی مربوطه.

Sample ID	MD-1	MD-2	S1	S2	S4	S50	SS12	SS16	SS17	SS34
CIA ¹	74/80	76/14	81/21	72/49	57/88	79/78	76/82	59/02	78/50	87/98
CIW ²	93/61	87/10	94/31	83/50	60/93	92/90	93/48	62/73	92/06	88/60
ICV ³	0/89	0/70	0/65	1/50	1/67	0/87	0/94	1/58	0/80	0/90

1. CIA= [Al₂O₃/Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O]*100

2. CIW= [Al₂O₃/Al₂O₃+CaO+Na₂O]*100

3. ICV= (Fe₂O₃^t+K₂O+Na₂O+CaO+MgO+TiO₂)/Al₂O₃

Petrology and geochemistry of the metamorphic rocks in the southwest of Nehbandan, East Lut Block

Seyedeh Maryam Hosseini Nejad¹, Zahra Tahmasbi^{*1}, Ahmad Ahmadi-Khalaji¹, Farzaneh Sepahvand¹

1. Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

*E-mail addresses: tahmasebi.z@lu.ac.ir Tel: 06633120619

Abstract

The studied metamorphic rocks occur around the Sefid-kuh, Qaleh -Rig, and Malekchahrooi granitoid plutons in the southwest of Nehbandan. Field and petrographic investigations indicate that these rocks comprise two main groups: regional and contact metamorphic rocks. Primary minerals in the regional metamorphic rocks include andalusite, garnet, plagioclase, biotite, muscovite, quartz, tourmaline, calcite, clay minerals, and opaque minerals, exhibiting porphyroblastic, lepidoblastic, and granoblastic textures. The contact metamorphic rocks display a granular texture and are mainly composed of quartz, chlorite, muscovite, biotite, plagioclase, epidote, and opaque minerals.

Geochemical results reveal that these rocks fall within a range of SiO₂ content from 49.29 to 86.74 wt%, Al₂O₃ from 5.89 to 21.40 wt%, FeO_t from 2.60 to 12.40 wt%, TiO₂ from 0.26 to 2.59 wt%, and MgO from 1.09 to 7.60 wt%. These compositions are consistent with metapelites derived from fine-grained sedimentary sources, particularly shales and greywackes. The relative enrichment of LILE and LREE compared to HREE and HFSE, along with negative anomalies in Nb, Ti, and P, indicates the evolution of these rocks in a subduction setting at an active continental margin. Furthermore, the negative Eu anomaly (Eu/Eu* $\approx$ 0.53) is consistent with the characteristics of calc-alkaline rocks in this setting. High values of CIA and CIW indices suggest intense chemical weathering in the source environment, comparable to values observed in Archean shales. Additionally, high ICV values in most samples indicate immature sediments rich in non-clay minerals, deposited at an active continental margin.

Keywords: *Metapelite, Sedimentary source rock, Shale-greywacke, Active continental margin, Nehbandan, Iran.*