

الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در پهنه‌های دگرسان و کانه‌دار کانسار لخشک (پهنه زمین درز سیستان)

نسیم حیدریان دهکردی^۱، شجاع‌الدین نیرومند^{۲،۳*} و حسینعلی تاج‌الدین^۳

۱. استادیار گروه زمین‌شناسی محیطی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی

۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

چکیده

کانسار لخشک در بخش جنوب‌غربی پهنه زمین‌درز سیستان و در ۲۸ کیلومتری شمال‌غربی زاهدان واقع است. واحدهای سنگی رخنمون یافته شامل توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی و دایک‌های داسیتی-ریولیتی با سن الیگوسن و کالک‌شیست و کوارتز شیست با سن ائوسن هستند که در حد رخساره شیست سبز دگرگون شده‌اند. این مجموعه تحت تأثیر پهنه برشی با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب دگرریخت شده است. ترکیب توده‌های نفوذی براساس نمودارهای سنگ‌شناسی در محدوده گرانودیوریت قرار می‌گیرد. براساس مطالعات پتروگرافی، کانی‌های تشکیل‌دهنده توده‌های نفوذی شامل کوارتز، آلکالی فلدسپات، پلاژیوکلاز، بیوتیت، سربیسیت، مسکویت، اکسیدهای آهن و کلسیت است. از مهم‌ترین انواع دگرسانی‌ها می‌توان به دگرسانی‌های سربیسیتی، سولفیدی، سیلیسی و کربناتی اشاره کرد. بررسی الگوهای پراکندگی عناصر نادر خاکی در نمونه‌های پهنه برشی، نشان‌دهنده غنی‌شدگی REE در بخش‌های مرکزی پهنه برشی (درجات شدید دگرسانی و دگرشکلی) نسبت به واحدهای کمر بالا و کمر پایین (درجات ضعیف دگرسانی و دگرشکلی) پهنه برشی است. الگوی پراکندگی این عناصر شامل غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE است که می‌توان آن را به دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیست سبز و چرخش سیالات CO₂ و SO₄²⁻ در پهنه برشی لخشک نسبت داد. علاوه بر آن، وجود بی‌هنجاری‌های Eu مثبت و منفی در پهنه برشی نشان‌دهنده دو مرحله دگرسانی متفاوت است. دگرسانی ضعیف تا متوسط که به ایجاد بی‌هنجاری Eu مثبت منجر شده است و دگرسانی پیشرفته که سبب تجزیه شدید پلاژیوکلاز به‌عنوان منبع اصلی Eu و بی‌هنجاری Eu منفی شده است.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری Eu، پهنه برشی، عناصر نادر خاکی، لخشک.

مقدمه

مشخصه‌ها، نوع دگرسانی و ویژگی‌های کانی‌زایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. براین اساس، طبقه‌بندی‌های مختلفی برای انواع تیپ کانسارهای طلا ارائه شده است

تقسیم‌بندی انواع کانسارهای طلا با توجه به تنوع زمان، خاستگاه و محیط تکتونیکی، نوع سنگ میزبان،

* نویسنده مرتبط: niroomand@ut.ac.ir

لخشک از نوع کوهزایی و مرتبط با پهنه برشی شکن-شکل پذیر است (حیدریان دهکردی و همکاران، ۱۴۰۱). به‌طور کلی، واکنش سیال-سنگ دیواره در طی تکامل پهنه برشی منجر به رخداد تغییراتی در شیمی عناصر اصلی می‌شود (Robert et al., 1997). بر مبنای نظر رولند و همکاران (Rolland et al., 2003)، تحرک عناصر REE در پهنه‌های برشی نیازمند در نظر گرفتن تعادل کانی‌شناسی میان سیال و کانی‌های سری REE و نقش pH، دما، شرایط اکسایش-کاهش و حضور لیگاندها در سیال است. ته‌نشینی و انحلال کانی‌های REE دار گوناگون در مراحل مختلف تکامل پهنه برشی نشان‌دهنده تغییرات در شیمی سیال طی تکامل این پهنه‌ها است. در این پژوهش جایگاه زمین‌ساختی محدوده، تعیین سری ماگمایی سنگ‌های توده نفوذی و تاثیر دگرسانی و دگرشکلی و جریان سیال بر پایداری REE در طی توسعه پهنه برشی، تحت شرایط دگرگونی در حد رخساره شیست سبز مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

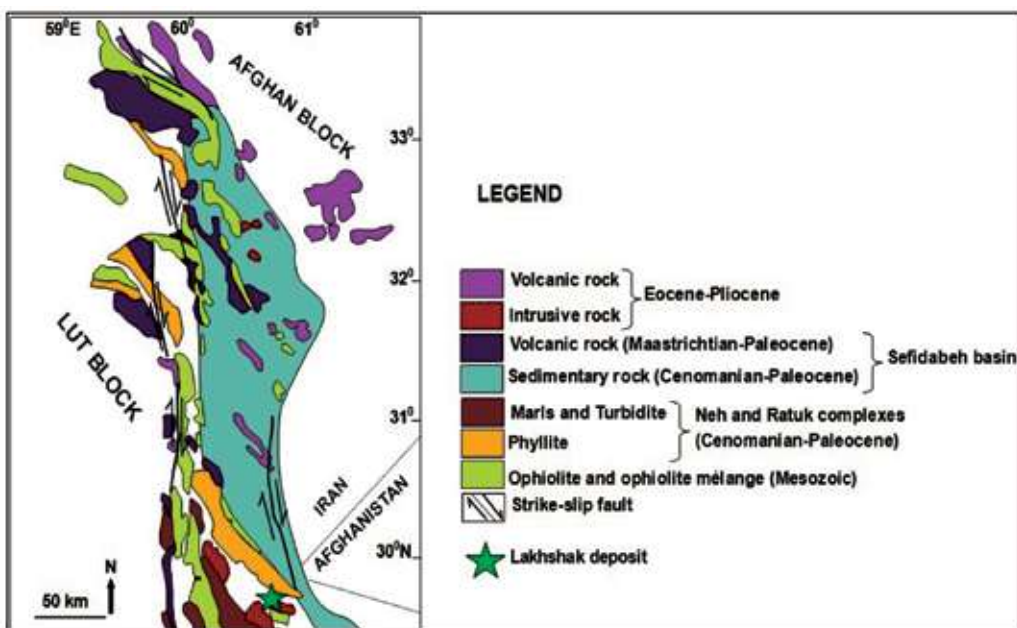
زمین‌شناسی ناحیه‌ای

گستره مورد مطالعه به لحاظ ساختاری در بخش جنوب‌غربی پهنه زمین‌درز سیستان واقع شده است (شکل ۱). این پهنه بخشی از کمربند فلزایی آلپ-همیالیا و یک پهنه فلزایی جوان و مهم واقع در جنوب شرق ایران و بین دو بلوک لوت و افغان است که متشکل از واحدهای فلیشی، افیولیت‌ها، توده‌های گرانیتوئیدی و کانسارهای مهم آنتیموان و طلا-آنتیموان است (شکل ۱). تیروول و همکاران (Tirru et al., 1983)، پهنه زمین‌درز سیستان را متشکل از دو مجموعه افیولیتی رتوک در شرق، نه در غرب و حوضه سفیدابه معرفی کردند (شکل ۱). به دنبال فرورانش و بسته شدن یکی از شاخه‌های اقیانوس نئوتتیس (اقیانوس سیستان) و برخورد صفحه عربی و اوراسیا این پهنه شکل گرفته است. تحولات نئوتتیس به‌صورت فرورانش، دگرگونی ناحیه‌ای، ماگماتیسیم، تکتونیک تصادمی و ایجاد پهنه‌های برشی تظاهر یافته است (Camp and Griffis, 1982). سیستم درزه‌ها، شکستگی‌ها، گسل‌ها، دگرشیمی‌ها و دگرشکلی‌های این پهنه متأثر از حرکات کوهزایی کاتانگایی و

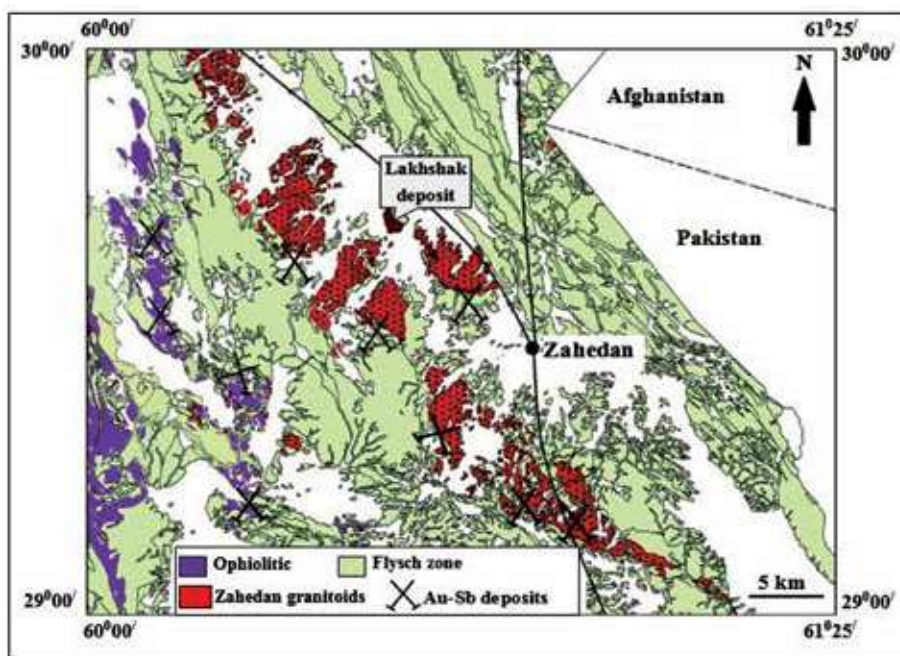
که شاخص‌ترین آنها شامل تقسیم‌بندی رابرت و همکاران (Robert et al., 1997; 2007) و کریچ و همکاران (Kerrich et al., 2000) است. در طبقه‌بندی ارائه شده توسط کریچ و همکاران (Kerrich et al., 2005)، کانسارهای طلا بر مبنای شرایط فیزیکی-شیمیایی سیالات کانه‌زا، نوع کانه‌ها، انواع دگرسانی و عمق شکل‌گیری کانسارها به شش گروه شامل کانسارهای طلا-نقره تیپ اپی‌ترمال، طلای کارلین، طلای تیپ کوهزایی، اکسید آهن-مس-طلا، مس-طلا، پورفیری و سولفید توده‌ای غنی از طلا با میزبان آتشفشانی طبقه‌بندی شدند. در تقسیم‌بندی رابرت و همکاران (Robert et al., 1997; 2007)، کانسارهای طلا را می‌توان به انواع کانسارهای طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی (کانسار طلای همراه با سنگ میزبان رسوبی)، تیپ پلاسری، تیپ کارلین، تیپ سولفید توده‌ای غنی از طلا، طلای مرتبط با توده‌های نفوذی اکسیدان (طلای اپی‌ترمال، پورفیری، اسکارن) و طلای مرتبط با کوهزایی در کمربندهای گرینستونی (طلای کوهزایی) تقسیم کرد. بر مبنای نظرات گلدفارب و همکاران (Goldfarb et al., 2005) و گرووز و همکاران (Groves et al., 1998)، کانسارهای طلای تیپ کوهزایی و مرتبط با پهنه برشی، در مراحل پایانی فاز کوهزایی شکل می‌گیرند. این کانسارها به دنبال فرایندهای دگرشکلی فشارشی به ترافشارشی در حاشیه صفحات همگرا در کوهزایی‌های برخوردی (برخورد صفحات قاره‌ای-قاره‌ای) و افزایشی (برخورد صفحات اقیانوسی-قاره‌ای) شکل گرفته‌اند (Groves et al., 2005). سنگ میزبان در این تیپ از کانسارها در حد رخساره شیست سبز دگرگون شده است. از ویژگی‌های شاخص این کانسارها می‌توان به مجموعه دگرسانی‌های سرپسیتی-کربناتی-سیلیسی و سولفیدی، دگرگونی در حد رخساره شیست سبز، شوری و حجم سولفید پایین، ارتباط با ساختارهای کششی-فشارشی و سیال کانه‌دار غنی از CO₂ اشاره کرد (Goldfarb et al., 2014). با توجه به اینکه این کانسارها در کمربندهای حاشیه فعال قاره‌ای شکل می‌گیرند، پهنه زمین‌درز سیستان میزبان خوبی برای این تیپ از کانسارها می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان داد که کانسار طلای

حاشیه فرورانش قاره‌ای است که می‌تواند پتانسیل میزبانی کانسارهای طلای تیپ کوهزایی را دارا باشد (نیرومند، ۱۳۹۷؛ Heydarihan Dehkordi et al., 2022). لخشک یکی از کانسارهای مهم طلا-آنتیموان است که موقعیت قرارگیری آن به همراه واحدهای فلیشی، افیولیت‌ها و توده‌های گرانیتوئیدی در شکل ۲ ارائه شده است.

سیمین است (Agard et al., 2011). پهنه سیستان یکی از جوان‌ترین پهنه‌های ساختاری ایران است که سنگ‌های قدیمی‌تر از کرتاسه در آن رخمون ندارند (Fotoohi Rad et al., 2005، بومری و همکاران، ۱۳۹۷) و میزبان بسیاری از کانسارهای فلزات پایه و طلا-آنتیموان است. این پهنه از نظر زمین‌شناسی، ساختاری و ژئودینامیکی، منطبق بر



شکل ۱. نقشه موقعیت قرارگیری بلوک‌های قاره‌ای و زیرشاخه‌های پهنه زمین‌دز سیستان شامل مجموعه برافزایشی رتوک، نه و رسوبات حوضه سفیدابه (modified after Tirrul et al., 1983. Fotoohi Rad et al., 2009)

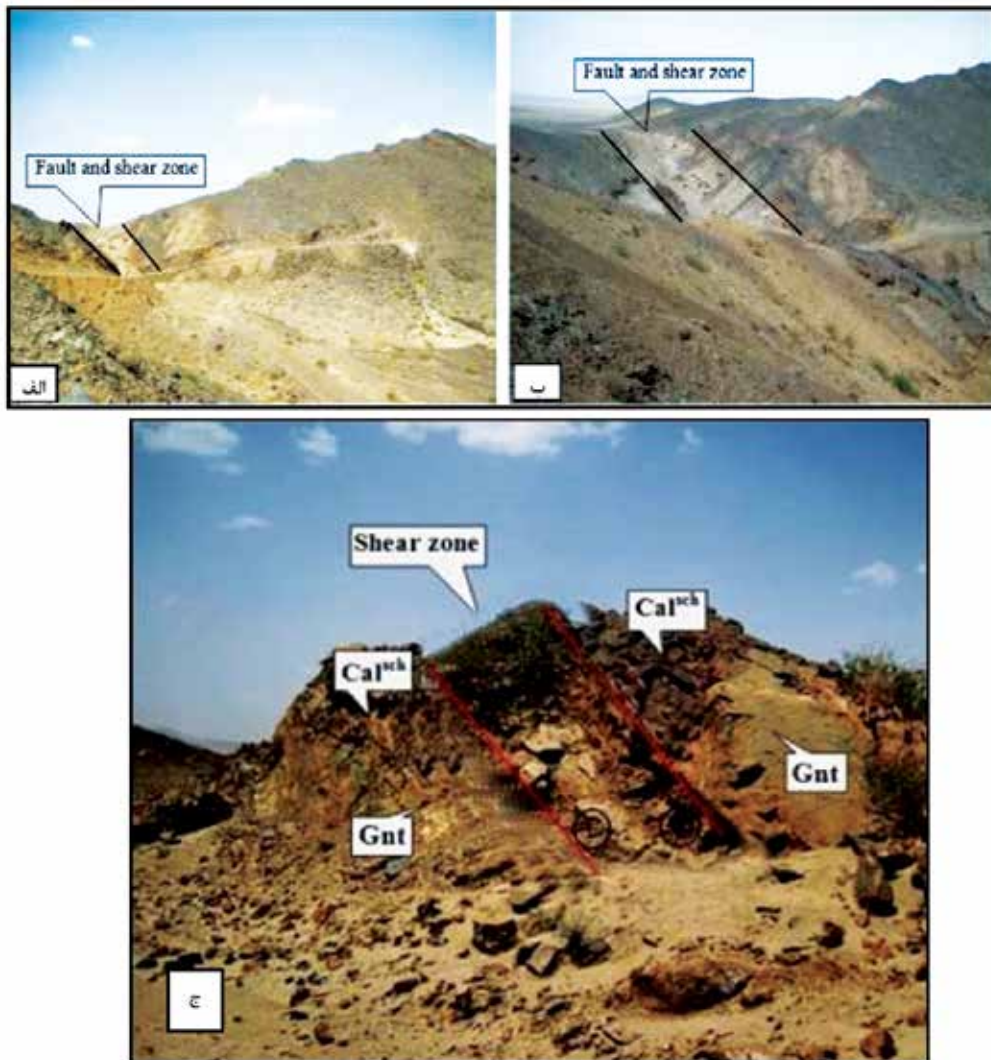


شکل ۲. موقعیت قرارگیری واحدهای فلیشی، افیولیت‌ها، توده‌های گرانیتوئیدی و کانسارهای مهم آنتیموان و طلا-آنتیموان زاهدان (Biabangard et al., 2019)

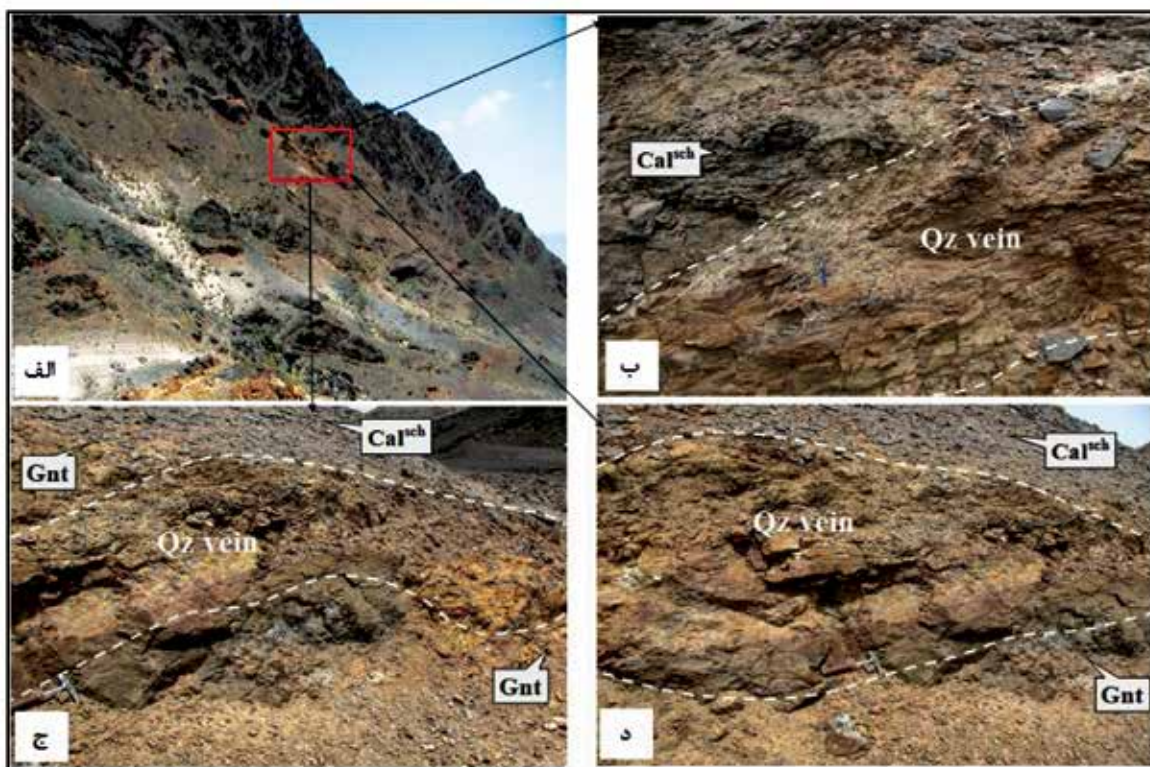
زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

به سمت شمال غرب دگرشکل شده است. واحدهای سنگی مختلف شدت دگرشکلی یکسان نداشته و به صورت واحدهای کمتر دگرشکل شده تا واحدهای با درجات بالای دگرشکلی در گستره قابل مشاهده می‌باشند (شکل ۳). سه مرحله دگرشکلی در گستره تشخیص داده شده است که در میان آنها دومین مرحله از مهم‌ترین مراحل این توالی دگرشکلی محسوب می‌شود. شکل کانه‌سازی به صورت رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفیدی با ضخامت و گسترش چند میلی‌متر تا چند متر است (شکل ۴). در کانسار لخشک عیارهای بالای طلا مربوط به بخش‌های سولفیدی-سیلیسی به شدت دگرشکل شده است.

محدوده اکتشافی لخشک در مختصات جغرافیایی $29^{\circ} 39' 39''$ طول شرقی و $60^{\circ} 39' 21''$ عرض شمالی قرار گرفته است. این کانسار در ۲۸ کیلومتری شمال غرب زاهدان و در ۷ کیلومتری غرب روستای لخشک در استان سیستان و بلوچستان و شهر زاهدان واقع است (شکل ۲). واحدهای سنگی رخنمون یافته در گستره مورد مطالعه به ترتیب از قدیم به جدید شامل واحدهای فلیشی، دایک‌های اسیدی-حدواسط و توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی هستند. این مجموعه تحت تأثیر پهنه برشی شکنا-شکل‌پذیر با روند شمال شرق-جنوب غرب با شیب عمومی ۳۰ تا ۵۰ درجه



شکل ۳. الف، ب و ج) تصویر دورنما از پهنه گسلی و برشی با روند شمال شرق-جنوب غرب در همبری توده‌های گرانیتوئیدی و واحد کالک شیبست در محدوده لخشک (دید به سمت جنوب غرب). (Gnt: توده گرانیتوئیدی؛ Calsch: واحد کالک شیبست) (نشانه‌های اختصاری واحدها از مقاله Whitney & Evans (2010) اقتباس شده است)



شکل ۴. الف، ب، ج و د) تصاویر دورنما و رخنمون از رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی کانه‌دار در پهنه برشی و گسلی (دید به سمت جنوب‌غرب) (Gnt: توده گرانیتوئیدی؛ Calsch: کالک‌شیست؛ Qz vein: رگه کوارتزی) (نشانه‌های اختصاری واحدها از مقاله Whitney & Evans (2010) اقتباس شده است)

روش مطالعه

داسیتی-ریولیتی انجام شد. نتایج نشان‌دهنده کانی‌شناسی ساده سنگ‌های کانه‌دار است. عمده‌ترین کانی‌های مشاهده شده شامل کوارتز، فلدسپات، میکا (سرپیسیت-بیوتیت-مسکویت)، اپیدوت، کلریت و کربنات است. واحد کالک‌شیست (Cal^{sch}) اصلی‌ترین رخنمون گستره می‌باشد که بیشترین گسترش را در محدوده لخشک دارد (شکل ۴). در همبری این واحد با توده گرانیتوئیدی، پهنه برشی رخ داده است. این واحد میزبان اصلی کانه‌زایی طلا-آنتیموان بوده و درجات مختلفی از دگرشکلی را متحمل شده است. بخش‌های پریکار کانسنگ که با کانه‌زایی طلا-آنتیموان همراه هستند، مربوط به رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی می‌باشند که در بخش‌های به شدت دگرشکل و دگرسان شده از پهنه برشی در واحد کالک‌شیست و یا در همبری توده‌های گرانیتوئیدی با این واحد رخنمون دارند. شواهد دگرشکلی پیشرونده از جمله برگوارگی، تفکیک کانی‌های تیره و روشن

این پژوهش در دو مرحله صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. در بررسی‌های صحرایی، ویژگی‌ها و تغییرات سنگ‌شناسی واحدهای سنگی گستره مطالعه شد. بر این اساس، به منظور بررسی سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی، تعداد ۹۲ نمونه از واحدهای سنگی مختلف برداشت شد. مطالعات پتروگرافی بر روی ۲۵ مقطع نازک انجام شد. به منظور انجام مطالعات ژئوشیمیایی، تعداد نه نمونه از توده‌های نفوذی گستره به روش XRF، ۱۰ نمونه از متاولکانیک‌های بخش‌های مرکزی پهنه برشی و چهار نمونه از واحدهای کمر بالا و کمر پایین پهنه برشی به روش ICP-MS آنالیز شدند.

روابط صحرایی و پتروگرافی واحدهای سنگی دگرسان

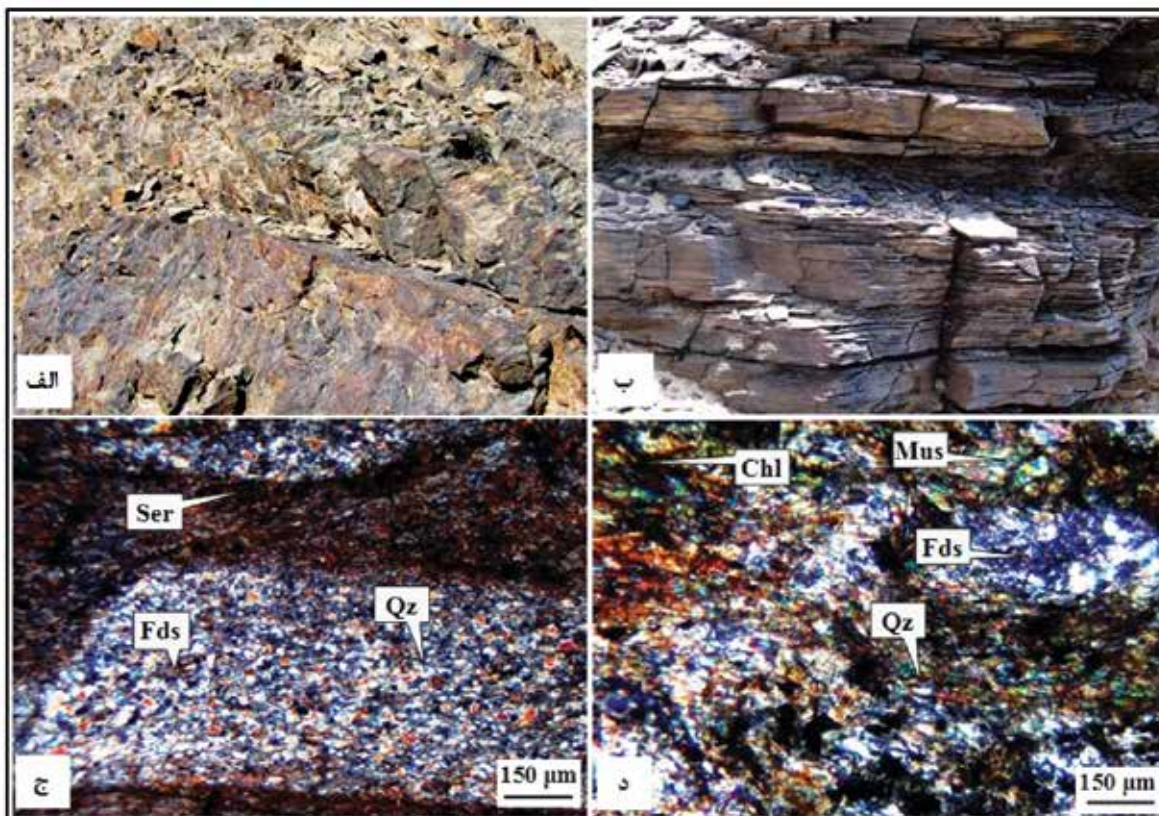
مطالعات پتروگرافی بر روی واحدهای سنگی رخنمون یافته در گستره مورد مطالعه شامل کوارتز شیست، کالک‌شیست، توده نفوذی گرانیتوئیدی و دایک‌های

کوارتز-سولفیدی عمدتاً در بخش‌های داخلی پهنه برشی و پهنه گسلی و یا در مجاورت آنها گسترش قابل توجهی دارند (شکل ۴). این نوع از رگه و رگچه‌ها اساساً سیلیسی بوده و متشکل از کوارتز همراه با مقادیر فرعی فلدسپات، بیوتیت-سریسیت و سولفید هستند. بر اساس شواهد صحرایی و مطالعات انجام شده، برگوارگی، شدت دگرشکلی و درصد کوارتز، از حاشیه به سمت بخش‌های داخل رگه‌های پهنه برشی، افزایش نشان می‌دهد. در گستره مورد مطالعه شدت دگرشکلی رابطه مستقیمی با رگه‌های مذکور و عیار طلا داشته و کانه‌زایی اصلی طلا و سولفیدهای همراه در کانسار لخشک مرتبط با این گروه از رگه‌ها می‌باشند. رگه و رگچه‌های کوارتزی فاقد کانه‌زایی محصول دگرگونی ناحیه‌ای بوده و جایگیری آن‌ها عمدتاً در بخش‌های اتساعی رخ داده است. شدت و نوع دگرسانی در پهنه برشی لخشک بسیار متفاوت است. از عمده‌ترین دگرسانی‌ها می‌توان به دگرسانی سریسیتی، کربناتی، سیلیسی و سولفیدی اشاره کرد. دگرسانی سریسیتی بیشتر در واحدهای سنگی گستره و در رگه و رگچه‌های کوارتزی طلا دار همراه با کوارتز و کانه‌های سولفیدی همراه است. این نوع دگرسانی در لخشک گسترش زیادی دارد و سریسیت به صورت رگه-رگچه‌ای، همراه با کوارتز و کانه‌های سولفیدی به‌ویژه پیریت، به موازات برگوارگی‌ها در مقیاس صحرایی، دستی و میکروسکوپی رخنمون دارد. براساس مطالعات میکروسکوپی، در برخی از نمونه‌ها سریسیت به شکل پرکننده، شکستگی‌های حاصل از دگرشکلی شکن را پر کرده است و در برخی از مقاطع دگرسان شده به شکل توده‌ای دیده می‌شود. در نمونه‌های صحرایی و دستی، کانی‌های کربناتی همراه با دگرسانی سولفیدی دیده می‌شوند. کربنات‌های حاصل از این دگرسانی در مقیاس صحرایی و میکروسکوپی، به دو صورت قابل مشاهده هستند. برخی از کربنات‌ها همراه با کانه‌های سولفیدی و کوارتز بوده و به صورت توده‌ای و رگچه‌های کلسیتی برگوارگی‌ها را قطع کرده‌اند. گروه دیگری در حاشیه پورفیروکلاست‌ها و به صورت بلورهای درشت به موازات برگوارگی‌ها و در زمینه‌ای از اکسیدهای آهن، دیده می‌شوند. در طی سولفیدی شدن در محدوده لخشک،

و ایجاد لایه‌بندی تفریقی یا ساختار نواری در رخنمون‌ها و مغزه‌های حفاری واحدهای کالک‌شیستی گستره دیده می‌شوند. در طی فازهای دگرشکلی مرحله دوم، نوارهای تیره و روشن چین‌خورده‌اند. در مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های برداشت شده از واحد کالک‌شیست کانی‌های اصلی از کوارتز، فلدسپات، سریسیت، آمفیبول، کلریت، بیوتیت و کربنات تشکیل شده است. رخنمون واحد کوارتز شیست بیشتر در جنوب و غرب گستره مورد مطالعه گسترش دارد. در رخنمون‌های این واحد مشابه واحد کالک‌شیستی، آثار تورق و برگوارگی ناشی از جهت‌یافتگی ترجیحی کانی‌های به شدت دگرشکل شده به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۵). بر مبنای مطالعات میکروسکوپی، این واحد شامل سریسیت، کوارتز-کلریت و کوارتز-مسکویت است که کوارتز غالباً به صورت پورفیروکلاست دیده می‌شود. بر مبنای موقعیت ژئودینامیکی، زمین‌شناسی و شواهد صحرایی، می‌توان گفت که شکل‌گیری توده گرانیتوئیدی گستره نتیجه فعالیت ماگمایی حاصل از فرورانس اقیانوس سیستان به زیر بلوک افغان است (Fotoohi Rad et al., 2005). توده نفوذی مذکور به شکل دوکی و کشیده در کالک‌شیست‌ها نفوذ کرده و در برخی از بخش‌ها با واحد کالک‌شیست همبری نشان می‌دهد (شکل ۳). در همبری توده‌های گرانیتوئیدی و واحد کالک‌شیست علاوه بر رخداد پهنه برشی با روند شمال شرق-جنوب غرب، پهنه کانی‌زایی و پهنه گسلی، رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی کانه‌دار نیز گسترش دارند. براساس مطالعات حیدریان دهکردی و همکاران (۱۳۹۸)، کنترل‌کننده کانه‌زایی در گستره لخشک ساختاری بوده و توسط پهنه برشی و غسل کنترل می‌شود. روند برگوارگی‌ها در گستره مورد مطالعه هم‌روند با پهنه برشی شمال شرق-جنوب غرب است. بر مبنای مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، دو نوع رگه شامل رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی کانه‌دار حاصل از دگرسانی و رگه و رگچه‌های کوارتزی فاقد کانه‌زایی و حاصل از دگرگونی تقسیم می‌شوند. رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی کانه‌دار با روند شمال شرق-جنوب غرب، به صورت گسسته با حداکثر گسترش در حد ۱۰۰ متر در گستره مورد مطالعه گسترش دارند. رگه و رگچه‌های

پیروتیت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت و اسفالریت همراه است. به دنبال افزایش شدت دگرسانی سریستی-سیلیسی و کربناتی، مقدار سولفیدها افزایش می‌یابد.

کانی‌های حاصل از دگرسانی سولفیدی اکسید شده و به هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. دگرسانی سولفیدی در واحد کالک‌شیست و توده نفوذی گرانیتوئیدی همراه با تشکیل کانه‌های سولفیدی از جمله پیریت، استینیت،



شکل ۵. الف و ب) تصاویری از رخنمون واحد کوارتز شیست که آثار تورق و گسترش برگوارگی ناشی از جهت‌یافتگی ترجیحی کانی‌های به‌شدت دگرشکل شده به خوبی قابل مشاهده است، ج و د) تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)) از واحد کوارتز شیست در منطقه لخشک، این واحد بیشتر از کانی‌های سریست، کوارتز-کلریت و کوارتز-مسکویت تشکیل شده است و کوارتز اغلب به صورت پورفیروکلاست دیده می‌شود. (Chl: کلریت؛ Fds: فلدسپات؛ Qz: کوارتز؛ Ser: سریست و Mus: مسکویت) (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از مقاله (Whitney & Evans 2010) اقتباس شده است)

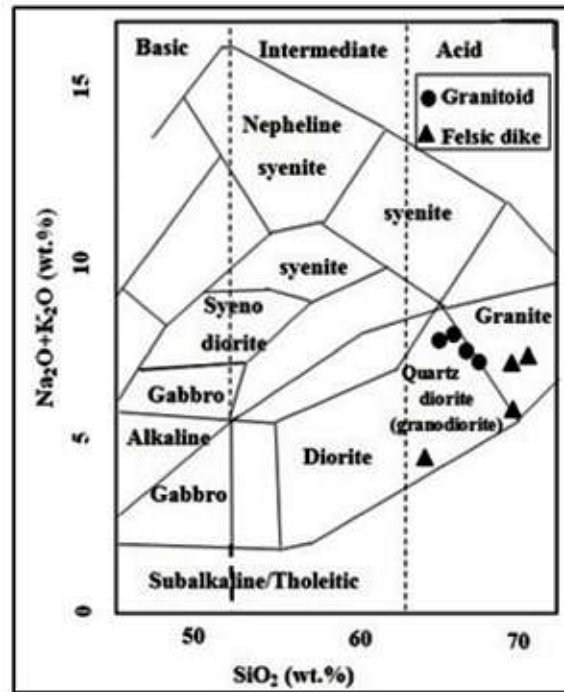
ماگماتیسیم توده نفوذی

مربوط به سنگ‌های خروجی (Cox et al., 1979) و نمودار مربوط به سنگ‌های نفوذی (Middlemost, 1985) مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس نمودارهای مذکور، دایک‌های محدوده لخشک از نوع فلسیک با ترکیب داسیت (معادل بیرونی کوارتز-دیوریت یا تونالیت) و ریولیت (معادل بیرونی گرانیت) هستند. سنگ‌های توده نفوذی لخشک نیز به لحاظ کانی‌شناسی متشکل از پلاژیوکلاز، فلدسپات، کوارتز، بیوتیت و هورنبلند هستند و به لحاظ سنگ‌شناسی و با توجه به

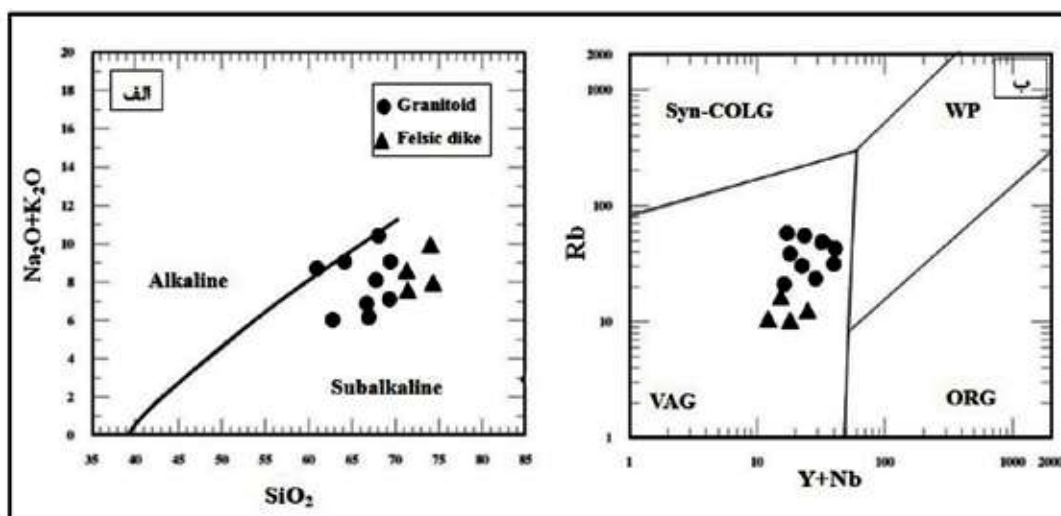
به‌منظور مطالعه ماگماتیسیم توده نفوذی، تعداد نه نمونه از واحد نفوذی گستره مورد مطالعه و تعداد چهار نمونه از دایک‌های منطقه به روش XRF آنالیز شدند. نتایج آنالیز XRF نمونه‌های برداشتی از توده گرانیتوئیدی و دایک‌ها بر روی نمودار آلکالن به سیلیس کاکس و همکاران (Cox et al., 1979) رسم شدند (شکل ۶). دایک‌های محدوده لخشک بیشتر از نوع نیمه آتشفشانی (نیمه نفوذی) هستند. بر این اساس، به‌منظور طبقه‌بندی آنها، نمودار

الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در پهنه‌های دگرسان و کانه‌دار کانسار لخشک (پهنه زمین درز سیستان)

نمودار میدل موست (Middlemost, 1985)، در محدوده گرانودیوریت قرار می‌گیرند. در این پژوهش، به منظور تعیین تیپ گرانیتوئید گستره لخشک، از نمودار Rb-(Y+Nb) پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984)، استفاده شده است. بر این اساس، توده گرانیتوئیدی لخشک محیط قوس آتشفشانی را نشان داد (شکل ۷). در شکل الف-مودار موقعیت قرارگیری دایک‌ها و سنگ‌های توده گرانیتوئیدی لخشک بر روی نمودار تفکیکی قلیایی-نیمه‌قلیایی (Irvine and Baragar, 1971) محدوده ساب آکالن را نشان دادند. با توجه به شکل ۷-ب نمودار Rb-(Y+Nb) (Pearce et al., 1984) موقعیت نمونه‌ها بر محیط قوس آتشفشانی منطبق است.



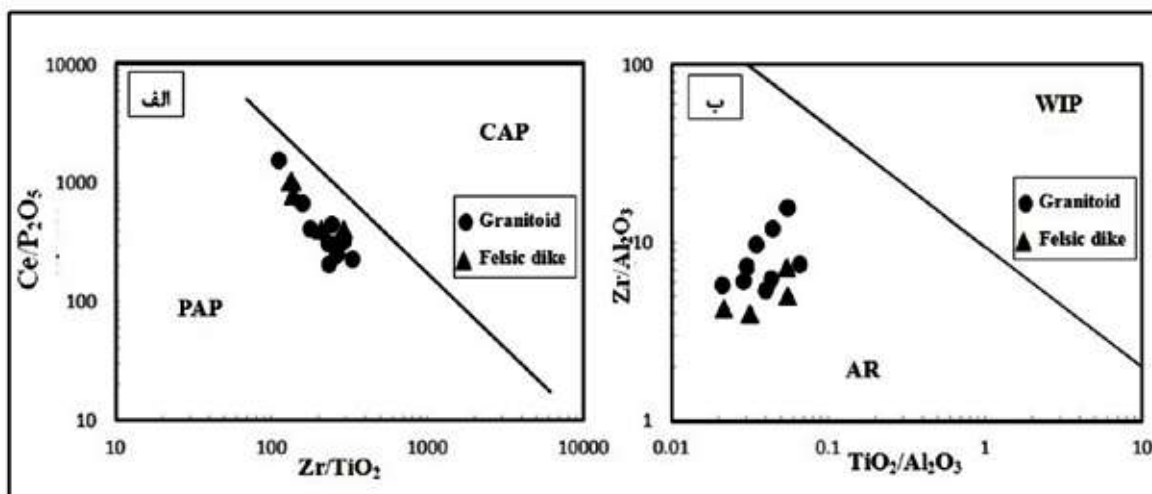
شکل ۶. نمایش موقعیت دایک‌های کانسار لخشک بر روی نمودار کاکس و همکاران (Cox et al., 1979) بر این اساس، سنگ‌های توده گرانیتوئیدی لخشک در گستره گرانودیوریت قرار می‌گیرند



شکل ۷. موقعیت قرارگیری دایک‌ها و سنگ‌های توده گرانیتوئیدی لخشک بر روی الف) نمودار تفکیکی قلیایی-نیمه‌قلیایی (Irvine & Baragar, 1971) که گستره ساب آکالن را نشان دادند، ب) نمودار Rb-(Y+Nb) (Pearce et al., 1984) که در آن موقعیت نمونه‌ها بر محیط قوس آتشفشانی منطبق است

لخشک موقعیت قوس آتشفشانی را نشان داد (شکل ۸. الف). همچنین، نمونه‌های مذکور، بر اساس نمودار $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ مولر (Muller, 1997)، موقعیت جایگاه قوس آتشفشانی (AR) را نشان دادند (شکل ۸. ب).

در این پژوهش، برای بررسی محیط زمین‌ساختی سنگ‌های توده گرانیتوئیدی کانسار لخشک، از نمودار $\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5\text{-Zr}/\text{TiO}_2$ مربوط به مولر (Muller, 1997) نیز استفاده شد (شکل ۸). بر این اساس، توده گرانیتوئیدی



شکل ۸. تعیین محیط زمین‌ساختی توده گرانیتوئیدی لخشک، الف) بر روی نمودار $\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5\text{-Zr}/\text{TiO}_2$ ، ب) بر روی نمودار $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ مولر (Muller, 1997)، (AR): قوس آتشفشانی؛ (CAP): قوس حواشی فعال قاره‌ای؛ (PAP): قوس‌های پس برخورد و (WIP): موقعیت داخل صفحه‌ای

بحث

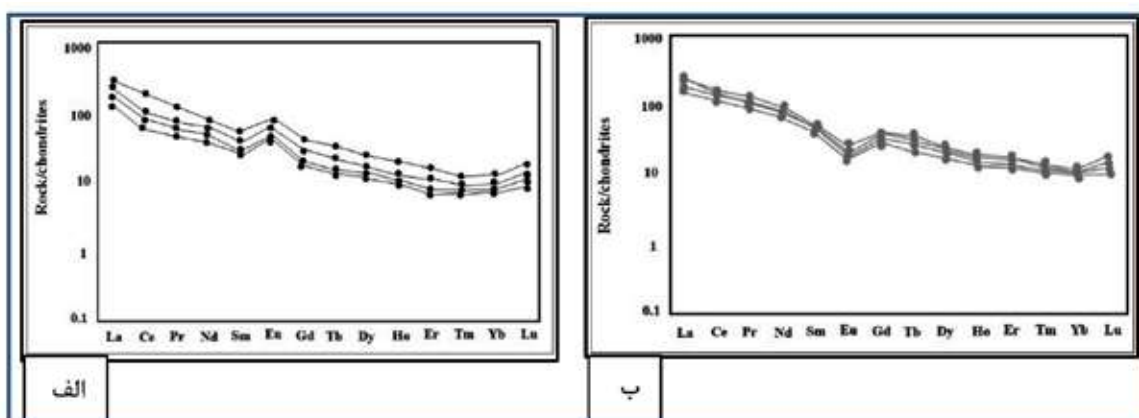
الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در بخش‌های مرکزی، کمر بالا و کمر پایین پهنه برشی

سولفیدی $(\text{SO}_4)^{2-}$ با LREEها کمپلکس ساخته و موجب غنی‌شدن آنها می‌شوند. در نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، روند ملایم غنی‌شدگی LREEها در مقایسه با تهی‌شدگی HREEها، مؤید چرخش سیالات دارای CO_2 و کمپلکس‌های $(\text{SO}_4)^{2-}$ و رخداد دگرگونی ناحیه‌ای و در حد رخساره شیست سبز در محدوده لخشک است. الگوی توزیع عناصر نادر خاکی واحدهای خارج از پهنه برشی (دگرسانی کمتر) و واحدهای رخنمون یافته در پهنه برشی (دگرسانی شدید)، آنومالی‌های مثبت و منفی Eu (یورپیوم) را نشان دادند (شکل ۹). بر اساس نظر کیکاوادا (Kikawada, 2001) و رولینسون (Rollinson, 1993)، پلاژیوکلازها حامل اصلی Eu بوده و رخداد آنومالی‌های مثبت و منفی Eu مرتبط با درجات دگرسانی و میزان تجزیه پلاژیوکلاز و فلدسپات است. بر این اساس، در واحدهای

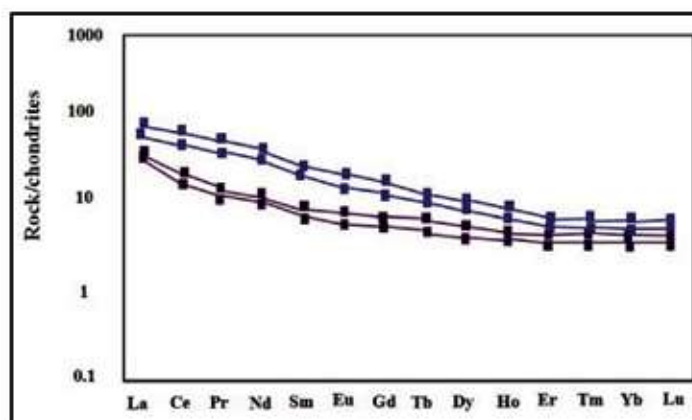
روند توزیع عناصر نادر خاکی برای واحدهای میزبان کانه‌زایی در پهنه برشی در شکل ۹ ارائه شده است. بر این اساس، روند توزیع عناصر نادر خاکی، بیانگر غنی‌شدگی این عناصر در نمونه‌های واقع در بخش‌های مرکزی پهنه برشی است. این الگوها و نحوه توزیع عناصر نادر خاکی، بیانگر روند غنی‌شدگی LREEها در مقایسه با تهی‌شدگی REEها در واحدهای میزبان کانه‌زایی واقع در بخش‌های مرکزی پهنه برشی هستند. از سوی دیگر، الگوی غنی‌شدگی LREEها در نمونه‌های با مقادیر بالای طلا و سولفید، بیانگر تاثیر دگرسانی گرمایی بر واحدهای موجود در پهنه برشی است. به‌طور کلی، غنی‌شدگی LREEها در مقایسه با تهی‌شدگی HREEها در پهنه‌های برشی، علاوه بر میزان CO_2 ، به درصد کمپلکس‌های سولفیدی نیز بستگی دارد (Rolland et al., 2003)، بر این اساس، کمپلکس‌های

میزبان کانه‌زایی در کانسار لخشک، آنومالی مثبت Eu در مراحل اولیه دگرسانی و آنومالی منفی Eu در مراحل پیشرفته و پایانی دگرسانی رخ داده است. الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در بخش‌های کمر بالا و کمر پایین پهنه برشی (با شدت دگرسانی و دگرشکلی پایین) در شکل ۱۰ ارائه شده است. این نمونه‌ها، تهی‌شدگی و مقادیر REE پایین‌تری را در مقایسه با بخش‌های مرکزی پهنه برشی نشان دادند. به بیان دیگر، در نمونه‌های دگرسان و دگرشکل با عیار بالا در بخش‌های مرکزی پهنه برشی، اختلاف میان تهی‌شدگی HREE در مقایسه با غنی‌شدگی LREE افزایش نشان داد. الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در نمونه‌های متعلق به بخش‌های رخنمون یافته در پهنه برشی دگرسان و دگرشکل شده، الگوی قاشقی شکل و تقعر رو به بالا را در محدوده

HREEها نشان دادند. در مقابل، روند توزیع عناصر نادر خاکی در نمونه‌های مربوط به بخش‌های کمر بالا و کمر پایین پهنه برشی، الگوی به نسبت صفحه‌ای یا تخت را نشان دادند. بر این اساس، اختلاف میان تهی‌شدگی HREEها در مقایسه با غنی‌شدگی LREEها در بخش‌های خارج از پهنه برشی با دگرسانی و دگرشکلی پایین کاهش نشان می‌دهد. بر مبنای نظر گلدفارب و همکاران (Goldfarb et al., 2014) و زو (Zhu, 2011) همراه بودن دگرسانی سولفیدی و سیلیسی، می‌تواند نشان‌دهنده حضور سیال گرمابی غنی از سیلیس باشد. براساس شواهد موجود، در محدوده لخشک بیشترین شدت دگرسانی سولفیدی در بخش‌های مرکزی پهنه برشی همراه با فابریک‌های شکل‌پذیر و در پهنه گسلی (شکنا) که دارای رگه و رگچه‌های کوارتزی فراوان است،



شکل ۹. الف) الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی در سنگ‌های میزبان پهنه برشی لخشک با درجات پایین دگرشکلی و دگرسانی. در این نمودار، یورویییم آنومالی مثبت را نشان می‌دهد، ب) الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی در سنگ‌های میزبان پهنه برشی لخشک با درجات بالای دگرشکلی و دگرسانی. در این نمودار، یورویییم آنومالی منفی نشان می‌دهد



شکل ۱۰. الگوی مقایسه پراکندگی عناصر نادر خاکی در دو نمونه با شدت کم دگرشکلی و دگرسانی در کمر بالا (نمودار رنگ آبی) و دو نمونه با شدت دگرشکلی و دگرسانی کم در کمر پایین (نمودار رنگ بنفش) پهنه برشی

لخشک، منجر به افزایش درز، شکاف، شکستگی و گردش سیال و همچنین افزایش برهمکنش سیال/سنگ دیواره و در نتیجه پیشرفت دگرسانی و تجزیه پلاژیوکلازها در واحدهای میزبان کانه‌زایی شده است. با توجه به آنکه پلاژیوکلازها حامل اصلی یوروپیم هستند، با پیشرفت دگرسانی، تجزیه شده و منجر به مهاجرت یوروپیم و رخداد آنومالی منفی یوروپیم شده است. نتایج مطالعات ژئوشیمیایی انجام شده بر روی نمونه‌های با درجات بالای دگرشکلی و دگرسانی کانسار لخشک، مؤید نقش و تأثیر عوامل زمین‌شناختی و دگرسانی در توزیع REEها است.

در واحدهای کالک‌شیستی و گرانیتوئیدی با شدت دگرشکلی بالا، LREEها همبستگی مثبت با طلا نشان دادند که علت غنی شدن آنها در بخش‌های با عیار بالا در پهنه کانه‌دار و دگرسان است. لازم به ذکر است که شدت همبستگی مثبت بالا نبوده است که علت آن پایین بودن تحرک عناصر نادر خاکی در پهنه‌های دگرشکل و دگرسان لخشک است. به‌طور کلی، انتقال HREEها توسط کمپلکس‌های فلوریدی انجام می‌شود، بنابراین، همبستگی میان HREEها و طلا متأثر از سیالات حاوی فلونئور است که منجر به آبشویی و حمل این عناصر شده است. در نمونه‌های با شدت دگرشکلی و دگرسانی بالا، یوروپیم همبستگی منفی با طلا نشان داد که علت آن پیشرفت دگرسانی و تجزیه پلاژیوکلازها و در نتیجه تهی‌شدگی یوروپیم در پهنه‌های کانه‌دار با دگرشکلی بالا در کانسار لخشک است. بر اساس نتایج مطالعات همبستگی عناصر نادر خاکی و طلا در واحدهای پهنه برشی کانسار لخشک، به‌استثنای یوروپیم، تمام عناصر نادر خاکی سبک دارای همبستگی مثبت با طلا هستند. بر این اساس، LREEها در مقایسه با HREEها، همبستگی مثبت بیشتری را با طلا نشان دادند که مؤید تحرک و غنی‌شدگی LREEها در نمونه‌های با شدت عیار و دگرسانی بالا (سولفیدی و سیلیسی) است.

نتیجه‌گیری

کانسار طلای لخشک در پهنه برشی و با میزبانی واحد کالک‌شیست همبر با توده گرانیتوئیدی با روند شمال شرق-

دیده می‌شود. مهم‌ترین محصول دگرسانی سولفیدی، کوارتز است که میزبان اصلی ذرات طلا در محدوده لخشک است و در فضاها ناشی از دگرشکلی شکل‌پذیر واحدهای کالک‌شیست و توده گرانیتوئیدی متمرکز شده است. براساس شواهد موجود در محدوده مورد مطالعه، به دنبال افزایش شدت دگرشکلی و ایجاد فابریک‌های شکل‌پذیر و از بخش‌های خارجی به سمت بخش‌های داخلی پهنه برشی، شدت دگرسانی سیلیسی افزایش نشان داد.

آنومالی Eu

بالا بودن ضریب توزیع Eu در فلدسپارها نشان‌دهنده آن است که این گروه، دارای بالاترین مقادیر Eu هستند (Rollinson, 1993; Kikawada, 2001) و کنترل‌کننده آنومالی Eu در ماگمای فلسیک هستند. در نتیجه برخلاف سایر عناصر نادر خاکی که در فلدسپارها ناسازگار هستند، Eu عنصر سازگار است و خروج فلدسپار از مذاب فلسیک، سبب رخداد آنومالی منفی این عنصر در مذاب می‌شود. بر اساس نظر پیراژنو (Pirajno, 2009) و کیکاوادا (Kikawada, 2001)، وجود شرایط احیایی و کاهش فعالیت اکسیژن، سبب بالا رفتن ضریب توزیع و آنومالی مثبت یوروپیم می‌شود. بر این اساس، در واحدهای میزبان کانه‌زایی در کانسار لخشک، آنومالی مثبت Eu در مراحل اولیه دگرسانی و آنومالی منفی Eu در مراحل پیشرفته و پایانی دگرسانی رخ داده است. بین حضور مقادیر بالای پلاژیوکلاز و آنومالی یوروپیم در نمونه‌های کانسار لخشک رابطه مستقیمی وجود دارد. در نمونه‌های با درجات دگرسانی ضعیف که عمدتاً در خارج از پهنه برشی (کمر بالا و کمر پایین پهنه برشی) قرار دارند، شدت تجزیه پلاژیوکلاز به سربسیست نیز ضعیف است، بر این اساس، یوروپیم ناهنجاری مثبت نشان داده و غنی‌شدگی LREEها در برابر تهی‌شدگی HREEها رخ داده است. در مقابل، در نمونه‌های با درجات دگرسانی شدید که بیشتر در داخل پهنه برشی قرار دارند، شدت تجزیه پلاژیوکلاز به سربسیست شدید بوده، در نتیجه یوروپیم ناهنجاری منفی را نشان می‌دهد. علت آن است که تأثیر پهنه برشی و افزایش شدت دگرشکلی در محدوده کانسار

- جنوب‌غرب شکل گرفته است. واحدهای سنگی رخنمون یافته شامل توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی و دایک‌های داسیتی-ریولیتی با سن الیگوسن و کالک‌شیست و کوارتز شیست با سن آئوسن هستند که در حد رخساره شیست سبز دگرگون شده‌اند. این مجموعه تحت تأثیر پهنه برشی با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب دگرریخت شده است. ترکیب توده‌های نفوذی براساس نمودارهای سنگ‌شناسی در محدوده گرانودیوریت قرار می‌گیرد. از عمده‌ترین دگرسانی‌ها می‌توان به دگرسانی سریسیتی، کربناتی، سیلیسی و سولفیدی اشاره کرد. از نظر محیط زمین‌شناختی، سنگ‌های مورد مطالعه در موقعیت قوس آتشفشانی می‌باشند. بررسی رفتار عناصر نادر خاکی در متاولکانیک‌های پهنه برشی نشان‌دهنده غنی‌شدگی این عناصر در پهنه برشی نسبت به واحدهای کمر بالا و پایین است. الگوی پراکندگی این عناصر گویای غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE است که می‌توان آن را به دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیست سبز نسبت داد. علاوه بر آن، می‌توان غنی‌شدگی LREE در پهنه برشی لخشک را به چرخش سیالات حاوی CO₂ و SO₄²⁻ در این پهنه نسبت داد. وجود بی‌هنجاری‌های Eu مثبت در متاولکانیک‌های پهنه برشی را می‌توان ناشی از تجزیه پلاژیوکلازها به سریسیت، تحت تأثیر دگرسانی‌های ضعیف و شرایط احیایی دانست که سبب افزایش ناچیز در بی‌هنجاری Eu شده است. بی‌هنجاری‌های Eu منفی گویای افزایش نسبت سیال/سنگ و تجزیه فلدسپارها به‌عنوان منبع اصلی Eu است. در نمونه‌های واقع در کمر بالا و پایین، الگوی پراکندگی REE گویای تهی‌شدگی این عناصر نسبت به پهنه برشی به‌ویژه در نمونه کمر پایین است و نبود بی‌هنجاری Eu و نبود تفکیک قابل توجه REE، می‌تواند ناشی از نبودن دگرسانی و دگرشکلی قابل توجه در واحدهای مذکور و واکنش ناچیز سیال/سنگ باشد.
- منابع**
- بومری، م.، مجددی‌مقدم، ح. و بیابانگرد، ح.، ۱۳۹۷. سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی سنگ‌های آذرین و کانی‌زایی آنتیموان طلا در منطقه سفیدسنگ و درگیابان.
- فصلنامه پترولوژی، (۹)، ۳۵، ۱۹۳-۲۱۶.
- حیدریان دهکردی، ن.، نیرومند، ش.، تاج‌الدین، ح.، ع. و نوزعی‌م، ر.، ۱۳۹۸. بررسی عوامل کنترل‌کننده کانی‌زایی در کانسار طلای لخشک (زون زمین‌درز سیستان)، هفتمین همایش ملی زمین‌ساخت و زمین‌شناسی ساختاری ایران، دانشگاه تهران.
- حیدریان دهکردی، ن.، نیرومند، ش.، تاج‌الدین، ح.، ع.، ادیب، ش. و میرزایی، س.، ۱۴۰۰. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و پتانسیل‌سنجی کانسار لخشک، زون زمین‌درز سیستان بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی (IP/RS). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵، ۵۸، ۲۵-۳۹.
- نیرومند، ش.، ۱۳۹۷. گزارش بررسی زمین‌شناسی و شواهد ساختاری کانسار لخشک در زون زمین‌درز سیستان، ۶۸.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivets L., Whitechurch, H., Vrielynck, B. and Spakman, W., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *The geological magazine*, 148, 692-725.
- Behruzi, A., 1993. Geological map of Zahedan 1:250000 survey sheet. Geological survey of Iran
- Camp, V.E., Griffis, R.J., 1982. Character, genesis, and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, Eastern Iran. *Lithos*, 15, 221-239.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979. *The interpretation of igneous rocks*. George Allen and Unwin, London.
- Fotoohi Rad, G.R., Droop, G.T.R. and Amini, S., 2005. Eclogites and blueschists of the Sistan Suture Zone, eastern Iran: a comparison of P-T histories from a subduction mélange. *Lithos* 84, 1-24.
- Goldfarb, R.J., Baker, T. and Dube, B., 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic Geology 100th Anniversary* 407-450.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre, M.M., Hagemann, S.G. and Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification

- in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol Rev* 13, 7-27. Groves, D., Condie, K.C., Goldfarb, R.J., 2005. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits. *Economic Geology* 100, 203-224.
- Heydarian Dehkordi, N., Niroomand, S. and Tajeddin, H.A., 2022. Integrated geophysical study of the Lakhshak gold-antimony deposit in the Sistan suture zone, southeastern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. DOI:10.1007/s12517-022-09628-9.
 - Heydarian Dehkordi, N., Niroomand, S., Tajeddin, H.A. and Nozaem, R., 2022. Metamorphic rock-hosted orogenic gold deposit style at Lakhshak deposit: Their key features and significances for gold exploration in Sistan suture zone, GEOPERSIA. 12(2): 317-329 DOI: 10.22059/GEOPE.2022.330120.648632.
 - Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 523-548.
 - Kikawada, Y., 2001. Experimental studies on the mobility of lanthanides accompanying alteration of andesite by acidic hot spring water. *Chemical Geology* 176, 137-149.
 - Kerrich, R., Goldfarb, R.J., Groves, D.I. and Garwin, S., 2000. The geodynamics of world-class gold deposits: Characteristics, space-time distribution, and origins: Reviews in *Economic Geology*, 13, 501-551.
 - Kerrich, R., Goldfarb, R.J. and Baker, Richards, J.P., 2005. Metallogenic Provinces in an Evolving Geodynamic Framework. *Economic Geology 100th Anniversary* 1097-1136.
 - Middlemost, E.A.K., 1985. Magmas and magmatic rocks. Longman, London.
 - Pearce, J.A., Harris, N.W. and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25, 956-983.
 - Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Berlin, Germany 1250 p.
 - Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B.T., Dobak, P.J., McEwan, C.J. and Rowe, R.R., Zhou, X., 2007. Models and exploration methods for major gold deposit types: exploration 07. Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Toronto, Proceedings 691-710.
 - Robert, F., Poulsen, K.H. and Dubé, B., 1997. Gold deposits and their geological classification. *Explor* 97, 209-220.
 - Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A.M., Pennacchioni, G. and Mancktelow, N., 2003. Rare earth and trace element mobility in mid crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 214, 203-219.
 - Rollinson, H.R., 1993. *Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation*. London, UK. 652.
 - Tirrul, R., Bell, I.R. and Griffis, R.J., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 9, 134-150.
 - Whitney, D. and Evans, B.D., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95 (1), 185-187.
 - Zhu, Y.F., 2011. Geology and geochemistry of the shear zone related gold deposits in west Tianshan, Xinjiang, NW China. In: *Abstract Volume with Program of CERCAMS 14 and MDSG 34*, Natural History Museum, London 1-66.