

## کانی‌شناسی و کانه‌زایی عناصر نادر خاکی در کمپلکس چاپدونی-پشت بادام، ایران مرکزی

محمدباقر احمدخانی<sup>۱</sup>، محمد یزدی<sup>۲\*</sup>، مهرداد بهزادی<sup>۲</sup>، خالق خشنودی<sup>۳</sup> و بشیر شکوه سلجوقی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

۴- سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

نویسنده مسئول: M-yazdi@sbu.ac.ir \*

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۰

دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۷

## چکیده

کمپلکس چاپدونی-پشت بادام در زون ساختاری ایران مرکزی و در شمال شرق استان یزد واقع شده است. منطقه مورد مطالعه از مناطق با پتانسیل بالا برای کانی‌سازی عناصر نادر خاکی به شمار می‌رود. در این پژوهش برای بررسی کانی‌شناسی و کانه‌زایی عناصر نادر خاکی، مطالعات صحرایی، کانی‌شناسی با میکروسکوپ نور عبوری-انعکاسی، میکروسکوپ الکترونی و روش پراش اشعه مجهول (XRD)، آنالیز شیمیایی به روش ICP-MS مورد استفاده قرار گرفته است. پس از بررسی‌های انجام شده نتایج مطالعات، غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی در منطقه را نشان می‌دهد. در این بین عنصر Ce با عیار میانگین  $1353 \text{ ppm}$  و La با عیار میانگین  $745 \text{ ppm}$  و Y با عیار میانگین  $252$  از  $170$  نمونه آنالیز شده از غنی‌شدگی بالایی برخوردار بوده و عناصر Dy-Sm-Gd-Yb-Er ناهنجاری جزئی را نشان می‌دهد. گنیس، گرانیت، گرانیت-گنیس، میگماتیت و شیست از مهم‌ترین سنگ‌های میزبان برای کانه‌زایی در منطقه هستند. این سنگ‌ها عمدتاً دگرسان و دگرگون شده هستند. متاسوماتیتی شدن سنگ میزبان از بارزترین شواهد دگرسانی برای غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی است. انواع مختلفی از کانی‌ها در منطقه شناسایی شده است که کانی‌های اصلی عناصر نادر خاکی شامل باستنزیت، مونازیت و آلانیت است و کانی‌هایی که می‌توانند حاوی مقادیری عناصر نادر خاکی باشند شامل توریت، زیرکن، اورانوتوریت، آپاتیت، فلوئورآپاتیت و تیتانیت است. کانی‌های توریت و اورنوتوریت که پاراژنز با کانه‌زایی عناصر نادر خاکی هستند را می‌توان به عنوان کانی‌های ردیاب کانی‌سازی در منطقه در نظر گرفت و از روش رادیومتری گاما برای پی‌جویی و اکتشاف زون‌های کانی‌سازی عناصر نادر خاکی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: عناصر نادر خاکی، کانی‌شناسی، کانه‌زایی، چاپدونی-پشت بادام، ایران مرکزی

## ۱- پیشگفتار

۲۰۱۶). از برخی کانی‌های دارای عناصر نادر خاکی می‌توان به مونازیت، زنونتیم، باستنزیت، پارسیسیت، گادولینیت، کیانوسیت، آپاتیت، آلانیت اشاره کرد. با اینکه REEs در بسیاری از کانی‌ها حضوری قابل توجه دارند، تقریباً تمام تولید آن‌ها از کم‌تر از ۱۰ کانی صورت می‌گیرد (سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا، ۲۰۱۴). عناصر نادر خاکی به دلیل تعداد زیاد و کاربردهای گوناگون و گسترده این عناصر و بالا رفتن سطح تکنولوژی و افزایش روزافزون تقاضا برای آن‌ها، دارای اهمیت استراتژیک هستند. در سال‌های اخیر در ایران فعالیت‌های اکتشافی یا تحقیقاتی برای عناصر نادر خاکی مورد توجه قرار گرفته است (معانی‌جو و همکاران، ۲۰۰۸). با توجه به کاربردها و نیازهای جدید روزافزون جوامع بشری به این عناصر، باید پذیرفت که نگاه ویژه‌ای به این عناصر داشته

عناصر نادر خاکی (REEs) شامل ۱۵ عنصر از لاتانیدها هستند. عنصر ایتريم نیز در این گروه از عناصر جای می‌گیرد. در بعضی از منابع اسکلندیم را نیز به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مشابه جزو عناصر نادر خاکی دسته‌بندی می‌کنند. REEs را به این دلیل نادر می‌خوانند که بسیاری از آن‌ها در قرن ۱۸ و ۱۹ به صورت اکسید از کانی‌های نادر به دست آمدند و خودشان کانی مستقل تشکیل نمی‌دهند. این عناصر به دلیل واکنش‌پذیری بسیار بالا، کم‌تر به صورت خالص دیده می‌شوند. عناصر نادر خاکی به دو دسته سبک (LREE) و سنگین (HREE) تقسیم می‌شوند. گروه LREE شامل عناصر La, Pr, Ce, Nd و Sm و گروه HREE شامل عناصر Er, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb و Lu هستند (فونکن،

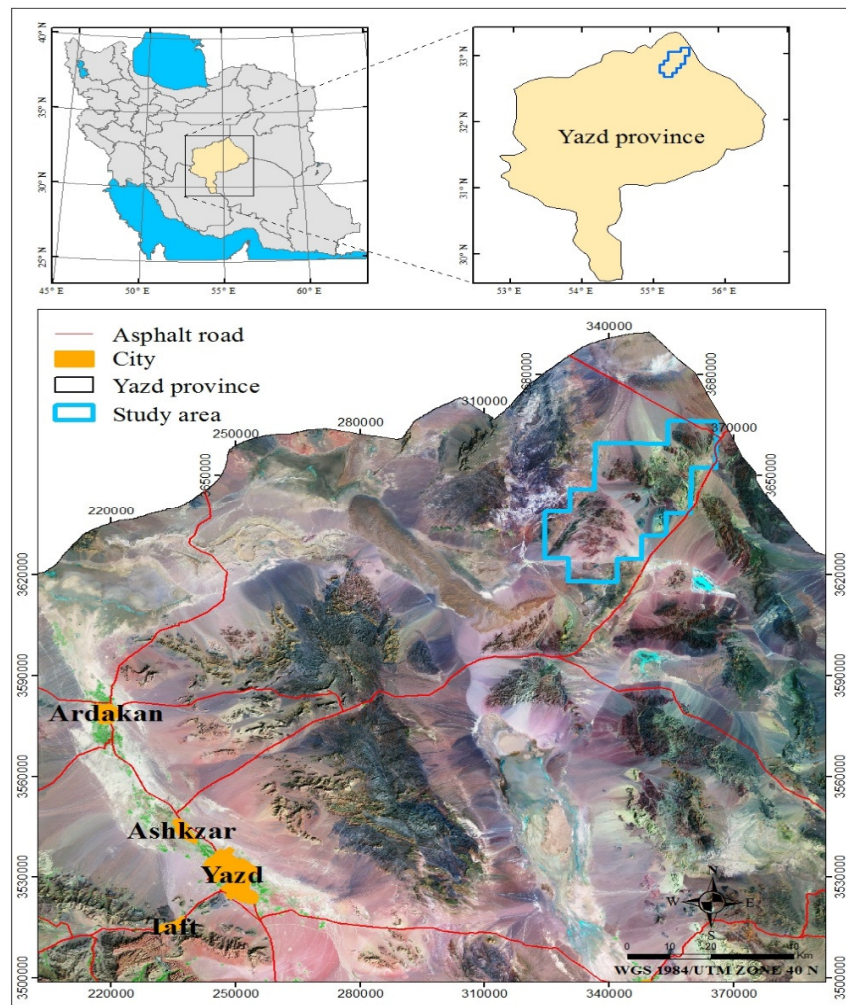
آمفیبولیت‌های افیولیت پشت بادام و کمپلکس چاپدونی" نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که دو نوع آمفیبولیت در افیولیت پشت‌بادام وجود دارد؛ آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز حدواسط که شامل کانی‌های هورنبلند چرماکیتی و هورنبلند آهن‌دار، پلاژیوکلاز آندزین تا لابرادوریت، کوارتز، اسفن، ایلمنیت، اپیدوت، آپاتیت و سربیسیت می‌باشد و آمفیبولیت‌های با پلاژیوکلاز غنی از آنورتیت و هورنبلند نوع شرماکیتی و هورنبلند منیزیم‌دار، پلاژیوکلاز از نوع بیتونیت تا آنورتیت، کوارتز، اسفن، ایلمنیت، کلریت، گارنت و موسکویت و لوکوکسن تشکیل شده‌اند. این آمفیبولیت‌ها سه مرحله دگرگونی را نشان می‌دهد و از لحاظ عناصر REE بسیار تپی‌شدگی نشان می‌دهند. (مختاری و ترابی، ۱۳۹۱). "پترولوژی سنگ‌های آتش‌فشانی ائوسن سازند چاپدونی" نتایج این مطالعه نشان می‌دهد سنگ‌های آتشفشانی منطقه چاپدونی در محدوده تراکی آندزیت قرار داشته و شامل کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز، سانیدین، بیوتیت، کوارتز، مگنتیت، اسفن، هماتیت، کلسدون، کلسیت و کلریت هستند. جایگاه تکتونیکی مجموعه آتش‌فشانی ائوسن بلوک پشت‌بادام را، با توجه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی ناحیه، یک قوس آتش‌فشانی می‌توان در نظر گرفت. الگوی عناصر نادر خاکی حاکی از غنی بودن از نظر LREE و LILE و فقیر بودن از نظر گروه HFS (Ta, Ti) و Nb) می‌باشد که از مشخصه‌های ماگماتیسیم مرتبط با زون فرورانش است. (قره‌چاهی و ترابی، ۱۳۹۸). "مدل‌سازی و تعیین تیپ کانسارهای عناصر نادر خاکی در کمپلکس چاپدونی-پشت بادام" در این پژوهش از روش مدل‌سازی شبکه‌ای برای تعیین تیپ و پتانسیل کانی‌سازی توریم - عناصر نادر خاکی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. بر مبنای بررسی‌ها صورت گرفته، تیپ‌های کانی‌سازی مرتبط با گرانیت، متاسوماتیسیم و دگرگونی برای توریم- عناصر نادر خاکی در کمپلکس چاپدونی-پشت بادام تعیین گردید. (احمدخانی و همکاران، ۱۳۹۹). "ارتباط دگر نهادی قلیایی و کانی‌سازی عناصر (Ti, U, Th, REE) در منطقه معدنی ساغند" این پژوهش نشان می‌دهد تفسیر ویژگی‌های زمین‌شیمیایی عناصر U, Th, REE در سنگ‌های دگرنهادی کانه‌زایی شده، سنگ‌های مادر و گرانیت‌های مجاور کانسار و نیز نبود شواهدی از نفوذ

باشیم. به دلیل اهمیت بالای این عناصر، شناسایی ذخایر و منابع کوچک نیز می‌تواند برای کشور از ارزش بالایی برخوردار باشد. در سال‌های اخیر طرح پتانسیل‌یابی عناصر کمیاب فلزی در مناطقی از کشور توسط سازمان زمین‌شناسی به اجرا در آمد. این طرح که در قسمت‌هایی از مناطق ایران مرکزی و از جمله منطقه آذربایجان و خراسان انجام گردید مناطق محتمل و مستعد برای غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی معرفی گردیدند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۴).

در این پژوهش با بکارگیری دلنش و فنون مختلف اکتشافات زمین‌شناسی، عناصر نادر خاکی در کمپلکس چاپدونی-پشت بادام مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج مفیدی در این زمینه به دست آمده است. مبحث کانی‌شناسی و کانه‌زایی که یکی از اساسی‌ترین بخش‌های هر پروژه اکتشافات زمین‌شناسی محسوب می‌شود از اهداف اصلی این پژوهش است. نتیجه این مطالعات معرفی منطقه مورد مطالعه (کمپلکس چاپدونی-پشت بادام) به عنوان یکی از مناطق دارای پتانسیل بالا برای عناصر نادر خاکی است. در زمینه عناصر نادر خاکی در منطقه، مواردی از مطالعات پیشین در قالب طرح اکتشافی و یا پژوهشی صورت گرفته است که منجر به شناسایی و معرفی تعدادی مناطق با پتانسیل بالا گردیده است. برخی از این فعالیت‌ها و مطالعات مهم عبارتند از؛ "مطالعات دفتری- صحرایی برای شناسایی محدوده‌های امیدبخش کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در استان یزد" که با مطالعات ناحیه‌ای در فاز شناسایی اکتشاف عناصر نادر خاکی در ۱۴ برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ انجام شد و در نهایت مناطق دارای پتانسیل بالا معرفی گردید. (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۴). "مطالعه گرانیت‌های ائوسن نوع S در کمپلکس دگرگونی حلقوی چاپدونی" و نتایج این مطالعه حاکی از آن است که این گرانیت‌ها، ماهیت کالک‌آلکان، پرآلمین و از نوع S می‌باشد و به سن ائوسن است. این گرانیت‌ها را فقیر از عناصر نادر خاکی نشان داده و حاصل جایگیری ماگمای برگرفته از گوشته در زیر پوسته قاره‌ای، تشکیل کمپلکس دگرگونی حلقوی در ترازهای بالایی پوسته و ذوب سنگ‌های رسوبی پوسته قاره‌ای هستند. (زکی‌پور و ترابی، ۱۳۹۵). "پترولوژی

شناسایی و پتانسیل‌یابی این عناصر انجام داده، بقیه فعالیت‌های صورت گرفته، مباحثی در زمینه‌های مختلف زمین‌شناسی بوده که اغلب آن‌ها در قالب مطالعات پژوهشی دانشگاهی است. پژوهش حاضر، به صورت متمرکز بر روی کمپلکس چاپدونی-پشت بادام با محوریت کانی‌شناسی و کانی‌سازی عناصر نادر خاکی است که با بکارگیری دانش و فنون مختلف اکتشافات زمین‌شناسی به دست آمده است.

ماگماهای کربناتیته یا آلکالن در محدوده کانسار، بیانگر وجود ارتباط میان دگرنهادی و کانه‌زایی با ماگماتیسم گرانیتوئیدی کالک‌آلکالن در منطقه است. (دیمر و همکاران، ۱۳۹۶). "مطالعه متالوژنی عناصر نادر خاکی در بلوک پشت بادام" نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بلوک متالوژنیک پشت بادام (ایران مرکزی) یک زون مناسب برای کانی‌سازی عناصر نادر خاکی به شمار می‌رود (مختاری، ۲۰۱۵). به جز سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور که مطالعات ناحیه‌ای برای



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location and map of access roads to the study area

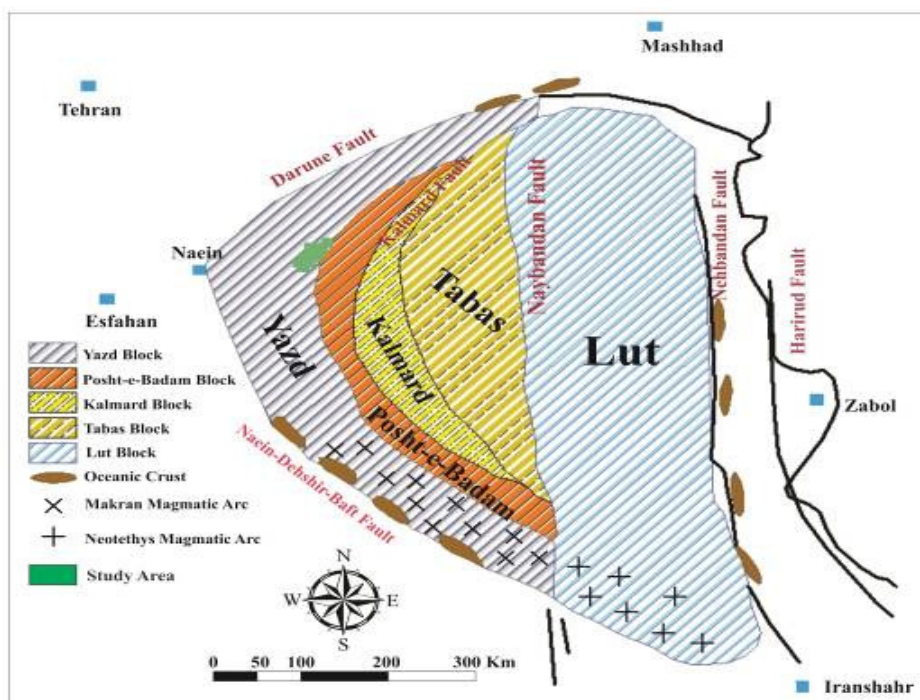
طیس قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های ارتباطی منطقه را نشان می‌دهد. این منطقه از نظر جایگاه زمین‌شناسی در زون ساختاری خرده قاره ایران مرکزی قرار دارد (شکل ۲). محدوده مورد مطالعه

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه در شمال شرق استان یزد و در فاصله ۱۴۰ کیلومتری از مرکز استان و ۱۶۰ کیلومتری از شهر

واحدهای رسوبی شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل و آهک تشکیل شده است. در داخل این سنگ‌ها توده‌های نفوذی متعددی مشاهده می‌شود که شامل توده‌های دیوریتی، کوآرتز دیوریتی - گرانودیوریتی و گرانیتی است (شکل‌های ۳ و ۴). گنیس، گرانیت، گرانیت-گنیس، میگماتیت و شیست از مهم‌ترین سنگ‌های میزبان برای کانه‌زایی عناصر نادر خاکی هستند که عمدتاً دگرسان و دگرگون شده هستند. متاسوماتیتی شدن (سدیک) سنگ میزبان از بارزترین شواهد دگرسانی برای غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی در منطقه است.

بخشی از برگه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ ساغند (باباخانی و مجیدی، ۱۳۷۸)، بیاضه (نبوی و هوشمندزاده، ۱۳۷۹)، و پشت بادام (حقی‌پور، ۱۳۵۶) است که بخش عمده‌ای از آن در برگه ساغند واقع شده است. واحدهای سنگی منطقه شامل سنگ‌های دگرگونی، آذرین و رسوبی است. بر اساس نقشه‌های مذکور و همچنین بر اساس نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه (شکل ۳) بیشتر رخنمون‌های سنگی موجود در منطقه را مجموعه دگرگون شده چاپدونی و پشت بادام به سن پرکامبرین تشکیل می‌دهند. واحدهای سنگی به سن کرتاسه در این ناحیه از



شکل ۲. موقعیت محدوده مورد مطالعه در زون خرده قاره ایران مرکزی (آقانیاتی، ۱۳۸۳).

Fig. 2. The location of the studied area in the micro-structural zone of the central Iranian continent

مختلف مطالعات آزمایشگاهی و آنالیز، مانند ICP-MS، XRD، Heavy Mineral، Thin Section، Polish Section، Thin-Polish، SEM-EDS به کار گرفته شده است.

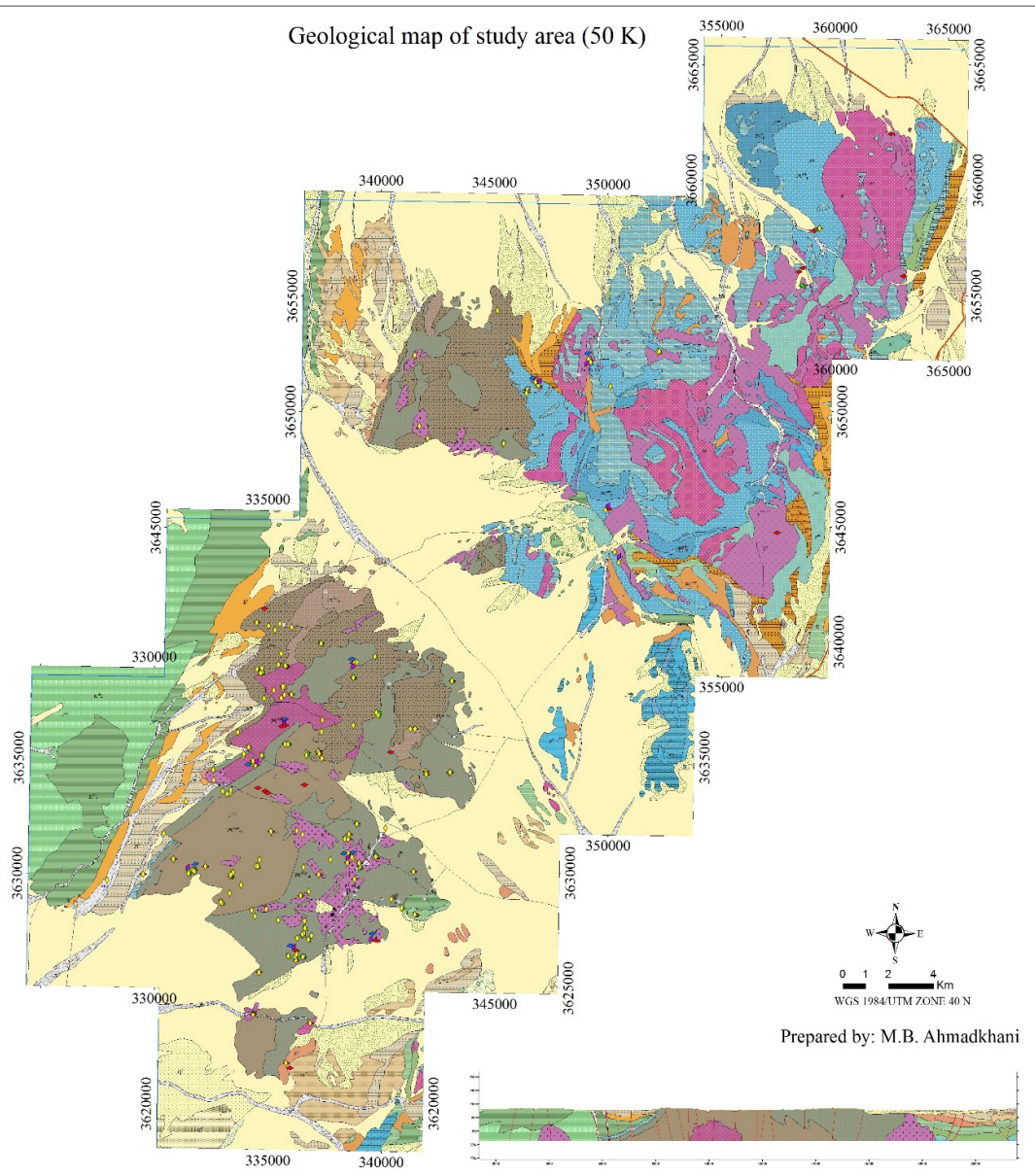
از روش آنالیز ICP-MS (آزمایشگاه شرکت زرآزما) برای تعیین عیار عناصر نادر خاکی استفاده شد. مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها برای آنالیز شیمیایی به ترتیب شامل؛ خشک کردن و رطوبت‌گیری نمونه کل، خرد کردن و پودر کردن، مخلوط و همگن کردن، تقسیم نمونه، پودر کردن، همگن‌سازی و در نهایت تجزیه نمونه انجام گرفت. از روش پراش اشعه مجهول (XRD) برای مطالعات

### ۳- مواد و روش‌ها

به منظور پی‌جویی و تحقق اهداف پژوهش، مراحل مختلف اکتشافی، برنامه‌ریزی و اجرا شده است. در این زمینه تلفیقی از مطالعات فنی-دفتری و زمین‌شناسی صحرایی به کار گرفته شده است. بعد از پتانسیل‌یابی و شناسایی مناطق دارای ناهنجاری (آنومالی) اقدام به نمونه‌برداری غیرسیستماتیک گردیده است. نمونه‌برداری لیتوژئوشیمیایی به روش لب‌پری، شیلیاری و توده‌ای یا حجیم صورت گرفته است. در این پژوهش برای بررسی کانی‌شناسی و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی، روش‌های

اکتشافات معدنی استان البرز) برای کانی‌شناسی دقیق کانی‌های ریز عناصر نادر خاکی و تعیین روابط پاراژنری استفاده گردید. این دستگاه با قابلیت بزرگنمایی ۵۰ تا ۸۰۰۰۰ هزار برابر می‌باشد. قبل از آنالیز مراحل آماده‌سازی انجام گرفته و نمونه‌ها با پوشش‌دهی طلا<sup>۱</sup> وارد مرحله آنالیز با دستگاه گردید.

کانی‌شناسی (آزمایشگاه شرکت زرآما)، از میکروسکوپ پلاریزان (آزمایشگاه سازمان انرژی اتمی ایران) برای مطالعه پتروگرافی و مینرالوگرافی مقاطع نازک و صیقلی، از میکروسکوپ بینوکولار (دانشگاه شهید بهشتی و شرکت زمین ریزکاو) برای مطالعه کانی‌های سنگین، از میکروسکوپ الکترونی (ZEISS Sigma300) FE-SEM-EDS (مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰۰ و واحدهای سنگی منطقه

Fig. 3. 1:50000 geological map and rock units of the area



شکل ۴. راهنمای نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه

Fig. 4. Legend of the 1:50000 geological map of the area

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- غنی‌شدگی و کانی‌سازی عناصر نادر خاکی

کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه از تنوع زیادی برخوردار است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها عناصر نادر خاکی (REE) است و بررسی کانی‌شناسی و کانی‌سازی این عناصر از اهداف اصلی این پژوهش است. بر اساس مطالعات و اکتشافات انجام شده در منطقه، واحدهای سنگی مولد و عقیم از نظر کانی‌سازی عناصر نادر خاکی شناسایی و تفکیک شده‌اند که واحدهای سنگی گنیس، گرانیت،

گرانیت-گنیس، میگماتیت و شیست از مهم‌ترین سنگ‌های میزبان برای عناصر هدف محسوب می‌شوند. جهت عیارسنجی عناصر، به تعداد ۱۷۰ نمونه از واحدهای سنگی مختلف نمونه‌برداری صورت گرفته است. نتایج اولیه مطالعات، غنی‌شدگی و کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در منطقه را نشان می‌دهد. عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) در منطقه از غنی‌شدگی بیشتری برخوردار است. از بین عناصر نادر خاکی سبک (Sm-Nd-Pr-La-Ce)، سریم (Ce) با عیار

میانگین ppm ۲۵۲ نسبت به سایر عناصر این گروه غنی‌شدگی نسبی را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نتایج برخی از نمونه‌های تجزیه شده ارائه شده است.

میانگین ppm ۱۳۵۳ و لانتانیم (La) با عیار میانگین ppm ۷۴۵ از بیشترین غنی‌شدگی برخوردار است. از بین عناصر نادر سنگین (Dy-Y-Gd-Yb-Er)، ایتیریم (Y) با عیار

جدول ۱. نتایج تجزیه ICP-MS تعدادی از نمونه‌های منطقه مورد مطالعه (نتایج تجزیه بر حسب PPM است)

Table 1. ICP-MS analysis results of a number of samples from the studied area (analysis results are in PPM)

ID	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	La	Lu	Nd	Pr	Sc	Sm	Tb	Tm	Y	Yb	ΣREE+Y	Lithology
99-319-BOC-161	123	183.5	140.7	6.73	54.1	54	17	55.4	13.13	23	23.45	17.6	21.1	1361	127	2220.5	Migmatite-Schist
99-319-BOC-168	90	191	128	9.4	64.65	42	13.7	43.4	9.72	19	25.79	19.9	19	1271	102	2048.8	Migmatite
99-319-BOC-167	130	146.8	107	9.48	50.84	64	13.1	62	15.18	18	25.64	15	17	1002	96.6	1772.7	Schist-Gneiss
99-319-BOC-223	1658	112.7	59.53	1.69	112.3	848	7.36	587.4	165.3	8.7	133.1	17	8.24	592.7	48.8	4360.8	Gneiss
99-319-BOC-171	359	108	56.45	14	82.28	172	4.76	201	43.8	12	94.95	14.2	7.3	563.8	35.5	1769.3	Schist-Gneiss
99-319-BOC-196	112	78.59	47.98	6.17	41.58	55	5.46	61.9	13.59	18	30.97	9.55	7.19	470.3	38.7	996.5	Schist-Gneiss
99-319-BOC-169	175	71.62	41.46	9.1	45.32	92	5.01	104.7	24.35	35	39.09	9.55	6.19	395.6	34.6	1088.4	Migmatite
96-EXP-CI-024	132	57.92	33.77	11.5	49.38	44	4.21	106.6	20.88	27	39.94	8.2	4.71	345.9	30.9	917	Granite-Gneiss
99-319-BOC-225	3149	104.2	34.23	4.98	197.3	1554	2.41	1305	346.3	5.3	260.8	21.5	3.39	336.9	16	7340.8	Granite-Gneiss
99-319-BOC-092	133	46.92	28.45	5.04	26.65	72	3.42	54.9	14.18	19	19.2	5.71	4.25	285.6	26	744.7	Migmatite-Schist
96-EXP-CI-022	1703	99.97	37.13	6.82	131.5	701	3.41	700.9	193.7	21	188.9	17.9	4.44	239.9	27.4	4077	Granite
97-EXP-CI-069	208	54.83	31.07	9.47	49.91	99	3.52	117.1	27.92	24	38.99	7.78	4.37	236.4	22.7	935	Schist-Gneiss
97-EXP-CI-064	875	60.17	27.22	1.26	75.31	458	2.33	324.7	102.7	6.6	69.51	9.35	3.2	221.2	15.8	2252	Granite
96-EXP-CI-013	1876	41.26	18.26	1.26	70.69	1021	1.87	564.5	177.3	41	85.19	7.46	2.23	187.5	13.2	4108	Granite-Gneiss
98-319-BOC-092	182	40.5	22.63	5.25	27.08	82	1.89	87.6	21.4	15	28.49	3.99	3.25	180	12.4	714	Granite-Gneiss
99-319-BOC-141	7332	53.54	20.18	8.67	162.9	3992	1.3	1974	624.5	25	228.1	13	1.78	160.3	10	14606.9	Alluvium
97-EXP-CI-112	7289	64.97	19.88	9.53	202	4086	1.34	2272	745.1	24	256.6	13.9	1.78	136.2	9.3	15131	Alluvium
97-EXP-CI-088	948	43.72	14.79	2.37	84.77	474	1.04	420.4	116.7	14	88.25	8.37	1.54	131.1	7.5	2357	Granite-Gneiss
97-EXP-CI-067	2644	30.48	14.72	10.8	64.08	1931	1.47	675	254.2	15	69.62	5.36	1.85	96.6	9.5	5824	Granite
96-EXP-CI-011	782	21.3	9.55	0.93	33.22	449	0.94	250.6	77.28	37	39.52	3.67	1.23	93.2	6.7	1806	Granite
96-EXP-CI-019	811	32.59	13.05	4.16	45.96	364	1.36	324.5	93.43	19	69.23	5.82	1.69	88.7	10.2	1884	Granite
96-EXP-CI-021	4381	41.24	14.93	5.47	127.7	2395	1.69	1759	537.1	17	297.4	9.59	1.75	83.8	11.6	9684	Granite
99-319-BOC-153	303	19.17	8.66	1.87	25.77	149	0.95	132.5	33.32	6.6	28.9	3.43	1.09	81.7	5.8	801.8	Granite-Gneiss
97-EXP-CI-087	606	27.66	8.28	1.91	60.85	322	0.49	275.4	75.4	1.5	59.65	5.57	0.77	77.7	3.1	1526	Gneiss
99-319-BOC-142	2590	20.34	8.09	4.01	60.96	1409	0.61	707.8	222.1	13	82.14	5.35	0.81	66.6	4.4	5195.5	Alluvium
99-319-BOC-140	1996	14.54	5.7	2.96	44.24	1082	0.46	519.1	162.2	9.6	59.16	3.76	0.58	49.1	3.1	3952.5	Alluvium
96-EXP-CI-020	497	9.29	6.12	1.22	10.81	238	0.94	119.3	46.41	21	17.31	1.4	0.97	40.3	6.4	1017	Granite
96-EXP-CI-027	640	17.92	6.67	4.14	27.35	327	0.78	210.5	65.7	31	41.34	3.26	0.92	38.4	5.8	1421	Granite
96-EXP-CI-016	2125	10.63	4.03	8.36	31.22	1536	0.51	429.9	173.1	3	37.37	2.24	0.52	37	3.2	4402	Granite
99-319-BOC-145	1226	11.35	4.81	2.79	30.68	661	0.41	362.8	115.7	8.1	43.33	2.7	0.51	35.2	2.5	2507.9	Alluvium
99-319-BOC-144	928	9.06	3.86	2.66	24.13	526	0.32	290.9	92.44	6.9	34.69	2.17	0.42	31.5	2.3	1955.4	Alluvium
98-319-BOC-129	268	5.92	2.83	2.01	8.97	138	0.28	85.1	27.24	4.6	12.13	0.99	0.37	21.1	1.4	579	Gneiss
96-EXP-CI-014	539	6.64	3.09	0.71	11.36	263	0.6	139.6	52.04	10	19.53	1.2	0.52	18.4	3.3	1069	Granite
97-EXP-CI-090	315	4.33	2.12	1.43	8.71	208	0.21	86.7	29.86	4.6	10.27	0.81	0.26	16.5	1.2	690	Granite-Gneiss
98-319-BOC-107	234	4.76	2.19	1.87	9.04	175	0.2	98.2	31.69	6.2	12.42	0.93	0.3	15.9	1.2	594	Granite-Gneiss
Detection limit	0.5	0.0	0.1	0.1	0.1	1.0	0.1	0.5	0.1	0.5	0.0	0.1	0.1	0.5	0.1		

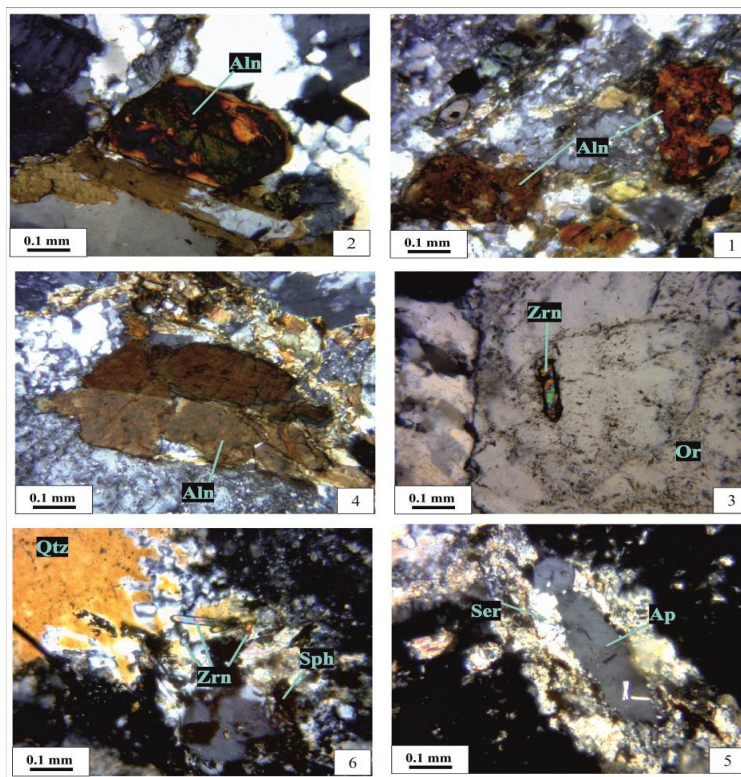
زمین‌شناسی رخنمون‌ها و یا مغزه‌های حفاری تا حدودی می‌توان به اطلاعات رسید، اما مطالعات کانی‌شناسی عملاً به مطالعات آزمایشگاهی و آنالیز دستگاهی محدود است. بدین منظور برای تعیین نهشت کانی‌ها از آنالیز دقیق بافت‌ها و ساخت‌های میکروسکوپی استفاده می‌شود. از مجموعه مطالعات انجام شده در منطقه که بیشتر تمرکزها روی نقاط ناهنجاری‌های (آنومالی) شناسایی شده بوده است نشان می‌دهد که غنی‌شدگی قابل توجهی از عناصر نادر خاکی در منطقه صورت گرفته و کانی‌های حامل و ردیاب این عناصر شناسایی شده است.

#### ۴-۲- کانی‌شناسی و کانه‌نگاری عناصر نادر خاکی

آگاه بودن از دانش کانی‌شناسی و کانه نگاری برای تشخیص و تعیین نوع کانسار و همچنین برای تعیین روابط پاراژنزی کانی‌ها در یک کانسار، نتایج مثبتی را در پی خواهد داشت. ترکیب شیمیایی کانی‌ها معین است و هر کانی دارای مشخصات ویژه مانند سیستم تبلور، سختی، کلیواژ، جرم مخصوص و رنگ می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه به منظور شناسایی نوع کانی‌های حامل و واجد عناصر نادر خاکی اقدام به نمونه‌برداری از نقاط دارای کانی‌سازی گردیده است. اگرچه با بررسی

مختلفی از کانی‌های فلزی و غیرفلزی شناسایی شده است که از مهم‌ترین و فراوان‌ترین آن‌ها در سنگ‌های میزبان می‌توان به کانی‌های آلانیت، کوارتز، آلبیت، ارتوکلاز، بیوتیت، سریسیت، فلوگوپیت، هورنبلند، آپاتیت، زیرکن، باریت، اسفن، روتیل، آناز، نیگرین، لوکوکسن، کلسیت، ترمولیت، گارنت، پیروکسن، آمفیبول، اپیدوت، کلریت، ایلمنیت، پیریت، لیمونیت، مگنتیت، مونازیت، گوتیت، هماتیت و انواع کانی‌های رسی اشاره کرد (شکل‌های ۵ و ۶). در این بین کانی‌های آلانیت، زیرکن، مونازیت، آپاتیت و اسفن (تیتانیت) به عنوان کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی تشخیص داده شده است.

۳-۴- مطالعات میکروسکوپی نور عبوری و انعکاسی<sup>۱</sup> همزمان با پیشرفت مراحل مختلف تحقیق و پژوهش و مطالعات زمین‌شناسی منطقه اقدام به نمونه‌برداری برای مطالعات کانی‌شناسی با میکروسکوپ پلاریزان گردیده است. نمونه‌ها عمدتاً از سنگ‌های میزبان دارای غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی تهیه شده است (۴۰ نمونه مقطع نازک، ۱۰ نمونه مقطع نازک صیقلی و ۱۰ نمونه مقطع صیقلی). با این اقدام شناخت انواع کانه‌ها و کانی‌های اصلی و فرعی سنگ میزبان، بررسی نوع دگرسانی، فرآیندها و فازهای کانی‌سازی، تعیین بافت و اسم سنگ، بررسی پاراژنز کانه‌ها، تیپ کانی‌سازی و کانی‌های باطله فراهم گردید. انواع



شکل ۵. ۱- تشکیل آلانیت در سنگ میزبان شیست (نمونه 98-319-BOC-016)، ۲- تشکیل آلانیت در سنگ میزبان گرانیت-گنیس (نمونه-BOC 98-319-133)، ۳ و ۴- تشکیل زیرکن و آلانیت در سنگ میزبان گنیس (نمونه 98-319-BOC-088)، ۵ و ۶- تشکیل آپاتیت و زیرکن در سنگ میزبان گرانیت (نمونه 98-319-BOC-085). تمامی تصاویر XPL هستند. (زیرکن: Zrn، ارتوکلاز: Or، آلانیت: Aln، کوارتز: Qtz، سریسیت: Ser، آپاتیت: Ap، اسفن: Sph)

Fig. 5. 1- Formation of allanite in schist host rock (sample 98-319-BOC-016), 2- Formation of allanite in granite-gneiss host rock (sample 98-319-BOC-133), 3 and 4- Formation of zircon and allanite in gneiss host rock (sample 98-319-BOC-088), 5 and 6- formation of apatite and zircon in granite host rock (sample 98-319-BOC-085). All images are XPL.

۵) و همچنین غنی از کانی‌هایی مانند آلبیت، ارتوکلاز و کوارتز است (شکل ۶) که معرف محیط‌های متاسوماتیتی در منطقه است. دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیکی،

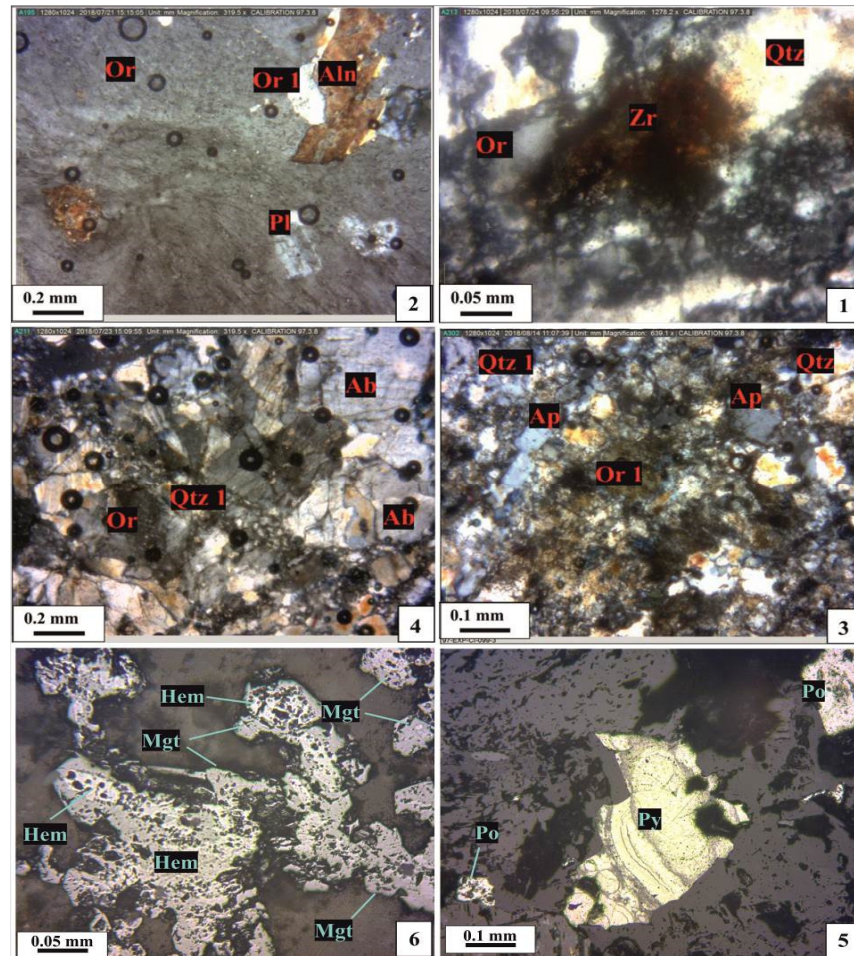
نتایج مطالعات میکروسکوپی مقاطع نشان می‌دهد که نمونه‌های سنگ میزبان غنی از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی مانند آلانیت، زیرکن، آپاتیت و اسفن است (شکل

<sup>1</sup> Thin-Polish, Thin Section, Polish Section



متاسوماتیتی شدن سنگ میزبان از بارزترین شواهد دگرسانی برای غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی در منطقه است.

کلریتی، سریسیتی و بیوتیتی و پدیده متاسوماتیتی شدن سدیک (آلبیتی شدن) از مهم‌ترین دگرسانی‌های شناسایی شده در مطالعات میکروسکوپی مقاطع می‌باشد.



شکل ۶. ۱- کانی‌زایی زیرکن در سنگ میزبان گرانیت متاسوماتیتی (نمونه 97-EXP-CI-041)، ۲- کانی‌زایی آلانیت در سنگ میزبان گرانیت-گنیس (نمونه 97-EXP-CI-037)، ۳- کانی‌زایی آپاتیت در سنگ میزبان گرانیت-گنیس (نمونه 97-EXP-CI-099)، ۴- آلبیتی شدن در سنگ میزبان گرانیت (نمونه 97-EXP-CI-040)، ۵- کانی‌سازی سولفیدی در سنگ میزبان گنیس (نمونه 98-319-BOC-034)، ۶- کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت در سنگ میزبان گرانیت (نمونه 98-319-BOC-043)، تصاویر ۱ الی ۴ مقاطع نازک و XPL هستند. تصاویر ۵ و ۶ مقاطع صیقلی هستند. (زیرکن: Zr، ارتوکلاز: Or، آلانیت: Aln، کوارتز: Qtz، آلبیت: Ab، آپاتیت: Ap، پلاژیوکلاز: Pl، پیریت: Py، پیروتیت: Po، هماتیت: Hem، مگنتیت: Mgt)

Fig. 6. 1- Zircon mineralization in metasomatite granite host rock (sample 97-EXP-CI-041), 2- Allanite mineralization in granite-gneiss host rock (sample 97-EXP-CI-037), 3- Apatite mineralization in granite-gneiss host rock (sample 97-EXP-CI-099), 4- albitization in granite host rock (sample 97-EXP-CI-040), 5- sulphide mineralization in gneiss host rock (sample BOC-034 - 98-319), 6- Hematite and magnetite mineralization in granite host rock (Sample BOC-043-98-319), images 1 to 4 are XPL thin sections, images 5 and 6 are polished sections.

مختلفی از کانی‌ها شناسایی شده است که آپاتیت و فلئوروآپاتیت از مهم‌ترین کانی‌های حاصل عناصر نادر خاکی می‌باشد. همان طوریکه در نتایج داده‌های XRD مشاهده می‌شود (جدول ۲) فاز اصلی و غالب پاراژنز کانی‌ها، فاز کوارتز-آلبیت-ارتوکلاز با کانی‌های رسی است. این می‌تواند بیانگر یکی از فازهای پاراژنزی مهم در

#### ۴-۴- کانی‌شناسی با روش XRD

کانی‌شناسی به روش XRD یکی از روش‌های به کار گرفته شده در این پژوهش بوده است. در این زمینه به تعداد ۴۷ نمونه برای آنالیز به روش XRD تهیه گردیده است. نمونه‌ها عمدتاً از واحدهای سنگی میزبان که دارای غنی‌شدگی عناصر هدف می‌باشد تهیه شده است. انواع

که فاز متاسوماتیت را نمی‌توان به کل منطقه تعمیم داد بلکه نتیجه‌گیری می‌شود که حداقل بخشی از کانی‌سازی‌ها و غنی‌شدگی عناصر در ارتباط با این پدیده باشد.

تیپ‌های کانساری متاسوماتیت با دخالت محلول‌های گرمایی (فاز هیدروترمال) باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در این زمینه به نظر می‌رسد فاز آلبیت متاسوماتیت، یعنی فاز سدیک، فاز غالب متاسوماتیت باشد. لازم به ذکر

جدول ۲. نتایج آنالیز XRD تعدادی از نمونه‌های منطقه

Table 2. XRD analysis results of a number of samples from the area

Sample-NO	Lithology	Minerals
97-EXP-CI-048	granite	Albite-Quartz-Microcline-Muscovite- Illite
97-EXP-CI-049	Granite-Gneise	Albite-Quartz-Orthoclase -Muscovite- Illite
97-EXP-CI-051	Granite-Gneiss	Quartz-Albite- Calcite-Muscovite- Illite-Orthoclase Or Sanidine
97-EXP-CI-053	Granite	Albite -Quartz-Microcline-Orthoclase -Muscovite- Illite
97-EXP-CI-100	Schist	Albite-Quartz-Calcite-Muscovite - Illite-Montmorillonite-Microcline-Hornblende
97-EXP-CI-101	Mica schist	Quartz-Muscovite- Illite- Albite-Microcline-Goethite
98-319-CI-024	Schist	Hematite-Quartz -Natro jarosite
98-319-CI-027	Granodiorite	Quartz -Albite -Muscovite- Illite-Chlorite
98-319-CI-048	Skarn	Quartz -Hematite-Calcite-Goethite-Andradite-Epidote
98-319-CI-051	Iron Vein	Hematite-Magnesioferrite-Magnetite-Magnesite-Tremolite-Pyrite
98-319-CI-093	Schist	Quartz -Albite -Andesine-Tremolite-Biotite -Chlorite-Montmorillonite
98-319-CI-095	Schist	Quartz-Albite -Andesine-Chlorite-Phlogopite
98-319-CI-113	Schist	Albite -Quartz -Andesine-Halite-Talc-Biotite or Phlogopite
98-319-CI-122	Gneiss	Quartz -Grossular-Diopside-Montmorillonite (Low)
99-319-CI-147	Alluvium	Quartz -Orthoclase-Microcline-Plagioclases -Phlogopite-Diopside-Chlorite
99-319-CI-162	Migmatite-micaschist	Quartz -Plagioclases-Biotite -Hedenbergite
99-319-CI-174	Migmatite	Quartz -Plagioclases-Calcite-Biotite -Diopside-Montmorillonite
99-319-CI-190	Alluvium	Quartz -Plagioclases -Orthoclase-Biotite -Calcite-Pyrite-Diopside
99-319-CI-199	Mica Schist	Quartz -Plagioclases-Cordierite-Phlogopite
99-319-CI-221	Geniss	Quartz -Plagioclases-Hyalophane-Orthoclase-Microcline
99-319-CI-243	Gneiss-Micaschist	Quartz -Plagioclases - Bassanite- Gypsum- Phlogopite-Fluor apatite
99-319-CI-281	Gneiss-Amphibolite	Epidote- Calcite- Quartz - Orthoclase Or Sanidine- Fluor apatite- Diopside- Cordierite

۲- در فاز مغناطیسی متوسط (AV): کانی‌های گارنت و پیروکسن، بصورت انتشار گرم در تن و کانی‌های آمفیبول، اپیدوت، ایلمنیت، پیریت اکسید شده، لیمونیت و بیوتیت با فراوانی کم و چندذره‌ای مشاهده شده است.  
 ۳- در فاز مغناطیسی شدید (AA): کانی مگنیت هم بصورت انتشار گرم در تن در منطقه مشاهده شده است.  
 ۴- بر اساس مطالعه این نمونه، کانی مونازیت به مقدار ۴ ذره و کوندوم صورتی رنگ به مقدار ۵ ذره مشاهده شده است.

#### ۴-۵- مطالعات کانی سنگین<sup>۱</sup>

نمونه رسوب پس از آماده سازی و تغلیظ کانی سنگین بررسی شد و نتایج زیر طی بررسی‌های میکروسکوپی بدست آمد.  
 ۱- در فاز غیر مغناطیسی یا فاز NM: کانی‌های زیرکن، باریت، آپاتیت، اسفن، کوارتز و فلدسپار به صورت انتشار گرم در تن و کانی‌های روتیل، آناتاز، نیگرین، لوکوکسن و کلسیت با فراوانی کم و چندذره‌ای<sup>۲</sup> مشاهده شده است.

<sup>2</sup> Particles-PTS

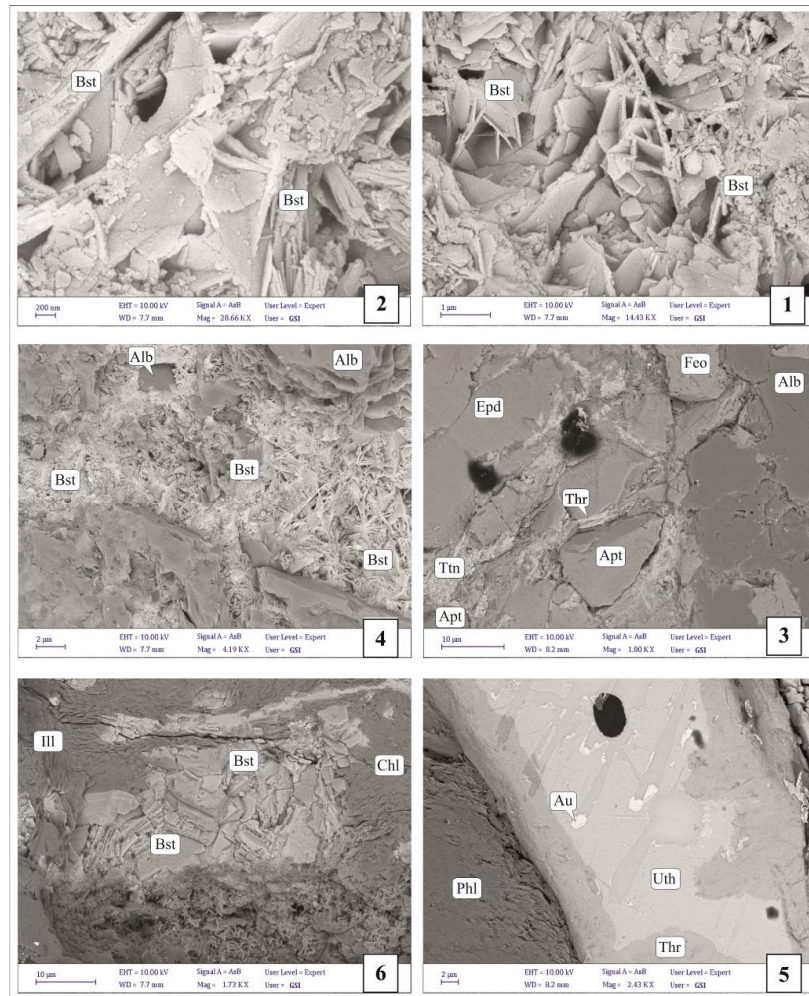
<sup>1</sup> Heavy Mineral

نتایج مطالعات کانی سنگین، حضور کانی‌های واجد عناصر نادر خاکی مانند مونازیت، زیرکن، آپاتیت و اسفن را نشان می‌دهد.

۴-۶- مطالعات کانی‌شناسی به روش میکروسکوپ الکترونی (FE-SEM-EDS)

آخرین مرحله از روش به کارگیری برای شناسایی کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی (REE) در منطقه مورد مطالعه، استفاده از روش میکروسکوپ الکترونی (FE-

SEM-EDS) است. همان طوریکه اشاره گردید قبل از این مرحله با مطالعه و روش‌های مختلف آنالیز، مقدار عیار، سنگ میزبان، دگرسانی و کانی‌های موجود شناسایی گردید. بنابراین در این مرحله با توجه به اطلاعات موجود، با آگاهی و شناخت بهتر، صرفاً جهت شناسایی دقیق کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی مورد توجه قرار گرفته است بدین منظور نمونه‌های دارای غنی‌شدگی عناصر هدف انتخاب گردیده (۱۵ نمونه) بعد از تهیه مقاطع صیقلی مناسب، با طلا پوشش (Coating) داده شده است.

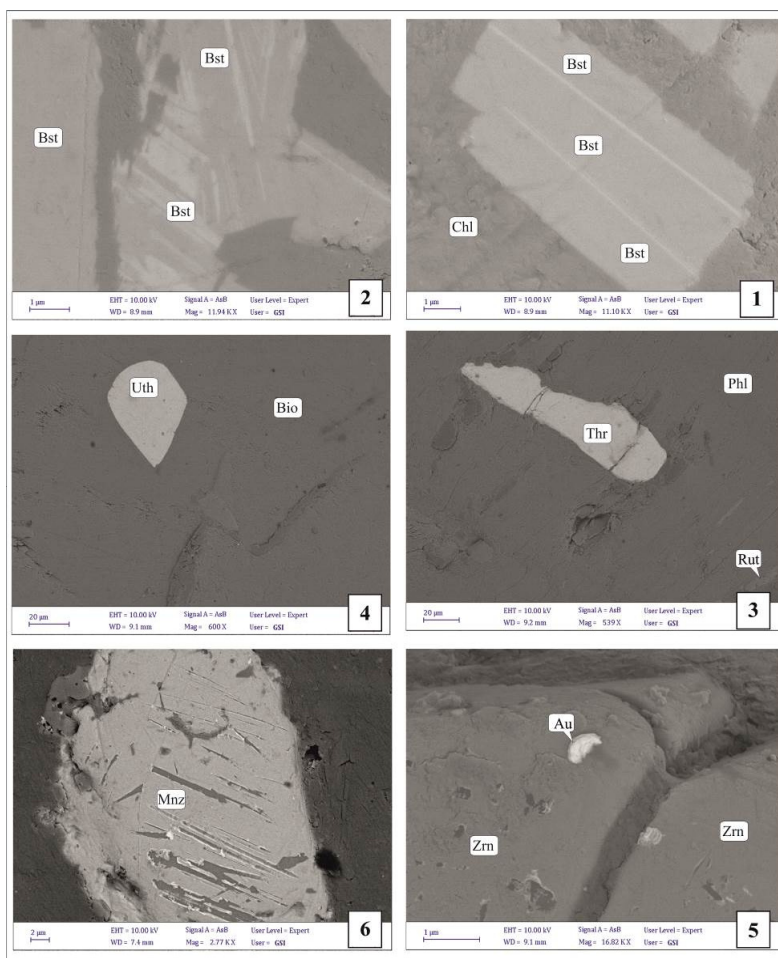


شکل ۷. تصاویر BSE از مقطع تهیه شده از سنگ میزبان گرانیت (نمونه 99-BOC-177)، ۱ و ۲- تصویری از کانی‌زایی باستانزیت از کانی‌های اصلی واجد عناصر نادر خاکی، ۳- تصویری از کانی‌زایی توریت، آپاتیت و تیتانیت از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی، ۴- تصویری از کانی‌زایی باستانزیت از کانی‌های اصلی و آل بیت (متاسوماتیسم سدیک)، ۵- تصویری از کانی‌زایی توریت و اورانوتوریت (حاوی انکلوزیون طلا) از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی، ۶- تصویری از کانی‌زایی باستانزیت از کانی‌های اصلی عناصر نادر خاکی (باستانزیت: Bst، اورانوتوریت: Uth، توریت: Thr، تیتانیت: Ttn، آل بیت: Alb، آپاتیت: Apt، اکسید آهن: Feo، اپیدوت: Epd، فلوگوپیت: Phl، کلریت: Chl، ایلیت: Ill).

Fig. 7. BSE images of the cross-section prepared from the granite host rock (sample 99-BOC-177), 1 and 2- a picture of bastnasite mineralization from the main minerals containing rare earth elements, 3- a picture of thorite mineralization, Apatite and titanite are minerals that carry rare earth elements, 4- a picture of bastnasite mineralization from the main minerals and albite (sodic metasomatism), 5- a picture of thorite and uranothorite mineralization (containing gold inclusions) from the mineral carriers of rare earth elements, 6- a picture of the mineralization of bastnasite from the main minerals of rare earth elements

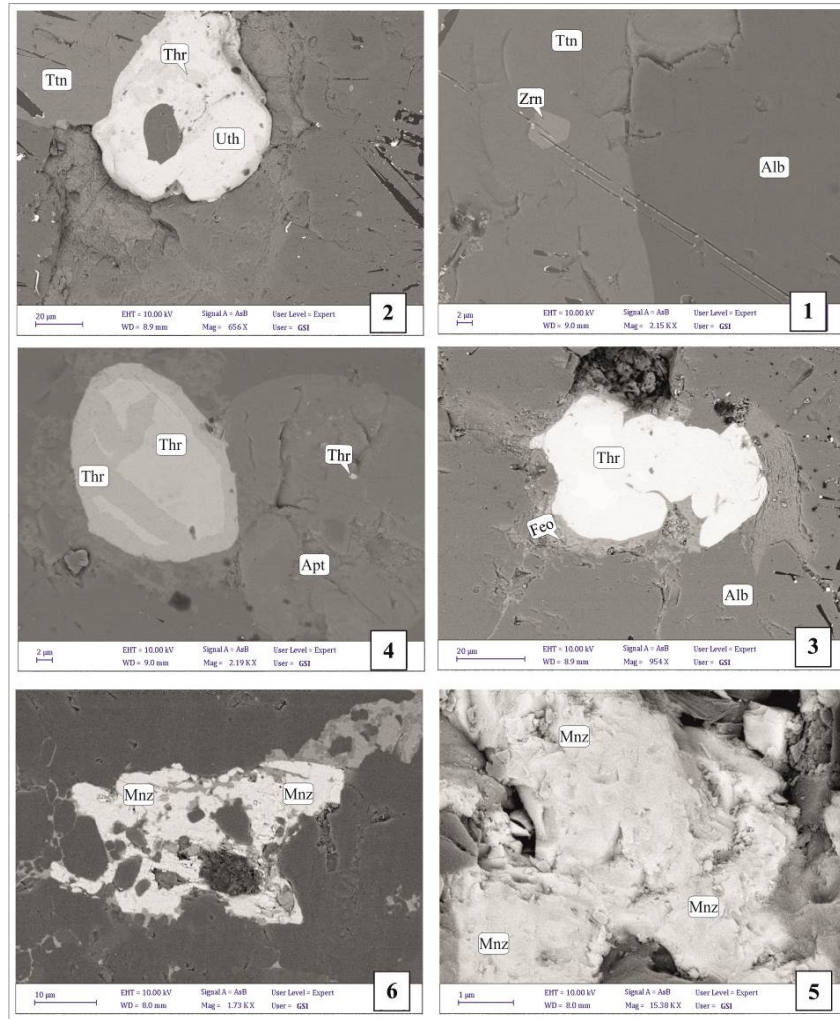
مطالعات در مقاطع مختلف کانی‌های باستانزیت، مونازیت، زیرکن، توریت، اورانوتوریت، آپاتیت، تیتانیت و آل‌بیت کانی‌زایی چشمگیری را نشان می‌دهد. سریم (Ce) و لانتانیم (La) از مهم‌ترین عناصر نادر خاکی (REE) شناسایی شده می‌باشد (شکل‌های ۷-۸-۹). همان طوری که در نتایج آنالیز ICP-MS مشاهده می‌شود دو عنصر سریم (Ce) و لانتانیم (La) از بیشترین غنی‌شدگی برخوردار بوده و با توجه به نتایج مطالعات کانی‌شناسی، این دو عنصر با کانی‌های واجد عناصر نادر خاکی شناسایی شده مطابقت دارد.

انواع کانی‌های باستانزیت، مونازیت، توریت، اورانوتوریت، زیرکن، آپاتیت، فلئوروآپاتیت، تیتانیت، آل‌بیت، فلوگوپیت، هماتیت، بیوتیت، ایلمنیت، اوتوز، اپیدوت، فلوریت، باریت، کلریت، ایلیت، آنکریت، کلسیت، روتیل، مسکوویت، پلاژیوکلاز، کالکوپیریت و انکلوزیون طلا شناسایی شده است (شکل‌های ۷-۸-۹). در این بین کانی‌های باستانزیت، مونازیت، توریت، اورانوتوریت، زیرکن، آپاتیت، فلئوروآپاتیت و تیتانیت از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی می‌باشند و کانی‌های آل‌بیت، ارتوکلاز و کوارتز به عنوان کانی‌های ردیاب به شمار می‌رود. در نتیجه این



شکل ۸. تصاویر BSE از مقطع تهیه شده از سنگ میزبان گنیس (نمونه 99-BOC-178)، ۱ و ۲- تصویری از کانی‌زایی باستانزیت از کانی‌های اصلی واجد عناصر نادر خاکی، ۳- تصویری از کانی‌زایی توریت از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی، ۴- تصویری از کانی‌زایی اورانوتوریت به صورت انکلوزیون در بیوتیت از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی، ۵- تصویری از کانی‌زایی زیرکن از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی که دارای انکلوزیون طلا است، ۶- تصویری از کانی‌زایی مونازیت از کانی‌های اصلی عناصر نادر خاکی (باستانزیت: Bst، اورانوتوریت: Uth، توریت: Thr، مونازیت: Mnz، زیرکن: Zrn، طلا: Au، فلوگوپیت: Phl، کلریت: Chl، روتیل: Rut، بیوتیت: Bio).

Fig. 8. BSE images of a cross-section prepared from gneiss host rock (sample 99-BOC-178), 1 and 2- a picture of bastnasite mineralization from the main minerals containing rare earth elements, 3- a picture of thorite mineralization from Minerals carrying rare earth elements, 4- A picture of uranothorite mineralization as an inclusion in biotite from minerals carrying rare earth elements, 5- A picture of zircon mineralization from minerals carrying rare earth elements that have gold inclusions. 6- An image of monazite mineralization, one of the main minerals of rare earth elements.



شکل ۹. تصاویر BSE از مقطع تهیه شده از سنگ میزبان گرانیت-گنیس (نمونه 99-BOC-256)، ۱- تصویری از کانی‌زایی تیتانیت و زیرکن از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی پارازنز با آلبیت (متاسوماتیسم سدیک)، ۲- تصویری از کانی‌زایی توریت، اورانو توریت و تیتانیت از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی، ۳- تصویری از کانی‌زایی توریت پارازنز با آلبیت (متاسوماتیسم سدیک)، ۴- تصویری از کانی‌زایی توریت و آپاتیت از کانی‌های حامل عناصر نادر خاکی، ۵ و ۶- تصویری از کانی‌زایی موناژیت از کانی‌های اصلی عناصر نادر خاکی (اورانو توریت: Uth، توریت: Thr، تیتانیت: Ttn، موناژیت: Mnz، آلبیت: Alb، آپاتیت: Apt، اکسید آهن: Feo).

**Fig. 9.** BSE image from the cross-section prepared from the granite-gneiss host rock (sample 99-BOC-256), 1- a picture of titanite and zircon mineralization from minerals carrying rare earth elements of paragenesis with albite (sodic metasomatism), 2 - An image of the mineralization of thorite, uranothorite and titanite from minerals carrying rare earth elements, 3- An image of the mineralization of thorite paragenes with albite (sedic metasomatism), 4- An image of the mineralization of thorite and apatite from minerals carrier of rare earth elements, 5 and 6- a picture of monazite mineralization from the main minerals of rare earth elements.

##### ۵- نتیجه‌گیری

منطقه مورد مطالعه (کمپلکس چاپدونی-پشت بادام) یکی از مناطق با پتانسیل بالا برای کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در ایران مرکزی به شمار می‌رود. برای اثبات این ادعا، در این پژوهش، موضوعی با محوریت کانی‌شناسی و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی، مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته است. برای بررسی کانی‌شناسی و کانه‌زایی، علاوه بر مطالعات زمین‌شناسی صحرائی، از مطالعات

آزمایشگاهی با به کارگیری روش‌های مختلف مطالعه و آنالیز استفاده شده است. در این زمینه، از کانی‌شناسی با میکروسکوپ نور عبوری-انعکاسی، میکروسکوپ الکترونی و روش پراش اشعه مجهول (XRD)، آنالیز شیمیایی به روش ICP-MS مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مطالعات، غنی‌شدگی و کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در منطقه را نشان می‌دهد. عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE)

حفاری با استفاده از دستگاه‌های رادیومتری پورتابل شناسایی زون‌های کانه‌زایی عناصر نادر خاکی را در منطقه انجام داد.

#### ۶- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت سازمان انرژی اتمی ایران انجام شده است. نویسندگان این مقاله از مدیران و کارشناسان این سازمان بدلیل حمایت‌های بی‌دریغ فنی و مالی‌شان سپاسگزاری می‌نمایند.

#### References

- Aghanabati, S. A (2004) Geology of Iran, Tehran, Geological Survey of Iran, first edition, 606 pp. (in Persian).
- Ahmad Khani, M. B., Yazdi, M., Behzadi, M., Khoshnoodi, Kh., Shokouh Saljoghi, B (2022) Determination of Th-REE mineralization type using network modeling in Chapdoni-Posht-e-Badam complex, Central Iranian structural zone, Journal of nuclear science and technology, 43 (4): 132-140, (in Persian).
- Babakhani, A. R., Majidi, J (1999) Geological map of Iran, Saghand 1:100000 series, geological survey of Iran, Tehran, 1pp.
- Deymar, S., Behzadi, M., Yazdi, M., Rezvanzadeh, M (2018) Relation of alkali-metasomatism and Ti-REE-U (Th) mineralization in the Saghand mining district, Central Iran, Iranian Journal of Economic Geology, 10 (2): 471-496, (in Persian).
- Geological survey of Iran and the ministry of industry, Mines and Trade (2015) Exploration of rare earth elements (REEs) in Iran (second phase), Technical and field studies to identify promising areas of mineralization of rare earth elements in Yazd province. 926 pp.
- Haghipor, A (1977) Geological map of Iran, Posht-e-badam 1:100000 series, geological survey of Iran, Tehran, 1pp.
- Mokhtari, Z., Torabi, Q (2012) Petrology of the amphibolites of the Posht Badam ophiolite and Chapdoni complex (northeast of Yazd province), M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 219 pp. (in Persian).
- Mokhtari, M, A (2015) Posht-e-Badam metallogenic block (Central Iran), A suitable zone for REE mineralization, Central European geology, 58 (3): 199-216, doi: 10.1556/24.58.2015.3.1.
- Maanijou, M., Rasa, I., Lentz, D (2008) Petrography and alteration of Chehelkureh copper deposit: Mass balance of elements and behavior of REE, Scientific quarterly journal of geosciences, 17 (67): 86-101, doi.org/10.22071/gsj.2009.57786.

در منطقه از غنی‌شدگی بیشتری برخوردار است. از بین عناصر نادر خاکی سبک (Sm-Nd-Pr-La-Ce)، سریم (Ce) با عیار میانگین ۱۳۵۳ ppm و لانتانیم (La) با عیار میانگین ۷۴۵ ppm از بیشترین غنی‌شدگی برخوردار است. از بین عناصر نادر سنگین (Dy-Y-Gd-Yb-Er)، ایتیریم (Y) با عیار میانگین ۲۵۲ ppm نسبت به سایر عناصر این گروه غنی‌شدگی نسبی را نشان می‌دهد. گرانیت، گنیس، میگماتیت، شیست، و گرانیت-گنیس از مهم‌ترین سنگ‌های میزبان برای کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در منطقه به شمار می‌رود. است. سنگ‌های میزبان دارای غنی‌شدگی عناصر هدف، غالباً متحمل دگرسانی و متاسوماتیتی شده (سدیک) هستند.

در نتیجه این مطالعات کانی‌های مختلفی شناسایی شده است که از جمله مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی‌های شناسایی شده شامل؛ باستنزیت، مونازیت، توریت، زیرکن، آلپیت، فلوگوپیت، تیتانیت، اورانوتوریت، هماتیت، بیوتیت، آپاتیت، فلئورآپاتیت، ایلمنیت، ارتوکلاز، اپیدوت، فلوریت، باریت، کلریت، ایلپیت، آنکریت، کلسیت، روتیل، مسکوویت، پلاژیوکلاز، پیروکلر (کلمبیت)، کالکوپیریت، آلانیت، کوارتز، سرریسیت، هورنبلند، آاناتاز، نیگرین، لوکوکسن، ترمولیت، گارنت، پیروکسن، آمفیبول، پیریت، لیمونیت، مگنتیت، گوتیت، هماتیت و انواع کانی‌های رسی می‌باشد. کانی‌های اصلی عناصر نادر خاکی شامل باستنزیت، مونازیت و آلانیت است و کانی‌هایی که می‌توانند حاوی مقادیری عناصر نادر خاکی باشند شامل توریت، زیرکن، اورانوتوریت، آپاتیت، فلئورآپاتیت و تیتانیت است. در منطقه مورد مطالعه کانی‌های توریم شامل توریت و اورانوتوریت پاراژنز با کانه‌زایی عناصر نادر خاکی هستند. از آنجائی‌که کانی‌های عناصر پرتوزای طبیعی شامل اورانیوم و توریم دارای پرتوزایی گامای قابل توجهی هستند و با استفاده از دستگاه‌های رادیومتری گاما مانند سنتیلومتر پورتابل می‌توان زون‌های کانه‌زایی را در سطح شناسایی و ردیابی نمود، در نتیجه می‌توان این کانی‌ها را به عنوان کانی ردیاب کانی‌سازی در منطقه نظر گرفت و از روش رادیومتری زمینی گاما برای پی‌جویی و اکتشاف زون‌های کانی‌سازی عناصر نادر خاکی با سرعت بیشتر و هزینه کمتر استفاده نمود. شایان ذکر است در اکتشافات زیرسطحی نیز می‌توان با استفاده از روش‌های درون چاهی سنجش گاما و همچنین رادیومتری مغزه‌های

- Nabavi, M. H., Hoshmandzadeh, A (2000) Geological map of Iran, Bayazeh 1:100000 series, geological survey of Iran, Tehran, 1pp.
- Qarachahi, Z., Torabi, Q (2010) Petrology of Eocene volcanic rocks in the formation and Chapdoni regions (Yazd province), M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 241 pp. (in Persian).
- USGS (2014) The rare earth elements vital to modern technologies and lifestyles. USGS mineral resources program. fact sheet 2014–3078. ISSN 2327–6932 (online).
- Voncken, J. H. L (2016) The rare earth elements an introduction, Springer briefs in earth sciences, ISBN 978-3-319-26809-5 (eBook), pp 127.
- Zakipour, Z., Torabi, Gh (2015) Study of Eocene type S granites in the Chapdoni ring metamorphic complex (northeast of Yazd province, Central Iran), Iranian Journal of Petrology, 7 (25): 33-50, doi.org/10.22108/ijp.2016.20831.

## Mineralogy and mineralization of rare earth elements in Chapdoni-Posht-e-Badam complex, Central Iran

M. B. Ahmad Khani<sup>1</sup>, M. Yazdi<sup>\*2</sup>, M. Behzadi<sup>2</sup>, Kh. Khoshnoodi<sup>3</sup> and B. Shokouh Saljoghi<sup>4</sup>

1-Ph. D. student, Dept. of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Prof., Dept. of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran

4-Atomic Energy Organization, Tehran, Iran

\*M-yazdi@sbu.ac.ir

Received: 2022.12.8 Accepted: 2023.4.9

### Abstract

Chapdoni-Posht-e-Badam complex is located in the structural zone of Central Iran and in the northeast of Yazd province. The study area is one of the areas with high potential for mineralization of rare earth elements. In this research, to investigate the mineralogy and mineralization of rare earth elements, field studies, mineralogy with transmission-reflection light microscope, electron microscope and X-ray diffraction method (XRD), chemical analysis by ICP-MS method have been used. After the studies, the results of studies show the enrichment of rare earth elements in the area. In between, Ce elements with an average grade of 1353 ppm, La with an average grade of 745 ppm, and Y with an average grade of 252 ppm from 170 analyzed samples have high enrichment and Dy-Sm-Gd-Yb-Er elements show slight anomalies. Gneiss, granite, granite-gneiss, magmatite and schist are the most important host rocks for mineralization in the area. These rocks are mainly altered and metamorphosed. The Metasomatization of the host rock is one of the most obvious evidence of alteration for the enrichment of rare earth elements. Different types of minerals have been identified in the region, the main minerals of which are rare earth elements including Bastnasite, Monazite and Allanite. Minerals that can contain trace amounts of rare earth elements include Thorite, Zircon, Uranothorite, Apatite, Fluoroapatite, and Titanite. Tourite and Uranothorite minerals, which are parageneses with rare earth element mineralization, can be considered as tracer minerals of mineralization in the region, and gamma radiometric method can be used to trace and explore the mineralization zones of rare earth elements.

**Keywords:** Rare earth elements, Mineralogy, Mineralization, Chapdoni-Posht-e-Badam, Central Iran

### Introduction

Rare earth elements (REEs) include 15 lanthanides. Yttrium and scandium elements are also included in this group of elements. Rare earth elements are divided into two categories: light (LREE) and heavy (HREE). The LREE group includes the elements La, Ce, Pr, Nd, and Sm, and the HREE group includes the elements Er, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, and Lu. Due to the high importance of these elements, the identification of reserves and small resources can also be of high value for the country. In this research, by applying the knowledge and techniques of geological discoveries, rare earth elements were studied in Chapdoni-Pesht Badam complex and useful results were obtained in this field. The result of these studies is the introduction of the study area (Chapdoni-Pesht Badam complex) as one

of the areas with high potential for rare earth elements.

Chapdoni-Posht-e-Badam complex is located in the structural zone of Central Iran and in the northeast of Yazd province. This complex is one of the most important areas for high potential of REE mineralization in Central Iran.

### Materials and methods

In order to explore and realize the goals of the research, various stages of discovery have been planned and implemented. For this purpose, a combination of technical-office studies and field geology has been used. After finding the potential and identifying the areas with anomalies, sampling has been done and required laboratory studies have been carried out. In this research, various study and analysis methods, such as ICP-MS, XRD, Heavy



Mineral, Thin Section, Polish Section, Thin-Polish, SEM-EDS, have been used to investigate the mineralogy and enrichment of rare earth elements. FE-SEM-EDS electron microscope was used for detailed mineralogy of rare earth element minerals and determination of paragenetic relationships.

### Discussion

Mineralization in the studied area is very diverse, one of the most important of which is rare earth elements (REE), and the mineralogy and mineralization of these elements is one of the main goals of this research. Based on the studies and exploration carried out in the region, productive and sterile rock units in terms of rare earth element mineralization have been identified and separated, and gneiss, granite, granite-gneiss, migmatite and schist rock units are among the most important host rocks for rare earth elements. The preliminary results of the studies show the enrichment and mineralization of rare earth elements in the area. Light rare earth elements (LREE) are more enriched than heavy rare earth elements (HREE) in the area. Among the light rare earth elements (Sm-Nd-Pr-La-Ce), cerium (Ce) and lanthanum (La) have the highest enrichment. Among heavy rare elements (Dy-Y-Gd-Yb-Er), yttrium (Y) shows relative enrichment compared to other elements of this group.

### Mineralogy by XRD method

XRD mineralogy was one of the methods used in this research. In this context, 47 samples have been prepared for analysis by XRD method. The samples are mainly prepared from the host rock units which have enrichment of rare earth elements. Different types of minerals have been identified, and Apatite and Fluoroapatite are among the most important minerals carrying rare earth elements.

### Microscopic studies of transmitted and reflected light (Thin-Polish, Thin Section, Polish Section)

Simultaneously with the progress of various stages of research and geological studies of the area, sampling for mineralogical studies has been done with a polarized microscope. The samples are mainly prepared from the host rocks enriched with rare earth elements (40 thin section samples, 10 polished- thin section samples and 10 polished section samples). Various types of metallic and non-metallic

minerals have been identified, among which the most important and abundant minerals in the host rocks are Allanite, Quartz, Albite, Orthose, Biotite, Sericite, Phlogopite, Hornblende, Apatite, Zircon, Barite, Titanite, Rutile, Anatase, Nigrine, Leucoxene, Calcite, Tremolite, Garnet, Pyroxene, Amphibole, Epidote, Chlorite, Ilmenite, Pyrite, Limonite, Magnetite, Monazite, Goethite, Hematite and various clay minerals. Among these minerals, Allanite, Zircon, Monazite, Apatite and Titanite have been recognized as minerals carrying rare earth elements.

### Heavy mineral studies

The results of the study of stone mineral samples in the studied area are:

- 1- In the non-magnetic phase or phase: NM, minerals of Zircon, Barite, Apatite, Sphene, Quartz, Feldspar, Rutile, Anatase, Nigrin, Leucoxene and Calcite have been observed with low frequency and few particles (Particles-PTS).
- 2- In the medium magnetic phase (AV): minerals Garnet, Pyroxene, Amphibole, Epidote, Ilmenite, oxidized Pyrite, Limonite and Biotite with low abundance and few particles (Particles-PTS) have been observed.
- 3- In the intense magnetic phase (AA): Magnetite mineral has been observed in the area

### Mineralogical studies using electron microscopy (FE-SEM-EDS)

The last stage of the method used to identify minerals bearing rare earth elements (REE) in the study area is the use of electron microscopy (FE-SEM-EDS). Bastnasite, Monazite, Tourite, Uranotourite, Zircon, Apatite, Fluoroapatite, Titanite, Albite, Phlogopite, Hematite, Biotite, Ilmenite, Orthose, Epidote, Fluorite, Barite, Chlorite, Illite, Ankrite, Calcite, Rutile, Muscovite, Plagioclase and Chalcopyrite have been identified. Among them, Bastnasite, Monazite, Thorite, Uranothorite, Zircon, Apatite, Fluoroapatite, and Titanite are minerals that carry rare earth elements. Cerium (Ce) and Lanthanum (La) are among the most important rare earth elements (REE) identified.

### Conclusion

In this research, various study and analysis methods, such as ICP-MS, XRD, Heavy Mineral, Thin Section, Polish Section, Thin-

Polish, SEM-EDS, have been used to investigate the mineralogy and enrichment of rare earth elements. After the investigations, the results of the studies show the enrichment of rare earth elements in the area. Light rare earth elements (LREE) are more enriched than heavy rare earth elements (HREE) in the region. Meanwhile, Ce elements with an average grade of 1353 ppm, La with an average grade of 745 ppm, and Y with an average grade of 252 ppm are highly enriched, and Dy-Sm-Gd-Yb-Er elements show slight anomalies. Gneiss, Granite, Granite-Gneiss, Migmatite and Schist are the most important host rocks for the mineralization of rare earth elements in the area. These rocks are mainly metamorphosed. The sodic metasomatization (albitization) of the host rock is one of the most obvious evidences of alteration for the enrichment of rare earth elements. Different types of minerals have been identified in the area, the main minerals of rare earth elements include Bastnasite, Monazite and Allanite. Minerals that can contain amounts of rare earth elements include Thorite, Zircon, Uranothorite, Apatite,

Fluoroapatite and Titanite. Hematite, Magnetite, Pyrite, Pyrrhotite and Gold inclusions are among the most important metal minerals in the area, and Apatite, Biotite, Ilmenite, Albite, Phlogopite, Orthose, Fluorite, Rutile, Muscovite, Quartz, Sericite, Hornblende, Anatase, Nigrin, Leucoxene, Garnet, Pyroxene, Amphibole and various clay minerals are identified in the area. Minerals containing thorium, including Thorite and Uranothorite (with gamma radioactivity), which are parageneses with the mineralization of rare earth elements, can be considered as tracer minerals of mineralization in the area, and the gamma radiometric method can be used to find and explore mineralization zones of rare earth elements.

#### **Acknowledgements**

This research was done with the support of Iran Atomic Energy Organization. The authors of this article are grateful to the managers and experts of this organization for their technical and financial support.