

## کانی‌شناسی و زمین‌شیمی کانی‌سازی طلا و مس سلطان انوچ، ملایر، غرب ایران

حمید رستمی پور<sup>۱\*</sup>، مهرداد بهزادی<sup>۱</sup>، رامین شهبازی<sup>۱</sup>، محمد امینی<sup>۲</sup>

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

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۹/۴، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸)

**چکیده:** رویداد کانه‌زایی مس و طلا در گستره سلطان انوچ در جنوب‌غربی ملایر، بخشی از پهنه سندرچ - سیرجان است. از مهم‌ترین واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی می‌توان به شیست، سنگ آهک و توده‌های نفوذی اسیدی تا حدواسط اشاره کرد. دگرسانی‌های غالب منطقه دگرسانی‌های پروپلیتی، سیرسیتی، آرژیلیک و هماتیته هستند، که بصورت محلی و در ارتباط با تشکیل اسکارن گسترش دارند. کانی‌های کوارتز، اپیدوت، هماتیت، مگنتیت، پیریت و ملاکیت کانی‌های شاخص دیده شده در مقاطع میکروسکوپی هستند. کانی‌سازی طلا و مس به صورت رگه‌ای و پرکننده فضای خالی دیده می‌شود. در نمونه‌های برداشت شده، بیشترین مقدار طلا ۶۷۵ میلی گرم در تن و بیشترین مقدار مس ۳۷۲۰۰ گرم در تن است. درست در مرز توده نفوذی با سنگ‌های کربناتی، آثار گسترده‌ای از واکنش‌های شیمیایی دگرگونی کناری سامانه باز دیده شده است. توده‌های نفوذی در گستره‌ی مشترک گرانیته‌های قوس آتشفشانی و همزمان با برخورد قرار دارند. از این رو، فعالیت ماگمایی منطقه در ارتباط با محیط فرورانشی است.

**واژه‌های کلیدی:** اسکارن سلطان انوچ؛ کانی‌سازی مس-طلا؛ ملایر؛ غرب ایران.

### مقدمه

کمربند دگرگونی سندرچ - سیرجان (شکل ۱) و در جنوب غرب ملایر و ۱۱ کیلومتری شرق شهرستان نهاوند واقع است (عرض جغرافیایی  $34^{\circ} 10'00''$  تا  $34^{\circ} 16'00''$  و طول جغرافیایی  $48^{\circ} 31'00''$  تا  $48^{\circ} 37'00''$ ). این گستره شامل دو بخش اصلی اسکارن و گرانیته‌ای است. گرانیته‌ای این منطقه بخشی از گرانیته‌ای سامن است. گرانیته‌ای سامن در بخش غربی پهنه سندرچ-سیرجان و جنوب غرب ملایر قرار دارد. در این پژوهش، امکان کانه‌زایی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی اسکارن و گرانیته‌ای سامن در منطقه سلطان انوچ بررسی شده است.

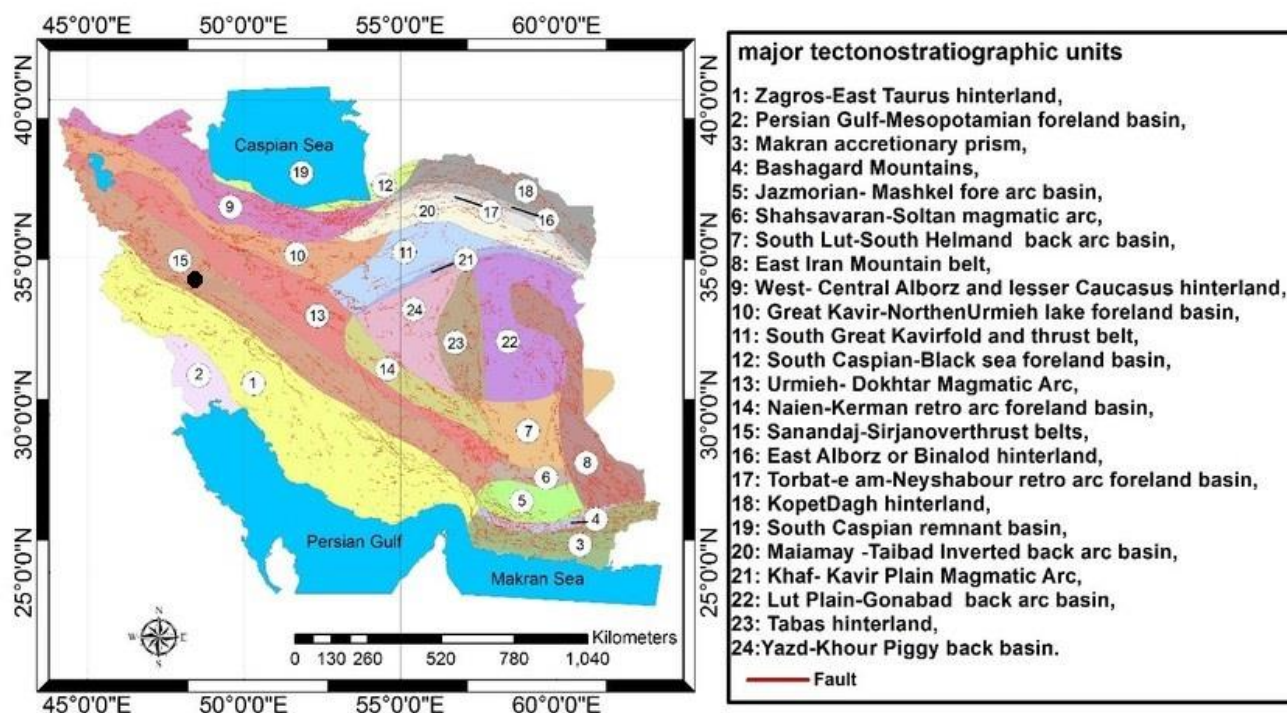
### روش بررسی

پس از بررسی‌های کتابخانه‌ای و همچنین گزارش‌های پیشین از منطقه مورد بررسی، بازدیدهای صحرایی از این گستره صورت

پهنه سندرچ - سیرجان به دلیل شرایط ویژه زمین‌پویایی، دگرگونی و ماگمایی، همچنین حضور معادن و شواهد متعدد کانه‌زایی فلزی چون طلا، آهن، مس، سرب و روی، تنگستن و کرومیت، از گذشته‌های دور برای زمین‌شناسان و معدنکاران مهم بوده است. این کمربند به طول ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض ۷۵-۲۰۰ کیلومتر با روند شمال غرب - جنوب شرق موازی با راندگی اصلی زاگرس کشیده شده است [۲، ۱]. بررسی‌های عزیزی [۳] نشان داد که یک کمربند آتشفشانی به سن کرتاسه در بخش شمالی سندرچ-سیرجان بین نهاوند و ارومیه گسترش یافته است. از جمله توده‌های گرانیته‌ای بزرگ موجود در شمال غرب پهنه سندرچ-سیرجان می‌توان به توده‌ی نفوذی عشوند [۵، ۴] و سامن اشاره کرد. منطقه سلطان انوچ در

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۹۱۱۵۳۴۱۴۴، پست الکترونیکی: [rostamipoor12@gmail.com](mailto:rostamipoor12@gmail.com)





شکل ۱ نقشه پهنه‌بندی پهنه‌های ساختاری و زمین‌شناسی حوضه‌های رسوبی ایران [۶]. موقعیت منطقه مورد بررسی با دایره مشکی نشان داده شده است.

واحد آهک دگرگونه: این واحد شامل سنگ آهک با رنگ‌های مختلف از خاکستری تیره و روشن تا سفید و وابسته به تریاس است که در سطح هوازده، رنگ سفید، خاکستری روشن با لایه-بندی ظریف و تناوب لایه‌های سفید و خاکستری نیز در سنگ دیده می‌شود. سطح تازه سنگ، خاکستری روشن همراه با حفره‌های پر شده با بلورهای کلسیت است. گاهی این کلسیت-ها به صورت رگه و رگچه‌های ظریف به رنگ سفید در سنگ دیده می‌شوند. این آهک بلوری متوسط تا نازک لایه است. لایه‌ها به صورت بسیار نازک اولیه و لایه‌بندی‌های ظریف تا بیشینه ضخامت ۶۰-۵۰ سانتیمتر نیز دیده می‌شوند (شکل ۲). این واحد سنگ آهک بلورین به طور هم شیب با واحدهای شیستی و فیلیتی پوشیده شده است. این واحد با ضخامت ۱۰۰ متر در بخش‌هایی از شمال غرب منطقه رخمون دارد. در بخش‌های مرکزی منطقه اکتشافی نیز، این واحد با رخمون به نسبت گسترده‌ای دیده می‌شود. در بخش جنوب-جنوب غربی منطقه، ضخامت واحد آهکی بیشتر شده است.

گرفت. در عملیات صحرایی به منظور بررسی‌های مختلف آزمایشگاهی، ۱۴ مقطع صیقلی از نمونه‌های کانه‌دار، ۲۰ مقطع نازک از واحدهای سنگی و ۴۳ نمونه برای تجزیه شیمیایی به روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) در آزمایشگاه زرازا تهران برداشت گردید. ICP-OES از جمله روش‌های طیف‌سنجی اتمی است که در آن، اتمی شدن عناصر به کمک محیط گرم پلازما انجام شده و سپس با یک طیف‌سنج انتشاری (OES) آشکارسازی و کمی‌سازی می‌شود. استاندارد و حد حساسیت این روش طوری بوده که تجزیه عناصر از غلظت‌های بسیار پایین حدود ۰٫۱ ppm تا چند درصد به طور هم زمان ممکن است. از محدودیت‌های این روش می‌توان به حل کردن نمونه‌های جامد و رقیق‌سازی بیشتر نمونه‌ها نسبت به روش‌های دیگر و خطا در اندازه‌گیری عناصری با غلظت بالا اشاره کرد.

#### زمین‌شناسی و کانی‌شناسی منطقه

مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی منطقه در ادامه توصیف شده‌اند.



شکل ۲ واحد آهک دگرگونه در گستره سلطان انوچ که دچار دگرگونی ناحیه‌ای و کناری شده است.

**واحد گرانیتوئیدی:** واحد گرانیتوئیدی منطقه شامل توده گرانودیوریت، گرانیت و مونزونیت (گرانیتوئید سامن) بوده که با توجه به شواهد میکروسکوپی، توده نفوذی رخنمون یافته در گستره سلطان انوچ بیشتر از نوع گرانودیوریت است. روند عمومی واحد گرانیتوئیدی سامن شرقی- غربی است. این توده در بخش‌های مختلف، بسته به مقدار کانی‌های موجود، دارای ترکیب متنوعی است و در واقع، یک مجموعه از سنگ‌های نفوذی را تشکیل می‌دهد. به طور کلی می‌توان ترکیبی از گرانیت، گرانودیوریت، مونزونیت تا دیوریت را در آن تشخیص داد که بررسی تقدم و تاخر این واحدها نیازمند یک پژوهش می‌باشد. قسمت‌هایی از واحد گرانودیوریتی در سطح هوازه به دلیل وجود اپیدوت سبز رنگ دیده می‌شود [۷]. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این واحد شامل پلاژیوکلاز تقریباً ۳۵ درصد، کوارتز ۲۵ درصد، فلدسپار آلکالن تقریباً ۲۰ درصد، و کانی بیوتیت می‌باشد. (شکل ۳ و ۴ الف و ب). در حاشیه رودخانه خانه‌آباد در شمال روستای انجیره آثار دگرسانی آرژلیک در این توده دیده می‌شود.

#### واحد شیست

این واحد سنگی پیرامون توده سامن دیده می‌شود و هاله بیرون دگرگونی همبری را تشکیل می‌دهد. در این مرحله، آثار تورق آسان هنوز وجود دارد و سنگ به دست آمده دارای شیست بیوتیت، کلریت و مسکویت است. کانی کدر و اکسید آهن نیز از کانی‌های فرعی آن به شمار می‌آیند. سنگ‌ها دارای شیستوارگی هستند و بافت ورقه شکفتی دارند [۸]. این

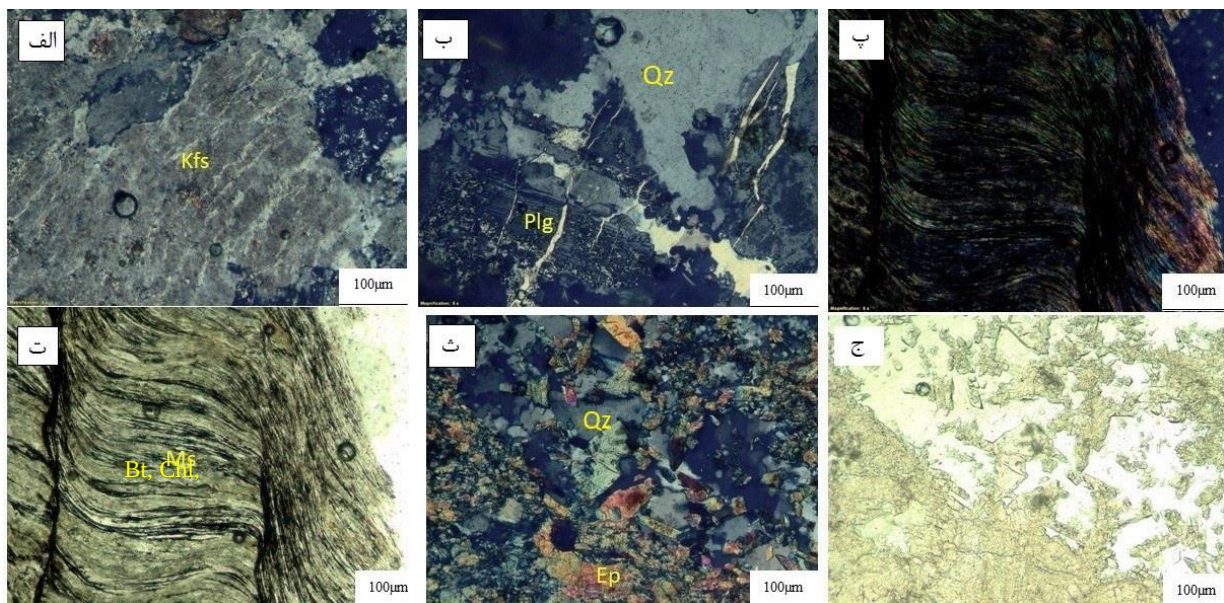
واحد سنگی پیرامون توده سامن برونزد دارد. رخنمون سنگی در سطح هوازه این واحد به رنگ خاکستری و در سطح تازه، به رنگ سیاه است. لایه‌بندی در این واحد بسیار ظریف بوده و دچار چین خوردگی ظریفی شده است. در این واحد سنگی، رگه‌ها و یا نوارهای سیلیسی سفیدرنگ به صورت پراکنده و هم شیب با لایه بندی وجود دارند (شکل‌های ۳ پ تا ث). در مقطع میکروسکوپی واحد شیست منطقه، کانی مسکویت به همراه بیوتیت و کلریت به راحتی دیده می‌شوند (شکل‌های ۴ پ و ت). **واحد زمین‌شناسی مولد طلا:** در اثر نفوذ توده گرانیتوئیدی و همبری آن با واحدهای کربناتی، به ویژه سنگ آهک تریاس، اسکارن‌زایی رخ داده است. اسکارن‌های موجود در منطقه اکتشافی در بخش شرقی، مرکزی و بخش‌هایی از غرب گستره وجود دارند. ضخامت این واحد به ۳۰ متر می‌رسد. در پهنه اسکارن، کانی گارنت بسیار یافت می‌شود و همچنین در بررسی‌های صحرایی، جنس واحد آهکی از نوع کلسیت تشخیص داده شد که در اثر بازتبلور رگه‌های سفید کلسیت ثانویه نیز دارد. طلا در اسکارن و رگه‌های سیلیسی، غنی‌شدگی نسبی نشان داده است، اما این غنی‌شدگی‌ها در حد غنی‌شدگی کانساری مشخص نشده‌اند. شواهدی چون تشکیل سنگ‌های دگرگونی، اسکارن‌ها و رگه‌های سیلیسی پیرامون توده گرانودیوریتی منطقه نشان می‌دهد که این پدیده‌ها در ارتباط با جایگزینی توده نفوذی هستند که بخش گسترده‌ای از منطقه را تشکیل می‌دهد (شکل‌های ۴ ث و ج). از این رو، اثر سیال‌های گرمایی این توده بر سنگ‌های کناری باعث دگرسانی و تشکیل

شمال است. رخنمون آن طولی حدود ۲۵۰ متر دارد که بصورت چند لکه پی در پی قابل ردیابی است و بخش‌هایی از آن با خاک برجا و مرتع پوشیده شده است. لایه‌های مختلفی از مرمر خاکستری تا سیلیس به تناوب در پهنه اسکارن دیده می‌شود. کانی سازی مس در ضخامت و طول محدودی قابل دیده است.

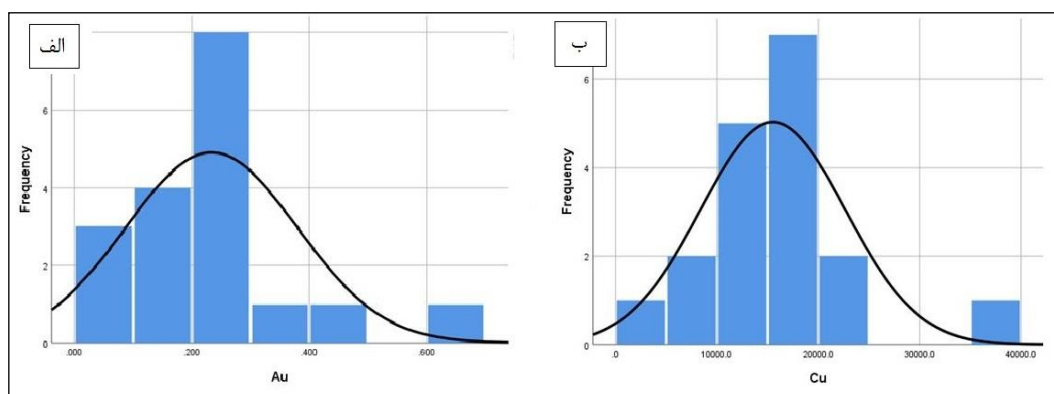
پهنه دگرنهاد در سنگ آهک‌های تریاس و واحدهای شیل-ماسه سنگ ژوراسیک شده است. بیشتر کانی‌زایی‌های طلا و مس به صورت رگه‌ای و لکه‌های پراکنده (پر کننده فضای خالی) در پهنه اسکارن‌های موجود در سنگ آهک‌های تریاس رخ داده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵ الف). روند عمومی اسکارن سلطان انوچ ۱۱۰ درجه و شیب عمومی آن ۵۰ درجه به سوی



شکل ۳. واحدهای منطقه مورد بررسی: الف و ب- نمایی از توده نفوذی گرانیتوئیدی، پ و ت و ث) واحد دگرگونه شیست و ج) واحدهای سیلیسی-لیمونیتی.



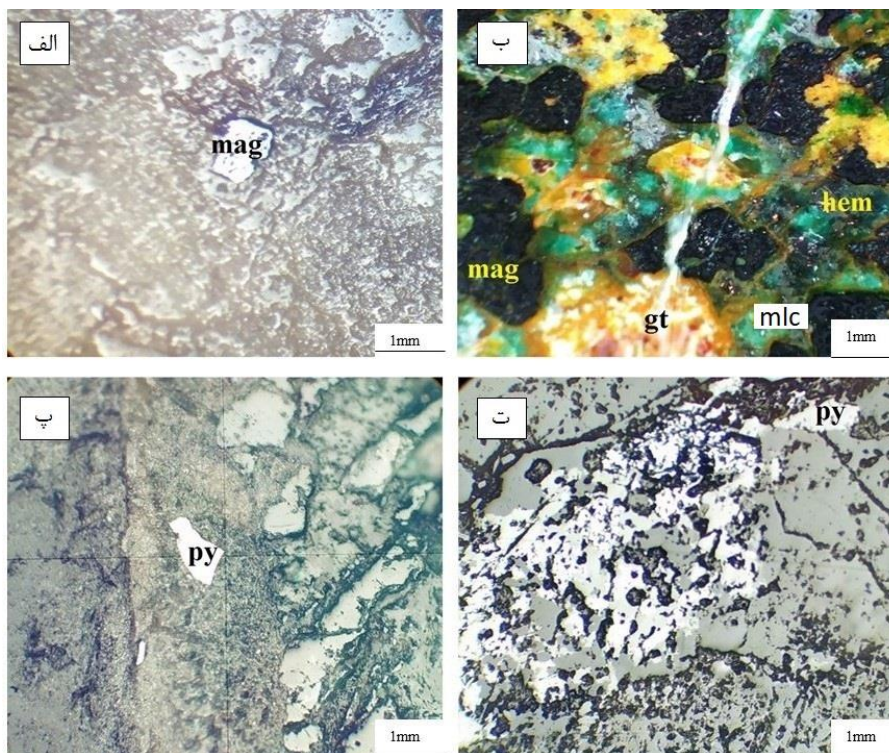
شکل ۴. تصاویر مقاطع میکروسکوپی از منطقه مورد بررسی: الف و ب) توده گرانیتوئیدی مولد کانه‌زایی در نور قطبیده متقاطع (XPL)، پ و ت) واحد شیست به ترتیب در XPL و نور قطبیده صفحه ای (ppL)، ث و ج) پهنه اسکارن به ترتیب در XPL و ppL: kfs: فلدسپار پتاسیم، Plg: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز و Ms: مسکوویت و Ep: اپیدوت [۹].



شکل ۵ نمودارهای ستونی طلا و مس در واحد اسکارن.

رگه‌های سیلیسی-لیمونیتی-کلسیتی تشکیل شده در این واحد دارای غنی‌شدگی طلا، نقره و بیسموت هستند (شکل ۳ ج). کانه‌زایی مس بیشتر به صورت مالاکیت دیده می‌شود که کانی‌های همراه آن مگنتیت، پیریت، هماتیت و گوتیت هستند (شکل ۶). به نظر می‌رسد که این رگه‌ها در ارتباط با شکستگی‌های سقف توده گرانودیوریتی و جای گرفتن سیال‌های گرمابی در واحدهای خرد شده، تشکیل شده باشند.

از آنجا که این اسکارن در نزدیکی یک توده نفوذی واقع بوده، مستعد کانی‌زایی طلا و مس است به طوریکه ارتفاع‌های سنگ‌های آهکی کنار توده‌های نفوذی در معرض سیال‌های گرمابی این توده قرار نگرفته‌اند. کانی‌سازی بیشتر در کنار توده نفوذی و درون واحد آهکی رخ داده است. کانی‌های کلسیت و گارنت گروسولار بسیار در پهنه اسکارن دیده می‌شوند، به طوری که می‌توان گفت که کانه‌زایی از نوع برون اسکارن کلسیمی است (شکل‌های ۲ و ۵).



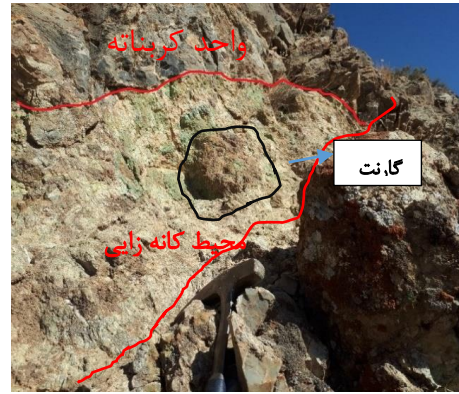
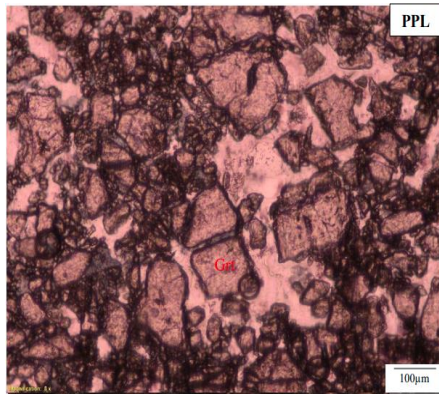
شکل ۶ تصاویر مقاطع صیقلی از کانه‌زایی منطقه مورد بررسی (mag: مگنتیت، gt: گوتیت، mlc: مالاکیت، hem: هماتیت، py: پیریت [۹]). چنان که مشخص است، کانی‌های مگنتیت و پیریت به صورت پر کننده فضای خالی، فضاهای موجود بین کانی‌های باطله را پر کرده‌اند. در تصویر الف کانی‌های ثانویه هماتیت و مالاکیت در اثر دگرسانی کانی‌های سولفیدی مس ایجاد شده‌اند.

## بحث و بررسی

## زمین‌شیمی واحدها و کانسنگ

تعداد ۴۳ نمونه از واحدهای مختلف منطقه مورد بررسی برداشت و برای تجزیه به روش ICP-OES به آزمایشگاه زراآما در تهران ارسال گردید که نتایج آنها در جدول ۱ آورده شده - است.

همچنین لایه‌ای کوارتزی به صورت رگه و نوارهای سیلیسی شیری رنگ در واحدهای دگرگونی شیست و ماسه‌سنگ‌های دگرگونه در سراسر منطقه قابل شناسایی است که هیچ اثری از کانه‌زایی در این نوارها دیده نمی‌شود. واحد دگرگونی بیشتر از کوارتز و اپیدوت تشکیل شده و دارای ترکیب‌های آهن (کانی-های کدر، به احتمال بسیار مگنتیت و گوتیت) است (شکل ۷).



شکل ۷ الف ساخت رگه‌ای دربردارنده کانه‌زایی درون واحد کربناتی در منطقه مورد بررسی (درون مستطیل قرمز رنگ) که از سنگ میزبان جدا شده است. کانه‌زایی بیشتر به صورت اکسید مس دیده می‌شود. ب) تصویر میکروسکوپی (PPL) واحد اسکارن که کانی گارت در آن مشخص است.

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی به روش ICP-OES

| عنصر | Au  | Ag  | As     | Ba  | Be  | Bi    | Cd  | Ce  | Co  | Cr  | Cu    | Dy  | Er  | Eu  |
|------|-----|-----|--------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
| واحد | ppb | ppm | ppm    | ppm | ppm | ppm   | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm   | ppm | ppm | ppm |
| SA-1 | ۱۹  | ۰/۱ | ۲      | ۳۴  | ۰/۲ | ۰/۲   | ۰/۱ | ۱۱  | ۲   | ۱۲۷ | ۱۰    | ۰/۱ | ۱/۳ | ۰/۱ |
| ۲    | ۲۷  | ۰/۱ | ۱۷     | ۹۴  | ۱/۸ | ۰/۱   | ۰/۴ | ۱۰۰ | ۱۷  | ۳۵۰ | ۲۲    | ۶/۳ | ۴/۸ | ۲/۶ |
| ۳    | ۲۳  | ۰/۱ | ۲      | ۷۱۱ | ۱/۶ | ۰/۱   | ۰/۱ | ۷۳  | ۷   | ۱۲۷ | ۵۷    | ۰/۲ | ۱/۹ | ۱/۲ |
| ۴    | ۳۵  | ۰/۱ | ۱۰۳    | ۷۰  | ۰/۱ | ۰/۱   | ۰/۲ | ۶۵  | ۶   | ۱۹۶ | ۷     | ۳/۸ | ۳/۸ | ۱/۲ |
| ۶    | ۷۵  | ۰/۱ | ۱۴۰    | ۴۱  | ۰/۷ | ۰/۲   | ۰/۱ | ۶۰  | ۷۱  | ۱۰۳ | ۴۲۶۲  | ۰/۱ | ۷/۴ | ۰/۵ |
| ۷    | ۳   | ۰/۱ | ۱      | ۶۱۶ | ۱/۷ | ۰/۱   | ۰/۱ | ۶۲  | ۷   | ۸۰  | ۱۱    | ۲/۷ | ۱/۱ | ۱/۳ |
| ۸    | ۳۱  | ۰/۱ | ۱۵     | ۹۹  | ۰/۱ | ۲/۶   | ۰/۲ | ۱۸  | ۷   | ۱۳۸ | ۳۲۷   | ۱/۴ | ۲/۴ | ۰/۴ |
| ۹    | ۴۴۳ | ۱/۵ | ۲۶۰    | ۶   | ۰/۱ | ۱۵۹۳  | ۲/۴ | ۶۹  | ۳۳  | ۱۱۳ | ۲۸۱۰۰ | ۰/۱ | ۸/۱ | ۰/۴ |
| ۱۰   | ۶۷۵ | ۳/۳ | ۱۹۰    | ۳۱  | ۰/۱ | ۶۷۶   | ۲/۳ | ۳۷  | ۱۰  | ۸۵  | ۳۷۲۰۰ | ۰/۱ | ۵/۳ | ۰/۲ |
| ۱۲   | ۲۳  | ۰/۱ | ۲      | ۳۱۳ | ۱/۶ | ۰/۱   | ۰/۱ | ۸۷  | ۴۲  | ۶۳  | ۲۱    | ۰/۴ | ۶/۵ | ۰/۳ |
| ۱۴   | ۶۷  | ۱/۹ | ۴۸     | ۱۰  | ۰/۵ | ۲۲    | ۴/۳ | ۴۶  | ۹   | ۵۲  | ۱۸۰۰۰ | ۰/۱ | ۵/۱ | ۲/۱ |
| ۱۵   | ۷۱  | ۰/۸ | ۱۳۹    | ۹   | ۰/۱ | ۰/۱   | ۱/۲ | ۴۶  | ۷   | ۱۲۷ | ۱۳۲۰۰ | ۰/۱ | ۴/۸ | ۰/۹ |
| ۱۶   | ۲۶  | ۰/۱ | ۳۰۹۵   | ۲۲۸ | ۱/۱ | ۰/۱   | ۰/۲ | ۶۲  | ۸   | ۲۰۰ | ۲۴    | ۳/۱ | ۳   | ۱/۳ |
| ۱۷   | ۴۰  | ۰/۱ | ۶۵۵۶   | ۲۲۹ | ۱/۳ | ۰/۱   | ۰/۲ | ۷۴  | ۲۵  | ۱۹۴ | ۱۱۱۲  | ۳/۱ | ۴/۵ | ۱/۴ |
| ۱۸   | ۳۴  | ۰/۱ | ۶۱۶۷   | ۳۶۰ | ۱/۲ | ۰/۱   | ۰/۱ | ۶۵  | ۲۳  | ۱۲۷ | ۱۱۰۹  | ۲/۲ | ۳/۶ | ۱   |
| ۱۹   | ۳۶  | ۰/۱ | ۶۵۰۳   | ۲۰۷ | ۰/۹ | ۰/۷   | ۰/۲ | ۵۱  | ۲۳  | ۱۲۹ | ۱۱۷۹  | ۲   | ۳/۷ | ۰/۹ |
| ۲۰   | ۱۳۸ | ۰/۴ | ۱۰۶۲   | ۱۹۱ | ۰/۷ | ۳۹۹   | ۰/۷ | ۵۲  | ۳۰  | ۱۰۸ | ۸۲۰۲  | ۱/۱ | ۴/۷ | ۰/۶ |
| ۲۱   | ۲۸۸ | ۱/۲ | ۱۱۶۶۳  | ۱۸۵ | ۰/۵ | ۵۶۷۹  | ۱/۳ | ۴۷  | ۱۴  | ۱۰۴ | ۱۶۰۰۰ | ۱/۱ | ۴/۲ | ۰/۶ |
| ۲۲   | ۲۹۳ | ۱/۲ | ۱۱۶۸۱  | ۱۱۰ | ۰/۵ | ۵۶۷۹  | ۱/۳ | ۵۳  | ۲۳  | ۹۹  | ۱۶۰۰۰ | ۱/۴ | ۵/۵ | ۱   |
| ۲۳   | ۳۰۲ | ۱/۷ | ۱۲۴۹۴  | ۸۷  | ۰/۶ | ۵۷۲۸  | ۲/۳ | ۶۰  | ۲۴  | ۷۸  | ۲۱۰۰۰ | ۱/۱ | ۶/۲ | ۱/۴ |
| ۲۴   | ۲۰۹ | ۱/۵ | ۹۴۶۴   | ۸۸  | ۰/۶ | ۱۷۴۵  | ۲   | ۵۴  | ۱۷  | ۸۲  | ۱۷۰۰۰ | ۱/۱ | ۵/۴ | ۱/۵ |
| ۲۵   | ۴۷  | ۰/۷ | ۵۴۸۴   | ۱۴۰ | ۰/۸ | ۵۶    | ۱/۵ | ۶۰  | ۱۷  | ۱۱۱ | ۷۸۳۶  | ۱/۸ | ۴/۸ | ۱/۸ |
| ۲۶   | ۵۱  | ۰/۷ | ۷۰۷۵   | ۱۱۹ | ۰/۷ | ۵/۶   | ۱/۵ | ۵۷  | ۱۲  | ۱۴۳ | ۸۱۰۹  | ۱/۶ | ۶/۳ | ۱/۴ |
| ۲۷   | ۴۳  | ۰/۲ | ۷۴۱۸   | ۲۰۶ | ۰/۹ | ۰/۱   | ۰/۵ | ۶۲  | ۱۶  | ۱۶۲ | ۳۸۸۶  | ۲/۱ | ۴   | ۰/۳ |
| ۲۸   | ۳۴  | ۰/۹ | ۵۵۸    | ۲۵۶ | ۱/۱ | ۰/۳   | ۰/۲ | ۶۳  | ۳۰  | ۱۶۲ | ۸۵۶   | ۲/۶ | ۳/۷ | ۱/۱ |
| ۲۹   | ۶۲  | ۰/۲ | ۷۴۱۱   | ۲۴۷ | ۱   | ۱۰۰   | ۰/۳ | ۶۱  | ۲۵  | ۱۳۹ | ۲۹۰۱  | ۲/۱ | ۴/۱ | ۱   |
| ۳۰   | ۱۲۴ | ۰/۴ | ۸۶۸۸   | ۲۳۶ | ۰/۸ | ۲۴۱/۹ | ۰/۶ | ۵۴  | ۲۲  | ۱۱۷ | ۶۷۲۶  | ۱/۶ | ۴   | ۰/۸ |
| ۳۱   | ۱۸۹ | ۰/۸ | ۱۰۰۶۷  | ۱۷۳ | ۰/۶ | ۳۸۳/۹ | ۰/۹ | ۵۱  | ۲۲  | ۱۱۰ | ۱۱۰۰۰ | ۱/۴ | ۴/۵ | ۰/۸ |
| ۳۲   | ۳۵۵ | ۱/۱ | ۱۱۵۶۵  | ۱۴۳ | ۰/۶ | ۵۲۶/۹ | ۱/۴ | ۵۳  | ۲۳  | ۹۷  | ۱۵۰۰۰ | ۱/۲ | ۵/۲ | ۰/۹ |
| ۳۳   | ۲۷۳ | ۱/۴ | ۱۱۳۲۶  | ۱۱۸ | ۰/۵ | ۴۷۰/۸ | ۱/۷ | ۵۳  | ۳۰  | ۹۱  | ۱۸۰۰۰ | ۱/۲ | ۵/۳ | ۱/۱ |
| ۳۴   | ۲۱۳ | ۱/۳ | ۹۷۸۱   | ۱۰۶ | ۰/۶ | ۳۳۰/۲ | ۱/۸ | ۵۷  | ۲۰  | ۹۲  | ۱۶۰۰۰ | ۱/۴ | ۵/۵ | ۱/۴ |
| ۳۵   | ۱۵۲ | ۱/۲ | ۸۶۲۹   | ۱۰۸ | ۰/۷ | ۱۸۹/۶ | ۱/۸ | ۵۸  | ۱۷  | ۱۰۳ | ۱۳۴۰۰ | ۱/۴ | ۵/۲ | ۱/۵ |
| ۳۶   | ۸۷  | ۰/۸ | ۷۳۶    | ۱۳۸ | ۰/۸ | ۴۶۴   | ۱/۴ | ۵۸  | ۱۵  | ۱۲۴ | ۹۲۴۰  | ۱/۷ | ۴/۶ | ۱/۵ |
| ۳۷   | ۴۴  | ۰/۴ | ۶۳۸۹   | ۱۸۰ | ۰/۹ | ۲/۹   | ۰/۹ | ۶۱  | ۱۶  | ۱۴۵ | ۵۱۷۲  | ۲   | ۴/۲ | ۱/۴ |
| ۳۸   | ۴۷  | ۰/۳ | ۶۸۱/۱  | ۲۰۷ | ۰/۹ | ۲۶۵   | ۰/۶ | ۶۱  | ۱۸  | ۱۵۲ | ۳۹۳۸  | ۲/۱ | ۴   | ۲/۱ |
| ۳۹   | ۶۶  | ۰/۲ | ۷۲۷۴   | ۲۳۶ | ۱   | ۸۵/۶  | ۰/۴ | ۶۰  | ۲۱  | ۱۴۵ | ۳۵۹۲  | ۲/۱ | ۴   | ۱   |
| ۴۰   | ۱۰۲ | ۰/۴ | ۷۹۲۷   | ۲۲۸ | ۰/۹ | ۱۸۱/۵ | ۰/۵ | ۵۷  | ۲۲  | ۱۳۲ | ۵۲۵۹  | ۱/۹ | ۴/۱ | ۰/۹ |
| ۴۱   | ۱۵۸ | ۰/۶ | ۹۴۲۳   | ۲۰۰ | ۰/۸ | ۳۱۳/۲ | ۰/۸ | ۵۵  | ۲۳  | ۱۱۶ | ۸۹۱۱  | ۱/۶ | ۴/۵ | ۰/۹ |
| ۴۲   | ۲۱۰ | ۰/۹ | ۱۰۴/۱۱ | ۱۶۷ | ۰/۶ | ۴۰۵/۹ | ۱/۱ | ۵۳  | ۲۲  | ۱۰۴ | ۱۳۰۰۰ | ۱/۳ | ۴/۸ | ۰/۹ |
| ۴۳   | ۲۲۲ | ۱/۲ | ۱۰۶۸۵  | ۱۳۵ | ۰/۶ | ۴۲۷/۹ | ۱/۴ | ۵۳  | ۲۱  | ۹۸  | ۱۴۸۰۰ | ۱/۳ | ۵/۱ | ۱/۱ |

ادامه جدول ۱

| Element | Ga  | Gd  | Hf  | La  | Li  | Mn    | Mo  | Nb   | Nd   | Ni  | P     | Pb   | Pr  | S    | Sb   |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|------|------|-----|-------|------|-----|------|------|
| Unit    | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm   | ppm | ppm  | ppm  | ppm | ppm   | ppm  | ppm | %    | ppm  |
| ۱SA-    | ۳   | ۴.۱ | ۳.۰ | ۵   | ۲۳  | ۲.۳   | ۳   | ۰.۳  | ۸.۱  | ۱۲  | ۲۱.۸  | ۱۷   | ۴.۱ | ۱۸.۰ | ۰.۴  |
| ۲       | ۲۱  | ۹.۴ | ۱.۱ | ۲۴  | ۴   | ۴۵۶   | ۳   | ۰.۳۱ | ۶۳۸  | ۲۲  | ۵۶۴۷  | ۳۸۰  | ۷.۵ | ۱۰.۰ | ۱.۰  |
| ۳       | ۱۸  | ۶.۱ | ۹.۲ | ۲۴  | ۸   | ۴۸۵   | ۱   | ۷.۱۷ | ۱.۲۴ | ۱۳  | ۱۱۹۷  | ۶    | ۷.۵ | ۱۱.۰ | ۱.۰  |
| ۴       | ۱۴  | ۹.۰ | ۶.۱ | ۲۴  | ۵   | ۱۶۰   | ۱   | ۴.۸  | ۴.۲۳ | ۲۳  | ۸۸۲   | ۲۹   | ۹.۳ | ۱۲.۰ | ۱.۲  |
| ۶       | ۲۴  | ۱.۰ | ۸.۰ | ۵   | ۶۶  | ۹.۰۰  | ۱   | ۸.۰  | ۵.۲  | ۸۶  | ۳۸۶   | ۴۲   | ۸.۰ | ۱۱.۰ | ۷.۶۵ |
| ۷       | ۱۷  | ۴.۱ | ۰.۳ | ۲۸  | ۹   | ۴۷۲   | ۳   | ۴.۲۰ | ۸.۲۱ | ۱۰  | ۱۱۲۸  | ۲    | ۷.۵ | ۰.۸۰ | ۱.۰  |
| ۸       | ۴   | ۹.۰ | ۶.۰ | ۶   | ۹   | ۷۴۳   | ۱   | ۴.۰  | ۴.۴  | ۱۲  | ۲.۲   | ۷    | ۴.۱ | ۰.۸۰ | ۲.۱۴ |
| ۹       | ۲۱  | ۱.۰ | ۰.۲ | ۸   | ۲   | ۱۹۹۶  | ۷   | ۸.۰  | ۸.۰  | ۵۳  | ۲۷۷   | ۳۱   | ۴.۰ | ۴۶.۰ | ۲.۲۱ |
| ۱۰      | ۷   | ۱.۰ | ۹.۰ | ۷   | ۴   | ۲۴۶۰  | ۲۸  | ۸.۰  | ۸.۰  | ۱۹  | ۱۳۱   | ۱۸   | ۷.۰ | ۳۳.۰ | ۰.۶۱ |
| ۱۲      | ۲۲  | ۵.۵ | ۳.۱ | ۲۹  | ۴۸  | ۱۵۵۷  | ۱   | ۱.۲۹ | ۷.۲۳ | ۳۸  | ۲۷۳۴  | ۲۷   | ۴.۱ | ۱۶.۰ | ۱.۰  |
| ۱۴      | ۵   | ۴.۲ | ۷.۱ | ۹   | ۱۲  | ۴۷۱۶  | ۴   | ۶.۸  | ۴.۱۹ | ۱۵  | ۵۲۲   | ۸    | ۵.۰ | ۲۸.۰ | ۷.۱۳ |
| ۱۵      | ۱۱  | ۱.۰ | ۸.۰ | ۶   | ۳   | ۲۴۱۲  | ۱   | ۱.۷  | ۹.۴  | ۱۲  | ۲۱۸   | ۳    | ۶.۰ | ۰.۹۰ | ۷.۵  |
| ۱۶      | ۱۴  | ۲.۳ | ۵.۱ | ۲۴  | ۱.۰ | ۳۳۶   | ۲   | ۸.۱۴ | ۲.۲  | ۱۷  | ۱۹۸۶  | ۱.۰۸ | ۲.۴ | ۱۲.۰ | ۶.۱  |
| ۱۷      | ۲۰  | ۹.۱ | ۶.۱ | ۲۴  | ۲۱  | ۱۶۳۹  | ۳   | ۵.۱۴ | ۲.۲۲ | ۳۶  | ۲۰.۳۸ | ۱۱.۴ | ۴   | ۱۱.۰ | ۱.۷  |
| ۱۸      | ۱۸  | ۱   | ۱.۲ | ۲۳  | ۲۲  | ۵۰.۴  | ۱   | ۸.۱۱ | ۱.۸  | ۳۳  | ۹۰.۱  | ۲۰   | ۴   | ۱۱.۰ | ۱.۷  |
| ۱۹      | ۱۵  | ۸.۰ | ۵.۱ | ۱۶  | ۲۲  | ۵۶۹   | ۱   | ۵.۷  | ۱.۳  | ۳۳  | ۵۸۲   | ۲۰   | ۹.۲ | ۱.۰  | ۵.۲۰ |
| ۲۰      | ۱۶  | ۶.۰ | ۶.۱ | ۱۲  | ۲۲  | ۱۰.۲۸ | ۳   | ۶.۵  | ۳.۷  | ۴۰  | ۵۰.۱  | ۲۰   | ۱.۲ | ۱۸.۰ | ۳.۷۸ |
| ۲۱      | ۱۲  | ۶.۰ | ۶.۱ | ۱۲  | ۶   | ۱۳۶۸  | ۱۰  | ۵.۵  | ۹.۶  | ۲۴  | ۴۲۷   | ۱۴   | ۲   | ۲۴.۰ | ۱.۷۴ |
| ۲۲      | ۱۴  | ۶.۱ | ۲.۱ | ۱۲  | ۱۶  | ۱۶۳۹  | ۹   | ۶.۷  | ۹.۹  | ۳۰  | ۸۳۶   | ۲۱   | ۱   | ۲۶.۰ | ۱.۷۴ |
| ۲۳      | ۱۴  | ۲   | ۴.۱ | ۱۳  | ۱۶  | ۲۶۲۲  | ۱۰  | ۷.۹  | ۶.۱۳ | ۳۱  | ۹۱۶   | ۲۱   | ۸.۰ | ۳۰   | ۹.۷۳ |
| ۲۴      | ۱۱  | ۲   | ۲.۱ | ۱۳  | ۱۶  | ۲۹۸۶  | ۹   | ۳.۱۱ | ۷.۱۴ | ۲۱  | ۹۰.۱  | ۱۴   | ۸.۰ | ۲۱.۰ | ۱.۲۰ |
| ۲۵      | ۱۳  | ۵.۲ | ۳.۱ | ۱۷  | ۱۸  | ۲۵۰۳  | ۲   | ۹.۱۴ | ۲.۰  | ۲۱  | ۱۳۶۵  | ۳۶   | ۷.۱ | ۱۶.۰ | ۳.۵  |
| ۲۶      | ۱۴  | ۶.۱ | ۴.۱ | ۱۶  | ۱۱  | ۲۲۳۹  | ۳   | ۲.۱۱ | ۱.۱۷ | ۲۰  | ۱۱۸۹  | ۵۸   | ۳.۲ | ۱۵.۰ | ۵.۹  |
| ۲۷      | ۱۶  | ۳.۱ | ۵.۱ | ۱۹  | ۱۴  | ۱۱۸۶  | ۱   | ۱.۲  | ۷.۱۶ | ۲۵  | ۱۲۸۳  | ۶۱   | ۲.۳ | ۱۱.۰ | ۳.۱۰ |
| ۲۸      | ۱۷  | ۵.۱ | ۷.۱ | ۲۳  | ۱۹  | ۴۷۸   | ۲   | ۱.۱۲ | ۸.۱۸ | ۳۰  | ۱۳۹۳  | ۶۵   | ۸.۳ | ۱۱.۰ | ۱.۴  |
| ۲۹      | ۱۷  | ۱.۱ | ۷.۱ | ۱۸  | ۲۲  | ۶۵۰   | ۲   | ۸.۹  | ۱.۱۵ | ۳۵  | ۱۰.۲۰ | ۴۳   | ۲.۳ | ۱۲.۰ | ۴.۳۲ |
| ۳۰      | ۱۶  | ۸.۰ | ۷.۱ | ۱۵  | ۱۸  | ۸۶۷   | ۴   | ۶.۷  | ۳.۱۱ | ۳۲  | ۶۲۲   | ۱۹   | ۸.۲ | ۱۶.۰ | ۷.۴۶ |
| ۳۱      | ۱۴  | ۹.۰ | ۵.۱ | ۱۳  | ۱۶  | ۱۱۵۱  | ۶   | ۵.۶  | ۳.۹  | ۳۲  | ۶۰.۶  | ۱۹   | ۲   | ۱۹.۰ | ۶.۱  |
| ۳۲      | ۱۴  | ۲.۱ | ۵.۱ | ۱۲  | ۱۸  | ۱۶۶۷  | ۸   | ۱.۷  | ۴.۹  | ۳۱  | ۶۷۲   | ۱۹   | ۵.۱ | ۲۴.۰ | ۳.۷۴ |
| ۳۳      | ۱۳  | ۶.۱ | ۳.۱ | ۱۳  | ۱۴  | ۲۱۵۶  | ۹   | ۵.۸  | ۳.۱۱ | ۲۷  | ۷۷۲   | ۱۷   | ۲.۱ | ۲۵.۰ | ۵.۶۰ |
| ۳۴      | ۱۳  | ۱.۲ | ۳.۱ | ۱۴  | ۱۷  | ۲۴۴۰  | ۸   | ۹.۱۰ | ۵.۱۴ | ۲۶  | ۱۰.۰۵ | ۲۳   | ۱.۱ | ۲۳.۰ | ۳.۴۳ |
| ۳۵      | ۱۳  | ۱.۲ | ۳.۱ | ۱۵  | ۱۵  | ۲۵۹۰  | ۶   | ۸.۱۱ | ۳.۱۶ | ۲۳  | ۱۰.۹۳ | ۳۲   | ۴.۱ | ۲۱.۰ | ۲.۲۷ |
| ۳۶      | ۱۳  | ۹.۱ | ۳.۱ | ۱۶  | ۱۸  | ۲۲۲۸  | ۴   | ۴.۱۲ | ۱.۱۷ | ۲۲  | ۱۱۵۵  | ۴۲   | ۲   | ۱۶.۰ | ۳.۱۱ |
| ۳۷      | ۱۵  | ۷.۱ | ۵.۱ | ۱۸  | ۱۵  | ۱۶۰۰  | ۲   | ۶.۱۲ | ۳.۱۸ | ۲۴  | ۱۳.۷  | ۵۵   | ۷.۲ | ۱۳.۰ | ۸.۹  |
| ۳۸      | ۱۶  | ۴.۱ | ۶.۱ | ۱۹  | ۱۶  | ۱۱۳۷  | ۲   | ۳.۱۱ | ۹.۱۶ | ۲۷  | ۱۲۲۱  | ۵۷   | ۱.۳ | ۱۲.۰ | ۶.۱۶ |
| ۳۹      | ۱۶  | ۲.۱ | ۶.۱ | ۱۹  | ۱۸  | ۷۹۴   | ۲   | ۴.۱۰ | ۸.۱۵ | ۳۰  | ۱۰.۷۹ | ۴۷   | ۲.۳ | ۱۲.۰ | ۹.۲۵ |
| ۴۰      | ۱۶  | ۱.۱ | ۶.۱ | ۱۷  | ۱۹  | ۷۸۶   | ۳   | ۹    | ۶.۱۳ | ۳۲  | ۹۱۰   | ۳۷   | ۹.۲ | ۱۵.۰ | ۵.۳۸ |
| ۴۱      | ۱۵  | ۱   | ۶.۱ | ۱۵  | ۱۸  | ۱۰.۸۴ | ۵   | ۸.۷  | ۳.۱۱ | ۳۳  | ۷۳۰   | ۲۵   | ۴.۲ | ۱۸.۰ | ۶.۵۳ |
| ۴۲      | ۱۴  | ۱.۱ | ۵.۱ | ۱۳  | ۱۶  | ۱۴۶۰  | ۷   | ۴.۷  | ۳.۱۰ | ۳۰  | ۶۶۸   | ۱۸   | ۸.۱ | ۲۱.۰ | ۶.۶۰ |
| ۴۳      | ۱۳  | ۴.۱ | ۴.۱ | ۱۳  | ۱۵  | ۱۸۵۳  | ۸   | ۳.۸  | ۱.۱۱ | ۲۹  | ۷۶۴   | ۲۰   | ۴.۱ | ۲۳.۰ | ۸.۵۹ |

ادامه جدول ۱

| Element | Sc   | Sm   | Sn   | Sr   | Ta  | Th  | Ti   | U   | V    | W   | Y   | Yb  | Zn   | Zr  |
|---------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|
| Unit    | ppm  | ppm  | ppm  | ppm  | ppm | ppm | %    | ppm | ppm  | ppm | ppm | ppm | ppm  | ppm |
| SA-۱    | ۱.۲  | ۱.۳  | ۱    | ۹۴۹  | ۱   | ۱   | ۰.۰۷ | ۳   | ۱۲   | ۱   | ۵   | ۰.۴ | ۲۲   | ۱۲  |
| ۲       | ۲۰.۵ | ۱۰.۸ | ۱    | ۳۹۷  | ۱   | ۸   | ۱.۲۶ | ۱   | ۱۶۰  | ۲   | ۲۹  | ۵.۲ | ۱۹۷  | ۷۹  |
| ۳       | ۹.۶  | ۴.۸  | ۱    | ۴۴۷  | ۲   | ۱۵  | ۰.۳۱ | ۱   | ۸۶   | ۵   | ۱۸  | ۲.۴ | ۲۳   | ۱۹  |
| ۴       | ۶.۶  | ۷.۹  | ۲    | ۸۴   | ۱   | ۴   | ۰.۳۵ | ۲   | ۷۷   | ۵   | ۲۳  | ۳.۶ | ۲۱۱  | ۲۰  |
| ۶       | ۱.۸  | ۱.۳۹ | ۱    | ۴۵   | ۸   | ۳   | ۰.۰۳ | ۱   | ۳۹   | ۲   | ۱۹  | ۶.۷ | ۱۶۹  | ۱۷  |
| ۷       | ۸.۷  | ۳.۴  | ۶    | ۴۶۴  | ۲   | ۲۴  | ۰.۳۲ | ۱   | ۸۵   | ۲   | ۱۶  | ۲.۳ | ۲۰   | ۲۱  |
| ۸       | ۲.۱  | ۲.۸  | ۹    | ۷۹   | ۱   | ۳   | ۰.۰۲ | ۱   | ۱۱   | ۴   | ۲۰  | ۲.۰ | ۷    | ۳   |
| ۹       | ۰.۷  | ۱.۳۶ | ۱۱   | ۱۱   | ۲   | ۳   | ۰.۰۱ | ۱   | ۲۱   | ۵۷  | ۱   | ۵.۹ | ۸۹   | ۱۶  |
| ۱۰      | ۰.۴  | ۴.۶  | ۲    | ۱۶   | ۱   | ۱   | ۰.۰۱ | ۱   | ۱۴   | ۱۷۸ | ۱   | ۲.۸ | ۱۰.۵ | ۹   |
| ۱۲      | ۱۸۰  | ۱۱.۱ | ۱    | ۷۰.۶ | ۱   | ۶   | ۱.۹۲ | ۱   | ۱.۶۴ | ۱   | ۳۳  | ۴.۶ | ۱۷۱  | ۵۹  |
| ۱۴      | ۳.۶  | ۸.۴  | ۲۰.۰ | ۱۰.۴ | ۱   | ۳   | ۰.۱۵ | ۱   | ۴۶   | ۲۰  | ۲۹  | ۴.۳ | ۸۲۱  | ۷۶  |
| ۱۵      | ۲.۵  | ۹.۵  | ۱۵.۰ | ۱۳   | ۹   | ۱   | ۰.۱۳ | ۳   | ۶۵   | ۲۵  | ۴۹  | ۴.۵ | ۱۷۴  | ۶۵  |
| ۱۶      | ۹.۵  | ۶.۲  | ۱    | ۴۶۹  | ۱   | ۷   | ۰.۵  | ۲   | ۸۴   | ۳   | ۱۹  | ۲.۹ | ۱۱۳  | ۳۵  |
| ۱۷      | ۹.۶  | ۹.۴  | ۱    | ۲۴۳  | ۳   | ۷   | ۰.۴۹ | ۱   | ۹۰   | ۳   | ۲۲  | ۴.۵ | ۱۵۰  | ۳۶  |
| ۱۸      | ۶.۷  | ۷.۵  | ۲    | ۲۶۰  | ۳   | ۱۱  | ۰.۲۵ | ۱   | ۷۲   | ۳   | ۱۹  | ۳.۷ | ۱۰۶  | ۲۲  |
| ۱۹      | ۴.۸  | ۷    | ۴    | ۱۶۸  | ۳   | ۸   | ۰.۱۸ | ۱   | ۵۳   | ۳   | ۱۹  | ۳.۶ | ۱۰.۲ | ۱۸  |
| ۲۰      | ۳.۳  | ۸.۴  | ۷    | ۱۵۰  | ۳   | ۸   | ۰.۰۹ | ۱   | ۳۹   | ۱۶  | ۱۴  | ۴.۲ | ۷۱   | ۱۴  |
| ۲۱      | ۳    | ۶.۱  | ۷    | ۱۴۲  | ۱   | ۸   | ۰.۰۹ | ۱   | ۳۳   | ۶۰  | ۹   | ۳.۳ | ۵۵   | ۱۲  |
| ۲۲      | ۵.۳  | ۸    | ۵    | ۲۰.۳ | ۱   | ۳   | ۰.۴۹ | ۱   | ۵۳   | ۶۰  | ۱۴  | ۳.۸ | ۹۳   | ۲۲  |
| ۲۳      | ۵.۷  | ۹.۴  | ۵۳   | ۲۰.۹ | ۱   | ۳   | ۰.۵۲ | ۱   | ۶۱   | ۶۴  | ۱۶  | ۴.۴ | ۲۹۶  | ۴۰  |
| ۲۴      | ۶.۱  | ۸.۴  | ۸۸   | ۲۱۰  | ۳   | ۲   | ۰.۵۵ | ۱   | ۷۲   | ۵۶  | ۲۸  | ۴.۱ | ۳۱۸  | ۵۲  |
| ۲۵      | ۸.۴  | ۸.۸  | ۸۸   | ۳۲۳  | ۳   | ۴   | ۰.۶۷ | ۱   | ۹۰   | ۱۲  | ۳۲  | ۴.۱ | ۳۲۰  | ۵۹  |
| ۲۶      | ۶.۳  | ۸.۴  | ۸۸   | ۲۰.۷ | ۳   | ۴   | ۰.۳۲ | ۲   | ۷۱   | ۱۳  | ۳۰  | ۴   | ۳۱۵  | ۵۳  |
| ۲۷      | ۷.۱  | ۸.۱  | ۳۹   | ۲۴۶  | ۴   | ۷   | ۰.۳۴ | ۲   | ۷۸   | ۹   | ۲۷  | ۳.۹ | ۱۳۶  | ۴۰  |
| ۲۸      | ۷.۷  | ۷.۵  | ۲    | ۲۸۵  | ۳   | ۸   | ۰.۳۶ | ۱   | ۷۵   | ۳   | ۲۰  | ۳.۷ | ۱۱۸  | ۲۸  |
| ۲۹      | ۶.۱  | ۸.۱  | ۴    | ۲۰.۵ | ۳   | ۹   | ۰.۲۵ | ۱   | ۶۳   | ۶   | ۱۹  | ۴   | ۱۰.۷ | ۲۳  |
| ۳۰      | ۴.۵  | ۷.۳  | ۵    | ۱۸۰  | ۳   | ۹   | ۰.۱۵ | ۱   | ۴۹   | ۳۱  | ۱۵  | ۳.۷ | ۸۴   | ۱۷  |
| ۳۱      | ۴.۱  | ۷.۴  | ۶    | ۱۶۶  | ۲   | ۷   | ۰.۲۱ | ۱   | ۴۴   | ۳۵  | ۱۴  | ۳.۷ | ۸۰   | ۱۷  |
| ۳۲      | ۴.۳  | ۸    | ۱۸   | ۱۷۶  | ۲   | ۵   | ۰.۳  | ۱   | ۴۶   | ۵۰  | ۱۳  | ۳.۹ | ۱۲۹  | ۲۲  |
| ۳۳      | ۵    | ۸    | ۳۸   | ۱۹۱  | ۱   | ۴   | ۰.۴۱ | ۱   | ۵۵   | ۶۰  | ۱۷  | ۳.۹ | ۱۹۱  | ۳۲  |
| ۳۴      | ۶.۴  | ۸.۷  | ۵۹   | ۲۳۶  | ۲   | ۳   | ۰.۵۶ | ۱   | ۶۹   | ۴۸  | ۲۲  | ۴.۱ | ۲۵۷  | ۴۳  |
| ۳۵      | ۶.۶  | ۸.۸  | ۷۹   | ۲۳۷  | ۲   | ۳   | ۰.۵۲ | ۱   | ۷۴   | ۳۶  | ۲۷  | ۴.۱ | ۳۱۲  | ۵۱  |
| ۳۶      | ۷    | ۸.۴  | ۷۶   | ۲۴۷  | ۳   | ۴   | ۰.۴۷ | ۱   | ۷۸   | ۲۲  | ۲۹  | ۴   | ۲۷۲  | ۵۱  |
| ۳۷      | ۷.۴  | ۸.۲  | ۵۴   | ۲۴۵  | ۳   | ۶   | ۰.۴۲ | ۱   | ۷۸   | ۹   | ۲۷  | ۳.۹ | ۲۲۲  | ۴۵  |
| ۳۸      | ۶.۸  | ۸    | ۳۳   | ۲۳۶  | ۳   | ۷   | ۰.۳۲ | ۱   | ۷۲   | ۸   | ۲۴  | ۳.۹ | ۱۶۹  | ۳۶  |
| ۳۹      | ۶.۳  | ۷.۸  | ۱۲   | ۲۲۹  | ۳   | ۸   | ۰.۲۸ | ۱   | ۶۶   | ۱۰  | ۲۰  | ۳.۸ | ۱۱۱  | ۲۷  |
| ۴۰      | ۵.۶  | ۷.۶  | ۴    | ۲۰.۹ | ۳   | ۸   | ۰.۲۴ | ۱   | ۵۸   | ۱۶  | ۱۷  | ۳.۸ | ۹۷   | ۲۱  |
| ۴۱      | ۴.۸  | ۷.۷  | ۸    | ۱۸۲  | ۲   | ۷   | ۰.۲۳ | ۱   | ۵۱   | ۲۸  | ۱۵  | ۳.۸ | ۱۰۰  | ۱۹  |
| ۴۲      | ۴.۵  | ۷.۷  | ۱۷   | ۱۷۸  | ۲   | ۶   | ۰.۲۷ | ۱   | ۴۹   | ۴۱  | ۱۵  | ۳.۸ | ۱۲۱  | ۲۲  |
| ۴۳      | ۵    | ۸    | ۳۰   | ۱۹۲  | ۲   | ۵   | ۰.۳۷ | ۱   | ۵۴   | ۴۸  | ۱۷  | ۳.۹ | ۱۶۴  | ۲۸  |

### نمودار فراوانی مقادیر اولیه طلا و مس در اسکارن

براساس نتایج تجزیه مقادیر طلا و مس، بیشترین مقدار طلا در این واحد ۶۷۵ میلی گرم در تن و کمترین مقدار آن ۳ میلی گرم در تن است. میانگین مس در این واحد ۱۵۵۱۵ گرم در تن، بیشترین مقدار آن ۳۷۲۰۰ گرم در تن و کمترین مقدار اقتصادی آن ۴۳۶۱ گرم در تن است. باید در نظر داشت که تحرک عنصر مس بیشتر از طلا بوده و بخش زیادی از مس شسته شده است که می‌توان به عیار واقعی آن در بخش‌های عمیق پی برد [۱۱، ۱۰]. باتوجه به شکل ۵ و جدول ۲، طلا توزیع ناهنجار و مس توزیع بهنجار دارد. طلا و مس هر دو دارای چولگی مثبت و راست هستند.

### تعیین موقعیت زمین ساختی

از رایج ترین روش‌ها برای تعیین موقعیت زمین ساختی استفاده از نمودار پیر و همکاران [۱۲] است که در آن، گرانیوتیوها از نظر ترکیب زمین شیمیایی و جایگاه زمین‌ساختی به چهار گروه گرانیوتیوئیدهای پشته میان اقیانوس (ORG)، گرانیوتیوئیدهای قوس آتشفشانی (VAG)، گرانیوتیوئیدهای درون ورقه‌ای (WPG) و گرانیوتیوئیدهای همزمان با برخورد (Syn-GOLG) تقسیم شده‌اند. در نمودار Y نسبت به Nb، چنان که دیده می‌شود، بیشتر سنگ‌های مورد بررسی در گستره مشترک گرانیوتیوئیدهای قوس آتشفشانی و همزمان با برخورد قرار می‌گیرند. از این رو، فعالیت ماگمایی منطقه در ارتباط با محیط فرورانشی است (شکل ۸).

### زمین شیمی عناصر خاکی نادر (REE)

عناصر خاکی نادر کاربرد های فراوانی در زمین‌شیمی و سنگ‌شناسی دارند. در بررسی الگوی توزیع عناصر کمیاب بر پایه نمودارهای عنکبوتی، مقادیر عناصر کمیاب ناسازگار و خاکی نادر نمونه‌های منطقه نسبت به مقادیر گوشته اولیه و کندریت بهنجار شده‌اند (شکل ۹). چنان که دیده می‌شود، عناصر Th، Pb، Yb، U، Rb دارای غنی‌شدگی و عناصر K، Ba و Nb دارای تهی‌شدگی هستند. ناهنجاری منفی در عناصری چون Nb، Sr، Ti مشخصه گرانیوتیوئیدهای آهکی قلیایی قوسی است. به باور ماکادو و همکاران [۱۳]، غنی‌شدگی عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) نسبت به مقادیر عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) به ویژه Nb نشان دهنده سری ماگمایی آهکی قلیایی است. غنی‌شدگی از LILE ها و Pb شواهدی از آلایش پوسته‌ای هستند. به باور ویلسون [۱۴]، بی‌هنجاری

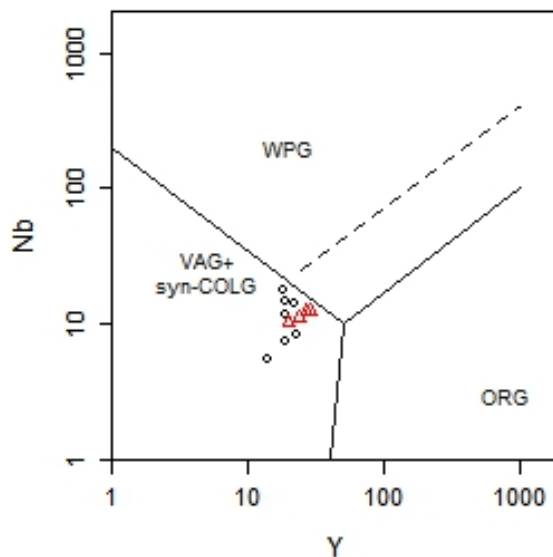
منفی در عناصر Ba و Nb می‌تواند به فرورانش مربوط باشد. همچنین نسبت بالای LILE/HFSE در مناطق قوسی نتیجه ورود عناصر سنگ دوست بزرگ یون موجود در صفحه فرو رونده به درون گوشته بالای آن است. غنی‌شدگی LREE ها نسبت به HREE ها ناشی از آلایش ماگما با مواد پوسته‌ای است و نیز بی‌هنجاری Ti نشانگر سنگ های محیط فرورانش است. ناهنجاری Eu به حضور کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول بستگی دارد، از آنجا که غلظت کلارک Eu ۱،۲ گرم در تن است، ناهنجاری مثبت Eu می‌تواند به حضور آمفیبول در سنگ‌ها مربوط باشد [۱۵].

### تعیین همبستگی عناصر در اسکارن

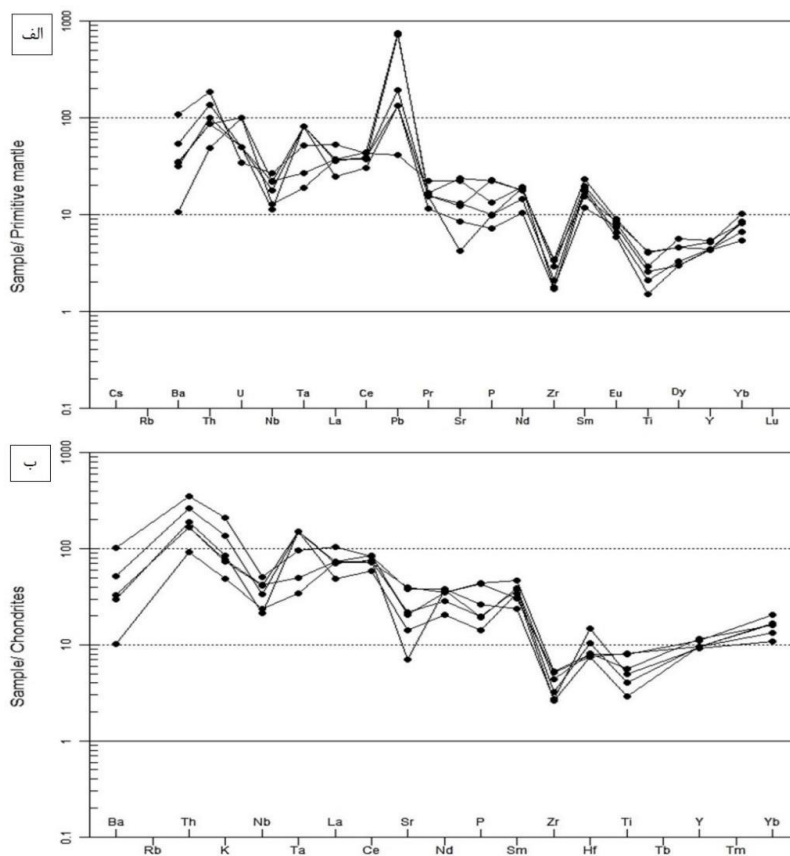
در اسکارن، طلا با عناصر مولیبدن، آنتیموان، بیسموت، تنگستن و گوگرد همبستگی بسیار شدید دارد. همبستگی بالای طلا با گوگرد و بیسموت به احتمال به دلیل جانشینی طلا در کانی‌هایی چون آرسنوپیریت‌ها و کانی‌های سولفیدی مس و بیسموت است. بر اساس داده‌های آماری اسپیرمن بدست آمده از نمونه‌های تجزیه شده پهنه اسکارن (جدول ۳)، بیشترین همبستگی میان طلا و بیسموت و همچنین بین مولیبدن و تنگستن است. مس با عناصر مولیبدن، تنگستن، نقره، بیسموت، کادمیم و گوگرد همبستگی بسیار شدید دارد. همبستگی بین این عناصر ناشی از حضور آن‌ها در کانی‌های سولفیدی و اکسیدی سنگ‌های کانه‌دار منطقه است. قلع تنها با منگنز و روی همبستگی بسیار شدید دارد. از آنجا که آرسنیک، کادمیوم و مولیبدن در محیط‌های قلیایی به صورت محلول حضور دارند، همبستگی بین این عناصر نشان دهنده حمل آنها توسط محلول‌های گرمایی با ماهیت قلیایی است که با توجه به حضور رگه های سیلیسی، می‌توان گفت که این عناصر طی تغییر ماهیت محلول‌های گرمایی (در اثر تماس با سنگ‌های اسیدی و حدواسط منطقه)، در رگه‌های سیلیسی ته‌نشین شده‌اند. وانادیم با استرانسیم و تیتانیوم همبستگی بسیار شدید دارد. با توجه به حضور آلومینیم، اسکاندیم و استرانسیم در پلاژیوکلازها و نیز حضور و یا جانشینی تیتانیوم و وانادیم در کانی‌هایی چون مگنتیت و یا تیتانومگنتیت و همچنین با توجه به سنگ دوست و اسید دوست بودن این عناصر، مشخص می‌شود که آنها در اثر فرایندهای گرمایی در سنگ ها حضور نیافته‌اند. حضور این عناصر در پلاژیوکلاز و مگنتیت به طور طبیعی طی فعالیت‌های آذرین در سنگ‌های منطقه صورت گرفته است.

جدول ۲ آزمون بهنجار بودن مقدار طلا و مس در واحد اسکارن.

|    | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |    |       |
|----|---------------------------------|----|-------|
|    | Statistic                       | df | Sig.  |
| Cu | ۰/۱۹۷                           | ۱۸ | ۰/۰۶۲ |
| Au | ۰/۲۰۹                           | ۱۸ | ۰/۰۳۶ |



شکل ۸ نمودار Y نسبت به Nb [۱۳].



شکل ۹ نمودارهای عنکبوتی عناصر خاکی نادر برای سنگ‌های منطقه بهنجار شده به الف) گوشته اولیه [۱۶] و ب) کندریت [۱۷، ۱۸].

جدول ۳ تعیین همبستگی عناصر در واحد اسکارن به روش آماری اسپیرمن.

|                           |    | Au    | Ag    | As   | Bi    | Cd    | Cr    | Cu   | Mn    | Mo    |
|---------------------------|----|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Spearman's<br>Correlation | Au | ۱     |       |      |       |       |       |      |       |       |
|                           | Ag | ۰/۵۳  | ۱     |      |       |       |       |      |       |       |
|                           | As | ۰/۵۸  | ۰/۱۱  | ۱    |       |       |       |      |       |       |
|                           | Bi | ۰/۹۶  | ۰/۴۶  | ۰/۵۲ | ۱     |       |       |      |       |       |
|                           | Cd | ۰/۴۲  | ۰/۹۵  | ۰/۰۹ | ۰/۳۷  | ۱/۰۰  |       |      |       |       |
|                           | Cr | -۰/۲۸ | -     | ۰/۰۱ | -۰/۱۸ | -۰/۶۸ | ۱     |      |       |       |
|                           | Cu | ۰/۶۷  | ۰/۹۵  | ۰/۳۳ | ۰/۶   | ۰/۹۱  | -۰/۶۶ | ۱    |       |       |
|                           | Mn | ۰/۰۱  | ۰/۷۱  | -    | -۰/۰۹ | ۰/۷۹  | -     | ۰/۶۴ | ۱     |       |
|                           | Mo | ۰/۸۷  | ۰/۶۸  | ۰/۳۲ | ۰/۷۷  | ۰/۵۰  | -     | ۰/۷۲ | ۰/۲۳  | ۱     |
|                           | Ni | ۰/۱۰  | -۰/۰۵ | ۰/۱۶ | ۰/۱۹  | -۰/۴۸ | ۰/۴۰  | -۰/۴ | -۰/۷۵ | -۰/۲۵ |
|                           | Pb | -۰/۰۲ | -     | -    | ۰/۰۳  | -۰/۲۹ | ۰/۳۳  | -    | -۰/۵۱ | -۰/۳  |
|                           | S  | ۰/۷۶  | ۰/۸۴  | ۰/۷۸ | ۰/۳۴  | ۰/۷۹  | -     | ۰/۹۰ | ۰/۳۷  | ۰/۷۰  |
|                           | Sb | ۰/۷۱  | ۰/۰۳  | ۰/۶۴ | ۰/۷۸  | -۰/۰۳ | ۰/۰۲  | ۰/۲۱ | -۰/۴۴ | ۰/۴۳  |
|                           | Sn | -۰/۲۸ | ۰/۳۹  | -    | -۰/۳۳ | ۰/۵۲  | -     | ۰/۲۹ | ۰/۸۳  | -۰/۰۴ |
|                           | Sr | -۰/۰۳ | ۰/۰۶  | -    | -۰/۱۱ | ۰/۰۲  | -     | -    | ۰/۰۸  | ۰/۲۱  |
|                           | Ti | ۰/۰۴  | ۰/۱۸  | -    | -۰/۰۷ | ۰/۱۵  | -۰/۴  | ۰/۰۵ | ۰/۲۹  | ۰/۲۹  |
|                           | V  | -۰/۳۱ | -     | -    | -۰/۴۲ | ۰/۰۳  | -     | -    | ۰/۴۱  | -۰/۰۷ |
|                           | W  | ۰/۹۳  | ۰/۶۸  | ۰/۴۸ | ۰/۸۵  | ۰/۵۴  | -     | ۰/۷۸ | ۰/۲۵  | ۰/۹۶  |
|                           | Zn | -۰/۳۶ | ۰/۳۸  | -    | -۰/۴۷ | ۰/۴۶  | -     | ۰/۲۲ | ۰/۷۴  | -۰/۰۷ |

ادامه جدول ۳

|    | Ni    | Pb    | S    | Sb    | Sn    | St   | Ti   | v     | W     | Zn |
|----|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|----|
| Au |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Ag |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| As |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Bi |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Cd |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Cr |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Cu |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Mn |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Mo |       |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Ni | ۱     |       |      |       |       |      |      |       |       |    |
| Pb | ۰/۷۳  | ۱     |      |       |       |      |      |       |       |    |
| S  | -۰/۱۴ | -۰/۱۷ | ۱    |       |       |      |      |       |       |    |
| Sb | ۰/۵۸  | ۰/۲۵  | ۰/۴۸ | ۱     |       |      |      |       |       |    |
| Sn | -۰/۰۶ | -۰/۴۵ | ۰/۰۵ | -۰/۵۹ | ۱     |      |      |       |       |    |
| Sr | -۰/۰۵ | ۰/۳۰  | -    | -۰/۲۹ | ۰/۲۷  | ۱    |      |       |       |    |
| Ti | -۰/۱۶ | ۰/۰۹  | -    | -۰/۲۶ | ۰/۴۷  | ۰/۹۲ | ۱    |       |       |    |
| V  | -۰/۳۱ | ۰/۰۶  | -    | -۰/۶۲ | ۰/۶۲  | ۰/۷۹ | ۰/۸۲ | ۱     |       |    |
| W  | -۰/۱۸ | -۰/۲۵ | ۰/۷۶ | ۰/۵۲  | -۰/۰۵ | ۰/۰۸ | ۰/۱۹ | -۰/۱۲ | ۱     |    |
| Zn | -۰/۴۹ | -۰/۱۸ | -    | -۰/۶۱ | ۰/۷۷  | ۰/۳۸ | ۰/۵۲ | ۰/۶۱  | -۰/۱۳ | ۱  |

## برداشت

نتایج بررسی‌های میدانی، بررسی مقاطع میکروسکوپی و همچنین تجزیه شیمیایی نشان داد که ساخت و بافت رگه‌ای و پر کننده فضای خالی در منطقه به صورت غالب وجود دارد. دگرسانی‌های پروپلیتی، سربستی، آرژلیک و همتیتی در منطقه شناسایی شد. بیشترین مقدار طلا ۰/۶۷۵ گرم در تن (۶۷۵ppb) و بیشترین مقدار مس ۳۷۲۰۰ گرم در تن (۳/۷۲٪) است. طلا با عناصر مولیبدن، آنتیموان، بیسموت،

تنگستن و گوگرد همبستگی مثبت دارد. همبستگی بالای طلا با گوگرد و بیسموت به احتمال بسیار به دلیل جانشینی طلا در کانی‌هایی چون آرسنوپیریت‌ها و کانی‌های سولفیدی مس و بیسموت است. بیشترین همبستگی بین داده‌ها میان طلا و بیسموت و همچنین مولیبدن و تنگستن وجود دارد. مس با عناصر مولیبدن، تنگستن، نقره، بیسموت، کادمیم و گوگرد همبستگی مثبت دارد. همبستگی بین این عناصر ناشی از حضور آن‌ها در کانی‌های سولفیدی و اکسیدی سنگ‌های کانه‌دار

- [7] Zamanian H., Ahmadnejad F., Karami A., Taghipour B., "Petrology, geochemistry and skarn formation potential of Samen granitoid mass (southwest of Malair, Hamedan)", Quarterly Journal of Geology of Iran, (2018) 51-81.
- [8] Jafarian M., Zamani pedram M., "1/100000 Geological map of Malayer", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (1887).
- [9] Whitney D., Evans B. "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American Mineralogist, Volume 95 (2010) 185-187.
- [10] Sahebi khadar J., Malekzadeh Shafaroodi A., Mazloomi Bajestani A., "Mineralogy, structure, texture and geochemistry in Fadiah copper-gold mineral occurrence, northwest of Torbat Haydaria", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, (2022) 57-74.
- [11] Ashbak P., Malekzaadeh shafaroodi A., Karimpour M., "Investigating gold  $\pm$  copper mineralization in Jalmabadan region (northwest of Sabzevar) based on mineralogical evidence of alteration and mineralization zones and geochemistry", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, (2018) 31-46.
- [12] Pearce J. A., Harris N.B., Tindle A.G., "Trace element discrimination diagrams. for the tectonic interpretation of granitic rocks", Journal Petrology, 25(1984) 956-983.
- [13] Machado A., Lima E. F., Chemale J. F., Morta D., Oteiza O., Almeida D. P. M., Figueiredo A. M. G., Alexandre F. M., Urrutia J. L., "Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calcalkaline magmatism in the south Shetland arc, Antarctica", Journal of South American Earth Sciences 18(3) (2005) 407-425.
- [14] Wilson M., "Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach", Unwin Hyman, London, 466 (1989).
- [15] Girardi J. D., Patchett P. J., Ducea M. N., Gehrels G. E., Cecil M. R., Rusmore M. E., Woodsworth G. J., Pearson D. M., Manthei C., Wetmore P., "Elemental and isotopic evidence for granitoid genesis from deep-seated sources in the Coast mountains batholith, British Columbia". Journal of Petrology 53 (7) (2012) 1505-1536.
- [16] McDonough W.F., Sun S.S., "The Composition of the Earth". Chemical Geology, 120 (1995) 223-253.

منطقه است. بیشتر سنگ‌های مورد بررسی در گستره مشترک گرانیت‌های قوس آتشفشانی (VAG) و همزمان با برخورد Syn-COLG قرار دارند، از این رو، فعالیت ماگمایی منطقه در ارتباط با محیط فرورانشی است [۷، ۱۹]. ناهنجاری منفی در عناصری چون Nb, Sr, Ti، ویژه گرانیتوئیدهای آهکی قلیایی قوسی است. غنی‌شدگی عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) نسبت به عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) به ویژه Nb نشان دهنده محیط زمین ساختی ماگمایی قوس آتشفشانی است. غنی‌شدگی از LILEها و Pb شواهدی از آلاینش پوسته‌ای هستند. توده‌های نفوذی منطقه نیز از گرانیتوئیدهای نوع I هستند.

#### قدردانی

نگارندگان صمیمانه از زحمات و راهنمایی‌های بی دریغ جناب دکتر مهرداد موحدی و همه کارکنان سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور قدردانی می‌نماید.

#### مراجع

- [1] Mohajjel M., Fergusson C. L., Sahandi M. R., "Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone", western Iran. Journal (2003).
- [2] Mohajjel M., Fergusson C. L., "Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros orogen in northwestern Iran". International Geology Review 56(3) (2014) 263-287.
- [3] Azizi H., Moinevaziri H., "Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran", Journal of Geodynamics 47 (2009) 167-179.
- [4] Movahedi M., Yazdi M., Behzadi M., "Temperature-barometric and chemistry of garnet and pyroxene minerals of Ashvand Nahavand skarn deposit, west of Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, (2022) 3-14.
- [5] Movahedi M., Yazdi M., Behzadi M., "Determining the mineralization conditions based on the data of fluid inclusion in the Skarn Ashvand deposit, west of Iran", Journal of Earth Sciences, (2021) 111-122.
- [6] Arian M., "Physiographic-Tectonic Zoning of Iran's Sedimentary Basins". Journal of Geology, 3(2013) 169-177.

[19] Zamanian H., Karami A., Zarei Sahamieh R., "A geochemical comparison of Saman granodiorite with the skarn granitoids of the world in terms of mineralization potential", The second international specialized congress of Earth Sciences, (2015).

[17] Thompson A.B., "Migmatism of The British Tertiary Volcanic Province. Scott". Journal of Geology, 18 (1982) 50-107.

[18] Nakamura N., "Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites". Geochim. Cosmochim. Acta 38 (1974) 757-775.