

## Geochemical investigation of rare earth elements and its relationship to auriferous ore- forming fluids in Senjedeh mine district (Central Iran)

Seyedeh Narges Sadati <sup>\*1</sup>, Zahra Nourian Ramsheh <sup>2</sup> and Mohammad Yazdi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>2</sup> Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### Abstract

Muteh gold mining district is located 60 km southwest of Delijan in the central part of the Sanandaj- Sirjan zone (SSZ). It consists of two main ore deposits, including the Chah Khatoon and Senjedeh open pits, and several smaller occurrences. Rock units exposing in the area underwent greenschist to lower amphibolite metamorphism. They consist of NW- SE trending deformed and metamorphosed volcano- sedimentary and acidic volcanic rocks. The gold mineralization in the study area occurred as quartz-sulfide veins and veinlets along N40W trending, NE dipping normal faults in metarhyolite host rock. Geochemical behavior of gold and associated elements in mineralized and altered samples indicates that among the major elements, S, Si and among the trace elements Ag, Te, Th, Bi, Ba increasing with the concentration of gold. The concentration of REE and the spider diagram of the samples from altered and mineralized zone and comparison with unmineralized sample indicate a general increasing enrichment for the all REE especially in LREE in the altered and mineralized zone. LREE enrichment in gold mineralization samples indicates the effect of hydrothermal reduced fluids enriched in sulfur, silica and CO<sub>2</sub> on concentration of volatile and mobile elements (LREE) during active tectonic of the region. The negative correlation between gold and HREE elements is probably due to the fluoride fluids that washed and carried these elements.

**Key words:** rare earth elements, gold mineralization, Senjedeh, Muteh mining district, Sanandaj- Sirjan Zone

\* sadati\_sn@uma.ac.ir

## بررسی زمین‌شیمیایی عناصر خاکی کمیاب و ارتباط آن با سیال‌های کانه‌ساز طلا در محدوده معدنی سنجد (ایران مرکزی)

سیده نرگس ساداتی<sup>۱\*</sup>، زهرا نوریان‌رامشه<sup>۲</sup> و محمد یزدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### چکیده

منطقه معدنی مونه در ۶۰ کیلومتری جنوب‌باختری دلیجان و در بخش مرکزی پهنه سنجد- سیرجان جای دارد. این منطقه شامل دو معدن فعال به نام چاه‌خاتون و سنجد و چندین رخداد کوچک‌تر است. واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در منطقه که در حد رخساره شیست‌سبز تا آمفیبولیت زیرین دگرگون شده‌اند، شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی و آذرآوری با راستای عمومی شمال‌خاوری- جنوب‌باختری هستند. کانه‌زایی در منطقه بررسی شده به صورت رگه- رگچه‌های کوارتز- سولفید در کانسنگ میزبان متاریولیتی و در راستای گسل نرمال با روند N40W و شیب به سوی شمال‌خاوری رخ داده است. بررسی و مقایسه رفتار زمین‌شیمیایی طلا و عنصرهای همراه در نمونه‌های کانه‌دار و دگرسان شده نشان می‌دهد در میان عنصرهای اصلی، عنصرهای Si و S و در میان عنصرهای کمیاب، عنصرهای Ag، Te، Bi، Th همراه با افزایش عیار طلا، افزایش می‌یابند. بررسی روند تغییرات و الگوی عناصر خاکی کمیاب در نمونه‌های کانه‌دار و دگرسان شده و مقایسه آنها با نمونه‌های دگرسان نشده، نشان‌دهنده غنی‌شدگی عمومی از عناصر خاکی کمیاب سبک، به‌ویژه در نمونه‌های کانه‌دار است. غنی‌شدگی عنصرهای کمیاب خاکی سبک در نمونه‌های با کانه‌زایی طلا، نشان‌دهنده تأثیر سیال‌های گرمایی احیایی سرشار از گوگرد، سیلیس و CO<sub>2</sub> همزمان با زمین‌ساخت فعال منطقه، در تجمع عنصرهای فرار و متحرک است. همبستگی منفی میان طلا و عناصر خاکی کمیاب سنگین چه بسا پیامد تأثیر سیال‌های فلوردار باشد که شستشو و حمل این عنصرها را به دنبال داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: عناصر خاکی کمیاب، کانه‌زایی طلا، سنجد، منطقه مونه، سنجد- سیرجان

سودمندی هستند که در تفسیر داده‌ها و ارائه کلید

مقدمه

اکتشافی و اکتشاف کانسارها به کار می‌روند. بررسی‌های

داده‌های زمین‌شیمیایی در کنار دیگر اطلاعات، ابزار

\* sadati\_sn@uma.ac.ir

۵- توانایی سیال برای زدودن REE از سیستم. از این رو، وجود همخوانی میان سنگ اولیه، تجمعات دگرسانی، ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی سیال‌های کانه‌دار، نسبت‌های سیال/سنگ و الگوی REE پدیدآمده پذیرفتنی است (Aliyari et al., 2012; Linnen et al., 2014).

از چند دهه گذشته، بسیاری از پژوهشگران به بررسی منطقه مته پرداخته‌اند و هر یک تلاش کرده‌اند پرسش‌های فراوان درباره کانسارهای طلای منطقه را به صورت علمی، منطقی و مستدل پاسخ دهند. برای نمونه، به باور Samani (۱۹۸۸)، کانه‌زایی‌های طلای منطقه با توده‌های گرانیتی وابستگی زایشی دارند. Moritz و Ghazban (۱۹۹۶) با بررسی کانه‌زایی‌های بخش شکنا در چاه خاتون و سنجده، کانه‌زایی‌های منطقه را پیامد آمیختگی یک سیال شور ناحیه‌ای و یک سیال رقیق دیگر - شاید آب جوی - دانسته‌اند. Mehrabi و همکاران (۲۰۱۲) در مقاله خود کانسارهای منطقه مته را سامانه طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی دانسته‌اند. Kouhestani و همکاران (۲۰۱۵) کانسار چاه‌باغ را بررسی و برای نخستین بار ارتباط کانه‌زایی طلا با پهنه‌های برشی شکل‌پذیر را در منطقه شناسایی و افزون بر بیان ویژگی‌های کانه‌زایی‌های شکل‌پذیر و شکنا در کانسار چاه‌باغ، آنها را از نوع کوهزایی دانسته‌اند. با وجود بررسی‌های فراوان انجام شده در منطقه مته گمان می‌رود بررسی دقیق و جامع کانسارهای طلای منطقه با تاکید بر بررسی‌های زمین‌شیمیایی عناصر خاکی کمیاب، افزون بر شناخت خاستگاه‌های احتمالی طلا و فرایندهای متأثرکننده توزیع آن، شناسایی فاکتورهای بحرانی پیدایش و تمرکز کانه‌زایی طلا را به دنبال دارد. در این پژوهش، برای به‌دست‌آوردن اطلاعاتی از ویژگی‌های سیال‌های کانه‌ساز، بررسی‌های زمین‌شیمیایی با بهره‌گیری از داده‌های REE سنگ کل نمونه‌های سنگی و کانه‌دار منطقه سنجده انجام می‌شود.

زمین‌شیمیایی در کانسارهای گوناگون، افزون بر آن که راهنمای خوبی در فهم چگونگی و مراحل پیدایش کانسار هستند، ابزار مهم اکتشافی در پی‌جویی کانسارهای مشابه به‌شمار می‌روند. الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب به‌طور معمول برای شناسایی نوع توده‌های زمین‌شناسی، به‌دست‌آوردن اطلاعاتی درباره حمل، غنی‌شدگی و تغییرات محیطی فلزها به کار برده می‌شود (Daux et al., 1994; Abdelnasser et al., 2018).

بررسی‌های زمین‌شیمیایی روی پهنه‌های دگرسانی، اهمیت ویژه‌ای برای شناخت میزان تغییرات آنها در دگرسانی دارد. تحرک‌پذیری یا تمرکز عناصر خاکی کمیاب هنگام دگرسانی گرمایی، مورد بحث و اختلاف نظر پژوهشگران بوده است. به‌باور برخی پژوهشگران، عناصر خاکی کمیاب نامتحرک هستند و فرایندهایی مانند شستشو و دگرسانی گرمایی بر آنها تأثیرگذار نیست (Palacios et al., 1986).

اما بررسی‌های انجام‌شده روی تیپ‌های گوناگون کانسارهای طلا مانند اپی‌ترمال، مرتبط با توده‌های نفوذی و طلا- مس پورفیری نشان داده است این عناصر در شرایط خاص (مانند: PH کم، نسبت سیال/سنگ بالا و فراوانی کمپلکس‌های یونی  $SO_4^{2-}$ ،  $PO_4^{3-}$ ،  $Cl^-$ ،  $F^-$  و  $CO_3^{2-}$ ) متحرک می‌شوند (Alderton et al., 1980; Wood et al., 2012; Liu et al., 2013).

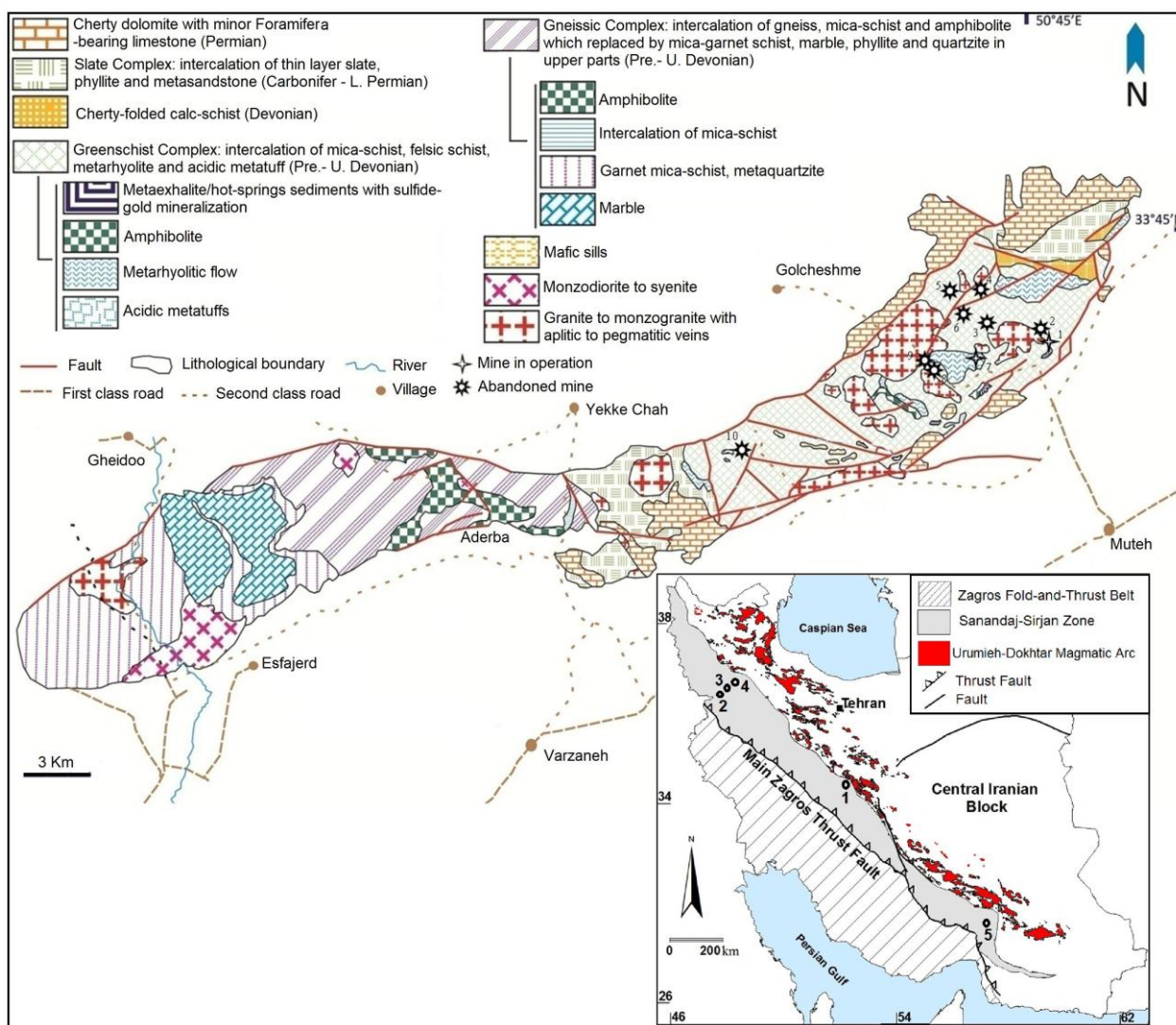
به باور (Morgan et al., 2012; Liu et al., 2013)، عناصر خاکی کمیاب بیشتر در شرایط اسیدی بالاتر و با حضور  $Cl^-$  و  $SO_4^{2-}$  کمپلکس پدید می‌آورند و متحرک می‌شوند. برپایه بررسی‌های Alderton و همکاران (۱۹۸۰)، افزایش یا کاهش عناصر خاکی کمیاب تا دو برابر در هنگام دگرسانی گرمایی، بیشتر را عوامل زیر کنترل می‌کنند:

- ۱- تمرکز REE در کانی‌های فعال در واکنش؛
- ۲- پایداری نسبی این کانی‌ها در سیال؛
- ۳- مکان‌های قابل دسترس در کانی‌های ثانویه برای همخوانی REE آزادشده در هنگام دگرسانی؛
- ۴- تمرکز REE در سیال افزوده‌شده به سنگ‌ها؛

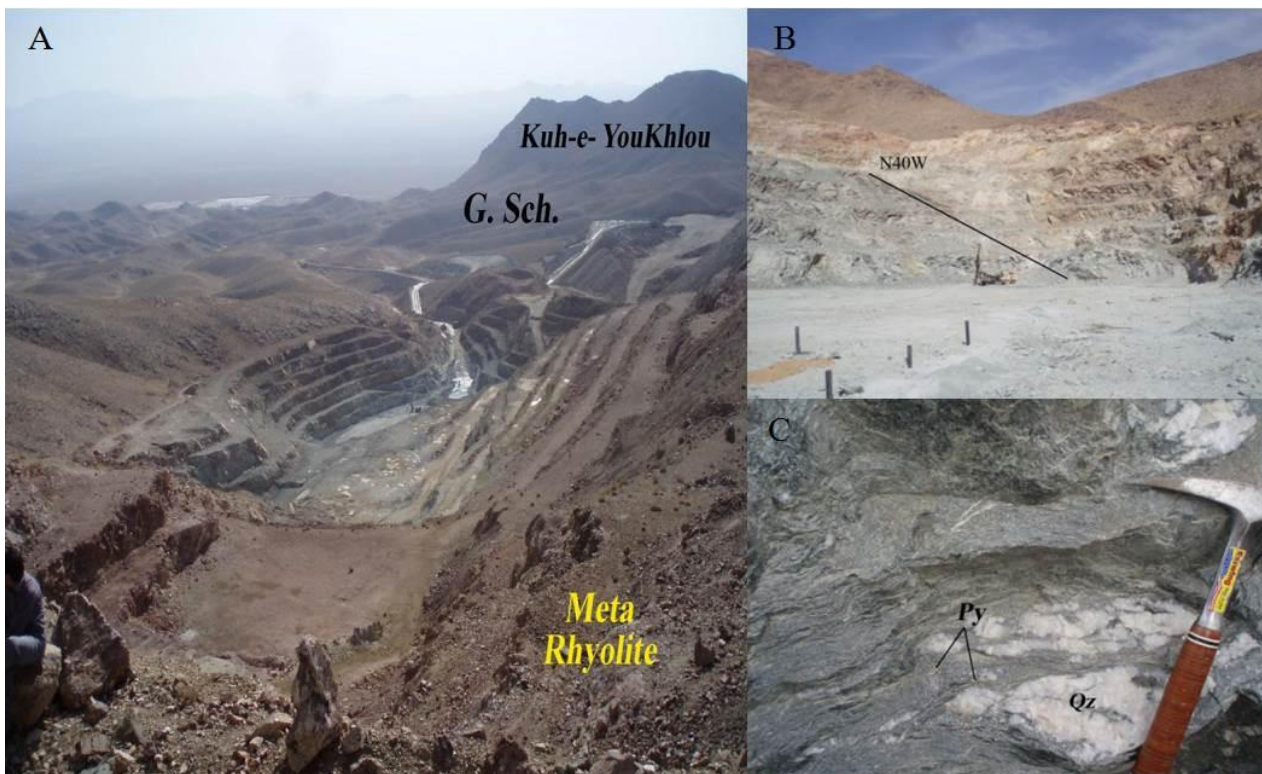
### جایگاه زمین‌شناسی منطقه و سنگ‌نگاری

منطقه معدنی موته دو معدن فعال چاه خاتون و سنجده و هشت رخداد طلا دار دارد و مهم‌ترین منطقه معدنی فعال طلا در ایران به شمار می‌رود. از دیدگاه زمین‌شناسی، این منطقه بخشی از پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان است. این منطقه در بردارنده سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی دگرگون شده است که توده‌های نفوذی فراوان مافیک تا فلسیک در آنها نفوذ کرده‌اند ( Badrzadeh, 2019). معدن سنجده در ۷ کیلومتری شمال باختری

کارخانه استحصال طلا است. سنگ میزبان این معدن، گنبد ریولیتی و فلسیک شیبست کوه‌سیاه است که بخش‌های طلا دار اقتصادی آن، در سه پهنه برشی با گسل‌های نرمال و ستبرای ۳ تا ۶ متر دیده می‌شوند (شکل‌های ۱ و ۲ - A). روند عمومی پهنه‌های کشتی طلا دار N46W و شیب آنها نزدیک به ۶۰ درجه شمال خاوری است (شکل ۲ - B). جنس این سنگ‌ها، متاریولیت خاکستری رنگ خرد شده و به شدت سیلیسی شده‌ای است که طلا در آنها متمرکز شده است (شکل ۲ - C).



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی موته (۱. چاه خاتون؛ ۲. دره اشکی؛ ۳. چشمه گوهر؛ ۴. سه کلوه؛ ۵. تنگه زر؛ ۶. چاه علومه؛ ۷. سنجده؛ ۸. قروم قروم؛ ۹. چشمه دستار؛ ۱۰. چاه باغ) (Kouhestani et al., 2014)



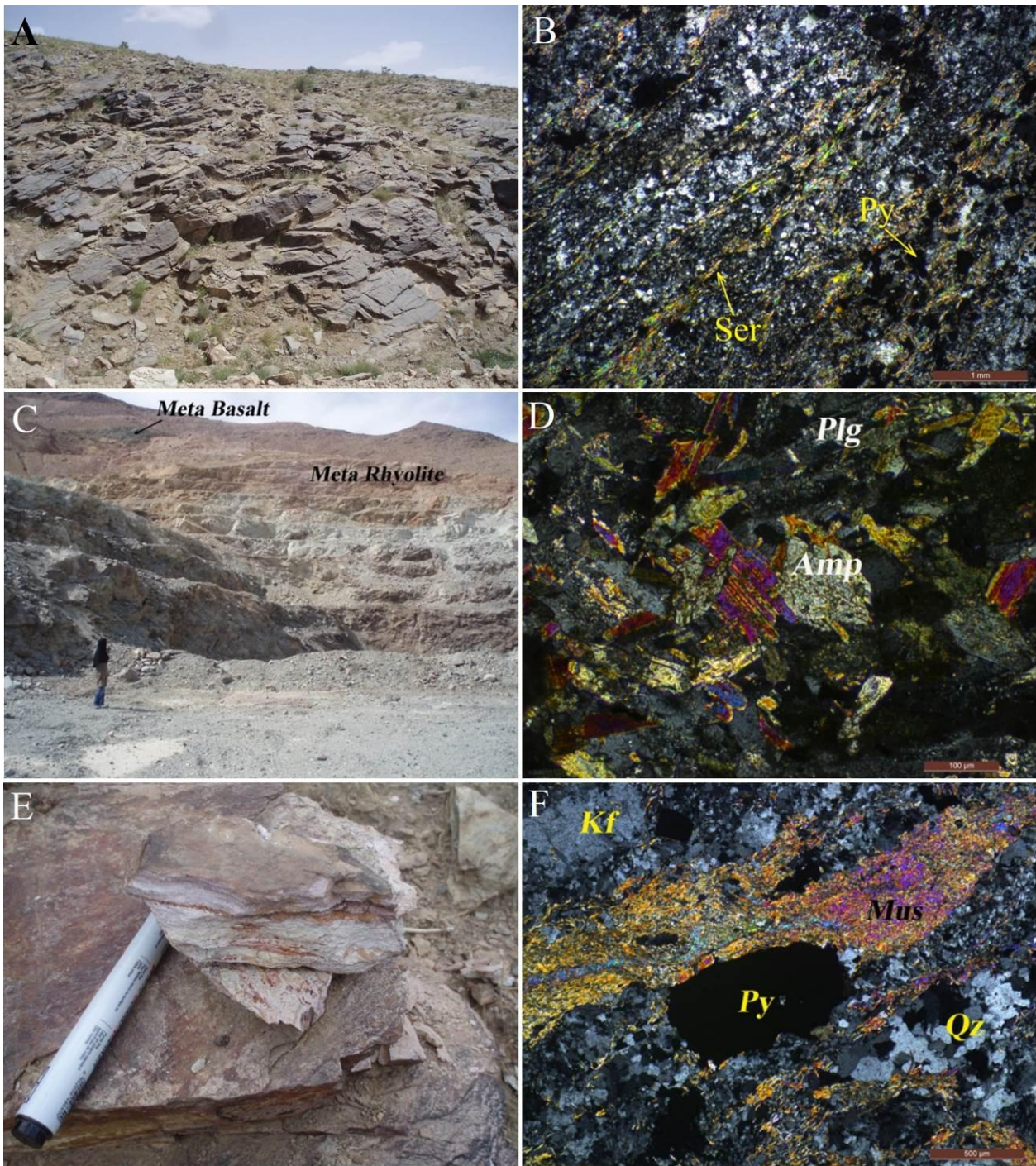
شکل ۲- A) نمایی از معدن سنجده و شیست‌های سبز و واحدهای متاریولیتی و نمایی از کوه یوخلو (دولومیت پرمین) (دید رو به جنوب)؛ B) نمایی نزدیک از معدن سنجده و رفتار گسل اصلی نرمال، آرژیلیتی‌شدن آشکارا با رنگ سفید در تصویر دیده می‌شود؛ C) دگرسانی سیلیسی و رگه‌های کوارتز طلادار

جهت یافته با چین خوردگی‌های ظریف در راستای شیستوزیته سنگ دیده می‌شود (شکل ۳- B). در بالاترین پله معدن سنجده در محل پهنه اکسیدی، یک توده متابازیت وجود دارد که در پی حرکت‌های گسلی در واحد متاریولیت جای گرفته است. این واحد با رنگ سبز تیره به آسانی از واحدهای سنگی اطراف شناخته می‌شود (شکل ۳- C). برپایه بررسی‌های سنگ‌نگاری مقطع‌های نازک- صیقلی، این واحد در بردارنده پلاژیوکلاز، آمفیبول (اکتینولیت)، کلریت، کلسیت، بیوتیت و به میزان کمتر پیریت، هماتیت و لیمونیت است و دچار دگرگونی اندکی شده است (شکل ۳- D).

پهنه‌های برشی با بخش‌های باطله متاریولیتی خاکستری مایل به قهوه‌ای کثیف از هم جدا شده‌اند. این بخش‌ها به همراه میان‌لایه‌های متابازیتی همگی بخشی از کمپلکس شیست سبز هستند (شکل‌های ۲- A تا ۲- C).

در بخش‌های سطحی واحد متاریولیتی، پیریت به اکسیدهای آهن تجزیه شده و مهاجرت یون‌های آهن ورنی شدن این بخش‌ها را به دنبال داشته است (شکل ۳- A). در این واحد بافت بلاستوپورفیری عمومیت دارد و زمینه آن بیشتر از کوارتزهای ریزدانه ساخته شده است. بلورهای سرسیت به صورت تجمع یافته و





شکل ۳- A) نمایی از واحد متاریولیت و ورنی شدن بخش‌های سطحی در پی تجزیه پیریت به اکسیدهای آهن؛ B) تصویر میکروسکوپی XPL از بلورهای پیریت در امتداد برگوارگی؛ C) نمایی از واحد متابازالت که با رنگ سبز تیره به آسانی از واحدهای سنگی اطراف شناخته می‌شود؛ D) تصویر میکروسکوپی XPL از این واحد؛ E) نمونه دستی از فلسیک شیست‌های منطقه؛ F) تصویر میکروسکوپی XPL از فلسیک شیست‌ها

سنگ‌های دگرگونه آتشفشانی- رسوبی هستند که در حد رخساره شیست‌سبز دگرگون شده‌اند.

متاپلیت‌ها از دیگر گروه‌های سنگی هستند که در منطقه رخنمون دارند. این سنگ‌ها،



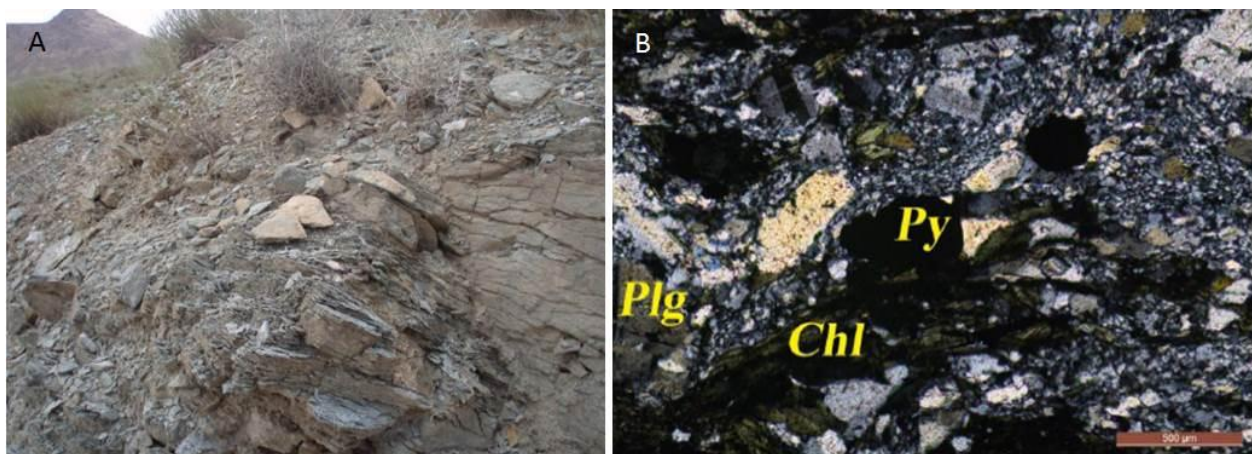
دگرریختی غالب منطقه، عموماً بر گوارگی شدید از خود نشان می‌دهد که شامل تناوب نوارهای سرشار از کانی‌های کلریت و کوارتز است (شکل‌های ۴-A و ۴-B).

دگرسانی گرمابی همراه با رخداد طلا در این ناحیه با سفیدشدگی سنگ‌دیواره و یا سنگ میزبان همراه است و بیشتر شامل دگرسانی‌های سیلیسی، سولفیدی، کربناتی، کلریتی، آرژیلیتی و سریسیتی شدن است (شکل‌های ۵-A تا ۵-H). دگرسانی با گسل‌های اصلی ناحیه ارتباط نزدیک دارد و بیشتر کانه‌زایی طلا در ارتباط با این گسل‌ها هستند. در سنگ‌های میزبان معدن سنجد، دگرسانی بیشتر از نوع سیلیسی است و به صورت رگه‌ای و بیشتر در محل تراکم درزه‌ها روی داده است (شکل‌های ۲-C، ۵-B، ۵-D و ۵-H). در برخی پهنه‌ها، رگه‌های سیلیسی پیریت‌دار با ستبرای نزدیک به یک متر دیده می‌شوند. کانه‌زایی در کانسار سنجد به صورت رگه‌های کوارتزی سولفیددار است که بافت اصلی ماده معدنی را می‌سازند (شکل‌های ۵-G تا ۵-H).

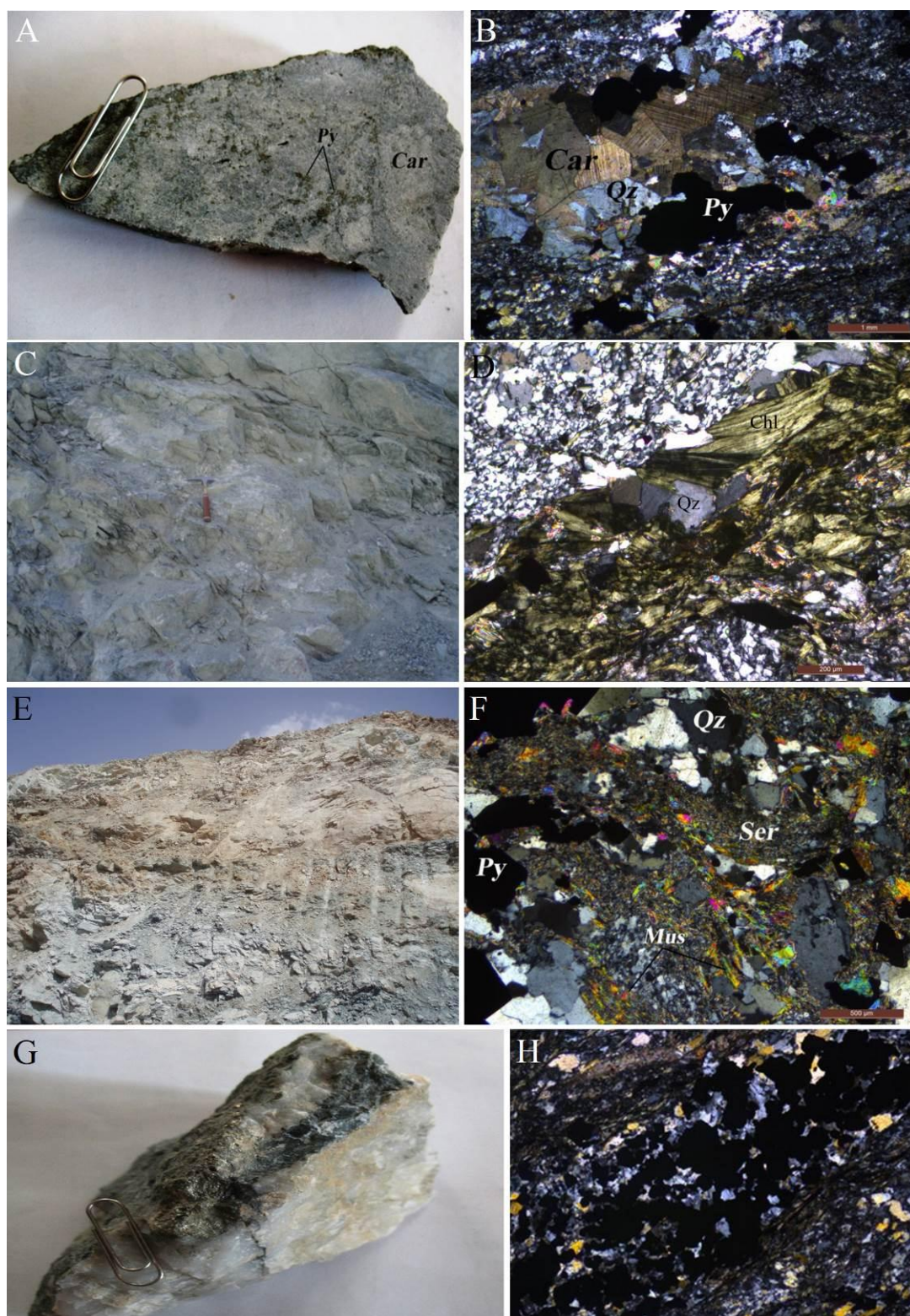
بخش رسوبی این سنگ‌ها از مواد پلیتی، آرژیلی، و ماسه‌ای و بخش ماگمایی از مواد انفجاری آذرآوری و همچنین، اپی‌کلاستیک‌ها و مواد پدیدآمده از فرسایش مواد آتشفشانی قدیمی هستند. برپایه بررسی‌های صحرایی، این واحد عموماً رنگ رخنمون خاکستری روشن دارد (شکل ۳-E) که در پی فراوانی کانی‌های میکایی، به ویژه مسکوویت، جلای ساتنی از خود نشان می‌دهد (شکل ۳-F).

### دگرسانی و کانه‌زایی

در منطقه بررسی‌شده، سنگ میزبان کانه‌زایی دچار درجه‌های گوناگون دگرسانی شده است و در بیشتر موارد، تا رخساره شیبست‌سبز دگرگون شده است. برپایه بررسی‌های صحرایی، این واحد با رنگ سبز تیره تا سبز مایل به خاکستری بیشترین گسترش را در منطقه به خود اختصاص داده است و بیشتر به صورت توف و گدازه‌های مافیک، به ندرت به شکل سیل و دایک دیده می‌شود. همچنین، در پی گسترش شدت دگرگونی ناحیه‌ای و



شکل ۴- A) نمایی از شیبست‌های سبز منطقه که بر گوارگی در آنها به خوبی دیده می‌شود؛ B) تصویر میکروسکوپی XPL از واحد شیبست سبز



شکل ۵- (A) تصویر نمونه دستی دگرسانی کربناتی؛ (B) تصویر میکروسکوپی XPL از دگرسانی کربناتی به‌همراه سیلیسی شدن و سولفیدی شدن؛ (C) نمایی از دگرسانی کلریتی؛ (D) تصویر میکروسکوپی XPL از دگرسانی کلریتی همراه با سیلیسی شدن؛ (E) دگرسانی آرژلیک در معدن سنجده با رنگ سفید به‌آسانی از دیگر بخش‌ها شناخته می‌شود؛ (F) ورقه‌های نازک سرسیت در زمینه سنگ که بیشتر به‌همراه بلورهای مسکوویت در راستای برگواگی جای گرفته‌اند؛ (G) نمونه دستی از رگچه کوارتزی پیریت‌دار؛ (H) تصویر میکروسکوپی XPL از رگه کوارتزی با کانه‌زایی پیریت



## روش انجام پژوهش

پس از بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، برای بررسی تغییرات عنصرهای اصلی، فرعی، کمیاب و طلا، شمار ۲۱ نمونه برای تجزیه به روش ICP-OES، ۱۷ نمونه برای تجزیه به روش ICP-MS و ۸ نمونه برای تجزیه به روش Fired Assay به مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی و SGS آنکارا فرستاده شدند. همچنین، از داده‌های زمین‌شیمیایی ۵۵ نمونه تجزیه‌شده در شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران (کرج)، به روش Fired Assay و ICP-AES نیز بهره گرفته شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها خردایش و پودر کردن در آزمایشگاه تهیه پودر دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی انجام شدند. زمین‌شیمی پهنه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان با تجزیه عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب نمونه‌های سنگی برگزیده (سنگ‌های آتشفشانی و دگرگونی) انجام شد.

در پردازش داده‌ها، مقادیرهای زیر آستانه آشکارسازی دستگاه که به صورت صفر و یا bdl گزارش شده بودند، ۱/۳ آستانه آشکارسازی کم در نظر گرفته شد. برای شناخت چگونگی حضور طلا و عناصر خاکی کمیاب در پهنه‌های کانه‌دار، پس از بررسی‌های کانه‌نگاری و شناسایی فازهای سولفیدی، شمار ۲۰ مقطع نازک-صیقلی و ۴ مقطع صیقلی برگزیده شدند و با دستگاه الکترون ریزکاو الکترونی (EPMA) در شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران (کرج) بررسی و تجزیه شدند.

## نتایج و بحث

توزیع طلا و عنصرهای همراه در

رخنمون‌های سنگی: برای بررسی فراوانی، توزیع و پراکنندگی طلا و عنصرهای همراه آن در پهنه‌های دگرسانی و کانه‌دار، از پهنه‌های کانه‌دار و دگرسان نمونه برداری سنگ‌زمین‌شیمیایی شد.

### همبستگی زمین‌شیمیایی طلا و عنصرهای

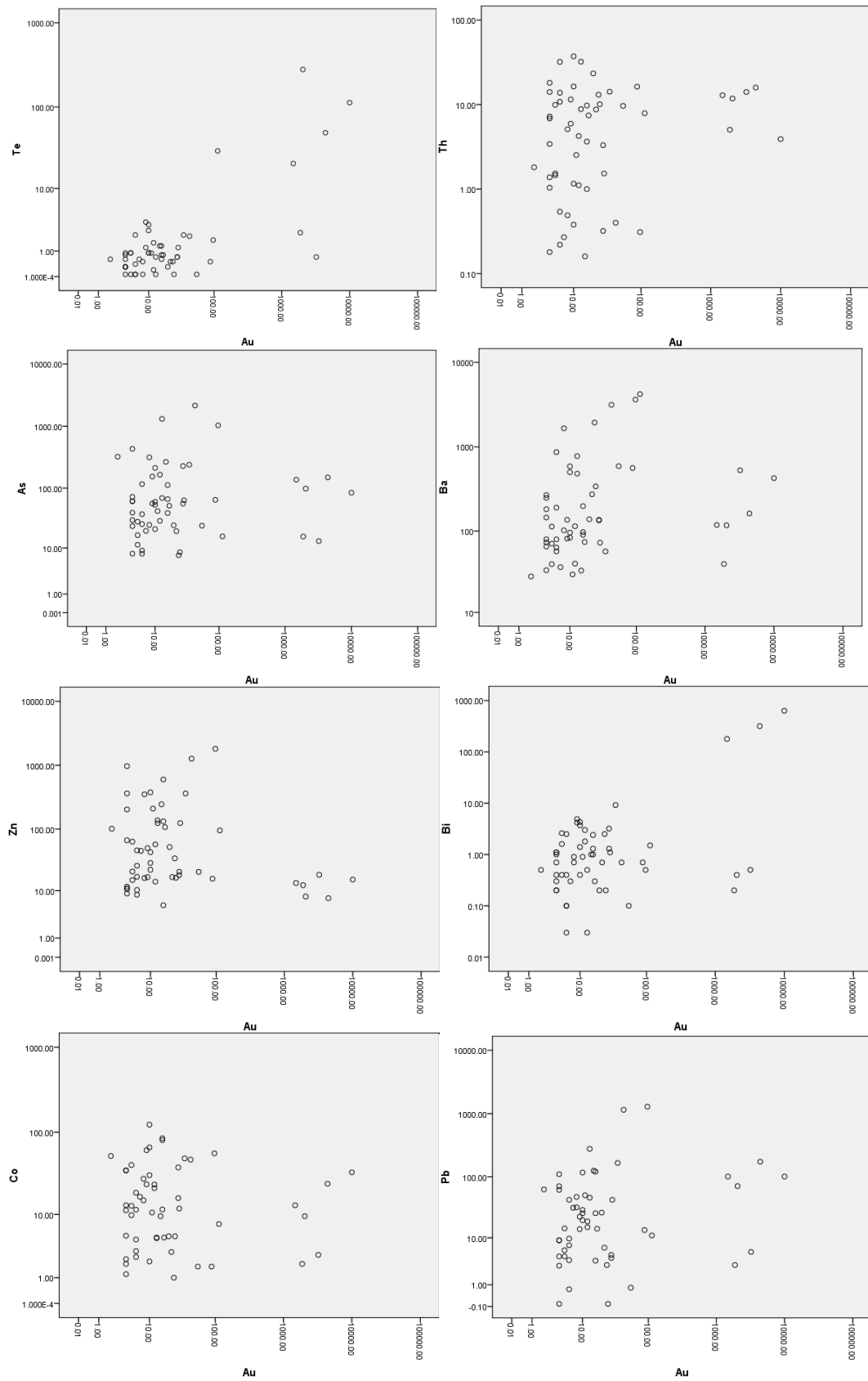
همراه: برای بررسی همبستگی طلا و عنصرهای همراه با آن، ضریب همبستگی برپایه روش اسپیرمن و رسم نمودارهای دومتغیره عنصرهای گوناگون در برابر طلا به کار برده شد (شکل ۶؛ جدول ۱). بر این پایه، طلا بیشترین همبستگی مثبت را با  $Ag$  ( $r=0.49$ ) و  $Te$  ( $r=0.44$ ) و به میزان کمتر با  $Ba$  ( $r=0.36$ )،  $Bi$  ( $r=0.22$ )،  $Pb$  ( $r=0.2$ )،  $Th$  ( $r=0.17$ )،  $Sr$  ( $r=0.17$ )،  $As$  ( $r=0.12$ ) و همچنین، طلا همبستگی ضعیفی با  $W$ ،  $K$ ،  $Fe$ ،  $U$  دارد. افزون‌براین، طلا با عنصرهای  $Cr$  ( $r=-0.39$ )،  $Mo$  ( $r=-0.16$ ) و  $Ni$  ( $r=-0.15$ ) همبستگی منفی و با عنصرهای  $Ti$  ( $r=-0.09$ )،  $Sc$  ( $r=-0.06$ )،  $Zn$  ( $r=-0.04$ )،  $Co$  ( $r=-0.02$ ) و  $Rb$  ( $r=-0.01$ ) همبستگی ضعیف منفی نشان می‌دهد. همبستگی مثبت نقره و تلوریم با حضور الکتروم و تلوریدهای طلا-نقره توجیه‌پذیر است. برخی پژوهشگران (مانند: Lang و همکاران، ۲۰۰۰؛ Silitoe و Thompson، ۱۹۹۸) همبستگی مثبت  $Bi$  و  $W$  با طلا در کانسارهای طلا را نشانه ارتباط قوی کانی‌سازی با گرانیتوئیدها و حتی ماگمایی بودن آن می‌دانند؛ اما برخی دیگر از پژوهشگران (مانند: Goldfarb و همکاران، ۱۹۹۹) غنی‌شدن این عنصرها را که در کانسارهای گوناگون با انواع

همبستگی منفی طلا با Zn در چاه‌باغ یاد کرده است، ایشان رفتار متفاوت Zn را پیامد تحرک آن هنگام دگرگونی و دگرسانی دانسته‌اند. همبستگی مثبت ضعیف Sr با طلا به دگرسانی پتاسیم‌فلدسپار سنگ دیواره مربوط است، چون این عنصر جانشین پتاسیم در کانی‌های پتاسیم‌دار می‌شود. همبستگی منفی Co، Cr و Ni با طلا نیز به سرشت اسیدی سنگ میزبان کانه‌زایی نسبت داده می‌شود.

سنگ میزبان و درجات گوناگون دگرگونی دیده می‌شوند، مستقل از ارتباط فضایی و زمانی آنها با گرانیوتوییدها می‌دانند. برپایه بررسی‌های Ciobanu و همکاران (۲۰۰۵) همراهی طلا با کالکوژنیدهای Pb و Bi در کانسارهای طلا معمول است و چه‌بسا دلیلی بر همبستگی مثبت Bi و Pb با طلا باشد. همبستگی طلا با مس نیز نشانه جایگیری طلا در ساختمان کالکوپیریت است. Kouhestani (۲۰۰۴) نیز از همبستگی مثبت طلا با Cu و Pb و

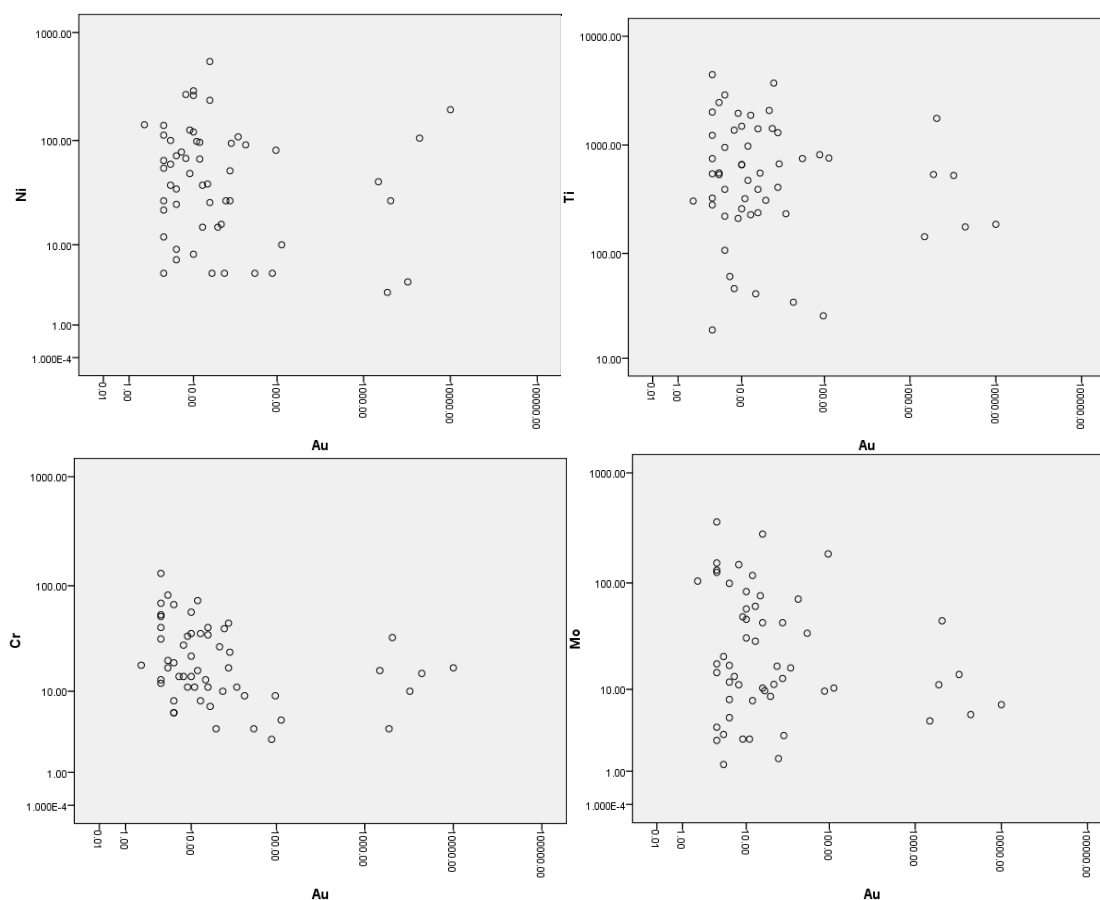
جدول ۱- ضریب‌های همبستگی طلا و عنصرهای همراه برپایه روش اسپرمن

	Au	Cr	Ni	Pb	Sr	Ba	Ti	Fe	Al	La	Sc	Ca	K	Na	Ag	As	Bi	Co	Cu	Mo	Sb	Zn	W	U	Te	Rb	Th
<b>Au</b>	1																										
<b>Cr</b>	-.391**	1																									
<b>Ni</b>	-0.152	0.238	1																								
<b>Pb</b>	0.168	-0.018	.589**	1																							
<b>Sr</b>	0.179	0.246	-0.229	0.109	1																						
<b>Ba</b>	.361**	-0.04	-0.229	0.06	.616**	1																					
<b>Ti</b>	-0.094	.508**	-.432**	-.405**	.475**	.284*	1																				
<b>Fe</b>	0.039	0.189	.737**	.512**	0.016	0.024	-.375**	1																			
<b>Al</b>	0.01	0.139	-.656**	-.392**	.468**	.341*	.822**	-.622**	1																		
<b>La</b>	0.203	0.084	-.308*	-0.137	.347**	.436**	.547**	-0.225	.545**	1																	
<b>Sc</b>	-0.063	.514**	-.276*	-0.224	.619**	.417**	.857**	-0.212	.739**	.614**	1																
<b>Ca</b>	0.107	0.013	-0.092	0.111	.609**	.527**	0.224	0.104	.329*	0.255	.445**	1															
<b>K</b>	0.029	0.106	-.506**	-.304*	.401**	.450**	.627**	-.467**	.791**	.451**	.576**	.322*	1														
<b>Na</b>	0.065	-0.072	-.647**	-.328*	.397**	0.208	.617**	-.630**	.892**	.424**	.492**	0.216	.684**	1													
<b>Ag</b>	.495**	-0.169	.363**	.456**	-0.089	0.008	-.388**	.400**	-.444**	-0.082	-.325*	-0.189	-.384**	-.391**	1												
<b>As</b>	0.129	0.195	.426**	.655**	0.138	0.121	-0.17	.445**	-.290*	-0.088	-0.041	0.082	-0.109	-.390**	.339*	1											
<b>Bi</b>	0.213	0.203	.485**	.283*	0.005	-0.043	-0.144	.659**	-.373**	0.012	-0.077	-0.131	-.378**	-.340*	.494**	.314*	1										
<b>Co</b>	-0.028	0.197	.904**	.541**	-0.195	-0.136	-.382**	.730**	-.599**	-0.178	-0.218	-0.107	-.494**	-.627**	.427**	.505**	.535**	1									
<b>Cu</b>	0.032	0.079	.684**	.486**	-0.131	-0.153	-.366**	.530**	-.544**	-.323*	-0.262	-0.209	-.529**	-.527**	.539**	.366**	.482**	.686**	1								
<b>Mo</b>	-0.163	0.153	0.206	0.153	0.108	0.161	-0.141	.383**	-.02	-0.207	-0.025	0.239	-0.055	-.338*	0.102	.420**	0.023	0.23	.313*	1							
<b>Sb</b>	0.02	.312*	.695**	.693**	0.057	0.026	-.321*	.659**	-.520**	-.271*	-0.15	0.052	-.413**	-.584**	.419**	.765**	.466**	.704**	.627**	.383**	1						
<b>Zn</b>	-0.042	0.041	.394**	.529**	0.084	0.093	-0.115	.290*	-0.193	-0.101	0.058	0.242	-0.146	-.286*	0.135	.459**	0.063	.397**	.439**	.294*	.438**	1					
<b>W</b>	0.002	0.178	-.423**	-0.256	.272*	0.214	.648**	-.493**	.654**	.284*	.493**	0.03	.601**	.560**	-0.222	0.017	-.377**	-.369**	-0.132	0.067	-.274*	-0.043	1				
<b>U</b>	0.075	0.171	.394**	.497**	.350**	.445**	-0.062	.426**	-0.126	0.164	0.206	.395**	-0.005	-0.229	0.25	.636**	0.147	.482**	.348**	.568**	.631**	.416**	0.094	1			
<b>Te</b>	.443**	-0.093	.317*	.409**	-0.036	-0.111	-.323*	.495**	-.395**	-0.201	-.370**	-.348**	-.405**	-0.208	.652**	0.262	.641**	.386**	.461**	0.03	.338*	-0.026	-0.193	0.102	1		
<b>Rb</b>	-0.013	0.166	-.453**	-0.262	.369**	.427**	.602**	-.451**	.768**	.413**	.572**	.372**	.958**	.631**	-.398**	-0.083	-.402**	-.448**	-.490**	-0.036	-.336*	-0.151	.608**	0.049	-.459**	1	
<b>Th</b>	0.179	-0.123	-.332*	0.003	.340*	.427**	.408**	-.306*	.660**	.641**	.465**	.329*	.629**	.680**	-0.229	-0.074	-0.149	-.289*	-.423**	-.281*	-.326*	-0.097	.414**	0.139	-0.191	.639**	1



شکل ۶- نمودارهای دومتغیره عنصرهای مختلف در برابر طلا (نکته: دو دسته‌بودن نمونه‌ها پیامد بالاتر بودن عیار طلا در نمونه‌های کانی‌سازی شده است)





شکل ۶- ادامه

بیشتر از نمونه‌های بدون کانه‌سازی است و این غنی‌شدگی در عناصر خاکی کمیاب سبک بیشتر دیده می‌شود. به باور Rolland و همکاران (۲۰۰۳)، در یک پهنه برشی، عنصرهای LREE در حاشیه، تهی‌شدگی و در مرکز غنی‌شدگی نشان می‌دهند. این تهی‌شدگی نشان‌دهنده شستشوی شدید و دگرسانی اپیدوتی است. در نمونه‌های بررسی شده، نمونه S637 نمونه‌ای است که کمترین فراوانی REE را دارد و در مقاطع نازک بررسی شده این سنگ اپیدوتی شدن به فراوانی دیده می‌شود.

غنی‌شدگی ضعیف از عناصر خاکی کمیاب سبک و تهی‌شدگی ضعیف از عناصر خاکی کمیاب سنگین در این نمونه‌ها همراه با منفی‌بودن نابهنجاری Eu در نمودار عنکبوتی آنها چه بسا

### زمین‌شیمی عناصر خاکی کمیاب

**توزیع و پراکندگی REE در واحدهای سنگی و پهنه‌های کانه‌دار:** در سیستم‌های گرمایی، عناصر خاکی کمیاب برای پی‌بردن به خاستگاه سیال‌های کانه‌ساز و فرایندهای برهم‌کنش سیال - سنگ به کار برده می‌شوند. معمولاً الگوی بهنجار شده عناصر خاکی کمیاب در برابر ترکیب کندریت بازتابی از ویژگی‌های خاستگاه و حتی تغییرات تمرکز REE است که هنگام هوازندگی فیزیکی و شیمیایی رخ داده است (Yang *et al.*, 2012). داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی عناصر خاکی کمیاب در واحدهای گوناگون سنگی منطقه و پهنه‌های کانه‌ساز در جدول ۲ آورده شده‌اند و ویژگی‌های آنها به تفکیک گفته می‌شوند. در کل، فراوانی عناصر خاکی کمیاب در نمونه‌های پهنه‌های کانه‌دار

نمونه S637 (که در پی اپیدوتی شدن بسیار، فراوانی REE و نیز درجه تفکیک کمتری دارد)، در دیگر نمونه‌ها غنی‌شدگی LREE در برابر HREE به خوبی دیده می‌شود. میانگین درجه تفکیک میان LREE یا  $(La/Sm)_n$  برابر با ۱/۵۶ و درجه تفکیک میان HREE یا  $(Gd/Yb)_n$  برابر با ۲/۵۵ است. از این رو، میزان تفکیک در HREEها بیشتر از LREE است. همچنین، آنومالی خاصی در Eu دیده نمی‌شود و  $\sigma Eu$  برابر با ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ است. چنین الگویی با ویژگی‌های REE در سنگ‌های مافیک همخوانی دارد (Vesali *et al.*, 2018; Song *et al.*, 1999; Malek-Mahmoudi *et al.*, 2017; Kouhestani, 2004). Kouhestani (۲۰۰۴) نیز چنین الگویی را برای دایک‌های متبازیت در چاه‌باغ پیشنهاد کرده است.

نشان‌دهنده نبود جدایش بلوری مناسب ماگما (کم‌بودن آب در ماگمای مادر) و وجود محیط احیایی باشد (Zarasvandi *et al.*, 2005).

**الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب در متبازیت‌ها:** الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب چهار نمونه از واحدهای متبازیت در اطراف کانسار سنجد در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود در بخش راست، نمودار شیب ملایمی دارد. همه نمونه‌ها کمابیش الگوی یکسانی دارند. میزان عناصر خاکی کمیاب نمونه‌ها برابر با ۴۲/۲۵ تا ۲۳۷/۵۴ ppm است؛ اما LREEها در برابر HREEها غنی‌شدگی نشان می‌دهند و  $(La/Yb)_n$  آنها برابر با ۱/۳۴ تا ۶/۷ است. درجه تفکیک LREE یا  $(La/Sm)_n$  برابر با ۱/۳۴ تا ۶/۷۴ است. همان گونه که در نمودار نیز دیده می‌شود، مگر

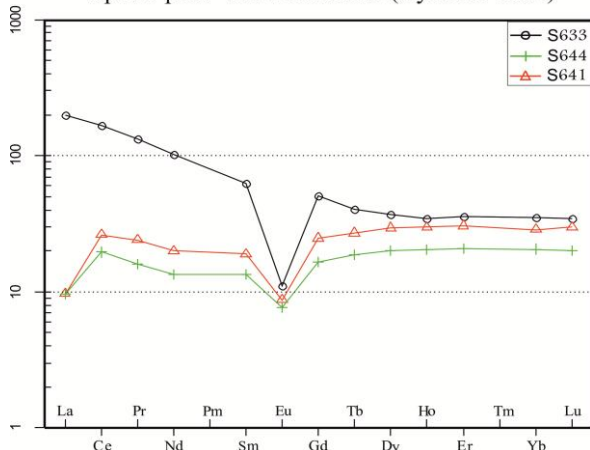
جدول ۲- داده‌های زمین‌شیمیایی عناصر خاکی کمیاب در واحدهای گوناگون سنگی منطقه سنجد (ایران مرکزی) و پهنه‌های کانه‌ساز (برای بهنجارسازی داده‌ها از داده‌های پیشنهادی Boynton (۱۹۸۴) برای ترکیب عناصر خاکی کمیاب در کندریت بهره گرفته شد)

Code lab	Sample no	Rock	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	$\Sigma REE$	LREE/HREE	L/H (La/Yb) <sub>n</sub>	(La/Sm) <sub>n</sub>	(Gd/Yb) <sub>n</sub>	$\sigma Eu$	Ce (Sm/Eu) <sub>n</sub>					
S629	SN-09	شیت سبز (M)	31	79.9	10.4	41.8	10.2	1.62	9.97	1.46	8.85	1.83	5.5	5.6	0.88	39.7	209.01	174.92	34.09	5.1311	3.73	1.9117	1.4366	0.4911	1.071	2.3732	
S630	SN-10	شیت سبز (M)	19	54.4	7.58	33.7	8.5	2.21	10.4	1.52	9.07	1.85	0.7	4.5	0.71	39.6	158.46	125.39	33.07	3.7916	2.847	1.406	1.8649	0.7186	1.091	1.4497	
S631	SN-13	شیت سبز (M)	59	147	19.3	77.6	15.8	2.55	15.3	2.14	12.7	2.6	7.9	7.8	1.25	56.3	370.94	321.25	49.69	6.465	5.1	2.3489	1.5828	0.5014	1.048	2.3354	
S632	SN-14	شیت سبز (M)	99	282	30.4	108	27	5.29	22.7	2.31	10.7	1.89	5.79	5.6	0.89	40.7	601.57	551.69	49.88	11.06	11.92	2.3064	3.271	0.6533	1.237	1.9238	
S633	SN-25	گرانیت مونه	62	135	16.3	61.3	12.3	0.82	13.2	1.91	11.9	2.46	7.48	7.4	1.12	58.8	333.19	287.72	45.47	6.3276	5.649	3.1707	1.4394	0.1967	1.022	5.6538	
S634	SN-03	شیت سبز (M)	28	71.3	10.1	45.9	12.2	3.12	20.1	3.06	19.5	4.28	11.8	8.9	1.34	100	239.6	170.62	68.98	2.4734	2.121	1.4436	1.8224	0.6091	1.02	1.4738	
S635	SN-07-2	شیت سبز (M)	24	57	7.4	32	7.6	1.83	9.79	1.61	10.4	2.19	6.42	6.4	1.50	3	167.64	129.83	37.81	3.4337	2.528	1.9864	1.2343	0.6486	1.029	1.5653	
S636	SN-08	شیت سبز (M)	30	80.6	11.1	49.2	12.6	3.16	14.5	2.13	12.7	2.49	6.9	5.9	0.86	55.3	232.14	186.66	45.48	4.1042	3.428	1.4976	1.9831	0.7148	1.063	1.5029	
S637	SN-22-2	متبازیت	3	15.6	2.08	9.6	2.6	0.95	3.25	0.53	3.36	0.68	1.88	1.5	0.22	13.3	45.25	33.83	11.42	2.9623	1.348	0.7258	1.7483	0.9992	1.503	1.0315	
S638	SN-23-2	شیت سبز (M)	18	54.2	9.52	46	9.9	1.58	8.75	1.47	10.4	2.39	7.78	8.2	1.3	55.8	179.49	139.2	40.29	3.455	1.48	1.1436	0.861	0.519	0.997	2.3617	
S639	SN-24-2	متبازیت	35	87.2	12.5	27.4	11.6	3.81	12.9	1.73	9.57	1.83	4.91	3.7	0.59	35.6	237.54	202.31	35.23	5.7425	6.378	1.8979	2.8134	0.9523	1.024	1.1475	
S640	SN-002	متبازیت	19	47.4	6.29	27	6.3	2.23	6.66	0.89	4.83	0.88	2.32	1.9	0.34	16.7	126.04	108.22	17.82	6.0729	6.742	1.897	2.8285	1.0526	1.044	1.0648	
S641	SN-004	متابولیت	3	21.2	2.94	12	3.7	0.64	6.44	1.28	9.54	2.15	6.44	6	0.96	48.9	76.29	43.48	32.81	1.3252	0.337	0.51	0.8661	0.4008	1.718	2.179	
S642	SN-0010	شیت سبز (M)	37	93	12.5	53.7	12.8	3	14	2.03	12.4	2.56	7.68	7	1.1	52.5	258.77	212	46.77	4.5328	3.564	1.8182	1.6138	0.6852	1.041	1.6082	
S643	SN-0013	متبازیت	19	46.2	6.24	27.4	6.8	2.44	8.01	1.13	6.48	1.23	0.7	2.3	0.34	24.3	130.61	108.08	22.53	4.7971	5.569	1.7575	2.8102	1.0108	1.021	1.0504	
S644	SN-0015	متابولیت	3	15.8	1.95	8	2.6	0.56	4.29	0.89	6.43	1.47	4.36	4.3	0.65	33.1	54.3	31.91	22.39	1.4251	0.47	0.7258	0.805	0.5126	1.572	1.75	
S645	SN-0020	شیت سبز	30	84	11.6	50.3	12.4	2.9	14.5	2.16	13.4	2.73	7.58	6.4	1.04	56.7	239.01	191.2	47.81	3.9991	3.16	1.5218	1.8282	0.6612	1.084	1.6116	
CI Chondorite			0.31	0.808	0.122	0.6	0.195	0.0735	0.259	0.0474	0.32	0.0718	0.21	0.21	0.032												

کافی سازی شده: M:

تبلور ماگماست و نشان دهندهٔ احیایی بودن ماگماست (Li et al., 2015; Bineli Betsia et al., 2018). همچنین، عناصر خاکی کمیاب در الگوی سنگ‌های آذرین (به‌ویژه ماگماهای فلسیک) معمولاً بی‌هنجاری منفی یوروپیم نشان می‌دهند. رفتار یوروپیم در حالت دو ظرفیتی بسیار به یون کلسیم شباهت دارد و جانشین کلسیم در پلاژیوکلازهای کلسیک می‌شود و همراه آنها از سیستم ماگمایی خارج می‌شود؛ اما دیگر یون‌های این گروه ناسازگار هستند و وارد شبکه کانی‌های سنگ‌ساز نمی‌شوند و در روند جدایش بلورین ماگما، در مذاب بجامانده غنی می‌شوند (عناصر خاکی کمیاب سبک ناسازگارتر از گروه سنگین هستند و در مذاب بجامانده افزایش چشمگیری دارند). عنصرهای HREE کمابیش الگوی تختی را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که درجه تفکیک HREE و میانگین نسبت  $(Gd/Yb)_n$  در این دو نمونه برابر با ۰/۸۳ است.

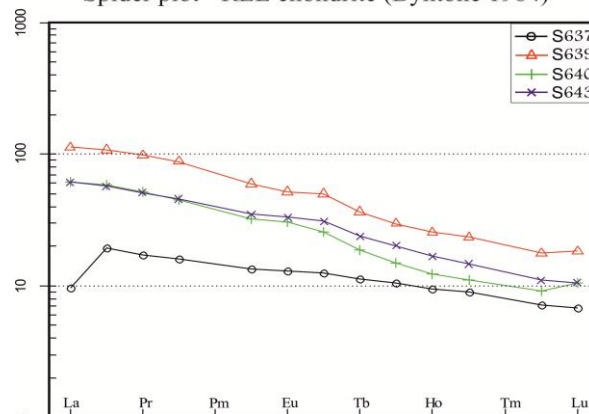
Spider plot - REE chondrite (Byntone 1984)



شکل ۸- الگوی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت در متاریولیت منطقهٔ سنجده

**الگوی عناصر خاکی کمیاب در پهنه‌های کانه‌دار:** این الگو کمابیش همانند الگوی متاریولیت بدون کانی‌سازی است؛ اما این نمونه‌ها

Spider plot - REE chondrite (Byntone 1984)



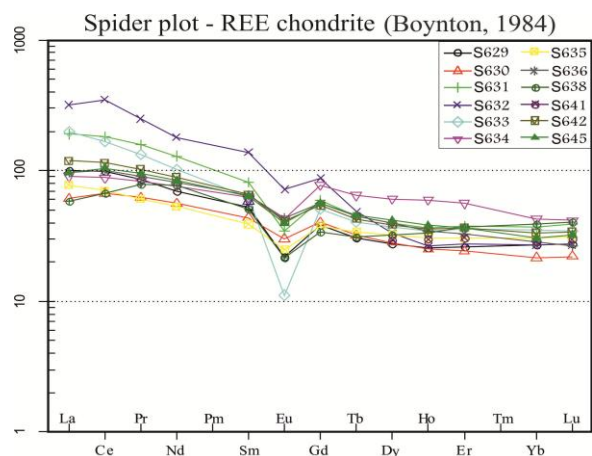
شکل ۷- الگوی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت در نمونه‌های متابازیت منطقهٔ سنجده

**الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب در متاریولیت کوه سیاه:** در شکل ۸ الگوی رفتاری REE در دو نمونه از متاریولیت‌های منطقه که سنگ میزبان کانسار سنجده شمرده می‌شوند و یک نمونه از گرانیت موته (نمونهٔ S633) نشان داده شده است. اگرچه الگوی این دو نمونه تا اندازه‌ای همانند الگوی گرانیت موته است، اما میزان عناصر خاکی کمیاب نمونه‌های متاریولیت از گرانیت موته کمتر است؛ زیرا سنگ‌های آذرین درونی نسبت به هم‌ارز بیرونی خود از LREE غنی‌تر هستند. همچنین، الگوی عناصر خاکی کمیاب که به ترکیب کندریت بهنجار شده است، نشان‌دهندهٔ الگوی تخت برای عناصر خاکی کمیاب سنگین است. این ویژگی با سرشت فلسیک آنها رابطه دارد. تهی‌شدگی از La نیز پیامد شستشوی شدید هنگام دگرسانی دانسته می‌شود (Palacios et al., 1986). در این نمونه‌ها، Eu آنومالی منفی شدید و Ce آنومالی مثبت اندکی نشان می‌دهند. آنومالی منفی Eu نشان‌دهندهٔ تجزیهٔ پلاژیوکلازها (که سرشار از Eu هستند؛ افزون‌بر دگرسانی فلیک) و بجاماندن پلاژیوکلاز در ماگمای خاستگاه و یا جدایش آنها هنگام



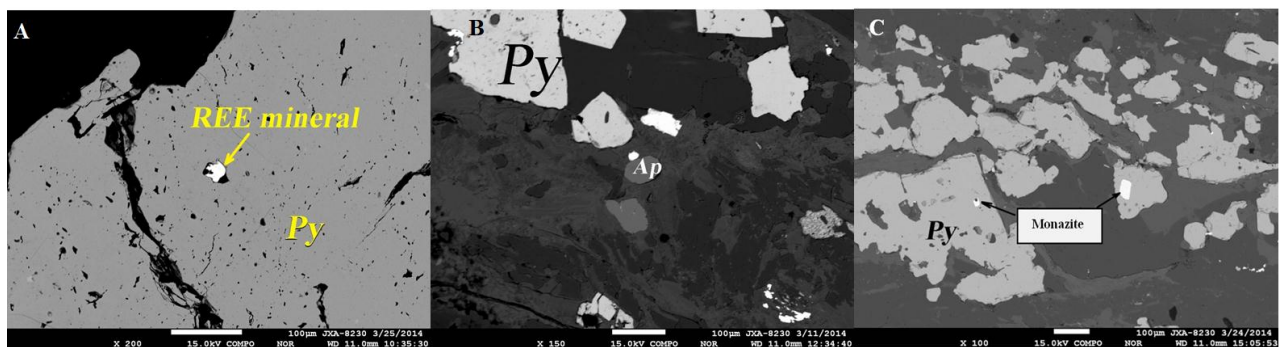
و زمانی دگرسانی گرمایی با دگرریختی و کانه‌زایی را نشان می‌دهند. آب‌زدایی و خروج سیال‌ها و مواد فرار، توسعه برگوارگی، چین‌خوردگی و بهم‌ریختگی واحدهای سنگی پیامد فرایندهای دگرگونی ناحیه‌ای هستند. غنی‌شدگی از LREE در نمونه‌های با کانه‌زایی طلا (نمونه‌های سولفیدی و سیلیسی) نشان‌دهنده تأثیر سیال‌های گرمایی سرشار از گوگرد و سیلیس در تجمع عنصرهای فرار و متحرک (LREE) هنگام دگرگونی است. آنومالی منفی Eu که در همه نمونه‌ها دیده می‌شود نشان‌دهنده محیط احيایی است و میزان آن برابر با ۰/۴۹ تا ۰/۷۱ است. همچنین، تفکیک روشنی میان LREE و HREE دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که میزان  $(La/Yb)_n$  برابر با ۲/۱۲ تا ۱۱/۹۱ است و این پدیده نشان می‌دهد سیال‌های کانه‌ساز از LREE غنی شده‌اند (Giritharan and Rajamani, 2001). همچنین، در بررسی‌های میکروسکوپی و در تصویرهای BSE کانی‌های REE دار (مانند: آپاتیت، اسفن، روتیل، زینوتایم و مونازیت) دیده می‌شوند و این نکته نشان‌دهنده غنی‌شدگی این نمونه‌ها از عناصر خاکی کمیاب هاست (شکل‌های A-۱۰ تا C-۱۰).

نسبت به متاریولیت بدون کانی‌سازی، فراوانی REE بیشتری دارند (شکل ۹)؛ به‌گونه‌ای که میزان عناصر خاکی کمیاب در این نمونه‌ها برابر با ۱۵۸/۴۶ تا ۶۰۱/۵۷ ppm است. فراوانی بالای REE در این نمونه‌ها چه‌بسا پیامد دگرسانی سیلیسی و سولفیدی است که در نمونه‌ها دیده می‌شود.



شکل ۹- الگوی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده در برابر ترکیب کندریت (Boynton, 1984) در پهنه‌های کانه‌دار و دگرسان منطقه سنجد

بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی ارتباط مکانی

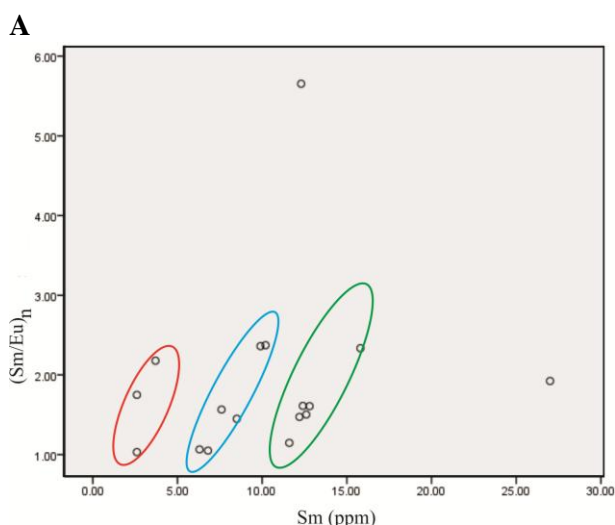


شکل ۱۰- تصویرهای BSE کانی‌های REE دار در نمونه‌های کانه‌دار و دگرسان منطقه سنجد. (A) آپاتیت (Ap)؛ (B) کانی با فراوانی بالای REE به‌صورت میانبار در کانی پیریت که نوع آن به‌صورت دقیق شناسایی نشده است؛ (C) مونازیت

سنگ‌ها، نمودار Sm در برابر  $(Sm/Eu)_n$  رسم شد (پراکندگی داده‌ها در راستای یک خط مستقیم

برای بررسی ارتباط میان سنگ‌های گوناگون و همچنین، پی‌بردن به خاستگاه سیال در این

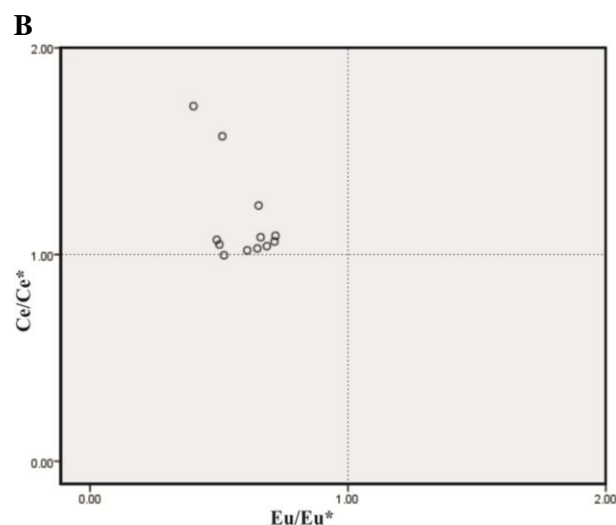
چاه‌خاتون، سنجده، دره‌اشکی، و قروم‌قروم را از دیدگاه خاستگاه به سه دسته متامفیک‌ها، متاپلیت‌ها، و سومین دسته متاریولیت و گرانیت‌ها دسته‌بندی کرده است. گمان می‌رود چنین دسته‌بندی در ارتباط با نمونه‌های اختصاصی سنجده نیز کاربردی است (شکل ۱۱- A).



شکل ۱۱- A) نمودار Sm در برابر  $(Sm/Eu)_n$  (محدوده سبز: گرانیت و متاریولیت؛ آبی: متاپلیت؛ سرخ: متابازیت)؛ B) نمودار  $Eu/Eu^*$  در برابر  $Ce/Ce^*$  (Liu et al., 2013)

یک نشان‌دهنده آنومالی منفی هستند). همان‌گونه که گفته شد در میان عناصر خاکی کمیاب، Ce و Eu که دو ظرفیت متفاوت دارند، به خوبی شرایط محیط را نشان می‌دهند. برپایه شکل ۱۱- B و جدول ۲، همه نمونه‌های بررسی شده در پهنه‌های کانه‌دار و با دگرسانی شدید، آنومالی منفی Eu و آنومالی مثبت Ce نشان می‌دهند. در سیال‌های گرمابی، سازگاری  $Eu^{2+}$  از  $Eu^{3+}$  کمتر است (Liu et al., 2013). همچنین، آنومالی منفی Eu نشان‌دهنده محیط احيایی است. درکل، الگوی عناصر خاکی کمیاب در نمونه‌های

نشان‌دهنده خاستگاه مشترک است). همان‌گونه که در شکل ۱۱- A نشان داده شده است، ارتباط پراکنده‌ای میان همه نمونه‌ها دیده می‌شود؛ اما برپایه این نمودار سه دسته نمونه در نمودار شناسایی شدند. Abdollahi (۲۰۰۹) نیز با بررسی داده‌های به‌دست‌آمده از عناصر خاکی کمیاب و نمودارهای عنکبوتی، سنگ معدن‌های



بیشتر REE‌ها در بیشتر محیط‌های زمین‌شناسی ظرفیت ۳+ دارند؛ هرچند در برخی محیط‌ها Ce ظرفیت ۴+ و Eu ظرفیت ۲+ نیز نشان می‌دهند که پیدایش آنومالی Ce و Eu را به‌دنبال دارد. به‌همین‌رو، نسبت  $Ce^{3+}/Ce^{4+}$  و  $Eu^{2+}/Eu^{3+}$  در یک سیال و یا ماگما از شرایط اکسیداسیون-احیا و یا درجه حرارت پیروی می‌کند (Linnen et al., 2014). ازاین‌رو، برای پی‌بردن به ویژگی‌های سیال گرمابی، مقدار  $Eu/Eu^*(\sigma Eu)$  و  $Ce/Ce^*(\sigma Ce)$  به‌دست آورده و بررسی می‌شود (مقدارهای بیشتر از یک نشان‌دهنده آنومالی مثبت و مقدارهای کمتر از

به روش اسپیرمن به دست آورده شدند (جدول ۳). برپایه این داده‌ها، طلا با عناصر خاکی کمیاب سبک همبستگی مثبت و با عناصر خاکی کمیاب سنگین همبستگی منفی نشان می‌دهد. غنی‌شدگی از LREE در نمونه‌هایی با کانه‌زایی طلا (نمونه‌های سولفیدی، سیلیسی و کربناتی هم‌رند برگوارگی) نشان دهنده تأثیر سیال‌های گرمابی سرشار از گوگرد، سیلیس و CO<sub>2</sub> هم‌زمان با زمین‌ساخت فعال منطقه، در تجمع عنصرهای فرار و متحرک (LREE) است. همبستگی منفی میان طلا و عنصرهای HREE چه بسا پیامد تأثیر سیال‌های فلوردار است که شستشو و حمل این عنصرها را به دنبال داشته‌اند (Gramaccioli *et al.*, 1999).

پهنه‌های کانه‌دار نسبت به پهنه‌های فاقد کانی‌سازی، محتوای REE بالاتری دارند. این ویژگی چه بسا نشان دهنده غنی‌شدگی سیال‌های کانه‌ساز از عناصر خاکی کمیاب است. همچنین، برپایه تصویرهای BSE، یکی دیگر از علت‌های غنی‌شدگی REE در این پهنه‌ها، حضور کانی‌هایی مانند آپاتیت، مونازیت و روتیل است که مقدار آنها در مقایسه با نمونه‌های بدون کانی‌سازی چشمگیر است.

**ارتباط و همبستگی عناصر خاکی کمیاب و طلا:** از مهم‌ترین موارد کاربردی عناصر خاکی کمیاب در بررسی کانسارها، شناخت ارتباط و همبستگی این عنصرها با عنصر یا عنصرهای کانسارساز است. از این‌رو، برای شناخت ارتباط و همبستگی عناصر خاکی کمیاب با طلا، ضریب‌های همبستگی برای عناصر خاکی کمیاب

جدول ۳- ضریب‌های همبستگی برای عناصر خاکی کمیاب برپایه روش اسپیرمن

	Au	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Y	Lu
Au	1													
La	0.209	1												
Ce	0.121	0.988	1											
Pr	0.121	0.891	0.904	1										
Nd	0.121	0.891	0.904		1									
Sm	0.219	0.819	0.809	0.904	0.904	1								
Eu	0.390	0.963	0.952	0.904	0.904	0.857	1							
Gd	0.269	0.896	0.898	0.850	0.850	0.922	0.922	1						
Tb	0.073	0.915	0.928	0.833	0.833	0.880	0.880	0.970	1					
Dy	-0.319	0.618	0.646	0.646	0.646	0.790	0.538	0.722	0.814	1				
Ho	-0.365	0.433	0.476	0.523	0.523	0.714	0.380	0.610	0.690	0.970	1			
Er	-0.439	0.084	0.142	0.333	0.333	0.523	0.095	0.323	0.357	0.766	0.880	1		
Y	-0.760	-0.163	-0.095	-0.023	-0.023	0.119	-0.239	-0.006	0.107	0.596	0.706	0.850	1	
Lu	-0.756	-0.144	-0.071	0.023	0.023	0.166	-0.214	0.035	0.142	0.622	0.738	0.880	0.994	1

## نتیجه‌گیری

کانه‌سازی طلا است و در بخش‌های کانی‌سازی شده در حد رخساره شیب‌سبز

در کانسار سنجده، گنبد متاریولیتی میزبان



سیال‌های پدیدآمده سرشار از  $\text{CO}_2$ ،  $\text{H}_2\text{O}$  و S در مسیر گرا دیان فشاری در ستون دگرگونی به‌سوی بالا جایجا شده‌اند و در مسیر خود طلا را از واحدهای آتشفشانی- رسوبی مسیر شسته‌اند و به‌صورت کمپلکس بی‌سولفیدی و لنزهای سولفیدی و رگه‌های کوارتزی سرشار از سولفید ته‌نشست کرده‌اند. غنی‌شدگی LREE در نمونه‌های سولفیدی و سیلیسی شده نیز نشانه تحرک دوباره این عنصرها هنگام دگرریختی با سیال احیایی سرشار از گوگرد، سیلیس و  $\text{CO}_2$  است.

همبستگی مثبت طلا با Bi و W و همبستگی منفی آن با Co, Cr و Ni نشان‌دهنده سرشت اسیدی سنگ میزبان کانه زایی و ارتباط قوی کانی‌سازی با گرانیوتیپیدهاست. همبستگی منفی میان طلا و عنصرهای HREE چه‌بسا پیامد تأثیر سیال‌های فلوردار باشد که شستشو و حمل این عنصرها را در پی داشته‌اند. همچنین، غنی‌شدگی اندک در عناصر خاکی کمیاب سبک و تهی‌شدگی اندک در عناصر خاکی کمیاب سنگین در پهنه‌های کانه‌دار همراه با منفی‌بودن نابهنجاری Eu در نمودار عنکبوتی آنها چه بسا نشانه تجزیه پلاژیوکلازها و یا بجا ماندن پلاژیوکلاز در ماگمای خاستگاه و یا جدایش آنها هنگام تبلور ماگما و نشان‌دهنده احیایی بودن ماگماست. در کل، الگوی عناصر خاکی کمیاب در نمونه‌های پهنه‌های کانه‌دار نسبت به پهنه‌های فاقد کانی‌سازی فراوانی بیشتری دارند و این ویژگی شاید نشان‌دهنده غنی‌شدگی سیال‌های کانه‌ساز از عناصر خاکی کمیاب باشد.

دگرگون شده است. بررسی‌های ساختاری انجام‌شده در منطقه موه نشان‌دهنده پیدایش آن در پی چندین مرحله دگرریختی است که چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی منطقه را نیز به دنبال داشته است.

مقایسه الگوی REEها در پهنه‌های کانه‌دار و فاقد کانی‌سازی نشان می‌دهد الگوی عناصر خاکی کمیاب در متابازیت‌ها شیب ملایمی به‌سوی راست دارد و درجه تفکیک  $\text{HREE} > \text{LREE}$  است. در این الگو آنومالی منفی یوروپیم دیده نمی‌شود و این ویژگی با سرشت مافیک آنها همخوانی دارد. در متاریولیت‌ها، HREEها الگویی تخت به‌همراه آنومالی منفی یوروپیم نشان می‌دهند و این ویژگی با سرشت فلسیک آنها در ارتباط است. الگوی عناصر خاکی کمیاب در پهنه‌های کانه‌دار کمابیش همانند متاریولیت بدون کانه‌سازی است؛ اما این نمونه‌ها نسبت به متاریولیت بدون کانی‌سازی، فراوانی REE بیشتری دارند. آنومالی منفی Eu در همه نمونه‌ها دیده می‌شود و نشان‌دهنده محیط احیایی است. همچنین، تفکیک روشنی میان LREE و HREE دیده می‌شود که نشان می‌دهد سیال‌های کانه‌ساز از LREE سرشار شده‌اند. کانه‌زایی طلا به‌صورت همراه با فاز سولفیدی درون رگه‌های کوارتزی هم‌روند با برگوارگی و نشان‌دهنده ته‌نشست همزمان کوارتز و سولفیدها)  $\pm$  طلا ( طی یک رخداد گرمایی یکسان است. شاید آب‌زدایی و خروج سیال‌ها و مواد فرار، گسترش برگوارگی، چین‌خوردگی و بهم‌ریختگی واحدهای سنگی پیامد فرایندهای دگرگونی ناحیه‌ای باشند. این

## منابع

- Abdelnasser, A., Kumral, M., Zoheir, B., Karaman, M. and Weihed, P. (2018) REE geochemical characteristics and satellite- based mapping of hydrothermal alteration in Atud gold deposit, Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 145: 317- 330.
- Abdollahi M. J., Karimpour, M. H. and Kheradmand, A. (2009) Stable Isotopes (O, H and S) in the Muteh Gold Deposit. *Iranian Society of Crystallography and Mineralogy* 17 (1): 3-16 (in Persian).
- Alderton, D., Pearce, J. and Potts, P. (1980) Rare earth element mobility during granite alteration: Evidence from southwest England. *Earth and Planetary Science Letters* 49: 149-165.
- Aliyari, F., Rastad, E. and Mohajel, M. (2012) Gold Deposits in the Sanandaj–Sirjan Zone: Orogenic Gold Deposits or Intrusion- Related Gold Systems? *Resource Geology* 62: 296–315.
- Badrzadeh, Z. (2019) Geochemistry and petrogenesis of Mata Lower Jurassic basaltic rocks (Southeast Kerman): Implication to Southern Sanandaj- Sirjan Zone evolution. *Iranian Journal of Petrology* 36: 154- 170 (in Persian).
- Bineli Betsia, T., Ponceb, M. and Chiaradiac, M. (2018) Petrogenesis of the Rio Blanco epithermal Au- Ag mineralization in the Cordillera Occidental of southwestern Ecuador: Assessment from host rocks petrochemistry and ore constituents isotopic (O, S, H, and Pb) compositions. *Journal of South American Earth Sciences* 86: 70–93.
- Ciobanu, C. L., Cook, N. J. and Pring, A. (2005) Bismuth tellurides as gold scavengers. In: *Mineral Deposit Research* (Eds. Mao, J. W., Mao, F. P.) 1383–1386. Meeting the Global Challenge. Springer, Berlin–Heidelberg, New York, US.
- Daux, V., Crovisier J. L., Hemmond, C. and Petit J. C. (1994) Geochemical evolution of basalt rocks subjected to weathering: Fate of the major elements, rare earth elements and thorium. *Geochimica Cosmochim. Acta* 58: 4941- 4954.
- Giritharan, T. S. and Rajamani, V. (2001) REE geochemistry of ore zones in the Archean auriferous schist belts of the eastern Dharwar Craton, south India. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Earth and Planetary Sciences* 110: 143- 159.
- Goldfarb, R. J., Hart, G., Miller, M., Miller, L., Farmer, G. L. and Groves, D. I. (1999) The Tintina gold belt- a global perspective. *British Columbia and Yukon Chamber of Mines* 2: 5- 34.
- Gramaccioli, C. M., Diella, V. and Demartin, F. (1999) The role of fluoride complexes in REE geochemistry and the importance of 4f electrons: Some examples in minerals, *European Journal of Mineralogy* 11(6): 983- 992.
- Kouhestani, H. (2004) *Geology, Mineralogy, Geochemistry and Fabrication of Gold Mineralization in Shear Zone of Chah-Bagh Region in Muteh Mineral Area*, (Southwest of Delijan, Isfahan Province). M.Sc. thesis, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Iran (in Persian).
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Chang, Z. and Zaw, K. (2015) Constraints on the ore fluids in the Chah Zard breccia- hosted epithermal Au–Ag deposit, Iran: Fluid inclusions and stable isotope studies. *Ore Geology Reviews* 65(2): 512- 521.

- Kouhestani, H., Rashidnejad-Omran, N., Rastad, E., Mohajjel, M., Goldfarb, R. J. and Ghaderi, M. (2014) Orogenic gold mineralization at the Chah Bagh deposit, Muteh gold district, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 91: 89–106.
- Lang, J. R., Baker, T., Hart, C. J. R. and Mortensen, J. K. (2000). An exploration model for intrusion related gold systems. *SEG News letter* 40: 6- 15.
- Li, B., Zhi, Y., Zhang, L., Ding, Q., Xu, Q., Zhang, Y., Qian, Y., Wang, G., Peng, B. and Ao, C. (2015) U–Pb dating, geochemistry, and Sr–Nd isotopic composition of a granodiorite porphyry from the Jiadanggen Cu– (Mo) deposit in the Eastern Kunlun metallogenic belt, Qinghai Province, China. *Ore Geology Reviews* 67: 1–10.
- Linnen, R. L., Samson, I. M., Williams-Jones, A. E. and Chakhmouradian A. R. (2014) Geochemistry of the Rare- Earth Element, Nb, Ta, Hf, and Zr Deposits. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, from *Treatise on Geochemistry* (Second Edition) 13: 543- 568.
- Liu, C., Liu, J., Wang, J., Yang, L., Wu, J. and Jia, L. (2013) Geochemical characteristics of rare earth elements and their implications for the Huachanggou gold deposit in Shaanxi Province, China. *Journal of Rare Earths* 31: 215- 226.
- Malek-Mahmoudi, F., Davoudian, A. R., Shabaniyan, N., Azizi, H. and Dong, Y. (2017) Geochemistry of metabasites from the North Shahrekord metamorphic complex, Sanandaj-Sirjan Zone: Geodynamic implications for the Pan- African basement in Iran. *Precambrian Research* 293: 56- 72.
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E. and Shahabifar, M. (2012) Ore mineralogy and fluid inclusions constraints on genesis of the Muteh gold deposit (western Iran). *Geopersia* 2: 67- 90.
- Morgan, B., Rate, A. W., Burton, E. D. and Smirk, M. N. (2012) Enrichment and fractionation of rare earth elements in FeS- and organic- rich estuarine sediments receiving acid sulfate soil drainage. *Chemical Geology* 60: 308- 309.
- Moritz, R., Ghazban, F. (1996) Geological and fluid inclusion studies in the Muteh gold district, Sanandaj- Sirjan zone, Esfahan Province, Iran, *Schweiz Mineral. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 76: 85- 89.
- Palacios, C. M., Hein, U. and Dulski, P. (1986) Behaviour of rare earth elements during hydrothermal alteration at the Buena Esperanza copper- silver deposit, northern Chile. *Earth and Planetary Science Letters* 80: 208- 216.
- 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.
- Samani, B. A. (1988) Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research* 39: 85– 106.
- Silitoe, R. and Thompson, J. F. H. (1998) Intrusion–Related Vein Gold Deposits: Types, Tectono- Magmatic Settings and Difficulties of Distinction from Orogenic Gold Deposits. *Resource Geology* 4 (4): 237 – 25.
- Song, X., Guo, Y., Xu, Q. and Xu, J. (1999) Geology and REE geochemistry of the Besshi- type Cu- Zn deposit at Faziba, SE Gansu, NW China. In: *Mineral deposits: Processes to processing* (Eds., Stanley et al.) 593-596. Balkema, Rotterdam.

- Vesali, Y., Esmaceli, D., Sepidbar, F., Sheibi, M. and Niroomand, S. (2018) Petrology, geochemistry and tectonic setting of alkaline mafic rocks in the Jalal Abad area in the NW of Zarand (Kerman Province): Evidence for Paleo-Tethys rifting in the Central Iran. *Iranian Journal of Petrology* 33: 1- 20 (in Persian).
- Wood, S. A. (1990) The aqueous geochemistry of the rare- earth elements and yttrium: Review of available low- temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of natural waters. *Chemical Geology* 82: 159- 186.
- Yang, X., Liu, J., Zhai, D., Han, S., Wang, H., Yang, L. and Huo, D. (2012) Geochemistry of the Yangla volcanic rocks and its relationship to Cu mineralization in the Yangla copper deposit, western Yunnan, China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 243-244: 38-44.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and Zentilli, M. (2005) Geology of Darreh- Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, central Iran. *International Geology Reviews* 47: 620- 646.