Study of the intrusive body associated with Gowdal skarn (North of Ahar) and its comparison with other skarn granitoids

Bahaedin Nakhjavani, Ali Asghar Calagari, Seyed Ghafour Alavi* and Kamal Siah Cheshm
Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The monzonitic-syenitic Gowdal intrusive body located in the north of Ahar, East-Azerbaidjan province is a member of the Shivardagh batholithic body and a part of the Alborz- Azerbaidjan- Lesser Caucasus magmatic belt related to the Meso-Tethys (Sevan- Akera- Ghareh Dagh) Ocean. Fe- Cu and Mo skarn mineralization (magnetite, specularite, pyrite, chalcopyrite, and molybdenite) occurred at the contact of the Gowdal intrusive body with limestone- marly limestone units. The supergene copper and iron minerals (malachite, azurite, secondary hematite, and Fe-hydroxides) are superimposed on the hypogene skarn mineralization assemblages. Based upon diagrams of major elements versus SiO_2, with mean values, ratios of trace elements, and diagrams of trace elements, the Gowdal intrusive body formed from relatively evolved magma and compositionally lies within the range of intrusive bodies affiliated with copper and to some extent zinc skarns. On the other hand, distribution patterns of trace elements of the Gowdal intrusive body normalized to N-MORB shows considerable similarity to known zinc and to some extent copper skarn-related intrusive bodies. Consequently, despite having dominant iron mineralization at the current level, the Gowdal intrusive body displays the utmost similarity with the bodies associated with copper skarns.

Key words: Skarn, Meso-Tethys, relatively evolved magma, Gowdal, Shivardagh

* ghafour_alavi@tabrizu.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22108/ijp.2021.124497.1197

پتـــــرولوژی، سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، زمستان ۱۳۹۹، صفحهٔ ۱۱۱- ۱۳۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

مقالهٔ پژوهشی

بررسی تودهٔ آذرین درونی مرتبط با اسکارن گودال (شمال اهر) و مقایسهٔ آن با دیگر گرانیتوییدهای اسکارنی

بهاالدین نخجوانی، علی‌اصغر کلاگری، سیدغفور علوی * و کمال سیاه‌چشم

گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

تودهٔ آذرین درونی مونزونیتی- سینیتی گودال به‌عنوان بخشی از تودهٔ باتولیتی شیورداغ، در شمال اهر (استان آذربایجان شرقی) رخنمون دارد. همچنین، این توده بخشی از پهنهٔ ماگمایی البرز- آذربایجان- قفقاز کوچک مربوط به اقیانوس مزوتتیس (سوان- آکرا- قره‌داغ) به‌شمار می‌آید. در همبری تودهٔ آذرین درونی گودال با واحد آهکی- آهک مارنی، کانه‌زایی اسکارنی آهن- مس و مولیبدن (مگنتیت، اسپیکولاریت، پیریت، کالکوپیریت و مولیبدنیت) رخ داده است. همچنین، کانی‌های برون‌زاد مس- آهن (مالاکیت، آزوریت، هماتیت ثانویه و هیدروکسیدهای آهن) مجموعهٔ کانه‌زایی درون‌زاد اسکارنی را همپوشانی کرده‌اند. برپایهٔ نمودار اکسید عنصرهای اصلی دربرابر SiO_2، به‌همراه مقدارهای میانگین، نسبت‌های عنصری و نمودارهای عنصرهای کمیاب، تودهٔ آذرین درونی گودال از ماگمایی کمابیش تکامل‌یافته پدید آمده است که در محدودهٔ ترکیبی توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن‌های مس و تا اندازه‌ای روی قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، الگوهای توزیع عنصرهای کمیاب تودهٔ آذرین درونی گودال که با ترکیب N-MORB بهنجار شده‌اند، بیشترین شباهت را با توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن روی و تا اندازه‌ای مس شناخته‌شده نشان می‌دهند. در نتیجه با اینکه کانه‌زایی آهن در سطح کنونی غالب است، تودهٔ آذرین درونی گودال بیشترین شباهت را به توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن‌های مس نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اسکارن، مزوتتیس، ماگمای نسبتاً تکامل یافته، گودال، شیورداغ

مقدمه

منطقهٔ گودال در طول‌های جغرافیایی "۱۳/۶ '۰۶ °۴۷ تا "۱۸/۲ '۰۹ °۴۷ خاوری و عرض‌های جغرافیایی "۲۱/۳ '۳۷ °۳۸ تا "۲۵/۱ '۳۸ °۳۸ شمالی و در ۲۵ کیلومتری شمال اهر در استان آذربایجان‌شرقی جای دارد

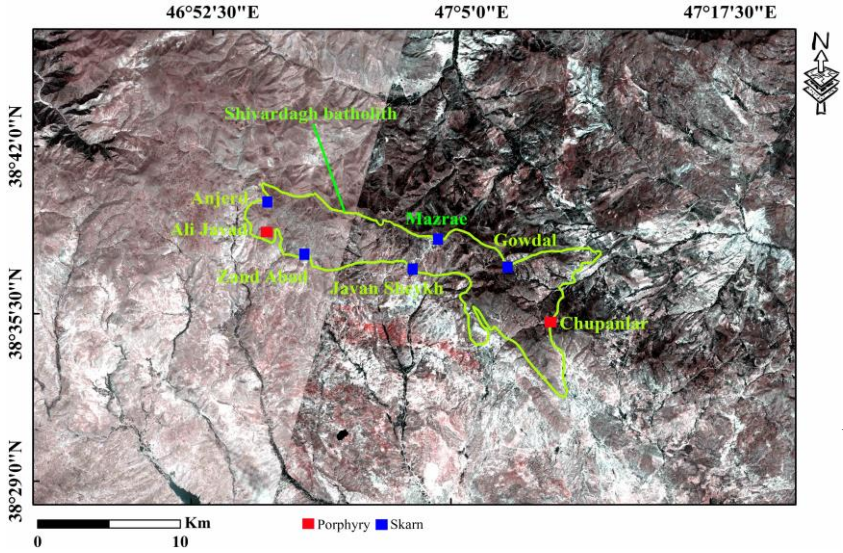
* ghafour_alavi@tabrizu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22108/ijp.2021.124497.1197

و بخشـــی از پهنـــهٔ فلززایـــی ارســـباران به‌شـــمار می‌آیـــد (Ghorbani, 2002). ایـــن پهنـــهٔ فلززایـــی بـــه‌علت وجـــود انـــدیس‌هـــای فلـــزی متعـــدد از عنصـرهای مـس، طـلا و مولیبـدن، از دیربـاز مـورد توجه زمین‌شناسـان و مکتشـفان بـوده اسـت. وجـود کانـه‌زایی‌های فـراوان مـس پـورفیری، کانسـارهای اسـکارنی مـس بـه‌همراه کانـه‌زایـی مـس و طـلای نوع رگـه‌ای، اهمیـت زمین‌شناسـی و اکتشـافی ایـن منطقـه را دو چنـدان کـرده اسـت. از کانسـارهای پـورفیری مـس در پهنـهٔ ارسـباران می‌تـوان معـدن ســـونگون (Calagari, 2004)، مســـجد داغـــی (Hassanpour and Alirezaei, 2017)، سـوناجیل (Hosseinzadeh *et al.*, 2016)، هفـت چشـــمه (Hassanpour *et al.*, 2010)، کیقـــال (Simmonds *et al.*, 2015) و دره علی‌جـــواد (Hajalilou *et al.*, 2013a) را نـــام بـــرد. از کانسـارهای اسـکارنی مـس در ایـن پهنـهٔ فلززایـی نیـز مـی‌تـوان پهنـه‌های اسـکارنی مـرتبط بـا پـورفیری سـونگون (Calagari, 2004; Calagari and Hosseinzadeh, 2006)، معـــدن مزرعـــه (Mollai *et al.*, 2009)، معـــدن انجـــرد (Hosseinzadeh *et al.*, 1999; Hassanpour *et al.*, 2013)، کانســـار زنـــدآباد (Karimzadeh Somarin *et al.*, 2002)، کانســـار گـــودال (Mahmoudiniya and Jahangiri, 2017; Asgharzadeh-Asl *et al.*, 2018) و کانســـار جوانشـیخ (Hajalilou *et al.*, 2013b) را نـام بـرد. همچنـــین، از کانی‌ســـازی‌های ســـه‌گانه اســـکارنی- پـورفیری- اپی‌ترمـالی در ایـن پهنـه می‌تـوان بـه منطقـه میـوه‌رود و از کانسـارهای مـرتبط بـا نفـوذی و یـا پـورفیری می‌تـوان انیـق- قره‌چیلـر (Jamali and Mehrabi, 2015) را نـام بـرد. افزون‌بـر ایـن، از کانســـارهای صـــرفاً اپی‌ترمـــالی طـــلا می‌تـــوان هیزه‌جـان- شـرف‌آباد (Nakhjavani and Alavi, 2018) و صـفی‌خانلو- نقـدوز (Ghadimzadeh *et al.*, 2004) را نـــام بـــرد. باتولیت‌هـــای قـــره‌داغ، شـیوردا‌غ و اسـتوک‌های پـورفیری هفـت چشـمه و سـونگون از مهم‌تـرین توده‌هـای آذریـن درونـی مـرتبط بـا کانـه‌زایی در پهنـهٔ فلززایـی ارسـباران هستند که همبری آنها بـا واحـدهای آهکـی کرتاسـه و آتشفشـانی ائوسـن رخـداد کانـه‌زایی‌های اسـکارنی، پـورفیری، اسـتوک‌ورکی و اپی‌ترمـالی را بـه دنبـال داشـته اسـت. ازآنجایی‌کـه کانسـار مـس گـودال نیـز هماننـد کانسـارهای اسـکارنی مـس مزرعـه، انجـرد، زنـدآباد و جوانشـیخ در پـی همبـری بلافصـل تـودهٔ آذریـن درونـی شـیوردا‌غ و آهک‌هـای کرتاسـه پدیـد آمـده اسـت، اهمیـت بـالایی دارد. همچنـین، شـواهد کانـــه‌زایی آهـــن و مـــس در برونزدهـــای ســـطحی و همجـواری آن بـا معـدن مـس مزرعـه، ارزش اکتشـافی در ایـن منطقـه را افـزایش داده اسـت. افزون‌بـر ایـن، از دیربـاز بررسـی‌ها و حفاری‌هـای عمقـی بسـیاری در ایـن ناحیـه انجـام شـده اسـت. ازایـن‌رو، بررسـی و مقایسـه زمین‌شـیمی تـودهٔ آذریـن درونـی مولـد پهنـه‌های اسـکارنی در گـودال بـا دیگـر توده‌هـای آذریـن درونـی در مقیـاس جهـانی می‌توانـد دیـد بهتـری در بررسـی و پیش‌بینـی پتانسـیل فلـزی اسـکارن گـودال فـراهم می‌کنـد و بـه‌عنوان معیـاری در مطالعـات اکتشـافی دیگر کانسارهای مشابه نیز کاربرد دارد.

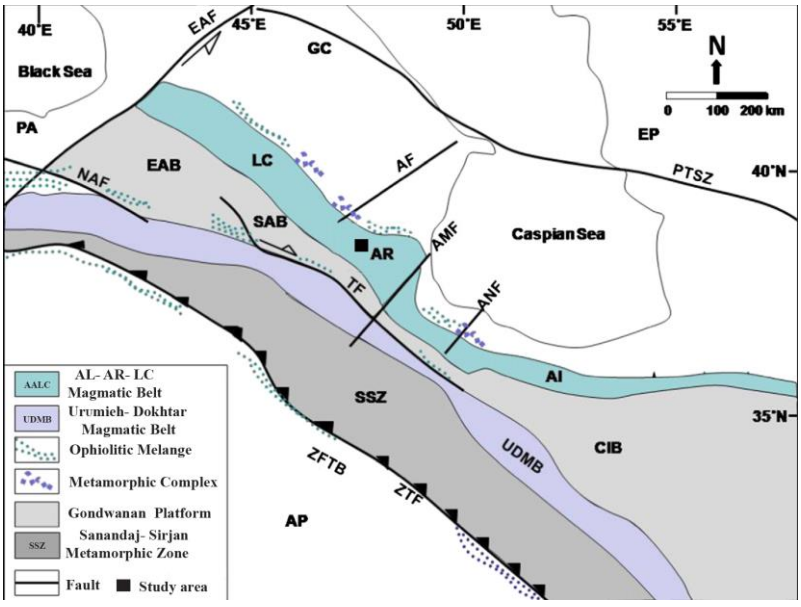
زمین‌شناسی منطقه گودال

منطقهٔ گودال بخشی از پهنهٔ فلززایی ارسباران، در بخـش شـمال‌خاوری تـودهٔ بـاتولیتی شـیوردا‌غ اسـت (شکل ۱) و برپایهٔ پهنه‌بندی زمین‌سـاختی- رسـوبی ایران (Alavi, 1991)، ایـن منطقـه بخشـی از بلـوک آذربایجان به‌شمار می‌رود که در پهنهٔ ایران مرکـزی و زیرپهنهٔ ماگمایی البرز– آذربایجان جای گرفته است.



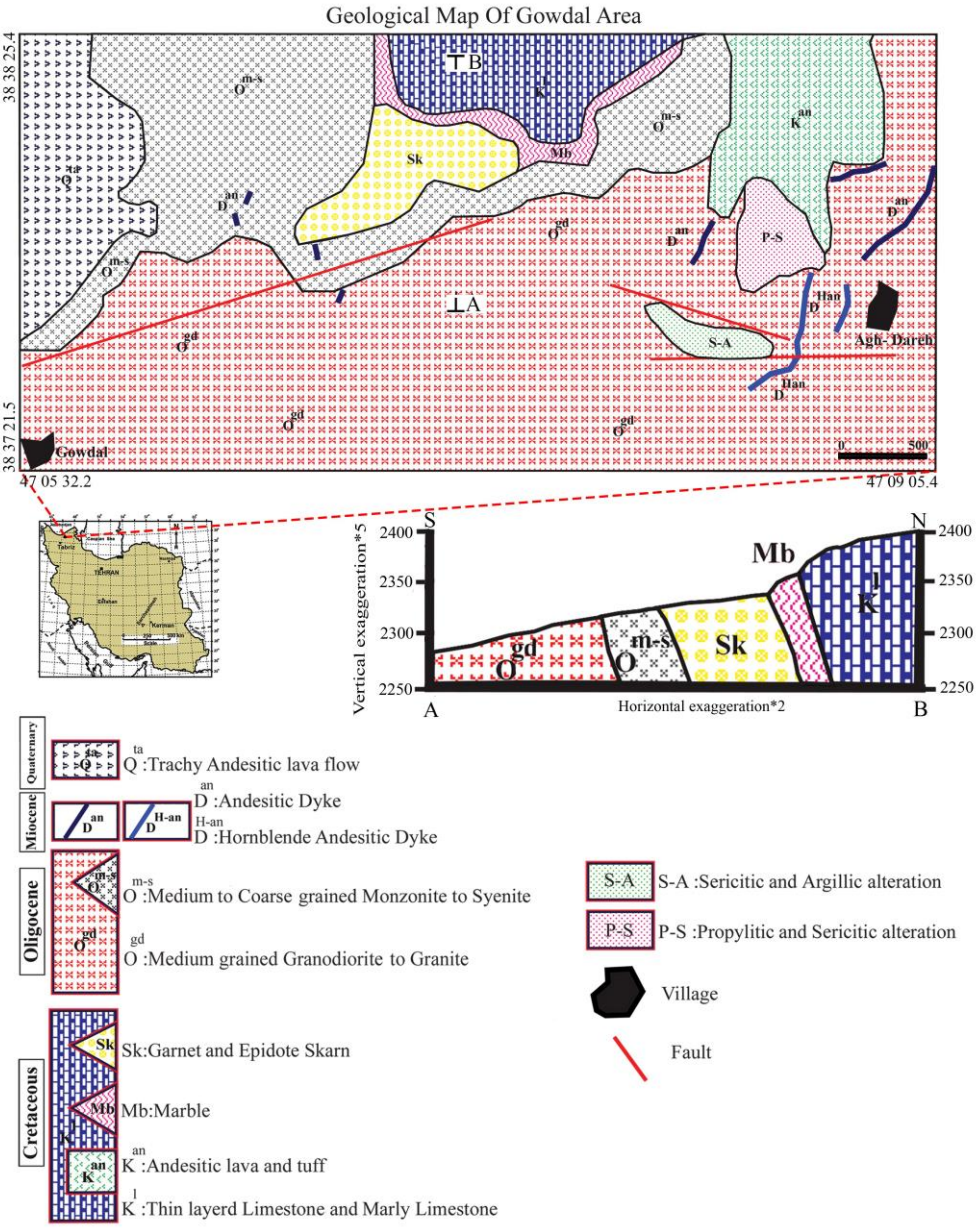
شکل ۱- جایگاه برخی کانسارهای پورفیری و اسکارنی پیرامون تودهٔ باتولیتی شیورداغ

از سوی دیگر، برپایهٔ شباهت‌های زمین‌شناسی و ماگماتیسم، این منطقه بخشی از بخش میانی پهنهٔ ماگمایی البرز- ارسباران- قفقاز کوچک (A-A-LC) (شکل ۲) با پی‌سنگ گندوانایی و ویژگی‌های بلوک ایران مرکزی (CIB)، بلوک ارمنستان جنوبی (SAB) و بلوک آناتولی خاوری (EAB) شمرده شده است (Aghanabati, 1993). در مزوزوییک- سنوزوییک، بسته‌شدن اقیانوس Meso-Tethyan (سوان- آکرا- قره‌داغ) میان اوراسیا و صفحه‌های بلوک ایران مرکزی، بلوک ارمنستان جنوبی و بلوک آناتولی خاوری ماگماتیسم و کانه‌زایی مرتبط با پهنهٔ فرورانشی با روند شمالی- جنوبی (Hassanpour, 2010) در ژوراسیک میانی را به‌دنبال داشته که تا کواترنر ادامه داشته است. تکامل ژئودینامیکی این پهنهٔ ماگمایی که با تکتونوماگماتیسم فشارشی مرتبط با کمان در ژوراسیک- کرتاسه آغاز شده است با تکتونوماگماتیسم کششی نئوژن پس از برخورد همراهی می‌شود (Jamali *et al.*, 2012).



شکل ۲- واحدهای ساختاری و زمین‌شناسی ایران مرکزی- خاور ترکیه. صفحهٔ اوراسیا: EP؛ قفقاز بزرگ: GC؛ رشته کوه البرز: AL؛ ارسباران: AR؛ قفقاز کوچک: LC؛ بلوک ایران مرکزی: CIB؛ ارمنستان جنوبی: SAB؛ آناتولی خاوری: EAB؛ پهنهٔ ماگمایی ارومیه- دختر: UDMB؛ پهنهٔ سنندج- سیرجان: SSZ؛ کمربند زاگرس تراستی و چین‌خورده: ZFTB؛ گسل آناتولی خاوری: EAF؛ گسل آناتولی شمالی: NAF؛ گسل ارس: AF؛ گسل آستارا- میانه: AMF؛ گسل انزلی: AnF؛ گسل تبریز: TF؛ گسل تراستی زاگرس: ZTF، با تغییرات از Aghanabati (۱۹۹۳)

در ایـن منطقـه برپایـهٔ پیمـایش صـحرایی انجام‌شـده، یافتـــه‌های به‌دســـــت‌آمده از نقشـــــهٔ زمین‌شناســـــی ۱:۱۰۰,۰۰۰ کلیبـــر و بررســـی‌های پیشـــین سن‌ســـنجی بلورهـای زیـرکن توده‌هـای آذریـن درونـی بـه روش LA-ICP-MS، بـــرای تهیـــهٔ نقشـــه زمین‌شناســـی ۱:۵۰۰۰ اقدام شد (شکل ۳).

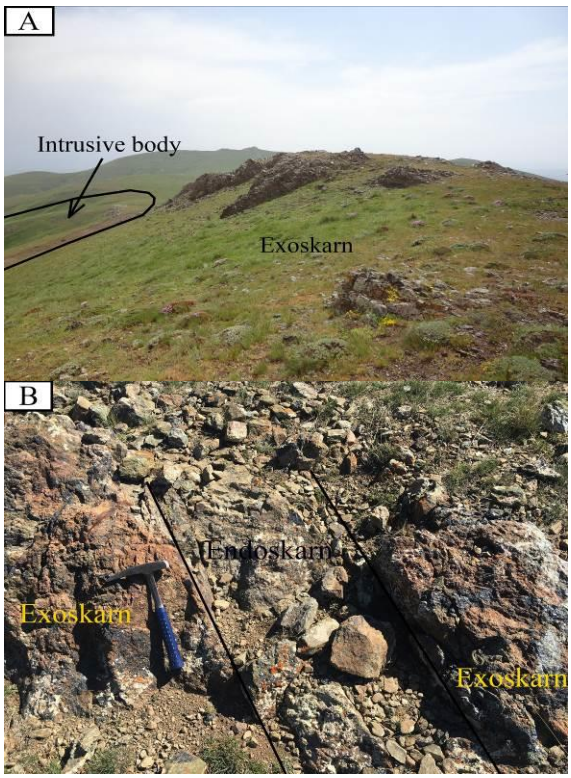


شکل ۳- نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ ساده‌شده در منطقهٔ گودال به‌همراه مقطع زمین‌شناسی در راستای A-B

بـر ایـن پایـه، کهن‌تـرین واحـدهای دیده‌شـده در محـدودهٔ گـودال، شـامل آهـک- آهـک مـارنی نـازک لایـه (K^L)، واحـد مرمـری (Mb)، واحـد اسـکارنی (Sk) و واحـد گـدازه- تـوف آنـدزیتی (K^{an}) بـه سـن کرتاسـه بـالایی هسـتند. واحـدهای جـوان‌تر، شـامل واحـد آذریـن درونـیِ گرانودیـوریتی- گرانیتـی (O^{gd}) بـه سـن الیگوسـن زیـرین (۲/۱± ۳۰/۸ میلیـون سـال پـیش) و واحـد مـونزونیتی- سـینیتی (O^{m-s}) بـه سـن الیگوسـن

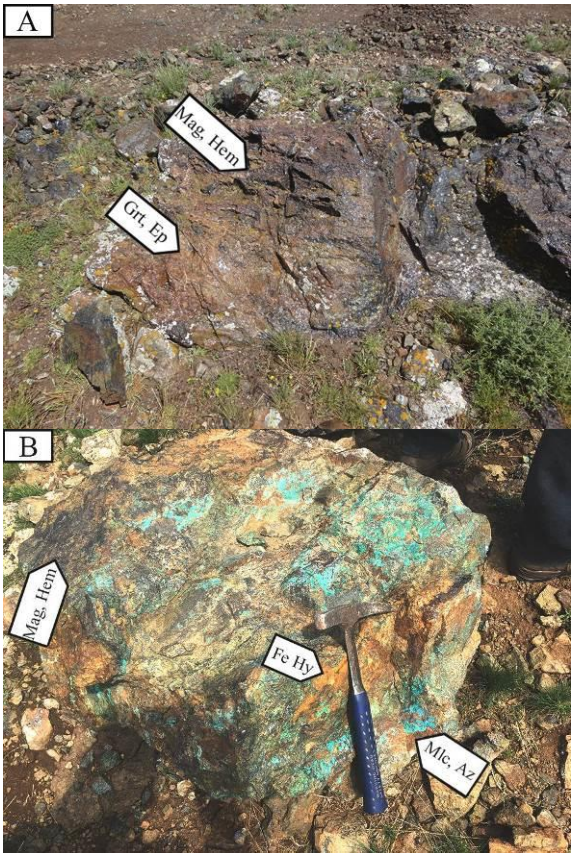
بالایی (۰/۵± ۲۳/۳ تا ۰/۹± ۲۵/۱ میلیون سال پیش) هستند (Aghazadeh *et al.*, 2011). دایک‌های آندزیتی (D^{an}) و هورنبلند آندزیتی (D^{H-an})، پس از الیگوسن نفوذ کرده‌اند. جوان‌ترین واحد رخنمون‌یافته در این محدوده، شامل گدازه تراکی‌آندزیت (Q^{ta}) کواترنری است (Mehrpartou and Nazer, 1999).

در مرز همبری تودهٔ آذرین درونی مونزونیتی- سینیتی با واحد آهکی، مرمری‌شدن، اسکارنی‌شدن و کانه‌زایی روی داده است. این کانه‌زایی بیشتر در پهنهٔ اگزواسکارن و برخی به‌صورت محلی در پهنهٔ اندواسکارن (به ستبرای نزدیک به ۱ تا ۲/۵ متر) رخ داده است (شکل‌های ۴- A و ۴- B).



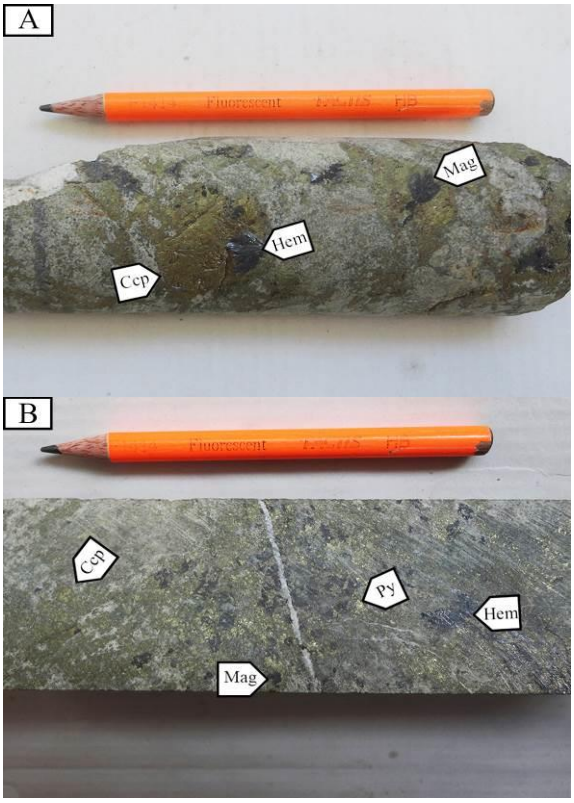
شکل ۴- تصویرهای صحرایی از پهنهٔ اسکارنی و تودهٔ آذرین درونی منطقهٔ گودال. A) وضعیت تودهٔ مونزونیتی- سینیتی و پهنهٔ اگزواسکارنی در پیرامون آن؛ B) نفوذ آپوفیزی از تودهٔ آذرین درونی مونزونیتی- سینیتی به واحد آهکی و پیدایش اندو اسکارن و اگزواسکارن

بیشتر پهنه‌های کانه‌زایی به‌صورت توده‌ای و رگه- رگچه‌ای هستند و کانه‌های نخستینِ مگنتیت– اسپیکولاریت- پیریت- کالکوپیریت و مولیبدنیت دارند. این پهنه‌ها در سطح زمین دچار فرایندهای برون‌زاد شده‌اند و با کانه‌های مالاکیت، آزوریت، هماتیت ثانویه و هیدروکسیدهای آهن همپوشانی شده‌اند (شکل‌های ۵- A و ۵- B).



شکل ۵- تصویرهای صحرایی از پهنه‌های کانه‌زایی اسکارنی و برون‌زاد. A) کانه‌زایی غالب آهن به‌صورت مگنتیت و اسپیکولاریت در پهنهٔ گارنت- اپیدوت اسکارن؛ B) حضور لکه‌های مالاکیت، آزوریت و هیدروکسیدهای آهن به‌عنوان کانی‌های برون‌زاد در این پهنه

بررسی مغزه‌های حفاری ژرفایی را نشان می‌دهد که با افزایش ژرفا از میزان کانه‌زایی اکسیدی آهن (مگنتیت- اسپیکولاریت) کاسته و بر کانه‌های سولفیدی (پیریت- کالکوپیریت- مولیبدنیت) افزوده شده است (شکل‌های ۶- A و ۶- B).



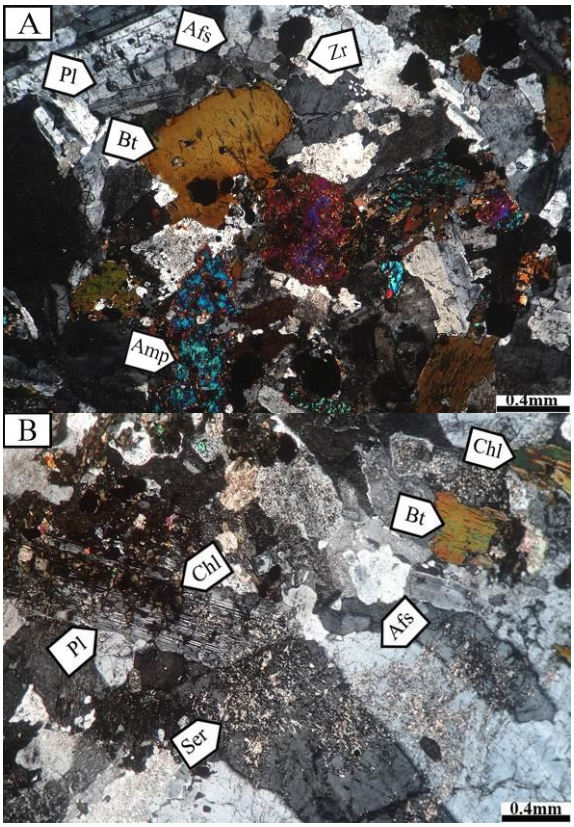
شـکل ۶- تصـویرهایی از مغزه‌هـای حاصـل از حفـاری در پهنـهٔ اسـکارنی منطقـهٔ گـودال. A) کانـه‌زایی سـولفیدی مـس (کالکوپیریـت) در همراهـی بـا مگنتیـت و اسـپیکولاریت و بـه فـرم تجمعـی، افشـان و رگچـه‌ای؛ B) کانـه‌زایی غالـب سـولفیدی مـس (کالکوپیریـت) در همراهـی بـا پیریـت، مگنتیـت و اسـپیکولاریت و به فرم رگه- رگچه‌ای و تجمعی

روش انجام پژوهش

در ایـن پـژوهش بـرای بررسـی و شناسـایی کانی‌هـا و کانـه‌های سـازندهٔ سـنگ میزبـان و پهنـه‌های اسـکارنی، ۵۰ مقطـع نـازک- صـیقلی تهیـه شـد. شـمار ۵ نمونـه سـنگی از برونزدهـای سـطحی تـودهٔ آذریـن درونـی مـونزونیتی- سـینیتی گـودال، بـا دسـتگاه پلاسـمای جفت‌شـدهٔ القـایی بـا اسـپکترومتر نشـری (ICP-OES) و فلوئورسـانس پرتـوی ایکـس (XRF) در آزمایشـگاه شـرکت تحقیقـات کـانی شناسـی- زمـین شناسـی کـان‌پـژوه تجزیـه شـدند. همچنـین، شـمار ۵۳ نمونـه سنگی از مغـزهٔ گمانـه‌های حفـاری بـا دسـتگاه پلاسـمای جفت‌شـده القـایی بـا اسـپکترومتر جرمـی (ICP-MS) و ۱۳ نمونـه نیـز بـا دسـتگاه فلوئورسـانس پرتـوی ایکـس (XRF) در آزمایشـگاه ALS-Minerals ایرلنـد تجزیـه شـدند. پـس از بررسـی‌های میکروسـکوپیِ مقطع‌هـای نـازک- صـیقلی و دریافـت داده‌هـای زمین‌شـیمیایی، زمین‌شیمی تودهٔ آذریـن درونـی گـودال کـه عامـل اصـلی اسـکارن‌زایی اسـت بررسـی شـد. سـپس یافتـه‌های به‌دسـت‌آمده بـا یافتـه‌های مشـابه در دیگـر توده‌هـای آذریـن درونـی مـرتبط بـا کانسـارهای اسـکارنی عنصرهای آهن، طلا، مس و روی مقایسه شدند.

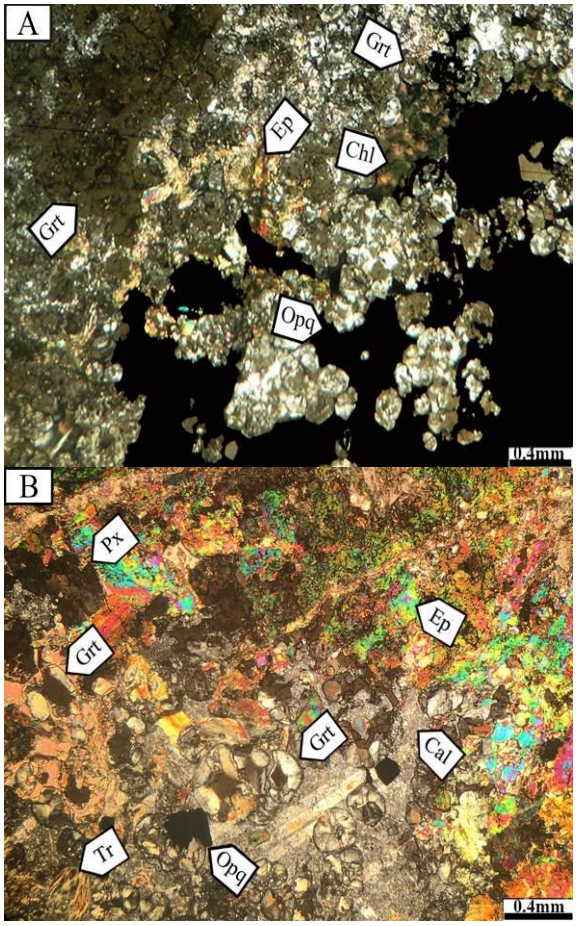
بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری

تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال در نمونـه‌های دسـتی، دانه‌متوسـط تـا دانه‌درشـت و بـه رنـگ عمـومی خاکسـتری تـا صـورتی اسـت؛ امـا در برخـی نمونـه‌ها بـه‌علت تـأثیر فراینـدهای دگرسـانی پروپیلیتیـک بـه رنـگ سـبز دیـده می‌شـود. برپایـهٔ تجزیـهٔ مـودال، ترکیـب ایـن تـوده مـونزونیتی تـا سـینیتی اسـت و درشـت‌بلورهای شـکل‌دار تـا بی‌شـکل آلکالی‌فلدسـپارِ (غالبـاً پرتیتـی و گـاه بـا ماکـل کارلسـباد؛ ۳۰ تـا ۵۰ درصـدحجمی) در همراهـی بـا پلاژیـوکلاز (بـا ماکـل غالـب پلی‌سـینتتیک و گـاه منطقه‌بنـدی؛ ۲۰ تـا ۴۵ درصـدحجمی) دارد. بیوتیـت (۱۰ تـا ۱۵ درصـدحجمی)، آمفیبـول (۵ تـا ۱۰ درصـدحجمی) و پیروکسـن (۵ تـا ۱۰ درصـدحجمی) از کانی‌هـای فرومنیـزین سـازندهٔ ایـن تـوده به‌شـمار می‌رونـد. در برخـی مقطع‌هـا، فلدسـپارها بـه‌طور بخشـی بـه سریسیت، اپیـدوت و کلریـت و بیوتیت‌هـا بـه کلریـت دگرسـان شـده‌اند. تورمـالین، آپاتیـت، اسـفن و زیـرکن از کانی‌هـای فرعـی ایـن سـنگ‌ها هسـتند (شکل‌های ۷- A و ۷- B).



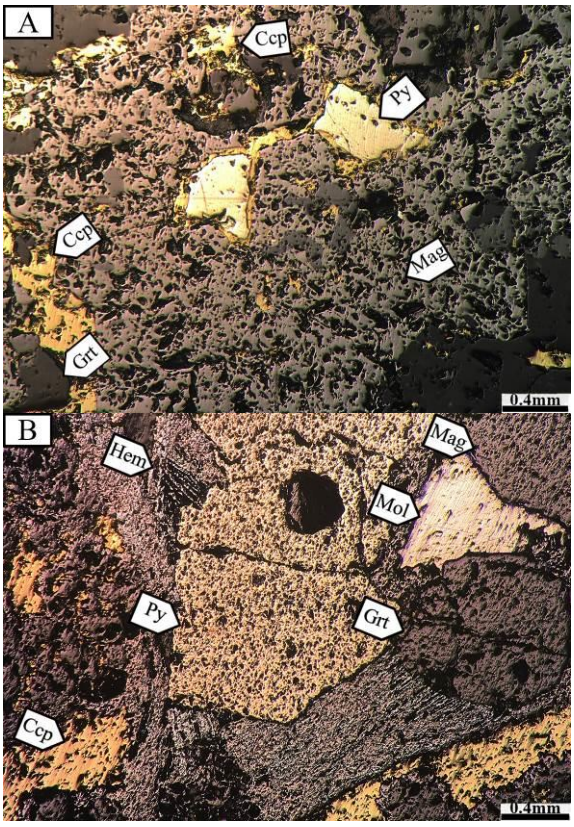
شکل ۷- تصویرهای میکروسکوپی از سنگ مونزونیتی- سینیتی گودال. A) کانی‌های روشنِ آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز و کانی‌های تیرهٔ بیوتیت و آمفیبول در همراهی با کانی فرعی زیرکن؛ B) دگرسانی فلدسپارها به سریسیت و کلریت و کانی بیوتیت به کلریت (در XPL) (Afs: آلکالی‌فلدسپار؛ Pl: پلاژیوکلاز؛ Bt: بیوتیت؛ Amp: آمفیبول؛ Chl: کلریت؛ Zr: زیرکن؛ نام اختصاری کانی‌های برپایهٔ Whitney و Evans (۲۰۱۰) است)

وجود درشت‌بلورهایی از بیوتیت و آمفیبول نشان می‌دهد ماگمای مونزونیتی- سینیتی بیشتر از ۳ درصدوزنی آب داشته است (Didier and Barbarin, 1973) و سیال‌های جداشده از آن در برخورد با آهک کرتاسه دگرسانی و کانه‌زایی اسکارنی را پدید آورده‌اند. بررسی‌های سنگ‌نگاریِ نمونه‌های پهنهٔ اگزواسکارنی نشان می‌دهند ولاستونیت، گارنت و پیروکسن در مرحلهٔ اسکارن پیش‌رونده و اپیدوت، کلریت، ترمولیت- اکتینولیت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های رسی در مرحلهٔ اسکارن پس‌رونده پدید آمده‌اند (شکل‌های ۸- A و ۸- B).



شکل ۸- تصویرهای میکروسکوپی از مقطع نازکِ نمونه‌های پهنهٔ اسکارنی گودال. A) گارنت همسانگرد و ناهمسانگرد که حضور مگنتیت به‌صورت جانشینی گارنت و توده‌ای در همراهی با اپیدوت و کلریت در آن چه‌بسا نشان‌دهندهٔ پیدایش آن در مرحلهٔ پایانی اسکارن پیش‌رونده تا مرحلهٔ آغازین اسکارن پس‌رونده است؛ B) گارنت همسانگرد و ناهمسانگرد و گاه بلورهای گارنت با هستهٔ همسانگرد و حاشیهٔ ناهمسانگرد که با اپیدوت و کلسیت و کانی پیروکسن به ترمولیت- اکتینولیت جایگزین شده‌اند (در XPL) (Grt: گارنت؛ Ep: اپیدوت؛ Chl: کلریت؛ Tr: ترمولیت- اکتینولیت؛ Cal: کلسیت؛ Px: پیروکسن؛ Opq: کانی‌های کدر؛ (نام اختصاری کانی‌ها برپایهٔ Whitney و Evans (۲۰۱۰) است)

برپایـــهٔ بررســـی‌های کانـــه‌نگاری، مگنتیـــت، اســـپیکولاریت، پیریـــت، کالکوپیریـــت و مولیبـــدنیت از کانه‌های دیده‌شده در این پهنـه هسـتند (شـکل‌های ۹- A و ۹- B). جانشینی گارنت‌هـای پدیدآمـده در مرحلـهٔ اسکارن پیش‌رونـده و پیـدایش جزیره‌هـایی از آن درون مگنتیت، همچنین، پیدایش مگنتیت رگه‌ای- رگچه‌ای و توده‌ای در همراهی بـا کانی‌هـای کالک‌سـیلیکاته آبـدار اپیـدوت و ترمولیـت- اکتینولیـت چه‌بسـا نشـان‌دهندهٔ پیدایش آن در پایان مرحلهٔ اسـکارن پیش‌رونـده و آغـاز مرحلهٔ اسکارن پس‌رونده هستند.



شکل ۹- تصویرهای میکروسکوپی از کانه‌های کانسـنگی در پهنـهٔ اگزواسکارن. A) جانشینی مگنتیت و پیریـت بـا کالکوپیریـت (در PRL). B) جانشینی مگنتیت با کالکوپیریت و پیدایش مولیبدنیت در مرحلـهٔ اسـکارن پس‌رونـده (در PRL) (Grt: گارنـت؛ Mag: مگنتیـت؛ Py: پیریـت؛ Ccp: کالکوپیریـت؛ Hem: اسـپیکولاریت؛ Mol: مولیبدنیت؛ نام اختصاری کانی‌ها برپایـهٔ Whitney و Evans (۲۰۱۰) است)

همراهـی اسـپیکولاریت بـا اپیـدوت و مگنتیـت نیـز نشـان‌دهندهٔ پیـدایش ایـن کانـه در آغـاز مرحلـهٔ اسکارن پس‌رونـده اسـت. پـس از آن، بـا کـاهش دمـا و افـزایش فوگاسـیته گـوگرد سـیال، نخسـت مولیبـدنیت بـه‌طور مسـتقیم از سـیال متاسـوماتیک و بـه‌دنبال آن پیریـت و سـپس کالکوپیریـت به‌صـورت جانشـینی مگنتیـت و پیریـت و همچنـین، بـه‌طور مسـتقیم از سیال نهشته شده‌اند.

مقایســهٔ زمین‌شــیمی تــودهٔ آذریــن درونــی مولــد اســکارن گــودال بــا چنــد تــودهٔ مشــابه در سطح جهان

برپایـهٔ داده‌هـای جـدول ۱، زمین‌شـیمی تـودهٔ آذریـن درونـی مـرتبط بـا اسـکارن گـودال بـا توده‌هـای آذریـن درونـی مـرتبط بـا اسـکارن‌های Fe، Au، Cu و Zn مقایسـه و پتانسـیل کانـه‌زایی اسـکارن گـودال، برپایـهٔ مقایسـه عنصـرهای اصـلی، کمیـاب و خـاکی کمیـاب (REE) در توده‌هـای آذرین درونی بررسی شده است.

ترکیب شیمیایی تودهٔ آذرین درونی

عنصـــرهای اصـــلی: برپایـهٔ نمـودار SiO_2 دربرابـر (Na_2O+K_2O) (شـکل ۱۰- A)، میـانگین نهشـته‌های اسـکارنی آهـن در مـرز مونزونیـت- تونالیـت، میـانگین نهشته‌های اسـکارنی طـلا در بخـش تونـالیتی بـا گـرایش به‌سوی مونزونیتی، میانگین نهشـته‌های اسـکارنی مـس در بخـش مـونزونیتی و بـا گـرایش به‌سـوی گرانودیـوریتی و میـانگین نهشـته‌های اسـکارنی روی در مـرز سـینیت- گرانودیوریت جای می‌گیرنـد کـه نشـان‌دهندهٔ بلوغ‌یـافتگی ماگماهای مرتبط بـا اسـکارن‌های مـس و روی نسـبت بـه ماگماهای بدوی مـرتبط بـا اسـکارن‌های آهـن و طلاسـت (Pons *et al.*, 2010).

جدول ۱- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیهٔ عنصرهای اصلی به روش XRF (برپایهٔ درصدوزنی) و عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب بـه روش ICP (برپایـهٔ ppm) و برخی از نسبت‌های عنصری در تودهٔ آذرین درونی گودال (Sy: سینیت؛ Mo: مونزونیت) (نمونه‌های سـتاره‌دار (*) در ایـران و دیگـر نمونـه‌ها در ایرلند آنالیز شده‌اند)

Sample No.	S-1*	S-2*	S-3*	S-4*	S-5*	BH9-164	BH9-170	BH9-175	BH9-180	BH9-185
Rock Type	Sy	Sy	Sy	Mo	Mo	Sy	Sy	Sy	Sy	Sy
SiO_2	57.1	56.5	54	53.5	56.00	---	54.43	---	---	---
TiO_2	0.53	0.65	0.69	0.79	0.79	0.57	0.79	0.73	0.68	0.66
Al_2O_3	16.3	16.9	18.5	18.2	15.44	15.91	16.01	15.82	15.48	16.16
Fe_2O_3	6.31	7.41	4.94	7.11	7.58	3.81	6.61	6.20	6.74	5.86
MnO	0.13	0.12	1.48	0.1	0.21	0.08	0.13	0.11	0.13	0.13
MgO	1.13	1.51	1.87	2.85	2.80	1.35	2.1	1.93	1.80	1.68
CaO	7.28	5.11	4.57	6.63	6.86	4.68	6.56	5.34	5.79	5.79
Na_2O	3.01	4.4	4.59	4.52	3.83	4.06	4.21	4.20	3.94	3.94
K_2O	4.17	5.53	5.42	5.13	4.53	5.4	4.64	5.15	5.18	5.52
P_2O_5	0.37	0.51	0.39	0.49	0.72	0.38	0.55	0.49	0.46	0.44
L.O.I	3.45	1.38	3.16	1.24	1.16	---	4.22	---	---	---
Total	99.8	100	99.6	101	99.9	---	100.24	---	---	---
Li	10.9	13.9	4.5	18.4	17	9.9	17.4	17	16.6	10.9
Sc	---	---	---	---	---	6.5	10.2	8.7	8.4	8.3
V	100	132	125	154	164	118	154	144	136	133
Cr	27	29	3	4	3	3	4	3	3	3
Co	18.6	21.4	14	20.3	22	9.9	20.1	11.8	12.3	13
Ni	37	40.2	3.3	5.5	4.2	7.6	8.2	6.1	5.3	7.8
Ga	7.5	7.5	14.3	15.6	13	16.9	20.1	18.5	18.5	18.1
Rb	---	---	---	---	---	124	107	113	115	130
Sr	818	1004	1087	1522	1454	1240	1070	1030	972	925
Y	19.7	19.4	22.6	19.9	21	15.2	23.6	20.5	20.2	20.2
Zr	36.7	30.4	44.9	58.9	54	37.3	58	52.7	55.6	50.1
Nb	---	---	---	---	---	17.6	23.9	22.5	24.3	23.9
Te	---	---	---	---	---	0.88	1.52	0.2	0.23	2.72
Cs	---	---	---	---	---	2.6	2.75	2.74	2.79	2.71
Ba	800	1060	1294	1317	1523	1990	1260	1170	1110	1100
Hf	---	---	---	---	---	1.1	1.9	1.8	1.8	1.7
Ta	---	---	---	---	---	1	1.13	1.16	1.21	1.2
Tl	16.7	18.6	7.5	7.5	7.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5
La	---	---	72	64.4	64	43.8	56	47.5	46.2	50.2
Ce	---	---	117	106	105	81.5	115.5	101.5	96.6	99.1
Pr	---	---	---	---	---	8.79	12.65	11.1	10.75	11.2
Nd	---	---	---	---	---	33.6	49.1	43.2	41.2	42.2
Sm	---	---	---	---	---	5.63	8.24	7.17	7.03	7.11
Eu	---	---	---	---	---	2.04	2.32	2.24	2.13	2.23
Gd	---	---	---	---	---	5.06	7.3	6.54	6.32	6.28
Tb	---	---	---	---	---	0.61	0.89	0.78	0.77	0.78
Dy	---	---	---	---	---	3.12	4.44	4.09	4.04	3.95
Ho	---	---	---	---	---	0.58	0.82	0.74	0.77	0.74
Er	---	---	---	---	---	1.6	2.25	2.12	2.12	2.04
Tm	---	---	---	---	---	0.21	0.3	0.27	0.28	0.27
Yb	---	---	---	---	---	1.25	1.85	1.73	1.77	1.73
Lu	---	---	---	---	---	0.2	0.28	0.26	0.27	0.26
Rb/Sr	---	---	---	---	---	0.10	0.10	0.11	0.12	0.14
La/Yb	---	---	---	---	---	35.04	30.27	27.46	26.10	29.02
La_n/Yb_n	---	---	---	---	---	23.62	20.41	18.51	17.60	19.56
Rb/Cs	---	---	---	---	---	47.69	38.91	41.24	41.22	47.97
La/Sm	---	---	---	---	---	7.78	6.80	6.62	6.57	7.06
Sm/Yb	---	---	---	---	---	4.50	4.45	4.14	3.97	4.11
Sr/Y	41.52	51.75	48.10	76.48	69.24	81.58	45.34	50.24	48.12	45.79

جدول ۱- ادامه

Sample No.	BH9-190	BH9-195	BH9-200	BH10-182	BH14-194	BH14-197	BH14-213	BH14-216	BH15-192	BH15-195
Rock Type	Sy	Sy	Sy	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
SiO_2	---	57.81	---	57.77	---	56.8	---	56.4	57.4	---
TiO_2	0.66	0.59	0.62	0.62	0.68	0.75	0.58	0.59	0.33	0.53
Al_2O_3	15.72	16.65	16.18	14	11.41	13.61	14.59	15.1	16.74	17.61
Fe_2O_3	5.76	3.84	5.80	9.03	7.37	4.47	2.99	4.43	2.66	3.64
MnO	0.13	0.09	0.13	0.6	0.14	0.11	0.15	0.13	0.13	0.09
MgO	1.65	1.15	1.58	1.9	3.25	4.27	1.07	1.38	0.45	1.22
CaO	6.65	4.76	5.10	6.1	8.75	9.49	6.39	7.03	4.38	4.63
Na_2O	3.97	3.62	3.85	0.97	2.83	3.73	3.86	3.53	2.22	4.21
K_2O	5.55	6.35	5.35	3.78	1.90	2.33	4.75	4.66	7.05	5.16
P_2O_5	0.44	0.44	0.41	0.4	0.15	0.17	0.37	0.38	0.17	0.35
L.O.I	---	4.46	---	4.85	---	4.15	---	5.21	4.95	---
Total	---	99.76	---	100.02	---	99.87	---	98.84	96.49	---
Li	13.4	9	13.7	6	11.8	12.9	6.5	8	4.1	12.9
Sc	7.6	6.5	7.6	11.1	16	18.7	6.3	7.3	3.6	6.2
V	131	106	123	131	106	124	108	113	70	97
Cr	2	2	4	8	108	97	2	3	3	3
Co	12.1	8.3	15.5	19.9	25.4	15	6.8	6.8	5.2	9
Ni	10	7.7	12.9	18.2	63.6	79.5	6.6	5.6	8.3	6.4
Ga	17.8	16.7	18.1	17.9	16.2	15.4	16.8	17.5	15.5	17.3
Rb	120	137	113	217	80.5	93.4	118.5	123	247	119
Sr	924	755	882	323	272	362	654	725	626	1145
Y	19.4	17.6	17.8	33	20.1	23.1	14.6	19.4	6.9	14.3
Zr	42.9	33.5	33	73.2	32.3	24	27.9	35.6	26.8	35.1
Nb	22.5	22.2	22.7	34.2	27.9	30.5	21.9	22	12.2	17.2
Te	0.7	3.39	1.21	0.63	9.13	0.56	0.31	0.11	4.73	16.9
Cs	3.03	2.71	2.63	4.7	2.56	2.25	2.49	2.48	6.47	2.58
Ba	1110	1150	1130	430	260	280	870	870	1390	1790
Hf	1.6	1.2	1	2.8	0.9	0.8	1.2	1.6	1	1.2
Ta	1.17	1.12	1.17	1.95	1.72	2.02	1.28	1.2	0.86	1.12
Tl	0.5	0.8	0.5	1.6	0.5	0.5	0.9	0.7	1.7	0.5
La	42.1	36.1	39.7	85.9	82.2	42	34.6	45.7	20.8	41.9
Ce	85.9	72.9	81.1	148	127	72.9	68.1	87.2	36.2	75.7
Pr	9.62	8.35	9.18	16.05	12.55	7.7	7.03	8.81	3.74	8.24
Nd	36.6	31.9	35.7	58.6	42.1	26.8	27.3	33.7	12.8	29
Sm	6.42	5.59	6.08	10.4	9.6	4.83	5.17	6.19	2.44	5.3
Eu	2.03	1.84	2.04	2.3	1.56	1.09	1.52	1.88	1.08	1.88
Gd	5.91	5.24	5.56	7.95	5.26	4.84	4.2	4.87	1.95	4.24
Tb	0.74	0.66	0.69	1.12	0.7	0.7	0.52	0.61	0.28	0.58
Dy	3.88	3.36	3.52	5.99	4.13	4.37	3.03	3.54	1.56	2.99
Ho	0.72	0.65	0.66	1.14	0.77	0.86	0.57	0.63	0.3	0.53
Er	2.01	1.74	1.89	3.14	2.3	2.57	1.64	1.84	0.92	1.51
Tm	0.27	0.24	0.25	0.45	0.34	0.36	0.23	0.26	0.13	0.2
Yb	1.7	1.57	1.54	2.88	2.73	2.23	1.45	1.66	0.87	1.28
Lu	0.25	0.23	0.23	0.44	0.31	0.34	0.21	0.23	0.13	0.19
Rb/Sr	0.13	0.18	0.13	0.67	0.30	0.26	0.18	0.17	0.39	0.10
La/Yb	24.76	22.99	25.78	29.83	30.11	18.83	23.86	27.53	23.91	32.73
La_n/Yb_n	16.70	15.50	17.38	20.11	20.30	12.70	16.09	18.56	16.12	22.07
Rb/Cs	39.60	50.55	42.97	46.17	31.45	41.51	47.59	49.60	38.18	46.12
La/Sm	6.56	6.46	6.53	8.26	8.56	8.70	6.69	7.38	8.52	7.91
Sm/Yb	3.78	3.56	3.95	3.61	2.32	2.17	3.57	3.73	2.80	4.14
Sr/Y	47.63	42.90	49.55	9.79	13.53	15.67	44.79	37.37	90.72	80.07

جدول ۱- ادامه

Sample No.	BH15-200	BH15-205	BH15-210	BH15-212	BH15-214	BH16-230	BH16-233	BH16-238	BH19-148	BH19-151
Rock Type	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
SiO_2	---	---	---	59.6	---	---	55.6	---	---	55.4
TiO_2	0.65	0.64	0.65	0.59	0.73	0.83	0.72	0.71	0.59	0.64
Al_2O_3	16.63	18.22	18.50	18.99	16.38	12.79	12.62	12.70	15.14	13.25
Fe_2O_3	4.59	5.14	3.01	3.6	5.70	4.17	4.44	4.14	6.63	9.8
MnO	0.10	0.11	0.07	0.10	0.11	0.10	0.13	0.13	0.12	0.14
MgO	1.55	1.87	1.98	1.67	1.90	3.87	3.95	2.95	1.60	1.62
CaO	4.66	7.18	6.79	6.72	4.58	8.68	8.99	7.08	5.83	6.72
Na_2O	3.94	3.89	4.20	3.98	4.24	2.81	2.66	2.10	3.24	2.81
K_2O	5.23	4.67	4.53	4.65	5.14	4.81	4.82	5.31	5.64	4.67
P_2O_5	0.41	0.43	0.43	0.41	0.49	0.35	0.33	0.18	0.40	0.46
L.O.I	---	---	---	0.88	---	---	3.22	---	---	4.19
Total	---	---	---	101.19	---	---	97.49	---	---	99.7
Li	14.7	15.3	9.8	9	16	11	12.8	12	7	7.7
Sc	8	7.9	7.5	7.2	9.8	11.2	8.7	11.1	8.8	7.3
V	122	125	122	123	146	76	91	76	120	114
Cr	4	3	2	3	5	27	29	15	4	3
Co	48.7	11.5	31.4	34.2	11.9	5.4	7.6	5.9	29.7	86.9
Ni	5.9	5.7	7	10.6	3.8	36.4	33.2	23.7	8.9	8.1
Ga	17.9	16.4	16.8	16.7	18.6	16.7	17.9	15	16.3	14.9
Rb	134	93.9	84.7	170	125	211	202	198.5	149	116.5
Sr	879	966	927	821	1145	270	318	336	947	956
Y	17.9	17.5	16	15.4	21.9	30.5	33.3	17.5	18.6	16.2
Zr	44.3	39.7	35.7	26.8	51.2	87.3	84.4	83.6	41.3	30.2
Nb	28.2	18.8	18.5	17.3	19.7	46.8	50.6	30.3	15.2	13.4
Te	2.41	0.11	0.47	0.73	<0.05	14.7	2.07	0.35	6.98	11.2
Cs	3.14	2.19	1.36	2.03	3.03	2.62	5.5	3.84	2.06	1.72
Ba	1000	1110	1240	1010	1310	470	500	620	1280	860
Hf	1.6	1.5	1.3	1	1.8	2.4	2.3	2	1.5	1
Ta	1.27	1.1	1.06	1.09	1.17	2.74	2.97	1.95	0.9	0.65
Tl	0.6	0.4	0.4	0.7	0.4	1.3	1	1.1	0.8	0.8
La	47.6	37.5	40.5	37.6	57	33.6	45	22.2	52.4	39.8
Ce	89.7	75.3	73.7	73.3	105.5	70.8	46.5	42.5	100.5	80.6
Pr	9.8	8.36	8.36	8.06	11.7	8.74	5.77	5.04	11.65	9.54
Nd	35.2	31.2	30.6	29.7	42.4	32.1	22.5	18.6	43.1	35.9
Sm	6.42	5.87	5.91	5.64	7.94	6.56	7.61	3.66	7.55	6.57
Eu	1.98	1.83	1.65	1.73	2.3	1.03	0.96	0.89	2.29	2.01
Gd	4.97	4.88	4.66	4.57	6.05	6.4	5.52	3.6	6.12	5.41
Tb	0.68	0.67	0.63	0.63	0.8	1.01	0.93	0.55	0.77	0.67
Dy	3.42	3.56	3.3	3.27	4.22	5.44	5.58	3.01	3.82	3.49
Ho	0.64	0.65	0.59	0.6	0.76	1.14	1.25	0.65	0.7	0.62
Er	1.71	1.72	1.6	1.64	2.06	3.24	3.63	1.82	1.86	1.69
Tm	0.24	0.24	0.23	0.23	0.27	0.44	0.52	0.26	0.24	0.21
Yb	1.51	1.58	1.42	1.38	1.72	2.83	1.71	1.67	1.56	1.35
Lu	0.22	0.23	0.21	0.2	0.26	0.39	0.45	0.23	0.22	0.19
Rb/Sr	0.15	0.10	0.09	0.21	0.11	0.78	0.64	0.59	0.16	0.12
La/Yb	31.52	23.73	28.52	27.25	33.14	11.87	26.3	13.29	33.59	29.48
La_n/Yb_n	21.25	16.00	19.23	18.37	22.34	8.00	17.73	8.96	22.65	19.88
Rb/Cs	42.68	42.88	62.28	83.74	41.25	80.53	36.73	51.69	72.33	67.73
La/Sm	7.41	6.39	6.85	6.67	7.18	5.12	4.60	6.07	6.94	6.06
Sm/Yb	4.25	3.72	4.16	4.09	4.62	2.32	4.51	2.19	4.84	4.87
Sr/Y	49.11	55.20	57.94	53.31	52.28	8.85	9.55	19.20	50.91	59.01

جدول ۱- ادامه

Sample No.	BH19-155	BH19-160	BH19-162	BH19-165	BH19-167	BH19-170	BH19-173	BH19-176	BH19-179	BH19-182
Rock Type	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
SiO_2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
TiO_2	0.73	0.78	0.63	0.37	0.68	0.68	0.50	0.48	0.68	0.66
Al_2O_3	15.85	15.34	16.42	13.45	16.29	15.10	12.96	12.47	15.19	15.23
Fe_2O_3	5.64	6.51	4.46	5.86	5.23	4.86	6.71	11.21	5.49	6.63
MnO	0.09	0.13	0.34	0.09	0.09	0.11	0.13	0.08	0.09	0.13
MgO	1.88	2.10	1.55	0.47	1.75	1.67	0.72	0.73	1.75	1.70
CaO	4.96	5.54	9.20	3.58	4.89	5.08	7.10	5.25	4.32	5.90
Na_2O	4.10	3.76	1.88	1.04	4.04	3.65	1.12	1.74	4.05	3.80
K_2O	5.14	4.90	5.50	4.25	4.43	5.52	5.35	5.31	5.36	5.06
P_2O_5	0.49	0.53	0.45	0.24	0.46	0.44	0.49	0.30	0.45	0.42
L.O.I	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Total	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Li	9	10.6	7.7	3.7	8.8	10	5.8	5.5	12.8	13.5
Sc	8.1	9.8	7.7	4	7.7	8.2	7.1	5.5	8.2	8.4
V	139	144	121	54	130	129	87	77	130	122
Cr	2	3	2	2	4	2	2	2	2	3
Co	11.1	12.8	22.2	288	11.7	13	191.5	549	10	9.7
Ni	3.7	4.3	3.5	29.7	3.4	3.5	8.6	8.5	3.4	4
Ga	17.9	18.4	17.7	8.4	18.1	17.4	13.4	11.9	18.3	17.7
Rb	110.5	120	204	153.5	99.5	124.5	160.5	165	119	110
Sr	1090	975	497	300	955	918	458	506	961	1010
Y	16.9	20	16.3	11.8	16.8	17	16	12.4	18.2	18.4
Zr	37	43.5	25.6	15.8	54.4	63.4	22	23.4	66.7	63.6
Nb	16.8	18.7	16.4	11.3	19.8	19.5	17.3	15	21.4	20.8
Te	0.13	0.3	0.34	260	0.21	0.3	5.89	9.95	0.07	0.08
Cs	2.04	2.37	5.41	2.1	2.24	2.54	6.96	3.08	2.69	2.46
Ba	1410	1160	1070	540	1130	1120	480	370	1060	1090
Hf	1.3	1.5	0.8	0.6	1.6	2	0.7	0.8	2	2.1
Ta	0.91	0.99	0.91	0.63	1.07	1.09	0.85	0.77	1.16	1.15
Tl	0.5	0.6	1.9	1	0.5	0.7	1.8	1.3	0.4	0.4
La	45.5	51.2	38.5	32.9	48.4	44.7	40.2	29.1	49.2	46.2
Ce	91	103.5	78.5	60.9	88.5	88.2	77.2	60.8	95.8	90.2
Pr	10.5	12.05	9.07	7.31	10.1	10.15	9.19	7.4	10.95	10.35
Nd	39.8	45.1	34.1	26.7	37.8	38.2	33.8	28	40.5	38.8
Sm	7.04	8.15	6.15	4.65	6.66	6.92	6.13	5.04	7.11	7
Eu	2.07	2.3	1.8	1.34	2.05	2.16	1.67	1.57	2.2	2.21
Gd	5.89	6.66	4.98	3.81	5.05	5.76	5.15	4.37	5.87	5.93
Tb	0.73	0.83	0.64	0.48	0.69	0.73	0.65	0.54	0.73	0.74
Dy	3.63	4.13	3.29	2.37	3.36	3.67	3.28	2.69	3.72	3.76
Ho	0.64	0.75	0.6	0.43	0.61	0.66	0.61	0.48	0.68	0.7
Er	1.72	1.98	1.66	1.17	1.64	1.82	1.64	1.31	1.86	1.91
Tm	0.22	0.26	0.22	0.15	0.24	0.23	0.21	0.17	0.24	0.25
Yb	1.45	1.65	1.46	0.95	1.46	1.53	1.39	1.12	1.59	1.59
Lu	0.2	0.23	0.2	0.13	0.21	0.22	0.19	0.16	0.22	0.22
Rb/Sr	0.10	0.12	0.41	0.51	0.10	0.14	0.35	0.33	0.12	0.11
La/Yb	31.38	31.03	26.37	34.63	33.15	29.22	28.92	25.98	30.94	29.06
La_n/Yb_n	21.16	20.92	17.78	23.35	22.35	19.70	19.50	17.52	20.86	19.59
Rb/Cs	54.17	50.63	37.71	73.10	44.42	49.02	23.06	53.57	44.24	44.72
La/Sm	6.46	6.28	6.26	7.08	7.27	6.46	6.56	5.77	6.92	6.60
Sm/Yb	4.86	4.94	4.21	4.89	4.56	4.52	4.41	4.50	4.47	4.40
Sr/Y	64.50	48.75	30.49	25.42	56.85	54.00	28.63	40.81	52.80	54.89

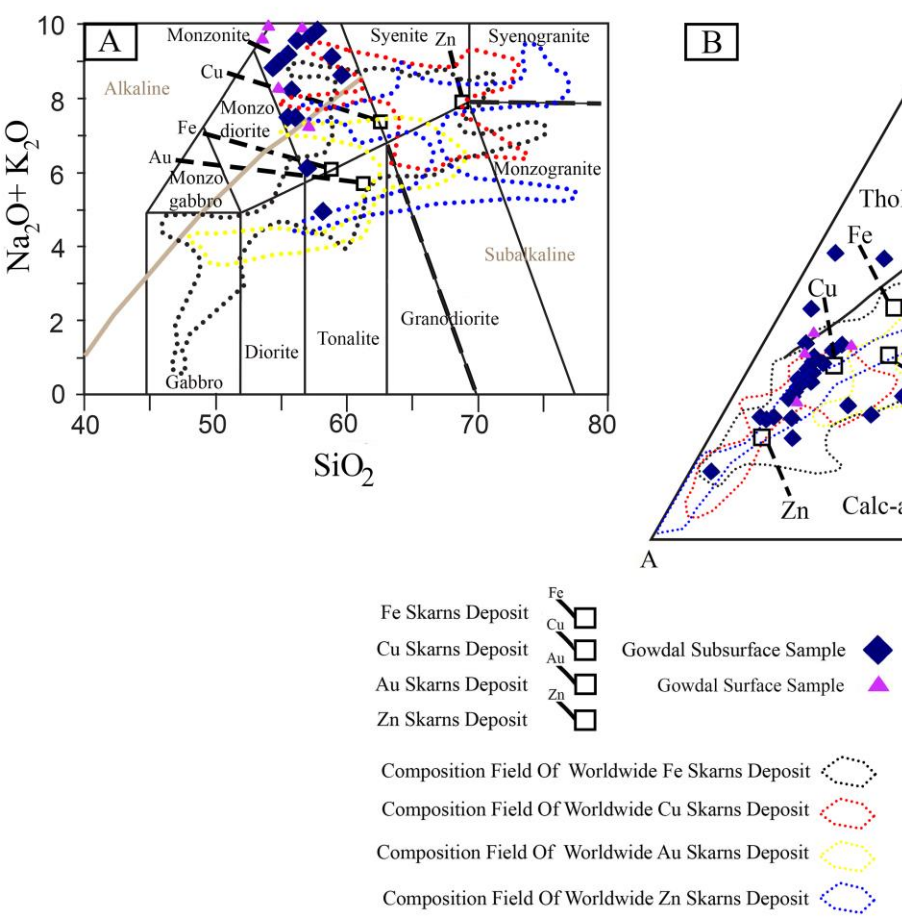
جدول ۱- ادامه

Sample No.	BH19-185	BH19-190	BH19-195	BH19-200	BH19-215	BH19-220	BH21-144	BH21-147	BH21-150	BH21-154
Rock Type	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Sy	Sy	Sy	Sy
SiO_2	58.9	---	---	---	---	57.4	---	55.8	---	---
TiO_2	0.67	0.45	0.68	0.69	0.67	0.69	0.66	0.64	0.50	0.69
Al_2O_3	15.04	12.18	15.50	14.13	16.08	14.44	15.23	14.98	13.72	15.36
Fe_2O_3	5.47	4.80	5.63	5.36	5.91	5.59	5.36	6.8	6.04	5.91
MnO	0.13	0.28	0.15	0.15	0.16	0.16	0.12	0.12	0.16	0.10
MgO	1.67	2.35	1.77	1.78	1.72	1.72	1.77	1.67	1.37	1.72
CaO	4.8	5.86	4.93	4.45	4.83	4.56	6.04	5.04	3.65	4.32
Na_2O	3.85	4.16	4.17	4.19	4.17	4.32	3.55	3.15	1.49	4.01
K_2O	5.33	5.35	5.46	5.38	5.65	5.47	5.18	5.84	6.54	5.85
P_2O_5	0.44	0.10	0.44	0.44	0.41	0.44	0.43	0.42	0.38	0.45
L.O.I	4.1	---	---	---	---	4.88	---	3.67	---	---
Total	100.39	---	---	---	---	99.66	---	98.14	---	---
Li	11.7	7.7	17.4	16.1	16.6	14.8	9.7	10	6.6	11.8
Sc	8.2	9.6	8.4	8.2	7.3	7.6	7.9	7.7	7.3	8
V	128	68	129	131	124	135	126	124	96	132
Cr	2	35	3	2	1	2	4	1	1	2
Co	10.5	15.2	11.9	11.9	10.7	11.2	19.6	24.7	25.8	11.9
Ni	3.7	33.6	3.8	2.8	3.8	3.4	6.8	5.2	3.6	3.6
Ga	17.9	11.4	18.7	18.3	18.6	18.5	18.2	17.9	14	18.7
Rb	117	52.2	123	119	126.5	109	129	163	154.5	140
Sr	961	423	1030	1030	1050	1090	840	818	467	982
Y	17.3	20	19.1	18.7	19.2	18.3	18.8	18	14	19.3
Zr	59.8	82.7	77.5	79.6	81.5	86	31.8	36.9	20.9	43.1
Nb	20.3	9.1	22.8	22.8	24.5	22.1	19.6	19.3	15.7	22.9
Te	0.05	0.14	0.05	0.09	0.13	0.07	1.65	12.6	40.9	0.61
Cs	3.23	0.75	2.92	3.31	4.15	3	1.98	2.4	2.97	3.36
Ba	1120	580	1180	1170	1160	1290	1020	1080	1330	1240
Hf	1.9	2.3	2.4	2.7	2.5	2.7	1.1	1.3	0.8	1.4
Ta	1.11	0.56	1.22	1.27	1.32	1.17	1.11	1.06	0.82	1.31
Tl	0.5	0.2	0.4	0.4	0.5	0.4	0.8	1	2.1	0.6
La	44	21.4	49.5	48.9	50.5	51.3	49.1	50.7	45.8	51.3
Ce	86.9	37	97.3	96.2	93.2	93.7	98.8	99.8	91.8	103.5
Pr	10.05	5.23	11	10.9	9.89	9.97	10.35	10.35	9.68	10.95
Nd	37.6	20.3	40.6	40.2	37.9	38.3	39.4	39.6	36.3	41.6
Sm	6.81	3.98	7.25	7.13	6.52	6.55	6.99	6.84	6.12	7.24
Eu	2.1	0.88	2.29	2.21	1.86	1.96	1.99	2	1.49	1.99
Gd	5.64	3.79	6.13	5.97	5.17	5.29	5.76	5.79	4.75	6.13
Tb	0.71	0.54	0.76	0.74	0.7	0.68	0.71	0.7	0.57	0.73
Dy	3.57	3.14	3.88	3.83	3.61	3.56	3.75	3.62	2.96	3.9
Ho	0.65	0.64	0.7	0.68	0.65	0.63	0.64	0.62	0.52	0.69
Er	1.82	1.92	1.96	1.95	1.84	1.81	1.94	1.84	1.47	1.94
Tm	0.24	0.26	0.27	0.25	0.25	0.24	0.25	0.23	0.2	0.26
Yb	1.54	1.8	1.73	1.69	1.67	1.62	1.65	1.6	1.29	1.7
Lu	0.21	0.26	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.21	0.18	0.24
Rb/Sr	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.10	0.15	0.20	0.33	0.14
La/Yb	28.57	11.89	28.61	28.93	30.24	31.67	29.76	31.69	35.50	30.18
La_n/Yb_n	19.26	8.02	19.29	19.51	20.39	21.35	20.06	21.36	23.94	20.34
Rb/Cs	36.22	69.60	42.12	35.95	30.48	36.33	65.15	67.92	52.02	41.67
La/Sm	6.46	5.38	6.83	6.86	7.75	7.83	7.02	7.41	7.48	7.09
Sm/Yb	4.42	2.21	4.19	4.22	3.90	4.04	4.24	4.28	4.74	4.26
Sr/Y	55.55	21.15	53.93	55.08	54.69	59.56	44.68	45.44	33.36	50.88

جدول ۱- ادامه

Sample No.	BH21-159	BH21-165	BH21-170	BH21-175	BH21-180	BH21-185	BH21-190	BH21-195
Rock Type	Sy	Sy	Sy	Sy	Sy	Sy	Sy	Sy
SiO_2	---	---	---	---	---	---	58.23	---
TiO_2	0.65	0.60	0.79	0.67	0.66	0.68	0.65	0.72
Al_2O_3	15.31	14.78	15.74	15.78	15.68	15.06	14.04	15.04
Fe_2O_3	5.94	7.30	7.37	6.30	6.27	5.70	5.59	6.89
MnO	0.09	0.09	0.13	0.13	0.15	0.13	0.12	0.12
MgO	1.60	1.37	2.32	1.75	1.75	1.73	1.62	2.33
CaO	4.48	4.21	5.73	4.85	4.35	6.54	4.79	5.75
Na_2O	3.76	3.06	3.67	3.85	3.67	3.96	3.93	3.31
K_2O	6.01	6.24	5.26	5.50	5.66	5.22	5.71	4.32
P_2O_5	0.41	0.38	0.52	0.44	0.44	0.44	0.43	0.53
L.O.I	---	---	---	---	---	---	3.27	---
Total	---	---	---	---	---	---	98.37	---
Li	10	8.1	10.4	10.3	12.3	15.5	17.9	25.7
Sc	7.7	7.2	10.7	7.7	7.5	8.1	7.5	9.6
V	126	114	160	129	127	135	134	158
Cr	1	3	3	2	1	2	2	3
Co	21.8	21.2	16.4	12.7	15.3	12.4	13.4	16.8
Ni	4.5	4.2	4.7	3.7	3.3	3.9	3.5	5
Ga	18.7	17.1	19	18.3	18.1	18.4	18.2	20
Rb	153	134	129	116.5	121	112.5	118.5	107.5
Sr	993	834	1000	1050	980	1050	1050	1380
Y	19	17.4	22.2	18.1	17.9	18.9	17	17.7
Zr	39.1	31.1	63.6	65	63.8	69.5	69.8	45.3
Nb	22.2	20.8	24	21.7	21.5	20.2	19.7	22.3
Te	0.23	1.08	0.55	0.26	0.17	<0.05	0.04	0.27
Cs	2.68	2.73	2.47	2.16	2.62	2.68	2.81	3.69
Ba	1260	1220	1080	1200	1220	1110	1240	1290
Hf	1.4	1.1	2.1	2.1	2	2.3	2.2	1.4
Ta	1.22	1.17	1.34	1.22	1.22	1.08	1.11	1.27
Tl	0.6	0.9	0.6	0.5	0.7	0.4	0.4	0.5
La	48.5	43.1	51.4	45.5	45.9	46.3	44.4	41.9
Ce	97	85.6	107.5	90.8	93.9	96	88.8	87.4
Pr	10.2	9.08	11.4	9.57	9.81	9.95	9.25	9.07
Nd	39.1	34.7	44.6	37.1	37.6	38.3	35.6	35.6
Sm	6.87	6.32	7.98	6.57	6.59	6.85	6.35	6.44
Eu	2.04	1.83	2.07	1.9	1.94	1.95	1.92	1.77
Gd	5.87	5.45	6.9	5.69	5.75	5.91	5.55	5.62
Tb	0.71	0.66	0.83	0.69	0.68	0.72	0.66	0.67
Dy	3.74	3.49	4.4	3.65	3.71	3.85	3.39	3.51
Ho	0.66	0.61	0.77	0.63	0.65	0.66	0.59	0.61
Er	1.92	1.79	2.26	1.84	1.92	1.88	1.73	1.76
Tm	0.25	0.24	0.3	0.24	0.25	0.25	0.22	0.23
Yb	1.65	1.53	1.96	1.63	1.66	1.71	1.52	1.51
Lu	0.23	0.21	0.26	0.22	0.23	0.23	0.21	0.2
Rb/Sr	0.15	0.16	0.13	0.11	0.12	0.11	0.11	0.08
La/Yb	29.39	28.17	26.22	27.91	27.65	27.08	29.21	27.75
La_n/Yb_n	19.82	18.99	17.68	18.82	18.64	18.25	19.69	18.71
Rb/Cs	57.09	49.08	52.23	53.94	46.18	41.98	42.17	29.13
La/Sm	7.06	6.82	6.44	6.93	6.97	6.76	6.99	6.51
Sm/Yb	4.16	4.13	4.07	4.03	3.97	4.01	4.18	4.26
Sr/Y	52.26	47.93	45.05	58.01	54.75	55.56	61.76	77.97

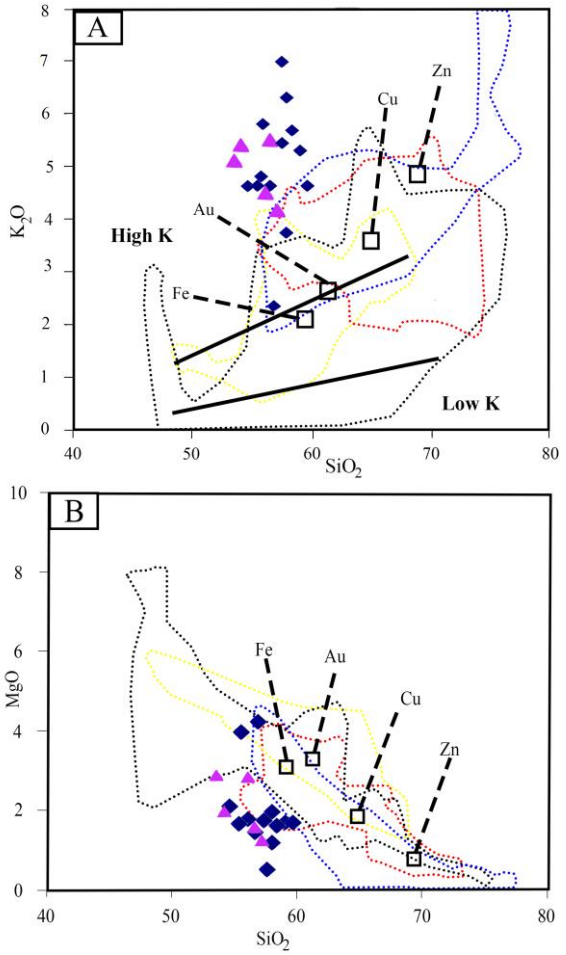
برپایهٔ این نمودار، نقاط مربوط به یافته‌های تودهٔ آذرین درونی گودال با ترکیب کلی مونزونیتی، در نزدیکی اسکارن مس جای می‌گیرند. از سوی دیگر، برپایهٔ همین نمودار، میانگین و بیشتر محدودهٔ ترکیبی توده‌های آذرین درونی مرتبط با نهشته‌های اسکارنی آهن، طلا، مس و روی، ساب‌آلکالن است؛ اما بیشتر نمونه‌های تودهٔ آذرین درونی گودال در محدودهٔ آلکالن جای می‌گیرند. برپایهٔ نمودار AFM، میانگین و محدودهٔ ترکیبی توده‌های مرتبط با نهشته‌های اسکارنی آهن، طلا، مس و روی در محدودهٔ سری کالک‌آلکالن است و تنها بخش کوچکی از محدودهٔ ترکیبی توده‌های مرتبط با اسکارن‌های آهن در بخش تولهایتی جای می‌گیرد (شکل ۱۰ - B). بر این اساس، بیشتر نمونه‌های اسکارن گودال در نزدیکی میانگین نهشته‌های اسکارنی مس- روی و در محدودهٔ ترکیبی اسکارن‌های آهن، مس و تا اندازه‌ای روی جهان و مرتبط با توده‌های سری کالک‌آلکالن جای می‌گیرند. اگرچه بیشتر توده‌های آذرین درونی مرتبط با ذخایر اسکارنی، سنگ‌های کالک‌آلکالن هستند، اما سنگ‌های آلکالن و تولهایتی مرتبط با اسکارن نیز شناسایی شده‌اند (Birkett and Sinclair, 1998; Corriveau and Gorton, 1993) که منحصر به نوع خاصی از اسکارن نیستند و فراوانی کمتری دارند (Meinert *et al.*, 2005).



شکل ۱۰- جایگاه میانگین و محدودهٔ ترکیبی توده‌های مرتبط با اسکارن‌های آهن، طلا، مس و روی جهان و اسکارن گودال در: A) نمودار درصدوزنی SiO_2 دربرابر Na_2O+K_2O (Middlemost, 1994)؛ B) نمودار AFM (A: Na_2O+K_2O؛ F: FeO_{total}؛ M: MgO) (Irvine and Baragar, 1971) (محدودهٔ ترکیبی و میانگین اسکارن‌ها برگرفته از Meinert (۱۹۹۵) است)

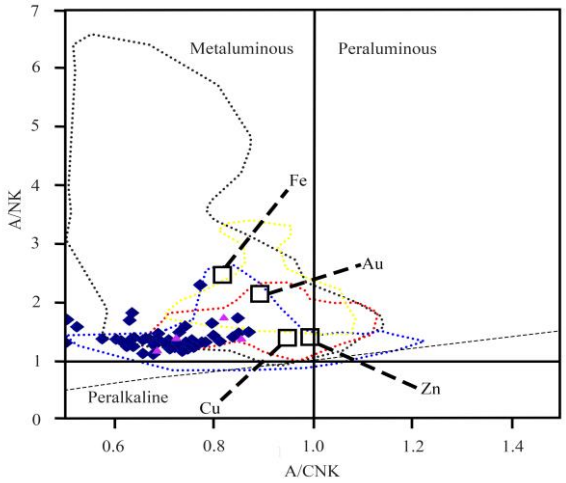
برپایـهٔ نمـودار SiO_2 دربرابـر K_2O، مگـر میـانگین توده‌های آذرین درونی مرتبط بـا اسـکارن‌های Fe و Au که در محـدودهٔ K_2O متوسـط قـرار دارنـد، میـانگین و بخش بزرگی از محـدودهٔ ترکیبـی توده‌هـای مـرتبط بـا اسـکارن‌های Cu و Zn در محـدودهٔ K_2O بـالا جـای می‌گیرنـد (شـکل ۱۱- A). ازایـن‌رو، نمونـه‌های تـودهٔ آذرین درونی مرتبط با اسکارن گودال در محـدودهٔ K_2O بالا جای می‌گیرند. چنین ترکیبی نشـان‌دهندهٔ ماگمـای بلوغ یافته گودال است.

برپایـهٔ نمـودار SiO_2 دربرابـر MgO، میـانگین اسـکارن‌های Fe و Au مقـدار MgO بـالا و میـانگین اسـکارن‌های Cu و Zn مقـدار MgO کمتری دارنـد. پـس بیشـتر نمونـه‌های تـودهٔ آذریـن درونـی مـرتبط بـا اسـکارن گـودال در نزدیکـی مـرز محـدودهٔ ترکیبـی و یـا در محـدودهٔ اسـکارن‌های مـس و روی جـای می‌گیرنـد (شـکل ۱۱- B). بـالابودن مقـدار K_2O و پـایین‌بودن مقـادیر MgO چه‌بسا گـواهی بـر بلـوغ نسـبی تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال اسـت (Pons *et al.*, 2010). اگرچـه در نمودارهـای هـارکر SiO_2 دربرابـر K_2O و SiO_2 دربرابـر MgO، نمونـه‌های تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال در محـدودهٔ اسـکارن خاصـی جـای نمی‌گیرنـد، امـا نسـبت K_2O/MgO تـودهٔ آذریـن درونـی بـرای شناسـایی اسـکارن‌های گونـاگون بـه‌کار بـرده می‌شـود. مقـدار میـانگین ایـن نسـبت بـرای توده‌هـای آذریـن درونـی مـرتبط بـا اسـکارن آهـن برابربـا ۱/۸، بـرای اسـکارن طـلا برابربـا ۱، بـرای اسـکارن مـس برابربـا ۲/۹ و بـرای توده‌هـای آذرین درونـی مـرتبط بـا اسـکارن روی برابربـا ۳۲/۸ اسـت (Meinert, 1995). در تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال، مقـدار میـانگین K_2O/MgO برابربـا ۳/۴ اسـت. ایـن مقـدار بـه میـانگین توده‌هـای آذریـن درونی مرتبط با اسکارن مس نزدیک است.



شـکل ۱۱- جایگـاه مقـدارهای میـانگین و محـدودهٔ ترکیبـی توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن‌های آهن، طلا، مس و روی جهان و اسکارن گودال در: A) نمـودار هـارکر درصـدوزنی SiO_2 دربرابر K_2O؛ B) نمودار هارکر درصـدوزنی SiO_2 دربرابـر MgO (محـدودهٔ ترکیبـی و میـانگین اسـکارن‌ها برگرفتـه از Meinert (۱۹۹۵) است. نمادها همانند شکل ۱۰ است)

برپایـهٔ نمـودار A/CNK دربرابـر A/NK، میـانگین توده‌هـای آذریـن درونـی مـرتبط بـا اسـکارن‌هایFe، Au و Cu متـاآلومینوس هسـتند و نمونـه‌های اسـکارن Zn نیـز در مـرز متـاآلومینوس- پرآلومینـوس جـای دارنـد. ازایـن‌رو، نمونـه‌های تـودهٔ آذریـن درونـی مـرتبط بـا اسـکارن گـودال در محـدودهٔ ترکیبـی اسـکارن‌های آهـن، مـس و روی تـا انـدازه‌ای در نزدیکـی مقـدار میـانگین نهشـته‌های اسـکارنی مـس جای می‌گیرند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- جایگاه مقدار میانگین و محدودهٔ ترکیبی توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن‌های آهن، طلا، مس و روی و اسکارن گودال در نمودار A/NK دربرابر A/CNK (مقدار مولار نسبت اکسیدهای $A=Al_2O_3$، $C=CaO$، $N=Na_2O$ و $K=K_2O$) (Maniar and Piccoli, 1989) (محدودهٔ ترکیبی و میانگین اسکارن‌ها برگرفته از Meinert (۱۹۹۵) است؛ نمادها همانند شکل ۱۰ است)

عنصرهای کمیاب و REE: نمودار هارکر عنصرهای اصلی عموماً شواهد و مدارک روشنی از خاستگاه، فرایندهای ماگمایی و نوع کانه‌زایی نشان نمی‌دهند (Meinert, 1995)؛ اما عنصرهای کمیاب و نسبت چنین عنصرهایی مفیدترین یافته‌ها و اطلاعات دربارهٔ فرایندهای بنیادی سنگ‌زایی را فراهم می‌کنند (Pearce *et al.*, 1984). میزان عنصرهای Rb و Sc در تودهٔ آذرین درونی شاخصی است که در بررسی میزان بلوغ توده‌های آذرین درونی به‌کار می‌رود؛ زیرا آلکالی‌فلدسپار و میکا کانی‌های حامل عنصر Rb و پیروکسن کانی حامل عنصر Sc هستند. ازآنجایی‌که پیروکسن در مراحل کمابیش آغازین و آلکالی‌فلدسپار و میکا در مراحل کمابیش پایانیِ تبلور مذاب‌های گرانیتی متبلور می‌شوند، پس عنصرهای Rb و Sc هنگام فرایند تبلور و جدایش بلورین (تفریق) ماگمایی به‌ترتیب افزایش و کاهش نشان می‌دهند (Meinert *et al.*, 2005). مقدار میانگین عنصر Rb در توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن آهن برابر با ۳۹ ppm، در اسکارن طلا برابر با ۶۹ ppm، در اسکارن مس برابر با ۱۰۳ ppm و در اسکارن روی برابر با ۱۷۸ ppm (Meinert, 1995) و مقدار میانگین این عنصر در تودهٔ آذرین درونی گودال برابر با ۱۳۲ ppm است. این مقدار بین توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن مس و روی قرار می‌گیرد. بالاتربودن Rb در تودهٔ آذرین درونی گودال در مقایسه با توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن مس دنیا چه‌بسا نشان‌دهندهٔ آلایش پوسته‌ای (Kusku *et al.*, 2002) و یا جدایش‌یافتگی بیشتر تودهٔ آذرین درونی گودال است.

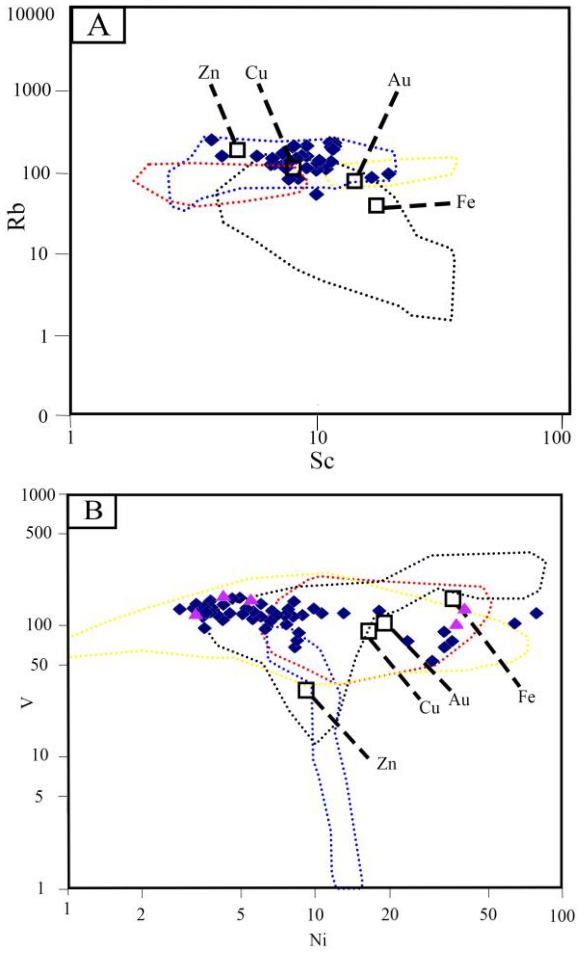
مقدار میانگین Sc در توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن آهن برابر با ۱۷ ppm، در اسکارن طلا برابر با ۱۴ ppm، در اسکارن مس برابر با ۸ ppm، در اسکارن روی برابر با ۵ ppm و مقدار میانگین آن در تودهٔ آذرین درونی گودال برابر با ۸/۳ ppm است. این مقدار همانند مقدار آن در توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن مس است. همچنین، برپایهٔ نمودار دوتایی Sc دربرابر Rb، بیشتر نمونه‌های تودهٔ آذرین درونی مرتبط با اسکارن گودال در محدودهٔ ترکیبی اسکارن روی جهان و در نزدیکی میانگین نهشته‌های اسکارنی مس جای می‌گیرند (شکل ۱۳- A). این ویژگی چه‌بسا نشان‌دهندهٔ بلوغ نسبی تودهٔ آذرین درونی گودال است.

مقدار میانگین Sr در توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن آهن برابر با ۵۰۵ ppm، در اسکارن طلا برابر با ۶۰۱ ppm، در اسکارن مس برابر با ۸۰۷ppm، در اسکارن روی برابر با ۴۹۷ ppm و مقدار میانگین این عنصر در تودهٔ آذرین درونی گودال برابر با ۸۶۲ ppm است. این مقدار همانند میانگین توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن مس است. از سوی دیگر، مقدار میانگین Rb/Sr در توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن آهن برابر با ۰/۰۹، در اسکارن طلا ۰/۱۴، در اسکارن مس برابر با ۰/۱۹، در اسکارن روی برابر با ۰/۶۹ (Meinert, 1995) و

مقدار میانگین این نسبت در تودهٔ آذریـن درونـی گـودال برابربا ۰/۲ppm است. این مقدار همانند میانگین توده‌های گرانیتوییدی مرتبط با اسکارن مس است؛ زیرا عنصـرهای لیتوفیـل درشـت‌یون ماننـد K، Rb و Sr تحـرک بـالایی دارند. ازاین‌رو، فرایندهای جدایش بلـورین را بـا محاسـبهٔ مقدار Rb/Sr (حساسیت بالا نسبت بـه جـدایش بلـورین) ارزیـابی می‌شـود (Meinert *et al.*, 2005). بـه پیشـنهاد Newberry و Swanson (۱۹۸۶)، نسبت‌هـای Rb/Sr>۸ نشـان‌دهندهٔ نقـش مـؤثرتر فراینـد جـدایش بلـورین در پیدایش توده‌های آذرین درونی مرتبط با کانسـارهای Sn، Mo و W هسـتند؛ امـا نسـبت‌هـای کمتـر Rb/Sr در توده‌های آذرین درونی مرتبط بـا سیسـتم‌هـای اسـکارنی Cu، Au، Fe و تا انـدازه‌ای Zn نشـان‌دهندهٔ تـأثیر کمتـر پدیده جدایش بلورین ماگمایی هستند. ازاین‌رو، توده‌هـای آذرین درونـی مـرتبط بـا ایـن اسـکارن‌ها از ترکیب‌هـای ماگمایی منحصر به‌فرد یا دیگر فراینـدهای سنگ‌شناسـی منـتج شـده‌اند (Meinert *et al.*, 2005). پـس مقـدار میـانگین Rb/Sr= ۰/۲ در تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال افزون‌بر نشان‌دادن بلوغ نسبی (Pons *et al.*, 2010)، تأثیر کمتر فرایند جدایش بلـورین در پیـدایش ماگمـای مـادر تودهٔ آذرین درونی گودال و تأثیر بیشتر آلایـش پوسـته‌ای را نشان می‌دهد.

مقـدار میـانگین Ba در توده‌هـای آذریـن درونـی مـرتبط بـا اسـکارن آهـن برابربـا ۳۲۶ ppm، در اسـکارن طـلا برابربـا ۸۹۱ ppm، در اسـکارن مـس برابربـا ۱۴۶۶ ppm، در اســـــکارن روی برابربـــــا ۱۲۲۷ppm (Meinert, 1995) و در تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال برابربـا ۱۰۶۰ ppm اسـت. ایـن مقـدارها بـین مقـادیر اسـکارن طـلا و روی قـرار می‌گیـرد. ازآنجایی‌کـه عنصـر Ba پـیش از تبلـور کانی‌هـای آلکالی‌فلدسـپار و بیوتیـت عنصـر ناسـازگار اسـت و در ماگمـا متمرکـز می‌شـود، بـا تبلـور کانی‌هـای آلکالی‌فلدسـپار و بیوتیـت در شـبکهٔ ایـن کانی‌هـا متمرکـز می‌شـود (Meinert, 1995).

ازایـن‌رو، مقـادیر کمـابیش بـالای Ba در تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال چه‌بسـا نشـان‌دهندهٔ مقـدار کمـابیش بـالای کانی‌هـای آلکالی‌فلدسـپار و بیوتیـت در ایـن تودهٔ آذرین درونی است.

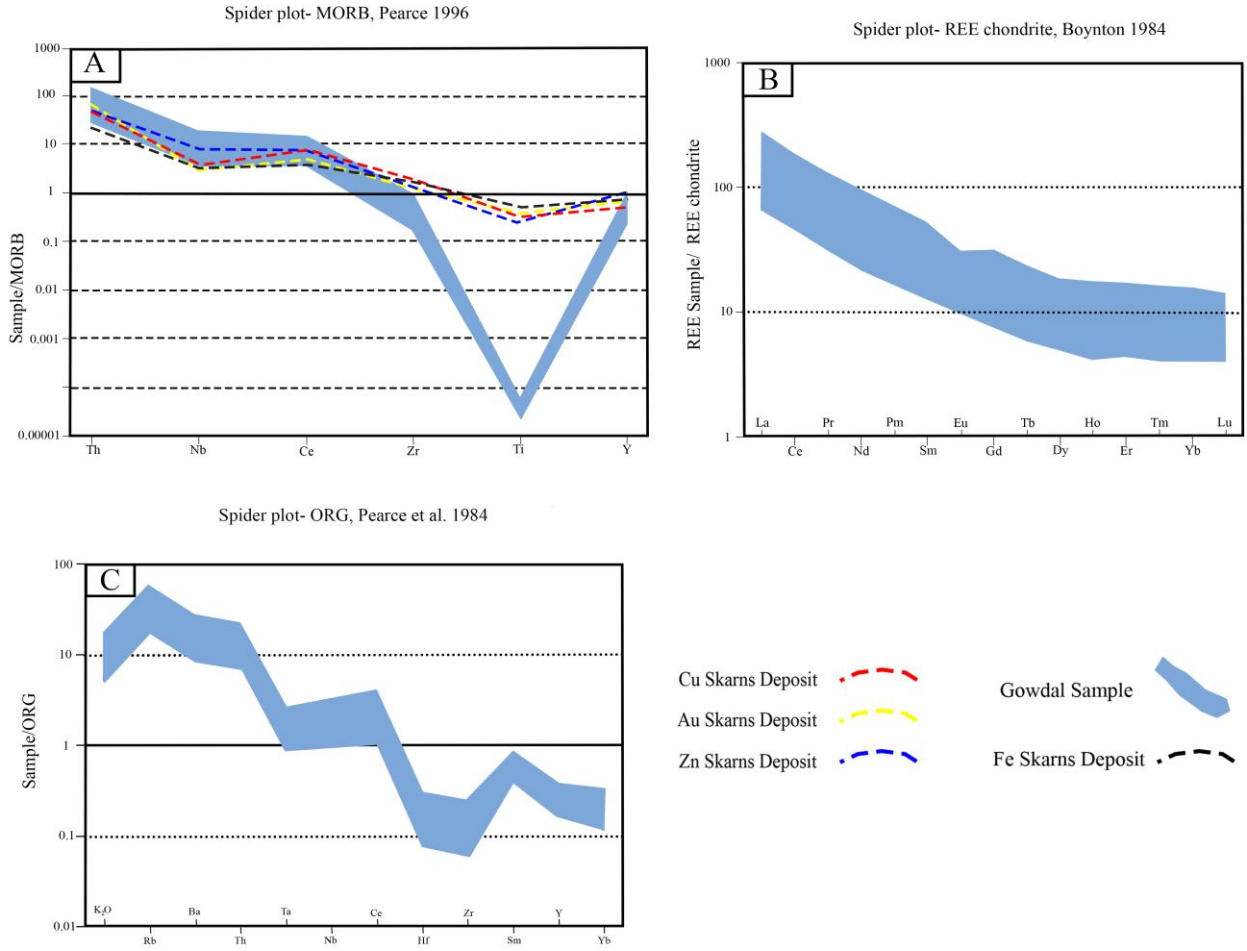


شکل ۱۳- میانگین و محدودهٔ ترکیبی توده‌های آذرین درونی مـرتبط با اسکارن‌های آهن، طلا، مس و روی جهان و اسـکارن گـودال در: A) نمودار Sc دربرابر Rb (برپایهٔ ppm)؛ B) نمـودار Ni دربرابـر V (برپایـهٔ ppm) (محـدودهٔ ترکیبـی و میـانگین اسـکارن‌ها برگرفتـه از Meinert (۱۹۹۵) است؛ نمادها همانند شکل ۱۰ است)

مقـدار میـانگین Ni در توده‌هـای آذریـن درونـی مرتبط با اسکارن آهن برابربا ۳۵ ppm، در اسکارن طلا برابربا ۱۸ ppm، در اسکارن مـس برابربـا ۱۶ ppm، در اسکارن روی برابربا ۹ ppm (Meinert, 1995) و مقدار میانگین این عنصر در تودهٔ آذرین درونی گودال برابربـا

۱۱/۴ppm است. این مقدار اسکارن مس و روی قرار می‌گیرد. مقدار میانگین V در توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن آهن برابربا ۱۵۲ppm، در اسکارن طلا برابربا ۹۹ ppm، در اسکارن مس برابربا ۸۵ ppm، در اسکارن روی برابربا ۳۰ ppm (Meinert, 1995) و مقدار میانگین این عنصر در تودهٔ آذرین درونی گودال برابربا ۱۲۰ ppm است. این مقدار بین مقادیر اسکارن‌های آهن و طلا قرار می‌گیرد. برپایهٔ نمودار دوتایی Ni دربرابر V، نمونه‌های تودهٔ آذرین درونی مرتبط با اسکارن گودال در محدودهٔ ترکیبی توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن‌های آهن، طلا و تا اندازه‌ای مس جهان جای می‌گیرند (شکل ۱۳- B).

الگوی عنصرهای کمیاب توده‌های آذرین درونی مرتبط با نهشته‌های اسکارنی آهن، طلا، مس، آهن و کانسار گودال که به ترکیب پیشنهادیِ Pearce (۱۹۹۶) برای بای N-MORB بهنجار شده‌اند، روند کلی مشابهی دارند. بر این پایه، تودهٔ آذرین درونی گودال با توده‌های مرتبط با اسکارن روی و تا اندازه‌ای مس شباهت بیشتری دارد و مهم‌ترین تفاوت آنها مقدار کمتر Zr و تهی‌شدگی بسیار آشکار Ti در تودهٔ آذرین درونی گودال است (شکل ۱۴- A).



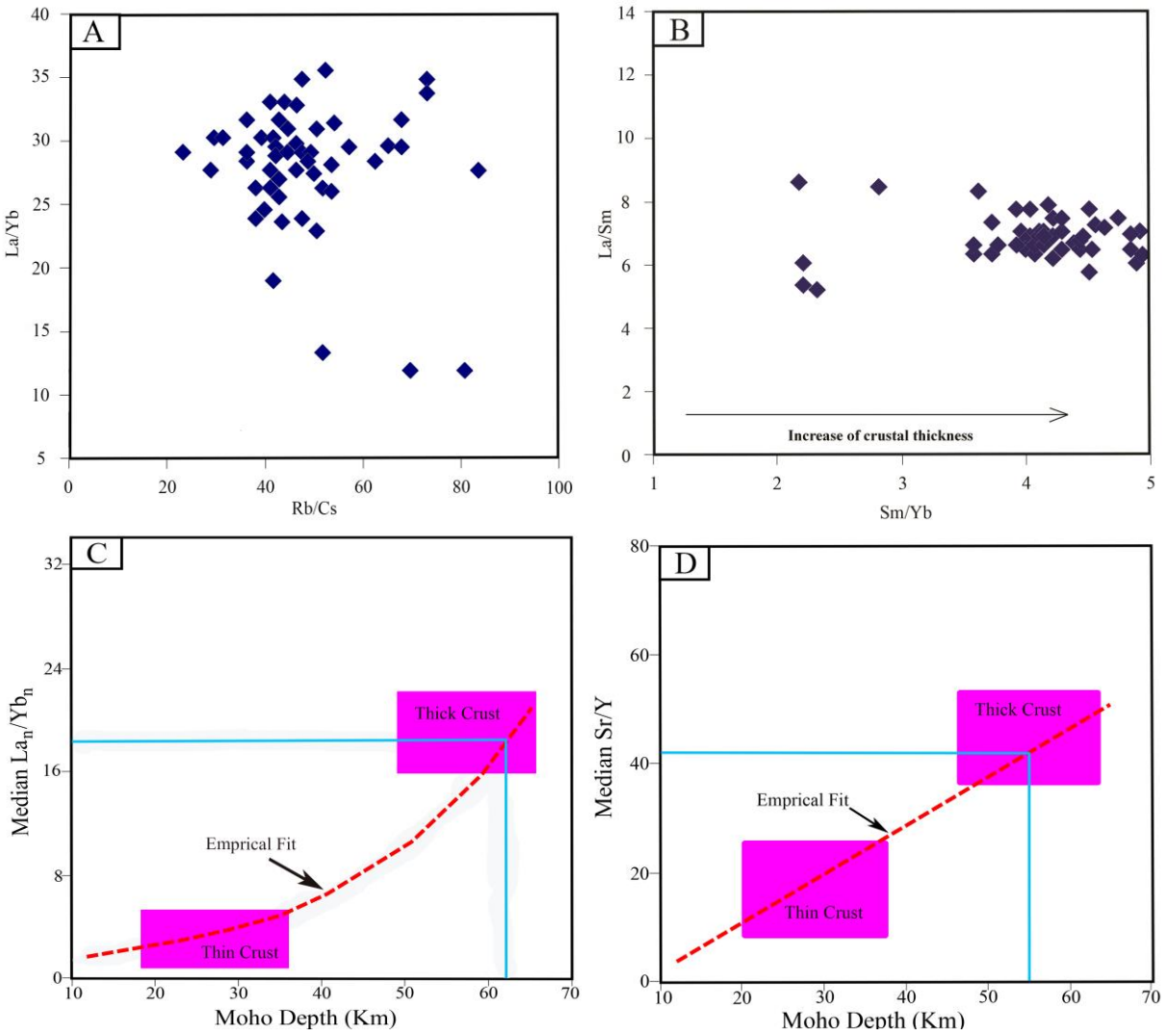
شکل ۱۴- A) الگوی عنصرهای کمیاب توده‌های آذرین درونی مرتبط با اسکارن‌های آهن، طلا، مس و روی جهان و اسکارن گودال، بهنجارشده به ترکیب پیشنهادیِ Pearce (۱۹۹۶) برای N-MORB؛ B) الگوی عناصر REE نمونه‌های برداشت شده از تودهٔ آذرین درونی مرتبط با اسکارن گودال بهنجارشده به ترکیب میانگین پیشنهادیِ Boynton (۱۹۸۹) برای کندریت؛ C) الگوی عنصرهای کمیاب و کمیاب تودهٔ آذرین درونی مرتبط با اسکارن گودال بهنجارشده به ترکیب پیشنهادیِ Pearce و همکاران (۱۹۸۴) برای پلاژیوگرانیت‌های شکاف میان اقیانوسی

مقـدارهای کمتـر عناصـر یادشـده در تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال گویـای حضـور فازهـای پسـماندیِ زیـرکن، تیتانیـت و روتیـل در خاسـتگاه ماگمـای مـادر اسـت. همچنـین، الگـوی عنصـرهای REE تـودهٔ آذریـن درونـی مـرتبط بـا اسـکارن گـودال (بهنجارشـده بـه ترکیـب میـانگین ترکیـب کنـدریت (Boynton, 1989)) نشـان‌دهندهٔ مقـدارهای بـالاتر LREE نسـبت بـه HREE، شـیب زیـاد LREE/HREE و نبـود بی‌هنجـاری منفـی مشـخص Eu در نمونـه‌های تـودهٔ آذرین درونـی مـرتبط بـا اسـکارن گـودال اسـت (شـکل ۱۴- B). ایـن مقـادیر بـه‌ترتیب نشـان‌دهندهٔ حضـور گارنـت بـه‌عنوان پسـماند در خاسـتگاه و ناپایـداری پلاژیـوکلاز در پسـماند خاسـتگاه ذوب ماگمـای گـودال و یـا نبـود جـدایش بلـورین چشـمگیر پلاژیـوکلاز اسـت (McKenzie and O'Nions, 1991). مقـدارهای بـالای La/Yb (میـانگین: ۲۷)، La_n/Yb_n (میـانگین: ۱۸/۵) و Sr/Y (میـانگین: ۴۲/۶) نیـز چه‌بسـا نشـان‌دهندهٔ حضـور گارنـت و ناپایـداری پلاژیـوکلاز در پسماند خاستگاه ذوب هستند (Moyen, 2009).

الگـوی عنصـرهای کمیـاب و کمیـاب تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال (بهنجارشـده بـه ترکیـب پلاژیوگرانیت‌هـای شـکاف میان‌اقیانوسـی یـا ORG (Pearce *et al.*, 1984)) نشـان‌دهندهٔ بی‌هنجـاری مثبـت و مشـخص عنصـرهای K_2O، Rb، Ba و Th و بی‌هنجـاری منفـی عنصـرهای Hf، Zr، Y و Yb اسـت (شـکل ۱۴- C). ایـن نکتـه چه‌بسـا نشـان‌دهندهٔ جـایگیری تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال در پوسـتهٔ قـاره‌ای بـا ضـخامت کمـابیش بسـیار و در پـی آن، آلایـش پوسـته‌ای باشـد (Rollinson, 1993).

برپایـهٔ نمـودار Rb/Cs دربرابـر La/Yb، تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال بـازهٔ گسـترده‌ای از Rb/Cs دارد (شـکل ۱۵- A) و ازآنجایی‌کـه Rb و بـه‌ویژه Cs از عنصرهای کمیاب ناسازگار هستند، ایـن بـازهٔ گسـترده نشـان‌دهندهٔ فراینـد تبلوربخشـی سـاده‌ای نیسـت (Pons *et al.*, 2010). بـه‌علت تمرکـز عنصـر Rb در پوسـتهٔ قـاره‌ای و سـازگاری عنصـر Cs بـا فازهـای سـیال، آلایـش پوسـته‌ای و فعـل و انفعـال سیسـتم ماگمـایی بـا سـیال‌های پوسـته‌ای بـه‌ترتیب منجـر بـه پراکنـدگی مقـدار عنصـرهای Rb و Cs می‌شـود (Pons *et al.*, 2010). ازایـن‌رو، برپایـهٔ داده‌هـای زمین‌شـیمیایی، گمـان مـی‌رود هـر دو عامـل آلایـش پوسـته‌ای و انـدرکنش ماگمـا بـا سـیال‌های پوسـته‌ای، در بـازهٔ گسـتردهٔ Rb/Cs تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال نقـش داشـته باشـند. همچنـین، برپایـهٔ نمـودار Sm/Yb دربرابـر La/Sm، تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال مقـدارهای کمـابیش بـالایی از Sm/Yb دارد (شـکل ۱۵- B) کـه ایـن مقـدارها نشـان‌دهندهٔ ضـخامت کمـابیش بـالای پوسـتهٔ قـاره‌ای هسـتند. ازایـن‌رو، می‌تـوان گفـت تـودهٔ آذریـن درونـی گـودال در یـک پوسـتهٔ قـاره‌ای کمـابیش ضـخیمی جـایگیری کـرده اسـت. بـه پیشـنهاد Pubellier و همکـاران (۱۹۹۹)، در پایـان الیگوسـن بـه‌علت برخـورد بلـوک ایـران مرکـزی (CIB) و صـفحهٔ اوراسـیا، ضـخامت پوسـته‌ای در منطقـهٔ ارسـباران بـیش از ۴۰ کیلـومتر بـوده اسـت. ایـن برخـورد از ائوسـن آغـاز شـده اسـت. همچنـین، بررسـی‌های گراویتـهٔ Dehghani و Makris (۱۹۸۳) نیـز نشـان‌دهندهٔ ضـخامت پوسـته‌ایِ ۴۰ تـا ۵۰ کیلومتر در جنوب کمربند ارسباران هستند.

برپایهٔ نمودارهای ژرفای موهو (ضخامت پوسته) دربرابر La_n/Yb_n و Sr/Y، ژرفای موهو نزدیک به ۵۵- ۶۰ کیلـومتر بوده است و منطقهٔ گودال در محدودهٔ پوسته ضـخیم قـرار می‌گیـرد (شـکل‌های ۱۵- C و ۱۵- D). بـا ایـن تفسـیرها گمان مـی‌رود بالاآمـدن ماگمـای مـادر در پوسـتهٔ قـاره‌ای ضخیم و آلایش پوسته‌ای، نقش مؤثری در پیدایش ترکیـب تودهٔ آذرین درونی گودال داشته باشد.



شکل ۱۵- جایگاه نمونه‌های تودهٔ آذرین درونی گودال در: A) نمودار Rb/Cs دربرابر La/Yb (Hildreth and Moorbath, 1988)؛ B) Sm/Yb دربرابر La/Sm (Hildreth and Moorbath, 1988)؛ C) ژرفای موهو دربرابر La_n/Yb_n (Profeta *et al.*, 2015)؛ D) ژرفای موهو دربرابر Sr/Y (Profeta *et al.*, 2015)

برداشت

برپایهٔ تجزیهٔ مودال، تودهٔ آذرین درونی گودال ترکیب مونزونیتی تا سینیتی دارد. وجود کانی‌های آبداری مانند بیوتیت و آمفیبول نشان‌دهندهٔ بیشتر از ۳ درصدوزنی آب در ماگمای نخستین است که همبری آن با سنگ‌های کربناته، رویداد دگرسانی و کانه‌زایی اسکارنی را به دنبال داشته است.

بررسی عنصرهای کمیاب تودهٔ آذرین درونی گودال (بهنجارشده به ترکیب N-MORB) نشان‌دهندهٔ مقدار کم Zr و تهی‌شدگی بسیار مشخص Ti است و نشان می‌دهد زیرکن، تیتانیت و روتیل فازهای پسماند در خاستگاه ماگمای مادر منطقهٔ گودال هستند. همچنین، الگوی عنصرهای REE در تودهٔ آذرین درونی گودال (بهنجارشده به ترکیب کندریت) نشان‌دهندهٔ مقدار بالاتر LREE نسبت به HREE، شیب زیاد LREE/HREE و نبود بی‌هنجاری منفی مشخص Eu در تودهٔ آذرین درونی مرتبط با اسکارن گودال است. این ویژگی‌ها نشان‌دهندهٔ حضور گارنت در پسماند خاستگاه و ناپایداری پلاژیوکلاز در پسماند ذوب

ماگمـای گـودال و یـا نبـود جـدایش بلـورین چشـمگیر پلاژیوکلاز باشد.

بررسـی الگـوی عنصـرهای کمیـاب و کمیـاب تـودۀ آذریـن درونـی گـودال بهنجارشـده بـه ترکیـب پلاژیوگرانیت‌هـای شـکاف میـان اقیانوسـی، بـه‌همراه دیگـر نمودارهـای عنصـرهای سـازگار و ناسـازگار نشـان‌دهندۀ نقـش مـؤثر فراینـد آلایـش پوسـته‌ای در پیدایش ترکیب تودۀ آذرین درونی گودال است.

با وجود غالب‌بودن کانـه‌زایی اکسـیدی آهـن در سـطح زمین، برپایۀ مقـدارهای میـانگین، نسـبت‌ها و نمودارهـای عنصـرهای اصـلی، کمیـاب و REE، تـودۀ آذریـن درونـی گودال بیشـترین مشـابهت را بـا توده‌هـای آذریـن درونـی مرتبط با اسکارن‌های مس و تا اندازه‌ای روی نشان می‌دهـد که به‌علت نبود شواهد زمین‌شناسـی و کانیـایی مـرتبط بـا کانه‌زایی اسـکارن روی در منطقـه، اسـکارن گـودال از نـوع اسکارن مس رده‌بندی می‌شود.

منابع

Aghanabati, A. (1993) Geological map of the Middle East, 1:5,000,000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.

Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z. and Vogt, K. (2011) Post- collisional polycyclic plutonism from the Zagros hinterland: the Shaivar Dagh plutonic complex, Alborz belt, Iran. Geological Magazine Cambridge University Press: 1-29.

Alavi, M. (1991) Sedimentary and structural characteristics of the Paleo- Thethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of American Bulletin 103: 983-993.

Asgharzadeh-Asl, H., Tale Fazl, E., Mehrabi, B. and Masoudi, F. (2018) Geochemical- metallogenic evolution of Agh-Daregh igneous rocks (north of Ahar) links to Cu-Au±W occurrences. Iranian Journal of Petrology 8(32): 21-44 (in Persian).

Birkett, T. C. and Sinclair, W. D. (1998) Rare- metal replacement deposits (skarns and fenites) associated with alkali and carbonatite complexes. Mineralogical association of Canada short course 26: 445- 473.

Boynton, N. V. (1989) Cosmochemistry of the rare earth elements: condensation and evaporation processes. In: Geochemistry and Mineralogy of Rare Earths (Eds. Lipin, B. R. and MacKay, G. A.) 21:1- 24. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America.

Calagari, A. A. (2004) Geology and fracture-related hypogene hydrothermal alteration and mineralization of porphyry copper deposit at Sungun. Journal of Geological Society of India 64: 595-618.

Calagari, A. A. and Hosseinzadeh, G. (2006) The mineralogy of copper bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaidjan, Iran. Journal of Asian Earth Science 28: 423-438.

Corriveau, L. and Gorton, M. P. (1993) Coexisting K- rich Alkaline and shoshonitic magmatism of arc affinities in the Proterozoic: A reassessment of syenitic rocks in the southwestern Grenville province. Contributions to Mineralogy and Petrology 113: 262-279.

Dehghani, G. A. and Makris, J. (1983) The gravity field and crustal structure of Iran. Geodynamic project (Geotraverse) in Iran, Report No. 51, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.

Didier, J. and Barbarin, B. (1973) Granites and their enclaves. Elsevier, Amsterdam.

Ghadimzadeh, H., Mehrparto, M. and Mohammadi, B. (2004) Gold generation in Safi Khanlu-Naqduz exploration area. 8th Symposium of Geological Society of Iran, Shahroud, Iran (in Persian).

Ghorbani, M. (2002) An Introduction to Economic Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).

Hajalilou, B., Dastar, S. and Ansari, S. (2013a) Investigation of mineralization and alteration zones in Ali Javad porphyry copper deposit. 17th Conference of Geological Society of Iran, Tehran, Iran (in Persian).

Hajalilou, B., Imani, F. and Khaleghi, F. (2013b) Economic geology studies of Cu-Mo mineralization

related with silica vein in Javan sheikh of Ahar, with emphasis on Fluid Inclusion studies. 17th Conference of Geological Society of Iran, Tehran, Iran (in Persian).

Hassanpour, S. (2010) Metallogeny and Mineralization of copper and gold in Arasbaran zone (Eastern Azerbaijan). Ph. D. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (in Persian).

Hassanpour, S. (2013) The alteration, mineralogy and geochronology (SHRIMP U–Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$) of copper bearing Anjerd skarn, north of the Shayvar Mountain, NW Iran. International Journal of Earth Sciences 102(3): 687- 699

Hassanpour, S. and Alirezaei, S. (2017) Eocene Masjeddaghi porphyry Cu-Au deposit; an example of island arc porphyry type deposit in NW Iran. Scientific Quarterly Journal of Geoscience 26(104): 43-58 (in Persian).

Hassanpour, S., Rasa, A., Heydari, M. and Moayyed, M. (2010) Geology, alteration and mineralization in the Haft-Cheshmeh Cu-Mo porphyry deposit. Scientific Quarterly Journal of Geoscience 4(15): 15- 28 (in Persian).

Hildreth, W. E. and Moorbath, S. (1988) Crustal contribution to arc magmatims in the Andes of Central Chile. Contributions to Mineralogy and Petrology 98: 455-489.

Hosseinzadeh, G., Calagari, A. A., Malek Ghasemi, F. and Mojtahedi, M. (1999) Economic Geology investigation of the Anjard Copper deposit (Northwest of Ahar), 3rd Symposium of Geological Society of Iran, Shiraz, Iran (in Persian).

Hosseinzadeh, M. R., Maghfouri, S., Ghorbani, M. and Moayyed, M. (2016) Different types of vein-veinlets related to mineralization and fluid inclusion studies in the Sonajil porphyry Cu- Mo deposit, Arasbaran magmatic zone. Scientific Quarterly Journal of Geoscience 26(101): 219- 231 (in Persian).

Irvine, T. and Baragar, W. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences 8: 523-548.

Jamali, H. and Mehrabi, B. (2015) Relationships between arc maturity and Cu– Mo– Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran magmatic belt. Ore Geology Reviews 65: 487-501.

Jamali, H., Yaghubpur, A., Mehrabid, B., Dilek, Y., Daliran, F. and Meshkani, S. A. (2012) Petrogenesis and tectono- magmatic setting of Meso- Cenozoic magmatism in Azerbaijan province, Northwestern Iran. Petrology, New Perspectives and Applications INTECH, Croatia: 39- 56.

Karimzadeh Somarin, A. R., Radmard, K., Calagari, A. A. and Moayyed, M. (2002) Investigation of Cu-Mo Skarn in Zand Abad (Northwest of Ahar). 6th Symposium of Geological Society of Iran, Kerman, Iran (in Persian).

Kusku, I., Kascu, G., Meinert, L. and Floyed, P. (2002) Tectonic setting and petrogenesis of the Celebi granitoids. Geochemistry Exploration 76: 175- 194.

Mahmoudiniya, H. and Jahangiri, A. (2017) Petrographic and petrogenetic studies of adakitic magmatism of Gavdel (Shivar Dagh) in Gareh dagh- South Arminian Zone (Northwest of Iran). Iranian Journal of Petrology 8(29): 21-36 (in Persian).

Maniar, P. D. and Piccoli, P. M. (1989) Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin 101: 635-643.

McKenzie, D. and O'Nions, R. K. (1991) Partial melt distribution from inversion of rare earth element concentratons. Journal of Petrology 32: 1021-1091.

Mehrpartou, M. and Nazer, K. (1999) Geological quadrangle map 1:100000 of Kaleybar. Geological survey of Iran, Tehran, Iran.

Meinert, L. (1995) Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits, chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization. Mineralogical Association of Canada Short Course Series 23: 401-418.

Meinert, L. D., Dipple, G. M. and Nicolescu, S. (2005) World Skarn Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 299-336.

Middlemost, E. (1994) Naming materials in the magma/ igneous rock system. Earth- Science Reviews 37: 215-224.

Mollai, H., Sharma, R. and Pe-Piper, G. (2009) Copper mineralization around the Ahar Batholith, north of Ahar (NW Iran): evidence for fluid evolution and the origin of the skarn ore deposit. Ore Geology Reviews 35: 401-414.

Moyen, J. F. (2009) High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the adakitic signature. Lithos 112: 556-574.

Nakhjavani, B. and Alavi, S. G. (2018) Type of mineralization, Geochemistry of Alteretion and Relation of Gold and associated elements in the Hizeh-jan area (NW Iran). Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 26(3): 673- 688 (in Persian).

Newberry, R. J. and Swanson, S. E. (1986) Scheelite skarn granitods: An evaluation of the roles of magmatic source and process. Ore Geology Reviews 1: 57- 81.

Pearce, J. A. (1996) A user's guide to basalt discrimination diagrams. In Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulphide exploration (Ed. Wyman, D. A.). Short Course Notes 12: 79-114. Geological Association of Canada.

Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1984) Trace- element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology 25: 956- 983.

Pons, J., Franchini, M., Meinert, L., López-Escobar, L. and Maydagán, L. (2010) Geology, petrography and geochemistry of igneous rocks related to mineralized skarns in the NW Neuquén basin, Argentina: Implications for Cordilleran skarn exploration. Ore Geology Reviews 38(1-2): 37- 58.

Profeta, L., Ducea, M. N., Chapman, J. B., Paterson, S. R., Marisol Henriquez Gonzales, S., Kirsch, M., Petrescu, L. and Decelles, P. G. (2015) Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs. Scientific Reports 5: 17786.

Pubellier, M., Bader, A. G., Rangin, C., Deffontaines, B. and Quebral, R. (1999) Upper plate deformation induced by subduction of a volcanic arc; the Snellius Plateau (Molucca Sea, Indonesia and Mindanao, Philippines). Tectonophysics 304: 345-368.

Rollinson, H. G. (1993) Using geochemical data: evaluation, presentation and interpretation. Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex.

Simmonds, V., Calagari, A. A. and Kyser, K. (2015) Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kighal porphyry Cu-Mo prospect, East- Azarbaidjan, NW Iran. Arabian Journal of Geosciences 8: 437- 453.

Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. American mineralogist 95: 158- 187.