Geochemical-metallogenic evolution of Agh-Daragh igneous rocks (north of Ahar) links to Cu-Au±W occurrences

Heydar Asgharzadeh-Asl [1], Ebrahim Tale Fazel *[2]
Behzad Mehrabi [1] and Fariborz Masoudi [3]
[1] Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran
[2] Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
[3] Department of Geology, Faculty of Earth sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

Abstract

The Agh-Daragh study area in the north of Ahar is located in Ahar-Arasbaran zone. The area is distinguished by W, Cu and Au metal endowment and has been explored during stream sediment and heavy mineral exploration. At least, three mineral occurrences are detected in Agh-Daragh area including Cu stockwork-disseminated mineralization in Chupanlar (occurred in O^{mz} quartz-monzonite), Cu-Au±W vein-type mineralization in Ayran Goli (occurred in O^{g} granodiorite), and Fe±Cu skarn in Gowdal (occurred between quartz-monzonite unit and crystallized carbonate). Chemically, Agh-Daragh mineralization-related metaluminous granitoids belong to oxidized, I-type and high-K calc-alkaline to shoshonitic series. They have SiO_2 = 63.5–67.6 wt%, Al_2O_3 = 14–16.5 wt%, and K_2O/Na_2O = 0.5–1.8. Moreover, LILE enrichment relative to HFSE depletion and HREE in the granitoids and the dikes occurred due to fluid-melt interaction, which are characteristics of subduction tectonic environment. In their magmatic evolution, the Agh-Daragh intrusive rocks underwent a transition from the early intrusive phases belonging to granodiorite (O^{g} unit) with low K/Na and Fe_2O_3/FeO ratios and to the late intrusive phases belonging to quartz-monzonite (O^{mz} unit) enriched in K (K/Na >1) and oxidized (Fe_2O_3/FeO >1). It seems that high content of volatiles in high-K and oxygenate magmas occurs due to saturation of magmatic melt in water under a lower degree of quartz-monzonite crystallization immediately preceding Cu-Au±W mineralization at Agh-Daragh intrusive suite. Combining our field geology and geochemical-metallogenic evidences, we conclude that the mineralization in Agh-Daragh area mostly occurred in accompany with late quartz-monzonite stocks; as a result, identification of high-K intrusive rocks and related dikes have important implications for proceeding exploration planning specially indicating of drilling points, and further refines the basis for mineral exploration in Sheyviar Dagh intrusive suite and subsequently in Ahar-Arasbaran metallogenic zone.

Key words: geochemical-metallogenic, high-K late intrusive rocks, exploration implication, Ahar-Arasbaran zone, Agh-Daragh

* e.talefazel@basu.ac.ir

پتــــــرولوژی، سال هشتم، شماره سی و دوم، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۲۱-۴۴
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۰۲

بررسی تحولات زمین‌شیمیایی- فلززایی سنگ‌های آذرین منطقه آق‌درق (شمال اهر) و ارتباط آن با رخداد عنصرهای Cu–Au±W

حیدر اصغرزاده اصل [۱]، ابراهیم طالع‌فاضل [۲]*، بهزاد مهرابی [۱] و فریبرز مسعودی [۳]

[۱] گروه زمین‌شیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
[۲] گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
[۳] دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

منطقه آق‌درق (شمال اهر) در پهنه اهر- ارسباران، از مناطق توانمند برای کانی‌سازی شناخته می‌شود که هنگام پیجویی‌های رسوب‌های آبراهه‌ای و کانی سنگین، نشانه‌هایی از عنصرهای تنگستن، مس و طلا در آن گزارش شده است. سه رخداد معدنی چندفلزی، شامل کانه‌زایی استوک‌ورک- انتشاری مس چوپانلار (میزبان کوارتزمونزونیت O^{mz})، کانه‌زایی رگه‌ای مس- طلا± تنگستن آیران‌گلی (میزبان گرانودیوریت O^{g}) و اسکارن آهن± مس گودال (میان واحد کوارتزمونزونیت و سنگ‌های کربناته متبلور)، در منطقه شناسایی شدند. از دیدگاه شیمیایی، در منطقه آق‌درق، گرانیتوییدهای متاآلومینِ میزبانِ کانه‌زایی سرشت اکسیدان و تیپ I دارند و از سری‌های ماگمایی پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند. در این توده‌ها، میزان SiO_2 برابر با ۶۳/۵ تا ۶۷/۶ wt%، Al_2O_3 برابر با ۱۴ تا ۱۶/۵ wt% و نسبت K_2O/Na_2O برابر با ۰/۵ تا ۱/۸ است. در گرانیتوییدها و دایک‌های منطقه، غنی‌شدگی LILE در برابر تهی‌شدگی نسبی HFSE و HREE پیامد فرایندهای تبادلی سیال- مذاب مرتبط با پهنه زمین‌ساختی فرورانش است. به‌دنبال تحولات ماگمایی، نوعی گذار شیمیایی در توده‌های نفوذی منطقه آق‌درق دیده می‌شود که در آن خاستگاه گرانودیوریت (O^{g}) از فاز ماگمایی نخستین با نسبت کم K/Na و Fe_2O_3/FeO است و پس از آن کوارتزمونزونیت (O^{mz}) به‌صورت یک فاز تأخیری سرشار از پتاسیم (K/Na>1) و اکسیدان ($Fe_2O_3/FeO>1$) در منطقه پدید آمده است. به‌نظر می‌رسد در ماگمای سرشار از پتاسیم و اکسیژن بالا، محتوای بالای عنصرهای فرار پیامد اشباع‌شدگی آب و درجه کم تبلور در سنگ‌های کوارتزمونزونیتی با رخداد مجموعه عنصرهای Cu–Au±W در مجموعه آذرین درونی آق‌درق سازگار است. از آنجایی‌که برپایه ویژگی‌های زمین‌شناسی صحرایی و زمین‌شیمیایی- فلززایی، رخداد کانه‌زایی در منطقه آق‌درق اغلب با استوک‌های کوارتزمونزونیت تأخیری وابستگی دارد، پس شناسایی دقیق این توده‌ها و دایک‌های پتاسیم بالای وابسته به آنها به‌عنوان راهبرد اکتشافی، نقش مؤثری در پیشبرد عملیات‌های پیجویی و به‌ویژه برگزیدن نقاط حفاری در مجموعه آذرین درونی شیورداغ و در پی آن پهنه فلززایی اهر- ارسباران دارد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی- فلززایی، توده‌های نفوذی تأخیری پتاسیم بالا، راهبرد اکتشافی، پهنه اهر- ارسباران، آق‌درق

* e.talefazel@basu.ac.ir

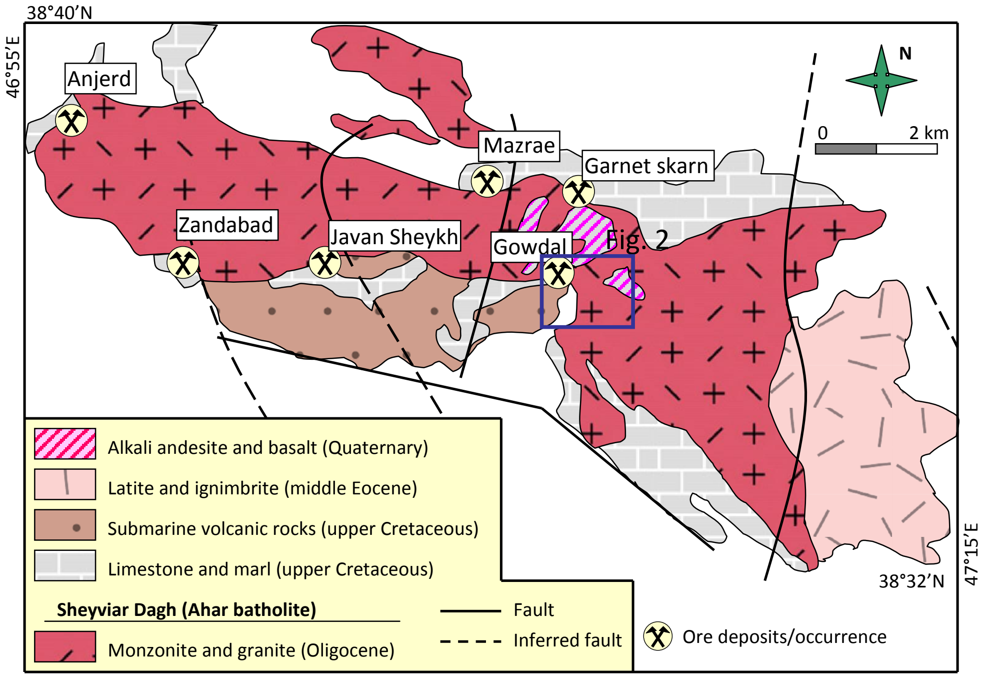
مقدمه

پهنه البرز- آذربایجان محل اتصال صفحه اوراسـیا بـا ایـران مرکـزی اسـت و در بخـش مرکـزی کمربنـد چین‌خورده آلپ- هیمالیـا جـای دارد. برپایـه رده‌بنـدی واحدهای زمین‌شناختی ایران (Nabavi, 1976)، منطقـه بررسی‌شدۀ آق‌درق در بخش باختری البرز- آذربایجان یا گستره اهر- ارسباران جای گرفتـه و در حقیقـت، ادامـه جنوبی قفقاز کوچک است. از دیدگاه فلززایی، عنصرهای طـلا، مـس، تنگسـتن، نقـره، مولیبـدن و سـرب و روی اهمیت ویژه‌ای دارند. برپایه بررسی‌هـای Aghazadeh و همکـــاران (۲۰۱۱)، Simmonds و Moazzen (۲۰۱۵)، Mederer و همکـــاران (۲۰۱۴)، Moritz و همکـــاران (۲۰۱۲) و Jamali و Mehrabi (۲۰۱۵)، بخش بزرگی از رخدادهای فلزی و کـانی‌سازی‌هـای چنـدفلزی منطقـه اهر- ارسباران در سنگ‌هـای ژرف تـا نیمـه‌ژرف آلکـالن مرتبط با کمان‌های ماگمایی بـالغ روی داده‌انـد. منطقـه آق‌درق از منـاطق بـا توانـاییِ معـدنی در پهنـه اهـر- ارسـباران اسـت و در عملیـات‌هـای پـی‌جـویی و انجـام پیجـویی‌هـای رسـوب‌هـای آبراهـه‌ای و کـانی سـنگین، نشانه‌هـایی از عنصـرهای تنگسـتن، مـس و طـلا در آن گزارش شـده اسـت (Gholami, 2004; Jamali, 2013). منطقه آق‌درق به گستردگی نزدیک به ۳۳ کیلومتر مربع و در فاصله نزدیک به ۳۵ کیلـومتری شـمال شهرسـتان اهـر جـای دارد. ایـن منطقـه میـان مختصـات طـول جغرافیایی خاوری "۴۷°۰۶'۵۸ تا "۴۷°۱۱'۱۰ و عـرض جغرافیـایی شـمالی "۳۸°۳۵'۳۴ تـا "۳۸°۳۸'۳۲ و در جنوب‌باختری برگـه زمـین‌شناسـی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلیبـر (Mehrparto and Nazer, 1999) اسـت. شـرکت ملـی صنایع مس ایران با همکاری شرکت تله‌متال فرانسـه بـه فعالیـت‌هـای شـدادی و حفـر گمانـه در ایـن منطقـه پرداختــه‌انـد. در ایــن پــژوهش، زمــین‌شــیمی تــوده گرانیتوییدی آق‌درق و رخـدادهای کانـه‌زایـی همـراه بـا بررسی کانی‌شناسی و تغییـرات الگـوی زمـین‌شـیمیایی عنصرهای اصلی، کمیاب و خاکی نادر مقایسـه و تحلیـل شده‌اند. هـدف از ایـن پـژوهش بررسـی ارتبـاط رخـداد کانی‌سازی و دگرسانی با سرشت اکسیدان- احیا و تـوان فلززایی تـوده نفـوذی آق‌درق اسـت. دسـتیابی بـه ایـن هدف‌ها، افزون‌بر جنبـه‌هـای علمـی و تحقیقـاتی، نقـش موثری در پیشبرد عملیات پیجویی‌های عمـومی در ایـن منطقه دارد.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای و منطقه معدنی

گستره فلززایـی اهـر- ارسـباران (پهنـه قـره‌داغ) بـا راستای WNW- ESE و پهنای ۵۰ تا ۱۰۰ کیلـومتر، در پهنه ماگمایی البرز باختری، پس از گذر از ارمنسـتان تـا کمان پونتاید خاوری در شمال خـاور ترکیـه ادامـه دارد. فرایندهای ماگمایی در گستره اهر- ارسـباران در زمـانی کمتر از ۲۰ میلیون سال، به‌صورت سنگ‌های آتشفشانی حدواسـط تـا اسـیدی ائوسـن آغـاز شـده و سـپس بـا جـایگیری تـوده‌هـای درونـی گرانیتوییـدی الیگوسـن- میوسن ادامه یافته است (Lescuyer and Riou, 1976; Hezarkhani, 2006). بیشتر این توده‌ها گرانیتوییـدهای اکسیدی گروه I با سرشت متاآلومین تا پرآلومین هستند و شامل طیفی از سنگ‌های ساب‌آلکالن تا آلکالن هستند (Jamali *et al*., 2009). مجموعـه آذریـن شـیورداغ (یـا باتولیت اهر)، با درازای نزدیک بـه ۳۰ کیلـومتر، پهنـای متغیر ۳ تا ۱۰ کیلومتر و راسـتای خـاوری- بـاختری، از مهمترین پدیده‌هـای ماگمـایی منطقـه اهـر- ارسـباران به‌شمار می‌روند. این مجموعه از کهن بـه جدیـد شـامل سـنگ‌هـای کربناتـه و آتشفشـانی زیردریـایی (کرتاسـه بـالایی)، تـوالی‌هـای رسـوبی- آتشفشـانی لاتیـت و ایگنمبریت (ائوسن میـانی)، تـوده‌هـای گرانودیـوریتی و دیوریتی شیورداغ (الیگوسن) و سنگ‌های آلکالی‌بازالت و آندزیت (کواترنری) است. برپایـه سـن‌سـنجی بلورهـای زیرکن با روش LA-ICP-MS، سـن ۲۳ تـا ۳۰ میلیـون سال پیش برای توده آذرین درونـیِ شـیورداغ بـه‌دسـت

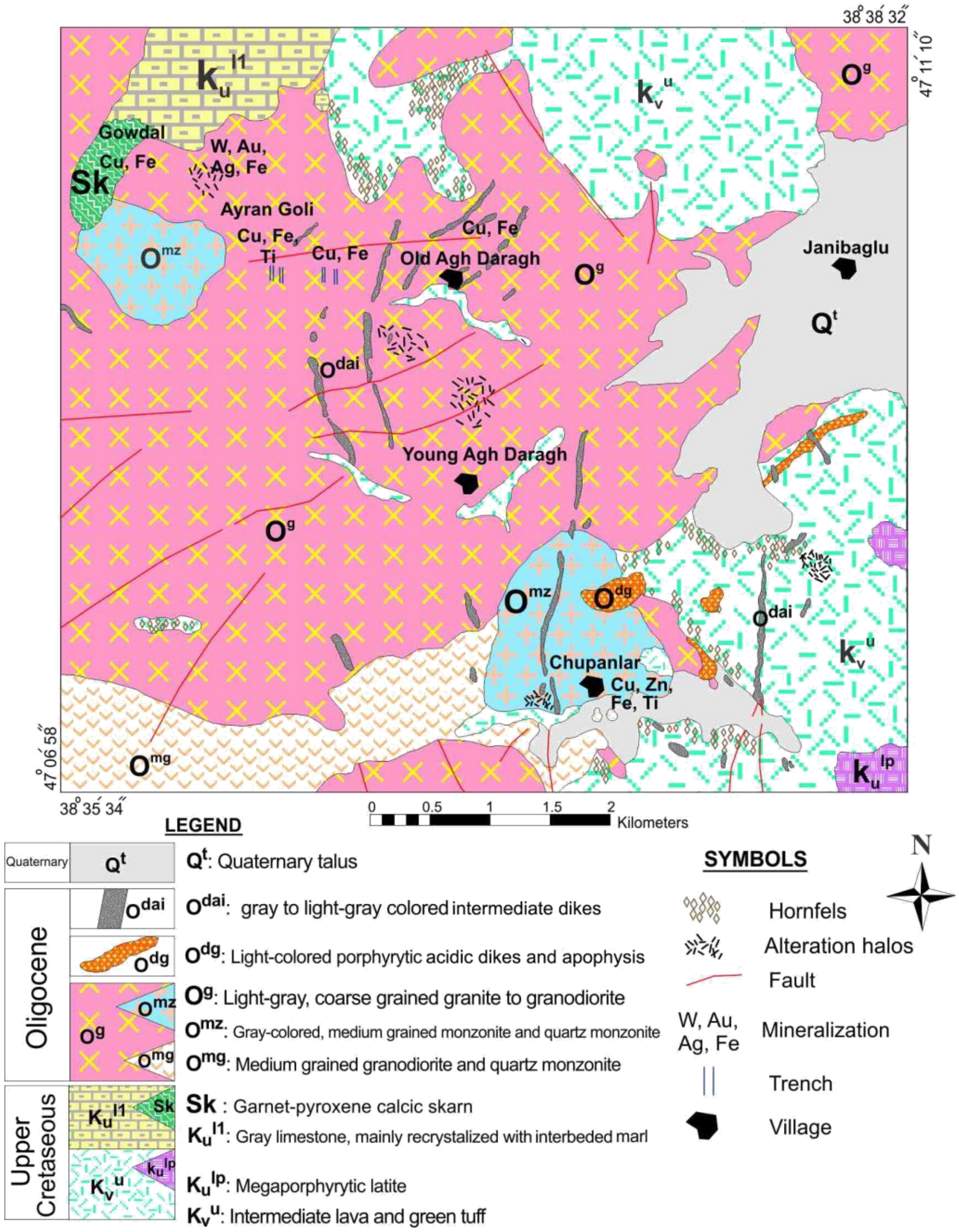
آمده است (Aghazadeh *et al.*, 2011). در نتیجه نفوذ توده شیورداغ به درون سنگ‌های کربناته کرتاسه بالایی، کانی‌سازی‌های اسکارن- پورفیری فراوانی (مانند: انجرد، زنـدآباد، جـوان شـیخ، مزرعـه، آق‌درق و گـودال) در پیرامـون ایـن تـوده گـزارش شـده‌انـد (Mollai *et al.*, 2009) (شکل ۱).



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی مجموعه نفوذی شیورداغ که در آن جایگاه کانه‌زایی‌های گونـاگون نمـایش داده شـده اسـت (بـا تغییراتـی پـس از Mollai و همکاران، ۲۰۰۹)

منطقه بررسی‌شدهٔ آق‌درق در بخش خاوری مجموعه نفوذی شیورداغ جای دارد (شکل ۱). در کـل، دو واحـد سـنگ‌شناسـی اصـلی شـامل سـنگ‌هـای رسـوبی و آتشفشانی- رسوبی (کرتاسه بالایی) و سنگ های آذریـن نفوذی و دایک‌ها (الیگوسن) در منطقه کانه‌زایـی آق‌درق رخنمون دارند (شکل ۲). کهنترین سنگ‌های منطقه بـه سن کرتاسه بـالایی- پالئوسـن هسـتند و بیشـتر شـامل سنگ‌های نیمه‌درونی تا آتشفشانی- رسـوبی زیردریـایی (مانند: توف سبز، گدازه‌های بازالتی، لاتیـت پـورفیری و تراکی آندزیت (افق زیرین) و مجموعه سنگ‌های رسوبی آهک‌هـای خاکسـتری- مـارنی (افـق بـالایی)) هسـتند. بیشتر این سنگ‌هـا در شـمال و جنـوب‌خـاوری منطقـه آق‌درق رخنمون دارند (شـکل ۲). تـوده آذریـن درونـی شـیورداغ بـا جـنس گرانیـت، مونزودیوریـت و کوارتزمونزونیت در الیگوسـن، دسـت کـم در دو چرخـه زمانی (چرخه اول ۲/۱±۳۰/۸ میلیون سال پیش شـامل سنگ‌هـای کالـک آلکـالن و چرخـه دوم ۰/۵±۲۳/۳ تـا ۰/۹±۲۵/۱ میلیـون سـال پـیش شـامل سـنگ‌هـای شوشـونیتی؛ Aghazadeh و همکـاران، ۲۰۱۱)، در ایـن واحدها نفوذ کرده است. سـپس و بـه‌ویـژه در الیگوسـن بالایی، همـه ایـن مجموعـه بـا دایـک‌هـایی اسـیدی تـا حدواسط قطع شده است. در منطقه آق‌درق دسـت کـم سه گسـترهٔ کانـه‌زایـی چنـدفلزی (ماننـد: چوپـانلار (بـا میزبـان کوارتزمونزونیـت)، آیـران گلـی (در میزبـان گرانودیوریـت) و اسـکارن گـودال) در میـان اسـتوک کوارتزمونزونیت (الیگوسن) و سنگ‌های کربناتـه متبلـور

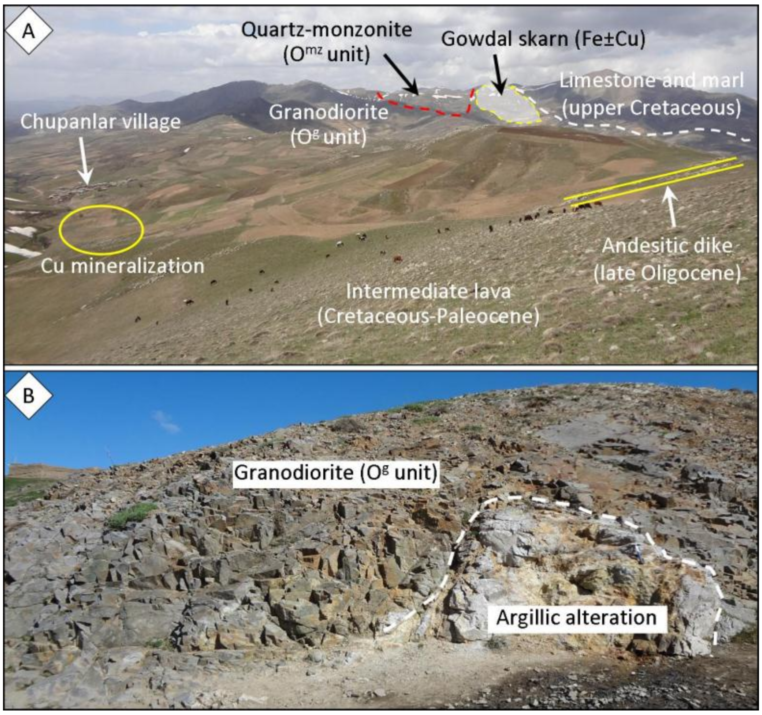
(کرتاسه بالایی)، دیده می‌شود. در تصویر دورنمای عمومی شکل ۳- A، وابستگی فضایی این کانی‌سازی‌ها با توده‌های آذرین درونی منطقه و واحدهای سنگی دیگر نشان داده شده است.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه آق‌درق و نمایش جایگاه منطقه‌های کانه‌زایی چوپانلار، آیران گلی و گودال (با تغییرات از برگه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ آق‌درق- چوپانلار (Jamali, 2013)

در پی فرایندهای کششی- فشارشی پوسته‌ای در مقیاس ناحیه‌ای، دست کم دو دسته درزه با راستاهای NNE- SSW و NNW- SSE در توده آذرین درونی شیورداغ پدید آمده است (Mollai *et al*., 2009). در درون این درزه‌ها، رگه‌های آپلیت، پگماتیت و کوارتز و گاه کانی‌سازی مس به‌صورت مالاکیت نیز دیده می‌شود. پیرو این فرایندهای زمین‌ساختی در منطقه معدنی آق‌درق، دو روند ساختاری با راستاهای NNE- SSW و

NE- SW شناخته شد که دسته اول با روند دایک‌های حدواسط تا اسیدی منطقه و دسته دوم با گسل‌های منطقه وابستگی دارند و کنترل‌کننده کانه‌زایی و دگرسانی نیز هستند (شکل ۳- B).



شکل ۳- A) دورنمای عمومی از واحدهای سنگی گوناگون منطقه معدنی آق‌درق و جایگاه منطقه‌های کانه‌زایی چوپانلار (مس) و گودال (آهن±مس) در آن (دید رو به شمال‌باختری)؛ B) رخنمونی از شکستگی‌ها و گسل‌های کنترل‌کننده دگرسانی در سنگ‌های گرانودیوریتی (O^{g}) منطقه چوپانلار (دید رو به شمال)

روش انجام پژوهش

پس از گردآوری اطلاعات، نقشه‌های زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی منطقه در مقیاس معدنی، برای دستیابی به هدف‌های تعیین‌شده، برداشت‌های صحرایی و نمونه‌برداری از رخنمون‌های سنگی، ترانشه‌ها و بخش‌های گوناگون انجام شد. در کل، شمار ۵۰ مقطع نازک، صیقلی و نازک- صیقلی برای انجام بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و دگرسانی ساخته شد. سپس مقطع‌ها با میکروسکوپ نوری بازتابی- عبوری مدل ZEISS در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه خوارزمی تهران بررسی شدند. پس از بررسی میکروسکوپی و بررسی کمترین میزان دگرسانی، شمار ۱۵ نمونه سنگی (۱۰ نمونه از توده آذرین درونی و ۵ نمونه از دایک) برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی- فلززایی سنگ میزبان برگزیده شدند. این نمونه‌ها با روش‌های دستگاهی فلورسانس اشعه ایکس یا XRF (تجزیه عنصرهای اکسیدی اصلی) در دانشگاه خوارزمی تهران و روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفتیده القایی یا ICP-MS (تجزیه عنصرهای کمیاب و خاکی نادر) درآزمایشگاه **Acme** کانادا (کد AQ250) تجزیه شد. برای تخریب کامل نمونه و دستیابی به عنصرهای اکسیدی اصلی در آزمایش XRF، قرص ذوب (fused disc) نمونه به‌کار برده شد. مقدار LOI یا مواد فرار سنگ نیز با به‌کارگیری کوره تا دمای ۹۰۰ تا درجه سانتیگراد ۱۲۰۰ در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران به‌دست آمد. آستانه آشکارسازیِ دستگاه ICP-MS برای عنصرهای گوناگون ۰/۰۱ تا ۰/۱ گرم در تن (ppm)

است. برای اطمینان از تجزیه کامل عنصرهای لیتوفیل و تخریب کامل کانی‌های مقاوم (مانند: زیرکن، مونازیت و روتیل)، روش آماده‌سازی ذوب قلیایی متابورات لیتیم ($LiBO_3$)، به‌کار برده شد. جزییات کامل این روش در تارنمای www.ACMELAB.com، بخش Schedule of Services and Fees آورده شده است. مقدار آهن کل (FeO_t) و آهن سه‌ظرفیتی (Fe_2O_3) با آنالیز شیمیِ تر انجام شد. داده‌های به‌دست‌آمده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱- داده‌های تجزیه دستگاهی سنگ‌کل از شمار ۱۵ واحد سنگی منطقه آق‌درق (شمال اهر) (۱۰ نمونه از توده آذرین درونی و ۵ نمونه از دایک) (مقدار عنصرهای اکسیدی اصلی برپایه درصد وزنی (wt%) و عنصرهای کمیاب و خاکی نادر برپایه گرم در تن (ppm) است. رابطه شاخص لارسن (LI) برابر $0.33SiO_2+K_2O-(FeO+CaO+MgO)$ است) (O^g: واحد گرانودیوریت، O^{mz}: واحد کوارتزمونزونیت)

Sample No.	Ch13	Ch16	Ch18	Ch20	A24	A25	A31	A34	Ag35	Ag36	Ag37	Ag38	Ag39	Ag40	Ag41
Units	O^g	O^g	O^g	O^g	O^g	O^{mz}	O^{mz}	O^{mz}	O^{mz}	O^{mz}	dike	dike	dike	dike	dike
SiO_2	63.8	64.01	63.79	67.23	63.48	63.5	67.6	65.23	64.11	65.81	57.45	55.95	56.23	73.23	73.32
TiO_2	0.37	0.5	0.55	0.43	0.6	0.56	0.35	0.47	0.57	0.4	1.05	0.69	1.21	0.14	0.13
Al_2O_3	14.57	15.73	16.25	15.32	16.48	15.08	15.73	15.34	13.94	15.76	15.11	15.84	16.23	11.23	11.08
Fe_2O_3	2.9	2.12	3.57	1.1	2.77	3.29	2.55	2.17	3.4	3.04	3.21	4.89	3.32	4.21	3.23
FeO	2.1	2.42	2.1	2.54	3.21	2.3	1.34	2.01	1.89	2.34	2.31	1.31	2.32	2.13	1.55
MnO	0.05	0.05	0.06	0.06	0.09	0.08	0.04	0.11	0.06	0.06	0.15	0.09	0.04	0.06	0.04
MgO	1.7	1.98	2.12	1.58	2.2	1.89	0.85	1.45	2.86	1.44	5.23	2.1	2.3	1.23	1.32
CaO	3.34	3.74	5.02	2.73	4.13	2.91	2.34	2.76	4.25	2.44	7.03	9.27	8.32	0.76	0.8
Na_2O	4.02	3.85	4.02	3.06	3.16	3.26	3.09	3.54	3.02	3.95	2.33	3.63	4.34	2.34	2.05
K_2O	3.54	3.04	2.17	4.27	2.29	5.65	5.62	4.32	4.68	4.01	4.23	3.67	3.21	3.34	4.53
P_2O_5	0.15	0.13	0.3	0.14	0.35	0.33	0.14	0.16	0.3	0.18	0.53	0.45	0.54	0.04	0.05
LOI	3.61	1.41	1.1	1.52	0.93	0.83	0.87	1.78	1.21	0.85	1.65	1.07	1.21	2.22	1.03
Total	100.15	98.98	101.05	99.98	99.69	99.68	100.52	99.34	100.29	100.28	100.28	98.96	99.27	100.93	99.13
Ba	859	935	877	806	724	829	857	729	789	807	935	775	857	798	769
Rb	92.3	50.6	71.7	78.9	123.1	237	197.4	105	87	101	97	86	79	121	106
Sr	684	897	786	740	477	724	729	524	678	856	560	567	789	567	456
Y	8.1	10.9	17.7	20.6	14.6	12.2	10.4	13.9	12	14	34	54	36	23	32
Zr	123	121	102	121	125.5	156	89	156	135	165	154	132	165	133	187
Nb	15.4	20.3	34	35	27.3	28.5	18.6	25.1	15.5	17.2	13.3	17.3	15.1	17.2	14.2
Th	16.6	11.2	15.9	16.1	24.7	11.6	13.4	17.8	14	12	16	13	16	13	12
Pb	52.7	13.66	14.84	20.17	11.99	19.68	8.73	14.41	18	23	45	33	23	43	12
Ni	17.9	19.8	7.8	6	5.1	4	45	5.3	5	4	23	2	1	2	1
V	55	87	121	111	56	160	99	66	43	3	3	5	44	43	23
Cr	34	50	69	56	94	22	65	84	43	44	32	67	32	22	56
Hf	1.93	0.85	0.74	0.99	0.43	4.2	1.47	0.55	1.22	0.77	0.76	0.9	1.22	1.45	2.3
Cs	1.3	0.9	2.2	1.7	2.5	1.8	0.7	2.6	2.3	2.4	1.5	4.3	3.3	2.3	2.4
Sc	4.5	5.6	7.2	7.1	3.7	5.8	7.6	4.9	5.4	4.3	4.6	7.6	4.4	5.4	4.7
Ta	1.2	1.2	1.8	2.4	2.2	1.6	1.3	1.8	3.2	1.3	2.4	3.3	4.3	2.2	1.2
Co	7.5	10.4	13.2	11.2	4.3	18.2	6.6	7.3	12.4	10.4	16.5	14	16	12.4	14.3
La	27.5	31.9	36.3	37.4	46.3	21.7	24.3	33.5	34.6	24.5	33.5	28.6	31	27	27.9
Ce	52.85	67.48	77.08	82.16	83.98	51.55	50.36	64.13	54.3	87.5	56.7	67.5	66.5	56.4	66.7
Pr	4.9	7.3	7.7	8.7	7.8	5.2	5.7	6.3	6.6	5.6	7	8.7	5.6	5.7	6.7
Nd	16	29.3	30.1	34	27.4	19.9	22.3	23	22.4	24.3	32.4	31.5	32.4	22.6	25.4
Sm	2.8	4.8	5.7	6.3	4	4	4.2	3.9	3.3	2.4	4.3	5.4	4.4	3.4	3.4
Eu	0.8	1	1.1	0.7	1	1.3	1.1	1	1	0.8	1	1.1	0.8	0.9	0.8
Gd	2.5	4.1	4.6	5.3	3.4	3.8	3.4	3.4	2.3	3.2	3.5	3.3	4.2	4.5	4.7
Tb	0.3	0.4	0.7	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.7	0.5	0.3	0.5	0.7
Dy	1.5	2.6	3.2	4.1	2.9	2.8	2.1	2.8	3.2	2.4	3.3	2.9	4.4	3.2	2.7
Ho	0.3	0.4	0.7	0.8	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.3	0.7	0.5	0.6	0.4
Er	1	1.2	1.9	2.6	1.4	1.5	1.1	1.3	1.3	1.2	1.4	1.3	1.2	1.2	1.5
Tm	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.4	0.5	0.2	0.1	0.2
Yb	1	1.3	1.9	2.3	1.8	1.4	0.9	1.5	1	1.5	1.4	2.1	1.3	1.6	1.8
Lu	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1
(La/Yb)n	18.5	16.5	12.9	11.0	17.3	10.5	18.2	15.1	23.3	11.0	16.1	9.2	16.1	11.4	10.5
K_2O/Na_2O	0.9	0.8	0.5	1.4	0.7	1.7	1.8	1.2	1.5	1.0	1.8	1.0	0.7	1.4	2.2
LI	17.5	16.0	14.0	19.6	12.7	19.5	22.4	19.6	16.8	20.5	8.6	9.5	8.8	25.4	24.1

همچنین، برای شناسایی دقیق کانی‌ها و پهنه‌های دگرسان منطقه پس از بررسی میکروسکوپی شمار ۲۷ مقطع نازک، شمار ۱۰ نمونه پودر سنگی با بزرگی ۷۵ میکرون (گذر از الک ۲۰۰ مش) با تجزیه دستگاهی پراش اشعه ایکس (XRD) مدل فیلیپس X′pert (مدت زمان جریان الکترونی ۳۰ دقیقه)، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه شدند.

سنگ‌نگاری و توزیع فضایی سنگ‌ها

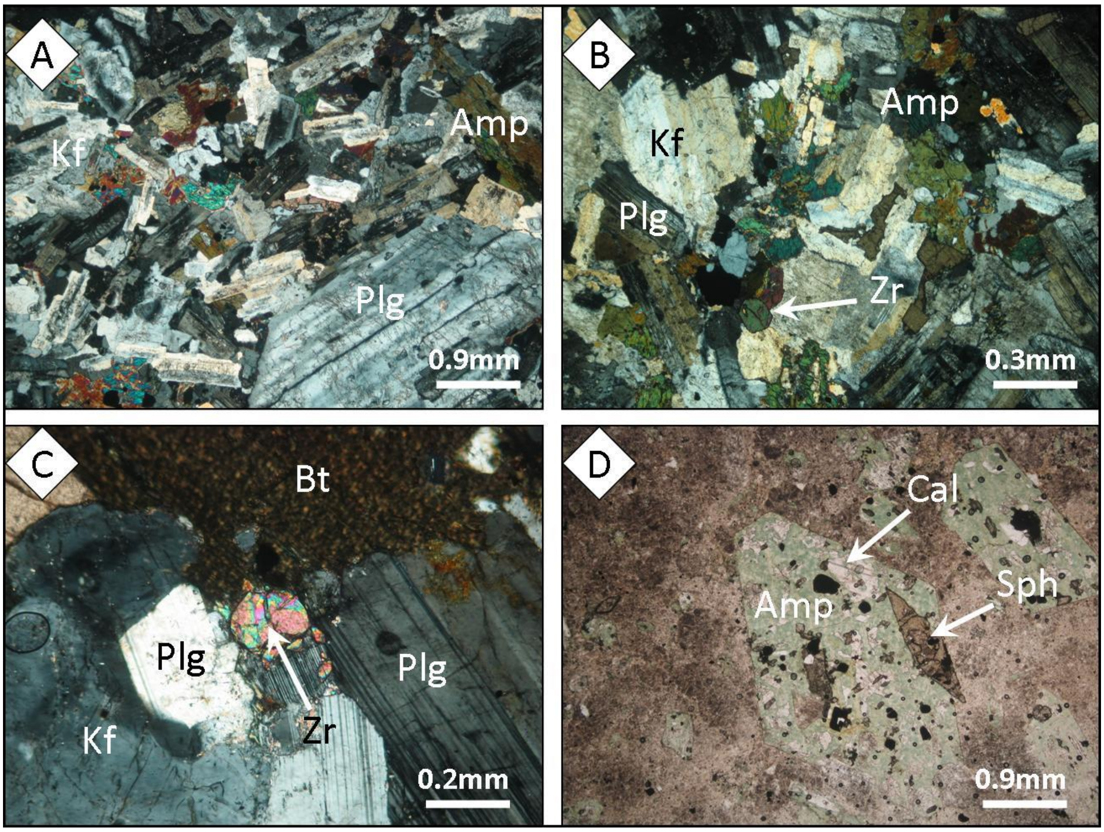
همان‌گونه‌ای که گفته شد برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و سرشت زمین‌شیمیایی- فلززایی سنگ‌های منطقه آق‌درق، شمار ۱۰ نمونه سنگ نفوذی و ۵ نمونه از دایک‌های حدواسط تا اسیدی تجزیه دستگاهی شدند. در ادامه به بررسی این دو واحد اصلی سنگ‌شناسی در منطقه پرداخته می‌شود:

توده نفوذی آق‌درق: توده نفوذی آق‌درق بخشی از مجموعه آذرین شیورداغ به سن الیگوسن و رنگ خاکستری روشن، گوشتی و سفید رنگ فراوان‌ترین واحد سنگی منطقه به‌شمار می‌روند (شکل ۲). برپایه شواهد صحرایی و نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه (Jamali, 2013)، این توده سه زیرگروه سنگی دارد که به ترتیب فراوانی عبارتند از: ۱) گرانیت و گرانودیوریت درشت بلور خاکستری روشن (واحد O^g)، ۲) کوارتزمونزونیت متوسط بلور خاکستری مایل به گوشتی (O^{mz}) و ۳) گرانودیوریت و کوارتزمونزونیت متوسط بلور خاکستری روشن (واحد O^{mg}) (شکل ۲).

از آنجایی‌که رخداد کانی‌سازی در سه محدوده چوپانلار، آیران‌گلی و گودال در میزبان واحدهای O^g و O^{mz} روی داده است، پس نمونه‌برداری و بررسی‌های زمین‌شیمیایی با تاکید بر این دو توده نفوذی انجام شده است. از دیدگاه توزیع فضایی، واحد سنگ‌شناسی O^g بخش بیشتری از سنگ‌شناسی منطقه را در بر می‌گیرد و واحد O^{mz} تنها در بخش‌های شمال‌باختری (کنار اسکارن گودال) و جنوب (میزبان کانی‌سازی چوپانلار) رخنمون دارد (شکل ۲). این توده‌ها ترکیب کانی‌شناسی کمابیش همانند دارند و دربردارندهٔ کانی‌هایِ پتاسیم‌فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند، بیوتیت و کانی‌های فرعیِ آپاتیت، اسفن و زیرکن هستند (شکل ۴- A). بافت گرانولار یا هم‌اندازه شاخص‌ترین بافت این سنگ‌ها بوده و بزرگی بلورها در آنها ۰/۲ تا ۰/۷ میلیمتر است (شکل‌های ۴- B و ۴- C).

دایک‌های حدواسط تا اسیدی: در منطقه معدنی آق‌درق، دایک‌ها از دیدگاه حجمی کمتر از ۱۰ درصد سنگ‌های منطقه را در بر می‌گیرند. این دایک‌ها سرشت حدواسط تا اسیدی و ترکیب گرانیت و سینیت پورفیری، آپلیت، دیوریت و گرانودیوریت دارند و رخنمونی آنها به پهنای نزدیک به ۱ متر و درازای ۵۰ متر تا بیش از ۱ کیلومتر است. دایک‌های اسیدی با رنگ خاکستری روشن و دایک‌های حدواسط با رنگ ظاهری قهوه‌ای تا سبز تیره و با روند شمالی- جنوبی، بلورهای ریز تا متوسط دارند. فراوانی دایک‌های حدواسط از دایک‌های اسیدی بیشتر است و رخنمون بیشتر دایک‌های اسیدی در نزدیکی منطقه چوپانلار دیده می‌شود (شکل ۲). دایک‌های حدواسط با بافت‌های آفانیتیک تا پورفیری هستند و از دیدگاه کانی‌شناسی دربردارندهٔ درشت بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت، با زمینه‌ای از ریزبلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت، پتاسیم‌فلدسپار و کانی‌های کدر هستند (شکل ۴- D). دایک‌های

اسـیدی نیـز بافـت میکروپـورفیری دارنـد و از دیـدگاه کانی‌شناسی دربردارنـدۀ کـانی‌هـای پتاسـیم‌فلدسـپار، پلاژیـــوکلاز، کـــوارتز، بیوتیـــت و مقـــدار نـــاچیزی هورنبلند هستند.



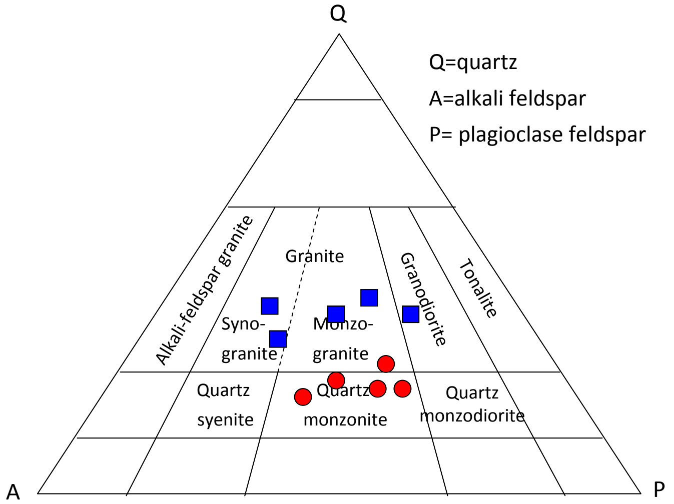
شـکل ۴- تصـویرهای میکروسـکوپی از سـنگ‌نگـاری واحـدهای نفـوذی و دایـک‌هـای منطقـه آق‌درق (شـمال اهـر) (تصـویرهای XPL): A) کـانی‌هـای آمفیبـول، پتاسیم‌فلدسـپار، اسـفن، کـوارتز و پلاژیـوکلاز در کوارتزمونزونیـت (O^{mz})؛ B، C) بافـت‌هـای گرانـولار بـه‌ترتیـب، در گرانودیوریـت (O^{g}) و کوارتزمونزونیـت (O^{mz}) بـا کـانی‌هـای آمفیبـول، پلاژیـوکلاز، پتاسـیم‌فلدسـپار، بیوتیـت، کـوارتز و کـانی کـدر؛ D) بافت پورفیری در دایـک آنـدزیتی بـا کـانی‌هـای آمفیبـول، پلاژیـوکلاز، آپاتیـت و اسـفن درشـت بلـور (Kf= پتاسـیم‌فلدسـپار؛ Sph= اسـفن؛ Amp= آمفیبول؛ Bt= بیوتیت؛ Cal= کلسیت؛ Zr= زیرکن؛ Plg= پلاژیوکلاز)

زمین‌شیمی سنگ‌های آذرین

زمین‌شیمی عنصرهای اصلی

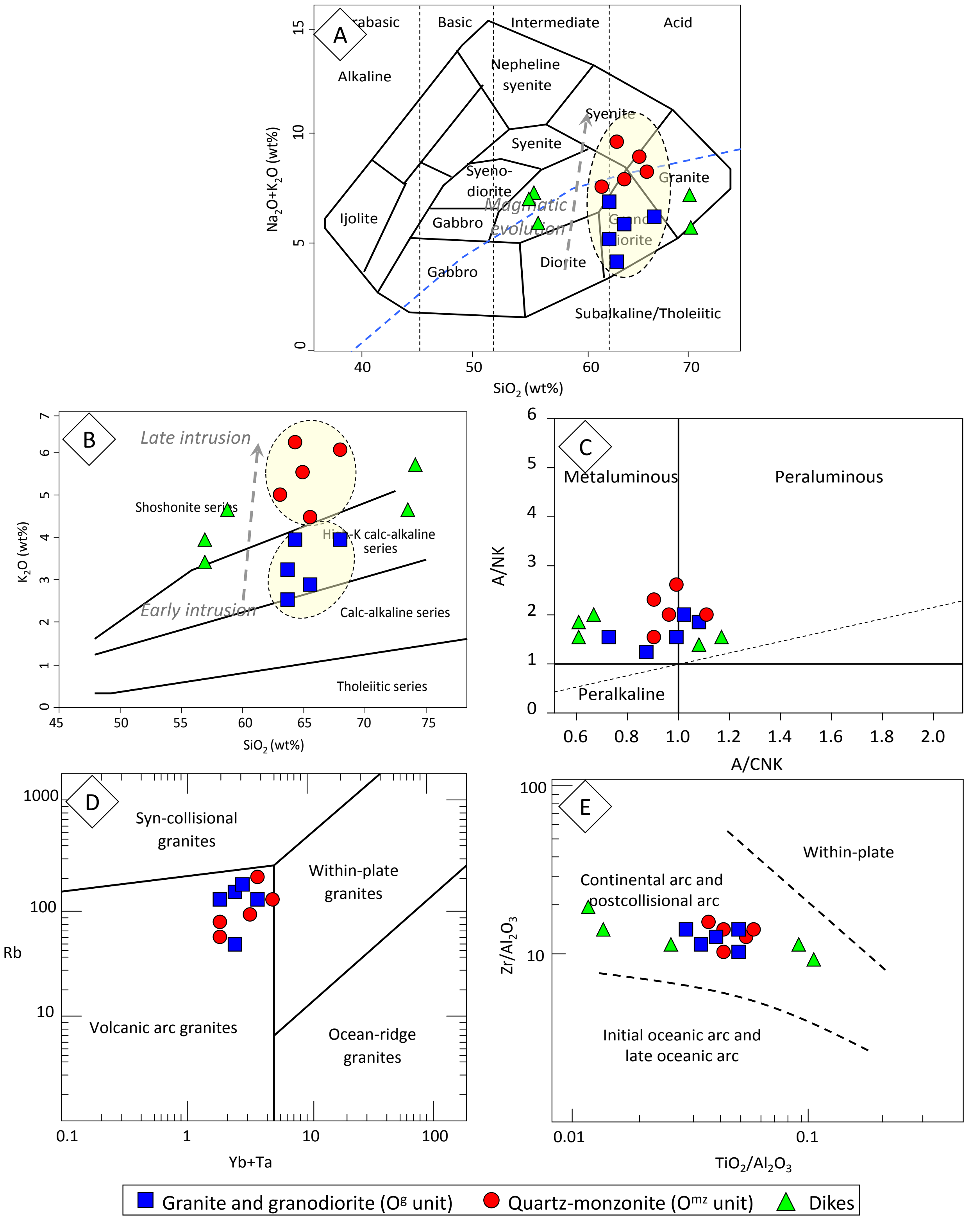
برپایــه رده‌بنــدی QAPF (Streckeisen, 1976)، تـوده‌هـای نفـوذی آق‌درق در گسـترۀی سـینوگرانیت- مونزوگرانیـت، گرانودیوریـت و کوارتزمونزونیـت جـای دارنـد (شـکل ۵). همچنـین، ایـن سـنگ‌هـا در نمـودار عنصـــرهای آلکـــالی کـــل (Na_2O+K_2O) در برابـــر ســـیلیس (SiO_2) (Cox et al., 1979) در محـــدوده گرانیـت و گرانودیوریـت بـا سرشـت سـاب‌آلکـالن تـا آلکـالن جـای گرفتـه‌انـد (شـکل ۶- A). برپایـه ایـن نمودار، دایک‌های منطقـه نیـز در محـدوده گرانیـت تـا دیوریت هسـتند. در تـوده‌هـای آذریـن درونـی منطقـه، میـــزان SiO_2 برابـــر بـــا ۶۳/۵ تـــا ۶۷/۶ wt%، Al_2O_3 برابـــر بـــا ۱۴ تـــا ۱۶/۵ wt% و Na_2O و K_2O بــه‌ترتیــب، برابــر بــا ۳ تــا ۴/۳ wt% و ۲/۲ تــا ۵/۷ wt% اســـت (جـــدول ۱). همچنـــین، نســـبت K_2O/Na_2O برابــر بــا ۰/۵ تــا ۱/۸ اســت. برپایــه داده‌های زمیـن‌شـیمیایی، دایـک‌هـای اسـیدی منطقـه

Nb/Y نزدیک به ۰/۵ و نسبت Zr/TiO_2 نزدیک به ۰/۱ دارند. بیشتر دایک‌های بازیک نیز با TiO_2 بالاتر و Zr کمتر از سنگ‌های اسیدی شناخته می‌شوند (جدول ۱).



شکل ۵- نمودار سه‌تایی کوارتز- آلکالی‌فلدسپار- پلاژیوکلاز (Streckeisen, 1976) برای رده‌بندی توده‌های آذرین درونی منطقه آق‌درق (شمال اهر) (نمادها مانند شکل ۶ هستند)

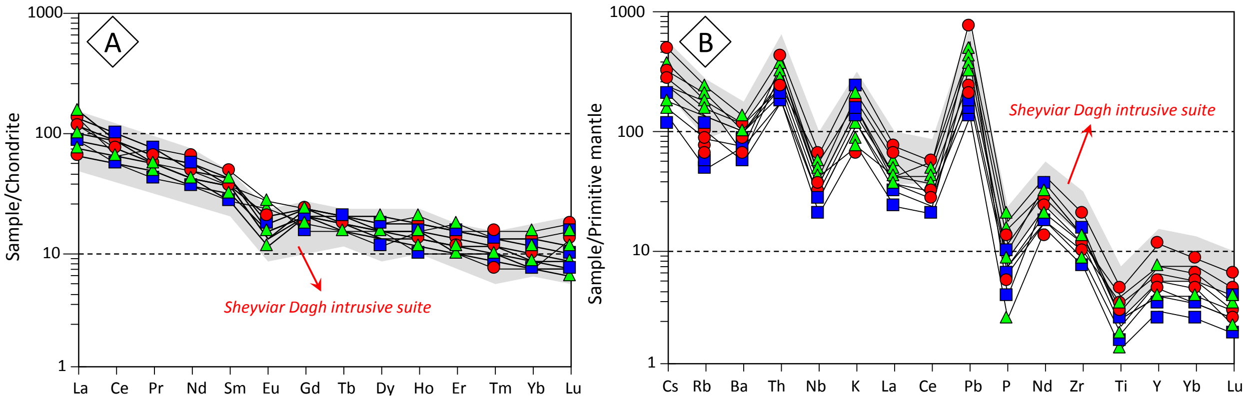
به مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین با ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی متفاوت که در پی جدایش ماگمایی از یک ماگمای بازیک پدید آمده باشند، سری ماگمایی گویند (Winter, 2001). برای بررسی سری‌های ماگمایی برپایه میزان آلکالینیتی (درجه قلیایی) سنگ‌ها، نمودار دوتایی SiO_2 در برابر K_2O (Le Maitre et al., 1989) به‌کار برده می‌شود. در این نمودار،سنگ‌های منطقه در گستره کالک‌آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی جای گرفته‌اند (شکل ۶- B). به باور Aghazadeh و همکاران (۲۰۱۱)، مجموعه ماگمایی شیورداغ از دیدگاه میزان آلکالینیتی، دست‌کم با دو چرخه ماگمایی کالک‌آلکالن (چرخه ۱) و شوشونیتی (چرخه ۲) شناخته می‌شود که این ویژگی زمین‌شیمیایی در میان واحد نفوذی نخستین O^g و واحد تأخیری O^{mz} در منطقه آق‌درق نیز دیده می‌شود (شکل ۶- B). همان‌گونه‌که در شکل‌های ۶- A و ۶- B دیده می‌شود، واحد تأخیری O^{mz} میزان آلکالینیتی (Na_2O+K_2O) بالاتری دارد. برای ارزیابی میزان اشباع‌پذیری سنگ‌ها از آلومینیم (اندیس اشباع آلومین)، نمودار دوتایی نسبت‌های مولار (Al_2O_3/Na_2O+K_2O) یا A/NK در برابر (Al_2O_3/Na_2O+K_2O+CaO) یا A/CNK (Maniar and Piccoli, 1989) به‌کار برده می‌شود. سنگ‌های نفوذی منطقه در محدودهٔ متاآلومینوس تا کمی پرآلومینوس جای گرفته‌اند (شکل ۶- C). در نمودار بررسی جایگاه زمین‌ساختی گرانیتوییدها (Pearce et al., 1984)، توده‌های نفوذی منطقه از گرانیت‌های کمان آتشفشانی به‌شمار می‌روند (شکل ۶- D). برپایه بررسی‌های Muller و Groves (۲۰۱۶)، برای شناسایی خاستگاه سنگ‌های متاآلومینوسِ پتاسیم بالا (یا شوشونیتی)، نمودار دوتایی TiO_2/Al_2O_3 در برابر Zr/Al_2O_3 به‌کار برده می‌شود. در این نمودار نمونه‌های سنگی در پهنه کمان قاره‌ای و پسابرخوردی جای گرفته‌اند (شکل ۶- E).



شکل ۶- ترکیب سنگ‌های آذرین منطقه آق‌درق (شمال اهر) در: A) نمودار دوتایی SiO_2 در برابر (Na_2O+K_2O) (Cox *et al.*, 1979)؛ B) نمودار دوتایی SiO_2 در برابر K_2O (Le Maitre *et al.*, 1989) برای ارزیابی میزان آلکالینیته سنگ‌ها؛ C) نمودار دوتایی A/CNK در برابر A/NK (Maniar and Piccoli, 1989)؛ D) نمودار دوتایی Yb+Ta در برابر Rb (Pearce *et al.*, 1984)؛ E) نمودار دوتایی TiO_2/Al_2O_3 در برابر Zr/Al_2O_3 (Muller and Groves, 2016)

زمین‌شیمی عنصرهای کمیاب و خاکی نادر

کاربرد نمودارهای عنکبوتی و بهنجارکردن نمونه‌ها به استانداردهایی مانند ترکیب کندریت و گوشته اولیه، از ملاک‌های اصلی ارزیابی پهنه زمین‌ساختی پیدایش ماگما و تحولات سیال- مذاب هنگام پیدایش سنگ‌های یک ناحیه به‌شمار می‌رود. الگوی توزیع عنصرهای کمیاب و خاکی نادر در سنگ‌های منطقه آق‌درق، رفتاری همانند مجموعه نفوذی شیورداغ و به دنبال آن، گستره ماگمایی اهر- ارسباران نشان می‌دهد (شکل‌های ۷- A و ۷- B). نمونه‌های سنگی منطقه آق‌درق با محتوای عنصرهای خاکی نادر کل (∑REE) از ۱۱۲ تا ۱۸۶/۵ ppm در نمودار بهنجارشده سنگ‌ها در برابر ترکیب کندریت (Boynton, 1984)، غنی‌شدگی نسبی دربارهٔ عنصرهای خاکی نادر سبک (LREE) در برابر سنگین (HREE) نشان می‌دهند (∑LREE/∑HREE=۱۲/۲۶) (جدول ۱). همچنین، نسبت $(La/Yb)_n$ در سنگ‌های منطقه از ۹/۲ تا ۲۳/۳ است (جدول ۱). تهی‌شدگی نسبی Eu از ۰/۸ تا ۱/۳ گویایی جدایش بلورینِ آلکالی‌فلدسپار در سنگ‌های منطقه است (شکل ۷- A). در نمودار بهنجارشده سنگ‌ها در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، غنی‌شدگی عنصرهای لیتوفیل با شعاع یونی بالا یا LILE (مانند: Rb، Th و K) پیامد تبادل‌های سیال- مذاب در پهنه فرورانش است (Wilson, 1989)؛ اما تهی‌شدگی از عنصرهای Nb، Zr و Ti از ویژگی‌های ماگمای کالک‌آلکالن مرتبط با کمان‌های آتشفشانی در برابر ماگماهای درون صفحه‌های سنگ‌کره‌ای است (Gioncada *et al*., 2003). تهی‌شدگی نسبی در عنصرهای Ti، Zr و P در بیشتر نمودارها، گویای ارتباط سنگ‌نگاری- شیمیایی در پی تبلور کانی‌های اسفن، زیرکن و آپاتیت در مرحله جدایش ماگمایی است (شکل ۷- B).



شکل ۷- نمودارهای عنکبوتی بهنجارشده در برابر: A) ترکیب کندریت (Boynton, 1984)؛) ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) (نمادها مانند شکل ۶ هستند)

کانه‌زایی و دگرسانی

بخش بیشتری از عملیات‌های پی‌جویی در منطقه کانه‌زایی آق‌درق را سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۳۹۳ انجام داده است و گزارش‌های فراوانی نیز درباره آن منتشر کرده است (Jamali, 2013). برپایه این گزارش‌ها، سه بخش کانه‌زایی، شامل چوپانلار (مس)، آیران‌گلی (مس±طلا±تنگستن) و گودال (آهن±مس) در این منطقه شناسایی شده‌اند. به‌علت ارتباط با مجموعه نفوذی شیورداغ یا باتولیت اهر، پژوهشگرانی مانند Mollai و همکاران (۲۰۰۹) و Jamali و همکاران (۲۰۰۹)، این کانی‌سازی‌ها را دربرداردندهٔ طیفی از اندوخته‌های اسکارن، پورفیری و کم‌ژرف رگه‌ای یا اپی‌ترمال دانسته‌اند. رخداد

کـانی‌سـازی در منطقـه معـدنی آق‌درق بـه سـه صـورت دیـــده مـــی‌شـــود: (۱) اســـتوک‌ورک- انتشـــاری، (۲) رگه‌ای و (۳) جانشینی (اسکارنی).

- کانی‌سازی استوک‌ورک- انتشـاری چوپـانلار همـراه بـا دگرسـانی‌هـای پتاسـیک و فیلیـک و عیـار متوسـط عنصرهای مس (۰/۰۵۶ wt%)، آهـن (۳/۱۴ wt%) و تیتـــــانیم (۰/۲۷ wt%)، در میزبــــان واحـــــد کوارتزمونزونیت (O^{mz}) رخ داده است (شـکل‌هـای ۸- A و ۸- B). در این کانی‌سازی کـانی‌هـای سـولفیدی کالکوپیریت، اسفالریت و پیریـت بـه‌صـورت رگـه‌ای و انتشاری در زمینه سنگ دیده شدند (شکل ۸- C).
- کانی‌سازی رگه‌ای آیران گلی در شـمال منطقـه آق‌درق با عیار متوسط برای عنصرهای مس (۰/۳ wt%)، طـلا (۰/۱ ppm)، تنگســتن (۵۰ ppm) و نقــره (۵ ppm) شناخته می‌شود. در این کانی‌سـازی دسـت‌کـم چهـار گروه رگه به‌ترتیب دیده شدند:

۱) رگچه‌های درشـت‌بلـور آمفیبـول- بیوتیـت (پهنـای ۲ میلیمتر تا ۱ سانتیمتر)، با کانی‌های فرعـی مگنتیـت، روتیـــل، آپاتیـــت و مونازیـــت در میزبـــان واحـــد گرانودیوریت (O^{g}) (شکل ۸- D)؛

۲) رگه سیلیسی تنگستن و طلا (پهنای متوسط ۱ متـر و درازای بیش از ۲۰ متر)، با کانی‌هـای فرعـی شـیلیت، پیریت، طلای آزاد (ابعاد تقریبی ۲۰ میکرون) در کنار استوک کوارتزمونزونیت (شکل ۸- E)؛

۳) رگه- رگچه‌های میلیمتری کوارتز- سولفیدی به‌صورت ناپیوسته و نامنظم در میزبان گرانودیوریت؛

۴) رگچـه‌هـای بـی‌کـوارتز بـا پیریـت و مقـدار نـاچیزی کالکوپیریت.

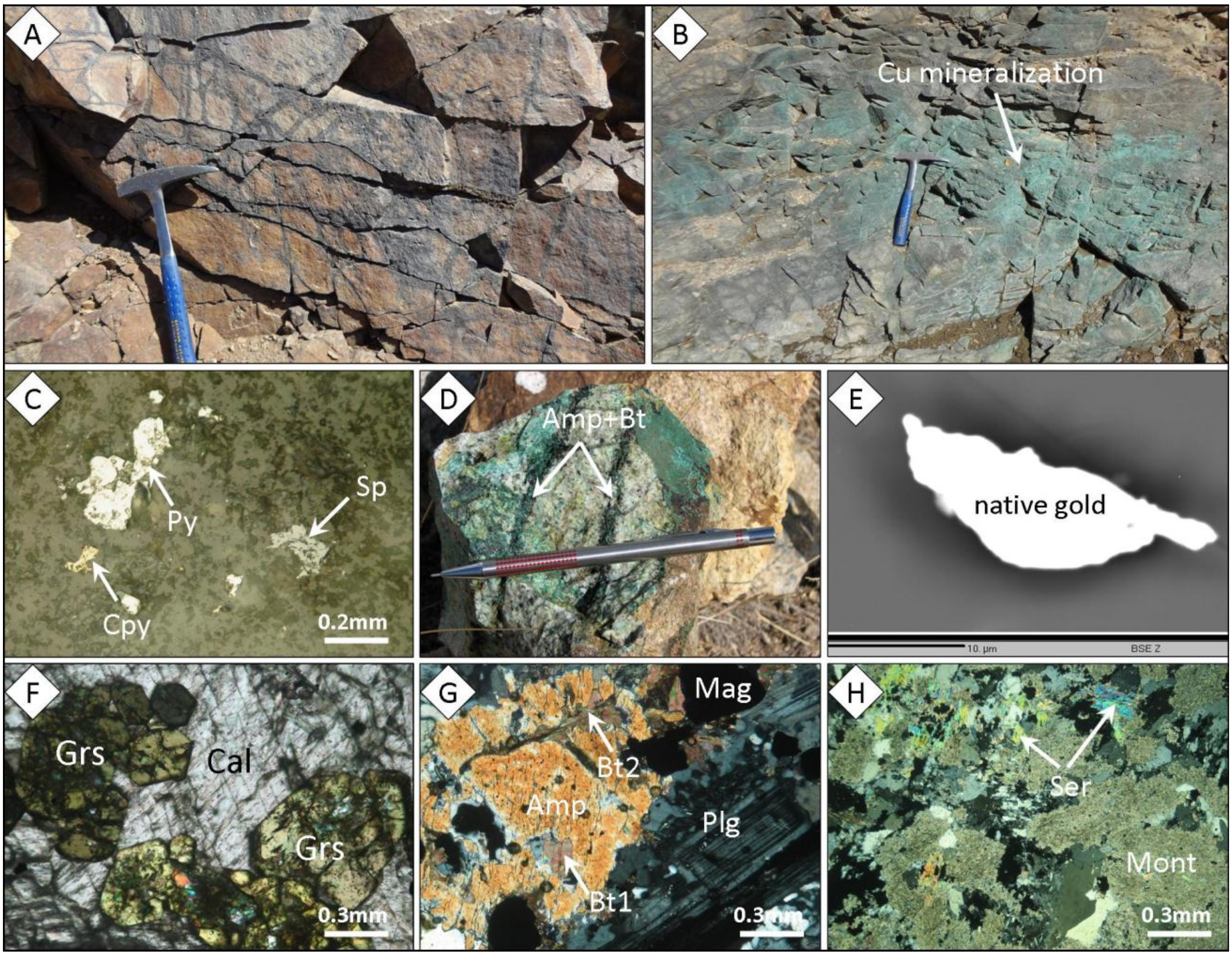
مگر رگه مافیـکِ نخسـت کـه هماننـد بخـش دگرسـانی پتاسیک در مرکز سیستم‌های پورفیری اسـت، بیشـتر رگه‌هـای یادشـدهٔ دیگـر در منطقـه آیـران‌گلـی و در دگرسانی فیلیک و تا اندازه‌ای سیلیسی پدید آمـده‌انـد و آغشتگی‌های اکسید/هیدروکسید آهن نیز گاه آنها را همراهی می‌کنند.

- کانی‌سازی جانشـینی (اسـکارن) گـودال بـا عنصـرهای آهن±مـس، در فاصلـه میـان واحـد نفـوذی اسـتوک کوارتزمونزونیت (الیگوسن) و سنگ‌های کربناته تبلـور دوباره‌یافته (کرتاسه بالایی)، در شمال‌باختری منطقـه آق‌درق رخ داده است (شـکل ۲). مگنتیـت، هماتیـت، کالکوپیریت، کالکوسیت و بورنیت از کانی‌هـای فلـزی در این بخش بوده و متوسط عیار عنصرهای کانـه‌سـاز در آنهـا ۱/۵ wt% آهـن و ۰/۳ wt% مـس اسـت. کانی‌هـای کالـک‌سـیلیکاتهٔ اولیـه (ماننـد: گروسـولار، آنــدرادیت، دیوپســید و هــدنبرژیت) بــا مجموعــه کانی‌های دگرسان (مانند: آمفیبول، اپیدوت، کلسـیت، کوارتز و کلریت) جانشین شده‌اند (شکل ۸- F).

همان‌گونه‌که گفته شد، به دنبال رخـداد فراینـدهای ماگمایی چندمرحله‌ای در منطقـه آق‌درق، ضـربان‌هـای دوره‌ای سیال‌های گرمابی پدیدآمده از ایـن جـایگیری و سردشــدن آرام‌آرام ایــن تــوده‌هــا، پیــدایش هالــه‌هــای دگرسانی گوناگونی را در پـی داشـته اسـت. پیامـد ایـن فرایندها، رخداد دو مجموعـه دگرسـانی جـدا (یکـی در ارتباط با واحد اسـکارن‌زایـی منطقـه گـودال و دیگـری دگرسـانی‌هـای مـرتبط بـا کـانی‌سـازی اسـتوک‌ورک- انتشاری و رگه‌ای مناطق چوپـانلار و آیـران‌گلـی) اسـت (Asgharzadeh-Asl, 2014). دگرسـانی‌هـای پتاسـیک (سیلیکات- پتاسیم)، فیلیک و آرژیلیـک از فـراوان‌تـرین دگرسانی‌های منطقه هستند. دگرسـانی‌هـای سیلیسـی، کلریتی و آغشتگی‌های سـطحی هیدروکسـید آهـن نیـز به‌گونهٔ فرعی دیده می‌شوند.

- دگرسانی پتاسیک یـا سـیلیکات- پتاسـیم در پهنـه‌هـای معدنی چوپانلار و آیران‌گلی با کانی‌های اصلـیِ بیوتیـت (به‌صورت اولیه و نئوفرم)، پتاسیم‌فلدسپار درشت بلـور و کـانی‌هـای فرعـی کـوارتز، آلبیـت و کلریـت شـناخته مـی‌شـود (شـکل ۸- G). ویژگـی‌هـای بـافتی (ماننـد: میرمکیتـــی، پرتیتـــی و بافـــت نئوفرمـــه بیوتیـــت) از نشانه‌هـای رخـداد دگرسـانی پتاسـیک در کانسـارهای مــس- مولیبـدن پـورفیری هسـتند (Collins, 1997;

(Meyer and Hemley, 1997). کانه‌های فلزی کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت و روتیل نیز همراه این دگرسانی دیده می‌شوند. دگرسانی پتاسیک در منطقه کانه‌زایی چوپانلار همراه با کانی‌سازی استوک‌ورک- انتشاری مس- طلا و در منطقه آیران گلی همراه رگچه‌های آمفیبول- بیوتیت پدید آمده است.



شکل ۸- رخنمون‌های صحرایی و تصویرهای میکروسکوپی XPL از کانه‌زایی و دگرسانی‌های منطقه آق‌درق (شمال اهر). A) رخنمون کوارتزمونزونیت (O^{mz}) با شکستگی‌های کانه‌دار در منطقه کانه‌زایی چوپانلار؛ B) کانی‌زایی مس سطحی در میزبان کوارتزمونزونیت (O^{mz}) خاور چوپانلار؛ C) تصویر میکروسکوپی بازتابی از کانه‌زایی انتشاری پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت، D) رگچه‌های سانتیمتری آمفیبول و بیوتیت در میزبان گرانودیوریتی (O^{g}) منطقه کانه‌زایی آیران‌گلی؛ E) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (BSE) از حضور طلای آزاد در کنار کوارتزمونزونیت (O^{mz})، F) درهم‌رشدی گارنت گروسولار و کلسیت در بخش کانه‌زایی اسکارن گودال؛ G) دگرسانی پتاسیک با رخداد بیوتیت‌های اولیه و نئوفرم در میزبان آمفیبول به‌همراه مگنتیت و پلاژیوکلاز؛ H) دگرسانی آرژیلیک با مونت‌موریونیت و سریسیت در منطقه چوپانلار (Cpy: کالکوپیریت؛ Sp: اسفالریت؛ Py: پیریت؛ Mag: مگنتیت؛ Ser: سریسیت؛ Mont: مونت‌موریونیت؛ Amp: آمفیبول؛ Bt: بیوتیت؛ Cal: کلسیت؛ Grs: گروسولار؛ Plg: پلاژیوکلاز)

- دگرسانی فیلیک نیز در کانه‌زایی‌های آیران گلی و خاور روستای چوپانلار رخنمون گسترده‌ای دارد و در کنار پهنه پتاسیک روی داده است. این دگرسانی با کانی‌های اصلی کوارتز ریزبلور، سریسیت و پیریت و کانی‌های فرعی آلبیت و کلریت شناخته می‌شود. در این پهنه دگرسانی، کانی ثانویه سریسیت در پی

رابطـه ۱ (Meyer and Hemley, 1997)، جانشـین درشت بلورهای پتاسیم‌فلدسپار شـده‌انـد و بلورهـای کـوارتز بـا بزرگـی کمتـر از ۰/۲ میلیمتـر در فضـای پیرامون آنها پدید آمده‌اند.

رابطه ۱:

$$3KAlSi_3O_8+2H^+ \rightarrow KAl_3SiO_{10}(OH)_2+2K^++6SiO_2$$

K- feldspar → muscovite/sericite + quartz

- دگرسـانی آرژیلیـک بـا کـانی‌هـایِ مونـت‌موریونیـت، ایلیـــت، پیریـــت و موســـکوویت، کمـــابیش در سراســر منطقــه آق‌درق گســترش دارد. بیشــترین فراوانی ایـن دگرسـانی در خـاور روسـتای چوپـانلار و شــمال روســتای آق‌درق جدیـد دیـده مـی‌شـود (شـــکل‌هـــای ۲ و ۸- H). بخـــش بزرگـــی از ایـــن دگرســـــانی از تجزیـــــه درشـــــت بلورهـــــای پتاسیم‌فلدسـپار پدیـد آمـده اسـت و گسـترش آن در راسـتای پهنـه‌هـای گسـلی و شکسـتگی‌هـای محلی منطقه بیشتر است.

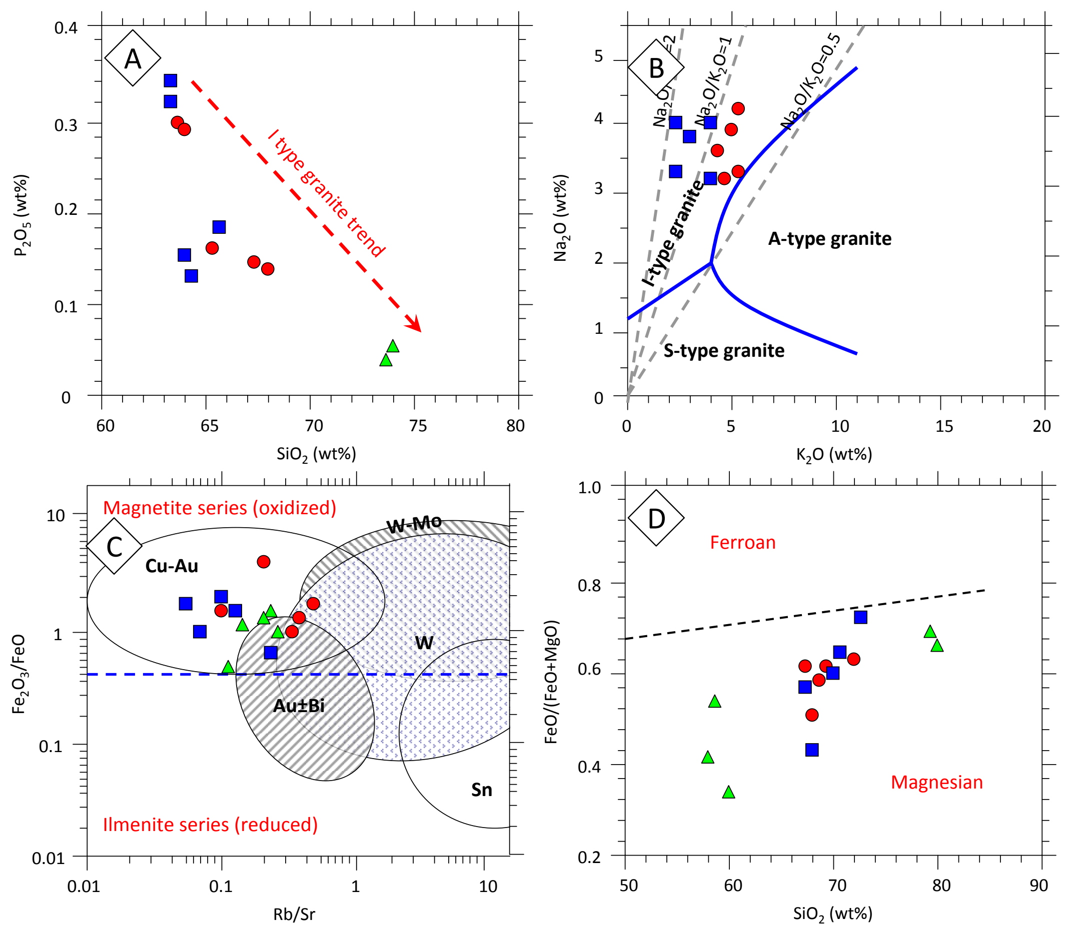
بحث

الف- خاستگاه گرانیتوییدها

دســـتیابی بـــه خاســـتگاه ماگمـــایی و پهنـــه زمین‌ساختی مجموعه‌هـای سـنگی یـک منطقـه نقـش مهمـی در پیشـبرد اهـداف اکتشـافی و دسترسـی بـه تـوان فلززایـی و کانـه‌زایـی تـوده‌هـای نفـوذی خواهـد داشــت. گســتره اهــر- ارســباران در شــمال‌بــاختری ایران از پهنه‌های بـا تـوانِ کانـه‌زایـی‌هـای چنـدفلزی و وابسـته بـه تـوده‌هـای آذریـن درونـی اکسـیدی/احیاء اسـت. بررسـی‌هـای Wu و همکـاران (۲۰۰۳)، Li و همکــــاران (۲۰۰۷) و Zhu و همکــــاران (۲۰۰۹)، گویـای آنسـت کـه ترکیـب آپاتیـت‌هـا شاخصـی بـرای شناسـایی گرانیتوییـدهای تیـپ I وS اسـت. برپایـه ایــن بررســی‌هــا، انحــلال آپاتیــت در مــذاب‌هــای گرانیتـی متـاآلومین تـا پرآلـومین کـم اسـت و بـا افـزایش میـزان SiO_2 کـاهش مـی‌یابـد. بررسـی‌هـای زمـین‌شـیمیایی در گرانودیوریـت و مونزوگرانیـت‌هـای منطقـه آق‌درق گویـای آنسـت کـه ایـن سـنگ‌هـا بـا ماهیـــت متـــاآلومین تـــا کمـــی پرآلـــومین (۱/۱-A/CNK=۰/۷)، بـــا افـــزایش میـــزان SiO_2 محتـــوای P_2O_5 در آنها کـاهش یافتـه اسـت. برپایـه بررسـی‌هـای Zhang و همکـاران (۲۰۱۶)، ایـن رونـد سـازگار بـا روند گرانیتوییدهای تیپ I است (شکل۹- A).

افـزون‌بـر ایـن، بـا کـاربرد نسـبت Na_2O/K_2O و رسـم آن در نمـودار دوتـایی درصـد وزنـی Na_2O در برابـر K_2O (Collins et al., 1982; Zhang et al., 2009)، گرانیتوییـــــدهای تیـــــپ‌هـــــای A ،I و S از یکـدیگر شناسـایی مـی‌شـوند. بـر پایـه ایـن نمـودار، سـنگ‌هـای آذریـن درونـی منطقـه آق‌درق بـا نسـبت Na_2O/K_2O برابـــر بـــا ۰/۵ تـــا ۲، در محـــدوده گرانیتوییـدهای تیـپ I جـای گرفتـه‌انـد (شـکل ۹- B). نمـودار دوتـایی وضـعیت اکسیداسـیون در برابـر درجه جدایش بلـوریِ ماگمـا، بـه‌ترتیـب، بـه دو متغیـر Fe_2O_3/FeO در برابـر Rb/Sr وابسـته اسـت (Baker *et al.*, 2005). در ایـن نمـودار، سـنگ‌هـای منطقـه در محدوده سـری مگنتیتـی بـا تـوان کـانی‌سازی طیفـی از عنصـــــرهای Cu-Au ،W-Mo و Au±Bi جـــــای گرفته‌اند (شکل ۹- C).

برپایـــه بررســـی‌هـــای Mahdy و همکـــاران (۲۰۱۵)، گرانیتوییـدها معمـولاً دو ترکیـب آهنـی (ferroan) و منیزیمـی (magnesian) نیـز دارنـد. نوع آهنـی آنهـا بیشـتر بـه رخـداد عنصـرهای فلـزی پایـه و مولیبـدن (Cu- Fe- Mo) و نـوع منیزیمـی بـه کانـه‌زایـی‌هـای عنصـرهای W- Au±Bi وابسـته اســـت. ازایـــن‌رو، در نمـــودار دوتـــایی $FeO_t/(FeO_t+MgO)$ در برابـر درصـد وزنـی SiO_2 (Frost et al., 2001)، ســنگ‌هــای منطقــه در محـدوده گرانیتوییـدهای منیزیمـی نـوع I جـای گرفته‌اند (شکل ۹- D).



شکل ۹- نمودارهای زمین‌شیمیایی برای ارزیابی خاستگاه سنگ‌های منطقه آق‌درق (شمال اهر). A) نمودار دوتایی SiO_2 در برابر P_2O_5 (Zhang *et al.*, 2016)؛ B) نمودار دوتایی درصد وزنی Na_2O در برابر K_2O برای تفکیک گرانیت‌های تیپ I، A و S؛ C) نمودار دوتایی Fe_2O_3/FeO در برابر Rb/Sr (Baker *et al.*, 2005) برای نمونه‌های مرتبط با سری‌های مگنتیتی عنصرهای کانه‌ساز Cu-Au±W±Bi؛ D) نمودار دوتایی $FeO_t/(FeO_t+MgO)$ در برابر SiO_2 (Frost et al., 2001) (نمادها مانند شکل ۶ هستند)

ب- اسکارن‌زایی و مراحل رخداد کانسنگ رگه‌ای

برپایه یافته‌های به‌دست‌آمده، منطقه کانه‌زایی آق‌درق نمونه‌ای از سامانه‌های کانه‌زایی اکسیدی است که در دوره زمانی کمابیش کوتاه ۷ میلیون ساله‌ای در الیگوسن (۲۳/۳±۰/۵ تا ۳۰/۸±۲/۱ میلیون سال پیش)، در پی دو چرخه زمانی ماگماتیسم (Aghazadeh *et al.*, 2011)، مجموعه‌های ماگمایی کالک‌آلکالن سرشار از پتاسیم تا شوشونیتی را پدید آورده است. برپایه بررسی‌ها، در منطقه کانه‌زایی گودال (شمال‌باختری منطقه آق‌درق)، نفوذ استوک کوارتزمونزونیت تیپ I (الیگوسن) در میزبان سنگ‌های کربناته متبلور (کرتاسه بالایی)، رخداد مجموعه گارنت- پیروکسن اسکارن پیشرونده را به‌دنبال داشته است. پس از آن با آزادشدن مقدارهای بالای $CaCl_2$ از سنگ‌های کربناته اطراف و به‌دنبال آن، افزایش فشار گاز اکسیژن (fO_2) در پی شکسته‌شدن پیوندهای OH در کانی‌های آبدار (مانند: هورنبلند و بیوتیت) در استوک کوارتزمونزونیتی، اکتینولیت در مرحله اسکارن پسرونده برپایه رابطه‌های ۲ و ۳ (Luo *et al.*, 2014) پدید آمده است. در نتیجه واکنش سیال کلریدی سرشار از آهن ($FeCl_2$) با کانی اکتینولیت بلورهای مگنتیت برپایه رابطه ۴ (Luo *et al.*, 2014) پدید آمده و کوارتز آزاد شده است.

رابطه ۲:

$$(Fe,Mg)_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2 + 2CaCl_2 \rightarrow Ca_2(Mg,Fe)_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2 + 2FeCl_2$$

hornblende → actinolite

رابطه ۳:

$$2K(Fe, Mg)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2 + 2CaCl_2 + 2SiO_2 \rightarrow Ca_2(Mg, Fe)_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2 + Al_2O_3 + 2KCl + 2FeCl_2 + H_2O$$

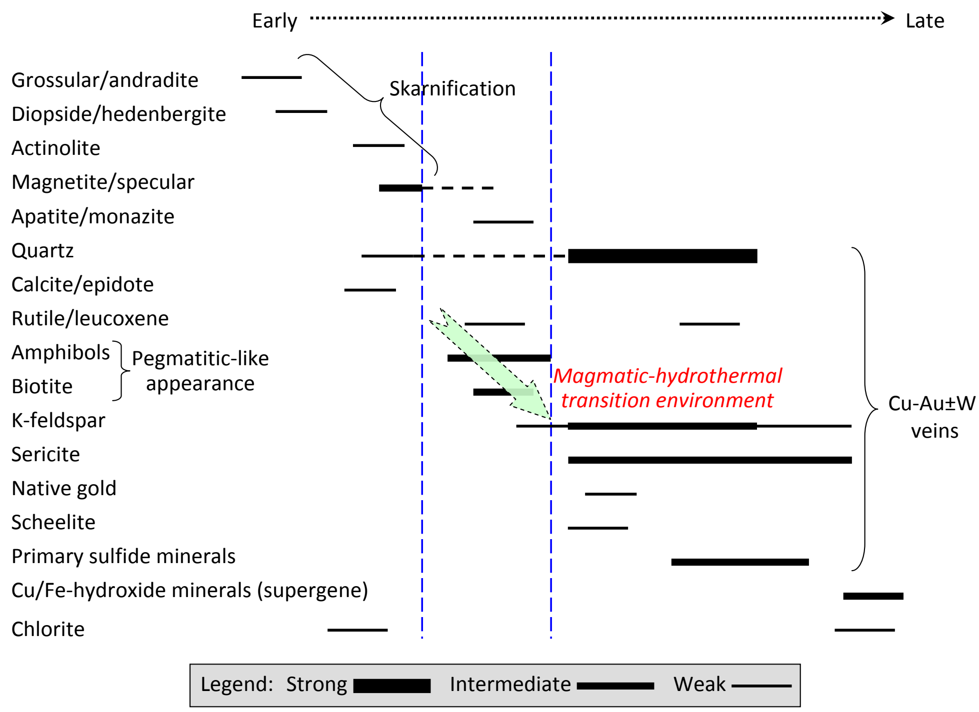
biotite → actinolite

رابطه ۴:

$$Ca_2(Mg,Fe)_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2 + FeCl_2 + 2Cl_2 \rightarrow 2Fe_3O_4 + 2CaCl_2 + 2HCl + 8SiO_2$$

actinolite → magnetite

ویژگی‌هایی مانند دارابودن گارنت نوع آندرادیت در مرحله اسکارن پیشرونده، فراوانی مگنتیت و هماتیت در مرحله اسکارن پسرونده، غنی‌شدگی توده از LREE و تهی‌شدگی Eu درپی حضور آلکالی‌فلدسپار، همگی گویای سرشت اکسیدان استوک کوارتزمونزونیتی و اسکارن وابسته به آن است. به باور Newberry (۱۹۸۳)، گارنت‌های کلسیک (مانند: آندرادیت و گروسولار) و پدیدنیامدنِ گارنت‌های کم‌کلسیم یا subcalcic (مانند: اسپسارتین و پیروپ) در هنگام مرحله اسکارن پیشرونده از زمینه‌های توانمندیِ کانه‌زایی‌های تنگستن در یک منطقه است. پس در بخش خاوری اسکارن گودال و مجاور استوک کوارتزمونزونیت (شکل ۲)، رگه سیلیسیِ دارای شیلیت ($CaWO_4$) و طلا، گواهی بر این کانی‌سازی است. افزون براین، رگچه‌های مافیک آمفیبول- بیوتیت با چهره پگماتیتی، همراه با کانی‌های فرعیِ مونازیت، روتیل و آپاتیت در منطقه آیران‌گلی، گویای رویداد سامانه تحولی ماگمایی- گرمابی است و بخش‌های ژرف (بیش از ۴ کیلومتر) اندوخته‌ای از مس پورفیری را نشان می‌دهد (Wolf and Cooke, 2011). این رگچه‌ها که به‌نام رگه‌های شاخص تیپ P (primitive) شناخته می‌شوند (Harris *et al.*, 2004)، بخش انتقالی از سامانه‌ای اسکارنی به بخش گرمابی- ماگمایی دانسته می‌شوند (شکل ۱۰).



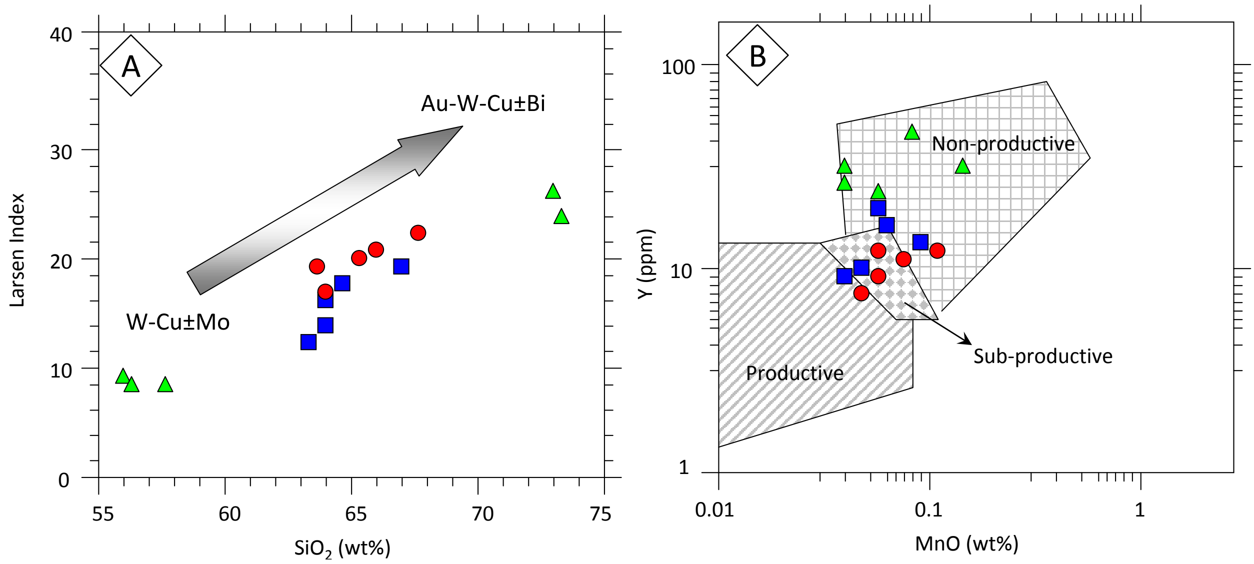
شکل ۱۰- مرحله‌های زمانی اسکارن‌زایی و رخداد سری کانی‌ها در منطقه کانه‌زایی آق‌درق (شمال اهر) (توضیح بیشتر در متن آورده شده است)

با گذشت زمان و کاهش آرام‌آرامِ دمای سامانه، نسبت fO_2/fS_2 کم‌کم کاهش یافته و با گذر از کانی‌سازی اکسیدی و کاهش pH سیال، رگه-رگچه‌های کوارتز- سولفیدی و پس از آن، سولفیدی بی‌کوارتز در منطقه آیران‌گلی پدید آمده است.

پ- ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و توان فلززایی سنگ‌های منطقه

در این پژوهش ویژگی‌های زمین‌شیمیایی- فلززایی سنگ‌های آذرین درونی منطقه آق‌درق با به‌کارگیری اکسیدهای اصلی و عنصرهای کمیاب بررسی شدند. برپایه این ویژگی‌ها، گویا توده‌های آذرین درونی منطقه آق‌درق، به‌ویژه کوارتزمونزونیت‌ها (O^{mg})، در جابجایی سیال‌های گرمابی کانه‌ساز و نیز خاستگاه تأمین فلز نقش مهمی داشته است. همان‌گونه‌که داده‌های زمین‌شیمیایی جدول ۱ نشان می‌دهند، نوعی تحول شیمیایی در توده‌های آذرین درونی منطقه، به‌ویژه سنگ‌های O^g و O^{mz} دیده می‌شود که در پی آن، خاستگاه سنگ‌های O^g، فاز ماگمایی اولیه با نسبت کم K/Na و Fe_2O_3/FeO بوده است و پس از آن، سنگ‌های O^{mz} به‌صورت فاز تأخیری سرشار از پتاسیم (K/Na>1) و اکسیدان ($Fe_2O_3/FeO>1$) در منطقه پدید آمده‌اند. محتوای بالای عنصرهای فرار در ماگمای سرشار از پتاسیم تا شوشونیتی پیامد اشباع‌شدگی آب در سنگ‌هایی با درجه تبلور کمی است که محتوای SiO_2 در آنها ۶۵ تا ۷۰ wt% بوده و با رخداد عنصرهای W+Mo سازگار هستند (Soloviev, 2014). اشباع‌شدگی آب در سیستم‌های ماگمایی با نسبت کم اکسیژن و عنصرهای قلیایی نیازمند میزان بیشتری از درجه تبلور ماگماست (Newberry, 1998). از سوی دیگر، میزان اکسیژن بالای ماگما، همراه با محتوای بالای آب، غنی‌شدگی نسبی ماگما از سولفید مس را در پی دارد (Jenner *et al.*, 2010). این پدیده رخداد مس همراه تنگستن در منطقه آیران‌گلی را به‌دنبال داشته است. نبود گرانیتوییدهای آهنی سرشار از اکسیژن و مذاب‌های سیلیسی اشباع از مولیبدن (مانند: ریولیت‌های سرشار از سیلیس) وابسته به پهنه‌های زمین‌ساختیِ درون صفحه‌ای از علت‌های نبود دخداد مولیبدن در منطقه آیران‌گلی، است (Mahdy *et al.*, 2015). مولیبدن عنصری ناسازگار است که همواره در مذاب بجامانده (residual melt) غنی می‌شود و تنها در توده‌های آذرین درونی با جدایش بلورین درجه بالا انباشته می‌شود (Candela and Holland, 1986). برپایه این یافته‌ها، درجه تبلور کم ماگما در شرایط اکسیدی، محیط خوبی برای رخداد عنصرهایی مانند طلا و نقره فراهم می‌کند. به‌گونه‌ای‌که این عنصرها در مرحله‌های پایانی تبلور سیستم ماگمایی-گرمابی، همراه با عنصرهای تنگستن، بیسموت و مس ته‌نشین می‌شوند (Wilson *et al.*, 2003). رخداد طلا و نقره با عیارهای متوسط ۰/۱ ppm و ۵ ppm در منطقه آیران‌گلی در این مرحله بوده است. در شکل ۱۱- A، روند رخداد عنصرها برپایه شاخص لارسن (Larsen Index) با ترکیب SiO_2+K_2O-۰/۳۳(FeO+CaO+MgO) در برابر SiO_2 (Soloviev, 2014)، در منطقه بررسی‌شده نشان داده شده است. با به‌کارگیری نمودار دوتایی Y در برابر MnO (Baldwin and Pearce, 1982)،

تـوده‌هـای آذریـن درونـی بـه سـه بخـش مولـد، نیمه‌مولد و نابارور رده‌بندی مـی‌شـوند. سـنگ‌هـای منطقه در محدوده تـوده‌هـای نابـارور تـا نیمـه‌مولـد جای گرفته‌اند (شکل ۱۱- B).



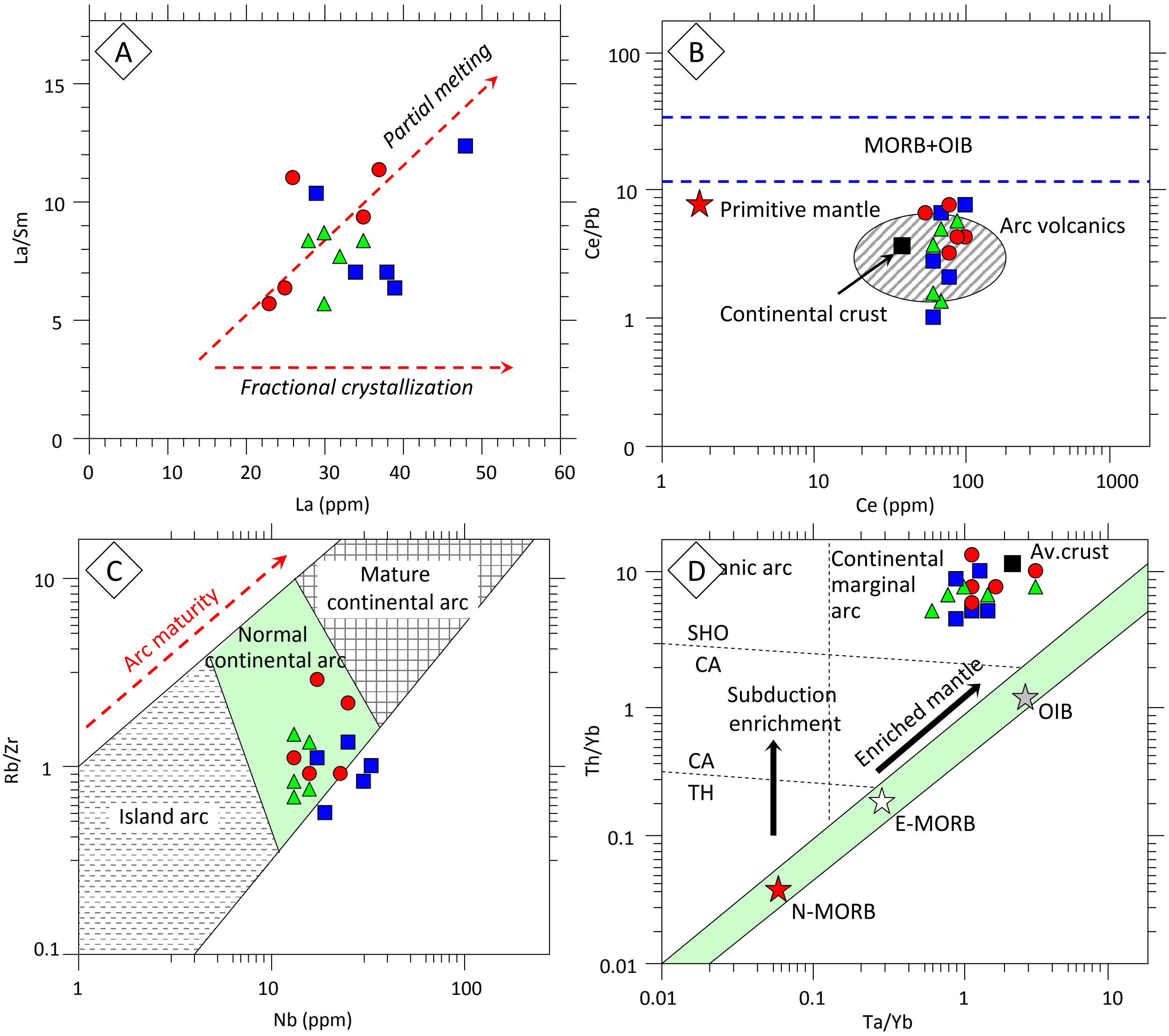
شـکل ۱۱- نمودارهـای زمـین‌شـیمیایی- فلززایـی سـنگ‌هـای منطقـه آق‌درق (شـمال اهـر). A) رونـد رخـداد عنصـرها در نمـودار دوتـایی شـاخص لارسـن (LI) در برابـر SiO_2؛ B) سرشـت نیمـه‌مولـد تـا نامولـد سـنگ‌هـای منطقـه در نمـودار دوتـایی Y در برابـر MnO (نمادها مانند شکل ۶ هستند)

ت- جایگاه زمین‌ساخت و تحولات ماگمایی

آنچـه از بررسـی‌هـای زمـین‌شـیمیایی و کـاربرد نمودارهـای سـنگ‌زایـی و جایگـاه زمـین‌سـاختی سنگ‌ها تا کنون دریافـت مـی‌شـود، وابسـتگی تـوده‌ها و دایک‌های منطقـه (بـا سـن الیگوسـن) بـه پهنـه‌هـای پســابرخوردیِ صــفحه‌هــای قــاره‌ای، بــه‌همــراه نشانه‌های زمـین‌شـیمیایی پهنـه‌هـای فـرورانش اسـت. بـه بـاور Turner و همکـاران (۱۹۹۶)، شـواهد رخـداد فـرورانش در یـک منطقـه پیامـد افـزایش سـیال‌هـای آزادشـــده از لبـــه صـــفحه فرورونـــده و تـــأثیر متاسوماتیســمیِ آن بــر ســنگ‌کــره و در پایــان ذوب سنگ‌کـرهٔ متاسوماتیسـم‌شـده خواهـد بـود. در پـی آن، رخـدادهای چندمرحلـه‌ای گونـاگونی از سـنگ‌هـای کالـــک‌آلکـــالن، آلکـــالن سرشـــار از پتاســـیم و شوشـــونیتی، در دوره زمـــانی کوتـــاهی (short-lived) رخ خواهند داد. این ویژگـی از ویژگـی‌هـای پهنـه‌هـای پسـابرخوردی بـوده کـه در بررسـی‌هـای گسـترده‌ای در شـــمال‌بـــاختری ایـــران گـــزارش شـــده اســـت (Moayyed, 2001; Tajbakhsh et al., 2012; Asgharzadeh-Asl, 2014). برپایــه بررســی‌هــای Wilson (۱۹۸۹)، غنـــی‌شـــدگی عنصـــرهای LILE و LREE در برابـــر تهـــی‌شـــدگی نســـبی عنصـــرهای HFSE و HREE در نمودارهـــای بهنجارشـــده بـــه ترکیـــب کنـــدریت و گوشـــته اولیـــه از ویژگـــی‌هـــای پهنـه‌هـای زمـین‌سـاختی فورانشـی بـوده اسـت. ایـن الگوهـا بـا نمودارهـای عنکبـوتی رسـم‌شـده بـرای سنگ‌های منطقه آق‌درق همخوانی دارد (شکل ۷).

نمودارهــای شناســایی جایگــاه زمــین‌ســاختی و سنگ‌شناسی- زمین‌ساختیِ (پتروتکتونیـک) سـنگ‌هـا (شکل ۶- E) نیز گویای پیدایش سنگ‌هـای منطقـه در

پهنه‌های کمان قاره‌ای و پسابرخوردی است. برپایه یافته‌های به‌دست‌آمده، گویا ذوب‌بخشی گوشته سنگ‌کره پیامد رفتار سیال‌های فرورانش نئوتتیس در محل برخورد صفحه‌های ایرانی – عربی بوده و ماگماتیسم آلکالن سرشار از پتاسیک تا شوشونیتی را به‌دنبال داشته است. برپایه نمودار دوتایی La/Sm در برابر La (Cocherie, 1986)، رابطه خطی مستقیمی در پی غنی‌شدگی La دیده می‌شود که پیامد پیدایش سنگ‌ها به‌دنبال فرایند ذوب‌بخشی (partial melting) است (شکل ۱۲- A).



شکل ۱۲- نمودارهای تحولات زمین‌شیمیایی فرایندهای زمین‌ساختی برای سنگ‌های آق‌درق (شمال اهر). A) نمایش رخداد فرایند ذوب‌بخشی در نمودار دوتایی La/Sm در برابر La (Cocherie, 1986)؛ B) نمودار دوتایی Ce/Pb در برابر Ce (Boztug *et al.*, 2007)؛ C) نمودار دوتایی Rb/Zr در برابر Nb (Brown *et al.*, 1984)؛ D) نمودار دوتایی Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 2008) (TH: تولییتی؛ CA: کالک‌آلکالن؛ SHO: شوشونیتی) (نمادها مانند شکل ۶ هستند)

نمودار نسبت عنصرهای کمیاب Ce/Pb در برابر Ce (Boztug *et al.*, 2007) (شکل ۱۲- B)،

گویـای خاسـتگاه کمـام آتشفشـانی بـرای سـنگ‌هـای منطقـه اسـت. همچنــین، جـای‌گـرفتن نمونــه‌هـا در بخش کمـان قـاره‌ای عـادی در نمـودار دوتـایی Rb/Zr در برابـــر Nb (Brown *et al.*, 1984)، نیـــز نشـان‌دهنـدۀ ایـن نکتـه اسـت (شـکل ۱۲- C). برپایـه نمـودار دوتـایی نسـبت‌هـای عنصـری کمیـاب Th/Yb در برابـــر Ta/Yb (Pearce, 2008)، کـــــه در آن سرشـت شـیمیایی سـنگ‌هـا، بـه‌همـراه جایگـاه زمـین‌سـاختی آنهـا شـناخته مـی‌شـود، نمونـه‌هـای سنگی منطقـه بررسـی‌شـده بـا سرشـت شوشـونیتی در محـــدوده ســـنگ‌هـــای پدیدآمـــده از گوشـــته‌ای غنی‌شده در پهنه کمان‌هـای فعـال حاشـیه قـاره جـای گرفته‌اند (شکل ۱۲- D).

نتیجه‌گیری

پهنـه فلززایـی اهـر- ارسـباران در شـمال‌بـاختری ایـران بـوده و دربردارنـدۀ تـوده‌هـای آذریـن درونـی اکسـیدی و احیـایی اسـت. ایـن پهنـه از پهنـه‌هـای توانمنـد بـرای کانـه‌زایـی‌هـای چنـدفلزی بـه‌شـمار مـــی‌رود. برپایـــه یافتـــه‌هـــای بـــه‌دســـت‌آمـــده، گرانیتوییـدهای اکسـیدان و احیـاء مـرتبط بـا رخـداد طـلا، بـه‌همـراه کـانی‌سـازی سـولفیدی بـا مقـدارهای بـــــالایی از عنصـــــرهای W، Cu و Bi (±Te±As) هسـتند. هنگـام ایـن رخـداد، سـنگ‌هـای آذریـن درونـیِ ایلمنیتـی و مگنتیتـی بـه‌ترتیـب، پیـدایش اندوختـه‌هـای اسـکارن احیـایی و اکسـیدی را در پی داشته‌اند.

گســترۀ کانـــه‌زایـــی آق‌درق در بخـــش خـــاوری مجموعـه نفـوذی شـیورداغ نمونـه‌ای از سـامانه‌هـای کانـــه‌زایـــی اکســـیدی بـــوده کـــه در دوره زمـــانی کمـــابیش کوتـــاه ۷ میلیـــون ســـاله‌ای در الیگوســـن (۰/۵±۲۳/۳ تـــا ۲/۱±۳۰/۸ میلیـــون ســـال پـــیش)، بـه‌دنبـال دو چرخـه زمـانی ماگماتیسـم پدیـد آمـده اسـت. چرخـه ماگمـایی نخسـت بـا گسـتردگی بـالا بـه رخـداد سـنگ‌هـای گرانودیـوریتی O^{g} وابسـته اسـت و چرخــه دوم بــا سرشــت پتاســیم‌بــالا تــا شوشـــونیتی، در غالـــب اســـتوک‌هـــای فـــراوان و کوچـــــک، در پـــــی رخـــــداد ســـــنگ‌هـــــای کوارتزمونزونیتی O^{mz} پدید آمده است.

برپایه یافته‌هـای بـه‌دسـت‌آمـده، اشـباع‌شـدگی آب و درجـۀ کـم تبلـور در ماگمـای کوارتزمـونزونیتیِ (O^{mz}) سرشـار از پتاسـیم، بـه‌همـراه محتـوای بـالای اکسـیژن، غلـیظ‌شـدن یـون‌هـای فـرار F^{-} و Cl^{-} و بـــه‌دنبـــال آن، رخـــداد مجموعـــه عنصـــرهای Cu−Au±W در مجموعـه نفـوذی آق‌درق را در پـی داشـته اسـت. افـزون‌بـر ایـن، در منطقـه کانـه‌زایـی آهـن±مـس گـودال (شـمال‌بـاختری منطقـه آق‌درق)، نفـــوذ اســـتوک کوارتزمونزونیـــتِ الیگوســـن درون سـنگ‌هـای کربناتـه متبلـورِ کرتاسـه بـالایی، رخـداد مجموعـه گارنـت- پیروکسـن اسـکارن پیشـرونده را به‌دنبال داشـته اسـت. برپایـه ایـن یافتـه‌هـا، شناسـایی دقیـق پلوتـون، اسـتوک و دایـک‌هـای پتاسـیم‌بـالای وابسـته بـه آنهـا راهبـردی اکتشـافی اسـت کـه نقـش مـؤثری در پیشـبرد عملیـات‌هـای اکتشـافی و بـه‌ویـژه برگزیـدن نقـاط حفـاری در پهنـه فلززایـی اهـر- ارسباران و مجموعه نفوذی شیورداغ دارد.

سپاس‌گزاری

ســازمان توســعه و نوســازی معــادن و صــنایع معـدنی ایـران (ایمیـدرو) پشـتیبان مـالی هزینـه‌هـای ایـن پـژوهش بـوده اسـت. از همکـاری‌هـای ایشـان صـــمیمانه ســـپاس‌گـــزاری مـــی‌شـــود. همچنـــین، نگارنـــدگان از داوران محتـــرم مجلـــه پترولـــوژی دانشگاه اصفهان نیز بسیار سپاس‌گزارند.

منابع

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.

Asgharzadeh-Asl, H. (2014) Geochemistry and mineralization of the Cu- W Agh- Darragh prospect (north of Ahar). M.Sc. thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran (in Persian).

Baker, T., Pollard P. J., Mustard, R., Mark, G. and Graham, J. L. (2005) A comparison of granite- related tin, tungsten, and gold- bismuth deposits: implications for exploration. Society of Economic Geologists Newsletter 61: 5–17.

Baldwin, J. A. and Pearce, J. A. (1982) Discrimination of productive and non- productive porphyritic intrusions in the Chilean Andes. Economic Geology 77: 664–674.

Boynton, W. V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, in Henderson, P., ed., Rare earth element geochemistry. Amsterdam, Elsevier 63–114.

Boztug, D., Harlavan, Y. and Arehart, G. B. (2007) K–Ar age, whole- rock and isotope geochemistry of A- type granitoids in the Divriği–Sivas region, eastern- central Anatolia, Turkey. Lithos 97: 193–218.

Brown, G. C., Thorpe, R. and Webb, P. C. (1984) The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. Journal of Geological Society London 141: 413–426.

Candela, P. A. and Holland, H. D. (1986) A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems; the origin of porphyry- type ore deposits. Economic Geology 81: 1–19.

Cocherie, A. (1986) Systematic use of trace element distribution patterns in log- log diagrams for plutonic suites. Geochimica et Cosmochimica Acta 50: 2517–2522.

Collins, L. G. (1997) Contrasting characteristics of magmatic and metasomatic Granites and Myth that Granite Plutons can be only magmatic. Theophrastus Contributions 7: 215–127.

Collins, W. J., Beams, S. D., White, A. J. R. and Chappell, B. W. (1982) Nature and origin of A- type granites with particular reference to southeastern Australia. Contribiution to Mineralogy and Petrology 80: 189–200.

Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhust, R. J. (1979) The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen, London.

Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis, D. J. and Frost, C. D. (2001) A geochemical classification for granitic rocks. Journal of Petrology 42: 2033–2048.

Gholami, N. (2004) Geochemical map of Kaleybar, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.

Gioncada, A., Mazzuoli, R., Bisson, M. and Pareschi, M. T. (2003) Petrology of volcanic products younger than 42 Ma on the Lipari- Volcano complex (Aeolian Island, Italy): an example of volcanism controlled by tectonics. Journal of Volcanology and Geothermal Researc 122: 191–220.

Harris, A. C., Kamenetsky, V. S., White, N. C. and Steele, D. A. (2004) Volatile phase separation in silicic magmas at Bajo de la Alumbrera porphyry Cu- Au deposit, NW Argentina. Resource Geology 54: 341–356.

Hezarkhani, A. (2006) Geochemistry of the Anjerd skarn and its association with copper mineralization, northwestern Iran. International Geology Review 48: 892–909.

Jamali, H. (2013) Agh- Daragh- Chupanlar (south of Kaleybar), scale 1:25000. Geological survey of Iran, Tehran, Report 5 (in Persian).

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., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A. M. and Mehrabi, B. (2009) Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar- Arasbaran volcanic belt, northern Iran. International Geology Review 52: 608–630.

Jenner, F. E., O'Neil, H. S. C., Arculus, R. J. and Mavrogenes, J. A. (2010) The magnetite crisis in the evolution of arc- related magmas and the initial concentration of Au, Ag and Cu. Journal of Petrology 51: 2245–2264.

Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M. J., Sabine, P. A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Wooley, A. R. and Zanetti, B. (1989) A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford.

Lescuyer, J. I. and Riou, R. (1976) Géologie de la région de Mianeh (Azarbayjan). Contribution de la volcanisme tertiare de l' Iran. Thèse 3 cycle, Grenoble, France.

Li, X. H., Li, Z.-X., Li, W. X., Liu, Y., Yuan, C., Wei, G. J. and Qi, C. S. (2007) U–Pb zircon, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I– and A–type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat–slab? Lithos 96: 186–204.

Luo, G., Zhang, Z., Du, Y., Pang, Z., Zhang, Y. and Jiang, Y. (2014) Origin and evolution of ore- forming fluids in the Hemushan magnetite–apatite deposit, Anhui Province, Eastern China, and their metallogenic significance. Journal of Asian Earth Sciences 113(3): 1100-1116.

Mahdy, N. M., El Kalioubi, B. A., Wohlgemuth-Ueberwasser, C. C., Shalaby, M. H., and El-Afandy, A. H. (2015) Petrogenesis of U- andMo- bearing A2- type granite of the Gattar batholith in the Arabian Nubian Shield, Northeastern Desert, Egypt: Evidence for the favorability of host rocks for the origin of associated ore deposits. Ore Geology Reviews 71: 57–81.

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

Mehrparto, M. and Nazer, N. (1999) Geological map of Kaleybar, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.

Mederer, J., Moritz, R., Zohrabyan, S., Vardanyan, A., Melkonyan, R. and Ulianov, A. (2014) Base and precious metal mineralization in Middle Jurassic rocks of the Lesser Caucasus: A review of geology and metallogeny and new data from the Kapan, Alaverdi and Mehmana districts. Ore Geology Reviews 58: 185–207.

Meyer, C. and Hemley, J. J. (1997) Wall rock alteration. In: Geochemistry of hydrothermal ore deposits (Ed. Barnes, H. L.) 2: 166- 235.

Moayyed, M. (2001) Geochemistry and petrology of volcano- plutonic bodies in Tarum area. Ph.D. thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran (in Persian).

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.

Moritz, R., Selby, D., Ovtcharowa, M., Mederer, J., Melkonyan, R., Hovakimyan, S. E., Tayan, R., Popkhadze, N., Gugushvili, V. and Ramazanov, V. (2012) Diversity of geodynamic settings during Cu, Au and Mo ore formation in the Lesser Caucasus: New age constraints. Proceedings, 1st Triennial EMC Meeting, Frankfurt, Germany.

Muller, D. and Groves, D. I. (2016) Potassic igneous rocks and associated gold- copper mineralization. Fourth edition, Springer, Berlin.

Nabavi, M. H. (1976) An introduction to the Iranian geology. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).

Newberry, R. J. (1983) The formation of subcalcic garnet in scheelitebearing skarns. Canadian Mineralogist 21: 529- 544.

Newberry, R. J. (1998) W- and Sn- skarn deposits: a 1998 status report. In Lentz DR (ed) Mineralized intrusion- related skarn systems. Mineral Assoc Canada Short Course, 26: 289-335.

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.

Pearce, J. A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos 100: 14–48.

Simmonds, V. and Moazzen, M. (2015) Re–Os dating of molybdenites from Oligocene Cu–Mo–Au mineralized veins in the Qarachilar area, Qaradagh batholith (northwest Iran): implications for understanding Cenozoic mineralization in South Armenia, Nakhchivan, and Iran. International Geology Review 57: 290- 304.

Soloviev, S. G. (2014) Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Kumbel oxidized W–Cu–Mo skarn and Au–W stockwork deposit in Kyrgyzstan, Tien Shan. Mineralium Deposita 50(2): 187-220.

Streckeisen, A. L. (1976) Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: A provisional attempt. Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen 1: 1–15.

Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes. In: Magmatism in the Ocean Basins (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publications 42: 313-345. Geological Society, London.

Tajbakhsh, G., Emami, M. H., Moine Vaziri, H. and Rashidnejad Omran, N. (2012) Petrology, geochemistry and tectonomagmatic setting of Kaleybar intrusion (Eastern Azarbijan). Scientific Quaterly Journal, Geosciences 22(85): 205- 224 (in Persian).

Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., Rogers, N., Hawkesworth, C., Harris, N., Kelley, S., Van Calsteren, P. and Deng, W. (1996) Post- collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalt. Journal of Petrology 37: 45- 71.

Wilson, M. (1989) Igneous petrogenesis, Unwin Hyman, London, UK.

Wilson, A. J, Cooke, D. R and Harper, B. L. (2003) The Ridgeway gold- copper deposit: a high-grade alkali porphyry deposit in the Lachlan Fold Belt, New South Wales, Australia. Economic Geology 98: 1637–1666.

Winter, D. (2001) An introduction to igneous and metamorphic petrology. Jon Wiely.

Wolf, R. C. and Cooke, D. R. (2011) Geology of the Didipio region and genesis of the Dinkidi alkalic porphyry Cu- Au deposit and related pegmatites, Northern Luzon, Philippines. Economic Geology 106: 1279–1315.

Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilder, S. A., Lo, C. H., Lin, Q., Ge, W. C. and Sun, D. Y. (2003) Highly fractionated I–type granites in NE China. Geochronology and petrogenesis. Lithos 66: 241–273.

Zhang, Y., Sun, J. G., Xing, S. W., Zhao, K. O., Ma, Y. B., Zhang Z. J. and Wang, Y. (2016) Ore- forming granites from Jurassic porphyry Mo deposits, east–central Jilin Province, China: geochemistry, geochronology, and petrogenesis. International Geology Review 1- 16.

Zhang, Q., Yin, X. M., Yin, Y., Jin, W. J., Wang, Y. L. and Zhao, Y. Q. (2009) Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan types granite in west Qinling. Acta Petrolei Sinica 25: 3103–3122.

Zhu, D. C., Mo, X. X., Wang, L. Q., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., Zhou, C. Y. and Yang, Y. H. (2009) Petrogenesis of highly fractionated I–type granites in the Zayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopes. Science in China Series D: Earth Sciences 52: 1223–1239.