

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

Heydar Asgharzadeh-Asl<sup>1</sup>, Ebrahim Tale Fazel<sup>\*2</sup>  
Behzad Mehrabi<sup>1</sup> and Fariborz Masoudi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>3</sup> 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<sup>mz</sup> quartz-monzonite), Cu-Au±W vein-type mineralization in Ayran Goli (occurred in O<sup>g</sup> 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<sub>2</sub> = 63.5–67.6 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 14–16.5 wt%, and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 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<sup>g</sup> unit) with low K/Na and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO ratios and to the late intrusive phases belonging to quartz-monzonite (O<sup>mz</sup> unit) enriched in K (K/Na >1) and oxidized (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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

پتروولوژی، 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 $Cu-Au\pm W$

حیدر اصغرزاده<sup>۱</sup>، ابراهیم طالع‌فاضل<sup>۱\*</sup>، بهزاد مهرابی<sup>۲</sup> و فریبرز مسعودی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه زمین‌شیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

<sup>۳</sup> 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 کوارتزومونزویت  $O^{mz}$ )، کانه‌زایی رگه‌ای مس- طلا  $\pm$  تنگستن ایران‌گلی (میزبان گرانودیوریت  $O^s$ ) و اسکارن آهن  $\pm$  مس گودال (میان واحد کوارتزومونزویت و سنگ‌های کربناته متبلور)، در منطقه شناسایی شدند. از دیدگاه شیمیایی، در منطقه آق‌درق، گرانتیویدهای متالومین میزبان 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 گرانتیویدها و دایک‌های منطقه، غنی‌شدگی LILE در برابر تهی‌شدگی نسبی HFSE و HREE پیامد فرایندهای تبدیلی 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 ( $O^s$ ) از فاز ماگمایی نخستین با نسبت کم K/Na و  $Fe_2O_3/FeO$  است و پس از آن کوارتزومونزویت ( $O^{mz}$ ) 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 کوارتزومونزونیتی با رخداد مجموعه عنصرهای  $Cu-Au\pm W$  در مجموعه آذرین درونی آق‌درق سازگار است. از آنجایی که برپایه ویژگی‌های زمین‌شناسی صحرائی و زمین‌شیمیایی- فلززایی، رخداد کانه‌زایی در منطقه آق‌درق اغلب با استوک‌های کوارتزومونزویت 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

Copyright©2018, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

## مقدمه

عنصرهای اصلی، کمیاب و خاکی نادر مقایسه و تحلیل شده‌اند. هدف از این پژوهش بررسی ارتباط رخداد کانی‌سازی و دگرسانی با سرشت اکسیدان-احیا و توان فلززایی توده نفوذی آق‌درق است. دستیابی به این هدف‌ها، افزون‌بر جنبه‌های علمی و تحقیقاتی، نقش موثری در پیشبرد عملیات پيجویی‌های عمومی در این منطقه دارد.

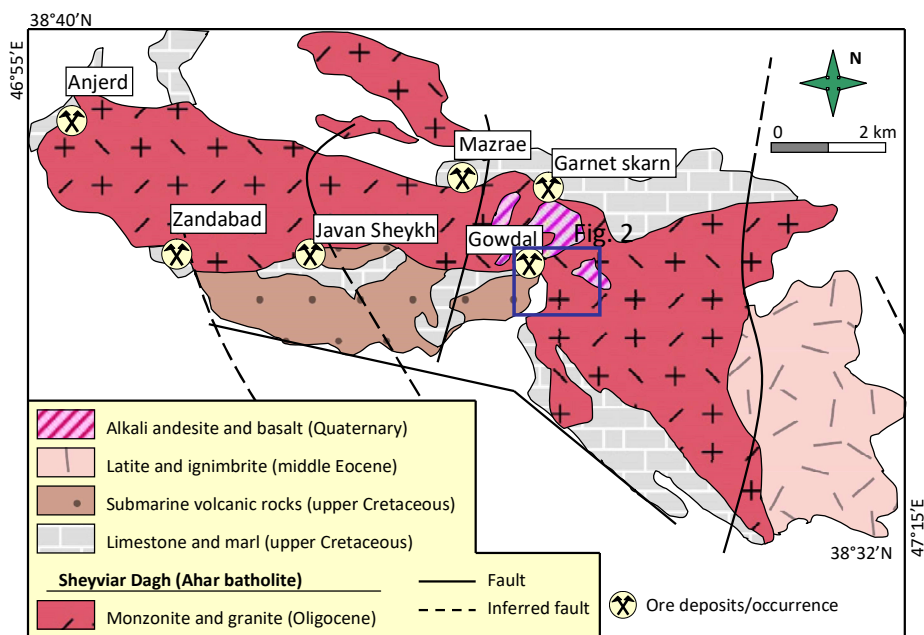
## زمین‌شناسی ناحیه‌ای و منطقه معدنی

گستره فلززایی اهر- ارسباران (پهنه قره‌داغ) با راستای WNW- ESE و پهنای ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر، در پهنه ماگمایی البرز باختری، پس از گذر از ارمنستان تا کمان پونتاید خاوری در شمال‌خاور ترکیه ادامه دارد. فرایندهای ماگمایی در گستره اهر- ارسباران در زمانی کمتر از ۲۰ میلیون سال، به‌صورت سنگ‌های آتشفشانی حدواسط تا اسیدی ائوسن آغاز شده و سپس با جایگیری توده‌های درونی گرانیتوئیدی الیگوسن- میوسن ادامه یافته است (Lescuyer and Riou, 1976; Hezarkhani, 2006). بیشتر این توده‌ها گرانیتوئیدهای اکسیدی گروه I با سرشت متآلومین تا پراآلومین هستند و شامل طیفی از سنگ‌های ساب‌آلکان تا آلکان هستند (Jamali et al., 2009). مجموعه آذرین شیورداغ (یا باتولیت اهر)، با درازای نزدیک به ۳۰ کیلومتر، پهنای متغیر ۳ تا ۱۰ کیلومتر و راستای خاوری- باختری، از مهمترین پدیده‌های ماگمایی منطقه اهر- ارسباران به‌شمار می‌روند. این مجموعه از کهن به جدید شامل سنگ‌های کربناته و آتشفشانی زبرداریایی (کرتاسه بالایی)، توالی‌های رسوبی- آتشفشانی لایت و ایگنمبریت (ائوسن میانی)، توده‌های گرانودیوریتی و دیوریتی شیورداغ (الیگوسن) و سنگ‌های آلکالی‌بازالت و آندزیت (کواترنری) است. برپایه سن‌سنجی بلورهای زیرکن با روش LA-ICP-MS، سن ۲۳ تا ۳۰ میلیون سال پیش برای توده آذرین درونی شیورداغ به‌دست

پهنه البرز- آذربایجان محل اتصال صفحه اوراسیا با ایران مرکزی است و در بخش مرکزی کمربند چین‌خورده آلپ- هیمالیا جای دارد. برپایه رده‌بندی واحدهای زمین‌شناختی ایران (Nabavi, 1976)، منطقه بررسی‌شده آق‌درق در بخش باختری البرز- آذربایجان یا گستره اهر- ارسباران جای گرفته و در حقیقت، ادامه جنوبی قفقاز کوچک است. از دیدگاه فلززایی، عنصرهای طلا، مس، تنگستن، نقره، مولیبدن و سرب و روی اهمیت ویژه‌ای دارند. برپایه بررسی‌های Aghazadeh و همکاران (۲۰۱۱)، Simmonds و Moazzen (۲۰۱۵)، Mederer و همکاران (۲۰۱۴)، Moritz و همکاران (۲۰۱۲) و Jamali و Mehrabi (۲۰۱۵)، بخش بزرگی از رخدادهای فلزی و کانی‌سازی‌های چندفلزی منطقه اهر- ارسباران در سنگ‌های ژرف تا نیمه‌ژرف آلکان مرتبط با کمان‌های ماگمایی بالغ روی داده‌اند. منطقه آق‌درق از مناطق با توانایی معدنی در پهنه اهر- ارسباران است و در عملیات‌های پی‌جویی و انجام پیجویی‌های رسوب‌های آبراهه‌ای و کانی‌سنگین، نشانه‌هایی از عنصرهای تنگستن، مس و طلا در آن گزارش شده است (Gholami, 2004; Jamali, 2013). منطقه آق‌درق به گستردگی نزدیک به ۳۳ کیلومتر مربع و در فاصله نزدیک به ۳۵ کیلومتری شمال شهرستان اهر جای دارد. این منطقه میان مختصات طول جغرافیایی خاوری  $47^{\circ}06'58''$  تا  $47^{\circ}11'10''$  و عرض جغرافیایی شمالی  $38^{\circ}35'34''$  تا  $38^{\circ}38'32''$  و در جنوب‌باختری برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلیبر (Mehrpato and Nazer, 1999) است. شرکت ملی صنایع مس ایران با همکاری شرکت تله‌متال فرانسه به فعالیت‌های شدادی و حفر گمانه در این منطقه پرداخته‌اند. در این پژوهش، زمین‌شیمی توده گرانیتوئیدی آق‌درق و رخدادهای کانه‌زایی همراه با بررسی کانی‌شناسی و تغییرات الگوی زمین‌شیمیایی

زندآباد، جوان شیخ، مزرعه، آق‌درق و گودال) در پیرامون این توده گزارش شده‌اند (Mollai *et al.*, 2009) (شکل ۱).

آمده است (Aghazadeh *et al.*, 2011). در نتیجه نفوذ توده شیورداغ به درون سنگ‌های کربناته کرتاسه بالایی، کانی‌سازی‌های اسکارن-پورفیری فراوانی (مانند: انجرد،



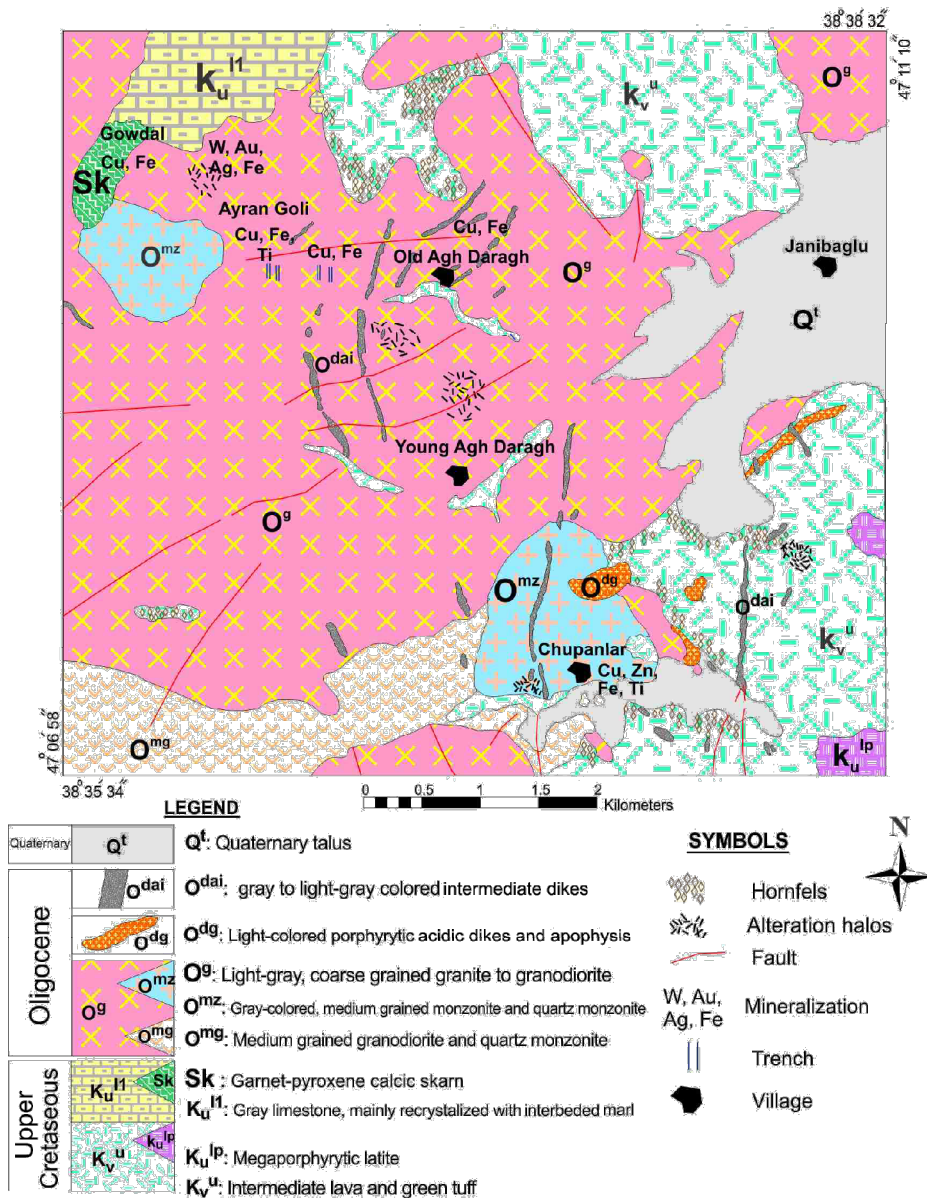
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی مجموعه نفوذی شیورداغ که در آن جایگاه کانه‌زایی‌های گوناگون نمایش داده شده است (با تغییراتی پس از Mollai و همکاران، ۲۰۰۹)

شیورداغ با جنس گرانیت، مونزودیوریت و کوارتزمونونیت در الیگوسن، دست کم در دو چرخه زمانی (چرخه اول  $30/8 \pm 2/1$  میلیون سال پیش شامل سنگ‌های کالک آلکالن و چرخه دوم  $23/3 \pm 0/5$  تا  $25/1 \pm 0/9$  میلیون سال پیش شامل سنگ‌های شوشونیتی؛ Aghazadeh و همکاران، ۲۰۱۱)، در این واحدها نفوذ کرده است. سپس و به‌ویژه در الیگوسن بالایی، همه این مجموعه با دایک‌هایی اسیدی تا حدواسط قطع شده است. در منطقه آق‌درق دست کم سه گستره کانه‌زایی چندفلزی (مانند: چوپانلار (با میزبان کوارتزمونونیت)، آبران گلی (در میزبان گرانودیوریت) و اسکارن گودال) در میان استوک کوارتزمونونیت (الیگوسن) و سنگ‌های کربناته متبلور

منطقه بررسی‌شده آق‌درق در بخش خاوری مجموعه نفوذی شیورداغ جای دارد (شکل ۱). در کل، دو واحد سنگ‌شناسی اصلی شامل سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی-رسوبی (کرتاسه بالایی) و سنگ‌های آذرین نفوذی و دایک‌ها (الیگوسن) در منطقه کانه‌زایی آق‌درق رخنمون دارند (شکل ۲). کهنترین سنگ‌های منطقه به سن کرتاسه بالایی-پالئوسن هستند و بیشتر شامل سنگ‌های نیمه‌درونی تا آتشفشانی-رسوبی زیردریایی (مانند: توف سبز، گدازه‌های بازالتی، لاتیت پورفیری و تراکی آندزیت (افق زیرین) و مجموعه سنگ‌های رسوبی آهک‌های خاکستری-مارنی (افق بالایی)) هستند. بیشتر این سنگ‌ها در شمال و جنوب‌خاوری منطقه آق‌درق رخنمون دارند (شکل ۲). توده آذرین درونی

با توده‌های آذرین درونی منطقه و واحدهای سنگی دیگر نشان داده شده است.

(کرتاسه بالایی)، دیده می‌شود. در تصویر دورنمای عمومی شکل ۳- A، وابستگی فضایی این کانی‌سازی‌ها



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

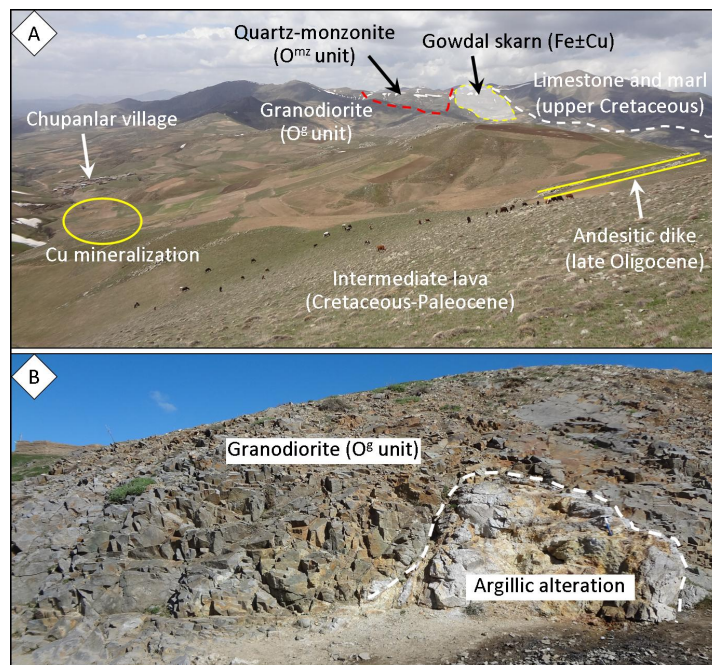
درون این درزه‌ها، رگه‌های آپلیت، پگماتیت و کوارتز و گاه کانی‌سازی مس به صورت مالاکیت نیز دیده می‌شود. پیرو این فرایندهای زمین‌ساختی در منطقه معدنی آق‌درق، دو روند ساختاری با راستاهای NNE- SSW و

در پی فرایندهای کششی- فشارشی پوسته‌ای در مقیاس ناحیه‌ای، دست کم دو دسته درزه با راستاهای NNW- SSE و NNE- SSW در توده آذرین درونی شیورداغ پدید آمده است (Mollai et al., 2009). در



منطقه وابستگی دارند و کنترل‌کننده کانه‌زایی و دگرسانی نیز هستند (شکل ۳- B).

NE- SW شناخته شد که دسته اول با روند دایک‌های حدواسط تا اسیدی منطقه و دسته دوم با گسل‌های



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)

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 جفتی القایی یا ICP-MS (تجزیه عنصرهای کمیاب و خاکی نادر) در آزمایشگاه 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 آشکارسازی دستگاه ICP-MS برای عنصرهای گوناگون ۰/۱ تا ۰/۱ گرم در تن (ppm)

### 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

تارنمای [www.ACMELAB.com](http://www.ACMELAB.com)، بخش Schedule of Services and Fees آورده شده است. مقدار آهن کل (FeO<sub>t</sub>) و آهن سه ظرفیتی (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) با آنالیز شیمی تر انجام شد. داده‌های به دست آمده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

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<sub>3</sub>)، به کار برده شد. جزییات کامل این روش در

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 بر پایه درصد وزنی (wt%) و عنصرهای کمیاب و خاکی نادر بر پایه گرم در تن (ppm) است. رابطه شاخص لارسن (LI) برابر (FeO+CaO+MgO) / (۰.۳۳SiO<sub>2</sub>+K<sub>2</sub>O) است) (O<sup>g</sup>: واحد گرانودیوریت، O<sup>mz</sup>: واحد کوارتزومونزیت)

| Sample No.                         | Ch13           | Ch16           | Ch18           | Ch20           | A24            | A25             | A31             | A34             | Ag35            | Ag36            | Ag37   | Ag38  | Ag39  | Ag40   | Ag41  |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Units                              | O <sup>g</sup> | O <sup>g</sup> | O <sup>g</sup> | O <sup>g</sup> | O <sup>g</sup> | O <sup>mz</sup> | O <sup>mz</sup> | O <sup>mz</sup> | O <sup>mz</sup> | O <sup>mz</sup> | dike   | dike  | dike  | dike   | dike  |
| SiO <sub>2</sub>                   | 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 <sub>2</sub>                   | 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 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 <sub>2</sub> O                  | 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 <sub>2</sub> O                   | 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 <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 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) <sub>n</sub>               | 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 <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O | 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  |

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 دربردارنده کانی‌های پتاسیم‌فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند، بیوتیت و کانی‌های فرعی 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 دربردارنده درشت بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت، با زمینه‌ای از ریزبلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت، پتاسیم‌فلدسپار و کانی‌های کدر هستند (شکل ۴- D). دایک‌های

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:

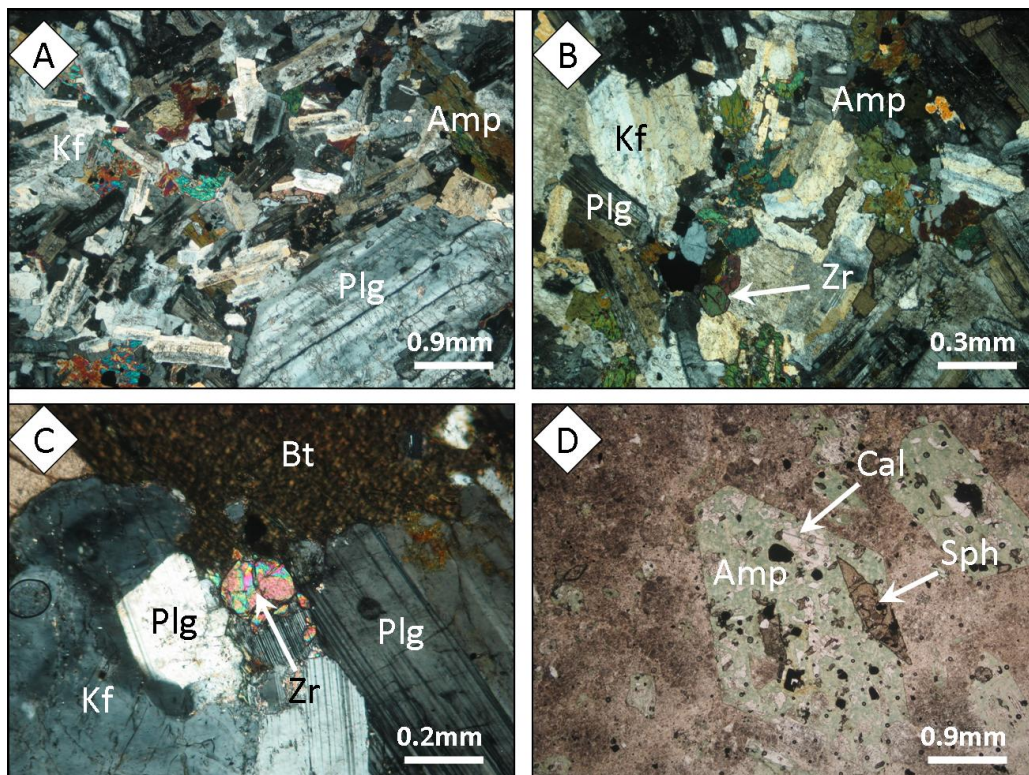
**توده نفوذی آق‌درق:** توده نفوذی آق‌درق بخشی از مجموعه آذرین شیورداغ به سن الیگوسن و رنگ خاکستری روشن، گوشتی و سفید رنگ فراوان‌ترین واحد سنگی منطقه به‌شمار می‌روند (شکل ۲). برپایه شواهد صحرایی و نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه (Jamali, 2013)، این توده سه زیرگروه سنگی دارد که به ترتیب فراوانی عبارتند از: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

از آنجایی که رخداد کانی‌سازی در سه محدوده چوپانلار، ایران‌گلی و گودال در میزبان واحدهای  $O^g$  و  $O^{mz}$  روی داده است، پس نمونه‌برداری و بررسی‌های زمین‌شیمیایی با تاکید



پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و مقدار ناچیزی هورنبلند هستند.

اسیدی نیز بافت میکروپورفیری دارند و از دیدگاه کانی‌شناسی دربردارنده کانی‌های پتاسیم‌فلدسپار،



شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی از سنگ‌نگاری واحدهای نفوذی و دایک‌های منطقه آق‌درق (شمال اهر) (تصویرهای XPL): (A) کانی‌های آمفیبول، پتاسیم‌فلدسپار، اسفن، کوارتز و پلاژیوکلاز در کوارتزومونزونیت ( $O^{Mz}$ ); (B, C) بافت‌های گرانولار به ترتیب، در گرانودیوریت ( $O^S$ ) و کوارتزومونزونیت ( $O^{Mz}$ ) با کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز، پتاسیم‌فلدسپار، بیوتیت، کوارتز و کانی کدر؛ (D) بافت پورفیری در دایک آندزیتی با کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز، آپاتیت و اسفن درشت بلور (Kf = پتاسیم‌فلدسپار؛ Sph = اسفن؛ Amp = آمفیبول؛ Bt = بیوتیت؛ Cal = کلسیت؛ Zr = زیرکن؛ Plg = پلاژیوکلاز)

آلکالن جای گرفته‌اند (شکل ۶- A). برپایه این نمودار، دایک‌های منطقه نیز در محدوده گرانیت تا دیوریت هستند. در توده‌های آذرین درونی منطقه، میزان  $SiO_2$  برابر با ۶۳/۵ تا ۶۷/۶ wt%،  $Al_2O_3$  برابر با ۱۴ تا ۱۶/۵ wt% و  $Na_2O$  و  $K_2O$  به ترتیب، برابر با ۳ تا ۴/۳ wt% و ۲/۲ تا ۵/۷ wt% است (جدول ۱). همچنین، نسبت  $K_2O/Na_2O$  برابر با ۰/۵ تا ۱/۸ است. برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی، دایک‌های اسیدی منطقه

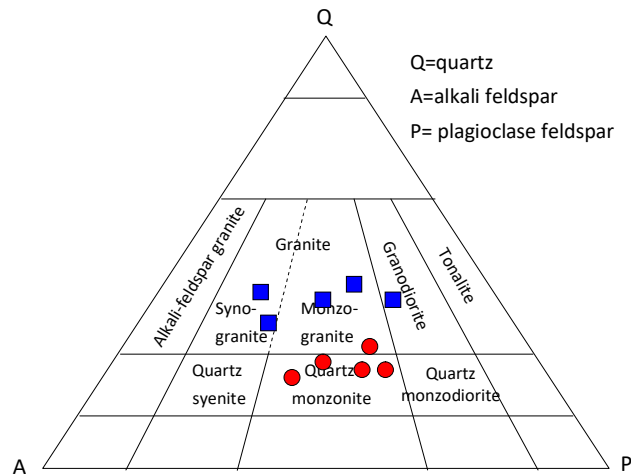
## زمین‌شیمی سنگ‌های آذرین

### زمین‌شیمی عنصرهای اصلی

برپایه رده‌بندی QAPF (Streckeisen, 1976)، توده‌های نفوذی آق‌درق در گستره‌ی سینوگرانیت-مونزوگرانیت، گرانودیوریت و کوارتزومونزونیت جای دارند (شکل ۵). همچنین، این سنگ‌ها در نمودار عنصرهای آلکالی کل ( $Na_2O+K_2O$ ) در برابر سیلیس ( $SiO_2$ ) (Cox et al., 1979) در محدوده گرانیت و گرانودیوریت با سرشت ساب‌آلکالن تا

بالاتر و Zr کمتر از سنگ‌های اسیدی شناخته می‌شوند (جدول ۱).

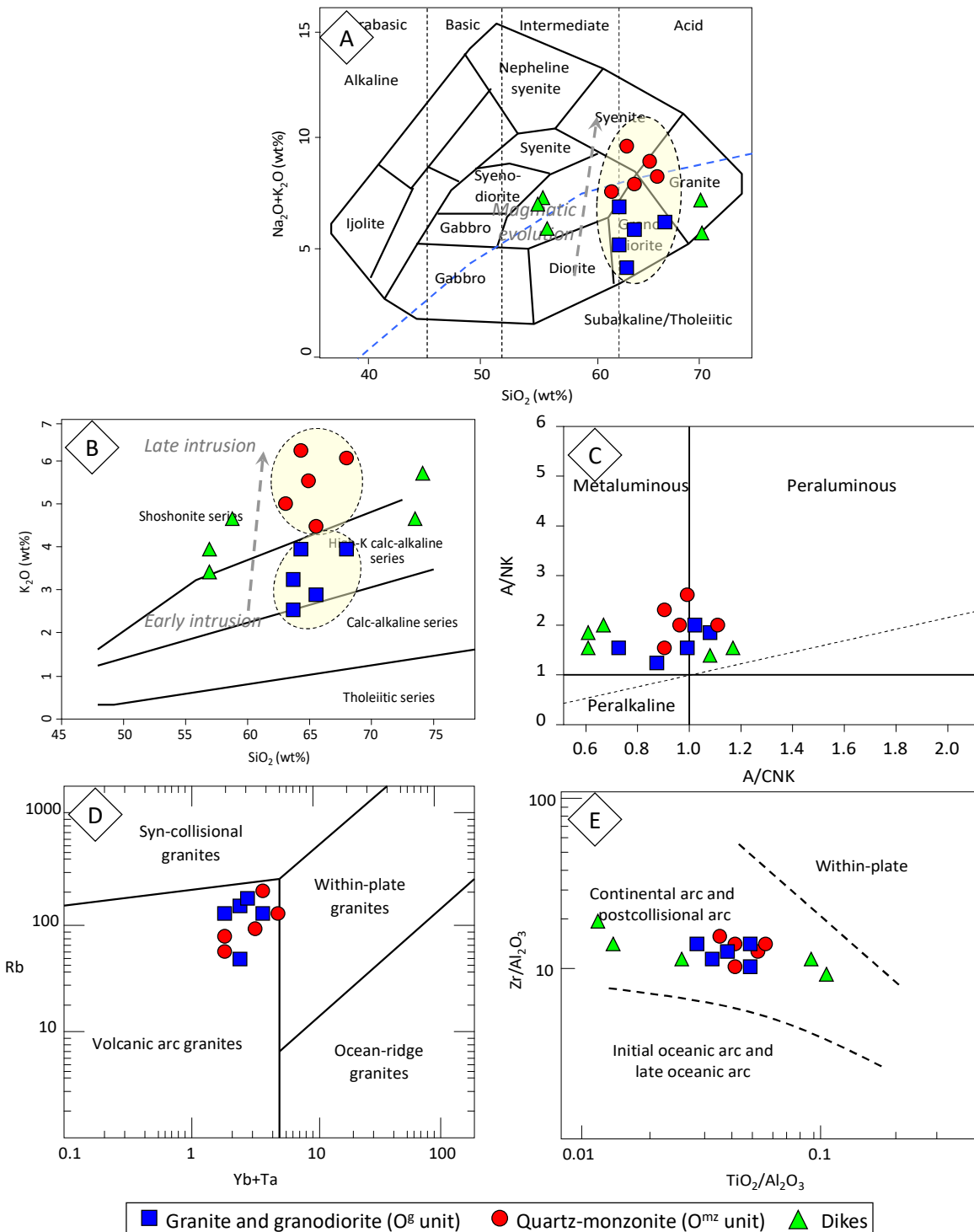
Nb/Y نزدیک به ۰/۵ و نسبت Zr/TiO<sub>2</sub> نزدیک به ۰/۱ دارند. بیشتر دایک‌های بازیک نیز با TiO<sub>2</sub>



شکل ۵- نمودار سه‌تایی کوارتز-آلکالی‌فلدسپار-پلاژیوکلاز (Streckeisen, 1976) برای رده‌بندی توده‌های آذرینی 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 کلیایی) سنگ‌ها، نمودار دوتایی SiO<sub>2</sub> در برابر K<sub>2</sub>O (Le Maitre et al., 1989) به کار برده می‌شود. در این نمودار، سنگ‌های منطقه در گستره کالک‌آلکان 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 کالک‌آلکان (چرخه ۱) و شوشونیتی (چرخه ۲) شناخته می‌شود که این ویژگی زمین‌شیمیایی در میان واحد نفوذی نخستین O<sup>g</sup> و واحد تأخیری O<sup>mz</sup> در منطقه آق‌درق نیز دیده می‌شود (شکل ۶- B). همان‌گونه که در شکل‌های A-۶ و B-۶ دیده می‌شود، واحد تأخیری O<sup>mz</sup> میزان آلکالینیتی

(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) بالاتری دارد. برای ارزیابی میزان اشباع‌پذیری سنگ‌ها از آلومینیم (اندیس اشباع آلومین، نمودار دوتایی نسبت‌های مولار Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O یا A/NK در برابر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O+CaO یا A/CNK (Maniar and Piccoli, 1989) به کار برده می‌شود. سنگ‌های نفوذی منطقه در محدوده مت‌آلومینوس تا کمی پرآلومینوس جای گرفته‌اند (شکل ۶- C). در نمودار بررسی جایگاه زمین‌ساختی گرانیتوئیدها (Pearce et al., 1984)، توده‌های نفوذی منطقه از گرانیت‌های کمان آتشفشانی به‌شمار می‌روند (شکل ۶- D). برپایه بررسی‌های Muller و Groves (۲۰۱۶)، برای شناسایی خاص‌تگاه سنگ‌های مت‌آلومینوس پتاسیم بالا (یا شوشونیتی)، نمودار دوتایی TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در برابر Zr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به کار برده می‌شود. در این نمودار نمونه‌های سنگی در پهنه کمان قاره‌ای و پسابروردی جای گرفته‌اند (شکل ۶- E).

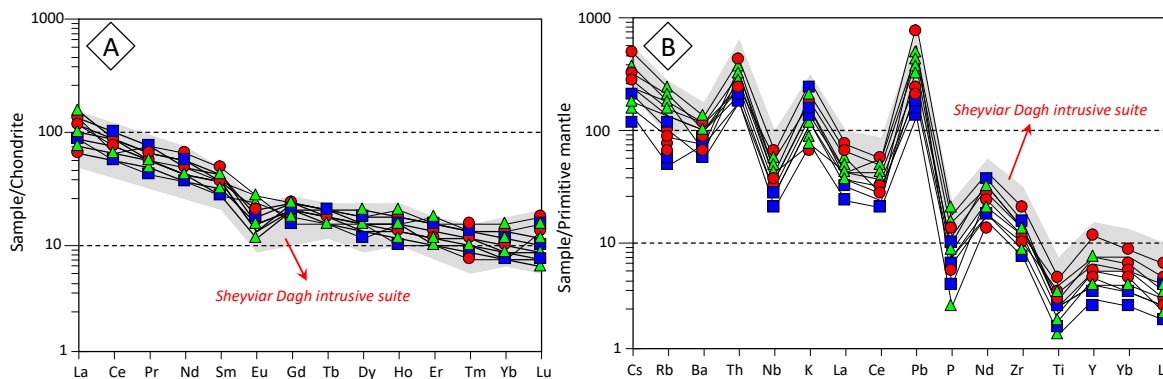


شکل ۶- ترکیب سنگ‌های آذرین منطقه آق‌درق (شمال اهر) در: (A) نمودار دوتایی  $SiO_2$  در برابر  $(Na_2O+K_2O)$  (Cox *et al.*, 1979); (B) نمودار دوتایی  $SiO_2$  در برابر  $K_2O$  (Le Maitre *et al.*, 1989) برای ارزیابی میزان آکالیینیت‌سنگ‌ها؛ (C) نمودار دوتایی  $A/CNK$  در برابر  $A/NK$  (Maniar and Piccoli,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

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 بلورین آلکالی‌فلدسپار در سنگ‌های منطقه است (شکل ۷-A). در نمودار بهنجار شده سنگ‌ها در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، غنی‌شدگی عنصرهای لیتوفیل با شعاع یونی بالا یا LILE (مانند: Rb, Th, K) پیامد تبادل‌های سیال-مذاب در پهنه فرورانش است (Wilson, 1989)؛ اما تهی‌شدگی از عنصرهای Zr, Nb و Ti از ویژگی‌های ماگمای کالک‌آلکان 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).

### زمین‌شیمی عنصرهای کمیاب و خاکی نادر

کاربرد نمودارهای عنکبوتی و بهنجار کردن 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 ( $\Sigma REE$ ) از ۱۱۲ تا ۱۸۶/۵ ppm در نمودار بهنجار شده سنگ‌ها در برابر ترکیب کندریت (Boynton, 1984)، غنی‌شدگی نسبی درباره‌ی عنصرهای خاکی نادر سبک (LREE) در برابر سنگین (HREE) نشان می‌دهند ( $\Sigma LREE/\Sigma HREE=12/26$ ) (جدول ۱). همچنین،



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

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 دربردارنده‌ی طیفی از اندوخته‌های اسکارن، پورفیری و کم‌ژرف رگه‌ای یا اپی‌ترمال دانسته‌اند. رخداد

### کانه‌زایی و دگرسانی

بخش بیشتری از عملیات‌های پی‌جویی در منطقه کان‌زایی آق‌درق را سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۳۹۳ انجام داده است و گزارش‌های فراوانی نیز درباره‌ی آن منتشر کرده است (Jamali, 2013). برپایه این گزارش‌ها، سه بخش کان‌زایی، شامل چوپانلار (مس)،

- کانی‌سازی جانشیننی (اسکارن) گودال با عنصرهای آهن±مس، در فاصله میان واحد نفوذی استوک کوارتزومونونیت (الیگوسن) و سنگ‌های کربناته تبلور دوباره‌یافته (کرتاسه بالایی)، در شمال‌باختری منطقه آق‌درق رخ داده است (شکل ۲). مگنتیت، هماتیت، کالکوپیریت، کالکوسیت و بورنیت از کانی‌های فلزی در این بخش بوده و متوسط عیار عنصرهای کانه‌ساز در آنها ۱/۵ wt% آهن و ۰/۳ wt% مس است. کانی‌های کالک‌سیلیکات‌آه‌اولیه (مانند: گروسولار، آندرادیت، دیوپسید و هیدرنیزیت) با مجموعه کانی‌های دگرسان (مانند: آمفیبول، اپیدوت، کلسیت، کوارتز و کلریت) جانشین شده‌اند (شکل ۸-F).

همان‌گونه که گفته شد، به دنبال رخداد فرایندهای ماگمایی چندمرحله‌ای در منطقه آق‌درق، ضربان‌های دوره‌ای سیال‌های گرمایی پدیدآمده از این جایگیری و سردشدن آرام‌آرام این توده‌ها، پیدایش هاله‌های دگرسانی گوناگونی را در پی داشته است. پیامد این فرایندها، رخداد دو مجموعه دگرسانی جدا (یکی در ارتباط با واحد اسکارن‌زایی منطقه گودال و دیگری دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی استوک‌ورک-انتشاری و رگه‌ای مناطق چوپانلار و ایران‌گلی) است (Asgharzadeh-Asl, 2014). دگرسانی‌های پتاسیک (سیلیکات-پتاسیم)، فلیک و آرژیلیک از فراوان‌ترین دگرسانی‌های منطقه هستند. دگرسانی‌های سیلیسی، کلریتی و آغشتگی‌های سطحی هیدروکسید آهن نیز به‌گونه‌ی فرعی دیده می‌شوند.

- دگرسانی پتاسیک یا سیلیکات-پتاسیم در پهنه‌های معدنی چوپانلار و ایران‌گلی با کانی‌های اصلی بیوتیت (به‌صورت اولیه و نئوفرم)، پتاسیم‌فلدسپار درشت بلور و کانی‌های فرعی کوارتز، آلبیت و کلریت شناخته می‌شود (شکل ۸-G). ویژگی‌های بافتی (مانند: میرمیکیتی، پرتیتی و بافت نئوفرمه بیوتیت) از نشانه‌های رخداد دگرسانی پتاسیک در کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری هستند (Collins, 1997;

کانی‌سازی در منطقه معدنی آق‌درق به سه صورت دیده می‌شود: (۱) استوک‌ورک-انتشاری، (۲) رگه‌ای و (۳) جانشیننی (اسکارنی).

- کانی‌سازی استوک‌ورک-انتشاری چوپانلار همراه با دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک و عیار متوسط عنصرهای مس (۰/۵۶ wt%)، آهن (۳/۱۴ wt%) و تیتانیوم (۰/۲۷ wt%)، در میزبان واحد کوارتزومونونیت ( $O^{mz}$ ) رخ داده است (شکل‌های ۸-A و ۸-B). در این کانی‌سازی کانی‌های سولفیدی کالکوپیریت، اسفالریت و پیریت به‌صورت رگه‌ای و انتشاری در زمینه سنگ دیده شدند (شکل ۸-C).

- کانی‌سازی رگه‌ای ایران‌گلی در شمال منطقه آق‌درق با عیار متوسط برای عنصرهای مس (۰/۳ wt%)، طلا (۰/۱ ppm)، تنگستن (۵۰ ppm) و نقره (۵ ppm) شناخته می‌شود. در این کانی‌سازی دست‌کم چهار گروه رگه به‌ترتیب دیده شدند:

(۱) رگه‌های درشت‌بلور آمفیبول-بیوتیت (پهنای ۲ میلیمتر تا ۱ سانتیمتر)، با کانی‌های فرعی مگنتیت، روتیل، آپاتیت و مونازیت در میزبان واحد گرانودیوریت ( $O^g$ ) (شکل ۸-D)؛

(۲) رگه سیلیسی تنگستن و طلا (پهنای متوسط ۱ متر و درازای بیش از ۲۰ متر)، با کانی‌های فرعی شیلیت، پیریت، طلای آزاد (ابعاد تقریبی ۲۰ میکرون) در کنار استوک کوارتزومونونیت (شکل ۸-E)؛

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

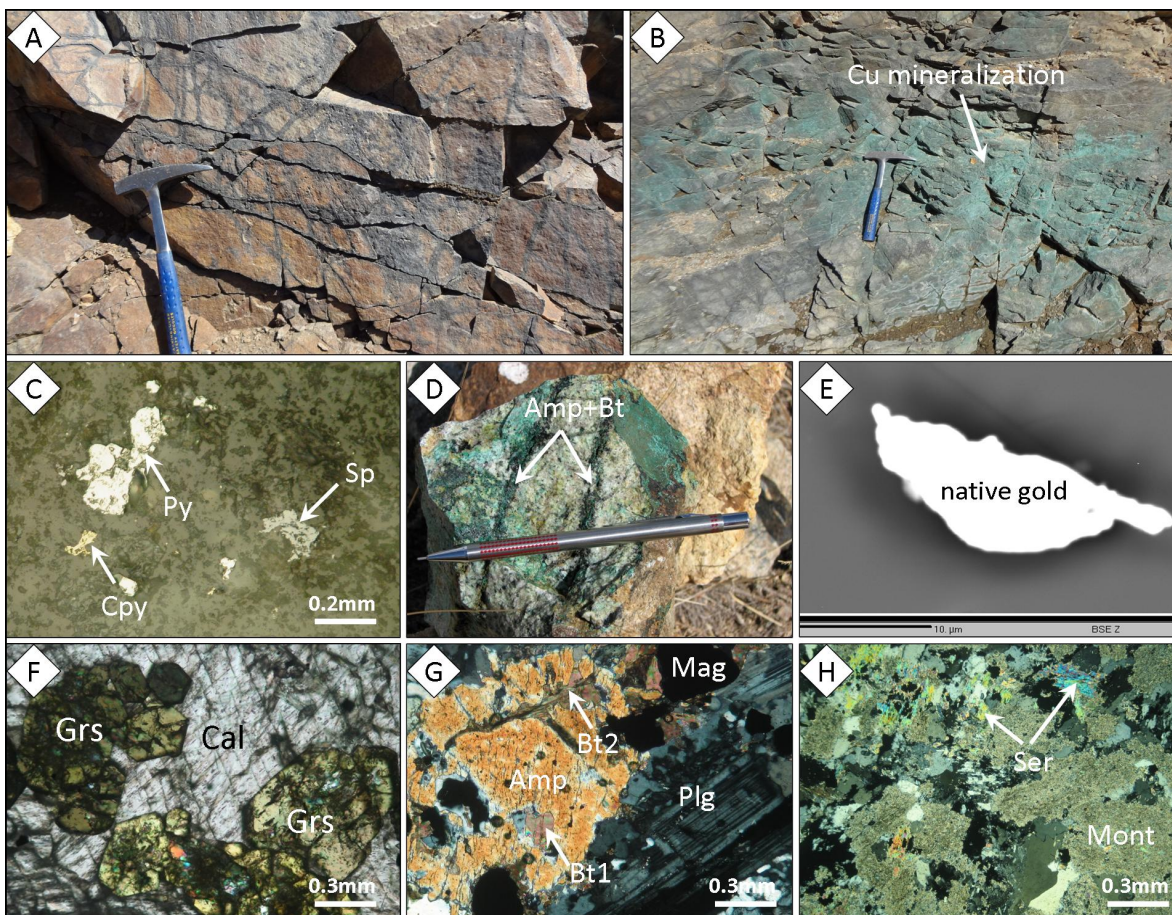
(۴) رگه‌های بی‌کوارتز با پیریت و مقدار ناچیزی کالکوپیریت.

مگر رگه مافیک نخست که همانند بخش دگرسانی پتاسیک در مرکز سیستم‌های پورفیری است، بیشتر رگه‌های یادشده دیگر در منطقه ایران‌گلی و در دگرسانی فلیک و تا اندازه‌ای سیلیسی پدید آمده‌اند و آغشتگی‌های اکسید/هیدروکسید آهن نیز گاه آنها را همراهی می‌کنند.



کانه‌زایی چوپانلار همراه با کانی‌سازی استوکورک -  
انتشاری مس - طلا و در منطقه ایران گلی همراه  
رگچه‌های آمفیبول - بیوتیت پدید آمده است.

(Meyer and Hemley, 1997). کانه‌های فلزی  
کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت و روتیل نیز همراه این  
دگرسانی دیده می‌شوند. دگرسانی پتاسیک در منطقه



شکل ۸- رخنمون‌های صحرایی و تصویرهای میکروسکوپی XPL از کان‌زایی و دگرسانی‌های منطقه آق‌درق (شمال اهر). (A) رخنمون کوارتزمونونیت ( $O^{mz}$ ) با شکستگی‌های کان‌دار در منطقه کان‌زایی چوپانلار؛ (B) کانی‌زایی مس سطحی در میزبان کوارتزمونونیت ( $O^{mz}$ ) خاور چوپانلار؛ (C) تصویر میکروسکوپی بازتابی از کان‌زایی انتشاری پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت، (D) رگچه‌های سانتیمتری آمفیبول و بیوتیت در میزبان گرانودیوریتی ( $O^g$ ) منطقه کان‌زایی ایران‌گلی؛ (E) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (BSE) از حضور طلای آزاد در کنار کوارتزمونونیت ( $O^{mz}$ )، (F) در هم‌رشدی گارنت گروسولار و کلسیت در بخش کان‌زایی اسکارن گودال؛ (G) دگرسانی پتاسیک با رخداد بیوتیت‌های اولیه و نفورم 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)

با کانی‌های اصلی کوارتز ریزبلور، سریسیت و پیریت و کانی‌های فرعی آلیت و کلریت شناخته می‌شود. در این پهنه دگرسانی، کانی ثانویه سریسیت در پی

- دگرسانی فیلیک نیز در کان‌زایی‌های ایران گلی و خاور روستای چوپانلار رخنمون گسترده‌ای دارد و در کنار پهنه پتاسیک روی داده است. این دگرسانی

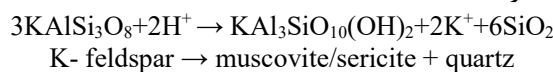
زمین‌شیمیایی در گرانودیوریت و مونزوگرانیت‌های منطقه آق‌درق گویای آنست که این سنگ‌ها با ماهیت مت‌آلومین تا کمی پرآلومین (۱/۱-۱/۷ A/CNK)، با افزایش میزان  $\text{SiO}_2$  محتوای  $\text{P}_2\text{O}_5$  در آنها کاهش یافته است. برپایه بررسی‌های Zhang و همکاران (۲۰۱۶)، این روند سازگار با روند گرانیتوئیدهای تیپ I است (شکل ۹- A).

افزون‌بر این، با کاربرد نسبت  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  و رسم آن در نمودار دوتایی درصد وزنی  $\text{Na}_2\text{O}$  در برابر  $\text{K}_2\text{O}$  (Collins et al., 1982; Zhang et al., 2009)، گرانیتوئیدهای تیپ‌های I، A و S از یکدیگر شناسایی می‌شوند. بر پایه این نمودار، سنگ‌های آذرین درونی منطقه آق‌درق با نسبت  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  برابر با ۰/۵ تا ۲، در محدوده گرانیتوئیدهای تیپ I جای گرفته‌اند (شکل ۹- B). نمودار دوتایی وضعیت اکسیداسیون در برابر درجه جدایش بلوری ماگما، به ترتیب، به دو متغیر  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  در برابر  $\text{Rb}/\text{Sr}$  وابسته است (Baker et al., 2005). در این نمودار، سنگ‌های منطقه در محدوده سری مگنتیتی با توان کانی‌سازی طیفی از عنصرهای  $\text{Cu-Au}$ ،  $\text{W-Mo}$  و  $\text{Au}\pm\text{Bi}$  جای گرفته‌اند (شکل ۹- C).

برپایه بررسی‌های Mahdy و همکاران (۲۰۱۵)، گرانیتوئیدها معمولاً دو ترکیب آهنی (ferroan) و منیزیمی (magnesian) نیز دارند. نوع آهنی آنها بیشتر به رخداد عنصرهای فلزی پایه و مولیبدن ( $\text{Cu-Fe-Mo}$ ) و نوع منیزیمی به کانه‌زایی‌های عنصرهای  $\text{W-Au}\pm\text{Bi}$  وابسته است. از این‌رو، در نمودار دوتایی  $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$  در برابر درصد وزنی  $\text{SiO}_2$  (Frost et al., 2001)، سنگ‌های منطقه در محدوده گرانیتوئیدهای منیزیمی نوع I جای گرفته‌اند (شکل ۹- D).

رابطه ۱ (Meyer and Hemley, 1997)، جانشین درشت بلورهای پتاسیم‌فلدسپار شده‌اند و بلورهای کوآرتز با بزرگی کمتر از ۰/۲ میلی‌متر در فضای پیرامون آنها پدید آمده‌اند.

رابطه ۱:

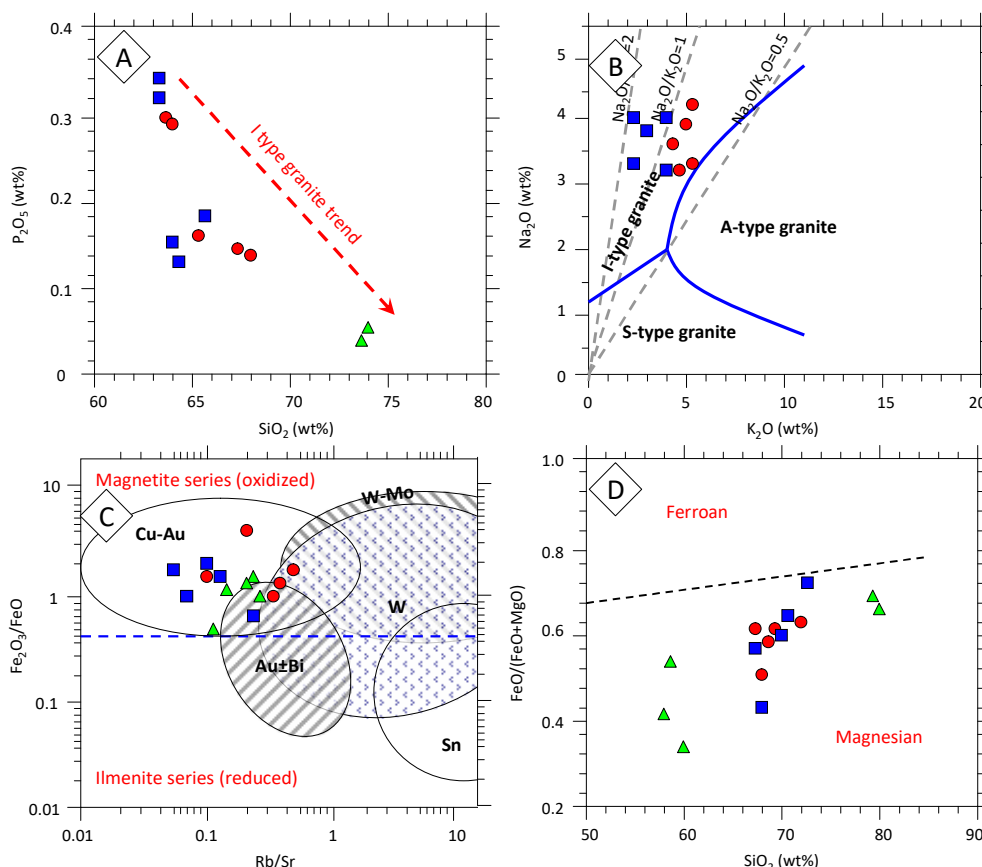


- دگرسانی آرژیلیک با کانی‌های مونت‌موریونیت، ایلیت، پیریت و موسکوویت، کمابیش در سراسر منطقه آق‌درق گسترش دارد. بیشترین فراوانی این دگرسانی در خاور روستای چوپانلار و شمال روستای آق‌درق جدید دیده می‌شود (شکل‌های ۲ و ۸-H). بخش بزرگی از این دگرسانی از تجزیه درشت بلورهای پتاسیم‌فلدسپار پدید آمده است و گسترش آن در راستای پهنه‌های گسلی و شکستگی‌های محلی منطقه بیشتر است.

## بحث

### الف- خاستگاه گرانیتوئیدها

دستیابی به خاستگاه ماگمایی و پهنه زمین‌ساختی مجموعه‌های سنگی یک منطقه نقش مهمی در پیشبرد اهداف اکتشافی و دسترسی به توان فلززایی و کانه‌زایی توده‌های نفوذی خواهد داشت. گستره اهر- ارسباران در شمال‌باختری ایران از پهنه‌های با توان کانه‌زایی‌های چندفلزی و وابسته به توده‌های آذرین درونی اکسیدی/احیاء است. بررسی‌های Wu و همکاران (۲۰۰۳)، Li و همکاران (۲۰۰۷) و Zhu و همکاران (۲۰۰۹)، گویای آنست که ترکیب آپاتیت‌ها شاخصی برای شناسایی گرانیتوئیدهای تیپ I و S است. برپایه این بررسی‌ها، انحلال آپاتیت در مذاب‌های گرانیتی مت‌آلومین تا پرآلومین کم است و با افزایش میزان  $\text{SiO}_2$  کاهش می‌یابد. بررسی‌های



شکل ۹- نمودارهای زمین‌شیمیایی برای ارزیابی خاستگاه سنگ‌های منطقه آق‌درق (شمال اهر). (A) نمودار دوتایی SiO<sub>2</sub> در برابر P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> نمودار دوتایی Na<sub>2</sub>O در برابر K<sub>2</sub>O برای تفکیک گرانیت‌های تیپ I، A و S؛ (C) نمودار دوتایی Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO در برابر Rb/Sr برای نمونه‌های مرتبط با سری‌های مگنتیتی عنصرهای کانه‌ساز Cu-Au±W±Bi؛ (D) نمودار دوتایی FeO/(FeO+MgO) در برابر SiO<sub>2</sub> (Frost et al., 2001) (نمادها مانند شکل ۶ هستند)

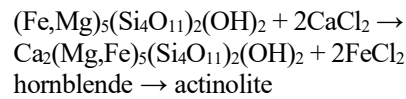
کرتاسه بالایی)، رخداد مجموعه گارنت- پیروکسن اسکارن پیشرونده را به‌دنبال داشته است. پس از آن با آزاد شدن مقادارهای بالای CaCl<sub>2</sub> از سنگ‌های کربناته اطراف و به‌دنبال آن، افزایش فشار گاز اکسیژن (fO<sub>2</sub>) در پی شکسته‌شدن پیوندهای OH در کانی‌های آبدار (مانند: هورنبلند و بیوتیت) در استوک کوارتز-موزونیتی، 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<sub>2</sub>) با کانی اکتینولیت بلورهای مگنتیت برپایه رابطه ۴ (Luo et al., 2014) پدید آمده و کوارتز آزاد شده است.

### ب- اسکارن‌زایی و مراحل رخداد کانسنگ رگه‌ای

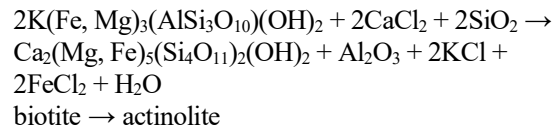
برپایه یافته‌های به‌دست‌آمده، منطقه کانه‌زایی آق‌درق نمونه‌ای از سامانه‌های کانه‌زایی اکسیدی است که در دوره زمانی کمابیش کوتاه ۷ میلیون ساله‌ای در الیگوسن (۲۳/۳±۰/۵ تا ۳۰/۸±۲/۱ میلیون سال پیش)، در پی دو چرخه زمانی ماگماتیسم (Aghazadeh et al., 2011)، مجموعه‌های ماگمایی کالک‌آلکان سرشار از پتاسیم تا شوشونیتی را پدید آورده است. برپایه بررسی‌ها، در منطقه کانه‌زایی گودال (شمال‌باختری منطقه آق‌درق)، نفوذ استوک کوارتز-موزونیت تیپ I (الیگوسن) در میزبان سنگ‌های کربناته متبلور

و پدیدنیامدن گارنت‌های کم‌کلسیم یا subcalcic (مانند: اسپسارتین و پیروپ) در هنگام مرحله اسکارن پیش‌رونده از زمین‌های توانمندی کانه‌زایی‌های تنگستن در یک منطقه است. پس در بخش خاوری اسکارن گودال و مجاور استوک کوارتز مونوزونیت (شکل ۲)، رگه سیلیسی دارای شیلیت (CaWO<sub>4</sub>) و طلا، گواهی بر این کانی‌سازی است. افزون بر این، رگه‌های مافیک آمفیبول-بیوتیت با چهره پگماتی، همراه با کانی‌های فرعی مونازیت، روتیل و آپاتیت در منطقه آیران‌گلی، گویای رویداد سامانه تحولی ماگمایی-گرمایی است و بخش‌های ژرف (بیش از ۴ کیلومتر) اندوخته‌ای از مس پورفیری را نشان می‌دهد (Wolf and Cooke, 2011). این رگه‌ها که به نام رگه‌های شاخص تیپ P (primitive) شناخته می‌شوند (Harris et al., 2004)، بخش انتقالی از سامانه‌های اسکارنی به بخش گرمایی-ماگمایی دانسته می‌شوند (شکل ۱۰).

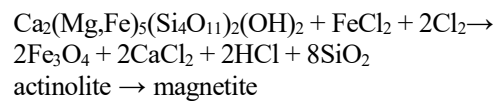
رابطه ۲:



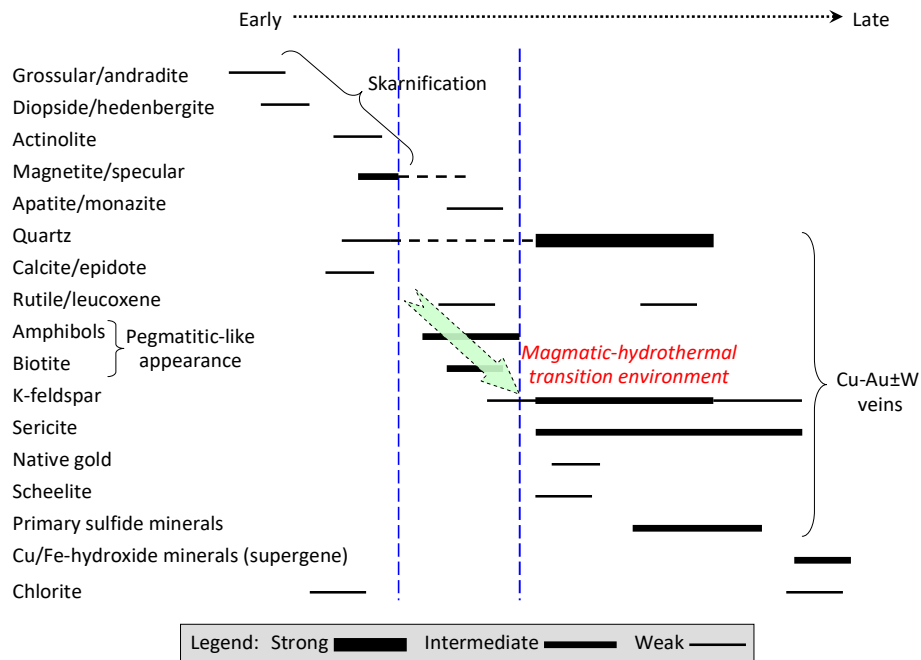
رابطه ۳:



رابطه ۴:



ویژگی‌هایی مانند دارابودن گارنت نوع آندرادیت در مرحله اسکارن پیش‌رونده، فراوانی مگنتیت و هماتیت در مرحله اسکارن پسروده، غنی‌شدگی توده از LREE و تهی‌شدگی Eu در پی حضور آلکالی‌فلدسپار، همگی گویای سرشت اکسیدان استوک کوارتز مونوزونیتی و اسکارن وابسته به آن است. به باور Newberry (۱۹۸۳)، گارنت‌های کلسیک (مانند: آندرادیت و گروسولار)



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



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 ایران‌گلی را به‌دنبال داشته است. نبود گرانیوتیویدهای آهنی سرشار از اکسیژن و مذاب‌های سیلیسی اشباع از مولیبدن (مانند: ریولیت‌های سرشار از سیلیس) وابسته به پهنه‌های زمین‌ساختی درون صفحه‌ای از علت‌های نبود دخداد مولیبدن در منطقه ایران‌گلی، 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. به‌گونه‌ای که 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 ایران‌گلی در این مرحله بوده است. در شکل ۱۱-A، روند رخداد عنصرها برپایه شاخص لارسن (Larsen Index)  $SiO_2+K_2O$ - ترکیب  $(FeO+CaO+MgO)/33$  در برابر  $SiO_2$  (Soloviev, 2014)، در منطقه بررسی شده نشان داده شده است. با به‌کارگیری نمودار دوتایی Y در برابر MnO (Baldwin and Pearce, 1982)،

با گذشت زمان و کاهش آرام‌آرام 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 ایران‌گلی پدید آمده است.

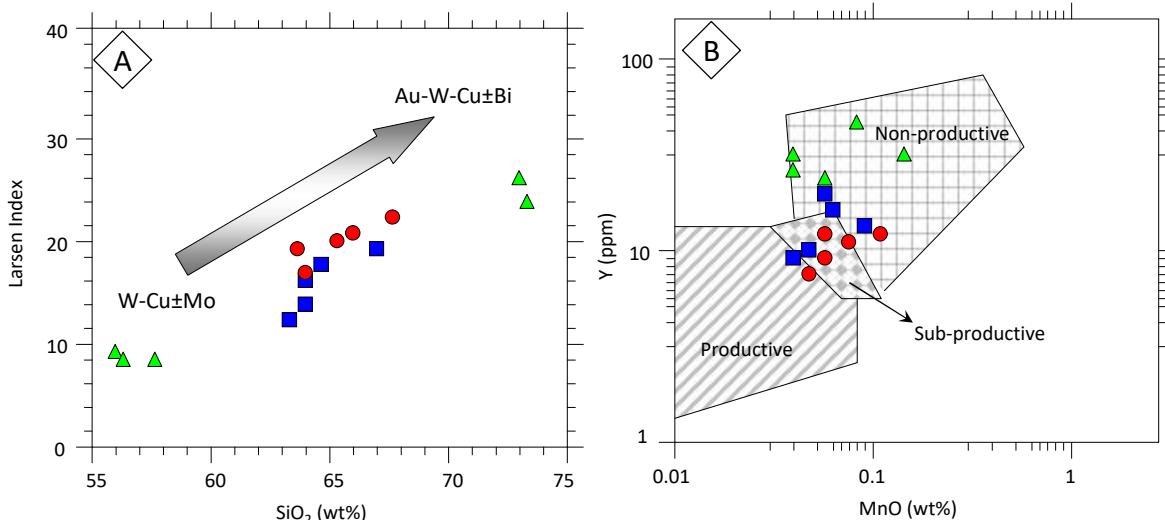
### پ- ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و توان فلززایی سنگ‌های منطقه

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. همان‌گونه که داده‌های زمین‌شیمیایی جدول ۱ نشان می‌دهند، نوعی تحول شیمیایی در توده‌های آذرین درونی منطقه، به‌ویژه سنگ‌های  $O^{mg}$  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



منطقه در محدوده توده‌های نابارور تا نیمه‌مولد جای گرفته‌اند (شکل ۱۱- B).

توده‌های آذرین درونی به سه بخش مولد، نیمه‌مولد و نابارور رده‌بندی می‌شوند. سنگ‌های



شکل ۱۱- نمودارهای زمین‌شیمیایی- فلززایی سنگ‌های منطقه آق‌درق (شمال‌اهر). (A) روند رخداد عناصر در نمودار دوتایی شاخص لارسن (LI) در برابر  $\text{SiO}_2$  (B) سرشت نیمه‌مولد تا نامولد سنگ‌های منطقه در نمودار دوتایی Y در برابر MnO (نمادها مانند شکل ۶ هستند)

رخ خواهند داد. این ویژگی از ویژگی‌های پهنه‌های پس‌اب‌خوردی بوده که در بررسی‌های گسترده‌ای در شمال‌باختری ایران گزارش شده است (Moayyed, 2001; Tajbakhsh et al., 2012; Wilson (1989), غنی‌شدگی عنصرهای LILE و LREE در برابر تهی‌شدگی نسبی عنصرهای HFSE و HREE در نمودارهای بهنجار شده به ترکیب کندریت و گوشته اولیه از ویژگی‌های پهنه‌های زمین‌ساختی فرورانشی بوده است. این الگوها با نمودارهای عکسبوتی رسم شده برای سنگ‌های منطقه آق‌درق همخوانی دارد (شکل ۷).

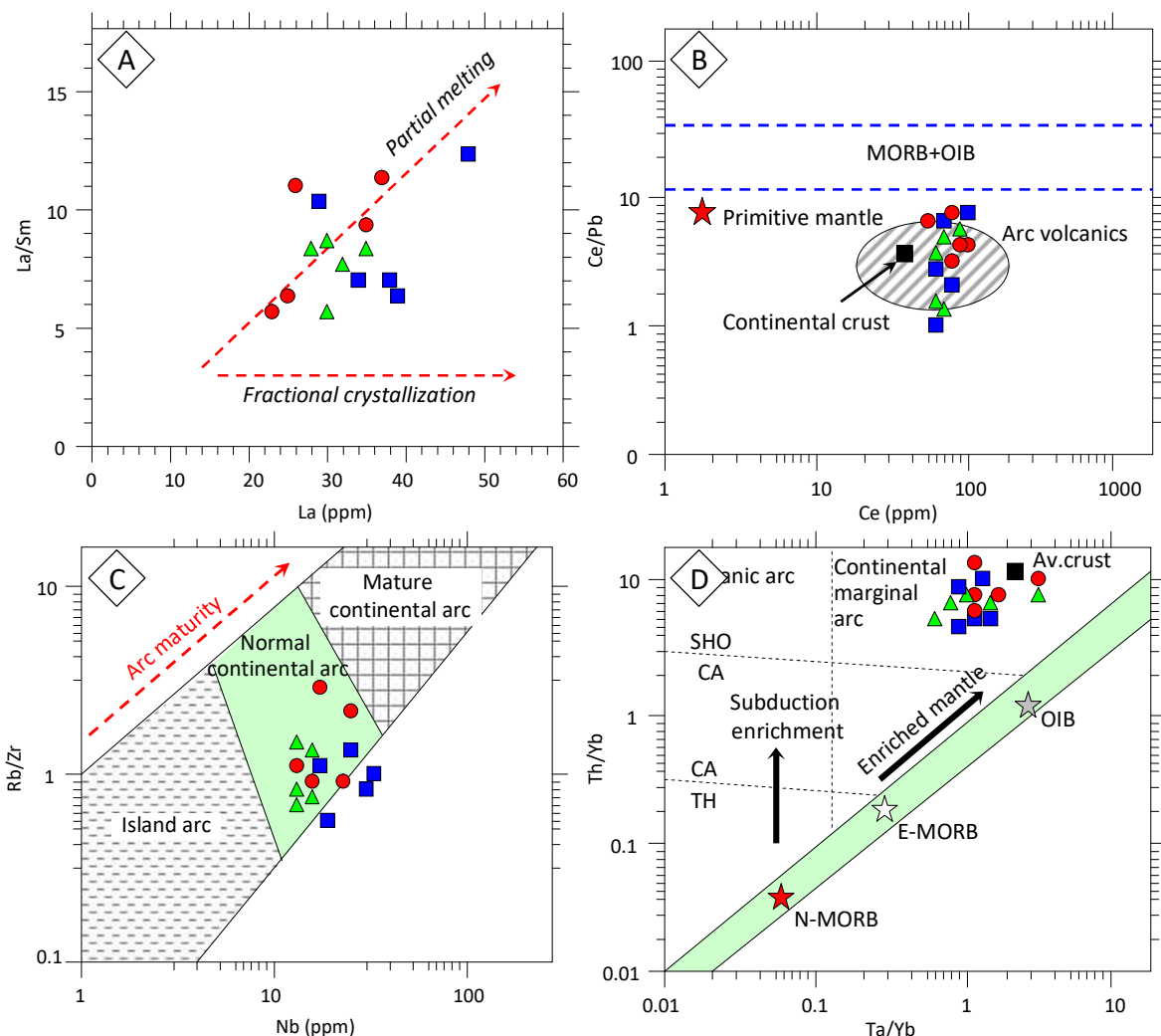
نمودارهای شناسایی جایگاه زمین‌ساختی و سنگ‌شناسی- زمین‌ساختی (پتروکتونیک) سنگ‌ها (شکل ۶- E) نیز گویای پیدایش سنگ‌های منطقه در

### ت- جایگاه زمین‌ساخت و تحولات ماگمایی

آنچه از بررسی‌های زمین‌شیمیایی و کاربرد نمودارهای سنگ‌زایی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌ها تا کنون دریافت می‌شود، وابستگی توده‌ها و دایک‌های منطقه (با سن الیگوسن) به پهنه‌های پس‌اب‌خوردی صفحه‌های قاره‌ای، به‌همراه نشانه‌های زمین‌شیمیایی پهنه‌های فرورانش است. به باور Turner و همکاران (1996)، شواهد رخداد فرورانش در یک منطقه پیامد افزایش سیال‌های آزاد شده از لبه صفحه فرورونده و تأثیر متاسوماتیسمی آن بر سنگ‌کره و در پایان ذوب سنگ‌کره متاسوماتیسم شده خواهد بود. در پی آن، رخداد‌های چند مرحله‌ای گوناگونی از سنگ‌های کالک‌آلکالن، آلکالن سرشار از پتاسیم و شوشونیتی، در دوره زمانی کوتاهی (short-lived)

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).

پهنه‌های کمان قاره‌ای و پسابروردی است. برپایه یافته‌های به‌دست آمده، گویا ذوب‌بخشی گوشته سنگ‌کره پیامد رفتار سیال‌های فرورانش نئوتیس در محل برخورد صفحه‌های ایرانی - عربی بوده و ماگماتیسم آکالن سرشار از پتاسیک تا شوشونیتی را



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: تولیتی؛ CA: کالک‌آکالن؛ SHO: شوشونیتی) (نمادها مانند شکل ۶ هستند)

برابر Ce (Boztug et al., 2007) (شکل ۱۲- B)،

نمودار نسبت عنصرهای کمیاب Ce/Pb در

به دنبال دو چرخه زمانی ماگماتیسم پدید آمده است. چرخه ماگمایی نخست با گستردگی بالا به رخدادهای سنگ‌های گرانودیوریتی  $O^S$  وابسته است و چرخه دوم با سرشت پتاسیم‌بالا تا شوشونیتی، در غالب استوک‌های فراوان و کوچک، در پی رخدادهای کوارتزموزنونیتی  $O^{mz}$  پدید آمده است.

برپایه یافته‌های به دست آمده، اشباع‌شدگی آب و درجه کم تبلور در ماگمای کوارتزموزنونیتی ( $O^{mz}$ ) سرشار از پتاسیم، به همراه محتوای بالای اکسیژن، غلیظ‌شدن یون‌های فرار  $F^-$  و  $Cl^-$  و به دنبال آن، رخداد مجموعه عنصرهای  $Cu-Au \pm W$  در مجموعه نفوذی آق‌درق را در پی داشته است. افزون‌بر این، در منطقه کانه‌زایی آهن  $\pm$ مس گودال (شمال‌باختری منطقه آق‌درق)، نفوذ استوک کوارتزموزنونیت الیگوسن درون سنگ‌های کربناته متبلور کرتاسه بالایی، رخداد مجموعه گارنت-پيروکسن اسکارن پیشرونده را به دنبال داشته است. برپایه این یافته‌ها، شناسایی دقیق پلوتون، استوک و دایک‌های پتاسیم‌بالای وابسته به آنها راهبردی اکتشافی است که نقش مؤثری در پیشبرد عملیات‌های اکتشافی و به‌ویژه برگزیدن نقاط حفاری در پهنه فلززایی اهر-ارسباران و مجموعه نفوذی شیورداغ دارد.

### سپاس‌گزاری

سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) پشتیبان مالی هزینه‌های این پژوهش بوده است. از همکاری‌های ایشان صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین، نگارندگان از داوران محترم مجله پتروولوژی دانشگاه اصفهان نیز بسیار سپاس‌گزارند.

گویای خاستگاه کمام آتشفشانی برای سنگ‌های منطقه است. همچنین، جای‌گرفتن نمونه‌ها در بخش کمان قاره‌ای عادی در نمودار دوتایی  $Rb/Zr$  در برابر  $Nb$  (Brown *et al.*, 1984)، نیز نشان‌دهنده این نکته است (شکل ۱۲- C). برپایه نمودار دوتایی نسبت‌های عنصری کمیاب  $Th/Yb$  در برابر  $Ta/Yb$  (Pearce, 2008)، که در آن سرشت شیمیایی سنگ‌ها، به همراه جایگاه زمین‌ساختی آنها شناخته می‌شود، نمونه‌های سنگی منطقه بررسی‌شده با سرشت شوشونیتی در محدوده سنگ‌های پدیدآمده از گوشته‌ای غنی‌شده در پهنه کمان‌های فعال حاشیه قاره جای‌گرفته‌اند (شکل ۱۲- D).

### نتیجه‌گیری

پهنه فلززایی اهر-ارسباران در شمال‌باختری ایران بوده و در بردارنده توده‌های آذرین درونی اکسیدی و احیایی است. این پهنه از پهنه‌های توانمند برای کانه‌زایی‌های چندفلزی به‌شمار می‌رود. برپایه یافته‌های به دست آمده، گرانیوتیویدهای اکسیدان و احیاء مرتبط با رخداد طلا، به همراه کانی‌سازی سولفیدی با مقدارهای بالایی از عنصرهای  $W$ ،  $Cu$ ،  $Bi$  و  $(Te \pm As \pm)$  هستند. هنگام این رخداد، سنگ‌های آذرین درونی ایلمنیتی و مگنتیتی به ترتیب، پیدایش اندوخته‌های اسکارن احیایی و اکسیدی را در پی داشته‌اند.

گستره کانه‌زایی آق‌درق در بخش خاوری مجموعه نفوذی شیورداغ نمونه‌ای از سامانه‌های کانه‌زایی اکسیدی بوده که در دوره زمانی کمابیش کوتاه ۷ میلیون ساله‌ای در الیگوسن ( $23/3 \pm 0/5$  تا  $30/8 \pm 2/1$  میلیون سال پیش)،

## 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. *Contribution 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 Research* 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 tertiaire 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- and Mo- 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, 1<sup>st</sup> 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 Quarterly 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.