



Research Article

Application of geochemical indicators to distinguish productive magma from barren in Qarah Gol area, Ardabil province using rare earth elements

Shadi Zia¹, Seyedeh Narges Sadati^{*1} , Gholamreza Ahmadzadeh¹

1-Department of Geology, Faculty of science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 04 Feb 2023 Accepted: 03 Aug 2023

Extended Abstract

Introduction: Qarah Gol study area is located in Ahar- Arasbaran metallogenic zone in Meshginshahr city in Moradloo section. According to field studies, the main exposed rock units in the region include volcanic, plutonic and pyroclastic igneous rocks. In the subduction zones, productive, semi-productive and fertile magma are found together, and the identification of these masses is very important from the point of view of exploration. Fertile granitoid magmas are generally formed in pre-collisional subduction setting. While productive granitoid magmas are formed in post-collision tectonic setting. It is thought that the melting of young thickened mafic lower crust or the partial crystallization of hydrous basaltic magma is the key factor in the production of various types of productive magmas, while partial melting of the young thin mafic lower crust is considered that can produce fertile magmas.

Materials and methods: In this research, 14 thin sections of surface samples and 28 thin sections of drilling cores were prepared for the petrologic study at Mineral Research and Processing Center. To determine the texture and paragenesis of ores, 30 polished thin sections and 20 polished sections of the samples were prepared. The 23 surface lithogeochemical samples were studied by ICP-MS. Also 14 core samples were studied by XRF for main oxides.

Results and discussion: Productive granitoids in the UDMB display lower values of Ni (9–31 ppm) and Cr (14–36 ppm) than barren granitoids (Ni = 11–73 ppm; Cr = 21–81 ppm). The low values of Ni (5–19.6 ppm) and Cr (14–30.2 ppm) in the igneous rocks of the Qarah Gol indicate that this magma originates from partial melting of the thick lower crust. Also, the productive magma has a higher LREE/HREE ratio than the barren magma, which is also seen in the samples of Qarah Gol area. In productive magmas, pattern of trace elements normalized to N-MORB is characterized by enrichment in Cs, Rb, Ba and Pb and depletion in Nb, Ta, Th, Zr, Hf and Ti. This process shows that garnet is present as a residual phase in the magma chamber of origin of the rocks and indicates the formation at a pressure (>15kbar) equivalent to a crustal thickness of 45-55 km (Palin et al, 2016).

Conclusion: According to geochemical results, the average concentration of copper is 138.21 ppm. Petrological observations and geochemical data show that the graniteoids of Qarah Gol area are calc alkalines type I related to subduction zone which is linked to porphyry copper mineralization. These results show that the study area is located in post-continental collision. Also, the use of La / Yb versus Sm / Yb diagram shows that the samples were made from partial melting of 10 to 20% garnet peridotite. Based on Ce against Ce / Yb diagram, the melting depth of 100 to 110 km is estimated. Productive magma has a higher LREE / HREE ratio than barren magma, which is evident in samples of the Qarah Gol area.

Keywords: Ardabil, Rare earth elements, Barren, Qarah Gol, Copper, Productive.


Citation: Shadi Zia, Seyedeh Narges Sadati, Gholamreza Ahmadzadeh (2023). Application of geochemical indicators to distinguish productive magma from barren, *Res. Earth. Sci.* 14(3), (52-67) DOI: 10.48308/ESRJ.2022.102263

* Corresponding author E-mail address: sadati_sn@uma.ac.ir



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

کاربرد شاخص‌های ژئوشیمیایی برای تشخیص ماگمای مولد از عقیم در محدوده قره گل، استان اردبیل با استفاده از عناصر خاکی کمیاب

شادی ضیاء^۱، سیده نرگس ساداتی^{۱*} , غلامرضا احمدزاده^۱^۱-گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

پژوهشی (دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲)

چکیده گسترده

مقدمه: منطقه مطالعاتی قره گل در منطقه متالوژنیک اهر- ارسباران در مشگین شهر در بخش مرادلو قرار دارد. براساس مطالعات میدانی، واحدهای سنگی اصلی در معرض در منطقه شامل سنگ‌های آذرین آتشفشانی، پلوتونیک و آذرآواری است. در نواحی فرورانش، ماگمای مولد، نیمه مولد و بارور با هم یافت می‌شوند که شناسایی این توده‌ها از نظر اکتشاف بسیار حائز اهمیت است. ماگماهای گرانیتوئیدی بارور عموماً در شرایط فرورانش پیش از برخورد تشکیل در حالی که ماگماهای گرانیتوئیدی تولیدی در محیط تکتونیک پس از برخورد تشکیل می‌شوند. تصور می‌شود که ذوب پوسته مافیک جوان ضخیم شده یا تبلور جزئی ماگمای بازالتی آبدار عامل کلیدی در تولید انواع مختلف ماگماهای مولد است. در حالی که ذوب بخشی از پوسته پایین مافیک نازک جوان می‌تواند ماگمای بارور ایجاد کند.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق ۱۴ مقطع نازک از نمونه‌های سطحی و ۲۸ مقطع نازک از هسته‌های حفاری برای مطالعه پترولوژیک در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی تهیه شد. برای تعیین بافت و پاراژنز سنگ معدن، ۳۰ مقطع نازک صیقل داده شده و ۲۰ مقطع صیقل داده شده از نمونه‌ها تهیه شد. ۲۳ نمونه لیتوژئوشیمیایی سطحی توسط ICP-MS مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین ۱۴ نمونه هسته توسط XRF برای اکسیدهای اصلی مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج و بحث: گرانیتوئیدهای مولد در UDMB مقادیر کمتری از Ni (9-31 ppm) و کروم (۱۴-۳۶ ppm) را نسبت به گرانیتوئیدهای بی حاصل (Ni = 11-73 ppm)؛ (کروم = ۲۱-۸۱ ppm) نشان می‌دهند. مقادیر کم نیکل (۱۹/۶-۵ ppm) و کروم (۳۰/۲-۱۴ ppm) در سنگ‌های آذرین قره گل نشان می‌دهد که این ماگما از ذوب نسبی منشاء می‌گیرد. پوسته پایین ضخیم همچنین ماگمای مولد نسبت LREE/HREE بالاتری نسبت به ماگمای بی حاصل دارد که در نمونه‌های منطقه قره گل نیز مشاهده می‌شود. در ماگماهای مولد، الگوی عناصر کمیاب نرمال شده به N-MORB با غنی شدن در Cs, Rb, Ba و Pb و کاهش در Nb, Ta, Th, Zr, Hf و Ti مشخص می‌شود. این فرآیند نشان می‌دهد که گارنت به عنوان یک فاز باقی‌مانده در محفظه ماگمایی منشأ سنگ‌ها وجود دارد و شکل‌گیری را در فشار (< ۱۵ کیلوبار) معادل ضخامت پوسته ۴۵-۵۵ کیلومتر نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج ژئوشیمیایی، میانگین غلظت مس ۱۳۸/۲۱ ppm است. مشاهدات سنگ‌شناسی و داده‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که گرانیتوئیدهای منطقه قره گل از نوع قلیائی کالک آلکالین نوع I مربوط به زون فرورانش است که با کانی‌سازی مس پورفیری مرتبط است. نتایج نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه در برخورد پس از قاره قرار دارد. همچنین استفاده از نمودار La/Yb در مقابل Sm/Yb نشان می‌دهد که نمونه‌ها از ذوب جزئی پریدوتیت گارنت ۱۰ تا ۲۰ درصد ساخته شده‌اند. براساس نمودار Ce در مقابل Ce/Yb، عمق ذوب ۱۰۰ تا ۱۱۰ کیلومتر برآورد شده است. ماگمای مولد نسبت LREE/HREE بالاتری نسبت به ماگمای بی حاصل دارد که در نمونه‌های منطقه قره گل مشهود است.

واژگان کلیدی: اردبیل، عناصر نادر خاکی، عقیم، قره گل، مس، مولد.

استناد: شادی ضیاء، سیده نرگس ساداتی، غلامرضا احمدزاده (۱۴۰۲). کاربرد شاخص‌های ژئوشیمیایی برای تشخیص ماگمای مولد از عقیم،

پژوهشهای دانش زمین: ۱۴ (۳)، (۶۷-۵۲). DOI: 10.48308/ESRJ.2022.102263

E-mail: sadati_sn@uma.ac.ir

* نویسنده مسئول:



مقدمه

بزرگ‌ترین محصول تکوین چرخه ابرقاره پانگه‌آ در ایران، تشکیل اقیانوس‌های تتیس (پالئوتتیس و نئوتتیس) بین گندوانا و اوراسیا است که بسته شدن و برخورد‌های آن، کمربند کوه‌زائی آلپ - هیمالیا را ایجاد نموده است (Alavi, 2004). سرزمین ایران در بخش میانی این کوه‌زائی (آلپ-هیمالیا) واقع است. بخش عمده کانه‌زایی‌های موجود در ایران به تکوین اقیانوس نئوتتیس (Alavi, 1994)، بین صفحه عربی و اوراسیا مربوط می‌شود. تشکیل و تکوین نئوتتیس از پرمین میانی تا عهد حاضر در رژیم‌های مختلف باعث تأثیر بر روی میکروقاره ایران به ویژه حاشیه باختری آن شده است. این فرگشت تا عهد حاضر طی تکوین خود در هر مرحله (بازشدگی، فرورانش، برخورد و پس از برخورد) منجر به تغییراتی در رژیم حاکم بر پوسته ایران‌زمین (میکروقاره ایران مرکزی) شده و نمود آن به صورت پهنه‌های ساختاری متفاوت از قبیل پهنه دگرگونی-ماگمایی سنندج-سیرجان، کمان ماگمایی سنوزوئیک (شامل ارومیه- دختر، البرز- آذربایجان و خاور ایران) از باختر به خاور، شده است. علاوه بر آن، حاشیه شمالی صفحه عربی که فرورانش به سمت آن رخ نداده است، به صورت واحدهای رسوبی چین‌خورده و تراستی، پهنه ساختاری زاگرس را تشکیل می‌دهد که در حال حاضر به موازات پهنه سنندج-سیرجان و چسبیده به آن (به دلیل بسته شدن نئوتتیس) قرار دارد و توسط کمربند افیولیتی (بقابای نئوتتیس) فرارنده شده (خوی-نیریز) از پهنه سنندج - سیرجان جدا می‌شود (تراست اصلی زاگرس). ویژگی‌های زمین‌شناسی و تاریخچه رخداد‌های زمین‌ساختی در هر یک زون‌های ساختاری خود منجر به تشکیل مواد معدنی گوناگون در این زون‌ها شده است، به طوری که هر زون توان معدنی خاص خود را دارا می‌باشد. از این رو قرارگیری مکانی استان‌ها و نحوه پوشش آن‌ها توسط زون‌های ساختاری به عنوان اصلی‌ترین عامل در تشکیل یا عدم تشکیل ذخایر معدنی و نیز نوع ذخایر تشکیل شده در آن‌ها می‌باشد. اردبیل بخشی از فلات آذربایجان، از دید بیشتر زمین‌شناسان ادامه زون البرز باختری- آذربایجان است. بنابراین بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختاری آن منجر به شناخت پتانسیل‌ها و قابلیت‌های معدنی طبیعی آن منطقه از کشور خواهد گردید. در منطقه مورد مطالعه کارهای

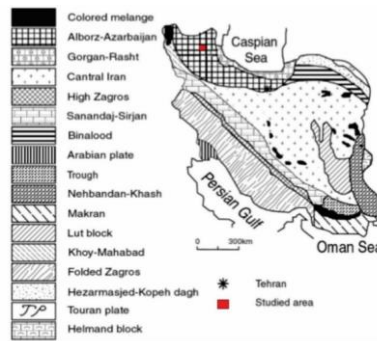
متعددی برای شناسایی سرگذشت تکتونیکی و ماگماتیسیم صورت گرفته است. برای مثال بررسی ژئوشیمی و پتروژنز ولکانیک‌های شمال منطقه لاهرود- اردبیل به وسیله شفاهی مقدم و شهبازی شیران در سال ۱۳۸۹ نشان داده است که ذوب بخشی یک منشا لروزیلیتی می‌تواند عامل ایجاد ماگمایی با ترکیب آندزیتی و با گرایش شوشونیتی باشد. پیروج و همکاران در سال ۱۳۹۳ بررسی سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی غرب نیر را انجام دادند که نتایج کار ایشان نشان داده است که ماگماها در محدوده مورد مطالعه هنگام صعود به ترازهای بالاتر دستخوش آلیش با مواد پوسته‌ای شده است. مبشری‌گرمی و همکاران در سال ۱۳۹۷ زمین‌شیمی و سنگ‌زایی سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه در جنوب و جنوب باختری شهرستان گرمی را بررسی کردند و براساس نتایج ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب به این نتیجه رسیدند که سنگ‌های این محدوده در کمان‌های آتشفشانی جای دارند که گوشته آنها تحت تأثیر فرایندهای فرورانشی متاسوماتیسیم شده قرار گرفته‌اند. همچنین مبشری‌گرمی و همکاران در تحقیق دیگری در سال ۱۳۹۸ بررسی سنگ‌شناسی و ایزوتوپی سنگ‌های بازالتی برزند و مقایسه آن با سنگ‌های بازالتی شهرستان گرمی را انجام داده‌اند و نتایج این پژوهش نشان داد که بازالت‌های منطقه گرمی نسبت به برزند بیشتر تحت تأثیر پدیده ذوب بخشی قرار گرفته‌اند.

فهمیم و همکاران در سال ۱۳۹۸ ویژگی‌های آتشفشان‌شناسی و زمین‌شیمیایی محصولات آخرین فوران سبلان (شمال باختری ایران) را براساس نمودارهای متمایزکننده محیط زمین‌ساختی مورد بررسی قرار دادند و بر پایه ویژگی‌های ژئوشیمیایی عناصر خاکی کمیاب سنگ‌های محدوده سبلان را مرتبط با فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر ورقه ایران دانستند که در یک محیط کمان ماگمایی به وجود آمده‌اند. در زون‌های فرورانش توده‌های مولد، نیمه‌مولد و عقیم در همراهی با هم یافت می‌شوند که شناسایی این توده‌ها از لحاظ اکتشافی بسیار حائز اهمیت است. با وجود بررسی‌های انجام شده در منطقه، تاکنون مطالعاتی جهت شناسایی ماگماهای مولد از عقیم در محدوده قره گل صورت نگرفته است.

هدف از این تحقیق این است که برای اولین بار با استفاده از ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب ماگماهای منطقه مورد

منطقه مورد مطالعه

زمین‌شناسی: منطقه مورد مطالعه در زون متالوژنی اهر- ارسباران در استان اردبیل، ۵۰ کیلومتری شهرستان مشکین‌شهر در بخش مرادلو واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱: زون‌های مهم ساختاری ایران (نبوی، ۱۳۵۵) و موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی آن با مربع قرمز نمایش داده شده است.

دایک‌های تغذیه کننده آتشفشان زایی بعدی باشند. واحدهای سنگی آتشفشانی این محدوده به دلیل فازهای هم‌زمانی و مرتبط به صورت کلی شرح داده می‌شود: تداوم ولکانیسم در منطقه موجب سنگ‌های آتشفشانی زیردریایی پیروکسن آندزیتی با ریخت بالشی Pillow شده است که قطر هر بالش تا ۵ متر نیز می‌رسد. این واحد که بر روی ولکانیک پرش‌ها قرار می‌گیرد، در بعضی نقاط، به صورت پوشش واحد مذکور را پوشانیده و خود نیز در زیر گدازه‌های تراکینی - تراکی آندزیتی که وجود شکاف‌های ستونی Columnar Jointing زیبا ویژگی آن بوده و در کناره‌ها، برشی و گاه توفی می‌شود، قرار می‌گیرد. هم‌زمان با ولکانیسم (E^{br}) و کمی بعد از آن در حوضه‌ای کم‌عمق و بسته رسوب‌گذاری نیز انجام می‌گردیده که حاصل آن تناوبی نازک لایه از ماسه‌سنگ توفی، مارن - گاه ژئپس دار - کنگلومرا و هیالوکلاستیک است (E^{S2}) است که علی‌رغم عدم وجود فسیل، معادل نهشته‌های تیپ فلیش حوضه رسوبی مغان (E^f) شمال زون افیولینی (اله یارلو) در نظر گرفته شده است. واحد E^{S2} همراه با سنگ‌های آتشفشانی قدیمی‌تر و ولکانیک برش‌ها (E^{br}) در زیر سنگ‌های آنالیسم دار تفریتهیک (E^{te}) قرار می‌گیرند که از نگاه رخساره‌ای شامل سه بخش پیروکسن آندزیت و آنالیسم متناوب با گدازه و برش ولکانیکی در پایین، گدازه آنالیسم دار و برش آنالیسم دار در بخش میانی و برش آنالیسم دار با سیمان هیالوکلاستیک و توف شیشه‌ای حاوی آنالیسم در بالا، قابل تشخیص است. با این حال این سری سنگ‌ها جملگی به

مطالعه را از لحاظ درصد ذوب بخشی، عمق ذوب بخشی، نقش سیالات حاصل از فرورائش و مولد یا عقیم بودن مورد ارزیابی قرار دهد.

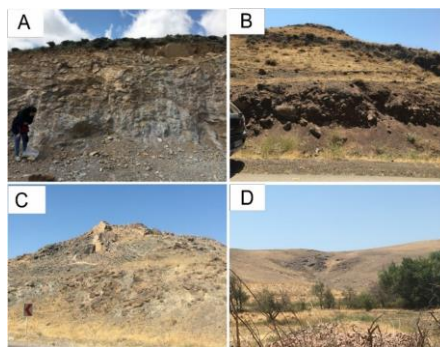
منطقه آذربایجان با توجه به پهنه‌بندی ایران، توسط زمین‌شناسان به قسمت‌های مختلف، جایگاه یکسانی ندارد. در تقسیم‌بندی که توسط نبوی (۱۳۵۵) صورت گرفته استان اردبیل در زون البرز - آذربایجان در نظر گرفته شده است و ارتباط تنگاتنگی با گسترش پالئوتتیس و در نهایت بسته شدن این اقیانوس دارد (Kouhestani et al, 2012). در البرز غربی و آذربایجان سنگ‌های آتشفشانی بیشتر از جنس گدازه‌های آندزیتی می‌باشند. در کمربند ارسباران پلوتونیسم با نفوذ توده‌های آهکی - قلیایی در زمان الیگوسن میانی تا انتهایی شروع شده و با نفوذ توده‌های شوشونیتی در زمان الیگوسن انتهایی و میوسن پیشین ادامه یافته است (Castro et al, 2013). آخرین رخداد پلوتونیسم این کمربند شامل گنبد‌های داسیتی و گرانودیوریتی و مونزونیتی می‌باشد که توده‌های نفوذی قدیمی‌تر را قطع می‌کنند (Aghazadeh et al, 2010). از لحاظ زمین‌شناسی در محدوده قره گل ناپیوستگی هم شیبی بین واحدهای آغازین اوسن متشکل از نهشته‌های نازک لایه فلیش گون و نهشته‌های کرتاسه وجود دارد (مبشر گرمی و همکاران، ۱۳۹۸). ظهور برش‌های آتشفشانی با ترکیب پیروکسن آندزیت (E^{br}) با سیمان توفی هیالوکلاستیکی که با مرز تدریجی بر روی واحدهای فلیش گونه آغازین اوسن قرار می‌گیرند؛ اولین نشان از آتشفشان زایی در منطقه است که در بعضی نقاط ویژگی آتشفشان‌های زیردریایی را نیز از خود نشان داده است. دایک‌های پیروکسن آندزیتی (d^b) و گاه تفرینی (d^{te}) که فراوان این واحد را قطع نموده‌اند شاید

آندزیت و داسیت است، جهت مطالعه و بررسی سنگ‌نگاری در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی کرج تهیه گردید. جهت تعیین بافت و پاراژنز کانه‌ها ۳۰ عدد مقطع نازک صیقلی و ۲۰ مقطع صیقلی از نمونه سنگ‌های برداشت شده از نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب و نادر خاکی ۲۳ نمونه لیتوژئوشیمیایی سطحی به روش (ICPOES) و ۱۴ نمونه مغزه حفاری به روش XRF و ICP-MS در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی کرج مورد مطالعه قرار گرفت. پردازش و تفسیر داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای GIS 10.4.1 و GCDkit 6.0 و Corel DRAW 2019 و ENVI 5.3 انجام گرفت. نقشه موقعیت نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی برداشت شده از محدوده قره گل در شکل ۳ نمایش داده شده است.

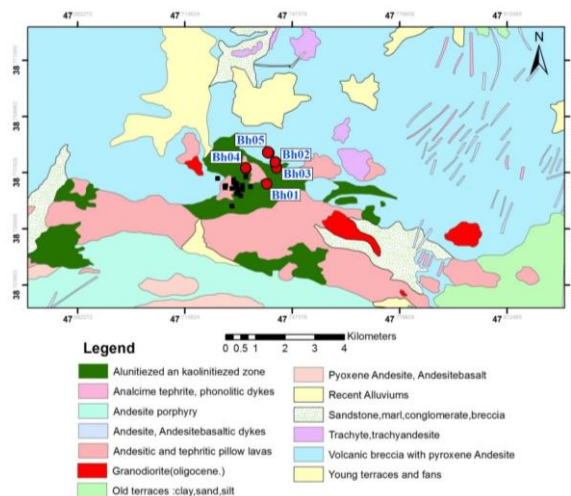
عنوان واحد (E^{te}) در نظر گرفته شده‌اند. ریخت صخره‌ای این واحد نشانگر سختی زیاد و مقاومت آن در مقابل فرسایش بوده است. همچنین واحد (E^{te}) و (E^{br}) با مرز هم‌شیب توسط دو واحد از سنگ‌های آتشفشانی پوشیده می‌گردند. مهم‌ترین توده نفوذی در منطقه قره گل شامل یک توده میکروکوآرتزدیوریت تا گابرویدیوریت ساب ولکانیک بزرگ با سن احتمالی الیگوسن که به درون واحد Ebp و Ebr نفوذ کرده است. (شکل ۲).

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ۱۴ عدد مقطع نازک از نمونه‌های سطحی که شامل سنگ‌های آندزیت، تراکی آندزیت، تراکیت و توف آندزیتی می‌باشد و ۲۸ عدد مقطع نازک از مغزه‌های حفاری که شامل توده‌های تراکی بازالت، بازالت، آندزی بازالت،



شکل ۲: تصاویر صحرایی از منطقه پژوهش؛ A: برش‌های آتشفشانی منطقه که دارای ترکیب پیروکسن آندزیت (Ebr) با سیمان توفی هیالوکلاستیکی که با مرز تدریجی بر روی واحدهای فلیش گونه آغازین ائوسن قرار گرفته‌اند؛ B: نمایی از برون زد واحد آندزیت پورفیری در نزدیکی روستای مازافا (دید به سمت شمال شرق)؛ C: گدازه‌های تراکیتی - تراکی آندزیتی با ساخت ستونی دید به سمت شمال؛ D: نمایی از نفوذ توده گرانودیوریتی به درون واحد Ebp.



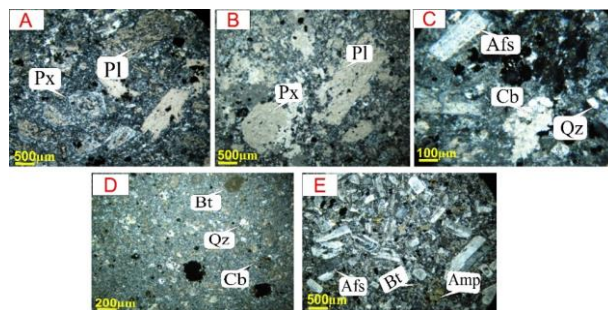
شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده قره گل به همراه موقعیت نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی، نمونه‌های سطحی با مربع مشکی و مغزه‌های حفاری با دایره قرمز نمایش داده شده‌اند.

بحث و نتایج

پتروگرافی

عمده‌ترین واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه شامل سنگ‌های آذرین بیرونی، درونی و آذرآواری است. در محدوده مطالعاتی برونزد سنگ‌های آتشفشانی بیشتر از سنگ‌های آذرین درونی است و همچنین سنگ‌های آذرآواری نیز گسترش نسبتاً خوبی دارند. بازالت‌ها در مطالعات صحرایی به رنگ‌های سیاه و تیره نمایان شده‌اند. بافت در این واحد پورفیریک در خمیره کریپتوکریستالین می‌باشد. پلاژیوکلاز و پیروکسن به عنوان کانی‌های اصلی به همراه کانی‌های فرعی اوپک در این سنگ‌ها یافت می‌شوند. پلاژیوکلازها شدیداً دگرسان شده و به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند (شکل A و B). آندزی بازالت‌ها در منطقه به رنگ خاکستری تا خاکستری مایل به بنفش دیده می‌شوند و دارای ضرب رنگی مزوکرات می‌باشند. ترکیب این سنگ‌ها عموماً حد واسط تا بازیک می‌باشد بافت پورفیریتیک در خمیره کریپتوکریستالین و میکروولیتی حفره‌دار در اغلب مقاطع دیده شده است. دو کانی پلاژیوکلاز و پیروکسن کانی‌های اصلی در نمونه‌های

برداشته شده از این واحد می‌باشند که شدیداً دگرسان شده و به کانی‌های کربناته و رسی تبدیل شده‌اند. دیگر واحد پتروگرافی مشاهده شده در مغزه‌های حفاری داسیت‌ها بودند. این سنگ‌ها دارای ترکیب حد واسط می‌باشد. بافت این سنگ‌ها پورفیری با زمینه کریپتو تا میکروکریستالین می‌باشد. دگرسانی مشاهده شده در این واحد ولکانیکی- ساب ولکانیکی شامل کربناتی شدن، رسی شدن، سیلیسی شدن، سریسیتی شدن است (شکل C۴). کانی‌های اصلی در این واحد شامل پلاژیوکلاز، بیوتیت و کوارتز به همراه کانی فرعی اوپک دیده می‌شوند. واحدهای نفوذی مشاهده شده در مقاطع از جنس میکرودیوریت با ترکیب حد واسط می‌باشد. کانی‌های اصلی که در مقاطع مشاهده شده است شامل پلاژیوکلاز و آمفیبول می‌باشد. کانی‌های فرعی بیوتیت و اوپک نیز در مقاطع مشاهده می‌شود. کانی‌های بیوتیت ثانویه اطراف آمفیبول احتمالاً نشانه دگرسانی پتاسیک هستند (شکل D۴ و E). بافت مشاهده شده در اکثر مقاطع پورفیریتیک با زمینه میکروگرانولار، اینترسترال و گاهی خمیره کریپتوکریستالین می‌باشد.

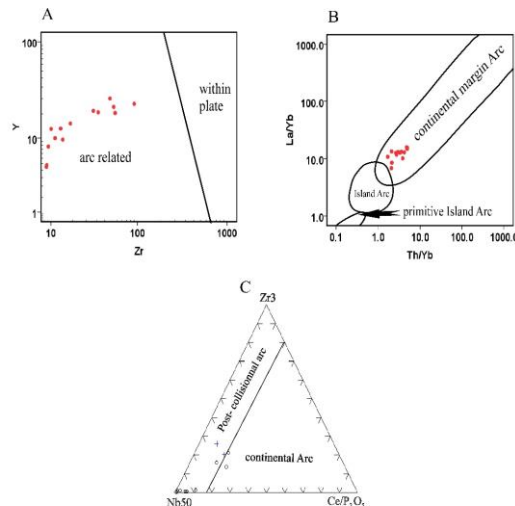


شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی از اجزای تشکیل دهنده سنگ‌های موجود در منطقه قره گل؛ A: تبدیل شدگی جزئی پیروکسن و پلاژیوکلاز به کانی کربناته در بازالت (xpl)؛ B: تبدیل شدگی کامل کانی پیروکسن و پلاژیوکلاز به کانی‌های کربناته (xpl)؛ C: کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپار، کانی فرعی اوپک و کانی‌های دگرسانی کربنات کانی رسی و کوارتز در سنگ داسیت (xpl)؛ D: نور عبوری از میکروکوارتز دیوریت با بافت پورفیری و خمیره میکروگرانولار، (xpl)؛ E: درشت‌بلورهای بیوتیت، آمفیبول، پلاژیوکلاز و کوارتز در زمینه شیشه‌ای (xpl)، Px= Pyroxene, Pl= Plagioclase, Afs= Alkali feldspar, Cb= Carbonate, Qz= Quartz, Bt= Biotite, Amp= Amphibol (Whitney and Evans, 2010).

ژئوشیمی

تعیین محیط زمین ساختی سنگ‌های محدوده قره گل برای تفسیر ماهیت سنگ‌زایی آن‌ها بسیار کاربردی است. همان‌طوری که در شکل A۵ دیده می‌شود براساس نمودار دو متغیره Z در برابر Y نمونه‌های محدوده قره گل در محدوده کمان‌های ماگمایی واقع شده‌اند که این کمان‌ها وابسته به موقعیت زمین ساختی فرورانش هستند. همچنین

برای شناسایی محیط تکتونیکی محدوده مورد مطالعه می‌توان از نمودارهای دو متغیره La/Yb در برابر Th/Yb و نمودار سه متغیره ZR3-Nb50-Ce/P2O5 استفاده کرد (شکل B۵ و C)، براساس این مطالعات نیز نمونه‌های محدوده قره گل در حاشیه فعال قاره‌ای و در کمان‌های بعد از برخورد قاره‌ای قرار گرفته‌اند.



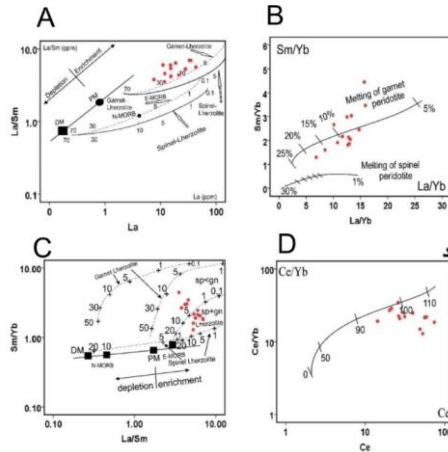
شکل ۵: موقعیت نمونه‌های سطحی و عمقی محدوده قره گل در نمودارهای تمایز محیط تکتونیکی: A: نمودار دومتغیره Zr در برابر Y (Muller and Grooves, 1977); B: نمودار دومتغیره La/Yb در برابر Th/Yb؛ C: نمودار سه متغیره Zr3-Nb50-Ce/P₂O₅ برای جدایش کمان‌های قاره‌ای از کمان‌های بعد از برخورد قاره‌ای.

ذوب خطی را به صورت عددی بر روی خطوط نمایش داده‌ایم. محدوده گوشته غنی‌شده و تهی شده روی خط ضخیم مشخص شده است. با فرض لرزولیتی بودن گوشته نمونه‌های مورد بررسی با ماگماهای تشکیل شده از گوشته غنی شده مطابقت دارند و روی روند منطبق با ۵-۱۰ درصد ذوب بخشی لرزولیت گارنت دار واقع شده است. همچنین برای پی بردن به درصد ذوب بخشی و ترکیب کانی‌شناسی منشأ ماگماهای مربوط به محدوده قره گل می‌توان از نمودار دومتغیره La/Yb در برابر Sm/Yb استفاده کرد، همان‌طوری که در شکل B۶ دیده می‌شود نمونه‌ها در محدوده‌ای از نمودار واقع شده‌اند که نشان‌دهنده ذوب بخشی ۱۰ الی ۲۰ درصد پریدوتیت گارنت دار است. به‌طور کلی نسبت Sm/Yb در سنگ‌های آذرین محدوده قره گل نشان‌دهنده درصد بالای گارنت در ناحیه منشأ باشد، از این رو نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb نیز نشان از ذوب بخشی اسپینل لرزولیت ماگمایی در ناحیه منشأ دارد که از روند گوشته‌ای (خط عبوری از DM و PM شکل C۶) تبعیت می‌کند. با توجه به این نمودار سنگ‌های آذرین محدوده قره گل از ذوب بخشی ۳ تا ۱۰ درصد یک منشأ گوشته‌ای غنی‌شده (لرزولیت اسپینل - گارنت دار) به وجود آمده‌اند که با نمودارهای قبلی در تطابق خوبی است. همچنین برای پی بردن به عمقی که فرایند ذوب بخشی در آن اتفاق افتاده است از نمودار تغییرات عناصر کمیاب Ce در برابر Ce/Yb استفاده کردیم و همان‌طوری که در شکل D۶ نشان داده

مشاهدات سنگ‌شناسی و داده‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که گرانیتوئیدهای محدوده قره گل از نوع I و مرتبط با کالک آلکان‌های زون فرورانش هستند؛ مقدار P2O₅ این سنگ‌ها از ۰/۷۰ تا ۳/۶ متغیر است و روند کاهشی نسبت به SiO₂ نشان می‌دهد که با نوع I سازگار است، همچنین نسبت Rb/Sr بین ۰/۶۰ تا ۰/۴ نیز با مقدار آن در گرانیتوئیدهای نوع I (کمتر از ۰/۹) همخوانی دارد (Sepidbar et al, 2018)، از طرفی ویژگی‌های گرانیتوئیدهای نوع I در سنگ‌های آذرین محدوده قره گل با ترکیب ژئوشیمیایی متآلومینوس تا پرآلومینوس به وسیله حضور هورنبلند، نبود کانی‌های اولیه آلومینیوم‌دار (مسکویت، کوردیریت، تورمالین، آندالوزیت و گارنت)، مقادیر متغیر K₂O (3.7-0.07) و Al₂O₃ (24.19-17) و محتوای پایین CaO (8.9-0.7) و Na₂O نیز قابل تأیید است (Chappell and White, 2001). از دیگر ویژگی مشخص‌کننده گرانیتوئیدهای نوع I جایگیری در عمق کم، محتوای بالای آب ماگمایی و دمای ۳۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است. این نوع گرانیتوئیدها معمولاً در ارتباط نزدیکی با کانه‌زایی از نوع مس پورفیری هستند. نمودار La در برابر La/Sm برای توصیف منشأ ماگمای سنگ‌های محدوده قره گل مورد استفاده قرار گرفت (شکل A۶). روند تغییر ترکیب ماگمایی که با نسبت‌های متفاوت ذوب بخشی از گوشته اسپینل لرزولیتی و گارنت لرزولیتی حاصل شده است با خطوط ممتد و بریده نمایش داده شده است. درجه

دار در عمق کمتر از ۲۵۰ کیلومتر ماگمایی غنی از پتاسیم تولید می‌شود که می‌تواند عامل ایجاد ماگمایی با گرایش شوشونیتی همانند نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده قره گل باشد.

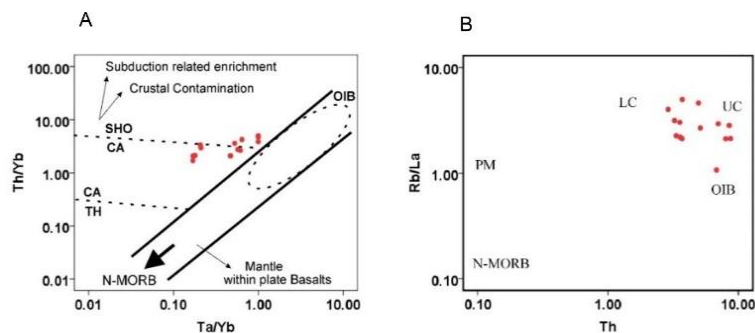
شده است محدوده قرارگیری نمونه‌ها حاکی از انجام فرایند ذوب بخشی در اعماق ۱۰۰ تا ۱۱۰ کیلومتری است. بنا به نظر کانسیکا و گرین (Conceicao and Green, 2004) در نتیجه ذوب بخشی یک منشأ لرزولیتی-فلوگوپیت-پارگازیت



شکل ۶: A: نمودار La نسبت به La/Sm به منظور محاسبه ذوب بخشی؛ B: نمودار تعیین درصد ذوب بخشی سنگ‌های محدوده قره گل با استفاده از نمودار دومتغیره La/Yb در برابر Sm/Yb؛ C: نمودار تعیین درصد ذوب بخشی سنگ‌های محدوده قره گل با استفاده از نمودار دومتغیره La/Sm در برابر Sm/Yb؛ D: نمودار تعیین عمق ذوب بخشی سنگ‌های محدوده قره گل با استفاده از نمودار دومتغیره Ce در برابر Ce/Yb

بهبتر رابطه بین سنگ‌های محدوده قره گل با گوشته غنی‌شده، پوسته بالایی، پایینی و جزایر قوسی از نمودار دومتغیره Rb/La در برابر Th نشان استفاده شده است همان طوری که شکل BV نشان می‌دهد نمونه‌های محدوده قره گل نیز بیشتر نشان‌دهنده آلودگی با پوسته بالایی هستند.

یکی از نمودارهای کاربردی جهت شناسایی پهنه فرورانش غنی‌شده از محیط‌های درون صفحه‌ای نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb است و روند خطی مشاهده شده در این نمودار با خاستگاه آلودگی با سنگ‌های پوسته در حین فرورانش مطابقت دارد (شکل AV) که نشان‌دهنده نقش پوسته قاره‌ای و غنی‌شدگی ناشی از فرورانش در خاستگاه ماگمای مولد سنگ‌های آذرین محدوده قره گل است. برای درک



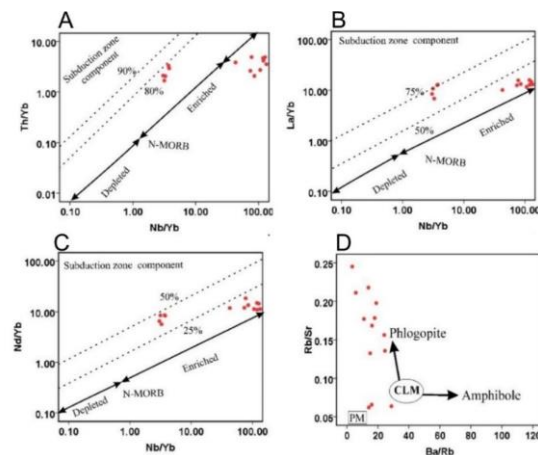
شکل ۷: A: نمودار دومتغیره Ta/Yb در برابر Th/Yb؛ B: نمودار دومتغیره Rb/La در برابر Th. مقادیر معرف در این نمودارها از (مقادیر گوشته تهی شده از مکنزی و آنیونز (McKenzie and O'Nions, 1991)، پوسته زیرین ویور و تامی (Weaver and Tamey, 1984)، پوسته بالایی از مک لنان و تیلور (McLennan and Taylor, 1981)، ادامه موارد از سان و مک دونوق (Sun and McDonough, 1989) گرفته شده است.

در گوه گوشته‌ای نیز این فرضیه را تأیید می‌کند که سیالات حاصل از پوسته فرورو با ماگمای اصلی آمیخته شده باشند

از طرف دیگر به دلیل غیرمتحرک بودن عناصر Hf, Zr, Th, Nb و Ta در سیال‌های ماگمایی، غنی‌شدگی این عناصر

آن‌ها را پیامد ذوب گوشته با غنی‌شدگی از سیال و مذاب‌های پوسته فرورو دانست که نمودارهای (شکل ۸) هم بر این فرضیه منطبق است، در تشکیل این سنگ‌ها ذوب آبدار گوه گوشته‌ای همراه با مقداری فلوگوپیت و پارگازیت نقش ایفا می‌کنند، عناصر Rb و Ba در ترکیب فلوگوپیت سازگارند، در حالی که عناصر Ba, Sr, Rb دارای سازگاری متوسطی در آمفیبول هستند (پیروج و همکاران، ۱۳۹۳). بنابراین اگر این ماگما از ذوب بخشی منشأ آمفیبول دار حاصل شده باشند نسبت Ba/Rb بیشتر از ۴۵ و نسبت Rb/Sr کمتر از ۰/۰۶ دارند، اما در صورتی که پدید آمده از یک خاستگاه فلوگوپیت دار باشند نسبت Ba/Rb در آن‌ها کمتر از ۲۰ و نسبت Rb/Sr بیشتر از ۰/۱ خواهد بود. همان‌طوری که شکل A۸ نشان می‌دهد مقادیر Ba/Rb برای سنگ‌های محدوده قره گل بین ۴/۴۳ تا ۱۶/۱۲ متغیر است و نسبت Rb/Sr بین ۰/۰۶ تا ۰/۴۳ می‌باشد که با ماگمای پدید آمده از ذوب بخشی یک خاستگاه فلوگوپیت دار سازگار است که هماهنگی خوبی با ماهیت شوشونیتی سنگ‌های منطقه نیز دارد. بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که سنگ‌های منطقه از ذوب ۱۵ درصد یک منبع گوشته‌ای تیپ مورب با رخساره اسپینل در یک محیط داخل صفحه قاره‌ای تا پس از برخوردی حاصل شده است که با درجات متفاوتی با سنگ‌های پوسته قاره‌ای آلوده شده‌اند.

(Plank and Langmuir, 1998). از این رو برای بررسی نقش سیالات حاصل از فرورانش در ماگمای مولد سنگ‌های منطقه مورد مطالعه از نمودارهای Nb/Yb در برابر Th/Yb، Nd/Yb در برابر La/Yb استفاده کردیم. همان‌طوری که شکل ۷ نشان می‌دهد خطوط موازی با روند گوشته‌ای نشان‌دهنده نقش فرورانش در غنی‌شدگی گوشته‌ای است. روندهای خطی در تمامی این نمودارها، دو ناحیه منشأ متفاوت، یکی گوشته منبع مورب و دیگری پوسته قاره‌ای را برای منشأ سنگ‌های منطقه معرفی می‌کند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مقادیر $La/Nb < 1$ نشانه ماگمای منشأ گرفته از گوشته آستنوسفری پشته‌های میان‌اقیانوسی و $La/Nb > 1$ منشأ گرفته از گوشته غنی شده یا آرایش یافته از پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهد (Aldanmaz, 2012). در تمامی نمونه‌های مربوط به مغزه‌های حفاری ۱، ۳ و ۵ این نسبت کمتر از یک است و در مغزه‌های حفاری ۲ و ۴ بیشتر از یک است. همچنین نسبت Ba/Nb در مغزه‌های حفاری گروه اول کمتر از ۸ است که مطابق با بازالت‌های پشته‌های میان‌اقیانوسی است (Taylor and Martinez, 2003) و مقادیر بالاتر آن را همان‌طور که در مغزه‌های حفاری ۲ و ۴ یافت می‌شود، منطبق بر متاسوماتیسم پوسته فرورو و آرایش پوسته‌ای ناشی از آن دانسته‌اند. براساس ماهیت شوشونیتی سنگ‌های آذرین محدوده قره گل می‌توان ماگمای مولد



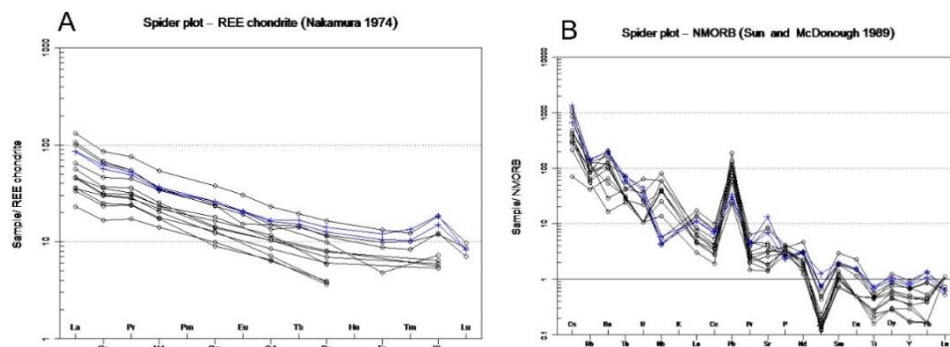
شکل ۸: A، B، C: Nb/Yb در برابر Th/Yb، La/Yb و Nd/Yb برای نشان دادن تأثیر فرورانش بر غنی‌شدگی برخی عناصر کیمیا؛ D: جایگاه نمونه‌های محدوده قره گل در نمودار Ba/Rb در برابر Rb/Sr، نشان‌دهنده روند موافق با گوشته فلوگوپیت دار.

در این نمودارها، در طول فرایند ذوب و تبلور بخشی، به عنوان عناصر ناسازگار رفتار می‌کند و میزان آن‌ها در طی تفریق ماگمایی در مذاب باقیمانده افزایش می‌یابد. به منظور

آنچه عناصر نادر خاکی (REE) را در بررسی‌های سنگ شناسی از اهمیت خاصی برخوردار می‌کند، نتایجی است که از بررسی گروهی آن‌ها حاصل می‌شود. همه عناصر موجود

نشان‌دهنده غنی‌شدگی LREE و هضم پوسته است. همچنین نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نسبت‌های بالای $(La/Yb)_n$ و Sr/Y از ویژگی‌های محیط فرورانش لیتوسفر اقیانوسی به زیر پوسته قاره‌ای و ذوب بخشی لیتوسفر اقیانوسی آبدار است که شرایط مطلوبی را برای تشکیل کانسارهای مس پورفیری فراهم می‌کند. میزان بالای Sr و میانگین $Sr/Y=26.82$ نیز نشان‌دهنده افزایش آب ماگما و توقف تبلور پلاژیوکلاز است. آنومالی مشخص و مثبت عنصر Pb در دیاگرام عنکبوتی احتمالاً نشانگر دخالت پوسته قاره‌ای در تکوین و تحول ماگمای مولد سنگ‌ها است. آنومالی منفی Ti نیز می‌تواند نشانگر تبلور اکسیدهای Fe-Ti و یا کلینوپیروکسن در مراحل اولیه تفریق و نیز فوگاسیته بالای اکسیژن در محیط منشأ ماگما باشد. از طرفی مقادیر مثبت پتاسیم و روبیدیوم و مقادیر منفی فسفر، نیوبیوم، زیرکونیوم و تیتانیوم نشان‌دهنده وابستگی این سنگ‌ها به ماگماهای کالک آلکالن وابسته به محیط‌های فرورانشی است (Machado et al, 2005).

بررسی تغییرات این عناصر، نمودار عنکبوتی هنجار شده برای سنگ‌های محدوده مورد مطالعه ترسیم گردید نمونه‌هایی که تعداد داده‌های سنسورد در آن‌ها بیش از ۵۰ درصد بود از روند پردازش حذف گردید. تغییرات عناصر نادر خاکی در دیاگرام‌های رسم شده (شکل ۹) دارای روندی با شیب منفی بوده و غنی‌شدگی از عناصر LREE^۲ نسبت به عناصر HREE^۳ نسبتاً بالا می‌باشد. این ویژگی از ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های منطقه است و شاخصه کمان‌هایی ماگمایی است این شاخصه احتمالاً می‌تواند در اثر فوگاسیته بالای CO_2 / H_2O باشد. نمونه‌های سنگ‌های محدوده قره‌گل دارای نسبت بالای $(La/Yb)_n=8.30-16.19$ و آنومالی یوربیم مثبت (1.07-0.97) و میانگین Eu/Eu^* برابر با 1.01 هستند که می‌تواند مرتبط با تفریق گارنت یا هورنبلند در ماگمای موجود در قسمت‌های عمیق پوسته (عمق ۴۵ تا ۶۰ کیلومتری) باشد و حالت اکسیداسیون ماگما (محتوای بالای آب ماگمایی) در نتیجه نبود تفریق پلاژیوکلاز از ماگمای اولیه و تشکیل هورنبلند را نشان می‌دهد. ضمن اینکه نسبت بالای $(La/Sm)_n=3.69-7.33$



شکل ۹: نمودارهای بهنجار شده عنصرهای خاکی کمیاب نمونه‌های برداشت شده از محدوده روستای قره گل؛ A: ترکیب کندریت (Nakamura, 1974)؛ B: ترکیب N-MORB (Sun and McDonough, 1989).

ماگماهای مولد و عقیم

به وجود می‌آیند (Li et al, 2016). همچنین در ماگماهای عقیم، گوه گوشته‌ای استوسفری (که به وسیله آزدایی لیتوسفر فرورانده متاسوماتیسم شده است) در نتیجه تعامل با صفحه فرارنده، آب‌های جوان ماگماهای کمانی را به وجود می‌آورد که به پوسته پایینی مافیک اضافه می‌شود. در مقابل ماگماهای گرانیتوئیدی مولد با گرایش ژئوشیمیایی پتاسیم بالا کالک آلکالن تا شوشونیتی (Roberts and Clemens, 1993) از طریق تعادل مجدد حرارتی، آرایش پوسته‌ای - تبلور بخشی (AFC) گوشته و

در زون‌های فرورانش توده‌های مولد، نیمه مولد و عقیم در همراهی با هم یافت می‌شوند که شناسایی این توده‌ها از لحاظ اکتشافی بسیار حائز اهمیت است. ماگماهای گرانیتوئیدی عقیم عموماً در محیط‌های فرورانشی قبل از برخورد تشکیل می‌شوند (Shafiei et al, 2009; Shahabpour, 1992; Li et al, 2016; Gammons and Williams Jones, 1997). در حالی که ماگماهای گرانیتوئیدی مولد در محیط‌های تکتونیک پس از برخورد

مذاب‌های پوسته‌ای در محیط‌های تکتونیکی پس از برخوردی تشکیل می‌شوند (Sisson et al, 2005; Roberts and Clemens, 1993; Huang et al, 2013; Hildreth et al, 1991). عناصر خاکی کمیاب کمترین تأثیرپذیری و تحرک را در طول فرایندهای هوازگی و دگرگونی‌های درجه پایین و دگرسانی گرمایی دارند، از این رو مطالعه آن‌ها در تعیین منشأ سنگ‌ها بسیار حائز اهمیت است (ساداتی و همکاران، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۸). روش لیتوژئوشیمیایی چند عنصری می‌تواند تحولات ژئوشیمیایی ماگماها را با استفاده از ویژگی‌های عناصر خاکی کمیاب بررسی کند و با استفاده از الگوی ژئوشیمیایی سنگ‌های مورد مطالعه و مقایسه آن با الگوی ژئوشیمیایی سنگ‌های مولد و عقیم امکان تشخیص پتانسیل اقتصادی یک کانسار را فراهم آورد (زرآسوندی و همکاران، ۱۳۹۸). در این میان استفاده از نسبت‌های همچون نسبت LREE/HREE, Sr/Y, Lan/Smn, Dyn/Ybn, Sr/Y, Lan/Yb و ... در تشخیص منشأ و ماهیت ماگما نقش مهمی را ایفا می‌کند. از این رو در ادامه برای تشخیص مولد یا عقیم بودن ماگماهای منطقه از بررسی عناصر فرعی و عناصر کمیاب خاکی در ۱۴ نمونه برداشت شده از مغزه‌های حفاری سود جستیم تا بررسی کنیم که ماگماتیسیم منطقه چه تأثیری بر روی کانی‌سازی داشته است.

بررسی ماهیت آداکیتی با استفاده از نسبت Sr/Y: بررسی‌های انجام شده در زون ارومیه دختر نشان‌دهنده همراهی اغلب کانه‌زایی‌ها با ماگماتیسیم کالک آلکالن و شبه آداکیتی است که در نتیجه فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ورقه ایران حاصل شده است. از آنجا که آداکیت‌ها و اهمیت آن‌ها در تشکیل سوئیت‌های ماگمایی مستعد برای کانه‌زایی مس پورفیری مسجل گشته است و ضمن اینکه بسیاری از سیستم‌های کانه‌زایی مس پورفیری در ایران با آداکیت‌ها همراه می‌باشند لذا شناسایی و پیگیری این تیپ سنگ‌های ماگمایی در ایران و خصوصاً پوسته کمانی ارومیه دختر امری اجتناب‌ناپذیر است. دروموند و دفانت (۱۹۹۰) آداکیت‌ها را به‌عنوان سنگ‌هایی با ژئوشیمی مخصوص معرفی کردند که در کمان‌های فرورانشی قاره‌ای از ذوب بخشی منشأ مافیک آبدار مانند اکلوژیت یا گارنت آمفیبول ایجاد می‌گردند. البته به عقیده دروموند و دفانت (۱۹۹۰) و مارتین (۱۹۹۹) چنین مذابی از ذوب پوسته بازالتی اسلب اقیانوسی فرورونده نیز و یا

پوسته تحتانی بالای جبهه که به لحاظ تکتونیکی و یا ماگمایی ضخیم شده باشد نیز می‌تواند تشکیل شود (Kay and Mpodozis, 2001). سیستم‌های ماگمایی مولد و عقیم (ماگماتیسیم کالک آلکالن در محیط‌های تکتونیکی کمانی) به ترتیب با نسبت‌های بالا و پایین استرانسیوم به ایتریوم مشخص می‌شوند (Richards, 2009; Wilkinson, 2013; Haschke et al, 2002; Cooke et al, 2005) و در تمامی کمرندهای کوهزایی سرتاسر جهان یافت می‌شوند. شناخت منشأ و پتروژنز این سیستم‌ها برای درک تکامل و ثبات طولانی مدت پوسته قاره‌ای و پتانسیل تشکیل ذخایر معدنی با ارزش اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار است (Spencer, 2018; Monecke et al, 2018). نتایج پژوهش‌ها پیرامون سنگ‌های آداکیتی تبیین در زون‌های فرورانش سنوزوئیک، نشان می‌دهد که پورفیری‌های مولد در زون ارومیه دختر به وسیله مقادیر نسبتاً بالای Sr/Y (۴۰-۱۴۹) مشخص می‌شوند، در حالی که توده‌های ماگمایی عقیم معادل آن‌ها مقادیر نسبتاً پایینی از Sr/Y (۲-۸۸) دارند (Sepidbar et al, 2018). نمونه‌های محدوده قره گل دارای میانگین Sr/Y=26.82 هستند و براساس نمودار Sr/Y در برابر Y همه نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده غیر آداکیتی قرار می‌گیرند. این نوع ماگماتیسیم از مشخصه‌های کمان‌های ماگمایی عادی است. نسبت Sr/Y بالاتر از ۲۰ با منشأ ذوب بخشی قسمت‌های عمیق پوسته ضخیم شده در ارتباط است (Sepidbar et al, 2018). میانگین و ماکزیمم نسبت Sr/Y در نمونه‌های محدوده قره گل به ترتیب ۲۶/۸ و ۵۲/۲ است که نزدیک با این نسبت در کانسارهای پورفیری کانه‌دار است (Sr/Y>30)، این نسبت می‌تواند نشانه پوسته ضخیم (بیشتر از ۳۰ کیلومتر) باشد که در آن استرانسیوم به صورت سازگار رفتار کرده و وارد ساختمان پلاژیوکلاز می‌شود در حالی که Y به صورت عنصر ناسازگار عمل می‌کند (براساس مطالعات پتروگرافی حضور فراوان فنوکریست‌های پلاژیوکلاز نیز با این نسبت سازگار است)، بنابراین نسبت Sr/Y می‌تواند به عنوان شاخص باروری ماگما و تفریق پلاژیوکلاز عمل کند. براساس نمودار نسبت نرمالیز شده Lan/Ybn به Yb اغلب سنگ‌های محدوده قره گل در محدوده ذوب بخشی ۳۰ درصد آمفیبولیت گارنت قرار می‌گیرد و در نمودار Sm/Yb در برابر La/Sm اغلب سنگ‌های محدوده قره گل در محدوده‌ای با ضخامت ۳۵ تا

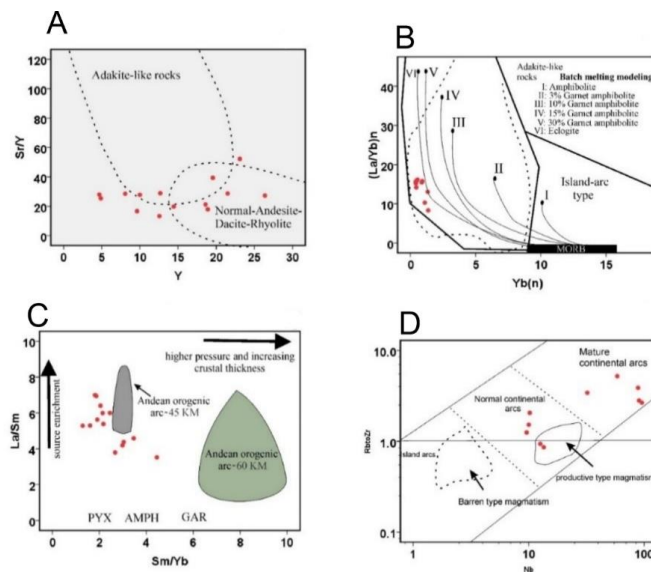
در سایر ماگماهای مولد در این کمر بند است و نشان‌دهنده این است که این ماگما از ذوب بخشی پوسته پایینی ضخیم شده منشأ می‌گیرد. همچنین ماگمای مولد نسبت LREE/HREE بالاتری نسبت به ماگمای عقیم دارد، که این برتری در نمونه‌های محدوده قره گل نیز به چشم می‌خورد. اسدی و همکاران در سال ۲۰۱۴ پیشنهاد کردند که الگوی عناصر فرعی بهنجار شده نسبت به N-MORB مربوط به ماگماهای مولد به وسیله غنی‌شدگی در Cs, Rb, Ba و Pb و تهی‌شدگی در Ta, Th, Zr, Hf, Nb و Ti مشخص می‌شوند. در واقع پورفیری‌های مولد برخلاف نوع عقیم معمولاً آنومالی منفی Nb, Ta و Ti نشان می‌دهند. این فرایند نشان می‌دهد که گارنت به عنوان فاز باقیمانده در اتاق ماگمایی منشأ سنگ‌ها حضور دارد و اشاره بر تشکیل در فشار ($>15\text{kbar}$) معادل ۴۵-۵۵ کیلومتر دارد (Palin et al, 2016). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ذوب بخشی آمفیبولیت - گارنت‌ها در فشارهای بالا ($>12\text{kbar}$) مذابی را به وجود می‌آورد که در تعادل با گارنت به عنوان فاز باقیمانده است و به دلیل شرکت پذیری بالای HREE ها در گارنت ماگمای تشکیل شده نسبت بالای LREE/HREE را خواهد داشت. از این رو نسبت $(\text{La}/\text{Sm})_n$ و $(\text{Dy}/\text{Yb})_n$ می‌تواند کانی‌شناسی ناحیه منشأ ماگما را شناسایی کند (برای تشخیص نقش هورنبلند (\pm تیتانیت) در برابر گارنت (Richards et al, 2012). براساس این پژوهش‌ها، مقادیر نسبتاً بالا $(\text{La}/\text{Sm})_n = 4.6-6.6$ و $(\text{Dy}/\text{Yb})_n = 1.2-2$ گرانیتوئیدهای مولد نشان‌دهنده غنی‌شدگی در منشأ مذاب و حضور آمفیبول و کمی گارنت به عنوان فاز باقیمانده است. در حالی که نسبت‌های پایین $(\text{La}/\text{Sm})_n = 1.1-2.2$ و $(\text{Dy}/\text{Yb})_n = 0.8-1.1$ منشأ مذاب با غنی‌شدگی کمتر همراه با مقادیر بسیار کم و یا عدم حضور آمفیبول و گارنت در منشأ را نشان می‌دهد در سنگ‌های آذرین محدوده قره گل مقادیر $(\text{La}/\text{Sm})_n$ و $(\text{Dy}/\text{Yb})_n$ به ترتیب $3/6-7/3$ و $0/1-8/53$ متغیر است، که با حضور آمفیبول و کمی گارنت در منشأ به عنوان فاز باقیمانده مطابقت دارد و مشابه با گرانیتوئیدهای مولد است. در این پژوهش نمودار Dy/Yb در برابر La/Sm برای تمایز نقش هورنبلند (\pm تیتانیت) در برابر گارنت به کار گرفته شده است (شکل ۱۱)، مقادیر بالا Dy/Yb نرمالیز شده نسبت به کندریت نشان‌دهنده

۴۰ کیلومتر قرار می‌گیرند که نشانه پوسته نسبتاً ضخیم است. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در اغلب کانسارهای مس پورفیری ضخیم شدگی پوسته ضمن فرورانش حاشیه قاره‌ای و فرایندهای پس از برخورد باعث فشردگی، بالا رفتن دما و فشار، هضم و آرایش ماگمای جایگزین شده در پوسته پایینی می‌شود که با گذشت زمان و توسعه بیشتر این فرایندها منجر به تشکیل ماگمای آداکیت مانند می‌شود و در نهایت با تفریق هورنبلند و افزایش آب ماگما شرایط برای تشکیل ماگماهای مولد مس پورفیری فراهم می‌گردد. از طرف دیگر بر روی نمودار تعیین محیط‌های تکتونیکی Nb در برابر Rb/Zr اغلب سنگ‌ها در محدوده کمان‌های عادی قاره‌ای قرار گرفته‌اند. پیشنهاد شده است که گرانیتوئیدهای مولد با سرشت کالک آلکالن اغلب از چنین محیط‌های تکتونیکی منشأ می‌گیرند. این ویژگی‌های ژئوشیمیایی نیز همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، بر مولد بودن سنگ‌های ماگمایی محدوده قره گل اشاره دارد.

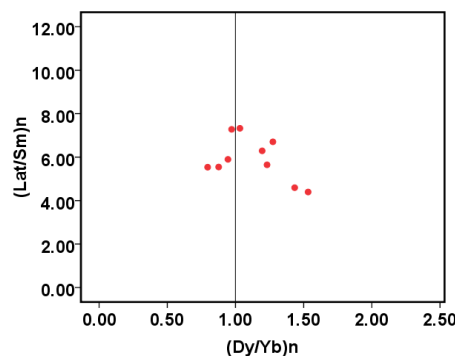
کاربرد شاخص‌های ژئوشیمیایی برای تشخیص ماگمای مولد از عقیم: همان‌طوری که پیش‌تر بحث شد، فرایندهای زیادی برای ایجاد پیدایش گرانیتوئیدها در محیط‌های کوهزایی برخوردار است یا برافزایی پیشنهاد شده است، از جمله: الف) ذوب بخشی قسمت‌های پایینی پوسته قاره (White et al, 2017)، ب) پوسته اقیانوسی فرورانش شده (Palin et al, 2016)، ج) تبلور تفریقی سنگ‌های بازالتی یا دیوریتی (Macpherson et al, 2006)، د) اختلاط ماگمایی سنگ‌های بازالتی و فلسیک و ه) آرایش پوسته‌ای گوه مشتق شده از گوشته (Sepidbar et al, 2018). تصور بر این است که ذوب پوسته پایینی مافیک ضخیم شده جوان یا تبلور بخشی ماگمای بازالتی آبدار فاکتور کلیدی تولید انواع ماگماهای مولد است (Hollings et al, 2005). در حالی که ذوب بخشی پوسته پایین مافیک نازک جوان به عنوان فرایندی در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند ماگماهای عقیم تولید کند. گرانیتوئیدهای مولد در کمر بند ماگمایی ارومیه دختر مقادیر پایین Ni (9-31 ppm) و Cr (14-36 ppm) را نسبت به گرانیتوئیدهای عقیم (Ni = 11-73 ppm; Cr = 21-81 ppm) نمایش می‌دهند (Sepidbar et al, 2018). مقادیر پایین Ni (5-19.6 ppm) و Cr (14-30.2 ppm) در سنگ‌های آذرین محدوده قره گل قابل مقایسه با مقادیر آن

کمی گارنت است (Richards et al, 2012). همان طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود در سنگ‌های محدوده قره‌گل این نسبت‌ها با حضور آمفیبول و مقدار کمی گارنت همان طور که از ماگماهای مولد انتظار می‌رود، نزدیک است. بنابراین ترسیم مقادیر مقادیر (La/Sm)_n در برابر (Dy/Yb)_n در محدوده قره‌گل نشان می‌دهد که نمونه‌ها دارای مقادیر مشابه با گرانیتوئیدهای مولد هستند.

تفریق گارنت یا باقی ماندن گارنت در ماگمای اولیه است، زیرا همان طور که قبلاً اشاره شد گارنت ضریب شرکت-پذیری بالایی برای HREE دارد. به نظر می‌رسد که مقادیر Dyn/Ybn برای ماگماهای نیمه مولد آن قدر بالا نیست که نقش عمده‌ای را برای گارنت (به عنوان فاز باقیمانده یا تفریق‌یافته) ثابت کند. در مقایسه نسبت Dyn/Ybn بالا در کانسارهای اقتصادی نشان‌دهنده تکامل به سمت ماگمایی با آب بیشتر است (نقش هورنبلند) با مقادیر



شکل ۱۰: A: نمودار Y در مقابل Sr/Y براساس (Drummond and Defant, 1993) روند کمان حضور هورنبلند، کلینوپیروکسن و تیتانومگنتیت و پلاژیوکلاز را در منشأ نشان می‌دهد براساس (Oyarzun, 2001; Castillo, 2012); B: نمودار نرمالیزه شده نسبت Yb(n) در برابر (La/Yb)_n; C: مقایسه توده نفوذی براساس نسبت Sm/Yb به La/Sm؛ D: نمودار دومتغیره Nb در مقابل Rb/Zr.



شکل ۱۱: نمودار دو متغیر (Dy/Yb)_n در مقابل (La/Sm)_n، مقادیر بالا Dy/Yb نرمالیزه شده نسبت به کندریت نشان‌دهنده تفریق گارنت یا باقی ماندن گارنت در ماگمای اولیه است.

آذرین محدوده قره گل بین ۰/۷ تا ۱/۰۷ است و از این نظر نیز با ماگماهای مولد کمربند ارومیه دختر تشابه دارد. همان طور که می‌دانیم تحت شرایط نسبتاً اکسیدان ماگما غنی از کانی‌های سولفیدی مس‌دار می‌شود و تمرکز بالایی

از طرفی نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که گرانیتوئیدهای مولد به وسیله داشتن نسبت Eu/Eu^* (>0.4) مشخص می‌شوند (Ballard et al., 2002) که در شرایط کاملاً اکسیدکننده ایجاد می‌شود، مقادیر Eu/Eu^* سنگ‌های

می‌توان ماگمای مولد آن‌ها را پیامد ذوب گوشته با غنی‌شدگی از سیال و مذاب‌های پوسته فرورو دانست همان‌طور که در نمودارهای Nb/Yb در برابر Th/Yb، La/Yb و Nd/Yb نمودار Ba/Rb دیده می‌شود، در تشکیل این سنگ‌ها ذوب آبدار گوه گوشته‌ای همراه با مقداری فلوگوپیت و پارگازیت نقش ایفا می‌کنند، عناصر Rb و Ba در ترکیب فلوگوپیت سازگارند در حالی که عناصر Ba, Sr, Rb دارای سازگاری متوسطی در آمفیبول هستند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که گرانیث‌توئیدهای مولد به وسیله داشتن نسبت $Eu/Eu^* (>0.4)$ مشخص می‌شوند که در شرایط کاملاً اکسیدکننده ایجاد می‌شود. تحت شرایط نسبتاً اکسیدان ماگما غنی از کانی‌های سولفیدی مس‌دار می‌شود و تمرکز بالای از عناصر کانه‌ساز را تولید می‌کند. وقتی این ماگما مولد به سمت بالا می‌آید و به درون سنگ‌های قبلی نفوذ می‌کند، می‌تواند کانی‌سازی ویژه‌ای را به وجود آورد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

از عناصر کانه‌ساز را تولید می‌کند. وقتی این ماگما مولد به سمت بالا می‌آید و به درون سنگ‌های قبلی نفوذ می‌کند، می‌تواند کانی‌سازی ویژه‌ای را به وجود آورد.

نتیجه‌گیری

براساس تحقیقاتی که در این پژوهش در محدوده مورد مطالعه انجام پذیرفت، بیشترین سنگ‌های رخنمون یافته در محدوده صلوات مرتبط با سنگ‌های آذرین بیرونی و آذرآواری ائوسن با ترکیب اسیدی تا بازیک می‌باشد. سنگ‌های محدوده قره‌گل در محدوده ذوب بخشی ۳۰ درصد آمفیبولیت گارنت قرار می‌گیرد و دارای ضخامت تا ۴۰ کیلومتر می‌باشند که نشانه پوسته نسبتاً ضخیم است. در این پژوهش نمودار Dyn/Ybn در برابر Lan/Smn برای تمایز نقش هورنبلند (\pm تیتانیت) در برابر گارنت به کار گرفته شده است، مقادیر بالا Dy/Yb نرمالیز شده نسبت به کندریت نشان‌دهنده تفریق گارنت یا باقی ماندن گارنت در ماگمای اولیه است، زیرا گارنت ضریب شرکت‌پذیری بالایی برای HREE دارد. براساس یافته‌های این پژوهش محدوده قره‌گل دارای ماگماتیسم مولد می‌باشد. براساس ماهیت شوشونیتی سنگ‌های آذرین محدوده قره‌گل

پانویس

- 1-Rare earth elements
- 2-Light rare earth elements

- 3-Heavy rare earth elements

منابع (References)

- Afshooni, S.Z., Esmaeily, D. and Asadi Haroni, H., 2014. Stable isotopes (S. H. O) study in phyllic and potassic- phyllic alteration zones of the Kahang porphyry copper-Molybdenum deposit (Northeast of Isfahan), *Advanced Applied Geology*, v. 1(7), p. 64-73 (in Persian).
- Aghazadeh, M., Castro, A., Omran, N.R., Emami, M.H., Moinevaziri, H. and Badrzadeh, Z., 2010. The gabbro (shoshonitic)-monzonite-granodiorite association of khankandi pluton, Alborz mountains, NW Iran *Jornal of Asian Earth Sciences*, v. 38(5), p. 199-219.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran. New data and interpretations, *Tectonophysics*, v. 229(3-4), p. 211-238.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphic of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution, *American Journal of Science*, v. 304(1), p.1-20.
- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G., 2000. Petrogenetic evolution of Late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 102(1-2), p. 67-95.
- Aldanmaz, E., 2012. Trace element geochemistry of primary mantle minerals in spinel-peridotites from polygenetic MOR SSZ suites of SW Turkey: constraints from an LA-ICP-MS study and implications for mantle metasomatism, *Geological Journal*, v. 47(1), p. 59-76.
- Ballard, J.R., Palin, M.J. and Campbell, I.H., 2002. Relative oxidation states of magmas

- inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 144(3), p. 36-347.
- Castro, A., Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z. and Chichorro, M., 2013. Late Eocene-Oligocene postcollisional monzonitic intrusions from the Alborz magmatic belt, NW Iran, an example of monzonite magma generation from a metasomatized mantle source. *Lithos*, v. 180-181, p. 109-127.
- Chappell, B. and White, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types, *Pacific Geology*, v. 8, p. 173-174.
- Cooke, D.R., Hollings, P. and Walshe, J.L., 2005. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution and tectonic controls, *Economic Geology*, v. 100(5), p. 801-818.
- Conceicao, R.V. and Green, D.H., 2004. Derivation of potassic (shoshonitic) magmas by decompression melting of phlogopite+pargasite, lherzolite, *Lithos*, v. 79(3-4), p. 209-229.
- Fahim Gilani, R., Sheikh Zikriai, J., Darvishzadeh, A. and Abedini, M., 2018. volcanological and geochemical characteristics of the products of the last Sablan eruption, northwest Iran. *Petrology*, v. 37, p. 125-146 (in Persian).
- Gammons, C.H. and Williams-Jones, A.E., 1997. Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment, *Economic Geology*, v. 92(1), p. 45-59.
- Haschke, M., Siebel, W., Günther, A. and Scheuber, E., 2002. Repeated crustal thickening and recycling during the Andean orogeny in north Chile (21°-26°S), *Journal of Geophysical Research*, v. 107(B1), p. 1-18.
- Hildreth, W., Halliday, A.N. and Christiansen, R.L., 1991. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone Plateau Volcanic Field, *Journal of Petrology*, v. 32(1), p. 63-138.
- Hollings, P., Cooke, D. and Clark, A., 2005. Regional geochemistry of Tertiary igneous rocks in central Chile: implications for the geodynamic environment of giant porphyry copper and epithermal gold mineralization, *Economic Geology*, v. 100(5), p. 90-887.
- Huang, C.M., Zhao, Z.D., Zhu, C.D., Liu, Y., Huang, M.C., Dung, Z.C. and Hu, J.P., 2013. Geochemistry zircon U-Pb chronology and Hf isotope of Luozha leucogranite, southern Tibet: Implication for petrogenesis, *Acta Petrologica Sinica*, v. 29(11), p. 3689-3702.
- Huang, C.M., Zhao, Z.D., Zhu, C.D., Liu, Y., Huang, M.C., Dung, Z.C. and Hu, J.P., 2013. Geochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope of Luozha leucogranite, southern Tibet: Implication for petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, v. 29(11), p. 3689-3702.
- Kay, S.M. and Mpodozis, C., 2001. Central Andes ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA TODAY (Geol Soc Am)*, v. 11(3), p. 4-9.
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S. and Emami, M.H., 2012. Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold-silver deposit in the Tethyan belt of Iran *Mineralium Deposita*, v. 47, p. 425-440.
- Li, G.M., Cao, M.J., Qin, K.Z., Hollings, P., Evans, N.J. and Seitmuratova, E.Y., 2016. Petrogenesis of ore-forming and pre/post-ore granitoids from the Kounrad, Borly and Sayak porphyry/skarn Cu deposits, Central Kazakhstan. *Gondwana Research*, v. 37, p. 408-425.
- Machado, A., Lima, E.F., Chemale, J.F., Morta, D., Oteiza, O.M., Almeida, D.P., Figueiredo, A.M.G., Alexandre, F.M. and Urrutia, J.L., 2005. Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc-alkaline magmatism in the South Shetland arc, Antarctica, *Journal of South America Earth Sciences*, v. 18(3-4), p. 407-425.
- Macpherson, C.G., Dreher, S.T. and Thirlwall, M.F., 2006. Adakites without slab melting: high pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 243(3-4), p. 581-593.
- Mobashergermi, M., Aghazadeh, M., Kheirkhah, M. and Ahmadzadeh, Gh., 2018. Geochemistry and petrogenesis of Cretaceous volcanic rocks from the south and southwest of Germe city (Northwest of Iran), *Petrology*, v. 9(33), p. 91-110 (in Persian).
- Mobashergermi, M., Zarei Sahamieh, R., Ahamadi Khalaji, A. and Le Roux, P., 2019. Petrological and isotopic study of basaltic rocks of Barzand area and comparison with Poshtasar originat basalts in South of Germe, *Petrology*, v. 10(1), p. 23-52 (in Persian).
- Monecke, T., Monecke, J., Reynolds, T.J., Tsuruoka, S., Bennett, M.M., Skewes, W.B. and Palin, R.M., 2018. Quartz solubility in the

- H₂O–NaCl system: a framework for understanding vein formation in porphyry copper deposits. *Economic Geology*, v. 113(5), p. 1007-1046.
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the geology of Iran, Geological Survey of Iran, Tehran, 109 p (in Persian).
- Palin, R.M., White, R.W., Green, E.C.R., Diener, J.F., Powell, R. and Holland, T.J.B., 2016. High-grade metamorphism and partial melting of basic and intermediate rocks, *Journal of Metamorphic Geology*, v. 34(9), p. 871-892.
- Pirooj, H., Jahangiri, A., Amel, N., Moayyed, M. and Kamali, A., 2012. Petrological and geochemical study of Plio-Quaternary volcanic and plutonic rocks in west of Nir (Ardabil Province). *www.ijcm.ir* 2014, v. 22(2), p. 257-268 (in Persian).
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y Magmas Reflect Arc Maturity, High Magmatic Water Content and Porphyry Cu ± Mo ± Au Potential: Examples from the Tethyan Arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan, *Economic Geology*, v. 107(2), p. 295-332.
- Richards, J.R., 2009. Post-subduction porphyry Cu–Au and epithermal Au deposits: products of remelting of subduction-modified lithosphere, *Geology*, v. 37(3), p. 247-250.
- Roberts, M.P. and Clemens, J.D., 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids, *Geology*, v. 21(9), p. 825-828.
- Sadati, N., Yazdi, M., Behzadi, M., Adabi, M.H. and Mokhtari, A.A., 2013. Geochemical investigation of rare earth elements (REE) of sedimentary copper deposits in Nahand-Ayvand area, north of Tabriz, *Researches in Earth Sciences*, v. 4, p. 70-85. 20.1001.1.20088299.1392.4.4.6.2 (in Persian).
- Sadati, S.N., Ramsheh, Z. and Yazdi, M., 2019. Geochemical investigation of rare earth elements and its relationship to auriferous ore-forming fluids in Senjedeh mine district, central Iran, *Petrology*, v. 10(38), p. 29-48 (in Persian).
- Sepidbar, F., Mirnejad, H., Ma, C. and Shafaiim Moghadam, H., 2018. Identification of Eocene-Oligocene magmatic pulses associated with flare-up in east Iran: Timing and sources, *Gondwana Research*, v. 57, p. 141-156.
- Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran, *Mineralium Deposita*, v. 44(3), p. 265-283.
- Shafaii Moghadam, H. and Shahbazi Shiran, H., 2010. Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks from the northern part of the Lahrud region (Ardabil): An example of shoshonitic occurrence in northwestern Iran, *Petrology*, v. 1(4), p. 15-34 (in Persian).
- Shahabpour, J., 1992. Unroofing fragmentites as a reconnaissance exploration tool in the central Iranian porphyry copper belt, *Economic Geology*, v. 87(2), p. 1599-1606.
- Sisson, T.W., Ratajeski, K., Hankins, W.B. and Glazner, A.F., 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 148(6), p. 66-635.
- Taylor, B. and Martinez, F., 2003. Back-arc basin basalt systematics. *Earth Planet Science Letters*, v. 210(3-4), p. 481-497.
- White, R.W., Palin, R.M. and Green, E.C., 2017. High-grade metamorphism and partial melting in Archean composite grey gneiss complexes, *Journal of Metamorphic Geology*, v. 35(2), p. 181-195.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American mineralogist*, v. 95 p. 185-187.
- Wilkinson, J.J., 2013. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs. *Nature Geoscience*, v. 6(11), p. 917-925.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Tashi, M., Fereydouni, Z. and Saed, M., 2019. Comparison of geochemistry and porphyry copper mineralization efficiency in granitoids of the Sanandaj-Sirjan and Urumieh-Dokhtar zones; using rare earth elements geochemistry, *Journal of Economic Geology*, v. 11(1), p. 1-32. doi: 10.22067/econg.v11i1.64476 (in Persian).