



Research Article

Petrography, geochemistry and tectonic setting of NW Bardaskan volcanic rocks: a case study of Zangalou mine

Mehdi Ghelichkhani, Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

mehdi.ghelichkhani@mail.um.ac.ir

Azadeh Malekzadeh Shafaroudi, Associate Professor, Department of Geology and Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

shafaroudi@um.ac.ir

Mohammad Hassan Karimpour, Professor, Department of Geology and Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

karimpur@um.ac.ir

Seyed Masoud Homam, Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

homam@um.ac.ir

Abstract

The Zangalou mine area, a part of NW Bardaskan magmatic assemblage, located south of Sabzevar and northwest of Bardaskan cities in Khorasan Razavi province. The rock units of the area are dominated by sedimentary and volcanic rocks (andesite, trachyandesite, latite and andesitic tuff). The dominant minerals are plagioclase, hornblende, pyroxene and alkali feldspar locally affected by argillic and propylitic alterations and the main textures are porphyritic, glomeroporphyritic, amygdaloidal and fine grain. The rocks under study formed in continental volcanic arc related to subduction zone, are calcalkaline in nature, metaluminous in composition and classified as shoshonite series. LREE and LILE enrichment compared to HREE and HFSE of the investigated rocks indicate their magma generation in subduction setting. Both Zr/Ba and Sm/Yb ratios point to lithospheric mantle origin and the rare or the absence of garnet in the origin respectively. The parent magma formed from partial melting of an enriched phlogopite spinel lherzolite. The geochemical properties of Zangalou share many signatures with those of the volcanic rocks distributed in other parts of NW Bardaskan volcanic assemblage indicate high similarity in geochemical signatures of volcanic rocks. Studying geochemistry of volcanic rocks in these areas indicates formation of these rocks in a subduction setting.

Key words: petrography, geochemistry, volcanic rocks, Zangalou, Bardaskan, Sabzevar zone

* Corresponding author



سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن: بررسی موردی معدن زنگالو

مهدی قلیچ‌خانی، دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

mehdi.ghelichkhani@mail.u.ac.ir

آزاده ملکزاده‌شفارودی*، دانشیار، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران،

دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

shafaroudi@um.ac.ir

محمدحسن کریم‌پور، استاد، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده

علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

karimpur@um.ac.ir

سید مسعود همام، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

homam@um.ac.ir

چکیده

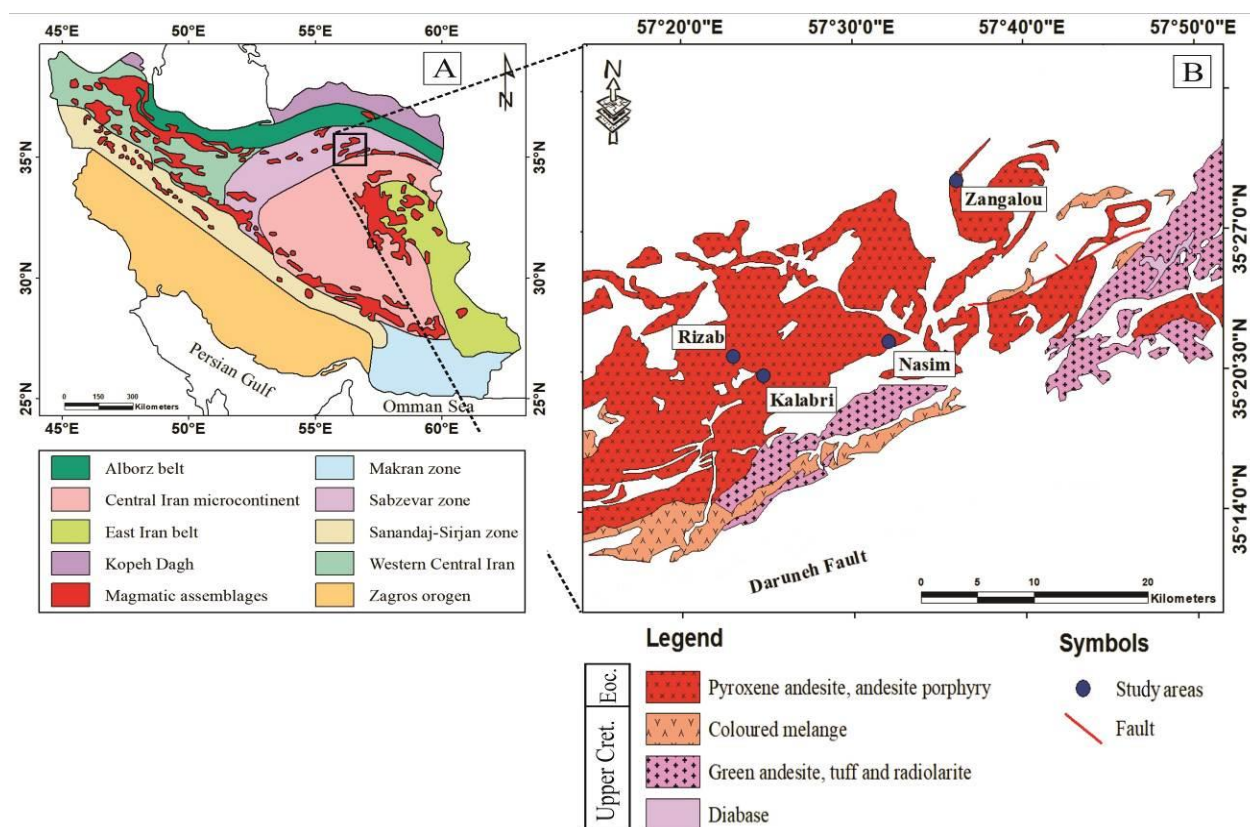
ناحیه معدن زنگالو که بخشی از مجموعه ماگمایی شمال‌باختری بردسکن است، در جنوب سبزوار و شمال‌باختری شهر بردسکن، در استان خراسان رضوی جای دارد. سنگ‌های رسوبی و سنگ‌های آتشفشانی (آندزیت، تراکی آندزیت، لاتیت و توف آندزیتی) از واحدهای سنگی این منطقه هستند. بافت سنگ‌های آتشفشانی بیشتر پورفیریتیک، گلوپورفیریتیک، آمیگدالوئیدال و ریزدانه است. پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن و آلکالی‌فلدسپار از کانی‌های اصلی هستند که به‌طور موضعی در برخی بخش‌ها دچار دگرسانی آرزلیک و پروپیلیتیک شده‌اند. این سنگ‌ها سرشت کالک‌آلکان دارند و متالومینوس هستند و در محدوده ترکیبی کمان آتشفشانی قاره‌ای مرتبط با پهنة فرورانش جای می‌گیرند. برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی، بیشتر نمونه‌ها آندزیتی و تراکی آندزیتی هستند و در محدوده سری کالک‌آلکان جای می‌گیرند. غنی‌شدگی از عنصرهای LREE نسبت به HREE و LILE نسبت به HFSE از نشانه‌های پیدایش ماگما در ناحیه فرورانش است. نسبت Zr/Ba نشان‌دهنده خاستگاه گوشته سنگ‌کراهی و نسبت Sm/Yb نشان‌دهنده نبود یا کم‌بودن گارنت در ناحیه خاستگاه است. این ماگما از ذوب‌بخشی یک اسپینل‌لر زولیت فلوگوپیت‌دار غنی شده خاستگاه گرفته است. مقایسه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی منطقه زنگالو با بررسی‌های پیشین در دیگر مناطق از مجموعه آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن مشابهت خوبی را نشان می‌دهد. بررسی زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی در این مناطق نشان‌دهنده پیدایش این سنگ‌ها در پی فرایند فرورانش است.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی، سنگ‌های آتشفشانی، زنگالو، بردسکن، پهنة سبزوار

مقدمه

پلاژیوک و مجموعه‌های افیولیتی است. چین‌خوردگی‌های فراوانی به شکل تاقدیس و ناودیس در این مجموعه دیده می‌شوند و راستای بیشتر گسل‌ها خاوری-باختری تا شمال‌خاوری-جنوب‌باختری است (Lindenberg and Jacobshagen, 1983). پهنه سبزوار در شمال‌باختری بردسکن (جنوب سبزوار) به صورت یک مجموعه آتشفشانی-رسوبی با سن ائوسن است که شامل سنگ‌های آتشفشانی عمدتاً آندزیتی، سنگ آهک نومولیت‌دار، مجموعه‌های افیولیتی (آمیژه رنگین)، توف، رادیولاریت و دیاباز است (شکل 1-B).

منطقه سبزوار بخشی از پهنه ایران مرکزی است که از شمال به کوه‌های البرز و بینالود و از جنوب به بلوک لوت محدود می‌شود و مرز شمالی پهنه تکنار را محدود می‌کند (Pilger, 1971) (شکل 1-A). در شمال و جنوب این منطقه به ترتیب گسل‌های میامی و درونه (گسل کویر بزرگ) دیده می‌شوند. تاریخ تحولات پهنه سبزوار، محدوده زمانی کرتاسه پسین و نئوژن را دربر می‌گیرد. از دیدگاه زمین‌شناسی پهنه سبزوار شامل واحدهای آتشفشانی، توده‌های آذرین درونی، توالی‌های آتشفشانی رسوبی، رسوب‌های



شکل 1-A) جایگاه پهنه سبزوار و مجموعه ماگمایی شمال‌باختری بردسکن در نقشه پهنه‌های ایران از دیدگاه (Alavi, 1991)؛ (B) نقشه مجموعه ماگمایی شمال‌باختری بردسکن و جایگاه مناطق بررسی‌شده روی آن (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی 1:250000 کاشمر (Eftekharnajad et al., 1976))

(2016) دهنه‌سیاه، چشمه‌مرضیه (Soltani and Fardust,)
(2017)، زنگالو (Ghelichkhani and Malekzadeh)

وجود معادن متروکه و اندیس‌های متعدد مس مانند
نسیم (Mahvashi and Malekzadeh Shafaroudi,)

رسوب‌های شبه‌فلیشی (سنگ‌های مارنی و ماسه‌سنگی و کنگلومرا) هستند که سنگ‌های آتشفشانی گدازه‌ای (آندزیت، تراکی‌آندزیت) و آذرآواری (توف آندزیتی) نیز همزمان با آنها پدید آمده‌اند. برپایه بررسی‌های دقیق سنگ‌شناسی و صحرایی، واحدهای سنگی محدوده بررسی شده به پنج گروه زیر دسته‌بندی می‌شوند (شکل 2):

الف) مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی که شامل سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌ای گوناگون هستند.

سن این مجموعه ائوسن در نظر گرفته می‌شود؛

ب) دو واحد سنگ آهک ماسه‌ای فسیل‌دار با سن نسبی متفاوت که یکی در بخش خاوری محدوده، با روندی شمالی-جنوبی به‌صورت هم‌شیب روی واحد مگاکنگلومراست و دیگری در مرکز منطقه با روند شمالی-جنوبی روی واحدهای آتشفشانی جای گرفته و با واحدهای توف آندزیتی (با مرز گسلی) و ماسه‌سنگی توفی و رسوب‌های آبرفتی پوشیده شده است؛

پ) واحدهای رسوبی (ماسه‌سنگ توفی و مارن)؛

ت) سه تیپ کنگلومرا (مگاکنگلومرا، کنگلومرای همراه با کانی‌سازی و کنگلومرای سست پلیوسن) با سن نسبی متفاوت که مجموعه‌های پیشین خود را می‌پوشانند؛

ث) رسوب‌های کواترنری که بیشتر شامل رسوب‌های رودخانه‌ای هستند. همه واحدهای یادشده، با راستای نزدیک به شمالی-جنوبی و شیب زیاد رو به باختر، یال باختری تاقدیسی را می‌سازند که محور آن در خاور منطقه تهیه نقشه است.

در کل، واحدهای آتشفشانی گدازه‌ای نسبت به واحدهای رسوبی و دو نوع از کنگلومراهای منطقه (مگاکنگلومرا و کنگلومرای سست پلیوسن) ارتفاع چشمگیری دارند.

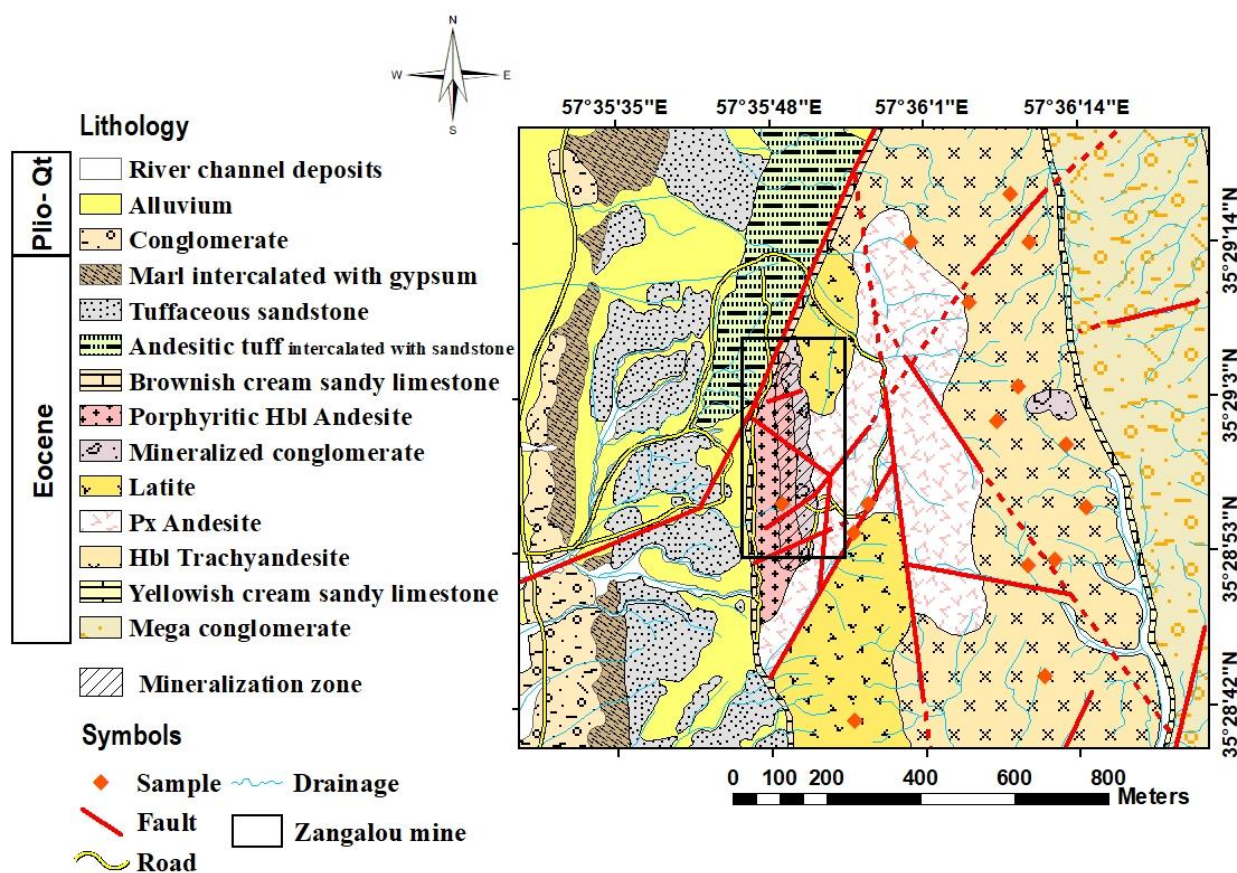
(Shafaroudi, 2018)، کال ابری (Jabbari et al., 2017)، ترنم، کیمیا، چشمه‌هادی و شریف‌آباد همراه با آثار کارهای شدادی، کوره‌های ذوب و سرباره فراوان همراه با اندیس‌های مس متعدد در حاشیه واحدهای آندزیتی و مرز واحدهای آتشفشانی با رسوبی، نشان‌دهنده اهمیت کانه‌زایی مس و پتانسیل بالای اکتشافی این مجموعه آتشفشانی-رسوبی است.

به‌طور کلی مجموعه آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن بخشی از محدوده نقشه زمین‌شناسی 1:250000 کاشمر (Eftekharnjad et al., 1976) است. بررسی‌های زمین‌شیمیایی این پروژه با تمرکز روی محدوده معدن مس زنگالو انجام شد. معدن مس زنگالو در 65 کیلومتری شمال‌باختری بردسکن در استان خراسان رضوی جای دارد.

پایان‌نامه‌های انجام‌شده در مناطق نسیم (Mahvashi et al., 2016)، کال ابری (Jabbari et al., 2017)، چشمه مرضیه (Soltani and Fardust, 2017) و ... از بررسی‌های پیشین در شمال‌باختری بردسکن هستند که هر کدام به بررسی کانی‌سازی‌های مس در این مناطق پرداخته‌اند؛ اما تا کنون بررسی زمین‌شیمیایی روی سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو انجام نشده است. از این‌رو، این پژوهش با هدف بررسی‌های زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی واحدهای آتشفشانی محدوده معدن مس زنگالو و تلفیق آن با اطلاعات زمین‌شیمیایی مناطق کال ابری، نسیم و ریزآب برای بررسی خاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی پیدایش ماگمای سازنده سنگ‌های آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن انجام شده است.

زمین‌شناسی منطقه زنگالو

برپایه نقشه زمین‌شناسی 1:100000 بردسکن (Shahrabi et al., 2005)، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در گستره بررسی‌شده زنگالو شامل



شکل 2- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدن مس زنگالو با مقیاس 1:1000 به همراه جایگاه نمونه‌های برداشت شده برای بررسی‌های سنگ‌شناسی

تراکی‌اندزیت واحدهای آتشفشانی میزبان کانی‌سازی در منطقه زنگالو هستند (شکل 2). واحد هورنبلند تراکی‌اندزیت (شکل 2) روندی شمالی-جنوبی دارد که از شمال منطقه تا جنوب آن ادامه دارد. به علت جایگیری واحدهای آتشفشانی منطقه زنگالو بین دو واحد سنگ آهک، به احتمال بالا این واحدها در یک محیط دریایی کم‌زرفا پدید آمده‌اند. این واحد، نخستین فعالیت آتشفشانی زیردریایی در منطقه پس از پیدایش حوضه دریایی کم‌زرفاست که پس از رسوب‌گذاری واحد سنگ آهک ماسه‌ای کرم زرد رنگ پدید آمده است. این واحد در سطح منطقه دچار هوازدگی شدید شده است؛ به گونه‌ای که درزه و شکاف‌های زمین‌ساختی آن را عوامل فیزیکی و شیمیایی مختلف باز کرده‌اند و سنگ در صحرا و

واحدهای آتشفشانی بخش بزرگی از منطقه زنگالو را می‌پوشانند. سن این واحدها ائوسن است و روند شمالی-جنوبی دارند. واحدهای آتشفشانی گدازه‌ای به ترتیب سن نسبی و روابط صحرائی عبارت هستند از: هورنبلند تراکی‌اندزیت، پیروکسن‌اندزیت، لاتیت و پورفیریتیک هورنبلند‌اندزیت (شکل‌های 2 و 3-A). در میان این واحدها، واحدهای هورنبلند تراکی‌اندزیت و پیروکسن‌اندزیت بیشترین گستردگی را نشان می‌دهند (شکل 3-C). به طور کلی واحدهای آتشفشانی گدازه‌ای نسبت به واحدهای رسوبی قدیمی‌تر و جدیدتر از خود ارتفاع بسیار بیشتری دارند. بیشتر این واحدها ریخت‌شناسی خشن و کوهستانی دارند و مرز آنها در برخی بخش‌ها گسلی است. واحد پورفیریتیک هورنبلند‌اندزیت پورفیری و هورنبلند

سنگی گوناگون که کمترین میزان دگرسانی را داشتند برای بررسی زمین‌شیمی سنگ میزبان و جایگاه زمین‌ساختی آن برگزیده شدند و برای اندازه‌گیری میزان اکسیدهای اصلی به روش XRF در آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود، و برای اندازه‌گیری میزان عنصرهای فرعی و خاکی کمیاب به روش ICP-MS در آزمایشگاه ACME کانادا تجزیه شدند. روش آماده‌سازی نمونه‌ها ذوب قلیایی با کد LF100 بوده است. داده‌های به‌دست‌آمده از این روش‌ها با نرم‌افزار GCD.kit پردازش شدند و نمودارهای سنگ‌شناسی مناسب رسم و تعبیر و تفسیر شدند. افزون‌بر داده‌های منطقه زنگالو، از داده‌های زمین‌شیمی سنگ‌های آذرین مناطق نسیم (Mahvashi and Malekzadeh Shafaroudi, 2016)، کال‌ابری (Jabbari et al., 2017) و ریزاب (Mohammadi et al., 2015) نیز در رسم نمودارها و تعبیر و تفسیر زمین‌شیمیایی مجموعه ماگمایی شمال‌باختری بردسکن بهره گرفته شده است.

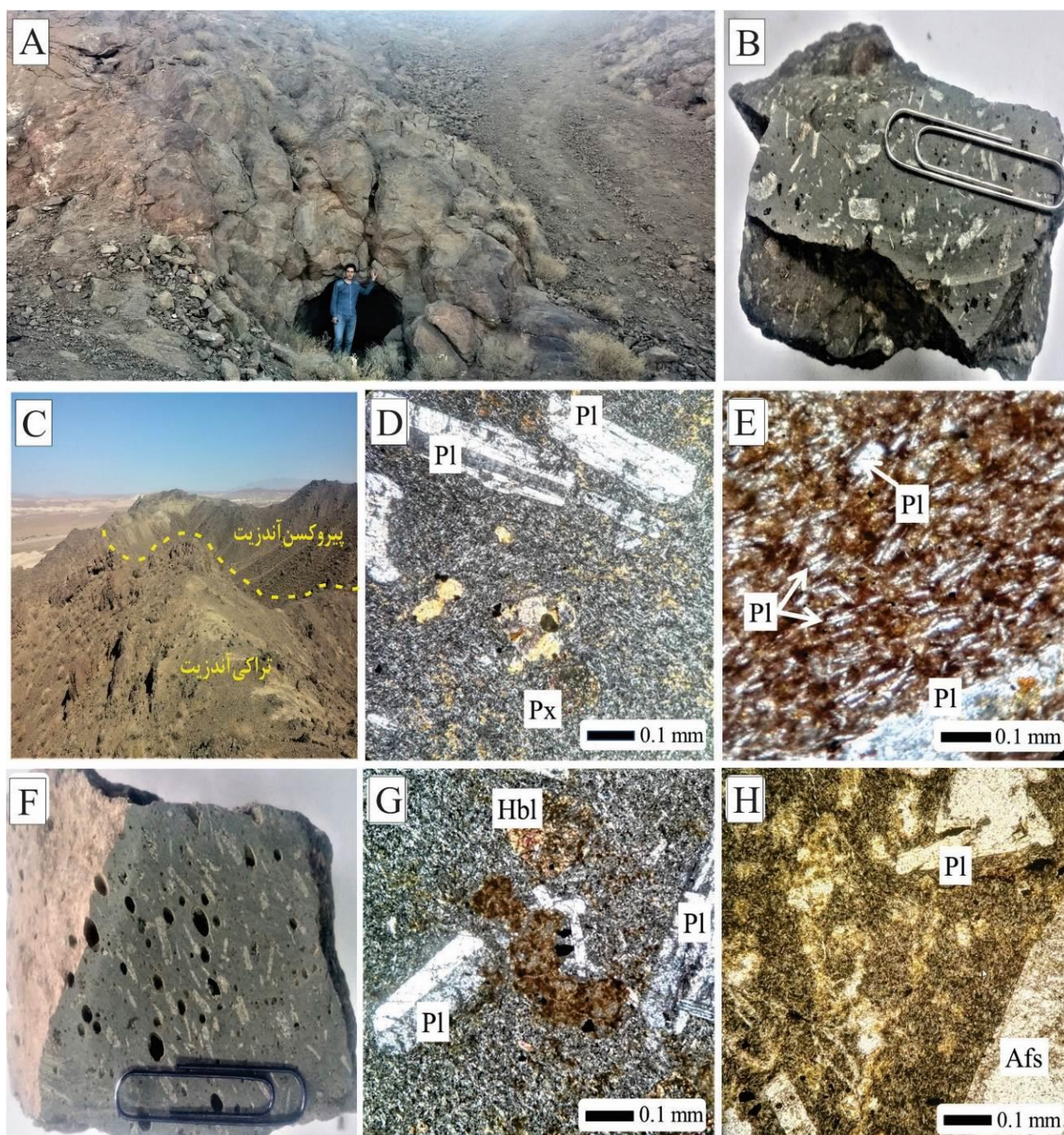
سنگ‌نگاری واحدهای آتشفشانی منطقه زنگالو

پورفیریتیک هورنبلند آندزیت: این سنگ‌ها بافت‌های پورفیریتیک و گلوپورفیریتیک (شکل 3-3-G) و آمیگدالوئیدال دارند. فراوانی فنوکریست‌ها برابر با 25 تا 30 درصد حجمی است و شامل 15 تا 20 درصد حجمی پلاژیوکلاز (آندزین) با اندازه بیشتر از 2 سانتیمتر، 5 تا 10 درصد حجمی هورنبلند با اندازه حداکثر 0/7 سانتیمتر هستند. بیشتر زمینه سنگ از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و در برخی بخش‌ها از کانی‌های ثانویه سریسیت، کلسیت، کلریت، اکسیدهای آهن و پیریت ساخته شده است. هورنبلندها در برخی بخش‌ها تا 10 درصد با کلریت و پلاژیوکلازها تا 15 درصد با کلسیت، سریسیت و کمتر کانی‌های رسی جایگزین شده‌اند. حفره‌های سنگ با کانی‌های کربناته پر شده‌اند.

نمونه دستی بسیار سست است. بخش‌های مرکزی و شمالی آن دگرسانی‌های سریسیتیک و کربناتی ضعیف دارند. به‌علت هوازدگی بسیار در نمونه دستی کانی‌ها به‌سختی شناخته می‌شوند. بافت آن در نمونه دستی، ریزدانه و گاه پورفیریتیک است و کانی پلاژیوکلاز و هورنبلند در نمونه دستی شناخته می‌شوند. واحد پروکسن آندزیت در بخش مرکزی منطقه رخنمون دارد (شکل 2). این واحد نیز همانند واحد هورنبلند تراکی آندزیت دچار هوازدگی شدید شده است و این ویژگی بررسی این سنگ‌ها در نمونه دستی را دشوار می‌کند. بافت آن در نمونه دستی ریزدانه تا پورفیری است و پلاژیوکلاز و هورنبلند در نمونه دستی شناخته می‌شوند. واحد لایت در دو نقطه در جنوب‌باختری و مرکز منطقه رخنمون دارد (شکل 2). این واحد ریخت‌شناسی کمابیش مرتفع دارد. بافت آن ریزدانه تا پورفیری و کانی پلاژیوکلاز و کانی‌های دگرسانی (مقداری کربنات و سرسیت) در نمونه دستی شناسایی می‌شوند. واحد هورنبلند آندزیت پورفیری جدیدترین واحد آتشفشانی از نوع گدازه‌ای است (شکل 2) و با روندی شمالی-جنوبی در مرکز منطقه رخنمون دارد که بلورهای بسیار درشت پلاژیوکلاز به اندازه چندین سانتیمتر دارد و بافت آن پورفیریتیک است. کانی‌های پلاژیوکلاز و هورنبلند به خوبی در نمونه دستی دیده می‌شوند.

روش انجام پژوهش

برای دستیابی به اهداف تعیین‌شده، برداشت‌های صحرائی و نمونه‌برداری از واحدهای زمین‌شناسی انجام شد. شمار 120 مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌نگاری-دگرسانی برداشت شد. نقشه زمین‌شناسی سطحی 1:1000 تهیه‌شده توسط شرکت پارسی‌کان‌کاو، از طریق بررسی مقاطع نازک، تصحیح و با نرم‌افزار Arc GIS رقومی شد. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری، شمار 17 نمونه از واحدهای



شکل 3- تصویرهای صحرایی، میکروسکوپی و نمونه‌دستی از واحدهای آتشفشانی در منطقه زنگالو: (A) تصویر صحرایی از واحد هورنبلند آندزیت پورفیری؛ (B) نمونه‌دستی از واحد هورنبلند آندزیت پورفیری؛ (C) رخنمون صحرایی واحدهای پیروکسن آندزیت و هورنبلند تراکی آندزیت؛ (D) بافت پورفیری در واحد هورنبلند پیروکسن آندزیت در XPL؛ (E) تراکی آندزیت با بافت تراکیتی در XPL؛ (F) بافت آمیگدالوئیدال در واحد هورنبلند تراکی آندزیت؛ (G) بافت گلمروپورفیری در واحد هورنبلند آندزیت پورفیری در XPL؛ (H) تصویر میکروسکوپی واحد لاتیت در PPL (نام اختصاری کنی‌ها برگرفته از Evans و Whitney (2010) است)؛ Pl: پلاژیوکلاز؛ Afs: آلکالی‌فلدسپار؛ Hbl: هورنبلند؛ Px: پیروکسن)

در مقاطع نازک، ریزدانه تا پورفیریتیک (شکل 3-D) است و 15 تا 20 درصد حجمی

پیروکسن آندزیت: تصویر صحرایی این واحد در شکل 3-C دیده می‌شود. بافت این سنگ‌ها

میلیمتر و 10 تا 15 درصد حجمی آلکالی‌فلدسپار با اندازه حداکثر 2/5 میلیمتر هستند. کانی‌های زمینه در بردارنده پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار و در برخی مقاطع تهیه شده از این واحد، کلریت، کلسیت، سربیسیت و کانی‌های رسی هستند. در برخی مقطع‌ها، آلکالی‌فلدسپارها (سانیدین) تا 15 درصد حجمی به سربیسیت و کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. افزون‌بر این، پلاژیوکلازها تا 10 درصد حجمی به کلریت و کلسیت دگرسان شده‌اند.

زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی زنگالو و

مقایسه با دیگر مناطق

داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی اکسید عنصرهای اصلی، فرعی و خاکی کمیاب در سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو در جدول 1 آورده شده‌اند. همچنین، این داده‌ها با داده‌های مناطق نسیم (Mahvashi and Malekzadeh, 2016, Shafaroudi), کال‌ابری (Jabbari et al., 2017) و ریزاب (Mohammadi et al., 2015) تلفیق شد تا بتوان اطلاعات بیشتر و بهتری از مجموعه آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن به‌دست آورد.

برپایه نمودار Co در برابر Th، نمونه‌های منطقه زنگالو و همچنین، همه نمونه‌های مناطق شمال‌باختری بردسکن (کال‌ابری، نسیم، ریزاب) ترکیب کالک‌آلکالن دارند (شکل 4). ویژگی میزان بالای Al_2O_3 و میزان کم MgO در واحدهای آندزیتی با میزان پتاسیم بالا و غنی از بلورهای پلاژیوکلاز نشان‌دهنده پیدایش احتمالی آنها در یک پهنه زمین‌ساختی کششی ناشی از فرورانش با زاویه کم و همانند منطقه ماتو در شیلی و حاشیه آند است (Morata and Aguirre, 2003).

فنوکریست دارند. فنوکریست‌ها شامل 5 تا 10 درصد حجمی پلاژیوکلاز (آندزین) با اندازه حداکثر 4 میلیمتر، کمتر از 5 درصد حجمی هورنبلند با اندازه حداکثر 3 تا 5 درصد حجمی پیروکسن (اوژیت) با اندازه حداکثر 0/2 میلیمتر است (شکل 3-D). پیروکسن‌ها از نوع اوژیت هستند. زمینه سنگ شامل کانی‌های فنوکریست با اندازه کوچک‌تر و همچنین، در برخی بخش‌های این واحد کانی‌های کلریت، کلسیت، سربیسیت، کانی‌های کدر و اکسیدهای آهن دیده می‌شوند.

هورنبلند تراکی آندزیت: بافت این سنگ‌ها بیشتر پورفیریتیک تا تراکیتی (شکل 3-E) است که از ویژگی‌های تراکی آندزیت‌ها به‌شمار می‌رود. همچنین، بافت آمیگدالووییدال (شکل 3-F) و گاه گلومروپورفیریتیک نیز در این سنگ‌ها دیده می‌شوند. این سنگ‌ها 15 تا 20 درصد حجمی فنوکریست دارند. فنوکریست‌ها شامل 10 تا 15 درصد حجمی پلاژیوکلاز از نوع آندزین با اندازه حداکثر 5 میلیمتر و 3 تا 5 درصد حجمی هورنبلند با اندازه حداکثر 3 میلیمتر است. کانی‌های یادشده در در زمینه سنگ نیز حضور دارند. هورنبلندها تا 10 درصد حجمی با کلریت جایگزین شده‌اند و فلدسپارها تا 15 درصد حجمی به سربیسیت، کلسیت و گاه به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. کانی‌های کدر و کانی‌های ثانویه دیگر (مانند سربیسیت، کلریت و کلسیت) که در برخی بخش‌های این واحد دیده می‌شوند از دیگر کانی‌های سازنده زمینه سنگ هستند.

لاتیت: این واحد بافت پورفیریتیک (شکل 3-G) و 20 تا 25 درصد حجمی فنوکریست دارد. فنوکریست‌ها شامل 10 تا 15 درصد حجمی پلاژیوکلاز از نوع آندزین با اندازه حداکثر 2/8

جدول 1- داده‌های به دست آمده از تجزیه اکسیدهای اصلی (بر پایه درصدوزنی)، عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب (بر پایه ppm) در واحدهای آتشفشانی منطقه زنگلو، شمال باختری بردسکن

Lithology	Andesite porphyry		Hbl Trachyandesite			
Sample No.	T8	T22	T38	T29	T26	T41
Longitude	57°35'49"	35°29'23"	57°36'12"	57°36'04"	57°36'8"	57°36'11"
Latitude	35°28'56"	35°29'23"	35°28'52"	35°29'09"	35°29'17"	35°28'44"
SiO ₂	53.09	53.48	53.72	54.03	54.73	54.77
TiO ₂	0.86	0.85	0.86	0.86	0.83	0.87
Al ₂ O ₃	18.4	18.17	18.35	18.45	15.71	15.33
FeOT	6.8	5.98	6.48	6.01	8.45	8.8
MnO	0.13	0.16	0.14	0.14	0.12	0.15
MgO	1.93	2.53	3.48	3.21	3.97	3.8
CaO	6.51	6.8	5.39	5.67	4.39	4.44
Na ₂ O	3.52	3.47	3.47	3.44	4.31	4.16
K ₂ O	5.07	4.69	4.7	4.63	4.37	4.46
P ₂ O ₅	0.78	0.79	0.79	0.78	0.62	0.6
LOI	2.59	2.75	2.22	2.37	2.28	2.37
Total	99.68	99.67	99.6	99.59	99.78	99.75
Ba	244	246	251	234	282	271
Be	2	2	3	2	3	2
Rb	186.1	179.8	193.0	189.8	193.3	196.7
Sr	522.4	540.5	520.9	528.7	537.1	512.8
Zr	133.8	127.9	132.9	131.8	132.7	135.2
Nb	7.9	7.5	8.1	7.8	8.2	8.1
Co	10.3	14.4	16.5	16.5	17.1	16.5
Y	15.1	15.7	16.0	16	16.4	16.0
Cs	1.6	2.4	3.1	3.1	2.9	3.4
Ta	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5
Hf	3.3	3	3.0	3.3	3.2	3.2
Ga	14.3	15.1	16.0	15.1	16	15.4
Sn	1	1	1	3	1	1
Th	7.7	6.2	6.4	6.4	6.2	6.2
U	2.2	2	2.1	2.3	2	2.4
V	197	195	196	194	188	193
W	3.8	1.4	1.1	0.9	0.5	0.7
La	20.7	21.1	21.7	20.9	21.4	21.3
Ce	38.9	40.9	41.3	40.5	41.3	41.8
Pr	4.81	4.84	4.93	4.84	4.91	5.00
Nd	18.5	19.7	19.7	19.9	20.4	19.4
Sm	3.51	3.45	3.58	3.65	3.64	3.65
Eu	0.97	1.04	0.98	1.03	1.07	1.01
Gd	3.06	3.28	3.20	3.3	3.24	3.45
Tb	0.45	0.45	0.48	0.46	0.48	0.46
Dy	2.6	2.75	2.92	2.7	2.74	2.83
Ho	0.52	0.54	0.59	0.55	0.62	0.59
Er	1.67	1.66	1.61	1.77	1.71	1.67
Tm	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25
Yb	1.66	1.58	1.69	1.68	1.66	1.73
Lu	0.26	0.25	0.25	0.27	0.25	0.26
Ce/Yb	23.43	25.88	24.43	24.1	24.87	24.16
Sr/Y	34.59	34.42	32.55	33.04	32.75	32.05
Eu/Eu*	0.9	0.95	0.89	0.91	0.95	0.87
LaN/YbN	8.41	9	8.66	8.39	8.69	8.3

جدول 1- ادامه

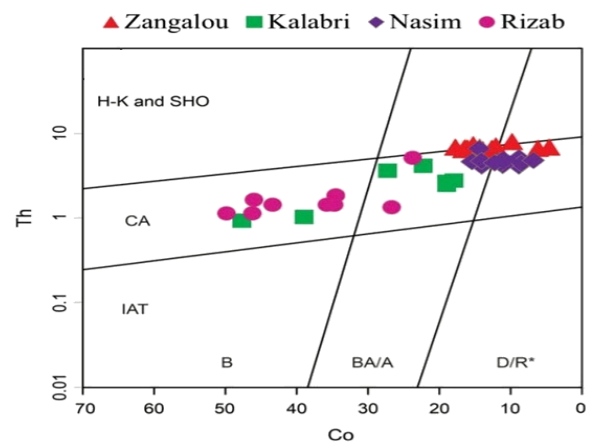
Lithology	Hbl Trachyandesite						
	Sample No.	T18	T36	T37	T32	T24	T35
Longitude		57°36'03"	57°36'14"	57°36'09"	57°36'09"	57°36'10"	57°36'13"
Latitude		35°29'25"	35°28'55"	35°28'51"	35°29'04"	35°29'14"	35°29'00"
SiO ₂		54.87	55	55.14	55.64	55.9	56.16
TiO ₂		0.87	0.86	0.88	0.9	0.88	0.88
Al ₂ O ₃		15.29	15.57	15.46	15.5	16.26	16.74
FeOT		8.37	8.27	8.39	7.97	4.74	6.68
MnO		0.15	0.13	0.13	0.14	0.17	0.14
MgO		4.18	3.7	3.66	3.53	0.57	2.78
CaO		4	4.31	4.55	4.38	7.78	3.83
Na ₂ O		4.13	4.24	4.12	4.07	4.13	4.57
K ₂ O		4.59	4.56	4.52	4.66	5.83	5.05
P ₂ O ₅		0.61	0.62	0.61	0.61	0.86	0.6
LOI		2.74	2.42	2.3	2.41	2.65	2.37
Total		99.8	99.68	99.76	99.81	99.77	99.8
Ba		309	301	266	301	393	308
Be		3	4	3	2	3	2
Rb		199.6	207.1	197.7	199.8	188.1	205.9
Sr		499.9	541.2	531.8	528.6	577.1	520.7
Zr		138.5	140.2	132.3	134.6	137.7	139.5
Nb		8	8.5	7.7	8.5	8.0	8.6
Co		18.2	15.7	15.7	14.8	5.1	12.6
Y		16.3	16.9	15.6	16.0	18.1	14.9
Cs		2.1	3.7	4.3	2.9	0.8	2.8
Ta		0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
Hf		3.2	3.5	3.1	3.2	3.3	3.3
Ga		16.2	15.9	16.6	16.5	18.7	16.4
Sn		1	1	1	1	1	1
Th		6.7	7.1	6.5	6.7	6.7	6.9
U		1.1	2.3	2.2	2.1	2.2	2.3
V		200	202	194	199	184	216
W		0.5	2.0	0.5	0.5	0.5	0.7
La		23.2	22.7	21.8	23.0	27.1	23.7
Ce		42.9	43.2	41.7	43.4	47.0	42.0
Pr		5.18	5.18	4.97	5.04	5.61	5.10
Nd		20.2	19.6	19.6	20.0	22.4	19.7
Sm		3.76	3.72	3.59	3.66	4.02	3.54
Eu		1.04	1.08	1.01	1.05	1.07	1.04
Gd		3.38	3.39	3.25	3.36	3.81	3.39
Tb		0.48	0.49	0.46	0.47	0.52	0.48
Dy		3.05	2.99	2.80	2.83	3.01	2.62
Ho		0.58	0.60	0.55	0.56	0.63	0.53
Er		1.77	1.68	1.74	1.72	1.83	1.57
Tm		0.24	0.24	0.24	0.23	0.28	0.23
Yb		1.75	1.61	1.62	1.65	1.86	1.69
Lu		0.26	0.25	0.25	0.25	0.29	0.23
Ce/Yb		24.51	26.83	25.74	26.3	25.26	24.85
Sr/Y		30.66	32.02	34.08	33.03	31.88	34.96
Eu/Eu*		0.89	0.93	0.9	0.92	0.84	0.92
LaN/YbN		8.94	9.51	9.07	9.4	9.82	9.45

جدول 1- ادامه

Lithology	Hbl Trachyandesite		Px Andesite		Latite
Sample No.	T33	T61	T60	T25	T68
Longitude	57°36'06"	57°35'55"	57°35'56"	57°36'00"	57°35'55"
Latitude	35°29'02"	35°28'54"	35°28'55"	35°29'14"	35°28'41"
SiO ₂	57.12	53.55	54.6	55.36	55.6
TiO ₂	0.89	0.82	0.9	0.87	0.8
Al ₂ O ₃	16.14	14.95	14.75	15.54	14.84
FeOT	6.72	5.45	9.06	7.97	7.01
MnO	0.13	0.19	0.16	0.11	0.12
MgO	2.59	1.17	4	3.46	4.3
CaO	3.77	9.64	4.52	4.54	2.96
Na ₂ O	4.13	4.03	4.22	4.27	2.82
K ₂ O	5.63	5.31	4.59	4.49	7.01
P ₂ O ₅	0.62	0.73	0.59	0.58	0.61
LOI	2.03	3.96	2.35	2.5	3.69
Total	99.77	99.8	99.74	99.69	99.76
Ba	397	256	277	311	449
Be	1	1	2	1	1
Rb	213.3	183.6	198.2	186.3	179.5
Sr	495.5	532.5	513.6	523.1	336.3
Zr	141.6	132.9	134.1	130.2	126.9
Nb	8.5	7.7	8.6	7.9	7.8
Co	13.1	6.7	16.8	16.8	14.3
Y	17.3	18.1	16.4	15.6	14.6
Cs	2.1	1.3	3.3	2.1	1.3
Ta	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5
Hf	3.2	3.0	3.3	3.2	3.0
Ga	16.9	16.0	16.0	14.1	15.1
Sn	1	1	1	1	1
Th	6.5	6.4	6.5	6.6	6.0
U	2.0	2.4	2.3	2.5	2.1
V	196	186	189	202	176
W	0.8	1.0	0.5	0.5	0.7
La	23.8	25.7	22.2	21.6	22.6
Ce	45.8	47.3	43.4	41.5	39.9
Pr	5.27	5.54	5.16	4.88	4.63
Nd	21.3	21.3	20.4	19.4	18.4
Sm	3.90	3.91	3.78	3.54	3.32
Eu	1.04	1.11	1.06	1	0.92
Gd	3.26	3.75	3.19	3.23	3.07
Tb	0.50	0.52	0.50	0.44	0.46
Dy	2.81	3.27	2.82	2.76	2.51
Ho	0.59	0.65	0.61	0.55	0.53
Er	1.72	1.85	1.76	1.68	1.49
Tm	0.25	0.26	0.25	0.23	0.21
Yb	1.67	1.80	1.68	1.62	1.48
Lu	0.28	0.28	0.25	0.22	0.23
Ce/Yb	27.42	26.27	25.83	25.61	26.95
Sr/Y	28.64	29.41	31.31	33.53	23.03
Eu/Eu*	0.89	0.89	0.93	0.9	0.88
LaN/YbN	9.61	9.63	8.91	8.99	10.3

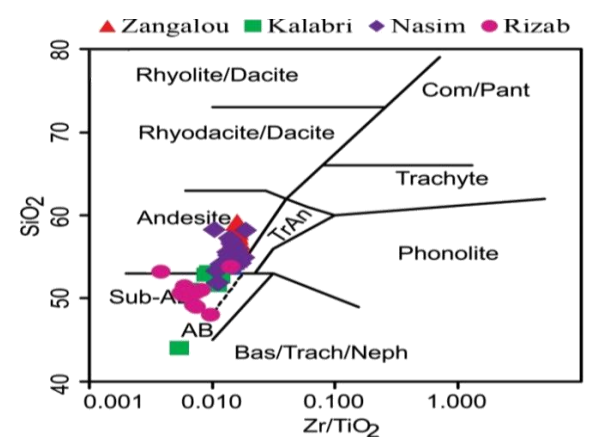
عنصرهای خاکی کمیاب نسبت به عنصرهای دیگر کمتر دچار هوازگی و دگرسانی‌های گرمایی می‌شوند؛ از این‌رو، الگوی فراوانی آنها خاستگاه آذرین سنگ‌ها را نشان دهد (Rollinson, 1993; Boynton, 1984). نمودارهای عنکبوتی عنصرهای خاکی کمیاب، میزان انحراف هر ترکیب نسبت به الگوی ترکیبی اولیه در پی فرایندهای ذوب‌بخشی یا جدایش بلوری را نشان می‌دهند. در نمودار عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت (Boynton, 1984)، الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب در سنگ‌های آتشفشانی گوناگون از مجموعه آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن با هم موازی هستند و همه نمونه‌ها یک غنی‌شدگی کمابیش متوسط از عنصرهای خاکی کمیاب سبک (LREE) نسبت به عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREE) را نشان می‌دهند (شکل 6-A). میزان $(La/Yb)_N$ برابر با 2/46 تا 10/30 (جدول 1) نیز این نکته را تأیید می‌کند.

همخوانی الگوی تغییر عنصرهای خاکی کمیاب چه‌بسا نشان‌دهنده خاستگاه مشترک این سنگ‌ها باشد (Henderson, 1984). روند غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE در مناطق یادشده نشان‌دهنده ماگمایی پدیدآمده در پهنه فرورانش است (Rollinson, 1993; Pearce, 1981; Gill, 1983). همچنین، غنی‌شدگی متوسط LREE نسبت به HREE شاید پیامد جدایش بلورین کانی هورنبلند یا گارنت‌دار بودن خاستگاه بوده باشد (Jahangiri, 2007). نسبت کم $(La/Yb)_N$ نیز پیامد کم بودن مقدار گارنت در خاستگاه ماگماست. مقدار Eu/Eu^*



شکل 4- سنگ‌های آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن (زنگالو، کال‌ابری (Jabbari *et al.*, 2017)، نسیم (Mahvashi and Mohammadi *et al.*, 2016) و ریزآب (Malekzadeh Shafaroudi, 2016)) در نمودار Co در برابر Th (Hastie *et al.*, 2007)

در نمودار نامگذاری سنگ‌ها بر پایه مقادیر Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 ، نمونه‌های منطقه زنگالو و نسیم بیشتر در بخش آندزیت و گاه تراکی آندزیت، نمونه‌های منطقه کال‌ابری در محدوده بازالت ساب‌آلکان و آندزیت و سنگ‌های آتشفشانی منطقه ریزآب در محدوده بازالت‌های ساب‌آلکان جای می‌گیرند (شکل 5).



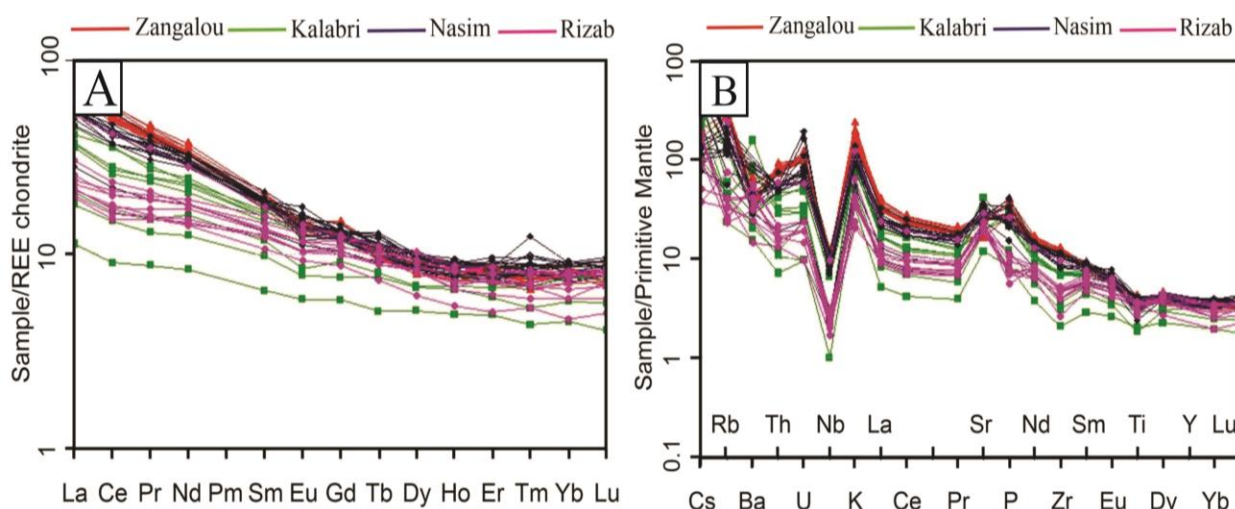
شکل 5- نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی مناطق زنگالو، کال‌ابری (Jabbari *et al.*, 2017)، نسیم (Mahvashi and Malekzadeh Shafaroudi, 2016) و ریزآب (Mohammadi *et al.*, 2015) در نمودار Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 (Winchester and Floyd, 1977) Com: Comendite; Pant: Pantellerite; AB: Alkali Basalt; TrAn: Trachy Andesite; Bas/Trach/Neph: (Basanite/Trachyte/Nephilinite)

می‌دهد. همچنین، آنومالی منفی Ti شاید نشان‌دهنده نقش اکسیدهای Fe-Ti باشد (Irvine and Baragar, 1971). اگر نسبت $Zr/Y > 3$ باشد، گدازه‌ها به کمان آتشفشانی قاره‌ای مربوط هستند؛ اما اگر این نسبت از 3 کمتر باشد در کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی پدید آمده‌اند (Pearce and Norry, 1979). این نسبت در سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو و دیگر مناطق بررسی شده از 3 بیشتر است. از این‌رو، در گروه کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای جای می‌گیرند. نسبت Sr/Y تعیین‌کننده کانی‌های خاستگاه ماگماست. بالای بودن این نسبت نشان‌دهنده بالای بودن گارنت در ترکیب بجامانده و کم بودن آن نشان‌دهنده مقادیر بالای پلاژیوکلاز و آمفیبول در ترکیب بجامانده است (Geng et al., 2009). مقدار این نسبت در سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو نشان‌دهنده حضور مقدار کمی گارنت در ترکیب بجامانده است. این پدیده ناهنجاری ضعیف Eu و آنومالی مثبت Sr در سنگ‌های آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن را توجیه می‌کند (جدول 1). همچنین، مقدار Nb در همه نمونه‌های منطقه زنگالو و همچنین، دیگر مناطق (کال‌بری، نسیم، ریزآب) از 8/6 ppm کمتر است. کاهیدگی شدید Nb همراه با ناهنجاری مثبت Sr شاخص ماگماهای پهنه فرورانش و افزایش آن نشان‌دهنده افزایش اختلاط پوسته قاره‌ای است (Zhang et al., 2006; Asran and Ezzat, 2002). نسبت Nb/La برای میانگین سنگ‌های پوسته قاره‌ای برابر با 0/39 (Rudnick and Gao, 2003) و برای بازالت‌های اقیانوسی برابر با 0/9 تا 1/3 (Sun and McDonough, 1989) است. این نسبت در واحدهای آتشفشانی منطقه زنگالو 0/29 تا 0/38 (جدول 1) و برای دیگر مناطق بررسی شده از 0/16 تا 0/46 است که به پوسته قاره‌ای نزدیک‌تر است و نشان‌دهنده آلودگی مذاب با

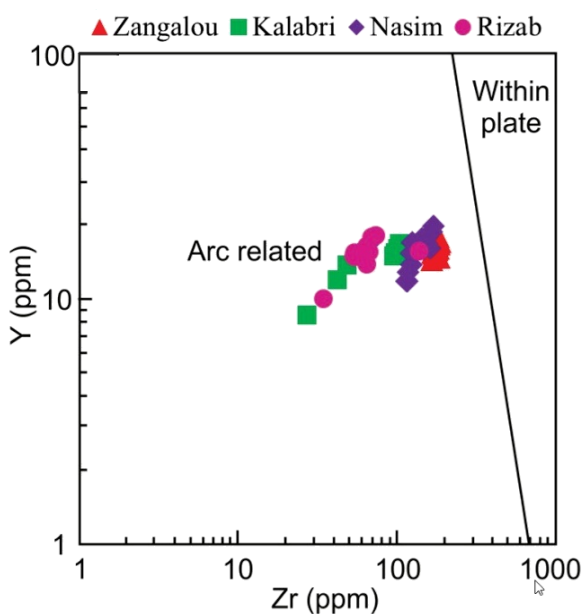
سنگ‌های آتشفشانی زنگالو برابر با 0/84 تا 0/95 است (جدول 1). این نسبت در مناطق دیگر شمال‌باختری بردسکن (کال‌بری، نسیم، ریزآب) از 0/76 تا 1/12 تغییر می‌کند. این مقادیر نشان‌دهنده آنومالی منفی ضعیف Eu است (شکل 6-A). تهی‌شدگی بسیار ضعیف Eu نشان‌دهنده نبود یا مقدار بسیار کم پلاژیوکلاز بجامانده در خاستگاه ماگما، فوگاسیته بالاتر اکسیژن محلول، آلودگی کمتر با پوسته قاره‌ای و همچنین، نبود جدایش بلورین چشمگیر پلاژیوکلاز در ماگما پیش از فوران است (Martin, 1999).

در نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، نمونه‌های منطقه زنگالو و همچنین، مناطق کال‌بری، نسیم و ریزآب همگی از عنصرهای LILE (K, Rb و Cs) و عنصرهای ناسازگار که رفتاری همانند آنها دارند (مانند Th) در برابر عنصرهای HFSE (Y, Zr و Nb Ti) غنی شده‌اند و تفاوت‌های اندک مربوط به تغییر کلی سنگ هستند (شکل 6-B). بالای بودن نسبت LILE/HFSE از نشانه‌های فرورانش به‌شمار می‌رود (Zanetti et al., 1999; Winter, 2001; Wilson, 2007; Gill, 2010). غنی‌شدگی از LILE یا از گوشته‌ای به‌ارث رسیده است که پیشتر با ترکیب‌های پهنه فرورانش دچار متاسوماتیسم شده است و یا پیامد آغشتگی کمان پوسته‌ای است (Liu and Liu, 2014). تهی‌شدگی Ti در ماگماتیسم به فرورانش و فوگاسیته اکسیژن وابسته است (Edwards et al., 1994). هنگامی که فوگاسیته اکسیژن بالا باشد دمای بیشتری نیاز است تا کانی‌های Ti دار در مذاب‌های جدا شده از پهنه فرورانش تهی شوند. از آنجایی که این دما فراهم نمی‌شود، پس Ti نیز تهی نمی‌شود و این عنصر ناهنجاری منفی نشان

پوسته‌قاره‌ای هنگام صعود مذاب است.



شکل 6- ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی شمال باختری بردسکن در نمودارهای عنکبوتی عنصرهای خاکی کمیاب و کمیاب بهنجار شده به: (A) ترکیب کندریت (Boynton, 1984)؛ (B) ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)



شکل 7- ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی شمال باختری بردسکن در نمودار Zr در برابر Y (Le Maitre *et al.*, 1989)

در نمودار نسبت‌های TiO_2/Al_2O_3 در برابر Zr/Al_2O_3 که برای تفکیک محیط‌های درون صفحه‌ای و کمان‌های آتشفشانی به کار برده می‌شود، همه نمونه‌های منطقه زنگالو و نیز مناطق دیگر شمال باختری بردسکن در گستره وابسته به کمان‌های آتشفشانی جای می‌گیرند (شکل 8 - A). همچنین، برپایه نمودار نسبت‌های

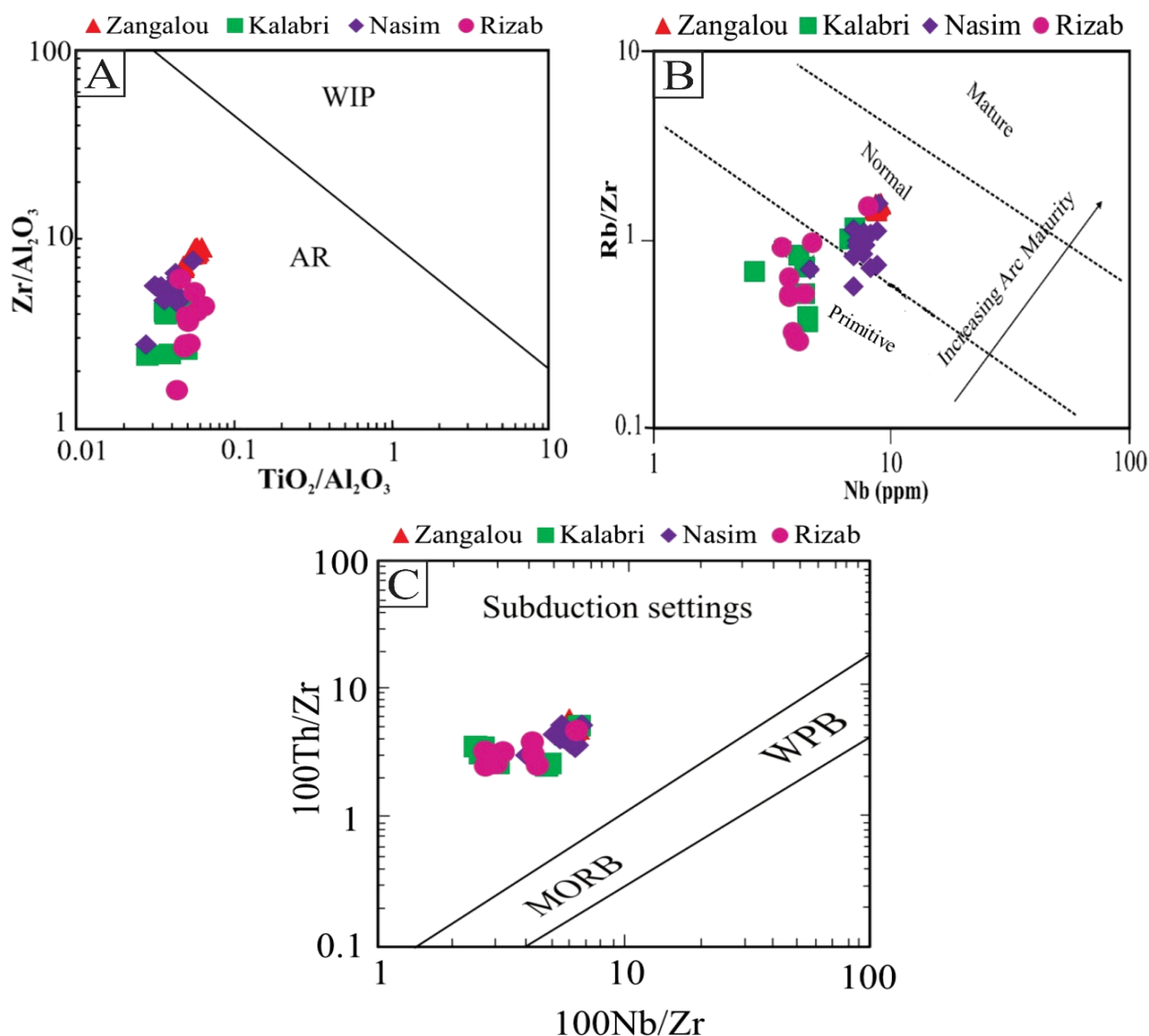
بحث

جایگاه تکتونوماگمایی

آندزیت‌ها و بازالت‌ها در جایگاه‌های زمین‌ساختی گوناگونی پدید می‌آیند. پیدایش آندزیت‌ها بیشتر در پهنه‌های فرورانش (جزیره‌های کمانی و حاشیه‌های قاره‌ای فعال) و بازالت‌ها بیشتر در محیط‌های واگرای اقیانوسی روی می‌دهد و ترکیب آنها در این جایگاه‌ها به فرایندهای رخ داده در مرزهای همگرا و واگرا بستگی دارد (Gill, 2010). برای تعیین جایگاه تکتونوماگمایی مجموعه آتشفشانی شمال باختری بردسکن نمودارهای مختلفی به کار برده شد که همگی جایگاه زمین‌ساختی پهنه‌های فرورانشی این مجموعه آتشفشانی را نشان می‌دهند. نمودار Zr در برابر Y (شکل 7) از نمودارهای به کاررفته است که در آن، همه نمونه‌های منطقه زنگالو در محدوده مرتبط با کمان جای می‌گیرند. همچنین، نمونه‌های مناطق دیگر شمال باختری بردسکن (کالابری، نسیم و ریزاب) نیز مشابه با منطقه زنگالو در محدوده مرتبط با کمان جای می‌گیرند.

منطقه کال‌ابری و ریزاب در محدوده کمان‌های آتشفشانی جوان یا مراحل آغازین فرورانش رسم می‌شوند (شکل 8-B). نمودار $100\text{Nb}/\text{Zr}$ در برابر $100\text{Th}/\text{Zr}$ برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو و دیگر مناطق شمال‌باختری بردسکن (کال‌ابری، نسیم و ریزاب) نیز محیط فرورانش را نشان می‌دهد (شکل 8-C).

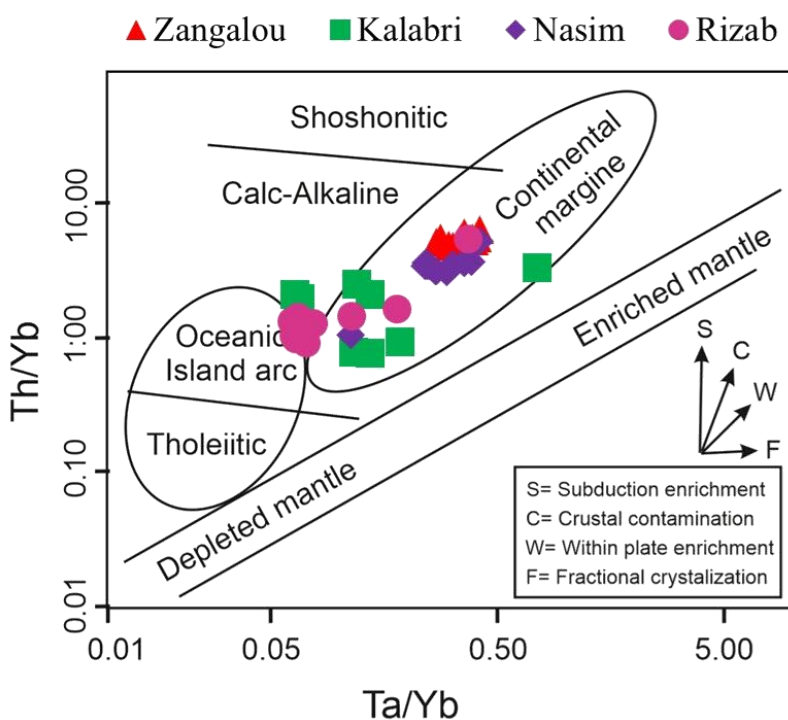
Nb در برابر Rb/Zr نیز سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو در گستره کمان‌های آتشفشانی میانسال یا مراحل میانی فرورانش جای گرفته‌اند (شکل 8-B). بیشتر نمونه‌های منطقه نسیم و برخی نمونه‌های منطقه کال‌ابری نیز همانند منطقه زنگالو در محدوده کمان‌های آتشفشانی میانسال جای می‌گیرند؛ اما بیشتر نمونه‌های



شکل 8- ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن در: (A) نمودار $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ در برابر $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Muller and Groves, 1997) (WIP: جایگاه درون‌صفحه‌ای؛ AR: وابسته به کمان‌های آتشفشانی)؛ (B) نمودار Nb در برابر Rb/Zr (Brown et al., 1984)؛ (C) نمودار $100\text{Th}/\text{Zr}$ در برابر $100\text{Nb}/\text{Zr}$ (Pearce, 1983; Asiabanha et al., 2012) (WPB: Within-Plate Basalt; MORB: Mid Oceanic Ridge) (Basalt)

ماگمای آنها از ذوب بخشی گوشته غنی شده پدید آمده است. روند نمونه‌های شمال باختری بردسکن در این نمودار گویای تبلور بخشی (روند F) است (شکل 9). بالا بودن نسبت Th/Yb در واحدهای آتشفشانی شمال باختری بردسکن در ارتباط با فرایندهای وابسته به فرورانش است. فرورانش سنگ‌کره اقیانوسی به زیر صفحه قاره‌ای، عامل پیدایش ماگماهای مرتبط با کمان (arc-related) است که بیشتر همراه با افزوده شدن اجزای متاسوماتیک از پوسته اقیانوسی فرورو است.

نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (شکل 9) ویژگی‌هایی مانند جایگاه زمین ساختی، نوع ماگما و خاستگاه ماگما را نشان می‌دهد. بر پایه این نمودار، نمونه‌های واحدهای آتشفشانی منطقه زنگالو همگی در محدوده حاشیه قاره‌ای و کالک‌آلکالن و در محدوده مایل به گوشته غنی شده جای می‌گیرند. نمونه‌های مناطق کال ابری، نسیم و ریزاب نیز در محدوده حاشیه‌های قاره‌ای و کالک‌آلکالن (مگر چند نمونه از منطقه کال ابری و ریزاب که تنها در محدوده کالک‌آلکالن جای می‌گیرند) واقع شده‌اند و



شکل 9- ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی شمال باختری بردسکن در نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (Siddiqui *et al.*, 2007; Helvacı *et al.*, 2009)

می‌رسد و همچنین، نمودارهای زمین ساختی به دست آمده در این پژوهش نیز همگی گویای رخداد یک کشش و بازشدگی درون کمان یا پشت کمان است. این محیط‌های کششی پشت کمانی در زمان آغاز پالئوسن آغاز به فرورانش به زیر صفحه توران کرده و در زمان ائوسن به طور کامل بسته شده‌اند. پیامد این فرورانش، پیدایش واحدهای

در کرتاسه میانی - بالایی، در پی فرورانش نئوتتیس به زیر پهنه ساندج- سیرجان، حوضه‌های پشت کمانی در اثر تنش‌های کششی پدید آمده‌اند (Ghasemi and Talbot, 2006; Agard *et al.*, 2007; Moghadam *et al.*, 2009). ستبرای بالای واحدهای آتشفشانی در مناطق شمال باختری بردسکن مانند زنگالو که گاه تا 400 متر هم

آتشفشانی و آذرین درونی در پهنه سبزواری و مجموعه آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن است.

بررسی خاستگاه ماگما

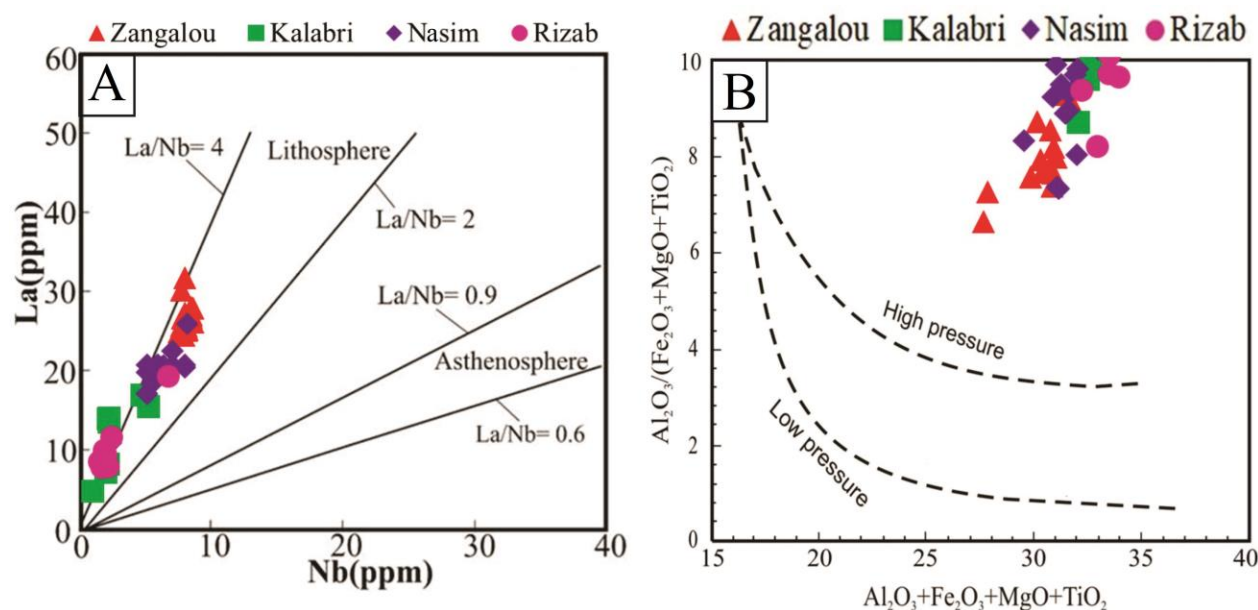
همخوانی الگوی تغییر عنصرهای خاکی کمیاب چه بسا نشانه خاستگاه مشترک این سنگ‌ها باشد (Henderson, 1984). ذوب‌بخشی یک خاستگاه گارنت‌دار، مذابی با مقدارهای Sm/Yb بیشتر از 2/5 پدید می‌آید (Aldanmaz et al., 2000). از این رو، بود و یا نبود گارنت در ناحیه خاستگاه ماگما با نسبت‌های این عنصرها شناخته می‌شود؛ زیرا Yb در گارنت سازگار است (Alici et al., 2004). نمونه‌های منطقه زنگالو نسبت Sm/Yb کمتر از 2/5 دارند و از این رو، بدون یا دارای مقدارهای کمی گارنت در ناحیه خاستگاه هستند. افزون‌براین، دیگر نمونه‌ها از مناطق شمال‌باختری بردسکن (کال‌بری، نسیم، ریزآب) نیز همانند منطقه زنگالو نسبت Sm/Yb کمتر از 2/5 دارند و از این رو، خاستگاه آنها بدون گارنت یا دارای مقدارهای کمی گارنت است. آنومالی منفی ضعیف Eu در نمودارهای عنکبوتی منطقه زنگالو و دیگر مناطق بررسی‌شده شمال‌باختری بردسکن نشان‌دهنده حضور مقادیر کمی گارنت در ترکیب بجامانده است. سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو و به‌طور کلی، مجموعه آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن از عنصرهای LREE و LILE نسبت به عنصرهای HREE و HFSE غنی‌شدگی نشان می‌دهند. این غنی‌شدگی چه بسا پیامد متاسوماتیسم گوشته‌ای با سیال‌های پدیدآمده از آزدایی ورقه اقیانوسی (Goss et al., 2009) و یا پیامد آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای باشد (Prouteau et al., 2001).

Lee و Bachman (2014) درباره خاستگاه آندزیت‌ها فرضیه‌هایی را پیشنهاد کرده‌اند که عبارتند از:

- 1- ذوب مستقیم گوشته در شرایط اشباع از آب؛
- 2- ذوب‌بخشی پوسته بازالتی دگرسان؛
- 3- جدایش بلوری از بازالتهای کمان در

بخش‌هایی از ماگما؛

4- آمیختگی ماگماهای مافیک با ماگما یا پوسته غنی از Si. نسبت Zr/Ba پارامتر مؤثری در شناخت خاستگاه گوشته سنگ‌کره‌ای از گوشته سست‌کره‌ای به‌شمار می‌رود. اگر این نسبت برابر با 0/3 تا 0/5 باشد نشان‌دهنده گوشته سنگ‌کره‌ای و اگر این نسبت از 0/5 بیشتر باشد نشان‌دهنده خاستگاه گوشته سست‌کره‌ای است (Kürkcüoğlu, 2010). میانگین این نسبت در واحدهای آتشفشانی منطقه زنگالو، 0/46 و برای دیگر مناطق شمال‌باختری بردسکن 0/28 است که نشان‌دهنده خاستگاه گوشته سنگ‌کره‌ای برای آنهاست. نمودار Nb در برابر La (Gusev and Korobeinikov, 2009) نیز نشان‌دهنده خاستگاه گوشته سنگ‌کره‌ای برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو (نسبت La/Nb برابر با 2/6 تا 3/8) و همچنین، دیگر مناطق بررسی‌شده شمال‌باختری بردسکن (نسبت La/Nb برابر با 2/15 تا 6/05) است (شکل 10-A). این ویژگی‌ها نشان‌دهنده جدایش این سنگ‌ها از یک خاستگاه ناهمگن (گوشته سنگ‌کره‌ای متاسوماتیسم‌شده) است (Fu et al., 2016). در نمودار $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO + TiO_2$ در برابر $(Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO + TiO_2))$ ، نسبت‌های بالای پدیدآمده در فشار بالا هستند؛ اما مذاب‌هایی که در بین دو خط فشار بالا و فشار پایین قرار می‌گیرند، حاصل برهم‌کنش گوشته-سنگ‌کره هستند (Geng et al., 2009). در سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو و همچنین، دیگر مناطق بررسی‌شده از شمال‌باختری بردسکن، نسبت‌های یادشده بالا و به‌ترتیب برابر با 6/56 تا 9/06 و 7/24 تا 24/62 است و در نتیجه در محدوده فشار بالا واقع می‌شوند (شکل 10-B). آندزیت‌ها و سنگ‌های آذرین درونی وابسته، اطلاعاتی درباره برهم‌کنش گوشته و پوسته فراهم می‌کنند (Terentiev et al., 2016).

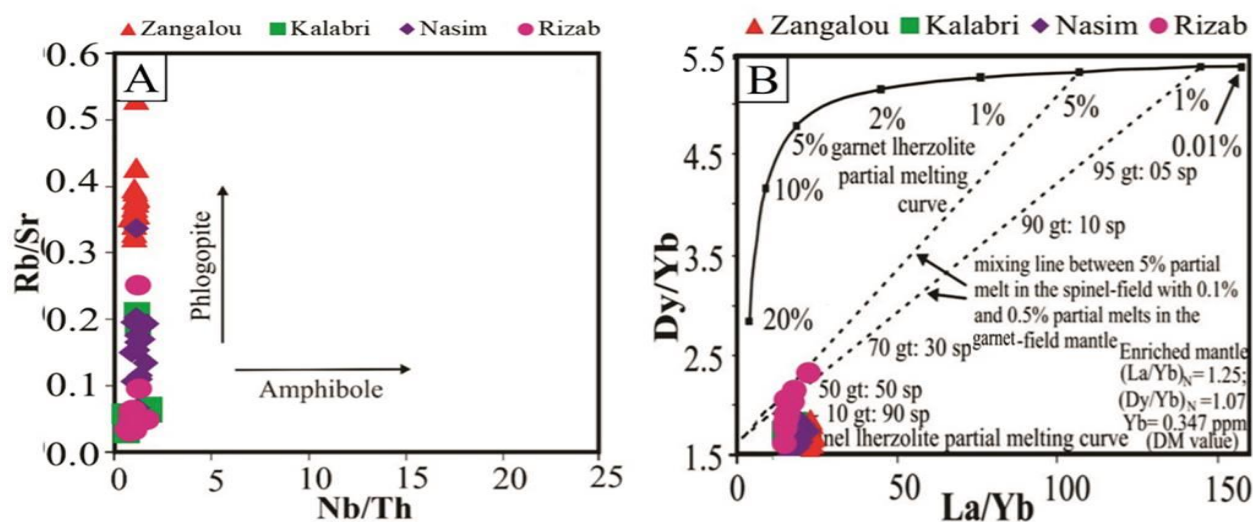


شکل 10 - ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو و دیگر مناطق شمال‌باختری بردسکن (کالابری، نسیم، ریزآب) در: (A) نمودار تغییرات Nb در برابر La (Gusev and Korobeinikov, 2009)؛ (B) نمودار $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO + TiO_2$ در برابر $Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO + TiO_2)$ (Geng *et al.*, 2009)

همچنین، برخی نمونه‌ها در منطقه بین منحنی اسپینل لرزولیت و گارنت لرزولیت جای می‌گیرند که نشان‌دهنده خاستگاه اسپینل لرزولیت با مقدار کمی گارنت است.

تحرك‌پذیری عنصرهای LREE (مانند: Th, Pr, Nd, La و Ce)، در سیال‌ها بالا نیست؛ اما این عنصرها در رسوبات غنی هستند (Elliott *et al.*, 1997). سیال‌های آبدار برخاسته از صفحه فرورو می‌تواند باعث انتقال برخی عنصرهای ناسازگار از پوسته فرورو به گوشته زیر قاره در محل فرورانش شوند (Hermann *et al.*, 2006). با افزوده شدن رسوبات پلاژیک و پوسته اقیانوسی دگرسان شده به گوشته در محل خاستگاه ماگما، U و Th در نمودارهای عنكبوتی آنومالی مثبت نشان می‌دهند (Fan *et al.*, 2003). گمان می‌رود خاستگاه ماگمای واحدهای آتشفشانی منطقه، اسپینل لرزولیتی با مقدار کمی گارنت بوده است.

از نسبت MREE/HREE در برابر LREE/HREE (برای نمونه نسبت La/Yb در برابر Dy/Yb که متمایزکننده خاستگاه ذوب گارنت - لرزولیت یا اسپینل - لرزولیت است) برای شناخت مدل ذوب بهره گرفته می‌شود. این نمودار به‌طور ویژه برای شناسایی مذاب‌های اسپینل و گارنت کارآمد است (Thirlwall *et al.*, 1994). مذاب‌های رخساره اسپینل تغییرات کمی از نسبت Dy/Yb نسبت به خاستگاه گوشته‌ای و همچنین، تغییرات کمی از Dy/Yb در برابر La/Yb نشان می‌دهند. در مقابل، مذاب‌های رخساره گارنت تغییرات بالایی در نسبت‌های Dy/Yb نشان می‌دهند. نمودار La/Yb در برابر Dy/Yb (شکل 11-B)، خاستگاه ذوب بخشی اسپینل - لرزولیت را برای نمونه‌های منطقه زنگالو و بیشتر نمونه‌های دیگر مناطق شمال‌باختری بردسکن نشان می‌دهد.



شکل 11 - ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن در: (A) نمودار Nb/Th در برابر Rb/Sr؛ (B) نمودار Dy/Yb در برابر La/Yb (McDonough and Sun, 1995)

بردسکن (کال‌بری، نسیم، ریزآب) نیز همانند منطقه زنگالو نسبت Sm/Yb کمتر از $2/5$ دارند و از این‌رو، خاستگاه آنها نیز بی‌گارنت یا دارای مقدار کم گارنت است. سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنگالو و به‌طور کلی مجموعه آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن از عنصرهای LREE و LILE نسبت به عنصرهای HREE و HFSE غنی‌شدگی نشان می‌دهند. این پدیده چه‌بسا پیامد متاسوماتیسم گوشته‌ای با سیال‌های برخاسته از آزدایی پوسته اقیانوسی و یا در پی آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای باشد. مقادیر نسبت Zr/Ba در واحدهای آتشفشانی منطقه زنگالو و دیگر مناطق شمال‌باختری بردسکن نشان‌دهنده جدایش این سنگ‌های از یک خاستگاه ناهمگن (گوشته سنگ‌کره‌ای متاسوماتیسم‌شده) است. مقدار نسبت $Al_2O_3/(Fe_2O_3+MgO+TiO_2)$ در سنگ‌های آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن بالاست و در محدوده فشار بالا واقع می‌شوند. این واحدها از ذوب‌بخشی یک خاستگاه اسپینل‌لرزولیت فلوگوپیت‌دار غنی‌شده پدید آمده‌اند. غنی‌شدگی گوشته را می‌توان پیامد فرورانش تخته فرورو دانست.

برداشت

مجموعه آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن شامل واحدهای آتشفشانی آندزیت، تراکی‌آندزیت و بازالت در مناطق مختلف خود است. برپایه بررسی‌های دقیق صحرایی و میکروسکوپی در منطقه زنگالو، واحدهای پورفیریتیک هورنبلند آندزیت، هورنبلند تراکی‌آندزیت، لاتیت و پیروکسن آندزیت شناسایی شدند. غنی‌شدگی کمابیش متوسط از LREE نسبت به HREE در واحدهای آتشفشانی منطقه زنگالو و دیگر مناطق شمال‌باختری بردسکن نشان‌دهنده ماگمایی پدیدآمده در پهنه فرورانش است. کاهیدگی شدید Nb همراه با ناهنجاری مثبت Sr در این سنگ‌ها پیدایش ماگمای مادر آنها در پهنه فرورانش را نشان می‌دهد. نسبت Nb/La در سنگ‌های آتشفشانی شمال‌باختری بردسکن نزدیک به میانگین سنگ‌های پوسته قاره‌ای و نشان‌دهنده آلودگی مذاب با پوسته قاره‌ای هنگام صعود است. نمونه‌های منطقه زنگالو نسبت Sm/Yb کمتر از $2/5$ دارند که نشان‌دهنده نبود یا کم‌بودن گارنت در ناحیه خاستگاه است. افزون‌براین، دیگر نمونه‌ها از مناطق شمال‌باختری

بردسکن و پهنه سبزوار پیشنهاد می کنند.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با پشتیبانی مالی دانشگاه فردوسی مشهد و در ارتباط با طرح پژوهشی شماره 3/49173 انجام شده است. نگارندگان از آقای مهندس کسبایان برای حمایت در برداشتهای صحرایی بسیار سپاس‌گزارند.

یافته‌های به‌دست‌آمده در بررسی‌های پیشین، فرورانش نئوتتیس به زیر پهنه سنندج-سیرجان، در زمان کرتاسه میانی-بالایی و پیدایش حوضه‌های پشت کمانی در پی تنش‌های کششی را نشان می‌دهند. یافته‌های این پژوهش، پیرامون پهنه زمین‌ساختی و نوع ماگمای این منطقه نیز بررسی‌های پیشین را تایید می‌کنند و پهنه فرورانش و پیدایش کمان را برای منطقه شمال‌باختری

منابع

- Agard, P., Jolivet, L., Vrielynck, B., Burov, E. and Monie, P. (2007) Plate acceleration: the obduction trigger? *Earth Planetary Scientific Letters* 258: 428-441.
- Alavi, M. (1991) Tectonic Map of the Middle East. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F. and Mitchell, J. G. (2000) Petrogenetic evolution of late Cenozoic, postcollision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102: 67- 95.
- Alici, S. P., Temel, A. and Gourgaud, A. (2004) Petrogenetic modeling of Quaternary postcollisional volcanism: a case study of central and eastern Anatolia. *Geological Magazine* 141: 81-98.
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J. M., Kananian, A., Rahimi, G. (2012) Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences* 45: 79-94.
- Asran, M. and Ezzat, M. (2012) The pan-African calc-alkaline granitoids and the associated mafic microgranular enclaves (MME) around Wadi Abu Zawal area, North Eastern desert, Egypt: geology, geochemistry and petrogenesis. *Biology and Earth Sciences* 2 (1): 1-16.
- Boynton, W. V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: *Rare Earth Element Geochemistry* (Ed. Henderson, P.) 63-114. Elsevier, Amsterdam.
- Brown, G. C., Thorpe, R. S. 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.
- Edwards, C. M., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F., Morris, J. D., Leeman, W. P. and Harmon, R. S. (1994) The transition to potassic alkaline volcanism in island arcs: the Ringgit-Beser complex, east Java Indonesia. *Petrology* 35(6): 1557-1595.
- Eftekharnjad, J., Aghanabati, A. and Hamzehpour, B. (1976) 1:250000 Kashmar geological map. Geological Survey and Mining Exploration of Iran.
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., White, W. and Bourdon, B. (1997) Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research* 102(B7): 14991-15019.
- Fan, W., Gue, F., Wang, Y. J. and Lin, G. (2003) Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of postorogenic extension in the northern Da Hinggan mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 121: 115-135.
- Fu, D., Bo, H., Songbai, P., Timothy, M.K., Wenxiao, Z. and Mengchun, G. (2016) Geochronology and Geochemistry of Late Carboniferous Volcanic Rocks from Northern Inner Mongolia, North China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Gondwana Research* 36: 545-560.
- Geng, H., Sun, M., Yuan, C., Xiao, W. J., Xian, W. S., Zhao, G. C., Zhang, L. F., Wong, K. and Wu, F. Y.

- (2009) Geochemical, Sr–Nd and zircon U–Pb–Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: implications for ridge subduction. *Chemical Geology* 266: 364-389.
- Ghasemi, A. and Talbot, C. J. (2006) A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Science* 26: 683-693.
- Ghelichkhani, M. and Malakzadeh Shafaroudi, A. (2018) Geology, alteration, mineralization, geochemistry of Zangalou copper mine area. 10th National Symposium of Economic Geology of Iran, Chamran University, Ahvaz, Iran (in Persian).
- Gill, J. B. (1981) *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer, New York.
- Gill, R. (2010) *Igneous Rocks and Processes*. Wiley-Blackwell, Malaysia.
- Goss, A. R. and Kay, S. M. (2009). Extreme high field strength element (HFSE) depletion and near-chondritic Nb/Ta ratios in Central Andean adakite-like lavas (~28°S, ~68°W). *Earth and Planetary Science Letters* 279: 97-109.
- Gusev, A. I. and Korobeinikov, A. F. (2009) Mantle–crustal interaction in the generation of different types of mineralization: geophysical and petrological aspects, *Izv. Tomsk Polytechnic University* 315(1): 18-25.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. and Mitchell, S. F. (2007) Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th–Co discrimination diagram. *Journal of Petrology* 48(12): 2341-2357.
- Helvacı, C., Ersoy, E. Y., Sözbilir, H., Erkül, F., Sümer, Ö. and Uzel, B. (2009) Geochemistry and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, western Anatolia. *Volcanology and Geothermal Research* 185(3): 181–202.
- Henderson P. (1984) *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Oxford, New York.
- Hermann, J., Spandler, C., Hack, A. and Korsakov, A. V. (2006) Aqueous fluids and hydrous melts in high-pressure and ultra-high pressure rocks: implications for element transfer in subduction zones. *Lithos* 92(3): 399-417.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971) Guide to the chemical classification of the common volcanic. *Canadian Journal of Earth Science* 8(5): 523-548.
- Jabbari, E., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M. H. (2017) Kalabri stratabound (manto-type) copper deposit in Eocene volcanic-sedimentary complex of NW Bardaskan, NE Iran. *Journal of Advanced Applied Geology* 7(1): 1-19 (in Persian).
- Jahangiri, A. (2007) Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: geochemical and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences* 30: 433-447.
- Kürkcüoğlu, B. (2010) Geochemistry and petrogenesis of basaltic rocks from the Develidag volcanic complex, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 37: 42-51.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Kellre, J., Le Bas, M. J., Sabine, P. A., Schmid, R., Sorenson, H., Streckeisen, A., Woolley, A. and Zanettin, B. (1989) *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford, UK.
- Lee, C. T. A. and Bachmann, O. (2014) How Important Is the Role of Crystal Fractionation in Making Intermediate Magmas? Insights from Zr and P Systematics. *Earth and Planetary Science Letters* 393: 266-274.
- Lindenberg, H. G. and Jacobshagen, V. (1983) Post-Paleozoic geology of the Taknar zone and adjacent area, NE Iran, Khorasan. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Liu, X. and Liu, W. (2014) Source characteristics and tectonic setting of the Early and Middle Devonian volcanic rocks in the north Junggar, northwest China: Insights from Nd-Sr isotopes and geochemistry. *Lithos* 27-41: 184-187.

- Mahvashi, M. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2016) Cheshmegaz (Nasim) copper deposit, NW Bardaskan, mineralogy, alteration, geochemistry and model determining Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24(3): 41–434 (in Persian).
- Mahvashi, M. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2016) Cheshmegaz (Nasim) copper deposit, NW Bardaskan, mineralogy, alteration, geochemistry and model determining. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24(3): 419-434 (in Persian).
- Martin, H. (1999). The adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos* 46(3): 411-429.
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253.
- Moghadam, H. S., Whitechurch, H., Rahgoshay, M. and Monsef, I. (2009) Significance of the Nain-Baft ophiolitic belt (Iran): short-lived transtensional Cretaceous back-arc oceanic basins over the Tethyan subduction zone. *Comptes Rendus Geoscience* 316: 1016-1028.
- Mohammadi, F., Zarrinkoub, Mohammadi, S. and Rajabi, A. R. (2015) Petrography and Geochemistry of volcanic rocks in Rizab area (North-west of Bardaskan), Khorasan Razavi province. M.Sc. thesis, Birjand University, Birjand, Iran (in Persian).
- Morata, D. and Aguirre, L. (2003) Extensional lower Cretaceous volcanism in the coastal range (29°20' - 30°S), Chile: Geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 459-476.
- Muller, D. and Groves, D. I. (1997) Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* (Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230-249. Shiva Publisher, Nantwich, UK:
- Pearce, J. A. and Norry, M. J. (1979) Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69(1): 33-47.
- Pilger A. (1971) Die zeitlich-tektonische Entwicklung der Iranischen Gebirge. *Clausthaler Geologische Abhandlungen*, 8: 1–27.
- Prouteau, G., Scaillet, B. and Pichavant, M. and Maury R. (2001) Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature* 410: 197-200.
- Rollinson, H. R. (1993) *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, Wiley, New York.
- Rudnick, R. L. and Gao, S. (2003) The Composition of the Continental Crust. In: *Treatise on Geochemistry* (Eds. Holland, H. D. and Turekian, K. K.) 3: 1-64. Elsevier-Pergamon, Oxford.
- Shahrabi, M., Hosseini, K., Shabani, K. and Massomi, R. (2005) Geological map of Bardaskan, 1:100000 scale. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Siddiqui, R. H., Asif Khan, M. and Qasim Jan, M. (2007) Geochemistry and petrogenesis of the Miocene alkaline and sub-alkaline volcanic rocks from the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan: Implications for porphyry Cu-Mo-Au deposits. *Himalayan Earth Sciences* 40: 1-23.
- Soltani, A. and Fardust, F. (2017). Mineralization, geochemistry and genesis of Abri, Rahbari and Cheshmeh-Marzieh, NE Darouneh. M.Sc. thesis, Shahroud Industrial University, Shahroud, Iran (in Persian).
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in Ocean Basins* (Eds. Saunders, A. D., Norry, M. J.) Geological Society, Special Publication 42: 312– 345.
- Terentiev, R. A., Savko, K. A. and Santosh, M. (2016) Paleoproterozoic crustal evolution in the East Sarmatian Orogen: Petrology, geochemistry, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb geochronology of andesites from the Voronezh massif, Western Russia. *Lithos* 246-247: 61-80

- Thirlwall, F. M., Upton, B. G. J. and Jenkins, C. (1994) Interaction between continental lithosphere and Iceland plume-Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of Tertiary basalts, NE Greenland. *Journal of Petrology* 35: 839-879.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Wilson, M. (2007) *Igneous Petrogenesis*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation product using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-343.
- Winter, C. (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall, New York.
- Zanetti, A., Mazzucchelli, M., Rivalenti, G. and Vannuci, R. (1999) The Finero phlogopite-peridotite massif: An example of subduction-related metasomatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 134: 107-122.
- Zhang, H., Zhang, L., Harris, N., Jin, L. and Honglin, Y. (2006) U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 152(1): 75-88.