



Research Article

**Investigation of the evolution of arc:
Azadegan magmatic rocks, north of Shahrekord,
Sanandaj-Sirjan zone**

Maryam Ahankoub*, Assistant Professor, Department of Geology, Payame Noor University, Iran

* m.ahankoub@pnu.ac.ir

Farimah Ayati, Associate Professor Department of Geology, Payame Noor University, Iran

f_aiaty@yahoo.com

Madineh Nazari, M.Sc. Student, Department of Geology, Payame Noor University, Iran

firuzeh67@yahoo.com

Abstract

The magmatic complex of Azadegan, composed of basalt, andesitic basalt, andesite, gabbro and diorite, located 45 km northwest of Shahrekord and in the middle part of the Sanandaj-Sirjan zone. The study rocks are dominated by plagioclase, olivine, pyroxene, hornblende as well as biotite and calcite as minor minerals. Geochemically, the rocks under study are calc-alkaline in nature and are characterized by Ce, Zr, Ba, and Sr depletion. Chondrite-normalized REE pattern illustrates LREE enrichment relative to HREE. Geochemical data of the studied samples indicate partial melting of the mantle source with the influence of fluids and sediments of the subducted crust during subduction. The ratio of Th/Yb (2-2.75) values are in consistent with those of the mature arc islands magma. Also, Ce /Y and Sr/Y ratios indicate the thickening of arc islands along with orogenic processes and maturation of arc islands in the study area. The for mentioned ratios also represent the thickness of crust up to 50 km., during orogenic processes at the end of subduction stages of the Neotethys.

Key words: magmatic complex, calc-alkaline, arc, mature, Azadegan, Shahrekord

* Corresponding author



بررسی روند تکامل جزیره‌های کمانی: سنگ‌های ماگمایی آزادگان، شمال شهرکرد، پهنه سنندج - سیرجان

مریم آهنکوب*، استادیار، گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم، دانشگاه پیام‌نور، ایران

* mahankoub@pnu.ac.ir

فریماه آیتی، دانشیار، گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم، دانشگاه پیام‌نور، ایران

f_aiaty@yahoo.com

مدینه نظری، دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم، دانشگاه پیام‌نور، ایران

firuzeh67@yahoo.com

چکیده

مجموعه ماگمایی آزادگان، در 45 کیلومتری شمال‌باختری شهرکرد و در بخش میانی پهنه سنندج - سیرجان رخنمون دارد. بازالیت، بازالیت آندزیتی، آندزیت، گابرو و دیوریت از واحدهای سنگی این مجموعه به‌شمار می‌روند. در این نمونه‌ها کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، الیوین، پیروکسن و هورنبلند، همراه با کانی‌های فرعی بیوتیت و کلسیت دیده می‌شوند. این سنگ‌ها سرشت کالک‌آلکان دارند و از عنصرهای Zr ، Ce و Ba ، Sr تهی‌شدگی نشان می‌دهند. در الگوی بهنجار شده REE آنها نیز غنی‌شدگی LREE در برابر HREE دیده می‌شود. داده‌های زمین‌شیمیایی نمونه‌های بررسی شده نشان‌دهنده ذوب‌بخشی خاستگاه گوشته همراه با دخالت سیال‌ها و رسوب‌های پوسته فرورانده در هنگام فرورانش هستند. مقدار نسبت $(2/75 - 2) Th/Yb$ نمونه‌ها با مقدار این نسبت در نمونه‌های ماگمای جزیره‌های کمانی بالغ همخوانی دارد. همچنین، نسبت‌های Ce/Y و Sr/Y نشان‌دهنده ضخیم‌شدگی جزیره‌های کمانی همراه با فرایندهای کوهزایی و بلوغ جزیره‌های کمانی منطقه بررسی شده هستند. نسبت یادشده تا 50 کیلومتر ضخامت پوسته در هنگام فرایندهای کوهزایی در پایان مراحل فرورانش نتوتیس را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مجموعه ماگمایی، کالک‌آلکان، جزیره‌های کمانی، بالغ، آزادگان، شهرکرد

مقدمه

et al., 2012; Jagoutz and Kelemen, 2015;
Delavault *et al.*, 2016) و پهنه‌های فرورانش
کنونی، کلیدی برای تفسیر شواهد فرورانش قدیمی

پهنه‌های فرورانش، محل پیدایش پوسته قاره‌ای
هستند (Taylor and McLennan, 1985; Grove)

* نویسنده مسئول

روی سنگ‌های آتشفشانی جزیره‌های کمانی نشان‌دهندهٔ پیدایش ماگماهای سیلیسی-قلیایی توسط گوۋهٔ گوشته‌ای متاسوماتیسم شده به مرور زمان و در پی آن، ضخیم‌شدن تدریجی پوستهٔ کمان هستند (Gill, 1981; Plank and Langmuir, 1998; Arculus, 1994; Annen *et al.*, 2006; Tatsumi *et al.*, 2008; Straub *et al.*, 2015). به عبارتی با افزایش بلوغ جزیره‌های کمانی، سرشت ماگما از توله‌ایتی به شوشونیتی تغییر می‌کند. برپایهٔ کارهای اخیر، سرشت جزیره‌های کمانی اولیه تا بلوغ متغییر است و با بازالت‌های توله‌ایتی کم پتاسیک آغاز می‌شود که در مراحل آغازین، در پی ذوب‌بخشی گوشتهٔ تهی شده پدید می‌آیند. سپس با جزیره‌های کمانی کالک‌آلکان بالغ که به‌دنبال دخالت پوسته با غنی‌شدگی LREE/HREE و یا در پی ذوب‌بخشی گوشتهٔ آبدار هنگام فرورانش مواد پوستهٔ ضخیم کمان دنبال می‌شود. در مراحل پایانی جزیره‌های کمانی و در نقطهٔ پایانی کوهزایی برخوردی، کمان‌های قاره‌ای پدید می‌آیند که جایگاهی برای ذوب پوستهٔ بالای و پیدایش ماگما هستند.

بررسی سنگ‌های دگرگونی فشار بالا-دما کم رخسارهٔ اکلوزیت در شمال شهرکرد نشان‌دهندهٔ رخداد فرورانش در حاشیهٔ پهنهٔ سنندج-سیرجان است (Davoudian *et al.*, 2008). همچنین، در بررسی پاراگنایس‌های حاشیهٔ زاینده‌رود و متاگرانیت‌های منطقهٔ آبادچی به جایگاه زمین‌ساختی حاشیهٔ قاره‌ای اشاره شده است (Heydari Chaloshitori, 2014; Riyahi Samani, 2015). به باور Moradi و همکاران (2018)، فرایند پیدایش بیشتر توده‌های نفوذی پهنهٔ سنندج-سیرجان متأثر از فرورانش و بسته‌شدن اقیانوس

به‌شمار می‌روند. پهنه‌های فرورانش شامل کمان جزیره‌های کمانی و حاشیهٔ فعال قاره‌ای هستند که به ترتیب روی سنگ‌کرهٔ اقیانوسی و قاره‌ای جای دارند (Condie, 1989; Wilson, 1989). رده‌بندی جزیره‌های کمانی عبارتست از:

- 1- جزیره‌های کمانی و آنهایی که روی پوسته نازک سیلیسی پدید می‌آیند؛
 - 2- جزیره‌های کمان قاره‌ای، شامل جزیره‌های کمانی که روی پوستهٔ قاره‌ای تکامل یافته یا روی حاشیهٔ نازک پوستهٔ قاره‌ای اصلی پدید می‌آیند؛
 - 3- کمان‌های نوع آند که روی حاشیهٔ قاره‌ای با پوستهٔ ضخیم پدید می‌آیند (Bailey, 1981).
- به‌تازگی رده‌بندی جدید و متفاوتی در این‌باره پیشنهاد شده است:

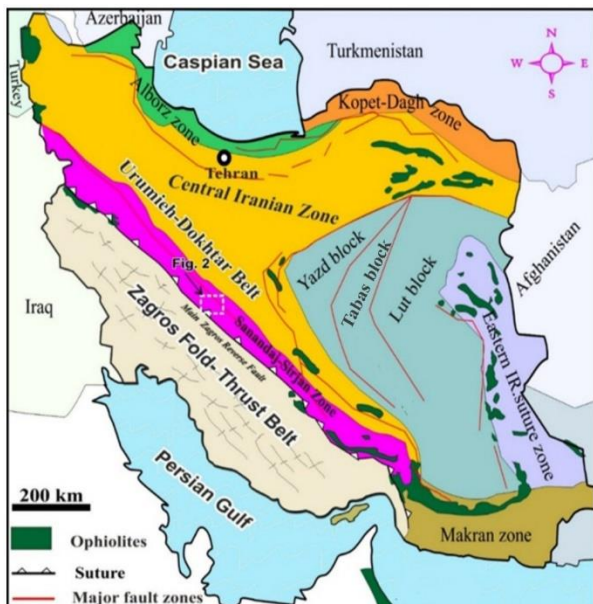
- 1- کمان‌های درون‌اقیانوسی که روی پوستهٔ اقیانوسی نازک پدید می‌آیند؛
- 2- جزیره‌های کمانی که روی پوستهٔ اقیانوسی ضخیم پدید می‌آیند؛
- 3- همهٔ حاشیه‌های قاره‌ای فعال (Xia and Li, 2019).

اینکه جزیره‌های کمانی در چه مرحلهٔ زمانی، تکاملی و بلوغ پدید آیند در سنگ‌زایی سنگ‌های ماگمای آن بسیار اثرگذار خواهد بود. جزیره‌های کمانی مرتبط با مراحل آغازین فرورانش درون‌اقیانوسی را نوپا¹ می‌نامند که بیشتر با پوستهٔ کمان نازک و نابالغ و مجموعه سنگ‌های بازالت و آندزیت توله‌ایتی همراه هستند (Wilson, 1989; Stern, 2010; Safonova *et al.*, 2017). مرحلهٔ بعدی با پوستهٔ کمان نسبتاً ضخیم و نمونه سنگ‌های آندزیتی و بازالتی کالک‌آلکان تا شوشونیتی شناخته می‌شود. بررسی‌های گسترده‌ای

² immature

¹ nascent

دگرگونی، ماگماتیسم و زمین‌ساخت پی‌درپی در هنگام فازهای کوهزایی و زمین‌ساخت چهره شناخته شده‌ای دارد.



شکل 1- نقشه زمین‌شناسی واحدهای ساختاری کمربند کوهزایی زاگرس با تغییراتی پس از Shabanian و همکاران (2018)

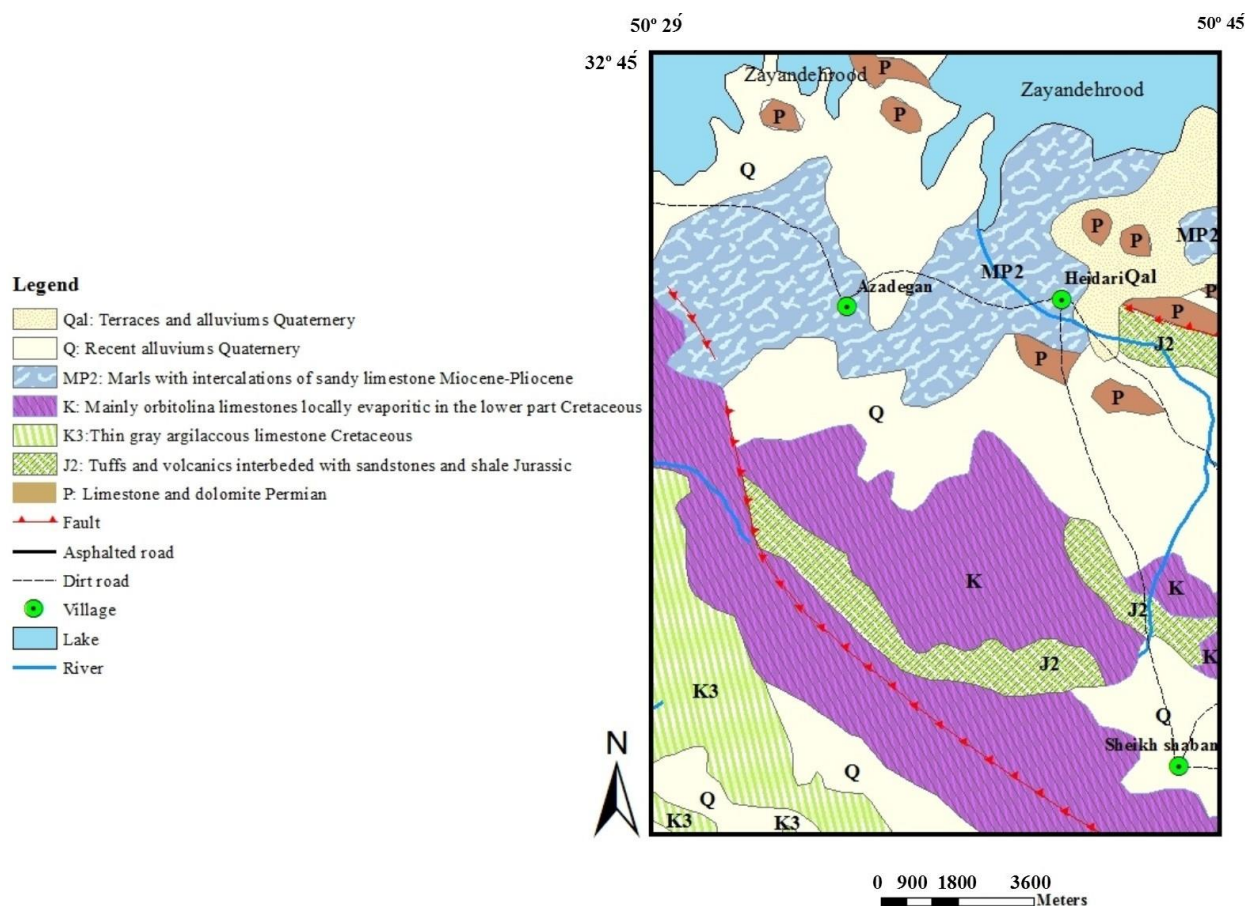
حضور سنگ‌های دگرگونی تا رخساره گرانولیت و حتی اکلوزیت، سنگ‌های آندزیتی و بازالتی و سنگ‌های رسوبی نشان‌دهنده ناآرامی پویایی این پهنه زمین‌ساختی است (Aghanabati, 2004; Davoudian *et al.*, 2016; Ahankoub *et al.*, 2020). برپایه داده‌های صحرائی و نقشه زمین‌شناسی، در منطقه بررسی‌شده، رخنمون گسترده‌ای از رسوبات پرمین، مزوزوییک و سنوزوییک دیده می‌شود (شکل 2). این رسوبات به صورت آهک و دولومیت‌های پرمین، شیل و آهک‌های ژوراسیک و واحدهای ماسه‌سنگی، آهکی و دولومیت‌های کرتاسه هستند. واحدهای کواترنری نیز به صورت آبرفت و تراست دیده می‌شوند.

نئوتتیس در امتداد حاشیه فعال قاره‌ای است. بررسی زمین‌شیمیایی ماسه‌سنگ‌های شمال شهرکرد نشان‌دهنده حضور ساب‌لیتارنایت تا ساب‌آرکوزهای پدیدآمده در محیط زمین‌ساختی حاشیه فعال قاره‌ای است (Bahrami Taghanaki, 2021). تا کنون چندین رخنمون از سنگ‌های آتشفشانی توله‌ایتی تا کالک‌آلکان تیپ جزیره‌های کمائی در شمال شهرکرد گزارش شده‌اند (Ahankoub *et al.*, 2020; Emami and Khalili, 2011; Eliasi *et al.*, 2009). با وجود این، در شمال باختری شهرکرد، در نزدیکی روستای آزادگان، رخنمون گسترده‌ای از سنگ‌های آتشفشانی آندزیت، بازالت و آندزیت بازالتی همراه با گابرو و دیوریت دیده می‌شود که تا کنون هیچگونه بررسی‌های زمین‌شناسی درباره آن انجام نشده است. در این نوشتار، با استفاده از بررسی‌های صحرائی، سنگ‌نگاری و داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی سنگ کل به بررسی سنگ‌زایی، جایگاه زمین‌ساختی و بررسی الگوی بلوغ و تکامل این سنگ‌ها پرداخته شده است.

زمین‌شناسی منطقه

مجموعه ماگمایی آزادگان در نزدیکی روستای آزادگان، میان طول‌های جغرافیایی $50^{\circ} 29' 09''$ و $50^{\circ} 29' 20''$ و عرض‌های جغرافیایی $32^{\circ} 39' 10''$ و $32^{\circ} 39' 18''$ شمالی در 45 کیلومتری شمال باختری شهرکرد و در چهارگوش نقشه زمین‌شناسی 1:250000 شهرکرد جای دارد (شکل 2).

از دیدگاه ساختاری، این منطقه در بخش میانی کمربند سنندج-سیرجان جای دارد. پهنه سنندج-سیرجان با مجموعه‌هایی از رخدادهای



شکل 2- نقشه زمین شناسی منطقه آزادگان برگرفته از Zahedi و Iikhchi (1994)

سنگی منطقه را به دنبال داشته‌اند.

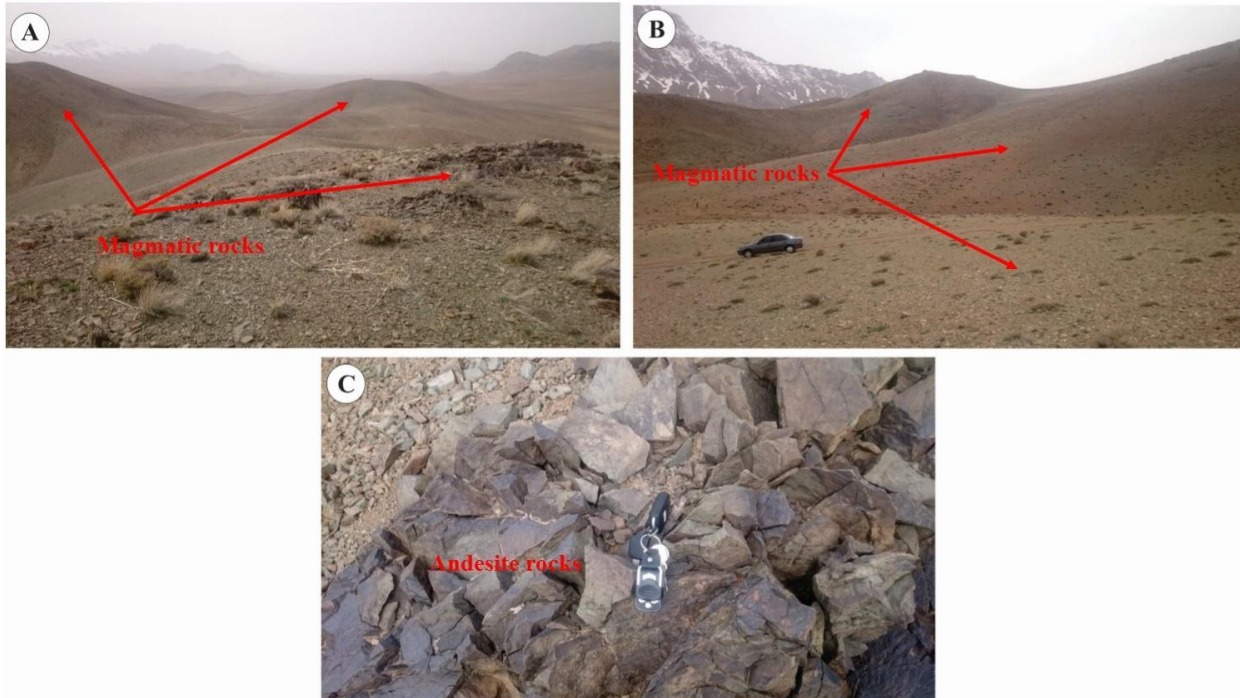
روش انجام پژوهش

پس از شناسایی و بررسی‌های زمین شناسی صحرائی منطقه، شمار 35 نمونه برداشت شد. از نمونه‌های سالم و هوانزده در دانشگاه اصفهان مقطع نازک تهیه شد. مقطع‌ها با میکروسکوپ الیمپوس دانشگاه پیام نور مرکز شهرکرد بررسی سنگ‌نگاری شدند. از میان نمونه‌های بررسی شده 10 نمونه برای آنالیز شیمیایی با دستگاه ICP-OES و ICP-MS برای تعیین عنصرهای اصلی، فرعی و خاکی کمیاب به شرکت زرازمای تهران فرستاده شدند. داده‌های به دست آمده از تجزیه شیمیایی با نرم افزارهای GCDKit و اکسل

واحدهای آذرین به صورت آندزیت، آندزیت بازالتی و بازالت با وسعت بسیار و دیوریت و گابرو با وسعت کم در منطقه رخنمون دارند (شکل‌های A-3، B-3 و C-3). در برخی بخش‌ها، در اطراف توده‌های آندزیتی، سنگ‌های آذرآواری با ترکیب توف‌های آندزیتی به رنگ سبز روشن با لایه‌بندی ظریف ریزدانه دیده می‌شوند. دگرسانی در این نمونه‌ها به صورت اپیدوتی دیده می‌شود. در برخی بخش‌ها، درون واحدهای آذرین، رگه‌های تاخیری کلسیتی و سیلیسی دیده می‌شود. منطقه بررسی شده در 25 کیلومتری گسل اصلی زاگرس جای دارد؛ اما گسل‌های موازی و متقاطع با زاگرس در منطقه یافت می‌شوند که با عملکردشان جایجایی و پیدایش درزه و شکاف در واحدهای

به تجزیه، تحلیل و تفسیر سنگ‌های آذرین منطقه پرداخته شده است.

پردازش شدند و در پایان با در کنار هم گذاشتن داده‌های صحرایی، آزمایشگاهی و تجزیه شیمیایی،



شکل 3- (A) رخنمون گسترده سنگ‌های ماگمایی در ارتفاعات آزادگان (دید رو به جنوب‌باختری)؛ (B) رخنمون سنگ‌های ماگمایی (دید رو به شمال‌باختری)؛ (C) رخنمون سنگ‌های آندزیت در منطقه آزادگان

سنگ‌نگاری

داده‌های صحرایی و سنگ‌نگاری نشان‌دهنده حضور سنگ‌های آذرین با بازه ترکیبی آندزیت، آندزیت‌بازالتی و بازالت، گابرو و دیوریت در منطقه بررسی شده هستند که با رخنمونی برجسته در ارتفاعات آزادگان دیده می‌شوند. ترکیب کانی‌شناسی این سنگ‌ها پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول و الیوین با بافت پورفیری تا گرانولار دانه ریز تا دانه درشت است.

آندزیت‌ها و آندزیت‌بازالت‌ها: بیشتر آندزیت‌ها و آندزیت‌بازالت‌ها به رنگ سبز تا خاکستری روشن با بافت پورفیری تا گلوبروپورفیری با رخنمون برجسته دیده می‌شوند. کانی اصلی در این سنگ‌ها فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز همراه با کانی‌های مافیک

اولیه شامل فنوکریست‌های پیروکسن و آمفیبول است. کانی‌های ثانویه بیشتر شامل سریسیت، اپیدوت، کلسیت، کلریت و کوارتز هستند. کانی‌های کدر بیشتر شامل مگنتیت و ایلمنیت هستند. در برخی نمونه‌ها، دگرسانی سریسیتی و آرژیلیک و اورالیتی دیده می‌شود (شکل‌های A-4 و B-4).

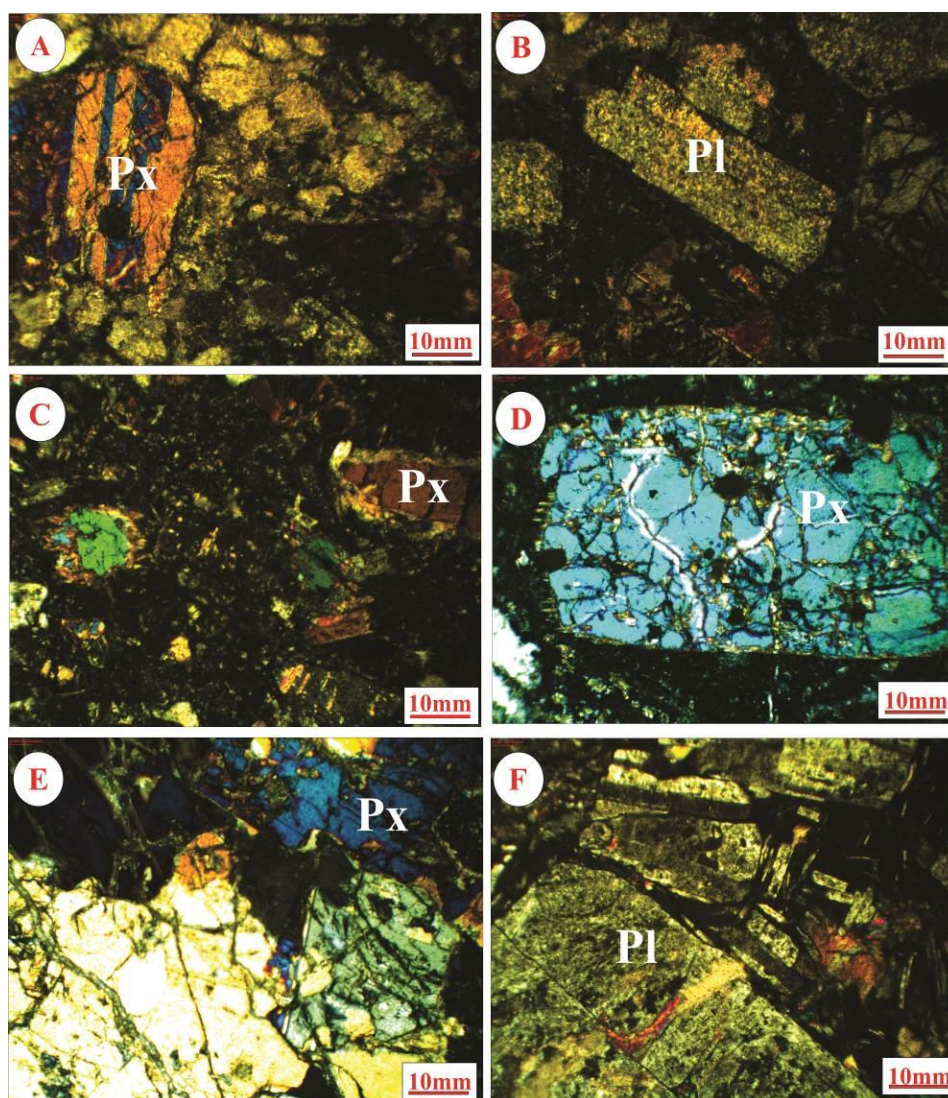
بازالت‌ها: با رنگ خاکستری تیره تا سیاه در منطقه رخنمون دارند. در نمونه دستی بازالت‌ها، فنوکریست‌های پیروکسن به خوبی دیده می‌شوند. فنوکریست‌های شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیوین از اصلی‌ترین کانی‌های این سنگ‌ها به‌شمار می‌روند. الیوین‌ها گاه با حاشیه اکسیدی دیده می‌شوند. کانه‌های کدر، اورالیتی‌شدن، سوسوریتی‌شدن، اپیدوتی‌شدن در

کلسیت، کلریت، اپیدوت، اورالیت، آلبیت دیده می‌شوند (شکل 4-E).

دیوریت‌ها: گاه با رخنمون‌های کوچک با رنگ خاکستری و مجموعه کانی‌های اصلی پلاژیوکلازها شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، پیروکسن و آمفیبول، با بافت گرانولار دانه درشت تا دانه متوسط دیده می‌شوند. دگرسانی‌های سوسوریتی، کلریتی و اورالیتی شدن نیز در این نمونه‌ها دیده می‌شوند (شکل 4-F).

این نمونه‌ها به فراوانی دیده می‌شود (شکل‌های 4-C و 4-D).

گابرو: بیشتر با رخنمون کوچک با رنگ خاکستری تیره تا سیاه و ظاهری متراکم است. کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلاز، الیوین و پیروکسن با بافت گرانولار دانه درشت تا دانه متوسط است. در برخی بخش‌ها ایدنگزیتی شدن الیوین‌ها، اورالیتی شدن پیروکسن‌ها و سوسوریتی شدن پلاژیوکلازها دیده می‌شود. در این سنگ‌ها، کانی‌های کدر همراه با مجموعه کانی‌های ثانویه



شکل 4- تصویرهای میکروسکوپی (در XPL) از سنگ‌های مجموعه آذرین آزادگان. A، B) تصویرهایی از فنوکریست‌های پیروکسن و الیوین در نمونه بازالت؛ C، D) کانی‌های پیروکسن و پلاژیوکلاز در نمونه آندزیت با بافت پورفیری؛ E) کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول و پیروکسن در نمونه دیوریت با بافت گرانولار؛ F) کانی‌های الیوین و پیروکسن در نمونه گابرو با بافت گرانولار (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از (Whitney and Evans (2010)

زمین‌شیمی سنگ کل

داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی 10 نمونه آذرین آزادگان در جدول 1 آورده شده‌اند. در این نمونه‌ها مقدار SiO_2 برابر با 41-53 درصدوزنی، Al_2O_3 برابر با 14-17 درصدوزنی، CaO برابر با 6-17 درصدوزنی، Fe_2O_3 برابر با 5-9 درصدوزنی، K_2O برابر با 3/6-0/62 درصدوزنی و MgO برابر با 4-9 درصدوزنی است. کاربرد نمودار رده‌بندی TAS (Le Maitre et al., 1989) سرشت بازالتی و بازالت‌آندزیتی نمونه‌ها را نشان می‌دهد

(شکل 5- A). در نمودار سه‌تایی Hf/3-Th-Nb/16 (Wood, 1980) نیز نمونه‌ها در محدوده بازالت‌های کالک‌آلکانل جای می‌گیرند (شکل 5- B). همچنین، در نمودار Nb/Y در برابر Zr/TiO₂ در محدوده بازالت‌های ساب‌آلکانل جای می‌گیرند (شکل 5- C). با توجه به دگرسانی بالای نمونه‌ها، نمودارهای Yb در برابر La و Th (Ross and Bédard, 2009) به کار برده شدند. در این نمودارها، نمونه‌ها در محدوده کالک‌آلکانل جای می‌گیرند (شکل‌های A-6 و B-6).

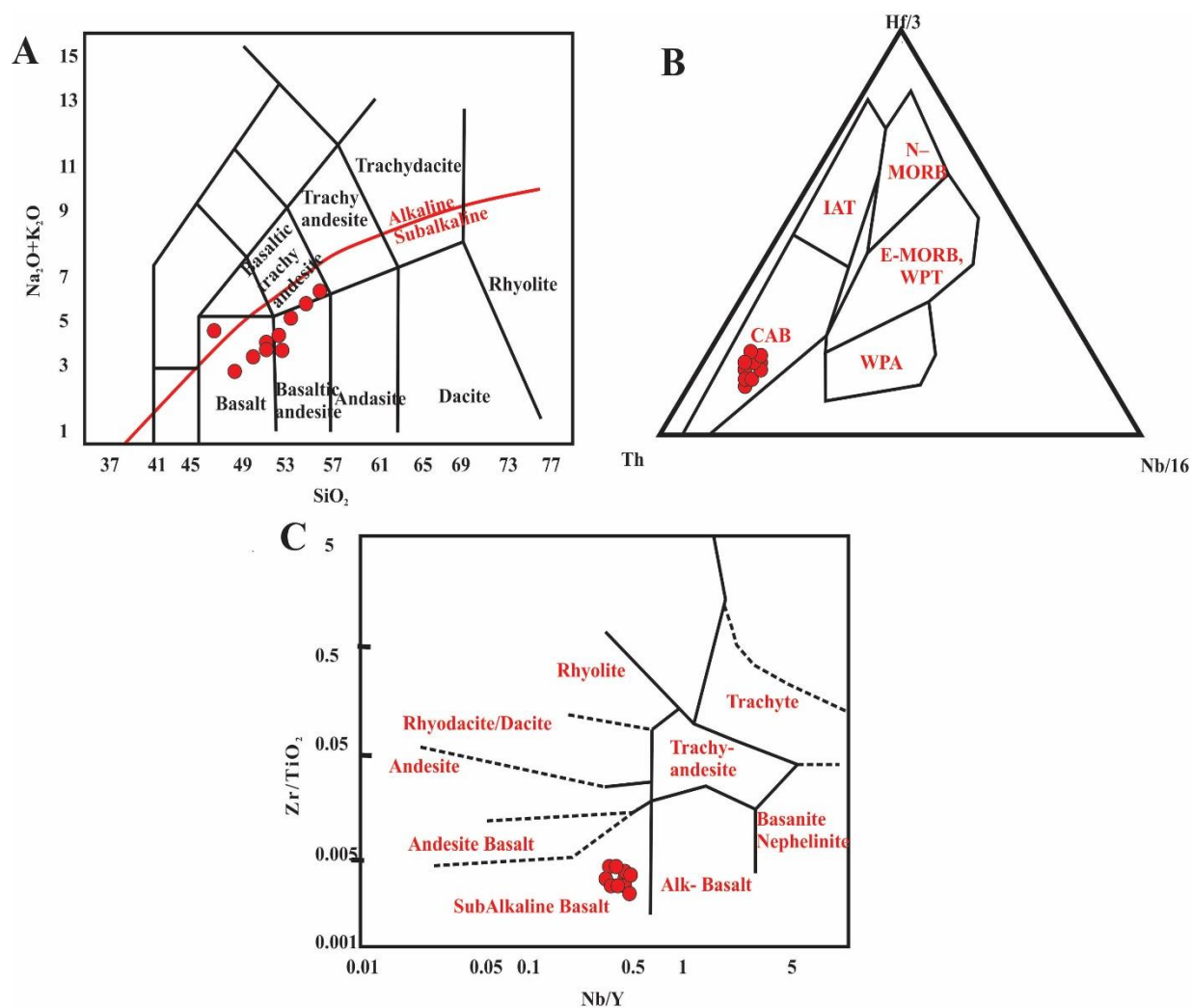
جدول 1- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی سنگ‌های ماگمایی آزادگان (اکسید عنصرها برپایه درصدوزنی و عنصرها برپایه ppm)

Sample No.	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample8	Sample12	Sample15	Sample16	Sample17
SiO ₂	41.65	47.06	48.8	50.35	53.69	51.8	44.36	47.93	49.58	52.75
TiO ₂	0.6	0.66	0.77	0.82	0.72	0.75	0.63	0.715	0.795	0.735
Al ₂ O ₃	14.49	16.06	16.63	17.3	16.62	17.09	15.28	16.35	16.97	16.86
Fe ₂ O ₃ *	5.46	7.79	9.16	8.7	6.55	7.51	6.63	8.48	8.93	7.03
MnO	0.19	0.17	0.18	0.12	0.13	0.12	0.18	0.18	0.15	0.13
MgO	4.53	7.29	9.83	7.14	6.96	7.42	5.91	8.56	8.49	7.19
CaO	17.51	11.49	6.02	7.68	4.95	6.88	14.5	8.76	6.85	5.92
Na ₂ O	2.26	2.1	3.21	1.35	2.41	3.54	2.18	2.66	2.28	2.98
K ₂ O	1.61	1.16	0.62	2.41	3.6	1.34	1.39	0.89	1.52	2.47
P ₂ O ₅	0.19	0.16	0.2	0.24	0.21	0.18	0.175	0.18	0.22	0.195
Total	88.49	93.94	95.42	96.11	95.84	96.63	91.22	94.68	95.77	96.24
LOI	11.51	6.06	4.58	3.89	4.16	3.37	8.785	5.32	4.235	3.765
Ba	204	160	94	532	294	205	182	127	313	249.5
Rb	51	31	19	63	99	37	41	25	41	68
Sr	184.6	204.6	349	531.5	203.9	328.6	194.6	276.8	440.25	266.25
Zr	22	17	27	36	24	25	19.5	22	31.5	24.5
Nb	6.1	6.4	7.2	6.3	5.1	5.6	6.25	6.8	6.75	5.35
Ni	46	115	139	82	29	47	80.5	127	110.5	38
Co	15.2	28.1	46.6	22	19.9	18.9	21.65	37.35	34.3	19.4
Zn	42	55	86	60	53	54	48.5	70.5	73	53.5
Cr	125	178	106	135	49	99	151.5	142	120.5	74
La	10	10	12	15	12	12	10	11	13.5	12
Ce	14	16	21	27	24	22	15	18.5	24	23
Pr	3.2	3.55	4.43	4.71	4.05	4.28	3.38	3.99	4.57	4.17
Nd	13.6	15.2	19.1	21	17.7	18.1	14.4	17.15	20.05	17.9
Sm	2.75	3.09	3.95	4.59	3.43	3.56	2.92	3.52	4.27	3.50
Eu	0.99	1.07	1.01	2.05	0.94	1.48	1.03	1.04	1.53	1.21
Gd	3.28	3.43	4.23	4.3	3.67	4.14	3.355	3.83	4.265	3.91
Tb	0.48	0.5	0.61	0.62	0.53	0.59	0.49	0.56	0.62	0.56
Dy	3.28	3.37	3.9	4.15	3.49	3.81	3.325	3.64	4.03	3.65
Er	1.82	1.97	2.42	2.64	2.01	2.32	1.90	2.20	2.53	2.17
Tm	0.26	0.26	0.34	0.36	0.28	0.35	0.26	0.3	0.35	0.32
Yb	1.8	1.8	2	2.2	1.8	2	1.8	1.9	2.1	1.9
Lu	0.29	0.25	0.33	0.36	0.26	0.34	0.27	0.29	0.35	0.30
Y	14.20	13.70	16.70	18.10	14.90	16.80	13.95	15.20	17.40	15.85
Cs	1.1	0.7	0.6	1	2.3	0.7	0.9	0.65	0.8	1.5

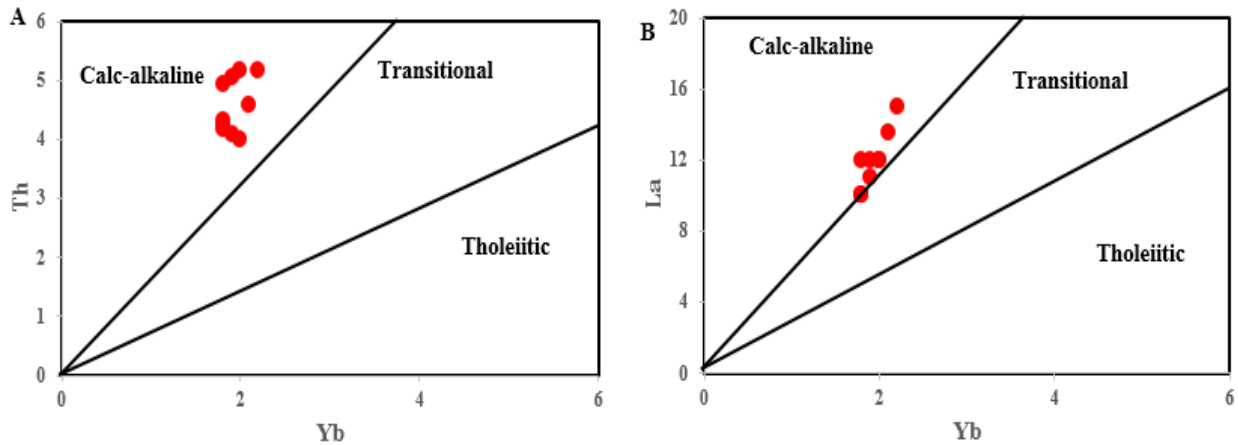
Fe₂O₃*: Fe₂O₃ as a total iron; LOI: Loss On Ignition

جدول 1- ادامه

Sample No.	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample8	Sample12	Sample15	Sample16	Sample17
Ta	0.62	0.68	0.68	0.62	0.57	0.61	0.65	0.68	0.65	0.59
Hf	1.81	1.5	1.81	1.99	1.55	1.7	1.66	1.66	1.9	1.63
Sc	28.7	31.7	39.4	33.1	22.2	28.2	30.2	35.55	36.25	25.2
Be	0.6	0.5	0.5	0.7	0.5	0.6	0.55	0.5	0.6	0.55
Sn	0.7	0.7	0.6	0.8	0.5	0.8	0.7	0.65	0.7	0.65
Th	4.31	4.17	4.01	5.16	4.95	5.16	4.24	4.09	4.59	5.06
U	2.3	1.3	0.8	1.6	1.2	1.04	1.8	1.05	1.2	1.12
V	257	226	272	253	217	213	241.5	249	262.5	215
W	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Pb	<1	<1	4	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Mo	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cu	71	55	26	55	30	56	63	40.5	40.5	43
As	15.7	15.7	9.6	7	6.7	3.9	15.7	12.65	8.3	5.3
Sb	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Ag	<0.1	0.1	0.2	0.2	<0.1	<0.1	<0.5	0.15	0.2	<0.1



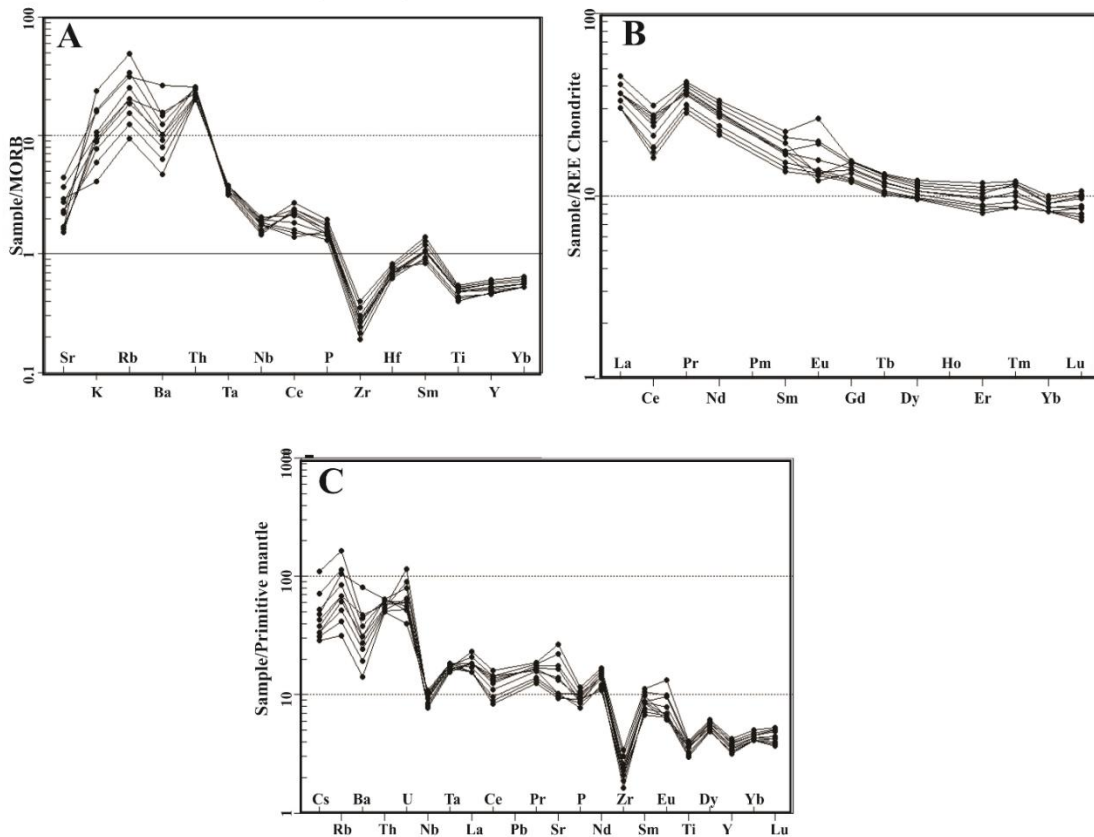
شکل 5- نمونه‌های آذرین آزادگان در: (A) نمودار SiO_2 در برابر $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (Le Maitre *et al.*, 1989)؛ (B) نمودار سه‌تایی Th-Hf-Nb (Wood, 1980)؛ (C) نمودار Nb/Y در برابر Zr/TiO_2 (Pearce, 1983) (N-MORB = normal MORB; E-MORB = enriched MORB; WPT = within-plate tholeiites; WPA = within-plate alkali basalts)



شکل 6- نمونه‌های آذرین آزادگان در: (A) نمودار Yb در برابر Th؛ (B) نمودار Yb در برابر La (Ross and Bédard, 2009)

مقایسه با HREE همراه با آنومالی منفی در Ce و Eu (مگر 3 نمونه) دیده می‌شود (شکل 7-B). در الگوی بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه تهی شدگی از Ba، Ti، Nb و Zr دیده می‌شود (شکل 7-C).

در الگوی بهنجار شده به ترکیب MORB، نمونه‌ها تهی شدگی از Zr و Ba و غنی شدگی از Th، Rb و Sm نشان می‌دهند (شکل 7-A). همچنین، در الگوی REE بهنجار شده به ترکیب کندریت نیز غنی شدگی LREE در



شکل 7- الگوی بهنجار شده نمونه‌های آذرین آزادگان به: (A) ترکیب مورب (Pearce, 1983)؛ (B) ترکیب کندریت (Nakamura, 1974)؛ (C) ترکیب گوشته (McDonough and Sun, 1995)

بحث

خاستگاه و اثر پهنه فرورانش

بر پایه رسم داده‌های زمین شیمیایی، مجموعه ماگمایی آزادگان شامل آندزیت، آندزیت بازالتی، بازالت، دیوریت و گابرو با سرشت کالک‌آلکال هستند که در موقعیت کمان پدید آمده‌اند. بالا بودن نسبت LREE/HREE چه بسا به دخالت گوشته غنی شده در پی فرورانش یا آلودگی پوسته‌ای مرتبط است (Thompson *et al.*, 1986). آنومالی منفی Eu بیشتر با فلدسپار کنترل می‌شود. این بی‌هنجاری منفی می‌تواند پیامد دگرسانی و آلیتی شدن پلاژیوکلازها باشد؛ زیرا یوروپیم به جانشین شدن در پلاژیوکلازها گرایش بالایی دارد. از سوی دیگر، بی‌هنجاری منفی می‌تواند نشانه جدایش پلاژیوکلاز در فشارهای کم باشد (Jung and Hoernes, 2000). همچنین، آنومالی منفی Eu می‌تواند نشانه‌ای از شرایط احیایی در ماگما باشد (Jazi *et al.*, 2013). آنومالی منفی Ti و Nb در الگوی بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه نشان‌دهنده ماگماهای مرتبط با فرورانش است (Pearce, 1983; Wilson, 1989). همچنین، تهی‌شدگی Ti و Nb به جدایش کانی‌های تیتانیوم‌دار نیز (مانند: اسفن، ایلمنیت و روتیل) مرتبط است (Pearce and Gale, 1977). افزون بر این، آمفیبول از کانی‌های مهمی است که در گوشته می‌تواند میزبان Nb باشد و آنومالی این عنصر را کنترل کند (Lonov and Hafmann, 1995). از سوی دیگر، آنومالی منفی Nb شاخص سنگ‌های قاره‌ای و شاخص حضور پوسته در فرایندهای ماگمایی دانسته می‌شود (Lan *et al.*, 1996). برای بررسی سرشت ماگمای مجموعه سنگ‌های آذرین آزادگان، کاربرد نمودار SiO_2 در برابر Nb گویای حضور ماگمای آتشفشانی کمانی است (شکل 8-A). همچنین، میزان دخالت گوشته، تخته فرورونده و متاسوماتیسم در تکامل ماگمای اولیه با به‌کارگیری نمودارهای Nb/Y

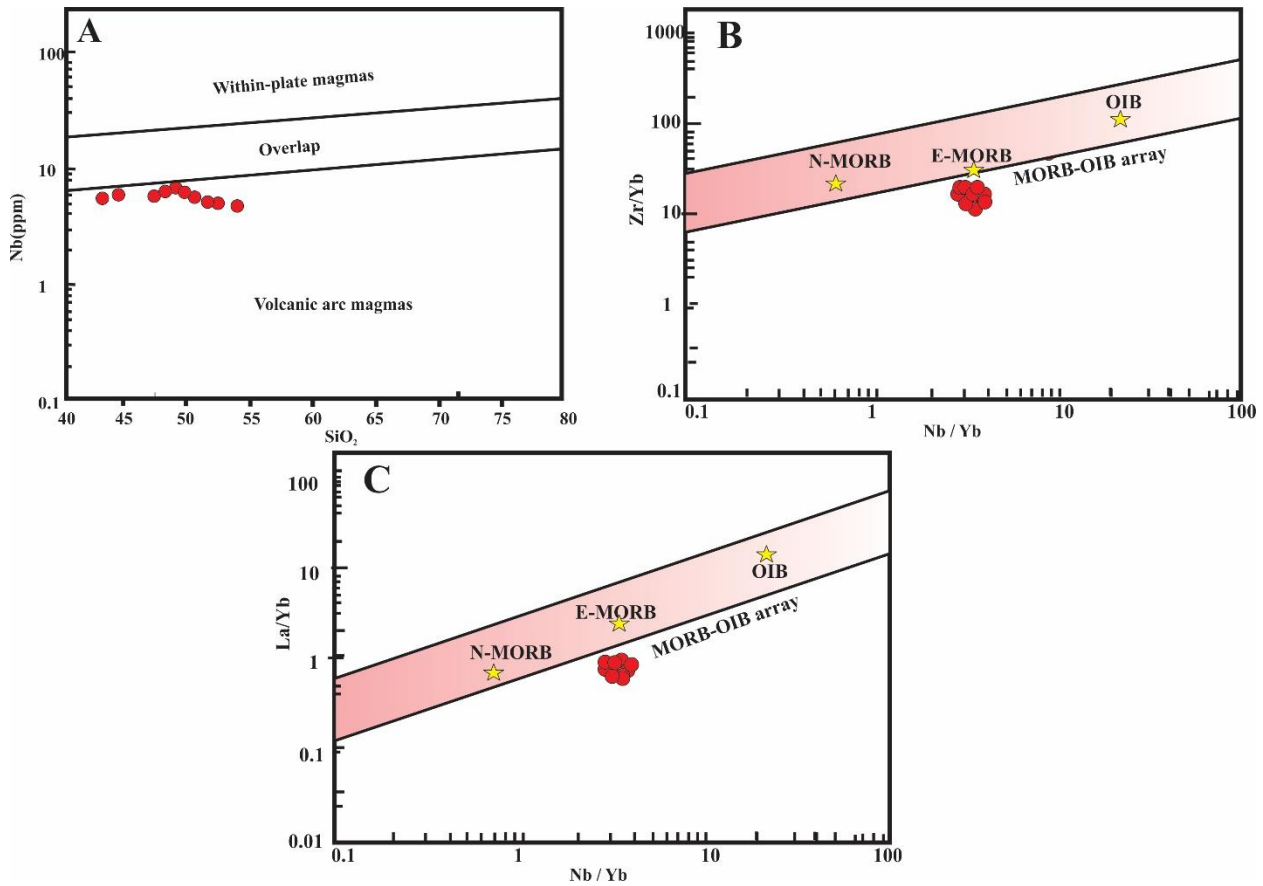
در برابر Zr/Yb و La/Yb تعیین شد. نمونه‌های آذرین آزادگان در این نمودارها در زیر محدوده E-MORB و آرایه MORB-OIB جای می‌گیرند (شکل‌های 8-B و 8-C).

عنصر Th نشان‌دهنده عملکرد رسوب‌ها در هنگام ماگماتیسم است. رسم داده‌ها در نمودارهای Th در برابر U/Th و Sr/Nd در برابر Th/Yb دخالت رسوب‌ها در پیدایش ماگما اولیه را نشان می‌دهد (شکل‌های 9-A و 9-B). در مقایسه با ترکیب کمان‌های امروزی (Hawkins and Ishizuka, 2009)، نسبت Th/Yb (= 2) تا 2/75 در نمونه‌های ماگمایی آزادگان نشان می‌دهد نمونه‌ها همانند جزیره‌های کمانی بالغ هستند.

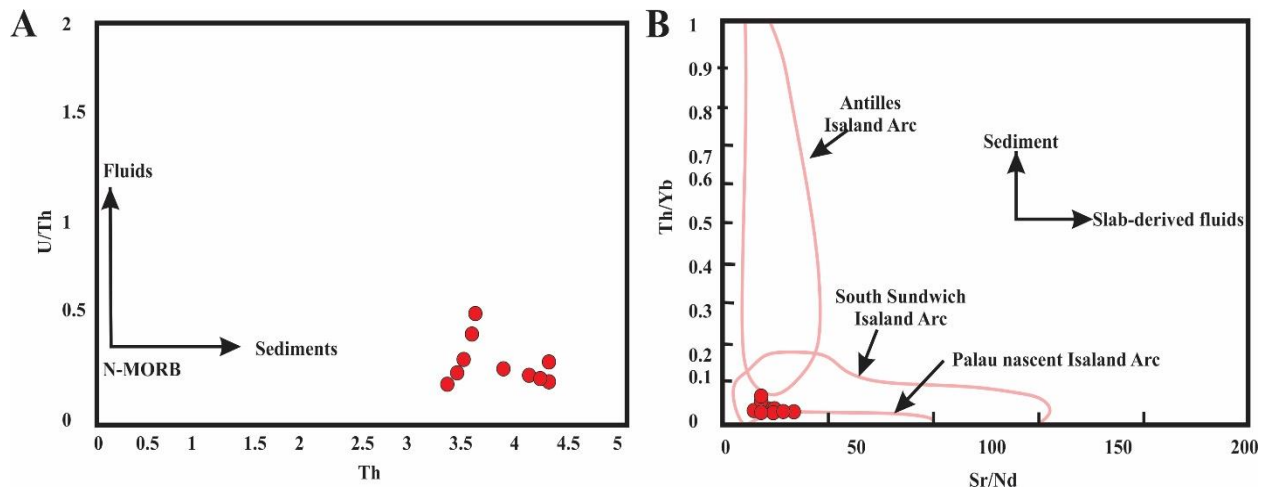
تعیین محیط ژئودینامیک

زمین‌شیمی ماگمای پدیدآمده در پهنه‌های فرورانش با توزیع ترکیب‌های منبع در دسترس، مانند سیال‌ها و مذاب‌های تخته³، ترکیب شیمیایی پوسته کمان و فرایندهای پوسته‌ای مانند جدایش بلورین، آلیش پوسته‌ای و آمیختگی ماگمای کنترل می‌شود (Wehrmann *et al.*, 2014; Straub *et al.*, 2015). توجه به تمرکز بالای LREE گمان می‌رود دخالت سیال‌های لبه گوشته و قطعه جدا شده در گوشته (Slab) در زایش ماگمای اولیه آزادگان روی داده است. غنی‌شدگی Th در جزیره‌های کمانی پیامد انحلال بالای این عنصرها در سیال‌های جدا شده از قطعه جدا شده در گوشته متاسوماتیسم شده دانسته می‌شود (Bailey and Ragnarsdottir, 1994). همچنین، جای‌گرفتن نمونه‌های آزادگان در محدوده آرایه MORB-OIB با کمی گرایش به لبه پایینی E-MORB می‌تواند به دخالت رسوبات مرتبط باشد. از این رو، با توجه به آنچه گفته شد، ماگمای اولیه مجموعه آذرین آزادگان از خاستگاه گوشته‌ای متاسوماتیسم شده با سیال‌های جدا شده از تخته

فرورونده پدید آمده است.



شکل 8- جایگاه نمونه‌های آذرین آزادگان در: A: نمودار SiO_2 (برپایه درصدوزنی) در برابر Nb (Pearce and Gale, 1977); B: نمودار Nb/Yb در برابر Zr/Yb (Green, 2006); C: نمودار Nb/Yb در برابر La/Yb (Green, 2006)



شکل 9- نمونه‌های آذرین آزادگان در: A: نمودار Th (برپایه ppm) در برابر U/Th (Hawkins and Ishizuka, 2009); B: نمودار Sr/Nd در برابر Th/Yb (Hawkins and Ishizuka, 2009)

آندزیتی اولیه پدید می‌آورد (Grove *et al.*, 2012)

با توجه به اینکه ذوب گوشته آبدار مذاب بازالتی-

نسبت در سنگ‌های آزادگان برابر با 0/99 تا 1/61 است. این مقدار ضخیم‌شدگی جزیره‌های کمانی همراه با فرایندهای کوهزایی را نشان می‌دهد و گویای بلوغ جزیره‌های کمانی در منطقه آزادگان است. مقدار نسبت Ce/Y تا 50 کیلومتر ضخامت پوسته در هنگام فرایندهای کوهزایی را نشان می‌دهد. نسبت مقدار Sm/Y نمونه‌های آذرین آزادگان از 13-29 است که با ضخامت 40 تا 50 کیلومتر پوسته کمان همخوانی دارد (Chapman *et al.*, 2015). بررسی‌های گسترده‌ای روی جزیره‌های کمانی نشان می‌دهد ماگما پدیدآمده از تخته فرورونده شباهت بسیاری به منبع N-MORB دارد که شاید به اندازه چشمگیری تحت تأثیر تهی‌شدگی یا غنی‌شدگی عنصرها قرار گرفته باشد (Pearce and Peate., 1995; Woodhead *et al.*, 2005; Leat *et al.*, 2003; Plank, 2005). به باور Pearce و همکاران (1995)، بازه گسترده ترکیبات جزیره‌های کمانی به ترکیب شیمیایی گوشته بستگی دارد؛ به گونه‌ای که گوشته تهی‌شده منجر به پیدایش ماگمای توله‌ایتی و ماگمای حاصل از ذوب گوشته N-MORB منجر به پیدایش ماگمای کالک‌آلکان می‌شود. بر پایه داده‌های زمین‌شیمیایی نمونه‌های آزادگان، ماگمای اولیه از گوشته‌ای تهی‌شده با کمی غنی‌شدگی در پی متاسوماتیسم پدید آمده است. نسبت‌های Ce/Y و Sr/Y و غنی‌شدگی از LREE، Ce و Sm حضور ماگمایی با خاستگاه گوشته‌ای غنی شده با سیال‌ها و رسوبات تخته فرورونده را نشان می‌دهند. این ماگما در ژرفای 40 تا 50 کیلومتری پوسته پدید آمده و سپس به سوی بالا حرکت کرده است. از آنجایی که سرشت و مقدار ترکیبات فرورونده شده با مراحل بلوغ همخوانی دارد وضعیت زمین‌شیمی سنگ‌ها ماگمای آزادگان نشان‌دهنده مقدار بالای فرورانش و دخالت غالب رسوبات ذوب‌شده است.

برداشت

پیشنهاد می‌شود ماگمای مادر سنگ‌های آزادگان در پی درجات پایین ذوب‌بخشی آبدار پریدوتیت گوشته متاسوماتیسم شده پدید آمده است. بر پایه مدل پیشنهادی Putirka (2008) در باره ماگمای آبدار-کالک‌آلکان، فرض می‌شود ماگمای مادر ماگمایی آبدار تا 3 درصد آب بوده است که از ذوب‌بخشی درجات پایین گوشته پریدوتیتی آبدار متاسوماتیسم شده پدید آمده است (Tatsumi and Suzuki, 2009; Grove *et al.*, 2012). بر پایه الگوهای پیشنهادی Putirka (2008) و داده‌های pMELTS database، میزان فشار هنگام پیدایش پیروکسن‌ها نزدیک به 0/5 گیگاپاسکال و در محدوده پایداری پلاژیوکلازها، اکسیدهای آهن و تیتانیوم (فوکاسیته اکسین بالا) بوده است (Smith and Asimow, 2005). این شرایط تبلور مجموعه توالی سری کالک‌آلکان را به دنبال دارد. گفتنی است برای پیدایش پیروکسن و پلاژیوکلاز مقدار 1 درصد H_2O در مذاب اولیه کافی و مناسب است. در این الگو، نخست الیوین در دمای 1280 درجه سانتیگراد پدیدار شده، سپس در دمای 1160 درجه سانتیگراد پیروکسن‌ها و به دنبال آن پلاژیوکلازها و مگنتیت پدیدار می‌شوند. در این میان، الگوی غنی‌شدگی از LREE و کمی جدایش یافته HREE به همراه سرشت کالک‌آلکان ماگما با آندزیت‌های جدایش یافته قابل مقایسه است. از آنجایی که مقادیر و سرشت ترکیبات فرورونده شده، از مرحله اولیه تا مرحله بلوغ متنوع است، نشانه‌های فرورانش در مجموعه آذرین آزادگان کمابیش فراوان است و بیشتر آنها تحت تأثیر ذوب رسوبات قرار گرفته‌اند. مقدار نسبت Th/Yb (2-2/75) در واحدهای آذرین آزادگان همانند مجموعه آذرین کمان بالغ (مانند سنگ‌های ماگمایی جزیره‌های کمانی جنوب ساندویچ؛ Hawkins and Ishizuka, 2009) است. نسبت بیشینه Ce/Y برای برآورد ضخامت پوسته‌ای (ژرفای موهو) به کار برده می‌شود که در آن ذوب سنگ خاستگاه روی داده باشد (Mantle and Collins, 2008). مقدار این

پوسته ضخیم کمان پدید آمده است. به‌دنبال تزریق ماگما درون پوسته، تحولات بعدی مانند ذوب پوسته بالایی تغییر زمین‌شیمیایی ماگما را به‌دنبال داشته است.

سپاس‌گزاری

این مقاله با پشتیبانی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه پیام‌نور ایران انجام شده است؛ از این‌رو، از معاونت گرامی سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین، نگارندگان برای پیشنهادهای ارزنده سردبیر و داوران گرامی مجله پترولوژی در بهبود ساختار علمی مقاله بسیار سپاس‌گزارند.

سنگ‌های آذرین آزادگان درون سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگی و شیلی ژوراسیک تا کرتاسه حضور دارند. ترکیب کانی‌شناسی ساده الیوین، پیروکسن، پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها بازه ترکیبی از بازالت تا آندزیت و گابرو تا دیوریت را پدید آورده است. ویژگی‌های زمین‌شیمیایی این نمونه‌ها پیدایش مجموعه یادشده با سرشت کالک‌آلکالن در جایگاه کمان قاره‌ای را نشان می‌دهد. ماگمای مادر سنگ‌های آزادگان از گوشته‌ای متاسوماتیسم‌شده با سیال‌ها و رسوبات قطعه‌فرورانده‌شده پدید آمده است. خاستگاه این ماگما ژرفای 40 تا 50 کیلومتری پوسته کمان است و از ذوب‌بخشی هنگام مراحل پایانی فرورانش و در جایگاه زمین‌ساختی با

منابع

- Aghanabati, A. (2004) The Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Ahankoub, M., Asahar, Y. and Tsuboic, M. (2020) Petrology and geochemistry of the Lattan Mountain magmatic rocks in Sanandaj-Sirjan Zone, west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 13: 809.
- Annen, C., Blundy, J. D. and Sparks, R. S. J. (2006) The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *Journal of Petrology* 47(3): 505–539.
- Arculus, R. J. (1994) Aspects of magma genesis in arcs. *Lithos* 33(1-3): 189–208.
- Bahrami Taghanaki, Z. (2021) Geochemical investigations of Sandstones from Horeh, North east of Chaharmahal and Bakhtiari Province. M. Sc. thesis, Shahrekord University, Iran (in Persian).
- Bailey, E. H. and Ragnarsdottir, K. V. (1994) Uranium and thorium solubilities in subduction zone fluids. *Earth and Planetary Science Letters* 124: 119–129.
- Bailey, J. C. (1981) Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites. *Journal of Chemistry of Geology* 32: 139–154.
- Chapman, J. B., Ducea, M. N., DeCelles, P. G. and Profeta, L. (2015) Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera. *Geology* 43: 919–922.
- Condie, K. C. (1989) Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos* 23(1-2): 1-18.
- Davoudian, A. R., Genser, J., Neubauer, F. and Shabanian, N. (2016) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages of eclogites from North Shahrekord in the Sanandaj–Sirjan Zone, Iran: Implications for the tectonic evolution of Zagros orogen. *Gondwana Research* 37: 216-240.
- Davoudian, A., Genser, J., Dachs, E. and Shabanian, N. (2008) Petrology of eclogites from north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Mineralogy and Petrology* 92: 393-413.
- Delavault, H., Dhuime, B., Hawkesworth, C. J. Cawood, P. A. and Marschall, H. (2016) Tectonic settings of continental crust formation: insights from Pb isotopes in feldspar inclusions in zircon. *Geology* 44: 819–822.

- Eliasi, Z., Emami, N. and Vahabi, M. B. (2011) Mineralogy and determination of tectonomagmatic setting of subplutonic rocks in north of Shahrekord by using clinopyroxene mineral chemistry. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 19(2): 207-218
- Emami, N., Khalili, M. and Noghreyan, M. (2009) Determination of tectonomagmatic environment of volcanic and subvolcanic rocks in north of Shahrekord by amphiboles geothermobarometry. *Iranian Society Crystallography and Mineralogy* 17: 267-278.
- Gill, J. B. (1981) *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer, Berlin, Germany.
- Green, N. L. (2006) Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints on from the Garibaldi volcanic belt, northern Cascadia subduction system. *Lithos* 87: 23-49.
- Grove, T. L., Till, C. B. and Krawczynski, M. J. (2012) The role of H₂O in subduction zone magmatism. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 40: 413-439.
- Hawkins, J. W. and Ishizuka, O. (2009) Petrologic evolution of Palau, a nascent island arc. *Island Arc* 18: 599-641.
- Heydari Chaloshitori, A. (2014) mineralogy and geochemistry of paragneiss of the north Lake Zayanderod (Sanandaj-Sirjan Zone). M. Sc. thesis, Shahrekord University, Iran (in Persian).
- Jagoutz, O. and Kelemen, P. B. (2015). Role of arc processes in the formation of continental crust. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 43: 363-404.
- Jazi, M. A., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A. (2013) Overview of the geochemistry and Rb/Sr, Sm/Nd isotopes of middle Jurassic and Tertiary granitoid intrusions: a new insight on tectono-magmatism and mineralization of this period in Iran. *Journal Economic Geology* 4: 171-198 (in Persian).
- Jung, S. and Hoernes, S. (2000) The major and trace element and isotope geochemistry of Cenozoic alkaline rift-type volcanic rocks from the Rhona area: petrology, mantle source characteristics and implications for asthenosphere lithosphere interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 99: 27-53.
- Lan, C. Y., Jahn, B. M., Mertzman, S. A. and Wu, T. W. (1996) Subduction-related granitic rocks of Taiwan. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences* 14: 11-28.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Lebas, M. J. Sabine, P. A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A. R. and Zanettin, B. (1989) A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford, Blackwell.
- Leat, P. T., Smellie, J. L., Millar, I. L. and Larter, R. D. (2003) Magmatism in the South Sandwich arc. *Intra-Oceanic Subduction Systems: Tectonic and Magmatic Processes*. Geological Society of London, Special Publication 285-313.
- Lonov, D. A. and Hofmann, A. W. (1995) Nb-Ta-rich mantle amphiboles and micas: applications for subduction-related metasomatic trace element fractionations. *Earth and Planetary Science Letters* 131: 341-356.
- Mantle, G. W. and Collins, W. J. (2008) Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: correlation between arc basalt composition and Moho depth. *Geology* 36: 87-90.
- McDonough, W. F., and Sun, S. S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120: 223-253.
- Moradi, A. Davoudian, A. R. and Shabanian, N. (2018) granite gneiss north of Chahar mahal and Bakhtiyari province with La-ICP-MS. *Advanced Applied Geology* 28: 40-51 (in Persian).
- Nakamura, N. (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochim Acta* 38: 757- 775.

- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Continental basalts and mantle xenoliths (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230-249. Nantwich, Cheshire, Shiva Publications.
- Pearce, J. A. and Gale, G. P. (1977) Identification of ore deposition environment from trace elements geochemistry of associated igneous host rocks. Geological society of London, Special publication 7: 14-24.
- Pearce, J. A. and Peate, D. W. (1995) Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 23(1): 251-285.
- Pearce, J.A., Baker, P.E., Harvey, P. K., and Luff, I. W. (1995) Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich island arc. Journal of Petrology 36(4): 1073-1109
- Plank, T. (2005) Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of continents. Journal of Petrology 46: 921-944.
- Plank, T. and Langmuir, C. H. (1998) The geochemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and the mantle. Chemistry Geology 145: 325-394.
- Putirka, K. D. (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 69(1): 61-120.
- Riyahi Samani, F. (2015) petrology of folded metagranite rocks of the Abadchi, north Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone. M. Sc. thesis, Shahrekord University, Iran (in Persian).
- Ross, P. S. and Bédard, J. H. (2009) Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. Canadian Journal of Earth Sciences 46: 823-839.
- Safonova, I., Kotlyarov, A., Krivonogov, S. and Xiao, W. (2017) Intra-oceanic arcs of the Paleo-Asian Ocean. Gondwana Research 50: 167-194.
- Shabanian, N., Davoudian, A. R., Dong, Y. and Liu, X. (2018) U-Pb zircon dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic ratios from Azna-Dorud Cadomian metagranites, Sanandaj-Sirjan zone of western Iran. Precambrian Research 306: 41-60.
- Smith, P. M. and Asimow, P. D. (2005) Adiaabat_1ph: A new public front-end to the MELTS, pMELTS, and pHMELTS models. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 6, Q02004.
- Stern, R. J. (2010) The anatomy and ontogeny of modern intra-oceanic arc systems. Geological Society, London, Special Publications 338(1): 7-34.
- Straub, S. M., Woodhead, J. D. and Arculus, R. J. (2015) Temporal evolution of Mariana arc: Mantle wedge and subducted slab control revealed with a tephra perspective. Journal of Petrology 56(2): 409-439.
- Tatsumi, Y. and Suzuki, T. (2009) Tholeiitic vs calc-alkalic differentiation and evolution of arc crust: constraints from melting experiments on a basalt from the Izu-Bonin-Mariana Arc. Journal of Petrology 50(8): 1575-1603.
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Tani, K., Takahashi, N., Kodaira, S. and Kogiso, T. (2008) Structure and growth of the Izu-Bonin-Mariana arc crust: 2. Role of crust-mantle transformation and the transparent Moho in arc crust evolution. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 113(B2): B02203.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, UK.
- Thompson, R. N., Morrison, M. A., Dickin, A. P., Gibson, I. and Harmon, R. S. (1986). Two contrasting styles of interaction between basic magmas and continental crust in the British Tertiary Volcanic Province. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 91(B6): 5985-5997.

- Wehrmann, H., Hoernle, K., Garbe-Schönberg, D., Jacques, G., Mahlke, J. and Schumann, K. (2014) Insights from trace element geochemistry as to the roles of subduction zone geometry and subduction input on the chemistry of arc magmas. *International Journal of Earth Sciences* 103(7): 1929-1944.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185–187.
- Wilson, M. (1989) *Igneous petrogenesis*. Unwin and Hyman, London, UK.
- Wood, D. A. (1980). The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters* 50(1): 11-30.
- Woodhead, J. D. Eggins, S. M. and Johnson, R. W. (1998) Magma Genesis in the New Britain Island Arc: Further Insights into Melting and Mass Transfer Processes. *Journal of Petrology* 39(9): 1641–1668.
- Xia, L. and Li, X. (2019) Basalt Geochemistry as a diagnostic indicator of tectonic setting. *Gondwana Research* 65: 43–47.
- Zahedi, M. Rahmati-Ilkhchi, M. and Vaezipour, J. (1992) Geological map of the Shahrekord Quadrangle E8, 1:250000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.