

Petrography, Geochemistry and tectonomagmatic setting of Tertiary volcanic rocks in Ebrahim Abad area (southwest of Gazik, Southern Khorasan)

Neda Amirteymoori¹, Seyyed Saeid Mohammadi^{1*} and Malihe Nakhaei²

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

² Department of Mining Engineering, Faculty of Mining, Civil, Chemistry, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

Abstract

Volcanic rocks are observed in Ebrahim Abad area, southwest of Gazik and in southern Khorasan province that located in northern part of the Sistan suture zone. The studied lavas consist of basaltic andesite, andesite and dacite with Eocene to Miocene age accompanied by pyroclastic rocks such as tuff. The main minerals in the basaltic andesite include of plagioclase, pyroxene and olivine, in the andesite consists of plagioclase, hornblende and pyroxene and in the dacites composed of plagioclase, quartz and hornblende. Intermediate volcanic rocks have porphyritic with microlitic groundmass, megaporphyritic, glomeroporphyritic and poikilitic textures and common texture in dacite is porphyritic with microgranular groundmass. These rocks show disequilibrium evidences such as zoning in plagioclases, sieve texture and embayment in some minerals. Geochemical studies indicate that the lavas of Ebrahim Abad area belong to calc alkaline series. These rocks are enriched in LREE relative to HREE. The high value of LREE and large ion lithophile elements (LILE) relative to that of HFSE and negative Nb and Ti, anomaly represent a subduction tectonic environment and active continental margin. The original magma of these lavas probably derived from partial melting of spinel- garnet lherzolite mantle that enriched by subducted slab fluids.

Key words: basaltic andesite, enriched mantle, spinel-garnet lherzolite, Ebrahim Abad, Sistan suture zone

* ssmohammadi@birjand.ac.ir

سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و جایگاه تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی ترشیری منطقه ابراهیم‌آباد (جنوب‌باختر گزیک، خراسان جنوبی)

ندا امیر تیموری^۱، سید سعید محمدی^{۱*} و ملیحه نخعی^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، عمران، شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در منطقه ابراهیم‌آباد در جنوب‌باختری گزیک و در استان خراسان جنوبی، سنگ‌های آتشفشانی برونزد دارند که از دیدگاه ساختاری در بخش شمالی زمین‌درز سیستان جای گرفته‌اند. گدازه‌های بررسی‌شده شامل آندزیت‌بازالتی، آندزیت و داسیت به سن ائوسن تا میوسن، همراه با سنگ‌های آذرآواری (توف) هستند. پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیوین از کانی‌های اصلی آندزیت‌بازالتی، پلاژیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن از کانی‌های آندزیت و پلاژیوکلاز، کوارتز و هورنبلند کانی‌های سازنده داسیت‌ها هستند. بافت‌های رایج در سنگ‌های آتشفشانی حد واسط شامل پورفیری با زمینه میکرولیتی، مگاپورفیری، گلومروپورفیری و پویی‌کیلیتیک و در داسیت‌ها، پورفیری با زمینه ریزدانه است. در این سنگ‌ها نشانه‌های نبود تعادل (مانند: منطقه‌بندی در پلاژیوکلازها، بافت غربالی و خوردگی خلیجی در کانی‌ها) دیده می‌شوند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد در گستره کالک‌آلکان رده‌بندی می‌شوند. غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE در این سنگ‌ها دیده می‌شود. بالا بودن مقدار LREE و عنصرهای لیتوفیل بزرگ یون (LILE) نسبت به HFSE و وجود آنومالی منفی در عنصرهایی مانند Nb و Ti در گدازه‌ها نشان‌دهنده پهنه زمین‌ساختی فرورانشی و مرز فعال قاره‌ای هستند. ماگمای سازنده این گدازه‌ها چه‌بسا از ذوب‌بخشی گوشته‌ای با ترکیب اسپینل-گارنت لرزولیت خاستگاه گرفته است که با سیال‌های جداشده از پوسته اقیانوسی فرورونده دچار غنی‌شدگی شده است.

واژه‌های کلیدی: آندزیت‌بازالتی، گوشته غنی‌شده، اسپینل-گارنت لرزولیت، ابراهیم‌آباد، زمین‌درز سیستان

ایران سنگ‌های آتشفشانی (گدازه‌ها و آذرآواری) و نیمه‌ژرف فراوان است که برپایه رخنمون سطحی این سنگ‌ها، ناحیه‌ای نزدیک به ۱۲۰۰۰۰ کیلومترمربع را پوشش می‌دهند (Pang *et al.*, 2013).

برای بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی گدازه‌های خاور ایران، برونزدهای این سنگ‌ها در برخی بخش‌های خاور ایران، به‌ویژه در پهنه زمین‌درز سیستان بررسی شده‌اند (Pang *et al.*, 2012; Vahedi Tabas *et al.*, 2017; Malekian Dastjerdi *et al.*, 2016; Mohammadi *et al.*, 2017; Delavari *et al.*, 2017). در منطقه ابراهیم‌آباد در جنوب‌باختری گزیک، گدازه‌های ترشیری با ترکیب‌های سنگی مختلف رخنمون داشته و تا کنون از دیدگاه سنگ‌شناسی بررسی نشده‌اند.

در این پژوهش تلاش شده است با بهره‌گیری از داده‌های زمین‌شیمیایی، خاستگاه و محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد شناخته شود که این کار به تکمیل داده‌های به‌دست‌آمده از بررسی‌های پیشین و همچنین، شناخت سرشت و محیط زمین‌ساختی ماگماتیسم خاور ایران کمک خواهد کرد.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه ابراهیم‌آباد در جنوب‌باختری نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گزیک (Guillou *et al.*, 1981) جای دارد. واحدهای آتشفشانی منطقه بررسی شده شامل واحدهای گدازه‌ای و آذرآواری به سن ائوسن تا میوسن است (Guillou *et al.*, 1981). سنگ‌های گدازه‌ای دربردارنده آندزیت بازالتی، آندزیت و داسیت و نهشته‌های آذرآواری شامل توف هستند (شکل ۱). در بخش‌هایی از مرکز و شمال منطقه

میان طول‌های جغرافیایی خاوری ۲۸° ۰۱' ۶۰ و تا ۰۸' ۰۶' ۶۰ و عرض‌های جغرافیایی شمالی ۲۷' ۳۸' ۳۲ تا ۵۹' ۴۲' ۳۲ در استان خراسان جنوبی جای دارد. از دیدگاه پهنه‌بندی واحدهای ساختمانی ایران، این منطقه در بخش شمالی زمین‌درز سیستان جای دارد (Pang *et al.*, 2012; Sacconi *et al.*, 2010; Tirrul *et al.*, 1983; Camp and Griffis, 1982).

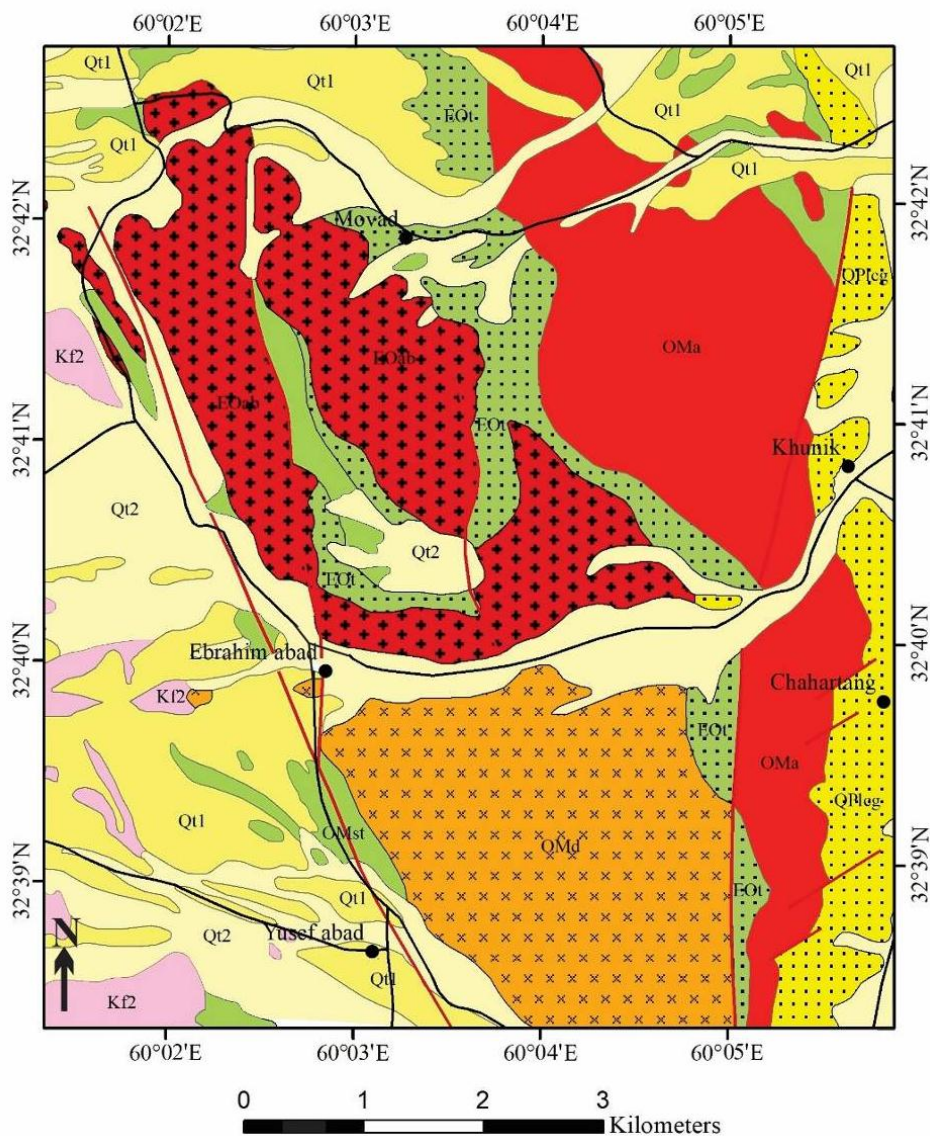
پهنه سیستان، پهنه‌ای جوش‌خورده میان بلوک لوت و هلمند (افغان) است که در دوره کوتاه پیدایش خود رویدادهای گوناگونی را پشت سر گذاشته است (Tirrul *et al.*, 1983; Camp and Griffis, 1982). برپایه پژوهش Babazadeh (2013)، پهنه جوش‌خورده سیستان از سرشاخه‌های نئوتتیس است که در زمان‌های کرتاسه پیشین تا پالئوژن پدید آمده و از دو بخش جداگانه زمین‌ساختی-رسوبی (گزیک و سهل‌آباد) ساخته شده است. واحدهای سنگی گوناگون زمین‌درز سیستان به حوضه رسوبی سفیدابه و یک ناحیه به‌هم‌ریخته که دربرگیرنده دو کمپلکس نه (Neh) و رتوک (Ratuk) است، رده‌بندی می‌شوند. سنگ‌های قدیمی‌تر از کرتاسه پسین در این پهنه دیده نمی‌شوند. در پهنه سیستان، سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی کمابیش گسترش بالایی دارند. کهن‌ترین سنگ‌های آذرین شناخته شده در این پهنه، گروه چشمه‌استاد نامیده شده است (Tirrul *et al.*, 1983).

به باور Camp و Griffis (۱۹۸۲)، سن ماگماتیسم در پهنه جوش‌خورده سیستان تا کرتاسه پسین نیز می‌رسد؛ اما بیشترین فعالیت آذرین این پهنه از پالئوژن تا نئوژن روی داده است. پیامد ماگماتیسم ائوسن-الیگوسن خاور

(شکل‌های ۲- A و ۲- B) که نشان‌دهنده سرشت انفجاری فرایندهای آتشفشانی در مرحله‌های نخستین هستند.

بررسی شده، واحد آذرآواری EOt، کریستال‌توف است و به صورت تپه‌ماهوری دیده می‌شود. واحدهای آتشفشانی روی توف‌ها جای گرفته‌اند

Geological map of Ebrahim abad



Legend

Quaternary	Pleistocene-Holocene	Q ²	Younger gravel fans and terraces
		Q ¹	Older gravel fans and terraces
Tertiary	Oligocene-Miocene	Q ^{Pl} gr	Conglomerate, sand
		OM st	Tuffaceous sandstone, cherty limestone, scarce conglomerate
		OM ^d	Dacite
	Eocene-Oligocene	OM ^a	Andesite
		EO ^a	Basaltic andesite
	EO ^c	Tuff	
Cretaceous		K ^{f2}	Flysch (mostly shales)

Symbols

- Fault
- Road
- Village

شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه ابراهیم آباد بر پایه نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ گزیک (Guillou et al., 1981) با اصلاح و رسم دوباره



شکل ۲- A) آندزیت با رخنمون گنبدی و ساخت منشوری روی توف (دید رو به شمال‌خاوری)؛ B) رخنمونی از توده داسیتی روی واحد آذرآوری در منطقه ابراهیم‌آباد (دید رو به باختر)

کهن‌ترین واحد آتشفشانی در منطقه ابراهیم‌آباد، آندزیت‌بازالتی (EOab) است که به صورت توده‌های منفرد و گاهی به هم پیوسته در شمال باختری منطقه رخنمون دارند (شکل ۱). بیشتر این سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ تیره دیده می‌شوند و در پی تأثیر عوامل ساختاری (مانند: درزه‌ها و شکستگی‌ها)، استحکام نخستین خود را از دست داده‌اند و در پی هوازدگی و دگرسانی‌ها، به رنگ سرخ و قهوه‌ای نیز دیده می‌شوند. از پدیده‌های رایج در این واحد سنگی، خردشدگی و بلوکه‌شدن است که در پی گسترش سیستم درزه و شکستگی‌های منظم پدید آمده است. در کل، منطقه بررسی شده تحت تأثیر بخش‌های شمالی گسل نه خاوری با روند کلی شمالی- جنوبی و سازوکار راستگرد با مؤلفه معکوس (Walker and Jackson, 2004) بوده است. افزون‌براین، این منطقه تحت تأثیر پهنه‌های گسلی کوچک‌تری با نام ابراهیم‌آباد، همت‌آباد، زولسک، دسته‌قیچ و شامه بوده است که راستای آنها از N20W تا N50W و مؤلفه راستالغز در این پهنه‌ها نیز از نوع راستگرد با مؤلفه معکوس است. همان‌گونه که گفته شد، رفتار یکی از این پهنه‌های گسلی در منطقه ابراهیم‌آباد، خردشدگی واحدهای گدازه‌ای به‌ویژه آندزیت‌بازالتی را در پی داشته است. بافت حفره‌ای و حفره‌ای- بادامکی از بافت‌های دیده شده در آندزیت‌بازالتی به‌شمار می‌روند. واحد گدازه‌ای OMa شامل آندزیت است که به‌صورت توده‌های خردشده در بخش خاوری محدوده رخنمون دارند (شکل ۱). بلورهای تیره آمفیبول سوزنی در نمونه دستی این سنگ دیده می‌شوند که اندازه بلورهای آن گاه تا ۳ میلیمتر می‌رسد.

کهن‌ترین واحد آتشفشانی در منطقه ابراهیم‌آباد، آندزیت‌بازالتی (EOab) است که به صورت توده‌های منفرد و گاهی به هم پیوسته در شمال باختری منطقه رخنمون دارند (شکل ۱). بیشتر این سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ تیره دیده می‌شوند و در پی تأثیر عوامل ساختاری (مانند: درزه‌ها و شکستگی‌ها)، استحکام نخستین خود را از دست داده‌اند و در پی هوازدگی و دگرسانی‌ها، به رنگ سرخ و قهوه‌ای نیز دیده می‌شوند. از پدیده‌های رایج در این واحد سنگی، خردشدگی و بلوکه‌شدن است که در پی گسترش سیستم درزه و شکستگی‌های منظم پدید آمده است. در کل، منطقه بررسی شده تحت تأثیر بخش‌های شمالی گسل نه خاوری با روند کلی شمالی- جنوبی و سازوکار راستگرد با مؤلفه معکوس (Walker and Jackson, 2004) بوده است. افزون‌براین، این منطقه تحت تأثیر پهنه‌های گسلی کوچک‌تری با نام ابراهیم‌آباد، همت‌آباد، زولسک، دسته‌قیچ و شامه بوده است که راستای آنها از N20W تا N50W و مؤلفه راستالغز در این پهنه‌ها نیز از نوع راستگرد با مؤلفه معکوس است. همان‌گونه که گفته شد، رفتار یکی از این پهنه‌های گسلی در منطقه ابراهیم‌آباد، خردشدگی واحدهای گدازه‌ای به‌ویژه آندزیت‌بازالتی را در پی داشته است. بافت حفره‌ای و حفره‌ای- بادامکی از بافت‌های دیده شده در آندزیت‌بازالتی به‌شمار می‌روند. واحد گدازه‌ای OMa شامل آندزیت است که به‌صورت توده‌های خردشده در بخش خاوری محدوده رخنمون دارند (شکل ۱). بلورهای تیره آمفیبول سوزنی در نمونه دستی این سنگ دیده می‌شوند که اندازه بلورهای آن گاه تا ۳ میلیمتر می‌رسد.

اصلی به روش ICP-OES و عنصرهای کمیاب و حاکی کمیاب به روش ICP-MS (با ذوب به کمک لیتیم متابورات/تتراپورات و هضم در اسیدنیتریک رقیق) در آزمایشگاه Acme کانادا انجام شد (جدول ۱). داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه، برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی و شناخت جایگاه زمین‌ساختی واحدهای بررسی‌شده، با نرم‌افزار GCDkit تعبیر و تفسیر شدند. در رسم نمودارها و نقشه زمین‌شناسی از نرم‌افزارهای CorelDraw و ArcGIS بهره گرفته شد.

سنگ‌نگاری

واحدهای گدازه‌ای منطقه ابراهیم‌آباد شامل آندزیت بازالتی، آندزیت و داسیت هستند که در زیر، ویژگی‌های سنگ‌نگاری آنها بررسی شده‌اند:

آندزیت بازالتی: بافت این سنگ‌ها عموماً پورفیری با زمینه میکرولیتی، مگاپورفیری و پویی‌کیلیتیک است. گاهی نیز تجمع بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن، بافت گومروپورفیری را پدید آورده است. زمینه این سنگ را معمولاً میکرولیت‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن‌های ریز دربر گرفته‌اند. پلاژیوکلاز به میزان ۵۰ تا ۶۰ درصد حجم سنگ را دربر گرفته است. درشت‌بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار این کانی بر پایه زاویه خاموشی، ترکیب لابرادوریت تا آندزین دارند و در اندازه‌های ۱ تا ۳ میلی‌متر دیده می‌شوند. برخی بلورهای پلاژیوکلاز حاشیه‌ی واجذبی (شکل ۳- A)، منطقه‌بندی (شکل ۳- B) و بافت غربالی نشان می‌دهند. چه‌بسا تغییرات دما، فشار و ترکیب شیمیایی، تعادل توده‌ی ماگمایی را برهم زده باشد. در پی نبود تعادل، کم‌کم در بخش‌هایی از بلور ذوب‌شدن آغاز می‌شود. چنانچه ماگما بیرون بریزد و فرصت

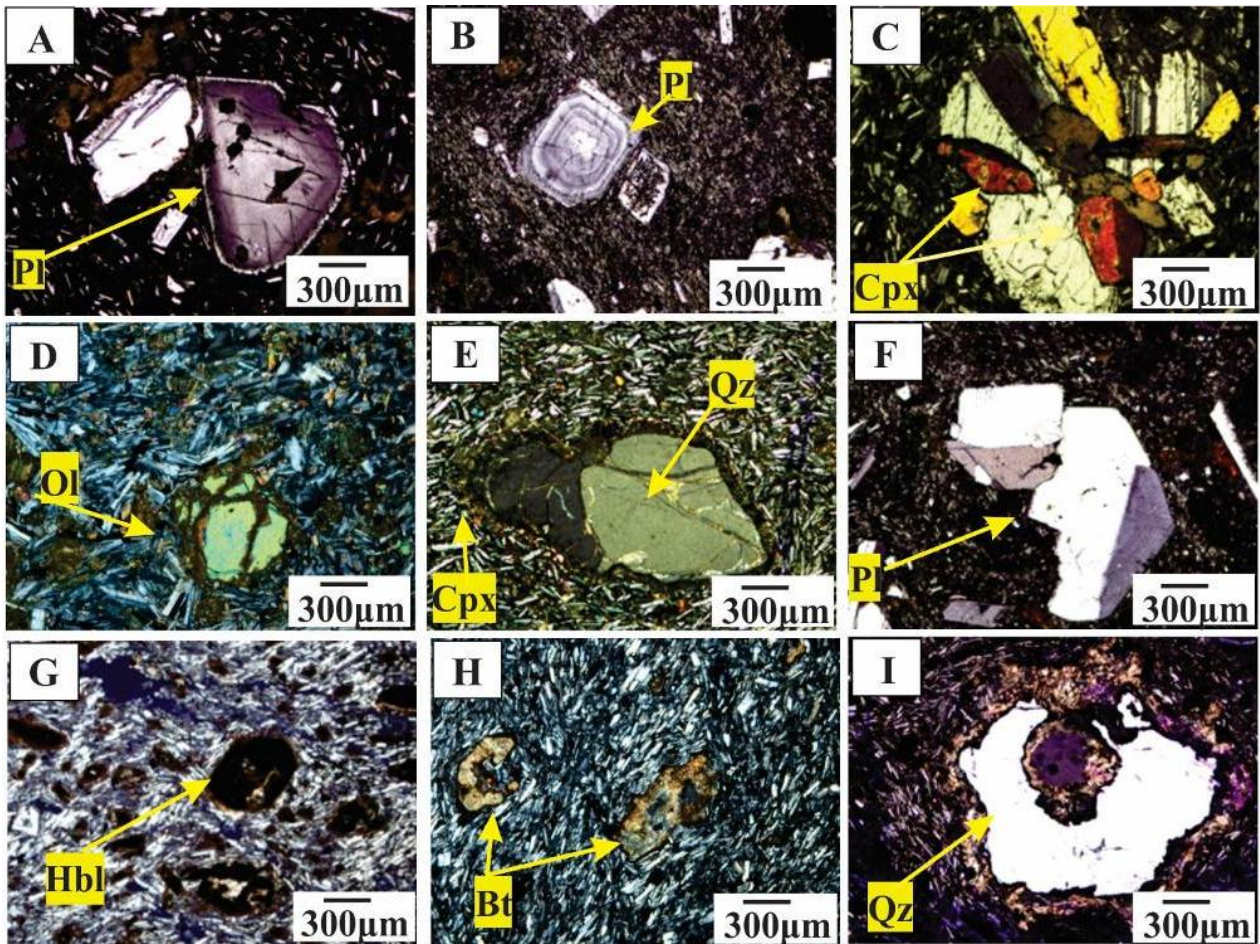
بافت پورفیری و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در سطح نمونه‌ها به‌خوبی شناسایی می‌شوند. این واحد سنگی به رنگ‌های سرخ و خاکستری روشن تا تیره و به‌صورت گنبدی با ساخت منشوری (شکل ۲- A) رخنمون دارد. این ساخت چه‌بسا پیامد نیروهای زمین‌ساختی روی داده پس از انجماد توده نیز باشد (Blatt et al., 2006). واحد Omd شامل داسیت با گنبدی مرتفع و گاه منفرد، در بخش جنوبی منطقه با گستردگی کمابیش بسیاری جای گرفته است (شکل ۱). رنگ این واحد، در نمونه دستی روشن است (شکل ۲- B). فرایند پوسته‌پوسته‌شدن و فرسایش پوست‌پیزی در داسیت‌ها دیده می‌شود. در بخش‌های خاوری محدوده بررسی شده، رخنمون‌هایی از کنگلومرا دیده می‌شود. این کنگلومرا بیشتر از پاره‌های سنگ‌های آتشفشانی ساخته شده و نسبت به واحدهای آتشفشانی جوان‌تر است. سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی منطقه بررسی‌شده، تحت‌تأثیر فرایندهای دگرسانی دستخوش تغییرات فیزیکی و شیمیایی شده و پهنه‌های دگرسانی را پدید آورده‌اند که دگرسانی‌های شاخص دیده‌شده در منطقه شامل پروپیلیتی، سربسیتی، آرژیلیتی و کربناتی از آن جمله‌اند.

روش انجام پژوهش

پس از گردآوری اطلاعات موجود از منطقه بررسی‌شده، برداشت‌های صحرائی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی انجام گرفت. از شمار ۸۲ نمونه سنگی برداشت‌شده، ۶۱ مقطع نازک ساخته و با میکروسکوپ پلاریزان بررسی دقیق سنگ‌نگاری شدند. سپس ۱۳ نمونه از سنگ‌های با کمترین دگرسانی برگزیده و تجزیه عنصرهای

غربالی دیده می‌شوند (Kawabata and Shuto, 2005; Perugini and Poli, 2012).

کافی برای سردشدن نداشته باشد، بخش‌های ذوب شده، با شیشه پر می‌شوند و به‌صورت بافت



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی (در XPL) از گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد: (A) حاشیه‌ی واجذبی و مژرس در پلاژیوکلازهای درون آندزیت‌بازالتی؛ (B) منطقه‌بندی در پلاژیوکلازهای درون آندزیت‌بازالتی؛ (C) بافت گلمروپورفیری و کلینوپیروکسن با ماکل نواری در آندزیت‌بازالتی؛ (D) حاشیه‌ی ایدنگزیتی شده الیون در آندزیت‌بازالتی؛ (E) حضور بیگانه‌بلور کوارتز و کلینوپیروکسن در پیرامون آن در آندزیت‌بازالتی؛ (F) پلاژیوکلاز با حاشیه‌ی خلیجی در آندزیت؛ (G) هورنبلند اپاسیتی شده در آندزیت؛ (H) بیوتیت کلریتی شده در آندزیت؛ (I) کوارتز با حاشیه‌ی خلیجی در داسیت‌های منطقه (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) است)

نمونه‌ها از پدیده‌های مهم در نمونه‌های آندزیت بازالتی ابراهیم‌آباد برشمرده می‌شوند (شکل ۳- E). در کناره این بیگانه‌بلورها، حاشیه‌ی ریزدانه‌ای از جنس کلینوپیروکسن پدید آمده است. حضور بیگانه‌بلورهای کوارتز با حاشیه‌ی واکنشی، از نشانه‌های سنگ‌نگاری رخداد آرایش ماگمای

کلینوپیروکسن از نوع اوژیت-دیوپسید نزدیک به ۳۰ تا ۴۰ درصد حجمی سنگ را در برگرفته است و گاهی ماکل نواری دارند (شکل ۳- C). الیون به میزان نزدیک به ۲ تا ۳ درصد حجمی است و گاه ایدنگزیتی شده است (شکل ۳- D). بیگانه‌بلورهای کوارتز در برخی

2003) و یا کاهش فشار حاکم بر ماگما در هنگام بالآآمدن ماگما (Blundy and Holland, 1990) پدید آمده باشند. دگرسانی پلاژیوکلاز به کلسیت و سریسیت رایج است. آمفیبول نوع هورنبلند فراوان ترین کانی فرومینزین این سنگ است که نزدیک به ۱۵ تا ۲۰ درصد حجم سنگ را در بر می گیرد. درشت بلورهای هورنبلند، نشانه ماگماتیسیم آبدار و پهنه های کمان ماگمایی هستند (Poma et al., 2004). فرایند پاسیته شدن روی این بلورها تأثیر بسیاری گذاشته و در بیشتر مقاطع، کم و بیش یا بطور کامل سوخته هستند (شکل ۳-G). فنوکریست های هورنبلند با حاشیه سوخته، نشان دهنده واکنش اکسیداسیون هستند که به نبود تعادل این کانی در محیط های آبدار و پر دما بستگی دارد (Rozebani and Arvin, 2010). کلینوپیروکسن نوع اوژیت - دیوپسید نزدیک به ۱۰ تا ۱۵ درصد و بیوتیت کمتر از ۳ درصد حجم سنگ را فرا گرفته است که با کلریت جایگزین شده اند (شکل ۳-H).

داسیت: نمونه صحرایی این واحد سنگی، در ظاهر با آندزیت تفاوتی ندارد؛ اما داسیت ها فنوکریست هایی از کوارتز اولیه دارند. بافت رایج در داسیت، پورفیری با زمینه ریزدانه است. زمینه این واحد سنگی ۶۰ تا ۶۵ درصد و دربردارنده ریزبلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز و گاهی شیشه است. فنوکریست پلاژیوکلاز به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم سنگ را دربر گرفته و اندازه آنها از ۰/۲ تا ۳ میلیمتر متغیر است. این کانی از نوع آلبیت تا الیگوکلاز است و لبه های گرد شده و گاه شکسته و غبارآلود دارد. از دیدگاه Raymond (۲۰۰۲)، لبه های گرد شده پلاژیوکلازها چه بسا پیامد نبود تعادل شیمیایی، بالآآمدن سریع ماگما، کاهش ناگهانی فشار و نقش آرایش

سازنده این سنگ ها با پوسته قاره ای در هنگام بالآآمدن به سوی سطح زمین است (Meade et al., 2009; Shitaoka et al., 2013). برپایه بررسی های Rutherford و Devin (۲۰۰۳)، هرچه سرعت بالآآمدن ماگما به سطح زمین آهسته تر باشد، حاشیه واکنشی گسترش بیشتری یافته و ضخیم تر است. در نمونه های آندزیت بازالتی ابراهیم آباد، ضخامت متغیر حاشیه واکنشی و دانه بندی متفاوت بلورها، نشان دهنده اینست که سرعت بالآآمدن ماگما دچار تغییرات بوده است. برپایه پژوهش Sato (۱۹۷۵)، حاشیه ضخیم کلینوپیروکسن در اطراف کوارتز نشانه آرایش ماگمایی است. هاله اطراف این بیگانه بلورها، از درون به بیرون دو منطقه دارد:

منطقه I: شیشه ای است و بیشتر با پلی مورف سیلیس (تری دیمیت) مرتبط است. این منطقه ضخامت متفاوت دارد و گاه هرگز دیده نمی شود؛
منطقه II: از بلورهای پیروکسن، کانی کدر و شیشه ساخته شده است.

آندزیت: بافت های رایج در این سنگ، پورفیری با زمینه میکرولیتی و گلوپورفیری است. پلاژیوکلاز فراوان ترین کانی آندزیت هاست و گاه ۷۰-۶۵ درصد حجم سنگ را دربر گرفته است. این کانی، در اندازه های ۱ تا ۳ میلیمتر دیده می شود. درشت بلورهای شکل دار پلاژیوکلاز برپایه زاویه خاموشی در محدوده الیگوکلاز تا آندزین جای می گیرند. این کانی حاشیه خلیجی (شکل ۳-F) و منطقه بندی دارد. لبه های خلیجی در پلاژیوکلازها چه بسا در پی تزریق ماگمای مافیک (Murphy et al., 2000)، همرفتی در آشیانه ماگمایی (Rutherford and devin,)

زمین‌شیمی

داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد (جدول ۱) نشان می‌دهند مقدار SiO_2 در این سنگ‌ها از ۵۵/۰۶ تا ۶۸/۶۶ درصدوزنی متغیر بوده و نشان‌دهنده ویژگی حد واسط تا اسیدی برای این سنگ‌هاست.

پوسته‌ای باشد. درشت‌بلورهای کوارتز با اندازه ۰/۵ تا ۲ میلیمتر، گردشده و با لبه‌های خلیجی (شکل ۲-۱) نزدیک به ۱۰ درصدحجمی سنگ را در بر گرفته‌اند. هورنبلند به‌صورت نیمه‌شکل‌دار و به مقدار کم وجود دارد. بیشتر هورنبلندها لبه‌های سوخته دارند. بیوتیت از دیگر کانی‌های مافیک است که به مقدار کم یافت می‌شود.

جدول ۱- داده‌های تجزیه زمین‌شیمیایی عنصرهای اصلی (برپایه درصدوزنی) و کمیاب (برپایه ppm) برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد

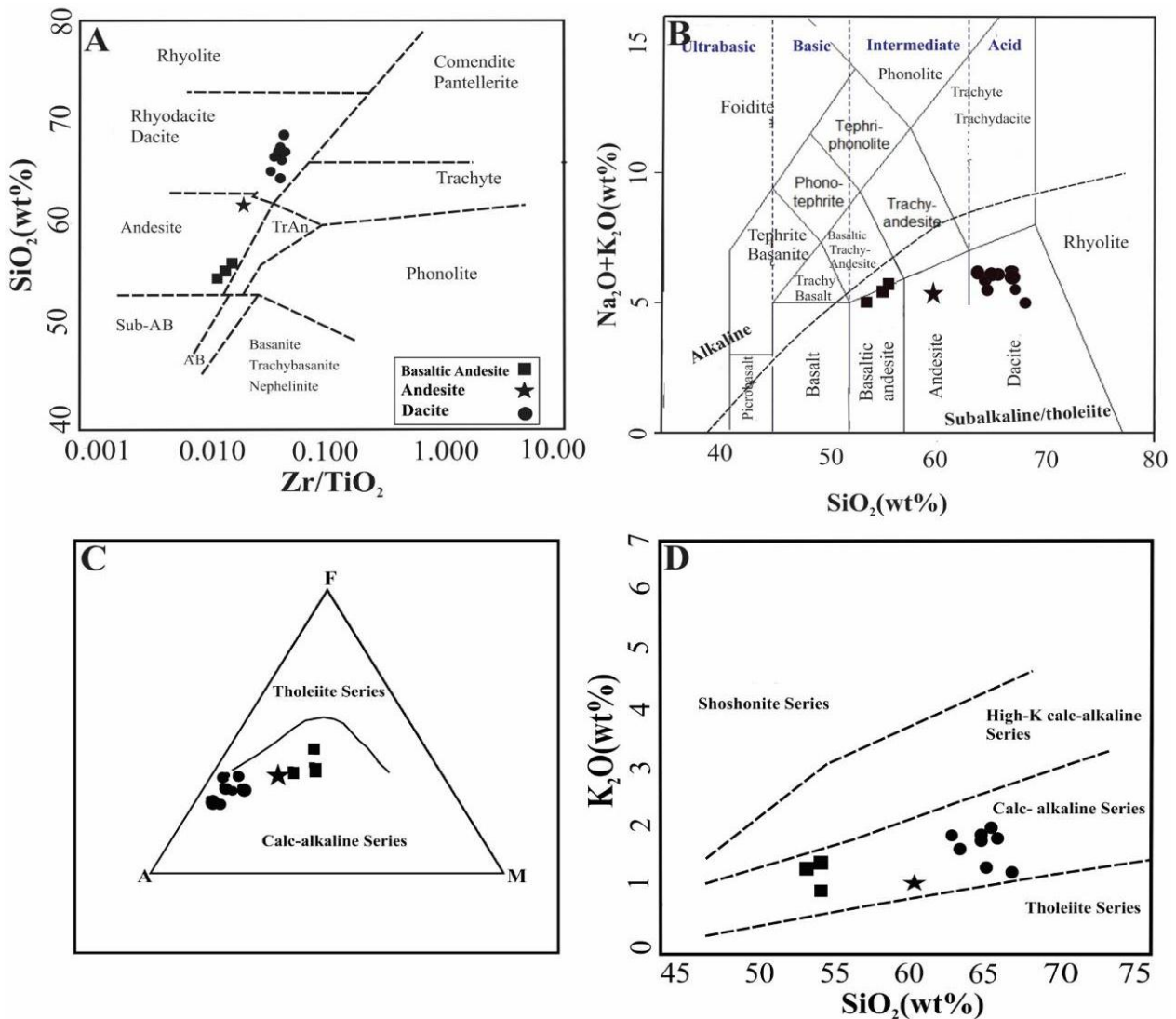
Sample No.	27	28	30	26	5	14
Rock type	Basaltic Andesite	Basaltic Andesite	Basaltic Andesite	Andesite	Dacite	Dacite
Sample Location:	X 60° 02' 15"E	60° 02' 29"E	60° 03' 45"E	60° 2' 16"E	60° 05' 01"E	60° 02' 57"E
	Y 32° 42' 18"N	32° 42' 06"N	32° 40' 26"N	32° 41' 03"N	32° 41' 44"N	32° 41' 13"N
SiO₂	55.06	55.54	55.82	62.08	66.6	67.04
TiO₂	1.23	1.26	1.15	0.67	0.49	0.51
Al₂O₃	16.43	16.94	16.92	16.4	16.13	16.14
Fe₂O_{3T}	6.65	5.52	7.74	4.49	3.54	3.81
MnO	0.12	0.14	0.12	0.09	0.01	0.03
MgO	4.27	2.97	4.24	2.25	0.47	0.44
CaO	7.50	8.27	7.35	6.06	4.24	4.36
Na₂O	4.13	4.19	4.13	4.39	4.08	4.09
K₂O	1.47	1.54	1.05	1.14	1.95	2.03
P₂O₅	0.32	0.33	0.24	0.25	0.19	0.17
LOI	2.6	3.0	1.0	2.0	2.2	1.2
Total	99.79	99.78	99.81	99.85	99.9	99.91
Sc	15	16	21	9	7	7
V	109	121	121	71	52	43
Co	26.9	26.8	26.8	13.8	5.3	6.0
Ni	77	64	39	37	22	28
Ga	13.8	13.8	13.8	13.3	13.3	13.8
Rb	28.8	32	32	33.2	64.8	67.6
Sr	557.2	714.8	714.8	259.3	267.2	285.4
Hf	4.4	4.3	4.3	4.2	5.4	5.2
Nb	15.6	16.4	16.4	9.8	9.4	10.0
Cs	2.5	4.4	4.4	2.9	4.5	2.1
Ba	213	221	164	224	230	253
Ta	1.1	1.2	1.2	0.9	0.8	0.8
Th	4.6	4.8	4.8	6.4	8.5	9.6
U	1.2	1.0	1.0	1.5	1.7	2.0
Zr	195.1	206.4	206.4	177.5	224.8	215.6
Y	20.8	22.6	22.6	13.7	17.4	18.8
La	21.5	22.7	22.7	22.5	27.1	27.9
Ce	41.3	43.2	43.2	42.1	49.5	50.8
Pr	4.59	4.97	4.97	4.39	5.28	5.44
Nd	18.9	18.7	18.7	15.8	18.9	19.7
Sm	3.91	3.90	3.90	3.13	3.55	3.82
Eu	1.27	1.31	1.31	0.90	0.94	0.97
Gd	3.99	4.17	4.17	2.93	3.53	3.56
Tb	0.65	0.69	0.69	0.45	0.53	0.57
Dy	3.36	4.14	4.14	2.75	2.98	3.35
Ho	0.76	0.80	0.80	0.58	0.70	0.69
Er	2.3	2.48	2.48	1.56	2.02	2.05
Tm	0.32	0.36	0.36	0.23	0.29	0.31
Yb	2.17	2.28	2.28	1.57	1.88	1.95
Lu	0.33	0.34	0.34	0.23	0.29	0.32
Eu/Eu*	0.98	0.99	0.99	0.91	0.81	0.81
La_N/Yb_N	6.68	6.71	6.71	9.66	9.72	9.56

جدول ۱- ادامه

Sample No.	3	4	34	EN- 17	EN- 24	EN- 27	016- 12
Rock type	Dacite	Dacite	Dacite	Dacite	Dacite	Dacite	Dacite
Sample Location:	X 60° 05' 32"E Y 32° 39' 10"N	60° 04' 53"E 32° 40' 57"N	60° 03' 52"E 32° 42' 26"N	60° 04' 44"E 32° 39' 04"N	60° 04' 10"E 32° 38' 39"N	60° 04' 08"E 32° 40' 30"N	60° 02' 34"E 32° 40' 18"N
SiO ₂	65.18	66.78	64.47	66.97	67.43	68.66	66.46
TiO ₂	0.57	0.47	0.44	0.47	0.51	0.32	0.83
Al ₂ O ₃	16.40	15.80	16.82	15.84	16.60	16.10	17.19
Fe ₂ O _{3T}	3.87	3.15	3.41	2.87	2.52	2.11	3.08
MnO	0.04	0.02	0.05	0.05	0.01	0.02	0.02
MgO	0.68	0.75	1.03	0.43	0.31	0.49	0.45
CaO	4.67	3.94	4.24	4.33	4.42	3.64	4.14
Na ₂ O	4.04	4.00	4.01	3.97	4.12	3.92	4.37
K ₂ O	1.80	2.04	2.01	1.47	2.00	1.30	1.90
P ₂ O ₅	0.20	0.18	0.20	0.19	0.20	0.11	0.21
LOI	2.4	2.7	3.0	3.3	1.8	3.2	1.6
Total	99.89	99.9	99.88	99.89	99.9	99.92	99.93
Sc	9	6	5	7	7	4	16
V	75	54	49	60	55	28	50
Co	8.4	11.6	7.0	7.1	3.8	3.1	6.0
Ni	31	24	20	20	20	20	22
Ga	13.6	12.6	15.2	14.0	14.2	14.6	17.0
Rb	59.4	65.8	70.1	71.1	71.0	24.2	65.7
Sr	280.7	260.1	400.0	315.5	289.9	344.4	279
Hf	5.1	5.0	4.4	5.0	5.2	3.7	5.1
Nb	8.5	9.5	14.3	10	10.3	6.3	10.8
Cs	4.0	3.5	6.1	12.3	4.5	1.4	4.6
Ba	221	220	285	284	251	248	243
Ta	0.6	0.8	1.0	0.9	0.9	0.5	0.8
Th	8.6	8.4	7.8	9.3	9.9	8.1	1.41
U	1.6	1.5	2.5	2.3	1.8	1.5	1.42
Zr	217.8	210.8	199	215	226.5	154.7	236
Y	19.8	17.9	15.3	19.6	17.0	11.3	20.0
La	25.5	25.5	29.1	27.6	27.6	22.4	25.8
Ce	47.3	45.8	50.7	51.6	50.2	40.1	49.8
Pr	5.24	5.15	5.35	5.53	5.45	4.14	5.50
Nd	20.0	17.9	18.9	19.6	20.2	14.7	19.9
Sm	3.75	3.74	3.19	3.77	3.57	2.43	3.80
Eu	0.95	0.89	0.93	0.99	0.98	0.72	1.00
Gd	3.62	3.39	3.13	3.88	3.58	2.21	3.57
Tb	0.57	0.53	0.48	0.59	0.53	0.34	0.56
Dy	3.63	2.96	2.69	3.64	3.09	2.05	3.27
Ho	0.71	0.7	0.58	0.76	0.64	0.43	0.64
Er	2.42	1.96	1.72	2.24	1.78	1.26	1.87
Tm	0.35	0.29	0.25	0.32	0.26	0.19	0.27
Yb	2.50	2.04	1.69	2.33	1.99	1.26	1.78
Lu	0.36	0.28	0.26	0.35	0.28	0.22	0.27
Eu/Eu*	0.99	0.98	0.90	0.79	0.84	0.95	0.83
La _N /Yb _N	6.88	8.43	11.61	7.90	9.74	11.99	9.77

سری ماگمایی (شکل ۴- C) نشان می‌دهند این سنگ‌ها سرشت کالک‌آلکان دارند. گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد، بر پایه نمودار K₂O در برابر SiO₂ (شکل ۴- D) در گستره کالک‌آلکان با پتاسیم متوسط جای می‌گیرند. سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکان (آندزیت و داسیت) از فراورده‌های مهم پهنه‌های زمین‌ساختی مرزهای صفحه‌های همگرا هستند (Harangi et al., 2007).

شکل‌های ۴- A و ۴- B، رده‌بندی و نامگذاری سنگ‌های بررسی‌شده برپایه نمودارهای پیشنهادی Winchester و Floyd (۱۹۷۷) و Le Bas و همکاران (۱۹۸۶) را نشان می‌دهد. در این نمودارها، ترکیب نمونه‌ها در گستره آندزیت‌بازالتی، آندزیت و داسیت و در محدوده ساب‌آلکان جای گرفته است. همچنین، بررسی‌های زمین‌شیمیایی و کاربرد نمودار شناسایی



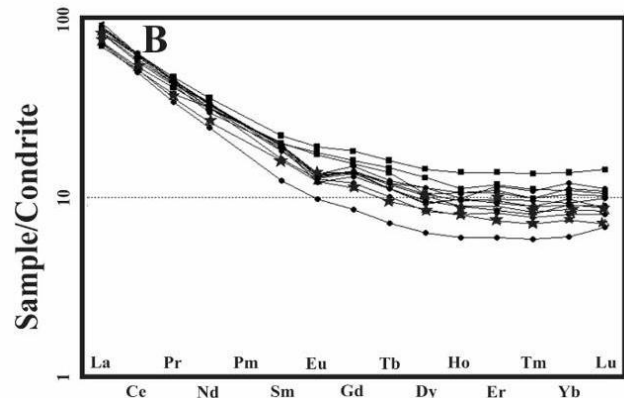
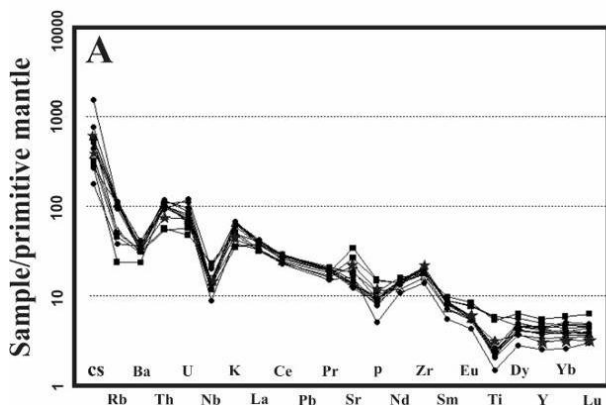
شکل ۴- رده‌بندی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد بر پایه: (A) نمودار داده‌های عنصرهای کمیاب (Winchester and Floyd, 1977); (B) نمودار مجموع آلکالن در برابر سیلیس (Le Bas et al., 1986); (C) نمودار شناسایی دسته ماگمایی سنگ‌های بررسی شده (Irvin and Baragar, 1971); (D) نمودار K₂O در برابر SiO₂ (Peccerillo and Taylor, 1976)

از ویژگی‌های بارز سنگ‌های پهنه‌های فرورانش است (Pearce, 1983; Winter, 2001; Sommer et al., 2006; Wilson, 2007; Gill, 2010). به باور Green (۲۰۰۶)، تهی‌شدگی HFSE در برابر LILE چه‌بسا پیامد تأثیر سیال‌ها یا مواد مذاب پدیدآمده از صفحه فرورانده روی گوته‌گوشته‌ای باشد. نمودار الگوی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجارشده به ترکیب کندریت (Boynton, 1984) نشان‌دهنده غنی‌شدگی

الگوی عنصرهای کمیاب بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های حد واسط و اسیدی منطقه ابراهیم‌آباد در شکل ۵- A نمایش داده شده است. این نمودار الگوی پراکندگی یکنواخت در REE، غنی‌شدگی عنصرهای K، Sr، U، Th و Cs و آنومالی منفی P، Ba، Nb و Ti به‌ویژه در نمونه‌های داسیتی نشان می‌دهد. غنی‌شدگی LILE، تهی‌شدگی از HFSE و آنومالی منفی Nb و Ti

بی‌هنجاری منفی ضعیف Eu را پیامد فرایند تبلوربخشی کانی پلاژیوکلاز می‌دانند. به باور Lin و همکاران (۱۹۸۹)، الگوی هموار میان عنصرهای Dy و Lu چه بسا نشان‌دهنده ذوب خاستگاهی لرزولیتی باشد. مقدارهای کمابیش کم Yb_N در همه نمونه‌ها نشان‌دهنده گارنت بجامانده در خاستگاه هستند (Machado *et al.*, 2005).

LREE، تهی‌شدگی HREE و آنومالی منفی ضعیف Eu به‌ویژه در نمونه‌های آندزیت و داسیت است (شکل ۵- B) که از ویژگی‌های سنگ‌های کالک‌آلکان آتشفشان‌های در مرز فعال قاره‌ای به‌شمار می‌روند (Nagudi *et al.*, 2003). مقدارهای به‌دست‌آمده Eu/Eu^* برای سنگ‌های بررسی‌شده از ۰/۷۶ تا ۰/۹۹ در نوسان هستند. Barnes و همکاران (۲۰۰۱)،



شکل ۵- گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد در: (A) نمودار الگوی عنصرهای کمیاب بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and Boynton, 1984) (نشان‌ها) (B) نمودار الگوی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجارشده به ترکیب کندریت (McDonough, 1989) همانند شکل ۴ هستند)

کمیاب و متحرک پیشنهاد شده است، سنگ‌های بررسی‌شده در گستره مرز قاره‌ای فعال جای گرفته‌اند. نمودار Zr/Nb در برابر Nb/Th (Condie, 2005) نشان می‌دهد ماگمای مادر این سنگ‌ها در پی ذوب‌بخشی یک گوشته غنی شده در محیط کمان پدید آمده است (شکل ۷).

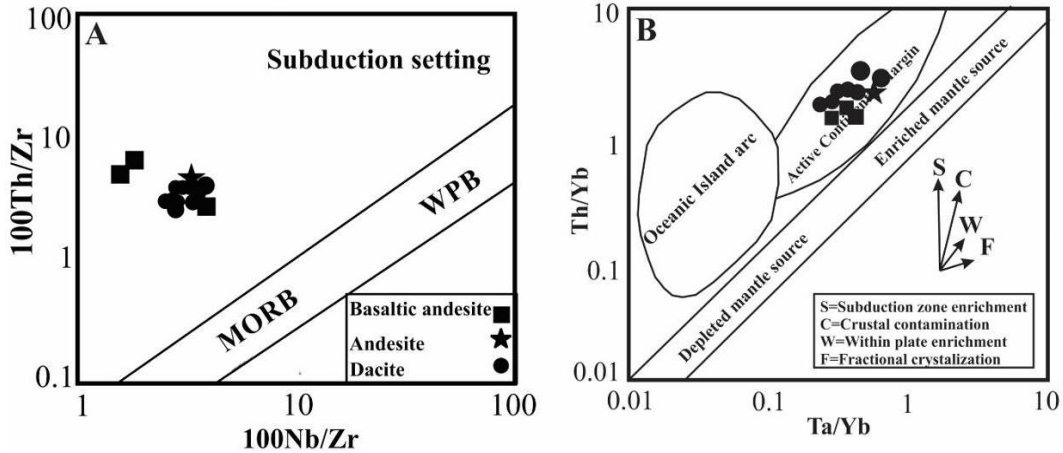
برای بررسی فرایندهای اساسی ماگمایی و نشان دادن روند تحولات مذاب سازنده سنگ‌های بررسی‌شده، نمودار تغییرات درصدوزنی MgO در برابر درصدوزنی CaO (شکل ۸) به کار برده شد. این نمودار نشان‌دهنده نقش تبلوربخشی در تحول سنگ‌های منطقه است؛ به‌گونه‌ای که ماگمای خاستگاه گرفته از ذوب‌بخشی پریدوتیت، تبلوربخشی الیوین، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز

بحث

جایگاه زمین‌ساختی و خاستگاه

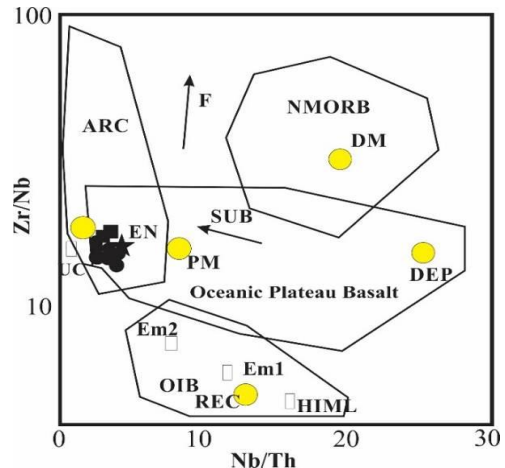
برای شناخت جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های بررسی‌شده از نمودار لگاریتمی $100Th/Zr$ در برابر $100Nb/Zr$ (Pearce, 1983; Asiabanha *et al.*, 2012) بهره گرفته شد. برپایه این نمودار، سنگ‌های منطقه ابراهیم‌آباد در جایگاه فرورانش جای می‌گیرند (شکل ۶- A). پهنه‌های فرورانش پیچیده‌ترین پهنه‌های پیدایش ماگما دانسته شده‌اند (Mandal *et al.*, 2012). برای شناخت اینکه سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد در محیط کمان جزیره یا در جایگاه زمین‌ساختی مرز فعال قاره‌ای فوران کرده‌اند، از نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983) بهره گرفته شد. در این نمودار (شکل ۶- B) که بر پایه عنصرهای

را نشان می‌دهد (شکل ۸).

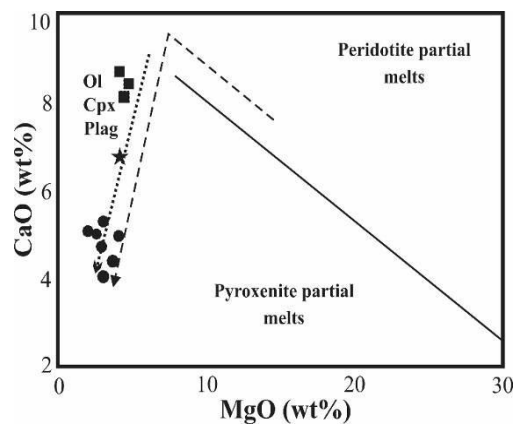


شکل ۶- نمودارهای تمایز محیط تکتونوماگمایی برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد. (A) نمودار $100\text{Th}/\text{Zr}$ در برابر $100\text{Nb}/\text{Zr}$ (Pearce, 1983) (B) نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983; Asiabanha *et al.*, 2012)

ماگماهای وابسته به گوشته سنگ‌کره‌ای نسبت La/Nb بیشتر از ۱ دارند؛ اما این نسبت در ماگماهای جداشده از گوشته سست‌کره‌ای غنی‌شده نزدیک به ۰/۷ است. در صورت رخداد آلودگی این ماگماها با گوشته سنگ‌کره‌ای هنگام صعود، تا اندازه‌ای این نسبت افزایش می‌یابد (DePaolo and Daley, 2000). این نسبت در نمونه‌های بررسی شده، برابر با ۱/۱ تا ۱/۵ است و نشان‌دهنده خاستگاه گوشته سنگ‌کره‌ای برای آنهاست. مذاب‌های پدیدآمده در محدوده پایداری گارنت، عموماً نسبت Dy/Yb بالا (بیشتر از ۲/۵) دارند؛ اما ذوب در محدوده پایداری اسپینل، مذابی با نسبت Dy/Yb کم (کمتر از ۱/۵) پدید می‌آورد (Shaw *et al.*, 2003)، میانگین مقدار Dy/Yb نمونه‌های بررسی شده ۱/۵ است که نشان‌دهنده خاستگاه اسپینل-گارنت لرزولیت برای آنهاست. افزون‌براین، برای شناخت ویژگی‌های خاستگاه ماگمای مادر سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد، نمودار درصدوزنی $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ در برابر Al_2O_3 (Herzberg, 1995; Cook *et al.*, 2016) به کار برده شد. برپایه این

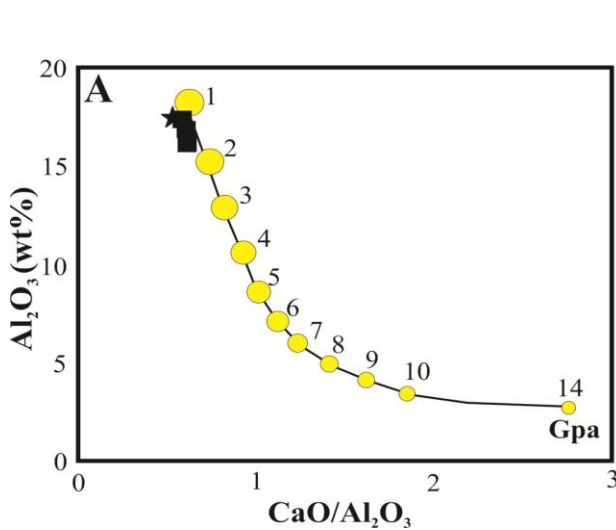


شکل ۷- نمودار تغییرات Nb/Th در برابر Zr/Nb (Condie, 2005) (نشانه‌ها همانند شکل ۶ هستند)



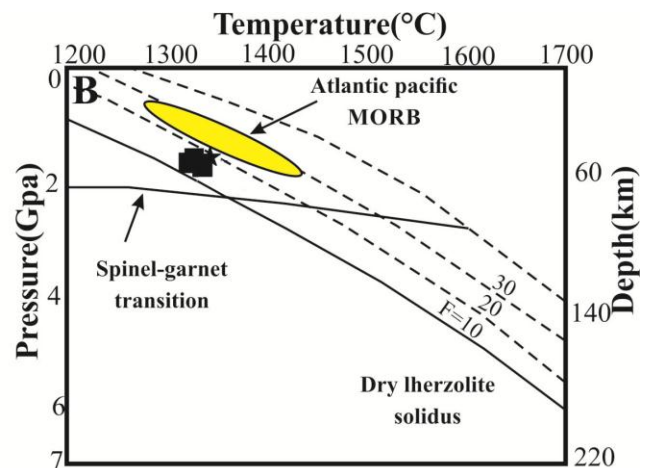
شکل ۸- نمودار تغییرات درصدوزنی CaO در برابر MgO (Cook *et al.*, 2016; Herzberg and Asimow, 2008) (نشانه‌ها همانند شکل ۶ هستند)

می‌دهند و در نزدیک منطقه انتقالی اسپینل-گارنت لرزولیت جای گرفته‌اند (شکل ۹- B). برپایه این نمودار، ماگما از ژرفای ۶۰ تا ۸۰ کیلومتری و در پی ۱۰ درصد ذوب‌بخشی در منطقه تحول اسپینل-گارنت لرزولیت خاستگاه گرفته است.



شکل ۹- A) نمودار تغییرات درصدوزنی CaO/Al_2O_3 در برابر Al_2O_3 (Herzberg, 1995; Cook *et al.*, 2016)؛ B) نمودار فشار-دما که نشان‌دهنده دما و ژرفای ذوب برای MORB (داده‌ها از Lee *et al.*, 2009) و سنگ‌های آندزیتی منطقه ابراهیم‌آباد است (نشانه‌ها: مربع توپر: آندزیت بازالتی، ستاره: آندزیت)

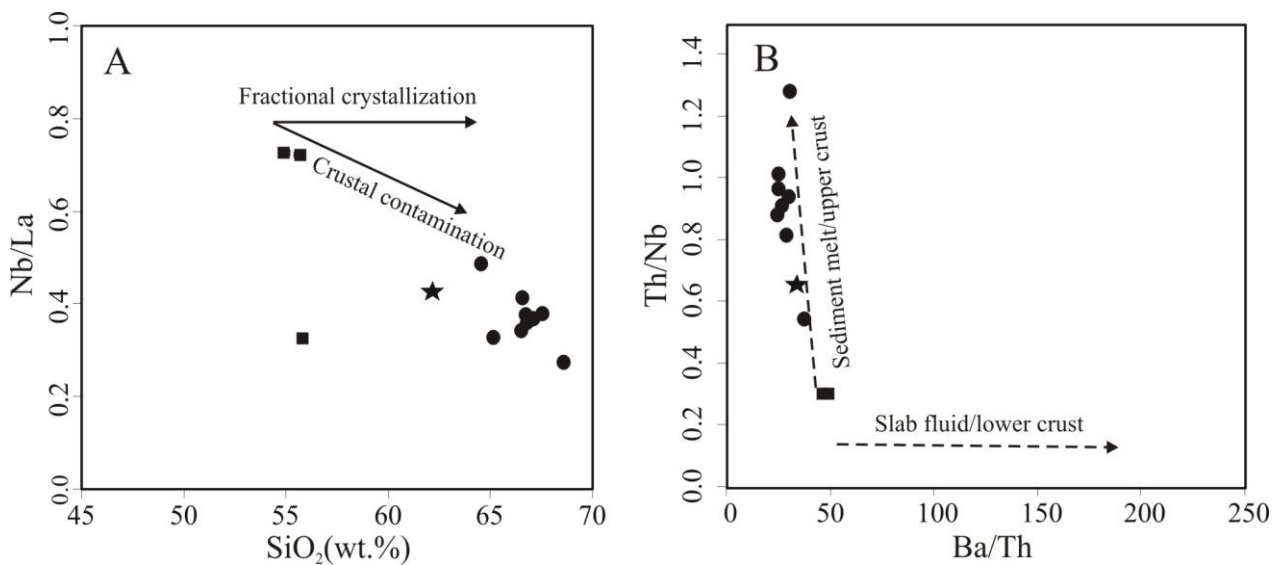
نمودار، گدازه‌های بررسی‌شده در بازه فشار ۱ تا ۲ گیگاپاسکال جای گرفته‌اند (شکل ۹- A). در نمودار فشار-دما که نشان‌دهنده دما و ژرفای ذوب برای MORB است (داده‌ها از Lee *et al.*, 2009)، نمونه‌های بررسی‌شده، دمای نزدیک به ۱۳۰۰ تا ۱۳۵۰ درجه سانتیگراد را نشان



بررسی آرایش پوسته‌ای در گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد حضور بیگانه‌بلورهای کوارتز از ویژگی‌های آندزیت بازالتی ابراهیم‌آباد و نشان‌دهنده رخداد آلودگی پوسته‌ای در گدازه‌های منطقه بررسی‌شده است. برای بررسی آلودگی پوسته‌ای، نسبت‌های Nb/La و Nb/U به کار برده می‌شوند که به آرایش پوسته‌ای حساس هستند (Hafmann *et al.*, 1986; Furman, 2007; He *et al.*, 2018). این نسبت‌ها در سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد به ترتیب برابر با ۰/۷ - ۰/۲ و ۱۶/۴ - ۴/۲ هستند. از آنجایی که مقدار آنها در پوسته به صورت Nb/La = ۰/۳۹ و Nb/U = ۴/۴ (Teng *et al.*, 2004) و برای گوشته به صورت Nb/La = ۲۵±۵ و Nb/U = ۵۰ (Hafmann *et al.*, 1986; Sun and McDonough, 1989) است، آرایش پوسته‌ای در سنگ‌های منطقه بررسی‌شده تأیید می‌شود. ماگماهای حد واسط و اسیدی در مقایسه با ماگمای بازیک مدت زمان بیشتری در پوسته سپری می‌کنند. از این‌رو، سنگ‌های حد واسط و اسیدی شواهد پوسته در تکامل ماگما را بهتر نشان می‌دهند (Verma and Verma, 2018). نمودار SiO_2 در برابر Nb/La (شکل ۱۰- A)، نشان‌دهنده همخوانی میان این نسبت با میزان سیلیس نمونه‌ها و رخداد آلودگی پوسته‌ای در هنگام پیدایش آنهاست.

بررسی آرایش پوسته‌ای در گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد

حضور بیگانه‌بلورهای کوارتز از ویژگی‌های آندزیت بازالتی ابراهیم‌آباد و نشان‌دهنده رخداد آلودگی پوسته‌ای در گدازه‌های منطقه بررسی‌شده است. برای بررسی آلودگی پوسته‌ای، نسبت‌های Nb/La و Nb/U به کار برده می‌شوند که به آرایش پوسته‌ای حساس هستند (Hafmann *et al.*, 1986; Furman, 2007; He *et al.*, 2018). این نسبت‌ها در سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد به ترتیب برابر با ۰/۷ - ۰/۲ و ۱۶/۴ - ۴/۲ هستند. از آنجایی که مقدار آنها در پوسته به صورت Nb/La = ۰/۳۹ و Nb/U = ۴/۴ (Teng *et al.*, 2004) و برای گوشته به صورت Nb/La = ۲۵±۵ و Nb/U = ۵۰ (Hafmann *et al.*, 1986; Sun and McDonough, 1989) است، آرایش پوسته‌ای در سنگ‌های منطقه بررسی‌شده تأیید می‌شود. ماگماهای حد واسط و اسیدی در مقایسه با ماگمای بازیک مدت زمان بیشتری در پوسته سپری می‌کنند. از این‌رو، سنگ‌های حد واسط و اسیدی شواهد پوسته در تکامل ماگما را بهتر نشان می‌دهند (Verma and Verma, 2018). نمودار SiO_2 در برابر Nb/La (شکل ۱۰- A)، نشان‌دهنده همخوانی میان این نسبت با میزان سیلیس نمونه‌ها و رخداد آلودگی پوسته‌ای در هنگام پیدایش آنهاست.



شکل ۱۰- بررسی نقش پوسته در تحولات ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد در: (A) نمودار SiO₂ در برابر Nb/La (He et al., 2018)؛ (B) نمودار Ba/Th در برابر Th/Nb (Orozco- Esquivel et al., 2006) (نشانه‌ها همانند شکل ۶ هستند)

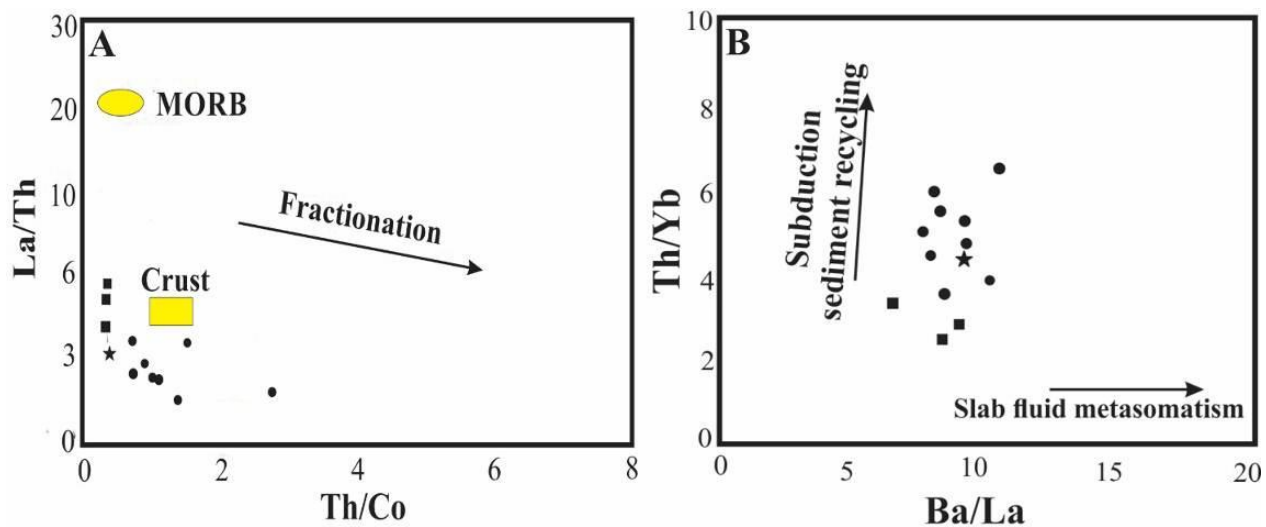
می‌شود (Koszowska et al., 2007). مقادیر این نسبت‌ها در گوشته اولیه و پوسته قاره‌ای به ترتیب عبارتند از: $Zr/Nb = 14/8$ و $16/2$ ، $La/Nb = 0/94$ و $2/2$ ، $Ba/Nb = 9$ و 54 ، $Rb/Nb = 0/91$ و $4/7$ (Koszowska et al., 2007). مقادیر میانگین نسبت‌های یادشده برای گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد به ترتیب برابر با $20/32$ ، $1/36$ ، $23/3$ و $5/03$ هستند. این مقادیر نشان‌دهنده مشارکت بخش‌های پوسته‌ای در تکامل ماگمای سازنده آنهاست. برای بررسی نقش پوسته بالایی و پوسته زیرین در تحولات ماگمایی، نمودار Th/Nb در برابر Ba/Th (Orozco- Esquivel et al., 2006) به کار برده شد (شکل ۱۰- B).

مقادیر بالای Th/Nb و کم Ba/Th نمونه‌ها، نشان‌دهنده مشارکت مواد پوسته‌ای در پیدایش آنها هستند. به گفته دیگر، مقدار این نسبت‌ها چه بسا نشان‌دهنده نقش محلول‌ها و مواد مذاب در محیط فرورانش و یا مواد پوسته‌ای در تکامل ماگما باشد.

نسبت Th/U نیز برای شناسایی آلودگی پوسته‌ای در سنگ‌های بررسی شده به کار برده شد. این نسبت در پوسته بالایی نزدیک به $3/8$ (Rudnick and Gao, 2014)، و در نمونه‌های منطقه ابراهیم‌آباد برابر با $3/8$ تا $6/3$ است و نشان‌دهنده تأثیر آلودگی پوسته‌ای در آنهاست. بررسی‌ها نشان داده‌اند پوسته قاره‌ای در Nb و Ta نسبت به دیگر عنصرهای ناسازگار (مانند: La) تهی‌شدگی دارد. Nb ، Ta و REE در پوسته قاره‌ای بالایی بیشتر از پوسته زیرین تمرکز دارند و شناخت ترکیب کلی پوسته دشوار است (Barth et al., 2000). تهی‌شدگی Nb نسبت به $LREE$ در پوسته نشان‌دهنده مرزهای همگراست و آلودگی پوسته‌ای، تغییر (افزایش) آنومالی Nb را به دنبال دارد (Verma and Verma, 2018). برای این پایه، برای بررسی نقش بخش‌های پوسته‌ای در تکامل ماگما، تغییرات زمین‌شیمیایی عنصرهای کمیاب به کار برده می‌شود. برای نمونه، از نسبت‌های Rb/Nb ، Ba/Nb ، La/Nb و Zr/Nb بهره گرفته

مقدارهای بالای Th/Nb در این سنگ‌ها، همانند این نسبت در سنگ‌های پهنه‌های فرورانش هستند. از این رو، برپایه نمودارهای زمین‌شیمیایی، ماگمای سازنده سنگ‌های گدازه‌ای منطقه ابراهیم‌آباد، تأثیر سیال‌های آزادشده از صفحه اقیانوسی فرورونده و آلودگی پوسته‌ای را نشان می‌دهند. سنگ‌های آتشفشانی که دچار آلودگی پوسته‌ای شده باشند، نسبت $La/Ta > 22$ دارند (Abdel-Rahman and Nassar, 2004). مقدار این نسبت در سنگ‌های کالک‌آلکان بررسی شده ۴۰-۱۸ است و اثر آلودگی پوسته‌ای را نشان می‌دهد. هنگام رویداد فرایندهای دگرسانی و یا دگرگونی، عنصر Th پایدار است (Rolland et al., 2000). نمودار Th/Co در برابر La/Th (Stevenson et al., 1999) نشان می‌دهد سنگ‌های حد واسط منطقه ابراهیم‌آباد در مقایسه با سنگ‌های اسیدی نسبت‌های بالاتری از La/Th دارند (شکل ۱۱- A).

مقدارهای بالای Th/Nb در این سنگ‌ها، همانند این نسبت در سنگ‌های پهنه‌های فرورانش هستند. از این رو، برپایه نمودارهای زمین‌شیمیایی، ماگمای سازنده سنگ‌های گدازه‌ای منطقه ابراهیم‌آباد، تأثیر سیال‌های آزادشده از صفحه اقیانوسی فرورونده و آلودگی پوسته‌ای را نشان می‌دهند. سنگ‌های آتشفشانی که دچار آلودگی پوسته‌ای شده باشند، نسبت $La/Ta > 22$ دارند (Abdel-Rahman



شکل ۱۱- A) نمودار تغییرات نسبت‌های Th/Co در برابر La/Th (Stevenson et al., 1999) (نسبت Th/Co شاخص تبلوربخشی است و پیکان روند جدایش بلورین را نشان می‌دهد)؛ B) نمودار Ba/La در برابر Th/Yb (Wang et al., 2010; Qian et al., 2016) (نشانه‌ها همانند شکل ۶ هستند)

سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده نسبت داده می‌شود که تمرکز آنها در پوسته اقیانوسی آبدگیری شده را در پی دارد (Saunders et al., 1991). آمفیبول کانی میزبان مهمی برای این عنصرها در گوشته بالایی است و آنومالی این عنصرها که ویژگی اصلی محیط‌های کم‌انرژی است را کنترل می‌کند (Ionof and Hofmann, 1995)؛ (Al-Saleh and Boyle, 2001). برپایه نمودار Ba/La در برابر Th/Yb (شکل ۱۱- B)، در خاستگاه نمونه‌های بررسی شده از میان اجزای فرورانشی، متاسوماتیسم وابسته به رسوب‌های فرورونده، بیشترین نقش را داشته است و چه بسا نشانه مشارکت رسوب‌های فرورونده در

در نمودار یادشده، نمونه‌های آندزیت‌بازالتی از MORB دورتر هستند و ویژگی‌های نزدیک به پوسته نشان می‌دهند. نمونه آندزیتی و داسیت‌ها کم‌کم از آندزیت‌بازالتی دورتر شده‌اند و نسبت‌های بالاتری از Th/Co دارند. نسبت Th/Co در داسیت‌ها مشابهت بسیاری با نسبت‌های پوسته نشان می‌دهد. بر پایه این نمودار، در گدازه‌های منطقه ابراهیم‌آباد، آرایش پوسته‌ای انتظار می‌رود. افزون بر تأثیر آرایش پوسته‌ای در سنگ‌های آتشفشانی ابراهیم‌آباد که پیش از این گفته شد، تهی‌شدگی Ta و Nb به حلالیت بسیار کم آنها در سیال‌های متاسوماتیسم‌کننده پدیدآمده از

پیدایش ماگمای مادر این سنگ‌هاست.

نتیجه‌گیری

سنگ‌های آتشفشانی منطقه ابراهیم‌آباد شامل آندزیت بازالتی، آندزیت و داسیت هستند که به صورت گنبدهایی با ساخت منشوری روی نهشته‌های آذرآواری مانند توف جای گرفته‌اند. پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیون از کانی‌های اصلی آندزیت‌بازالتی، پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن از کانی‌های اصلی در آندزیت و پلاژیوکلاز، کوارتز و هورنبلند از کانی‌های اصلی در گدازه‌های اسیدی هستند. سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری بررسی شده، در پی فرایندهای دگرسانی دستخوش تغییرات فیزیکی و شیمیایی شده‌اند و پهنه‌های دگرسانی را پدید آورده‌اند که از میان آنها، دگرسانی‌های شاخص دیده شده در منطقه مانند پروپلیتیک، سریسیتیک، آرژیلیک و کربناتی نام برده می‌شوند. حضور بیگانه‌بلورهای کوارتز از ویژگی‌های آندزیت‌بازالتی ابراهیم‌آباد است که چه بسا نشان‌دهنده وجود بیگانه سنگ‌های گرانیتوئیدی و رخداد آرایش ماگمایی باشد. در کناره این بیگانه‌بلورها، حاشیه ریزدانه‌ای از جنس کلینوپیروکسن پدید آمده است. ضخامت متغیر حاشیه واکنشی و دانه‌بندی متفاوت بلورها نشان‌دهنده اینست که سرعت بالآمدن ماگما دچار تغییرات بوده است. وجود حاشیه ضخیم کلینوپیروکسن در پیرامون کوارتز در برخی نمونه‌ها، رخداد آرایش ماگمایی را نشان می‌دهد. داده‌های زمین‌شیمیایی و کاربرد نسبت‌های عنصرهای کمیاب نیز اثر آلودگی پوسته‌ای در سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده را نشان می‌دهند. نمودار تغییرات

درصدوزنی MgO در برابر درصدوزنی CaO نشان‌دهنده نقش تبلوربخشی در تحول سنگ‌های منطقه ابراهیم‌آباد است؛ به گونه‌ای که ماگمای خاستگاه گرفته از ذوب‌بخشی پریدوتیت، تبلوربخشی الیون، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز را نشان می‌دهد. نمودارهای الگوی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب گدازه‌های ابراهیم‌آباد، نشان‌دهنده غنی‌شدگی LILE، آنومالی منفی P، Ba، Nb و Ti، غنی‌شدگی LREE و تهی‌شدگی HREE هستند و پیدایش این سنگ‌ها در پهنه‌های فرورانش را نشان می‌دهند. یکنواختی الگوی توزیع عنصرهای کمیاب نمونه‌ها نشان‌دهنده وابستگی این سنگ‌ها به یکدیگر از راه جدایش بلوری است. الگوی صاف میان عنصرهای Dy و Lu نشان‌دهنده ذوب خاستگاهی لرزولیتی و مقدارهای کمایش کم Yb_N در نمونه‌ها، نشان‌دهنده گارنت بجامانده در خاستگاه است. داده‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند ماگمای مادر سنگ‌های بررسی شده در پی رخداد نزدیک به ۱۰ درصد ذوب‌بخشی در ژرفای نزدیک به ۶۰ تا ۸۰ کیلومتری، در منطقه تحول اسپینل-گارنت لرزولیت و در دمای نزدیک به ۱۳۰۰ تا ۱۳۵۰ درجه سانتیگراد پدید آمده است. همچنین، میانگین مقدار نسبت Dy/Yb در نمونه‌های بررسی شده برابر با ۱/۵ است و خاستگاه اسپینل-گارنت لرزولیت را برای آنها نشان می‌دهد.

سپاس‌گزاری

نگارندگان از معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه بیرجند برای حمایت‌های مادی و معنوی برای به‌باررسیدن این پژوهش بسیار سپاس‌گزارند.

منابع

Abdel-Rahman, A. F. M. and Nassar, P. E. (2004) Cenozoic volcanism in the Middle East: petrogenesis of alkali basalts from northern Lebanon. Geological Magazine 141: 545-563.

- Al-Saleh, A. M. and Boyle, A. P. (2001) Neoproterozoic ensialic back-arc spreading in the eastern Arabian shield: geochemical evidence from the Halaban Ophiolite. *Journal of African Earth Sciences* 33: 1-15.
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J. M., Kananian, A. and 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.
- Babazadeh, S. A. (2013) A note on stratigraphic data and geodynamic evolution of Sistan suture zone (neo-tethyan margin) in eastern Iran. *Geodynamics Reserach International Bulletin* 1: 1-7.
- Barnes, S. J., Van Achterbergh, E., Makovicky, E. and Li, C. (2001) Proton microprobe results for the partitioning of platinum-group elements between monosulphide solid solution and sulphide liquid. *South African Journal of Geology* 104: 275-286.
- Barth, M. G., McDonough, W. M. and Rudnick, R. L. (2000) Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. *Chemical Geology* 165 : 197–213.
- Blatt, H., Tracy, R. and Owens, B. (2006) *Igneous, sedimentary, and metamorphic*. 3rd Edition, W. H. Freeman, New York, US.
- Blundy, J. D. and Holland, T. J. B. (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104: 208-224.
- Boynton, W. V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry* (Ed. Henderson, P.) 63-114. Elsevier, Amsterdam.
- Camp, V. E. and Griffis, R. J. (1982) Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 15: 221-239.
- Condie, K. C. (2005) High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. *Lithos* 79: 491-504.
- Cook, Y. A., Sanislav, I. V., Hammerli, J., Blenkinsop, T. G. and Dirks, P. H. G. M. (2016) A primitive mantle source for the Neoproterozoic mafic rocks from the Tanzania craton. *Geoscience Frontiers* 7: 911-926.
- Delavari, M., Dolati, A. and Alipoorian. E. (2017) Geochemistry of volcanic rocks from the south of Gazik (east of Birjand): implications for the evolution of Sistan Ocean (eastern Iran). *Iranian Journal of Petrology* 8(31): 21-42 (in Persian).
- DePaolo, D. J. and Daley, E. E. (2000) Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chemical Geology* 169: 157-185.
- Furman, T. (2007) Geochemistry of east African rift basalts: an overview. *Journal of African Earth Sciences* 48: 147-160.
- Gill, R. (2010) *Igneous rocks and processes*. Wiley-Blackwell, Malaysia.
- Green, N. L. (2006) Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints from the Garibaldi volcanic belt, northern Cascadia subduction system. *Lithos* 87: 23-49.
- Guillou, Y., Maurizot, P., Vaslet, D. and de la villéon, H. (1981) Geological map of Gazik, Scale 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Harangi, S., Downes, H., Thirlwall, M. and Gméling, K. (2007) Geochemistry, petrogenesis and geodynamic relationships of Miocene calc alkaline volcanic rocks in the Western Carpathian arc, eastern central Europe. *Journal of Petrology* 48: 2261-2287.
- He, J., Zhang, Y., Wang, Y., Qian, X. and Sun, L. (2018) Late Paleozoic post-collisional setting of the North Tianshan, NWChina: New insights from geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic compositions of the Permian Nileke volcanic rocks. *Lithos* 318–319: 314–325.

- Herzberg, C. (1995) Generation of plume magmas through time: an experimental perspective. *Chemical Geology* 126: 1-16.
- Herzberg, C. and Asimow, P. D. (2008) Petrology of some oceanic island basalts: PRIMELT2.XLS software for primary magma calculation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9: 12-18.
- Ionof, D. A. and Hofmann, A. W. (1995) Nb–Tarcich mantle amphiboles and micas; implication for subduction- related metasomatic trace element fractionations. *Earth and Planetary Science Letters* 131: 341–356.
- Irvine, T. N. J. and Baragar, W. R. A. F. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523-548.
- Kawabata, H. and Shuto, K. (2005) Magma mixing recorded in intermediate rocks associated with high-Mg andesites from the Setouchi volcanic belt, Japan: implications for Archean TTG formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 140: 241-271.
- Koszowska, E., Wolska, A., Zuchiewicz, W., Cuong, N. Q. and Pecskey, Z. (2007) Crustal contamination of Late Neogene basalts in the Dien Bien Phu Basin, NW Vietnam: Some insights from petrological and geochronological studies. *Journal of Asian Earth Sciences* 29:1–17.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745-750.
- Lee, C. T. A., Luffi, P., Plank, T., Dalton, H. and Leeman, W. P. (2009) Constraints on the depths and temperatures of basaltic magma generation on Earth and other terrestrial planets using new thermobarometers for mafic magmas. *Earth and Planetary Science Letters* 279: 20-33.
- Lin, P. N., Stern, R. J. and Bloomer, S. H. (1989) Shoshonitic volcanism in the Northern Mariana Arc: 2. Large- ion lithophile and rare earth element abundances: Evidence for the source of incompatible element enrichments in intraoceanic arcs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 94: 4497-4514.
- Machado, A., Chemale, F., Conceição, R. V., Kawaskita, K., Morata, D., Oteíza, O. and Van Schmus, W. R. (2005) Modeling of subduction components in the Genesis of the Meso-Cenozoic igneous rocks from the South Shetland Arc, Antarctica. *Lithos* 82: 435-453.
- Malekian Dastjerdi, M. M., Mohammadi, S. S., Nakhaei, M. and Zarrinkoub, M. H. (2016-2017) Geochemistry and tectonomagmatic setting of Tertiary volcanic rocks of the Kangan area, northeast of Sarbisheh, southern Khorasan. *Journal of Economic Geology* 8(2): 553-568 (in Persian).
- Mandal, A., Ray, A., Debnath, M. and Paul, S. P. (2012) Petrology, geochemistry of hornblende gabbro and associated dolerite dyke of Paharpur, Puruliya, West Bengal: Implication for petrogenetic process and tectonic setting. *Journal of Earth System Science* 121: 793-812.
- Meade, F. C., Chew, D. M., Troll, V. R., Ellam, R. M. and Page, L. M. (2009) Magma Ascent along a Major Terrane Boundary: Crustal Contamination and Magma Mixing at the Drumadoon Intrusive Complex, Isle of Arran, Scotland. *Journal of Petrology* 50:2345-2374.
- Mohammadi, S. S., Bayani, R., Nakhaei, M., Chung, S. L. and Zarrinkoub, M. H. (2017) Petrography, mineral chemistry, geochemistry and tectonic setting of Tertiary volcanic rocks in Shoushk area (east of Sarbisheh), Southern Khorasan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 25(1): 167-186(in Persian).
- Murphy, M. D., Sparks, R. S. J., Barclay, J., Carroll, M. R. and Brewer, T. S. (2000) Remobilization of andesite magma by intrusion of mafic magma at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies. *Journal of Petrology* 41: 21-42.
- Nagudi, B., Koeberl, C. and Kurat, G. (2003) Petrography and geochemistry of the Singo granite, Uganda, and implications for its origin. *Journal of African Earth Sciences* 36: 73-87.
- Orozco-Esquivel, T., Pwtrone, C. M., Ferrari, L., Tagami, T. and Manetti, P. (2007) Geochemical variability in lavas from the eastern Trans-Mexican volcanic belt: slab detachment in a subduction zone with varying dip. *Lithos* 93:149-174.

- Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H. Y. and Lo, C. H. (2013) Eocene–Oligocene post-collisional magmatism in the Lut–Sistan region, eastern Iran: magma genesis and tectonic implications. *Lithos* 180: 234-251.
- Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S., Yang, H. M., Chu, C. H. and Lo, C. H. (2012) Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut–Sistan region, eastern Iran. *Chemical Geology* 306: 40-53.
- Pearce, J. A. (1983) Role of the subcontinental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental basalts and mantle xenoliths* (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230–249. Shiva, Nantwich.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81.
- Perugini, D. and Poli, G. (2012) The mixing of magmas in plutonic and volcanic environments: analogies and differences. *Lithos* 153: 261-277.
- Poma, S., Quenardelle, S., Litvak, V., Maisonnave, E. B. and Koukharsky, M. (2004) The Sierra de Macon, plutonic expression of the Ordovician magmatic arc, Salta Province Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 587-597.
- Qian, X., wang, Y., Feng, Q., Zi, J. W., Zhang, Y. and Chonglakmani, C. (2016) Petrogenesis and tectonic implication of the Late Triassic post-collisional volcanic rocks in Chiang Khong, NW Thailand. *Lithos* 248–251: 418–431.
- Raymond, L. A. (2002) *Petrology: the study of igneous, sedimentary and metamorphic rocks*. McGraw-Hill, New York, US.
- Rolland, Y., Pecher, A. and Picard, C. (2000) Middle Cretaceous back-arc formation and arc evolution along the Asian margin: the Shyok Suture Zone in northern Ladakh (NW Himalaya). *Tectonophysics* 325: 145-173.
- Roobahani, L. and Arvin, M. (2010) Petrography, geochemistry and petrogenesis of rhyolitic and andesitic rocks of Nasir- Abad area, SW of Rayen, Kerman. *Iranian Journal of Petrology* 1(2): 1-16 (in Persian).
- Rudnick, R. L. and Gao, S. (2014) Composition of the continental crust. *Treatise on geochemistry* 4. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (Ed. Elias, S. A.) 2nd edition, 1-51. Elsevier, Amsterdam.
- Rutherford, M. J. and Devin, J. D. (2003) Magmatic condition and magma ascent as indicated by hornblende phase equilibria and reactions in the 1995- 2002 Soufrière Hills Magma. *Journal of Petrology* 44(8): 1433-1453.
- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. and Amini, S. (2010) Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan Ocean. *Lithos* 117: 209-228.
- Sato, H. (1975) Diffusion coronas around quartz xenocrysts in andesite and basalt from Tertiary volcanic region in northeastern Shikoku, Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 50: 49-64.
- Saunders, A. D., Norry, M. J. and Tarney, J. (1991) Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 335: 377-392.
- Shaw, J. E., Baker, J. A., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F. and Ibrahim, K. M. (2003) Petrogenesis of the largest intraplate volcanic field on the Arabian Plate (Jordan): a mixed lithosphere–asthenosphere source activated by lithospheric extension. *Journal of Petrology* 44: 1657-1679.
- Shitaoka, Y., Miyoshi, M., Yamamoto, J., Shibata, T., Nagatomo, T. and Takemura, K. (2013) Thermoluminescence age of quartz xenocrysts in basaltic lava from Oninomi Monogenetic volcano, northern Kyushu, Japan. *Geochronometria* 41(1): 30-35.

- Sommer, C. A., Lima, E. F., Nardi, L. V. S., Liz, J. D. and Waichel, B. L. (2006) The evolution of Neoproterozoic magmatism in Southernmost Brazil: shoshonitic, high-K tholeiitic and silica-saturated, sodic alkaline volcanism in post-collisional basins. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 78(3): 573-589.
- Stevenson, R., Henry, P. and Gariépy, C. (1999) Assimilation–fractional crystallization origin of Archean sanukitoid suites: western Superior Province, Canada. *Precambrian Research* 96: 83-99.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematic of ocean basalts: implications for mantle composition and process. In: *Magmatism in the ocean basins*(Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publication 42(1): 313–345. Geological Society, London, UK.
- Teng, F. Z., McDonough, W. F., Rudnick, R. L., Dalpé, C., Tomascak, P. B., Chappell, B. W. and Gao, S. (2004) Lithium isotopic composition and concentration of the upper continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68: 4167-4178.
- Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, R. J. and Camp, V. E. (1983) The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 94: 134-150.
- Vahedi Tabas, z., Mohammadi, S. S. and Zarrinkoub, M. H. (2017) Petrography, mineral chemistry and geochemistry of post-ophiolitic volcanic rocks in the Ratouk area (south of Gazik, east of Iran), southern Khorasan. *Journal of Economic Geology* 9(2): 439-461. (in Persian).
- Verma, S.P. and Verma, S. K. (2018) Petrogenetic and tectonic implications of major and trace element and radiogenic isotope geochemistry of Pliocene to Holocene rocks from the Tacaná Volcanic Complex and Chiapanecan Volcanic Belt, southern Mexico. *Lithos* 312–313: 274–289.
- Walker, R. T. and Jackson, J. (2004) Active tectonic and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics* 23: 1-24.
- Wang, Y., Zhang, A., Fan, W., Peng, T., Zhang, F., Zhang, Y. and Bi, X. (2010) Petrogenesis of late Triassic post-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern Paleotethys: geochronological and geochemical constraints. *Lithos* 120: 529-546.
- Wilson, M. (2007) *Igneous petrogenesis*. Springer, Netherlands.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-343.
- Winter, J. D. (2001) *An introduction to Igneous and metamorphic petrology*. Prentice Hall, New Jersey, US.