

Separation of the Mahabad young basalts, trachytes and trachy- andesites, geochemical and tectono- magmatic setting aspects: necessity of the Mahabad 1:100000 sheet reform

Monir Modjarrad * and Yousef Rahim Souri

Geology Department, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

In the Mahabad region accompaniment of trachytes and trachy- andesites with OIB- like alkali- basalts are shown. Trachytes at the Soltan Mountain heights, trachy- andesites as darker enclaves in it and alkali- basalts in the three sites, Khatton Bagh, Bardarashan and Badam are outcropped. Alkali- basalts have shoshonitic, met- aluminous and OIB- like characteristics with LREE/HREE enrichment and generate at deep garnet peridotitic source. Trachytes and its intermediate trachy- andesite enclaves at the Sltan Mountain with shoshonitic, per- aluminous affinity have high LREE/HREE ratios with HFSE and Ti depletion and continental arc relevant signatures. The Soltan Mountain trachytes have adakitic nature which accompany with the High niobium basaltic) HNB) affinity of Badam, Barderashan and Khatoon Bagh basalts of Mahabad and their similarities to Ghorveh HNB could clarify the relationship between adakites and basalts along the Neo- Tethys post collisional activities. Computer modelling clarify the fractional crystallization opportunity for the intermediate to acidic terms production from mantle basaltic liquid. In addition, very high contents of incompatible elements in the most evolved rocks suggest the occurrence of open- system magmatic processes. Continuous fractional crystallization from a primitive basaltic source, similar to post- plateau coeval basalts, towards acidic terms combined with small rates of assimilation) AFC) in a shallow magmatic reservoir, is best explains for the young volcanic association in the Mahabad. These phenomena occurred after Neo- Tethys closure at the Quaternary.

Key words: geochemistry, high niobium basalt, trachyte, adakite, trachy- andesite, Mahabad

* m.modjarrad@urmia.ac.ir

تفکیک بازالت‌ها، تراکیت‌ها و تراکی آندزیت‌های جوان مه‌باد از دیدگاه زمین‌شیمیایی و محیط تکتونوماگمایی: لزوم اصلاح ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ مه‌باد

منیر مجرد* و یوسف رحیم‌سوری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

سنگ‌های آذرین بیرونی مه‌باد عبارتند از تراکیت‌ها که در ارتفاعات کوه‌سلطان و تراکی آندزیت‌ها که به‌صورت انکلاوهای تیره در آنها دیده می‌شوند؛ همچنین، بازالت‌ها که در سه منطقه خاتون‌باغ، بردرشان و بادام در ورقه مه‌باد برونزد دارند. بازالت‌ها با سرشت شوشونیتی الگوی پرشیبی از عنصرهای خاکی کمیاب و خاستگاه ژرف گارنت‌پریدوتیتی با ویژگی‌های همانند درون‌صفحه‌ای دارند. تراکیت‌ها و انکلاوهای حد واسط تراکی آندزیتی شوشونیتی و پرآلومینوس و نسبت بالای عنصرهای خاکی کمیاب سبک به سنگین با آنومالی منفی از عنصرهای با میدان پایداری بالا و تیتانیوم هستند. این سنگ‌ها ویژگی‌های محیط وابسته به کمان قاره‌ای را نشان می‌دهند. همچنین، تراکیت‌های کوه‌سلطان سرشت آداکیتی نشان می‌دهند. این ویژگی در کنار شباهت ترکیب بازالت‌های مه‌باد به بازالت‌های نیوبیم بالای ناحیه قروه چه‌بسا نشان‌دهنده ارتباط بازالت‌ها با آداکیت‌ها هنگام فرایندهای پس از برخورد ورقه‌های ایران و عربی باشد. الگوسازی تجربی با نرم‌افزار نشان‌دهنده احتمال رویداد تبلوربخشی برای ساخت ترم‌های حد واسط و اسیدی کوه‌سلطان از مذاب بازالتی گوشته‌ای است. محتوای بالای عنصرهای ناسازگار و برخی نسبت‌های میان عنصرهای کمیاب نشانه فرایندهای ماگمایی در یک سیستم باز هستند. تبلوربخشی پیوسته از یک خاستگاه بازالتی اولیه با ژرفای پیدایش بسیار، ترکیب شبه‌درون‌صفحه‌ای (نیوبیم بالا) به‌سوی فراورده‌های اسیدی به‌همراه مقادیری از هضم در لانه ماگمایی کم‌ژرفا (برای پیدایش تراکیت‌های آداکیتی) بهترین توضیح‌ها برای مجموعه آتشفشانی جوان دیده‌شده در مه‌بادند.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی، بازالت نیوبیم بالا، تراکیت، آداکیت، تراکی آندزیت، مه‌باد

نسبت فرایندهای ماگمایی مانند تبلوربخشی، نبود

مقدمه

آمیختگی ماگمایی، ماگمای هیبریدی و ذوب‌بخشی در

از آنجایی که تراکیت‌ها کاربرد چشمگیری در شناسایی

* m.modjarrad@urmia.ac.ir

۱۹۸۷) یا به همراه سنگ‌های بازالتی درون صفحه‌ای Causens *et al.*, (۲۰۰۳) و جزیره‌های قناری (Freundt-Malecha *et al.*, 2001) یا در کنار سنگ‌های درون صفحه‌ای قاره‌ای، مانند Oki-Dozen ژاپن (Brenna *et al.*, ۲۰۱۵)، جزیره‌ای در کره جنوبی (Brenna *et al.*, ۲۰۱۴) و پهنه‌هایی در چین (Wei *et al.*, 2007) دیده شده‌اند. تراکیت‌ها بیشتر به همراه طیف کاملی از سنگ‌های مافیک تا فلسیک دیده می‌شوند؛ به گونه‌ای که گاه در فاصله ترکیب‌ها، نبوده‌های ترکیبی (Daly Gap) دیده می‌شوند و میان دو سازنده پایانی ترکیب پیوستگی برپا نیست (Clague, 1978; Ferla and Meli, 2006).

آداکیت نوعی سنگ کمیاب در سیستم کمان‌های مدرن یا در پهنه‌های برخورد کمان/قاره است. نخست این واژه برای ماگماهایی به کار برده شد که سازنده‌های آنها از ذوب‌بخشی تختال اقیانوسی فرورونده جدا شده بودند (Defant and Drummond, 1990)؛ اما امروزه روشن شده است آداکیت چه‌بسا در پی ذوب‌بخشی پوسته زیرین ضخیم‌شده یا تبلوربخشی نیز پدید می‌آید (Defant *et al.*, 2002; Kay and Kay, 2002; Chung *et al.*, 2003; Castillo, 2006; Wen *et al.*, 2008; Goss and Kay, 2009). این دو دسته ماگما با شناساگرهای زمین‌شیمیایی (مانند: نسبت‌های La/Yb و Sr/Y، محتوای MgO و Na₂O یا کمیت‌های ایزوتوپی) شناسایی می‌شوند.

درباره سنگ‌های آذرین بیرونی مهاباد، به انجام کار سنگ‌شناسی برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی، رده‌بندی سنگ‌های آذرین منطقه و نیز بررسی احتمال پدیدآمدن واحدهای اسیدی و حد واسط از ماگمای مادر بازالتی نیاز است. آنچه از مقاله بر می‌آید، لازم است ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ مهاباد اصلاح شود و تنوع سنگ‌شناسی برای سنگ‌های آذرین بیرونی پلیوکوترنر در نظر گرفته شود.

پیدایش ماگما دارند (Ashwal *et al.*, 2016)، اهمیت بالایی دارند. ماگماتیسم دوکرانه‌ای (اسیدی - بازیگ) ویژگی محیط‌های کشتی مانند ریفت‌های قاره‌ای (Ayalew and Yirgu, 2003; Peccerillo *et al.*, 2003) و نیز پهنه‌های پشت کمان است (Shinjo and Kato, 2000). در چنین محیط‌هایی بازالت‌ها در حجم‌های وسیع با گدازه‌های روان و ویژگی‌های درون صفحه‌ای به همراه حجم‌های متغیری از سنگ‌های ولکانیک اسیدی چه از دیدگاه زمانی و چه مکانی برونزد دارند (Epinoza *et al.*, 2008). در چنین موقعیتی، رویداد ولکانیسم مافیک معمولاً مرتبط با بالآمدگی گوشته‌ای به همراه تأثیراتی است که در سست کره و سنگ کره به خود گرفته است. به باور برخی پژوهشگران، خاستگاه سنگ‌های اسیدی تراکیتی یا ذوب‌بخشی سنگ‌های پوسته‌ای (آناکسی) یا بازالت‌های زیر صفحه‌ای (under plated) است که درباره بازالت‌های زیر صفحه‌ای، بازالت‌ها به‌طور مستقیم از ذوب‌بخشی سنگ‌های گوشته جداش یافته‌اند (Tchameni *et al.*, 2001).

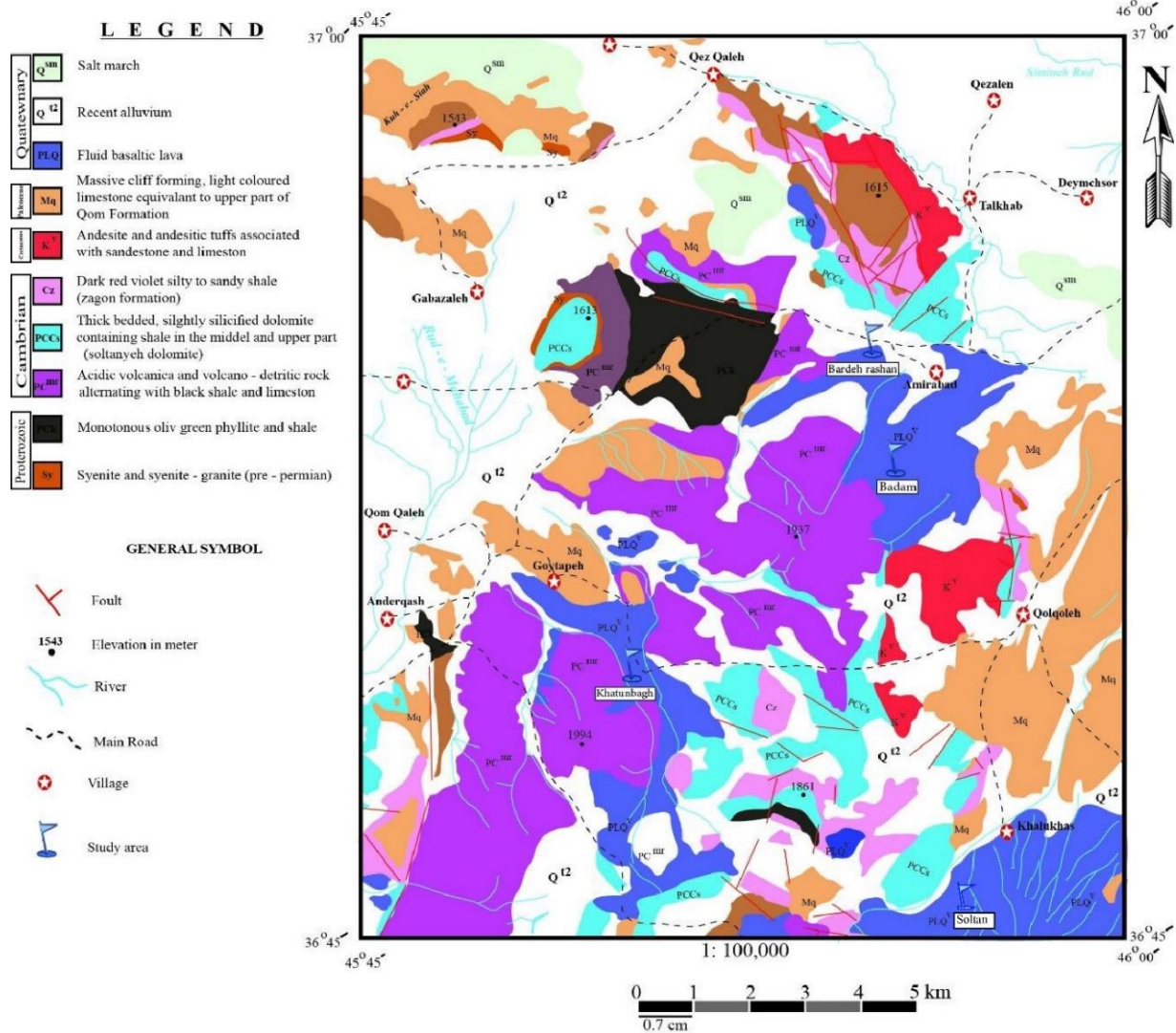
تفریق ماگماهای مافیک با خاستگاه گوشته‌ای که در شرایط سیستم‌های باز (مانند همراهی با ذوب‌بخشی سنگ‌های پوسته‌ای، هضم پوسته افزون بر تبلوربخشی - AFC - ماگماهای بازالتی و آمیختگی ماگماها) رخ می‌دهد شاید یکی از چندین سازوکارهایی باشد که در پیدایش مجموعه‌های ماگمایی اسیدی - بازیگ نقش دارند (Whalen *et al.*, 1987; Mingram *et al.*, 2000; Litvinovsky *et al.*, 2002; Vernikovskiy *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2005).

به‌طور تبیین، تراکیت‌ها پیامد تبلوربخشی پیشینه از ماگماهای بازالتی دانسته می‌شوند (Ashwal *et al.*, 2016). این گروه از سنگ‌ها در مقیاس‌های کوچک در مجموعه‌های ریفت قاره‌ای، مانند ریفت خاور آفریقا در کنیا و تانزانیا (Baker,

زمین‌شناسی منطقه

منطقه بررسی‌شده، در خاور ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ مهاباد در استان آذربایجان غربی جای گرفته است. طول جغرافیایی خاوری منطقه برای بازالت‌های بخش‌های سه‌گانه بادام، بردرشان و خاتون‌باغ از $45^{\circ}48'57''$ تا $45^{\circ}58'11''$ و عرض جغرافیایی شمالی آن $36^{\circ}49'33''$ تا $36^{\circ}55'26''$ است. منطقه کوه‌سلطان نیز در طول‌های جغرافیایی خاوری $36^{\circ}39'$ تا $36^{\circ}45'$ و عرض‌های جغرافیایی

شمالی $45^{\circ}51'$ تا $45^{\circ}57'$ جای دارد (شکل ۱). سنگ‌های سنگ‌های آذرین بیرونی بررسی‌شده در این پژوهش در منطقه بررسی‌شده عموماً روی واحدهای کهن‌تر از خود جای گرفته‌اند که آهک و مارن‌های به سن پلیوسن هستند (Kholghi et al., 2004). بیشتر آتشفشان‌های جوان ایران فعالیت خود را از میوسن، به‌ویژه میوسن بالایی یا میوپلیوسن، آغاز کرده‌اند و فعالیت آنها تا کواترنر ادامه یافته است (Moeinvaziri, 1998).



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مهاباد (برگرفته از: (Aghanabati (۲۰۰۵) (جایگاه نمونه‌برداری از مناطق چهارگانه بادام، بردرشان، خاتون‌باغ و کوه‌سلطان در مستطیل‌های سفیدرنگ و با پرچم آبی نشان داده شده‌اند)

است (Fletcher *et al.*, 2006) (شکل ۲). سرعت این نوع فرسایش به تمرکز واکنش دهنده‌ها، سرعت واکنش، سرعت انتقال و ویژگی‌های مکانیکی سنگ بستگی دارد. درباره کوه‌سلطان، قله‌های نوک‌تیز و دیواره‌های بلند و پرشیب، دره‌های ژرف با دیواره‌های قائم یا نزدیک به قائم در سراسر منطقه دیده می‌شوند. برونزدها در منطقه خاتون‌باغ، بردرشان و بادام کمابیش کم‌شیب و هموارترند. گفتنی است انکلاوهای تیره‌تری درون سنگ‌های روشن کوه‌سلطان دیده می‌شوند (شکل ۳) که جداگانه نمونه‌برداری و ۳ نمونه نیز تجزیه شیمیایی شدند.

درباره پیشینه پژوهش در منطقه افزون‌بر دو پایان‌نامه کارشناسی ارشد (Mouloudivand, 2017; Noukam, 2016) و یک بررسی کلی روی بازالت‌های شمال‌باختری (Amel *et al.*, 2008) که از این ناحیه تنها یک نمونه برداشت و بررسی کرده‌اند، یک مقاله همایشی نیز در اینبار موجود است (Shojaeei *et al.*, 2012). اینها همه بررسی‌های انجام‌شده در این ناحیه‌اند. نقشه زمین‌شناسی یک‌صد هزارم سازمان (تهیه‌شده با نظارت (Aghanabati 2005)) نیز با یک ایراد بسیار آشکار، همه سنگ‌های آذرین بیرونی مهاباد را بازالت با یک طرح و سن و ترکیب دانسته است. البته در توضیح ورقه یک‌صد هزارم، دو نمونه از سنگ‌های آذرین بیرونی به‌نام پلیوکواترن دانسته شده‌اند. از این‌رو، دلیل این اشتباه شمار بسیار کم نمونه برای تهیه نقشه دانسته می‌شود. جایگاه نمونه‌برداری‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

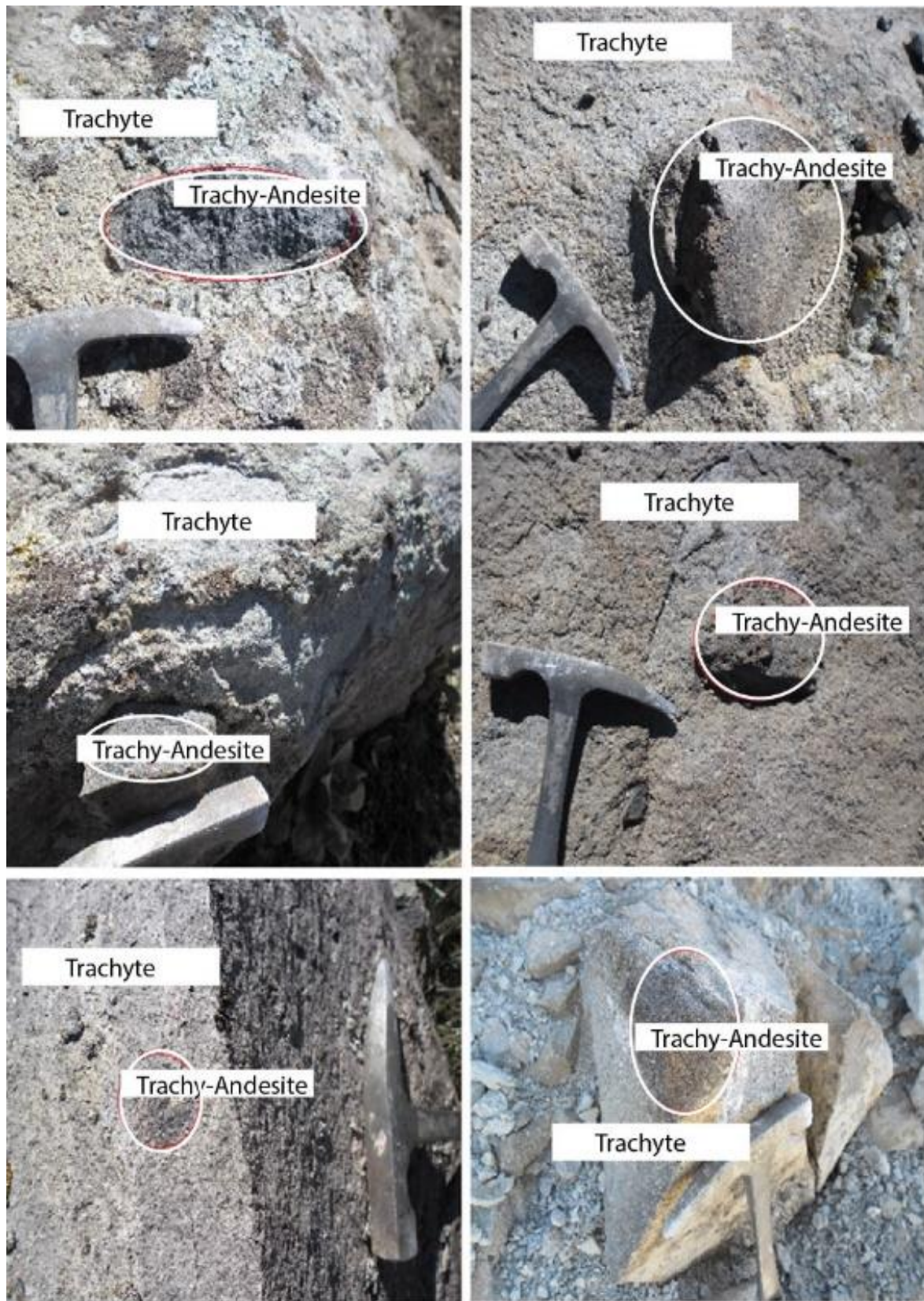
گدازه‌های بازالتی آلکالن کواترنی هنگام فاز کششی از راه شکستگی‌های فراوانی به سطح زمین رسیده‌اند که روند بیشترشان خطی است و ارتباط روشنی با گسل‌های اصلی دارند.

بررسی سنگ‌های گابرویی-دیوریتی در نزدیکی شمال‌باختری منطقه بررسی‌شده که بخشی از پلوتون پسوه (Mazhari *et al.*, 2011) به‌شمار می‌روند نشان می‌دهد این سنگ‌ها سرشت کالک‌آلکالن دارند. به باور این پژوهشگران، این سنگ‌ها در پی فرورانش مایل نئوتتیس به زیر صفحه ایران پدید آمده‌اند. افزون‌بر آنها، توده‌های نفوذی از گرانیت‌ها و همچنین، سنگ‌های بازیک کالک‌آلکالن تا برخی از پلوتون‌هایی با ترکیب آلکالن را نیز در همین منطقه شناسایی کرده‌اند که مستقیماً در ارتباط با فرورانش مایل نئوتتیس به زیر صفحه ایران پدید آمده‌اند. افزون‌بر آنچه گفته شد، برخی پژوهشگران (مانند: Ghalamghash *et al.*, 2003) پلوتون‌های گرانیتی با سرشت کالک‌آلکالن در اطراف نقده (۱۰۰ کیلومتری شمال‌باختری منطقه بررسی‌شده) شناسایی کرده‌اند که با فرورانش مایل نئوتتیس مرتبط‌اند. همچنین، توده‌های گابرو-دیوریتی در کوه پریشان جنوب قروه (جنوب محدوده مورد بحث) از نوع کمان و با احتمال آمیختگی دو ماگمای اسید و بازیک گزارش شده‌اند (Torkian *et al.*, 2015).

دبی دیاکلازی بازالت‌های خاتون‌باغ و تجزیه پوست‌پیزی آنها از دبی‌های دیده‌شده در منطقه مهاباد هستند (شکل ۲). آب‌های نافذ کم‌کم باز شدن شکاف‌های دیاکلازی و تجزیه سانتریپت (به‌سوی مرکز) را به‌دنبال داشته‌اند که تجزیه پوست‌پیزی یکی از پیامدهای آن



شکل ۲- نمای صحرائی از: (A) منطقه کوه سلطان؛ (B) گسل اصلی در منطقه کوه سلطان؛ (C) چگونگی فرسایش تراکیت‌های کوه سلطان؛ (D، E تا H) برونزد و فرسایش بازالت‌ها در مناطق سه‌گانه بادام، بردرشان و خاتون‌باغ



شکل ۳- انکلاوهای تراکی‌آندزیت در تراکیت که با آن فراگرفته شده‌اند (این پدیده در کوه‌سلطان رایج است. از این‌رو، تراکیت‌ها آخرین بخش‌های آذرین بیرون‌ریخته بر سطح زمین در مهاباد هستند)

جدول ۱- چکیده‌ای از سنگ‌نگاری منطقه بردرشان، بادام و خاتون‌باغ مهاباد به‌همراه جایگاه نمونه‌برداری‌ها (X: فراوانی به‌اندازه کانی‌های اصلی؛ x: فراوانی به‌اندازه کانی‌های فرعی)

Sample No.	G.R.	Ol	Cpx	Pl	Bt	Opq	A
۹۵.۰۰.۵.۱	E 45° 50' 42", N 36° 49' 42"	X	X	x			
۹۵.۰۰.۰.۱	E 45° 54' 18", N 36° 54' 29"	X			x	x	x
۹۵.۰۰.۱۹	E 45° 55' 6", N 36° 52' 43"	X	X	X			
۹۵.۰۰.۰	E 45° 55' 9", N 36° 52' 36"	X	X	X			
۹۵.۰۰۰.۰۱۵	E 45° 57' 15", N 36° 52' 21"	X	X			x	
۹۵.۰۰.۱۰	E 45° 57' 48", N 36° 51' 19"	X	X	X			
۹۵.۰۰.۱۱	E 45° 57' 36", N 36° 53' 54"		X	x		x	
۹۵.۰۰.۰۷	E 45° 39' 31", N 36° 45' 53"	X					
۹۵.۰۰.۱۲	E 45° 39' 35", N 36° 45' 33"		X		x	x	
۹۵.۰۰.۱۰.۱	E 45° 29' 2", N 36° 46' 50"	X	X	x		x	
۹۵.۰۰.۱۹۰	E 45° 28' 44", N 36° 46' 49"	X	X				
۹۵.۰۰.۰۲	E 45° 28' 34", N 36° 46' 38"	X	X	X			
۹۵.۰۰.۰۸	E 45° 37' 15", N 36° 41' 30"	X		X			
۹۵.۰۰.۰۲۰	E 45° 37' 15", N 36° 41' 30"	X	X	x			
۹۵.۰۰.۵.۳	E 45° 37' 8", N 36° 41' 30"	X	X	X		x	

جدول ۲- چکیده‌ای از سنگ‌نگاری سنگ‌های آذرین بیرونی کوه‌سلطان به‌همراه جایگاه نمونه‌برداری‌ها (X: فراوانی به‌اندازه کانی‌های اصلی؛ x: فراوانی به‌اندازه کانی‌های فرعی)

Sample No.	G.R.	Pl	Kfs	Am	Cpx	Bt	Ttn	Opq	A
۹۳.۰۰.۰۹	E 36° 43' 44", N 45° 56' 05"	X	X	X	x	x		x	
۹۳.۰۰.۰۱۱	E 36° 43' 46", N 45° 56' 02"	X	X	X		x		x	
۹۳.۰۰.۰۳۲	E 36° 43' 42", N 45° 56' 07"	X	X	x	x		x	x	
۹۳.۰۰.۰۳۴	E 36° 43' 45", N 45° 56' 23"	X	X	x	x	x		x	
۹۳.۰۰.۰۳۷	E 36° 43' 53", N 45° 56' 14"	X	X	X		x		x	
۹۳.۰۰.۰۴۱	E 36° 43' 42", N 45° 56' 13"	X	X	X		x		x	
۹۳.۰۰.۰۴	E 36° 43' 42", N 45° 56' 03"	X	X	x			x	x	
۹۳.۰۰.۰۱۴	E 36° 43' 40", N 45° 56' 01"	X	X	X	x		x	x	x
۹۳.۰۰.۰۱۶	E 36° 43' 40", N 45° 56' 00"	X	X	x	x		x	x	x
۹۳.۰۰.۰۱۸	E 36° 43' 38", N 45° 56' 02"	X	X	x		x	x	x	x
۹۳.۰۰.۰۲۲	E 36° 43' 38", N 45° 56' 04"	X	X	x	x		x	x	
۹۳.۰۰.۰۲۳	E 36° 43' 40", N 45° 56' 00"	X	X	x			x	x	
۹۳.۰۰.۰۳۰	E 36° 43' 41", N 45° 56' 06"	X	X	x	x		x	x	
۹۳.۰۰.۰۳۸	E 36° 43' 38", N 45° 56' 14"	X	X	X	x	x	x	x	
۹۳.۰۰.۰۴۸	E 36° 43' 30", N 45° 55' 50"	X	X	x		x	x	x	
۹۳.۰۰.۰۵۰	E 36° 43' 31", N 45° 55' 50"	X	X	X		x	x	x	x
۹۳.۰۰.۰۴۵	E 36° 43' 41", N 45° 56' 06"	X	X	X	x	x	x	x	x
۹۳.۰۰.۰۴۲	E 36° 43' 38", N 45° 56' 12"	X	X	x				x	x
۹۳.۰۰.۰۳۱	E 36° 43' 42", N 45° 56' 06"	X	X	x	x		x	x	x
۹۳.۰۰.۰۳۳	E 36° 43' 39", N 45° 56' 06"	X	X	X	x				
۹۳.۰۰.۰۲۹	E 36° 43' 41", N 45° 56' 06"	X	X	x	x				
۹۳.۰۰.۰۳۶	E 36° 43' 54", N 45° 56' 21"	X	X	x	x	x			

مقاله پژوهشی

روش انجام پژوهش

در این مرحله، در منطقه‌های خاتون‌باغ، بادام و بردرسان مهاباد نمونه‌برداری‌های تصادفی انجام شد. برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی نمونه‌های بررسی‌شده، پس از نمونه‌برداری و بررسی‌های سنگ‌نگاری، شمار ۹ نمونه تازه و سالم، از میان ۷۰ نمونه برداشت‌شده برگزیده شدند و برای انجام تجزیه شیمیایی به شرکت ALS Mineral کشور ایرلند فرستاده شدند. در این آزمایشگاه، روش ICP-AES برای دستیابی به فراوانی اکسید عنصرهای اصلی و فلزهای واسطه و روش ICP-MS (فوزیون

بورالیتیم) برای اندازه‌گیری برخی عنصرهای کمیاب و کمیاب خاکی به کار برده شدند. درباره کوه‌سلطان نیز ۱۰ نمونه سنگی (سه نمونه تراکی‌آندزیتی و ۷ نمونه تراکیتی) برای بررسی عنصرهای اصلی، کمیاب و خاکی کمیاب برگزیده و در شرکت Actlabs کانادا تجزیه شیمیایی شدند. در این آزمایشگاه، روش FUS-ICP برای دستیابی به فراوانی اکسید عنصرهای اصلی و روش‌های INAA و نیز TD-ICP برای اندازه‌گیری فراوانی کمیاب و خاکی کمیاب به کار برده شدند. جدول‌های ۳ و ۴ داده‌های به‌دست‌آمده را نشان می‌دهند.

جدول ۳- داده‌های اکسید عنصرهای اصلی (بر پایه درصدوزنی) و فرعی (بر پایه ppm) به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی بازالت‌های مهاباد

Sample No.	۹۵.۰۰.۱۰	۹۵.۰۰.۱۱	۹۵.۰۰.۱۲	۹۵.۰۰.۱۷	۹۵.۰۰.۱۸	۹۵.۰۰.۲۰	۹۵.۰۰.۲۳	۹۵.۰۰.۲۴	۹۵.۰۰.۲۵	Detection Limit
SiO ₂	42	41.1	38.9	43.2	42.4	41.5	47.3	43.7	41	
Al ₂ O ₃	12.85	12.4	11.65	12.1	12.05	12.6	14.65	12.5	12.6	
Fe ₂ O ₃	9.28	9.05	8.3	9.47	9.38	9.22	7.22	9.22	9.07	
CaO	12.85	13.7	16.5	13.1	12.35	13	11.95	11.45	13.8	
MgO	10.25	10.1	9.7	12.2	11.65	10.35	3.97	11.65	10.2	
Na ₂ O	3.58	3.2	3.78	3.37	2.67	3.61	3.83	2.57	4.39	
K ₂ O	2.28	2.21	0.54	0.48	1.79	1.98	2.52	0.63	0.4	
Cr ₂ O ₃	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.02	0.06	0.04	
TiO ₂	1.63	1.51	1.41	1.57	1.54	1.57	1.13	1.45	1.56	
MnO	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14	0.11	0.14	0.15	
P ₂ O ₅	1.47	1.4	1.34	1.27	1.27	1.47	0.81	1.07	1.43	
SrO	0.26	0.24	0.24	0.24	0.22	0.25	0.18	0.2	0.26	
BaO	0.13	0.12	0.11	0.12	0.12	0.14	0.14	0.17	0.13	
La	129	120	120.5	121	120.5	131	97	94.5	132	0.5
Ce	221	206	212	209	207	228	162.5	169	227	0.5
Pr	21.6	20.4	21	20.9	20.5	22.3	15.75	17	22.8	0.3
Nd	86.4	81.1	82.5	84	83	89	61.3	68.5	89.5	0.1
Sm	11.35	10.85	11.3	11.2	10.95	12	8.46	9.72	11.7	0.03
Eu	3.3	3.08	3.18	3.08	2.94	3.19	2.11	2.61	3.18	0.03
Gd	7.85	7.28	7.53	7.5	7.56	8.21	5.56	6.88	8.18	0.05
Tb	0.96	0.93	0.91	0.96	0.97	1.01	0.7	0.9	0.96	0.01
Dy	4.73	4.94	4.78	4.59	4.5	5.38	3.81	4.49	5.08	0.05
Ho	0.83	0.83	0.85	0.77	0.8	0.84	0.66	0.78	0.82	0.01

* m.modjarrad@urmia.ac.ir

Er	2.18	2.22	2.31	1.99	2.17	2.33	1.76	2.08	2.15	0.03
Tm	0.26	0.25	0.22	0.26	0.28	0.24	0.22	0.25	0.25	0.01
Yb	1.78	1.8	1.75	1.57	1.54	1.92	1.63	1.71	1.71	0.03
Lu	0.23	0.26	0.23	0.21	0.22	0.25	0.21	0.21	0.25	0.01
Ba	1150	1080	1070	1115	1040	1285	1280	1565	1200	0.5
Co	46	46	41	51	50	47	30	50	46	1
Cr	330	320	320	450	430	330	170	470	320	10
Cs	1.43	1.46	1.43	1.23	1.09	1.41	1.22	5.76	1.28	0.01
Cu	55	61	55	63	64	45	33	69	67	1
Ga	17	16.6	16.5	17.8	17.2	17.7	20.8	18.1	18.1	0.1
Hf	4.7	4.7	6.3	4.5	4.9	5.1	4.7	4.9	5	0.2
Ni	221	217	214	364	330	232	54	333	227	1
Pb	13	21	125	12	13	13	11	13	66	2
Rb	43.6	41.1	14.3	20.8	36.9	45.4	50.8	15.9	25.8	0.2
Sc	21	20	19	21	20	20	12	21	21	1
Sr	1935	1810	1940	1950	1805	2000	1450	1620	2100	0.1
Ta	1.9	1.9	1.9	1.4	1.8	2.1	1.3	1.4	2	0.1
Th	12.7	12.1	12.1	11.55	11.85	12.6	15.55	12.4	12.25	0.05
U	2.8	2.95	2.55	2.23	2.71	2.94	3.31	2.86	2.68	0.05
V	193	178	180	192	186	202	96	179	200	5
Y	24.1	23	23.4	22.5	22.5	25	19.7	22.8	24.5	0.5
Zn	98	98	113	104	101	98	86	93	123	2
Zr	225	208	281	206	222	224	221	213	223	2

جدول ۴- داده‌های اکسید عنصرهای اصلی (برپایه درصدوزنی) و فرعی (برپایه ppm) به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی سنگ‌های آذرین بیرونی کوه‌سلطان مه‌باد (T: تراکیت؛ T-A: تراکی‌اندزیت)

Sample No.	93.SM.R11	93.SM.R16	93.SM.R23	93.SM.R29	93.SM.R30	93.SM.R31	93.SM.R36	93.SM.R37	93.SM.R41	93.SM.R45
	T-A	T	T	T	T	T	T	T-A	T-A	T
SiO ₂	52.94	64.34	67.65	68.01	66.68	67.97	69.12	55.53	54.48	66.44
Al ₂ O ₃	17.25	14.34	14.94	15.39	14.69	14.97	15.01	17.95	18.01	14.60
Fe ₂ O ₃	6.78	2.69	2.64	3.01	2.70	2.87	2.59	6.78	6.73	2.53
CaO	8.09	5.15	2.21	2.00	3.55	2.92	1.95	6.67	6.26	3.73
MgO	2.72	0.88	0.63	0.77	0.43	0.82	0.76	2.58	2.63	0.63
Na ₂ O	4.60	4.90	4.61	5.05	5.00	4.88	5.05	4.73	4.73	4.86
K ₂ O	3.44	4.08	4.07	4.01	4.01	4.20	4.37	3.55	3.46	4.12
TiO ₂	0.716	0.322	0.30	0.342	0.326	0.33	0.299	0.712	0.702	0.301
MnO	0.16	0.10	0.06	0.1	0.07	0.13	0.1	0.17	0.14	0.08
P ₂ O ₅	0.77	0.24	0.26	0.24	0.22	0.24	0.2	0.77	0.75	0.24
LOI	1.85	3.03	2.42	0.9	0.83	1.53	0.78	1.44	0.63	2.21
La	124	65.2	75	79.3	68.7	66.3	74.3	119	120	66.6
Ce	184	87	99	103	107	92	96	165	181	105
Nd	95	40	26	48	21	28	50	58	64	45
Sm	8.7	3.6	3.6	3.5	3.8	3.5	3	8.7	9	3.3
Eu	2	0.9	0.5	0.8	0.8	0.8	0.5	1	1.6	0.5
Yb	2	1.3	0.7	1.7	1.7	1.1	1.6	1.4	2.1	1.8
Lu	0.3	0.17	0.12	0.37	0.26	0.25	0.23	0.34	0.43	0.34
As	16	7	17	6	18	17	19	8	7	17
Ba	1940	1130	1140	1110	1080	1080	1120	1800	1800	1070
Be	3	5	6	4	5	5	5	4	3	5
Co	21	8	<1	<1	<1	8	<1	22	21	9
Cs	<0.5	5.4	8.6	5.2	9.8	10.7	20	<0.5	<0.5	9.8
Cu	27	15	37	11	14	17	14	54	28	12
Hf	6.5	5.8	7.1	6.5	5.2	4.8	5.8	7.4	7.2	6.3
Ni	10	7	9	10	9	10	8	15	12	14
Pb	12	26	40	34	29	22	35	17	13	29
Rb	<20	210	160	180	160	200	200	<20	<20	280
Sb	<0.2	1.9	2.2	2.2	2.2	1.3	2.1	1.5	2	1.8
Sc	7.7	2.8	2.7	3.3	3.2	3.1	2.3	7.3	7.3	3.1
Sr	1816	814	988	980	757	775	732	1649	1661	766
Th	32	41.4	46	45.5	44.7	47.8	49.7	31.9	37	48.3
U	9.1	13.3	13.2	13.5	17.2	15.6	16.4	7.8	7.4	13.5
V	129	44	44	45	34	49	50	126	129	39
Y	21	13	11	24	13	21	20	23	22	12
Zn	78	54	46	58	51	59	58	127	80	46
Zr	233	174	184	188	180	189	188	245	243	189

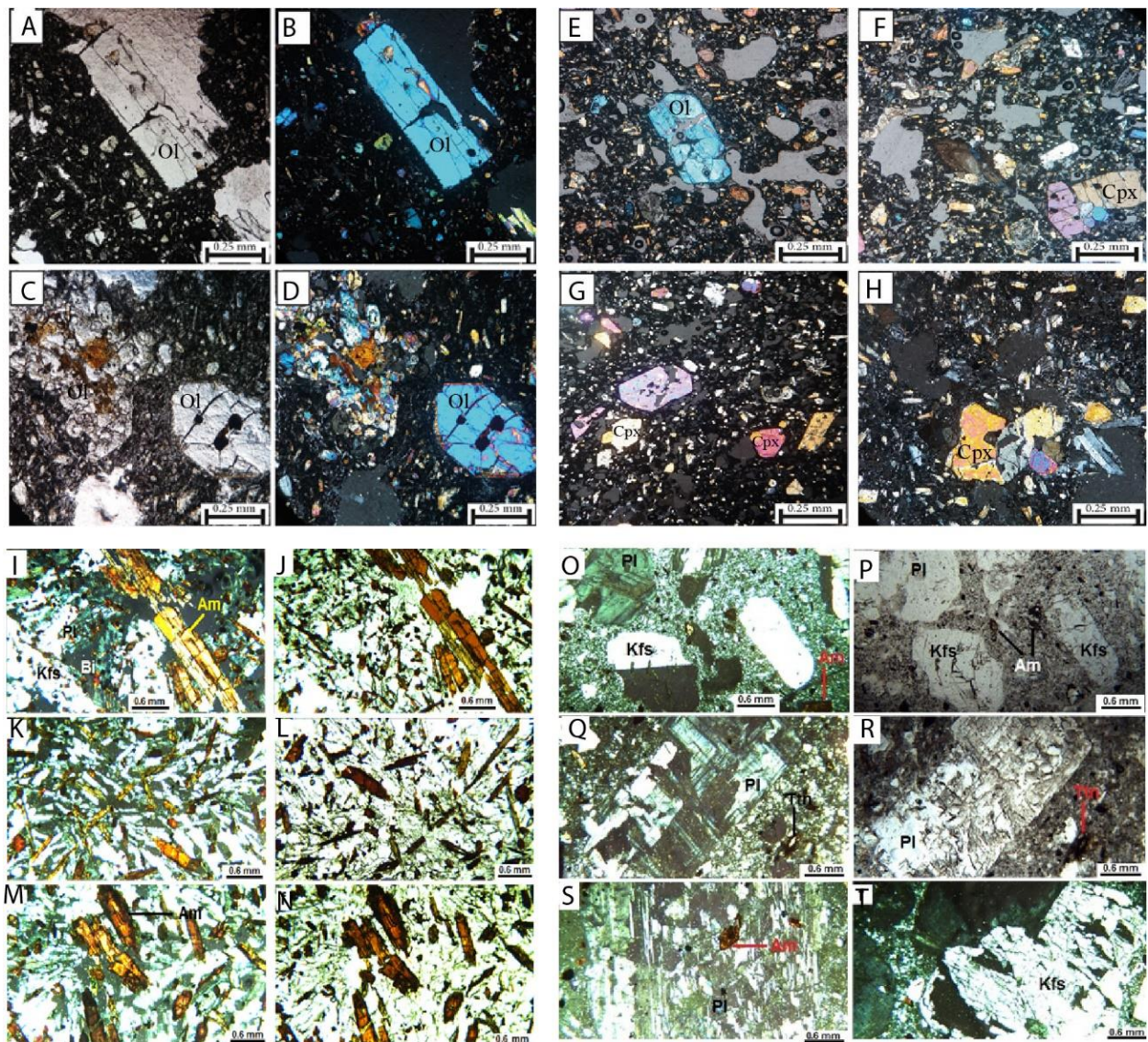
سنگ‌نگاری

بازالت‌ها: بلورهای مافیک الیوین، پلاژیوکلاز و پیروکسن از کانی‌های اصلی بازالت‌ها هستند. این سنگ‌ها بیشتر بافت هیالوپورفیری و وزیکولار (پرشده یا تهی مانده) دارند و فنوکریست‌های آنها شکل دار تا نیمه‌شکل دار هستند (شکل‌های ۴-A و ۴-B). بیشتر بلورهای الیوین، به‌صورت بلورهای درشتی هستند که در حاشیه ایدینگسیتی شده‌اند. کلینوپیروکسن‌ها به اورالیت تجزیه شده‌اند. همچنین، در آنها منطقه‌بندی و ماکل ساعت‌شنی دیده می‌شود و بلورهای پلاژیوکلاز به‌صورت میانبار در آنها یافت می‌شوند (شکل‌های ۴-C و ۴-D). در برخی نمونه‌ها، بلورهای شکل دار تا نیمه‌شکل دار کلینوپیروکسن بافت گلومروپورفیریتیک نشان می‌دهند (شکل‌های ۴-G و ۴-H). پلاژیوکلازها گاه در پی دگرسانی‌ها سوسوریتی شده‌اند. آمفیبول به مقدار اندک بیوتیت از کانی‌های فرعی هستند.

انکلاوهای تراکی آندزیتی: آلکالی‌فلدسپارها (۵۰-۴۰ درصد حجمی)، پلاژیوکلازها (۴۵-۳۵ درصد حجمی)، کانی‌های فرومنیزین آمفیبول (۲۰-۱۵ درصد حجمی) از کانی‌های اصلی هستند. همچنین، بیوتیت (۷-۳

درصد حجمی)، کلینوپیروکسن (۱۰-۵ درصد حجمی) و کدر (۱۰-۵ درصد حجمی) از کانی‌های فرعی به‌شمار می‌روند (شکل‌های ۴-I تا ۴-N). سریسیت نیز از کانی‌های دگرسانی در تراکی آندزیت‌هاست. بافت گلومروپورفیری بافت غالب در تراکی آندزیت‌هاست (شکل ۴-I). بیشتر کانی‌های تراکی آندزیت‌ها به‌صورت بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار و گهگاه شکل دار (شکل ۴-M) هستند.

تراکیت‌ها: در تراکیت‌ها فنوکریست‌های پلاژیوکلازها (کمتر از ۳۰ درصد حجمی) و آلکالی‌فلدسپار (بیشتر از ۶۰ درصد حجمی)، از کانی‌های اصلی به‌شمار می‌روند (شکل‌های ۴-O تا ۴-T). کانی‌های فرومنیزین بیوتیت (۷-۲ درصد حجمی) و آمفیبول (۱۵-۱۰ درصد حجمی) با فراوانی کمتر همراه آنها هستند و بافت‌های میکروولیت پورفیری، گلومروپورفیری، هیالوپورفیری، پویی کیلیتیک و گاه اینترسرتال دارند. کلسیت، سریسیت و کلریت کانی ثانویه و کانی‌های کدر (۱۰-۵ درصد حجمی) و تیتانیت (۵-۳ درصد حجمی)، از کانی‌های دیگر در تراکیت‌ها هستند (شکل‌های ۴-O تا ۴-T).



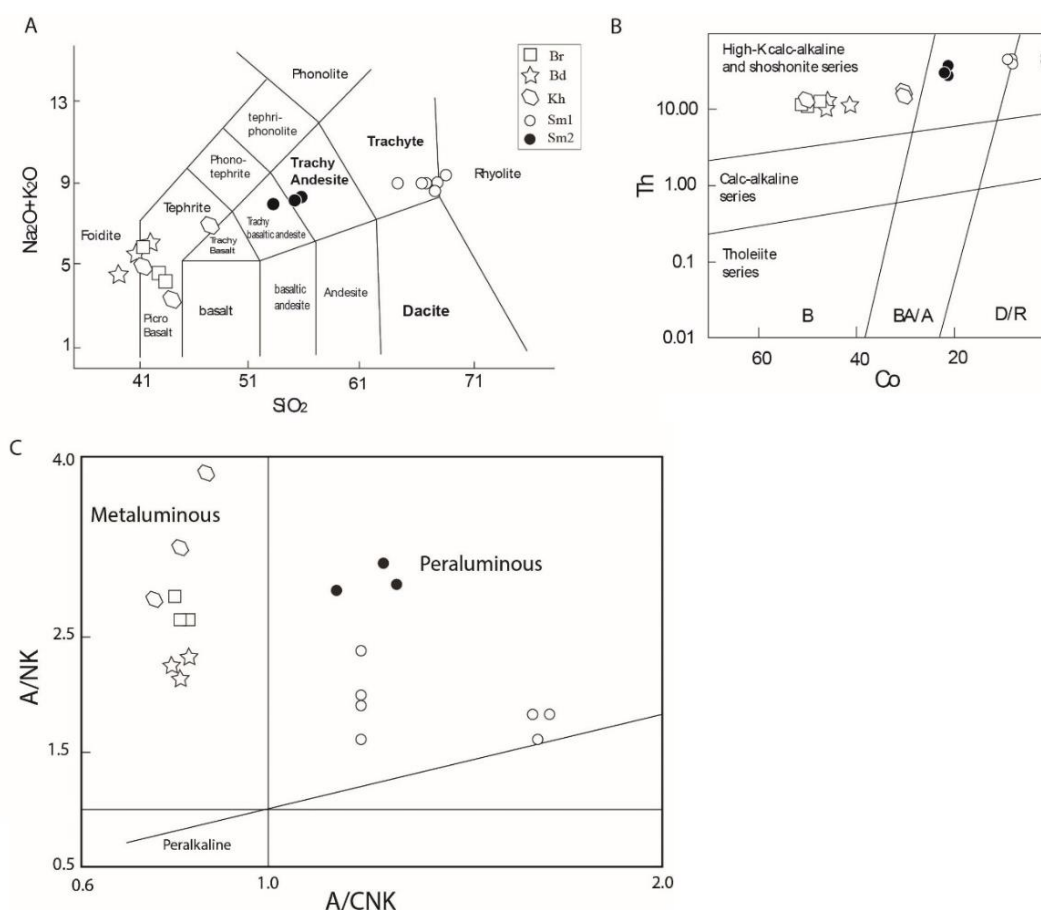
شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی سنگ‌نگاری از همه سنگ‌های آذرین بیرونی منطقه مهاباد: (A-H) بازالت‌های مناطق بادام، بردرشان و خاتون‌باغ؛ (I-N) تراکی‌اندزیت‌ها؛ (O-T) تراکیت‌ها (نام‌های اختصاری کانی‌ها برگرفته از Kretz (۱۹۸۳) هستند)

زمین‌شیمی

در نمودار مجموع آلکالی در برابر سیلیس (شکل ۵- A)، نمونه‌های بررسی شده از مناطق بادام، بردرشان و خاتون‌باغ در محدودهٔ پیکرو بازالت، تفریت و بازالت، نمونه‌های انکلاوی تیره‌تر کوه‌سلطان در بخش تراکی‌اندزیت و نمونه‌های روشن و حجیم کوه‌سلطان در بخش تراکیتی جای گرفته‌اند. همچنین، برپایهٔ نسبت‌های میان عنصرهای کمیاب نام‌های آلکالی‌بازالت و بازالت نفلینیتی برای نمونه‌های یادشده به‌دست می‌آیند (نسبت Nb/Yb برابر Zr/Ti از Pearce و Winchester (۱۹۹۶)؛ نسبت SiO_2 برابر Zr/TiO_2 از Floyd و (۱۹۷۷)؛ Nb/Y برابر Zr/TiO_2 و SiO_2 و

در برابر Nb/Yb از Winchester و Floyd (۱۹۷۷)). همچنین، در رده بندی پیشنهادی Le Maitre (۲۰۰۲)، برپایهٔ نسبت اکسیدهای سدیم و پتاسیم نام لاتیت برای تراکی‌اندزیت‌ها به‌دست می‌آید.

برای شناسایی سری ماگمایی سنگ‌های آذرین بیرونی مهاباد از نمودار پیشنهادی Hastie (۲۰۰۷) بهره گرفته شد (شکل ۵- B). همهٔ سنگ‌های بررسی شده با سرشت کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی شناخته شدند. در شکل ۵- C، نمونه‌های بازالتی مناطق بادام، بردرشان و خاتون‌باغ در محدودهٔ متاآلومینوس و تراکیت‌ها و تراکی‌اندزیت‌های کوه‌سلطان در بخش پراآلومینوس جای گرفته‌اند.



شکل ۵- سنگ‌های آذرین بیرونی منطقه مهاباد در: A) نمودار رده‌بندی پیشنهادی Cox و همکاران (۱۹۷۹) (چهار ناحیه شامل بادام، بردرشان، خاتون‌باغ و سلطان با نماد ویژه نشان داده شده‌اند. همچنین، نمونه‌های سلطان در دو گروه تراکیتی (دایره تو خالی) و تراکی‌اندزیتی (دایره تو پر) جای گرفته‌اند؛ B) نمودار پیشنهادی Hastie (۲۰۰۷) برای شناسایی سری سنگ‌های آذرین بیرونی؛ C) نمودار پیشنهادی Shand (۱۹۴۳) برای ارزیابی ضریب اشباع از آلومین

همچنین، ژرفای بسیارِ ذوب‌بخشی برای بازالت‌ها بوده است. به باور Machado و همکاران (۲۰۰۵) و Ewart (۱۹۸۲)، غنی‌شدگی از LREE در برابر HREE ویژگی سنگ‌های آلکان و کالک‌آلکان است. در این نمودار الگوی عنصرهای خاکی کمیاب آلکالی‌بازالت‌های منطقه Tasse کانادا (Friedman, 2016) نیز پیاده شده‌اند که از دیدگاه فراوانی و نیز الگو با بازالت‌های منطقه مه‌باد همانندی دارند.

نمودارهای عنکبوتی بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه برای همه نمونه‌های بازالتی رسم و سپس برای مقایسه با انواع نیوبیم بالا، در یک نمودار در کنار هم آورده شدند (شکل ۶- B). سنگ‌های بازالتی منطقه در مقایسه با گوشته اولیه نسبت به عنصرهای LILE و LREE غنی‌شدگی و نسبت به عنصرهای HFSE و HREE تهی‌شدگی نشان می‌دهند. این پدیده در بازالت‌های منطقه پیامد ذوب‌بخشی خاستگاه و به‌جاماندن گارنت است. عنصرهای خاکی کمیاب سبک در کمترین درجه‌های ذوب‌بخشی به ماگما افزوده می‌شوند و فراوانی آنها افزایش می‌یابد. تهی‌شدگی از عنصرهایی مانند تیتانیوم و هافنیم و در کل، عنصرهای HFSE‌ها چه‌بسا پیامد تفکیک کانی‌های خاستگاه این عنصرها در هنگام تبلوربخشی در پوسته‌ی قاره‌ای یا خاستگاه تهی‌شده از عنصرهای یادشده است. غلظت زیرکنیم در مرحله پایانی تفریق ماگمایی فراوان‌تر است و از این‌رو، زیرکن بیشتر در ترم‌های جدایش یافته، یافت می‌شود. چه‌بسا غلظت کم زیرکنیم در ماگمای مادر سنگ‌های ناحیه، نبود مشارکت فاز جامد زیرکن‌دار در فرایند ذوب و همچنین، نامحلولی و نامتحرک بودن این عنصر بوده است.

الگوی عنصرهای خاکی کمیاب و عنکبوتی سنگ‌های آذرین بیرونی مه‌باد

برای بررسی الگوی عنصرهای خاکی کمیاب در سنگ‌های بازالتی جوان مناطق سه‌گانه مه‌باد، مقدار عنصرها به ترکیب کندریت بهنجارسازی شده است (شکل ۶- A). در این راستا، نتایج زیر به‌دست آمده‌اند:

در کل، عنصرهای خاکی کمیاب سنگ‌های مناطق سه‌گانه بازالتی یک روند کاهشی از La (عنصرهای خاکی کمیاب سبک یا LREE) تا Lu (عنصرهای خاکی کمیاب سنگین یا HREE) نشان می‌دهند. الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب در نمونه‌های بررسی‌شده با هم موازی هستند و از عنصرهای کمیاب سبک LREE غنی‌تر هستند. سه احتمال را برای غنی‌شدگی نمونه‌های LREE در نظر گرفته می‌شود:

(۱) خاستگاه ماگمای سنگ‌های منطقه بررسی‌شده از این عنصرها غنی باشد؛

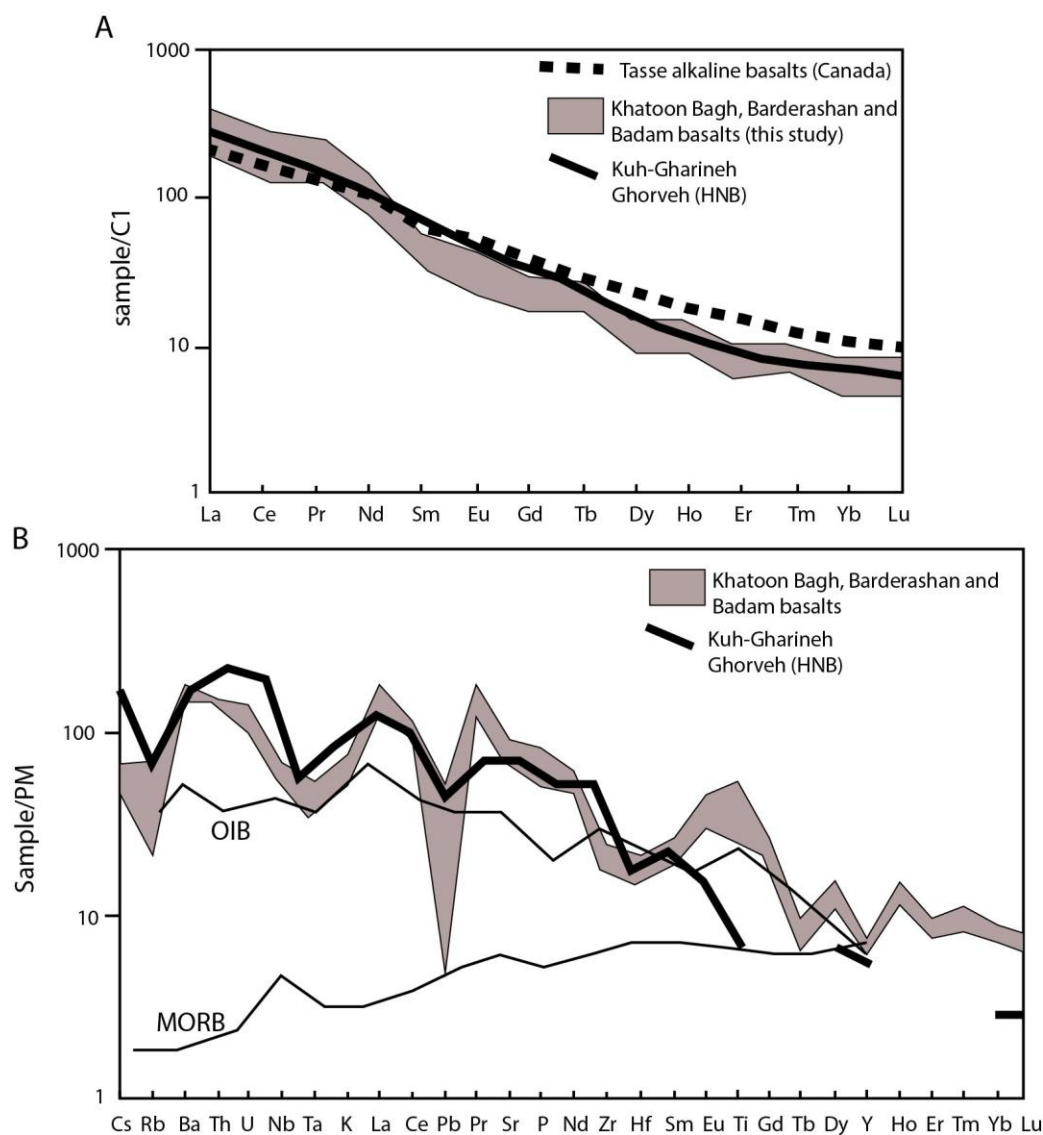
(۲) از آنجایی که LREE‌ها از HREE‌ها ناسازگارتر هستند (Krauskopf and Bird, 1995)، چه‌بسا در پی تحولات ماگمایی در سنگ‌های منطقه متمرکز شده باشند؛

(۳) عامل دیگری که غنی‌شدگی سنگ‌های یک ناحیه از LREE‌ها را به‌دنبال داشته است پیدایش این سنگ‌ها در پهنه‌های فرورانش است (Winter, 2001).

تهی‌شدگی چشمگیر این سنگ‌ها از HREE پیامد به‌جاماندن گارنت در فاز تفاله و نبود مشارکت این کانی در فرایند پیدایش مذاب دانسته می‌شود. غنی‌شدگی LREE در برابر HREE در سنگ‌های اسیدی و حد واسط کوه‌سلطان چه‌بسا پیامد آرایش پوسته‌ای، درجه کم تبلوربخشی، تجمع ناهم‌هنگ فنوکریست‌ها، تفریق کانی‌ها (Haschke et al., 2002) و

عنصرهای خاکی کمیاب سنگ‌های کوه‌سلطان یک روند کاهشی از La (عنصرهای خاکی کمیاب سبک LREE) تا Lu (عنصرهای خاکی کمیاب سنگین HREE) نشان می‌دهند.

شکل ۷ نمودارهای مربوط به الگوی عنصرهای خاکی کمیاب و عنکبوتی تراکیتی‌ها و تراکی‌اندزیتی‌های کوه‌سلطان را نمایش می‌دهد. اگرچه داده‌ها برای این ناحیه کامل نیست،



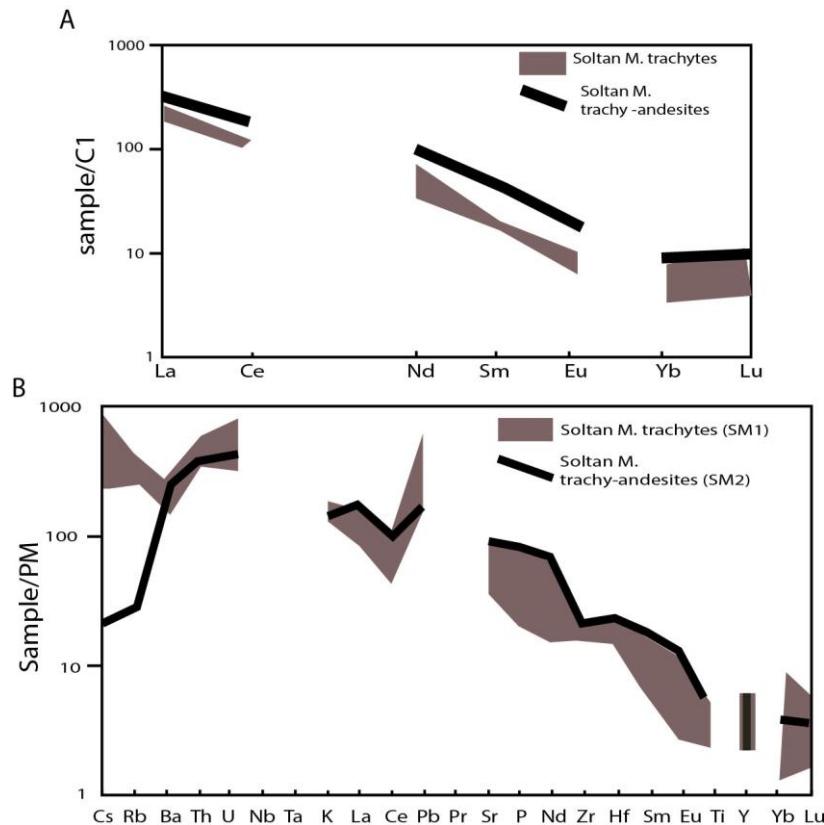
شکل ۶- A) الگوی تغییرات عنصرهای خاکی کمیاب در بازالت‌های مهاباد که به‌نچارشده به ترکیب کندریت (Nakamura, 1974) (الگوی آلکالی‌بازالت‌های منطقه Tasse کانادا (Friedman, 2016) (خط چین ضخیم) به‌عنوان ترکیب OIB؛ الگوی عنصرهای خاکی کمیاب و عنکبوتی بازالت‌های نوع بازالت‌های نیوبیم بالا (HNB) از منطقه کوه قرینه قروه (Zakaryaei et al., 2015) که در کانادا تجزیه شده‌اند با خط مشکی ضخیم)؛ B) نمودار عنکبوتی بازالت‌های مهاباد به‌نچارشده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) (ترکیب OIB از Sun و (۱۹۸۰) و MORB نرمال از Saunders و Tarney ۱۹۸۴ هستند. همچنین، الگوی عنکبوتی کوه قرینه قروه هم پیاده شده است)

Zr و Hf دیده می‌شود (شکل ۷- B). درباره تراکیتی‌ها، عنصرهای U، Pb و Th غنی‌شدگی و

در نمونه‌های تراکی‌اندزیتی، غنی‌شدگی از Pb، Cs، Th، U، Rb و تهی‌شدگی آشکاری از Ti،

سنگ‌های منطقه باشد. برپایه احتمال تفریق این گروه‌ها از ماگمای بازالتی، گمان می‌رود عنصرهای با پایداری میدان یونی بالا، بیشتر در کانی‌های تفریق‌یافته در مراحل پیشین تجمع یافته‌اند و در این تیپ‌ها غایب هستند.

HFSE و Ti تهی‌شدگی نشان می‌دهند. غنی‌شدگی در LILE چه‌بسا پیامد درجه‌های کم تا متوسط ذوب‌بخشی از خاستگاه گوشته‌ای، تحرک عنصرها هنگام دگرسانی، نقش گوشته متاسوماتیزه، آلودگی با مواد پوسته‌ای یا دخالت پوسته در پیدایش



شکل ۷- نمونه‌های سنگ‌های آذرین بیرونی کوه سلطان مهاباد در: (A) نمودار تغییرات عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت (Nakamura, 1974); (B) نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough *et al.*, 1989)

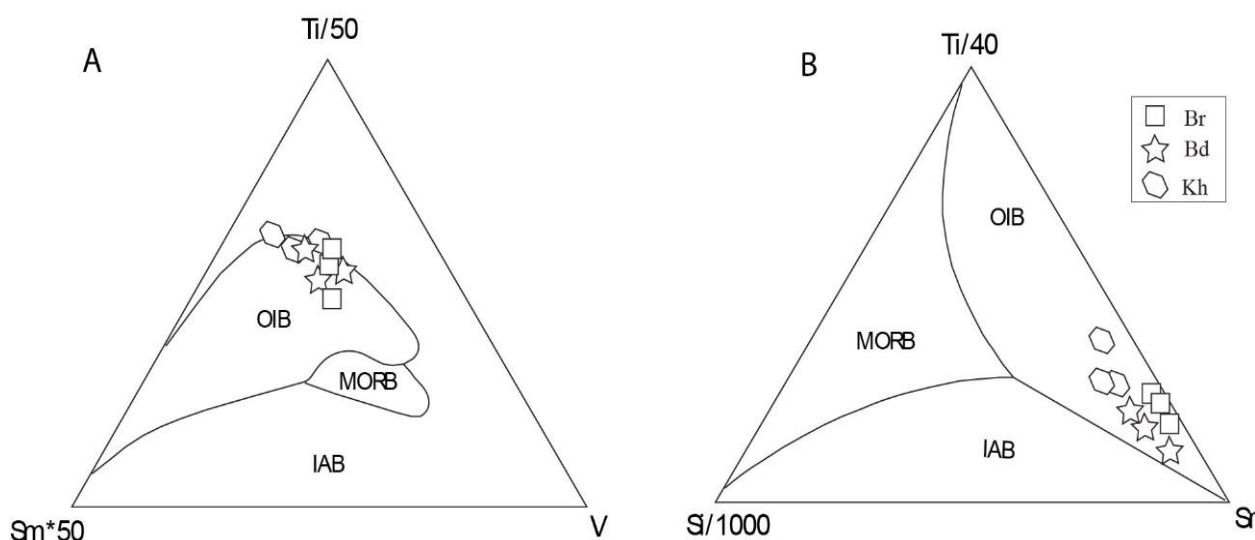
شناسایی دیگر نیز همین پهنه زمین‌ساختی را برای نمونه‌های بازالتی مناطق سه‌گانه نشان می‌دهند (مانند: Thieblemont and Tegye, 1994; Pearce, 1983; Eby, 1990; Schandl and Gorton, 2002 و ...). دیگر فاکتورهای تفکیکی در منابع نیز سرشت آلكالین مرتبط با درون‌صفحه‌ای را برای بازالت‌های مناطق سه‌گانه بازالتی نشان می‌دهند (مانند: Vasquez and Althenberger, 2005; Pearce, 1982; Floyd and Winchester, 1975; Winchester and

پهنه زمین‌ساختی پیدایش بازالت‌های مناطق سه‌گانه بادم، بردرشان و خاتون‌باغ مهاباد

با هدف شناسایی پهنه زمین‌ساختی پیدایش ماگما از نمودارهای گوناگونی بهره گرفته شد که تنها برگزیده‌ای از آنها در این مقاله آورده شده است (شکل ۸). در نمودارهای سه‌تایی پیشنهادی Vermeesch (۲۰۰۶)، نمونه‌های بازالتی بررسی شده، از نوع درون‌صفحه‌ای (نه لزوماً اقیانوسی) ارزیابی می‌شوند. معیارهای

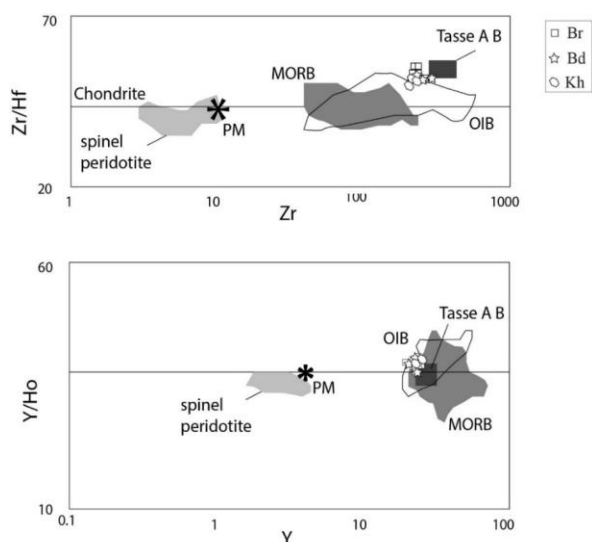
همکاران (۱۹۸۹) در شکل ۹ به نمایش درآمده‌اند که افزون بر این نکته، تشابه این بازالت‌ها با آلکالی‌بازالت‌های ناحیه Tasse کانادا (Friedman, 2016) را نیز نشان می‌دهند.

نشان‌دهنده وابستگی بازالت‌های منطقه خاتون‌باغ، بادام و بردرشان به پهنه درون‌صفحه‌ای هستند. نمودارهایی از Jochum و



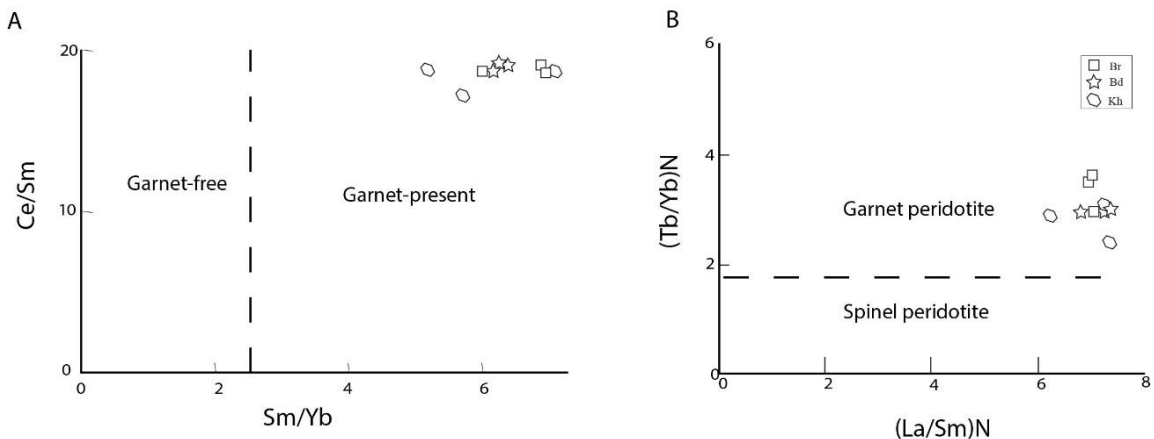
شکل ۸- بازالت‌های مناطق سه‌گانه در: A، B) نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی برای بازالت‌ها (Vermeesh, 2006) (جای‌گرفتن نمونه‌ها در محدوده OIB به معنی صفحه‌اقیانوسی نیست؛ بلکه تنها نشان‌دهنده محیط درون‌صفحه‌ای (صرف‌نظر از نوع آن) باشد)

بررسی‌هایی که برای به‌دست‌آوردن ژرفا و نوع خاستگاه ماگما روی بازالت‌های منطقه انجام شد (نمودارهایی از: Coban, 2007؛ Wang و همکاران، 2002) نشان می‌دهند خاستگاه آنها از نوع گارنت‌دار (با ژرفای زیاد خاستگاه) بوده است (شکل ۱۰). تهی‌شدگی چشمگیر از HREE نشانه گارنت در خاستگاه گوشته‌ای در این سنگ‌هاست. نسبت‌های زمین‌شیمیایی دیگر مانند نسبت بسیار بالای La_N/Yb_N (Ramos and Kay, 1992) نشان‌دهنده آهنگ ذوب کم هستند. همچنین، از دیدگاه نسبت‌های پیشنهادی Keskin (2005)، نسبت Sm/Yb در برابر La/Sm نیز نشان‌دهنده خاستگاه گوشته‌ای اسپینل-گارنت لرزولیتی برای نمونه‌های منطقه بررسی شده است. همچنین، از نمودار اکسیدآلومینیم در برابر اکسیدتیتانیوم، نمودار زیرکونیم



شکل ۹- نمودارهای تفکیک محیط پیدایش ماگما بر پایه نسبت‌های Zr در برابر Zr/Hf و نیز Y در برابر Y/Ho در مقایسه با ترکیب گوشته اولیه و کندریت (ترکیب OIB، MORB، PM و اسپینل‌پریدوتیت‌ها برگرفته از Jochum و همکاران (۱۹۸۹) هستند)

تفسیر سنگ‌زایی سنگ‌های آذرین، چه بسا با درجهٔ دگرسانی بالا نیز سودمند هستند (Widdowson *et al.*, 2000). برای پایه، نمونه‌های بازالتی با نسبت ایتیریم به زیرکنیم نزدیک به ۰/۱ و نسبت ۴ برابری زیرکنیم به نیوبیم، از نوع غنی شده هستند.



شکل ۱۰- سنگ‌های آذرین درونی مهاباد در نمودارهای شناسایی ژرفای خاستگاه بازالت‌ها برپایهٔ بود یا نبود گارنت در خاستگاه. (A) نمودار Sm/Yb در برابر Ce/Sm (Çoban, 2007)؛ (B) نمودار (La/Sm)_N در برابر (Tb/Yb)_N (Wang *et al.*, 2002)

$Sr > 400 \text{ ppm}$ ، $MgO < 3 \text{ wt\%}$ ، $Al_2O_3 > 15 \text{ wt\%}$ غنی‌شدگی از LILE و LREE، تهی‌شدگی از Y و HREE و نسبت بالای $Sr/Y > 40$ و $La/Yb > 20$ از ویژگی‌های زمین‌شیمیایی هستند که برای آداکیت‌ها در نوشتارهای زمین‌شناسی (Castillo, 2006) برشمرده شده‌اند و در نمونه‌های تراکیتی کوه‌سلطان نیز دیده می‌شوند.

برای بررسی اینکه آیا نمونه‌های تراکیتی کوه‌سلطان از گروه سنگی آداکیت‌ها به‌شمار می‌روند، از نمودار کلاسیک و کاربردی پیشنهادی Defant و Drumond (۱۹۹۰) بهره گرفته می‌شود (شکل‌های ۱۲- A و ۱۲- B). همچنین، برای تفکیک آداکیت‌های گوناگون از نمودار SiO_2 در برابر MgO (شکل ۱۲- C) بهره گرفته شد. برپایهٔ این نمودارها همهٔ نمونه‌های بررسی‌شده از نوع آداکیت‌های پر سیلیس (HAS) به‌شمار می‌روند.

در برابر ایتیریم و نیز نمودار زیرکونیم در برابر زیرکونیم به ایتیریم نیز برای بررسی میزان غنی‌شدگی و تهی‌شدگی سنگ‌های تراکیتی و انکلاوهای کوه‌سلطان مهاباد بهره گرفته شد (شکل ۱۱). از آنجایی که تحرک این عناصر بسیار کم است، برای

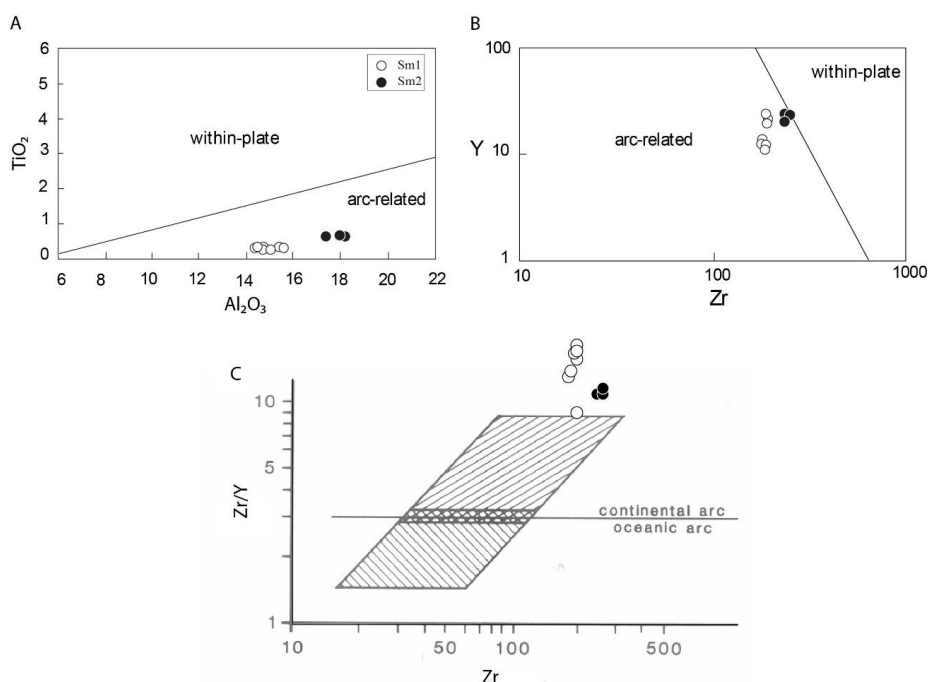
جایگاه زمین‌ساختی تراکیت‌ها و تراکی‌اندزیت‌های کوه‌سلطان مهاباد

نمونه‌های تراکیتی و تراکی‌اندزیتی کوه‌سلطان از نوع مرتبط با کمان از نوع قاره‌ای ارزیابی شده‌اند (شکل ۱۱) و این نکته با الگوی عنصرهای خاکی کمیاب و عنکبوتی آنها همخوانی دارد.

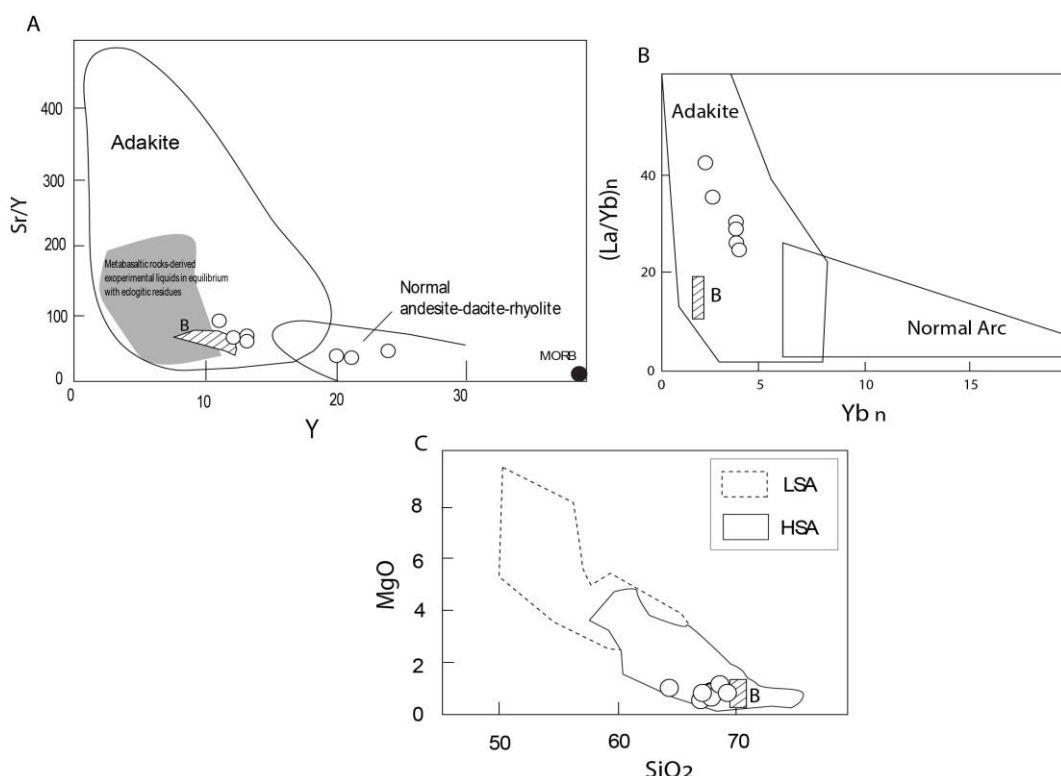
خاستگاه آداکیتی تراکیت‌های کوه‌سلطان مهاباد

امروزه آداکیت به گروه بزرگی از سنگ‌ها گفته می‌شود که میزان Sr/Y و La/Yb بالایی دارند. این ویژگی‌ها پیامد فرایندهایی مانند ذوب پوستهٔ اقیانوسی فرورانده، ذوب خاستگاه سرشار از Sr و La و تهی‌شدگی از Y و Yb در مناطق ژرف با گارنت برجمانده، جدایش بلوری و واکنش‌گذاره فلسیک با گوشته هستند (Martin *et al.*, 2005).

برپایهٔ جدول ۴، $SiO_2 > 56 \text{ wt\%}$ ،



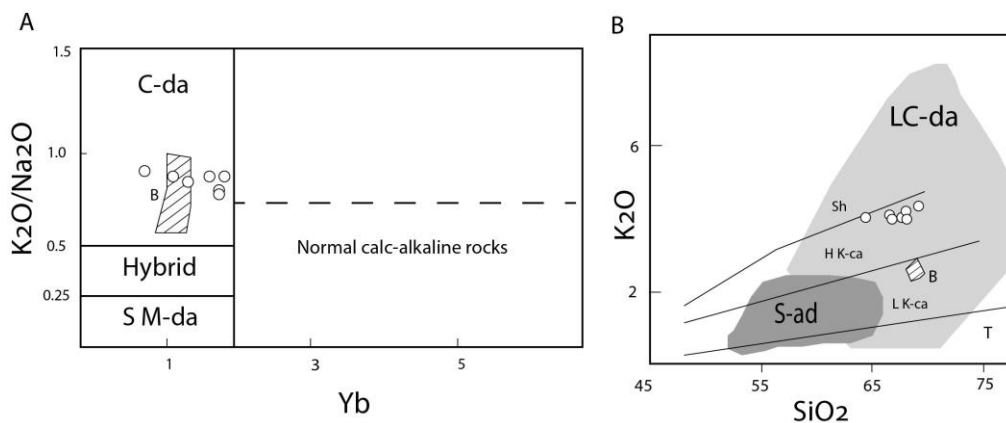
شکل ۱۱- تفکیک محیط پیدایش سنگ‌های اسیدی و حدواسط کوه‌سلطان مهاباد در: A، B) نمودارهای پیشنهادی Muller و Grovs (۱۹۹۳)؛ B) نمودار پیشنهادی Pearce (۱۹۸۳)



شکل ۱۲- A) نمودار شناسایی آداکیت‌ها (با تغییر پس از: Defant and Drummond (۱۹۹۰)) (ترکیب مایع تجربی اکلوزیت‌ها از: Drummond و Defant (۲۰۰۲)؛ B) نمودار (Defant *et al.* ۲۰۰۲) که در آن محدوده آداکیت از سنگ‌های مرتبط با کمان عادی جدا شده است؛ C) نمودار تفکیک آداکیت‌های کم سیلیس و پر سیلیس (Martin *et al.*, ۲۰۰۵) (محدوده داسیت‌های بزوداگی ارومیه (Modjarrad, ۲۰۱۵) برای مقایسه نشان داده شده است)

زیرین ارزیابی شده‌اند (شکل ۱۳- B). همانگونه که در نمودارها نمایش داده شده است، ترکیب آداکیت‌های کوه‌سلطان با آداکیت‌های کوه بزو ارومیه (Modjarrad, 2015) که پیامد فعالیت‌های پس از برخورد نئوتتیس در شمال‌باختری ایران هستند، همانندی دارد.

برای شناسایی خاستگاه مذاب‌های آداکیتی کوه‌سلطان، نمودار Yb در برابر K_2O/Na_2O به کار برده شد (شکل ۱۳- A). برپایه این نمودار، آداکیت‌ها از گروه آداکیت‌های جداشده از پوسته هستند. در نمودار SiO_2 در برابر K_2O نیز همه نمونه‌های بررسی شده جدا شده از مواد پوسته

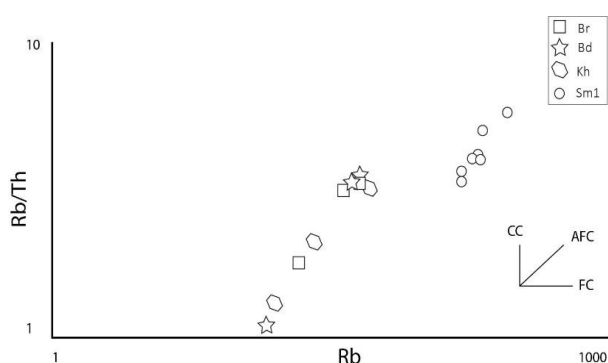


شکل ۱۳- A) نمودار Yb در برابر K_2O/Na_2O برای تمایز خاستگاه آداکیت‌ها از (Kamvong *et al.*, 2014) C-da: آداکیت جداشده از پوسته قاره‌ای؛ Hybrid: خاستگاه دوگانه؛ S M-da: آداکیت‌های جداشده از مذاب‌های تختال اقیانوسی؛ B) نمودار SiO_2 در برابر K_2O (Rickwood, 1989) LC-da: آداکیت‌های جداشده از پوسته زیرین؛ S-ad: آداکیت جداشده از تختال اقیانوسی؛ محدوده‌ها از Guan و همکاران (۲۰۱۰) هستند؛ محدوده داسیت‌های بزوداگی ارومیه (Modjarrad, 2015) برای مقایسه نشان داده شده است)

بحث

عنصرهای HREE تهی‌شدگی نشان می‌دهند. به احتمال بالا، خاستگاه ماگمای این سنگ‌ها سرشار از LREE‌هاست. همچنین، به احتمال دیگر شاید این پدیده پیامد ناسازگارتر بودن LREE‌ها نسبت به HREE‌ها باشد و نیز چه بسا LREE‌ها در پی تحولات ماگمایی (ژرفای بسیار و درصد ذوب‌بخشی کم) در سنگ‌های منطقه متمرکز شده باشند. تهی‌شدگی چشمگیر این سنگ‌ها از HREE شاید پیامد به‌جاماندن گارنت در فاز تفاله و نبود مشارکت این کانی در فرایند پیدایش مذاب باشد. همچنین، احتمال آرایش در گوه‌گوشته‌ای نیز نباید نادیده گرفته شود، چنانچه در بازالت‌های خاش در مکران نیز سرشت

برپایه بررسی‌های زمین‌شیمیایی، سنگ‌های خاتون‌باغ، بردرشان و بادام ترکیبی از بازالت تا آلکالی‌بازالت و تراکی‌بازالت از خود نشان می‌دهند و از دیدگاه سری ماگمایی، سرشتی آلکالن تا شوشونیتی دارند. این سنگ‌ها متاآلومین هستند و از دیدگاه پهنه زمین‌ساختی، از گروه بازالت‌های درون‌صفحه‌ای هستند. رخداد ذوب در محدوده گارنت - اسپینل لرزولیت بوده است. در نمودارهای الگوی REE، الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب در نمونه‌های بررسی شده همانند است و همه سنگ‌های منطقه بررسی شده از عنصرهای LREE غنی‌شدگی و از



شکل ۱۴- نمودار تعیین اصلی ترین فرایند اثرگذار بر پیدایش ماگمای مادر بازالتها و تراکیت های جوان در مهاباد (روندها برگرفته از Tchameni و همکاران (۲۰۰۶) هستند؛ توزیع روند نمونه ها نشان دهنده اهمیت پدیده های AFC در تکامل ماگمای مادر است؛ AFC=Assimilation؛ Fractional crystallization, Contamination؛ از آنجایی که در تراکی آنندزیتها مقدار رویدیم از آستانه آشکار سازی دستگاه کمتر گزارش شده است، امکان پیاده سازی برای نمونه های آن (با دایره توپر) در این نمودار نیست)

همچنین، بر پایه کار نرم افزاری (Ashwal *et al.*, 2016) روی مذابی تجربی در شرایط یاد شده در توضیح زیر شکل ۱۵، روشن شد هر سه ترم دیده شده در مهاباد در نمودارهای هارکر موازی روند به دست آمده از تبلور بخشی مذاب بازالتی تجربی پیاده شده هستند و این نکته نشان دهنده اینست که گروه های تراکی آنندزیتی و تراکیتی چه بسا پیامد جدایش بخشی یک مذاب بازالتی همسان بوده اند. به باور Epinoza و همکاران (۲۰۰۸)، ترم های اسیدی تر در لایه های بالایی آشیانه ماگمایی جای گرفته اند و کم کم پالس هایی از مذاب از آشیانه ای یکسان به بیرون ریخته است؛ به گونه ای که چه بسا نخست اجزاء بازیک تر (مانند بازالت های خاتون باغ، بادام و بردر شان) و به ترتیب سپس تراکی آنندزیت های کوه سلطان در حجم کم پدید آمده اند و به صورت انکلاو در حجم بزرگی از مذاب جدایش یافته اسیدی (تراکیت های کوه سلطان) در منطقه فوران کرده اند. بر پایه

درون صفحه ای بازالتها پیامد غنی شدگی بعدی با سیال های فرورانشی است (Firouzkouhi *et al.*, ۲۰۱۷).

درباره تراکیت های آداکیتی و انکلاو های تراکی آنندزیت های آن در کوه سلطان، Rb و Ba در پی جانشینی در کانی های پتاسیم داری مانند ارتوز در مراحل پایانی تبلور ماگما، روند افزایشی دارند. بی هنجاری منفی شدیدی که در Ti (یکی از سه عنصر TNT یا همان Ta، Nb و Ti) دیده می شود ویژگی مذاب های حاشیه ای (کمان قاره ای یا اقیانوسی) (Pearce, 1996) و نیز تأثیر گذاری اجزای فرورانشی است. این آنومالی منفی پیامد عوامل گوناگونی دانسته می شود که عبارتند از:

- ۱) ویژگی ماگماتیسم وابسته به فرایند فرورانش (Sunders *et al.*, 1980)؛

- ۲) ویژگی سنگ های پوسته قاره ای و شرکت پوسته در فرایندهای ماگمایی (Küster and Harms, 1997)؛
- ۳) نشانه تهی شدگی این عنصرها در خاستگاه، پایداری فازهای دارای این عنصرها در هنگام ذوب بخشی یا جدایش آنها در هنگام فرایند تفریق.

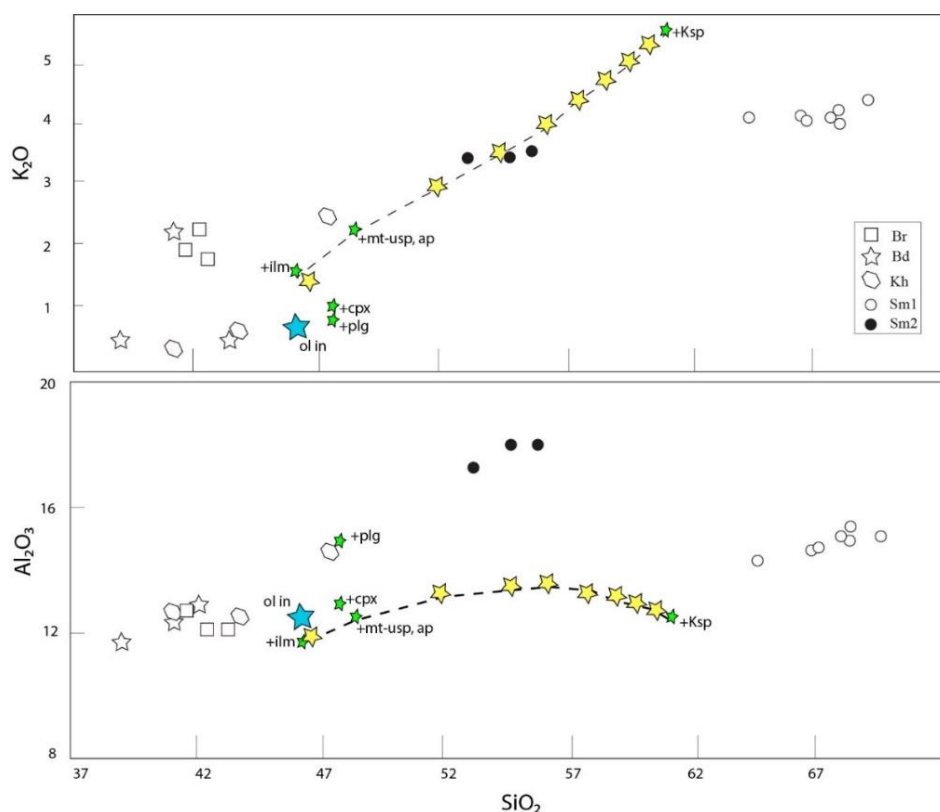
تفریق پیشینه، بررسی احتمال پیدایش تراکیت ها از خاستگاه بازالتی

با هدف بررسی احتمال اینکه هر سه ترم متفاوت دیده شده در منطقه مهاباد (بازالت، تراکی آنندزیت و تراکیت) پیامد ماگمایی یکسان بوده اند و در پی جدایش بلورین از مایع بازالتی، دو نوع دیگر نیز پدید آمده اند، بررسی هایی انجام شد. در شکل ۱۴، سه روند برای فرایندهای گوناگونی که مسئول پیدایش ماگما دانسته می شوند، نشان داده شده است. نمونه های منطقه با روند AFC همخوانی دارند و احتمال درستی این نکته را بالا می برند.

چنین مجموعه‌ای احتمال رویداد تبلوربخشی برای پیدایش تراکیت‌ها از بازالت‌هاست. برای نمونه، le Roex (۱۹۸۵) برای تراکیت‌های جزیره Gough در اقیانوس اطلس جنوبی تبلوربخشی نزدیک به ۷۰٪ از کانی‌هایی مانند کلینوپیروکسن، الیون، پلاژیوکلاز، اکسیدهای تیتانوفروس و آپاتیت از یک مذاب بازالتی آلکالن مادر را پیشنهاد کرده است. از سوی دیگر، Cousens و همکاران (۲۰۰۳) تبلوربخشی بیشتر از ۹۰٪ از همان فازها از یک آلکالی‌بازالت را برای پیدایش تراکیت‌های آتشفشانی هاوایی پیشنهاد کرده‌اند. برای سنگ‌های آذرین بیرونی جوان مهاباد برپایه‌الگوسازی، نزدیک به ۸۵٪، تبلوربخشی عامل احتمالی رسیدن ترکیب از بازالت تا تراکیت بوده است.

سرشت لاواهای بازالتی، این گدازه‌ها روانه هستند و ارتفاعات چندانی را پدید نیاورده‌اند؛ اما ترکیب‌های اسیدی به‌علت گرانی‌تر و نیز سن کمتر، ارتفاعات خشنی در منطقه ساخته‌اند.

رفتار عنصرهایی مانند K_2O و Al_2O_3 با رفتار این اکسیدها در مجموعه‌های تبلوربخشی فازهای کانیایی دیده شده همخوانی دارد. تهی‌شدگی از Zr, Hf, P, Sr و Ti چه‌بسا پیامد جدایش بلورین پلاژیوکلاز، آپاتیت، زیرکن و اکسیدهای تیتانوفروس است. فرضیه‌ی جدایش بلوری برای چنین محیط‌هایی در شرایط سیستم بسته با کارهای سنگ‌شناسی تجربی و محاسبه‌های الگوسازی همخوانی ندارد (Espinoza *et al.*, 2005). یک توجیه بسیار منطقی و سراسر است برای پیدایش



شکل ۱۵- الگوسازی تبلوربخشی از مذاب بازالتی فرضی (ستاره آبی) در نمودارهای هارکر با به‌کارگیری نرم‌افزار PELE (Boudreau, 1999) (برگرفته از: Ashwal *et al.*, 2016) (ستاره‌های زرد: ترکیب مذاب بجامانده از تبلوربخشی در بازه‌های ۲۰ درجه سانتیگراد؛ ستاره‌های سبز: پیدایش فازهای کانیایی از مذاب؛ شرایط نخستین مذاب: دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد، فشار یک کیلو بار و محتوای آب ۰/۲٪؛ روند خطی افزایشی درباره‌ی اکسیدپتاسیم و روند کوژ رو به بالا درباره‌ی اکسیدآلومینیم نیز در

الگوی مذاب تجربی فرضی و هم در الگوی نمونه‌های واقعی مهاباد جالب توجه است)

این سنگ‌ها در پی ذوب‌بخشی یک گوئه گوشته‌ای غنی‌شده در بالای پهنه فرورانشی، مرتبط با فرورانش مایل نئوتتیس به زیر پهنه سنندج- سیرجان و در یک پهنه درون‌صفحه‌ای پدید آمده‌اند و در پی رفتار گسل‌های ژرف، در مراحل بعدی دوباره تزریق شده و تکامل یافته‌اند. چنانچه تعلق بازالت‌های مناطق سه‌گانه بادام، بردرشان و خاتون‌باغ مهاباد به نوع HNB پذیرفته شود، باید گفت با اینکه این سنگ‌ها کاملاً با ویژگی‌های نوع درون‌صفحه‌ای همخوانی دارند؛ اما برخی ویژگی‌ها (مانند: شباهت با گروه‌های نیوییم بالا در مناطق کناری (مانند قروه) و نیز همراهی با تراکیت‌های آداکیتی کوه‌سلطان) نشان می‌دهند نقش تختال اقیانوسی هنگام فرایندهای پس از برخورد نیز مهم بوده است و پیدایش این سنگ‌ها بیشتر با پهنه فرورانش در ارتباط بوده است تا محیط درون‌صفحه‌ای. در بررسی امکان جدایش مذاب‌های اسیدی و حد واسط کوه‌سلطان از بازالت‌های مناطق سه‌گانه مهاباد نیز نتایج مثبتی به‌دست آمد. از این‌رو، نباید چنین احتمالی نیز نادیده گرفته شود؛ اگرچه برای پاسخ‌های مطمئن‌تر به بررسی‌های ایزوتوپی نیاز است.

گفتنی است در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه که سازمان زمین‌شناسی کشور آن را تهیه کرده است، همه سنگ‌های آذرین بیرونی بررسی‌شده با یک طرح و یک ترکیب یکسان نامیده شده‌اند؛ اما داده‌های زمین‌شیمیایی آن را رد می‌کند. در این نوشتار بازالت‌های HNB گوناگون، تراکیت‌های آداکیتی و انکلاوهای تراکی‌آندزیتی متعلق به کمان از هم شناسایی شدند. از این‌رو، سازمان زمین‌شناسی کشور با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده تفصیلی باید نقشه‌های چاپ‌شده پیشین را بازنگری کند و سپس آنها را به تایید سازمان برساند.

به پیشنهاد Azizi و همکاران (۲۰۱۴)، هنگام برخورد صفحه‌های ایران و عربی و فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به بخش گوئه گوشته‌ای و ذوب‌بخشی آن ناحیه، نازک‌شدگی سنگ‌کره در بخش شمالی پهنه سنندج- سیرجان (همین منطقه بررسی‌شده) رخ داده است. پردازش امواج S عبوری نشان‌دهنده درستی این فرض هستند. در این هنگام، بازالت‌های نیوییم بالا (HNB) به همراه آداکیت‌ها که هنگام فرورانش پوسته اقیانوسی جوان پدید آمده‌اند در این ناحیه گسترش یافته‌اند (همانند منطقه قروه). همراهی این دو ترم بسیار مهم است و درباره منطقه مهاباد نیز گویا درست به نظر می‌رسد (قربت الگوی عنصرهای خاکی کمیاب و عنکبوتی بازالت‌های مناطق بادام، بردرشان و خاتون‌باغ با بازالت‌های کوه قرینه قروه). همچنین، تراکیت‌های کوه‌سلطان سرشت آداکیتی از خود نشان داده‌اند و این نکته نشان‌دهنده همانندی قروه و منطقه بررسی‌شده Azizi و همکاران (۲۰۱۴) است که در فاصله کمتر از ۳۰۰ کیلومتری جنوب مهاباد جای دارد. از آنجایی که در این بررسی کار ایزوتوپی انجام نشده است، با اطمینان از این نکته یاد نمی‌شود.

نتیجه‌گیری

از آنجایی که سن بازالت‌ها جوان (کواترنر) است روشن است که در منطقه شرایط پس از برخورد قاره‌ای میان صفحه عربستان و پلاتفرم ایران برپا بوده است. از این‌رو، این سنگ‌های آذرین بیرونی بی‌گمان در شرایط پس از برخورد پدید آمده‌اند. آنچه در پهنه‌های راستالغز به‌صورت پهنه‌های کشش در قالب زمین‌ساخت فشاری روی می‌دهد، عامل مهمی برای رویداد فعالیت‌های بازالتی منطقه است و در این میان نقش پوسته ضخیم و آرایش‌های پدیدآمده انکارشدنی نخواهد بود.

سپاس‌گزاری

داوران مجله پترولوژی که با وقت ارزشمند خود آن را با دقت بررسی کردند و به‌راستی باعث تحول بنیادین مقاله شدند بسیار سپاس‌گزاریم.

داده‌های این مقاله از دو پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد به راهنمایی نگارنده نخست به‌دست آمده‌اند که در متن به آنها ارجاع داده شده است. از این‌رو، از معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین، از

منابع

- Aghanabati, A. (2005) 1:100000 geological map of Mahabad. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Amel, N., Moayyed, M., Ameri, A., Vosoghi Abedini, M. and Moazzen, M. (2008) Petrogenesis of Plio- Quaternary basalts in Azerbaijan, NW Iran and comparisons them with similar basalts in the east of Turkey. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 16(2): 327- 340 (in Persian).
- Ashwal, L., Torsvik, T., Horvath, P. and Harris, C. (2016) A Mantle- derived Origin for Mauritian Trachytes. *Journal of Petrology* 57(9): 1645- 1675.
- Ayalew, D. and Yirgu, G. (2003) Crustal contribution to the genesis of Ethiopian plateau rhyolitic ignimbrites: basalt and rhyolite geochemical provinciality. *Journal of the Geological Society of London* 160: 47-56.
- Azizi, H., Asahara, Y. and Tsuboi, M. (2014) Quaternary high- Nb basalts: existence of young oceanic crust under the Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran. *International Geology Review* 56: 167- 186.
- Baker, B. H. (1987) Outline of the petrology of the Kenya rift alkaline province. In: *Alkaline Igneous Rocks*. (Eds. Fitton, J. G. and Upton, B. G. J.) Special Publications 30: 293-311. Geological Society, London, UK.
- Boudreau, A. E. (1999) PELE-a version of the MELTS software program for the PC platform. *Computers and Geosciences* 25: 201-203.
- Brenna, M., Nakada, S., Miura, D., Toshida, K., Ito, H., Hokanishi, N. and Nakai, S. (2015) A trachyte-syenite core within a basaltic nest: filtering of primitive injections by a multi-stage magma plumbing system (Oki-Dozen, southwest Japan). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 170: 1-22.
- Brenna, M., Price, R., Cronin, S. J., Smith, I. E. M., Sohn, Y. K., Kim, G. B. and Maas, R. (2014) Final magma storage depth modulation of explosivity and trachyte-phonolite genesis at an intraplate volcano: a case study from Ulleung Island, South Korea. *Journal of Petrology* 55: 709-747.
- Castillo, P. R. (2006) An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Sciences Bulletin* 51: 257-268.
- Chung, S. L., Liu, D. Y., Ji, J. Q., Chu, M. F., Lee, H. Y., Wen, D. J., Lo, C. H., Lee, T. Y., Qian, Q. and Zhang, Q. (2003) Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology* 31: 1021-1024.
- Clague, D. A. (1978) The oceanic basalt-trachyte association: An explanation of the Daly gap. *Journal of Geology* 86: 739-743.

- Çoban, H. (2007) Basalt magma genesis and fractionation in collision- and extension- related provinces: Acomparision between eastern, central and western Anatolia. *Earth Science Reviews* 80: 219- 238.
- Cousens, B. L., Clague, D. A. and Sharp, W. D. (2003) Chronology, chemistry, and origin of trachytes from Hualalai Volcano, Hawaii. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4(9): 27.
- Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhurst, R. J. (1979) *The interpretation of igneous rocks.* George, Allen and Unwin, London, UK.
- Defant, M. J., Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 367: 662-665.
- Defant, M. J., Xu, J. F., Kepezhinskas, P., Wang, Q., Xiao, L. (2002) Adakites: some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica* 18:129- 142.
- Eby, G. N. (1990) The A- type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations their petrogenesis. *Lithos* 26: 115-134.
- Epinoza, F., Morata, D., Polve, M., Lagabrielle, Y., Maury, R., Guivel, C., Cotton, J., Bellon, H. and Suarez, M. (2008) Bimodal back- arc alkaline magmatism after ridge subduction: Pliocene felsic rocks from Central Patagonia (47°S). *Lithos* 101(3- 4): 191- 217.
- Espinoza, F., Morata, D., Pelleter, E., Maury, R. C., Suárez, M., Lagabrielle, Y., Polvé, M., Bellon, H., Cotten, J., De la Cruz, R., Guivel, C. (2005) Petrogenesis of the Eocene and Mio- Pliocene alkaline basaltic magmatism in Meseta Chile Chico, Southern Patagonia, Chile: evidence for the participation of two slab windows. *Lithos* 82: 315-343.
- Ferla, P. and Meli, C. (2006) Evidence of magma mixing in the 'Daly Gap' of alkaline suites: a case study from the enclaves of Pantelleria (Italy). *Journal of Petrology* 47: 1467-1507.
- Firouzkouhi, Z., Ahmadi, A., Moinvaziri, H., Moradian, A. A. and Lentz, D. R. (2017) Geochemical characterization of basalts from west of Khash (SE Iran): an approach to the nature of the mantle source. *Iranian Journal of Petrology* 30: 99- 118 (in Persian).
- Fletcher, R. C., Buss, H. L. and Brantley, S. L. (2006) A spheroidal weathering model coupling pore water chemistry to soil thicknesses during steady- state denudation. *Earth and Planetary Science Letters* 244: 444- 457.
- Floyd, P. A. and Winchester, J. A. (1975) Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth and Planetary Science Letters* (27): 211- 218.
- Freundt-Malecha, B., Schmincke, H. U. and Freundt, A. (2001) Plutonic rocks of intermediate composition on Gran Canaria: the missing link of the bimodal rock suite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 141: 430-445.
- Friedman, E. (2016) *The origin of mantle xenoliths in Tertiary alkaline basalts, British Columbia, Canada: Implications for convergent plate margin geodynamic and petrogenetic processes.* Published electronic theses and dissertations, University of Windsor.
- Ghalamghash, J., Abedini, M. V., Bellon, H., Emami, M. H., Pourmafi, M. and Rashid, H. (2003) K/Ar age dating of Oshnaviyeh plutonic complex. *Geosciences* 47-48: 16-27 (in Persian).
- Goss, A. R. and Kay, S. M. (2009) Extreme high field strength element (HFSE) depletion and nearchondritic Nb/Ta ratios in Central Andean adakite- like lavas. *Earth and Planetary Science Letters* 279: 97-109.
- Guan, Q., Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Zhang, L. L., Liu, M., Li, X. W, Yu, F., Liu, M. H. and Mo, X. X. (2010) Late Cretaceous adakites from the eastern segment of the Gangdese Belt,

- Southern Tibet: products of Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction. *Acta Petrologica Sinica* 26: 2165-2179 (in Chinese with English abstract).
- Haschke, M., Siebel, W., Gunther, A. and Scheuber, E. (2002) Repeated crustal thickening and recycling during the Andean orogeny in north Chile. *Journal of Geophysical Research* 107- 328.
- Hastie, A. R., Keer, 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. *Journal of Petrology* 48(12): 2341- 2357.
- Jochum, K. P., McDonough, W. F., Palme, H. and Spettel, B. (1989) Compositional constraints on the continental lithospheric mantle from trace elements in spinel peridotite xenoliths. *Nature* 340: 548- 550.
- Kamvong, T., Zaw, K., Meffre, S., Maas, R., Stein, H., Lai, C. K. (2014) Adakites in the Truong Son and Loie fold belts, Thailand and Laos: genesis and implications for geodynamics and metallogeny. *Gondwana Research* 26: 165-184.
- Kay, R. W. and Kay, S. M. (2002) Andean adakites. Three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica* 18: 303-311.
- Keskin, M. (2005) Domal uplift and volcanism in a collision zone without a mantle plume: Evidence from Eastern Anatolia. *Mantle Plumes*. <http://www.mantleplumes.org/Anatolia.html>.
- Krauskopf, K. B. and Bird, D. K. (1995) *Introduction to Geochemistry*. Third ed. McGraw-Hill, New York, US.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *American mineralogist* 68:277- 279.
- Küster, D. and Harms, U. (1997) Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the Late Neoproterozoic East African Orogen: a review. *Lithos* 45(1-4): 177- 195.
- le Roex, A. P. (1985) Geochemistry, mineralogy and magmatic evolution of the basaltic and trachytic lavas from Gough Island, South Atlantic. *Journal of Petrology* 26: 149-186.
- Litvinovsky, A. A., Jahn, B. M., Zangvilevich, A. N., Saunders, A., Poulain, S., Kuzmin, D. V., Reichow, M. K. and Titov, A. V. (2002) Petrogenesis of syenite-granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia): implications for the origin of A-type granitoid magmas. *Chemical Geology* 189: 105-133.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R. P., Moyen, J- F. and Champion, D. C. (2005) An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79(1-2): 1-24.
- Mazhari, S. A, Amini, A., Ghalamghash, J. and Bea, F. (2011) Petrogenesis of granitic unit of Naqadeh complex, Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 4:59- 67.
- Mingram, B., Trumbull, R. B., Littman, S. and Gerstenberger, H. (2000) A petrogenetic study of androgenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos* 54: 1-22.
- Modjarrad, M. (2015) Geochemistry of Bezow-Daghi volcanic rocks, Urmia; adakitic magmatism in the Urmia-Dokhtar magmatic belt. *Iranian Journal of Petrology* 21: 121-138 (in Persian).
- Moeinvaziri, H. (1998) *Introduction to Iran magmatism*. Tarbiat Moallem University publication.

- Mouloudivand, F. (2016) Petrology of Soltan mountain Pelio- Quaternary volcanic rocks, east of Mahabad) Western Azarbaijan). Unpublished Thesis, Urmia University, Urmia, Iran (in Persian).
- Muller, D. and Groves D. I. (1993) Direct Associations between Potassic Igneous Rocks and Gold- Copper Deposits. *Ore Geology Reviews* 8(5): 383- 406.
- Nakamura, N. (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochemica Cosmochimica Acta* 38: 757- 775.
- Noukam, R. (2017) Petrology of the Badam mountain Pelio- Quaternary volcanic rocks, east of Mahabad) Western Azarbaijan). Unpublished Thesis, Urmia University) in Persian).
- Pearce, J. A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. Wiley, Chichester 525- 548.
- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub- continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental Basalts and Mafic Xenoliths* (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230-249. Shiva, Nantwich, UK.
- Peccerillo, A., Barberio, M. R., Yirgu, G., Ayalew, D., Barbieri, M. and Wu, T. W. (2003) Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: a petrological, geochemical and isotopic study of the Gedesma Volcano, Central Ethiopian Rift. *Journal of Petrology* 44(11): 2003-2032.
- Ramos, V. A. and Kay, S. M. (1992) Southern Patagonian plateau basalts and deformation: back arc testimony of ridge collisions. In: *Andean Geodynamics* (Ed. Oliver R. A.) 205:261- 282. Tectonophysics.
- Rickwood, P. C. (1989) Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos* 22: 247- 263.
- Saunders, A. D. and Tarney, J. (1984) Geochemical characteristics of basalt volcanism within back- arc basins. *Geological Society London Special Publications* 16(1): 59- 76.
- Schandl, E. S and Gorton, M. P. (2002) Applications of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environments. *Economic geology* 97: 629- 642.
- Zakaryaei, S. J., Ashja Ardalan, A. and Tarabi, S. (2015) Petrography and Geochemistry of the Basic Volcanic rocks of Kuh- e- Gharineh, north- east Ghorveh) west of Iran). *Environmental Geology* 8(27):63- 79 (in Persian).
- Shand, S. J. (1943) Eruptive rocks: Their genesis, composition, and classification, and their relation to ore- deposits with a chapter on meteorites. John Wiley & Sons, New York, US.
- Shinjo, R. and Kato, Y. (2000) Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism in the Okinawa Trough, an incipient backarc basin. *Lithos* 54: 117-137.
- Shojaeei, M., Emami, M. H., Khaikhah, M. and Maleki, G. (2012) Geochemistry of the Mahabad Pelio- Quaternary volcanic rocks. 31st Earth Sciences Symposium of Iran (in Persian).
- Sun, S. S. (1980) Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid- ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions of the Royal Society A297*: 409- 445.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological society of London* (42): 313- 345.
- Sunders, A. D., Tarney, J. and Weaver, S. D. (1980) Trans- verse variations across the Antractic Peninsula. *Earth and Planetary Science Letters* 46: 344- 360.

- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N. E. and Pouclet, A. (2001) Crustal origin of early Proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem Complex), South Cameroon. *Lithos* 57: 3-42.
- Tchameni, R., Pouclet, A., Penary, J., Ganwa, A. and Toteu, S. F. (2006) Petrology and geochemistry of the Ndaoundere Pan- African granitoids in Central north Cameroon: implications for their sources and geological setting. *Journal of African Earth Science* 44(5): 511- 529.
- Thieblemont, D. and Tegye, M. (1994) Une discrimination geochimique des roches différenciées témoin de la diversité d'origine et de situation tectonique des magmas calcocalciques. *Comptes Rendus Academic Sciences* 319: 87- 94.
- Torkian, A., Mohebbi, K. and Sepahi Gerow, A. A. (2015) Petrology of the gabbroic- dioritic intrusions in the Parishan Mountain (south of Qurveh) Kurdistan. *Petrology* (23): 27- 44 (in Persian).
- Vermeesch, P. (2006) Tectonic discrimination of basalts with classification trees. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1839- 1848.
- Vernikovskiy, V. A., Pease, V. L., Vernikovskaya, A. E., Romanov, A. P., Gee, D. G. and Travin, A. V. (2003) First report of early Triassic A- type granite and syenite intrusions from Taimyr: product of the northern Eurasian superplume? *Lithos* 66: 23-36.
- Wang, K., Plank, T., Walker, J. D. and Smith, E. I. (2002) A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA. *Journal of Geophysical Research* 107.
- Wei, H., Wang, Y., Jin, J., Gao, L., Yun, S. H. and Jin, B. (2007) Timescale and evolution of the intracontinental Tianchi volcanic shield and ignimbrite- forming eruption, Changbaishan, northeast China. *Lithos* 96: 315-324.
- Wen, D. R., Chung, S. L., Song, B., Iizuka, Y., Yang, H. J., Ji, J. Q., Liu, D. Y. and Gallet, S. (2008) Late Cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos* 105:1-11.
- Whalen, J. B., Currie, K. L. and Chappell, B. W. (1987) A- type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 95: 407-419.
- Widdowson, M., Pringle, M. S. and Fernandez, O. A. (2000) A post K-T Boundary (Early Palaeocene) age for Deccan type feeder dykes, Goa, India. *Journal of Petrology* 41: 1177- 1194.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1976) Geochemical magma type discrimination; application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 28: 459- 469.
- 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, US.