

بررسی تحولات ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب (شمال باختری نائین) با تأکید بر نقش آلایش پوسته‌ای

فرزانه خامیان^۱، زهرا اعلمی‌نیا^{۲*}، علیرضا ندیمی^۳، علی قاسمی^۴ و مرتضی شریفی^۳

۱- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۴- استادیار گروه پژوهشی ژئوشیمی، جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

نویسنده مسئول: * zalaminia@sci.ui.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

دریافت: ۱۴۰۲/۹/۱۹

چکیده

گستره مورد بررسی در استان اصفهان و در شمال باختری شهر نائین (باختر ایران مرکزی) جای دارد. سنگ‌های آذرین اصلی رخنمون‌یافته در این محدوده شامل واحدهای آتشفشانی ترشیری (آندزیت بازال، آندزیت و ریولیت) همراه با نهشته‌های آذرآواری متشکل از توف و ایگنمبریت است. این سنگ‌ها دارای سرشت کالک‌آلکان هستند و با غنی‌شدگی عنصرهای لیتوفیل بزرگ یون (LILE) و خاکی کمیاب سبک (LREE) و تهی‌شدگی از عنصرهای با میدان پایداری بالا (HFSE) مشخص می‌شوند که بیانگر ماگماتیسم کمان‌های آتشفشانی مرتبط با فروانش است. بررسی‌های سنگ‌شناختی و زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که فرایندهای جدایش بلورین (جدایش بلورین کانی پلاژیوکلاز و تا حدود بسیار کمی کانی کلینوپیروکسن)، اختلاط ماگمایی، هضم و آلایش نقش مهمی در تحول و تکامل ماگمای این ناحیه دارد. تهی‌شدگی در عنصرهای Zr و Nb، Ti، Ta و نسبت‌های پائین Ce/Pb، Nb/U و نسبت بالای Ba/Nb و La/Nb نشان از آلایش پوسته‌ای این سنگ‌ها دارد. برپایه یافته‌های بدست آمده از بررسی‌های زمین‌شیمیایی، می‌توان نتیجه گرفت که ماگمای اولیه سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب احتمالاً از ذوب‌بخشی گوشته سنگ‌کره‌ای متأثر از شاره‌های مشتق شده از پوسته اقیانوسی فرورانده شده، منشأ گرفته است و به دلیل آمیختگی با ماگمای بازالتی در هنگام بالا آمدن به سطوح بالاتر و استقرار در آشیانه ماگمایی پیش از فوران، در طی فرایندهای جدایش بلورین، هضم و آلایش انواع متفاوتی از سنگ‌های منطقه را به وجود آورده است.

واژه‌های کلیدی: تحولات ماگمایی، آلایش پوسته‌ای، گوشته سنگ‌کره‌ای، سنگ‌های آتشفشانی، ایران مرکزی

۱- پیشگفتار

اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران (بربریان و کینگ، ۱۹۸۱؛ محجل و همکاران، ۲۰۰۳) و در سه محدوده زمانی ائوسن، الیگوسن- پلیوسن و پلیو- کواترنر رخ داده است (علوی، ۲۰۰۴؛ قاسمی و تالبوت، ۲۰۰۶؛ عمرانی و همکاران، ۲۰۰۸؛ وردل و همکاران، ۲۰۱۱؛ چپو و همکاران، ۲۰۱۳؛ پانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ قلمقاش و همکاران، ۲۰۱۶، ۲۰۱۹b؛ لچمن و همکاران، ۲۰۱۸). ماگماتیسم ائوسن که اصلی‌ترین رخنمون‌های آتشفشانی این کمربند را تشکیل می‌دهند، تنوع ترکیبی از انواع بازیک بازیک تا اسیدی را شامل می‌شوند. سنگ‌های آتشفشانی شهراب (شمال باختر نائین)، بخشی از تکاپوی گسترده ائوسن هستند که در بخش میانی کمربند ارومیه- دختر و در حاشیه باختری پهنه ایران مرکزی جای دارد (شکل ۱-)

سرزمین ایران به دلیل تحمل زمین‌ساخت وابسته به مناطق همگرایی صفحه عربی و اوراسیا تاریخچه زمین‌شناسی پیچیده‌ای دارد، این وابستگی در طی بسته شدن شاخه‌هایی از اقیانوس نئوتتیس و حاکم شدن سامانه‌های کششی و فشارشی مختلف بر آن، سبب پدیدآمدن مهم‌ترین ساختارهای زمین‌ساختی و فعالیت ماگمایی به‌ویژه در طی دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک شده است (شنگور و همکاران، ۲۰۰۳؛ علوی، ۲۰۰۴؛ عمرانی و همکاران، ۲۰۰۸). در ایران مرکزی و پهنه ماگمایی ارومیه- دختر می‌توان فعالیت ماگمایی مرتبط با مناطق فروانش را مشاهده نمود. به نظر می‌رسد فعالیت ماگمایی در مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر در اثر فروانش سنگ‌کره

می‌باشد و سعی شده است تا با تکیه بر بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و شیمی سنگ‌کل به ارتباط ژنتیکی و فرایندهای مؤثر در تحول و تکامل ماگمای سازنده این سنگ‌ها پرداخته شود.

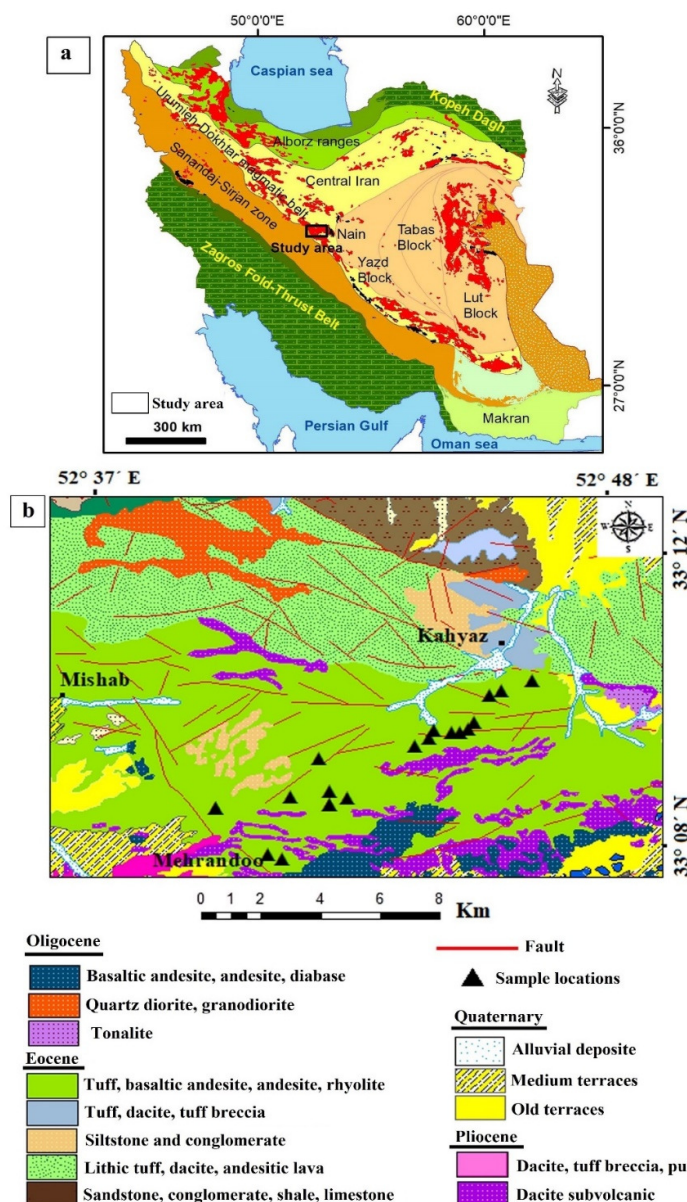
۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی در ۵۰ کیلومتری شمال باختری نائین و در جنوب نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهراب (بحرودی و فنودی، ۱۳۸۲)، بین طول‌های جغرافیایی ۳۷° ۵۲' تا ۴۸° ۵۲' و عرض‌های جغرافیایی ۰۸' ۳۳° تا ۱۲' ۳۳° شمالی واقع شده است. نیمه شمالی منطقه مطالعاتی به صورت یک دشت بزرگ آبرفتی از رسوب‌های مخروط‌افکنه کوآترنری، پادگانه‌های رودخانه‌ای و کنگلومرای پلی‌ژنتیک نئوژن پوشیده شده است اما نیمه جنوبی آن دارای واحدهای مختلف وسیع و سبتر آتشفشانی، آتشفشانی-رسوبی و به میزان کمتر توده‌های نفوذی مزوزوئیک تا سنوزوئیک است (شکل ۱-۲). در منطقه مورد بررسی و نواحی اطراف آن توالی‌های ضخیمی از سنگ‌های آتشفشانی حدواسط و اسیدی با سن ۵۲ میلیون سال (چیو و همکاران، ۲۰۱۳) و واحدهای آذرآواری به‌ویژه ایگنمبریت با گسترش و پراکندگی متفاوت مشاهده می‌شود (شکل ۲). سنگ‌های حدواسط منطقه مورد بررسی با سن ائوسن و ترکیب آندزیت بازالت و آندزیت به صورت گدازه‌های توده‌ای هستند که در محیط خشکی و یا نزدیک به خشکی فوران نموده‌اند (شکل ۲-۲-a و ۲-b). سنگ‌های آندزیت بازالت از تشکیل‌دهنده‌های اصلی در بخش قاعده و رأس توالی ائوسن می‌باشد که در الیگوسن نیز تداوم داشته است (یگانه‌فر و همکاران، ۲۰۱۳) واحدهای آندزیتی منطقه مورد بررسی در بعضی موارد حاوی آنکلاوهای مافیک و فلسیک می‌باشد (شکل ۲-۲-c). از ویژگی‌های این آنکلاوها می‌توان به شکل کروی تا بیضی و دانه درشت بودن آن‌ها اشاره نمود. سنگ‌های اسیدی ائوسن اغلب به صورت گنبد‌های ریولیتی و ریوداسیتی در ابعاد مختلف رخمون دارند (شکل ۲-۲-b و ۲-c). این واحدهای اسیدی حاوی زینولیت‌های میکروگرانولار مافیک با ترکیب آندزیت بازالت و آندزیت می‌باشند که در سرتاسر این واحدها به چشم می‌خورند (شکل ۲-۲-f). تمامی واحدهای آتشفشانی و آذرآواری منطقه توسط دایک‌های مافیک با ترکیب دیاباز و دایک‌های فلسیک ریولیتی با روند خاوری-

a). این منطقه دارای توالی ضخیمی از واحدهای آتشفشانی، سنگ‌های آذرآواری و توده‌های نفوذی می‌باشد. شدت و گسترش دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی این ناحیه، باعث شده این سنگ‌ها از دیدگاه پترولوژی کمتر مورد توجه قرار بگیرند و به نظر می‌رسد شناخت بهتر ماگماتیسزم در این منطقه مستلزم بررسی‌های دقیق‌تری می‌باشد. از مهم‌ترین بررسی‌های سنگ‌شناسی انجام گرفته بر روی واحدهای آتشفشانی منطقه شهراب (شمال‌باختری نائین)، می‌توان به مطالعات گسترده سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی و بررسی‌های چینه‌شناسی از منطقه نطنز تا نائین و سورک (عمیدی، ۱۹۷۵)، سنگ‌های آتشفشانی جنوب اردستان (یگانه‌فر، ۱۳۸۶)، سنگ‌های آتشفشانی بازیک با سن ائوسن جنوب باختری شهراب (احمدوند، ۱۳۸۷)، سنگ‌های آتشفشانی حدواسط-فلسیک جنوب باختری شهراب (عموزاده‌خلیلی، ۱۳۸۸) و سنگ‌زایی سری‌های ماگمایی آلکالن و ساب‌آلکالن جنوب شهراب (آقاجری، ۱۳۹۲) در قالب پایان‌نامه اشاره نمود. نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان (رادفر، ۱۹۹۹)، شهراب (بحرودی و فنودی، ۱۳۸۲)، نطنز (خلعت‌بری جعفری و علانی، ۱۳۷۷)، و ۱:۲۵۰۰۰۰ نائین (عمیدی و همکاران، ۱۳۷۵) از انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور نیز اطلاعات ارزشمندی در اختیار ما قرار می‌دهند. با وجود مطالعات متعدد بر روی سنگ‌های آتشفشانی در منطقه شهراب، منشأ و تکامل ژئوتکتونیکی آن‌ها نامشخص است. با توجه به این نکته که سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب (شمال باختری نائین) جزو نواحی مرتبط با حاشیه فعال قاره‌ای به شمار می‌آیند (خادمیان و همکاران، ۱۴۰۱)، بنابراین لازم است، منشأ سنگی این واحدها با دقت بیشتری مطالعه شود چرا که محیط‌های مرتبط با فرورانش یکی از پیچیده‌ترین محیط‌های زمین‌ساختی است (ویلسون، ۱۹۸۹) و فرایندهای متفاوتی مانند آزدایی قطعه فرورونده، ذوب بخشی، جدایش بلورین، هضم و اختلاط ماگمایی می‌توانند در تکوین و تکامل این ماگماها مؤثر باشد. این نوشتار مشاهدات صحرایی جدید و داده‌های ژئوشیمیایی سنگ‌کل از سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب را ارائه می‌کند. هدف اصلی این پژوهش بررسی نقش فرایندهای جدایش بلورین، اختلاط ماگمایی و آلایش پوسته‌ای در تشکیل سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب (شمال‌باختری نائین)

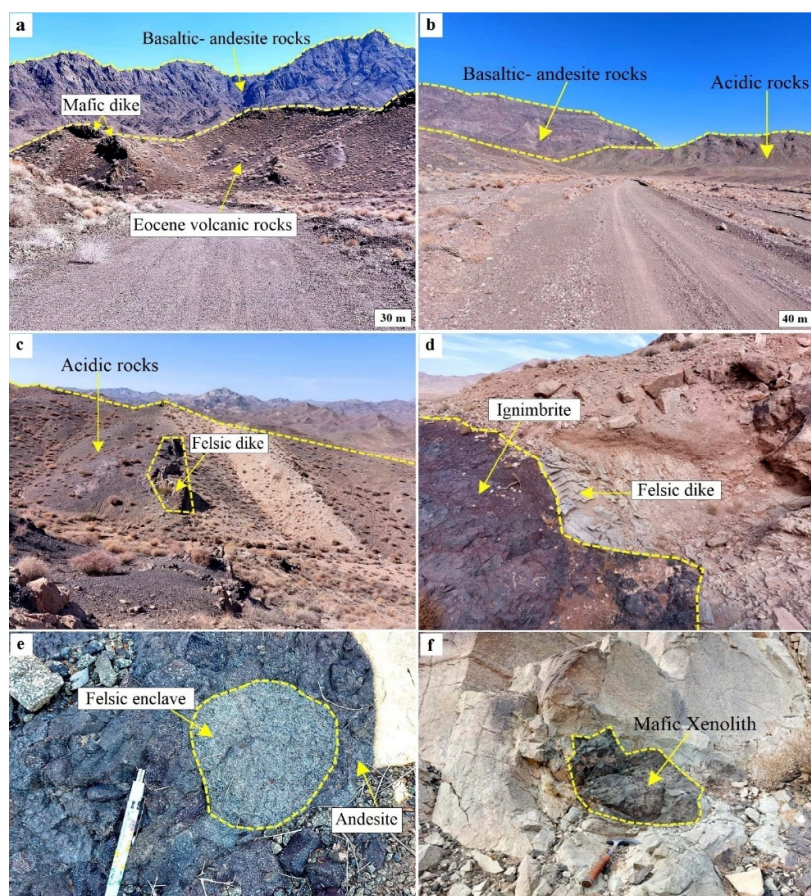
راستای شمال باختری - جنوب خاوری و گسل کچومثقال و ظفرقند با راستای کلی خاوری - باختری می‌باشد که سیمای ریخت زمین‌ساختی منطقه را تحت تاثیر قرار داده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). این گسل‌ها با سازوکار امتدادلغز راستگرد با مؤلفه شیبی معکوس باعث تغییر شکل‌های شکننده در مقیاس وسیع و کانی‌سازی در سطح منطقه شده است (خادمیان و همکاران، ۲۰۲۴).

باختری مورد هجوم قرار گرفته‌اند (شکل ۲- a, b, c و d). فعالیت آتشفشانی در محدوده مورد بررسی در ائوسن زیرین آغاز شده و در ائوسن میانی و فوقانی به اوج خود رسیده است. از دید زمین‌ساخت، منطقه مورد بررسی ساختار پیچیده‌ای دارد و گسل‌های متعدد با روندهای مختلف ساختار عمومی واحدها را به هم ریخته است. از جمله گسل‌های اصلی و فعال منطقه گسل کاشان با



شکل ۱. a) جایگاه محدوده مورد بررسی بر روی واحدهای اصلی رسوبی و ساختاری ایران (آغانباتی، ۱۹۹۸) با علامت مستطیل نشان داده شده است؛ b) نقشه زمین‌شناسی شمال باختر نائین بر پایه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرباب (با تغییراتی پس از بحرودی و فنودی، ۱۳۸۲؛ خادمیان و همکاران، ۲۰۲۴).

Fig. 1. a) The location of the studied area is shown with a rectangle symbol on the major sedimentary and structural units of Iran (Aghanabati, 1998); b) Geological map of south of Shahrab based on 1:100000 geological map of Shahrab (Modified after Bahroudi and Fonoudi, 2003; Khademian et al., 2024).



شکل ۲. تصاویر صحرایی بیرون‌زدگی‌های واحدهای سنگی مختلف، جنوب شهراب (شمال‌باختری نائین): (a) دورنمای سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و آندزیت بازالت به همراه دایک‌های مافیک در جنوب شهراب (دید به سمت شمال); (b) دورنمای سنگ‌های آتشفشانی آندزیت بازالت و اسیدی در جنوب روستای کهیاز (شهراب) (دید به سمت شمال‌باختر); (c) سنگ‌های اسیدی همراه با دایک فلسیک در محدوده مورد بررسی (دید به سمت شمال‌خاور); (d) واحد آذرآواری (ایگنمبریت) رخنمون‌یافته همراه با دایک فلسیک (دید به سمت جنوب‌خاور); (e) حضور آنکلاو فلسیک در سنگ‌های آندزیتی جنوب شهراب (دید به سمت شمال); (f) حضور زینولیت مافیک در سنگ‌های اسیدی جنوب روستای کهیاز (جنوب شهراب) (دید به سمت شمال‌خاور).

Fig. 2. Field photographs of outcrops of different rock units, south of Shahrab; a) Far view of Eocene volcanic rocks and Basaltic andesite with mafic dikes in the south of Shahrab (look toward the north); b) Far view of basaltic andesite and acidic rocks in the south of Kahyaz village (look toward northwest); c) Acidic rocks with felsic dikes in the studied area (look toward northeast); d) The pyroclastic unit (ignimbrite) exposed along with the felsic dike (look towards the southeast); e) The presence of a felsic enclave in the andesitic rocks south of Shahrab (look towards the north); f) The presence of mafic xenolith in acidic rocks south of Kahyaz village (south of Shahrab) (look towards the northeast).

۳- روش بررسی

برای رسیدن به اهداف این پژوهش، پس از بازدید صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای آتشفشانی مختلف با سن ائوسن، ۵۰ مقطع نازک تهیه شد. پس از بررسی‌های سنگ‌شناسی (شناسایی نوع کانی‌ها و بافت سنگ‌ها)، شمار ۲۰ نمونه با دگرسانی کمتر برای تجزیه شیمیایی انتخاب و در آزمایشگاه شرکت زرآما به روش ICP-OES (طیف‌سنج جرمی پلاسمای انتشار اتمی) برای عنصرهای اصلی و ICP-MS (طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی) برای عنصرهای کمیاب و حاکی کمیاب تجزیه شدند. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌ها با نرم‌افزارهای

GCDKit و Corel Draw X7 طراحی و سپس تفسیر شد. داده‌های تجزیه شیمیایی به همراه مختصات جغرافیایی نمونه‌های برداشت شده در جدول ۱ آورده شده است.

۴- سنگ‌شناسی

بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب شهراب در غالب آندزیت بازالت، آندزیت، ریوداسیت و ریولیت رخنمون یافته‌اند.

بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی شمال باختر نائین دارای بافت پورفیریک با خمیره میکروولیتیک، اینترگرانولار، گلومروپورفیریک و

شده و شکستگی هستند. همچنین کانی پلاژیوکلاز در مواردی به طور بخشی و یا کامل به اپیدوت و کلسیت دگرسان شده‌اند. از بافت‌های معمولی که کانی پلاژیوکلاز از خود نشان می‌دهد، می‌توان به بافت غربالی اشاره کرد (شکل ۳-۳). در محل حفرات مربوط به بافت غربالی، کانی‌های ثانویه نظیر کلسیت و کلریت جانشین شده است.

حفره‌ای می‌باشند (شکل ۳-۳ و b). این سنگ‌ها از لحاظ کانی‌شناسی اغلب شامل پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، کوارتز، آلکالی فلدسپار، بیوتیت، کانی‌های ثانویه (کلسیت، کلریت و اپیدوت) و کدر هستند. پلاژیوکلاز در سنگ‌های شمال باختر نائین به دو صورت بلورهای درشت و میکروولیت و حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد حجمی دیده می‌شود. بلورهای درشت این کانی به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با اندازه ۰/۲ تا ۴ میلی‌متر دارای حواشی خورده

جدول ۱. نتایج تجزیه‌های شیمیایی اکسیدهای اصلی (به جزء SO_3) و عنصرهای فرعی و خاکی کمیاب (ppm) سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب.

Table 1. Results of chemical analyses of the major oxides (in wt %) and trace element (ppm) composition of volcanic rocks in the south of Shahrab.

		Rock Type				Basaltic andesite				
Sample No.		Mf-1	Mf-19	Kf-3	Mf-8	Kf-15	Mf-11	Mf-3	Mf-4	Kf-8
Position	X	652771	653913	657601	653091	667990	653074	652773	653160	657601
Y		3666210	3667707	3666778	3666062	3670281	3666079	3666113	3666112	3666778
SiO ₂		48.61	49.79	51	51.26	52.28	53.22	53.37	54.03	55.33
TiO ₂		0.97	0.82	0.7	1.6	0.93	0.92	0.9	1.1	1.02
Al ₂ O ₃		17.66	14.16	18.45	15.33	15.19	15.16	16.9	14.89	13.91
Fe ₂ O ₃		9.91	6.19	7.1	12.14	7.73	8.75	8.29	7.27	9.52
MnO		0.21	0.21	0.34	0.43	0.27	0.36	0.46	0.3	0.34
MgO		5.49	3.23	5.67	4.15	4.03	6.93	5.97	2.74	4.94
CaO		8.18	13.57	6.14	6.74	11.6	6.26	7.65	9.6	5.52
Na ₂ O		3.58	1.43	2.4	3.44	1.61	1.81	1.95	1.62	2.13
K ₂ O		1.4	0.91	1.06	1.59	0.98	1.58	0.68	1.38	1.67
P ₂ O ₅		0.18	0.33	0.14	0.47	0.45	0.25	0.23	0.53	0.3
LOI		3.44	9.28	6.83	2.77	4.73	4.59	3.46	6.35	5.17
Total		99.94	100	99.94	99.97	100	100	100	100	100
Sc		28.5	24.2	27	28.4	28.7	26.4	29.7	28.2	23.4
V		270	167	213	280	206	223	246	200	186
Cr		29	200	82	27	126	39	39	38	118
Co		30.1	26.4	26.2	26.9	29	28	29.5	29.3	25.6
Ni		26	65	19	21	40	28	28	30	50
Cu		53	50	149	99	19	135	64	127	7
Zn		91	68	102	148	52	81	107	160	73
As		5.6	7.8	5.2	0.6	5.6	8.7	7.4	31.1	7.7
Rb		84	81	62	97	92	95	90	83	74
Sr		616.5	365	604.3	337.7	454.3	499	541	327	434.8
Y		19.5	18.9	10.8	32.2	20.2	19.4	18.5	21.8	24.6
Zr		53	111	30	150	108	85	68	97	131
Nb		14	9.4	5.3	8.7	10.8	6.4	4.8	5.8	17
Ag		0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.1	0.3	0.1	0.5
Sn		1.2	1.3	0.3	1.8	0.5	1.4	1.3	1.4	0.9
Cs		7.5	5.5	1	3.9	<0.5	5	2.2	6.2	0.7
Ba		521	325	319	573	362	586	623	624	554
La		10	14	16	24	20	11	18	11	22
Ce		22	36	13	53	40	28	22	28	46
Pr		2.27	4.15	1.99	5.77	4.89	3.56	2.96	3.63	5.38
Nd		10.3	19.4	7.6	23.9	19	19.5	16.6	19.3	21.4
Sm		3	3.5	1.8	5.7	4.1	3.6	3.1	4.2	4
Eu		1.22	1.1	0.6	1.45	1.08	1.21	1.27	1.19	1.13
Gd		2.83	3.68	2.19	5.1	4.06	3.76	3.47	4.11	4.8
Tb		0.4	0.7	0.4	1	0.6	0.6	0.6	0.8	0.7
Dy		2.9	4	2.6	5.5	4.2	4.1	4.2	4.6	5
Er		1.6	2.2	1.4	3.4	2.5	2.2	2	2.7	2.8
Tm		0.2	0.4	0.2	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3
Yb		2.32	2.32	1.66	3.85	2.62	2.15	2.38	2.59	2.85
Lu		0.3	0.4	0.2	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
Hf		1.5	2.5	1.6	3.7	3.1	2.4	2	2.6	3.5
Ta		1	0.6	0.5	1	1.1	0.5	0.5	0.5	1.6
Pb		23	20	8	35	5	14	11	29	9
Th		2.1	1.7	0.9	5.7	1.5	3	2	3.4	3.4
U		0.5	0.6	0.3	0.4	0.6	0.9	0.7	1	0.9

ادامه جدول ۱. نتایج تجزیه‌های شیمیایی اکسیدهای اصلی (به جزء SO_3) و عنصرهای فرعی و خاکی کمیاب (ppm) سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب.
Table 1. (Continued). Results of chemical analyses of the major oxides (in wt %) and trace element (ppm) composition of volcanic rocks in the south of Shahrab.

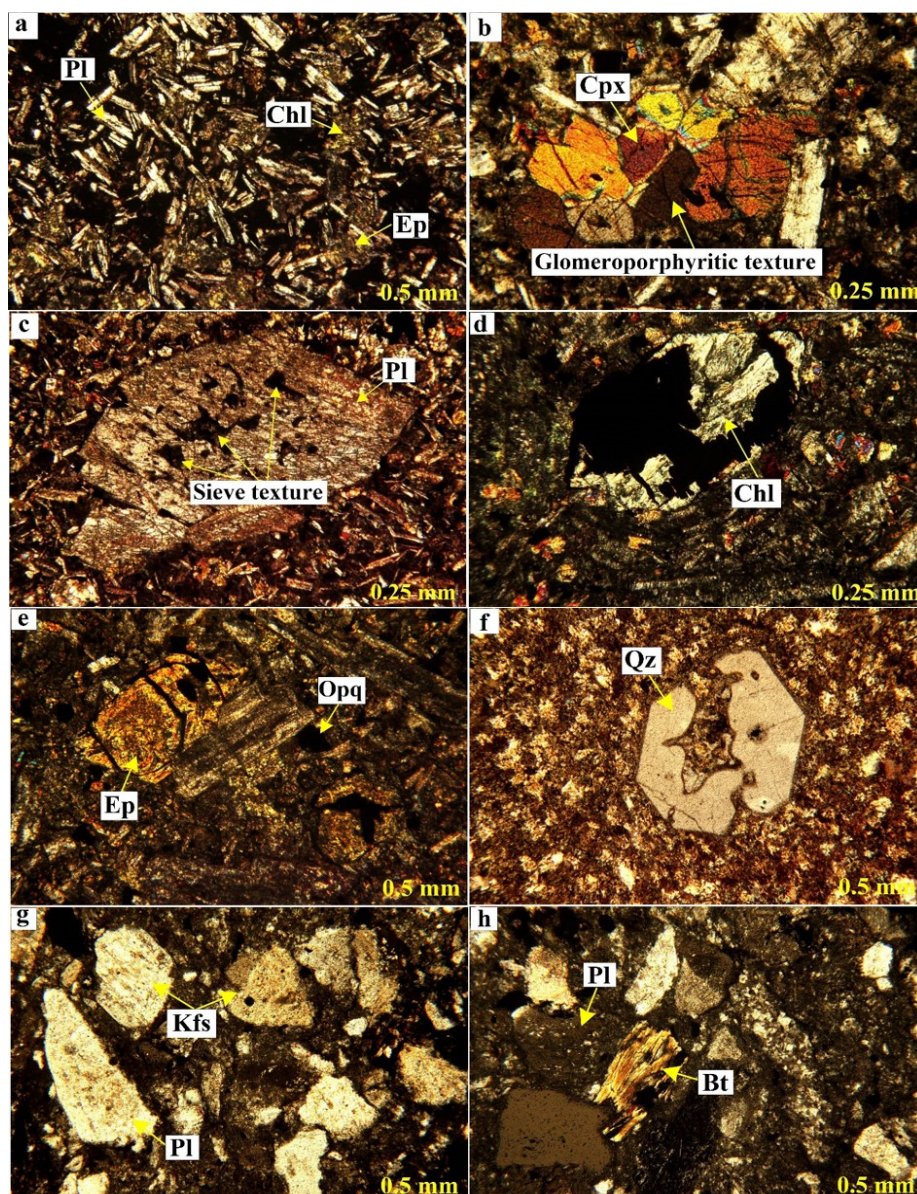
Rock Type		Andesite					Rhyolite					
Sample No.		Mf-14	Mf-17	Kf-11	Kf-1	Kf-2	Kf- 20	Kf- 14	Kf-26	Kf-24	Kf-25	Kf-19
Position X		653091	653480	662747	657755	657750	670663	667990	671845	671171	671835	670720
Y		3666062	3666918	3672959	3667165	3667319	3670241	3670281	3669031	3670108	3669011	3670261
SiO ₂	57.63	57.93	59.94	60.83	62.14	75.01	75.84	76.41	77.53	80.09	81.44	
TiO ₂	0.97	1.29	1.32	0.8	1.02	0.19	0.2	0.11	0.13	0.12	0.13	
Al ₂ O ₃	15.17	15.22	14.92	15.65	14.86	11.51	11.95	11.5	10.88	10.76	10.38	
Fe ₂ O ₃	8.32	9.68	8.31	6.29	6.69	1.01	0.84	1.05	0.91	1.21	0.58	
MnO	0.45	0.31	0.37	0.26	0.34	0.03	0.03	0.11	0.04	0.06	0.03	
MgO	4.2	2.33	3.07	4.15	2.53	0.42	0.65	0.37	0.25	0.26	0.29	
CaO	8.28	6.61	6.67	6.64	5.1	2.14	1.78	2.41	2.01	1.65	1.24	
Na ₂ O	1.75	1.62	2.18	1.72	2.18	0.74	3.07	1.38	0.34	2.31	1.09	
K ₂ O	1.29	2.69	1.29	1.96	1.93	4.9	3.37	3.9	3.59	2.25	3.15	
P ₂ O ₅	0.22	0.46	0.4	0.33	0.41	0.05	0.08	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
LOI	1.55	1.66	1.46	1.31	2.47	3.72	1.96	2.46	4.2	1.1	1.58	
Total	100	100	100	100	99.9	99.98	100	99.99	100	99.96	100	
Sc	32.3	22.8	31.9	22.1	22.8	3.7	4	3.6	3.9	3.9	3.1	
V	274	231	280	176	210	11	11	8	<1	<1	<1	
Cr	45	31	21	76	13	13	12	6	6	12	3	
Co	26.5	17.2	20.9	21.5	18.2	1.9	2.1	1.6	1.1	1.2	1.2	
Ni	18	15	9	27	8	2	2	4	2	4	4	
Cu	34	12	69	4	59	76	7	8	9	3	96	
Zn	96	73	95	62	94	58	37	80	69	21	6	
As	5.5	10.7	5	6	11.7	3.3	2.9	7.1	6.9	8.9	6.9	
Rb	99	96	98	87	96	114	96	105	95	98	126	
Sr	406	347	393.8	485.2	836.3	112.6	90.2	125.2	41.7	102.4	139.5	
Y	21.8	25.6	29.3	19.8	29.6	14.6	16.6	16.4	13.5	18.6	14.8	
Zr	90	121	133	123	135	67	77	66	66	72	60	
Nb	5.4	7.4	7.4	9.8	8.2	12.9	15.6	11.4	13.9	11	11.7	
Ag	0.4	0.2	0.5	0.5	0.6	0.2	<0.1	0.3	0.3	0.1	0.5	
Sn	1.6	2	0.9	0.7	1.5	1.7	2	0.8	1.5	1.3	0.9	
Cs	2	3.8	<0.5	0.8	2	4.2	2.8	3.1	4.9	1.4	2.3	
Ba	442	670	278	472	459	623	391	370	394	580	551	
La	11	17	16	21	26	20	28	24	27	23	22	
Ce	28	41	36	42	54	40	56	43	46	45	40	
Pr	3.52	4.86	4.51	4.33	5.92	3.45	4.48	4.23	4.55	4.35	3.66	
Nd	19.1	22.5	18.3	16.8	22.7	11.6	15.4	14	14.4	14.2	11	
Sm	3.3	5.4	4.1	3.1	4.7	2.1	2.9	2.4	2.4	2.5	1.9	
Eu	1.13	1.47	1.3	0.87	1.32	0.19	0.47	0.16	<0.1	<0.1	0.19	
Gd	3.56	4.8	4.93	4.21	5.01	2.58	3.03	2.92	2.45	2.83	2.24	
Tb	0.7	0.9	0.8	0.6	0.8	0.2	0.3	0.5	0.4	0.5	0.3	
Dy	4.4	5.5	6.1	3.8	5.9	2.3	2.5	3.1	2.5	3.3	2.1	
Er	2.5	3	3.4	2.5	3.3	1.5	1.7	2	1.7	2.2	1.8	
Tm	0.4	0.5	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	
Yb	2.66	2.78	3.51	2.39	3.17	1.57	1.85	1.85	1.58	2.01	1.34	
Lu	0.4	0.5	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	
Hf	2.4	3.4	3.7	3.2	4	2.2	2.4	2.7	2.6	2.7	2.7	
Ta	1.3	0.6	0.8	1	0.8	1.2	1.2	1.6	2.3	1.3	1.2	
Pb	3	45	9	6	11	<1	<1	17	14	7	13	
Th	3.5	4.4	1.8	3.2	6.4	9.9	10.2	8.2	9.2	8.7	7.9	
U	1.1	1.4	0.8	1	1.7	1.5	1.1	2.1	1.9	2.3	2	

درشت و ریز موجود در زمینه را شامل می‌شوند. کانی کلینوپیروکسن به طور عمده به کلریت و گاه اپیدوت دگرسان شده‌اند (شکل ۳-d و e). در ریولیت‌های منطقه مطالعه شده، کانی کوارتز به مقدار زیاد و با اندازه ۱ تا ۳ میلی‌متر با بافت خوردگی خلیجی می‌باشد (شکل ۳-f). کانی پلاژیوکلاز با درصد حجمی ۱۰ تا ۱۲ درصد است که

کانی کلینوپیروکسن از نوع اوژیت با فراوانی حدود ۲۰ درصد مجموع بلورهای درشت، به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده و ابعاد آن‌ها تا ۳ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۳-b). کلینوپیروکسن‌ها به دو صورت سالم و دگرسان شده مشاهده می‌شوند. کلینوپیروکسن‌های سالم عمدتاً بلورهای درشت و انواع دگرسان شده، بلورهای

دشوار نموده است (شکل ۳-گ). کانی بیوتیت به صورت شکل‌دار و در اندازه کوچک تا متوسط در مقاطع دیده می‌شود (شکل ۳-ه).

در بعضی موارد به طور کامل به کانی کلسیت دگرسان شده است. کانی پتاسیم فلدسپار تحت تأثیر دگرسانی، کائولینیتی شده که این مسئله شناسایی نوع این کانی را



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب: (a) بافت پورفیریک با خمیره میکرولیتیک در یک نمونه آندزیت؛ (b) بافت گلومروپورفیریک کانی کلینوپیروکسن در آندزیت بازال؛ (c) بافت غریالی کانی پلاژیوکلاز در یک نمونه آندزیت؛ (d) دگرسانی بلور درشت کلینوپیروکسن به کلریت در یک نمونه آندزیت؛ (e) کانی کلینوپیروکسن دگرسان شده به کانی اپیدوت در آندزیت بازال؛ (f) بافت پورفیریک بلور درشت کوارتز در خمیره دانه ریز در یک نمونه ریولیت؛ (g) بلورهای درشت پلاژیوکلاز و پتاسیم فلدسپار در یک نمونه ریولیت؛ (h) کانی بیوتیت همراه با کانی پلاژیوکلاز در یک نمونه ریولیت؛ (علائم اختصاری کانی‌ها: Qz: quartz; Bt: biotite; Pl: plagioclase; Ep: epidote; Cpx: clinopyroxene; Chl: Chlorite; Kfs: k-feldspar; Opq: opaque). (Withney and Evans, 2010).

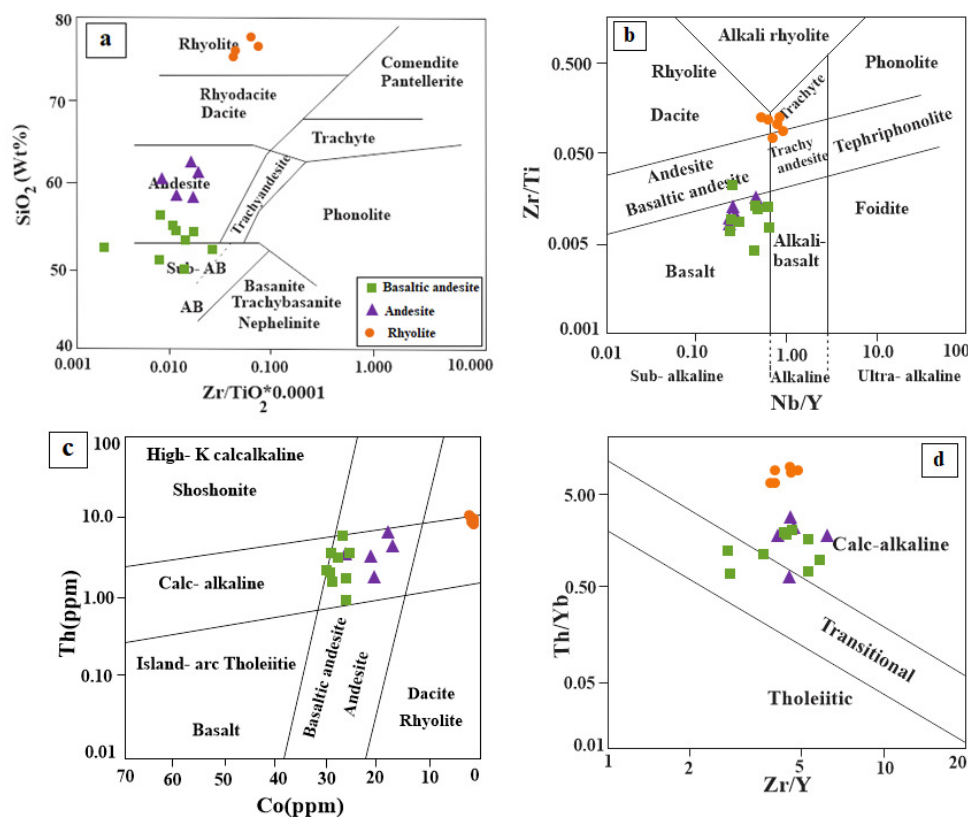
Fig. 3. Microphotographs of volcanic rocks in the south of Shahrab; a) Porphyritic texture with microlithic groundmass in the andesite sample; b) Glomeroporphyritic texture of clinopyroxene mineral in basaltic andesite rocks (XPL); c) Sieve texture of plagioclase phenocryst (XPL); d) Clinopyroxene phenocryst altered to chlorite in the andesite sample (XPL); e) Clinopyroxene mineral altered to epidote in basaltic andesite (XPL); f) porphyritic texture of quartz phenocrysts in fine-grained groundmass in the rhyolite rock (XPL); g) Phenocrysts of plagioclase and k-feldspar in a rhyolite rock (XPL); h) Biotite and plagioclase minerals in the rhyolite rock (XPL). (Mineral abbreviations: Ep: epidote; Cpx: clinopyroxene; Pl: plagioclase; Chl: Chlorite; Qz: quartz; Bt: biotite; Kfs: k-feldspar; Opq: opaque (Withney and Evans, 2010).

۵- نتایج

۵-۱- زمین‌شیمی

داده‌های تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی و کمیاب سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهرباب (شمال باختر نائین) در جدول ۱ ارائه شده است. اغلب سنگ‌های آتشفشانی محدوده مورد بررسی مقادیر $L.O.I^1$ بالایی را نشان می‌دهند که بیانگر شدت پدیده دگرسانی و تأثیر محلول‌های گرمایی می‌باشد. به همین منظور از فراوانی عنصرهای کمیاب و کم تحرک Nb, Y, Zr و Ti برای نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی استفاده شده است. میزان سیلیس سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهرباب بین ۴۸/۶۱ تا ۸۱/۴۴ درصد متغیر است. این سنگ‌ها در نمودار رده‌بندی برپایه نسبت Zr/TiO_2 در مقابل SiO_2 (وینچستر

و فلویید، ۱۹۷۷) در محدوده ساب‌آلکالی بازالت، آندزیت، ریوداسیت و ریولیت واقع می‌شوند (شکل ۴-ا). رده‌بندی (پیرس، ۱۹۹۶) که بر حسب تغییرات Zr/Ti در مقابل Nb/Y ترسیم شده است، سنگ‌های مورد بررسی در محدوده بازالت، آندزیت بازالت، آندزیت و ریولیت جانمایی می‌شوند (شکل ۴-ب). به منظور تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه از نمودار Th مقابل Co (هستی و همکاران، ۲۰۰۷) و نمودار Th/Yb مقابل Zr/Y (راس و بیدارد، ۲۰۰۹) استفاده شده است. با توجه به نمودار Th مقابل Co نمونه‌ها ماهیت کالک‌آلکان را نشان می‌دهند و در نمودار Th/Yb در مقابل Zr/Y ، تعلق نمونه‌ها به سری ماگمایی کالک‌آلکان تأیید می‌شود (شکل ۴-ج و د).



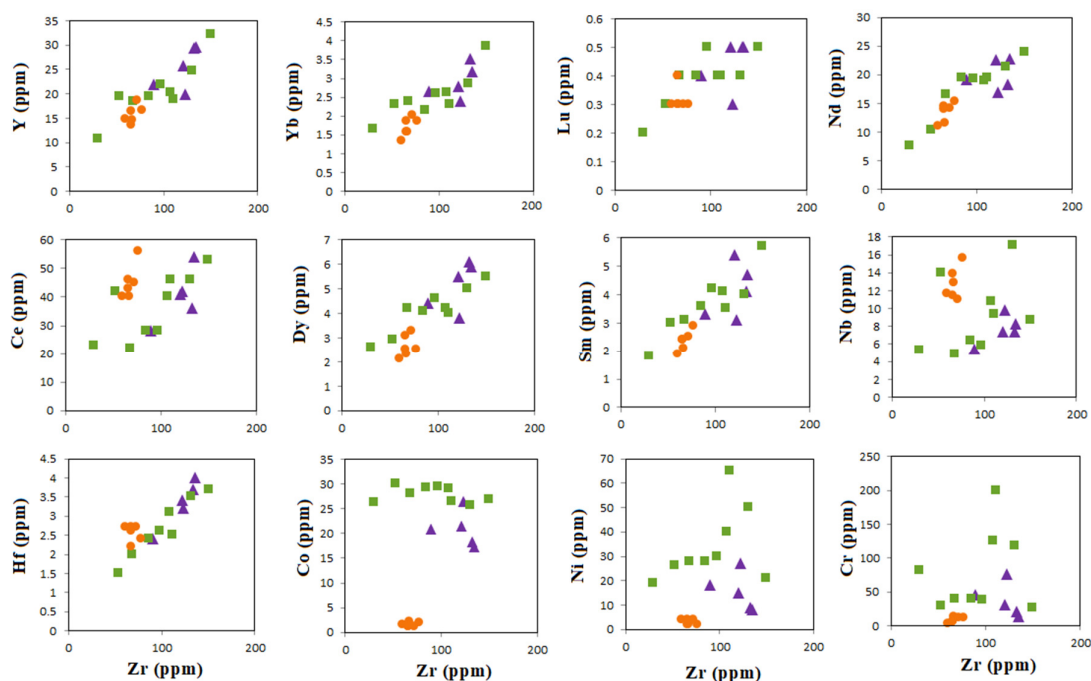
شکل ۴. طبقه‌بندی شیمیایی و تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی واقع در جنوب شهرباب (شمال باختری نائین): (a) نمودار Zr/TiO_2 در مقابل SiO_2 (وینچستر و فلویید، ۱۹۷۷); (b) نمودار Nb/Y در مقابل Zr/Ti (پیرس، ۱۹۹۶); (c) نمودار Th در مقابل Co (هستی و همکاران، ۲۰۰۷); (d) نمودار Th/Yb در مقابل Zr/Y (راس و بیدارد، ۲۰۰۹).

Fig. 4. Chemical classification and determination of magmatic series of volcanic rocks located in the South of Shahrab; a) Zr/TiO_2 versus SiO_2 diagram (Winchester and Floyd, 1977); b) Zr/Ti versus Nb/Y trace elements ratio diagram (Pearce, 1996); c) Th versus Co diagram (Hastie et al, 2007); d) Zr versus Y diagram (Ross and Bedrad, 2009).

¹ loss on ignition values

عنصرهای ناسازگار (Hf, Y, Yb, Nd, Nb, Dy, Lu, Sm, Ce)، در مقابل Zr دارای روند مثبت و عنصرهای سازگار (Ni, Co, Cr) در مقابل Zr دارای روند تقریباً منفی می‌باشند (شکل ۵) که نشان‌دهندهٔ قرابت ژنتیکی و خویشاوندی سنگ‌های حدواسط منطقه با یکدیگر است (خادمیان و همکاران، ۱۴۰۱). با توجه به قرارگیری سنگ‌های اسیدی در برخی از نمودارهای دو متغیره، به نظر می‌رسد که سنگ‌های اسیدی منشأ متفاوتی از سنگ‌های حدواسط در منطقه مورد بررسی دارند که در ادامه به این موضوع بیشتر پرداخته می‌شود. همچنین با توجه به حساسیت برخی عنصرهای کمیاب در مقابل تحولات ماگمایی، پراکندگی تعدادی از نمونه‌ها می‌تواند نشانگر تغییر شرایط ژئوشیمیایی در حین تشکیل، صعود، فوران و انجماد باشد.

به منظور بررسی رفتار ژئوشیمیایی عنصرها و نمایش ارتباط ژنتیکی سنگ‌های آتشفشانی گسترهٔ مورد بررسی با یکدیگر، از نمودارهای دو متغیره عنصرهای کمیاب ناسازگار و سازگار استفاده شده است. برای پی‌بردن به روند تحولات ماگمایی سعی شده است از عنصرهایی استفاده شود که تحت تأثیر فرآیندهای ثانویه مانند دگرسانی و دگرگونی درجه پائین قرار نمی‌گیرند و نامتحرک می‌باشند. این عنصرها شامل عنصرهای ناسازگار (Zr, Hf, Y, Yb, Nd, Nb, Dy, Lu, Sm, Ce) نظیر (Ni, Cr, Co) می‌باشند (گالان و همکاران، ۲۰۰۶). به همین منظور از عنصر بسیار ناسازگار Zr که تحرک بسیار کمی دارد (تالوسانی، ۲۰۱۰؛ منگ و همکاران، ۲۰۱۲) و دارای دامنهٔ تغییرات در نمونه‌های سنگی می‌باشد، برای ترسیم نمودارهای دو متغیره استفاده گردید (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۶). نمودار تغییرات تمرکز



شکل ۵. موقعیت نمونه‌های آتشفشانی جنوب شهراب (شمال باختر نائین) در نمودارهای تغییرات عنصرهای کمیاب در مقابل Zr. (علائم مشابه شکل ۴).

Fig. 5. The location of the volcanic rocks south of Shahrab in the diagram of trace elements versus Zr (in ppm). (Symbols are as Figure 4).

۱۹۸۹) و به‌هنگار شده به ترکیب کندریت (سان و مک‌دنووی، ۱۹۸۹)، نمونه‌های آتشفشانی جنوب شهراب در شکل ۶ نمایش داده شده است. نمونه‌های آتشفشانی، غنی‌شدگی از عنصرهای لیتوفیل بزرگ یون (LILE) مانند

۵-۲- بررسی تغییرات عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب

الگوهای تغییرات عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب به‌هنگار شده در برابر ترکیب گوشتهٔ اولیه (سان و مک‌دنووی،

لیتوسفر فرورونده که از Nb فقیر و از LILE غنی هستند، به گوه گوشته‌ای افزوده می‌شوند (بورگ و همکاران، ۱۹۹۷). بالا بودن میزان عناصر K, Ba, Ce در واحدهای آتشفشانی منطقه می‌تواند بیانگر هضم سنگ‌های پوسته قاره‌ای در مسیری که مذاب از پوسته تحتانی و گوشته فوقانی از سنگ‌ها عبور نموده و یا دخالت ماگمایی از خاستگاه پوسته قاره‌ای (ذوب‌بخشی) و ماگمایی از منشأ عمیق‌تر به صورت اختلاط ماگمایی باشد. غنی‌شدگی عنصرهای U, Th و تهی‌شدگی Y و HREE با هضم سنگ‌های پوسته‌ای سازگار است و نقش آلاینش پوسته‌ای در پیدایش سنگ‌های منطقه را نشان می‌دهد (فن و همکاران، ۲۰۰۳؛ چوبان و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال، رسوبات بالای صفحه فرورونده نیز می‌توانند این عناصر را مشابه ترکیبات پوسته‌ای سنگ دیواره به ماگمای صعودکننده اعمال کنند. بنابراین برای تفکیک آن‌ها، شاخص‌های ژئوشیمیایی لازم است. رسوبات پلاژیک بالای صفحه فرورونده دارای نسبت‌های La/Nb (حدود ۳/۵)، Pb/Rb (۰/۳۷-۰/۳) و Pb/K₂O (۱۴-۱۲) و میانگین نسبت Sm/Hf برابر با ۳ هستند. در حالی‌که در پوسته قاره‌ای نسبت‌های پائین‌تر (La/Nb) بین ۱-۳، Pb/Rb بین ۰/۲-۰/۱۵ و Pb/K₂O بین ۸-۰ و میانگین Sm/Hf برابر ۱ می‌باشد (پلانک، ۲۰۰۵). این نسبت‌ها در سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب (La/Nb) بین ۳/۷۵-۰/۷۱ با میانگین ۲/۰۸، Pb/Rb بین ۰/۳۶-۰/۳ و میانگین ۰/۱۶، Pb/K₂O بین ۴۲/۶۴-۱/۵۳ و میانگین ۱۲/۱۰ و نسبت Sm/Hf با میانگین ۱/۲۵ هستند. نسبت‌های یاد شده از پوسته قاره‌ای (La/Nb, Pb/Rb و Sm/Hf) در نمونه‌های منطقه با پوسته قاره‌ای انطباق قابل‌توجهی دارند و می‌توان مطرح نمود که آلاینش با مواد پوسته‌ای در سنگ‌های آتشفشانی حدواسط و ذوب‌بخشی پوسته در ایجاد واحدهای اسیدی نقش داشته است.

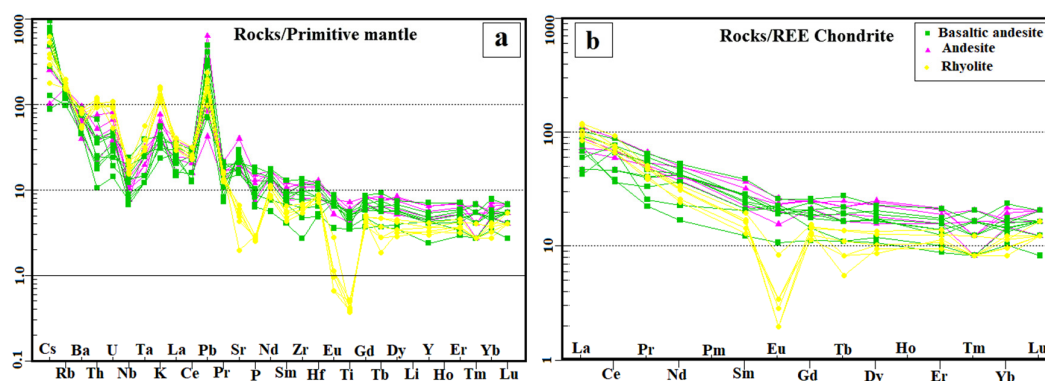
۵-۳- بررسی محیط زمین ساختی پیدایش سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب

غنی‌شدگی عنصرهای LREE نسبت به عنصرهای HREE همراه با غنی‌شدگی در عنصرهای LILE (مانند باریم، پتاسیم، سزیم و روبیدیم) و تهی‌شدگی عنصرهای HFSE به‌ویژه بی‌هنجاری منفی در عنصرهای نیوبیم و تیتانیوم در واحدهای آتشفشانی جنوب شهراب (شمال باختر نائین) از

باریم، پتاسیم و سزیم و تهی‌شدگی از عنصرهای با میدان پایداری بالا (HFSE) مانند نیوبیم، زیرکن و تیتانیوم نشان می‌دهند (شکل ۶-ا). غنی‌شدگی در عنصرهای (K, Ba, Cs) و بی‌هنجاری منفی در عنصرهای (Ti و Nb, Zr) از ویژگی‌های زمین‌شیمیایی ماگماتیسیم حاکم بر کمان‌های آتشفشانی مرتبط با پهنه فرورانش و حاشیه فعال قاره‌ای است و می‌تواند بیانگر شکل‌گیری این سنگ‌ها از منشأ گوشته سنگ‌کره‌ای متاسوماتیسیم شده باشد (چاشچین و همکاران، ۲۰۱۶؛ یو و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین برخی از این ویژگی‌ها ناشی از ترکیب بازالتی منبع مذاب است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸). غنی‌شدگی از Pb در الگوهای عناصر کمیاب، حاصل تأثیرات متفاوت مواد پوسته‌ای است (لیو و همکاران، ۲۰۱۴) که نقش آن را در ژنز سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب تأیید می‌کند. در نمودار عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده نسبت به کندریت (آندرس و گروز، ۱۹۸۹) نمونه‌های مورد بررسی، غنی‌شدگی متوسط از عنصرهای خاکی کمیاب سبک (LREE) نسبت به عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREE) و بی‌هنجاری منفی Eu را نشان می‌دهند (شکل ۶-ب). روند غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE می‌تواند ناشی از ذوب‌بخشی درجه پایین منبع گوشته‌ای و یا آلاینش ماگما با مواد پوسته‌ای باشد (آلمیدا و همکاران، ۲۰۰۷). تهی‌شدگی Eu از ویژگی‌های گدازه‌های کالک‌آلکالن وابسته به فرورانش و بیانگر حضور کانی پلاژیوکلاز در خاستگاه ماگماست (یانگ و لی، ۲۰۰۸) و نشان می‌دهد که فلدسپار در تحول ماگما فاز مهمی بوده است (ارسلان و همکاران، ۲۰۰۶). تهی‌شدگی واضح و آشکار Eu و Sr در سنگ‌های اسیدی، نشان می‌دهد که کانی پلاژیوکلاز به عنوان فاز مهم در هنگام جدایش بلورین و یا تغییر فوگاسیته اکسیژن بوده است (رولینسون، ۱۹۹۳؛ وایت، ۲۰۰۵). آلاینش پوسته‌ای ماگمای بازالتی و غنی‌شدگی محل منبع گوشته‌ای سبب افزایش میزان LREE و LILE و کاهش نسبت‌های HFSE/LREE یا HFSE/LILE در ماگما می‌شود (خو و همکاران، ۲۰۱۵). الگوی نسبتاً پرشیب و غنی از عنصرهای LREE، الگوی مسطح عنصرهای HREE و نسبت بالای LREE/HREE برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب شهراب، نقش آلاینش پوسته‌ای و غنی‌شدگی منبع گوشته‌ای را مشخص می‌کند. در مناطق فرورانش، شاره‌های آزاد شده از بخش فوقانی

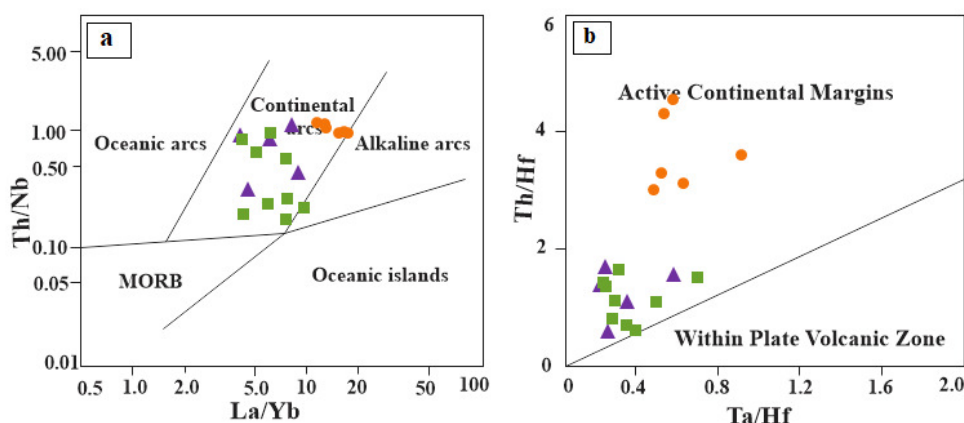
واحدهای آتشفشانی، بیشتر از ۳ باشد این سنگ‌ها متعلق به کمان قاره‌ای و اگر این نسبت کمتر از ۳ باشد، بیانگر کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی می‌باشد. سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده به غیر از دو نمونه دارای نسبت Zr/Y بالاتر از ۳ می‌باشند که نشان‌دهنده ویژگی‌های کمان آتشفشانی قاره‌ای می‌باشد. به منظور تأیید و اثبات جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده از نمودار Th/Nb در مقابل La/Yb (هولوچر و همکاران، ۲۰۱۲) استفاده شده است (شکل ۷-ا). با توجه به این نمودار وابستگی سنگ‌های آتشفشانی منطقه به محیط‌های کمان-های آتشفشانی قاره‌ای ثابت شد. نمودار Th/Hf در مقابل Ta/Hf (شاندل و گورتون، ۲۰۰۲)، بیانگر تعلق نمونه‌ها به محیط حاشیه فعال قاره‌ای می‌باشد (شکل ۷-ب).

ویژگی‌های زمین‌شیمی ماگماهای مرتبط با زون‌های فرورانش است (مارچو و همکاران، ۲۰۰۴؛ نیکلسون و همکاران، ۲۰۰۴؛ هلوچی و همکاران، ۲۰۰۹؛ ذوالقرنین، ۲۰۰۹؛ آسیابان‌ها و همکاران، ۲۰۱۲). جهت تفسیر جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب می‌توان از نسبت Zr/Y و Ba/La استفاده نمود. نسبت Ba/La برای سنگ‌های E-MORB برابر با ۱۰-۱۵، سنگ‌های N-MORB برابر با ۴-۱۰ و برای سنگ‌های آتشفشانی صفحه‌های همگرا بیشتر از ۱۵ است (وود، ۱۹۸۰). این نسبت در کمان‌های آتشفشانی بیشتر از مناطق کششی و مناطق پشت کمان است (مکدونالد و همکاران، ۲۰۰۱). در واحدهای آتشفشانی منطقه، میزان این نسبت از ۱۳/۹۶ تا ۵۶/۷۳ در تغییر است. علاوه بر این اگر نسبت Zr/Y



شکل ۶. (a) نمودار عنصرهای کمیاب بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (داده‌های بهنجارسازی از سان و مک‌دونووی (1989): (b) نمودار عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت (داده‌های بهنجارسازی شده از آندرس و گروز، ۱۹۸۹).

Fig. 6. a) Primitive mantle-normalized trace element diagram (normalization values from Sun and McDonough, 1989), b) Chondrite-normalized REEs elements diagram (normalization values from Andres and Grevesse, 1989).



شکل ۷. شناسایی بهینه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب؛ (a) نمودار Th/Nb در مقابل La/Yb (هولوچر و همکاران، ۲۰۱۲): (b) نمودار Th/Hf در مقابل Ta/Hf (شاندل و گورتون، ۲۰۰۲)، (علامت مشابه شکل ۴).

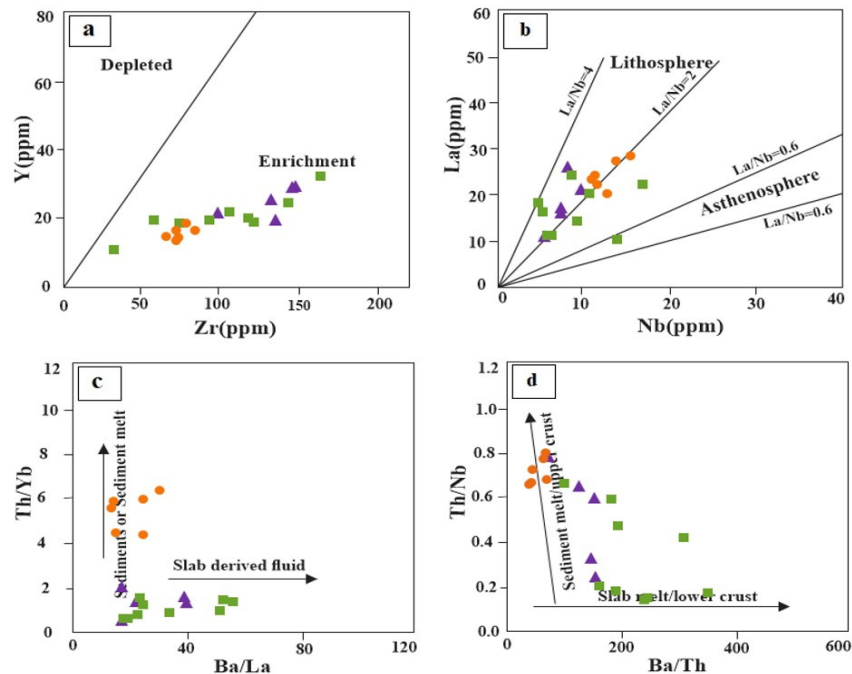
Fig. 7. Identification of the tectonic zone of rocks in the south of Shahrab; a) Th/Nb versus La/Yb diagram (Hollocher et al., 2012); d) Th/Hf versus Ta/Hf diagram (Schandl and Gorton, 2002). (Symbols are as Figure 4).

۵-۴- سرشت سنگ خاستگاه

در محیط زمین‌ساختی حاشیه فعال قاره‌ای، خاستگاه ماگماها می‌تواند پوسته بالایی، میانی و زیرین، پوسته اقیانوسی فرورو و نیز خاستگاه‌های مرکب پوسته‌ای و گوشته‌ای باشد (ویگنرس، ۲۰۰۴). در این بین، ماگماهای حدواسط و اسیدی کالک‌آلکانل می‌توانند از تفریق ماگماهای بازالتی گوشته‌ای در مخازن پوسته‌ای، اختلاط مذاب‌های بازالتی با مذاب‌های حاصل از ذوب بخشی پوسته قاره‌ای و هضم و آلیش با مواد پوسته‌ای نیز به وجود آیند (کوبینگ، ۲۰۰۰؛ ویگنرس، ۲۰۰۴).

بر پایه داده‌های (سان و مک‌دنوی، ۱۹۸۹)، مقادیر Zr/Y برابر $۲/۴۶$ و Nb/Y برابر با $۰/۰۸$ نشان‌دهنده خاستگاه گوشته‌ای تهی‌شده می‌باشد. مقادیر نسبتاً متغیر Zr/Y ($۲/۷۲-۶/۲۱$) و Nb/Y ($۰/۲۵-۱/۰۳$) در نمونه‌های منطقه نشان‌دهنده اشتقاق آن‌ها از یک خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده می‌باشد. همچنین نمودار تغییرات عنصرهای سازگار Zr در مقابل Y (ابو-هماته، ۲۰۰۵)، تعلق این نمونه‌ها به گوشته غنی‌شده را تأیید می‌کند و نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که گوشته توسط سیالات آزاد شده از پوسته اقیانوسی فرورونده غنی شده و ذوب بخشی در آن موجب تشکیل ماگمای غنی‌شده می‌شود (شکل ۸-a). افزون بر این نسبت Zr/Ba ($۰/۰۹-۰/۴۸$)، میانگین $۰/۲۰$ (نسبت Zr/Ba گوشته سنگ‌کره‌ای بین $۰/۳-۰/۵$ ؛ کورکچو اوغلو، ۲۰۱۰) و نسبت Rb/Zr ($۰/۵۶-۲/۱۰$)، میانگین $۱/۱۳$ (نسبت Rb/Zr گوشته متاسوماتیسم شده بیشتر از $۰/۱۲$ ؛ کونلی و همکاران، ۲۰۰۵) به خاستگاه گوشته سنگ‌کره‌ای متاسوماتیسم شده نمونه‌های منطقه اشاره دارد. برپایه نمودار تغییرات La در برابر Nb (گوسف و کوروبینی‌کوف، ۲۰۰۹)، سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب، ویژگی گوشته سنگ‌کره‌ای را نشان می‌دهند. این نمونه‌ها به طور متوسط دارای نسبت La/Nb برابر با $۲/۰۸$ می‌باشند (شکل ۸-b). غنی‌شدگی انتخابی از LREEs، $LILEs$ و بی‌هنجاری مثبت Pb در نمونه‌های مورد بررسی (شکل ۶) می‌تواند مربوط به دخالت اجزای مشتق شده از صفحه اقیانوسی فرورونده و یا ذوب بخشی پوسته اقیانوسی در محل منشأ باشد (کسکین و همکاران، ۱۹۹۸). سیالات مشتق شده و مذاب‌های حاصل از ذوب رسوبات صفحه اقیانوسی معمولاً به عنوان عوامل متاسوماتیک در زون‌های فرورانش در نظر گرفته می‌شوند. بررسی میزان تحرک

عناصر در اجزاء مشتق شده از اسلب فرورونده در زون فرورانش به صورت نسبی است. به عنوان مثال عنصر Ba به دلیل تحرک بالاتری که نسبت به عناصر گروه REE دارد در سیال‌ها قابل حل بوده و در مقابل عناصر Th و Yb به دلیل عدم تحرک وارد سیالات غنی از عنصرهای متحرک مانند LILE نمی‌شود اما در مذاب‌های مشتق شده از رسوبات صفحه اقیانوسی فرورونده تحرک بالاتری از خود نشان می‌دهند (وودهید و همکاران، ۲۰۰۱). از این‌رو، نسبت‌های عناصری مانند Ba/La و Th/Yb می‌توانند نشانگرهای مفیدی از مشارکت سیالات یا دخالت رسوبات در تشکیل ماگماهای فرورانشی در نظر گرفته شوند. با توجه به نمودار Th/Yb در مقابل Ba/La (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰)، نمونه‌های آتشفشانی حدواسط، به علت مقادیر متغیر نسبت Ba/La اما تقریباً یکنواخت نسبت Th/Yb مشخص می‌شوند که نشان‌دهنده منشأیی است که پیش از ذوب، بوسیله سیالات مشتق شده از اسلب اقیانوسی غنی شده‌اند (شکل ۸-c). در این شکل نمونه‌های اسیدی در محدوده رسوبات و ذوب رسوبات واقع شده‌اند که با منشأ این سنگ‌ها در منطقه جنوب شهراب همخوانی دارد. همچنین سنگ‌های منطقه در نمودار Th/Nb در مقابل Ba/Th (اروزکو-اسکوویل و همکاران، ۲۰۰۷)، مقادیر بالای Ba/Th و Th/Nb نشان می‌دهند. رفتار این عناصر کمیاب نشان می‌دهد که نسبت بالای Th/Nb می‌تواند مربوط به مشارکت مذاب حاصل از ذوب رسوبات فرورونده یا پوسته فوقانی باشد در حالی که نسبت بالای Ba/Th باید به متاسوماتیسم منشأ گوشته‌ای به وسیله سیالات مشتق از ورقه فرورونده مربوط باشد. با توجه به این نمودار می‌توان چنین نتیجه گرفت که در خاستگاه نمونه‌های آتشفشانی حدواسط بررسی شده، علاوه بر تأثیر سیالات آزاد شده از ورقه فرورونده، تا حدودی متاسوماتیسم حاصل از ذوب رسوبات نیز نقش داشته است. قرارگیری نمونه‌های اسیدی مطابق با بردار پوسته بالایی نقش ذوب بخشی پوسته را در تشکیل و تکوین سنگ‌های اسیدی منطق مشخص می‌سازد (شکل ۸-d). همچنین مطالعه خادیمان و همکاران (۱۴۰۱) تأثیر سیالات آزاد شده از ورقه فرورونده و متاسوماتیسم حاصل از ذوب رسوبات را در ژنز سنگ‌های آتشفشانی حدواسط جنوب شهراب (شمال باختری نائین) تأیید می‌کند.



شکل ۸. تعیین سرشت خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب: (a) نمودار تغییرات Y در مقابل Zr (ابو-هماته، ۲۰۰۵: b) نمودار La در برابر Nb (گوسف و کوروبینیکوف، ۲۰۰۹: c) نمودار تغییرات Th/Yb در مقابل Ba/La (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰: d) نمودار Th/Nb در برابر Ba/Th (اروزکو-اسکوویل و همکاران، ۲۰۰۷) (علائم مشابه شکل ۴).

Fig. 8. Determining the nature of the origin of volcanic rocks in the Northwest of Nain; a) Diagram of Y versus Zr changes (Abu-Hamatte, 2005); b) La versus Nb diagram (Gusev and Korobeinikov, 2009); c) Diagram of Y versus Zr changes (Wang et al., 2010); d) La versus Nb diagram (Orozco-Esquivel et al., 2007) (Symbols are as Figure 4).

۶- بحث

از ویژگی‌های عنصرهای اصلی و ناسازگار Th, Nb, Hf, Y, و REE به منظور تعیین فرایندهای مؤثر در تکامل و تحولات ماگمایی (مانند: ذوب‌بخشی، جدایش بلورین، هضم و آلیش و اختلاط ماگمایی) سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب استفاده شده است که در ادامه به بررسی نقش هر پدیده پرداخته می‌شود.

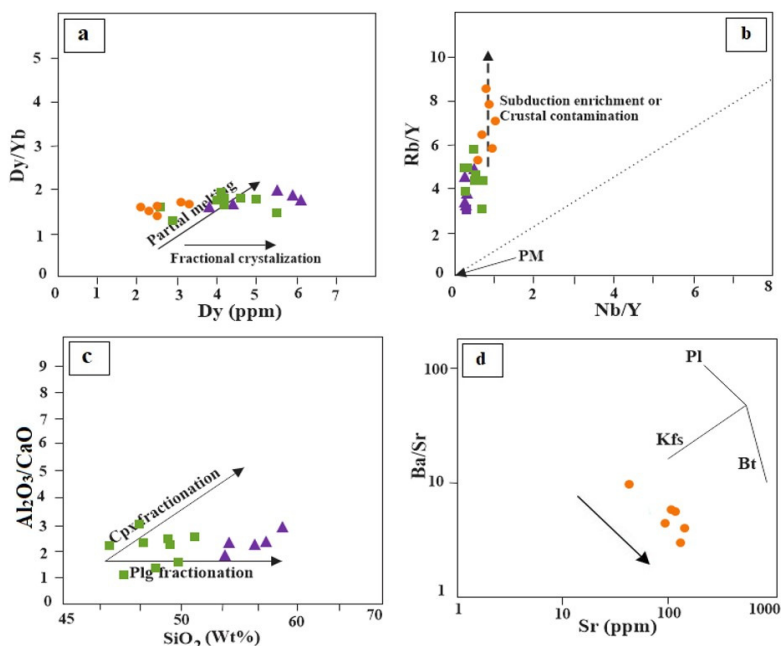
۶-۱- فرایند ذوب‌بخشی و جدایش بلوری

ترکیب ماگمای مشتق شده از گوشته می‌تواند پیش از جایگیری یا در نزدیکی سطح، به‌وسیله تبلور تفریقی تغییر یابد. پراکندگی داده‌ها، روندهای مشاهده شده در نمودارهای دو متغیره (شکل ۵) و حجم بالای سنگ‌های حدواسط در منطقه نشان می‌دهد که تفریق ماگمایی مذاب اولیه به تنهایی نمی‌تواند چنین حجمی از سنگ‌های حدواسط را ایجاد کند و به احتمال قوی پوسته قاره‌ای اسیدی ماگماهای تحول یافته‌تر را تحت تأثیر قرار داده است. برای تمایز ذوب‌بخشی و جدایش بلورین از نمودار Dy/Yb در مقابل Dy (گائو و همکاران، ۲۰۰۷) استفاده

شده است. همان‌طور که شکل ۹-a نشان می‌دهد، ذوب‌بخشی همراه با فرایند تفریق، در تشکیل سنگ‌های آتشفشانی منطقه دخالت داشته است. در نمودار Dy/Yb در مقابل Dy، نمونه‌های اسیدی در امتداد بردار ذوب‌بخشی قرار می‌گیرند و نشان می‌دهد که تبلور تفریقی به تنهایی پاسخگوی تحولات ماگمایی منطقه نیست. با توجه به نمودار شکل ۹-a، با افزایش میزان Dy، نسبت Dy/Yb در نمونه‌های حدواسط تغییرات کم‌تری نسبت به نمونه‌های اسیدی، نشان می‌دهد و می‌توان اینگونه بیان نمود که نمونه‌های آتشفشانی حدواسط بیشتر روندی مطابق با جدایش بلورین را دنبال می‌کنند و فرض تبلور تفریقی را در تکوین و تکامل واحدهای آتشفشانی حدواسط منطقه، محکم می‌کند (شکل ۹-a). همچنین در این نمودار همبستگی مثبت و روندی مطابق با ذوب‌بخشی بین نمونه‌های اسیدی، تأثیر مؤلفه‌های پوسته‌ای، چه از نوع ذوب‌بخشی رسوبات بالای صفحه فرورونده و یا ذوب‌بخشی پوسته را در مورد این سنگ‌ها قوت می‌بخشد. (شکل ۹-a). فعالیت‌های آتشفشانی در مناطق حاشیه فعال قاره‌ای، دارای نسبت Nb/Y کمتر از ۱/۲۲ هستند (کورالای و

پایین La/Yb (۱۷/۰۹-۴/۱۴) با میانگین ۸/۲۴ و Nb/Y در واحدهای آتشفشانی منطقه، نشان می‌دهد که غنی‌شدگی ناحیه منشأ می‌تواند توسط سیالات مشتق شده از صفحه فرورونده اقیانوسی ایجاد شده باشد (هوفر و همکاران، ۲۰۰۸).

همکاران، ۲۰۱۱). این نسبت در نمونه‌های بررسی شده ۰/۲۴-۱/۰۲ با میانگین ۰/۴۳ است و در نمودار Rb/Y در مقابل Nb/Y نمونه‌های مورد بررسی به صورت عمودی و هم‌رند با بردار غنی‌شدگی در مناطق فرورانش و یا آرایش پوسته‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۹-ب). همچنین نسبت‌های



شکل ۹. a) تمایز روند ذوب‌بخشی و جدایش بلورین در نمودار Dy/Yb در مقابل Dy (گائو و همکاران، ۲۰۰۷); b) نمودار Rb/Y در مقابل Nb/Y (تمل و همکاران، ۱۹۹۸); c) نمودار تغییرات Al_2O_3/CaO در مقابل SiO_2 (ژو و همکاران، ۲۰۰۸); d) نمودار Ba/Sr در مقابل Sr (وو و همکاران، ۲۰۰۳). (علامت مشابه شکل ۴).

Fig. 9. a) Distinguishing the process of partial melting and fractional crystallization in the Dy/Yb versus Dy diagram (Gao et al., 2007); b) Rb/Y versus Nb/Y diagram (Temel et al., 1998); c) Diagram of changes Al_2O_3/CaO versus SiO_2 (Zho et al., 2008); d) Ba/La versus Sr diagram (Wu et al., 2003). (Symbols are as Figure 4).

همکاران، ۲۰۱۹). برای بررسی نقش جدایش بلورین و نوع فازهای حاصل از تبلور ماگما از نمودارهای Al_2O_3/CaO در مقابل SiO_2 (ژو و همکاران، ۲۰۰۸) و نمودار Ba/Sr در مقابل Sr (وو و همکاران، ۲۰۰۳) استفاده گردید. در نمودار تغییرات Al_2O_3/CaO در مقابل SiO_2 ، روندهای جدایشی کانی کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز مشخص شده است. طبق این نمودار، با افزایش میزان SiO_2 ، نسبت Al_2O_3/CaO تغییرات بسیار کمی نشان می‌دهد که این ویژگی بیانگر جدایش بلورین کانی پلاژیوکلاز هنگام تحول ماگمای سازنده سنگ‌های حدواسط منطقه مورد بررسی است (شکل ۹-ج). چنانچه در (شکل ۹-د)، مشاهده می‌شود، مقدار نسبت Ba/Sr با افزایش Sr به صورت خطی کاهش می‌یابد. این ویژگی با جدایش کانی پلاژیوکلاز در سنگ‌های اسیدی منطقه سازگار است.

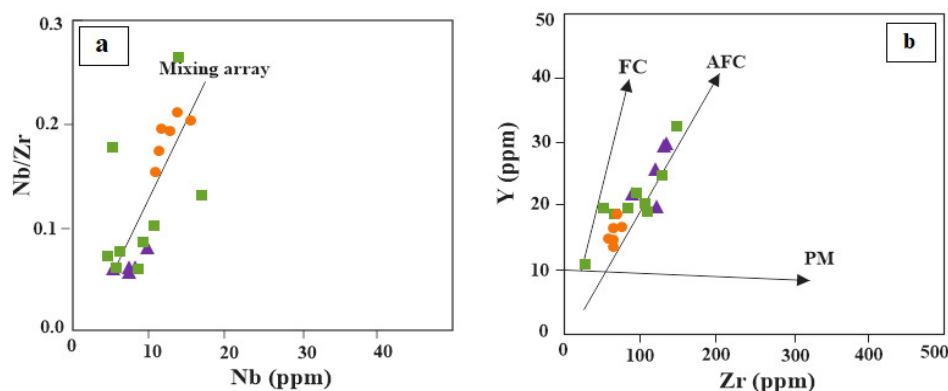
در سنگ‌های مورد بررسی میزان MgO (۲۵/۰ - ۶/۹۳ درصد وزنی با میانگین ۲/۳) و مقادیر عنصرهای سازگار Ni (۶۵-۳ ppm با میانگین ۲۰/۱) و Cr (۲۰۰-۳ ppm با میانگین ۴۶/۸) است در حالی که مذاب‌های اولیه مشتق شده از گوشته دارای مقادیر نیکل (Ni) بیش از ۴۰۰ ppm و کروم (Cr) بیشتر از ۱۰۰۰ ppm می‌باشند (ویلسون، ۱۹۸۹). مقادیر بسیار کم این عنصرها در سنگ‌های آتشفشانی منطقه بررسی شده نشان می‌دهد که ماگمای سازنده این سنگ‌ها ماگمای نخستین نبوده و ممکن است این ماگما درون آشیانه ماگمایی، یا هنگام بالا آمدن به سمت پوسته بالایی دچار جدایش بلورین شده باشد که این مسئله به وسیله حضور فراوان بلورهای درشت پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در واحدهای سنگی منطقه نیز تأیید می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ شهسواری علویچه و

ماگمایی باشد (گیل، ۲۰۱۰). پدیده اختلاط ماگمایی را می‌توان با استفاده از نمودار Nb/Zr در مقابل Nb (سوسو، ۲۰۰۰) اثبات نمود. با توجه به شکل ۱۰-ا روند صعودی و شیب‌دار نمونه‌های آتشفشانی محدوده مورد بررسی با روند اختلاط ماگمایی هم‌خوانی دارد. این بدان معناست که سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب حدواسط ممکن است در نتیجه اختلاط ماگماهای بازالتی با ماگمای فلسیک ایجاد شده باشند (یوشیدا و همکاران، ۲۰۱۳). برای بررسی نقش فرایند جدایش بلورین همراه با هضم (AFC) در تحول سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب از نمودار Zr در مقابل Y (عبدالله و همکاران، ۱۹۹۷؛ چنگ، ۲۰۰۱) استفاده شده است که نمونه‌های بررسی شده در راستای روند AFC قرار گرفته و بیانگر تأثیر فرایندهای جدایش بلورین، هضم و آلیش در تحولات و تکوین سنگ‌های آتشفشانی منطقه است (شکل ۱۰-ب). داده‌های زمین‌شیمیایی موجود در مورد سنگ‌های منطقه حاکی از نقش اساسی و توأم فرایندهای جدایش بلورین همراه با هضم و اختلاط ماگمایی در تحول ماگمایی آن‌ها است.

همچنین با توجه به نمودار تغییرات عنصرهای کمیاب (شکل ۷) سنگ‌های اسیدی بررسی شده تهی‌شدگی بسیار Sr و Eu را نشان می‌دهند که این مسئله مربوط به جدایش بلورین کانی پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم‌دار و بیوتیت از مذاب فلسیک چه به وسیله جدایش بلورین و چه به علت ذوب‌بخشی (که در آن فلدسپار در تفاله باقی می‌ماند) است (جانگ و همکاران، ۲۰۰۷). به عبارتی با افزایش میزان SiO₂ در این سنگ‌ها Eu بی‌هنجاری بیشتری نشان می‌دهد که بیانگر درجه بالایی از جدایش بلورین است.

۲-۶- فرایند اختلاط ماگمایی، هضم و جدایش بلورین (AFC)

از دیگر فرایندهای مؤثر در تکامل ماگما، می‌توان به اختلاط ماگمایی اشاره نمود. در بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری حضور بافت‌های غیر تعادلی مانند بافت غربالی در آندزیت‌ها (لی و همکاران، ۲۰۱۳)، حاشیه‌خوردگی کانی کوارتز (سوزانو و همکاران، ۲۰۱۷) و بافت گلومروپورفیریک ناشی از تجمع بلورهای کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز که در تعدادی از مقاطع دیده شده است، می‌تواند احتمالاً گواه اختلاط ماگمایی و اغتشاش در مخزن



شکل ۱۰. تعیین فرایند اختلاط ماگمایی، هضم و جدایش بلورین در واحدهای آتشفشانی جنوب شهراب: (a) نمودار Nb/Zr در مقابل Nb (سوسو، ۲۰۰۰)؛ (b) نمودار Y در مقابل Zr (عبدالله و همکاران، ۱۹۹۷؛ چنگ، ۲۰۰۱). (علامت مشابه شکل ۴).

Fig. 10. Determining the process of magma mixing and assimilation in the volcanic units south of Shahrab; a) Nb/Zr versus Nb diagram (Soesoo, 2000); b) Y versus Zr diagram (Abdollah et al., 1997; Cheng, 2001) (Symbols are as Figure 4).

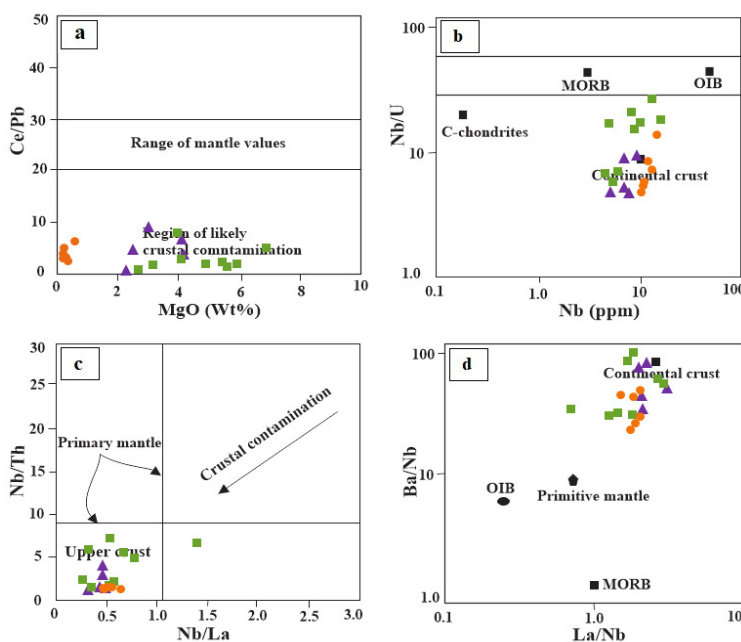
۳-۶- بررسی نقش آلیش پوسته‌ای

تغییری در مقدار آن‌ها، پیامد آلیش پوسته‌ای در ماگمای سازنده این سنگ‌ها است (فورمن، ۲۰۰۷). برای بررسی رخداد آلیش پوسته‌ای، نسبت عنصرهایی مانند Ce/Pb و Nb/U بسیار مفید است. زیرا عنصرهای فوق طی ذوب‌بخشی یا تبلوربخشی از یکدیگر تفکیک نمی‌شوند و نسبت‌های آن‌ها منعکس‌کننده این نسبت‌ها در منطقه

آلیش با مواد پوسته‌ای در سنگ‌ها تأثیر بسیاری در فراوانی عنصرهای فرعی به خصوص عنصرهای ناسازگار دارد. زیرا عنصرهای ناسازگار (مانند: Cs, Rb, K و Zr) در ساختمان کانی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن و اکسیدهای آهن-تیتانیم وارد نمی‌شوند، از این‌رو، افزایش عنصرهای یاد شده و هر

در مقابل Nb (کورنلیوس و همکاران، ۲۰۱۱) مشاهده می‌شود نسبت Nb/U در نمونه‌های مورد مطالعه پایین است و نمونه‌ها در محدوده پوسته قاره‌ای و به دور از محدوده OIB قرار می‌گیرند (شکل ۱۱-b) که این می‌تواند دلیل دیگری بر آلودگی پوسته‌ای در سنگ‌های آتشفشانی حدواسط و نقش ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای در تشکیل سنگ‌های اسیدی منطقه باشد. برای بهتر مشخص نمودن نقش آلودگی پوسته‌ای در سنگ‌های منطقه می‌توان از نمودارهای Nb/Th در مقابل Nb/La (خو و همکاران، ۲۰۱۵) و نمودار Ba/Nb در مقابل La/Nb (دیلک و همکاران، ۲۰۱۰) استفاده کرد (شکل ۱۱-c و d). با توجه به این نمودارها نقش پوسته قاره‌ای به صورت ذوب‌بخشی در تکوین و تکامل سنگ‌های آتشفشانی اسیدی و آلودگی با مواد پوسته‌ای در مورد گدازه‌های حدواسط منطقه تأیید می‌شود. دخالت مؤلفه‌های پوسته‌ای می‌تواند به صورت ذوب‌بخشی رسوبات بالای صفحه فرورونده و یا ذوب‌بخشی پوسته صورت گیرد (لیو و همکاران، ۲۰۱۴؛ مک درموت و همکاران، ۲۰۰۵).

منبع ماگما است (هافمن، ۱۹۸۸). میانگین نسبت Ce/Pb در مایعات بازالتی مشتق شده از گوشته در محدوده 25 ± 5 (هافمن، ۱۹۸۸) و در پوسته قاره‌ای این نسبت برابر با $3/3$ می‌باشد (رودنیک و فونتین، ۱۹۹۵). نسبت Ce/Pb در نمونه‌های مورد بررسی در محدوده $0/91$ تا 8 بوده و بر اساس نمودار Ce/Pb در مقابل MgO (فورمن، ۲۰۰۷) در قلمرو مقادیر آلودگی یافته با پوسته واقع می‌شوند (شکل ۱۱-a). از دیگر راه‌های تشخیص آلودگی پوسته‌ای نسبت Nb/U و Nb/La می‌باشد (پانگ و همکاران، ۲۰۱۳). نسبت Nb/U برای بازالت‌های اقیانوسی در حدود 50 و نسبت Nb/La در حدود $0/9$ تا $1/3$ است (سان و مک‌دنووی، ۱۹۸۹). میزان نسبت‌های یاد شده برای میانگین پوسته قاره‌ای به ترتیب حدود $4/4$ و $0/39$ می‌باشد (رودنیک و گائو، ۲۰۰۳). مقادیر Nb/U سنگ‌های مورد بررسی از $21/75 - 4/35$ و مقادیر Nb/La، $0/77 - 0/26$ بوده که به مقادیر ذکر شده برای پوسته قاره‌ای بالایی نزدیک و دلیلی بر آلودگی پوسته‌ای واحدهای آتشفشانی منطقه است. مواد پوسته‌ای از Nb تهی‌شدگی نشان می‌دهند، بنابراین نسبت Nb/U در آن‌ها پایین است، همانگونه که در نمودار Nb/U



شکل ۱۱. اثبات نقش آلودگی پوسته‌ای در سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهراب: (a) نمودار Ce/Pb در مقابل MgO (فورمن، ۲۰۰۷)؛ (b) نمودار Nb/U در مقابل Nb (کورنلیوس و همکاران، ۲۰۱۱)؛ (c) نمودار Nb/Th در مقابل Nb/La (خو و همکاران، ۲۰۱۵)؛ (d) نمودار Ba/La در مقابل La/Nb (دیلک و همکاران، ۲۰۱۰). (علائم مشابه شکل ۴).

Fig. 11. Determination of crustal contamination in volcanic rocks south of Shahrab; a) Ce/Pb versus MgO diagram (Furman, 2007); b) Nb/U versus Nb diagram (Cornelius et al., 2011); c) Nb/Th versus Nb/La diagram (Xu et al., 2015); d) Ba/La versus La/Nb diagram (Dilek et al., 2010). (Symbols are shown in Figure 4).

نمودارهای دو متغیره در مورد سنگ‌های اسیدی تا حدودی متفاوت از گدازه‌های حدواسط منطقه است و به احتمال قوی عاملی دیگری در تکوین این واحدها نقش داشته است. بنابراین شاید بتوان ذوب‌بخشی پوسته را به عنوان منشأ ماگمای سنگ‌های اسیدی در نظر گرفت. بررسی نسبت‌های مشابه عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی سنگ‌های مورد مطالعه شامل نسبت‌های Sm/Hf , Pb/Rb , La/Nb و Th/Nb نشان می‌دهند که ماگمای سازنده گدازه‌های حدواسط با مؤلفه‌های پوسته‌ای آلاش یافته‌اند اما گدازه‌های اسیدی حاصل ذوب بخشی پوسته بالایی هستند. با توجه به موقعیت زمانی و مکانی سنگ‌های آتشفشانی و همراهی سنگ‌های اسیدی با سنگ‌های حدواسط و مافیک در این منطقه، به نظر می‌رسد در اثر فروانش سنگ‌کره اقیانوسی (نئوتتیس) به زیر سنگ‌کره قاره‌ای که خود تحت تأثیر شارهای مشتق شده از پوسته اقیانوسی در حال فروانش است، گوه گشته‌ای دچار ذوب‌بخشی شده و ماگمای بازیک اولیه را به وجود آورده است. در این زمان ممکن است ماگمای والد بدون عبور از پوسته قاره‌ای به طور مستقیم به سطح زمین رسیده و تشکیل ماگمای بازالتی اولیه را در پهنه فروانشی دهد و یا اینکه ماگمای بازالتی تا مرز پوسته و گوشته صعود کند و در اینجا به دلیل اختلاف چگالی پوسته قاره‌ای با پوسته اقیانوسی، ماگما متوقف گردد و تشکیل محفظه ماگمایی را دهد. این ماگما پیش از فوران، افزون بر اختلاط/آمیختگی ماگمایی، دچار جدایش بلورین، هضم و آلاش با پوسته قاره‌ای بالایی گردیده است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های منطقه، می‌توان اینگونه بیان نمود که سنگ‌های حدواسط منطقه، حاصل آمیختگی با ماگمای مشتق شده از گوشته و پوسته زیرین می‌باشند که ضمن صعود با مواد پوسته‌ای آلاش یافته‌اند. در مورد پیدایش سنگ‌های اسیدی منطقه، می‌توان چنین بیان نمود که ماگمای بازیک حاصل از ذوب‌بخشی گوشته، ضمن صعود به ترازهای بالاتر در پوسته تجمع یافته و گرمای حاصل از آن سبب ذوب‌بخشی پوسته و ایجاد ماگمای اسیدی شده است. واضح است که ماگمای والد پس از صعود در پوسته و تشکیل ماگمای اسیدی، می‌تواند با ماگمای اسیدی نیز اختلاط حاصل نموده و طیف وسیعی از سنگ‌های حدواسط در منطقه را ایجاد نماید. فرضی که

به باور مؤلفان، مشکل بتوان در مورد سنگ‌های آتشفشانی به‌خصوص سنگ‌های اسیدی که مؤلفه‌های پوسته‌ای در تکامل و تحول ماگما دخالت داشته‌اند نقش ذوب‌بخشی پوسته را از ذوب‌بخشی رسوبات بالایی صفحه فرورونده منطقه، متمایز کرد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی (تغییرات عناصر کمیاب) نوشتار گردید و مسائل مطرح شده در بالا، نقش آلاش پوسته‌ای را در تکوین سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهرباب، چه در صورت ذوب‌بخشی رسوبات صفحه فرورونده و یا ذوب‌بخشی پوسته (به‌خصوص در مورد سنگ‌های اسیدی) تأیید می‌کند. بنابراین شاید بتوان اینگونه مطرح نمود که ماگمای حدواسط بررسی شده که حاصل ذوب‌بخشی گوشته سنگ‌کره‌ای زیر قاره‌ای (SCLM) است ضمن صعود به ترازهای بالاتر، افزون بر اختلاط ماگمایی با پوسته نیز آلاش یافته است. علاوه بر این گرمای حاصل از تجمع این ماگما در درون پوسته قاره‌ای، سبب ذوب‌بخشی پوسته و تشکیل ماگمای اسیدی شده است. واضح است که ماگمای حدواسط همراه با ماگمای اسیدی متحمل تفریق ماگمایی نیز شده است و طیف متفاوتی از سنگ‌های آتشفشانی منطقه را ایجاد نموده است.

۷- نتیجه‌گیری

بررسی‌های حاصل از این پژوهش بیانگر این است که ترکیب سنگ‌های آتشفشانی جنوب شهرباب (شمال‌باختری نائین) طیفی از سنگ‌های حدواسط و اسیدی را در برمی‌گیرد. آندزیت بازالت، آندزیت و ریولیت با سرشت کالک‌آلکالن از جمله این سنگ‌ها هستند. برپایه نمودارهای تغییرات عنصرهای کمیاب، غنی‌شدگی در عنصرهای خاکی کمیاب سبک و عنصرهای لیتوفیل بزرگ یون و تهی‌شدگی در عنصرهای با میدان پایداری بالا (مانند: Nb, Ti و Ta)، از ویژگی‌های شاخص کمان‌های آتشفشانی ناشی از فروانش است. الگوهای نمودارهای عناصر نادر به هنجار شده با مقادیر کندریت و الگوهای عناصر نادر خاکی و کمیاب به هنجار شده با مقادیر گوشته اولیه از گدازه‌های حدواسط، قابل مقایسه با سنگ‌های آتشفشانی کمان قاره‌ای هستند، اما نسبت به آن‌ها غنی‌ترند که می‌توان به آلاش پوسته‌ای و غنی‌شدگی ناحیه منشأ توسط سیالات و رسوبات فرورانده شده نسبت داد. الگوهای به هنجار شده از نمودارهای عنکبوتی و روندهای مشخص شده بر روی

- des roches magmatiques de la region de Natanz-Nain-Surk (Iran central). (Doctoral dissertation, Université Scientifique et Médicale de Grenoble).
- Amidi, M., Alavi, N., Davdzadeh, M., Nabavi, M. H., Aganbati, A (1979) Geological map 1:250000 Nain, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Amuzadeh Khalili, D (1388) Geochemistry and petrology of volcanic rocks in south-western Shahrab (Ardestan). Master's thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 60p. (in Persian)
- Anders, E., Grevesse, N (1989) Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochim Acta*, 53: 197-214. doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X.
- Arslan, M., Aslan, Z (2006) Mineralogy, petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2): 177-193.
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J. M., Kananian, A., Rahimi, G (2012) Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45: 79-94. doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.09.020.
- Bahrudi, A., Fonoudi, M (2003) Geological Map of Shahrab in the scale of 1:100,000, No. 6556, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Berberian, M., King, G.C.P (1981) Towards paleogeography and Tectonic Evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Science* 18: 210-265. doi.org/10.1139/e81-019.
- Borg, L. E., Clyne, M. A., Bullen, T. D (1997) The variable role of slab derived fluids in the generation of a suite primitive calc-alkaline lavas from the Southernmost Cascades, California. *The Canadian Mineralogist*, 35(2): 425-452.
- Chashchin, A. A., Sorokin, A. A., Lebedev, V. A., Blokhin, M. G (2016) Age, Main Geochemical Characteristics, and Sources of Late Cenozoic Volcanic Rocks in the Udurchukan Volcanic Area (Amur Region). *Russian Journal of Pacific Geology*, 10: 239-248.
- Cheng, H (2001) Petrology and geochemistry of neogene continental basaltic and related rocks in Northern Taiwan. *Western Pacific Earth Sciences* 1: 19-46.
- Chiu, H. Y., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S.S., Khatib, M.M., Iizuka, Y (2013) Zircon U-Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos*, 162-163: 70-87. doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.006.
- Çoban, H., Karacık, Z., Ece, Ö (2012) Source contamination and tectonomagmatic signals of اثبات آن نیاز به داده‌های بیشتر صحرایی و آزمایشگاهی در این بخش از کمان ماگمایی ارومیه-دختر را دارد.
- ### ۸- قدردانی
- نگارندگان مقاله از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان برای انجام این پژوهش تشکر می‌کنند.
- نویسندگان از خداوند متعال برای جناب آقای دکتر مرتضی شریفی، استاد گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان، که به دیار باقی شتافتند، تقاضای علو درجات و رحمت الهی دارند. همچنین از داوران گرامی برای بیان پیشنهادهای مفید و سازنده، سردبیر محترم و هیئت تحریریه مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی سپاس‌گزاری می‌شود.
- ### References
- Abdallah, J. A., Said, A., Visona, D (1997) New geochemical and petrographic data on the gabbro-syenite suite between Hargeysa and Berbera-Shiikh (Northern Somalia). *Journal of African Earth Sciences*, 23(3): 363-373. doi.org/10.1016/S0899-5362(97)00007-9.
- Abu-Hamatteh, Z. S. H (2005) Geochemistry and petrogenesis of mafic magmatic rocks of the Jharol Belt, India: geodynamic implication. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25: 557-581. 10.1016/j.jseaes.2004.05.006.
- Aghajari, F (1392) Petrogenesis of alkaline and sub-alkaline magmatic series in the south of Shahrab (Ardestan). Master's thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 114p.
- Aghanabati, A (1998) Major sedimentary and structural units of Iran (map). *Geosciences* 7, Geological Survey of Iran.
- Ahmadvand, A (1387) Geochemistry and petrology of basic volcanic rocks in the southwest of Shahrab (Ardestan). Master's thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 69p. (in Persian)
- Alavi, M (2004) Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304: 1-20.
- Almeida, M. E., Macambira, M. J. B., Oliveira, E. C (2007) Geochemistry and zircon geochronology of the I-type high-K calc-alkaline and S-type granitoid rocks from southeastern Roraima, Brazil: Orosirian collisional magmatism evidence (1.97-1.96 Ga) in Central portion of Guyana shield. *Precambrian Research*, 151(1): 69-97. doi.org/10.1016/j.precamres.2007.01.004.
- Amidi, M (1975) Contribution a l'etude stratigraphique, Petrologique, et Petrochimique

- collisional magmatism in northwestern Iran: Evidence for timetransgressive magmatism away from the collisional suture. *Lithos*, 344-345: 265-279.
- Ghasemi, A., Talbot, C. J (2006) A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 683-693. doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003.
- Ghasemi, H., Rostami, M. and Sadeghian, M (2017) Basic magmatism in extensional back-arc basin of the Lower-Middle Jurassic at the Northern edge of Central Iran South of Eastern Alborz zones, Shahrood-Damghan. *Scientific Quarterly Journal*, 27: 107. (in Persian). doi.org/10.22071/gsj.2018.63800.
- Gill, R (2010) *Igneous rocks and processes, a practical guide: A John Wiley and Sons Publication*, 428p.
- Gusev, A. I., Korobeinikov, A. F (2009) Mantle–crustal interaction in the generation of different types of mineralization: geophysical and petrological aspects, *Izv. Tomsk Polytechnic University*, 315(1): 18-25.
- Helvacı, C., Ersoy, E. Y., Sozbilir, H., Erkul, F., Sumer, O., Uzel, B (2009) Geochemistry and 40 Ar /39Ar Geochronology of Miocene Volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implication for amphibole– bearing lithospheric mantle source, Western Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(3): 181-202.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A., Mitchell, S. F (2007) Classification of altered volcanic arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12): 2341-2357.
- Hollocher, K., Robinson, P., Walsh, E., Roberts, D (2012) Geochemistry of amphibolite-facies volcanics and gabbros of the Støren Nappe in extensions west and southwest of Trondheim, Western Gneiss Region, Norway: a key to correlations and paleotectonic settings. *American Journal of Science*, 312(4): 357-416.
- Hoffer, G., Eissen, J. P., Beat, B., Bourdon, E., Fornari, M., Cotton, J (2008) Geochemical and petrological constraints on rear-arc magma genesis processes in Ecuador: the puyo cones and Mero lavas volcanic formations. *Volcanology geothermal research*, 176: 107-118.
- Hofmann, A. W (1988) Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297-314. doi.org/10.1016/0012-821X(88)90132-X.
- Jung, S., Hoffer, E., Hoernes, S (2007) Neo-Proterozoic rift-related syenites (Northern Damara Belt, Namibia): geochemical and Nd–Sr– Pb–O isotope constraints for mantle sources overlapping Early to Middle Miocene orogenic magmas associated with shallow continental subduction and asthenospheric mantle flows in Western Anatolia: A record from Simav (Kütahya) region: *Lithos*, 140-141: 119-141.
- Cobbing, J (2000) *The geology and mapping of granite batholiths. Lecture Notes in Earth Sciences 96*, Springer, Berlin Heidelberg New York, 121 p.
- Conley, A. G., Bernan, J. M., Bellon, H., Scott, S. D (2005) Arc to rift transitional volcanism in the Santa Rosalia Region, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 142(3-4): 303-341. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.11.013.
- Cornelius, T., Ntaflou, T. V., Akinin, V (2011) Polybaric petrogenesis of Neogene alkaline magmas in an extensional tectonic environment: Viliga Volcanic Field, northeast Russia. *Lithos*, 122: 13-24.
- Dilek, Y., Imamverdiyev, N., Altunkaynak, S (2010) Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review*, 52(4–6): 536–578. doi.org/10.1080/00206810903360422.
- Fan, W. M., Gue, F., Wang, Y. J., Lin, G (2003) Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of postorogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 121: 115-135. doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00415-8.
- Furman, T (2007) Geochemistry of East African Rift basalts: An overview. *Journal of African Earth Sciences*, 48: 147-160. doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.06.009.
- Gahlan, H. A., Arai, S., Ahmed, A. H., Ishida, Y., Abdel-Aziz, Y. M., Rahimi, A (2006) Origin of magnetite veins in serpentinite from the Late Proterozoic Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco: An implication for mobility of iron during serpentinization. *Journal of African Earth Sciences*, 46(4): 318–330.
- Gao, Y., Hou, Z., Kamber, B. S., Wei, R., Meng, X., Zhao, R (2007) Adakite-like porphyries from the southern Tibetan continental collision zones: evidence for slab melt metasomatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 105- 120.
- Ghahamghash, J., Mousavi, S., Hassanzadeh, J., Schmitt, A (2016) Geology, zircon geochronology, and petrogenesis of Sabalan volcano (northwestern Iran). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327: 192-207.
- Ghahamghash, J., Schmitt, A. K., Chaharlang, R (2019b) Age and compositional evolution of Sahand volcano in the context of post-

- Marchev, P., Raicheva, R., Downes, H., Vaselli, O., Chiaradia, M., Moritz, R (2004) Compositional diversity of Eocene-Oligocene basaltic magmatism in the Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: implications for genesis and tectonic setting. *Tectonophysics*, 393(1-4): 301-328. doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.045.
- McDermott, F., Delfin, F. G, Defant, M. J, Turner, S., Maury, R (2005) The petrogenesis of magmas from Mt. Bulusan and Mayon in the Bicol arc, the Philippines. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 652-670.
- Meng, L., Li, Z. X., Chen, H., Li, X. H., Wang, X. C (2012) Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China Block support the flat-slab subduction model. *Lithos*, 132: 127-140. doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.022.
- Mohajjel, M., Ferguson, C. L., Sahandi, M. R (2003) Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 397-412.
- Mohammadi, S., Nadimi, A., Alaminia, Z (2018) Analysis of the relationship between mineralization and alteration zones with tectonic structures using remote sensing studies in south Ardestan area (northeastern Isfahan). *Tectonics Journal*, 2(7): 29-49 (in Persian).
- Nicholson, K. N., Black, P. M., Hoskin, P. W. O., Smith, I. E. M (2004) Silicic volcanism and back-arc extension related to the migration of the Late Cainozoic Australian- Pacific plate boundary. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131(3-4): 295-306. doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00382-2.
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G., Jolivet, L (2008) Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106: 380-398. doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.032.
- Orozco-Esquivel, T., Petrone, C. M., Ferrari, L., Tagami, T., Manetti, P (2007) Geochemical and isotopic 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., Chu, C. H., Lee, H. Y., Lo, C. H (2013) Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180- 181: 234-251.
- Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Chiu, H. Y., Li, X.-H (2014) On the magmatic record of the Makran arc, southeastern Iran: Insights from zircon U-Pb geochronology and bulk-rock geochemistry. *Geochemistry, Geophysics*, and petrogenesis. *Lithos*, 96(3): 415-435. doi.org/10.1016/j.lithos.2006.11.005.
- Keskin, M., Pearce, J. A., Mitchell, J. G (1998) Volcano-stratigraphy and geochemistry of collision-related volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, North Eastern Turkey. *Volcanology and Geothermal Research*, 85: 355-404.
- Khademian, F., Alaminia, Z., Ghasemi, A., Nadimi, A. R (2023) Petrology, trace and rare earth elements geochemistry, and tectonic setting of basic- intermediate volcanic rocks from northwest of Nain, Isfahan. *Petrological Journal*, 52: 1-34. (in Persian with English Abstract).
- Khademian, F., Alaminia, Z., Nadimi, A.R., Lentz, D.R., Ghasemi, A., Sharifi, M (2024) Structural and Alteration Zones Controls on Cu Mineralisation in the Northwest of Nain (northeastern Isfahan, Iran): A Remote Sensing Perspective. *Journal of African Earth Sciences*, 211: 105-151.
- Khaltabari Jafari, M., Alaei Mahabadi, S (1998) Geological map 1:100000 of Natanz, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Koralay, T., Kadioglu, Y. K., Davis, P (2011) Weak compositional zonation in a silicic magmatic system: Incesu ignimbrite, Central Anatolian Volcanic Province (Kayseri-Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 371-393. doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.05.018.
- Kürkçüoğlu, B (2010) Geochemistry and petrogenesis of basaltic rocks from the Develidag volcanic complex, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(1): 42-51. doi: 10.1016/j.jseaes.2009.07.004.
- Lechmann, A., Burg, J. P., Ulmer, P., Guillong, M., Faridi, M (2018) Metasomatized mantle as the source of Mid-Miocene-Quaternary volcanism in NW-Iranian Azerbaijan: Geochronological and geochemical evidence. *Lithos*, 304-307: 311-328. doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.030.
- Li, X., Mo, X., Yu, X., Ding, Y., Huang, X., Wei, P., He, W (2013) Petrology and geochemistry of the early Mesozoic pyroxene andesites in the Maixiu Area, West Qinling, China: Products of subduction or syn-collision. *Lithos*, 172-173: 158-174.
- Liu, H. Q., Xu, Y. G., Tian, W., Zhong, Y. T., Mundil, R., Li, X. H., Yang, Y. H., Luo, Z. Y., Shang – Guan, S. M (2014) Origin of two types of rhyolites in the Tarim Large Igneous Province: Consequences of incubation and melting of a mantle plume. *Lithos*, 204: 59-72. doi: 10.1016/j.lithos.2014.02.007.
- Macdonald, R., Hawkesworth, C. J., Heath, E (2001) The lesser Antilles volcanic chain: A study in arc magmatism. *Earth Science Reviews*, 49: 1-76.

- processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Geological Society, Special Publications 42: 313-345.
- Suzaño, N., Becchio, R., Sola, A., Ortiz, A., Nieves, A., Quiroga, M., Fuentes, G (2017) The role of magma mixing in the evolution of the Early Paleozoic calc-alkaline granitoid suites, Eastern magmatic belt, Puna, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. doi.org/10.1016/j.jsames.2017.02.008.
- Talusani, V. R (2010) Bimodal tholeiitic and mildly alkali basalts from Bhirarea, central Deccan Volcanic Province, India. *Geochemistry and petrogenesis Journal of Volcanology Geothermal Research*, 189: 278-290. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.11.019.
- Temel, A., Gündoğdu, M. N., Gourgaud, A (1998) Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high - K calc -alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85: 327 -354.
- Verdel, Ch., Wernicke, B. P., Hassanzadeh, J., Guest, B (2011) A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics* 30. doi.org/10.1029/2010TC002809.
- Vignerresse, J. L (2004) A new paradigm for granite generation. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 95: 11- 22. doi.org/10.1017/S0263593300000882.
- Wang, Z., Zhao, Y., Zou, H., Li, W., Liu, X., Wu, H., Xu, G., Zhang, S (2007) Petrogenesis of the Early Jurassic Nandaling flood basalts in the Yanshan belt, North China Craton: A correlation between magmatic underplating and lithospheric thinning. *Lithos*, 96: 543-566. doi.org/10.1016/j.lithos.2006.12.004.
- Wang, H., Wu, Y. B., Qin, Z. W., Zhu, L. Q., Liu, Q., Liu, X. C., Gao, S., Wijbrans, J. R., Zhou, L., Gong, H. J (2013) Age and geochemistry of Silurian gabbroic rocks in the Tongbai orogeny, central China: implications for the geodynamic evolution of the North Qinling arc-back-arc system. *Lithos*, 179: 1-15.
- White, W. M (2005) *Geochemistry*. First edition, Wiley-Blackwell, London, UK.
- Whitney, D. L., Evans, B. W (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185-187. doi.org/10.2138/am.2010.3371.
- Wilson, M (1989) *Igneous Petrogenesis*, Unwin Hyman London, 466.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-342. doi:10.1016/0009-2541(77)90057-2.
- Wood, D. A (1980) The application of a Th Hf Ta diagram to problems of tectonomagmatic Geosystems, 15(6): 2151-2169. doi.org/10.1002/2014GC005262.
- Pearce, J. A (1996) A user's guide to basalt discrimination diagrams, In: *trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration* (Ed. Wyman, D.A.) Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 79- 113.
- Plank, T (2005) Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46: 921 - 944. doi.org/10.1093/petrology/egi005.
- Radfar, J (1997) Geological map of Ardestan, scale 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Rollinson, H. R (1993) *Using geochemical data, Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific and Technical, New York, 352p.
- Ross, P. S., Bedard, J. H (2009) Magmatic affinity of modern and ancient sub alkaline volcanic rocks determined from trace element discrimination diagram. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46: 823-829.
- Rudnick, R. L., Fountain, D. M (1995) Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33: 267-309. doi.org/10.1029/95RG01302.
- Rudnick, R. L., Gao, S (2003) *Composition of the continental crust*. (Ed. Rudnick, R.L.), Treatise in Geochemistry, 3. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-64.
- Schandl, E. S., Gorton, M. P (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97: 629-642. doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.629.
- Shahsavari Alavijeh, B., Rashidnejad-Omran, N., Toksoy-Köksal, F., Xu, W., Ghalamghash, J (2019) Oligocene subduction-related plutonism in the Nodoushan area, Urumieh-Dokhtar magmatic belt: Petrogenetic constraints from U-Pb zircon geochronology and isotope geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 10: 725-751. doi.org/10.1016/j.gsf.2018.03.017.
- Şengör, A. M. C., Özeren, S., Zor, E., Genç, T (2003) East Anatolian high plateau as a mantle-supported, N-S shortened domal structure. *Geophysical Research Letters*, 30 (24): 80451-80454.
- Soesoo, A (2000) Fractional crystallization of mantle-derived melts as a mechanism for some I-type granite petrogenesis: an example from Lachlan Fold Belt, Australia. *Journal Geology Society*, 157: 135-149. doi.org/10.1144/jgs.157.1.135.
- Sun, S. S., McDonough, W. F (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and

- Journal of Asian Earth Sciences, 29: 320-335. doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.12.004.
- Zulkarnain, I (2009) Geochemical Signature of Mesozoic Volcanic and Granitic Rocks in Madina Regency Area, North Sumatra, Indonesia, and its Tectonic Implication. *Journal Geologi Indonesia*, 4 (2): 117-131. doi.org/10.17014/ijog.vol4no2.20094.
- classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and planetary science letters*, 50 (1): 11-30.
- Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Davidson, J. P., Eggins, S.M (2001) Hafnium isotope evidence for conservative element mobility during subduction zone processes: *Earth and Planetary Science Letters*, 192: 331- 346.
- Wu, F., Jahn, B., Wilde, S. A., Lod, C. H., Yu, T. F., Lina, Q., Ge, W., Sun, D., (2003) Highly fractionated I-type granites in NE China II: isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67: 191-204.
- Xu, X., Song, S., Su, L., Li, Z., Niu, Y. and Allen, M. B (2015) The 600- 580 Ma continental rift basalts in North Qilian Shan, northwest China: Links between the Qilian-Qaidam block and SE Australia, and the reconstruction of East Gondwana. *Precambrian Research*, 257: 47-64. doi.org/10.1016/j.geogeo.2021.10.004.
- Yang, W., Li, Sh (2008) Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102 (1-3): 88-117.
- Yeganehfar, H (1386) Petrology and geochemistry of volcanic rocks in South Ardestan. Master's thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 118p. (in Persian)
- Yoshida, T., Okamura, S., Sakamoto, I., Ikeda, Y., Adachi, Y., Kojima, M., Sugawara, M., Shitahaku, R (2013) Petrology of felsic rocks dredged from the Myojin Seamount and the Myojin Rift in the north Izu-Bonin arc- Contribution of intra-oceanic subduction system to making continental middle crust. Meeting of International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, Kagoshima, Japan.
- Yu, Q., Ge, W. C., Zhang, J., Zhao, G. C., Zhang, Y.L., Yang, H (2016) Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implication of Late Paleozoic Volcanic Rocks from the Dashizhai Formation in Inner Mongolia, NE China. *Gondwana Research*, 47: 164-177. doi.org/10.1139/cjes-2017-0226.
- Zhang, C. L., Li, Z. X., Li, X. H., Ye, H. M (2009) Neoproterozoic mafic dyke swarms at the northern margin of the Tarim Block, NW China: age, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 167-179.
- Zhu, D., Pan, G., Mo, X., Liao, Z., Jiang, X., Wang, L., Zhao, Z (2007) Petrogenesis of volcanic rocks in the Sangxiu Formation, central segment of Tethyan Himalaya: A probable example of plume-lithosphere interaction,

Investigating the magmatic evolution of volcanic rocks south of Shahrab (NW of Nain) with emphasis on the role of crustal contamination

F. Khademian¹, Z. Alaminia^{2,3*}, A. Nadimi³, A. Ghasemi⁴ and M. Sharifi³

1- Ph. D. student Dept., of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

4- Assist. Prof., Dept., of Geochemistry Research, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR) on IUT, Isfahan, Iran

* z.alaminia@sci.ui.ac.ir

Received: 2023.12.10 Accepted: 2024.3.12

Abstract

The study area is located in northwestern Nain (western central Iran), Isfahan province. The dominant igneous rocks in this locality comprise Tertiary volcanic units including basaltic andesite, andesite, and rhyolite, accompanied by pyroclastic deposits composed of tuff and ignimbrite. The presence of enriched large-ion lithophile elements (LILE) and light rare earth elements (LREE), and depleted high-field-strength elements (HFSE) in these rocks suggests a magmatic setting related to volcanic arc subduction. Petrological and geochemical investigations indicate that processes such as fractional crystallization (fractionations of plagioclase and, to a lesser extent, clinopyroxene), magma mixing, assimilation, and contamination play a significant role in the evolution of magmas in this area. The depletion in elements such as Nb, Ti, Ta, and Zr, as well as the low Ce/Pb and Nb/U ratios, along with high Ba/Nb and La/Nb ratios, are consistent with the effects of crustal contamination on the magmas. According to the geochemical findings, the primary magmas responsible for the volcanic rocks in the southern Shahrab area are most likely derived from the partial melting of the lithospheric mantle, which has been influenced by fluids derived from the subducted oceanic crust. During the ascent to shallower crustal levels and subsequent emplacement in a magmatic chamber before an eruption, these primary magmas interacted with basaltic magmas, resulting in the formation of various types of rocks in the area through fractional crystallization, assimilation, and contamination processes.

Keywords: Magmatic Evolution, Crustal Contamination, Lithospheric mantle, Volcanic Rocks, Central Iran.

Introduction

Subduction-related magmatic activities are evident in Central Iran and the Urumieh – Dokhtar magmatic arc. These activities in the Urumieh – Dokhtar magmatic arc result from the subduction of the Neo-Tethys oceanic lithosphere beneath the Iranian Plate. during the Eocene, Oligocene–Pliocene, and Plio-Quaternary periods. Encompassing the most significant volcanic outcrops along this belt, Eocene magmatism involves a combination of complexes ranging from basic to acidic. The Shahrab volcanic rocks (northwest Nain) are part of the extensive Eocene evolutions in the middle segment of the Urumieh-Dokhtar belt along the western part of Central Iran. Despite numerous studies on the magmatic rocks in the Shahrab, the origin and geotectonic evolution of these rocks remain unidentified. Therefore, this article presents new field observations and

whole-rock geochemical data on the southern Shahrab volcanic rocks. The primary aim of this research is to investigate the roles of fractional crystallization, magma mixing, and crustal contamination in the formation of south Shahrab (NW Nain) volcanic rocks. Accordingly, efforts were made to explore the genetic correlation and the processes affecting the evolution of the magmas comprising these rocks through field surveys, petrologic studies, and whole-rock analyses.

Regional Geology

The study area is 50 km northwest of Nain and within the central part of the Urumieh-Dokhtar magmatic belt (UDMA). South of Shahrab (NW Nain), many outcrops of Tertiary volcanic lavas and pyroclastic deposits exist. In this area, the volcanic units are basic to acidic combination from the Eocene to Oligocene and

pyroclastic rocks with the nature of tuff, breccia, and ignimbrite, which in low altitude areas are overlain by a sequence of sediments containing Quaternary alluvium.

Materials and methods

In this study, after the preparation of thin sections and petrographic and mineralogical investigations of these units, 20 volcanic samples have been analyzed by the ICP-MS method for major and trace elements.

Petrography

Microscopic examinations reveal that the volcanic rocks in the south of Shahrab display a porphyritic texture with a microlithic intergranular glomeroporphyritic matrix. Mineralogically, these rocks are mainly composed of plagioclase, clinopyroxene, quartz, k-feldspar, biotite, and secondary (calcite, chlorite, and epidote) and opaque minerals.

Results and Discussion

Based on the geochemical data, the volcanic rocks with have a calc-alkaline nature which is consistent with the features of volcanic arcs in the subduction zone of the active continental margin. The primitive mantle-normalized elements diagram indicates patterns of enrichment in Large Ion Lithophile Elements (LILE) (e.g., Ba, K, Rb), REE, and depletion of high stability field elements (HFSE) (e.g., Nb, Ti, Zr), consistent with typical subduction zone-related magmas.

In the Dy/Yb versus Dy diagram (Gao et al., 2007), the Dy/Yb ratio subtly changes with increasing Dy, following trends associated with partial melting and fractional crystallization. Petrographic and geochemical evidence supports fractional crystallization, particularly of plagioclase and, to a lesser extent, clinopyroxene minerals in the studied volcanic lavas. Geochemical characteristics, such as the increasing trend of the Nb/Zr ratio versus Nb (Soesoo, 2000), indicate magma mixing in the volcanic rocks of the study area.

The observed enrichment in LILEs and LREEs, coupled with relative depletion in HFSEs and HREEs, implies the influence of subduction and crustal contamination processes. Additional indicators of crustal contamination include elemental ratios like Ce/Pb (0.91 – 8), Nb/U (4.35 – 21.75), and Nb/La (0.26 – 0.77). The available geochemical data for the study area highlight the significant and simultaneous roles of fractional crystallization, crustal contamination, and magma mixing in the magmatic evolution of the south Shahrab volcanic rocks. This magmatism is attributed to the subduction of the Neo-Tethys oceanic lithosphere beneath the central Iranian plate, resulting in substantial magmatic activity during the Eocene and after that.

Conclusion

The current research findings reveal that the south of Shahrab (northwest Nain) volcanic rocks encompass intermediate and acidic species, including basaltic andesite, andesite, and calc-alkaline-originated rhyolite. Through field observations, petrological evidence, geochemical data, and bivariate diagrams, a genetic correlation, common source, and significant roles of fractional crystallization, magma mixing, assimilation, and crustal contamination emerge in the evolution of the magma constituting the south Shahrab rocks. The geochemical characteristics suggest that intermediate volcanic rocks in the area result from mixing with magma derived from the mantle and lower crust, contaminated by crustal materials during upwelling. Concerning the formation of acidic rocks, it is proposed that the upward migration of mafic magma, generated by the partial melting of the mantle, accumulates in the crust. The ensuing heat leads to the partial melting of the crust, forming acidic magma. As the basic magma upwelling through the crust and interacts with the acidic magma, a diverse range of intermediate rocks is produced in the region.