

سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی، جایگاه زمین‌ساختی و سنگ‌زایی مخروط‌های آتشفشانی دشت مختاران (جنوب غرب بیرجند - شرق ایران)

اسماعیل اله‌پور^۱ و مریم آهنگوب^{۲*}

۱ و ۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

نویسنده مسئول: * m.ahankoub@pnu.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

دریافت: ۱۴۰۲/۶/۲۷

چکیده

مخروط‌های آتشفشانی دشت مختاران بصورت قله متمایز و پراکنده در بخش شمالی پهنه جوش‌خورده سیستان و در جنوب باختری بیرجند قرار گرفته‌اند. این مجموعه با طیف ترکیبی آندزیت بازالتی، آندزیت و تراکی آندزیت بروی نهشته‌های فیلیشی پالئوژن به صورت مخروط‌های منفرد دیده می‌شوند. مجموعه کانی‌های اصلی این سنگ‌ها را پلاژیوکلاز همراه با پیروکسن و کمتر هورنبلند به صورت فنوکریستال‌های درشت تشکیل می‌دهند. بافت غالب در این سنگ‌ها پورفیریتیک، میکرولینتیک پورفیری، هیالومیکرولینتیک پورفیری و گلوپورپورفیریتیک و مزوستاز آن‌ها عموماً شیشه‌ای تا ریزبلور می‌باشد. بیوتیت، الیون و اپاک نیز به عنوان فاز فرعی حضور دارند. بررسی‌های ژئوشیمیایی دال بر ماهیت کالک‌آلکالن این سنگ‌ها می‌باشد که در یک محیط زمین‌ساختی قوس آتشفشانی پس از برخورد تشکیل شده‌اند. الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی نشان از غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک و تهی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سنگین داشته و ویژگی شاخص آن‌ها آنومالی منفی Nb و آنومالی مثبت Pb می‌باشد. در نمودار تعیین موقعیت تکتونیکی، نمونه‌های دشت مختاران با موقعیت کمان‌های آتشفشانی پس از برخورد مربوط به زون فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای تطابق دارد.

واژه‌های کلیدی: آندزیت، قوس آتشفشانی، حاشیه فعال قاره‌ای، دشت مختاران، جنوب غرب بیرجند

۱- پیشگفتار

منطقه دشت مختاران در جنوب غربی شهر بیرجند از نظر زمین‌شناسی ساختاری در زون بین انگشتی واقع بین بلوک لوت (در باختر) و زون جوش‌خورده سیستان (در خاور) قرار دارد (شکل ۱). واحدهای سنگی شاخص منطقه شامل تهنشست‌های فیلیش، کنگلومرا و واحدهای آتشفشانی ترشیری می‌باشند. دشت مختاران به عنوان مورفولوژی میزبان، شامل دشت رسی در مرکز، تپه‌های ماسه‌ای در جنوب و ساختار حلقوی مشهور به آغل کوه در غرب بوده و میزبان واحدهای آتشفشانی به صورت رخنمون‌های مخروطی شکل پراکنده می‌باشد. به عنوان سوابق پژوهش در این منطقه می‌توان به مطالعه سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری غرب بیرجند (دلاور، ۱۳۸۹) و مکانیسم جایگیری توده‌های نیمه‌نفوذی (دیوریت پورفیری) منطقه گیوشاد (خطیب و همکاران، ۱۳۸۹) اشاره نمود. زرین‌کوب و محمدی (۱۳۹۰) نیز در بررسی مجموعه نیمه نفوذی و آتشفشانی گیوشاد به آندزیت‌ها و آندزیت‌های بازالتی اشاره می‌کنند که طی

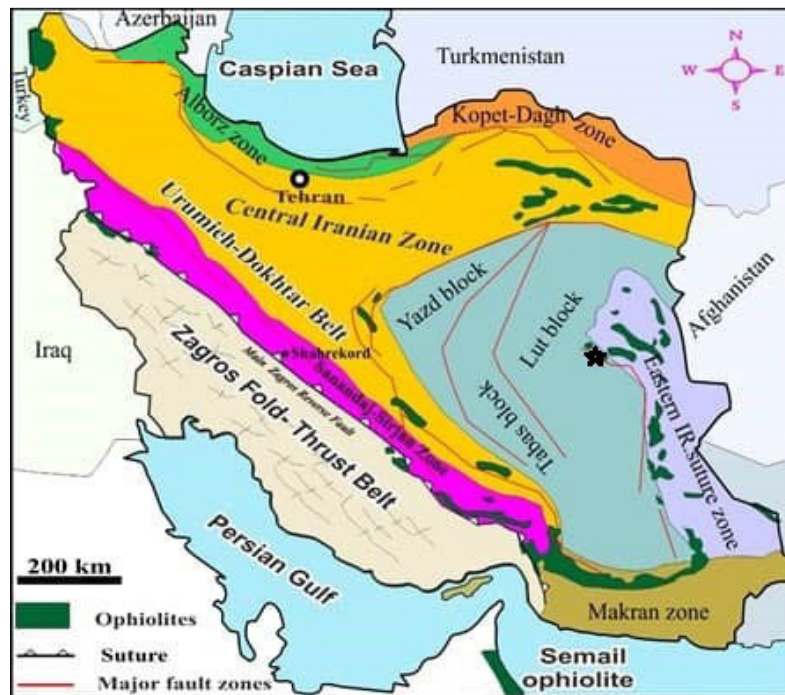
فرایند ولکانیسم پس از برخورد و با خاستگاه اکلوزیتی تشکیل شده‌اند. هدف از این پژوهش مطالعه پتروگرافی، ژئوشیمی و پتروژنز مخروط‌های آتشفشانی پراکنده در دشت مختاران و ارائه یافته‌های جدید در مورد فرایندهای شکل‌گیری و تکامل آن‌ها می‌باشد.

۲- زمین‌شناسی

واحدهای سنگی موجود در دشت مختاران شامل مجموعه‌ای از ماسه‌سنگ و شیل‌های پالئوسن هستند که توسط ماگماتیسیم بعد از پالئوسن با ترکیب آندزیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت بازالتی و بطور خاص دیوریت پورفیری (در ساختار آغل کوه) مورد هجوم قرار گرفته‌اند (شکل ۲). مخروط‌های آتشفشانی پراکنده در هر دو نشیب شمالی و جنوبی دشت مختاران بصورت رخنمون‌های خاکستری تا سیاه برروی واحدهای شیلی و ماسه‌سنگی پالئوژن و آبرفت‌های جوان قرار گرفته (شکل ۳) و آثار پختگی ناشی از نفوذ دیوریت پورفیری به درون طبقاتی از جنس شیل و ماسه‌سنگ بصورت موضعی

برجسته، تیره رنگ تا خاکستری و با فواصل نامنظم از یکدیگر دیده می‌شوند. در این سنگ‌ها بافت پورفیریتیک با مزوستاز میکروولیتی عمومیت داشته و درشت بلورهای پلاژیوکلاز در نمونه دستی قابل مشاهده هستند.

پیرامون ساختار حلقوی در منطقه شمال غرب روستای گیوشاد قابل مشاهده است. سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه در منطقه شامل آندزیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت‌بازالتی هستند. این سنگ‌ها در صحرا با مورفولوژی



شکل ۱. نقشه واحدهای ساختاری ایران (شبابیان و همکاران، ۲۰۱۸). منطقه مورد مطالعه با علامت ستاره روی نقشه نشان داده شده است.

Fig. 1. Structure unites map of Iran (Shabanian et al, 2018).

در آزمایشگاه دانشگاه پیام نور مرکز بیرجند مقطع نازک تهیه و بدقت با میکروسکوپ پلاریزان انکساری مورد مطالعه پتروگرافی قرار گرفته است. در مرحله بعد تعداد ۱۰ نمونه برگزیده بروش ICP-OES در شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما به روش ذوب قلیایی مورد آزمایش قرار گرفت. فرایند ذوب قلیایی با بکارگیری کمک ذوب لیتیوم متابورات بیشتر عناصر دبرگداز^۱ را تجزیه می‌نماید. این روش قابلیت تجزیه اکسیدهای اصلی از جمله SiO_2 را دارا بوده و تلفیق این روش با LOI ترکیب کلی سنگ را مشخص می‌نماید. در این روش نمونه با استفاده از لیتیوم متابورات ذوب میشود. محصول ذوب شده با استفاده از اسید نیتریک رقیق حل شده و سپس محلول نهایی مورد خوانش قرار گرفته و عیار اکسیدهای اصلی مشخص می‌گردد. در این روش از لیتیوم بورات به منظور تجزیه بافت نمونه‌های سنگی و

۳- موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی

منطقه مورد مطالعه در استان خراسان جنوبی (جنوب باختری شهر بیرجند) و در محدوده $32^{\circ}30'$ تا $32^{\circ}40'$ عرض شمالی و $56^{\circ}58'$ تا $59^{\circ}11'$ طول شرقی واقع شده است. دسترسی به منطقه از مسیر جاده اصلی بیرجند - خوسف و ادامه به سمت جنوب در مسیر اختصاصی منتهی به گیوشاد (شکل ۲c) امکانپذیر می‌باشد. گیوشاد به عنوان مهمترین روستای واقع در منطقه مورد مطالعه، در ۴۱ کیلومتری جنوب غربی بیرجند قرار دارد.

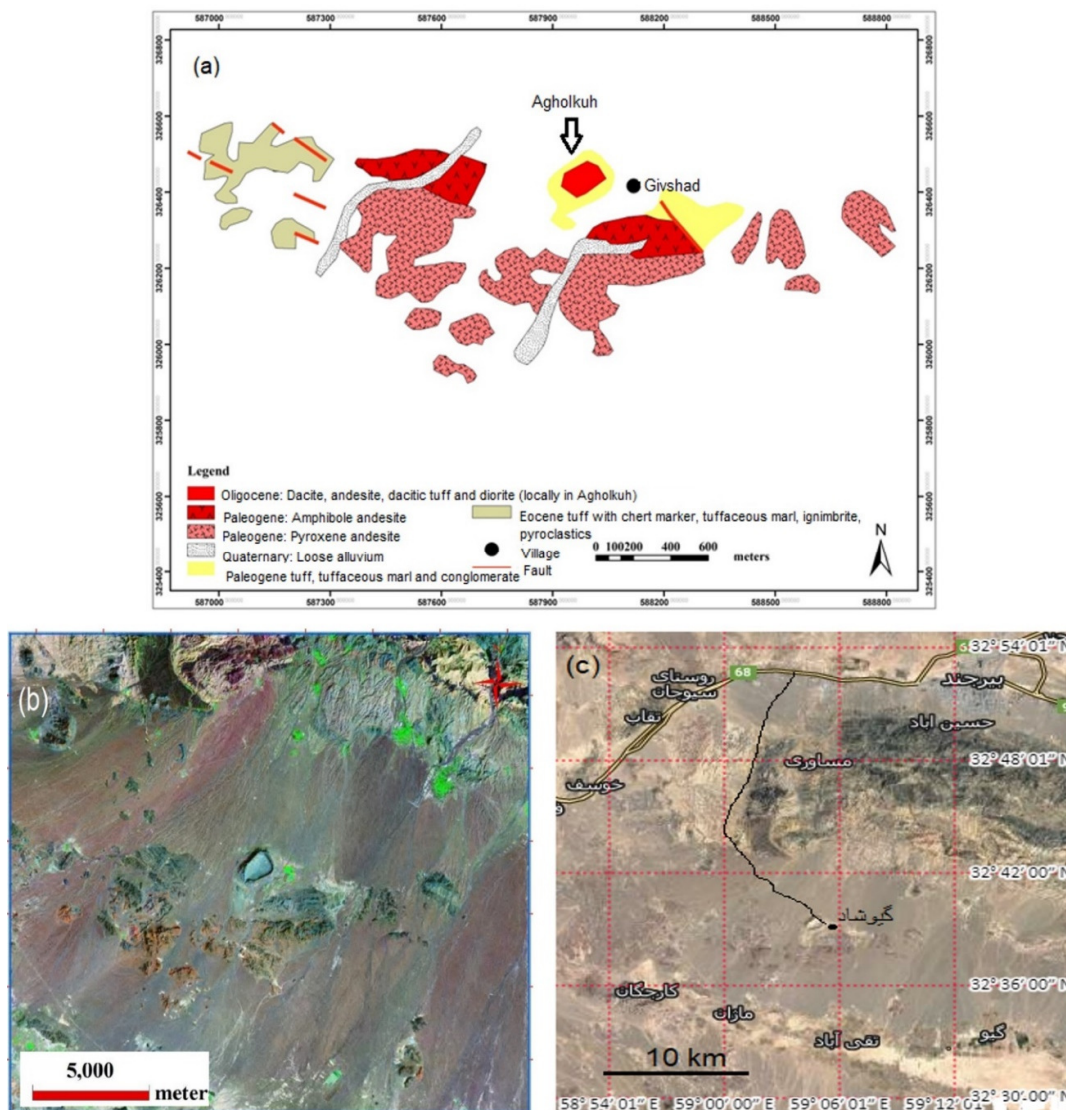
۴- روش تحقیق

به منظور این پژوهش پس از بررسی‌های جامع صحرایی، تعداد ۳۰ نمونه سنگی تازه و فاقد دگرسانی به طور سیستماتیک برداشت شده است. سپس از تمامی نمونه‌ها

¹ Refractory Elements

قرار می‌گیرد (جدول ۱). نتایج داده‌های آنالیز شیمی کل سنگ توسط نرم افزار GCDKIT پردازش شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

اندازه‌گیری عناصر سنگ‌ساز استفاده می‌شود به این صورت که نمونه‌های مذاب در اسید نیتریک ۵٪ حل شده و محلول حاصل به کمک دستگاه واریان مدل ۷۳۵ مورد خوانش



شکل ۲. (a) نقشه پراکندگی واحدهای آتشفشانی و آذرآواری در دشت مختاران، (b) موقعیت آغل کوه در مجاورت رخنمون‌های آتشفشانی و آذرآواری مجاور روی عکس ماهواره ای و (c) موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به منطقه

Fig 2. (a) Distribution map of volcanics and pyroclastic unites in Mokhtaran plain, (b) The location of Agholkuh and other volcanic and pyroclastic outcrops on satellite image and (c) Geographical situation and the road map of the area.

۵ - سنگ‌شناسی

با کانی‌های دیگری نظیر پیروکسن و در مواردی الیون یا هورنبلند، در ابعاد و مقادیر کمتر همراهی می‌گردد. بافت این سنگ‌ها عموماً پرفیریتیک و در مواردی گلوپروپرفیریتیک با مزوستاز ریزبلور تا شیشه‌ای و گاهی جریان‌ی می‌باشد (شکل ۴a-d).

بررسی‌های صحرایی و سنگ‌شناسی مخروط‌های آتشفشانی دشت مختاران گواه حضور ولکانیک‌های آندزیتی، تراکی‌آندزیتی و آندزیت‌های بازالتی می‌باشد. کانی اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها پلاژیوکلاز است که



شکل ۳. (a) نمایی از رخنمون و دایک آندزیتی مجاور، شمال مازان؛ دید به شمال، (b) مخروط آتشفشانی شمال تقی‌آباد (دید به شمال) و (c) منظره آغل کوه در مجاورت شمال غربی روستای گیوشاد (دید به شمال)

Fig 3. (a) A view of a cone and its adjacent dyke, north of Majan (view to the north), (b) North Taghiabad volcanic cone (view to the north) and (c) Agholkuh, located in the northwest of Givshad village (view to the north).

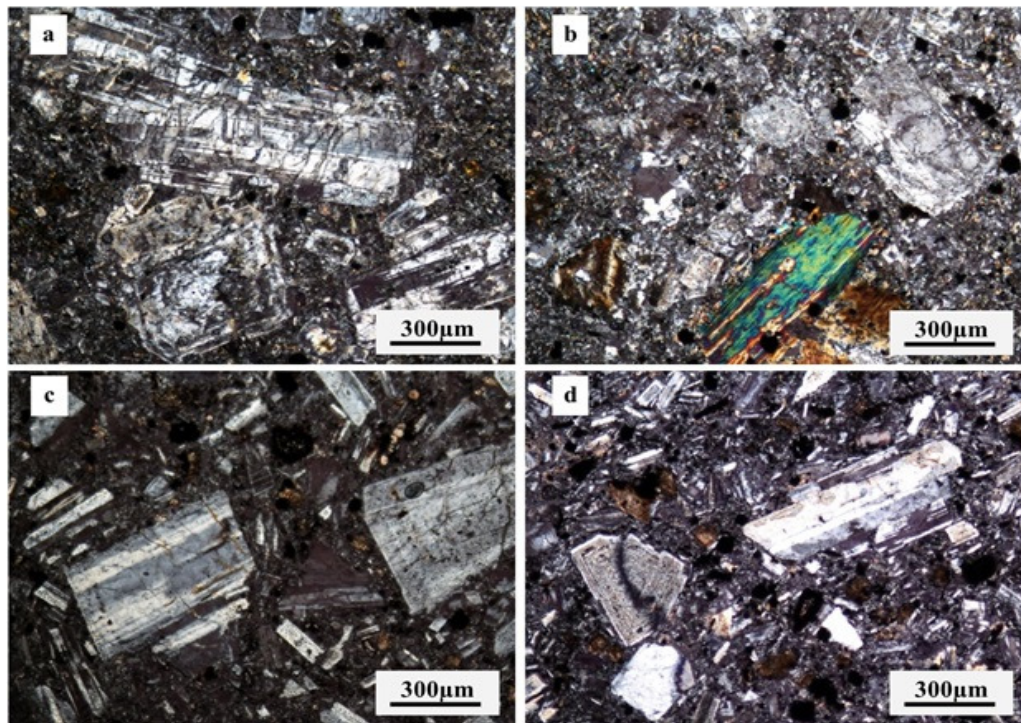
تراکی آندزیت: این سنگ‌ها با بافت پورفیریتیک و میکرولیتی بوده و دارای ۳۰ تا درصد حجمی درشت بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت می‌باشند. در این سنگ‌ها، سانیدین هم به صورت فنوکریست و میکرولیت با ماکل کارلسباد دیده می‌شود. آپاتیتی شدن درشت بلورهای هورنبلند و بیوتیت قابل مشاهده است که دال بر واکنش‌های اکسیداسیون در محیط آبدار و دمای تشکیل بالا می‌باشد (امیرتیموری و همکاران، ۲۰۱۹؛ روزبهانی و آروین، ۲۰۱۰).

آندزیت بازالتی: بافت در این سنگ‌ها اغلب پرفیریتیک، گلومروپرفیریتیک و هیالوپورفیریتیک تا میکرولیتی می‌باشد (شکل ۴c). کانی اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها فنوکریستال‌های پلاژیوکلاز و ریزبلورهای پیروکسن هستند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز ۴۰ تا ۷۰ درصد حجمی سنگ‌ها را در بر گرفته است. زمینه با ۳۰ تا ۶۰ درصد حجمی سنگ

آندزیت: این سنگ‌ها با بافت پورفیریتیک با زمینه ریز تا متوسط دانه می‌باشند که حاوی ۲۵ تا ۳۰ درصد درشت بلورهای پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر، ۳ تا ۵ درصد حجمی هورنبلند با اندازه ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر و ۲ تا ۵ درصد حجمی بیوتیت تا اندازه ۱ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۴a-b). پلاژیوکلازها فراوان‌ترین فنوکریست آندزیت‌ها بوده و اغلب شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند. مطالعات نوری پلاژیوکلازها نشان می‌دهد که این کانی‌ها از نوع الیگوکلاز تا آندزین هستند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز اغلب دارای منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی هستند که دال بر عدم تعادل شیمیایی و صعود سریع ماگما و افت ناگهانی فشار به همراه آلایش پوسته‌ای می‌باشد (مقدم و همکاران، ۲۰۱۶ و ریموند، ۲۰۰۲). زمینه آندزیت‌ها اغلب دانه‌ریز بوده و دارای درشت بلورهای مشابه و نیز فازهای کدر می‌باشند. زیرکن، آپاتیت و اسفن از کانی‌های فرعی این سنگ‌ها می‌باشد. سوسوریتی شدن و سریسیتی شدن پلاژیوکلازها نیز دیده می‌شود.

هورنبلند دارای حواشی سوخته می‌باشند که فوگاسیته بالای اکسیژن و درجه حرارت بالای محیط تشکیل را نشان می‌دهد (رادرفورد و دوین، ۲۰۰۳؛ رینگوود، ۱۹۷۴).

اغلب از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، ریزبلورهای پیروکسن، الیوین و شیشه تشکیل شده است. پلاژیوکلازها عموماً زونه بوده (شکل ۴d) و دارای شواهد آلتراسیون سوسوریتی می‌باشند. محدود ریزبلورهای



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های اخذ شده از مخروط‌های آتشفشانی دشت مختاران: a: فنوکریست‌های پلاژیوکلاز که عموماً دچار دگرسانی شده‌اند در نمونه‌ای از آندزیت با بافت هیالو فلسیتیک. b: همراهی بلورهای پلاژیوکلاز با هورنبلند سبز و بیوتیت‌هایی که اپاک شده‌اند در نمونه‌ای دیگر از سنگ‌های آندزیتی. c: بافت هیالو میکروولیتی پورفیری، گسترش آلتراسیون در بلورهای زونه‌ی پلاژیوکلاز، شیشه، اپاک و ریزبلورهای مافیکی که به تمامی اکسید شده‌اند. d: زونینگ پدیده رایج در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز است، پورفیرهای درشت پلاژیوکلاز با اپاک و بلورهای سوخته هورنبلند همراهی می‌گردند.

Fig 4. Selected microscopic views from Mokhtaran plain's volcanic cones. a: Predominant alteration in Plagioclase phenocrysts in an andesitic sample, b: Plagioclase associated with green hornblende and biotite in andesitic samples, c: Porphyritic texture, alteration in zoned plagioclase and totally opaqued mafic microcrystals and d: Zoned plagioclases associated with opaque and hornblende micro phenocrysts.

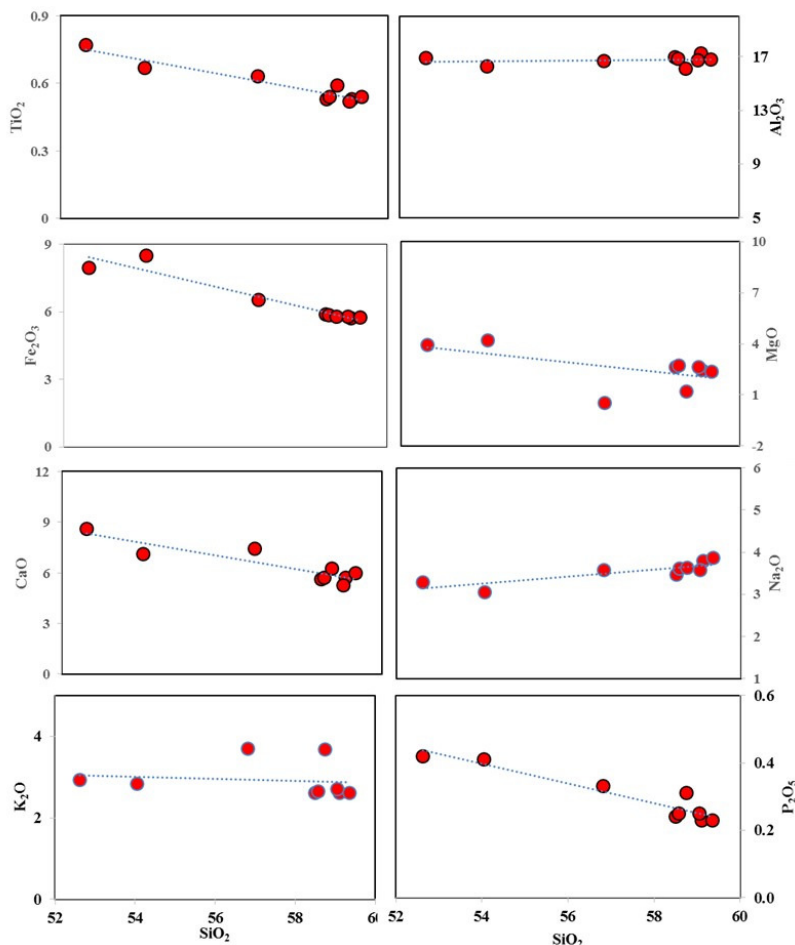
مورد K_2O یکنواخت می‌باشد (شکل ۵). روند کاهشی CaO بواسطه تحول ترکیبی پلاژیوکلازها در حین تبلور از کلسیک به سدیک و افزایش تبلور بلورهای آلبیت با ادامه روند تبلور می‌باشد (موراتا و آگوایره، ۲۰۰۳؛ خواجه و همکاران، ۲۰۱۴؛ زراسوندی و همکاران، ۲۰۱۳). روند افزایشی Na_2O نیز می‌تواند به تبلور آلبیت با ادامه روند تبلور دلالت داشته باشد. روند کاهشی Fe_2O_3 نیز به علت سازگار بودن عنصر آهن در حین جدایش ماگمایی در کانی‌های مافیک می‌باشد.

۶- ژئوشیمی

نتایج آنالیز شیمی سنگ کل مربوط به ۱۰ نمونه از رخنمون‌های منفرد آتشفشانی دشت مختاران بشرح مندرج در جدول ۱ ارائه شده است. در این نمونه‌ها تغییرات مقادیر SiO_2 از ۵۲/۶۴ تا ۵۹/۱۱ می‌باشد. ترسیم اکسیدهای اصلی در مقابل SiO_2 به عنوان اندیس تفريق (هارکر، ۱۹۰۶) نشان می‌دهد که روند تغییر اکثر اکسیدها کاهشی است. در این رابطه رفتار Na_2O و K_2O متفاوت است بطوری که این روند در مورد Na_2O افزایشی و در

Table 1. Whole rock chemistry results of Mokhtaran plain's volcanic samples

Sample	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10
SiO ₂ (Wt%)	Δ9/11	Δ1/Δ	Δ1/Δ7	ΔΔ/97	Δ9/0Δ	Δ9/3Δ	Δ9/12	Δ9/0Δ	Δ2/92	Δ1/ΔΔ
TiO ₂	0/Δ3	0/Δ3	0/Δ4	0/ΔΔ	0/Δ2	0/Δ4	0/93	0/97	0/77	0/Δ9
Al ₂ O ₃	17/2Δ	19/96	19/14	19/77	19/72	19/11	19/96	19/29	19/92	19/13
Fe ₂ O ₃	Δ7	Δ1/Δ7	Δ1/Δ6	9/0	Δ7/Δ	Δ7/Δ	9/Δ2	1/49	7/96	Δ7/7
MnO	0/13	0/13	0/14	0/13	0/2	0/13	0/11	0/17	0/09	0/11
MgO	27/4Δ	27/94	27/74	27/Δ3	27/9Δ	27/3Δ	0/Δ3	9/21	37/9Δ	1/21
CaO	Δ7/2	Δ7/6	Δ7/1	Δ7/7	Δ2/Δ	Δ7/97	Δ4/3	7/13	1/Δ9	9/27
Na ₂ O	37/9	37/47	37/91	37/13	37/Δ1	37/Δ6	37/Δ7	37/0Δ	37/29	37/94
K ₂ O	27/92	27/92	27/9Δ	27/97	27/7	27/92	37/7	27/Δ3	27/92	27/97
P ₂ O ₅	0/23	0/24	0/2Δ	0/2Δ	0/2Δ	0/23	0/23	0/41	0/42	0/21
LOI	27/23	37/11	27/Δ2	27/23	37/17	27/12	27/42	27/44	27/27	27/2Δ
Total	97/Δ3	99/Δ6	99/91	94/4Δ	99/7	97/94	99/3	97/2	97/Δ3	99/4Δ
Ba(ppm)	721	733	739	724	7Δ1	717	7Δ1	ΔΔ6	97Δ	749
Rb	Δ9	Δ2	Δ2	4Δ	Δ9	49	76	40	41	7Δ
Sr	7Δ3	742	724	709	70Δ	722	14Δ	124	9Δ1	107
Zr	91	41	41	41	44	33	100	111	9Δ	133
Nb	4	37	37/6	37/Δ	37/9	4	37/9	27/Δ	27/2	37/6
Ni	4	4	3	4	3	1	Δ	9	12	9
Co	11/2	11/1	11/9	11/2	11/9	10/Δ	11/4	21/2	22	11/1
Zn	99	74	72	73	70	99	Δ9	119	96	71
Cr	47	46	40	41	44	3Δ	ΔΔ	3Δ	41	96
La	1Δ	1Δ	16	1Δ	16	16	16	14	12	17
Ce	32	31	32	31	32	32	3Δ	31	30	40
Pr	Δ/Δ	Δ/29	Δ/11	Δ/24	Δ/14	Δ/26	Δ/13	47/1	47/96	47/96
Nd	20/7	11/Δ	19/7	21/9	19/2	19/4	11	19/1	14/Δ	11/1
Sm	3/1	2/1	2/9	3	2/9	2/1	3/2	3/96	2/1	2/1
Eu	1/03	0/91	0/9	0/97	0/12	0/9Δ	1/09	1/22	1/1	0/91
Gd	37/23	37/17	37/21	37/2	37/19	37/07	37/43	37/92	37/Δ1	37/14
Tb	0/Δ	0/2	0/2	0/Δ	0/2	0/2	0/2	0/Δ	0/Δ	0/2
Dy	37/4	37/Δ	37/1	37/2	37/2	37/1	37/2	37/7	37/2	3
Er	1/9	1/Δ	1/Δ	1/4	1/4	1/4	1/4	1/7	1/Δ	1/4
Tm	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2
Yb	1/Δ1	1/96	1/73	1/7	1/73	1/73	1/14	27/4	27/21	1/7Δ
Lu	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2
Y	1Δ/7	1Δ/9	19/Δ	19/1	19/4	19/Δ	17/4	21/2	11/96	17/1
Cs	2	27	32	27/1	27/7	17	4/Δ	1/1	2	11/2
Ta	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2	0/2
Hf	27/6	1/9	1/9	2	2	1/9	37/2	27/4	27/2	27/4
Sc	9/2	9/Δ	10/1	9/1	10/1	10	13	20/4	2Δ/96	11/1
Be	1/Δ	1/Δ	1/Δ	1/Δ	1/Δ	1/Δ	1/7	1/4	1/7	1/9
Sn	0/1	0/7	0/1	0/96	0/96	0/7	0/1	0/7	0/96	0/7
Th	Δ/1	4/Δ	4/4	4/Δ	4/9	4/Δ	Δ/1	3/9	2/1	Δ/9
U	1/1	1/3	1/1	1/1	1/1	1	1/4	1/1	1	1/1
V	136	136	131	140	131	134	147	24Δ	214	12Δ
W	37	3/6	3/3	3/Δ	4	4/9	4/1	2/Δ	2/1	4/2
pb	11	12	10	11	7	12	13	31	9	17
Mo	2/9	1/2	1/2	1/7	1/7	1/4	0/1	2/1	1/3	2/Δ
Cu	Δ4	33	30	26	36	27	26	77	12	40
As	4/4	1	2/Δ	1/1	7/Δ	0/Δ	13/9	12	Δ/4	10/1
Sb	0/Δ	0/Δ	0/Δ	0/Δ	0/Δ	0/Δ	1/1	0/Δ	0/Δ	0/Δ
Ag	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1



شکل ۵. چگونگی تغییر اکسیدهای اصلی نمونه‌های مورد مطالعه در مقابل درصد وزنی SiO_2 (هارکر، ۱۹۰۶)

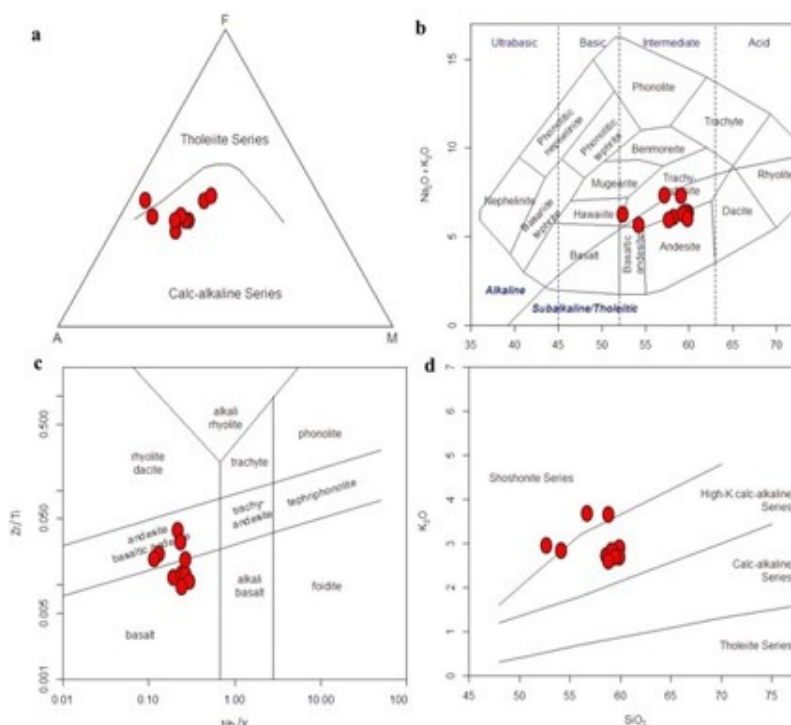
Fig 5. Main oxides vs. SiO_2 (Harker, 1906)

(بنیتون، ۱۹۸۴) و همچنین عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه (مکدانوف و سان، ۱۹۹۵) برای سنگ‌های آتشفشانی دشت مختاران نشان داده شده است. مبتنی بر این نمودارها غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE به وضوح قابل مشاهده می‌باشد که نشان‌دهنده پهنه فرورانس است (ویلسون، ۱۹۸۹؛ آسیابانها و همکاران، ۲۰۱۲). ویلسون (۱۹۸۹) غنی‌شدگی از Cs, Nd, U, Sr, Pb و تپی‌شدگی از Ti, Zr, Nb را از ویژگی‌های شناخته شده ماگماتیسیم پهنه فرورانس برمی‌شمارد ضمن این که بی‌هنجاری منفی Ti, Nb و P در ارتباط با تبلور روتیل، تیتانومگنتیت و آپاتیت (ریگان و گیل، ۱۹۸۹)، آرایش ماگما با مواد پوسته‌ای در هنگام صعود (ژو و همکاران، ۲۰۰۹) و جایگزینی ماگما در پهنه فرورانس نیز قلمداد گردیده است (لین و همکاران، ۲۰۱۲). سنگ‌های آتشفشانی دشت مختاران در دیاگرام Zr در مقابل Ti

نمودار AFM طبیعت بارز کالک‌آلکان این سنگ‌های آتشفشانی را آشکار ساخته (ایروین و باراگار، ۱۹۷۱؛ شکل 6a) و مستند به شکل (6b) مخروط‌های آتشفشانی دشت مختاران از نظر ترکیبی عموماً شامل آندزیت بازالتی و آندزیت بوده و در مواردی به تراکی آندزیت تمایل ترکیبی دیده می‌شود (کاکس و همکاران، ۱۹۷۹). نمودار Nb/Y در مقابل Zr/Ti ترکیب شیمیایی نمونه‌ها را طیفی از آندزیت، آندزیت بازالتی و بازالت نشان داده (پیرس، ۱۹۹۶؛ شکل 6c) و به استناد شکل (6d) نمونه‌ها ماهیت کالک-آلکانل پتاسیم بالا تا شوشونیتی نشان می‌دهند (پکسریلو و تیلور، ۱۹۷۶). با توجه به عملکرد عناصر خاکی کمیاب در مقابل هوازدگی و دگرسانی، از الگوی این عناصر برای تعیین خاستگاه سنگ‌ها استفاده می‌شود (رولینسون، ۱۹۹۳). در شکل‌های ۷a و ۷b به ترتیب نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به کندریت

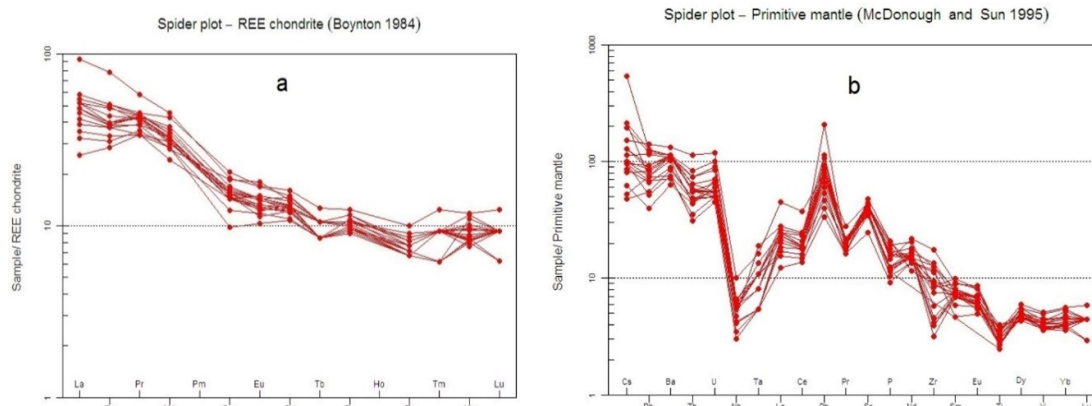
می‌دهند (شکل ۸b). ترسیم داده‌ها در نمودار Y در مقابل Zr (مولر و گروز، ۱۹۹۷) ماهیت قوس آتشفشانی را برای نمونه‌های دشت مختاران تأیید می‌کند (شکل ۸c).

(پیرس، ۱۹۸۳) در محدوده سنگ‌های آتشفشانی جزایر کمانی (شکل ۸a) و در نمودار سه‌تایی Th-Nb/16-Hf/3 (وود، ۱۹۸۰) ماهیتی مشابه بازالت‌های کالک‌آلکالن نشان



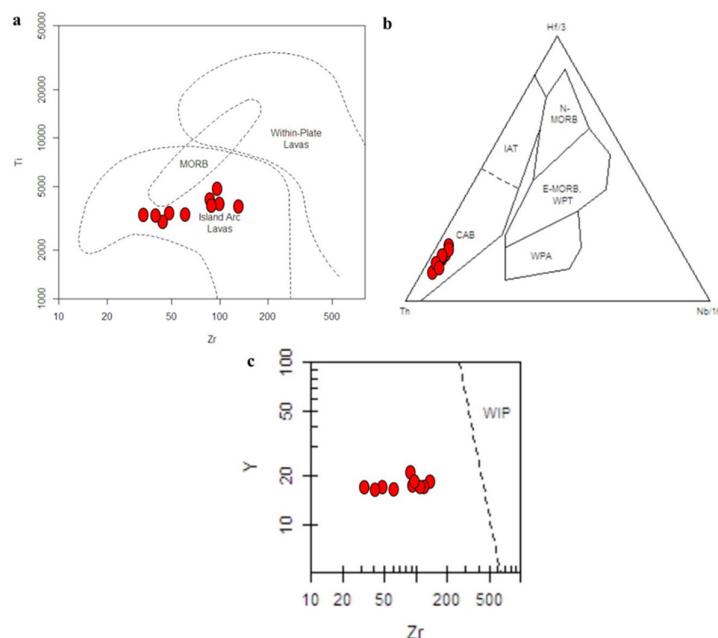
شکل ۶. نمودارهای نشانگر ترکیب شیمیایی و ماهیت ژئوشیمیایی مخروط‌های آتشفشانی دشت مختاران: a: آشکارسازی ماهیت کالک‌آلکالن سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه به وسیله نمودار AFM (ایروین و باراگار، ۱۹۷۱): تعیین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها به کمک نمودار SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$; (کاکس و همکاران، ۱۹۷۹): طیف ترکیبی بازالت، آندزیت، آندزیت بازالتی برای این سنگ‌ها به کمک نمودار Nb/Y vs. Zr/Ti (پیرس، ۱۹۹۶): d: آشکارسازی طبیعت کالک‌آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی برای نمونه‌های مورد مطالعه در دیاگرام SiO_2 vs. K_2O (پکسرینو و تابلور، ۱۹۷۶).

Fig 6. Chemical composition and geochemical diagrams for Mokhtaran plain's volcanic cones, a: Revealing of the calc-alkaline nature of the samples in AFM diagram (Irvine & Baragar, 1971), b: Determination of the samples' chemical composition using SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ diagram (Cox et al, 1979), c: Nb/Y vs. Zr/Ti diagram (Pearce, 1996) shows a combined compositional spectrum of andesite, basaltic andesite and basalt for studied samples, d: Revealing the nature of high-potassium calc-alkaline to shoshonitic for the samples based on the SiO_2 vs. K_2O diagram (Pecceirillo and Taylor, 1976).



شکل ۷. a: نمودار عناصر نادر خاکی نمونه‌های آتشفشانی دشت مختاران بهنجار شده در برابر ترکیب کندریت (بنیتون، ۱۹۸۴)، b: نمودار عنکبوتی نمونه‌های آتشفشانی دشت مختاران بهنجار شده در برابر ترکیب گوشته اولیه (مک دانوف و سان، ۱۹۹۵).

Fig 7. a: REE pattern normalized by chondrite (Boynton, 1984) and b: Spider diagram normalized by the primitive mantle (McDonough and Sun, 1995).



شکل ۸. مطالعه نمونه‌های اخذ شده از مخروط‌های آتشفشانی دشت مختاران با استفاده از نمودارهای a: Ti vs. Zr (پیرس، ۱۹۸۳)؛ b: دیاگرام سه‌تایی $Th-Nb/16-Hf/3$ (وود، ۱۹۸۰) و c: نمودار Zr vs. Y (مولر و گروز، ۱۹۹۷).

Fig 8. a: Ti vs. Zr diagram (Pearce, 1983), b: $Th-Nb/16-Hf/3$ (Wood, 1980) and c: Zr vs. Y (Muller and Groves, 1997).

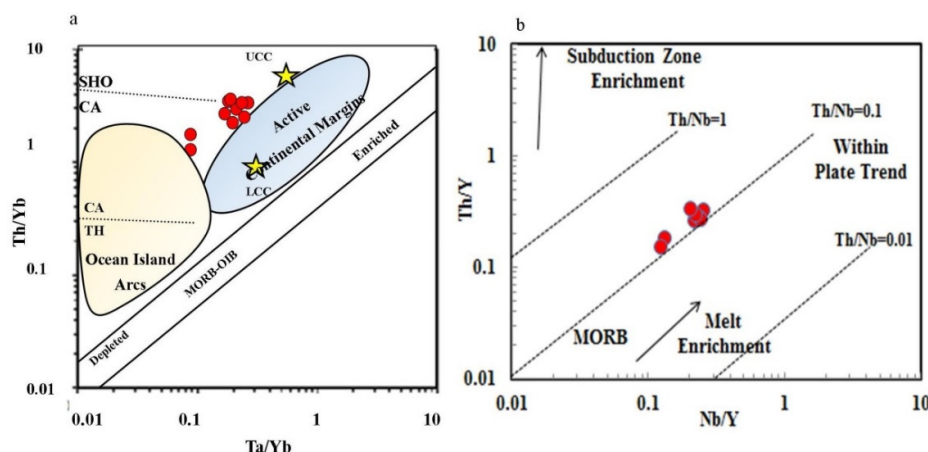
۷- بحث

۱۰۰ppm بر اولیه نبودن ماگمای سازنده این سنگ‌ها دلالت دارد (ویلسون، ۱۹۸۹) ضمن این که غنی‌شدگی از LREE نیز به درجات کم ذوب بخشی اشاره دارد. روند تغییرات اکسیدهای اصلی MgO و CaO در مقابل SiO_2 تأیید کننده دخالت کانی‌های کلینو و ارتوپروکسن در سیر تکاملی ماگما می‌باشد. همچنین روند نزولی Al_2O_3 در مقابل SiO_2 به اهمیت تفریق و تبلور پلاژیوکلاز اشاره دارد. به همین ترتیب روند صعودی P_2O_5 ممکن است در ارتباط با تفریق آپاتیت باشد. مقادیر نسبت‌های La/Nb و La/Ta در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب بیشتر از ۲۲ و ۱/۵ می‌باشند که تأیید کننده دخالت فرایندهای آلیایش پوسته‌ای هستند (عبدالفتاح و همکاران، ۲۰۰۴). بر اساس نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb (پیرس، ۱۹۸۳؛ مک کولچ و گامبل، ۱۹۹۱) سنگ‌های آتشفشانی منطقه از نوع کالک‌آلکان حواشی فعال قاره‌ای می‌باشند (شکل ۹a) و به استناد نمودار Nb/Y در مقابل Th/Y نمونه سنگ‌های آتشفشانی دشت مختاران روند غنی‌شدگی در پهنه فرورانشی را نشان می‌دهند (شکل ۹b)؛ آلیسک و همکاران، ۲۰۰۲. کوشو و جنلی (۲۰۱۰) نسبت بالای Th/Y را نشان دهنده اثرگذاری هر چه بیشتر صفحه فرورنده بر روی گوشته می‌دانند. غنی‌شدگی LREE و

جایگاه زمین‌ساختی: داده‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند که رخداد ماگماتیسم دشت مختاران مرتبط با کمان فرورانش می‌باشد. آنومالی منفی Nb و Ti در الگوی بهنجار شده با ترکیب گوشته اولیه نیز این موضوع را تأیید کرده و نمودار شکل ۸b نشان می‌دهد که کمان ماگمایی مذکور یک کمان قاره‌ای است. پتروژنز: ماگمای اولیه نمونه‌های آتشفشانی مختاران دارای ماهیت آرایه گوشته‌ای بوده که با توجه به آنومالی مثبت Pb ، دچار آلیایش و متاسوماتیسم در منشأ و با ضمن تحول و تکامل ماگما حین صعود شده است (ویلسون، ۱۹۸۹). براین اساس گوشته متاسوماتیسم شده می‌تواند خاستگاه مناسبی برای ماگمای مولد مجموعه سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه باشد. با توجه به آنومالی مثبت U ، Sr ، Nd و Cs و آنومالی منفی Nb ، Ti و Zr به نظر می‌رسد فرایند آلیایش ماگمای اولیه با مواد پوسته‌ای با نسبت‌های مختلف رخ داده است (هافمن، ۱۹۹۷). در نمونه‌های دشت مختاران نسبت La/Sm ۳/۸۹ تا ۶/۰۷ می‌باشد که دال بر آلیایش پوسته‌ای است (لایت فوت و کیاس، ۲۰۰۵). مقادیر $MgO < 7wt\%$ گواهی بر عدم تشابه نمونه‌های مورد مطالعه با ترکیب گوشته اولیه بوده و مقادیر پایین $Ni < 4$ و $Cr <$

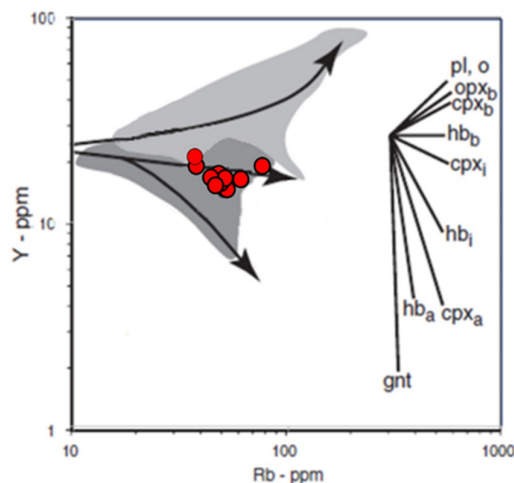
La/Nb، خاستگاه نمونه‌های مورد مطالعه می‌تواند گوشته لیتوسفری در نظر گرفته شود (فیتون و همکاران، ۱۹۸۸). از آنجاییکه سنگ‌های آندزیتی و تراکی‌آندزیتی در پهنه‌های فرورانش می‌توانند از خاستگاه‌ها و فرایندهای متنوعی تشکیل شوند (گیل، ۱۹۸۱) و با توجه به دامنه تغییرات SiO_2 در نمونه‌های دشت مختاران، می‌توان ماگمای مولد این سنگ‌ها را منشأ گرفته از تحول ماگمای گوشته‌ای توسط فرایندهای AFC و آلیش پوسته‌ای دانست. این نمونه‌ها دارای تشابه ژئوشیمیایی با آرایه کمان‌های آتشفشانی بوده (پیرس، ۲۰۰۸) و مستند به مولر و گرووز (۱۹۹۵) از نوع کمان‌های آتشفشانی تأخیری بشمار می‌روند (شکل‌های a, b, ۱۲).

تهی‌شدگی HREE در نمونه‌های مختاران، علاوه بر حضور گارنت در خاستگاه ماگمایی، می‌تواند به دخالت فرایند تبلور تفریقی پیروکسن و پلاژیوکلاز مرتبط باشد چنانچه در اکثر نمونه‌ها مقادیر $\text{Sc} < 25 \text{ ppm}$ می‌باشد که به تفریق گسترده پیروکسن قبل از فوران اشاره می‌کند (فورمن و گراهام، ۱۹۹۹). بر اساس نمودار Y در مقابل Rb، تحولات ماگمایی در نمونه‌های مورد مطالعه با تفریق توأمان فازهای بدون آب (کلینوپیروکسن) و آبدار (هورنبلند) تطابق دارد (پیرس و همکاران، ۱۹۹۰؛ شکل ۱۰). در همین رابطه بر اساس نمودار اقتباس گردیده از الام و کاکس (۱۹۹۱)، عمق تقریبی ذوب بخشی مذاب والد سنگ‌های آتشفشانی دشت مختاران کمتر از ۵۰ کیلومتر تخمین زده می‌شود (شکل ۱۱). با توجه به مقادیر بالاتر از ۱/۵ در مورد نسبت



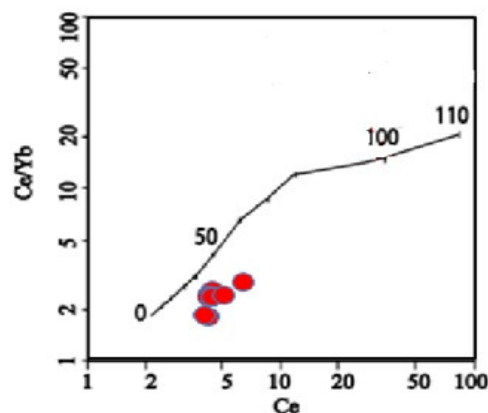
شکل ۹. نمایش سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه، a: در نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb (پیرس، ۱۹۸۳)؛ b: نمودار Th/Y vs. Nb/Y (آلیسیک و همکاران، ۲۰۰۲) - UCC: Upper continental crust, LCC: Lower continental crust

Fig 10. Plot of the samples, a: in Th/Yb vs. Ta/Yb diagram (Pearce, 1983), b: in Th/Y vs. Nb/Y diagram (Alici et al., 2002).



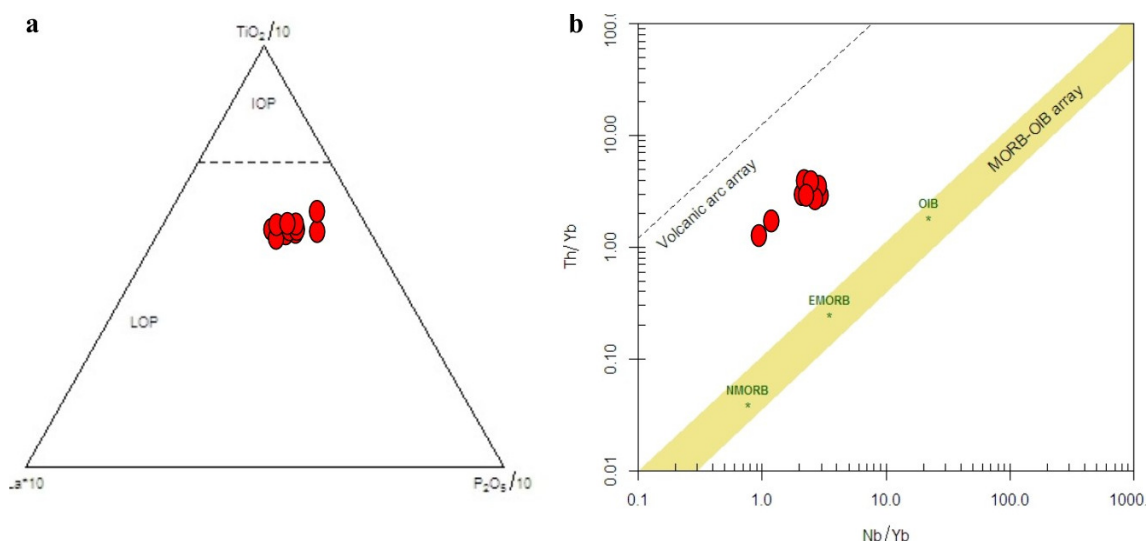
شکل ۱۰. نمودار دوتایی Y در مقابل Rb، در خصوص تفریق فازهای آبدار و بی‌آب (پیرس و همکاران، ۱۹۹۰)

Fig 11. Y vs. Rb diagram regarding anhydrous differentiation and hydrous phases (Pearce et al., 1990).



شکل ۱۱. نمودار Ce vs. Ce/Yb برای تعیین عمق ذوب بخشی مذاب والد نمونه‌های مورد مطالعه (الام و کاکس، ۱۹۹۱)

Fig 11. Ce/Yb vs. Ce diagram (Ellam & Cox, 1991) for determination of the partial melting depth in the source of Mokhtaran plain's volcanic rocks.



شکل ۱۲. a: نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار $TiO_2/10-P_2O_5/10-Y*10$ در محدوده کمان‌های آتشفشانی تاخیری قرار می‌گیرند (مولر و گرووز، ۱۹۹۵)؛ b: نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار Th/Yb vs. Nb/Yb (پیرس، ۲۰۰۸) در محدوده آرایه کمان آتشفشانی واقع می‌گردند.

LOP: Late oceanic potassic magmatic rocks; IOP: Initial oceanic potassic magmatic rocks

Fig. 12. Plot of the samples in area of the late oceanic potassic magmatic rocks, $TiO_2/10-P_2O_5/10-Y*10$ diagram (Müller & Groves, 1995), b: Plot of the samples in the area of volcanic arcs, Nb/Yb vs. Th/Yb diagram (Pearce, 2008).

۱۰- نتیجه‌گیری

مواردی جریانی و یا تلفیقی از آن‌ها می‌باشد. تهی‌شدگی از HREE و غنی‌شدگی از LREE از نشانه‌های بارز حضور گارنت در خاستگاه و دخالت فرایند تبلور تفریقی پیروکسن و پلاژیوکلاز در پتروژنز این سنگ‌ها بوده و انطباق زایشی آن‌ها را با ماگماهای مناطق فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای تأیید می‌نماید. مستندات ارائه شده در این پژوهش حاکی از آنند که ماگمای بازیک مولد مجموعه رخنمون‌های آتشفشانی دشت مختاران بیرجند، خاستگاهی از نوع گوه گوشته‌ای لیتوسفری داشته که وسیله افزوده شدن ترکیبات مرتبط با صفحه فرورونده متاسوماتیزه شده و ضمن صعود با مواد پوسته‌ای با نسبت‌های مختلف آلاش

مخروط‌های منفرد آتشفشانی دشت مختاران دارای تنوع ترکیبی آندزیت، آندزیت بازالتی و تراکی آندزیت می‌باشند. کانی‌شناسی بارز این سنگ‌ها را بلورهای فراوان و عمدتاً درشت و زونه پلاژیوکلاز تشکیل می‌دهند که بسته به ترکیب شیمیایی آن‌ها بوسیله معدود فنوکریست‌های پیروکسن و هورنبلند همراهی می‌گردند. الیوین و بیوتیت بصورت میکروفنوکریست و پراکنده در مزوستاز دیده شده و اپاک، اکسیدهای آهن و تیتانیوم و شیشه دیگر فازهای سنگ‌ساز بشمار می‌روند. بافت معمول در این سنگ‌ها پرفیریتیک و مزوستاز غالب میکروگرانولار، شیشه‌ای و در

- Birjand. Master's Thesis, Shahrood University of Technology (in persian).
- Ellam, R. M., Cox, K. G (1991) An interpretation of Karoo picrite basalts in terms of interaction between asthenospheric magmas and the mantle lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 105 (1-3): 330-342. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90141-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90141-4)
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J. and Lin, G (2003) Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1-2): 115-135. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00415-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00415-8).
- Fitton, J. G., James, D., Kempton, P. D., Ormerod, D. S., Leeman, W. P (1988) The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States. *Journal of Petrology*, 1: 331-349. https://doi.org/10.1093/petrology/Special_Volume.1.331
- Furman, T., Graham, D (1999) Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: geochemical evidence from the Kivu volcanic province. In *Developments in Geotectonics*, 24: 237-262.
- Gill, J. B (1981) *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer, Berlin, 390p.
- Harker, A (1906) *The natural history of igneous rocks*, Methuen, London, 348p.
- Hofmann, A. W (1997) Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature* 385: 219-229. DOI:10.1038/385219a0
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A (1971) A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks". *Canadian Journal of Earth Science*, 8: 523-548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>.
- Khajeh, A., Pourmoafi, S. M. and Mohammadi, S. S (2014) Geochemistry and Tectonic setting of Tertiary volcanic rocks in north of Khusf (East of Iran). *Iranian Journal of Petrology*, 5(19): 107-122 (in Persian).
- Khatib, M. M., Zarrinkoub, M. H. and Etemadkhah, Z (2010) Mechanism of the sub-volcanic replacement in Givshad area based on the micro-structural evidence, 28th Iranian geosciences symposium, Tehran, Iran (in persian).
- Kuscu, G. G. and Geneli, F (2010) Review of post-collisional volcanism in the central Anatolian volcanic province (Turkey) with special reference to the Tepekoy volcanic complex. *Earth Sciences* 99(3), 593- 621. doi:10.1007/s00531-008-0402-4.
- Lightfoot, P. C., Keays, R. R (2005) Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian trap, Noril'sk region: نیز یافته است. سرانجام اینکه مذاب والد مجموعه سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه از ذوب بخشی اندک و در عمق تقریبی کمتر از ۵۰ کیلومتر تشکیل شده است.
- ### ۹- تشکر و قدردانی
- بدینوسیله از تلاش‌ها و مساعی سردبیر دانشمند و مدیر مسئول محترم دوفصلنامه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی که علاوه بر فراهم آوردن امکان انتشار این پژوهش، ضمن مراحل مختلف ارزیابی و داوری از راهنمایی‌های ارزنده ایشان برخوردار بوده‌ایم، سپاسگزاری می‌نماییم. از شکیبائی دبیر محترم اجرائی نشریه برای پاسخگویی به موقع ضمن فرایندهای مختلف داوری و آماده‌سازی نوشتار و تعامل سازنده ایشان تشکر می‌گردد. بدون تردید دقت نظر و نکته‌سنجی داوران محترم سبب رفع نقایص و ارتقاء کیفی نوشتار حاضر شده که از این بزرگواران نیز قدردانی می‌نماییم.
- ### References
- Abdel – Fattah, M., Abdel – Rahman, A. M., Nassar, P. E (2004) Cenozoic volcanism in the Middle East: Petrogenesis of alkali basalts from northern Lebanon. *Geological magazine*, 141: 545-563. DOI: 10.1017/S0016756804009604.
- Alici, P., Temel, A. and Gourgaud, A (2002) Pb-Nd-Sr isotope and trace element geochemistry of Quaternary extension- related alkaline volcanism: A case study of Kula region (western Anatolia, Turkey). *Volcanology and Geothermal Research*, 115: 487- 510.
- Amirteymoori, N., Mohammadi, S. S. and Nakhaei, M (2019) Petrography, Geochemistry and tectonomagmatic setting of Tertiary volcanic rocks in Ebrahim Abad area (southwest of Gazik, Southern Khorasan). *Iranian Journal of Petrology*, 10(37): 53-74 (in Persian).
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J. M., Kananian, A. and Rahimi, G (2012) Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Asian Earth Sciences*, 45(1): 79-94. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2011.09.020>.
- Boynton, W. V (1984) Geochemistry of Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., Ed., *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, New York, 63-114. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>.
- Cox, K. G (1979) *The Interpretation of Igneous Rocks*. Allen and Unwin, London, 450p.
- Delavar, Z (2009) *Petrology and Geochemistry of the Subvolcanic Domes in the Southwest of*

- Oceanic Crust. *Lithos*, 100: 14-48.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>.
- Peccherillo, A. and Taylor, S. R (1976) Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63-81.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00384745>.
- Raymond, L. A (2002) *Petrology: The study of igneous, sedimentary and metamorphic rocks*. 2nd Edition, McGraw Hill, New York, 720 p.
- Reagan, M. K. and Gill, J. B (1989) Coexisting calc-alkaline and high niobium basalts from Turrialba volcano, Costa Rica: implication for residual titanates in arc magma source. *Geophysical Research*, 94(B4): 4619-4633.
<https://doi.org/10.1029/JB094iB04p04619>.
- Ringwood, A. E (1974) The petrological evolution of island arc systems. *Journal of the Geological society*, 130(3): 183-204.
<https://doi.org/10.1144/gsjgs.130.3.0183>.
- Rollinson, H. R (1993) *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, Wiley, New York, 352p.
- Rouzbahani, L. and Arvin, M (2010) Petrography, geochemistry and petrogenesis of rhyolitic and andesitic rocks of Nasir- Abad area, SW of Rayen, Kerman. *Iranian Journal of Petrology*, 1(2): 1-16 (in Persian).
- Rutherford, M. J., Devine, J. D (2003) Magmatic conditions and magma ascent as indicated by hornblende phase equilibria and reactions in the 1995–2002 Soufriere Hills magma. *Journal of petrology*, 44(8): 1433-1453.
<https://doi.org/10.1093/petrology/44.8.1433>.
- Shabanian, N., Davoudian, A. R., Dong, Y., Liu, X (2018) U-Pb zircon dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic ratios from Azna-Dorud Cadomian metagranites, Sanandaj-Sirjan zone of western Iran. *Precambrian Research*, 306: 41-60.
- Shafaii Moghaddam, H., Li, X. H., Stern, R. J., Ghorbani, G., and Bakhshizad, F (2016) Zircon U–Pb ages and Hf–O isotopic composition of migmatites from the Zanjan–Takab complex, NW Iran: constraints on partial melting of metasediments. *Lithos*, 240: 34-48.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.004>
- Wilson, M (1989) *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. Unwin Hymen, London. 466p.
- Wood, D. A (1980) The application of Th- Hf- Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planetary Sciences Letters*, 50: 11- 30.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90116-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90116-8)
- Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores. *Economic Geology*, 100(3): 439-462.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.3.439>.
- Lin, I. J., Chung, S. L., Chu, C. H., Lee, H. Y., Gallet, S., Wu, G., Ji, J. and Zhang, Y (2012) Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Cretaceous to Paleocene granitoids and volcanic rocks, SE Tibet: petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 131–150.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.03.010>.
- McCulloch, M. T. and Gamble, J. A (1991) Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3): 358-374.
- McDonough, W. F. and Sun, S (1995) The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- Morata, D. and Aguirre, L (2003) Extensional lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20'–30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *South American Earth Sciences*, 16: 459-476.
- Muller, D., Groves, D. I (1997) Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization, sec. updated, Springer Verlag - Berlin, 242p.
- Nakamura, H., Iwamori, H (2009) Contribution of slab-fluid in arc magmas beneath the Japan arcs. *Gondwana Research*, 16(3-4): 431-445.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.05.004>.
- Pearce, J. A., Gale, G. H (1977) Identification of ore deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 7: 14 – 24.
<http://dx.doi.org/10.1144/gsl.sp.1977.007.01.03>
- Pearce, J. A (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, In: Hawkesworth C. J., Norry, M. J., (eds.), *Continental Basalts and mantle Xenoliths.*, Shiva, Nantwich, 230 -249.
<https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/8626>.
- Pearce, J. A., Bender, J. F., Delong, S. E., Kidd, W. S. F., Low, P. J., Guner, Y., Saroglu, F., Yilmaz, Y., Moorbath, S. & Mitchel, J. G (1990) Genesis of collision volcanism in eastern Anatolia, Turkey, *J. of volcanology and geothermal research*, 44: 189 – 229.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90018-B](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90018-B)
- Pearce, J. A (1996) Users guide to basalt discrimination diagrams. *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 79 -113 .
- Pearce, J. A (2008) *Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean*

- Yan, J., Zhao, J. X (2008) Cenozoic alkali basalts from Jingpohu, NE China: the role of lithosphere–asthenosphere interaction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(1-2): 106-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.11.001>
- Zarasvandi, A., Pourkaseb, H., Saki, A. and Karevani, M (2013) Investigation of petrology and geochemistry of volcanic rocks in the Kasian area, northeast of Khorramabad. *Iranian Journal of Petrology*, 4(14): 39-50 (in Persian).
- Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S (2011) Geochemical studies of volcanic rocks of Cheshme Khouri region (northwest of Birjand), 4th conference of the Economic Geology Association of Iran (in Persian).
- Zhou, M. F., Zhao, J. H., Jiang, C. Y., Gao, J. F., Wang, W. and Yang, S. H (2009) OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: implications for a possible Permian large igneous province. *Lithos*, 113(3-4): 583–594.

Petrography, geochemistry, tectonic setting and petrogenesis of Mokhtaran plain volcanic cones (Southwest of Birjand - East of Iran)

E, Elahpour¹ and M. Ahankoub^{2*}

1, 2- Assist. Prof., Dept., of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

* m.ahankoub@pnu.ac.ir

Recieved: 2023.9.18 Accepted: 2024.2.13

Abstract

Mokhtaran Volcanic cones are located in the northern part of the Sistan suture zone - southwest of Birjand, as several distinct and scattered structures. The complex includes some individual cones with the composition of basaltic andesite, andesite, and trachyandesite located on Paleogene flysch deposits of the plain. The main phenocrysts of these rocks are plagioclase, pyroxene, and hornblende in lower amounts and porphyritic and glomeroporphyritic as their common textures. Their mesostasis is generally glassy to microcrystalline and biotite, olivine, and opaque are secondary phases. Geochemical investigations indicate the calc-alkaline nature of these rocks, which were formed in a post-collision volcanic arc tectonic setting. The distribution pattern of REE indicates the enrichment and depletion for LREE and HREE respectively, and their main characteristic feature is the negative anomaly of Nb and positive for Pb. Based on tectonic setting diagrams, Mokhtaran Plain samples belong to the post-collision volcanic arcs related to the active continental margins concerning subduction.

Keywords: Andesite, Volcanic arc, Active continental margin, Mokhtaran plain, Southwest of Birjand

Introduction

The studied area is located in the southwest of Birjand between 32°30' to 32°40' north latitude and 58°56' to 59°11' east longitude, within the interfingering zone between the Lut block to the west and welded Sistan suture zone to the east. The geological formations here include flysch deposits, conglomerates, and tertiary volcanic units. Mokhtaran plain as the host morphology includes a clay plain in the center, Sand dunes toward the south and north, beside a cyclic structure known as Aghol-Kuh accompanied by scattered cone-shaped volcanic units. The most former studies about the area consist of the study of west Birjand magmatic rocks. The purpose of this research is petrography, geochemistry, and petrogenesis of the scattered volcanic cones in Mokhtaran Plain and determination of their formation and evolution processes.

Materials & Methods

After field studies, we have selected 30 fresh and unaltered rock samples. Then, we prepared thin sections from all the samples in the petrographic laboratory of Payame Noor University of Birjand. Then we studied them carefully using a petrographic microscope. In the next step, 10 samples were selected for ICP-

OES analysis in Zarazma Mineral Studies Company using the alkali melting method. The results of whole rock chemical analysis have been processed and interpreted by the GCDKIT software.

Discussion and Results

According to the field observations and petrography studies, the volcanic units here include andesite, trachyandesite, and basaltic andesite. The main mineral assemblage is plagioclase - pyroxene accompanied by olivine or hornblende in smaller amounts. The most textures in these rocks are porphyritic and glomeroporphyritic with microcrystalline to glassy mesostasis.

Andesitic rocks have a porphyritic texture with a fine to medium grain background, which contains 25 to 30% of coarse plagioclase crystals with a size of 0.5 to 2 mm, 3 to 5 % of hornblende with the size of 0.2 to 1 mm and 2 to 5% of biotite up to 1 mm. Plagioclases are the most abundant phenocrysts in the form of shaped to semi-shaped crystals.

Trachy-andesitic rocks have porphyritic and microlithic textures and contain up to 30% plagioclase. In these rocks, Sanidine is an important component in the form of phenocrysts and microlites exhibiting Carlsbad

twinning. Basaltic andesites: The texture in these rocks consists of porphyritic to glomeroporphyritic generally and in some cases hyalo-porphyritic to microlithic. The main minerals of these rocks are plagioclase phenocrysts and pyroxene microcrystals. Plagioclase phenocrysts are formed 40 to 70% of the rocks. Plagioclases are generally zoned and mainly altered to Sosoritic assemblage. Burned rims of hornblende microcrystals indicate high oxygen fugacity and high temperature of the petrogenesis evolution. The results of whole rock chemistry analysis for example in the AFM diagram revealed calc-alkaline for the nature of these volcanic rocks. More interpretations clear that all the samples were categorized as high potassium calc-alkaline complex. The spider diagrams established by the trace elements normalized with chondrite and primary mantle show the enrichment of LREE compared to HREE and also the enrichment of Cs, Nd, U, Sr, and Pb. These signs besides the depletion of Ti, Zr, and Nb confirm the subduction zone magmatism for the petrogenesis of this volcanic succession. The negative anomaly of Ti, Nb, and P are related to the crystallization of Rutile, Titanomagnetite, and Apatite (Regan and Gill, 1989) and also contamination of the magma with crustal materials during ascension (Zhou et al., 2009) in addition to the replacement of the magma in the zone of Subduction. The geochemical data of the studied samples show that the magmatism event of Mokhtaran Plain is related to the subduction arc. The primary magma for the mentioned volcanism shows the character special for mantle array that has been contaminated and metasomatized at the origin or during the transformation and evolution when magma ascension. Therefore, the metasomatized mantle is a suitable source for the Mokhtaran magmatism and the ratio of La/Sm, 3.89 to 6.07 is a considerable sign for crustal contamination.

Conclusions

The volcanic cones of the Mokhtaran plain are a variety of andesites, basaltic andesite, and trackyandesite. The main mineral assembly of these rocks consists of plagioclase, pyroxene, hornblende, and olivine. Biotite, opaque, iron, and titanium oxides and glass are the secondary rock-forming phases. Their main textures are porphyritic and the depletion of HREE and enrichment of LREE in their compositions pointed to the existence of garnet residual in their magmatic source and also pyroxene and plagioclase fractional crystallization process in their petrogenetic evolution. Mokhtaran Magmatic source is formed in a subduction zone related to the active continental margins. Geochemical evidences also propose a metasomatized lithospheric mantle wedge which was affected by the subducting plate. The parental melt of the studied volcanic rocks was formed by melting at a depth lower than 50 km.