

## ژئوشیمی و کانی‌شناسی گدازه‌های بازیک زئولیت‌دار محدوده بومهن - رودهن، شرق تهران

امیرعلی طبخ شعبانی\*، مرتضی دلاوری کوشان و مهسا حاجی عبدالرحیم خباز

گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۴

### چکیده

شمال شرق تهران در محدوده بومهن و رودهن سنگ‌هایی با ترکیب الیوین بازالت در بین سازند کرج برونزد دارند که در حفرات و شکستگی‌های آن کانی‌های زئولیت فیبری شکل تشکیل شده است. بنابراین سن این سنگ‌ها، ائوسن میانی تا بالایی در نظر گرفته می‌شود. این سنگ‌ها دارای بافت‌های هیالو میکروولیتی پورفیری و گلوپورپورفیری هستند که درشت‌بلورهای آن را پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و الیوین ایدنگستی شده تشکیل می‌دهد. نتایج آنالیز الکترون میکروپروب فنو کریست‌های پلاژیوکلاز ترکیب لابرادوریت تا بیتونیت و پیروکسن ترکیب اوژیت - دیوپسید را نشان می‌دهد. دمای تبلور پیروکسن‌ها بین ۱۱۵۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار تبلور بین ۳ تا ۸ کیلوبار تخمین زده می‌شود. این سنگ‌ها در نمودارهای تعیین دسته ماگمایی در دسته آلکالن و در نمودارهای تعیین محیط تکتونوماگمایی در جایگاه بازالتهای کمان قاره‌ای قرار می‌گیرند. نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب که نسبت به گوشته اولیه به‌هنجار شده، غنی‌شدگی عناصر LILE همچون K و Rb و تهی‌شدگی عناصر HFSE همچون Nb و Hf را نشان می‌دهند. غنی‌شدگی از LILE و تهی‌شدگی از HFSE از ویژگی‌های مذاب‌های کمان‌های آتشفشانی است. همچنین مشابهت الگوی نمودار عنکبوتی این سنگ‌ها با آندزیت‌های بازالتی آند نشانه ماگماتیسیم زون‌های فروآنشی است. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها نیز مشابه پیروکسن‌های محیط کمان آتشفشانی است.

**واژه‌های کلیدی:** الیوین بازالت، آلکالن، کمان ماگمایی، بومهن - رودهن، البرز مرکزی

### مقدمه

اسیدی تا بازیک را نشان می‌دهند. بر پایه شواهد صحرایی و فسیل‌شناختی، سنگ‌های آذرین این محدوده در سه گروه سنی قرار می‌گیرند. گدازه‌های قبل از ائوسن میانی، گدازه‌های بین لایه‌ای با سازند کرج (ائوسن میانی) و سنگ‌های نیمه عمیق و گدازه‌های پس از ائوسن میانی. سنگ‌های نیمه عمیق و گدازه‌های پس از ائوسن در دو گروه آلکالن و کالک آلکالن قرار می‌گیرند؛ در حالی که گدازه‌های بین لایه‌ای با سازند کرج با داشتن آلکالینیت بالا از دو گروه یادشده متمایز می‌شوند.

در شمال شرق تهران در محدوده شهرستان‌های بومهن - رودهن سنگ‌های آذرین تیره‌رنگی برونزد دارد که ویژگی بارز آنها حضور کانی‌های ثانوی زئولیت در حفرات و شکستگی‌های آنهاست. بنابر بررسی‌های محمودی (Mahmoodi, 2000) سنگ‌های آذرین محدوده رودهن به دو صورت نیمه عمیق (دایک، سیل) و گدازه برونزد دارند. سنگ‌های نیمه عمیق عموماً از نوع دیاباز هستند؛ ولی گدازه‌ها طیف پیوسته‌ای از

محمودی (Mahmoodi, 2000) به شباهت ژئوشیمی این سنگ‌ها با سنگ‌های مناطق جزایر قوسی و حاشیه فعال قاره‌ها اشاره کرده است، اگرچه داده‌های ژئوشیمیایی لازم برای تشخیص و تبیین محیط زمین‌ساخت این بازالت‌ها را در اختیار نداشته است. با توجه به نبود داده‌های ژئوشیمی عناصر کمیاب و کانی‌شناختی سنگ‌های آتشفشانی در این بخش از البرز میانی، این پژوهش تنها گدازه‌های بازیک پس از ائوسن میانی را که در حفرات و شکستگی‌های آنها کانی‌های زئولیت در شرایط هیدروترمال تشکیل شده است، مورد ارزیابی قرار می‌دهد. بنابراین در این پژوهش، سعی شده است ویژگی‌های سنگ‌شناختی، ژئوشیمی سنگ کل و شیمی کانی‌ها به‌منظور درک بیشتر پتروژنز و محیط زمین‌ساخت گدازه‌های بازیک در این بخش از البرز مرکزی مورد بررسی قرار گیرد. بررسی کانی‌شناسی زئولیت‌ها و نحوه تشکیل آنها موضوع این پژوهش نیست و جداگانه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

### زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی

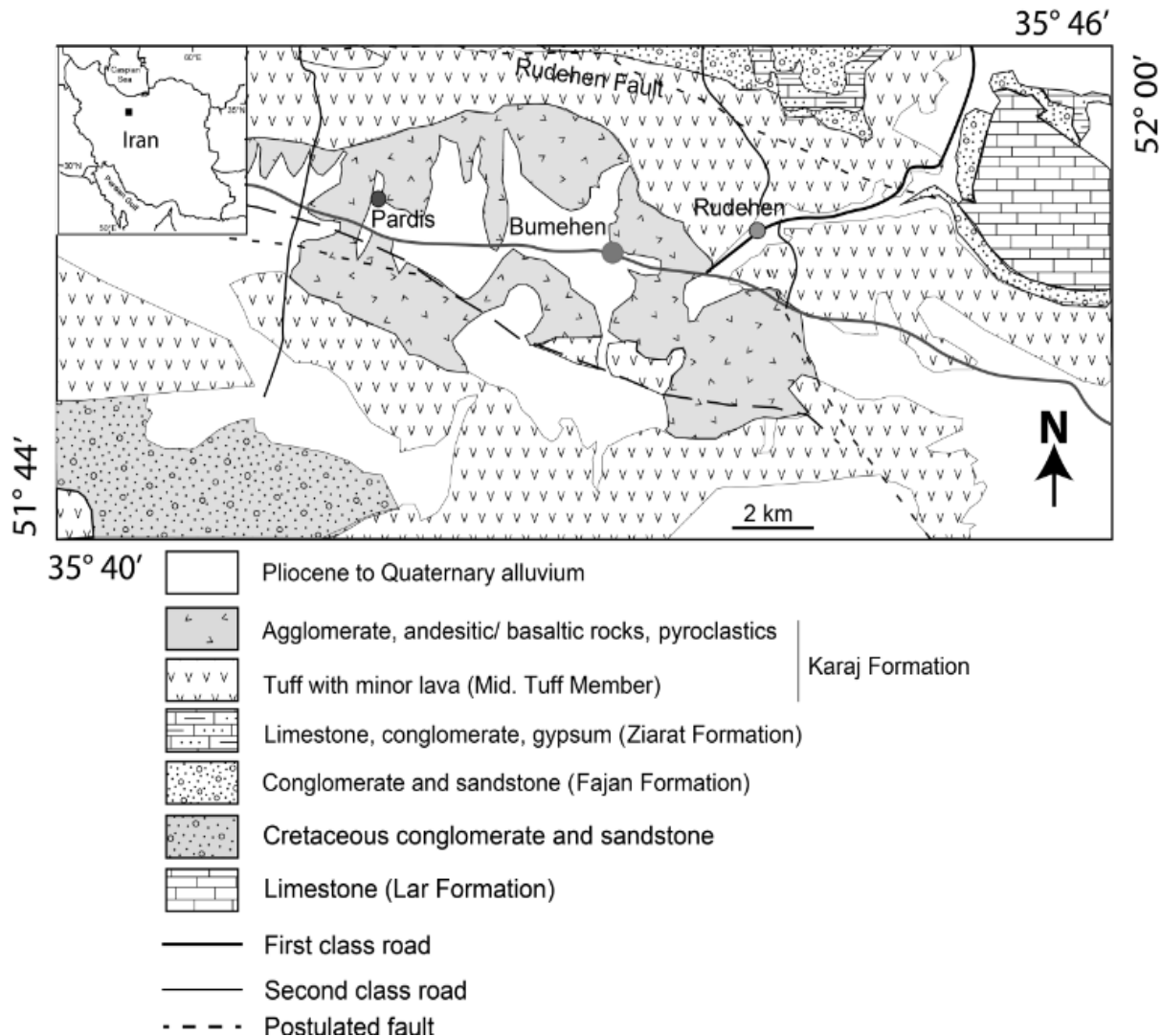
منطقه مورد بررسی در محدوده طول جغرافیایی  $51^{\circ}44'$  تا  $52^{\circ}$  خاوری و عرض جغرافیایی  $35^{\circ}40'$  تا  $35^{\circ}46'$  شمالی و در خاور ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ شرق تهران (Vahdati Daneshmand, 1997) در حد فاصل شهرستان‌های بومهن و رودهن واقع شده است (شکل ۱). این منطقه از لحاظ زون ساختاری، جزو زون البرز مرکزی محسوب شده و در کوه پایه‌های جنوبی البرز قرار گرفته است. قدیمی‌ترین واحد چینه‌شناسی منطقه، سازند فجن به سن پالئوسن است که عمدتاً از کنگلومرا و ماسه‌سنگ قرمز تشکیل شده، سپس واحدهای مربوط به ائوسن رخنمون دارند که شامل توف سبز، شیل توفی، توف-برش و نیز آگلومرا و سنگ‌های آندزیتی-بازالتی است. این واحدها جزئی از سازند کرج است که در جاهایی ضخامت آن به ۱۷۰۰ تا ۲۰۰۰ متر نیز می‌رسد. واحدهای لیتولوژیکی سازند کرج غالباً در هسته ناودیس‌ها ظاهر می‌شوند. واحدهای ائوسن منطقه مورد بررسی اغلب از نهشته‌های کم‌ویش مشابه عضو توف میانی سازند کرج تشکیل شده است (Dedual, 1967; Vahdati

Daneshmand, 1997). جوانترین بخش سازند کرج در محدوده مورد بررسی شامل سنگ‌های آندزیتی-بازالتی، آگلومرا، توف و توفیت است که به صورت یک ناودیس از رودهن تا شرق جاجرود بر روی واحدهای ائوسن میانی قرار گرفته‌اند و از نظر زمانی قابل مقایسه با عضو توف بالای سازند کرج است. واحد سنگی مورد پژوهش نیز بخشی از واحدهای سازند کرج بوده است که روابط چینه‌شناختی آنها سن جوانتر از ائوسن میانی را پیشنهاد می‌کند (Vahdati Daneshmand, 1997). گسل رودهن با امتداد تقریبی شرقی-غربی و شیب تند به سمت شمال کم‌ویش مشابه گسل شمال تهران است. به‌علاوه چین‌خوردگی‌های گسترده‌ای در منطقه وجود دارد که شاخص‌ترین آنها تاقدیس آبناک و ناودیس چهل-چشمه-تیزکوه است که طول چند ده کیلومتری دارند. ناودیس بومهن و درندک نیز از جمله موارد فرعی‌تر هستند.

### روش مطالعه

از گدازه‌های بازیک مورد بحث حدود ۴۵ نمونه جمع‌آوری شد. از این تعداد با توجه به شباهت ظاهری برای بررسی میکروسکوپی ۳۲ نمونه مقطع نازک تهیه شد. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری با توجه به آلتراسیون و هوازدگی فراگیر، تنها ۴ نمونه دارای کمترین میزان دگرسانی برای تجزیه شیمیایی انتخاب شد. تجزیه شیمیایی سنگ کل نمونه‌ها به روش‌های ICP-OES و XRF در شرکت زرآزما انجام شد که نتایج آن در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

آنالیز شیمیایی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن با طیف‌سنجی XRF-WD با به‌کارگیری الکترون میکروپروب مدل Cameca SX100 در دانشگاه لاس‌پینزا-ایتالیا برای ۱۱ عنصر (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Cl, F) بر روی مقاطع نازک صیقلی سنگ به‌دست آمد. ولتاژ به‌کار رفته ۱۵kV و شدت جریان پروب ۲۰nA بود. ترکیب شیمیایی کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن مورد بررسی به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ همراه با فرمول ساختاری بر پایه ۸ اتم اکسیژن برای پلاژیوکلاز و ۶ اتم اکسیژن برای پیروکسن آمده است.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده بومهن - رودهن (رسم مجدد از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شرق تهران، (Vahdati Daneshmand, 1997)

**Fig. 1.** Simplified geological map of the Boumehen-Roudehen are (redrawn from the geological map of the east of Tehran, 1/100000) (Vahdati Daneshmand 1997)

دارای بافت پورفیری، گلومروپورفیری و میکرولیتی پورفیری هستند. فنوکریست‌های شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار کلینوپروکسن، پلاژیوکلاز، الیون‌های ایدنگسیتی شده و مگنتیت در زمینه شیشه‌ای حاوی میکرولیت‌های پلاژیوکلاز و کلینوپروکسن پراکنده شده‌اند. کانی‌های ثانوی نظیر کلریت، کلسیت، زئولیت در حفرات و زمینه سنگ دیده می‌شود (شکل ۳-A و B). بر پایه بررسی پتروگرافی و با توجه به ترکیب کانی‌شناسی، این سنگ‌ها الیون بازال هستند.

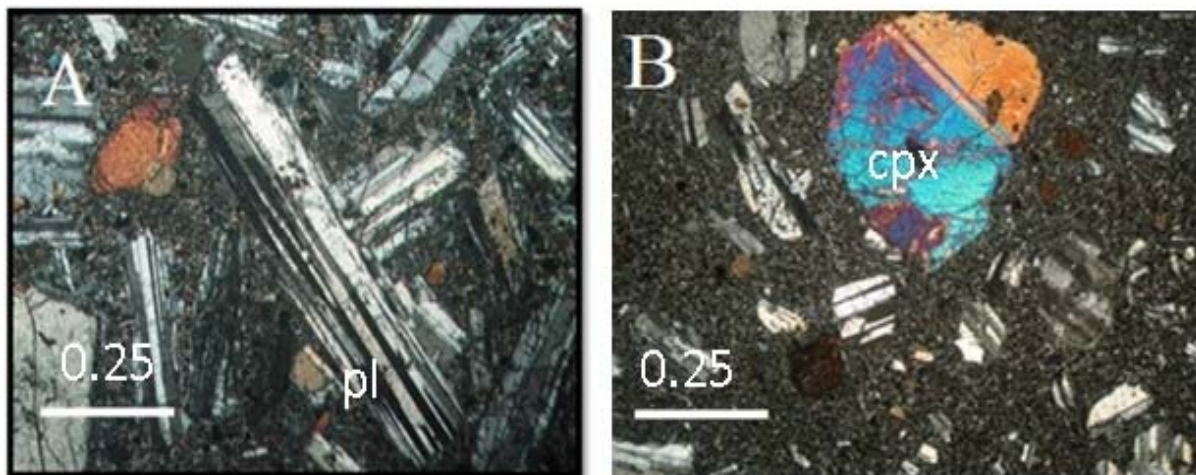
## بحث و بررسی پتروگرافی

در محدوده شهرستانهای بومهن - رودهن سنگ‌های آذرین تیره‌رنگی برون‌زد دارند که فرسایش پوست پیزی را به نمایش می‌گذارند و ویژگی بارز آنها حضور کانی‌های ثانوی سفیدرنگ زئولیت فیبری در حفرات و شکستگی‌های آنهاست که بافت آمیگدالی را ایجاد کرده است (شکل ۲). این سنگ‌ها در نمونه دستی دارای رنگ تیره و در بررسی میکروسکوپی



شکل ۲. تصویر صحرایی از یک برون‌زد از بازالت‌های محدوده بومهن- رودهن که حفرات و شکستگی‌ها با کانی‌های ثانوی سفیدرنگ زئولیت پر شده و بافت آمیگدالی ایجاد شده است.

**Fig. 2.** Field picture of an outcrop of basalts from Boumehen-Roudehen area in which their vesicles and fractures filled by secondary white zeolite forming amygdaloidal texture.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی در نور پلاریزه متقاطع از بازالت‌های کمتر دگرسان‌شده بومهن- رودهن A: فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در یک زمینه شیشه‌ای و B: بلورهای قهوه‌ای رنگ الیوین ایدنگسیتی‌شده، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در زمینه شیشه بافت هیالومیکرولیتی پرفیری را به‌نمایش می‌گذارند. (Whitney and Evans 2010) pl: plagioclase و cpx: clinopyroxene

**Fig. 3.** Microscopic pictures of less altered basalts in XPL from Boumehen-Roudehen area showing A: plagioclase and clinopyroxene phenocrysts in a glassy matrix, and B: Brown colored crystals of iddingsitized olivine, clinopyroxene and plagioclase in a glassy matrix display hyalo-microlitic porphyry texture.

cpx: clinopyroxene pl: plagioclase (Whitney and Evans, 2010)

ساختاری براساس ۸ اتم اکسیژن در جدول ۳ آمده است. ترکیب این پلاژیوکلازها در نمودار مثالی Ab- An- Or (شکل ۴) در محدوده لابرادوریت و بیتونیت قرار گرفته‌اند.

### شیمی کانی‌ها

نتایج حاصل از آنالیز نقطه‌ای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در گدازه‌های بازیک منطقه بومهن- رودهن همراه با محاسبه فرمول

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی (برحسب درصد وزنی) به روش XRF همراه با محاسبه کانی‌های نورماتیو CIPW نمونه‌های بازالت محدوده بومهن و رودهن. مقادیر آهن فریک با استفاده از رابطه  $(Fe_2O_3=TiO_2+1.5)$  محاسبه شده است (Irvine and Baragar, 1971).

**Table 1.** Chemical analyses of major oxides (in terms of wt%) through XRF techniques along with calculated CIPW normative minerals for the basalt samples from Boumehen-Roudehen area. Ferric contents are calculated using Irvine and Baragar (1971) equation  $(Fe_2O_3=TiO_2+1.5)$ .

Sample	BR-14	BR-33	BR-35	BR-41
SiO <sub>2</sub>	47.36	47.08	47.2	47.47
TiO <sub>2</sub>	1.14	1.10	1.11	1.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.19	16.7	15.89	16.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.64	2.60	2.61	2.74
FeO	6.61	7.25	6.90	6.68
MnO	0.16	0.19	0.18	0.17
MgO	4.55	7.00	7.24	7.13
CaO	11.4	10.56	10.3	10.43
Na <sub>2</sub> O	2.68	2.52	2.78	2.64
K <sub>2</sub> O	1.76	1.70	1.97	1.69
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.28	0.27	0.31	0.33
LOI	2.44	2.18	2.65	2.63
Total	99.21	99.15	99.14	99.16
CIPW normative minerals (wt%)				
Plagioclase	56.25	51.68	49.36	52.09
Orthoclase	10.99	10.64	11.23	10.58
Nepheline	1.02	0.94	1.51	0
Diopside	19.03	19.5	19.97	19.27
Hypersthene	0	0	0	0.36
Olivine	6.17	11.15	11.27	10.77
Ilmenite	2.28	2.2	2.24	2.49
Magnetite	3.57	3.81	3.68	3.64
Apatite	0.7	0.07	0.76	0.81

همچنین نتایج حاصل از آنالیز نقطه‌ای کانی پیروکسن موجود در گدازه‌های بازیک بومهن - رودهن همراه با فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن در جدول ۴ آمده است. در نمودار مثلثی En- Fs- Wo (شکل ۵) ترکیب درشت‌بلورهای پیروکسن سنگ‌های بازالتی بومهن - رودهن در محدوده دیوپسید تا اوژیت قرار گرفته‌اند.

همچنین نتایج حاصل از آنالیز نقطه‌ای کانی پیروکسن موجود در گدازه‌های بازیک بومهن - رودهن همراه با فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن در جدول ۴ آمده است. در نمودار مثلثی

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب (برحسب ppm) به روش ICP-OES نمونه‌های بازالت محدوده بومهن و رودهن

**Table 2.** Chemical analyses of trace elements (in terms of ppm) by ICP-OES technique for the basalt samples from Boumehen-Roudehen area

Sample	BR-14	BR-33	BR-35	BR-41
Zr	65	66	71	82
Nb	5.3	4.9	5.2	6.3
Sn	1.3	1.3	1.3	1.4
Cs	0.5	0.5	0.8	0.5
Ba	444	350	377	380
Hf	1.4	1.48	1.5	1.82
W	20.5	20.5	20.5	20.5
Th	2.6	2.33	2.54	2.5
U	0.9	0.7	0.7	0.7
La	12	13	14	15
Ce	25	26	27	31
Pr	3.85	4.05	4.12	4.61
Sm	3.4	3.31	3.33	3.7
Eu	1.23	1.16	1.22	1.32
Gd	2.91	2.83	2.77	3.27
Tb	0.4	0.4	0.38	0.42
Dy	3.04	2.98	2.79	3.14
Er	2.93	2.88	2.82	3.18
Tm	0.26	0.26	0.24	0.26
Yb	1.5	1.5	1.4	1.6
Lu	0.25	0.24	0.24	0.26
(La/Yb)N	5.74	35.86	41.84	41.38
(La/Sm)N	2.28	2.54	2.71	2.62
(Sm/Yb)N	2.52	14.15	15.42	15.81
Eu/Eu*	1.20	1.16	1.23	1.16

و فرعی کلینوپیروکسن برای تمایز محیط‌های زمین‌ساختی بازالت‌ها طراحی شده است (Nisbet and Pearce, 1977)، ترکیب کانی‌ها در قلمرو بازالت‌های کمان آتشفشانی قرار می‌گیرند (شکل ۶-B). این نمودار قادر به تمایز بازالت‌های کمان آتشفشانی (VAB)<sup>۱</sup> و محیط‌های زمین‌ساختی مختلف نظیر بازالت‌های تولیتی درون صفحه‌ای (WPT)<sup>۲</sup>، بازالت‌های بستر اقیانوسی (OFB)<sup>۳</sup> و بازالت‌های آلکالن درون صفحه‌ای (WPA)<sup>۴</sup> است.

از آن‌جا که کلینوپیروکسن کانی پتروژنتیک مهمی بوده که در مقابل دگرسانی نیز نسبتاً مقاوم است؛ بنابراین، ترکیب شیمیایی این کانی برای دریافت دسته ماگمایی و محیط زمین‌ساختی ماگمای سازنده استفاده شده است (Leterrier et al., 1982). بررسی ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌های موجود در بازالت‌های بومهن-رودهن نشان می‌دهد که آنها به دسته ماگمایی ساب‌آلکالن و آلکالن تعلق دارند (شکل ۶-A). در نمودار F1-F2 که بر پایه ترکیب تمام اکسید عناصر اصلی

1. Volcanic arc basalts
2. Within plate tholiite
3. Ocean floor basalts
4. Within plate alkali basalts

جدول ۳. ترکیب شیمیایی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز موجود در گدازه‌های بازیک بومهن-رودهن و محاسبه فرمول ساختاری بر پایه ۸ اتم اکسیژن

**Table 3.** Chemical composition of plagioclase phenocrysts from Boumehen-Roudehen basic volcanic rocks and their structural formulas based on 8 oxygen atoms

Point analysis	4-3-1	4-4-1	4-3-2	4-4-2	6-2-1a	6-2-1b	6-2-1d	6-2-1e
SiO <sub>2</sub>	46.14	49.13	45.84	48.29	48.82	52.69	48.01	48.81
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.04	0.00	0.09	0.02	0.01	0.03	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.64	31.65	34.01	32.43	32.45	28.91	32.26	31.96
FeO*	0.60	0.61	0.53	0.56	0.60	0.27	0.50	0.61
MnO	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.05	0.03	0.06
MgO	0.07	0.07	0.07	0.09	0.08	0.05	0.10	0.08
CaO	17.88	15.66	18.19	15.91	15.81	13.49	16.89	16.58
BaO	0.05	0.00	0.02	0.03	0.00	0.11	0.04	0.00
Na <sub>2</sub> O	1.44	2.75	1.26	2.44	2.48	3.62	2.05	2.22
K <sub>2</sub> O	0.08	0.19	0.07	0.18	0.19	0.53	0.14	0.18
Total	99.98	100.12	100.01	100.02	100.47	99.73	100.04	100.52
Si	2.13	2.24	2.11	2.21	2.23	2.41	2.20	2.23
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.83	1.70	1.85	1.75	1.74	1.56	1.75	1.72
Fe <sup>2+</sup>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
Ca	0.88	0.77	0.90	0.78	0.77	0.66	0.83	0.81
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.13	0.24	0.11	0.22	0.22	0.32	0.18	0.20
K	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
An%	86.87	75.10	88.47	77.47	77.05	65.25	81.36	79.70
Ab%	12.65	23.82	11.12	21.51	21.86	31.67	17.86	19.27
Or%	0.47	1.07	0.41	1.01	1.09	3.08	0.77	1.03

ادامه جدول ۳. ترکیب شیمیایی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز موجود در گدازه‌های بازیک بومهن- روده‌هن و محاسبه فرمول ساختاری بر پایه ۸ اتم اکسیژن

**Table 3 (Continued).** Chemical composition of plagioclase phenocrysts from Boumehen-Roudehen basic volcanic rocks and their structural formulas based on 8 oxygen atoms

Point analysis	6-4-1	6-4-1	6-6-1	6-8-1a	6-8-1b	11-4-1	13-5-1	13-5-2
SiO <sub>2</sub>	45.82	47.56	46.98	46.53	46.68	51.12	53.04	51.87
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.04	0.06	0.04	0.00	0.08	0.07	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.83	32.95	33.17	34.01	33.48	29.89	29.12	29.42
FeO*	0.56	0.55	0.57	0.52	0.54	1.15	0.86	0.81
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
MgO	0.08	0.07	0.07	0.07	0.05	0.13	0.16	0.16
CaO	18.08	17.12	17.63	17.47	17.51	14.00	12.29	13.42
BaO	0.04	0.00	0.00	0.03	0.05	0.00	0.03	0.07
Na <sub>2</sub> O	1.29	1.75	1.68	1.61	1.72	3.26	4.11	3.69
K <sub>2</sub> O	0.08	0.15	0.10	0.11	0.12	0.50	0.75	0.53
Total	99.84	100.18	100.26	100.37	100.16	100.11	100.43	100.03
Si	2.12	2.18	2.16	2.13	2.14	2.33	2.40	2.36
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.84	1.78	1.79	1.84	1.81	1.61	1.55	1.58
Fe <sup>2+</sup>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Ca	0.89	0.84	0.87	0.86	0.86	0.68	0.60	0.65
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.12	0.16	0.15	0.14	0.15	0.29	0.36	0.33
K	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03
An%	88.15	83.67	84.78	85.15	84.36	68.35	59.56	64.72
Ab%	11.38	15.45	14.64	14.23	14.95	28.77	36.09	32.23
Or%	0.47	0.87	0.58	0.62	0.69	2.88	4.35	3.06

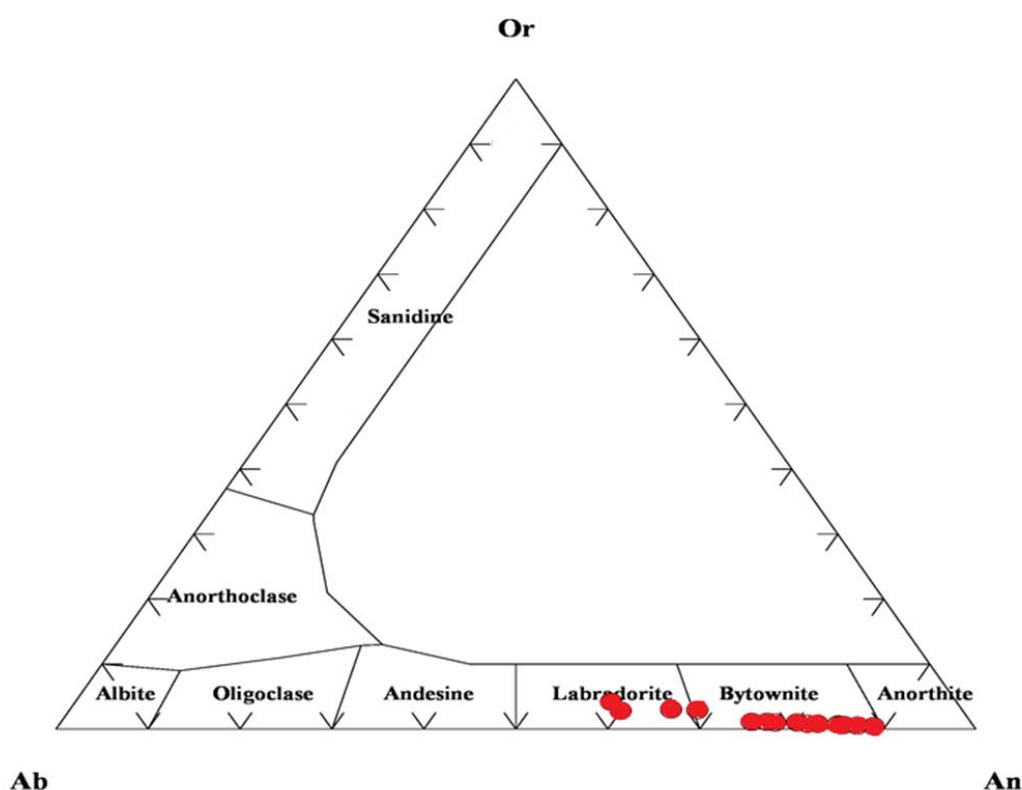
۷۲ تا ۸۲ دارند که نشانه تشکیل آنها در فشار نسبتاً پایین است. در نمودار 2Ti+Alvi+Cr در برابر Na+Aliv (شکل ۷) که تابعی از میزان آهن فریک پیروکسن هاست، می‌توان فوگاسیته اکسیژن را به‌طور کیفی برآورد کرد (Schweitzer et al.,

نتایج بررسی‌ها نشان داده است که کلینوپیروکسن‌های اولیه‌ای که از یک ماگمای بازیک در فشار پایین متبلور می‌شوند، اغلب عدد منیزیم کمتر از ۸۴ دارند (Parlak et al., 2001). عدد منیزیم نمونه‌های کلینوپیروکسن این بررسی محدوده‌ای بین



شکل‌های (A-۸ و B) دیده می‌شود پیروکسن‌ها در دو محدوده دمایی و فشار واقع شده‌اند. یک دسته مربوط به آنالیزهای حاشیه پیروکسن است که آلومینیم پایین (۱/۷ تا ۳/۳ درصد وزنی) دارند (جدول ۳) و دمایی کمتر از ۱۱۵۰ تا حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار تبلور ۳ تا ۵ کیلوبار را نشان می‌دهند و دسته دیگر آنالیزهای نقاط میانی و مرکزی پیروکسن هستند که آلومینیم به نسبت بالاتری (۴/۹ تا ۵/۷ درصد وزنی) دارند و دمایی بالاتر (۱۲۰۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) و فشار تبلور بیشتری (۶ تا ۸ کیلوبار) نشان می‌دهند.

1978). چنان که مشاهده می‌شود، تمام نمونه‌های پیروکسن بالای خط  $Fe^{3+}=0$  قرار گرفته‌اند که بیانگر تبلور آنها در فوگاسیته اکسیژن نسبتاً بالاست. بر اساس مؤلفه‌های XPT در برابر YPT می‌توان دما و فشار در زمان تبلور کلینوپیروکسن‌ها را برآورد کرد (Soesoo, 1997). بنابراین بر پایه این روش، دمایی تشکیل کلینوپیروکسن‌ها بین ۱۱۵۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود (شکل A-۸). برای تعیین فشار با استفاده از همین مؤلفه‌ها در نمودار XPT در برابر YPT میزان فشار تبلور کلینوپیروکسن‌ها ۳ تا ۸ کیلوبار تخمین زده می‌شود (شکل B-۸). چنان که در هر یک از



شکل ۴. نمودار مثلی دسته‌بندی فلدسپارها طیف ترکیبی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در گدازه‌های بازیک منطقه بومهن- رودهن را نشان می‌دهد (Deer et al., 1992).

**Fig. 4.** Ternary classification of feldspars displays the composition of plagioclase phenocrysts from Boumehen-Roudehen basic volcanic rocks (Deer et al., 1992).

کمتر از ۱ درصد وزنی است (۴۷/۰۸ تا ۴۷/۴۷). میزان  $TiO_2$  بالاتر از ۱ درصد وزنی بوده و تغییرات آن بین ۱/۱ تا ۱/۲۴ درصد وزنی است (جدول ۱). این عنصر به‌عنوان مؤلفه‌ای مهم

### ژئوشیمی سنگ کل

سنگ‌های مورد بررسی از نظر میزان سیلیس تغییرات ژئوشیمیایی گسترده‌ای نشان نمی‌دهند؛ به‌طوری‌که طیف آن

$K_2O$  (۱/۶۹ تا ۱/۹۷ درصد وزنی) نیز نسبتاً بالاست که از این نظر نمونه‌ها در قلمرو دسته آلکالن قرار می‌گیرند (شکل ۹-۱). در نمودار  $K_2O-SiO_2$  نیز مقدار پتاسیم نمونه‌ها بالاتر از محدوده کالک آلکالن پتاسیم بالا بوده است و در محدوده دسته شوشونیتی قرار می‌گیرند (شکل ۹-۲).

در شناسایی جایگاه زمین‌ساختی بازالت‌ها استفاده می‌شود و مقدار آن از کمان‌های ماگمایی به سمت مناطق کافتی و درون ورقه‌ای افزایش می‌یابد (Rollinson, 1993). میزان  $Al_2O_3$  و  $MgO$  طیف گسترده‌تری نشان می‌دهد که به ترتیب بین ۱۵/۸۹ تا ۱۸/۱۹ و ۴/۵۵ تا ۷/۲۴ درصد وزنی تغییر می‌کند. در نمونه‌های منطقه میزان  $Na_2O$  (۲/۵۲ تا ۲/۷۸ درصد وزنی) و

جدول ۴. ترکیب شیمیایی درشت‌بلورهای پیروکسن در گدازه‌های بازالتی بومهن- رودهن و فرمول ساختاری بر پایه ۶ اتم اکسیژن

**Table 4.** Chemical composition of pyroxene phenocrysts from Boumehen-Roudehen basic volcanic rocks and their structural formulas based on 6 oxygen atoms

oxides	11-2-rim	11-4-1core	11-4-2core	11-4-1mid	11-4-2mid	11-4-1rim	11-4-2rim
$SiO_2$	51.40	49.94	49.16	49.98	50.28	51.78	51.81
$TiO_2$	0.76	0.86	0.96	0.63	0.82	0.90	0.86
$Al_2O_3$	2.43	5.55	5.93	5.34	5.77	2.90	2.75
$FeO^*$	8.40	6.09	6.36	5.71	5.95	8.57	8.97
$MnO$	0.31	0.14	0.17	0.16	0.11	0.19	0.30
$MgO$	14.69	14.67	14.32	14.82	14.27	14.61	14.29
$CaO$	21.44	23.00	22.93	23.39	23.26	21.59	21.51
$Na_2O$	0.29	0.27	0.34	0.25	0.31	0.27	0.30
Total	99.71	100.52	100.18	100.29	100.77	100.82	100.79
Z site							
Si	1.91	1.83	1.81	1.83	1.84	1.91	1.91
Al	0.09	0.17	0.19	0.17	0.16	0.09	0.09
M1 site							
Ti	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
$Fe^{3+}$	0.05	0.08	0.10	0.09	0.06	0.03	0.03
Al	0.02	0.07	0.06	0.06	0.08	0.03	0.03
$Fe^{2+}$	0.19	0.10	0.08	0.08	0.11	0.21	0.22
Mg	0.72	0.73	0.72	0.75	0.72	0.71	0.70
M2 site							
$Fe^{2+}$	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
Mg	0.09	0.07	0.06	0.05	0.06	0.10	0.09
Mn	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
Ca	0.85	0.90	0.90	0.92	0.91	0.85	0.85
Na	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg/Mg+Fe	0.76	0.81	0.80	0.82	0.81	0.75	0.74

ادامه جدول ۴. ترکیب شیمیایی درشت‌بلورهای پیروکسن در گدازه‌های بازالتی بومهن-رودهن و فرمول ساختاری بر پایه ۶ اتم اکسیژن

**Table 4 (Continued).** Chemical composition of pyroxene phenocrysts from Boumehen-Roudehen basic volcanic rocks and their structural formulas based on 6 oxygen atoms

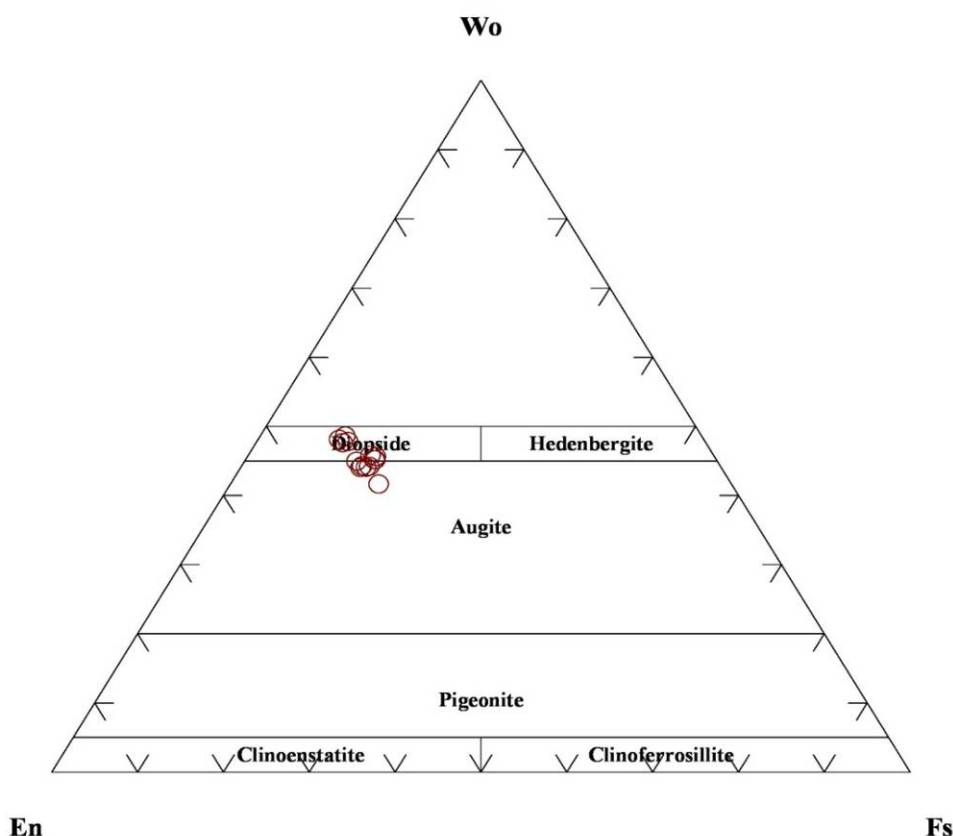
oxides	13-5-1mid	13-5-2core	6-1-1a core	6-1-1b core	6-1-1c core	6-1-1d mid	6-2-1 rim
SiO <sub>2</sub>	50.34	49.34	48.24	48.17	48.22	48.29	50.75
TiO <sub>2</sub>	0.88	0.93	1.39	1.38	1.40	1.20	0.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.30	5.69	5.58	5.51	5.65	4.92	2.74
FeO*	8.99	7.84	8.87	9.02	9.03	8.48	9.12
MnO	0.22	0.13	0.29	0.24	0.21	0.30	0.47
MgO	14.61	14.40	13.54	13.75	13.62	13.83	14.66
CaO	21.69	21.44	21.78	21.72	21.57	22.09	20.68
Na <sub>2</sub> O	0.31	0.36	0.43	0.47	0.41	0.40	0.35
Total	100.34	100.13	100.12	100.25	100.11	99.50	99.62
Z site							
Si	1.86	1.82	1.79	1.78	1.79	1.80	1.89
Al	0.14	0.18	0.21	0.22	0.21	0.20	0.11
M1 site							
Ti	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02
Fe <sup>3+</sup>	0.11	0.09	0.13	0.15	0.13	0.15	0.07
Al	0.00	0.07	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01
Fe <sup>2+</sup>	0.15	0.13	0.13	0.11	0.13	0.11	0.18
Mg	0.71	0.69	0.67	0.67	0.66	0.70	0.71
M2 site							
Fe <sup>2+</sup>	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03
Mg	0.09	0.10	0.08	0.08	0.09	0.07	0.11
Mn	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.86	0.85	0.87	0.86	0.86	0.88	0.83
Na	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Mg/Mg+Fe	0.74	0.77	0.73	0.73	0.73	0.74	0.74

محاسبه نرم CIPW نمونه‌های مورد بررسی نشان از زیر اشباع بودن بازالت‌های مورد بررسی با حضور الیوین و نفلین

نورماتیو (کمتر از ۱/۵ درصد وزنی) در ترکیبشان دارند (جدول ۱). معین وزیری (Moinvaziri, 2010) بازالت‌های آلکالن را

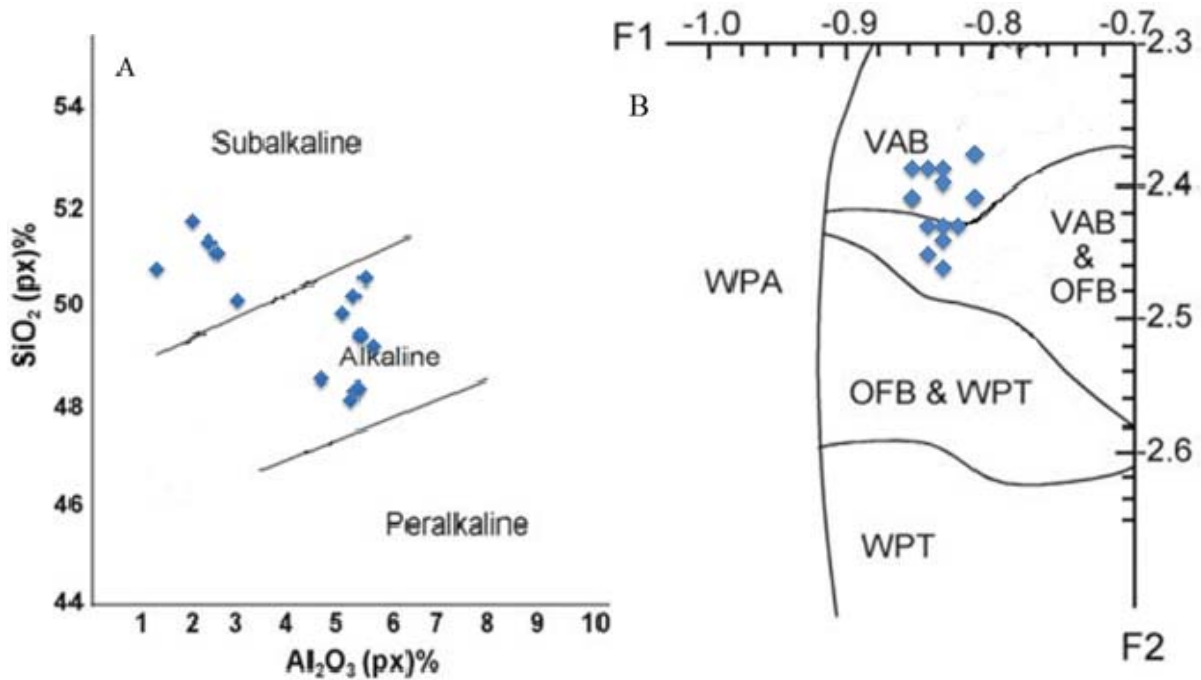
(الیوین + ارتوپروکسن + کلینوپروکسن ± گارنت ± اسپینل) دارای نسبت  $Mg/(Mg+Fe) > 0.7$ ، Ni بیشتر از ۴۰۰ تا ۵۰۰ ppm و Cr بالاتر از ۱۰۰۰ ppm هستند و مقدار سیلیس آنها کمتر از ۵۰ درصد وزنی است (Wilson, 1989). مقادیر نسبت  $Mg/(Mg+Fe)$  نمونه‌های مورد بررسی از ۰/۵۵ تا ۰/۶۵ و مقدار Ni ۲۴ تا ۵۸ ppm و Cr ۵۷ تا ۲۰۳ ppm هستند و مقدار سیلیس آنها حدود ۴۷ درصد وزنی است. لذا، به نظر می‌رسد که نمونه‌های بازالتی منطقه نسبت به یک مذاب بازالتی اولیه متعادل با ترکیب گوشته‌ای اختلاف آشکاری دارد. این ویژگی را می‌توان با تبلور تفریقی نسبتاً زیاد کانی‌هایی مانند الیوین و کلینوپروکسن در حین صعود و رسیدن مذاب به سطح زمین توجیه کرد.

از نظر درصد سیلیس به دو دسته بسیار فقیر از سیلیس که درصد نفلین نورماتیو آنها بیش از ۵٪ وزنی و بازالت‌های آلکالن کمتر فقیر از سیلیس که مقدار درصد نفلین نورماتیو آنها کمتر از ۵٪ است، دسته‌بندی می‌کند. بنابراین، با توجه به مقادیر نفلین نورماتیو کم و این که کلینوپروکسن این سنگ‌ها تیتان اوژیت نیست (جدول ۴)، نمی‌توان آنها را آلکالی الیوین بازالت تیپیک محسوب کرد. آلکالی بازالت‌های مورد بررسی از نظر نسبت  $K_2O/Na_2O$  از ۰/۶۴ تا ۰/۷۱ تغییر می‌کند، بنابراین در دسته سدیک قرار می‌گیرند و مقدار آلومین آنها از ۱۵/۹ تا ۱۸/۲ درصد وزنی تغییر می‌کند و از این جهت شبیه بازالت‌های ساب‌آلکالن جزایر کمانی است. مذاب‌های بازالتی در تعادل با ترکیب کانی‌شناسی گوشته بالایی



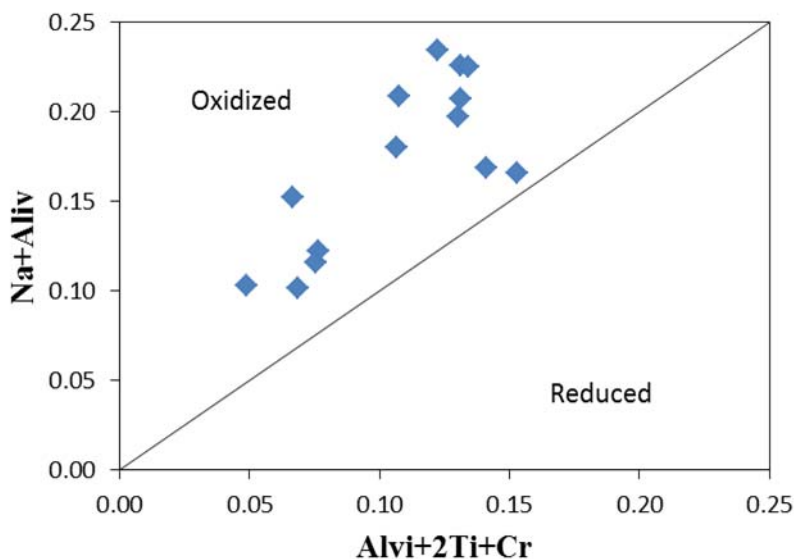
شکل ۵. نمودار مثلثی طبقه‌بندی پروکسن‌ها (Morimoto et al., 1988) که موقعیت ترکیب درشت‌بلورهای پروکسن در گدازه‌های بازالتی بومهن-رودهن را نشان می‌دهد.

**Fig. 5.** Ternary classification of pyroxenes (Morimoto et al., 1988) displays the composition of pyroxene phenocrysts from Boumehen-Roudehen basic volcanic rocks.



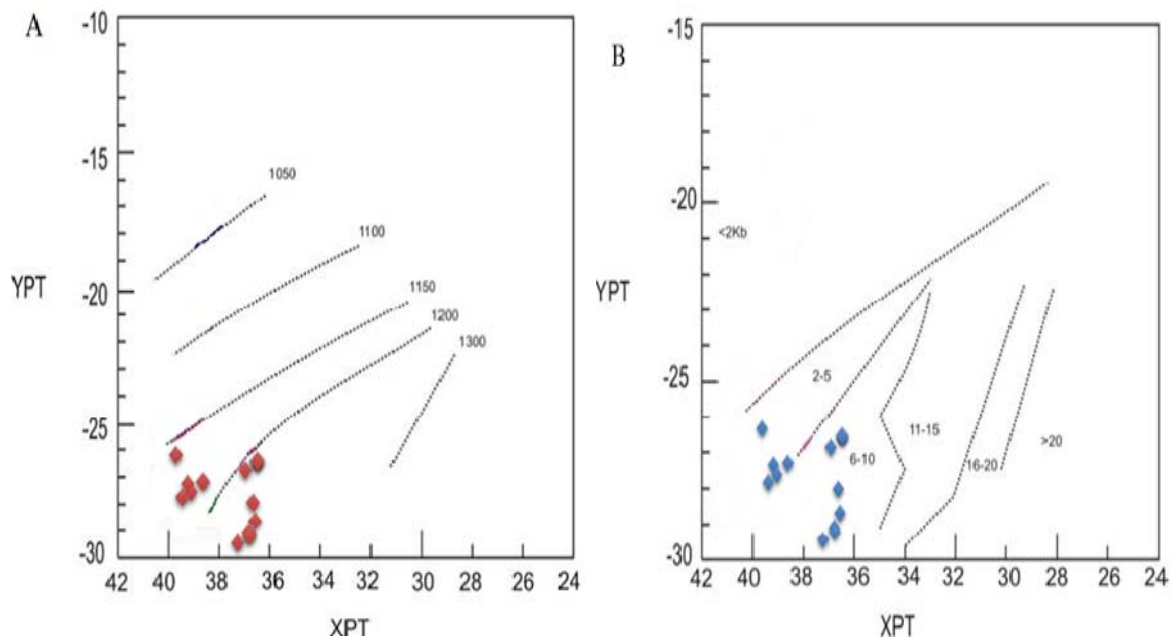
شکل ۶. موقعیت ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های بازالت‌های بومهن- رودهن در A: نمودارهای تعیین دسته ماگمایی (Le Bas, 1962) و B: محیط زمین‌ساخت (Nisbet and Pearce, 1977).

**Fig. 6.** Chemical composition of pyroxene phenocrysts from Boumehen-Roudehen basic volcanic rocks in A: magmatic series diagram of Le Bas (1962), and B: tectonic discrimination diagram of Nisbet and Pearce (1977).



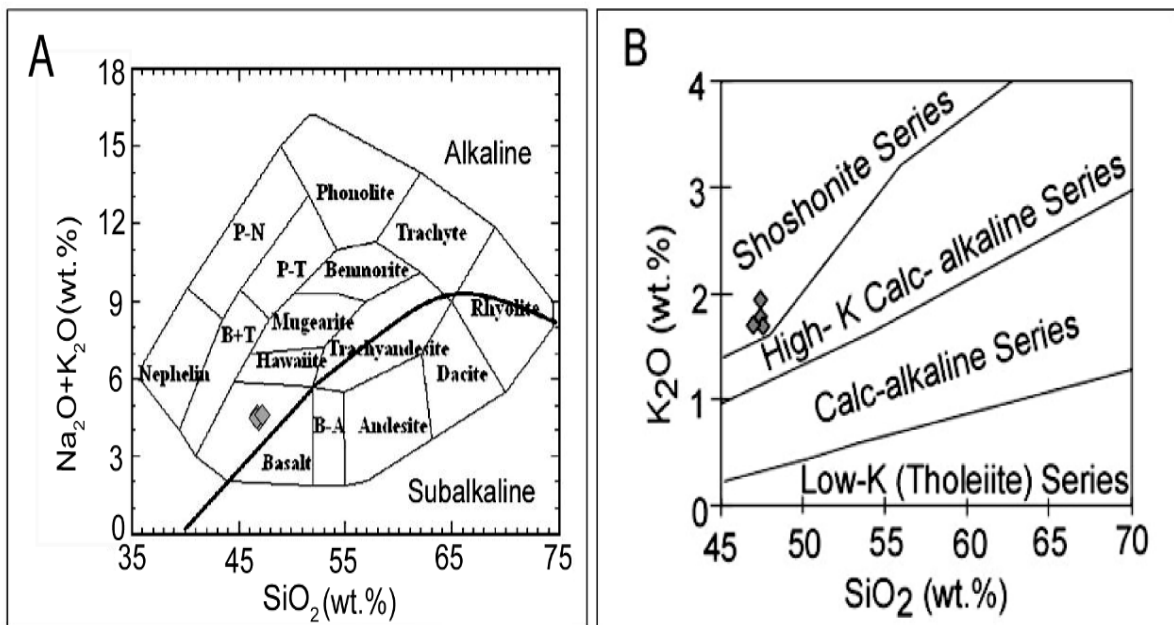
شکل ۷. نمودار  $Alvi+2Ti+Cr$  در برابر  $Na+Aliv$  برای ارزیابی کیفی فوگاسیته اکسیژن در زمان تبلور پیروکسن‌ها (Schweitzer et al., 1978)

**Fig. 7.**  $Alvi+2Ti+Cr$  versus  $Na+Aliv$  for qualitative estimation of oxygen fugacity during pyroxene crystallization (Schweitzer et al., 1978)



شکل ۸. A: تعیین دما و B: فشار تبلور کلینوپیروکسن‌های بازالت بومهن- رودهن با استفاده از روش سوئسو (Soesoo, 1997)

**Fig. 8.** A: thermometry and B: barometry of pyroxene crystallization in Boumehen-Roudehen basaltic rocks using Soesoo, (1997) technique



شکل ۹. A: موقعیت نمونه‌های بازیک محدوده بومهن- رودهن در طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین بیرونی بر پایه مجموع عناصر قلیایی در برابر سیلیس، (Cox et al., 1979)، خط جدا کننده دسته آلكالن از ساب‌آلكالن از میاشیرو (Myashiro, 1978). B: موقعیت نمونه‌ها در نمودار  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  پکسریلو و تیلور (Peccerillo and Taylor, 1976) در محدوده دسته شوشونیتی قرار گرفته‌اند.

**Fig. 9.** A: The plot of Boumehen-Roudehen basic volcanic rocks on the volcanic rock classification based on the total alkali elements versus silica (Cox et al., 1979), curve discriminating alkaline series from sub-alkaline after Myashiro (1978), and B: The plot of same samples on the shoshonite series of  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  diagram of Peccerillo and Taylor (1976).

## بحث

## محیط تکتونوماگمایی و ویژگی‌های منشأ مذاب

برای بررسی محیط ژئودینامیک بازالت‌های مورد بررسی از یک دسته نمودارهای متمایزکننده محیط زمین‌ساختی استفاده شد. در نمودار Nb/U در برابر Nb (Wang et al., 2004) تمام نمونه‌های مورد بررسی در محدوده سنگ‌های ولکانیک قوسی قرار می‌گیرند (شکل ۱۰). همچنین در نمودار Y در برابر Cr (Pearce, 1982) تمام نمونه‌های مورد بررسی در محدوده سنگ‌های ولکانیک قوسی واقع شده‌اند (شکل ۱۱). برای تمایز سنگ‌های ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای از کمان ماگمایی جزایر قوسی، از نمودار Zr نسبت به Zr/Y استفاده شد (شکل ۱۲). در این نمودار سنگ‌های مورد بررسی در گستره قوس قاره‌ای قرار گرفته‌اند.

در نمودار عنکبوتی عناصر که نسبت به گوشته اولیه به‌هنجار شده‌اند (شکل ۱۳) غنی‌شدگی عناصر LILE همچون K و Rb و تهی‌شدگی عناصر HFSE همچون Nb و Hf دیده می‌شود. غنی‌شدگی از LILE و تهی‌شدگی از HFSE از ویژگی‌های مذاب‌های قوس‌های آتشفشانی است. در این مناطق دخالت سیالات سرچشمه گرفته از لیتوسفر فرورانده موجب تحرک عناصر LIL و غنی‌شدگی آن در منشأ مذاب می‌شود و از طرفی پایداری برخی از کانی‌ها در منشأ مذاب که سبب جذب عناصر HFS می‌شود، باعث می‌شود که مذاب‌های مناطق فرورانشی یا قوس‌های آتشفشانی از این عناصر تهی شود (McCulloch and Gamble, 1991; Peacock et al., 1994; Pearce and Peate, 1995). عنکبوتی ترکیب شیمیایی نمونه‌های منطقه با آندزیت‌های بازالتی آند (NVZ) مقایسه شده است. چنان که ملاحظه می‌شود انطباق خوبی بین الگوی به‌هنجار شده بازالت‌های منطقه و آند وجود دارد. بنابراین ویژگی‌های عناصر فرعی و کمیاب نمونه‌ها تشابه خوبی با ماگماتیسم زون‌های فرورانشی دارد. با توجه به میزان بالای نسبت Zr/Y در نمونه‌ها و شباهتی که به مذاب

NVZ نشان می‌دهند جایگاه کمان قاره‌ای یا حاشیه فعال قاره‌ای

نسبت به جزیره قوسی ترجیح داده می‌شود.

در نمودار عناصر نادر خاکی به‌هنجار شده به کندریت (شکل ۱۴) نمونه‌های منطقه غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) نشان می‌دهند. نسبت (La/Yb)N و (La/Sm)N در نمونه‌ها به ترتیب از ۵/۷۴ تا ۴۱/۸۴ و از ۲/۲۸ تا ۲/۷۱ تغییر می‌کند. همچنین نسبت (Sm/Yb)N در محدوده ۲/۵۲ تا ۱۵/۸۱ تغییر می‌کند. الگوی نمونه‌ها غنی‌شدگی اندکی از Eu را نشان می‌دهد و نسبت  $Eu/Eu^*$  محاسبه‌شده برای نمونه‌ها ۱/۱۶ تا ۱/۲۳ است (جدول ۱) که این ویژگی را می‌توان به تجمع پلاژیوکلاز در سنگ کل و یا ناپایداری آن در منشأ تفسیر کرد. غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE و یا شیب منفی الگوی به‌هنجار شده عناصر نادر خاکی نیز از یک سو با ویژگی‌های مورد انتظار منشأ مذاب و ویژگی‌های دسته‌های ماگمایی آلکانل سازگاری داشته است و از طرفی با جایگاه تکتونوماگمایی مرتبط با زون‌های فرورانشی همخوانی دارد (Winter, 2001).

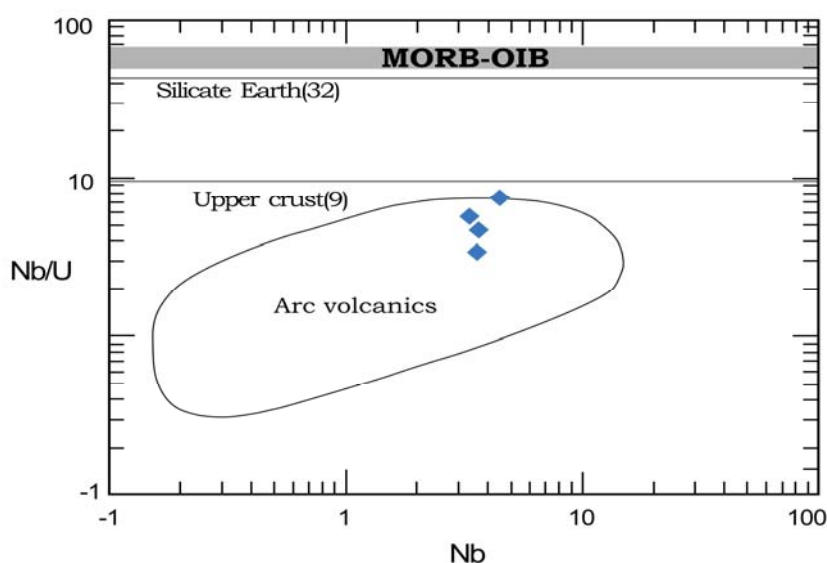
چنان‌که پیشتر اشاره شد، ژئوشیمی سنگ کل نمونه‌های بازالتی منطقه بیانگر یک منشأ گوشته‌ای است که تحت تأثیر سیالات آزادشده از لیتوسفر فرورانده قرار گرفته است. تهی‌شدگی زیاد این منشأ بر اساس آنچه الگوی به‌هنجار شده عناصر نادر خاکی نشان می‌دهند، چندان مورد انتظار نیست. برعکس به نظر می‌رسد این منشأ گوشته‌ای ویژگی‌های یک گوشته غنی‌شده/تهی‌نشده را داشته باشد. نمودار Zr در برابر Y (Sun and McDonough, 1989) می‌تواند گوشته غنی‌شده را از گوشته تهی‌شده جدا کند (خط جداکننده  $Zr/Y=2.46$ ) (شکل ۱۵). همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، تمام نمونه‌های منطقه در قلمرو گوشته غنی‌شده قرار گرفته‌اند. غنی‌شدگی این منشأ می‌تواند مرتبط با حضور یک فاز آب‌دار (میکا یا آمفیبول) در گوشته باشد.

وجود فازهای آمفیبول یا فلوگوپیت در منشأ را می‌توان بر اساس

1. Large ion lithophile elements
2. High field strength elements

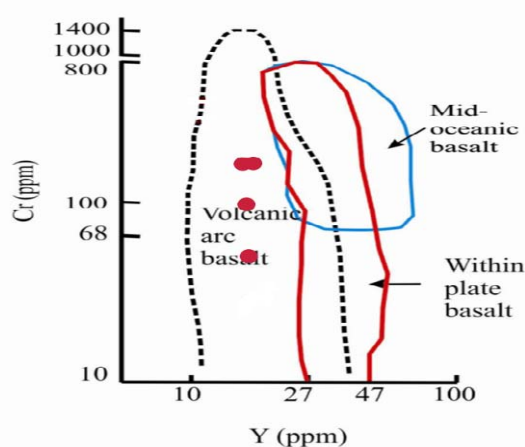
کنار عدم تغییر قابل توجه نسبت Nb/Th حضور فلوگوپیت در منشأ گوشته‌ای محتمل به نظر می‌رسد. حضور این کانی از طرف دیگر می‌تواند نشان‌دهنده منشأ نسبتاً عمیق مذاب باشد که با لیتوسفر ضخیم‌شده حواشی فعال قاره‌ای تناسب دارد.

نسبت‌های Rb/Sr و Nb/Th (شکل ۱۶) دریافت کرد، به‌ویژه که نسبت Nb/Th شاخصی از سازگاری بیشتر عنصر Nb در ترکیب آمفیبول نسبت به فلوگوپیت (Lonov et al., 1997) بوده است و نیز تحرک کم این عناصر در طی دگرسانی را نشان می‌دهد. بر اساس این نسبت‌ها و تغییرات منظم نسبت Rb/Sr



شکل ۱۰. موقعیت نمونه‌های بازالت بومهن-رودهن در نمودار Nb در برابر Nb/U (Wang et al., 2004)

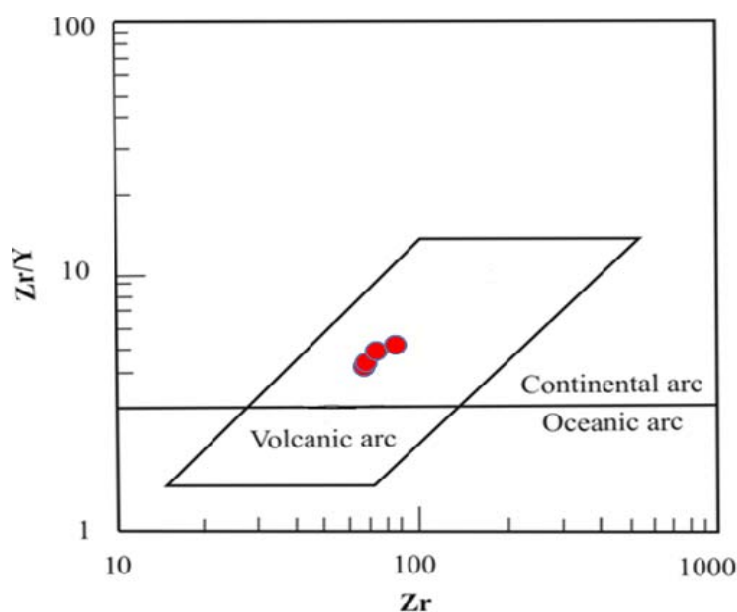
**Fig. 10.** The plot of Boumehen-Roudehen basaltic rocks on the Nb-Nb/U diagram (Wang et al., 2004)



شکل ۱۱. موقعیت نمونه‌های بازالت بومهن-رودهن در نمودار Cr-Y. این نمودار، MORB و بازالت‌های کمان آتشفشانی (VAB) را با همپوشانی کمی از هم جدا می‌کند. همچنین گستره بازالت‌های درون صفحه‌ای (WPB) با گستره مورب و بازالت‌های کمان آتشفشانی همپوشانی دارد (Pearce, 1982).

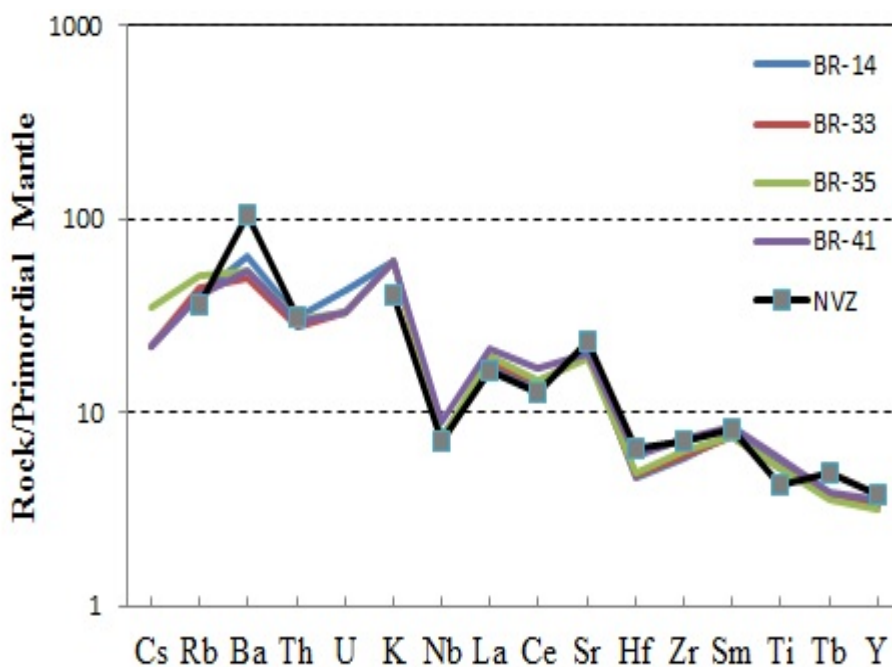
**Fig. 11.** The plot of Boumehen-Roudehen basaltic rocks on the Cr-Y diagram (Pearce, 1982). This diagram separates MORB from volcanic arc basalt (VAB). Within plate basalts (WPB) overlap MORB and VAB realms.





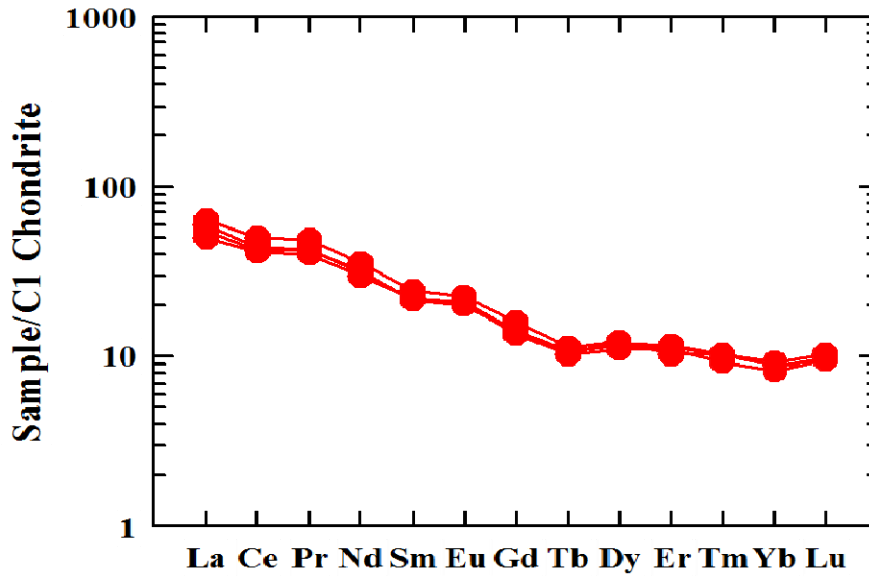
شکل ۱۲. موقعیت نمونه‌های بازیک منطقه رودهن در نمودار تعیین محیط زمین‌ساختی بر اساس تغییرات Zr نسبت به Zr/Y (Pearce, 1983)

**Fig. 12.** The plot of Boumehen-Roudehen basic rocks on the tectonic discrimination diagram based on the variation of Zr versus Zr/Y (Pearce, 1983)



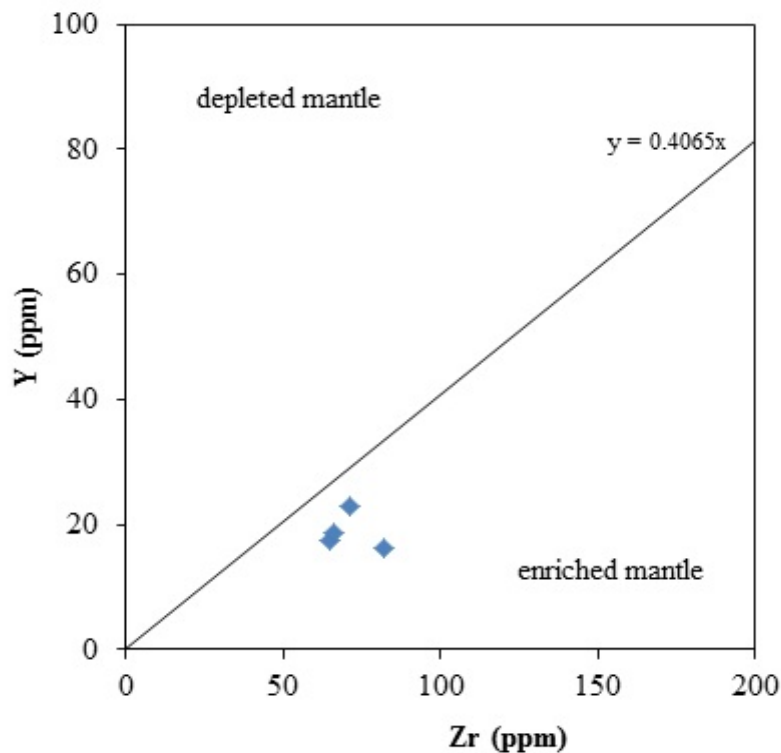
شکل ۱۳. نمودار عنکبوتی برای مقادیر عناصر کمیاب به‌هنجار شده با ترکیب گوشته اولیه از مک‌دوناف و همکاران (McDonough et al., 1992). الگوی سنگ‌های بازیک آند (NVZ) برای مقایسه پلات شده است (Wilson, 1989).

**Fig. 13.** The spider diagram of trace elements of Boumehen-Roudehen basic rocks normalized to primordial mantle values after McDonough et al., 1992. Andean data (NVZ) are plotted for comparison (Wilson, 1989).



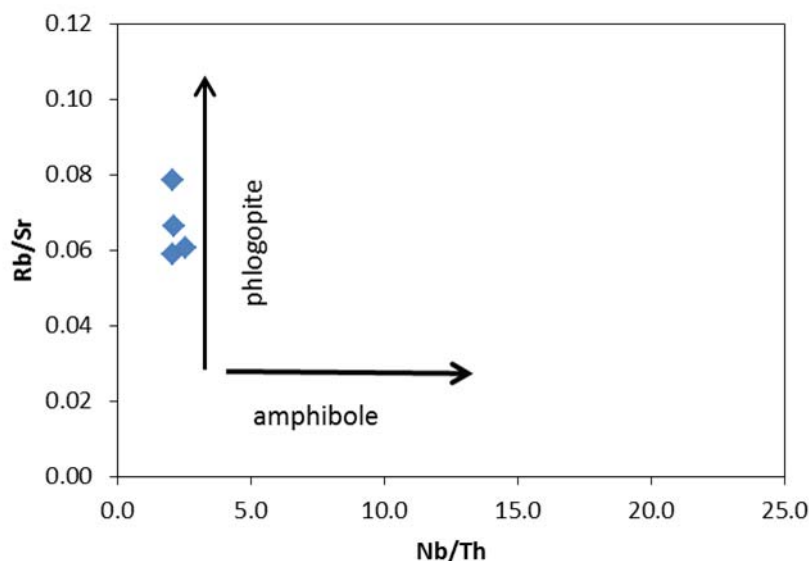
شکل ۱۴. الگوی عناصر نادر خاکی نمونه‌های بازالت بومهن- رودهن نرمالیزه شده به مقادیر کندریت C1 از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989)

**Fig. 14.** The REE pattern of Boumehen-Roudehen basic rocks normalized to C1 Chondrite values after Sun and McDonough et al., (1989)



شکل ۱۵. موقعیت نمونه‌های بازالت بومهن و رودهن در نمودار مقادیر Zr در برابر Y (Sun and McDonough, 1989) خط جدا کننده  $Zr/Y=2.46$  گوشته غنی شده را از گوشته تهی شده جدا می‌کند.

**Fig. 15.** The plot of Boumehen-Roudehen basaltic rocks on the Zr versus Y diagram (Sun and McDonough, 1989). The line defined by  $Zr/Y=2.46$  separates enriched mantle from depleted mantle



شکل ۱۶. موقعیت نمونه‌های بازالت بومهن و رودهن در نمودار Nb/Th در برابر Rb/Sr (Furman and Graham, 1999) که بیانگر حضور فلوگوپیت در منشأ ذوب این سنگ‌هاست.

**Fig. 16.** The plot of Boumehen-Roudehen basaltic rocks on the Nb/Th versus Rb/Sr diagram (Furman and Graham, 1999) indicates the presence of phlogopite in the source region melt.

تا شوشونیتی بوده و شواهد ژئوشیمیایی آنها همچون غنی‌شدگی از LILE و تهی‌شدگی از HFSE نشان‌دهنده تأثیرپذیری منشأ مذاب از فرآیندهای زون فرورانش است که بعد در محیط کشتی پشت قوسی دچار ذوب‌بخشی شده است (Asiabanha and Foden, 2012; Ghasemi and Rezaei-Kakhkhaei, 2015). ماگماتیسیم نفوذی البرز غربی در زمان الیگوسن نیز منشأ گوشته‌ای دگرسان‌شده مرتبط با فرآیندهای فرورانشی را نشان می‌دهد (Aghazadeh et al., 2010). بررسی‌های متعددی در مورد ماگماتیسیم و وضعیت زمین‌ساختی پالتوژن در ایران انجام شده است که نشان می‌دهند ولکانیسم قوسی در ایران در زمان پالتوژن گسترش وسیعی داشته است. این سنگ‌های ولکانیکی در قسمت‌های زیادی از ایران مرکزی (نوار ماگمایی ارومیه - دختر)، حاشیه جنوبی نوار کوه‌زایی البرز، البرز غربی - آذربایجان، بلوک لوت و شمال لوت رخنمون دارند (Amidi et al., 1984; Ramezani and Tucker, 2003; Shahabpour, 2007; Asiabanha and Foden, 2012; Chiu et al., 2013; Pang et al., 2013). البته این ماگماتیسیم فراتر از سرزمین ایران بوده و در مناطق همجوار نیز

### ماگماتیسیم پالتوژن در البرز

ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های منطقه با آنچه پیشتر در مورد ماگماتیسیم ترشیر البرز که در ادامه بحث شده است، سازگاری خوبی دارد. ماگماتیسیم شوشونیتی در سنگ‌های نفوذی پس از اتوسن البرز غربی (Aghazadeh et al., 2011) و البرز مرکزی (Maghdour-Mashhour et al., 2015) و نیز در سنگ‌های ولکانیکی اتوسن و جوانتر از اتوسن البرز غربی (Asiabanha and Asiabanha et al., 2012) (Foden, 2012) گزارش شده است. به‌علاوه، جایگاه تکتونوماگمایی ماگماتیسیم ترشیر البرز مشابه آنچه نمونه‌های منطقه نشان می‌دهند، در بقیه مناطق البرز نیز مرتبط با زون‌های فرورانش است. به‌طوری‌که در البرز غربی ولکانیسم پس از اتوسن ویژگی‌های کمان‌های قاره‌ای را نشان می‌دهد (Asiabanha et al., 2012). ویژگی‌های ژئوشیمیایی ولکانیسم اتوسن البرز غربی نشان می‌دهد که ماگماتیسیم با گذر زمان از شکل فوران‌های زیردریایی به روانه‌های محیط بیرون از آب تغییر پیدا کرده است. این سنگ‌ها کالک‌آلکالن پتاسیم بالا

است. این گوشته بر اثر تقابل یا واکنش با مواد آزاد شده از لیتوسفر فرورانده دگرسان می‌شود. مذاب‌های حاصل از این منشأ مشابه آنچه نمونه‌های منطقه نشان می‌دهند، ویژگی‌های مذاب‌های مناطق مرتبط با فرورانش را نشان می‌دهند. عامل ذوب چنین منشأ گوشته‌ای علاوه بر آنچه در گوه گوشته‌ای بالای لیتوسفر فرورانده مورد انتظار است که تحت تأثیر ورود سیالات دچار افت نقطه ذوب شود، ممکن است متأثر از زمین‌ساخت کششی و به خاطر کاهش فشار، صعود آستوسفری و آنومالی حرارتی لیتوسفری باشد.

### نتیجه‌گیری

گدازه‌های پس از ائوسن میانی البرز مرکزی در محدوده رودهن - بومهن بر پایه پتروگرافی و ترکیب کانی‌شناسی الیوین بازالت و به لحاظ ژئوشیمی آلکالن (شوشونیتی) هستند. این بازالت‌های آلکالن به لحاظ ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی از بازالت‌های آلکالن تیپیک (ریفیت‌های قاره‌ای و جزایر اقیانوسی) متمایز هستند. به عبارت دیگر، ژئوشیمی کل سنگ و همچنین الگوی عنکبوتی عناصر کمیاب و خاکی این سنگ‌ها شباهت زیادی با الگوی این عناصر در مذاب‌های کمان‌های قاره‌ای (حواشی فعال قاره‌ای) دارد. به عبارتی، غنی‌شدگی از LILE و تهی‌شدگی از HFSE دلالت بر تأثیرپذیری منشأ مذاب از فرآیندهای زون فرورانش دارد. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن این سنگ‌ها نیز با ترکیب این کانی در بازالت‌های کمان آتشفشانی همخوانی دارد. بنابراین به نظر می‌رسد فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر گوشته میکروپلیت البرز در زمان پالئوژن و به دنبال آن کشش در حوضه پشت قوس می‌تواند علت ماگماتیسیم آلکالن مرتبط با فرورانش باشد.

وجود دارد. در حاشیه جنوبی اورازیا، نوارهای مختلف ماگماتیسیم کالک‌آلکالن حتی در زمان قبل از پالئوژن نیز وجود داشته و در یک دوره گسترده زمانی از تریاس تاکنون رخنمون یافته است. به استثنای ولکانیسم تریاس که در مناطقی همچون توران و قفقاز دیده می‌شود و آن را می‌توان به بسته شدن پالئوتتیس منسوب کرد، از زمان ژوراسیک به بعد این فعالیت‌ها در ارتباط با تحولات نئوتتیس پی‌گیری می‌شود. این فعالیت‌ها در پنج مرحله شامل ابتدای ژوراسیک، ژوراسیک میانی - کرتاسه آغازی، کرتاسه پایانی، پالئوژن و میوسن پایانی - کواترنر انجام شده است. نوارهای مزوزوئیک به ویژه در بخش پونتید - قفقاز دیده می‌شود که در سنوزوئیک امتداد این فعالیت از بالکان تا ایران و افغانستان کشیده می‌شود. (Kazmin et al., 1986). با توجه به ارتباط فضایی و همجواری حاشیه قاره‌ای جنوب اورازیا و حوضه اقیانوسی نئوتتیس و تحولاتی که با فرورانش لیتوسفر اقیانوسی به زیر لبه قاره‌ای مرتبط بوده است، بسیاری از محققان فعالیت ماگمایی گسترده در حاشیه جنوبی اورازیا را متأثر از لیتوسفر فرورانده نئوتتیس می‌دانند (Berberian and Berberian, 1981; Berberian and King, 1981). تحولات زمین‌ساختی لیتوسفر بالای زون فرورانده با توجه به سازوکار فرورانش لیتوسفر اقیانوسی (زاویه فرورانش، به عقب برگشتگی لیتوسفر فرورانده و یا گسیختگی آن)، ممکن است ماهیت کششی داشته باشد یا حتی تا مرحله تشکیل و گسترش حوضه‌های پشت قوسی پیش برود. در همین راستا، فوران‌های بازالتی ریفتی در زمان‌های ژوراسیک میانی، ژوراسیک پایانی، اواسط کرتاسه و ائوسن آغازی - میانی شاهدهی از بازشدگی حوضه‌های پشت قوس مرتبط با فرورانش نئوتتیس در نظر گرفته شده‌اند (Kazmin et al., 1986). لذا با توجه به داده‌های این پژوهش و در توافق با بررسی‌هایی که در گذشته انجام شده، تولید مذاب‌های بازالتی منطقه در ارتباط با ذوب یک گوشته غنی / تهی‌نشده لیتوسفری بالای زون فرورانش

### References

Asiabanha, A., Bardintzeff, J.M., Kananian, A. and Rahimi, G., 2012. Post-Eocene volcanics

of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. Journal of Asian

- Earth Sciences, 45: 79-94.
- Asiabanha, A. and Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos*, 148: 98-111.
- Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z. and Vogt, K., 2011. Post-collisional polycyclic plutonism from the Zagros hinterland: the Shaivar Dagh plutonic complex, Alborz belt, Iran. *Geological Magazine*, 148(5-6): 980-1008.
- Aghazadeh, M., Castro, A., Omrani, N.R., Emami, M.H., Moinvaziri, H. and Badrzadeh, Z., 2010. The gabbro (shoshonitic)-monzonite-granodiorite association of Khankandi pluton, Alborz Mountains, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 38(5): 199-219.
- Amidi, S., Emami, M. and Michel, R., 1984. Alkaline character of Eocene volcanism in the middle part of central Iran and its geodynamic situation. *Geologische Rundschau*, 73(3): 917-932.
- Berberian, F. and Berberian, M., 1981. Tectono-plutonic episodes in Iran. In: H.K. Gupta and F.M. Delany (Editors), *Zagros Hindukush, Himalaya Geodynamic Evolution*. American Geophysical Union, Washington DC, pp. 5-32.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210-265.
- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Khatib, M.M. and 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.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979. *The interpretation of igneous rocks*. George Allen and Unwin, London, 450 pp.
- Dederal, E., 1967. Zur Geologie des mittleren und unteren Karaj-Tales, Zentral-Elburz (Iran). *Mitteilungen, Geologisches Institut ETH und Universität Zürich, Neue Folge*, 76: 1-123.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. Longman, London, 696 pp.
- Furman, T. and Graham, D., 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: geochemical evidence from the Kivu volcanic province. *Lithos*, 48(1-4): 237-262.
- Ghasemi, H. and Rezaei-Kahkhaei, M., 2015. Petrochemistry and tectonic setting of the Davarzan-Abbasabad Eocene volcanic (DAEV) rocks, NE Iran. *Mineralogy and Petrology*, 109(2): 235-252.
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523-548.
- Kazmin, V.G., Sbertshikov, I.M., Ricou, L.E., Zonenshain, L.P., Boulin, J. and Knipper, A.L., 1986. Volcanic belts as markers of the Mesozoic-Cenozoic active margin of Eurasia. *Tectonophysics*, 123(1-4): 123-152.
- Le Base, M.J., 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260(4): 267-288.
- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 139-154.
- Lonov, D.A, O'Reilly, S.Y. and Griffin, W.L., 1997. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle. *Chemical Geology*, 141(3-4): 153-184.
- Maghdour-Mashhour, R., Esmaeily, D., Tabbakh Shabani, A.A., Chiaradia, M. and Latypov, R., 2015. Petrology and geochemistry of the Karaj Dam basement sill: Implications for geodynamic evolution of the Alborz magmatic belt. *Chemie der Erde- Geochemistry*, 75(2): 237-260.
- Mahmoodi, M., 2000. Petrography, geochemistry and petrology of subvolcanic and volcanic rocks of Roudhen area. M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran, 132 pp.
- McCulloch, M.T. and Gamble, J.A., 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3-4): 358-374.
- McDonough, W.F., Sun, S.-S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E. and Hofmann, A.W. 1992. Potassium, Rubidium and Cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of

- the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001-1012.
- Moinevaziri, H., 2010. *Magmatism*. Tarbiat Moallem University Publications, Tehran, 396 pp. (in Persian)
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 73(9-10): 1123-1133.
- Myashiro, A., 1978. Nature of Alkalic volcanic rock series. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66(1): 91-104.
- Nisbet, E.G. and Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2):149-160.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Chu, C.H., Lee, H.Y. and Lo, C.H., 2013. Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180-181: 234-251.
- Parlak, O., Delaloye, M., Demirkol, C. and Unlugenc, U.C., 2001. Geochemistry of Pliocene/ Pleistocene basalts along the Central Anatolian Fault Zone (CAFZ), Turkey: *Geodinamica Acta*, 14(1): 159-167.
- Peacock, S.M., Rushmer, T. and Thompson, A.B., 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(3-4): 227-244.
- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: R.S., Thorpe (Editor), *Andesites*. Wiley, Chichester, United Kingdom. pp. 525-548.
- Pearce, J.A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins: In: C.J., Hawkesworth and M.J., Norry (Editors), *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich, United Kingdom, pp. 230-249.
- Pearce, J.A., Peate, D.W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251-285.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- Ramezani, J. and Tucker, R.D., 2003. The Saghand Region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana Tectonics. *American Journal of Science*, 303(7): 622-665.
- Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation Interpretation*. Longman Scientific and Technical Limited, Harlow, United Kingdom, 352 pp.
- Schweitzer, E., Papike, J.J. and Bence, A., 1978. Clinopyroxenes from deep sea basalts: A statistical analysis. *Geophysical Research Letters*, 5(7): 573-576.
- Shahabpour, J., 2007. Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(5-6): 652-665
- Soesoo, A. 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: Empirical coordinates for the crystallisation PT- estimations. *Journal of the Geological Society of Sweden*, 119(1): 55-60.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: A.D., Saunders and M.J., Norry (Editors), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42. 313-345.
- Vahdati Daneshmand, F., 1997. Geological map of the East of Tehran, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Wang, K.L., Chung, S.L., O'Reilly, S.Y., Sun, S.S., Shinjo, R. and Chen, C.H., 2004. Geochemical Constraints for the Genesis of Post-collisional Magmatism and the Geodynamic Evolution of the Northern Taiwan Region. *Petrology*, 45(5): 975-1011.
- Wilson, M., 1989. *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. Unwin Hymen, London, 466 pp.
- Winter, J.D., 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall Incorporation, Upper Saddle River, New Jersey, United state of America, 697 pp.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.



## Geochemistry and Mineral Chemistry of Zeolites Bearing Basic Volcanic Rocks from the Boumehen-Roudehen Area, East of Tehran

Amir Ali Tabbakh Shabani\*, Morteza Delavari Kooshan and Mahsa Hajiabdolrahim Khabbaz

Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Submitted: Aug. 30, 2015

Accepted: Apr. 12, 2016

**Keywords:** *Olivine basalt, alkaline, volcanic arc, Central Alborz, Boumehen-Roudehen*

### Introduction

The Upper Eocene basic volcanic rocks that have cropped out in Karaj formation in the Boumehen and Roudehen area in the east of Tehran are characterized by fibrous zeolites filling their vesicles, cavities and fractures creating amygdale texture. The study area is located structurally in the Central Alborz orogenic belt. The presence of large volumes of shoshonitic magma during the Middle to Late Eocene in southern-central Alborz implies that partial melting to produce shoshonitic melts was not a local petrological event. Thus, their ages, formation processes, and interpretations are of regional tectonic significance. In this study, we present a detailed petrography, mineral chemistry, and whole-rock geochemistry of high-K (shoshonitic) basic rocks to understand the petrogenesis and source region and to deduce the nature of the tectonomagmatic regime of the Alborz.

### Materials and methods

In this study, we present new major and trace element data for a selection of 4 of the least altered samples by a combination of X-ray fluorescence (XRF) and ICP-OES techniques at the Zarazma Mineral Studies Company.

Mineral analyses were obtained by wavelength dispersive X-ray spectrometry on polished thin sections prepared from each rock sample described above for 12 elements using a Cameca SX-50 electron microprobe at the Istituto di Geologia e Geingegneria Ambientale, C.N.R., University La Sapienza of Rome, Italy. Typical beam operating conditions were 15 kV and probe

current of 15 nA. The accuracy of the analyses is 1% for major and 10% for minor elements. A total of 24 point analyses were collected.

### Results and Discussion

The extent of alteration in the study rocks varies from slight to severe and shows porphyritic to glomeroporphyritic textures. Pyroxenes are generally subhedral to euhedral and occur as discrete crystals as well as aggregates. Olivine may occur only as relics filled with iddingsite, chlorite and calcite. Plagioclase is subhedral to euhedral and occurs both as pheocrysts and microliths in the glassy groundmass. The plagioclase crystals are variably sasseratized and sometimes replaced by zeolites.

Microprobe data indicate a restricted range of chemical composition for pyroxene falling in diopside and augite fields of ternary pyroxene classification diagram (Morimoto, 1988). The plagioclase compositions have been plotted in the fields of labradorite and bytownite in the orthoclase–albite–anorthite ternary diagram (Deer et al., 1992). On the F1-F2 tectonic discrimination diagram of Nisbet and Pearce (1977), pyroxene compositions plot mainly in volcanic arc basalt field consistent with their whole rock geochemistry. Thermobarometry based on pyroxene composition (Soesoo, 1997) displays a range of temperatures from 1150 to 1250 °C and pressure from 3 to 8 kbar for its crystallization.

Whole rock compositions show that the variations of SiO<sub>2</sub> contents are narrow (47.08 – 47.47 wt%) and TiO<sub>2</sub> (1.1 – 1.24 wt%). Relatively higher

\*Corresponding authors Email: aatshabani@khu.ac.ir

contents of  $K_2O$  show a shoshonitic affinity in the  $K_2O-SiO_2$  diagram (Peccerillo and Taylor 1976). Trace element and rare earth element (REE) distribution patterns for the basaltic samples normalized to the primitive mantle (McDonough et al., 1992) and chondrite values (Sun and McDonough, 1989) show similar patterns. The samples are all enriched in large-ion lithophile elements (LILEs), such as Rb, Ba, and K, and light rare earth elements (LREEs) ( $(La/Sm)_N = 2.3-3.2$ ) relative to the more immobile elements (e.g., Hf, Ti and Y). The plot of analyzed samples in a series of different tectonic discrimination diagrams shows that the Boumehen-Roudehen alkaline basalts are consistent with characteristics of subduction related (active continental margins) tectonic environments. In addition, enrichment in LILE and depletion in HFSE on spidergram create patterns which are very similar with the pattern of Andean counterparts indicating an arc setting.

#### Acknowledgments

Marcello Serracino is thanked for microprobe analyses. The authors are grateful to Journal Manager and reviewers who critically reviewed the manuscript and made valuable suggestions for its improvement.

#### References

- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992. An Introduction to the Rock Forming Minerals. Longman, London, 696 pp.
- McDonough, W.F., Sun, S.-S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E. and Hofmann, A.W. 1992. Potassium, Rubidium and Cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001-1012.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 73(9-10): 1123-1133.
- Nisbet, E.G. and Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2):149-160.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- Soesoo, A. 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: Empirical coordinates for the crystallisation PT- estimations. *Journal of the Geological Society of Sweden*, 119(1): 55-60.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: A.D., Saunders and M.J., Norry (Editors), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42. 313-345.