

**Dating and source determination of volcanic rocks
from Khunik area (South of Birjand, South Khorasan)
using Rb-Sr and Sm-Nd isotopes**

**Somayeh Samiee¹, Mohammad Hassan Karimpour^{1*}, Majid Ghaderi²,
Mohammad Reza Heidarian Shahri¹ and José Francisco Santos³**

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Department of Geosciences, Geobiotec Research Unit, University of Aveiro, Aveiro, Portugal

Abstract

The Khunik area is located in the south of Birjand, Khorasan province, in the eastern margin of Lut block. Tertiary volcanic rocks have andesite to trachy-andesite composition. Dating analyzing by Rb-Sr method on plagioclase and hornblende as well as whole-rock isochron method was performed on pyroxene-hornblende andesite rock unit. On this basis the emplacement age is Upper Paleocene (58 ± 11 Ma). These rocks have initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and ϵ_{Nd} 0.7046-0.7049 and 2.16-3.12, respectively. According to isotopic data, volcanic rocks originated from depleted mantle and have the least crust contamination while it was fractionated. Geochemically, Khunik volcanic rocks have features typical of calc-alkaline to shoshonite and are metaluminous. Enrichment in LILEs and typical negative anomalies of Nb and Ti are evidences that the volcanic rocks formed in a subduction zone and active continental margin. Modeling suggests that these rocks were derived dominantly from 1–5% partial melting of a mainly spinel garnet lherzolite mantle source that is metasomatized by slab-derived fluid.

Keywords: Sr and Nd isotopes, Geochemistry, Volcanic rocks, Khunik, Lut block

* karimpur@um.ac.ir

سن سنجی و خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) با بهره‌گیری از ایزوتوپ‌های استرانسیم و نئودیمیم

سمیه سمیعی^۱، محمدحسن کریم‌پور^{۱*}، مجید قادری^۲، محمدرضا حیدریان‌شهری^۱ و ژوزه فرانسیسکو سانتوز^۳
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۳ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه آویرو، آویرو، پرتغال

چکیده

منطقه خونیک در جنوب بیرجند، در استان خراسان جنوبی و در کناره خاوری بلوک لوت جای دارد. سنگ‌های آتشفشانی ترسیری در این منطقه ترکیب آندزیتی و تراکی‌آندزیت هستند. سن سنجی به روش روبیدیم-استرانسیم بر روی کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند و کل سنگ نمونه هورنبلند پیروکسن آندزیت انجام شد. بر این پایه، سن جایگیری مجموعه آتشفشانی در منطقه خونیک 58 ± 11 میلیون سال پیش (پالئوسن پایانی) به دست آمد. این سنگ‌ها دارای ترکیب ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و ϵNd اولیه به ترتیب 0.7049 تا 0.7046 و $+2.16$ تا $+3.12$ هستند. بر پایه داده‌های ایزوتوپی، ماگمای مادر سنگ‌های آتشفشانی از گوشته تهی شده پدید آمده و دچار کمترین آلودگی پوسته‌ای در هنگام تبلوربخشی شده است. از دیدگاه زمین‌شیمیایی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک کالک‌آلکان تا شوشونیتی و متآلومین هستند. غنی‌شدگی از LILEها و آنومالی منفی Nb و Ti در سنگ‌های آتشفشانی نشانه پیدایش آنها در پهنه فرورانش و در جایگاه زمین‌ساختی کناره‌های فعال قاره‌ای است. بر پایه الگوسازی انجام‌شده، این سنگ‌ها در نتیجه ۱ تا ۵ درصد ذوب‌بخشی گوشته متاسوماتیسم شده با ترکیب اسپینل‌گارتلرزولیت پدید آمده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ایزوتوپ‌های استرانسیم و نئودیمیم، زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی، خونیک، بلوک لوت

مقدمه

سربیشه و در ۱۰۶ کیلومتری جنوب بیرجند، مرکز

استان خراسان جنوبی، در طول جغرافیایی

۵۹°۰۹' تا ۵۹°۱۳' خاوری و عرض جغرافیایی

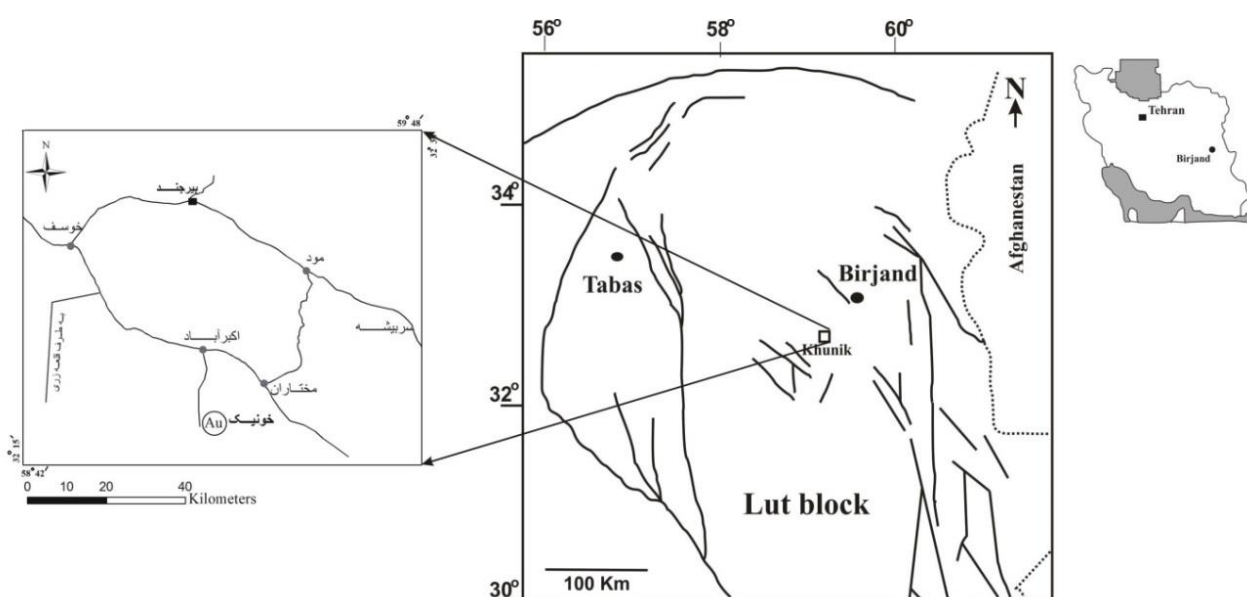
منطقه خونیک در ۲۱ کیلومتری

جنوب‌باختری روستای مختاران، در شهرستان

* karimpur@um.ac.ir

طلای اپی‌ترمال سولفید بالای کوه شاه (Abdi *et al.*, 2010) و چاه شلغمی (Arjmandzadeh *et al.*, 2010) و کانی‌سازی پلی‌متال رگه‌ای رودگز (Hamooni *et al.*, 2013) را برشمرد. برپایه وابستگی کانی‌سازی‌های منطقه با فعالیت‌های ماگمایی، شناخت بهتر از زمین‌شیمی و خاستگاه ماگمای سازنده توده‌های وابسته به کانی‌سازی و یا بی‌کانی‌سازی در منطقه، گام مهمی برای یافتن کانسارهای گوناگون در خاور ایران است. این مقاله، به بررسی داده‌های زمین‌شیمیایی کل سنگ و داده‌های ایزوتوپی روییدیم-استرانسیم در سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک پرداخته است. بررسی این سنگ‌ها که بخشی از بلوک لوت هستند، به شناخت هرچه بهتر جایگاه زمین‌ساختی و در نهایت یافتن کانی‌سازی‌های رخ داده در این منطقه کمک خواهد کرد.

۳۲°۲۱' تا ۳۲°۲۶' شمالی، جای گرفته است (شکل ۱). برپایه به‌روزترین پهنه‌بندی‌های ساختاری، این منطقه در پهنه بلوک لوت جای دارد (Aghanabati, 2004). از ویژگی‌های بی‌همتای بلوک لوت، فعالیت ماگمایی گسترده آن، به‌ویژه در بخش‌های شمالی است که از ژوراسیک آغاز شده و در ترسیری به اوج رسیده است، به‌گونه‌ای که سنگ‌های آتشفشانی-نفوذی ترسیری، به‌ویژه ائوسن، با ستبرای نزدیک به ۲۰۰۰ متر، نیمی از بلوک لوت را پوشانده‌اند (Aghanabati, 2004). در سال‌های اخیر بسیاری از زمین‌شناسان این منطقه را بررسی و کانی‌سازی‌های گوناگونی در آن گزارش کرده‌اند. از میان آنها می‌توان کانسارهای مس-طلای پورفیری ماهرآباد و خوییک (Malekzadeh, 2007; Shafaroudi *et al.*, 2014; Karimpour *et al.*, 2007)



شکل ۱- راه‌های دسترسی و جایگاه جغرافیایی منطقه اکتشافی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی).

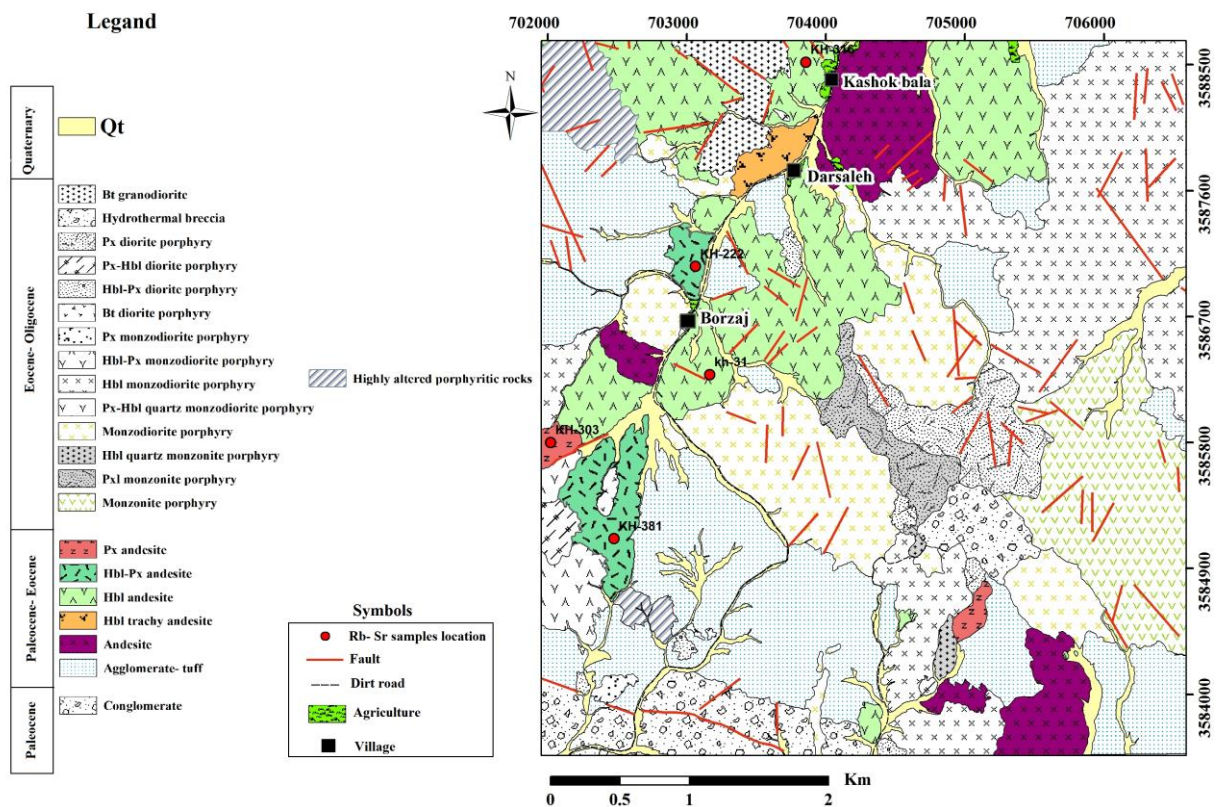
این سنگ‌ها عبارتند از: (۱) سنگ‌های کنگلومرای با سن پالئوسن؛ (۲) سنگ‌های آتشفشانی (آندزیت، پیروکسن آندزیت، پیروکسن هورنبلند آندزیت و تراکی آندزیت) و آذرآواری پالئوسن

زمین‌شناسی منطقه خونیک

در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ منطقه خونیک (Samiee *et al.*, 2014) چهار گروه سنگی زمین‌شناسی را می‌توان شناسایی کرد (شکل ۲).

زمین‌شیمیایی، متالومین و کالک‌آلکان بوده و از دیدگاه زمین‌ساختی در پهنه فرورانش و کناره‌های قاره‌ای فعال پدید آمده‌اند (Samiee *et al.*, 2014)؛ (۴) تراس‌های آبرفتی و رسوب‌های رودخانه‌ای عهد حاضر (شکل ۲).

پایانی؛ (۳) استوک‌ها و دایک‌های نیمه‌عمیق ائوسن که درون سنگ‌های آتشفشانی پالئوسن نفوذ کرده‌اند. این سنگ‌ها دارای گستره ترکیبی از دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، مونزونیت و مونزودیوریت هستند. از نظر ویژگی‌های



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه خونیک (Samiee *et al.*, 2014). در این پژوهش سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده‌اند.

بررسی ایزوتوپ‌های استرانسیم و نئودیمیم:

پس از انجام بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری، از رخنمون‌های سطحی سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک، ۵ نمونه با کمترین میزان دگرسانی برای بررسی‌های ایزوتوپی برگزیده شدند. نخست نمونه‌های سنگی با سنگ‌شکن خرد شده و سپس در آسیاب تا اندازه ۲۰۰ مش خرد شدند. افزون بر این، برای سن‌سنجی، کانی‌های پلاژیوکلاز و هورنبلند از نمونه KH-

روش انجام پژوهش

سنگ‌نگاری: در هنگام بازدید میدانی از رخنمون‌های سنگ‌های آتشفشانی، ۸۰ نمونه دستی برداشت شد. برای شناسایی ترکیب سنگ‌شناسی و روابط بافتی، ۳۰ مقطع نازک میکروسکوپی تهیه شد. مقاطع تهیه‌شده با میکروسکوپ Olympus در دانشگاه فردوسی مشهد بررسی و نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه خونیک تهیه شد (شکل ۲).

گروه لانتانیدها با به کارگیری رزین Ln انجام شد (فناوری Elchro).

اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی با دستگاه Multi-Collector Thermal Ionization Mass Spectrometer (TIMS) VG 54 جرم به روش بهنجارسازی داده‌ها به $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ = ۰/۱۱۹۴ و $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ = ۰/۷۲۱۹ انجام شد. اندازه‌گیری داده‌ها نسبت به استانداردهای SRM-987 = ۰/۷۱۰۲۵۶ و JNdia = ۰/۵۱۲۱۰۵۷ انجام شد. میزان خطا دو سیگما است. در پایان، سن با نرم‌افزار Isoplot 3.7 (Ludwig, 2008) به دست آمد. تصحیح سنی برای نسبت‌های $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ بر پایه سن به دست آمده از سن‌سنجی به روش Rb-Sr (سن ۵۸ میلیون سال) انجام شده است. داده‌ها در جدول ۱ آورده شده‌اند.

303 جدا شدند. جدایش این کانی‌ها به روش دستی و در زیر میکروسکوپ دوچشمی انجام شد و در هاونی از جنس آگات پودر شدند. پودر نمونه‌های سنگی به همراه کانی‌های جدا شده برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های استرانسیم و نئودیمیم به دانشگاه آویرو پرتغال فرستاده شدند. در این آزمایشگاه، پودر نمونه‌های برگزیده در محلول HF/HNO₃ و در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، به مدت سه روز حل شد. پس از تبخیر محلول به دست آمده، نمونه‌ها را در HCl حل کرده و سپس خشک کردند. کروماتوگرافی در دو مرحله انجام شد: جدایش استرانسیم و دیگر عناصر کمیاب خاکی در لوله‌های تبادل یونی با رزین AG8 50W Bio Rad و خالص‌سازی نئودیمیم از دیگر عناصر

جدول ۱- داده‌های ایزوتوپی استرانسیم و نئودیمیم برای سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) و کانی‌های هورنبلند و پلاژیوکلاز جداسازی شده از نمونه Kh-303.

Sample No.	X	Y	Sr (ppm)	Rb (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Error (2s)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Nd (ppm)	Sm (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	Error (2s)	e_{Nd}	T _{DM}
Kh-316	703854	3588517	1180	45.5	0.112	0.003	0.7046	21.2	4.15	0.118	0.006	3.12	0.46
KH-31	703163	3586286	788.4	68.7	0.252	0.007	0.7047	23.7	4.95	0.126	0.007	2.60	0.54
Kh-222	703061	3587059	1048	55.1	0.152	0.004	0.7049	21.2	4.22	0.120	0.006	2.16	0.54
Kh-381	702475	3585113	972.3	68.7	0.214	0.006	0.7047	25.7	5.19	0.122	0.007	2.88	0.49
Kh-303	702020	3585800	1065.1	87.3	0.237	0.007	0.7047	25.3	4.93	0.118	0.006	3	0.48

در آزمایشگاه ACME کانادا (با روش آماده‌سازی ذوب قلیایی) تجزیه شد. دقت دستگاه برای عناصر اصلی ۰/۰۱ درصد، برای عناصر کمیاب ppm ۰/۱ و برای عناصر خاکی نادر ppm ۰/۰۱ است. داده‌های تجزیه در جدول ۲ آورده شده است. نمودارهای زمین‌شیمیایی با نرم‌افزار GCD kit 3.0 (Janousek et al., 2006) رسم شده‌اند.

زمین‌شیمی کل سنگ: برای بررسی اکسیدهای اصلی به روش XRF، ۱۰ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی منطقه، با کمترین دگرسانی، برگزیده و در آزمایشگاه شرکت طیف کانساران بینالود با دستگاه فیلیپس مدل II تجزیه شدند. پس از بررسی داده‌های تجزیه عناصر اصلی، همان نمونه‌ها برای عناصر فرعی و خاکی نادر به روش ICP-MS

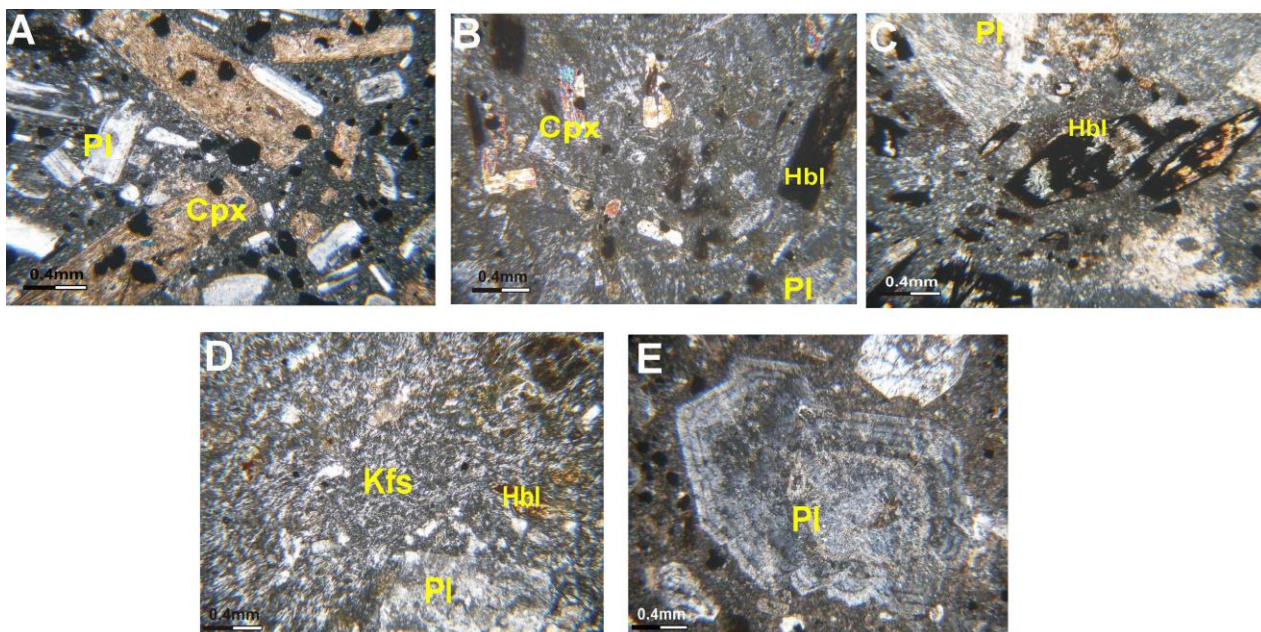
جدول ۲- داده‌های تجزیه عناصر اصلی، کمیاب و خاکی نادر سنگ‌های آذرین بیرونی منطقه خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) $(Eu/Eu^* = Eu / \sqrt{(Sm \times Gd)})$.

Sample No.	KH-479	KH-403	KH-381	KH-303	Kh-481	KH-316	KH-31	KH-222	Kh-60	Kh-418
Latitude	704501	705062	702475	702020	702691	703854	703163	703061	704570	703793
Longitude	3584826	3584547	3585113	3585800	3588427	3588517	3586286	3587059	3584545	3586674
Lithology	Px andesite	Px andesite	Hbl-Px andesite	Hbl-Px andesite	Hbl-Px andesite	Hbl andesite	Hbl andesite	Hbl andesite	Hbl andesite	Hbl Andesite
SiO ₂	57.72	58.56	60.07	57.8	56.79	62.97	54.52	60.14	55.91	62.69
TiO ₂	0.65	0.63	0.69	0.55	0.62	0.49	0.7	0.57	0.63	0.38
Al ₂ O ₃	16.21	16.20	14.62	16.88	16.72	15.36	15.47	14.71	15.7	14.67
FeOt	5.6	5.19	5.75	5.53	6.2	4.34	5.95	5.48	6.15	5.67
MnO	0.13	0.15	0.17	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.15
MgO	3.49	3.51	2.65	3.54	3.14	1.58	3.46	2.45	4.42	1.16
CaO	6.24	4.14	6.35	4.48	6.58	6.64	7.76	6.07	4.03	5.64
Na ₂ O	3.42	4.52	3.23	4.52	3.83	2.76	2.86	3.29	4.67	2.99
K ₂ O	2.17	3.58	3.04	3.42	2.98	1.77	2.88	2.48	3.4	2.83
P ₂ O ₅	0.5	0.39	0.42	0.4	0.49	0.25	0.37	0.34	0.43	0.28
LOI	3.05	2.69	2.15	1.93	1.59	2.96	5.02	3.39	3.61	2.81
Total	99.18	99.19	99.14	99.21	99.11	99.29	99.17	99.10	99.13	99.27
ASI	0.84	0.86	0.72	0.87	0.78	0.82	0.70	0.74	0.84	0.81
Ba	577	722	539	633	537	1058	607	670	562	1299
Rb	42.8	87.3	68.7	83.6	71.7	45.5	68.7	55.1	85.5	68.8
Sr	115.6	1065	927.3	882.3	879.4	1189	788.4	1048	856.8	700
Zr	109.3	108.6	104.5	109.5	110.6	95.4	104.5	93.6	117.5	74.8
Nb	4.4	5.1	3.4	4.8	4.8	3.6	4.1	3.3	4.7	3.4
Ga	16.6	17.1	20.1	18.1	19.2	16.1	2.7	16.9	17.4	9.8
La	25.5	25.7	27.3	27	29.6	23.3	23.8	23.5	28.3	18.1
Ce	48.5	51.6	52.8	49.4	55.3	47.2	51.5	44.9	56.4	34.2
Pr	6.07	6.15	6.34	6.17	6.7	5.19	5.80	5.20	6.92	4.11
Nd	23.7	25.3	25.7	25.1	27.4	21.2	23.7	21.2	27.6	16.1
Sm	4.74	4.93	5.19	4.94	5.49	4.15	4.95	4.22	5.36	3.39
Eu	1.38	1.42	1.45	1.39	1.51	1.21	1.39	1.25	1.42	0.99
Gd	4.57	4.28	4.84	4.55	4.9	3.82	4.78	3.98	4.47	3.41
Tb	0.60	0.63	0.63	0.59	0.64	0.56	0.69	0.58	0.61	0.48
Dy	3.35	3.21	3.29	3.31	3.81	3.03	3.56	3.59	3.41	2.83
Ho	0.71	0.73	0.78	0.65	0.68	0.67	0.79	0.72	0.65	0.57
Er	1.69	1.90	2.11	1.75	1.87	1.85	2.01	2.11	1.90	1.58
Tm	0.26	0.31	0.29	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.28	0.24
Yb	1.75	2.08	2.23	1.71	2.01	1.78	1.98	2.02	1.82	1.65
Lu	0.27	0.35	0.29	0.29	0.31	0.31	0.36	0.33	0.28	0.26
Y	18.5	18.2	18.2	18	19.7	16.6	19.7	18.7	18.6	15.5
Eu/Eu*	0.91	0.95	0.88	0.90	0.89	0.93	0.87	0.93	0.89	0.89
La/Yb _(N)	9.82	8.33	8.25	10.65	9.93	8.83	8.10	7.84	10.48	7.40

سنگ‌نگاری سنگ‌های آتشفشانی

برپایه ویژگی‌های میدانی و میکروسکوپی (ترکیب سنگی، فراوانی و نوع فنوکریست، زمینه، نوع و میزان کانی‌های مافیک) سنگ‌های آتشفشانی در منطقه خونیک را می‌توان به پنج گروه سنگی رده‌بندی کرد (شکل ۲). بافت بیشتر آنها پورفیری و تراکتی با زمینه شیشه‌ای تا بسیار دانه‌ریز است و در نمونه دستی به رنگ‌های خاکستری تا سبز تیره دیده می‌شوند. پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول و آلکالی‌فلدسپار کانی‌های اصلی هستند (شکل ۳). پلاژیوکلازها با ماکل

پلی‌سینتیک و ساخت منطقه‌ای دیده می‌شوند. برپایه روش میشل‌لوی و شناسایی زاویه خاموشی ماکل‌ها، پلاژیوکلازها الیگوکلاز-آندزین هستند. آمفیبول‌ها هورنبلند و بلورهای آنها شکل‌دار و بیشتر دارای لبه‌های سوخته (پاسیتی) و اکسیدی است. پیروکسن‌ها کلینوپیروکسن (اوزیست)، شکل‌دار با اندازه‌های گوناگون هستند و گاه کربناتی شده‌اند. آلکالی‌فلدسپار نیز در زمینه سنگ وجود دارد و تاندازه‌ای به کانی‌های رسی دگرسان شده است. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت و کانی‌های تیره است.



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی در نور XPL (Cross Polarized Light) از سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک. (A) فنوکریست‌های کلینوپیروکسن در پیروکسن‌آندزیت منطقه خونیک که کربناتی شده‌اند؛ (B) فنوکریست‌های هورنبلند با لبه‌های سوخته و کلینوپیروکسن در هورنبلند پیروکسن‌آندزیت؛ (C) فنوکریست هورنبلند در هورنبلند‌آندزیت؛ (D) هورنبلند تراکتی‌آندزیت؛ (E) منطقه‌بندی در پلاژیوکلازهای سنگ آندزیتی که در مرکز کربناتی شده است. نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) است.

رخنمون کوچک در جنوب و باختر این محدوده دیده می‌شوند (شکل ۲). این سنگ‌ها به رنگ خاکستری تیره با بافت آفانیتیک هستند و در مقطع نازک دارای بافت پورفیری هستند. میزان فنوکریست ۲۰ تا ۲۵ درصد حجمی است. نزدیک

سنگ‌های آتشفشانی خونیک عبارتند از: پیروکسن‌آندزیت، هورنبلند پیروکسن‌آندزیت، هورنبلند تراکتی‌آندزیت و آندزیت (شکل‌های ۳- A تا ۳- E). پیروکسن‌آندزیت: این سنگ‌ها به صورت دو

(Tracy, 1995) و یا فرایندهای آلیش و هضم پدید آمده‌اند (McBirney, 2007).

هورنبلند تراکی آندزیت: این سنگ‌ها در بخش شمالی منطقه خونیک و در نزدیکی روستای درصالح رخنمون دارند (شکل ۲). بافت این سنگ‌ها بیشتر تراکیتی است. کانی‌های سازنده این سنگ بیشتر شامل ۱۰ تا ۱۲ درصد حجمی پلاژیوکلاز با اندازه ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر، ۷ تا ۱۰ درصد حجمی هورنبلند به صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با اندازه ۰/۱ تا ۰/۳ میلی‌متر و ۵ تا ۷ درصد حجمی آلکالی‌فلدسپار در اندازه ۰/۲ - ۰/۳ میلی‌متر هستند. آلکالی‌فلدسپار در هورنبلند تراکی آندزیت‌های منطقه بیشتر به صورت سانیدین با ماکل کارلسباد و به صورت فنوکریست تا میکروولیت دیده می‌شود. میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار به همراه کانی‌های رسی زمینه سنگ را می‌سازند (شکل ۳-D).

آندزیت: پراکندگی رخنمون‌های آندزیتی در شمال، باختر و جنوب منطقه است. ریخت‌شناسی آنها چندان مرتفع نیست. بافت آنها بیشتر پورفیری است. میزان فنوکریست ۱۵ تا ۳۰ درصد حجمی است. پلاژیوکلازهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار فراوان‌ترین کانی اصلی هستند و با منطقه‌بندی در اندازه‌های ۰/۲ تا ۲ میلی‌متر در زمینه دانه‌ریز تا شیشه‌ای سنگ دیده می‌شوند. پیروکسن و هورنبلند فنوکریست‌های این سنگ‌ها هستند. فراوانی کانی‌های تیره که ۵ تا ۷ درصد حجمی هستند گاه با اکسیدهای آهن جایگزین شده‌اند. برپایه روش میشل‌لوی، پلاژیوکلازهای سالم که منطقه‌بندی ندارند الیگوکلاز تا آندزین هستند. پلاژیوکلازها به کلسیت، اپیدوت و کلریت تبدیل شده‌اند و زمینه نیز به کانی‌های رسی و کلسیت دگرسان شده است. از مهم‌ترین کانی‌های فرعی می‌توان کانی‌های کدر (مگنتیت) را برشمرد (شکل ۳-E).

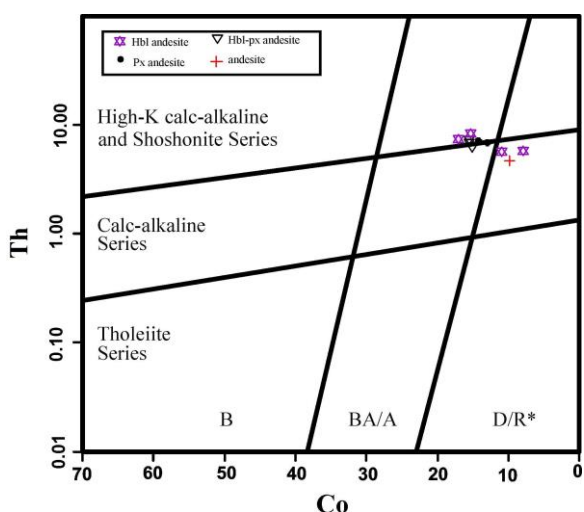
به ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی از این میزان پلاژیوکلازها (آندزین) با اندازه ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر هستند. فنوکریست‌های شکل‌دار کلینوپیروکسن (اوژیت) با اندازه ۰/۲ تا ۱/۲ میلی‌متر نزدیک به ۱۰-۸ درصد حجمی سنگ را می‌سازند. بیشتر پیروکسن‌ها به کربنات تبدیل شده و تنها قالبی از پیروکسن‌ها به جامانده است (شکل ۳-A).

هورنبلند پیروکسن آندزیت: این سنگ‌ها در بخش‌های باختری و جنوب‌باختری دیده می‌شوند. بافت این سنگ‌ها پورفیری بوده و شامل ۲۵-۳۰ درصد حجمی فنوکریست در زمینه ریزدانه است. فنوکریست‌ها شامل ۱۲ تا ۱۵ درصد پلاژیوکلاز با اندازه ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر، ۱۰-۸ درصد حجمی پیروکسن (اوژیت) در اندازه ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر و ۵ تا ۸ درصد هورنبلند با اندازه ۰/۱ تا ۱/۵ میلی‌متر هستند. زمینه سنگ نیز شامل کانی‌های فنوکریست به همراه کانی تیره است. پلاژیوکلازها اغلب به کانی‌های رسی، سریسیت و کلسیت تبدیل شده‌اند. هورنبلند دارای لبه‌های سوخته بوده و در برخی بخش‌ها تنها قالب هورنبلندها به جامانده است (شکل ۳-B).

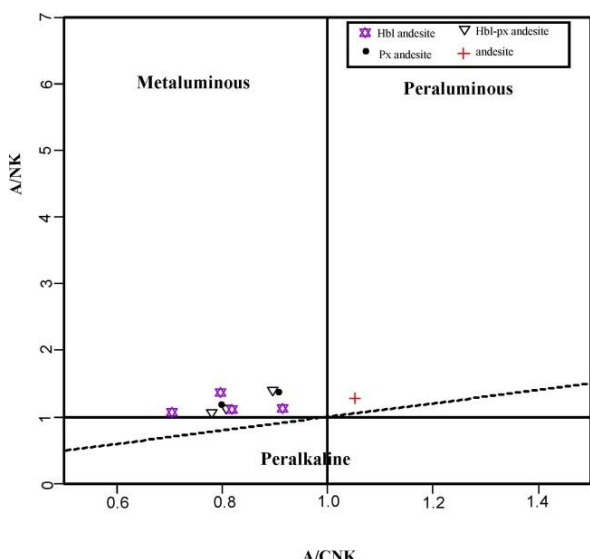
هورنبلند آندزیت: هورنبلند آندزیت فراوان‌ترین سنگ‌های آتشفشانی رخنمون یافته در منطقه است که در بخش‌های شمالی و باختری منطقه گسترده شده است. بافت این سنگ‌ها، بیشتر پورفیری است و شامل ۲۰ تا ۳۰ درصد حجمی فنوکریست است. فنوکریست‌ها شامل ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی پلاژیوکلاز با اندازه ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر، ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی هورنبلند در اندازه ۰/۲ تا ۱/۵ میلی‌متر هستند. هورنبلندها دارای حاشیه سوخته هستند و در پی اکسایش شدید، آمفیبول‌ها به مجموعه‌ای از کانی‌های تیره تبدیل شده‌اند. پلاژیوکلازها به کانی رسی و کلسیت دگرسان شده‌اند (شکل ۳-C). ساختارهای منطقه‌ای در پلاژیوکلاز و لبه‌های سوخته در هورنبلند، نشانه شرایط ناپایدار در هنگام تبلور بوده و چه بسا در پی بالآمدن پرشتاب ماگما (Blatt and

بررسی زمین‌شیمی و فرایندهای مؤثر در تحول ماگما

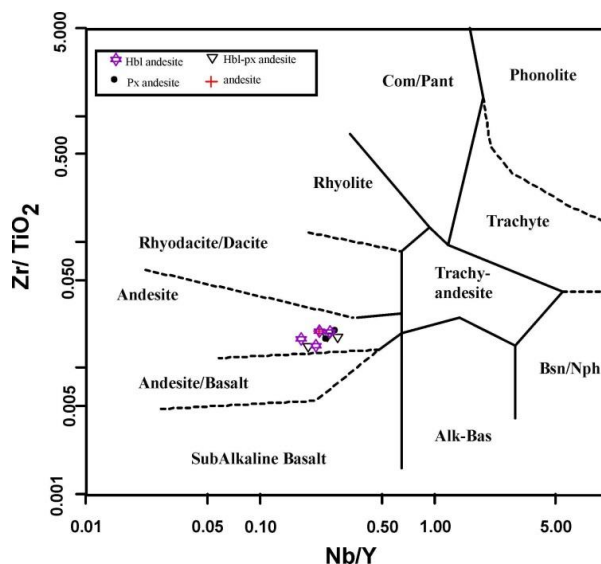
ترکیب شیمیایی این سنگ‌های آتشفشانی دارای بازه‌ای از سیلیس از ۵۵/۹۱ تا ۶۲/۹۷ است. مجموع عناصر آلكالین (Na₂O+K₂O) آنها ۸/۷ تا ۹/۵۸ است و میانگین TiO₂ آنها ۵/۲۹ است. میزان Al₂O₃ در این سنگ‌ها ۱۴/۶۲ تا ۱۶/۸۸ است. برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی (جدول ۲)، نمونه‌های منطقه خونیک در نمودار Winchester و Floyd (۱۹۹۷)، در محدوده آندزیت جای می‌گیرند (شکل ۴).



شکل ۵- سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) در نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007) (B): بازالت؛ BA/A: آندزیت بازالتی؛ آندزیت؛ *D/R: لاتیت و تراکیت).



شکل ۶- نمودار شناسایی اندیس آلومینیم (Shand, 1969) برای سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی).



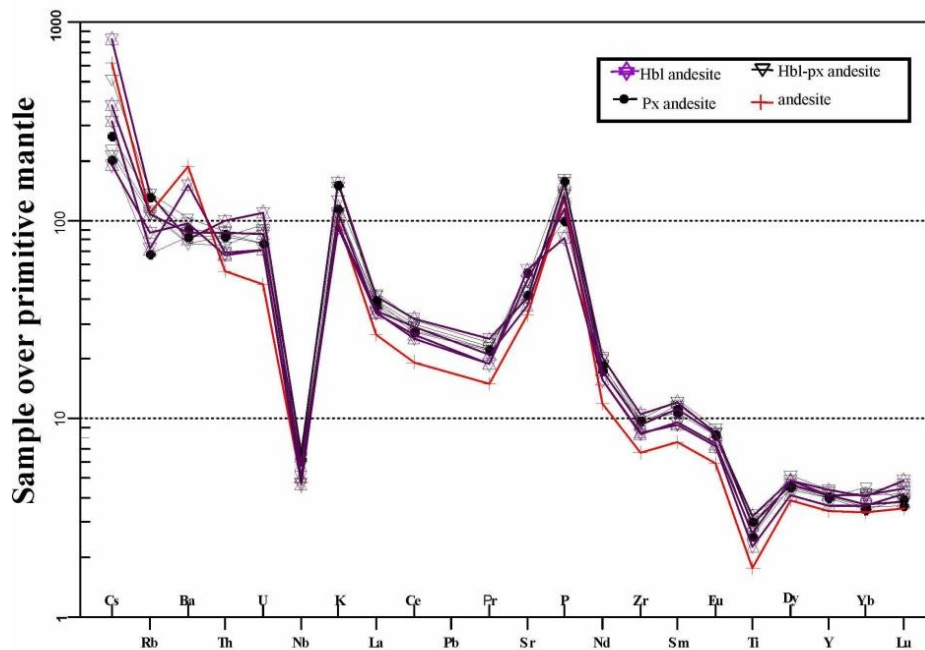
شکل ۴- سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) روی نمودار نامگذاری سنگ‌های آذرین بیرونی (Winchester and Floyd, 1977).

در نمودار عنکبوتی که برپایه Sun و McDonough (۱۹۸۹) در برابر گوشته اولیه به‌نکار شده است (شکل ۷)، تهی‌شدگی آشکاری در عناصر Ti و Nb دیده می‌شود. از سوی دیگر، این سنگ‌ها غنی‌شدگی از عناصر LILE (مانند: K, Ba و Sr) نشان می‌دهند (شکل ۷). بالا بودن نسبت LILE/HFSE و LREE/HREE از نشانه‌های فرورانش به‌شمار می‌رود

در نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007)، بیشتر نمونه‌ها در بخش کالک‌آلكالین و کالک‌آلكالین پتاسیم‌بالا تا شوشونیتی جای می‌گیرند (شکل ۵). میزان آلومین (Shand, 1969) نشان‌دهنده مت‌آلومینوس بودن نمونه‌هاست و تنها یک نمونه در محدوده پرآلومینوس جای گرفته است (شکل ۶).

همان‌گونه که نشان داده شده است سنگ‌های آتشفشانی محدود به گسترده‌ای دارای نسبت Ba/La (۱۹/۸) تا $71/70$ هستند و از گوشته (MORB) شناخته می‌شوند. همچنین، شکل ۸ نشان می‌دهد که خاستگاه این سنگ‌ها، در مقایسه با آغشتگی پوسته‌ای، بیشتر با ترکیبات فرورانش غنی شده است.

(Zanetti *et al.*, 1999; Winter, 2001; Wilson, 2007; Gill, 2010). غنی‌شدگی از LILE یا از خاستگاه گوشته‌ای به‌ارث رسیده است و پیشتر با ترکیب‌های پهنه فرورانش دچار متاسوماتیسم شده است و یا در پی آغشتگی کمان پوسته‌ای پدید آمده است (Liu and Liu, 2014). برای شناسایی فرایند مؤثر، از نمودار Ba/La در برابر

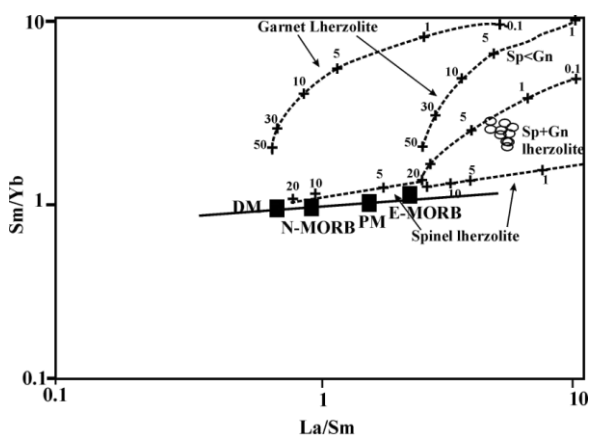


شکل ۷- سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) در نمودار عنکبوتی عناصر فرعی و کمیاب که در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) به‌نچار شده است.

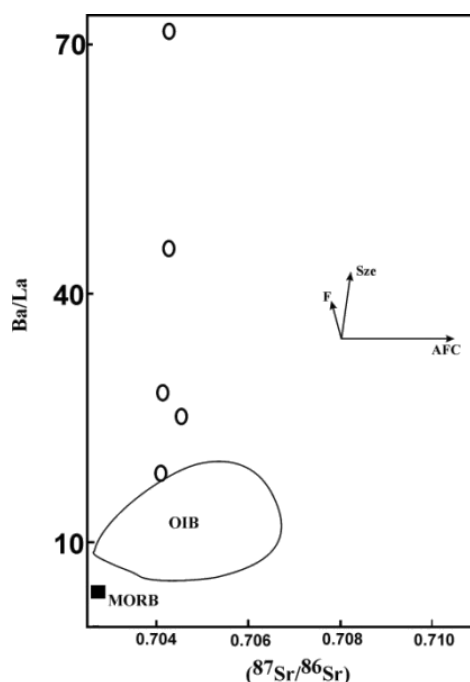
همچنین در پی نبود پلاژیوکلازهای کلسیک در فاز به‌جامانده و یا فوگاسیته بالای اکسیژن (با تبدیل Eu^{+2} به Eu^{+3})، این عنصر نمی‌تواند وارد شبکه پلاژیوکلازهای کلسیک شده و در مایع جدایش یافته انباشته خواهد شد (Martin, 1999; Rollinson, 1993; Atherton *et al.*, 1985). پیدایش کانی‌های کدر مانند مگنتیت و هماتیت در سنگ‌ها نیز نشان‌دهنده درستی این پیشنهاد هستند.

در نمودار عنکبوتی به‌نچار شده در برابر کلدريت (شکل ۹)، الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب در سنگ‌های گوناگون با هم موازی هستند و نمونه‌ها از عناصر کمیاب سبک غنی شده‌اند. همخوانی الگوی تغییر عناصر خاکی نادر می‌تواند نشانه خاستگاه مشترک این سنگ‌ها باشد (Henderson, 1984). بی‌هنجاری منفی از Eu دیده نمی‌شود و این نشان می‌دهد پلاژیوکلازهای کلسیک کنترل‌کننده تحول ماگمایی بوده است.

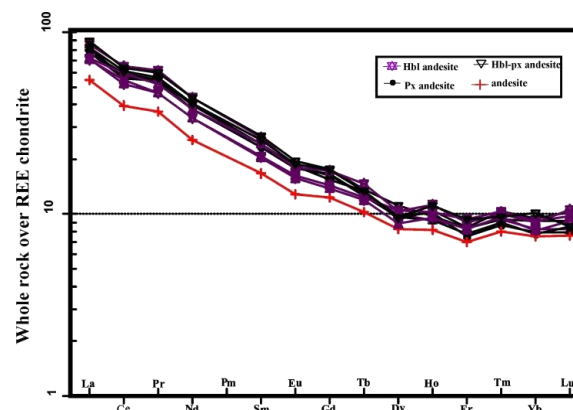
برای شناسایی ترکیب کانی‌شناسی خاستگاه و درجه ذوب‌بخشی سنگ‌های آتشفشانی این منطقه از نمودار Sm/Yb در برابر La/Sm (Aldanmaz *et al.*, 2000) بهره گرفته شد (شکل ۱۰). نمونه‌ها در محدوده میان اسپینل‌لرزولیت و اسپینل‌گارت‌لرزولیت جای گرفته‌اند (شکل ۱۰)؛ از این‌رو، خاستگاه آنها یک گارت‌اسپینل‌لرزولیت با مقدار گارت بسیار اندک و درجه ذوب‌بخشی ۱ تا ۵ درصد بوده است. نسبت کم $(La/Yb)_N$ (۸/۱ تا ۱۰/۶۵) پیامد میزان اندک گارت به‌جامانده در خاستگاه است. در نمودار Th/Yb در برابر Nb/Yb (Pearce *et al.*, 1995) نمونه‌های مربوط به منطقه خونیک در محدوده بالای آرایه گوشته‌ای و در پهنه فرورانش جای گرفته‌اند و با پیدایش در کمان ماگمایی همخوانی دارند (شکل ۱۱). برای سنگ‌های وابسته به پهنه فرورانش، افزایش عناصری مانند Th به‌دست سیال‌ها یا مذاب جداشده از ورقه فرورو، نسبت Th/Yb در خاستگاه را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰- سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) در نمودار Sm/Yb در برابر La/Sm . روند گوشته‌ای برپایه ترکیب گوشته تهی‌شده (McKenzie and O'Nions, 1991) و گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و منحنی‌های ذوب اسپینل‌لرزولیت و گارت‌پریدوتیت از Aldanmaz و همکاران (۲۰۰۰) رسم شده است. افزون‌بر این، خطوط و اعداد روی منحنی‌های ذوب نشان‌دهنده درجه ذوب‌بخشی برای یک خاستگاه گوشته‌ای است.



شکل ۸- سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) در نمودار Ba/La در برابر $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ (Davidson, 1987) (SZE: پهنه فرورانش، AFC: آغستگی پوسته‌ای، F: تأثیر احتمالی جدایش بلورین).



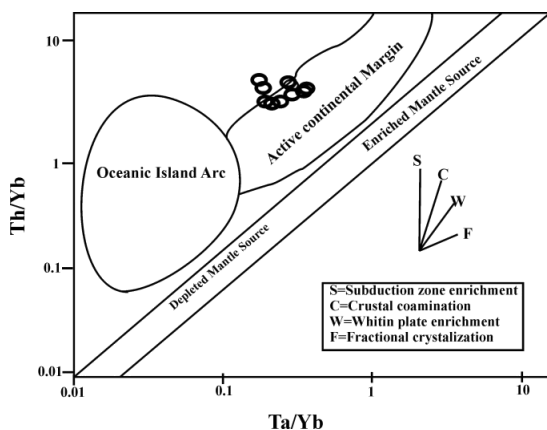
شکل ۹- نمودار عناصر خاکی نادر برای سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) که در برابر کندریت (Boynton, 1984) به‌نجار شده است.

برای بررسی نوع کانی به‌جامانده در خاستگاه و درجه ذوب‌بخشی می‌توان عناصر خاکی نادر را به‌کار برد. در این‌باره فراوانی عنصر به‌شدت ناسازگار La و کمتر ناسازگار Sm می‌تواند ترکیب کلی خاستگاه را نشان دهد (Aldanmaz *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2014).

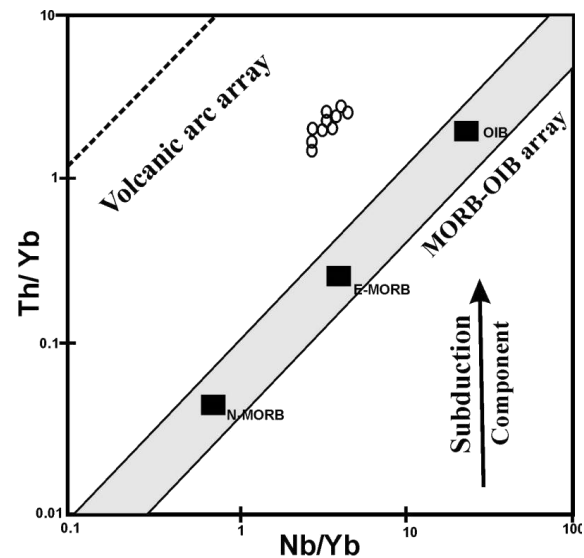
منطقه ماهرآباد و خونیک در ۷۰ کیلومتری جنوب‌باختری بیرجند Malekzadeh Shafaroudi, (2009) هستند.

سنگ‌های آتشفشانی منطقه از دیدگاه Ba/La ویژگی‌های سنگ‌های آذرین کمان ماگمایی را نشان می‌دهند. این نسبت برای N-MORB برابر ۴ تا ۱۰، برای E-MORB برابر ۱۰ تا ۱۵ و برای سنگ‌های آتشفشانی مرزهای واگرا بیش از ۱۵ است (Wood, 1980). در گدازه‌های منطقه خونیک این نسبت ۱۹/۷ تا ۷۱/۷ است. بالابودن این نسبت نشانه غنی‌شدگی گوشت‌های به‌دست سیال منطقه پیش از برخورد و در هنگام فروانش است (Pirmohammadi Alishah *et al.*, 2012).

به باور Pearce و Norry (۱۹۷۹) از نسبت عناصر کیمیا Zr/Y می‌توان برای شناسایی رژیم زمین‌ساختی استفاده کرد؛ زیرا مقدار $Zr/Y > 3$ نشان‌دهنده کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای و مقدار $Zr/Y < 3$ نشان‌دهنده کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی است. سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک دارای نسبت Zr/Y بیشتر از ۳ (۵ تا ۶/۳) هستند و در گروه کمان آتشفشانی قاره‌ای جای گرفته‌اند.



شکل ۱۲- شناسایی جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) در نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983).



شکل ۱۱- سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) در نمودار Th/Yb در برابر Nb/Yb (Pearce *et al.*, 1995). همه نمونه‌ها دارای نسبت بالای Th/Yb بوده و در بالای آرایه گوشت‌های و در نزدیکی آرایه کمان آتشفشانی جای گرفته‌اند.

جایگاه زمین‌ساختی و خاستگاه ماگمایی

شناسایی پهنه زمین‌ساختی سنگ‌ها در تفسیر سنگ‌زایی آنها بسیار مهم است (Pirmohammadi Alishah *et al.*, 2012). نمودارهای شناسایی پهنه‌های زمین‌ساختی ماگما (تکتونوماگمایی)، نمودارهای زمین‌شیمیایی هستند که ماگمای پدیدآمده و جایگاه‌های گوناگون زمین‌ساختی را برپایه شیمی آنها از یکدیگر جدا می‌کنند (Pearce and Cann, 1973). برای تشخیص جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983) به کار برده شد. برپایه این نمودار، این سنگ‌ها در کناره‌های فعال قاره‌ای پدید آمده‌اند (شکل ۱۲). از دیدگاه جایگاه زمین‌ساختی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک همانند توده‌های نیمه‌عمیق منطقه خونیک (Samiee *et al.*, 2014)، گرانیتوئیدهای منطقه کوه‌شاه در ۸۰ کیلومتری جنوب‌باختری بیرجند (Abdi *et al.*, 2010) و گرانیتوئیدهای

Sr در دو کانی و کل سنگ بهره گرفته می‌شود (Karimpour and Saadat, 2002). چگونگی برگزیدن کانی‌ها به گونه‌ای است که دارای بیشترین اختلاف در میزان روبیدیم باشند؛ پس در اینجا برای سن‌سنجی، از میزان استرانسیم و روبیدیم در کانی‌های هورنبلند و پلاژیوکلاز جدا شده از این سنگ، به همراه میزان این ایزوتوپ‌ها در کل سنگ بهره گرفته شد. این داده‌ها در جدول ۳ آورده شده‌اند. در شکل ۱۳، منحنی ایزوکرون برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه سن 58 ± 11 (Thanetian) را نشان می‌دهد.

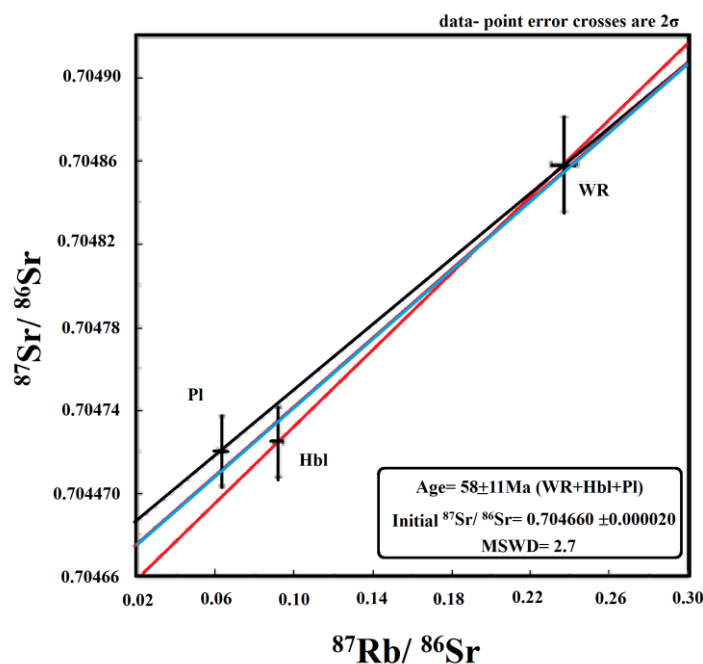
جدول ۳- داده‌های ایزوتوپی روبیدیم و استرانسیم کل سنگ و کانی‌های هورنبلند و پلاژیوکلاز جداسازی شده از نمونه Kh-303 در منطقه خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی).

Sample No.	Sr (ppm)	Rb (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Error (2 σ)
Kh-303	1065.1	87.3	0.237	0.007
Kh-303Plg	1939.4	42.3	0.063	0.0018
Kh-303Hbl	416	13.2	0.92	0.0026

زمین‌شناسی ایزوتوپ‌های استرانسیم و نئودیمیم

در زمین‌شیمی، ایزوتوپ‌های رادیوژنیک دو کاربرد پایه‌ای دارند. از دیدگاه تاریخی، نخستین بار این ایزوتوپ‌ها برای شناسایی سن سنگ‌ها و کانی‌ها به کار رفته‌اند و به‌تازگی نیز در بررسی‌های سنگ‌شناسی و شناسایی خاستگاه و فرایندهای زمین‌شناسی استفاده می‌شوند (Rollinson, 1993). از این‌رو، در این پژوهش، برای سن‌سنجی و شناسایی خاستگاه ماگمایی سنگ‌های آذرین بیرونی منطقه خونیک، ایزوتوپ‌های ناپایدار بررسی شدند:

سن‌سنجی به روش Rb-Sr با توجه به حساس بودن داده‌های ایزوتوپی Rb-Sr در برابر فرایندهای دگرسانی، نمونه سنگ آتشفشانی KH-303 با ترکیب سنگ‌شناسی پیروکسن‌هورنبلندآندزیت با کمترین دگرسانی هیدروترمالی و سوپرژن برای سن‌سنجی برگزیده شد. برای سن‌سنجی نیاز به ترسیم منحنی ایزوکرون است؛ از این‌رو، از تغییر ایزوتوپی Rb



شکل ۱۳- سن‌سنجی سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) به روش Rb-Sr. نمودار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در برابر $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ برای کانی‌های پلاژیوکلاز (Pl)، هورنبلند (Hbl) و کل سنگ (WR) برای نمونه KH-303 رسم شده است.

et al., 2011; Arjmandzadeh and Santos, 2014) و کوه‌شاه (Abdi and Karimpour, 2013) در بلوک لوت هستند. جایگیری نمونه‌ها در نزدیکی آرایه گوشته‌ای و مقدار مثبت اپسیلون نئودیمیم آنها نشانه خاستگاه گرفتن آنها از بخش گوشته استنوسفری تهی‌شده و خارج از پوسته قاره‌ای است (Rollinson, 1993; Zhang et al., 2006; Mao et al., 2014). مقایسه سنگ‌های آذرین بیرونی منطقه با سنگ‌های نیمه‌عمیق آذرین (Samiee et al., 2014) نشان‌دهنده خاستگاه همانند آنهاست (شکل ۱۴).

بحث و نتیجه‌گیری

منطقه خونیک بخشی از پهنه سنگ‌های آذرین درونی - بیرونی خاور ایران در بلوک لوت است. ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک گستره‌ای از سنگ‌های آندزیت تا تراکی‌آندزیت را دربر می‌گیرد. سن سنجی بر روی هورنبلند، پلاژیوکلاز و کل سنگ بر روی پیروکسن هورنبلند آندزیت سن 58 ± 11 میلیون سال (Thanetian) را برای سنگ‌های آتشفشانی موجود در منطقه خونیک پیشنهاد می‌کند.

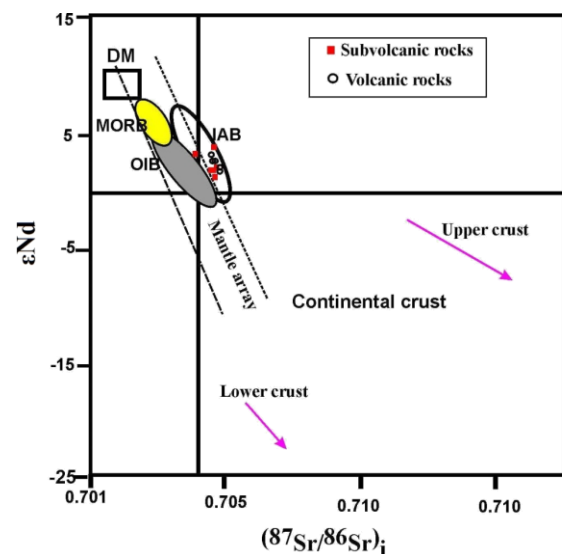
میزان کل عناصر خاکی نادر سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک، دارای غنی‌شدگی در عناصر خاکی نادر سبک هستند. از سوی دیگر، این مجموعه نسبت به HFSE تهی‌شدگی و در LILE غنی‌شدگی نشان می‌دهد. ویژگی‌های عناصر خاکی نادر و کمیاب آنها نشان‌دهنده پیدایش سنگ‌های ماگمایی منطقه در کمان ماگمایی وابسته به پهنه فرورانش در بلوک لوت است. شواهد زمین‌شیمیایی به‌همراه بالابودن نسبت Th/Yb در این گدازه‌ها نشانه ریشه‌گرفتن آن از یک پهنه فرورانش است.

نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd در همه نمونه‌ها

ترکیب ایزوتوپی استرانسیم و نئودیمیم: ترکیب

ایزوتوپی Sr-Nd در سنگ‌های آتشفشانی مربوط به منطقه خونیک در جدول ۱ آورده شده است. برای اندازه‌گیری میزان استرانسیم و نئودیمیم اولیه از سن ۵۸ میلیون سال پیش به‌دست‌آمده از داده‌های سن سنجی به روش Rb-Sr بهره گرفته شد. سنگ‌های آتشفشانی پالئوسن پایانی دارای نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه (0.7049 ± 0.0002) و میزان مثبت ϵNd $(+2.16)$ تا $(+3.12)$ هستند.

همان‌گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، همه نمونه‌ها به‌صورت خوشه‌ای و در بخش راست آرایه گوشته‌ای و درون محدوده IAB (بازالت‌های کمان‌های آتشفشانی) جای می‌گیرند.



شکل ۱۴- نمودار تغییر ایزوتوپی Sr-Nd (Arjmandzadeh et al., 2011; Arjmandzadeh and Santos, 2014) برای توده‌های نیمه‌عمیق و سنگ‌های آتشفشانی خونیک (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی) نشان‌دهنده جایگیری نمونه‌ها در بخش راست آرایه گوشته‌ای و همانند سنگ‌های نیمه‌عمیق منطقه خونیک است (DM: گوشته تهی‌شده؛ MORB: بازالت‌های پشته‌های میان‌اقیانوسی؛ OIB: بازالت‌های جزایر اقیانوسی؛ IAB: بازالت‌های جزایر کماتی).

این داده‌ها بسیار همانند نسبت‌های ایزوتوپی در مناطق ده‌سلم، چاه‌شلغمی (Arjmandzadeh

گارنت اسپینل لرزولیت پدید آمده‌اند. برپایه اهمیت بررسی‌های سنگ‌زایی در پهنه سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی بلوک لوت، بررسی سنگ‌های آتشفشانی منطقه خونیک، به فهم بهتر زمین‌شیمی و کانی‌سازی منطقه کمک می‌کند.

سپاس‌گزاری

این پژوهش به‌صورت طرح پژوهشی با پشتیبانی مالی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد و با کد شناسایی ۳/۱۸۳۰۵ به تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۲ انجام شده است.

بسیار همانند است و نشان می‌دهد که این سنگ‌ها هم‌خاستگاه هستند و هنگام فرایندهای جدایش ماگمایی (مانند تبلوربخشی) از مذاب‌های مادر یکسانی پدید آمده‌اند. ترکیب ایزوتوپی همسان بازالت‌های جزایر کمانی (IAB) نشان می‌دهد که ماگمای مادر در هنگام ذوب‌بخشی، در بالای پهنه فرورانش در گوه‌گوشته‌ای پدید آمده است. همچنین، این داده‌ها نشان می‌دهند که مذاب پدیدآمده از گوشته با پوسته آغشته نشده است. سنگ‌های آتشفشانی این منطقه از ذوب اندک (۵ تا ۱۰ درصد) یک خاستگاه

منابع

- Abdi, M. and Karimpour M. H. (2013), Petrochemical characteristics and timing of Middle Eocene granitic magmatism in Kooch-Shah, Lut Block, Eastern Iran. *Acta Geologica Sinica* 84(4): 1032–1044.
- Abdi, M., Karimpour, M. H. and Najafi, A. (2010) Geology, alteration and mineralization potential of Kuh- Shah region, South Khorasan. First Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Mashhad, Iran 1-7 (in Persian).
- Aghanabati, S. A. (2004) Geology of Iran. Geological survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Aldanmaz E., Pearce J. A., Thirlwall, M. F. and Mitchell, J. G. (2000) Petrogenetic evolution of late Cenozoic post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102: 67-95.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F. and Homam, S. M. (2010) Study of alteration zones, geochemistry and petrogenesis of Chahshaljami prospect area, East Iran. *Journal of Earth Science Research* 1(3): 74-89 (in Persian).
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M. and Homam, S. M. (2011) Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut block, eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 41: 283–296.
- Arjmandzadeh, R. and Santos, J. F. (2014) Sr–Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu–Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, eastern Iran. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* 103: 123-140.
- Atherton, M. P., Sanderson, L. M., Warden, V. and McCourt, W. J. (1985) The volcanic cover, chemical composition and the origin of the magmas of the Calipuy Group. In: *Magmatism at a Platt Edgi: The Peruvian Andes* (Eds. Pitcher, W. S., Atherton, M. P., Cobbing, E. J. and Beckinsale, R. D.) 273-284. Glasgow, Blackie Halstead Press.
- Blatt, H. and Tracy, R. (1995) *Petrology: Igneous, Sedimentary and Metamorphic*. W. H. Freeman Book Company, New York, USA.
- Boynton, W. V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry*. (Ed. Henderson, P.) 63-114. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.

- Davidson, J. P. (1987), Crustal contamination versus subduction zone enrichment: Examples from the Lesser Antilles and implications for mantle source compositions of island arc volcanic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51: 2185–2198.
- Gill, R. (2010) *Igneous Rocks and Processes*. Wiley-Blackwell, Malaysia.
- Hamooni, S. J., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Hajimirzajan, H. (2013) Geology, mineralization, geochemistry and petrology of intrusions of the Roud Gaz prospect area southeast of Gonabad. *Petrology* 4(15): 77-96 (in Persian).
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. and Mitchell, S. F. (2007) Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Petrology* 48(12): 2341-2357.
- Henderson, P. (1984) *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Oxford, New York.
- Janousek, V., Farrow, C. M. and Erban, V. (2006) Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology* 47:1255–1259.
- Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazaheri, S. A. and Haidarian Shahri, M. H. (2007) Magmatism and different types of mineralization in Lut block, 15th Symposium of Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, Ferdowsi University of Mashhad, Iran (in Persian).
- Li, D., He, D. F., Santosh, M. and Tang, J. Y. (2014) Petrogenesis of Late Paleozoic volcanics from the Zhaheba depression, East Junggar: Insights into collisional event in an accretionary orogeny of Central Asia. *Lithos* 184-187: 167–193.
- Liu, X. and Liu, W. (2014) Source characteristics and tectonic setting of the Early and Middle Devonian volcanic rocks in the north Junggar, northwest China: Insights from Nd–Sr isotopes and geochemistry. *Lithos* 184–187: 27–41.
- Ludwig, K. R. (2008) *User's manual for Isoplot/Ex version 3.70. A geochronological tool kit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special, Publication No. 4.
- Malekzadeh Shafaroudi, A. (2009) Geology, mineralization, alteration, geochemistry, micro thermometry, radioisotope and petrogenesis studies of Khupik and Maherabad copper-gold porphyry prospect area. Ph. D. Thesis, Ferdowsi university of Mashhad, Razavi Khorasan, Iran.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Stern, C. R. (2014) The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore geology reviews* 65(2): 522–544.
- Mao, Q., Xiao, W., Fang, T., Windley, B. F., Sun, M., Ao, S., Zhang, J. and Huang, X. (2014) Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Early Permian alkaline magmatism in the Eastern Tianshan: Implications for tectonics of the Southern Altaids. *Lithos* 190–191: 37–51.
- Martin, H. (1999) Adakitic magmas: modern analogous of Archean granitoids. *Lithos* 46(3): 411-429.
- McBirney, A. R. (2007) *Igneous Petrology*. 3rd edition, Jones and Bartlett Learning, Burlington, Canada.
- McKenzie, D. and O'Nions, R. K. (1991) Partial melt distribution from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology* 32: 1021–1091.
- Pearce, J. A. (1983) The role of the subcontinental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: *Continental basalts and mantle xenoliths* (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230-249. Natwich Shiva, Cambridge.
- Pearce, J. A., Baker, P. E., Harvey, P. K. and Luff, I. W. (1995) Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich arc. *Journal of*

Petrology 36: 1073–1109.

- Pearce, J. A. and Cann, J. R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Planetary Science Letters* 19: 290-300.
- Pearce, J. A. and Norry, M. J. (1979) Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variation in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69: 33-47.
- Pirmohammadi Alishah, F., Ameri, A., Jahangiri, A., Mojtahedi, M. and Keaskin, M. (2012) Petrology and geochemistry of volcanic rocks from the south of Tabriz (Sahand volcano). *Petrology*: 3(9): 38-55 (in Persian).
- Rollinson, H. (1993) *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific and Technical, London, UK.
- Samiee, S., Karimpour, M. H., Haidarian Shahri, M. H., Santos, J. F. and Ghaderi, M. (2014) Petrography, geochemical characteristics, Sr-Nd isotopes and source of granitoid intrusions in Khunik prospecting area, south of Birjand. *Journal of advanced applied geology Ahvaz* 3(13): 63-79 (in Persian).
- Shand, S. J. (1969) *Eruptive Rocks: Their Genesis, Composition, Classification and Their Relation to Ore Deposits*. Hafner, New York, USA.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implication for mantle composition and processes. In: *Magmatism in Ocean Basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publication 42: 313–345. Geological Society, London.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Wilson, M. (2007) *Igneous Petrogenesis*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Winter, J. D. (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation protextures and setting of VMS mineralization in the Pilbara ducts using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325–344.
- Wood, D. A. (1980) The application of a 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 and Planetary Science Letters* 50: 11-30.
- Zanetti, A., Mazzucchelli, M., Rivalenti, G. and Vannuci, R. (1999) The Finero phlogopite-peridotite massif: An example of subduction-related metasomatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 134: 107-122.
- Zhang, H., Zhang, L., Harris, N., Jin, L. and Honglin, Y. (2006) U–Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 152: 75-88.