

Research Article

Geochemistry of basaltic rocks of Meshkin- Rasht Abad area (North of Zanzan)

Nayer Ajalli, Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu- Ali Sina University, Hamedan, Iran

n.ajalli@yahoo.com

Ashraf Torkian*, Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu- Ali Sina University, Hamedan, Iran

a-torkian@basu.ac.ir

Ebrahim Tale Fazel, Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu- Ali Sina University, Hamedan, Iran

e.talefazel@basu.ac.ir

Abstract

The Meshkin-Rasht Abad area is a small part of the western Alborz-Azərbayjan magmatic belt (AAMB). Field investigations reveal that andesitic-basalt rocks are the dominant rock units of the area with high-K calc-alkaline to shoshonitic affinities. On the basis of geochemical features all rocks are enriched in light rare earth elements (LREE), large ion lithophile elements (LILE) and have positive anomalies of Pb, U and Cs and Ti, Sr and Nb negative anomalies. These volcanic rocks have the criteria of active continental margin arcs on tectonomagmatic discrimination diagrams. Geochemical data, including low amounts of Cr, Ni, V, and Zr/Nb ratio suggest the enriched mantle source (lithospheric mantle) for the rocks under study. Moreover, the diagrams of the ratio of highly incompatible elements indicate the effect of slab-derived fluids on the magma generation. The Ce/Pb low value as well as various geochemical diagrams demonstrate that the magma is possibly contaminated by continental derived-crustal materials.

Key words: lithospheric mantle, volcanic rocks, calc- alkaline, western Alborz-Azərbayjan. Meshkin- Rasht Abad

* Corresponding author



زمین شیمی سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین - رشت آباد (شمال زنجان)

نیر اجلی، دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

n.ajalli@yahoo.com

اشرف ترکیان*، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

a-torkian@basu.ac.ir

ابراهیم طالع فاضل، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

e.talefazel@basu.ac.ir

چکیده

منطقه مشکین - رشت آباد بخش کوچکی از پهنه ماگمایی البرز باختری - آذربایجان (AAMB) است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهند سنگ‌های بازالت آندزیتی مهم‌ترین واحدهای سنگی منطقه هستند و سرشت کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی دارند. برپایه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، همه سنگ‌ها از عنصرهای خاکی کمیاب سبک (LREE) و عنصرهای لیتوفیل بزرگ یون (LILE) غنی شده هستند. همچنین، عنصرهای U، Pb و Cs ناهنجاری مثبت و Ti، Sr و Nb ناهنجاری منفی دارند. نمودارهای شناسایی تکتونوماگمایی نشان می‌دهند این سنگ‌های آتشفشانی ویژگی‌های کمان‌های مرز فعال قاره‌ای را دارند. داده‌های زمین‌شیمیایی شامل مقادیر کم V، Ni، Cr و نسبت Zr/Nb، خاستگاه گوشته‌ای غنی شده (گوشته سنگ‌کره‌ای) را برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه مشکین - رشت آباد پیشنهاد می‌کنند. افزون‌بر این، نمودارهای نسبت عنصرهای فرعی بسیار سازگار نشان‌دهنده تأثیر سیال‌های جدا شده از تخته فرورو در پیدایش ماگمای مادر هستند. نسبت کم Ce/Pb و نمودارهای زمین‌شیمیایی گوناگون، چه بسا نشان‌دهنده آرایش ماگما با مواد پوسته قاره‌ای هستند.

واژه‌های کلیدی: گوشته سنگ‌کره‌ای، سنگ‌های آتشفشانی، کالک‌آلکان، البرز باختری - آذربایجان، مشکین - رشت آباد

مقدمه

Azizi *et al.*, 2014; Yousefi *et al.*, 2017; (Sugden *et al.*, 2019; Fazlnia, 2019).

این پهنه در پی همگرایی صفحه عربی - آفریقایی و صفحه اوراسیا، برخورد چندین بلوک قاره‌ای و در ادامه، فرورانش اقیانوس تتیس به زیر اوراسیا پدید آمده است. ماگماتیسیم مرتبط با فرورانش در حاشیه

جریان‌های گدازه مافیک و حد واسط در برخی واحدهای زمین‌شناسی در شمال باختر ایران در کمربند کوهزایی نئوتتیس گسترده شده‌اند (Kheirkhah *et al.*, 2009, 2013; Neill *et al.*, 2013, 2015; Shafaii Moghadam *et al.*, 2014;

* نویسنده مسئول



قاره‌ای پدید آمده‌اند (Asiabanha *et al.*, 2009). پهنه‌ی ماگمایی البرز که منطقه‌ی مشکین-رشت آباد بخش از آن به‌شمار می‌رود، به درازای 600 کیلومتر و پهنای نزدیک به 100 کیلومتر با روند خاوری-باختری است. تفاوت‌های بسیاری میان دو بخش البرز خاوری و البرز باختری شناخته شده است. برپایه‌ی بررسی‌های Blourian (1994)، بخش خاوری دربردارنده‌ی توف و گدازه‌های بازیگ تا اسیدی با سرشت آکالن تا شوشونیتی و به سن ائوسن است؛ اما بخش باختری (که به نام پهنه‌ی ماگمایی البرز-آذربایجان خوانده می‌شود) از گدازه‌های آندزیتی و داسیتی به همان سن و توده‌های آذرین درونی فراوان، با ترکیب گرانیتوئید و سرشت کالک‌آکالن ساخته شده است (Moayyed, 2001; Nabatian and Ghaderi, 2013). توالی آتشفشانی منطقه‌ی مشکین-رشت آباد بخشی از پهنه‌ی ماگمایی ائوسن البرز باختری است. این پژوهش با بررسی ارتباط ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و رژیم زمین‌ساختی سنگ‌ها، به تبیین جایگاه زمین‌ساختی، خاستگاه و شرایط پیدایش ماگماهای سازنده‌ی سنگ‌های مافیک، به‌ویژه بازالت‌ها، می‌پردازد. امید است این پژوهش در روشن‌شدن سرگذشت زمین‌شناسی منطقه مؤثر باشد.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه‌ی مشکین-رشت آباد بخشی از پهنه‌ی ماگمایی ترشیری البرز باختری است که در 45 کیلومتری شمال باختری شهرستان زنجان، در عرض جغرافیایی شمالی $36^{\circ}59'32''$ تا $37^{\circ}09'01''$ و طول جغرافیایی خاوری $48^{\circ}20'09''$ تا $48^{\circ}30'00''$ در جنوب نقشه‌ی زمین‌شناسی 1:100000 هشتجین جای دارد (Faridi and Anvari, 2000) (شکل 1).

پی سنگ کهن پهنه‌ی ماگمایی البرز-آذربایجان (AAMB) از سنگ‌های دگرگونی ساخته شده است

اوراسیا در کرتاسه آغاز شده و با فرورانش صفحه‌ی عربی در پالتوسن ادامه یافته است و پس از آن برخورد تا کنون ادامه داشته است (Moritz *et al.*, 2016). ماگماتیسم سنوزویک در مرز فعال قاره‌ای در ایران در مناطق البرز، ارومیه-دختر و سنندج-سیرجان روی داده است. این ماگماتیسم در پالس‌های زمانی و مکانی گوناگون، سنگ‌های ماگمایی با ویژگی‌های زمین‌شیمیایی گوناگون پدید آورده است؛ اما ارتباط میان پالس‌های ماگمایی سنوزویک در شمال باختری ایران و فرورانش نئوتتیس، لایه‌لایه‌شدگی، برخورد و شکست تخته‌ی فرورو به‌طور قطعی شناخته نشده است (Shafaii Moghadam *et al.*, 2018). افزون‌بر این، درباره‌ی سازوکار دقیق پیدایش و جایگیری مذاب گوشته‌های نیز شبه‌هایی وجود دارد (Fazlnia, 2019). به باور برخی پژوهشگران، هنوز ذوب تخته‌ی فرورو و یا پوسته‌ی زیرین ادامه دارد (مانند: Azizi *et al.*, 2014; Lechmann *et al.*, 2018). اما بیشتر پژوهشگران استدلال‌های دیگری دارند. برای نمونه، ترکیب صفحه‌ی شکسته نئوتتیس و گوشته‌ی بالآمده (Allen *et al.*, 2013; Fazlnia and Kouzekoulani, 2012; Keskin, 2003; Kheirkhah *et al.*, 2009; Neill *et al.*, 2013, 2015; Shafaii Moghadam *et al.*, 2017; Özdamar *et al.*, 2014)، تضاد ضخامت سنگ‌کره‌ای (Sugden *et al.*, 2019)، ذوب‌شدگی در منطقه و ژرفای تجزیه‌ی آمفیبول‌ها (Allen *et al.*, 2013).

سکانس‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن یکی از پالس‌های ماگمایی مهم در طول پهنه‌ی کوهزایی نئوتتیس، هستند که بیشتر در بخش باختری پهنه‌ی ماگمایی البرز گسترده شده‌اند و دربردارنده‌ی رسوب‌های آواری، آذرآواری و سنگ‌های بازیگ کالک‌آکالن پتاسیک تا جریان‌های گدازه اسیدی هستند. این سنگ‌ها در پهنه‌ی زمین‌ساختی کمان

ردیفی از سنگ‌های آذرآواری (واحد E^t) توف سبز با لایه‌بندی منظم و میان‌لایه‌های گدازه‌های داسیتی-آندزیتی و بازالت‌آندزیتی (واحد E^t1) و توف‌های بازیگ با درون‌لایه‌های گدازه‌های تراکی‌بازالتی (واحد E^{V2}) هستند. مجموعه‌ای از سنگ‌های ریولیت، ریوداسیت با بافت پورفیریتیک (واحد OI^{V1}) و تراکی‌بازالت، تراکی‌آندزیت (واحد OI^{V2}) به سن الیگوسن با ناپیوستگی زاویه‌دار روی واحدهای سنگی ائوسن جای گرفته‌اند (Feizi *et al.*, 2016).

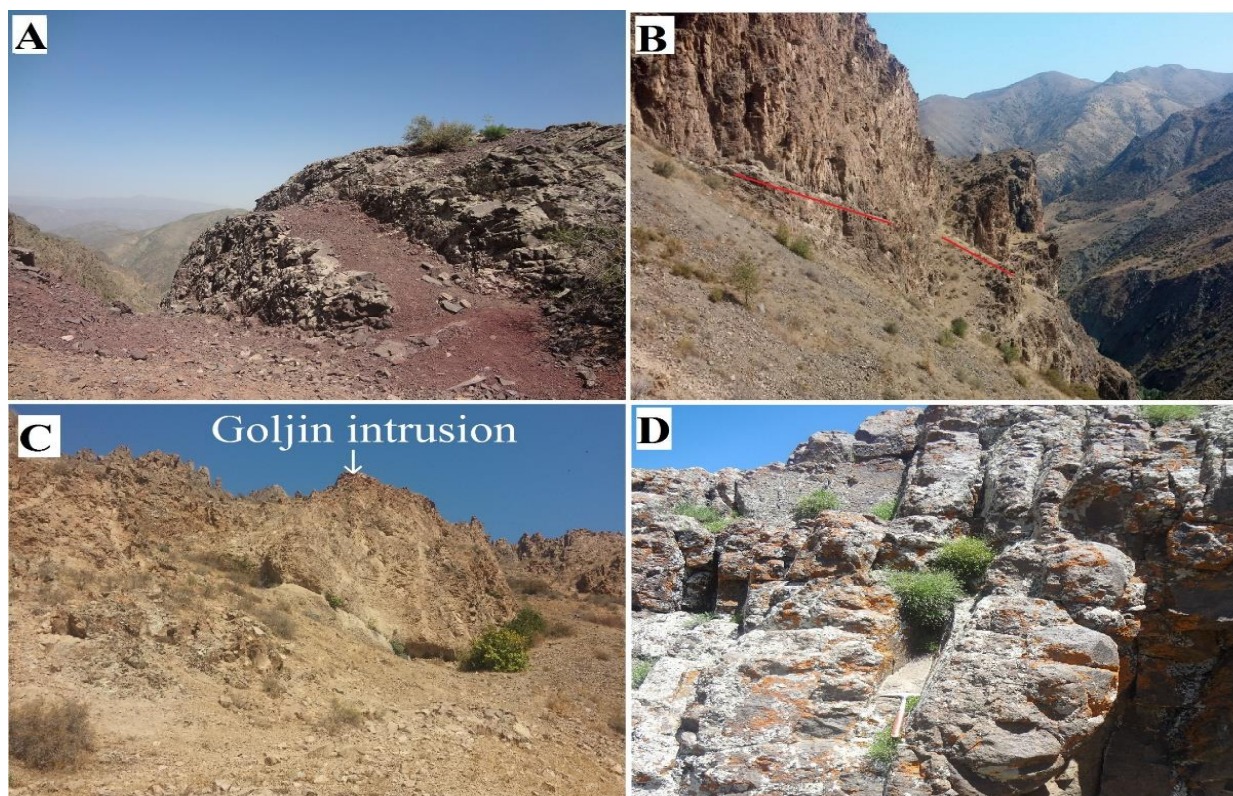
که در شمال‌باختری لاهیجان، جنوب‌باختری خوی، شمال تبریز و شمال-شمال‌باختری زنجان رخنمون دارند. سن این پی‌سنگ، نوپروتروزوییک بالایی-کامبرین زیرین است (Shafaii *et al.*, 2015). برپایه نقشه و برپایه بررسی‌های میدانی، بیشتر واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در این منطقه مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن هستند که با توده‌های آذرین نیمه‌ژرف و درونی الیگوسن قطع شده‌اند. سنگ‌های ائوسن (هم‌ارز با سازند کرج) شامل



شکل 1- نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه مشکین-رشت‌آباد برپایه نقشه 1:100000 هشتجین (Faridi and Anvari, 2000) (با تغییرات)

منطقه دچار چین خوردگی و گسلس شده و همزمان با آنها توده‌های آذرین درونی با ترکیب کوارتزمونزونیت و کوارتزسینیت (واحد OI^{qm}) در این منطقه پدید آمده‌اند (Mehrabi *et al.*, 2009) (شکل 2-C). سن این واحد توده آذرین درونی گلجین) به روش Ar^{40}/Ar^{39} ، برابر با $41/1 \pm 87/58$ میلیون سال پیش (اٹوسن میانی) به دست آمده است (Ghasemi Siani *et al.*, 2015).

سنگ‌های آذرین نیمه‌ژرف با ترکیب تراکی‌آندزیتی که به شکل‌های گوناگون (دایک، سیل، لاکولیت و رگه) (شکل 2-A) رخنمون دارند، درون واحدهای اٹوسن و الیگوسن تزریق شده‌اند. پراکندگی جغرافیایی این دایک‌ها معمولاً از روند خطی خاوری-باختری و هم‌راستا با گسل راستالغز رشت‌آباد پیروی می‌کند (شکل 2-B). در پی حرکت‌های زمین‌ساختی، نهشته‌های اٹوسن



شکل 2-A) رخنمون دایک بازالتی ارغوانی‌رنگ با روند خاوری-باختری (دید به سوی خاور)؛ B) گسل رشت‌آباد با روند خاوری-باختری (دید به سوی شمال)؛ C) توده آذرین درونی با ترکیب گرانیتی (گرانیت گلجین) که در نقشه زمین‌شناسی با نام اختصاری OI^{qm} شناخته می‌شود (دید به سوی شمال)؛ D) رخنمونی از واحد بازالتی (دید به سوی خاور)

روش انجام پژوهش

با دستگاه ICP-AES (طیف‌سنج جرمی پلاسمای انتشار اتمی) برای اندازه‌گیری عنصرهای اصلی و ICP-MS (طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی) برای عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب، با هدف بررسی‌های زمین‌شیمیایی در دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا (آمریکا) انجام شد. داده‌های به دست آمده از این آزمایش‌ها در جدول 1 آورده شده‌اند.

پس از انجام بررسی‌های کتابخانه‌ای و بررسی پژوهش‌های پیشین، از واحدهای سنگی نمونه‌برداری انجام شد. شمار 60 مقطع نازک از واحدهای سنگی منطقه تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان Zeiss بررسی شد. سپس برپایه تغییرات سنگ‌شناسی، شمار 10 نمونه برای انجام تجزیه‌های شیمیایی برگزیده و تجزیه شیمیایی آنها

جدول 1- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین-رشت‌آباد (اکسید عنصرهای اصلی برپایه درصدوزنی و عنصرهای فرعی برپایه ppm)

Sample No.	R56- 31	Zn- js1	Zn- M55	ZR- 516	R56- 13	ZR- 56	ZR- 58
Coordinate	48°22'36"E 37°05'02"N	48°29'19"E 37° 08'41"N	48°08'23"E 37°0.2'08"N	48°22'39"E 37°03'18"N	48°22'44"E 37°05'20"N	48°23'06"E 37°04'19"N	48°23'15"E 37° 04'05"N
SiO ₂	57.76	56.24	51.40	51.20	54.02	57.88	52.77
TiO ₂	0.98	0.98	1.03	0.97	1.19	0.85	0.95
Al ₂ O ₃	16.87	14.72	17.36	15.98	17.04	14.20	17.05
Fe ₂ O ₃	1.26	1.28	1.52	1.54	1.32	1.48	1.31
FeO	7.19	7.27	8.63	8.78	7.47	8.41	7.48
MnO	0.48	0.10	0.18	0.35	0.64	0.26	0.14
MgO	2.03	2.41	4.07	5.27	3.94	5.30	4.47
CaO	1.43	5.51	8.61	6.49	2.53	1.91	7.23
Na ₂ O	1.62	2.06	3.26	2.03	2.45	2.24	2.43
K ₂ O	6.70	3.14	1.44	4.63	5.99	2.22	3.79
P ₂ O ₅	0.31	0.47	0.39	0.31	0.41	0.23	0.32
LOI(900°C)	3.42	5.48	3.30	2.26	3.46	4.59	2.00
Sum	100.05	99.66	101.19	99.81	100.46	99.57	99.94
Li	40.80	13.00	17.10	29.90	52.50	64.70	27.10
Sc	15.20	22.10	24.70	26.40	25.60	23.90	24.80
V	94.50	207	246	238	223	174	216
Cr	5.14	39.90	74.50	104	43.10	60.20	44.80
Co	19.80	21.70	32.40	32.30	31.50	28.10	36.30
Ni	1.93	13.80	29.30	33.50	15.60	22.50	22.00
Cu	44.30	197	65.90	41.00	7.80	57.50	101
Zn	202	61.40	94.30	701	569	209	86.40
Rb	288	85.50	29.20	177	210	70.70	134
Sr	239	594	717	532	441	148	517
Y	31.30	25.90	26.30	24.20	33.30	18.10	25.90
Zr	191	155	191	155	100	124	166
Nb	15.90	14.10	14.70	12.30	12.10	9.79	12.50
Mo	0.25	0.98	0.65	1.13	1.12	4.66	1.04
Cd	0.03	1.58	0.21	1.26	1.10	0.314	0.12
Sn	1.70	2.03	2.70	1.75	2.00	1.43	1.60
Sb	3.91	0.32	1.52	3.44	6.85	3.00	3.05
Cs	9.37	3.16	0.30	3.89	6.31	0.73	2.08
Ba	1370	893	285	1150	1310	668	598
La	28.00	28.80	27.60	22.50	24.1	11.40	24.10
Ce	56.70	56.30	56.00	45.70	51.50	23.40	49.20
Pr	6.97	6.70	6.58	5.62	6.67	3.44	5.95
Nd	27.50	25.20	26.30	22.70	26.90	14.40	24.10
Sm	6.14	5.37	5.40	4.96	6.20	3.41	5.17
Eu	1.49	1.48	1.33	1.29	1.64	0.85	1.36
Gd	5.76	5.15	5.15	4.80	6.18	3.32	5.04
Tb	0.91	0.81	0.77	0.72	0.96	0.52	0.78
Dy	5.33	4.58	4.59	4.3	5.35	3.13	4.59
Ho	1.13	0.94	0.93	0.89	1.08	0.69	0.92
Er	3.14	2.70	2.67	2.45	2.99	1.98	2.67
Tm	0.47	0.39	0.40	0.37	0.42	0.30	0.39
Yb	3.07	2.64	2.61	2.35	2.74	2.02	2.54
Lu	0.45	0.39	0.40	0.36	0.39	0.30	0.38
Hf	4.99	3.86	4.76	4.21	2.68	3.38	4.18
Ta	1.03	0.85	0.94	0.78	0.74	0.63	0.83
Tl	1.82	0.90	0.30	0.84	1.26	0.46	0.58
Pb	13.20	11.00	16.30	72.1	161	35.00	9.14
Th	7.98	5.60	10.00	7.53	5.00	5.66	7.44
U	2.32	1.84	3.32	2.41	1.42	2.74	2.23
Mg#	33.51	37.15	45.68	51.70	48.49	52.93	51.58
Ta/Yb	0.33	0.32	0.36	0.33	0.27	0.31	0.32
Th/Yb	2.59	2.12	3.83	3.20	1.82	2.80	2.92
Nb/Y	0.50	0.54	0.55	0.50	0.36	0.54	0.48
Th/Y	0.25	0.21	0.38	0.31	0.15	0.31	0.28
La/Yb	9.12	10.90	10.57	9.57	8.79	5.64	9.48
Ba/La	48/92	31.00	10.32	51.11	54.35	58.59	24.81
Ba/Ta	1330	1050	303.19	1474	1770	1060	720
Zr/Nb	12.01	10.99	12.99	12.60	8.26	12.66	13.28
Ce/Pb	4.29	5.11	3.43	0.63	0.31	0.66	5.38
(La/Yb) _n	6.86	6.28	4.04	6.81	6.30	7.91	7.04

جدول 1- ادامه

Sample No.	ZR- 59Z	ZR- 517	ZR- RS12
Coordinate	48°23'15"E 37°04'05"N	48°22'38"E 37°03'18"N	48°25'00"E 37°05'14"N
SiO ₂	52.81	52.02	55.53
TiO ₂	0.90	0.83	0.87
Al ₂ O ₃	15.98	17.00	16.17
Fe ₂ O ₃	1.27	1.25	1.08
FeO	7.21	7.08	6.13
MnO	0.24	0.14	0.10
MgO	4.53	5.62	3.46
CaO	6.82	7.46	5.59
Na ₂ O	2.14	2.42	2.89
K ₂ O	2.94	3.85	3.16
P ₂ O ₅	0.27	0.30	0.34
LOI (900°C)	3.84	1.99	4.63
Sum	98.95	99.96	99.95
Li	25.70	24.70	40.80
Sc	26.30	25.70	17.60
V	201	208	196
Cr	67.20	119.00	62.00
Co	43.30	32.00	21.10
Ni	21.70	32.10	21.00
Cu	29.90	46.40	17.80
Zn	106	74.70	58.40
Rb	96.20	111	85.30
Sr	458	433	613
Y	24.40	22.00	23.00
Zr	152	137	160
Nb	11.80	11.00	13.00
Mo	0.87	0.96	0.71
Cd	0.07	0.08	0.17
Sn	1.57	1.61	1.81
Sb	3.26	3.13	0.79
Cs	2.81	2.24	59.3
Ba	680	499	559
La	22.20	18.90	26.80
Ce	43.20	39.20	52.20
Pr	5.41	4.87	6.31
Nd	21.70	19.80	24.20
Sm	4.74	4.39	5.05
Eu	1.26	1.10	1.30
Gd	4.68	d	4.65
Tb	0.74	0.66	0.72
Dy	4.30	3.87	4.10
Ho	0.88	0.80	0.86
Er	2.47	2.25	2.47
Tm	0.36	0.34	0.36
Yb	2.36	2.16	2.43
Lu	0.35	0.32	0.35
Hf	3.88	3.71	4.11
Ta	0.78	0.69	0.88
Tl	0.54	0.50	0.62
Pb	18.3	8.65	12.40
Th	6.68	6.59	8.84
U	2.02	1.93	3.12
Mg#	52.82	58.57	50.19
Ta/Yb	0.33	0.31	0.36
Th/Yb	2.83	3.05	3.63
Nb/Y	0.48	0.50	0.56
Th/Y	0.27	0.29	0.38
La/Yb	09.40	8.75	11.02
Ba/La	30.63	26.40	20.85
Ba/Ta	871.79	723	635
Zr/Nb	12.88	12.45	12.30
Ce/Pb	2.36	4.53	4.20
(La/Yb) _n	7.55	6.74	7.24

در این روش نزدیک به 0/2 گرم از پودر سنگ با لیتیم‌بورات (LiBO₂) ذوب و سپس در اسید HNO₃ حل می‌شود. محلول به‌دست‌آمده با دستگاه ICP-MS خوانش می‌شود. آستانه آشکارسازی عنصرهای اصلی 0/1 تا 0/01 درصدوزنی و برای عنصرهای فرعی 0/1 تا 10 ppm است. مقدار LOI (loss on ignition) در هر نمونه پس از حرارت در کوره با دمای میانگین 900 درجه سانتیگراد، برپایه اختلاف وزن آن با نمونه نخستین به‌دست آمد. در پایان با به‌کاربردن نرم‌افزارهای سنگ‌شناسی و گرافیکی به ترسیم نمودارها و سپس تفسیر این داده‌ها پرداخته شد.

سنگ‌نگاری

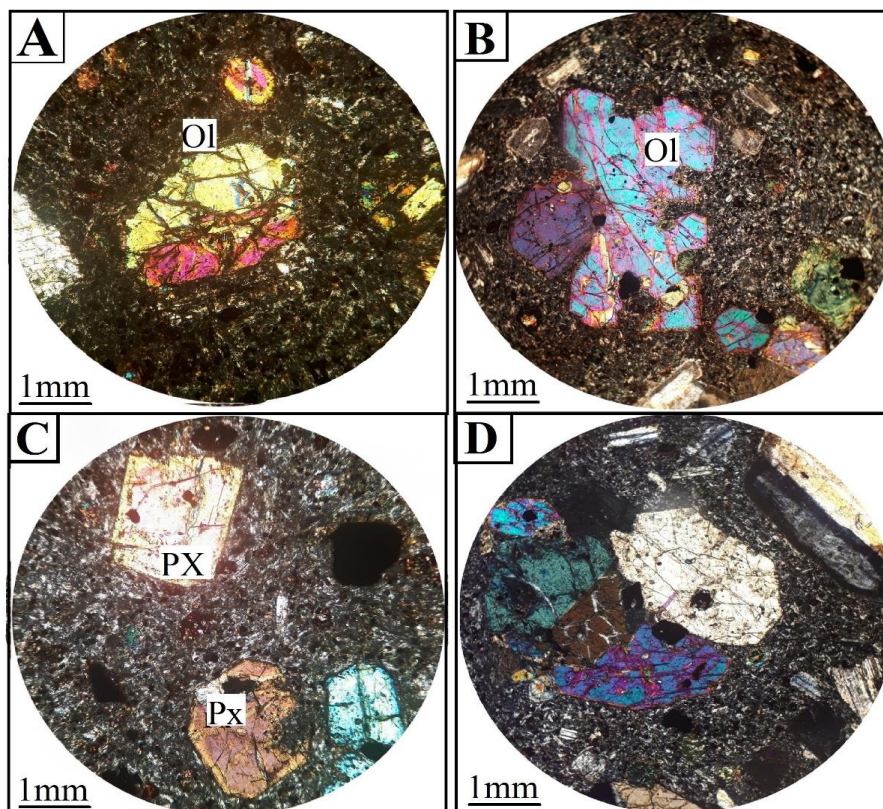
برپایه شواهد صحرایی واحدهای آتشفشانی ائوسن (هم‌ارز سازند کرج) بخش بزرگی از منطقه مشکین-رشت آباد را دربر می‌گیرند. این سنگ‌ها دربردارنده بازالت‌اندزیتی هستند که در شکل 1 به ترتیب در واحدهای E¹ و E^{V2} جای دارند. بازالت‌اندزیتی (شکل 2-D) به رنگ خاکستری و ارغوانی تیره دیده می‌شود و به ترتیب فراوانی از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و الیوین ساخته شده است. پلاژیوکلازها (30-60 درصدحجمی) بیشتر نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل هستند. این کانی‌ها هم به صورت درشت‌بلور و هم به صورت ریزبلور در خمیره سنگ دیده می‌شوند و نشانه‌هایی از دگرسانی‌های اپیدوتی‌شدن و سرسیتی‌شدن در آنها دیده می‌شوند. درشت‌بلورهای الیوین دارای فراوانی 0-15 درصدحجمی هستند. برپایه ریخت‌شناسی الیوین‌ها، بازالت‌اندزیتی به دو دسته رده‌بندی می‌شود:

1- بلورهای گردشده که ساختار بلوری ندارند

(شکل 3-A)؛

درصد حجمی به صورت مقاطع شش‌وجهی و یا ستونی دیده می‌شوند و برخی به کلریت دگرسان شده‌اند. بیشتر پیروکسن‌ها منطقه‌بندی دارند (شکل 3-C). در همه نمونه‌های بررسی شده بخش بزرگی از خمیره سنگ را میکروولیت‌هایی دربر می‌گیرند که بیشترشان پلاژیوکلاز و پیروکسن هستند. بافت غالب در این سنگ‌ها پورفیری (هیالومیکروولیتی پورفیریک) و پورفیری تدریجی است. همچنین، تجمع فنوکریست‌ها (پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیوین) در بیشتر نمونه‌ها بافت گلومروپورفیری را پدید آورده است (شکل 3-D).

2- بلورهای با خوردگی‌های خلیجی که با کلریت پر شده‌اند (شکل 3-B). الیوین‌ها از شمار کانی‌هایی هستند که در سنگ‌های آتشفشانی، تغییرات فیزیکی و شیمیایی ماگما را به خوبی و در غالب فرایند انحلال ماگمایی، به صورت تحلیل‌رفتگی، هضم سطوح و کناره‌های بلور و در پایان، پدید آمدن خلیج‌خوردگی نشان می‌دهند. انحلال و ناپایداری بلور، در پی عواملی مانند تغییر فشار و دما هنگام بال‌آمدن ماگما و یا تغییر ترکیب شیمیایی آن روی می‌دهد (Chen and Zhang, 2008). کلینوپیکروکسن‌ها با درصد فراوانی 10 تا 20

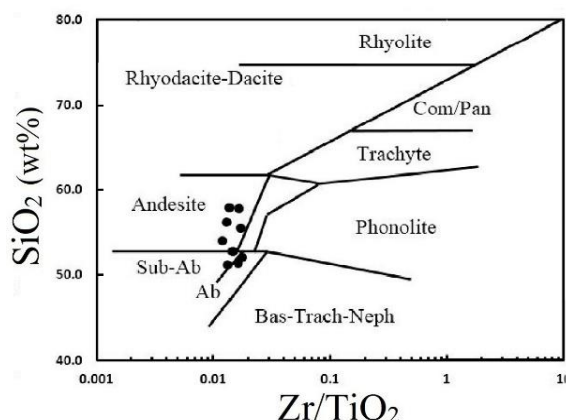


شکل 3- تصویرهای میکروسکوپی (در XPL) از نمونه‌های بازالتی منطقه مشکین-رشت‌آباد: (A) فنوکریست الیوین گرد شده و فاقد ساختار بلوری؛ (B) بلور الیوین با خوردگی خلیجی؛ (C) بلورهای کلینوپیکروکسن با منطقه‌بندی آشکار؛ (D) بافت گلومروپورفیری (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (2010): Ol: الیوین؛ Px: پیروکسن)

کمیاب و خاکی کمیاب برای سنگ‌های آتشفشانی بازالتی منطقه مشکین-رشت‌آباد در جدول 1 آورده

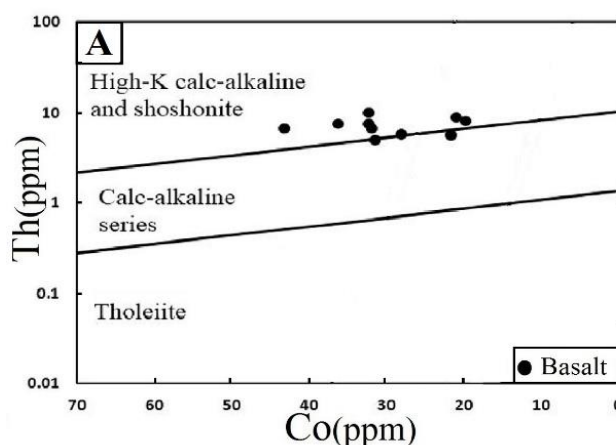
زمین‌شیمی سنگ کل

داده‌های تجزیه شیمیایی عنصرهای اصلی،



شکل 4- نمودار Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 برای رده‌بندی زمین‌شیمیایی سنگ‌های آذرین منطقه مشکین-رشت‌آباد (Winchester and Floyd, 1977)

برای شناسایی سری ماگمایی سنگ‌ها و دریافتن وابستگی آنها، نمودار عنصرهای کمیاب کم تحرک Co در برابر Th رسم شد (شکل 5-A). برپایه این نمودار، ترکیب سنگ‌های منطقه در محدوده کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی است (شکل 5-A). همچنین، نمودار Ta/Yb در برابر Ce/Yb نمونه‌ها در بخش سری کالک‌آلکان جای می‌گیرند (شکل 5-B).

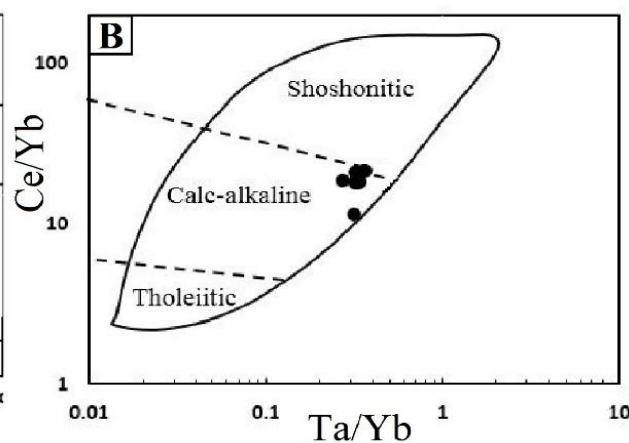


شکل 5- ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین-رشت‌آباد در: (A) نمودار Co در برابر Th (Hastie et al., 2007); (B) نمودار Ta/Yb در برابر Ce/Yb (Siddiqui et al., 2007)

سنگ‌های آتشفشانی مافیک- حد واسط منطقه

شده‌اند. در نمونه‌های منطقه مشکین-رشت‌آباد، میزان SiO_2 برابر با 51-58 درصدوزنی، Al_2O_3 برابر با 14-18 درصدوزنی، CaO برابر با 1-9 درصدوزنی، MgO برابر با 2-6 درصدوزنی و میزان FeO در این نمونه‌ها برابر با 6-9 درصدوزنی است. مقدار اکسیدهای سدیم و پتاسیم نیز به ترتیب برابر با 4-1 درصدوزنی و 7-1 درصدوزنی به دست آمده است.

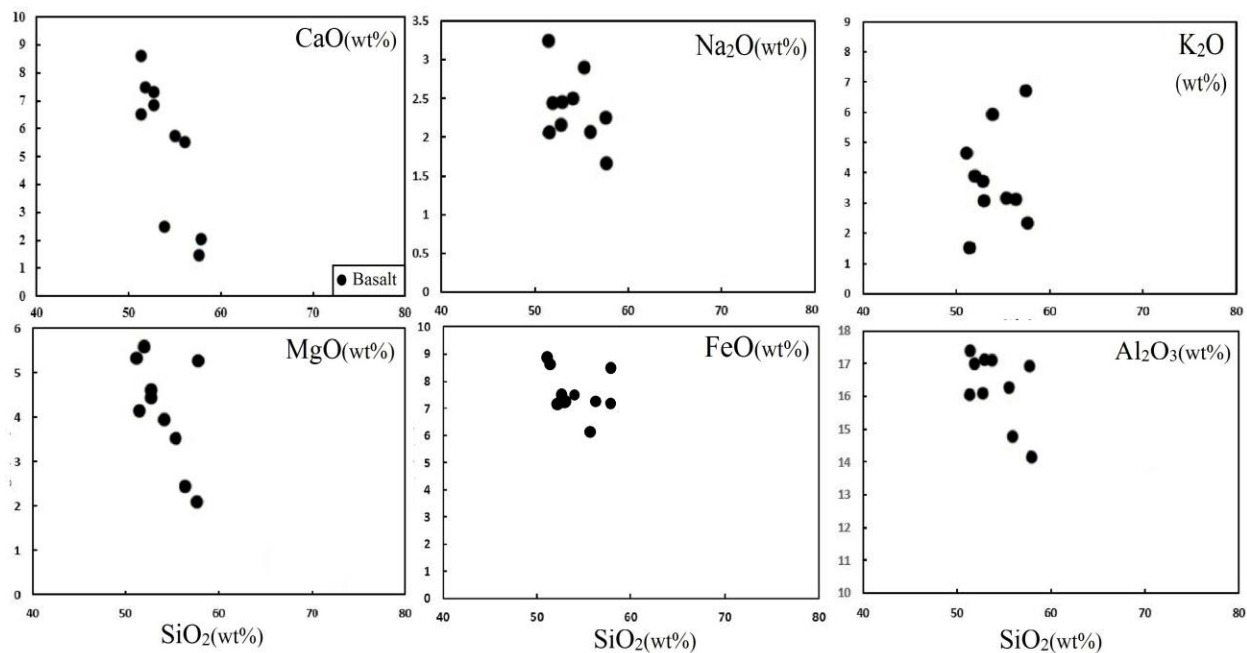
از آنجایی که فرایند دگرسانی تحرک عنصرهای قلیایی را در پی دارد، کاربرد داده‌های عنصرهای کم تحرک (مانند: Ti, Zr) برای نام‌گذاری و رده‌بندی سنگ‌ها قابل اعتمادتر است. از این‌رو، برپایه نمودار Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 (شکل 4)، سنگ‌های آتشفشانی مافیک منطقه مشکین-رشت‌آباد در محدوده ترکیبی بازالت‌آندزیتی-آندزیت (که در این مقاله با نام کلی بازالت از آنها نام برده می‌شود) جای گرفته‌اند. این یافته‌ها با بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی همخوانی پذیرفتنی نشان می‌دهند.



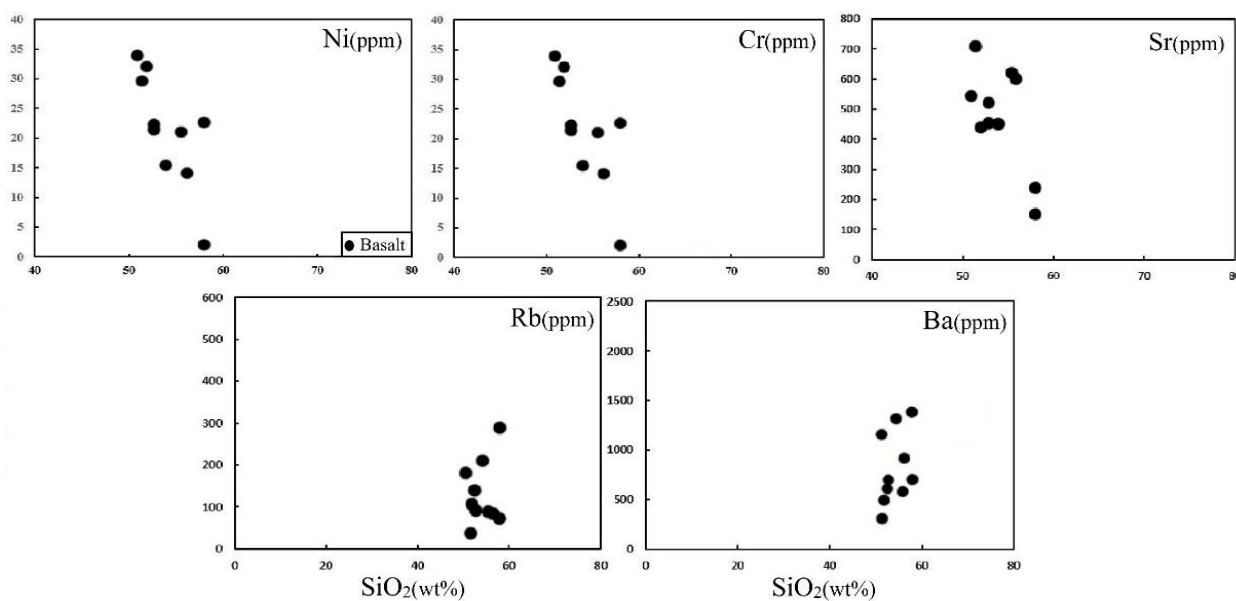
برای شناسایی فرایند تکاملی ماگمای سازنده

ماگما کاهش نشان می‌دهد. از سوی دیگر، برای بررسی سرشت فرایندهای زمین‌شناسی و نیز پیدایش مجموعه سنگ‌های منطقه نمودارهای عنکبوتی عنصرهای چندمتغیره به کار برده می‌شوند. برپایه نمودار تغییرات عنصرهای فرعی که در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) بهنجار شده‌اند (شکل 8-A)، بازالت‌ها کاهش آشکاری از عنصرهای سبک LILE به سوی HFSE نشان می‌دهند و این نکته از ویژگی‌های بیشتر ماگماهای وابسته به پهنه‌های فرورانش است (Seghedi *et al.*, 2001; Machado *et al.*, 2005; Yang and Li, 2008). در همه نمونه‌ها، عنصرهای K, Pb و Cs ناهنجاری مثبت دارند؛ به ویژه Pb که در سنگ‌ها، ناهنجاری بسیار مثبتی (100-1000 برابر) نشان می‌دهند. همچنین، از دیگر ویژگی‌های سنگ‌های بررسی شده تهی‌شدگی عنصرهای HFSE (مانند Hf, Zr, Sm, Y و Yb) است.

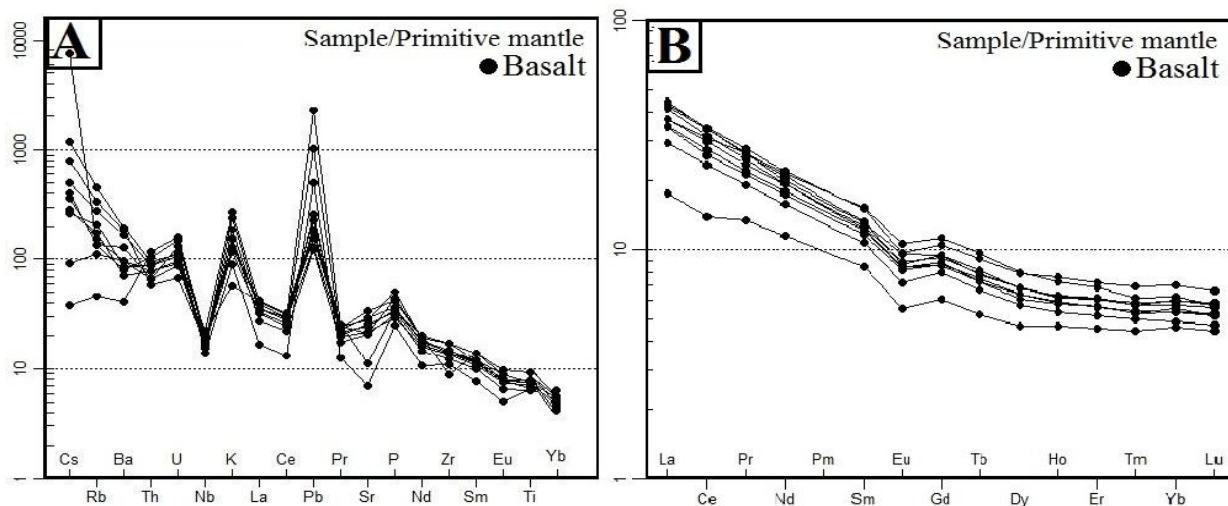
مشکین-رشت‌آباد، از نمودارهای تغییر عنصرهای اصلی (شکل 6) و فرعی (شکل 7) بهره گرفته شد. با افزایش SiO_2 میزان اکسیدهای FeO ، Al_2O_3 ، CaO ، MgO روندی کاهشی نشان می‌دهند؛ اما K_2O روند افزایشی دارد. عنصرهای فرعی مانند Ni و Cr با افزایش SiO_2 روندی کاهشی و رفتاری ناسازگار هنگام جدایش بلوری ماگما نشان می‌دهند؛ اما Rb و Ba افزایش نشان می‌دهند. همبستگی منفی میان FeO و MgO و نیز کروم و نیکل با SiO_2 شاخصی برای فرایند جدایش بلوری ماگما و نشان‌دهنده تبلوربخشی کانی‌های فرومنیزین الیومین و کلینوپیروکسن هنگام تبلور ماگما به شمار می‌رود (Wilson, 1989). همبستگی منفی میان نسبت‌های $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ در برابر محتوای SiO_2 شاید نشان‌دهنده جدایش بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در سنگ‌های آتشفشانی منطقه باشد (Herzberg and Zhang, 1996). در پی جانشینی Sr با کلسیم و ورود آن به شبکه پلاژیوکلاز کلسیم‌دار، Sr هنگام تکامل



شکل 6- ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین-رشت‌آباد در نمودارهای تغییرات اکسیدهای عنصرهای اصلی در برابر SiO_2



شکل 7- ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین - رشت آباد در نمودارهای تغییرات عنصرهای فرعی (بر پایه ppm) در برابر SiO_2



شکل 8- ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین - رشت آباد در: (A) نمودار تغییرات عنصرهای کمیاب بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه (Sun) (Sun and McDonough, 1989)؛ (B) نمودار تغییرات عنصرهای خاکی کمیاب بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)

در سنگ‌های بازیک برابر $7/91 - 4/04$ است. در کل، الگوی عنصرهای خاکی کمیاب سنگین الگوهای جدایش نیافته و مسطح و ناهنجاری منفی Eu را نشان می‌دهد (شکل 8-B). چنین الگوهایی برای عنصرهای HREE و نیز نشان Y می‌دهند ماگما بیرون از میدان پایداری گارنت پدید آمده است؛ اما ناهنجاری منفی یوروپیم و نیز استرانسیم چه بسا پایداری پلاژیوکلاز در خاستگاه را نشان می‌دهد (Wilson, 1989).

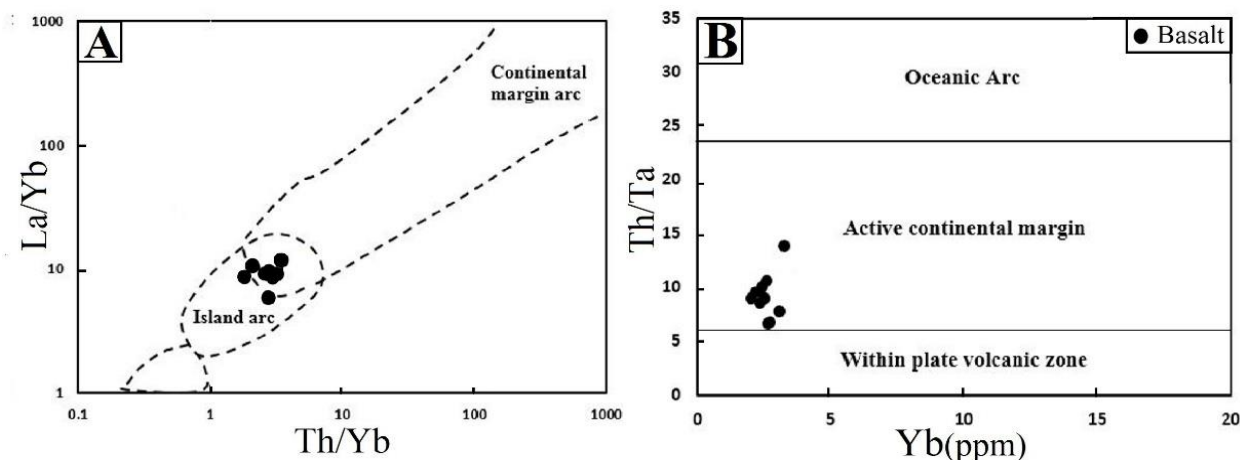
در شکل 8-B تغییرات عنصرهای خاکی کمیاب (REE) در نمودار بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، LREE بازالت‌های منطقه مشکین - رشت آباد غنی‌شدگی برابر با 20-40 برابر گوشته اولیه نشان می‌دهند. همچنین، میزان فراوانی عنصرهای خاکی کمیاب سبک آنها (LREE) نسبت به عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREE) غنی‌شدگی آشکاری نشان می‌دهد. نسبت

بحث

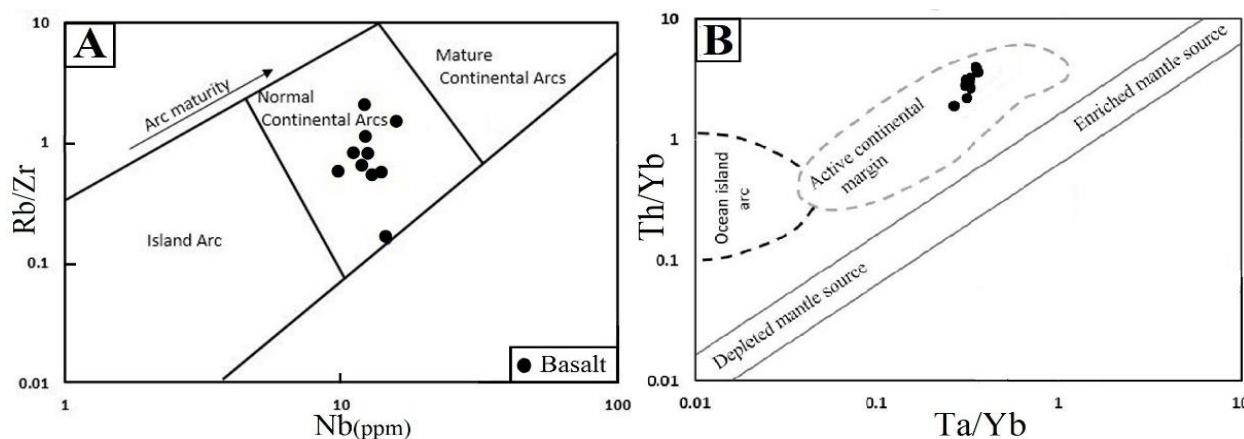
الف - جایگاه زمین‌ساختی

قاره‌ای برای پیدایش سنگ‌های منطقه است. نسبت Ba/La برای سنگ‌های N-MORB برابر با 4-10، برای E-MORB و بیشتر بازالت‌های درون‌صفحه‌ای برابر با 15-10 و برای سنگ‌های آتشفشانی مرز صفحه‌های همگرا بیشتر از 15 است (Wood, 1980). این نسبت در کمان‌های آتشفشانی بیشتر از پهنه‌های کششی و پهنه‌های پشت کمان است (Macdonald *et al.*, 2000). میزان این نسبت در بیشتر سنگ‌های منطقه برابر با 20 تا 58 است. افزون‌بر این ویژگی، نسبت Ba/Ta بالاتر از 450 نیز نشان‌دهنده مذاب‌های محیط کمان ماگمایی است (Macdonald *et al.*, 2000). این نسبت در نمونه‌های بررسی‌شده برابر با 635 تا 1770 است (مگر یکی از نمونه‌ها). Brown و همکاران (1984) با به‌کارگیری نسبت Nb در برابر Rb/Zr، کمان‌های ماگمایی را بر پایه میزان بلوغ آنها از یکدیگر شناسایی کرده‌اند (شکل 10-A). در این نمودار نمونه‌های منطقه مشکین-رشت‌آباد در محدوده کمان قاره‌ای نرمال (در برابر کمان‌های بالغ) جای گرفته‌اند (شکل 10-A). همچنین، در نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb سنگ‌های آتشفشانی منطقه ویژگی سنگ‌های مرز فعال قاره‌ای را نشان می‌دهند (شکل 10-B).

برای شناخت محیط زمین‌ساختی پیدایش سنگ‌های منطقه از داده‌های زمین‌شیمیایی به‌ویژه داده‌های عنصرهای کمیاب کم تحرک بهره گرفته شد. غنی‌شدگی LREE‌ها نسبت به HREE‌ها با الگوی کمابیش مسطح HREE‌ها (شکل 8-B) نشان‌دهنده ماگمایی با سرشت کالک‌آلکان (Machado *et al.*, 2005)، پیدایش سنگ‌ها در پهنه‌های فرورانش و گارنت‌داربودن سنگ خاستگاه (Wilson, 1989) هستند. همچنین، ناهنجاری منفی Eu از ویژگی‌های گدازه‌های کالک‌آلکان پهنه‌های فرورانش است (Tepper *et al.*, 1993; Yang and Li, 2008). یادآوری می‌شود عنصرهای LILE (مانند: K, Rb و Th) و نیز LREE (مانند: La, Ce و Nd) نسبت به HFSE غنی‌شدگی نشان می‌دهند. به باور Sajona و همکاران (1996)، این اختلاف نشان‌دهنده محیط‌های مرتبط با فرورانش است؛ زیرا که رسوب‌ها و مایعات همراه آنها این غنی‌شدگی غیرعادی را به‌دنبال داشته‌اند. از سوی دیگر، پراکندگی نمونه‌ها در نمودارهای Th/Yb در برابر La/Yb (شکل 9-A) و نیز Yb در برابر Th/Ta (شکل 9-B) نشان‌دهنده محیط زمین‌ساختی مرز فعال

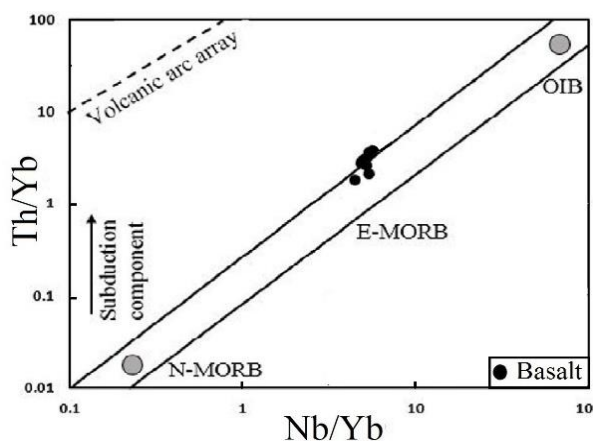


شکل 9- ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین-رشت‌آباد در نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی. (A) Th/Yb در برابر La/Yb (Condie, 1998)؛ (B) نمودار Yb در برابر Th/Ta (Gorton and Schandle, 2002)



شکل 10 - ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین - رشت‌آباد در: (A) نمودار Nb در برابر Rb/Zr (Brown *et al.*, 1984)؛ (B) نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (Wilson, 1989)

مستقیماً از ماگمای اولیه گوشته‌ای پدید نیامده است. مذاب به‌دست‌آمده از خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده (E-MORB) Zr/Nb کمتری نسبت به N-MORB (32) دارد (Sun and McDonough, 1989). مقدارهای کم تا متوسط Zr/Nb در سنگ‌های این منطقه (8-13)، مقدارهای کم Cr، Ni و V، غنی‌شدگی از LILE و LREE گواه بر خاستگاه غنی‌شده‌ای مانند گوشته سنگ‌کره‌ای (E-MORB) آنهاست. افزون‌بر این شکل 11 نیز گویای این نکته است.



شکل 11 - غنی‌شدگی خاستگاه ماگمای بازالت‌های منطقه مشکین - رشت‌آباد در نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb (Leat *et al.*, 2004)

همان‌گونه‌که در بحث محیط زمین‌ساختی در بالا گفته

ب - سنگ‌زایی (خاستگاه ماگمای سازنده)

بازالت‌ها ماگماهای کمابیش اصلی هستند که اطلاعات ارزشمندی از ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی خاستگاه خود در اختیار قرار می‌دهند. بازالت‌ها بخش‌های بزرگی از پهنه‌های زمین‌ساختی (مانند: پشته‌های میان‌اقیانوسی، مرز قاره‌ها، جزیره‌های کمانی و ...) را می‌سازند و در آنها بازالت‌ها به میزان چشمگیری دیده می‌شوند (Pearce and Cann, 1973). به باور بسیاری از پژوهشگران (مانند: Zhao and Zhou, 2007) ماگماهای مافیک عموماً از گوشته سنگ‌کره‌ای یا سست‌کره‌ای سرچشمه می‌گیرند. از سوی دیگر، این سنگ‌ها با داشتن عدد منیزیم بیشتر از 40 و به استناد تحقیقات (Kelemen, 2004) هم نمی‌توانسته‌اند مستقیماً محصول ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای باشند.

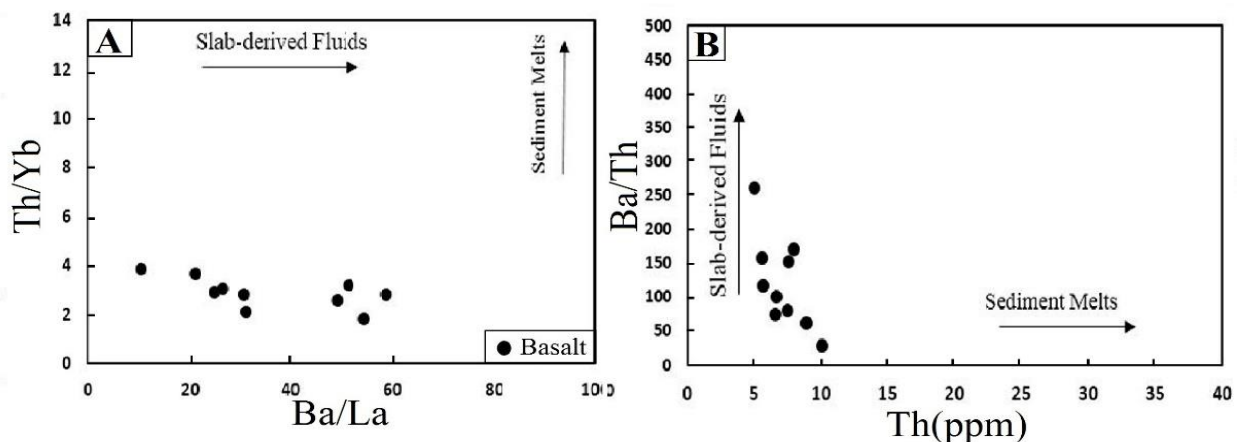
مقدار Mg# در بازالت‌های منطقه برابر با 59-33 است. از این‌رو، خاستگاه گوشته‌ای اولیه ($Mg\# > 70$) برای این سنگ‌ها نامحتمل است. همچنین، در ترکیب ماگماهای نخستین گوشته، $Cr > 1000$ ppm، $Ni > 400$ ppm و $Mg\# > 70$ است (Wilson, 1989)؛ اما برپایه مقدارهای کم Ni (1-33 ppm)، Cr (5-119 ppm)، V (94-246 ppm) و مقدار Mg# در بازالت‌های منطقه مشکین - رشت‌آباد، ماگمای این سنگ‌ها

هم جهت است (شکل 11).

برای تفکیک اجزای فرورانشی مشارکت‌کننده در ماگما، از نسبت عنصرهای فرعی بسیار ناسازگار، که کمتر تحت تأثیر درجات مختلف ذوب‌بخشی، تبلوربخشی و یا تجمع بلوری قرار گرفته‌اند، بهره گرفته می‌شود (Brenan *et al.*, 1995). بدین منظور باریم بدلیل تحرک بالای این عنصر در سیال جدا شده از تخته فرورو، بعنوان شاخص مشارکت سیال در خاستگاه ماگما بکار گرفته شده است (Brenan *et al.*, 1995). برپایه نمودار Ba/La در برابر Th/Yb (شکل 12-A) و برپایه روندهای نمایش داده شده گمان می‌رود مقدار بالای Ba/La گویای نقش سیال‌های جدا شده از تخته فرورو در تعیین ویژگی‌های شیمیایی خاستگاه سنگ‌های بازالتی باشد. نمودار Th در برابر Ba/Th نیز نقش سیال جدا شده از تخته فرورو در ویژگی‌های شیمیایی ماگمای مادر را نشان می‌دهد (شکل 12-B). در این نمودار بالابودن Th نشان‌دهنده تأثیر رسوب‌های پلاژیک در خاستگاه ماگماست؛ اما میزان بالای Ba/Th نشان‌دهنده تأثیر سیال آزاد شده از تخته فرورو در ترکیب ماگمای مادر است (Kirchenbaur *et al.*, 2009, Kirchenbaur and Münker, 2015).

شد محیط پیدایش سنگ‌های مافیک منطقه (بازالت‌های آندزیتی) از نوع محیط مرز فعال قاره‌ای است. با توجه به دخالت عوامل گوناگونی مانند ترکیب‌های جدایش‌یافته از تخته فرورو، حضور سیال‌های آزاد شده از پوسته اقیانوسی فرورو و نیز ماگماهای پدیدآمده در زیر پوسته قاره‌ای، این محیط یکی از محیط‌های پیچیده پیدایش ماگماها به‌شمار می‌رود. در این محیط در پی بالآمدن گوشته و دخالت تخته فرورو، ماگمای پدیدآمده ویژگی‌های مشترکی از بازالت‌های سنگ‌کره‌ای (و نیز E-MORB)، سیال‌های جدا شده از تخته فرورو و یا مذاب‌های پوسته قاره‌ای را به ارث می‌برد (Wilson, 1989).

برپایه بررسی‌های Leat و همکاران (2004)، غنی‌شدگی در خاستگاه بازالت‌ها با به‌کارگیری نسبت Nb/Yb در برابر Th/Yb بررسی می‌شود (شکل 11). در این نمودار Yb فاکتور بهنجارکننده برای Nb و Th است. عنصرهای Nb و Th ضریب جدایش یکسان در بلور و مذاب دارند. میزان Th در پهنه‌های فرورانش در ماگما افزایش می‌یابد؛ اما میزان Nb در این پهنه‌ها کاهش می‌یابد (Leat *et al.*, 2004). جهت پیکان در این نمودار نشان‌دهنده افزایش Th است و از این‌رو، غنی‌شدگی با سیال‌های جدا شده از سنگ کره فرورو در پهنه‌های فرورانش است که با روند غنی‌شدگی نمونه‌ها همسو و

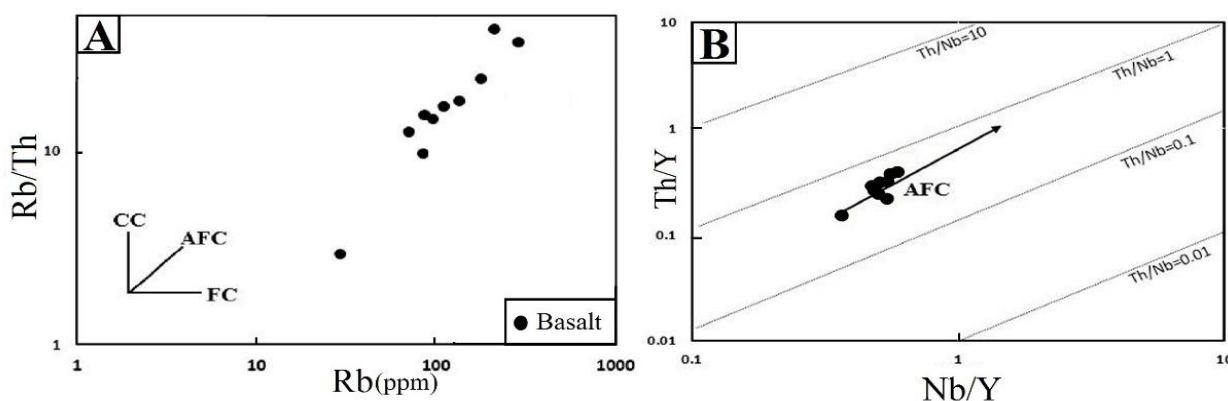


شکل 12 - ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین-رشت‌آباد و تأثیر سیال جدا شده از تخته فرورو در ترکیب ماگمای مادر آنها در: (A) نمودار Ba/La در برابر Th/Yb؛ (B) نمودار Th در برابر Ba/Th (Kirchenbaur *et al.*, 2012)؛ (C) نمودار Th در برابر Ba/Th (Kirchenbaur *et al.*, 2012)

همان گونه که پیشتر گفته شد، در محیط‌های مرز فعال قاره، افزون بر ترکیب‌های جدا شده از تخته فرورو، پوسته قاره‌ای نیز بر ترکیب ماگما تأثیرگذار است. بر پایه وجود طیف ترکیبی از مافیک (بازالت-آندزیتی) تا حد واسط (آندزیت) در سنگ‌های منطقه مشکین-رشت آباد، تأثیر پوسته قاره‌ای نیز دور از انتظار نیست. وجود بافت خلیجی و گردشگی در الیوین‌ها نیز گواهی بر احتمال رخداد آلودگی پوسته‌ای در سنگ‌های منطقه مشکین-رشت آباد است.

برای ارزیابی بهتر نقش فرایند آلیش ماگمای بازیک با مذاب پوسته قاره‌ای در سنگ‌های منطقه، غلظت عنصر Rb در برابر Rb/Th به کار برده می‌شود (شکل 13-A). تغییرات این نسبت‌ها در نمونه‌های بررسی شده روندی بر پایه فرایند AFC را نشان می‌دهند. در نمودار Nb/Y در برابر Th/Y نیز نمونه‌ها روند آلیش ماگمایی را نشان می‌دهند (Wilson et al., 1997) (شکل 13-B). نتایج به دست آمده از بررسی‌های پیشین مانند Khademian و همکاران (2108)، برای سنگ‌های آتشفشانی شمال زنجان نشان می‌دهند سنگ‌های منطقه شمال زنجان با پوسته بالایی آلیش یافته و فرایندهای هضم پوسته‌ای-جدایش بلوری (AFC) در پیدایش آنها نقش مؤثری را داشته است.

برای بررسی رخداد آلیش پوسته‌ای از نسبت Ce/Pb بهره گرفته می‌شود؛ زیرا این عنصرها هنگام ذوب یا تبلور بخشی از یکدیگر جدا نمی‌شوند. از این رو، نسبت این عنصرها نشان از فراوانی و تمرکز آنها در خاستگاه ماگمایی دارد (Hofmann, 1988). میانگین نسبت عنصرهای Ce/Pb در بازالت‌های اقیانوسی (MORB, OIB) برابر با 25 (Hofmann, 1988) و در پوسته قاره‌ای برابر 3/3 است (Rudnick and



شکل 13- ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه مشکین-رشت آباد در: (A) نمودار Rb در برابر Rb/Th برای بررسی نقش آلیش پوسته‌ای (Wilson et al., 1997) (B) تغییرات Nb/Y در برابر Th/Y (Tchameni et al., 2006)

تا کمی به سوی حد واسط با ترکیب بازالت-آندزیتی را در برمی‌گیرد. بیشتر این سنگ‌ها سرشت کالک‌آلکالن پتاسیم بالا دارند

برداشت

ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه مشکین-رشت آباد طیفی از سنگ‌های بازیک

ویژگی‌های شیمیایی خاستگاه سنگ‌های بازالتی یادشده است. بررسی آلایش ماگمای سازنده سنگ‌های آتشفشانی این منطقه با نمودارهای زمین‌شیمیایی گوناگون و نیز ویژگی‌های سنگ‌نگاری نشان‌دهنده آلایش سنگ‌های منطقه با پوسته بالایی است و چه‌بسا فرایند آلایش پوسته‌ای-جدایش بلوری (AFC) نیز در پیدایش این سنگ‌ها نقش داشته است.

سپاس‌گزاری

این مقاله با پشتیبانی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی‌سینای همدان انجام شده است. از این‌رو، از آن معاونت محترم سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین، نگارندگان از سردبیر و داوران گرامی مجله پترولوژی برای پیشنهادهای ارزنده‌شان در بهبود ساختار علمی مقاله بسیار سپاس‌گزارند.

و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی آنها (مانند: غنی‌شدگی LREE و LILE نسبت به HREE و HFSE، ناهنجاری منفی عنصرهای Nb، Eu و Ti) نشان‌دهنده وابستگی آنها به پهنه‌های فرورانشی است. از دیدگاه پهنه زمین‌ساختی، سنگ‌های آتشفشانی این منطقه در محیط‌های وابسته به کمان و در محدوده کمان قاره‌ای نرمال پدید آمده‌اند. برپایه غنی‌شدگی LREE و LILE در نمودارهای بهنجار شده به ترکیب کندریت و گوشته اولیه و مقدار کم Zr/Nb در نمودارهای زمین‌شیمیایی، گمان می‌رود ماگمای سازنده این سنگ‌ها از ذوب‌بخشی گوشته‌ای غنی‌شده با ترکیب E-MORB پدید آمده باشد. همچنین، نمودارهای نسبت عنصرهای فرعی بسیار ناسازگار که کمتر دچار درجات مختلف ذوب‌بخشی، تبلوربخشی و یا تجمع بلوری شده‌اند، نشان‌دهنده تأثیر سیال‌های پهنه‌های فرورانشی در تعیین

منابع

- Allen, M. B., Kheirkhah, M., Nill, I., Emami, M. H. and Mcleod, C. (2013) Generation of arc and within-plate chemical signatures in collision zone magmatism: Quaternary lavas from Kurdistan province, Iran. *Journal of Petrology* 54: 887- 911.
- Asiabanha, A., Ghasemi, H. and Meshkin, M. (2009) Paleogene continental- arc type volcanism in North Qazvin, North Iran: facies analysis and geochemistry. *Neues Jahrbuch für Mineralogie- Abhandlungen* 186: 201- 214.
- Azizi, H., Asahara, Y. and Tsuboi, M. (2014) Quaternary high- Nb basalts: existence of young oceanic crust under the Sanandaj- Sirjan Zone, NW Iran. *International Geology Review* 56: 167- 186.
- Blourian, G. H. (1994) Petrology of Tertiary volcanic rocks in the north of Tehran. M.Sc. Thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran (in Persian).
- Brenan, J. M., Shaw, H. F., Ryerson, F. J. and Phinney, D. L. (1995) Mineral aqueous fluid partitioning of trace elements at 900 °C and 2.0 GPa: constraints on the trace element chemistry of mantle and deep crustal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59: 3331- 3350.
- Brown, G. C., Thorpe, R. S. and Webb, P. C. (1984) The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society* 14(3): 413- 426.
- Chen, Y. and Zhang, Y. (2008) Olivine dissolution in basaltic melt. *Geochimica Cosmochimica Acta* 72: 4756- 4777.
- Condie, K. C. (1989) Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean- Proterozoic boundary: identification and significance. *Lithos* 23: 1- 18.

- Faridi, M. and Anvari, A. (2000) Geological map of the Hashtjin: Scale 1: 100000. Sheet 1, Geological Survey of Iran. Tehran, Iran.
- Fazlnia, A. N. (2019) Origin and magmatic evolution of the Quaternary syn- collision alkali basalts and related rocks from Salmas, northwestern Iran. *Lithos* 344-345: 297- 310.
- Fazlnia, A. N. and Kouzekoulani, F. (2012) Petrography, geochemistry and tectonomagmatic setting of the southwestern Salmas lamprophyres and related rocks, Iran. *Iranian Journal of Petrology* 3: 69- 88 (in Persian).
- Feizi, M., Ebrahimi, M., Kouhestani, H. and Mokhtari, A. A. (2016) Geology, Mineralogy and Geochemistry of Aghkand Copper Mine Occurrence, North of Zanjan, Tarom- Hashtjin. *Iranian Journal of Economic Geology* 2: 524- 507 (in Persian).
- Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B., Azizi, H., Wilkinson, C. and Generod, M. (2015) Geochemistry and geochronology of the volcano- plutonic rocks associated with the Glojeh epithermal gold mineralization, NW Iran. *Open Geoscience* 7: 207- 222.
- Gorton, M. P. and Schandle, E. S. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97: 629- 642.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. and Mitchell, S. F. (2007) Classification of altered volcanic arc rocks using immobile trace elements: development of the Th- Co discrimination diagram. *Journal of Petrology* 48(12): 2341- 2357.
- Herzberg, C. and Zhang, J. (1996) Melting experiments on anhydrous peridotite KLB- 1: compositions of magmas in the upper mantle and transition zone. *Journal of Geophysical Research* 101: 8271- 8295.
- Hofmann, A. W. (1988) Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and the oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 90: 297- 314.
- Kelemen, P. B., Hanghoj, K. and Greene, A. R. (2004) One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. Elsevier, Amsterdam 3: 593- 659.
- Keskin, M. (2003) Magma generation by slab steepening and break- off beneath a subduction- accretion complex: an alternative model for collision- related volcanism in eastern Anatolia, Turkey. *Geophysical Research Letters* 30(24): 8046.
- Khademian, F., Monsef, I. and Rahgoshay, M. (2018) Petrogenesis and geochemistry of the Eocene volcanic sequence in the northeast of Zanjan: Implications for active continental margin magmatism in the Alborz- Azarbaijan Zone. *Iranian Journal of Petrology* 9(33): 191- 206 (in Persian).
- Kheirkhah, M., Allen, M. B. and Emami, M. (2009) Quaternary syn- collision magmatism from the Iran/Turkey borderlands. *Journal of Volcanology Geothermometry Research* 182: 1- 12.
- Kheirkhah, M., Neill, I., Allen, M. B and Ajdari, K. (2013) Small-volume melts of lithospheric mantle during continental collision: Late Cenozoic lavas of Mahabad, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 74: 37-49.
- Kirchenbaur, A., Münker, C. and Marchev, P. (2009) The HFSE budget of post- collisional high- K basalts and shoshonites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73: A660.
- Kirchenbaur, M. and Münker, C. (2015) The behavior of the extended HFSE group (Nb, Ta, Zr, Hf, W, Mo) during the petrogenesis of mafic K- rich lavas: the Eastern Mediterranean case. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 165: 178- 199.
- Kirchenbaur, M., Münker, C., Schuth, S., Garbe- Schonberg, D. and Marchev, P. (2012) Tectonomagmatic constraints on the sources of Eastern Mediterranean K- rich lavas. *Journal of Petrology* 53: 27- 65.
- Leat, P. T., Pearce, J. A., Barker, P. F., Millar, I. L., Barry, T. L. and Larter, R. D. (2004) Magma genesis and mantle flow at a subducting slab edge: the South Sandwich arc- basin system. *Earth and Planetary Science Letters* 227: 17- 35.
- Lechmann, A., Burg, J. P., Ulmer, P., Guillong, M., Faridi, M. (2018) Metasomatized mantle as the source of Mid-Miocene- Quaternary volcanism in NW- Iranian Azarbaijan: Geochronological and

- geochemical evidence. *Lithos* 304-307: 311- 328.
- Macdonald, R., Hawkesworth, C. J. and Heath, E. (2000) The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism. *Earth- Science Reviews* 49: 1- 76.
- Machado, A. T., Chemale, Jr. F., Conceicao, R. V., Kawaskita, K., Morata, D., Oteiza, O. and Schmus, W. R. V. (2005) Modeling of subduction components in the Genesis of the Meso- Cenozoic igneous rocks from the South Shetland arc, Antarctica. *Lithos* 82(3-4): 435- 453.
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E., Ghasemi Siani, M. and Eghbali, M. A. (2009) Investigation of mineralization and formation of Guluje copper - gold deposits (North Zanjan), based on mineralogy, geochemistry and fluid inclusions. *Journal of Science, University of Tehran* 199: 185- 205 (in Persian).
- Moayyed, M. (2001) Petrological study of Alborz volcano- plutonic magmatic belt with special attitude on Hashtjin area. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (in Persian).
- Moritz, R., Rezeau, H., Ovtcharova, M., Tayan, R., Melkonyan, R., Hovakimyan, S., Ramazanov, V., Selby, D., Ulianov, A., Chiaradia, M. and Putlitz, B. (2016) Long- lived, stationary magmatism and pulsed porphyry systems during Tethyan subduction to post- collision evolution in the southernmost Lesser Caucasus, Armenia and Nakhitchevan. *Gondwana Research* 37: 465- 503.
- Nabatian, G. and Ghaderi, M. (2013) Oxygen isotope and fluid inclusion study of the Sorkhe- Dizaj iron oxide- apatite deposit, NW Iran. *International Geology Review* 55: 397- 410.
- Neill, I., Meliksetian, K., Allen, M. B., Navarsardyan, G. and Karapetyan, S. (2013) Pliocene- Quaternary volcanic rocks of NW Armenia: magmatism and lithospheric dynamics within an active orogenic plateau. *Lithos* 180-181: 200- 215.
- Neill, I., Meliksetian, K., Allen, M. B., Navasardyan, G. and Kuiper, K. (2015) Petrogenesis of mafic collision zone magmatism: The Armenian sector of the Turkish- Iranian plateau. *Chemical Geology* 403: 24- 41.
- Özdamar, Ş., Roden, M. F. and Roden, M. Z. (2017) Petrology of the shoshonitic Çambaşı pluton in NE Turkey and implications for the closure of the Neo- Tethys Ocean: Insights from geochemistry, geochronology and Sr- Nd isotopes. *Lithos* 284- 285: 477- 492.
- Pearce, J. A. and Cann, J. R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters* 19: 290- 300.
- Rudnick, R. L. and Fountain, D. M. (1995) Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics* 33: 267- 309.
- Sajona, F. G., Maury, R. C., Bellon, H., Cotten, J. and Defant, M. J. (1996) High field strength element enrichment of Pliocene- Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Penin- sula, western Mindanao (Philippines). *Journal of Petrology* 37: 693- 726.
- Seghedi, I., Downes, H., Pecskey, Z., Thirlwall, M. F., Szakacs, A., Prychodko, M. and Matthey, D. (2001) Magma genesis in a subduction related post- collisional volcanic arc segment: the Ukrainian Carpathians. *Lithos* 57(4): 237- 262.
- Shafaii Moghadam, H., Ghorbani, G., Zaki Khedr, M., Fazlnia, A. N., Chiaradia, M., Eyuboglu, Y., Santosh, M., Galindo Francisco, C., Lopez Martinez, M., Gourgaud, A. and Arai, S. (2014) Late Miocene K- rich volcanism in the Eslamieh Peninsula (Saray), NW Iran: Implications for geodynamic evolution of the Turkish- Iranian high plateau. *Gondwana Research* 26: 1028- 1050.
- Shafaii Moghadam, H., Griffin, L. W., Kirchenbaur, M., Garbe- Schönberg, D., Zaki Khedr, M., Kimura, J., Stern, R., Ghorbani, Gh., Murphy, R., O'Reilly, S., Arai, Sh. and Maghdour- Mashhour, R. (2018) Roll- Back, extension and mantle upwelling triggered Eocene potassic magmatism in NW Iran. *Journal of Petrology* 59(7): 1417- 1465.
- Shafaii Moghadam, H., Khademi, M., Hu, Z. C., Stern, R. J., Santos, J. F. and Wu, Y. B. (2015) Cadomian (Ediacaran- Cambrian) arc magmatism in the ChahJam- Biarjmand metamorphic complex (Iran): magmatism along the northern active margin of Gondwana. *Gondwana Research* 27: 439- 452.
- Siddiqui, R. H., Asif Khan, M. and Qasim Jan, M. (2007) Geochemistry and petrogenesis of the Miocene

- alkaline and sub- alkaline volcanic rocks from the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan: implications for porphyry Cu- Mo- Au deposits. *Journal of Himalayan Earth Sciences* 40: 1- 23.
- Sugden, P. J., Savov, I. P., Wilson, M., Meliksetian, K., Navasardyan, G. and Halama, R. (2019) The thickness of the mantle lithosphere and collision- related volcanism in the lesser Caucasus. *Journal of Petrology* 60: 199- 230.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological society of London, Special Publication 42: 313- 345.
- Tchameni, R., Pouclet, A., Penary, J., Ganwa, A. and Toteu, S. F. (2006) Petrology and geochemistry of the Ndaoundere Pan- African granitoids in Central north Cameroon: implications for their sources and geological setting. *Journal of African Earth Science* 44(5): 511- 529.
- Tepper, J. H., Nelson, B. K., Bergantz, G. W. and Irving, A. J. (1993) Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calc- alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 113: 333- 351.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock- forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185- 187.
- Wilson, M. (1989) *Igneous petrogenesis: A global tectonic approach*. Unwin Hyman, London, UK.
- Wilson, M., Tankut, A. and Gulec, N. (1997) Tertiary volcanism of the Galatia province, north- west Central Anatolia, Turkey. *Lithos* 42: 105- 121.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation product using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325- 343.
- 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* 50: 11- 30.
- Yang, W. and Li, S. (2008) Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos* 102(1-3): 88- 117.
- Yousefi, S. J., Moradian, A. and Ahmadipour, H. (2017) Petrogenesis of Plio- Quaternary basanites in the Gandom Beryan area, Kerman, Iran: geochemical evidence for the low- degree partial melting of enriched mantle. *Journal of Earth Science* 26: 284- 301.
- Zhao, J. and Zhou, M. (2007) Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzihua district (SW China). Implication for subduction related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research* 152: 27- 47.