

Geology, petrography, geochemistry and petrogenesis of Alishahi rhyodacitic-dacitic columnar joints (Southeast of Rayen, Kerman)

Leila Noroozi, Mohsen Arvin* and Sara Dargahi

Department of Geology, College of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract

The Alishahi rhyodacitic-dacitic columnar joints are outcropped in the Middle-Upper Eocene Razak complex in the southeastern of Urumieh-Dokhtar volcanic belt in the Dehaj-Sarduieh volcano-sedimentary belt. The complex consists of intermittent of pyroclastic rocks, andesite, rhyolite, and rhyodacite-dacitic lava flows. The latter partially shows 5 to 6 unequal sided columnar structure in which entablature and colonnade sections along with stria are clearly visible. The predominant textures are phyrritic, hyaloporphyritic, glomeroporphyritic, flow and sieve textures along with perlitic cracks. Mineralogically, the Alishahi rhyodacitic-dacitic rocks consist of plagioclase phenocrysts together with rare microphenocrysts of sanidine, orthoclase, hornblende, pyroxene, biotite and accessory minerals including apatite, titanite and opaques are setting in a cryptocrystalline glassy matrix. The matrix is partly in the verge of devitrification process and conversion to mixture of quartz and alkali feldspars. Geochemically, the Alishahi columnar joints are rhyodacitic-dacitic in composition with calc-alkaline nature. Negative Eu anomaly and decrease in Sr content along with increase in Si amount reveal the significance of plagioclase as a differentiated phase. Enrichment in large lithophile elements and depletion in high field strength elements normalized to primitive mantle such as Ti, Ta, Nb along with their chondrite normalized rare earth elements patterns are pointing to their magma formation in a volcanic arc setting in an active continental margin. The depletion in Nb and Ta could be related to their low solubility in aqueous fluids and melts formed under relatively low pressures in the shallow part of the subduction zone.

Key words: petrography, columnar joints, rhyodacitic-dacitic, geochemistry, Razak complex, Alishahi Rayen

* arvin@uk.ac.ir

زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و سنگ‌زایی درزهای ستونی ریوداسیتی - داسیتی علیشاهی (جنوب‌خاوری راین، کرمان)

لیلا نوروژی، محسن آروین* و سارا درگاهی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

درزهای ستونی ریوداسیتی - داسیتی علیشاهی بخشی از مجموعه آتشفشانی رازک، با سن ائوسن میانی - بالایی هستند و در پهنه آتشفشانی - رسوبی دهج - ساردوییه و جنوب‌خاوری کمرند ماگمایی ارومیه - دختر جای دارند. این مجموعه شامل تناوبی از سنگ‌های آذرآوری و جریان‌های گدازه‌ای آندزیت، ریولیت و ریوداسیتی - داسیتی است. سنگ‌های ریوداسیتی - داسیتی گاه ساختار ستونی به صورت پنج یا شش وجهی نابرابر با ستون‌های منظم و مستقیم (کولونیدی) و ستون‌های کج‌شده و نامنظم (اینتبولیتور) به همراه ساختارهای شیباری (استریا) دارند. بافت شاخص آنها فیریک، هیالوپورفیریتیک، گلوپورفیری، غربالی، جریان‌ی و پرلیتیک هستند. پلاژیوکلازها که فنوکریست اصلی هستند همراه با میکروفنوکریست‌های کمیاب سانیدین، ارتوکلاز، هورنبلند، پیروکسن، بیوتیت و کانی‌های فرعی آپاتیت، تیتانیت و کانی‌های کدر، در زمینه‌ای شیشه‌ای و نهان‌بلور جای گرفته‌اند. زمینه گاه در مرحله فرایند واشیشه‌ای شدن و تبدیل به مخلوطی از کوارتز و آلکالی‌فلدسپار است. برپایه بررسی‌های زمین‌شیمیایی، ترکیب درزهای ستونی علیشاهی ریوداسیت - داسیت است و سرشت کالک‌آلکان نشان می‌دهند. آنومالی منفی Eu و کاهش مقدار Sr همراه با افزایش مقدار Si نشان‌دهنده اهمیت پلاژیوکلاز به عنوان فازی جدایش یافته هستند. غنی‌شدگی از عنصرهای لیتوفیل با شعاع یونی بزرگ و تهی‌شدگی از عنصرهای با شدت میدان بالا (مانند: Ta, Ti, Nb) نسبت به ترکیب گوشته اولیه، همچنین، الگوی عنصرهای خاکی نادر پهنجارشده به ترکیب کندریت نشان‌دهنده پیدایش ماگمای درزهای ستونی در پهنه کمان آتشفشانی مرتبط با حاشیه فعال قاره‌ای هستند. تهی‌شدگی از عنصرهای Ta و Nb پیامد کاهش انحلال این عنصرهای در سیال‌های و مذاب‌های محیط‌های فرورانش در ژرفای کم است. واژه‌های کلیدی: سنگ‌نگاری، درزهای ستونی، ریوداسیتی - داسیتی، زمین‌شیمی، مجموعه رازک، علیشاهی راین

مقدمه

و از این رو، پیدایش، رشد و گسترش ترک‌هایی عمود

بر سطح جریان (از پایین به سوی بالا و برعکس) را

در پی دارند (Mallet, 1875; Iddings, 1886;)

درکل، درزهای ستونی یا چندوجهی به‌علت

وجود استرس هنگام سردشدن گدازه پدید می‌آیند

* arvin@uk.ac.ir

لاوایی میان سنگ‌های آذرآواری (از نوع توف بلور شیشه‌ای) رخنمون یافته‌اند. از آنجایی که درزهای ستونی منطقه علیشاهی راین برای نخستین بار گزارش می‌شوند، هدف این پژوهش بررسی سنگ‌شناختی، زمین‌شیمی و سنگ‌زایی (پتروژنز) این درزهای ستونی است.

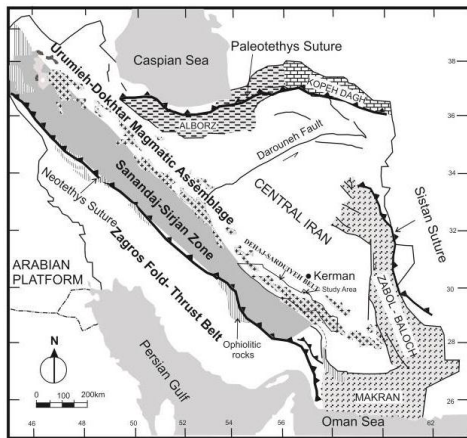
زمین‌شناسی منطقه

منطقه بررسی شده در جنوب خاوری پهنه ماگمایی ارومیه- دختر در نوار آتشفشانی- رسوبی دهج- ساردوییه از پهنه ساختاری ایران مرکزی است. نوار دهج- ساردوییه به درازای ۵۰۰ کیلومتر و پهنای نزدیک به ۸۰ کیلومتر از شهر دهج در شمال باختری استان کرمان تا منطقه ساردوییه در جنوب خاوری این استان کشیده شده است. این نوار ستبرایی نزدیک به ۱۵ کیلومتر دارد و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و بازیگ ائوسن را در برمی‌گیرد. افق‌های رسوبی کم‌ستبرای نیز در قاعده یا بخش‌های میانی آن هستند (Dimitrijevic, 1973). حضور افق‌های رسوبی نشان دهنده آرامش نسبی در فعالیت‌های آتشفشانی است. در الیگو-میوسن توده‌های نفوذی در واحدهای آتشفشانی نفوذ کرده‌اند. در شکل ۱ جایگاه نوار دهج- ساردوییه و منطقه بررسی شده نشان داده شده‌اند. نوار دهج- ساردوییه به صورت سه مجموعه آتشفشانی رده‌بندی شده است که عبارتند از: (۱) مجموعه بحرآسمان با سن ائوسن پایینی- میانی (شامل سنگ‌های پیروکلاستیک با ترکیب اسیدی، جریان‌های ریولیت، ریوداسیت، آندزیت، توف سبز رنگ، آگلومر و برش‌های آتشفشانی با میان‌لایه‌های آهکی)؛ (۲) مجموعه رازک با سن ائوسن میانی- بالایی که به سه زیر مجموعه پایینی (بیشتر با ترکیب بازیگ)، میانی (بیشتر با ترکیب اسیدی) و بالایی (بیشتر با ترکیب

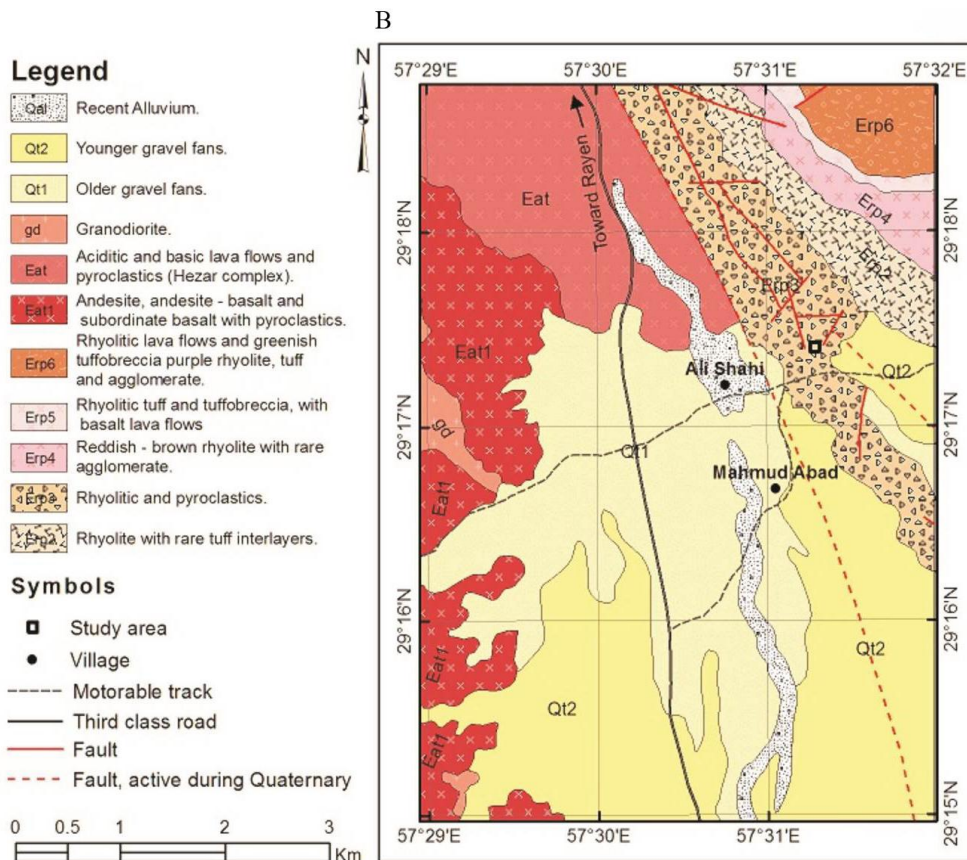
Spry, 1962; Budkewits, 1994; Goehring, 2008). آنها یک یا دو بخش با مجموعه‌ای از ستون‌های منظم و مستقیم (کولونیدی: Colonnade) و یک بخش شامل ستون‌های کج‌شده و نامنظم (اینتبولیتور: Entablature) هستند (Long and Wood, 1986). درزهای ستونی سیمای معمول در جریان‌های لاوایی در محدوده ترکیبی بازالیت تا ریولیت هستند و در پهنه‌های خشکی، زیر یخچالی و همچنین، در برخی رسوب‌های آذرآواری جوش‌خورده پدید می‌آیند (Wright at al., 2011; Bosshard at al., 2012; Hetényi at al., 2012; Phillips at al., 2014; Forbes, at al., 2013). درزهای ستونی در جریان‌های گدازه، سیل‌ها، دایک‌ها، ایگنمبریت‌ها و نفوذی‌های کم‌ژرفا با هر ترکیبی پدید می‌آیند (Huxley, 1881; French, 1922; Gilbert, 1938; Degraff, 1987; Seshadri, 1997; Müller, 1998a, 1998b; Menger at al., 2002; Toramaru and Matsumoto, 2004). بهترین نمونه آنها سنگ فرش غول (Giant's Causeway) در ساحل شمال خاوری ایرلند شمالی، یا غار فینگال (Fingal's cave) در اسکاتلند بوده و درزهای ستونی بازالیتی آنها شش‌گوش هستند. درزهای ستونی داسیتی از باختر تاسمانیا در استرالیا (McPhie at al., 1993) و ریولیتی از منطقه راین- کرمان (Roozbahani and Arvin, 2010) هم گزارش شده‌اند. همانند چنین درزهای ستونی در منطقه بررسی شده (در ۵ کیلومتری شمال خاوری روستای علیشاهی، در ۴۵ کیلومتری جنوب راین) نیز دیده می‌شوند. این درزها تناوبی از سنگ‌های آذرآواری و جریان‌های گدازه‌های آندزیت، ریولیت و ریوداسیتی- داسیتی بخش میانی مجموعه رازک هستند (شکل ۱). درزهای ستونی به صورت جریانی

توف‌های سرخ‌رنگ، ماسه‌سنگ‌های توفی، تراکی‌آندزیت و تراکی‌بازالت و جریان‌هایی از گدازه و پیروکلاستیک با میان‌لایه‌های آهکی (Dimitrijevic, 1973).

بازیک) با میان‌لایه‌های آهکی و ماسه‌سنگی است. درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی در بخش میانی این مجموعه رخنمون یافته‌اند؛ (۳) مجموعه آتشفشانی هزار با سن ائوسن بالایی (شامل



A



B

شکل ۱- A) جایگاه منطقه بررسی‌شده علیشاهی راین، در نقشه ساده زمین‌شناسی ایران؛ B) نقشه زمین‌شناسی منطقه علیشاهی راین، برپایه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه خاتون آباد (Djokovic, at al., 1972)

روش انجام پژوهش

در بررسی های صحرایی و با توجه به دگرسانی شدید تلاش شد تا حد امکان از سنگ های با دگرسانی کمتر نمونه برداری شود. در این راستا، شمار ۶۰ نمونه برداشت شد و از میان آنها، ۲۸ نمونه برای بررسی میکروسکوپی برگزیده و از آنها مقطع نازک ساخته شد. سپس شمار ۷

نمونه با کمترین دگرسانی برگزیده و برای تجزیه اکسیدهای عنصرهای اصلی (با دستگاه ICP-AES) و تجزیه عنصرهای فرعی و خاکی نادر (با دستگاه ICP-MS) به آزمایشگاه ALS-Chemex (در کانادا) فرستاده شدند. داده های تجزیه زمین شیمیایی به دست آمده در جدول ۱ آورده شده اند.

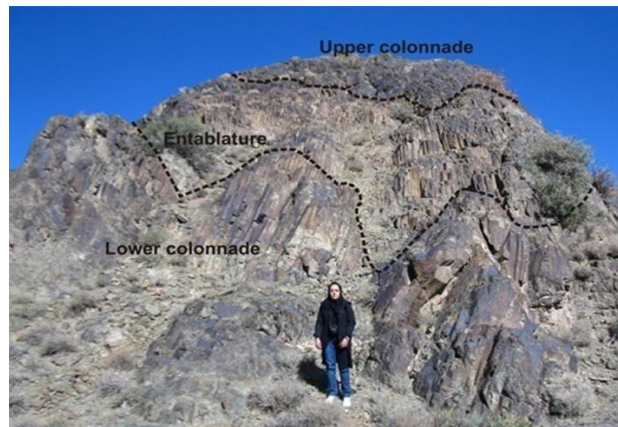
جدول ۱- داده های تجزیه شیمیایی از درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی (جنوب خاوری راین، کرمان) (FeO*: اکسید آهن کل؛ LOI: کاهیدگی در اثر دما؛ C: تجزیه از مرکز نمونه؛ M= تجزیه از حاشیه نمونه؛ عنصرهای اصلی برپایه درصد وزنی و عنصرهای فرعی برپایه ppm)

Sample No. Symbols	NZ-2-1 ■	NZ-2-3C ▽	NZ-2-3M ●	NZ-5-1 ■	NZ-8-2C △	NZ-8-2M ▲	NZ-11-4 ■
SiO ₂	66.70	63.70	66.30	66.10	63.90	67.10	65.70
TiO ₂	0.54	0.51	0.52	0.54	0.48	0.52	0.50
Al ₂ O ₃	14.55	16.80	15.00	14.75	15.70	13.70	15.05
FeO*	4.44	3.33	4.57	4.69	4.35	4.76	4.32
MnO	0.09	0.07	0.10	0.09	0.08	0.08	0.10
MgO	1.10	0.83	1.14	1.13	1.06	1.10	1.34
CaO	1.39	1.77	1.29	1.64	1.64	0.94	1.99
Na ₂ O	5.12	8.02	5.55	4.75	7.65	3.56	4.00
K ₂ O	2.64	0.65	2.58	3.31	0.48	4.78	3.62
P ₂ O ₅	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14
SrO	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
BaO	0.06	0.01	0.05	0.07	0.01	0.09	0.05
LOI	2.44	2.41	2.40	2.57	2.70	2.01	3.61
Total	99.26	98.28	99.69	99.82	98.22	98.80	100.43
V	55.00	51.00	55.00	57.00	53.00	56.00	64.00
Co	7.30	5.50	7.50	7.20	6.40	7.30	7.20
Ni	7.00	6.00	9.00	6.00	<5	6.00	6.00
Cr	30.00	30.00	40.00	30.00	20.00	20.00	20.00
Cu	43.00	42.00	37.00	38.00	42.00	30.00	31.00
Zn	68.00	52.00	69.00	70.00	63.00	71.00	65.00
Ga	15.10	17.00	15.80	12.40	16.30	12.60	17.30
Cs	2.65	1.51	2.14	2.40	0.75	2.06	3.65
Ba	509	71.90	455	624	85.80	784	441
Rb	121.5	30.70	107	156.5	22	205	153.5
Sr	311	316	270	257	264	231	163
Y	38.90	33.30	36.20	37.70	37.50	39.40	39.90
Zr	221	203	214	223	249	235	232
Nb	9.40	8.90	9.20	9.30	9.10	9.70	9.50
Hf	6.50	6.10	6.50	6.50	6.50	6.90	6.80
Ta	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Pb	7.00	10.00	15.00	17.00	10.00	11.00	11.00
Th	9.98	9.28	9.97	9.77	10.45	10.05	9.96
U	2.47	2.36	2.36	2.50	2.34	2.54	2.56
Mo	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Sn	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Tl	0.50	<0.50	<0.50	0.50	<0.50	0.60	<0.50
W	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00
La	23.90	22.40	24.80	24.50	21.40	23.80	20.20
Ce	52.30	47.4	53.40	51.70	45.90	50.50	46.50
Pr	6.78	6.02	6.65	6.51	5.93	6.49	6.31
Nd	26.80	23.50	26.00	25.70	23.80	25.40	25.40
Sm	6.14	5.17	5.93	5.89	5.46	5.86	6.31
Eu	1.16	1.03	1.21	1.03	1.04	1.02	1.22
Gd	5.98	5.16	5.78	5.75	6.13	5.85	6.22
Tb	1.03	0.87	1.00	1.00	0.98	1.03	1.07
Dy	6.50	5.65	6.29	6.35	6.23	6.53	6.75
Ho	1.38	1.23	1.32	1.34	1.32	1.41	1.43
Er	4.13	3.74	4.01	4.03	3.91	4.14	4.22
Tm	0.64	0.58	0.61	0.61	0.61	0.63	0.65
Yb	4.17	3.81	4.06	4.00	3.92	4.12	4.24
Lu	0.63	0.58	0.62	0.62	0.61	0.64	0.65
Eu/Eu*	0.57	0.60	0.62	0.53	0.54	0.52	0.59

زمین‌شناسی صحرایی و سنگ‌نگاری

بیشتر درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی پنج‌وجهی و یا شش‌وجهی نابرابر هستند و بیشتر به‌صورت قائم رخنمون دارند؛ اما به علت رفتار گسل‌ها، شیبی به‌سوی شمال‌باختری نشان می‌دهند. با وجود گسل‌خوردگی و فرسایش بالا در منطقه، بخش ستون‌های منظم و مستقیم (کولونیدی) به‌صورت ستون‌های منظم و مستقیم و بخش ستون‌های کج‌شده و نامنظم (اینتبولیتور) در مجموعه درزهای ستونی هنوز دیده می‌شوند (شکل ۲). قطر درزهای ستونی از ۷ تا ۲۰ سانتیمتر بوده و بلندای آنها نزدیک به ۲۰ متر

است. در درزهای ستونی علیشاهی، یک سری شیارهای ریز (استریا، Stria) به‌موازات قاعده درزهای ستونی دیده می‌شود که گاه با کلسیت یا سیلیس پر شده‌اند (شکل ۳). استریا بیشتر در قالب نقاط ضعف عمل کرده است و به‌دنبال فرایند هوازدگی و فرسایش درزهای ستونی، در پایان در راستای آنها و در قالب قطعه‌هایی با اندازه‌های گوناگون شکسته می‌شوند. همچنین، سطح بیرونی درزهای ستونی در پی عملکرد فرایند برشی شدن درجا بسیار خردشده هستند. تافونی از فرسایش‌های دیگر در این سنگ‌ها بوده و از چند سانتیمتر تا چندین متر در قطر متغیر است.



شکل ۲- بخش‌های گوناگون درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی راین (کرمان)



شکل ۳- ساختارهای شیاری (استریا) در درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی راین (کرمان) (مقیاس = ۱۳/۸ سانتیمتر)

همچنین، تغییر در سرعت سردشدن در عملکرد فرایند دگرسانی نیز دیده می‌شود به گونه‌ای که در نمونه‌های با دگرسانی کمابیش کم، بخش‌های کناره‌ای و میانی، به ترتیب با درصد حجمی شیشه‌ای بالا و کم، به رنگ قهوه‌ای و رنگ سبز هستند (شکل ۵).

گفتنی است که در مقطع نازک نیز بافت پرلیتیک بیشتر در بخش‌های کناره‌ای وجود دارد و بررسی‌های زمین‌شیمیایی نیز این تفاوت در سرعت سردشدن را به خوبی نشان می‌دهند. در درزهای ستونی، در پی دگرسانی فلدسپارها، دگرسانی اپیدوتیتی شدن و کلریتی شدن به مقدار کم و کائولینیتی شدن به مقدار بالا دیده می‌شوند (شکل ۴). بافت این سنگ‌ها در نمونه دستی، پورفیریتیک بوده (شکل ۵) و پیامد جایگیری درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز است. درزهای ستونی گاه با دایک‌های دولریتی قطع شده‌اند.

از دیدگاه سنگ‌شناسی، درزهای ستونی ریوداسیتی - داسیتی علیشاهی ریوداسیت - داسیت هستند. پلاژیوکلاز کانی اصلی این سنگ‌هاست. فنوکریست‌های این کانی (شکل دار تا نیمه‌شکل دار تخت‌های؛ در اندازه‌های ۴ تا ۸ میلیمتر) کمتر از ۱۵ درصد حجمی و به صورت میکرولیتی (به اندازه‌های کمتر از یک میلیمتر) کمتر از ۱۰ درصد حجمی سنگ را در بر می‌گیرند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز گاه برپایه زاویه خاموشی (با روش میشل لوی) از نوع سدیک ($An < 20$) و دارای ماکل پلی‌سینتتیک هستند و گاه زونینگ و بافت غربالی دارند. آلکالی فلدسپار (مانند: ارتوکلاز و گهگاه

بخش‌های کناره‌ای درزهای ستونی ریوداسیتی - داسیتی علیشاهی با شتاب بیشتری نسبت به بخش میانی آنها سرد شده‌اند. از نشانه‌های آن، افزایش محسوس شدت دگرسانی و نیز افزایش اندازه و درصد حجمی تبلور کانی‌ها به سوی بخش‌های میانی (در مقطع نازک و در نمونه دستی) است (شکل‌های ۴ و ۵).



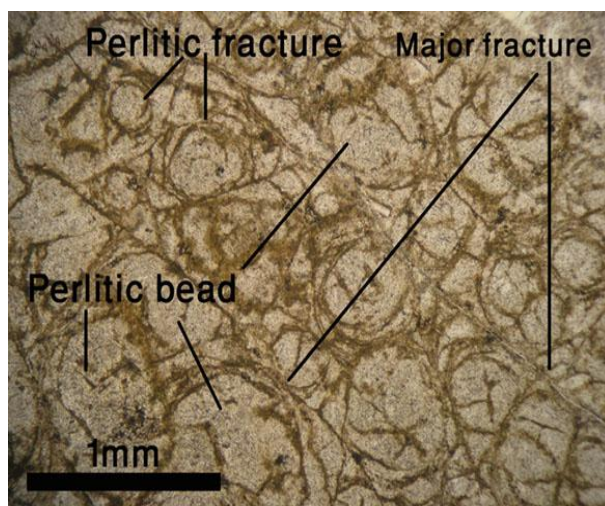
شکل ۴- عملکرد دگرسانی در بخش‌های کناره‌ای و میانی درزهای ستونی ریوداسیتی - داسیتی علیشاهی راین (کرمان) (بخش سفید رنگ نشان‌دهنده عملکرد فرایند کائولینیتی شدن است)



شکل ۵- بافت پورفیریتیک به همراه تغییر رنگ در پی عملکرد متفاوت دگرسانی از کناره‌ها به سوی بخش‌های میانی (در برش عرضی یک درز ستونی ریوداسیتی - داسیتی شش وجهی نامنظم در علیشاهی راین، کرمان)

دگرسان شده و گاه با کلریت و کلسیت جانشین شده‌اند. بافت سنگ‌های ریوداسیتی- داسیتی درزهای ستونی علیشاهی هیالو پورفیریتی- گلوپورفیریتی- پرلیتیک (شکل ۶) و تا اندازه کمی جریان است. بافت جریانی با میکروولیت‌های پلاژیوکلاز در پیرامون فنوکریست‌های پلاژیوکلاز دیده می‌شود. کوارتز و کلسیت به صورت رگه‌ای هم در سنگ و مقطع نازک دیده می‌شوند.

سانیدین، پیروکسن، بیوتیت، آپاتیت، هورنبلند (اوپاسیته شده)، تیتانیت و کانی‌های کدر از کانی‌های دیگر زمینه (که روی هم‌رفته کمتر از ۱۰ درصد حجمی سنگ را در بر می‌گیرند) هستند. این کانی‌ها بیشتر شکل دار تا نیمه شکل دار هستند و همراه با پلاژیوکلازها در یک زمینه شیشه‌ای نهان‌بلور و گاه واشیشه‌ای شده (Devitrification) جای گرفته‌اند. فلدسپارها به سرسیت و کائولینیت



شکل ۶- بافت پرلیتیک در درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی راین (کرمان) (تصویر PPL)

بخش‌های میانی، از SiO_2 و K_2O غنی شدگی دارند. همچنین، Al_2O_3 و Na_2O در بخش میانی نسبت به کناره‌ای افزایش نشان می‌دهند. این افزایش‌ها و کاهش‌ها کاملاً با چگونگی سردشدن، تبلور و دگرسانی درزهای ستونی علیشاهی همخوانی دارد (در بخش مقدمه نیز به آن پرداخته شد).

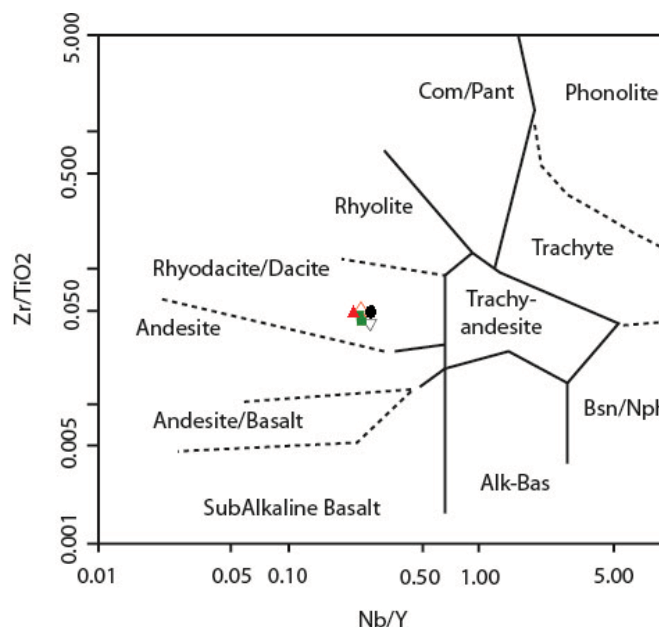
همچنین، سنگ‌ها در نمودارهای SiO_2 در برابر Irvine and Baragar, (AFM و $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) (1971)، به ترتیب در بخش ساب‌آلکالن و سری ماگمایی کالک‌آلکالن جای می‌گیرند (شکل ۸). این

زمین‌شیمی

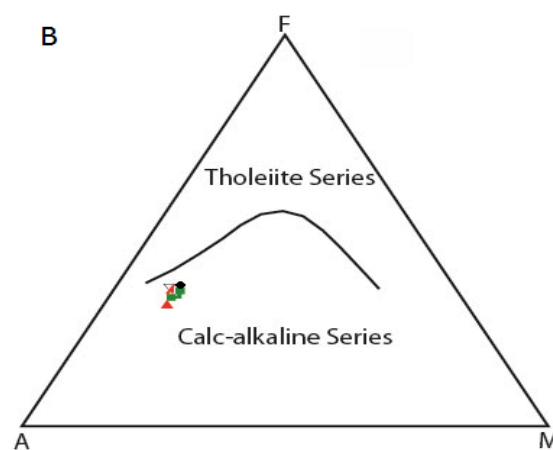
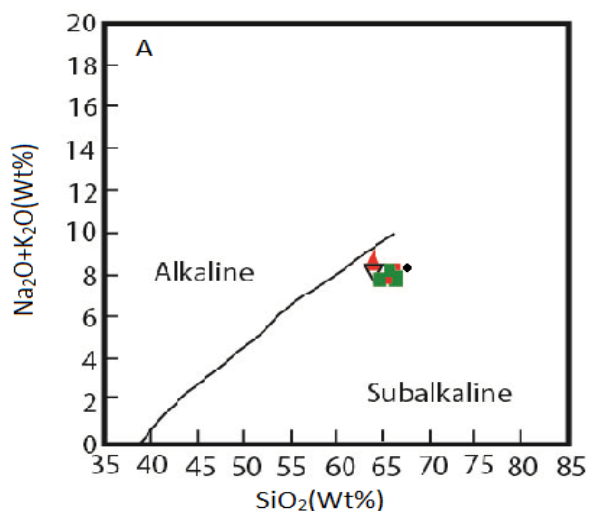
برپایه سرشت دگرسان شده درزهای ستونی علیشاهی و برای رده‌بندی شیمیایی آنها، نمودار Nb/Y در برابر Zr/TiO_2 (Winchester and Floyd, 1977) به کار برده شد که در آن سنگ‌ها در بخش ریوداسیتی- داسیتی جای می‌گیرند (شکل ۷). این نکته با یافته‌های به دست آمده از بررسی‌های سنگ‌نگاری همخوانی دارد. همان‌گونه که در جدول ۱ دیده می‌شود، سنگ‌های ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی در بخش‌های کناره‌ای نسبت به

سیلیس است که از ویژگی های ماگمای کالک آلکان است (Irvine and Baragar, 1971).

نکته نشان دهنده فشار بخشی بالای اکسیژن و جداسدن مگنتیت از ماگما و غنی شدن آن از



شکل ۷- رده بندی شیمیایی درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی رایین (کرمان) برپایه نمودار Nb/Y در برابر Zr/TiO₂ (Winchester and Floyd, 1977) (نمادها همانند جدول ۱)



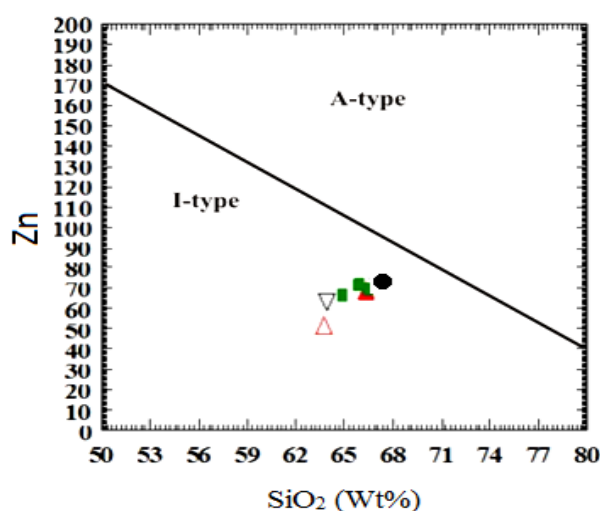
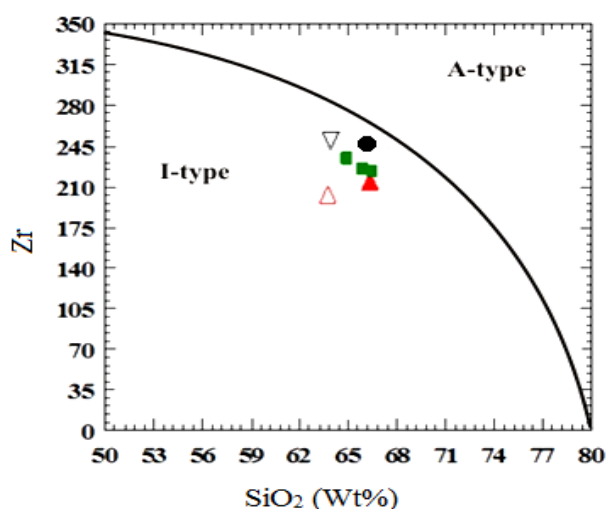
شکل ۸- درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی رایین (کرمان) در: (A) نمودار درصد وزنی SiO₂ در برابر درصد وزنی K₂O+Na₂O (Irvine and Baragar, 1971) (نمادها همانند جدول ۱) (B) نمودار AFM برای شناسایی سری ماگمایی (Irvine and Baragar, 1971)

واسطه (Ni، Cr، V، U، Se و Tm) و عنصرهای خاکی نادر در هنگام دگرسانی گرمایی شدید و حتی تا اندازه های ضعیف تا متوسط در سنگ های ولکانیکی،

سنگزایی

باور کلی بر این است که عنصرهای با قدرت میدانی بالا (Ti، Zr، Y، Nb، Ta، P و Hf)، عنصرهای

این عناصرها برای پی‌بردن به خاستگاه و تکامل سنگ‌های آذرین بهره گرفته می‌شود. در نمودارهای SiO_2 در برابر Zr و Zn (Newbery *at al.*, 1990) که جداکننده دو نوع ماگمای گرانیتوئیدی نوع A و I از یکدیگر هستند، نمونه‌های درزه‌های ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی در محدوده گرانیتوئیدهای نوع I جای می‌گیرند (شکل ۹).

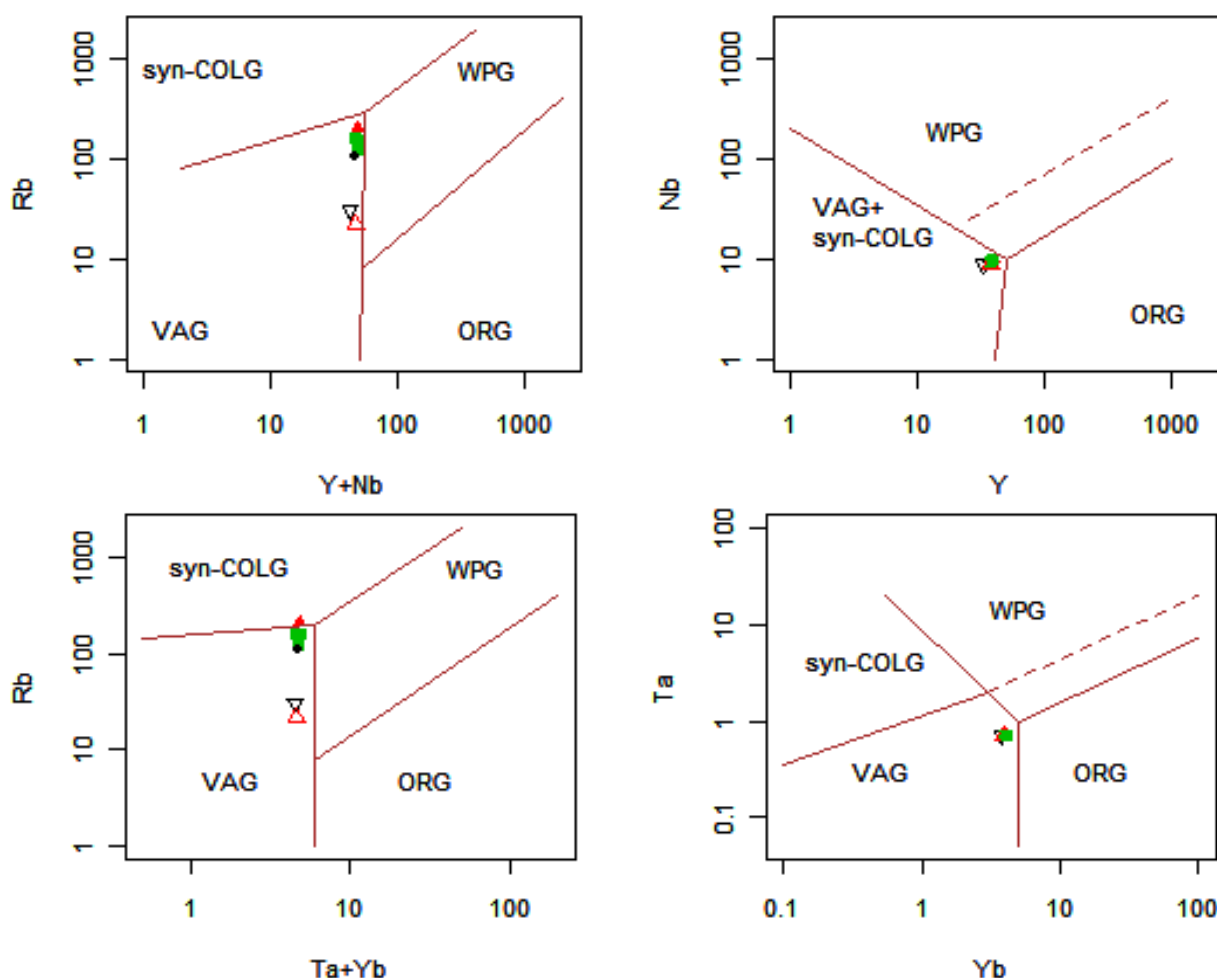


شکل ۹- نمودار درصد وزنی SiO_2 در برابر Zr و Zn (برپایه ppm) (Newbery *at al.*, 1990) برای شناسایی خاستگاه درزه‌های ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی (نمادها همانند جدول ۱)

تکامل پهنه زمین‌ساختی ماگمایی یک ناحیه است (Schandl and Gorton, 2002). در اینباره، نسبت‌های Ta/Hf ، Th/Hf ، Th/Ta و Th/Yb و Ta/Yb برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی آتشفشان و کمان‌های اقیانوسی، حاشیه‌های فعال قاره‌ای و پهنه‌های آتشفشانی درون قاره‌ای به کار برده می‌شوند. برپایه این نمودارها، سنگ‌های ریوداسیتی- داسیتی درزه‌های ستونی منطقه علیشاهی در بخش حاشیه فعال قاره‌ای جای می‌گیرند (شکل ۱۱).

به صورت نامتحرک رفتار می‌کنند؛ اما عناصرهای با قدرت میدانی کم (Cs و Rb ، Ba ، Sr) و عناصرهایی مانند Na ، K ، و Si ، در سیال‌های آبدار متحرک هستند (Pearce and Cann, 1973; Pearce, 1975; Smith and Smith, 1976; Floyd and Winchester, 1978; Humphris and Thompson, 1978; Pearce and Norry, 1979; Wood *at al.*, 1979; Humphris, 1984; Jiang *at al.*, 2009). از این‌رو، از

برای شناسایی خاستگاه و پهنه زمین‌ساختی، نمودارهای تغییرات عناصرهای کمیاب (Pearce *at al.*, 1984) (که به باور Twist و Harmer (۱۹۸۷) و Menuge و همکاران (۲۰۰۲)، برای گدازه‌های فلسیک نیز کاربرد دارند) به کار برده شدند. برپایه این نمودارها، سنگ‌های ریوداسیتی- داسیتی درزه‌های ستونی علیشاهی در پهنه کمان ماگمایی و هم‌زمان با کوهزایی پدید آمده‌اند (شکل ۱۰). نسبت عناصرهای با قدرت میدانی بالا (HFSE) در سنگ‌های فلسیک بازتابی از

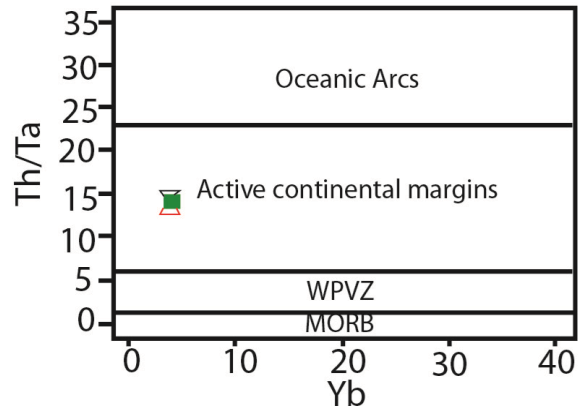
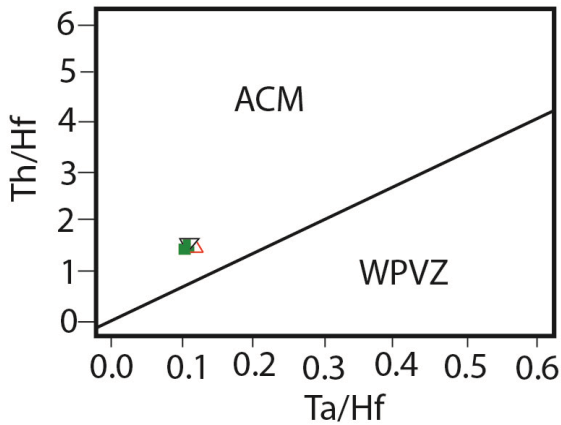
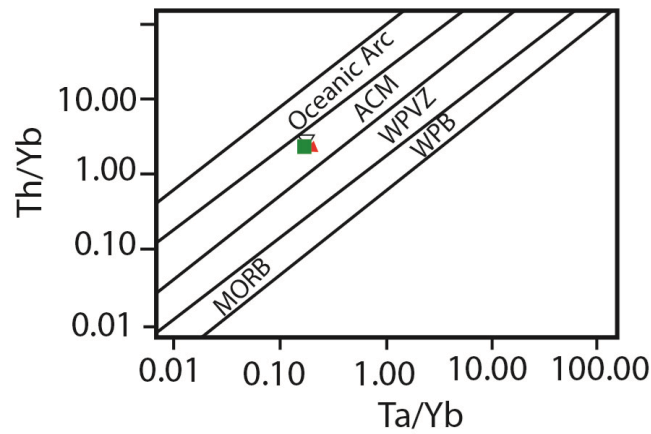


شکل ۱۰- درزهای ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی رایین (کرمان) در نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی (Pearce *at al.*, 1984) (عنصرها برپایه ppm هستند؛ نمادها همانند جدول ۱ هستند؛ ORG: ocean-ridge granite; WPG: granite:within-plate; syn-COLG (volcanic arc granite: VAG; syn-collisional granite: COLG)

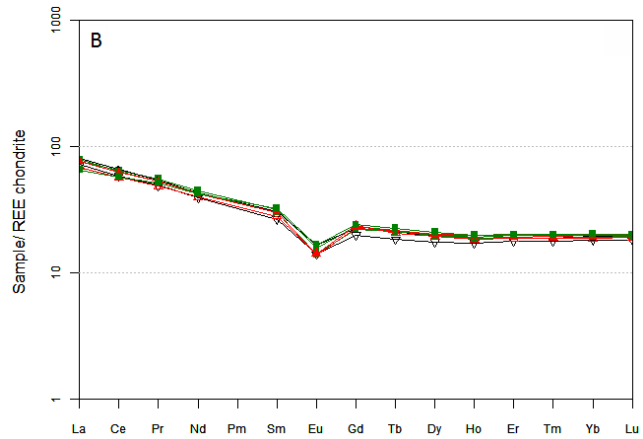
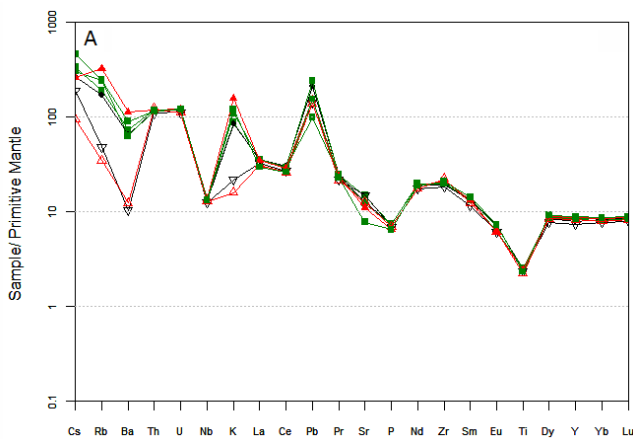
مذاب‌های پهنه فرورانش در ژرفای کم است (Baier *at al.*, 2008).

الگوی عنصرهای خاکی نادر سنگ‌های ریوداسیتی- داسیتی درزهای ستونی علیشاهی بهنجارشده به ترکیب کندریت نشان‌دهنده غنی‌شدگی از LREE با شیب تند است؛ اما HREE شیب مثبت با الگوی هموار نشان می‌دهد که با آنومالی منفی Eu (Eu/Eu^*) برابر با ۰/۵۲-۰/۶۲؛ میانگین: ۰/۵۶) شناخته می‌شود (شکل ۱۲-B).

نمودار عنصرهای کمیاب بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه برای سنگ‌های ریوداسیتی- داسیتی درزهای ستونی علیشاهی در شکل ۱۲-A نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، سنگ‌ها از LILE (مانند: Rb, K, Th) و LREE (مانند: Ce و Sm) در برابر HFSE و HREE غنی‌شدگی نشان می‌دهند. تهی‌شدگی از HFSE (مانند: Nb, Ta و Ti) به خوبی دیده می‌شود. تهی‌شدگی از عنصرهای Nb و Ta پیامد کاهش انحلال این عنصرها در سیال‌ها و



شکل ۱۱- درزه‌های ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی رایین (کرمان) در نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی (Schandl and Gorton, 2002) بر پایه عنصرهای کمیاب Ta, Yb, Th و Hf (بر پایه ppm) (نمادها همانند جدول ۱) ACM: active continental-margin (within-plate volcanic zones :WPVZ within-plate basalt :WPB mid-ocean ridge basalt :MORB



شکل ۱۲- درزه‌های ستونی ریوداسیتی- داسیتی علیشاهی رایین (کرمان) در: (A) نمودار عنکبوتی بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995); (B) نمودار فراوانی عنصرهای خاکی نادر بهنجارشده به ترکیب کندریت (McDonough and Sun, 1995) (نمادها همانند جدول ۱)

است و آنومالی منفی Nb و Ta نشان می‌دهد (Taylor and McLennan, 1985). آنومالی منفی Nb و Ta در سنگ‌های ریوداسیتی-داسیتی درزهای ستونی علیشاهی نشان‌دهنده پیدایش در پهنه فرورانش است (Kaygusuza and Şen, 2011).

نتیجه‌گیری

در درزهای ستونی ریوداسیتی-داسیتی علیشاهی راین دو بخش ستون‌های منظم و مستقیم (کولونیدی) و ستون‌های کج‌شده و نامنظم (اینتبولیتور) به خوبی دیده می‌شوند. ترکیب سنگ شناختی آنها ریوداسیت-داسیت بوده و فراوان‌ترین کانی درشت آنها پلاژیوکلازهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار است. از کانی‌های دیگر که بیشتر به صورت میکروفونوکریست‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار است آلکالی‌فلدسپارها (مانند: ارتوکلاز و گهگاه سانیدین)، پیروکسن، بیوتیت، آپاتیت، هورنبلند (اوپاسیته‌شده)، تیتانیت و کانی‌های کدر را نام برد. این کانی‌ها همراه با فلدسپارها، در زمینه‌های شیشه‌ای و نهان‌بلور و گاه واشیشه‌ای شده جای گرفته‌اند. بافت سنگ‌های ریوداسیتی-داسیتی درزهای ستونی علیشاهی هیالو پورفیریتییک-گومروپورفیریتییک، پرلیتیک و بسیار کمتر، جریان‌ی است. برپایه بررسی‌های زمین‌شیمیایی و از دیدگاه ترکیبی، درزهای ستونی علیشاهی ریوداسیت-داسیت هستند و در سری ماگمایی ساب‌آلکان جای می‌گیرند. سرشت کالک‌آلکان، غنی‌شدگی بالا از عنصرهای با پتانسیل یونی کم (مانند: Cs،

همچنین، به باور McLennan و Taylor (۱۹۸۵)، چنانچه مقدار Eu/Eu^* بیشتر یا کمتر از یک باشد، به ترتیب آنومالی مثبت و منفی نشان می‌دهد. از آنجایی که Eu عنصری سازگار در پلاژیوکلاز و با درجه اهمیت کمتر در پتاسیم‌فلدسپار است، پس آنومالی منفی Eu بیشتر با جدایش فلدسپار (به‌ویژه در ماگماهای اسیدی) کنترل می‌شود (Nash and Crecraft, 1985). آنومالی منفی Eu پیامد خارج‌شدن فلدسپار از مذاب در هنگام جدایش بلوری یا ذوب‌بخشی سنگی است که در آن فلدسپار در خاستگاه ذوب به‌جای بماند (Ragland, 1989; Wilson, 1989; Rollinson, 1993). همچنین، تهی‌شدگی از Ba و Sr پیامد جدایش بلوری فلدسپار است. آنومالی منفی Eu در داسیت‌های Kuroko ژاپن پیامد دگرسانی گرمابی است (Shikazono, 2003) و در سنگ‌های گرانیوتییدی جنوب‌باختری انگلیس، تهی‌شدگی از Eu پیامد سرسیتی شدن فلدسپارهاست (Alderton *at al.*, 1980).

آنومالی منفی Eu و کاهش Sr، همراه با افزایش Si نشان‌دهنده اهمیت فلدسپار به‌عنوان فاز جدایش‌یافته از ماگما یا فاز بجامانده در خاستگاه ذوب است. در هر روی، نقش فرایندهای دگرسانی را هم نباید نادیده گرفت. همچنین، در روند تبلور ماگما، جداشدن فازهای تیتانیم‌دار (مانند: ایلمنیت و تیتانیت) و فسفردار (مانند: آپاتیت) به ترتیب کاهش Ta، Ti، Nb و P را در پی داشته‌دارند. پوسته قاره‌ای بسیار جدایش‌یافته از LREE غنی‌شدگی دارد و الگوی HREE آن هموار

مذاب‌های پهنه‌های فرورانش در ژرفای کم است. همچنین، در سنگ‌های اسیدی درزه‌های ستونی علیشاهی، آنومالی منفی Eu و کاهش Sr، همراه با افزایش Si نشان‌دهنده اهمیت فلدسپار به‌عنوان یک فاز جدایش‌یافته از ماگما یا بجامانده در خاستگاه ذوب است؛ اما نقش فرایندهای دگرسانی را نیز نباید نادیده گرفت.

سپاس‌گزاری

نگارندگان مقاله از راهنمایی ارزشمند داوران گرامی در بهبود هر چه بیشتر مقاله سپاس‌گزارند.

Rb، Ba، Th، K و U) و تهی‌شدگی از عنصرهای با پتانسیل یونی بالا (مانند: Nb، Zr، Ta و Ti) نسبت به ترکیب گوشته اولیه، آنومالی منفی Ti، Nb و Ta، الگوی غنی‌شدگی همراه با شیب تند LREE نسبت به HREE با یک شیب مثبت و الگوی هموار، گرایش به سوی سنگ‌های کالک‌آلکان با پتاسیم بالا، همگی نشان‌دهندهٔ پیدایش ماگمای اسیدی درزه‌های ستونی علیشاهی در پهنه حاشیه فعال قاره‌ای هستند. تهی‌شدگی در عنصرهای Nb و Ta پیامد کاهش انحلال این عنصرها در سیال‌ها و

منابع

- Alderton, D. H. M., Pearce, J. A. and Potts, P. J. (1980) Rare earth element mobility during granite alteration: Evidence from southwest England. *Earth and Planetary Science Letters* 49: 149-165.
- Baier, J., Audéat, A. and Keppler, H. (2008) The origin of the negative niobium tantalum anomaly in subduction zone magmas. *Earth and Planetary Science Letters* 267: 290-300.
- Bosshard, S. A., Mattsson, H. B. and Hetenyi, G. (2012) Origin of internal flow structures in columnar-jointed basalt from Hrepphólar, Iceland: I. Textural and geochemical characterization. *Bulletin of Volcanology* 74: 1645-1666.
- Budkewitsch, P. and Robin, P. Y. (1994) Modeling the evolution of columnar joints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 59: 219-239.
- Degraff, J. M. and Aydin, A. (1987) Surface morphology of columnar joints and its significance to mechanics and direction of joint growth. *Bulletin of Geological Society of American* 99: 605-617.
- Dimitrijevic, M. D. (1973) Geology of Kerman region. Geological Survey of Iran, Report Number YU/52.
- Djokovic, I., Dimitrijevic, M. N., Cvetic, S. and Dimitrijevic, M. D. (1972) Geological map of Iran sheet 7548—Khaneh-Khatun. Offset Press Incorporated, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Floyd, P. A. and Winchester, J. A. (1978) Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. *Chemical Geology* 21: 291-306.
- Forbes, A. E. S., Blake, S. and Tuffen, H. (2014) Entablator: fracture types and mechanisms. *Bulletin of Volcanology* 76: 820-833.
- French, J. W. (1922) The fracture of homogeneous media. *Geological Society of Glasgow Transaction* 17: 50-68.
- Gilbert, C. M. (1938) Welded tuff in eastern California. *Bulletin of Geological Society of American* 49: 1829-1862.

- Goehring, L. (2008) On the scaling and ordering of columnar joints. Ph.D. Thesis, Department of Physics, University of Toronto, Canada.
- Hetényi, G., Taisne, B., Garel, F., Medard, E., Bosshard, S. and Mattsson, H. B. (2012) Scales of columnar jointing in igneous rocks: field measurements and controlling factors. *Bulletin of Volcanology* 74: 457–482
- Humphris, S. E. (1984) The mobility of the rare earth elements in the crust. In: *Rare earth geochemistry* (Ed. Henderson, H.) 317-42, Elsevier, Amsterdam.
- Humphris, S. E. and Thompson, G. (1978) Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42: 127-36.
- Huxley, T. H. (1881) *Physiography: An introduction to the study of nature*. Macmillan & Co., London, UK.
- Iddings, J. P. (1886) Columnar structure in the igneous rocks on Orange Mountain, New Jersey. *American Journal of Science* 131: 321-330.
- 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: 523-548.
- Jiang, Y. H., Jiang, S. Y., Dai, B. Z., Liao, S. Y., Zhao, K. D. and Ling, H. F. (2009) Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting. *Lithos* 107: 185-204.
- Kaygusuza, A. and Şen, C. (2011) Calc-alkaline I-type plutons in the eastern Pontides, NE Turkey: U–Pb zircon ages, geochemical and Sr–Nd isotopic compositions. *Chemie der Erde – Geochemistry* 71: 59–75.
- Long, P. E. and Wood, B. J. (1986) Structures, textures, and cooling histories of Columbia River basalt flows. *Bulletin of Geological Society of American* 97: 1144–1155.
- Mallet, R. (1875) On the Origin and Mechanism of Production of the Prismatic (or Columnar) Structure of Basalt. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 23: 180-184.
- McDonough, W. F. and Sun, S. -S. (1995) Composition of the earth. *Chemical Geology* 120: 223-253.
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, R. L. and Allen, R. (1993) *Volcanic textures. A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania.
- Menger, F. M., Zhang, H., Caran, K. L., Seredyuk, V. A. and Apkarian, R. P. (2002) Gemini-induced columnar jointing in vitreous ice. Cryo-HRSEM as a tool for discovering new colloidal morphologies. *Journal of American Chemical Society* 20: 1140-1141.
- Menuge, J. F., Brewer, T. S. and Seeger, C. M. (2002) Petrogenesis of metaluminous A-type rhyolites from the St Francois Mountains, Missouri and the Mesoproterozoic evolution of the southern Laurentian margin. *Precambrian Research* 113: 269-291.
- Müller, G. (1998a) Starch columns: Analog for basalt columns. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 103: 15239-15253.
- Müller, G. (1998b) Experimental simulation of basalt columns. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 86: 93-96.
- Nash, W. P. and Crecraft, H. R. (1985) Partition coefficients for trace elements in silicic magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49: 2309-2322.

- Newbery, R. J., Burns, L. E., Swanson, S. E. and Smith, T. E. (1990) Comparative petrologic evolution of the Sn and W granite of the Fairbanks Circle area, interior Alaska. In: Ore-bearing systems, petrogenesis and mineralizing processes (Eds. Stein, H. J. and Hannah, J. L.) 246: 121-142. Geological Society of America, Special Paper.
- Pearce, J. A. (1975) Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. *Tectonophysics* 25: 41-67.
- 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.
- Pearce, J. A., Lippart, S. J. and Roberts, S. (1984) Characteristic and tectonic setting of Supra-subduction zone ophiolites. Geological Society of London, Special Publication 16: 77-96.
- Pearce, J. A. and Norry, M. J. (1979) Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69: 33-47.
- Phillips, J. C., Humphreys, M. C. S., Daniels, K. A., Brown, R. J. and Witham, F. (2013) The formation of columnar joints produced by cooling in basalt at Staffa, Scotland. *Bulletin of Volcanology* 75: 715-732.
- Ragland, P. C. (1989) *Basic Analytical Petrology*. Oxford University Press, New York.
- Rollinson, H. R. (1993) *Using geochemical data; evaluation, presentation, interpretation*. Longman Group Ltd., London, UK.
- Roobahani, L. and Arvin, M. (2010) Petrography, geochemistry and petrogenesis of rhyolitic and andesitic rocks of Nasir-Abad area, SW of Rayen, Kerman. *Petrology* 1: 1-16 (in Persian).
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97: 629-642.
- Seshadri, K. V. (1997) Columnar jointing in Mesozoic sandstone of Bhuj series, Kutch Basin, Gujarat, India. *Journal of Geological Society of India* 49: 452-453.
- Shikazono, N. (2003) *Geochemical and tectonic evolution of arc-back arc hydrothermal systems. Implication for the origin of Kuroko and epithermal-vein type mineralizations and the global geochemical cycle*. Elsevier, Amsterdam.
- Smith, R. E. and Smith, S. E. (1976) Comments on the use of Ti, Zr, Y, Sr, K, P and Nb in classification of basaltic magma. *Earth and Planetary Science Letters* 32: 114-120.
- Spry, A. (1962) The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows. *Journal of Australian Geological Society* 8: 192-216.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) *The Continental Crust: Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Blackwell, Oxford.
- Toramaru, A. and Matsumoto, T. (2004) Columnar joint morphology and cooling rate; a starch-water mixture experiment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 109: B02205.
- Twist, D. and Harmer, R. E. (1987) Geochemistry of contrasting siliceous magmatic suites in the Bushveld complex: genetic aspects and implication for tectonic discrimination diagrams. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 32: 83-98.
- Wilson, M. (1989) *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman Ltd., London.
- Winchester, J. A. and Floyd P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-343.

- Wood, D. A., Joron, J. L. and Treuil, M. (1979) A reappraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letters* 45: 326-336.
- Wright, H. M. N., Lesti, C., Cas, R. A. F., Porreca, M., Viramonte, J. G., Folkes, C. B. and Giordano, G. (2011) Columnar jointing in vapor-phase-altered, non-welded Cerro Galán Ignimbrite, Paycuqui, Argentina. *Bulletin of Volcanology* 73: 1567–1582.