

Petrology, geochemistry and tectonic setting of alkaline mafic rocks in the Jalal Abad area in the NW of Zarand (Kerman Province): Evidence for Paleo-Tethys rifting in the Central Iran

**Yusef Vesali^{1*}, Darush Esmaeili¹, Fatemeh Sepidbar¹
Maryam Sheibi² and Shojaaldin Niroomand¹**

¹ School of Geology, Faculty of science, University of Tehran, Tehran, Iran

² Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

The Jalal Abad region lies within the southern sector of Posht Badam block near to Jalal Abad, Najaf Abad iron deposits. In this region, several mafic intrusions and associated dyke and sills were intruded within the volcano-sedimentary unit of Rizu series and magnetite veins producing a narrow contact metamorphic aureole and overlain by Desu Series dolomites. These intrusion massives include irregular coarse-grained gabbro-diorites stocks and several NW-SE-trending basaltic dykes and sills. Petrographical and geochemical studies on the Jalal Abad mafic units reveal that they are alkaline in nature and based on the tectonic discrimination diagrams are grouped in alkaline basalts field of the intra-continental rift setting. They display LREE enrichment and HREE depletion, and significant enrichment in LILE in comparison to HFSE and HREE. Compositionally, they resemble modern OIB and the Hawaiian alkaline basalts. Magmas of these OIB-type and alkaline rock associations formed from partial melting of garnet-lherzolite facieses in the plume source, during the rift-drift and seafloor spreading evolution of the Proto-Tethys oceanic lithosphere during the Ordovician through Silurian periods.

Key words: gabbro, diorite, oceanic island basalts, rift, Jalal Abad, Posht Badam Block, Central Iran

* y.vesali@ut.ac.ir

سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی و خاستگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آلکان در منطقه جلال‌آباد زرنند (استان کرمان): نشانه‌هایی از کافت‌زایی پالتوتیس در ایران مرکزی

یوسف وصالی^۱،*، داریوش اسماعیلی^۱، فاطمه سپیدبر^۱، مریم شبیبی^۲ و شجاع‌الدین نیرومند^۱

^۱ دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

منطقه جلال‌آباد در شمال‌باختری شهر زرنند در استان کرمان جای دارد. این منطقه بخشی از جنوب‌خاوری بلوک پشت‌بادام است و با دارابودن کانسار مهم آهن، از بخش‌های مهم در کمربند سنگ آهن ایران مرکزی به‌شمار می‌رود. در سراسر این منطقه، توده‌های آذرین درونی فراوان مافیک، با ترکیب دیوریت-گابرو و هم‌ارزهای بیرونی آنها، شامل دایک‌های بازالتی، درون سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی سری‌های ریزو تزریق شده‌اند و رویداد دگرگونی همبری در این سنگ‌ها را در پی داشته‌اند. برپایه بررسی‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی و از دیدگاه ترکیبی، این سنگ‌ها دربردارنده سه دسته سنگی گابرو، دیوریت و بازالت هستند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند ماگمای سازنده سنگ‌های بررسی‌شده آلکان سدیک بوده است. برپایه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی (مانند: غنی‌شدگی از عنصرهای بزرگ‌یون و عنصرهای خاکی نادر سبک، همراه با تهی‌شدگی در عنصرهای خاکی نادر سنگین)، این سنگ‌ها در نمودارهای بهنجار شده در برابر ترکیب گوشته نرمال و بازالت جزیره‌های اقیانوسی، همانند مجموعه بازالت‌های آلکان پهنه‌های درون‌صفحه‌ای یا OIB های امروزی و بازالت‌های آلکان هاوایی هستند. کاربرد نمودارهای گوناگون برای شناسایی خاستگاه زمین‌ساختی نشان‌دهنده پیدایش این سنگ‌ها در پی خیزش و ذوب‌بخشی پلوم گوشته‌ای در محدوده گارنت لِرزولیت و در پهنه کافت درون‌صفحه‌ای، هنگام بازشدگی پالتوتیس در اردوویسین تا سیلورین است.

واژه‌های کلیدی: گابرو، دیوریت، بازالت جزیره‌های اقیانوسی، کافت، منطقه جلال‌آباد، بلوک پشت‌بادام، ایران مرکزی

مقدمه

برپایه ویژگی‌های چینه‌شناسی، زمین‌ساختی و

زمین‌شیمیایی سنگ‌های آذرین و دگرگونی، در

ایران مرکزی، چندین بلوک پوسته‌ای با تفاوت‌های

بخش‌های مرکزی ایران دارای فرگشت

زمین‌شناسی بسیار پیچیده‌ای است؛ به‌گونه‌ای که

* y.vesali@ut.ac.ir

اکیانوسی و درون صفحه‌ای تا حاشیه قاره (مگر پشته‌های میان اکیانوسی) یافت می‌شوند (Zhao *et al.*, 1995). این سنگ‌ها معمولاً در پهنه‌های کششی، در نقاط داغ درون صفحه‌ای (مانند: جزیره‌های اکیانوسی)، در گام‌های نخستین کافت‌زایی درون قاره‌ای و در بخش‌های درون قاره‌ای پهنه‌های فرورانش حاشیه قاره یافت می‌شوند (Wilson, 1989). این نوع ماگماتیسم در هر قاره‌ای بیشتر با کشش فعال سنگ‌کره‌ای در پهنه کافت‌های قاره‌ای (مانند: کافت‌های بایکال، خاور آفریقا و ریوگراند) و همچنین، بخش‌های فراتر از گستره قاره‌ها (باختر ایالات متحده، خاور چین، جنوب‌خاوری آسیا و جنوب‌خاوری استرالیا) همراه هستند (Sen, 2014). حضور سنگ‌های آتشفشانی که بیشترشان ترکیب آلکان دارند، از ویژگی‌های پالئوزویک زیرین و به‌ویژه اردوویسین تا دونین ایران است. رخنمون‌های آنها در شمال شاهرود، بازالت‌های سلطان‌میدان (Derakhshi and Ghasemi, 2015)، رباط قره‌بیل، جاجرم و اسفراین (Fathi, 1999)، کوه‌های شتری (Ruttner *et al.*, 1968)، شیرگشت (Derakhshi and Ghasemi, 2014)، سُه کاشان (Ayati *et al.*, 2010)، ترود (Houshmand-Zadeh *et al.*, 1978)، جام (Alavi Naini, 1972)، جنوب بجنورد (Fathi, 1999)، جهـــــــــق جنوب بهاباد (Tabatabaimanesh *et al.*, 2009)، شمال شاهرود (Balaghi *et al.*, 2010)، پل‌خاوند (Derakhshi and Ghasemi, 2014) و منطقه (Torabi and Hashemi, 2010) جلال‌آباد زرنند در جنوب بلوک پشت‌بادام دیده می‌شوند. با اینکه سنگ‌های آلکان پالئوزویک زیرین در منطقه جلال‌آباد زرنند گسترده‌گی دارند،

آشکار در فرگشت زمین‌ساختی شناخته شده‌اند (Stöcklin, 1968; Takin, 1972; Berberian and King, 1981; Aghanabati, 2004). از پیچیده‌ترین بخش‌های این منطقه، بلوکی کمائی شکل میان بلوک‌های یزد در باختر و بلوک طبس در خاور است که دربردارنده کهن‌ترین سنگ‌های پوسته ایران و میزبان مهم‌ترین کانسارهای آهن، سرب و روی و اورانیم است و به آن بلوک پشت‌بادام گفته می‌شود (Aghanabati, 2004). بررسی‌های بسیاری از پژوهشگران نشان می‌دهند بخش‌های گوناگون این بلوک هنگام رویدادهای گوناگون زمین‌ساختی دچار کشش و فرایندهای کافتش مرتبط با پالئوتتیس در پالئوزویک زیرین شده‌اند (Berberian and King, 1981; Samani, 1988; Balaghi *et al.*, 2010). ماگماتیسم کششی پالئوزویک زیرین در ایران مرکزی از مباحث مهم در زمین‌شناسی ایران است که تا کنون بررسی جامع و کاملی در ارتباط با علت‌ها و سازوکار رویداد آن و وابستگی آن با گسترش پوسته اکیانوسی پالئوتتیس انجام نشده است. در جنوب‌خاوری بلوک پشت‌بادام، در منطقه جلال‌آباد شهر زرنند، رخنمون‌های گسترده‌ای از سنگ‌های ماگمایی با ویژگی‌های کافتی و جایگاه چینه‌شناسی پالئوزویک زیرین دیده می‌شوند که در کنار کانسارهای مهم آهن (مانند: کانسارهای آهن جلال‌آباد، نجف‌آباد و کلاه‌کافر) جای گرفته‌اند. بررسی‌های Ale-Taha-Kuhbanani (۱۹۹۴) روی سنگ‌های آذرین منطقه نشان‌دهنده سرشت آلکان آنها و پیدایش آنها در پهنه زمین‌ساختی کافت‌های درون قاره‌ای هستند. سنگ‌های آتشفشانی آلکان در پهنه‌های زمین‌ساختی گوناگون، از پهنه‌های قاره‌ای تا

میان لایه‌هایی از شیل‌های ماسه‌ای با سیلتستون و عدسی‌های دولومیتی با سبزی ۱۰۰۰ متر است که در روی زمین رخمون ندارد (Gotlov and Esev, 1976). بخش بالایی این سری، از مجموعه گوناگونی از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی (مانند: سیلتستون، ماسه‌سنگ و توف‌های ماسه‌ای گوناگون با افق مگنتیتی، آهک‌های دولومیتی، توف‌های با ترکیب نیمه‌اسیدی، توفیت، توده‌های آذرین درونی و افق‌های نازک و عدسی‌مانندی از آهک‌های توفی و کنگلومراهای کربناته، سیلیسی) ساخته شده و به‌گونه هم‌شیب روی ماسه‌سنگ‌های زیرین جای گرفته است (شکل ۱) (Gotlov and Esev, 1976). رخساره‌های آواری، کربناته و آتشفشانی نشان‌دهنده تغییر زمین‌ساختی ناگهانی پهنه رسوبی هستند؛ به‌گونه‌ای که رخساره سیلتستون و ماسه‌ای ناگهانی جای خود را به رخساره آهک‌های دولومیتی و در پایان به‌گونه جانبی و محوری به رخساره ولکانوژن می‌دهد. مجموعه بزرگی از سنگ‌های آذرین در جنوب و جنوب‌باختری کانسار جلال‌آباد دیده می‌شود. برپایه ترکیب شیمیایی، این سنگ‌ها به دو گروه اسیدی و بازیک رده‌بندی می‌شوند. سنگ‌های اسیدی دربردارنده ریولیت، کوارتزپورفیری، ایگنمبریت، داسیت و توف‌های ریولیتی هستند و بخش بزرگی از سنگ‌های آذرین منطقه را در برمی‌گیرند. توده‌های گابرویی و دیوریتی، همراه با دایک و سیل‌های بازیک، از دیگر سنگ‌های آذرین در این منطقه هستند. این سنگ‌ها درون سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی ریزو و دولومیت‌های سری دزو تزریق شده‌اند (شکل‌های ۲-A تا ۲-D).

دایک و سیل‌ها روند NW-SE دارند و درازای آنها متغییر است و بزرگی برخی از آنها تا ۱۰۰۰ متر می‌رسد. این توده‌ها همه سنگ‌های کانسار را قطع می‌کنند. در پی تزریق این واحدها، رویداد

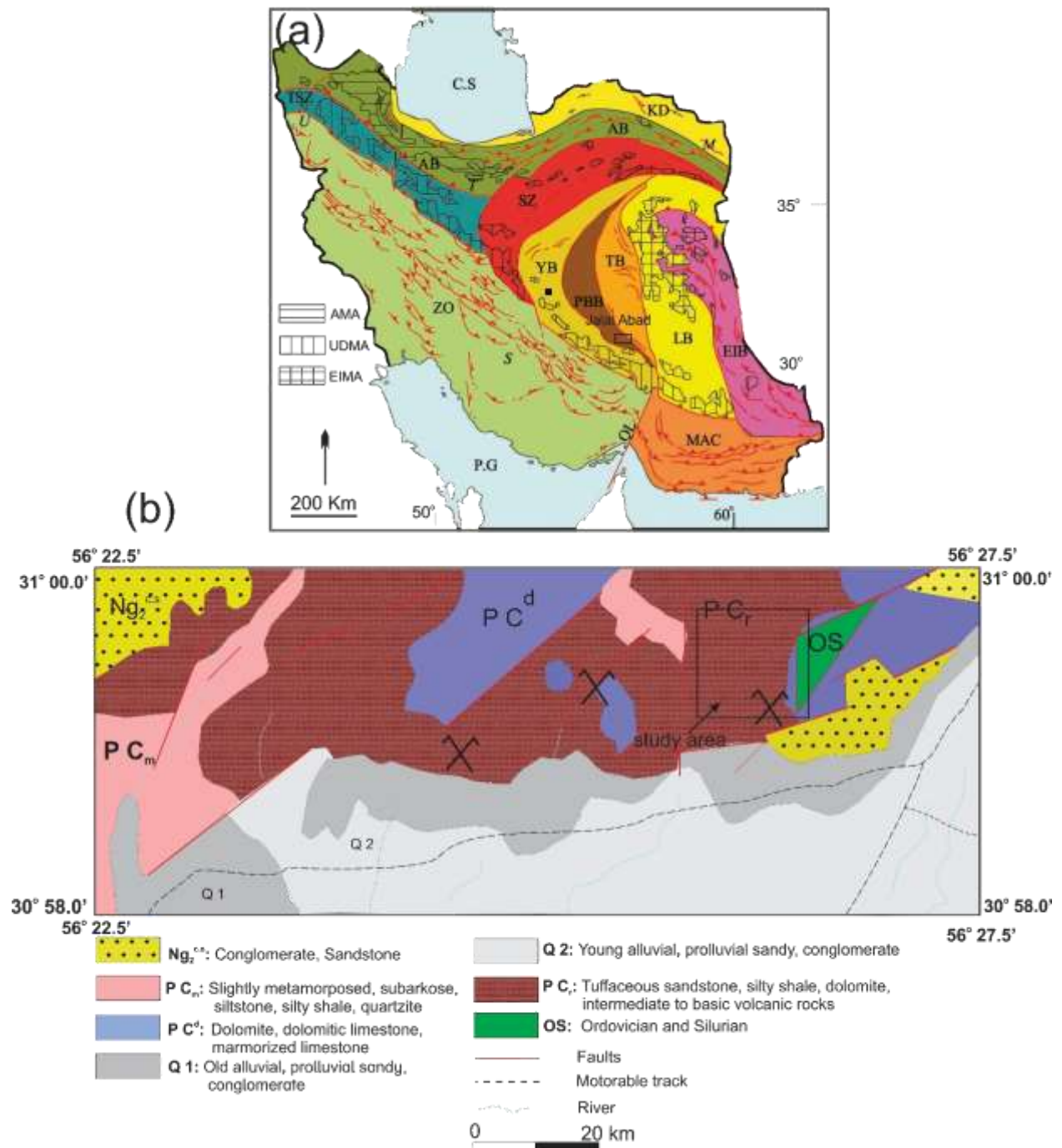
این مجموعه‌ها از دیدگاه سنگ‌شناسی بررسی نشده‌اند و درباره سرشت ماگماتیسم، سنگ‌زایی و خاستگاه زمین‌ساختی این سنگ‌ها نادانسته‌ها بسیار هستند. از این‌رو، بررسی دقیق سنگ‌شناسی و زمین‌شیمیایی این سنگ‌ها که بخشی از رخمون‌های ماگماتیسم پالئوزویک زیرین ایران هستند، گام ارزشمندی برای روشن‌تر شدن فرایندهای ماگماتیسم گوناگون در پالئوزویک زیرین این بلوک و نیز درک بهتر رفتار آنها هنگام بازشدگی پالئوتتیس است. در همین راستا، در این پژوهش تلاش شده است برای نخستین بار، این سنگ‌ها برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی و از دیدگاه سنگ‌شناسی، زمین‌شیمیایی و خاستگاه زمین‌ساختی به تفصیل بررسی شوند.

جایگاه زمین‌شناسی

منطقه جلال‌آباد در گستره عرض‌های جغرافیایی شمالی $31^{\circ}01'18''$ تا $31^{\circ}00'31''$ و طول‌های جغرافیایی خاوری $56^{\circ}25'42''$ تا $56^{\circ}25'00''$ و در شمال‌باختری استان کرمان جای دارد. برپایه پهنه‌بندی ایالت‌های زمین‌شناسی و ساختاری ایران، این منطقه بخشی از پهنه ایران مرکزی است که در بلوک پشت‌بادام جای گرفته است (شکل ۱-a). در منطقه جلال‌آباد، نهشته‌های مربوط به پرکامبرین، پالئوزویک، مزوزویک و ترشیری دیده می‌شوند (شکل ۱-b). کهن‌ترین سنگ‌های منطقه مربوط به سری مراد است. برپایه نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ داوران، سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی، کربناتی، آواری سری ریزو مهم‌ترین سنگ‌های سازنده منطقه هستند که با دگرشیمی زاویه‌دار روی سری مراد جای گرفته‌اند. بخش زیرین این سری، به‌نام ماسه‌سنگ زیرین، دربردارنده لایه‌های از ماسه‌سنگ‌های خاکستری، خاکستری مایل به سبز و صورتی، به‌همراه

داده‌های حفاری، این دایک‌ها در افق‌های زیرین کانسار، لایه‌های آهن‌دار را قطع کرده و سیستم‌های گرمایی در پیرامون دایک‌ها را گسترش داده‌اند.

دگرگونی همبری در سنگ‌های آذرین فلسیک کهن‌تر (مانند: ریولیت‌های و کوارتزپورفیری‌ها) و همچنین، دولومیت‌های بخش بالایی کانسار روی داده است (شکل‌های A-۲ و B-۲). برپایه



شکل (۱-۱) جایگاه کانسار جلال‌آباد (زرنند، کرمان) در بلوک پشت‌بادام؛ (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه جلال‌آباد برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ (Vahdati, 1995) داوران



شکل ۲- تصویرهای صحرایی از منطقه جلال‌آباد زرند، کرمان. (A) نمایی از تزریق دایک‌های مافیک درون سنگ‌های آتشفشانی فلسیک سری ریزو و پیدایش هاله دگرگونی همیری در آنها؛ (B) نمایی از تزریق دایک بازالتی درون دولومیت‌های سری ریزو؛ (C) پچ دیوریتی درون سنگ‌های فلسیک سری ریزو؛ (D) نمایی از گابروها

روش انجام پژوهش

پس از انجام بازدیدهای صحرایی و نمونه‌برداری سطحی از توده‌های آذرین درونی و دایک‌های همراه، با به‌کارگیری مغزه‌های حفاری، نمونه‌برداری زیرسطحی نیز انجام شد. شمار ۱۰۰ نمونه سنگی برای بررسی‌های سنگ‌نگاری برگزیده و از آنها مقطع نازک ساخته شد. برپایه سنگ‌شناسی گوناگون در این منطقه، نمونه‌هایی از همه سنگ‌های سالم کانسار تجزیه زمین‌شیمیایی شدند. روش XRF برای عنصرهای اصلی در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران (کرج) به‌کار برده شد. برای عنصرهای فرعی (برخی عنصرهای کمیاب و عنصرهای خاکی

در برخی بخش‌ها، به‌ویژه در مسیر رودشور، مالاکیت و آزوریت در این دایک‌ها گسترش یافته‌اند. این پدیده نشان‌دهنده وابستگی زایشی میان کانی‌زایی مس با این دایک‌هاست. توده‌های آذرین درونی از لایه‌های آتشفشانی-رسوبی سری ریزو می‌گذرند و از آنها جوان‌تر هستند. گابروها و دیوریت‌ها توده‌های آذرین درونی کم‌ژرفا و کوچکی به‌بزرگی ۲۰۰ در ۳۰۰ متر هستند. این توده‌های آذرین درونی از سنگ‌های وابسته به سری ریزو می‌گذرند و بیشتر به‌صورت پچ درون آنها دیده می‌شوند (شکل ۲- C). در بخش جنوبی معدن، گابروها با ریخت تپه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۲- D).

ICP-AES و ICP-MS به کار برده شد. داده‌های به دست آمده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

نادر) نیز در شرکت SGS کانادا روش تجزیه ۴۹ عنصری انحلال ۴ اسیدی بر پایه کاربرد دو روش

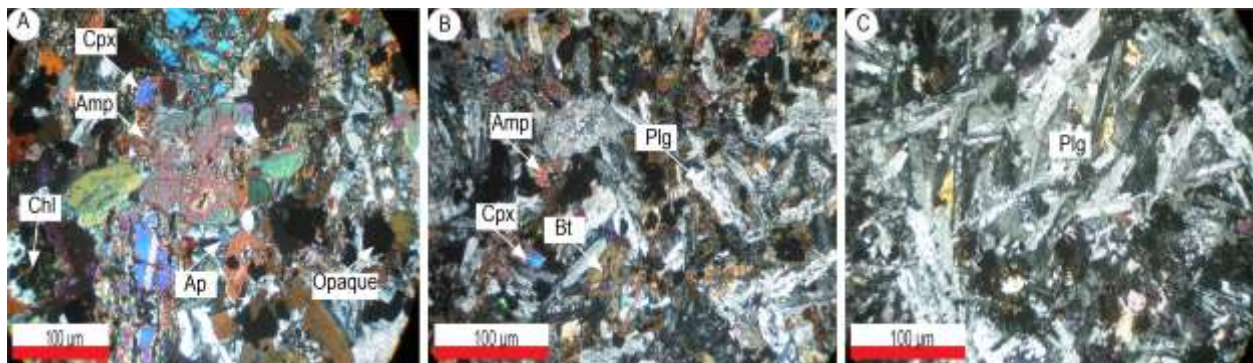
جدول ۱- فراوانی عنصرهای اصلی (بر پایه درصدوزنی) و کمیاب (بر پایه ppm) برای گابرو- دیوریت و دایک‌های جلال‌آباد (زرنند، کرمان)

Sample No.	JA-62	ZRD-28	JRM-6	ZRD-31	ZRD-33	ZRD-32	ZRD-81	ZRD-80	ZRD-8	ZRD-10	JPM-13	JPM-7	ZRD-42	ZRD-41
Rock Type	basalt	basalt	basalt	basalt	basalt	basalt	Diorite	Diorite	diorite	diorite	gabbro	gabbro	gabbro	gabbro
SiO ₂	50.35	49.85	46.37	52.91	50.58	45.85	47.08	47.90	46.66	47.26	42.01	40.27	41.32	40.96
Al ₂ O ₃	18.25	16.87	16.32	16.67	17.29	16.90	1549.00	18.37	18.44	17.15	14.28	11.58	12.97	11.63
Fe ₂ O ₃	11.88	13.21	13.88	10.95	12.25	12.95	14.15	12.39	14.34	14.29	17.12	18.90	18.06	18.08
CaO	4.43	4.64	3.58	4.06	3.76	5.48	8.08	5.87	5.40	6.21	7.68	9.50	8.40	9.12
MgO	2.92	2.82	6.01	1.17	4.37	5.39	3.94	3.44	4.10	2.95	6.65	6.52	7.25	6.53
Na ₂ O	2.80	2.43	2.20	2.10	1.95	3.60	1.89	2.31	2.70	2.92	1.65	1.23	1.41	1.37
K ₂ O	1.80	2.27	1.82	4.59	1.75	1.54	1.14	1.33	1.38	1.43	1.51	1.34	1.16	1.47
TiO ₂	2.30	2.53	3.21	1.27	2.36	2.72	3.57	3.58	2.84	3.11	5.68	6.45	6.48	6.56
MnO	-	0.26	-	-	0.21	-	-	0.02	0.24	-	-	-	0.22	-
P ₂ O ₅	1.33	1.30	0.68	0.58	0.67	1.88	0.71	0.72	0.71	0.99	0.73	0.59	0.70	0.62
LOI	3.96	3.70	5.57	4.74	4.82	3.72	3.79	3.89	3.20	3.53	2.70	4.64	2.03	4.85
Total	100.02	99.88	99.75	99.18	100.01	100.03	99.84	99.92	100.01	100.00	100.01	101.02	100.00	101.16
Li	25.5	35.8	62.5	27.7	32.5	40	61.3	59.2	134	124	44.7	48.6	57.7	52.4
Sc	8.5	9.7	10.1	5.3	9.7	10	13.0	10.3	10.4	11.1	19.9	21.8	23.8	22.9
V	130	139	203	0	200	144	268	287	220	224	435	483	531	500
Co	25.7	37.0	42.3	7.1	42.1	52.1	38.2	39.9	42.0	42.1	64.6	75.1	80.6	77.8
Cr	19.1	37	170	16.1	79.4	27	127	82.7	41.4	40.7	178	242	227	230
Ni	13.1	14.0	107	3.2	41.0	13	77.0	59.2	36.6	34.2	106	140	138	138
Ga	23.3	24.9	23.6	28.8	27.1	22	25.5	25.9	22.5	23.2	24.3	23.6	26.7	23.8
Rb	39.9	43.1	46.7	80.2	67.7	44.4	29.2	34.1	55.4	49.3	27.2	104	27.2	105
Sr	470	537	675	432	287	461	942	730	770	960	649	390	668	392
Y	31.5	36.0	22.3	19.3	21.3	35.7	29.2	24.3	22.5	27.4	41.3	35.2	41.7	37.7
Zr	90.1	102	141	147	84.8	90	169	111	137	162	262	210	267	218
Nb	65.0	76.6	67.1	99.7	64.2	60	63.7	56.3	57.0	64.4	58.4	48.7	53.1	49.1
Cs	0.45	0.38	1.08	5.98	0.67	0.5	0.67	0.27	0.87	1.01	0.45	8.63	0.64	9.17
Ba	797.8	1258.4	678.8	736.4	1304.0	977	1240	676.6	597.2	596.2	628.2	326.8	507.8	330.6
La	51.0	62.1	52.8	45.5	39.6	46.9	59.1	48.0	55.8	60.1	54.8	43.1	48.3	44.3
Ce	120	132	110	92.2	83.4	86.3	120	94.9	114	124	136	110	118	116
Pr	13.1	15.6	11.9	9.94	9.02	12.2	12.8	10.8	12.4	13.1	16.8	13.8	14.9	14.3
Nd	51.7	61.5	46.4	36.5	35.7	48.2	49.7	43.2	46.0	47.8	74.0	60.4	65.1	62.5
Sm	11.7	13.2	9.65	7.94	7.98	10	10.1	8.91	8.95	9.95	16.2	13.8	15.3	14.2
Eu	4.70	4.77	3.67	2.48	3.13	3.12	3.99	3.37	3.35	3.80	5.84	4.73	5.36	5.10
Gd	13.2	13.6	10.5	7.56	8.19	8.95	11.1	9.65	8.90	9.97	17.3	14.7	15.8	15.6
Tb	1.60	1.75	1.24	1.06	1.05	1.24	1.32	1.21	1.21	1.24	2.05	1.80	1.85	1.88
Dy	9.02	10.3	6.27	5.57	5.44	7.18	7.42	6.50	6.63	6.85	11.1	9.77	10.3	9.72
Ho	1.51	1.73	1.06	0.92	0.99	1.23	1.43	1.07	1.01	1.20	1.85	1.66	1.78	1.70
Er	3.55	4.01	2.41	2.28	2.13	3.56	3.51	2.49	2.63	3.24	4.46	4.12	4.16	3.96
Yb	1.9	2.0	1.6	1.4	1.3	2.6	1.9	1.6	1.8	1.9	2.7	2.5	2.6	2.5
Lu	0.22	0.22	0.16	0.18	0.12	0.4	0.24	0.17	0.21	0.25	0.33	0.34	0.31	0.31
Hf	3.82	4.11	4.84	3.59	2.84	8	5.87	3.93	4.45	5.22	9.39	7.59	9.30	7.60
Ta	4.21	5.08	4.09	5.19	3.66	3.1	4.74	3.78	3.58	3.75	4.14	3.33	3.75	3.22
Pb	6	7	7	4	8	35	6	6	17	12	26	6	18	6
Th	4.4	5.5	4.0	4.0	2.6	5.7	5.9	4.3	4.4	4.8	2.7	2.6	3.0	2.5
U	0.8	1.0	1.4	0.4	0.7	1.29	1.3	0.8	1.0	1.0	1.0	0.7	0.9	0.7

سنگ‌نگاری

قهوه‌ای هستند که تا ۴۰ تا ۵۰ درصد حجم کانی‌های مافیک سنگ را در برمی‌گیرند. اندازه آمفیبول‌ها ۰/۱ تا ۵ میلی‌متر است. کانی‌های دیگر گابروها (مانند: فنوکریست‌های ترمولیت، کلینوپیروکسن و الیوین) در زمینه‌ای دانه‌ریز هستند و این کانی‌ها با کانی‌های فرعی و ثانویه (مانند: آپاتیت، کلریت، کربنات و کانی‌های کدر) همراهی می‌شوند.

بررسی‌های سنگ‌نگاری سنگ‌های مافیک منطقه جلال‌آباد نشان می‌دهند این سنگ‌ها دربردارنده سه دسته سنگی بازالت، گابرو و دیوریت هستند (شکل‌های ۳- A تا ۳- C). گابروها مهم‌ترین توده‌های آذرین درونی در این منطقه هستند. ویژگی اصلی گابروها، بلورهای آمفیبول



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی (XPL) از کانی‌شناسی سنگ‌های آذرین جلال‌آباد (زرنند، کرمان). (A) گابرو؛ (B) دیوریت؛ (C) بلورهای پلاژیوکلاز همراه با اپیدوت و کلریت در دایک‌های بازالتی (نام اختصاری کانی‌ها از Kretz (۱۹۸۳) برگرفته شده است)

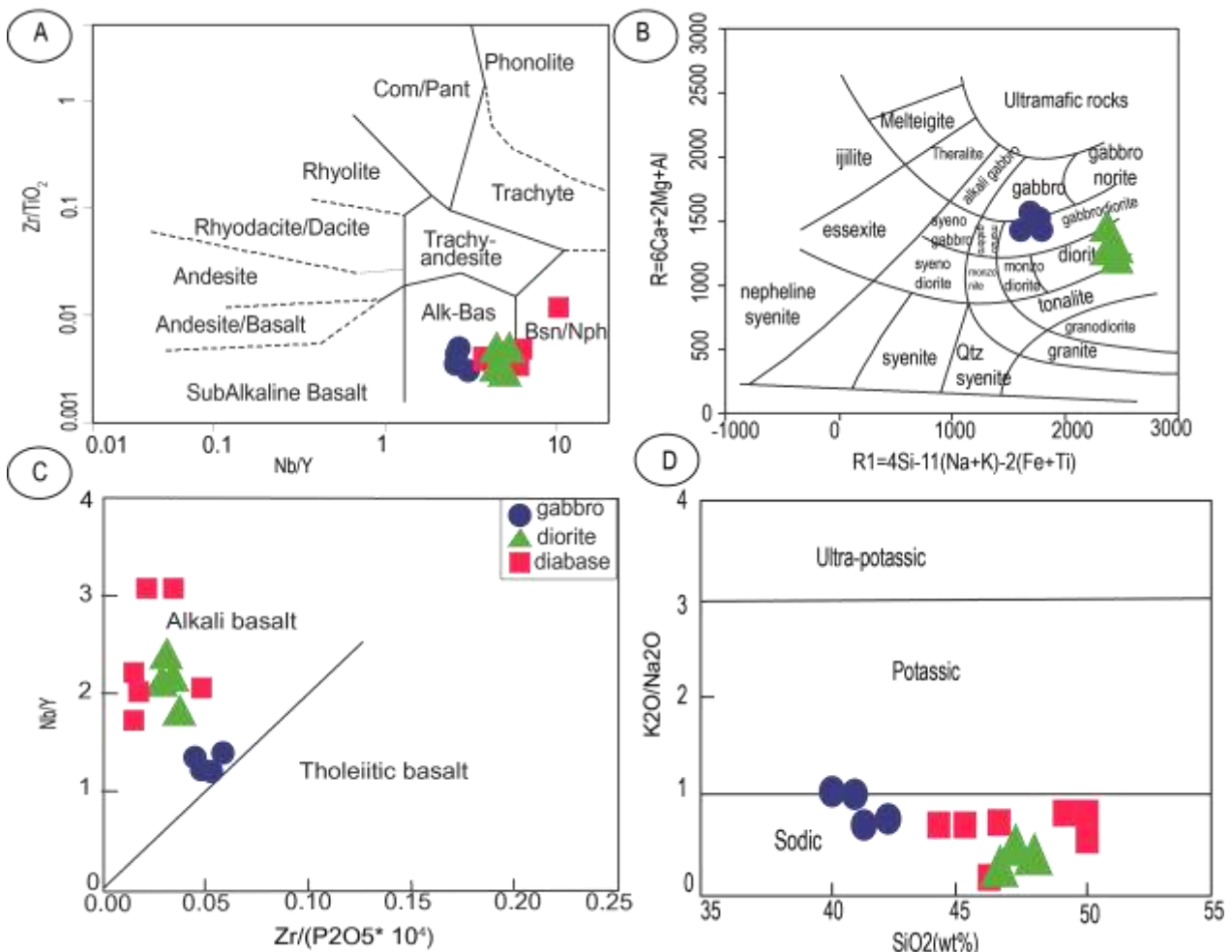
است. همچنین، بافت پویی کیلیتیک نیز در برخی نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۳- A). در بازالت‌ها، پلاژیوکلاز کانی اصلی بوده و نزدیک به ۶۵-۷۰ درصد حجم سنگ را در برمی‌گیرد. این کانی بیشتر با شکل‌های بلوری میله‌ای، مستطیلی شکل دار و نیمه‌شکل دار، با ماکل پلی‌سینتتیک و آلبیتی دیده می‌شود. بیشتر این کانی‌ها دچار دگرسانی سوسوریتی و سرسیتی شده‌اند. کانی‌های پیروکسن همراه با کانی‌های کدر، آپاتیت و بیوتیت نیز در این سنگ‌ها دیده می‌شوند. کلسیت، اپیدوت، کلریت و ... از کانی‌هایی ثانویه‌ای هستند که در پی دگرسانی این سنگ‌ها پدید آمده‌اند. بافت این سنگ‌ها گرانولار و اینترسرتال است (شکل ۳- C).

دیوریت‌ها بیشتر از پلاژیوکلاز، پیروکسن و بیوتیت ساخته شده‌اند. بلورهای پلاژیوکلاز عموماً در مرکز سوسوریتی شده‌اند. بافت این سنگ‌های دیوریتی، گرانولار و اینترگرانولار است (شکل ۳- B). کانی‌های فرعی دیوریت‌ها بیشتر دربردارنده کوارتز، بیوتیت و آپاتیت هستند و نزدیک به ۲۰ درصد حجمی سنگ را در برمی‌گیرند. کانی فرعی آپاتیت درون هورنبلند و پلاژیوکلازها دیده می‌شود. کانی‌های کدر و اکسیدهای آهن نیز در متن سنگ پراکنده هستند. کانی‌های ثانویه سرسیت، کلریت، اپیدوت، بیوتیت، کوارتز و کلسیت در دیوریت‌ها دیده می‌شوند. بافت دیوریت، گرانولار و اینترگرانولار است. در این بافت فضای میان تیغه‌های پلاژیوکلاز با یک یا چندین کانی پیروکسن (\pm الیوین و کانی‌های کدر) پر شده

زمین‌شیمی

برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آذرین منطقه جلال‌آباد، داده‌های عنصرهای اصلی و کمیاب به‌کار برده شدند. سنگ‌های جلال‌آباد دارای بازه ترکیبی SiO_2 از ۴۱/۳۲ تا ۵۲/۹۱ درصدوزنی هستند. همچنین، در این سنگ‌ها، مقادیر بالای TiO_2 (۱/۲۷ تا ۶/۴۸ درصدوزنی)، MgO متوسط تا بالا (۱/۱۷ تا ۷/۲۵ درصدوزنی) همراه با تغییر بسیار در مقدار Cr

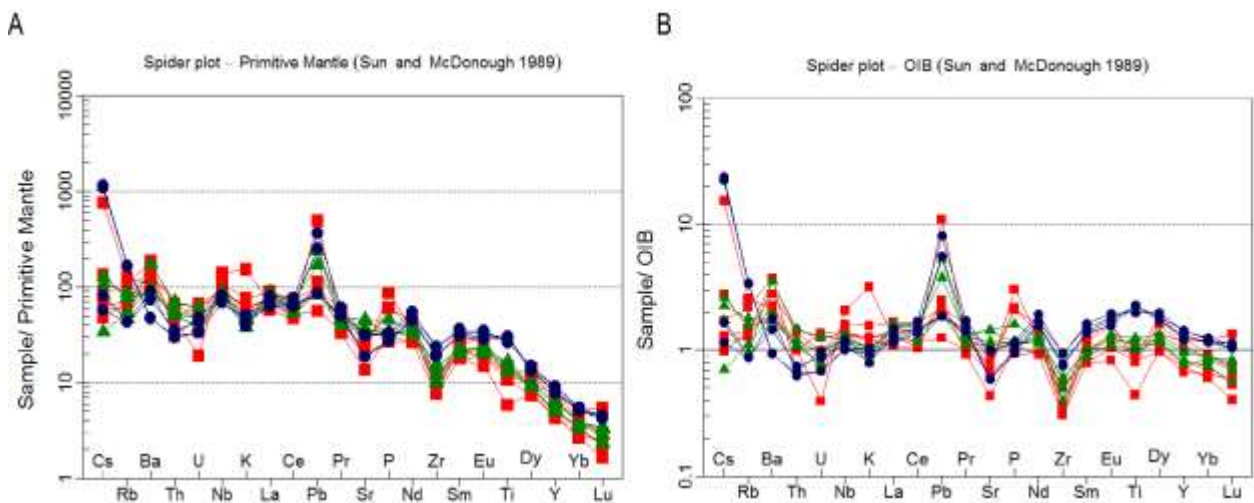
(۱۹/۱ تا ۲۴۲ ppm) و Ni (۱۳/۱ تا ۱۴۰ ppm) و فراوانی برخی عنصرهای ناسازگار دیده می‌شوند (جدول ۱). از آنجایی که ترکیب شیمیایی و سنگ‌شناسی نمونه‌های بررسی‌شده همسانی دارد، برای نامگذاری این سنگ‌های برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی، نمودار Nb/Y در برابر Zr/TiO_2 به‌کار برده شد. در این نمودار نمونه‌های سنگی آذرین آتشفشانی و درونی در گستره بازالت‌های آلکالن جای می‌گیرند (شکل ۴- A).



شکل ۴- ویژگی زمین‌شیمیایی سنگ‌های مافیک کانسار جلال‌آباد (زرند، کرمان) در: (A) نمودار Zr/TiO_2 در برابر Nb/Y (Winchester and Floyd, 1977)؛ (B) نمودار R_1 در برابر R_2 (De la Roche et al., 1980)؛ (C) نمودار $\text{Zr/P}_2\text{O}_5 \cdot 10^4$ در برابر Nb/Y (Floyd and Winchester, 1975)؛ (D) نمودار SiO_2 در برابر $\text{K}_2\text{O/Na}_2\text{O}$ (نمادهای به‌کاررفته در همه نمودارها یکسان هستند: دایره آبی: گابرو؛ مثلث سبز: دیوریت؛ مربع سرخ: بازالت)

برای گوشته اولیه، نمونه‌های منطقه جلال‌آباد الگو و روند کاهشی نسبی با غنی‌شدگی از عنصرهای LILE و LREE در برابر HREE را آشکار می‌سازند (شکل ۵- A). عنصرهای HFSE (مانند: Th, U و Zr) همراه با K و Sr، آنومالی منفی و عنصرهای Ba, Nb, La و Pb، غنی‌شدگی مثبت دارند. الگوهای بهنجارشده در برابر بازالت‌های جزیره‌های اقیانوسی Sun و McDonough (۱۹۸۹) برای سنگ‌های مافیک منطقه جلال‌آباد روندی افقی و همانند بازالت‌های جزیره‌های اقیانوسی نشان می‌دهند (شکل ۵- B). در این نمودار، عنصرهای Ti, Zr, Sr, K و U در برابر ترکیب OIB، تهی‌شدگی و عنصرهای Ba, Nb و Pb غنی‌شدگی نشان می‌دهند.

افزون بر این، در نمودار R_1 در برابر R_2 که برای رده‌بندی توده‌های نفوذی به کار برده می‌شود، سنگ‌های آذرین بررسی شده در گستره گابرو و دیوریت جای می‌گیرند (شکل ۴- B). نمودار $Zr/P_2O_5 * 10^4$ در برابر Nb/Y برای شناسایی سری ماگمایی نمونه‌های سنگی جلال‌آباد به کار برده شد. برپایه این نمودار نمونه‌های بررسی شده دارای گرایش آکالن هستند (شکل ۴- C). سری‌های آکالن برپایه نسبت K_2O/Na_2O سه گروه سدیک، پتاسیک و التراپتاسیک دارند. نمونه‌های آکالن منطقه جلال‌آباد نیز گرایش سدیک از خود نشان می‌دهند (شکل ۴- D). در نمودار چندعنصری بهنجارشده در برابر ترکیب پیشنهادی Sun و McDonough (۱۹۸۹)



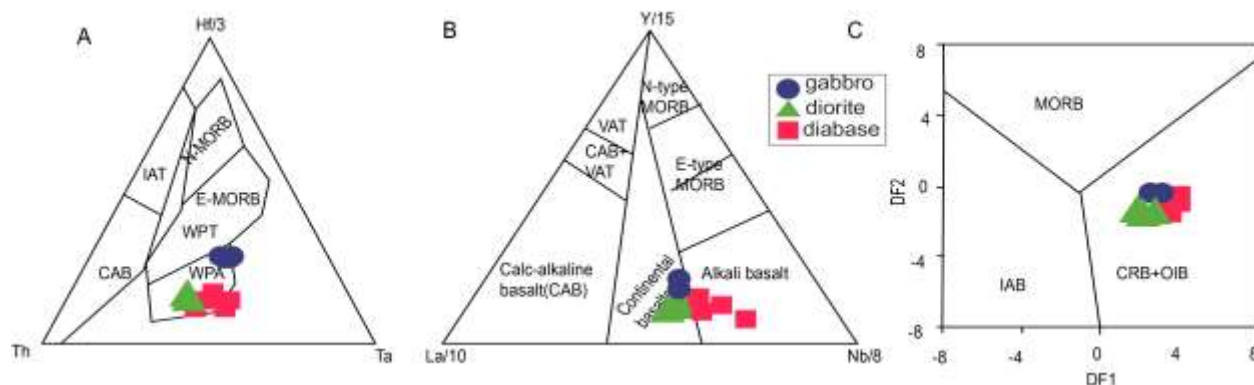
شکل ۵- الگوی چندعنصری ترکیب سنگ‌های آذرین جلال‌آباد (زرنند، کرمان) در: (A) نمودار بهنجارشده در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989); (B) نمودار بهنجارشده در برابر ترکیب بازالت‌های جزیره‌های اقیانوسی یا OIB (Sun and McDonough, 1989) (نمادها همانند شکل ۴ هستند)

بهره گرفته شد. در نمودار سه‌تایی Th-Zr/117-Nb/16 که برپایه عنصرهای HFSE پیشنهاد شده است، نمونه‌های بررسی شده در گستره WPA یا بازالت‌های آکالن درون‌صفحه‌ای جای می‌گیرند. در نمودار سه‌تایی Y/15-La/10-Nb/8 در گستره

در کل، وابستگی نزدیکی میان ترکیب شیمیایی سنگ‌ها و خاستگاه زمین‌ساختی آنهاست. از این‌رو، از داده‌های به‌دست‌آمده در بررسی‌های زمین‌شیمیایی برای شناسایی خاستگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آذرین منطقه جلال‌آباد

زمین‌ساختی سنگ‌های الترابازیک-بازیک هستند. در این نمودار، نمونه‌های بررسی‌شده در گستره بازالت‌های میان‌صفحه‌ای و بازالت جزیره‌های اقیانوسی جای می‌گیرند.

بازالت‌های قاره‌ای جای می‌گیرند. افزون‌بر این، نمودار دوتایی DF_1 در برابر DF_2 ، برپایه نسبت‌های عنصرهای TiO_2 ، V ، Nb ، Y و Zr است. اینها با ارزش‌ترین عنصرها در شناسایی پهنه



شکل ۶- جایگاه نمونه‌های جلال‌آباد (زرند، کرمان) در: (A) نمودار شناسایی پهنه زمین‌ساختی Th-Hf/3-Ta (Wood, 1980)؛ (B) نمودار سه‌تایی Y/15-La/10-Nb/8 (Cabanis and Lecolle, 1989) برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی؛ (C) نمودار شناسایی خاستگاه زمین‌ساختی پیشنهادی Agrawal و همکاران (۲۰۰۸)؛ IAT: توله‌ایت‌های جزیره‌های کمائی؛ VAT: توله‌ایت‌های کمائی؛ WPA: قاره‌ای؛ سنگ‌های آکالن میان‌صفحه‌ای؛ IAB: بازالت‌های جزیره‌های کمائی؛ CRB: بازالت‌های کافت قاره‌ای (نمادها همانند شکل ۴ هستند)

بحث و بررسی

خاور آفریقا و ریوگراند) و همچنین، بخش‌های دورتر از گستره قاره‌ها (باختر ایالات متحده، خاور چین، جنوب‌خاوری آسیا و جنوب‌خاوری استرالیا) همراه هستند (Sen, 2014). بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های مافیک جلال‌آباد (مانند: روند الگوهای به‌هنجارشده در برابر گوشته اولیه و بازالت‌های جزیره‌های اقیانوسی همراه با نسبت‌های عنصری) نشان‌دهنده‌ی همانندی آنها با بازالت‌های میان‌اقیانوسی است. معمولاً بازالت‌های میان‌اقیانوسی الگوهای عنصری ویژه‌ای دارند که برای شناسایی آنها از بازالت‌های پهنه‌های زمین‌ساختی دیگر به‌کار برده می‌شوند. دارا بودن روند کاهشی در نمودار چندعنصری به‌هنجارشده در برابر ترکیب گوشته اولیه، همراه با نبود آنومالی منفی عنصرهای Nb ، P و Ti ، نشان‌دهنده‌ی ویژگی‌های آشکار ماگماتیسم آکالن درون‌صفحه‌ای

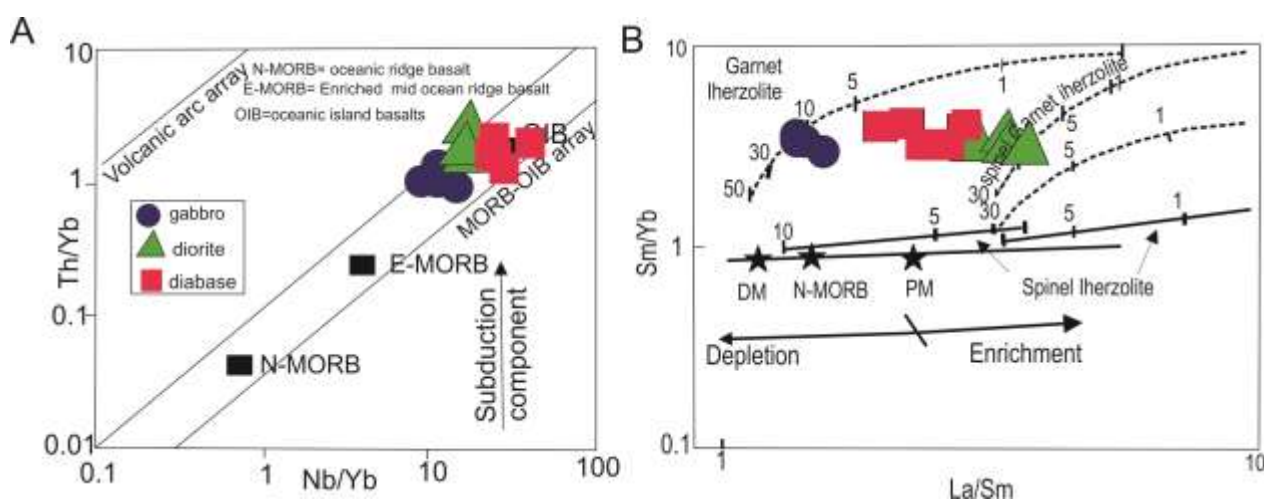
سنگ‌های مافیک منطقه جلال‌آباد دربردارنده‌ی دایک و سیل‌های بازالتی و توده‌های آذرین دیوریتی و گابروبی هستند. این سنگ‌ها سرشت آکالن با گرایش سدیک دارند. سنگ‌های آتشفشانی آکالن در پهنه‌های زمین‌ساختی گوناگونی (از پهنه‌های قاره‌ای تا اقیانوسی و درون‌صفحه‌ای تا حاشیه قاره، مگر پشته‌های میان اقیانوسی) یافت می‌شوند (Zhao *et al.*, 1995). این سنگ‌ها معمولاً در پهنه‌های کششی، در نقاط داغ درون‌صفحه‌ای (مانند: جزیره‌های اقیانوسی)، در مرحله‌های نخستین کافت‌زایی درون‌قاره‌ای و در بخش‌های درون قاره‌ای پهنه‌های فرورانش حاشیه قاره یافت می‌شوند (Wilson, 1989). این نوع ماگماتیسم در هر قاره‌ای بیشتر با کشش فعال سنگ‌کره‌ای در جایگاه کافت‌های قاره‌ای (مانند: کافت‌های بایکال،

شناسایی خاستگاه آلکالی‌بازالت‌های وابسته به پلوم و ناوابسته به پلوم پیشنهاد داده‌اند. بر پایه آن، مقادیرهای $\Delta Nb > 0$ نشان‌دهنده خاستگاه پلوم است؛ اما سنگ‌های با مقادیرهای $\Delta Nb < 0$ خاستگاه پلوم ندارند. مقادیرهای ΔNb برای سنگ‌های درون‌صفحه‌های قاره‌ای بیشتر از صفر و برای مورب‌ها و بازالت‌های کمافی منفی است. ΔNb در نمونه‌های منطقه جلال‌آباد ۰/۰۷۹ تا ۰/۹۲۴ و میانگین آن ۰/۴۳ است؛ از این رو، در محدوده سنگ‌های آلکان مرتبط با پلوم جای می‌گیرند. بررسی ماگماتیسیم آلکان در جزیره‌های اقیانوسی نشان می‌دهد ترکیب مذاب پدیدآمده از پلوم فراخاسته به ترکیب مواد، دما در پلوم و همچنین، ژرفا و رخساره سنگی ناحیه خاستگاه بستگی دارد (Winter, 2014). سرشت آلکان ماگمای بازالتی پیامد دو سازوکار است: (۱) نرخ کم ذوب‌بخشی سنگ خاستگاه گارنت‌لرزولیتی؛ (۲) ذوب‌بخشی گوشته متاسوماتیسیم شده، (Best, 2003).

درجه ذوب‌بخشی خاستگاه گوشته‌ای برپایه نسبت‌های فراوانی عنصرهای کمیاب گوناگون ارزیابی می‌شود (Zhou *et al.*, 2008). از آنجایی که هر دو عنصر La و Sm در پی تغییر کانی‌شناسی خاستگاه (مانند: گارنت و یا اسپینل)، دگرگون نمی‌شوند، پس درباره ترکیب کلی خاستگاه ماگماهای مافییک اطلاعاتی را آشکار می‌کنند. از سوی دیگر، برپایه سازگاربودن Yb در گارنت در برابر Sm در ناحیه خاستگاه، این عنصرها در شناخت کانی‌شناسی خاستگاه کارآمد هستند (Shaw, 1970). برای ارزیابی ویژگی‌های کانی‌شناسی و خاستگاه سنگ‌های مافییک کانسار جلال‌آباد، نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb به کار برده شد. در این نمودار، خاستگاه نمونه‌های بررسی‌شده از گوشته‌ای است که ساختار آن از گارنت+اسپینل لرزولیت و گارنت لرزولیت بوده است (شکل ۷-B).

قاره‌ای است و نبود آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهد. الگوی هم‌روند در نمودار چندعنصری بهنجار شده در برابر ترکیب OIB، همراه با نسبت نزدیک به یک در این نمودار، همانندی نمونه‌های جلال‌آباد با بازالت‌های آلکان میان‌صفحه‌ای را نشان می‌دهد. این پدیده نشان‌دهنده خاستگاهی گوشته‌ای همانند OIB و جایگاه درون‌صفحه‌ای برای آنهاست. برای شناسایی خاستگاه ماگمای مادر سنگ‌های مافییک منطقه جلال‌آباد، نمودارهای گوناگون سنگ‌زادی به کار برده شدند. نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb سنگ‌هایی با خاستگاه گوشته تهی‌شده (MORB) و گوشته غنی‌شده (OIB) را از هم جدا می‌کند. در این نمودار، همه نمونه‌ها در گستره بازالت‌های میان‌اقیانوسی (OIB) جای می‌گیرند (شکل ۷-A). این نکته خاستگاه غنی‌شده نوع OIB برای سنگ‌زایی سنگ‌های این منطقه را نشان می‌دهد. به باور Fitton (۲۰۰۷)، بازالت‌های آلکان و انتقالی درون‌صفحه‌های قاره‌ای که ترکیبی همانند بازالت‌های OIB دارند، خاستگاه مبهم در برابر OIB‌های واقعی دارند. در کل، گمان می‌رود در پهنه‌های میان‌قاره‌ای، زایش آلکالی‌بازالت‌ها همانند زایش بازالت‌های OIB وابسته به فرایندهای پلوم گوشته‌ای و یا ذوب مواد سست‌کره‌ای بالازده باشد (McKenzie and O'Nions, 1991). در حقیقت، اجتماع‌های سنگی همانند بازالت‌های OIB در پهنه‌های نزدیک به فرایندهای پلوم‌های گوشته‌ای (مانند: خاور گرینلند Thirlwall *et al.*, 1994)، ایسلند (Fitton *et al.*, 1997) و جنوب‌باختری پشته هند (Le Roex *et al.*, 1983) و یا پهنه‌های بدون دخالت پلوم (مانند: میدلند والی اسکاتلند (Gill, 2010)) یافت می‌شوند.

Fitton و همکاران (۱۹۹۷) پارامتر $\Delta Nb = \{1.47 + \log(Nb/Y) - 1.92 \log(Zr/Y)\}$ را برای



شکل ۷- نمونه‌های مافیک منطقه جلال‌آباد (زرند، کرمان) در: (A) نمودار Th/Yb در برابر Nb/Yb (Leat *et al.*, 2004); (B) نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb (Shaw, 1970) (نمادها همانند شکل ۴ هستند)

سنگ‌هاست. افزون‌بر این، به باور Spath و همکاران (۲۰۰۱)، مقدارهای Tb_N/Yb_N در جنوب کافت کنیا ۲/۷ تا ۵/۶ است که نشان از خاستگاه گوشته‌ای با رخساره گارنت لرزولیت دارد؛ اما برای کافت خاور آفریقا این مقدار ۲/۲ تا ۲/۸ است که نشان‌دهنده جدانشدن آنها از خاستگاهی گارنت لرزولیتی است. این مقدار در نمونه‌های مافیک جلال‌آباد برابر ۳/۱۴ تا ۴/۰۹ (میانگین: ۳/۵۵) بوده و نشان‌دهنده یک خاستگاه گوشته‌ای با رخساره گارنت لرزولیت برای این سنگ‌هاست. پس زایش سنگ‌های مافیک آلکالن منطقه جلال‌آباد به خاستگاه گوشته‌ای وابسته به پلوم وابسته دانسته می‌شود. از دیدگاه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، این سنگ‌های آلکالن بسیار همانند OIBها بوده و خاستگاه ماگمای مادر آنها از یک خاستگاه ژرف‌تر (گوشته زیرین و یا پهنه انتقالی) است که به صورت پلوم بالا آمده و در رخساره گارنت لرزولیت ذوب شده است تا این سنگ‌ها را بسازد. بسیاری از پژوهشگران، پلوم گوشته‌ای را مهم‌ترین سازوکار به‌پیش‌برنده زمین‌ساخت کشتی پالتوزویک دانسته‌اند که بازشدگی پالتوتیس در مرکز و خاور آسیا را در پی داشته است (Dai *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2008).

نمونه‌های گابرویی از ذوب‌بخشی ۱۰ درصدی گوشته‌ای گارنت لرزولیتی و نمونه‌های بازالتی و دیوریتی از ذوب‌بخشی ۱۰ درصدی گوشته‌ای اسپینل + گارنت لرزولیتی خاستگاه گرفته‌اند (شکل ۷-B). به باور Dong و همکاران (۲۰۱۰)، ترکیب گوشته و درجه ذوب‌بخشی آن، کنترل‌کننده اصلی زمین‌شیمیایی ماگماهای مافیک و به‌ویژه مقدار عنصرهای REE آن هستند. بررسی رفتار زمین‌شیمیایی عنصرهای خاکی نادر در نمونه‌های مافیک جلال‌آباد نشان‌دهنده خاستگاه گارنت لرزولیتی برای آنهاست. درجه جدایش بلوری و غنی‌شدگی عنصرهای نادر سنگین با نسبت Dy_N/Yb_N نشان داده می‌شوند. غنی‌شدگی در MREE (برای نمونه: Dy و Yb) تنهای هنگامی روی می‌دهد که گارنت فاز بجامانده در خاستگاه باشد؛ زیرا Yb در برابر Dy به‌صورت ترجیحی پذیرفته می‌شود (Peters *et al.*, 2008). جدایش بلوری بالای عنصرهای خاکی نادر سنگین و نسبت $Dy_N/Yb_N > 1/6$ نشانه گارنت‌داربودن ناحیه خاستگاه هستند (Haase *et al.*, 2004). این نسبت در نمونه‌های مافیک بررسی‌شده ۲/۴۹ تا ۳/۳۰ (میانگین: ۲/۶۴) است. این نکته نشان‌دهنده نقش مهم گارنت در خاستگاه این

دره انجیر) و ایران مرکزی (جندق و انارک)، همراه با توالی ماگمایی ستبری از سازندهای سلطان‌میدان نشان می‌دهند سنگ‌کره قاره‌ای ایران‌زمین هنگام دوران پالئووییک زیرین در پی فرایند کافت‌زایی دچار شکستگی شده و از هم جدا شده است و پهنه‌های اقیانوسی در بخش‌هایی از فلات ایران (مانند: افیولیت‌های مشهد، تالش در شمال و افیولیت‌های بیاضه و جندق در ایران مرکزی) پدیده آمده‌اند. این تکه‌ها و بجامانده‌های اقیانوسی که بیشتر در پهنه‌های شمالی ایران (و به‌ویژه مشهد، فریمان و دره‌انجیر) و ایران مرکزی (جندق و انارک) برونزد دارند از سنگ‌کره اقیانوسی پالئوتتیس به‌جای مانده‌اند (Shafaii Moghadam *et al.*, 2015). اصلی‌ترین و مهم‌ترین مرحله زایش افیولیت‌های پالئوتتیزی در پالئووییک زیرین تا میانی در پی پدیده کافت‌زایی و جدایش رو به شمال تکه‌های قاره‌ای حاشیه شمالی گندوانا روی داده است (Shafaii Moghadam *et al.*, 2015). ویژگی‌های گوناگون زمین‌شناسی نشان می‌دهند این مرحله از کشش پوسته‌ای پس از هم‌افزایی بلوک‌های پرکامبرینی و پیدایش ابرقاره گندوانا و به‌دنبال آن، پیدایش کمان ماگمایی و بازشدگی پشت کمان آغاز شده است. ابرقاره گندوانا از برخورد و گردهمایی ۷ تا ۸ قاره نئوپروتروزویکی (بلوک کادومینی) به بزرگی استرالیا و در پی دو مرحله (دوره نخست: ۶۵۰ تا ۶۰۰ میلیون سال پیش و دوره دوم: ۵۷۰ تا ۵۲۰ میلیون سال پیش) پدید آمده است (Collins and Pisarevsky, 2005; Ustaömer *et al.*, 2009; Shafaii Moghadam *et al.*, 2013). پس از این مرحله، در پی فروانش سنگ‌کره اقیانوسی پالئوتتیس به زیر مرز شمالی گندوانا، کمان ماگمایی نوع آندی در راستای کرانه استرالیا-قطب جنوب، آمریکای جنوبی، همچنین، مرز شمالی هند، بلوک ایران مرکزی و پلاتفرم تورید-آناطولی پدید آمده است (Shafaii Moghadam *et al.*, 2013; Ramazani and Tucker, 2003). فروانش درازمدت سنگ‌کره

این، بررسی‌های Saccani و همکاران (۲۰۱۳) روی مجموعه میشو در شمال‌باختری تبریز نشان می‌دهند فراخاست پلومی گوشته‌ای در دونین پسین-کربونifer پیشین سازوکار مهمی برای کافت‌زایی قاره‌ای بوده و بازشدگی پالئوتتیس در شمال‌باختری ایران را در پی داشته است. داده‌های به‌دست‌آمده از بررسی‌های زمین‌شیمیایی در کنار نشانه‌های فراوان دیگر نشان‌دهنده فراخاست و جایگیری پلوم گوشته‌ای و رویداد فرایند کافت‌زایی و تبدیل آن به کافت اقیانوسی هنگام پالئووییک زیرین در این منطقه هستند. یکی از این نشانه‌ها، ناپیوستگی در بخش زیرین رسوب‌های کربونifer ایران مرکزی درکوه‌های شتری در ناحیه طبس است که به‌صورت کنگلومرایی با ستبرای ۳۰ متر در بخش زیرین سازند سردر که با دگرشیمی روی سازند شیستو جای گرفته و نشان‌دهنده بالازدگی و آماس پوسته‌ای در پی پیدایش پلوم گوشته‌ای پیش از پیدایش شکاف اقیانوسی است (Stampfli, 1978). رویداد سنگ‌های آکالن کششی با سن اردووسین، سیلورین و کربونifer و رویداد افیولیت‌های پشت‌بادام و بیاضه) نیز از نشانه‌های دیگر است.

الگوی زمین‌ساختی

سنگ‌های مافیک منطقه جلال‌آباد به شکل دایک‌های بازالتی و همچنین، توده‌های آذرین درونی کوچک در سراسر این منطقه و بلوک پشت‌بادام پراکنده هستند. این سنگ‌ها سرشت آکالن دارند و در نمودارهای گوناگون شناسایی پهنه زمین‌ساختی، در پهنه کافت میان‌قاره‌ای جای می‌گیرند. برپایه جایگاه چینه‌شناسی این سنگ‌ها وابسته به ماگماتیسیم پالئووییک زیرین هستند و بیشتر در سنگ‌های سری ریزو تزریق شده‌اند و به‌صورت آذرین‌پی در زیر رسوب‌های پرمین جای گرفته‌اند. ویژگی‌های زمین‌شناسی فراوان (مانند: تکه‌ها و بجامانده‌های اقیانوسی در شمال ایران (مشهد، فریمان و

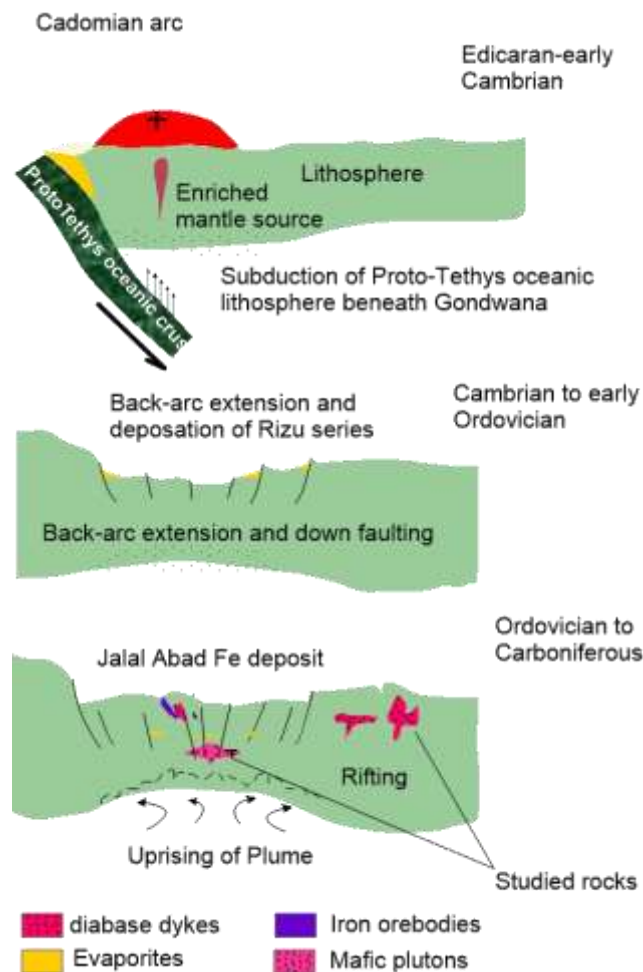
Hashemi, 2010) و منطقه زرنند در جنوب بلوک پشت‌بادام دیده می‌شود. منطقه زرنند و به‌ویژه منطقه جلال‌آباد در بردارنده توالی گسترده‌ای از سنگ‌های پالئوزویک زیرین است. بررسی‌های Lasemi (۱۹۹۹) نشان می‌دهند این منطقه از پالئوزویک زیرین تا زمان تریاس پهنه کافتی عقیم (اولاکوژن) بوده که از شمال به پالئوتتیس مرتبط بوده است. برپایه گستردگی سنگ‌های آذرین اسیدی و مافیک در منطقه، الگوهای ماگماتیسم بایومدال و پدیده ماگمایی مرتبط با کافت‌زایی برای پیدایش ماگمایی منطقه پیشنهاد شده است (Ale-Taha-Khosrowanjam, 1998; Karimi, Kuhbanani, 1994; 2003; Kianian, 2006).

بررسی روابط صحرائی نشان‌دهندهٔ جوان‌تر بودن ماگماتیسم مافیک در برابر ماگماتیسم اسیدی این منطقه است؛ به‌گونه‌ای که تزریق دایک‌ها و توده‌های آذرین درونی درون سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی، با رویداد دگرگونی همبری و دگرسانی موضعی در این سنگ‌ها همراه بوده است. داده‌های سن‌سنجی Hamdi و Zhiwen (۱۹۹۳) برای سنگ‌های فلسیک این منطقه، سن 558 ± 32 میلیون سال پیش را نشان می‌دهند. بر پایه این سن، این سنگ‌ها با سنگ آتشفشانی رسوبی کامبرین (CVSU) که در سراسر پهنه زمین‌ساختی کاشمر - کرمان پراکنده هستند، هم‌ارز هستند (Ramazani and Tucker, 2003). بررسی‌های Vesali و Esmaily (۲۰۱۶) روی سنگ‌های آذرین کانسار جلال‌آباد نشان می‌دهند ماگماتیسم مرتبط سنگ آتشفشانی - رسوبی کامبرین سنگ‌شناسی گوناگونی دارد و در بردارندهٔ بازالت، ریولیت، کوارتزپورفیری، تراکیت، داسیت، ریوداسیت و گرانودیوریت است. همچنین، بخشی از ماگماتیسم کمان کادومین در منطقه به‌شمار می‌رود. در برابر ماگماتیسم بازیگ که به‌صورت توده‌های گابرویی، دیوریتی و دسته دایک‌ها و سیل‌های بازیگ در منطقه جلال‌آباد دیده می‌شود، رویدادی جوان‌تر در پی ماگماتیسم کششی در

اقیانوسی پروتوتتیس و همچنین، پشته میان‌اقیانوسی، کافت‌زایی و جدایش پشت‌کمانی نواری درازی از بلوک‌های قاره‌ای شمال گندوانا به‌نام ابرسرزمین هون یا هوان را در پی داشته است (Stampfli and Borel, 2002). ابرسرزمین هون به‌صورت نوار درازی در بردارندهٔ شمار بسیاری از سرزمین‌های گندوانایی بهم‌پیوسته (از سرزمین آمریکا تا تبت) بوده و به‌صورت توده‌ای از بخش‌های شمالی کراتون گندوانا در اردوویسین پیشین جدا شده است (Stampfli and Borel, 2002). سپس پیدایش و گسترش این پهنه پشت‌کمانی، آن را به ناوه اقیانوسی پالئوتتیس تبدیل کرده است (Torsvik and Cocks, 2009). ویژگی‌های زمین‌شناختی در بخش ایرانی این ابرسرزمین نشان می‌دهند بازشدگی پالئوتتیس پیش از اردوویسین روی داده است (Stampfli, 1978). بررسی‌های Fathi (۱۹۹۸) در ناحیه شاهرود، رباط قره‌بیل و جنوب بجنورد نشان می‌دهند مرحله نخست پدیده کافت‌زایی در کامبرین پایانی - اردوویسین زیرین، مرحله دوم در اردوویسین میانی به‌صورت جریان بازالتی و مرحله سوم در اردوویسین بالایی - سیلورین و به‌صورت روانه‌های بازالتی و گدازه‌های بالشی روی داده است. سنگ‌های آتشفشانی، با ترکیب بیشتر آلکالن، از ویژگی‌های پالئوزویک زیرین و به‌ویژه اردوویسین تا دونین ایران است. رخنمون این سنگ‌ها در شمال شاهرود بازالت‌های سلطان‌میدان (Derakhshi and Ghasemi, 2015)، رباط قره‌بیل، جاجرم و اسفراین (Fathi, 1999)، کوه‌های شتری (Ruttner et al., 1968)، شیرگشت (Derakhshi and Ghasemi, 2014)، سُه کاشان (Ayati et al., 2010)، ترود (Houshmand-Zadeh et al., 1978)، جام (Alavi Naini, 1972)، جنوب بجنورد (Fathi, 1999)، جهق (Tabatabaïmanesh et al., 2009)، جنوب بهاباد (Balaghi et al., 2010)، شمال شاهرود (Derakhshi and Ghasemi, 2014)، پل‌خاوند (Torabi and

نشان‌دهنده جوان‌تر بودن این ماگماتیسم و نبود وابستگی آنها با ماگماتیسم اسیدی منطقه است؛ در صورتی‌که ماگماتیسم اسیدی با دگرشیبی آذرین‌پی با دولومیت‌های سری ریزو پوشانده شده است. در پایان، برپایه داده‌های به‌دست‌آمده، رویدادهای زمین‌ساختی و ژئودینامیکی منطقه زرنند از پرکامبرین پسین تا سیلورین، سه مرحله دارند (شکل ۸).

سراسر پهنه ایران مرکزی روی داده است که از اردوویسین آغاز و تا دونین و پرمین ادامه داشته است. Ale-Taha-Kuhbanani (۱۹۹۴) در قاعده سازندهای پرمین نیز دایک‌ها را گزارش کرده است. افزون‌بر این، رویداد دگرگونی همبری در برخورد دایک‌های بازیک با ریولیت‌ها و همچنین، تزریق این دایک‌ها درون دولومیت‌های دزو و انکلاوهای دولومیتی در دایک‌ها



شکل ۸- الگوی ژئودینامیکی برای تحولات زمین‌ساختی ماگما و زمین‌ساختی منطقه جلال‌آباد (زرنند، کرمان) از پروتروزوییک پسین تا دونین

به‌نام کمانی کادومین (ادیاکارین - کامبرین)، در راستای حاشیه پروتوتتیس در ابرقاره گندوانا از کناره‌های عربی تا کناره‌های هیمالیایی شبه‌قاره هند روی داده‌اند (شکل ۸). سنگ‌های این کمان به‌گونه گسترده در سراسر ایران

برپایه ویژگی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی، در پروتروزوییک پسین - کامبرین پیشین، به‌دنبال همگرایی و فرورانش پوسته اقیانوسی پروتوتتیس، فرایندهای نوع کمان ماگمایی نوع آندی،

هستند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده این هستند که سرشت ماگمای سازنده سنگ‌های مافیک منطقه بررسی‌شده آکالن بوده است. برپایه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی در نمودارهای بهنجارشده در برابر ترکیب گوشته نرمال و بازالت‌های میان‌صفحه‌ای (مانند: غنی‌شدگی در عنصرهای بزرگ یون و عنصرهای خاکی نادر سبک همراه با تهی‌شدگی در عنصرهای خاکی نادر سنگین) این سنگ‌های همانند سنگ‌های OIB امروزی و بازالت‌های آکالن‌هاوایی هستند. این نکته نشان‌دهنده خاستگاه نوع OIB و پهنه زمین‌ساختی درون‌صفحه‌ای برای این سنگ‌هاست. کاربرد نمودارهای گوناگون شناسایی پهنه زمین‌ساختی نشان می‌دهند این سنگ‌ها در پهنه کافتی درون‌صفحه‌ای پدید آمده‌اند که در پی ذوب‌بخشی پلوم گوشته‌ای در محدوده گارنت لرزولیت و هنگام بازشدگی پالئوتتیس هنگام اردوویسین تا سیلورین روی داده است. فاز کششی سنگ‌کره‌ای پالئوزویک زیرین در فلات ایران زایش مذاب‌های آکالی در بلوک ایران مرکزی و منطقه جلال‌آباد را به‌دنبال داشته است.

سپاس‌گزاری

هزینه این طرح پژوهشی از سوی طرح حمایت از پایان‌نامه تحصیلات تکمیلی سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران فراهم شده است. از این‌رو، بر خود می‌دانیم از تلاش‌های این سازمان و به‌ویژه مسئول بخش تحقیق و توسعه این سازمان، جناب آقای سیاسی‌راد بسیار سپاس‌گزاری می‌کنیم. از مدیریت محترم معدن سنگ آهن جلال‌آباد و بخش تحقیق و توسعه این معدن، جناب آقای تقی‌زاده برای همکاری در انجام نمونه‌برداری و فراهم‌آوردن امکان اقامت و کمک در کارهای صحرائی سپاس‌گزاری می‌شود.

مرکزی و به‌ویژه ناحیه زرنند و جلال‌آباد دیده می‌شوند (Ramezani and Tucker, 2003). در کامبرین زیرین تا بالایی، تداوم پدیده فرورانش و ماگماتیسیم کمان، حاکمیت پدیده کشش و کافت‌زایی در پهنه پشت‌کمان آتشفشانی و پیدایش پهنه پشت‌کمانی از نوع پهنه‌های پشت‌کمانی سیالیک در کامبرین زیرین را در پی داشته است (Ramazani and Tucker, 2003). این پهنه‌های پشت‌کمانی با رسوب‌های آذراواری و نهشته‌های تبخیری انباشته شدند. پدیده کافت‌زایی در منطقه ایران مرکزی در راستای گسل‌های اصلی منطقه (مانند: گسل کوهبنان و پشت‌بادام) روی داده و فرونشست پرشتاب و پیدایش توالی ستبری از رسوب‌های پالئوزویک در کوه‌های شتری و کوهبنان را به دنبال داشته است. فرونشینی شدید از ویژگی‌های بلوک طبس و پشت‌بادام، به‌ویژه در محدوده کوه‌های شتری و شیرگشت است؛ به‌گونه‌ای که ردیف‌های پالئوزویک آن ۲ تا ۳ هزار متر ستبرا دارند (Aghanabati, 2004). تداوم تدریجی کشش از کامبرین بالایی و اردوویسین زیرین، خیزش و جایگیری پلوم گوشته‌ای و رویداد ماگماتیسیم آکالن با سرشت کافتی را در پی داشته است و دیوریت، گابروها و بازالت‌های آکالن منطقه جلال‌آباد در این مرحله جایگیری کرده‌اند (شکل ۸).

نتیجه‌گیری

منطقه جلال‌آباد در شمال‌باختری زرنند در بخش جنوب‌خاوری بلوک پشت‌بادام دربردارنده سنگ‌های ماگمایی مافیک فراوانی است که به سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی سری ریزو تزریق شده‌اند. این سنگ‌ها به‌شکل توده‌های آذرین درونی کوچک دیوریتی گابرویی کوچک و دایک و سیل‌های بازیک با بزرگی گوناگون برونزد دارند. بررسی‌های صحرائی و سنگ‌نگاری این سنگ‌ها نشان می‌دهند آنها گابرو، دیوریت و دیابازی

منابع

- Aghanabati, A. (2004) Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Agrawal, S., Guevara, M. and Verma, S. P. (2008) Tectonic discrimination of basic and ultrabasic volcanic rocks through log-transformed ratios of immobile trace elements: *International Geology Review* 50: 1057-1079.
- Alavi Naini, M. (1972) Etude geologique de la region de Djam. Report number 23. Geological survey of Iran, Tehran, Iran.
- Ale-Taha-Kuhbanani, B. (1994) Petrological and geochemical investigations on volcanic rocks in east of Zarand, Kerman. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Ayati, F., Khalili, M., Noghreiyani, M. and Mackizadeh, M. A. (2011) Silurian magmatism in the abyaneh-She area (Kashan-Central Iran). *Journal of Science, University of Tehran* 4: 21-31.
- Balaghi, Z. Sadegheian, M. and Ghasemi, H. (2010) Petrogenesis of the lower Paleozoic igneous rocks, south of Bahabad (Bafq, Central Iran): Implication for Rifting. *Iranian Journal of Petrology* 1(4): 45-64 (in Persian).
- Berberian, M. and King, G. C. P. (1983) towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Science* 5: 101-117.
- Best, M. G. (2003) *Igneous and metamorphic petrology*. Blackwell Publishing, Malden, MA, USA.
- Cabanis, B. and Lecolle, M. (1989) Le diagramme La/10–Y/15–Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus demelange et/ou de contamination crustale. *Compte Rendus de l'Academie des Sciences, Seris II* 309: 2023–2029.
- Collins, A. S. and Pisarevsky, S. A. (2005) Amalgamating eastern Gondwana: the evolution of the circum-Indian orogens. *Earth-Science Reviews* 71: 229–270.
- Dai, J., Wang, C., Hébert, R., Li, Y., Zhong, H., Guillaume, R., Bezard, R. and Wei, Y. (2011) Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleo-Tethys? *Gondwana Research* 19: 232–243.
- De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P. and Marchal, M. (1990) A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major elements analysis– its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* 29: 183-210.
- Derakhshi, M. and Ghasemi, H. (2014) Ordovician-Devonian magmatism in the north of Shahrood: implication for long lived rifting of Paleotethys in eastern Alborz. *Iranian Journal of Petrology* 5(18): 105-122 (in Persian).
- Derakhshi, M. and Ghasemi, H. (2015) Soltan Maidan Complex (SMC) in the eastern Alborz structural zone, northern Iran: magmatic evidence for Paleotethys development. *Arabian Journal of Geoscience* 8(2): 849–866.
- Dong, Y., Xiao, L., Zhou, H, Du J., Zhang, N., Xiang, H., Wang, C., Zhao, Z. and Huang, H. (2010) Volcanism of the Nanpu Sag in the Bohai Bay Basin, Eastern China: Geochemistry, petrogenesis, and implications for tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences* 39: 173–191.
- Fathi, T. (1999) the petrology and geochemistry of lower Paleozoic volcanic roks in the North east of Iran (Shahrood, Robate gharabil, South Boujnord succession). M.Sc. thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Fitton, J. G. (2007) The OIB Paradox. *Geological Society of America, Special Paper* 430: 387-412.
- Fitton, J. G., Saunders, A. D., Norry, M. J., Hardarson, B. S. and Taylor, R. N. (1997) Thermal and chemical structure of the Iceland Plume. *Earth and Planetary Sciences Letters* 153: 197-208.
- Floyd, P. A. and Winchester, J. A. (1975) Magma - type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth and Planetary Sciences Letters* 27: 211-218.

- Gill, R. (2010) igneous rock and processes: a practical guide, 1st edition, Wiley-Blackwell, London, UK.
- Gotlov, V. I. and Esev, Y. M. (1976) Report on the result of preliminary survey of the Zarand iron ore deposit. National Iranian steel company interior report, TECNOEXPORT, USSR.
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J. and Li, C. W. (2004) Upper Paleozoic basalts in the southern Yangtze block: geochemical and Sr–Nd isotopic evidence for asthenosphere–lithosphere interaction and opening of the Paleo-Tethyan Ocean. *International Geology Review* 46: 332–346.
- Haase, K. M., Goldschmidt, B. and Garbe-Schonberg, C. D. (2004) Petrogenesis of tertiary continental intraplate lavas from the Westerwald region, Germany. *Journal of Petrology* 45(5): 883-905.
- Hamdi, B. and Zhiwen, J. (1993) Paleozoic fossils from the Morad and Rizu series in Central Iran. *Geoscience* 1(4): 26-35 (In Persian).
- Houshmand-Zadeh, A., Alavi Naini, M. and Haghypour, A. (1978) the evolution of geologic phenomenon in Toroud area (from Precambrian to present day). Report number H5, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Karimi, S. B. (2003) study of geochemistry and economic geology of Jalal Abad iron deposit, Zarand (Kerman province). M.Sc. thesis, University of Kharazmi, Tehran, Iran (in Persian).
- Khosrowanjam, M. (1998) the genesis of Jalal Abad iron ore deposit. M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran (in Persian).
- Kianian, M. (2006) Geochemistry of the Major, Minor and Rare Earth Elements and the Origin of the Jalal-Abad Iron Ore, Zarand. Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran (in Persian).
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68: 277-279.
- Lasemi, Y. (1999) Depositional environments of the Ordovician rocks of Iran (syn-rift sequence) and formation of the Paleotethys passive margin. Proceedings of the 17th annual meeting of the Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Le Roex, A. P., Dick, H. J. B., Erlank, A. J., Reid, A. M., Frey, F. A. and Hart, S. R. (1983) Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the Southwest Indian Ridge between the Bouvet Triple Junction and 11 degrees East. *Journal of Petrology* 24: 267–318.
- Leat, P. T., Pearce, J. A., Barker, P. F., Miller, I. L., Barry, T. L. and Larter, R. D. (2004) Magma genesis and magma flow at a subduction slab edge: the South Sandwich arc-basin system. *Earth and Planetary Science Letters* 227: 17-35.
- McKenzie, D. P. and O’Nions R. K. (1991) Partial melt distribution from inversion of rare earth element concentration. *Journal of Petrology* 32: 1021– 1091.
- Peters, T. J., Menzies, M., Thirlwall, M. and Kyle, P. K. (2008) Zuni- Bandera volcanism, Rio Grande, USA, Melt formation in garnet-and spinel-facies mantle straddling the asthenosphere –lithosphere boundary. *Lithos* 102: 295-315.
- Ramazani, J. and Tucker, R. D. (2003) The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science* 303: 622-665.
- Ruttner, A, Nabavi, M. H. and Alavi Naini, M. (1968) Geology of the Ozbak-kuh mountains (Tabas area, East Iran) report number 5. Geological Survey Iran, Tehran, Iran.
- Saccani, E., Azimzadeh, Z. Dilek, Y. and Jahangiri, A. (2013) Geochronology and petrology of early Carboniferous Misho mafic complex (NW Iran) and implication for the melt evolution of Paleo-Tethys rifting Western Cimmeria. *Lithos* 162–163: 264–278.
- Samani, B. A. (1988) Metallogeny of the Precambrian in Iran, *Precambrian Research* 39: 85-106.
- Sen, G. (2014) *Petrology: principle and practice*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Shafaii Moghadam, H., Khademi, M., Hu, Z., Stern, R. J., Santos, J. F. and Wu, Y., (2013) 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.
- Shafaii Moghadam, H., Li, X. H., Ling, X. X., Stern, R. J., Zakikheder, M., Chiaradia, M., Ghorbani, G. Arai, S. and Tamura, A. (2015) Devonian to Permian evolution of the Paleo-Tethys Ocean: New evidence from U–Pb zircon dating and Sr–Nd–Pb isotopes of the Darrehanjir–Mashhad ophiolites, NE Iran. *Gondwana Research* 28: 781–799.
- Shaw, D. (1970) Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 34: 231.
- Spath, A., Le Roex, A. P. and Opiyo Akech, N. (2001) Plume -lithosphere interaction and the origin of continental rift-related alkali volcanism-the Chyulu Hills volcanic province, southern Kenya. *Journal of Petrology* 42: 765-787.
- Stampfli, G. (1978). Etude geologique generale de l'Elbourz oriental au S de Gonbad-e-Qabus, Iran N-E. Ph.D. thesis, Universite de Geneve, Geneve, Swisserland.
- Stampfli, G. M. and Borel, G. D. (2002) A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters* 196: 17–33.
- Stöcklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran; a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52(7): 1229-1258.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematic of oceanic basalt: implications 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 of London, UK.
- Tabatabaïmanesh, M., Mirlohi, A. and Torabi, G. (2009) Geochemistry and tectonic setting of Early Paleozoic volcanic rocks in Jahagh Valley (South of Kashan). *Journal of Science Kharazmi University* 8(3): 241-254.
- Takin, M. (1972) Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature* 235: 147-150.
- Thirlwall, M., Upton, B. G. J. and Jenkins, C. (1994) Interaction between continental lithosphere and the Iceland plume-Sr–Nd–Pb isotope geochemistry of tertiary basalts, NE Greenland. *Journal of Petrology* 35: 839-879.
- Torabi, G. and Hashemi, F. (2010) Petrology of Devonian basalts from Pol-e-Khavand area (SE of Anarak, NE of Isfahan). *Petrology* 1(3): 29-46.
- Torsvik, T. H. and Cocks, R. M. (2009) The Lower Palaeozoic palaeogeographical evolution of the northeastern and eastern peri-Gondwanan margin from Turkey to New Zealand. In: *Early Palaeozoic Peri-Gondwana Terranes: New Insights from Tectonics and Biogeography* (Ed. Basset, M. G.) special publications 325: 3-21. Geological Society, London, UK.
- Ustaömer, P. A., Ustaömer, T., Collins, A. S. and Robertson, A. H. F. (2009) Cadomian (Ediacaran–Cambrian) arc magmatism in the Bitlis Massif, SE Turkey: magmatism along the developing northern margin of Gondwana. *Tectonophysics* 473: 99–112.
- Vahdati, D. F. (1995) Explanatory text of Davaran. Geological Quadrangle Map 1:100000, No. 7251, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Vesali, Y. and Esmaily, D. (2016) Cadomian (Ediacaran–Cambrian) arc magmatism in the Jalal Abad iron district, NW Zarand, Central Iran. *Proceeding of the 8th international Siberian Early Career GeoScientists Conference*, Novosibirsk, Russia.
- Wilson, M. (1989) *Igneous Petrogenesis a global tectonic approach*. Unwin Hyman, London, UK.
- 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.

- Winter, J. (2014) Principles of igneous and metamorphic petrology. 2nd edition, Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Harlow, UK.
- 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.
- Xiao, L., He, Q., Pirajno, F., Ni, P., Du, J. and Wei, Q. (2008) Possible correlation between a mantle plume and the evolution of Paleo-Tethys Jinshajiang Ocean: evidence from a volcanic rifted margin in the Xiaru-Tuoding area, Yunnan, SW China. *Lithos* 100:112–126.
- Zhao, J. X., Shiraishi, K., Ellis, D. J. and Sheraton, J. W. (1995) Geochemical and isotopic studies of syenites from the Yamato mountains, east Antarctica: implications for the origin of syenite magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59: 1363-1382.
- Zhou, M. F., Arndt N. T., Malpas, J., Wang C. Y. and Kennedy A. K. (2008) Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Lithos* 103: 352–368.