

## ژئوشیمی و جایگاه پالئوکتونوماگماتیک پروتولیت متابازیت‌های مجموعه دگرگونی شمال غرب اسدآباد (غرب همدان)

سحر رجبی<sup>۱</sup>، محسن نصرآبادی<sup>\*</sup>، رضا نوزعیم<sup>۲</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۶/۱۵

### چکیده

مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد بخشی از پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان محسوب می‌شود که در غرب همدان برون‌زد دارد. سنگ‌های دگرگونی این مجموعه، عمدتاً متاپلیت است و برون‌زدهای محدودی از متابازیت‌های توده‌ای و فولیاسیون‌دار نیز در آن وجود دارند. کانی‌های سنگ‌ساز متابازیت‌ها، آمفیبول، پلاژیوکلاز، کلریت و اپیدوت هستند که معرف شرایط دگرگونی رخساره شیست سبز است. پلاژیوکلاز از نوع آلبیت و آمفیبول از نوع ترمولیت و ادنیت هستند. ترکیب شیمیایی آمفیبول و پلاژیوکلاز با شرایط دگرگونی رخساره شیست سبز هم‌خوانی دارد و با متاپلیت‌های مجاور هم‌رخساره است. مطابق داده‌های ژئوشیمیایی سنگ کل، متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد از نوع ارتوآمفیبولیت بوده و ترکیب غالباً بازالتی دارند. شاخص‌های ژئوشیمیایی این متابازیت‌ها با جایگاه زمین‌ساختی داخل صفحه‌ای و حاشیه صفحه‌ای قاره‌ای هم‌خوانی دارد. احتمالاً متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، معرف ماگماتیسم مافیک جایگاه پشت قوس قاره‌ای ناشی از فرورانش حوضه اقیانوسی نئوتتیس به زیر لیتوسفر قاره‌ای سنندج-سیرجان می‌باشد که دستخوش دگرگونی حاشیه فعال قاره‌ای یا برخورد شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** متابازیت، جایگاه تکتونیک، اسدآباد، سنندج-سیرجان.

## مقدمه

بررسی پروتولیت سنگ‌های دگرگونی برای شناخت محیط ژئودینامیک تشکیل آنها از اهداف مهم پترولوژی دگرگونی می‌باشد. نمودارهای متمایزکننده محیط تکتونوماگمایی که از دیرباز تا کنون به کار گرفته شده (Pearce and Cann, 1971, 1973; Verma et al, 2006; Vermeesh, 2006; Agrawal et al, 2008; Pearce, 2008; Sheth, 2008; Verma, 2010; Verma et al, 2011; Hollocher et al, 2012; Verma and Verma, 2013; Saccani, 2015). ابزاری مکمل برای سایر روش‌های پترولوژیکی به منظور تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی هستند. در مطالعه تحولات تکتونیکی نوارهای کوهزایی، سنگ‌های بازیک و الترابازیک دگرگون شده از واحدهای سنگی کلیدی و مهم محسوب می‌شوند. این سنگ‌ها معمولاً با ماگماتیسم پشته میان‌اقیانوسی، قوس آتشفشانی و حوضه‌های کششی پشت قوس قبل از برخورد دو قاره (Miyashiro, 1974)، کوه‌های زیردریایی و جزایر اقیانوسی (John et al, 2010) در ارتباط می‌باشند. بررسی تحولات دگرگونی، سن‌سنجی و برداشت‌های ساختاری این‌گونه سنگ‌ها، توجه پترولوژیست‌ها را به خود معطوف داشته است. ژئوشیمی پروتولیت سنگ‌های بازیک دگرگون شده نیز تاریخچه قبل از برخورد را برای ما روشن می‌سازد. مجموعه‌های دگرگونی شمال اسدآباد بخشی از پهنه سنندج-سیرجان محسوب می‌شود و اساساً متشکل از سنگ‌های متاپلیتی نوع گارنت‌شایست می‌باشد. در این مجموعه دگرگونی، متابازیت‌هایی نیز وجود دارند که با توجه به پارائز کانی‌شناسی و شیمی کانی‌ها، شرایط دگرگونی رخساره شایست سبز را نشان می‌دهند. در این تحقیق سعی شده است که با بررسی شیمی سنگ کل و مخصوصاً استفاده از عناصر کمیاب نامتحرک در طی دگرگونی، جایگاه

پالئو تکتونوماگماتیک متابازیت‌های مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد ارزیابی گردد.

## منطقه مورد مطالعه

## زمین‌شناسی ناحیه‌ای

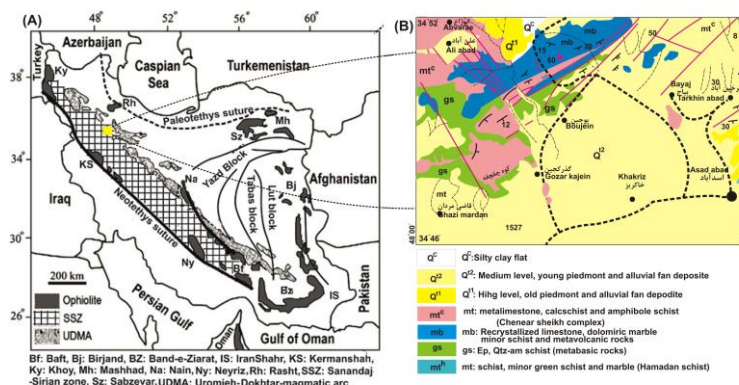
محدوده جغرافیایی ایران متشکل از خرده قاره ایران مرکزی و بلوک‌های البرز و سنندج-سیرجان می‌باشد و قرارگیری آنها بین دو ابرقاره گندوانا و اوراسیا تاریخچه پالئوکتونیک پیچیده‌ای را رقم زده است. صفحه ایران تا پرمین قرابت مکانی نزدیکی با ابرقاره گندوانا داشته و در حاشیه شمالی آن واقع بوده اما با شروع بسته شدن پالئوتتیس، ریف‌تینگ درون قاره‌ای منجر به جدایش صفحه ایران از گندوانا گشته و حوضه اقیانوسی نئوتتیس در راستای زاگرس بین صفحه ایران و گندوانا به وجود آمده است (Berberian and King, 1981; Sengör et al, 1988; Stampfli and Borel, 2002; Golonka, 2004; Bagheri and Stampfli, 2008). همزمان با برخورد صفحه ایران و توران در تریاس بالایی و تمام حوضه اقیانوسی پالئوتتیس، نئوتتیس بیشترین گسترش را داشته و فروانش آن به زیر صفحه ایران شروع شده است (Berberian and King, 1981; Bess et al, 1988; Mohajjel et al, 2003; Shahbazi et al, 2010). از این زمان به بعد، بلوک سنندج-سیرجان که به صورت جایگاه حاشیه فعال قاره‌ای در بخش جنوب غربی صفحه ایران واقع بوده، از نظر توالی چینه‌ای با صفحه خرده قاره ایران مرکزی متفاوت شده است (Rachidnejad-Omrani et al, 2002; Wendt et al, 2005). این بلوک که بیشتر متشکل از واحدهای سنگی مزوزوئیک و پالئوزوئیک دگرگون شده است با طول ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر به موازات زاگرس چین‌خورده و نوار

نیز در این مجموعه دگرگونی وجود دارند که همزیستی مکانی نزدیکی با سنگ‌های متاپلیتی، مرمر و کالک‌سیلیکاته همجوار نشان می‌دهند (شکل ۲). در این تحقیق سعی شده است ضمن بررسی کانی‌شناسی، با توجه به شیمی سنگ کل، جایگاه زمین‌ساختی این متابازیت‌ها ارزیابی گردد.

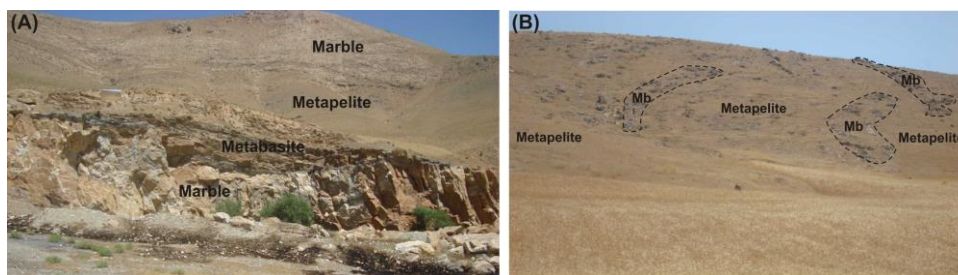
#### پتروگرافی

متابازیت‌های شمال‌غرب اسدآباد با پارائنز کانی-شناسی آمفیبول، اپیدوت، کلریت و پلاژیوکلاز مشخص هستند. این چنین پارائنز نشان‌دهنده شرایط رخساره شیست سبز می‌باشند. همان‌طور که در بخش شیمی کانی‌ها خواهیم دید ترکیب آلبیتی پلاژیوکلاز نیز با شرایط دگرگونی رخساره شیست سبز هم‌خوانی دارد. بیشتر متابازیت‌ها از نوع فولیاسیون‌دار بوده و کانی‌های جهت‌یافته آمفیبول و کلریت سازنده فولیاسیون سنگ هستند (شکل A۳). در بعضی از نمونه‌ها در اثر چین-خوردگی فولیاسیون نسل اول، دومین نسل فولیاسیون در حال تشکیل است (شکل B۳). به ندرت می‌توان بافت دلریتی آذرین را در تعدادی از نمونه‌ها مشاهده کرد. در این نمونه‌ها، فضای بین تیغه‌های پلاژیوکلاز توسط کلریت، اپیدوت و آمفیبول پر شده است (شکل C۳)، از کانی‌های یک نمونه متابازیت فولیاسیون‌دار آنالیز ریزپردازنده نقطه‌ای به عمل آمده که در ادامه به تشریح آنها می‌پردازیم.

رورانده زاگرس قرار دارد (Alavi, 1994). بیشتر مطالعات پترولوژیکی صورت گرفته در زون سنندج-سیرجان متوجه ماگماتیسم مرتبط با قوس این منطقه بوده (Arvin et al, 2007; Ahmadi Khalaji et al, 2007; Sepahi, 2008; Ghalamghash et al, 2009; Shahbazi et al, 2010) و سنگ‌های دگرگونی متاپلیتی آن نیز به-خصوص در اطراف همدان (Baharifar et al, 2004; Sepahi et al, 2004) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد در -غرب همدان واقع بوده و از نظر زمین‌شناسی، بخشی از پهنه سنندج-سیرجان محسوب می‌شود (شکل A۱). شرایط اوج دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه همدان تحت رخساره آمفیبولیت و در جایگاه زمین‌ساختی قوس قاره‌ای روی داده و با تشکیل سنگ‌های گارنت‌آمفیبولیت، استارولیت-شیست و سیلیمانیت‌شیست همراه شده است (بهاری‌فر، ۱۳۷۶، ۱۳۸۳؛ بهاری‌فر و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به نبود چنین پارائزهایی، متاپلیت‌ها و متابازیت‌های شمال‌غرب اسدآباد نسبت به منطقه همدان در شرایط دگرگونی درجه کمتری ایجاد شده‌اند (رجبی، ۱۳۹۲). از طرفی برخلاف سنگ‌های دگرگونی اطراف همدان که تحت‌تأثیر حرارتی تزریق توده نفوذی الوند، پارائنز و زون‌های دگرگونی متنوعی در آن به وجود آمده، متاپلیت‌های مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد از تنوع و گسترش قابل ملاحظه‌ای برخوردار نیستند (شکل B۱). برونزدهایی از سنگ‌های متابازیتی



شکل ۱: (A) موقعیت مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد در پهنه سنندج- سیرجان، به صورت چهارگوش زرد نشان داده شده است. (B) نقشه زمین‌شناسی مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد (با تغییرات از اشرافی و محمودی قرایی (Eshraghi and Mahmodi Gharai, 2003).



شکل ۲: (A) ارتفاعات شمال غرب اسدآباد با توپوگرافی مرتفع بیشتر متشکل از مرمر، متاپلیت و متابازیت می‌باشند. (B) برونزد متابازیت‌ها به صورت میان لایه‌ای یا توده‌های کوچک در سنگ میزبان متاپلیتی.

های یک نمونه متابازیت، در مرکز فرآوری مواد معدنی کرج، آنالیز ریزپردازش نقطه‌ای به کمک دستگاه میکروپروپ مدل Cameca SX100 به-عمل آمده است. در طول انجام آنالیز، ولتاژ 15KV، شدت جریان تابیده شده 15nA و قطر پرتو مورد استفاده ۱ تا ۵ میکرون بوده است. برای محاسبه فرمول ساختاری کانی‌ها نرم‌افزار CalcMin به کار گرفته شده است.

### نتایج

#### شیمی کانی‌ها

نتایج آنالیز شیمی کانی‌های آمفیبول، فلدسپار و کلریت این نمونه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

### مواد و روش‌ها

پس از انجام نمونه‌برداری و بررسی‌های میکروسکوپی، ۱۰ نمونه جمع‌آوری شده از متابازیت‌های مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد با ساخت همگن که عاری از شواهد دگرسانی و ساختارهای رگه‌ای بودند انتخاب و برای انجام آنالیزهای XRF و ICP، به آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ارسال گردید. سپس به کمک نتایج حاصل و با استفاده از نرم‌افزارهای Iqpet, Excel و Corel Draw به رسم نمودارهای ژئوشیمیایی و تفسیر این نمودارها اقدام شده است. هم‌چنین به منظور شناخت شیمی کانی‌ها و ارزیابی نسبی شرایط دگرگونی، از کانی-

جدول ۱: نتایج آنالیز ریزپردازنده نقطه‌ای کانی‌های نمونه شلیست سبز، فرمول ساختمانی کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و کلریت ۲۳، ۸ و ۲۸ اکسیژن محاسبه شده‌اند.

نمونه	آمفیبول				اپیدوت	فلدسپار				کلریت		
	MHb	MHb	Tr	Tr								
SiO <sub>2</sub>	51.28	51.86	51.60	51.57	38.42	66.65	66.98	64.54	67.11	27.59	26.52	25.89
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.09	0.07	0.08	0.16	0.03	0.01	0.0	0.01	0.05	0.07	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.14	4.69	4.34	3.88	28.88	18.79	18.96	20.48	19.32	19.46	21.61	19.87
FeO	12.73	11.95	11.64	11.63	1.03	0.0	0.0	0.0	0.0	23.88	24.67	25.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.84	3.12	4.66	2.63	6.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MnO	0.32	0.3	0.34	0.29	0.11	0.0	0.0	0.01	0.0	0.33	0.29	0.29
MgO	11.95	12.67	12.59	12.99	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	15.91	16.35	15.68
CaO	11.41	11.42	11.38	11.93	24.15	0.13	0.18	2.24	0.07	0.09	0.17	0.14
Na <sub>2</sub> O	0.0	0.7	0.48	0.61	0.0	12.6	13.29	11.81	14.24	0.0	0.0	0.0
K <sub>2</sub> O	0.19	0.19	0.22	0.15	0.0	0.08	0.07	0.1	0.08	0.0	0.0	0.0
Total	97.14	95.99	96.5	95.87	98.11	98.28	99.49	99.18	100.83	87.34	89.68	87.11
Si	7.53	7.6	7.58	7.65	2.96	2.97	2.96	2.88	2.94	5.78	5.43	5.5
Ti	0.01	0.01	0.008	0.009	0.009	0.001	0.0	0.0	0.0	0.007	0.01	0.012
Al <sup>IV</sup>	0.45	0.39	0.44	0.39						2.21	2.56	2.49
Al <sup>VI</sup>	0.26	0.41	0.3	0.28	2.62	0.99	0.98	1.07	0.99	2.58	2.65	2.48
Fe <sup>3+</sup>	0.53	0.34	0.51	0.29	0.401	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sup>2+</sup>	1.52	1.42	1.38	1.52	0.009	0.0	0.0	0.0	0.0	4.18	4.22	4.47
Mn	0.02	0.003	0.0	0.03	0.007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05	0.05	0.052
Mg	2.61	2.76	2.76	2.87	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0	4.96	4.99	4.97
Ca	1.8	1.79	1.79	1.89	1.99	0.006	0.008	0.107	0.003	0.0	0.0	0.0
Na	0.0	0.17	0.1	0.1	0.0	1.09	1.14	1.02	1.21	0.0	0.0	0.0
K	0.03	0.03	0.04	0.02	0.0	0.004	0.004	0.005	0.004	0.0	0.0	0.0
Sum	14.9	14.92	14.76	15.04	8.016	5.07	5.11	5.09	5.16	19.97	19.91	19.76
Mg#	62	61	60	62						53	53	52
<sup>B</sup> Ca/ <sup>B</sup> (Ca+Na)	1	0.912	0.94	0.94								
Ab						99	99	90.1	99.4			
An						0.5	0.7	9.4	0.2			
Or						0.5	0.3	0.5	0.4			

### آمفیبول

تعداد کاتیون‌های سیلیسیم موجود در کلریت، ۵/۴۳ تا ۵/۷۸ متغیر است و با عدد منیزیم ۵۲ تا ۵۳ مشخص می‌باشند.

### شیمی سنگ کل

نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل ۱۰ نمونه متابازیت شمال غرب اسدآباد در جدول ۲ نشان داده شده است. اولین قدم در بررسی ژئوشیمی پروتولیت متابازیت‌ها تمایز منشا رسوبی یا آذرین آنها می‌باشد. مطابق نمودارهای متمایزکننده خاستگاه رسوبی و آذرین (Garrels and Mckenzie, 1971; Winchester et al, 1980)، متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد از دگرگونی سنگ‌های آذرین نشأت گرفته‌اند (شکل ۵). براساس نمودار نام‌گذاری سنگ‌های آذرین (COX

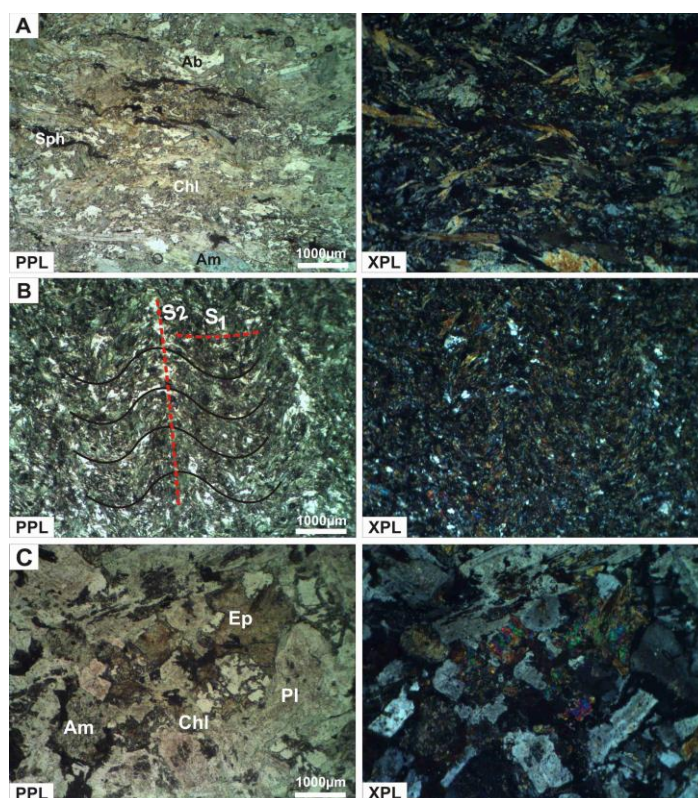
با توجه به معیار طبقه‌بندی آمفیبول‌ها (Hawthorne et al, 2012)، آمفیبول نمونه مورد مطالعه از نوع کلسیک بوده (  $^{B}Ca/^{B}Ca + Na \geq 0.75$  ) و مطابق میزان کاتیون‌های آلومینیم، آهن و تیتانیوم جایگاه C و سدیم، پتاسیم و کلسیم موجود در جایگاه A، ترمولیت و منیزیوهورنبلند نام دارند (شکل ۵ A).

### فلدسپار

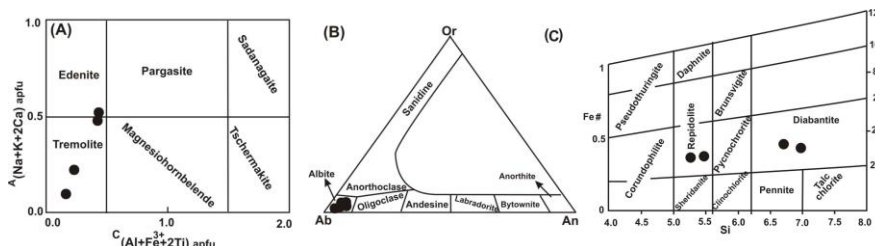
با توجه به نتایج آنالیز شیمیایی فلدسپار، ترکیب شیمیایی فلدسپارهای مورد مطالعه مطابق نمودار مثلثی تقسیم‌بندی فلدسپارها (Deer et al, 1992)، آلبیت می‌باشند (شکل ۶ B).

ندارد (et al, 1979)، نمونه‌های مورد مطالعه بازالت و آندزیت بازالتی می‌باشند (شکل A۶). نظر به ماهیت دگرگونی نمونه‌های مورد مطالعه، از نمودارهایی که براساس عناصر کمتر متحرک در طی دگرگونی بنا شده‌اند (Winchester and Floyd, 1977)، نیز استفاده شده است. مطابق این نمودار، متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد از نوع بازالت آلکالن هستند (شکل B۶). در نمودار متمایزکننده سری آلکالن از توله‌ایتی سری ماگمایی (Winchester and Floyd, 1976)، سری ماگمایی نمونه‌های مورد مطالعه آلکالن می‌باشد (شکل C۶). نمونه‌های مورد مطالعه، در نمودار عناصر نادر خاکی سنجیده شده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989)، الگوی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به سنگین غنی‌شدگی نشان می‌دهند و نسبت La/Yb در آنها از ۱/۹ تا ۵/۸ متغیر است (شکل A۷). در نمودار عنکبوتی سنجیده شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، عناصر سزیم، باریم، توریم، اورانیوم و سرب غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل B۷). این چنین شاخص‌های ژئوشیمیایی از ویژگی‌های ماگماهای مناطق فرورانش هستند. آنومالی مثبت عناصری مانند سرب، اورانیوم و توریم، شاخص آلاینش مذاب گوشته‌ای با پوسته قاره‌ای نیز می‌باشند (Wilson, 1989).

شکل ۳: مقاطع میکروسکوپی متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد. A) بیشتر متابازیت‌ها از نوع فولیاسیون دار بوده و کانی‌های سنگ‌ساز آمفیبول و کلریت به وجود آورنده فولیاسیون سنگ هستند. B) تشکیل شیستوزیته نسل دوم در نتیجه چین‌خوردگی شیستوزیته نسل اول، C) به ندرت بافت دلریتی اولیه در بعضی از متابازیت‌ها محفوظ مانده و فضای بین پلاژیوکلازهای اولیه توسط آمفیبول، کلریت و اپیدوت پر شده است.



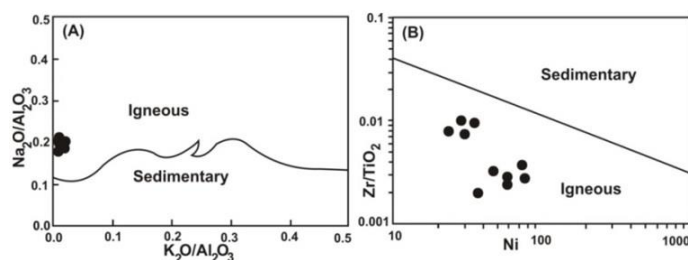
شکل ۳: مقاطع میکروسکوپی متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد. A) بیشتر متابازیت‌ها از نوع فولیاسیون دار بوده و کانی‌های سنگ‌ساز آمفیبول و کلریت به وجود آورنده فولیاسیون سنگ هستند. B) تشکیل شیستوزیته نسل دوم در نتیجه چین‌خوردگی شیستوزیته نسل اول، C) به ندرت بافت دلریتی اولیه در بعضی از متابازیت‌ها محفوظ مانده و فضای بین پلاژیوکلازهای اولیه توسط آمفیبول، کلریت و اپیدوت پر شده است.



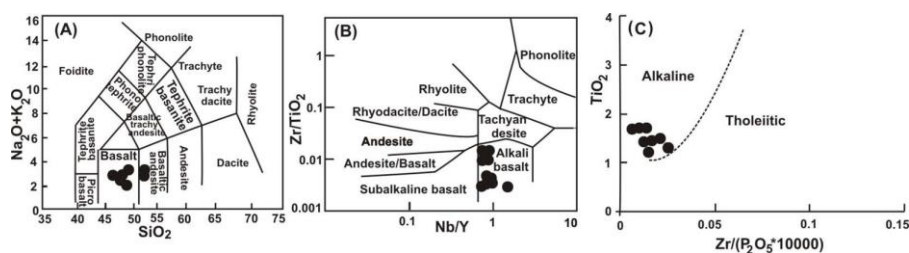
شکل ۴: A) مطابق نمودار تقسیم‌بندی آمفیبول (Hawthorne et al, 2012)، آمفیبول‌های مورد مطالعه، از نوع ترمولیت و منیزیهورنبلند هستند. B) با توجه به نمودار طبقه‌بندی فلدسپار (Deer et al, 1992)، فلدسپار نمونه‌های مورد مطالعه از نوع آلبیت است. C) کلریت‌های مورد مطالعه، براساس نمودار طبقه‌بندی کلریت (Deer et al, 1992)، از نوع ریدولیت و دیابانتیت هستند.

جدول ۲: نتایج آنالیز شیمیایی سنگ کل ۱۰ نمونه از متابازیت‌های شمال غرب اسداباد. عناصر اصلی و فرعی براساس درصد و عناصر کمیاب بر حسب قسمت در میلیون می‌باشند.

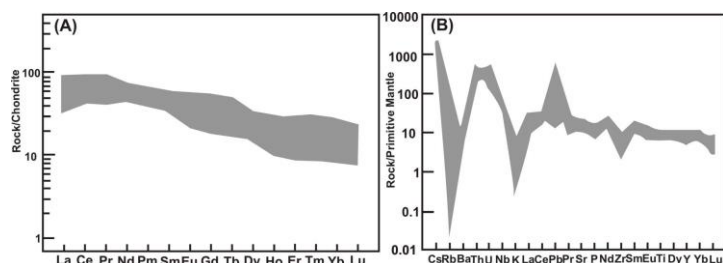
Sample No.	RJ12	RJ20A	RJ9	RJ3	RJ1	RJ29	RJ14A	RJ20B	RJ26B	RJ2A
<b>Major Oxides</b>										
SiO <sub>2</sub>	47.7	48.9	49.2	49.3	49.4	49.5	50	50.3	53	53.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.8	15	13	13.9	13.4	12.2	12.1	15.1	15.2	15.2
FeO	11.6	11.76	10.88	12	11.52	11.28	13.44	9.6	9.6	9.36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9	2.94	2.72	3	2.88	2.82	3.36	2.4	2.4	2.34
MgO	5.4	5.8	6.5	6.1	6.3	5.9	5.8	4.7	6	5.6
CaO	10.2	6.6	9.2	8.3	10.3	10.8	7.9	8.2	4.9	5.4
Na <sub>2</sub> O	2.8	2.7	2.5	2.8	2.3	2.3	2.1	3.2	3	3.2
K <sub>2</sub> O	0.02	0.06	0.04	0.03	0.01	0.2	0.02	0.2	0.07	0.09
TiO <sub>2</sub>	1.7	1.2	1.5	1.7	1.4	1.4	1.7	1.4	1.3	1.3
MnO	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.4	0.5	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4
LOI	2.85	4.09	3.72	2.17	1.81	2.5	2.74	4.11	3.81	3.59
<b>LILES</b>										
Cs	15	13.5	15	15.1	13.11	16	18.7	13.8	14.1	14.1
Rb	0.04	0.05	9.5	21.1	0.07	11.5	0.02	23.6	0.03	61.2
Ba	96.8	59.8	50	49.2	23.7	77.6	40	59.5	52.3	46.1
Sr	497.9	413.4	385	266.6	697.9	482.4	249.6	476	329.4	342.1
Pb	26.6	4.8	20.7	38.5	24.8	6.5	13.4	30.5	1	2
Th	33.9	20.8	36.3	38.3	34.3	34.3	24.9	30.2	27.8	23.6
U	5.4	7.8	7.2	5.1	4.8	3.5	6.2	7.3	11.2	7.3
Zr	29.1	77	42.8	35	27.2	38.9	29.4	84.2	105	105
Hf	12.8	11	7.1	7.3	10.7	10	7.3	8.6	14.5	12.2
Ta	4.1	5.6	5.2	3.2	4	2.4	3.8	5	6	4.2
Y	26.3	34.3	37.6	40.4	31.1	39.4	49.4	38.2	34	35.9
Nb	38.1	24.8	32.3	35.9	28.9	35.7	38.9	26.6	25.1	24.4
La	19.9	16.7	11.9	11.1	8.1	11.6	12.9	20.5	16.7	17.2
Ce	55.8	49.6	43.8	46.5	33.5	46.6	52.5	56	47.9	48.4
Pr	3.5	6.8	5.9	3.2	4.2	2.6	4.9	6.7	9.2	5.7
Nd	32.1	28.6	24.8	26.7	23.3	31	27.8	34.1	28.4	30.9
Sm	6.4	6.4	7.8	7.5	5.5	7.9	7.2	8.6	6.8	7.1
Eu	1.7	1.9	1.6	1.5	1.2	1.2	1.6	2.6	1.4	1.6
Gd	6	10	8.3	5.8	5.5	4	7.4	8.4	13.3	9
Tb	1.8	1.6	1.9	1.8	2	2.1	1.9	1.9	1.2	1.3
Dy	5.6	5.9	6.4	6.6	5.4	6.9	8.4	6.9	6.5	6
Ho	0.2	0.5	0.3	0.1	0.2	0.1	0.3	0.5	0.6	0.4
Er	1.5	2.3	1.8	2.2	1.6	1.3	1.3	2.6	2.6	2.2
Tm	0.4	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.8	0.5
Yb	3.4	3.6	4.7	4.9	4.1	4.8	5.9	4	3.7	3.8
Lu	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4	0.6	0.4
Sc	39.2	38.5	52	53.3	55.1	52.6	51.8	39.2	38.1	38.5
Cr	88.2	99.9	214.2	210.3	287.4	195.9	57.1	86.8	96	102.9
Ni	59.4	30.4	77	57.5	78.5	48.6	37.8	23.7	35.5	29.1
Co	55.5	31.7	50.4	53.3	50.6	48.8	57.6	36.8	44.4	40.6
V	332.4	278.5	352.4	371.7	352.2	372.7	434.4	298.2	284.2	273.4
Ga	27.2	24.2	28.6	23.3	34.6	31	26.6	29.8	25.8	28.2
Zn	139.6	656.3	127	249.8	104	167.4	157.6	119.8	157.8	130
Cu	76.8	71	71.2	93.9	87.9	70.9	68.6	60.9	34.7	34.3
Ag	<0.1	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	<0.1
Ge	2.2	1.9	2.5	2.3	1.8	2.5	2.7	2.1	2.4	2.2
Hg	<0.5	0.06	0.5	<0.05	<0.5	<0.5	<0.5	<0.05	<0.5	0.16
Li	18.2	31.1	19.7	13.1	10.2	7	15.7	30.7	24.9	24
Be	1.3	1.4	1.1	0.9	0.7	0.9	0.9	1.5	1.4	1.4
As	<1	2.4	2.7	<1	2.2	4.3	2.5	<1	2.6	1.6
S	91.4	178.2	101.2	73.9	74.8	121.4	66.8	175.5	100.6	80.4
Sb	0.5	0.5	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.6
Se	0.5	0.1	0.1	0.3	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1
Sn	3.4	5.7	4.7	3.3	3.2	2.4	4.3	4.7	7.5	5
B	10.3	21.6	11.8	10.6	9.4	11.7	10.8	19.9	18.6	13.1
Bi	0.7	0.8	0.6	1	<0.5	1	1.1	<0.5	1.7	1.1
Tl	0.9	0.7	1	1.4	1.8	0.8	1.6	1.3	1.4	1
Cd	0.1	0.7	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1



شکل ۵: (A) مطابق نمودار متمایزکننده پروتولیت آذرین از رسوبی (Garrels and Mckenzie, 1971)، پروتولیت متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد از آذرین است. (B) در نمودار متمایزکننده منشأ آذرین از رسوبی (Winchester et al, 1980) نیز، تمامی نمونه‌های مورد از پروتولیت آذرین برخوردارند.



شکل ۶: (A) مطابق نمودار نام‌گذاری سنگ‌های آذرین (Cox et al, 1977)، ترکیب متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد بازالت و آندزیت بازالتی می‌باشد. (B) با توجه به نمودار دوتایی Nb/Y در برابر Zr/TiO<sub>2</sub> (Winchester and Floyd, 1977)، ترکیب نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده بازالت آلکالن جای دارند. (C) مطابق نمودار دوتایی نسبت Zr/P در برابر Zr (Winchester and Floyd, 1976)، سری ماگمایی نمونه‌های مورد مطالعه آلکالن می‌باشد.



شکل ۷: (A) در نمودار REE سنجیده شده نسبت به کندریت نمونه‌های مورد مطالعه از LREE نسبت به HREE نسبتاً غنی می‌باشند. (B) آنومالی‌های منفی زیرکنیم و فسفر و آنومالی مثبت سرب بیانگر جایگاه تکتونیکی مرتبط با فرورانش برای متابازیت‌های مورد مطالعه است.

غرب اسدآباد استفاده گردد. مطابق نمودارهای متمایزکننده جایگاه تکتونیکی متداول و مرسوم، جایگاه تکتونیکی ماگمای مافیک جنوب بردسکن غالباً مرتبط با جایگاه فرورانش است. با توجه به نمودار مثلثی TiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Pearce et al, 1975)، ماگمای سازنده متابازیت‌های شمال غرب

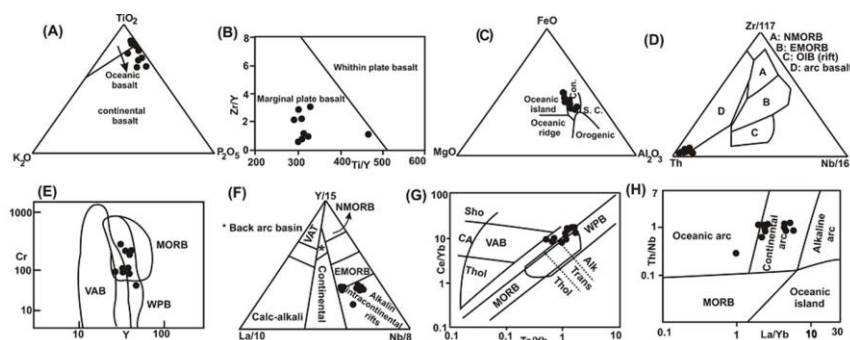
### جایگاه تکتونیکی

در این بخش سعی شده که علاوه بر نمودارهای متداول و مرسوم دهه‌های ۷۰ و ۸۰ قرن میلادی، از نمودارهای تصحیح شده جدید که براساس لگاریتم چندعنصری تعریف شده‌اند نیز برای شناسایی جایگاه تکتونیکی متابازیت‌های شمال-



تکتونیکی پشته میان اقیانوسی، داخل صفحه‌ای و فرورانش را نشان می‌دهند (شکل E۸) اما مطابق نمودار مثلثی Nb/8-Y/15-La/10 (Cabanis and 1989)، نمونه‌های مورد مطالعه ویژگی‌های ژئوشیمیایی ریفت داخل قاره‌ای را دارا می‌باشند (شکل F۸). در نمودار دوتایی Ce/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1982)، متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، در مرز متمایزکننده بازالت-های داخل صفحه‌ای و قوس آتشفشانی واقعند (شکل G۸). در نمودار دوتایی هولوچر و همکاران (Hollocher et al, 2012)، جایگاه زمین‌ساختی متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، عمدتاً قوس قاره‌ای می‌باشد (شکل H۸).

اسدآباد عمدتاً در جایگاه قاره‌ای تشکیل شده است (شکل A۸). مطابق نمودار دوتایی Ti/Y در برابر Zr/Y (Pearce and Gale, 1982)، جایگاه تشکیل ماگمای سازنده نمونه‌های مورد مطالعه از هر دو نوع حاشیه صفحه‌ای و درون صفحه‌ای می‌باشند (شکل B۸). در نمودار مثلثی FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Pearce et al, 1977)، ژنز پروتولیت متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد مرتبط با جایگاه قاره‌ای است (شکل C۸). براساس نمودار سه تایی Th-Zr/117-Nb/16 (Wood, 1980)، ژنز متابازیت‌های مورد مطالعه مرتبط با فرورانش می‌باشد (شکل D۸). براساس نمودار دوتایی Cr در برابر Y (Pearce, 1982)، متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، شاخص‌های ژئوشیمیایی هر سه جایگاه



شکل ۸: مطابق نمودارهای متمایزکننده جایگاه تکتونیکی متداول و مرسوم، جایگاه تکتونیکی پروتولیت متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، شاخص‌های ژئوشیمیایی هر دو جایگاه فرورانش و داخل صفحه‌ای را نشان می‌دهند. (A) با توجه به نمودار مثلثی پیرس و همکاران (Pearce et al, 1975)، ماگمای سازنده متابازیت‌های مورد مطالعه عمدتاً در جایگاه قاره‌ای تشکیل شده است. (B) مطابق نمودار Ti/Y در برابر Zr/Y (Pearce and Gale, 1977)، جایگاه تشکیل ماگمای سازنده‌ی نمونه‌های مورد مطالعه از هر دو نوع حاشیه صفحه‌ای و درون صفحه‌ای می‌باشند. (C) براساس نمودار مثلثی FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Pearce et al, 1977)، ژنز پروتولیت متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد مرتبط با جایگاه قاره‌ای است. (D) در نمودار سه تایی Th-Zr/117-Nb/16 (Wood, 1980)، ژنز متابازیت‌های مورد مطالعه مرتبط با فرورانش می‌باشد. (E) با توجه به نمودار دوتایی Cr-Y (Pearce, 1982)، متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد شاخص‌های ژئوشیمیایی هر سه جایگاه تکتونیکی پشته میان اقیانوسی، داخل صفحه‌ای و قوس آتشفشانی را نشان می‌دهند. (F) مطابق نمودار مثلثی Nb/8-Y/15-La/10 (Cabanis and Lacolle; 1989)، متابازیت‌های مورد مطالعه، ویژگی‌های ژئوشیمیایی ریفت داخل قاره‌ای را دارا می‌باشند. (G) براساس نمودار دوتایی پیرس (Pearce, 1982)، جایگاه تکتونیکی متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد از هر دو نوع داخل صفحه‌ای و قوس آتشفشانی است. (H) در نمودار دوتایی هولوچر و همکاران (Hollocher et al, 2012)، نمونه‌های مورد نظر، عمدتاً از جایگاه تکتونیکی قوس آتشفشانی برخوردارند.

$$DF1 = - 4.6761 \ln (TiO_2/SiO_2) + 2.533 \ln (Al_2O_3/SiO_2) - 0.3884 \ln (Fe_2O_3/SiO_2) + 3.9688 \ln (FeO/SiO_2) + 0.898 \ln (MnO/SiO_2) - 0.5832 \ln (MgO/SiO_2) - 0.2896 \ln (CaO/SiO_2) - 0.2704 \ln (Na_2O/SiO_2) + 1.081 \ln (K_2O/SiO_2) + 0.1845 \ln (P_2O_5/SiO_2) + 1.5445$$

$$DF2 = 0.6751 \ln (TiO_2/SiO_2) + 4.5895 \ln (Al_2O_3/SiO_2) + 2.0897 \ln (Fe_2O_3/SiO_2) + 0.8514 \ln (FeO/SiO_2) - 0.4334 \ln (MnO/SiO_2) + 1.4832 \ln (MgO/SiO_2) - 2.3627 \ln (CaO/SiO_2) - 1.6558 \ln (Na_2O/SiO_2) + 0.6775 \ln (K_2O/SiO_2) + 0.413 \ln (P_2O_5/SiO_2) + 13.1639$$

در نمودار دوتایی آگراوال و همکاران (Agrawal et al, 2008) نیز جایگاه تکتونیکی نمونه‌های مورد مطالعه جزایر قوسی است (شکل C<sup>۹</sup>). پارامترهای

موجود در این نمودار به قرار زیر می‌باشند:

$$DF1 = 0.3518 \log (La/Th) + 0.6013 \log (Sm/Th) - 1.345 \log (Yb/Th) + 2.1056 \log (Nb/Th) - 5.4763$$

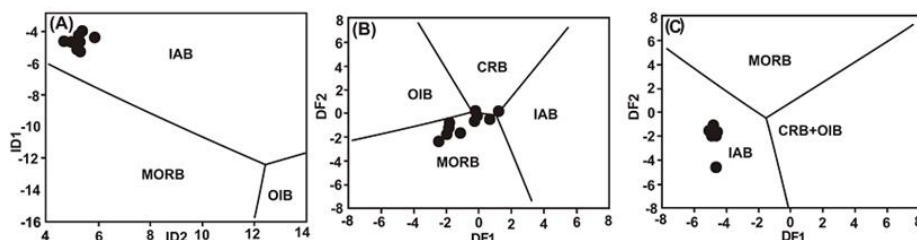
$$DF2 = - 0.305 \log (La/Th) - 1.1801 \log (Sm/Th) + 1.6189 \log (Yb/Th) + 1.226 \log (Nb/Th) - 0.9944$$

با توجه به نمودار دوتایی تعریف شده براساس لگاریتم تغییرات عناصر Y, Zr, Ti و Sr (Vermeesch, 2006)، جایگاه تکتونیکی متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، جزایر قوسی است (شکل A<sup>۹</sup>). پارامترهای ID1 و ID2 موجود در این نمودار به قرار زیر می‌باشند:

$$ID1 = - 0.016 \log (Zr/Ti) - 2.961 \log (Y/Ti) + 1.500 \log (Sr/Ti)$$

$$ID2 = - 2.474 \log (Zr/Ti) + 2.143 \log (Y/Ti) + 1.840 \log (Sr/Ti)$$

ورما (Verma, 2006) و آگراوال و همکاران (Agrawal et al, 2008)، با توجه به توابع تمایزی تعریف شده، نمودارهای دوتایی متمایزکننده جایگاه تکتونیکی را ابداع نموده‌اند. مطابق با توابع تمایز تعریف شده توسط ورما (Verma, 2006)، جایگاه تکتونیکی بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه پشته میان اقیانوسی است (شکل B<sup>۹</sup>). پارامترهای موجود در این نمودار به شرح زیر هستند:



شکل ۹: مطابق نمودار متمایزکننده جایگاه تکتونیکی جدید و انواعی که براساس لگاریتم چندعنصری بنا شده و در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند ژنز پروتولیت متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، عمدتاً مرتبط با جایگاه فرورانش می‌باشد. A) با توجه به نمودار دوتایی ID1 در برابر ID2 (Vermeesch, 2006)، ژنز متابازیت‌های مورد مطالعه مرتبط با جایگاه جزایر قوسی می‌باشد. B) مطابق نمودار دوتایی DF1 در برابر DF2 (Verma et al, 2006)، نیز جایگاه تشکیل نمونه‌های مافیک جنوب بردسکن جزایر قوسی می‌باشد. C) براساس نمودار دوتایی DF1 در برابر DF2 (Agrawal et al, 2008)، نمونه‌های مورد مطالعه در جایگاه جزایر قوسی به وجود آمده‌اند (بازالت پشته میان اقیانوسی: MORB، بازالت جزایر اقیانوسی: OIB، بازالت جزایر قوسی: IAB، بازالت ریفت قاره‌ای: CRB).

دگرگونی سنندج-سیرجان محسوب می‌شود. این پهنه که وقوع ماگماتیسم و دگرگونی وسیع مزوزوئیک و نبود ولکانیسم ائوسن، آن را از سایر

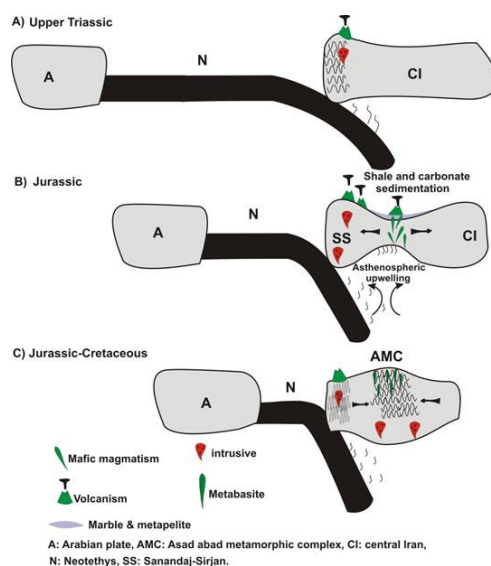
همان‌طور که در مباحث قبل بیان شد مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد بخشی از پهنه ماگمایی-

قاره‌ای است. این چنین متابازیت‌هایی با شاخص‌های ژئوشیمیایی قوس و پشت قوس قاره‌ای از سایر نقاط پهنا سنندج-سیرجان شمالی مانند سنقر-کنگاور (Bellon and Braud, 1974)، سقز-پیرانشهر (ترخانی و همکاران، ۱۳۸۸) و شاهین‌دژ (حاجی‌قربانی، ۱۳۹۶؛ حاجی‌قربانی و همکاران، ۱۳۹۷) نیز گزارش شده است. براود و بلون (Bellon and Braud, 1974) جایگاه تکتونیکی واحدهای آتشفشانی دگرگون شده و شیست‌های بازیک سنقر و کنگاور را که در غرب منطقه مورد مطالعه واقعند قوس آتشفشانی قاره‌ای در نظر گرفته و خاطر نشان کرده‌اند که فیلیت‌های همدان با جایگاه تکتونیکی پشت قوس معادل این واحدهای آتشفشانی دگرگون شده هستند. در این رابطه تعداد زیادی از محققین (Alavi, 1994; Mohajjel et al, 2003; Ghasemi and Talbot, 2006; Hassanzadeh et al, 2008; Shahbazi et al, 2010) نیز معتقدند که ماگماتیسم مرتبط با قوس ماگمایی سنندج-سیرجان در جایگاه زمین-ساختی کششی روی داده است. به عقیده شهبازی و همکاران (Shahbazi et al, 2010) مجموعه پلوتونیک الوند با سن ژوراسیک میانی، تا اندازه‌ای ویژگی‌های ژئوشیمیایی آلکالن درون صفحه‌ای مرتبط با حوضه‌های کششی کمان قاره‌ای را نشان می‌دهد. از طرفی، توالی رسوبات شیلی، آهکی و ماگمای بازالتی قبل از وقوع دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه اسدآباد نیز، با پیدایش یک حوضه رسوبی قاره‌ای در حال کشش هم‌خوانی دارد. در حالی که فرورانش نئوتتیس به زیر حاشیه فعال قاره‌ای صفحه ایران (پهنا سنندج-سیرجان) منجر به پیدایش اقیانوس نائین-بافت در بخش جنوبی زون سنندج-سیرجان به صورت یک حوضه پشت قوس باریک شده (Ghasemi and Talbot, 2006; Shafaii Moghadam et al, 2009) در بخش

پهنه‌های زمین‌شناسی ایران متمایز می‌سازد در نتیجه فرورانش نئوتتیس از تریاس بالایی تا کرتاسه در جایگاه زمین‌ساختی قوس قاره‌ای واقع بوده و دست‌خوش رویدادهای زمین‌ساختی، ماگمایی و دگرگونی جایگاه حاشیه فعال قاره‌ای شده است (Berberian and King, 1981; Hassanzade and Wernicke, 2016). نظر به ترکیب بازالتی متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، خاستگاه تشکیل آنها مرتبط با ذوب بخشی گوشته می‌باشد. ماگماتیسم مافیک گوشته‌ای نواحی قاره-ای، تابعی از شرایط ژئودینامیک مرتبط با تنوره-های گوشته‌ای، ریفتینگ قاره‌ای و جایگاه فرورانش و پشت قوس در نواحی حاشیه فعال قاره‌ای می‌باشد (Wilson, 1989). با توجه به نمودارهای متمایز کننده محیط تکتونیکی، شاخص‌های ژئوشیمیایی متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، با هر سه جایگاه پشته میان‌اقیانوسی، داخل صفحه‌ای و قوس آتشفشانی اقیانوسی و قاره‌ای هم‌خوانی دارند. به عقیده ویلسون (Wilson, 1989)، شرایط ژئودینامیک حاکم در جایگاه پشت قوس قاره‌ای طوری است که ماگماتیسم حاضر در آن، ویژگی‌های ژئوشیمیایی جایگاه حاشیه صفحه‌ای و داخل صفحه‌ای (ریفت قاره‌ای) را به طور توأمان دارا می‌باشد. بنابراین شاخص‌های ژئوشیمیایی پروتولیت بازالتی متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد، بیانگر تشکیل آنها در یک حوضه کششی پشت قوس قاره‌ای (ریفت قاره‌ای) است. ویژگی‌های ژئوشیمیایی غنی شده در ماگمای جایگاه پشت قوس قاره‌ای همانند آنچه که در متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد پیداست متأثر از مشارکت گوشته لیتوسفری غنی شده زیر قاره‌ای و گوه گوشته‌ای متاسوماتیزه در ژنز ماگما و تقابل ماگمای گوشته‌ای با پوسته

هم‌جوار هستند و شرایط دما و فشار مشابهی را نسبت به آنها نشان می‌دهند (رجبی، ۱۳۹۲) معرف ماگماتیسم مافیک حاصل از فرورانش حوضه اقیانوسی نئوتتیس به جایگاه حوضه کششی پشت قوس قاره‌ای می‌باشند که با حاکم شدن رژیم تکتونیکی فشارشی در ژوراسیک-کرتاسه و بسته شدن این حوضه، دستخوش شرایط دگرگونی رخساره شیست سبز در جایگاه حاشیه فعال قاره‌ای یا کوهزایی همزمان با برخورد شده‌اند (شکل ۱۰c). تکمیل ارزیابی دقیق جایگاه زمین‌ساختی متابازیت‌های شمال‌غرب اسدآباد، مستلزم بررسی‌های سن‌سنجی و استفاده از نسبت‌های ایزوتوپی استرانسیم و نئودیمیم به منظور روشن شدن زمان رویداد دگرگونی و تعیین تحولات پتروژنتیکی پروتولیت این متابازیت‌ها است.

شمالی سنندج-سیرجان، تکتونیک کششی پشت قوس تنها ایجاد ریفت قاره‌ای عمیق متشکل از رسوبات تریاس و ژوراسیک را سبب شده است (Amidi and Majidi, 1977; Mohajjel, 1992; Ghasemi et al, 2005; Ghasemi and Talbot, 2006). با توجه به داده‌های موجود، مدل ژئودینامیک سناریوی تشکیل متابازیت‌های شمال‌غرب اسدآباد در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. با شروع فرورانش حوضه اقیانوسی نئوتتیس (تریاس بالایی)، پهنه سنندج-سیرجان در جایگاه حاشیه فعال قاره‌ای واقع بوده است (شکل ۱۰a). در ادامه فرورانش و حاکم شده رژیم تکتونیک کششی در پهنه سنندج-سیرجان، در زمان ژوراسیک فرایند رسوب‌گذاری و وقوع ماگماتیسم مافیک درون حوضه در حال فرونشست صورت گرفته است (شکل ۱۰b). احتمالاً متابازیت‌های شمال‌غرب اسدآباد که هم‌رخساره با متاپلیت‌های



شکل ۱۰: مدل ژئودینامیک تشکیل متابازیت‌های مجموعه دگرگونی شمال اسدآباد. A) در شروع فرورانش نئوتتیس (تریاس بالایی)، پهنه سنندج-سیرجان در جایگاه حاشیه فعال قاره‌ای واقع بوده است. B) ایجاد حوضه کششی پشت قوس قاره‌ای با رسوب‌گذاری و وقوع ماگماتیسم مافیک در ژوراسیک همراه شده است. C) در ادامه فرورانش (ژوراسیک-کرتاسه) و حاکم شدن رژیم زمین‌ساختی فشارشی، ضمن بسته شدن حوضه کششی، ماگماتیسم مافیک و رسوبات موجود در آن در شرایط رخساره شیست سبز دگرگون شده‌اند.

### نتیجه گیری

شواهد کانی‌شناسی و شیمی کانی بیانگر آن است که متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد در شرایط رخساره شیبست سبز دگرگون شده و با متابلیت‌های هم‌جوار هم‌رخساره می‌باشند. شاخص‌های ژئوشیمیایی این متابازیت‌ها با پروتولیت آذرین بازالتی هم‌خوانی دارد. در نمودارهای متمایزکننده جایگاه تکتونیکی، پروتولیت متابازیت‌های شمال غرب اسدآباد ویژگی‌های ژئوشیمیایی داخل صفحه‌ای و حاشیه صفحه‌ای عمدتاً قاره‌ای نشان می‌دهند. بنابراین احتمالاً این متابازیت‌ها

معرف ماگماتیسیم بازیگه جایگاه پشت قوس قاره‌ای ناشی از فروانش نئوتتیس به زیر لبه قاره‌ای پهنه سنندج-سیرجان شمالی هستند که دستخوش دگرگونی حاشیه فعال قاره‌ای یا کوهزایی همزمان با برخورد شده‌اند.

### سپاس‌گزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی که در تأمین هزینه آنالیزهای شیمیایی سنگ کل مساعدت نموده‌اند قدردانی می‌گردد.

### منابع

- منطقه سقز- پیرانشهر، مجله علوم زمین، شماره ۱۲، ص ۸۷-۸۹.
- حاجی‌قربانی، ش.، ۱۳۹۶. پترولوژی پی‌سنگ دگرگونی ایران در مجموعه دگرگونی محمودآباد (جنوب شرق شاهین‌دژ). پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۵)</sup>، قزوین.
- حاجی‌قربانی، ش.، نصرآبادی، م.، جمشیدی‌بدر، م. و داودی، ز.، ۱۳۹۷. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی آمفیبولیت‌های مجموعه دگرگونی محمودآباد (جنوب شرق شاهین‌دژ)، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی، شماره ۳، ص ۷۳۳-۷۵۰.
- رجبی، س.، ۱۳۹۲. پترولوژی سنگ‌های دگرگونی شمال غرب اسدآباد با نگرشی ویژه به متابازیت‌های این منطقه، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۵)</sup>، قزوین.
- بهاری‌فر، ع.، ۱۳۷۶. نگرشی نو بر دگرگونی‌های ناحیه‌ای زون سنندج-سیرجان، منطقه همدان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه خوارزمی، تهران.
- بهاری‌فر، ع.، نانگ پنگ، ک.، لین چونگ، س. و ایزوکا، ی.، ۱۳۹۶. کانی‌شناسی و زمین دما- فشارسنجی گارنت آمفیبولیت‌های علی‌آباد دما (جنوب همدان، پهنه سنندج-سیرجان)، مجله پترولوژی، شماره ۳۱، ص ۱-۲۰.
- بهاری‌فر، ع.، ۱۳۸۳. پترولوژی سنگ‌های دگرگونی منطقه همدان، رساله دکتری (گرایش پترولوژی)، دانشگاه خوارزمی، تهران.
- ترخانی، م.س.، وثوقی عابدینی، م.، مسعودی، م. و بهاروند، ن.، ۱۳۸۸. کاربرد عناصر ردیاب غیرمتحرک Th و Co در بررسی سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده و هوازده: شواهدی از سنگ‌های کرتاسه

-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, v. 50, p. 1057-1079.

-Ahmadi Khalaji, A., Esmaeily, D., Valizadeh, M.V. and Rahimpour-Bonab, H., 2007. Petrology and geochemistry of the granitoid complex

of Boroujerd, Sanandaj- Sirjan Zone, Western Iran: Journal of Asian Earth Sciences, v. 29, p. 859-877.

-Alavi, M., 1994. Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretation: Tectonophysics, v. 229, p. 211-238.

-Amidi, M. and Majidi, B., 1977. Geological Map of Hamadan, (scale 1:250,000), Geological Survey of Iran.

- Arvin, M., Pan, Y., Dargahi, S., Malekzadeh, A. and Babaei, A., 2007. Petrochemistry of the Siah-Kuh granitoid stock southwest of Kerman, Iran: implication for initiation of Neotethys subduction: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 30, p. 474–489.
- Bagheri, S. and Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complex in Central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications: *Tectonophysics*, v. 451, p. 123-155.
- Baharifar, A.A., Moinevaziri, H., Bellon, H. and Pique, A., 2004. The crystalline complexes of Hamadan (Sanandaj–Sirjan Zone, Western Iran): metasedimentary Mesozoic sequences affected by Late Cretaceous tectono-metamorphic and plutonic event: *Comptes Rendus Geosciences*, v. 336, p. 1443–1452.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 18, p. 210–265.
- Besse, J., Torcq, F., Gallet, Y., Ricou, L.E., Krystyn, L. and Saidi, A., 1998. Late Permian to Late Triassic palaeomagnetic data from Iran: constraints on the migration of the Iranian block through the Tethyan Ocean and initial destruction of Pangaea: *Geophysical Journal International*, v. 135, p. 77-92.
- Braud, J. and Bellon, H., 1974. Donnees nouvelles sur le domaine metamorphique du Zagros (zone de Sanandaj–Sirjan) au niveau de Kermanshah-Hamadan (Iran): nature age et interpretation des series metamorphiques et des intrusions; evolution structural. *Rapport Universite Paris-Sud*, p. 1–20.
- Cabanis, B. and Lacolle, M., 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discremination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange etou de contamination crustal: *C. R. Acad. Sci. II*, v. 309, p. 2023-2029.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979. Interpretation of igneous rocks, Allen and Unwin, London, 582 p.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992. An introduction to rock forming minerals, London, 528 p.
- Dilek, Y. and Furnes, H., 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere: *Geological Society of America Bulletin*, v. 123, p. 387–411.
- Eshraghi, S.A. and Mahmoudi Gharai, M., 2003. Geological Map of Tuyserkan, (scale 1: 100,000), sheet 5659, Geological Survey of Iran.
- Garrels, R.M. and Mckenzie, F.T., 1971. Evolution of Sedimentary Rocks, W. W', Norton New York, NY.
- Ghalamghash, J., Nedelec, A., Bellon, H., Vousoughi Abedini, M. and Bouchez, J.L., 2009. The Urumieh plutonic complex (NW Iran): a record of the geodynamic evolution of the Sanandaj–Sirjan zone during Cretaceous times – Part I: petrogenesis and K/Ar dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 35, p. 401–415.
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran): *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 26, p. 683–693.
- Ghasemi, A., Haji Hosseini, A. and Hosseini, M., 2005. Geological Map of Chadegan, (scale 1: 100,000), Geological Survey of Iran.
- Golonka, A.J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic: *Tectonophysics*, v. 381, p. 235-273.
- Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Horton, B.K., Axen, G.J., Stockli, L.D., Grove, M., Schmitt, A.K. and Walker, J.D.,

2008. U–Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic– Early Cambrian granitoids in Iran: implication for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement: *Tectonophysics*, v. 451, p. 71–96.
- Hassanzadeh, J. and Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions: *Tectonics*, v. 35, p. 586–621.
- Hawthorne, F.C., Oberti, R.E., Harlow, G.V., Maresch, W.F., Martin, R.C., Schumacher, J.D. and Welch, M., 2012. Nomenclature of the amphibole supergroup, *American Mineralogist*: v. 97, p. 2031-2048.
- Hollocher, K., Robinson, P., Walsh, E. and Roberts, D., 2012. Geochemistry of amphibolite-facies volcanics and gabbros of the Støren Nappe in extensions west and southwest of Trondheim, Western Gneiss region, Norway: a key to correlations and paleotectonic settings, *American Journal of Science*: v. 312, p. 357-416.
- John, T., Scherer, E.E., Schenk, V., Herms, P., Halama, R. and Garbe-Schönberg, D., 2010. Subducted seamounts in an eclogite-facies ophiolite sequence: The Andean Raspas Complex, SW Ecuador: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 159, p. 265-284.
- Miyashiro, A., 1974. Metamorphism and related magmatism in plate tectonics, *American Journal of Sciences*, v. 272, p. 629-656.
- Mohajjel, M., 1992. Geological Map of Golpaygan, (scale 1: 100,000), Geological Survey of Iran.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 21, p. 397–412.
- Pearce, J.A., ?. "Trace elements characteristic of lavas from destructive plate boundaries", *Andesites* (Thorpe, R. S., ed.), Wiley, New York: (1982), p. 525–528.
- Pearce, J.A. and Gale, G.H., 1977. Identification of ore deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks: *Geological Society, Special Publication*, v. 7, p. 14-24.
- Pearce, J.A., 1982. Trace elements characteristic of laves from destructive plate boundaries. In: *Andesites* (Ed. Thorpe, R. S.) Wiley, New York, p. 525-528.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1971. Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 12, p. 339-349.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 19, p. 290-300.
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust: *Lithos*, v. 100, p. 14-48.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C., 1975. The P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-TiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram: a method of discriminating between oceanic and non-oceanic basalts: *Earth and Planetary Science Letters*. v. 24, p. 419-426.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C., 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 36, p. 121-132.
- Rachidnejad-Omrani, N., Hachem Emami, M., Sabzehhei, M., Rastad, E., Bellon, H. and Pique', A., 2002.

- "Lithostratigraphie et histoire paleozoïque-paleocene des complexes metamorphiques de la region de Muteh, zone de Sanandaj-Sirjan (Iran meridional): Comptes Rendus Geoscience, v. 334, p. 1185-1191.
- Saccani, E., 2015. A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematics: Geoscience Frontiers, v. 6, p. 481-501.
- Sengör, A.M.C., Altmer, D., Cin, A., Ustaömer, T. and Hsü, K.J., 1988. Origin and assembly of the Tethys side orogenic collage at the expense of Gondwana Land: Geological Society of London Special Publication, v. 37, p. 119-181.
- Sepahi, A.A., 2008. Typology and petrogenesis of granitic rocks in the Sanandaj- Sirjan metamorphic belt, Iran: with emphasis on the Alvand plutonic complex: Neues Jahrbuch für Geologie und Paleontologie Abhandlungen, v. 247 (3), p. 295-312.
- Sepahi, A.A., Whitne, D.L. and Baharifar, A.A., 2004. Petrogenesis of andalusite-kyanite- sillimanite veins and host rocks, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Hamadan, Iran: Journal of Metamorphic Geology, v. 22, p. 119-134.
- Shafaii Moghadam, H., Whitechurch, H., Rahgoshay, M. and Monsef, I., 2009. Significance of Nain-Baft ophiolitic belt (Iran): short-lived, transitional Cretaceous back-arc oceanic basins over the Tethyan subduction zone: Comptes Rendus Geoscience, v. 341, p. 1016-1028.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A.A., Shang, C.K. and Abedini, M.V., 2010. Geochemistry and U-Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj-Sirjan Zone (Iran): new evidence for Jurassic magmatism: Journal of Asian Earth Sciences, v. 39, p. 668-683.
- Sheth, H.C., 2008. Do major oxide tectonic discrimination diagrams work? Evaluating new log-ratio and discriminant-analysis-based diagrams with Indian Ocean mafic volcanics and Asian ophiolites: Terra Nova: v. 20, p. 229-236.
- 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, v. 196, p. 17-33.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Magmatism in Ocean Basins (Eds. Saunders, A. D., Norry, M. J., Special Publications, Geological Society, London, v. 42, p. 312-345.
- Verma, S.K. and Verma, S.P., 2013. Identification of Archaean plate tectonic processes from multidimensional discrimination diagrams and probability calculations: International Geology Review, v. 55, p. 225-248.
- Verma, S.P., 2010. Statistical evaluation of bivariate, ternary and discriminant function tectonomagmatic discrimination diagrams: Turkish Journal of Earth Sciences, v. 19(2), p. 185-238.
- Verma, S.P., Guevara, M. and Agrawal, S., 2006. Discriminating four tectonic settings: five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log-ratio transformation of major element data: Journal of Earth System Science, v. 115(5), p. 485-528.
- Vermeesch, P., 2006. Tectonic discrimination diagrams revisited:



- Geochemistry, Geophysics and Geosystems, v. 7, p. 1-55.
- Wendt, J., Kaufmann, B., Belka, Z., Farsan, N. and Bavandpur, A.K., 2005. Devonian/Lower Carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran Part II. Northern and Central Iran: *Acta Geologica Polonica*, v. 55(1), p. 31-97.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Unwin Hyman, London.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1976. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed igneous rocks: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 28, p. 459-469.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements: *Chemical Geology*, v. 20, p. 325-343.
- Winchester, J.A., Park, R.G. and Holland, J.G., 1980. The geochemistry of Lewisian semi-pelitic schists from the Gairloch district", *Western Ross: Scottish Journal of Geology*, v. 16, p. 165-179.
- 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*, v. 50, p. 11-30.