

سن سنجی U-Pb و تعیین ترکیب محل منشأ گندهای آداکیتی پساافیولیتی سبزوار

خدیجه جمشیدی^۱، حبیب‌اله قاسمی^{۱*} و لایچنگ میائو^۲

^۱ گروه پتروولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ مؤسسه زمین‌شناسی و ژئوفیزیک آکادمی علوم چین، پکن، چین

چکیده

سنگ‌های آذرین پساافیولیتی با ترکیب ریولیت/داسیت در داخل مجموعه افیولیتی پهنه سبزوار رخنمون دارند. ماهیت کالک‌آلکالن و آداکیتی پرسیلیس این سنگ‌ها پیش از این به اثبات رسیده است. این سنگ‌ها حاوی مقادیر نسبت‌های ایزوتوپی نخستین $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (۰/۷۰۳۸۲ تا ۰/۷۰۴۴۴) و $\varepsilon\text{Nd}(t)$ (+۵/۳۰ تا +۶/۱۸) مشابه با ترکیبات بازالت پشته میان اقیانوسی (MORB) هستند. این ویژگی‌های ایزوتوپی با ترکیبات آداکیتی حاصل از ذوب ورقه‌های اقیانوسی فرورانده شده سنوزوئیک مطابقت دارد. سن جایگزینی این سنگ‌ها در پهنه افیولیتی سبزوار از طریق سن سنجی U-Pb با روش SHRIMP II روی کانی زیرکن، حدود ۴۸ میلیون سال به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که ماگمای اولیه سازنده سنگ‌های آداکیتی پهنه سبزوار از ذوب بخشی یک منبع گارنت‌آمفیبولیتی یا اکلوزیتی حاصل از دگرگونی لیتوسفر اقیانوسی فرورانده شده سبزوار در ائوسن آغازین حاصل شده است. تبلور تفریقی ماگما از طریق جدایش بلوری آمفیبول، عامل اصلی در بروز ویژگی‌های آداکیتی برجسته‌تر در سنگ‌های تحول یافته‌تر (ریولیت‌ها) بوده است.

واژه‌های کلیدی: سن سنجی ایزوتوپی، گنبد ریولیتی/داسیتی، آداکیت، سبزوار، پهنه ایران مرکزی

مقدمه

واژه آداکیت نخستین بار برای نامگذاری دسته‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و معادل‌های درونی آنها در محیط‌های کمان قاره‌ای یا جزایر کمانی جوان به کار برده شد که دارای ویژگی‌های ژئوشیمیایی متفاوت با سنگ‌های معمول کمان بودند (Defant and Drummond, 1990). این ویژگی‌ها شامل: مقادیر بالای SiO_2 (>۵۶ درصد)

وزنی)، Al_2O_3 (>۱۵ درصد وزنی) و نسبت بالای Sr/Y به همراه نسبت پایین $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ، مقادیر بسیار اندک عناصر HFS، Y و Yb است. اگر چه در طول سال‌های اخیر، پتروژنز و منشأ ماگمای سازنده این دسته از سنگ‌ها با سردرگمی و مجادله همراه بوده است، اما این امر به طور گسترده پذیرفته شده که حضور مقادیر در خور توجه‌ای از گارنت±آمفیبول در مراحل از پتروژنز

* h-ghasemi@shahroodut.ac.ir

ماگماهای آداکیتی به عنوان فاز باقیمانده یا به عنوان نخستین تجمعات فازی تبلور یافته، امری ضروری است. مدل‌های پتروژنزی مختلفی برای تشکیل ماگماهای آداکیتی پیشنهاد شده‌اند که شامل: الف) ذوب بخشی بازالت لیتوسفر اقیانوسی فرورو (Defant and Drummond, 1990؛ Kay, 1978؛ Drummond and Defant, 1990) و برهم‌کنش مذاب حاصل از آن با گوشته پریدوتیتی رویی با نسبت‌های متغیر (Rapp et al., 1999) ب) تفریق فشار بالای گارنت و آمفیبول از مذاب بازالتی آبدار (Proureau and Scaillet, 2003) ج) ذوب بخشی پوسته قاره‌ای زیرین توسط زیر ورقه‌ای شدن ماگماهای بازالتی یا آزادسازی سیالات از سنگ‌های قاره‌ای زیرانده شده (Rapp et al., 1993؛ Atherton and Petford, 1993) د) اشتقاق ماگما از ذوب بخشی پوسته اکلوتیتی قاره‌ای زیرین فروافتاده در گوشته و واکنش آن با پریدوتیت گوشته (Xu et al., 2002).

در منطقه سبزوار، سنگ‌های آذرین نیمه عمیق به شکل گنبد و دایک و با ترکیب اسیدی تا حد واسط در گستره وسیعی از پهنه افیولیتی سبزوار رخنمون دارند. در سال‌های اخیر، مطالعات زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی بسیار خوبی روی این واحدهای سنگی انجام شده است (Salehinejad, 2008؛ Ghasemi et al., 2010؛ Jamshidi et al., 2014, 2015؛ Rossetti et al., 2014). سنگ‌های نیمه عمیق فلسیک مورد هدف این پژوهش در بخش جنوبی و جنوب‌غربی پهنه افیولیتی سبزوار، ترکیب داسیت تا ریولیت دارند. مطالعات ژئوشیمیایی انجام شده توسط Jamshidi و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵)، بیانگر ماهیت کالک‌آلکالن، مت‌آلومین تا پرآلومین برای این سنگ‌ها است. با توجه به این پژوهش‌ها، سنگ‌های

یاد شده حاوی مقادیر بالای Al_2O_3 (۱۵ تا ۱۸ درصد وزنی)، عناصر آلکالی ($Na_2O=3/5$ تا 7)، $K_2O=4/2$ تا $1/3$ درصد وزنی) و نسبت بالای Na_2O/K_2O ($2/2$ تا 3) هستند. عدد منیزیوم محاسبه شده برای این سنگ‌ها بین ۲۵ تا ۶۸ متغیر بوده و مقادیر Sr از تمرکز بالایی برخوردار است (۲۰۸ ppm تا ۸۹۳). روند کاهشی اکسیدهای عناصر اصلی مانند: CaO ، Al_2O_3 ، FeO_{total} و عناصر کمیاب سازگار Co و Ni به همراه همبستگی مثبت Na_2O و Ba با افزایش SiO_2 ، بیانگر نقش مهم تفریق بلوری در خلال تحول ماگما است. این سنگ‌ها حاوی مقادیر بسیار پایین Y (۲/۲ ppm تا ۱۳) و Yb (۰/۵ ppm تا ۱/۵) هستند. با افزایش تفریق، نسبت Sr/Y روند افزایشی و در مقابل، مقادیر عناصر HFS (Nb و Zr) روند کاهشی نشان می‌دهند. این ویژگی‌های ژئوشیمیایی به همراه نبود آنومالی تا آنومالی اندکی مثبت Eu با ویژگی‌های ژئوشیمیایی آداکیت‌ها سازگاری کامل دارند (Jamshidi et al., 2014, 2015).

به دلیل ابهامات موجود در باره محل منبع ماگمای سازنده این گنبد‌های آداکیتی پساافیولیتی، در این پژوهش، به بررسی این مسأله با استفاده از مطالعات شیمی عناصر اصلی و کمیاب سنگ کل، داده‌های ایزوتوپی Sr-Nd سنگ کل و سن‌سنجی U-Pb روی کانی زیرکن جدا شده از نمونه‌های سنگی مطالعه شده پرداخته شده است. در نهایت، ترکیب محل منشأ ماگمای اولیه و فرآیندهای پتروژنتیکی درگیر در تحول ماگما در خلال صعود، پیشنهاد می‌شود.

زمین‌شناسی

مجموعه افیولیتی سبزوار، واقع در لبه شمالی پهنه ایران مرکزی، به عنوان بقایایی از شاخه

در چند مکان، از جمله شمال روستای کلاته سادات، رخنمون رسوبات مارنی اولیگوسن (معادل سازند قرمز زیرین) به وسیله چندین دایک و روانه اولیوین بازالتی آکالن قطع شده اند (Ghasemi et al., 2011).

واحد مارنی سفید رنگ میوسن که از گسترش چشمگیری در منطقه برخوردار است با مرز تدریجی روی این مارن های قرمز قرار داشته و به طور تدریجی توسط توالی ضخیمی از کنگلومرای چندزادی پلیوسن پوشیده می شود. قطعات تخریبی حاصل از گنبد های آداکیتی پسا فیولیتی به همراه قطعاتی از هارزبورژیت های سری فیولیتی و سنگ های آتشفشانی-رسوبی ائوسن با جورشدگی و گردشدگی ضعیف، اجزای تشکیل دهنده کنگلومرای چندزادی پلیوسن هستند (شکل ۲- D) (Ghasemi et al., 2011; Jamshidi et al., 2014).

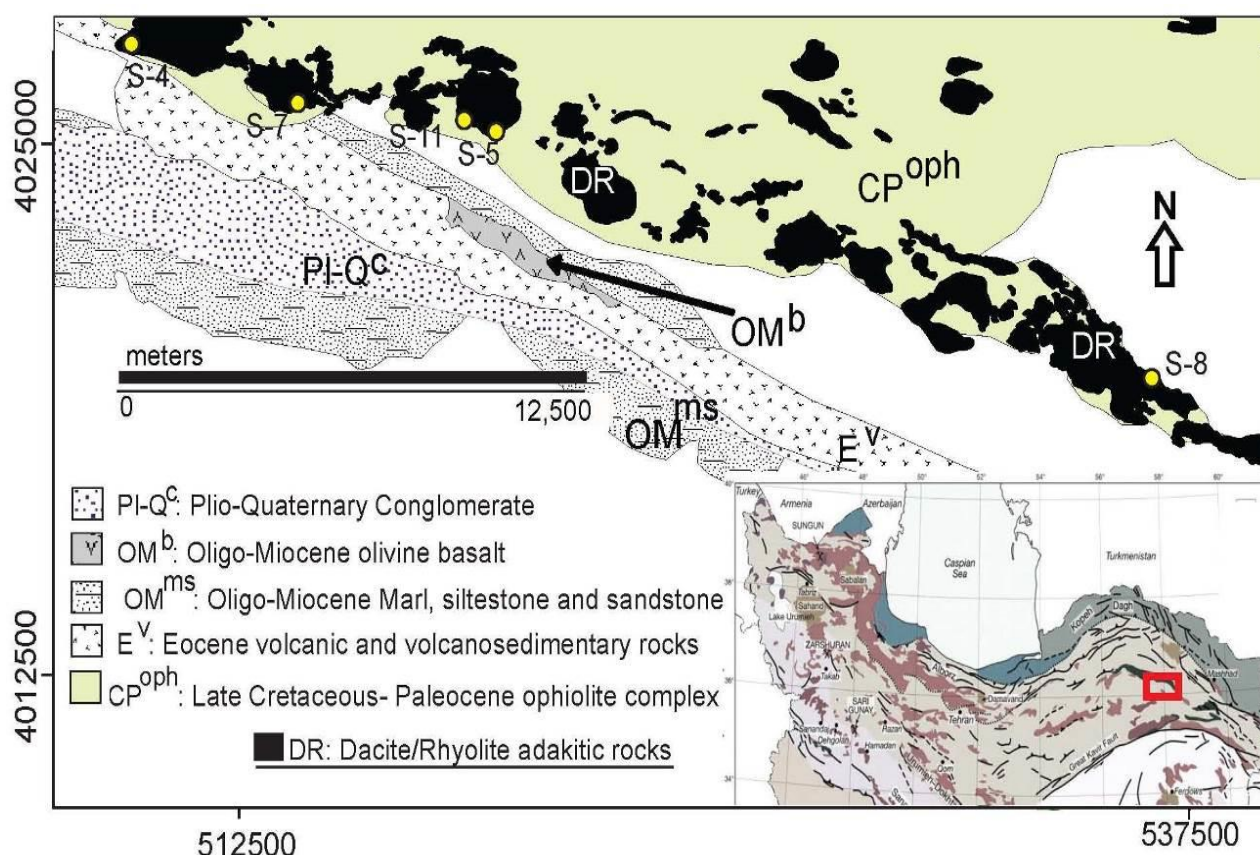
روش انجام پژوهش

در این پژوهش از نتایج تجزیه های ژئوشیمیایی Jamshidi و همکاران (۲۰۱۴) روی ۳۵ نمونه سنگی از رخنمون های سنگ های نیمه عمیق پسا فیولیتی در جنوب سبزوار استفاده شده است. مقادیر عناصر اصلی و برخی از عناصر کمیاب با روش ICP-ES و فراوانی دیگر عناصر کمیاب و کمیاب خاکی با روش ICP-MS در آزمایشگاه ACME کانادا تعیین شده است. تجزیه های ایزوتوپی و تعیین نسبت های ایزوتوپی ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) و ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) سنگ کل با روش Yang و همکاران (۲۰۱۰) و Li و همکاران (۲۰۱۲) انجام شده است. جداسازی عناصر Rb, Nd, Sm و Sr با روش کروماتوگرافی تبادل یونی دو مرحله ای انجام گرفته است و مقادیر آنها با روش طیف سنج جرمی یونیزاسیون حرارتی در آزمایشگاه ایزوتوپ رادیوژنیک مؤسسه زمین شناسی و

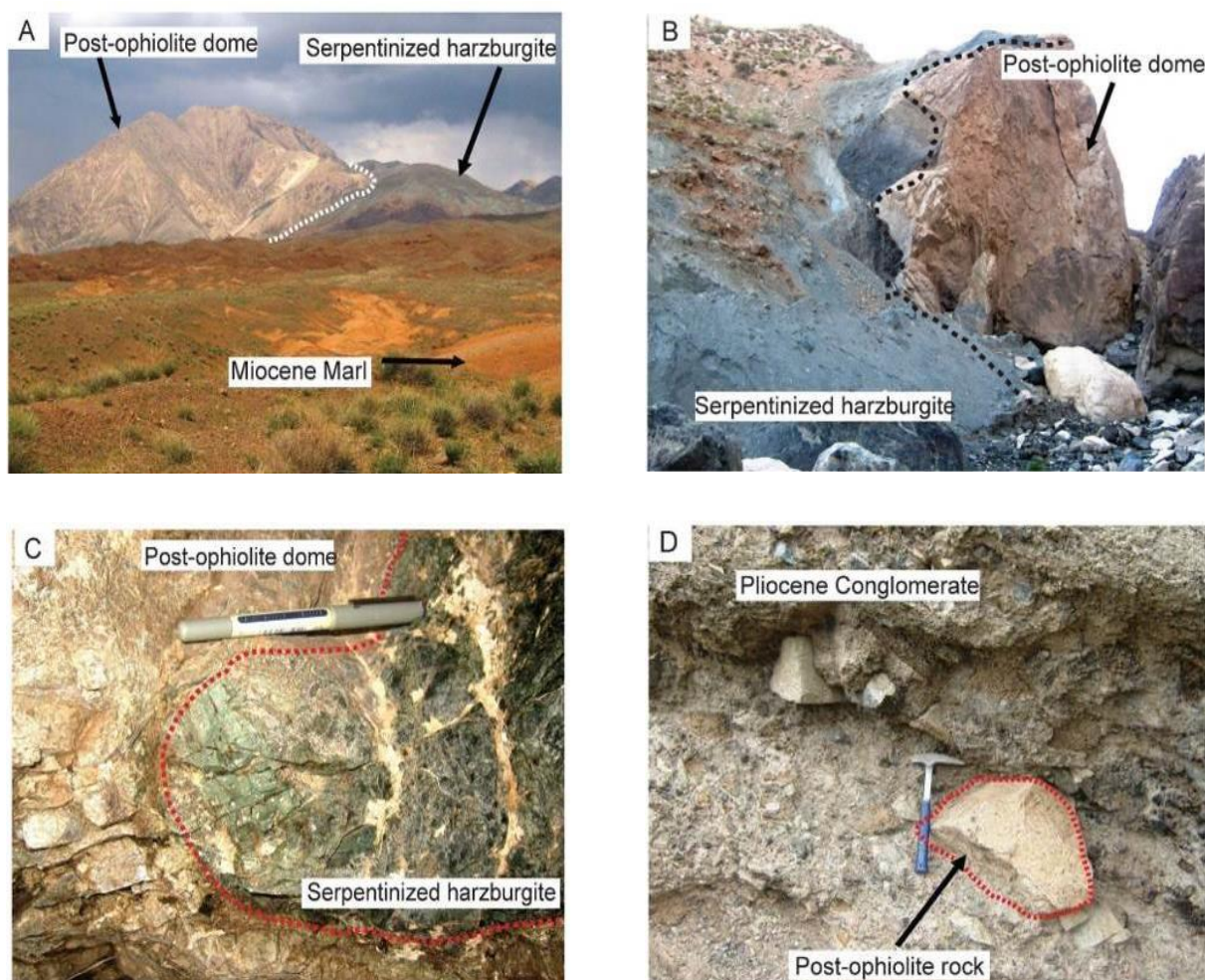
شرقی اقیانوس نئوتتیس قلمداد می شود که در اثر فرورانش پرشیب رو به شمال این اقیانوس به زیر البرز شرقی (بینالود) و بسته شدن آن در کرتاسه بالایی-پالئوسن تشکیل شده است (Shojaat et al., 2003; Ghasemi et al., 2010; Shafaei Moghadam et al., 2014). فرورانش این اقیانوس، علاوه بر تشکیل مجموعه افیولیتی سبزوار، سبب ظهور فعالیت های آتشفشانی طولانی مدت از ائوسن (تقریباً ۴۰ میلیون سال) تا پایان پلیوسن (تقریباً ۲/۳ میلیون سال) شده است (Spies et al., 1983; Lensch et al., 1977; Ghasemi et al., 2010; Shojaat et al., 2003; Shabanian et al., 2012). در پهنه سبزوار، سنگ های آتشفشانی در طول این پهنه و همچنین، در شمال و جنوب نوار افیولیتی مشاهده می شوند. رخنمون گسترده سنگ های آذرین حد واسط تا فلسیک به شکل گنبد، دایک و استوک در بخش های مختلفی از این پهنه افیولیتی گزارش شده است (Bahroudi and Spies et al., 1983; Omrani, 1999). رخنمون های این واحدهای سنگی که در این پژوهش تحت عنوان (سنگ های آداکیتی پسا فیولیتی جنوب سبزوار) از آنها یاد شده است، درون هارزبورژیت های سرپانتینیته شده بخش جنوبی مجموعه افیولیتی سبزوار مشاهده می شوند (شکل ۱ و ۲-A و B). این گنبدها (و گاهی دایک یا استوک) با رنگ سفید یا کرم، ارتفاعات بخش جنوبی و جنوب شرق پهنه افیولیتی سبزوار را به خود اختصاص داده اند. مشاهدات میدانی گویای حضور قطعاتی از بیگانه سنگ های هارزبورژیتی با ابعاد مختلف از چند سانتی متر تا چند دسی متر، درون این سنگ های آداکیتی پسا فیولیتی است (شکل ۲-C). در جنوب ارتفاعات یاد شده، به طور گسترده رسوبات فلیش دریایی و رسوبات قاره ای ترسیری دیده می شوند.

مغناطیسی و مایعات سنگین و در نهایت جدایش دستی، سن سنجی U-Pb روی زیرکن‌های جدا شده از نمونه‌ها نیز با روش SHRIMP II در آزمایشگاه SHRIMP آکادمی علوم زمین چین انجام شد. نسبت‌های ایزوتوپی U-Th-Pb بر اساس مقادیر این نسبت‌ها در زیرکن استاندارد (TEMORA) اندازه‌گیری شده است. در جدول ۲ نتایج نسبت‌های ایزوتوپی U-Pb مربوط به زیرکن‌های جدا شده از یک نمونه ریولیتی (S-8) آورده شده است. تصویر CL (Cathodoluminescence) تهیه شده از زیرکن‌های جدا شده نمونه بیان شده به همراه نقاط تجزیه و نتایج حاصل از سن سنجی U-Pb هر نقطه در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

ژئوفیزیک آکادمی علوم چین (IGGCAS) در پکن اندازه‌گیری شده است. در طول جمع‌آوری داده‌های ایزوتوپی، به منظور ارزیابی دقت و ثبات دستگاه، از نمونه استاندارد (NBS-987) با میانگین نسبت $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = 0.710250 \pm 0.000021$ و نمونه استاندارد (JNdi-1) با میانگین نسبت $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) = 0.512645 \pm 0.000014$ به ترتیب برای بهنجارسازی مقادیر نسبت‌های $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ و $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})$ استفاده شده است. پس از جدایش زیرکن‌ها از تعداد شش نمونه پودر سنگ تهیه شده از نمونه‌های اسیدی و حد واسط مورد مطالعه در آزمایشگاه جدایش کانی مؤسسه زمین‌شناسی و ژئوفیزیک آکادمی علوم چین با روش جدایش



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از رخنمون سنگ‌های آذرین پساایولیتی در جنوب پهنه ایولیتی سبزوار بر گرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ باشتین (Bahroudi and Omrani, 1999). موقعیت نمونه‌های برداشت شده برای تجزیه ایزوتوپی Sr-Nd و جداسازی زیرکن با دایره‌های زرد رنگ در نقشه مشخص شده است.



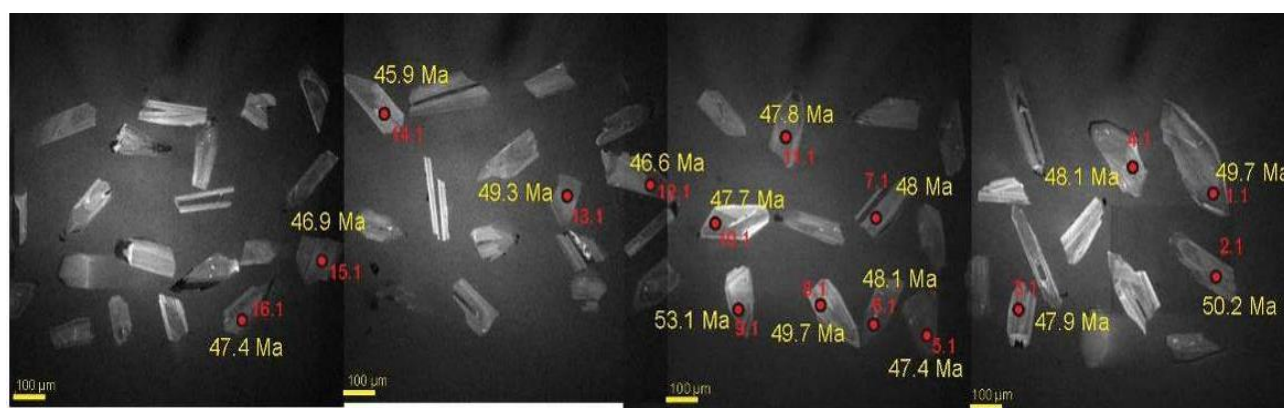
شکل ۲- A و B) تصاویر صحرایی از رخنمون گنبد‌های پسا‌فیولیتی فلسیک در هارزبورژیت‌های سرپانتینی شده متعلق به مجموعه افیولیتی سبزوار؛ C) حضور قطعات بیگانه سنگ با ترکیب هارزبورژیت در استوک آداکیتی پسا‌فیولیتی موجود در افیولیت سبزوار؛ D) حضور قطعاتی از سنگ‌های ریولیتی آداکیتی پسا‌فیولیتی در کنگلومرای پلیوسن منطقه سبزوار.

جدول ۱- نتایج تجزیه‌های ایزوتوپی Nd-Sr برای سه نمونه ریولیتی (Rhy) و دو نمونه داسیتی (Da) آداکیتی پسا‌فیولیتی سبزوار

Sample	Sm [ppm]	Nd [ppm]	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Nd(48Ma)	$\epsilon\text{Nd}(48\text{Ma})$	Error (2s)	Rb [ppm]	Sr [ppm]	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Error (2s)	TDM2 (Ma)
S-4(Rhy)	0.91	4.08	0.5129305	0.5128885	6.09	0.000008	74.04	511.43	0.70437	0.7040818	0.000012	358
S-5(Rhy)	1.02	4.81	0.5129028	0.5128628	5.59	0.000008	87.35	346.08	0.70429	0.7037899	0.000001	399
S-7(Rhy)	0.70	3.95	0.5129172	0.5128835	5.99	0.000009	53.18	768.13	0.70456	0.7044274	0.000014	367
S-8(Rhy)	1.84	9.64	0.5129467	0.5129106	6.52	0.000009	61.42	360.96	0.70414	0.7038024	0.000013	323
S-21(Da)	3.80	8.52	0.5129302	0.5128459	5.26	0.000008	23.15	668.57	0.70402	0.7039539	0.000011	429
S-11(Da)	2.07	8.72	0.5129442	0.5128991	6.07	0.000009	25.95	284.25	0.70452	0.7043410	0.000015	341

جدول ۲- نتایج نسبت‌های ایزوتوپی U-Pb و نتایج سنی زیرکن‌های جدا شده از یک نمونه ریولیتی آداکیتی پسافیولیتی سبزوار

Spot	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm(\%)$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$	$\pm(\%)$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm(\%)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma; ± 1)
S-8-1.1	1034	179	0.17	0.0480	4.3	0.0450	3.5	0.00776	2.5	49.7
S-8-2.1	867	165	0.19	0.0453	6.3	0.0420	5.7	0.00784	2.5	50.2
S-8-3.1	383	167	0.44	0.0430	13	0.0418	12	0.00757	2.7	48.0
S-8-4.1	795	138	0.17	0.0477	11	0.0462	11	0.00752	2.5	48.1
S-8-5.1	1134	189	0.17	0.0378	10	0.0371	9.9	0.00746	2.5	47.4
S-8-6.1	1137	189	0.17	0.0454	4.6	0.0440	3.9	0.00750	2.5	48.1
S-8-7.1	903	187	0.21	0.0395	13	0.0383	12	0.00755	2.5	48.0
S-8-8.1	527	208	0.39	0.0529	5.6	0.0496	5.0	0.00775	2.6	49.7
S-8-9.1	421	175	0.42	0.0734	13	0.0644	12	0.00801	3.2	53.1
S-8-10.1	737	335	0.45	0.0480	6.8	0.0469	6.3	0.00744	2.5	47.7
S-8-11.1	1007	198	0.20	0.0477	6.0	0.0465	5.4	0.00744	2.5	47.8
S-8-12.1	568	204	0.36	0.0470	5.6	0.0469	4.9	0.00728	2.6	46.6
S-8-13.1	935	153	0.16	0.0520	4.9	0.0491	4.2	0.00767	2.5	49.3
S-8-14.1	506	219	0.43	0.0401	12	0.0406	12	0.00726	2.6	46.0
S-8-15.1	818	141	0.17	0.0342	14	0.0340	14	0.00742	2.5	46.9
S-8-16.1	1175	182	0.16	0.0478	7.0	0.0470	6.5	0.00739	2.5	47.4



شکل ۳- تصاویر CL (cathodoluminescence) تهیه شده از نمونه زیرکن‌های جدا شده از یک نمونه سنگ ریولیتی (S-8) پسافیولیتی سبزوار به همراه نقاط تجزیه و نتایج سن‌سنجی هر نقطه.

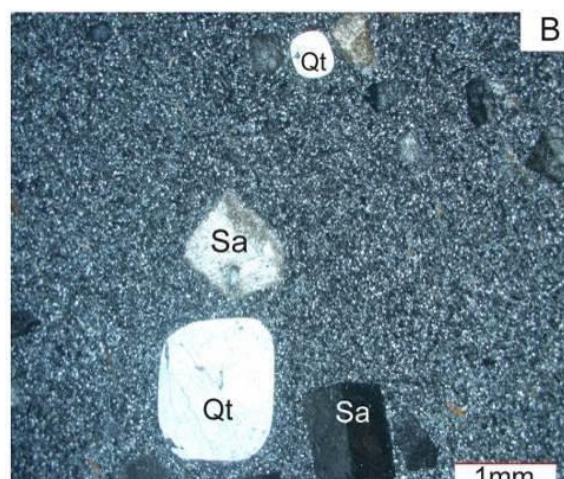
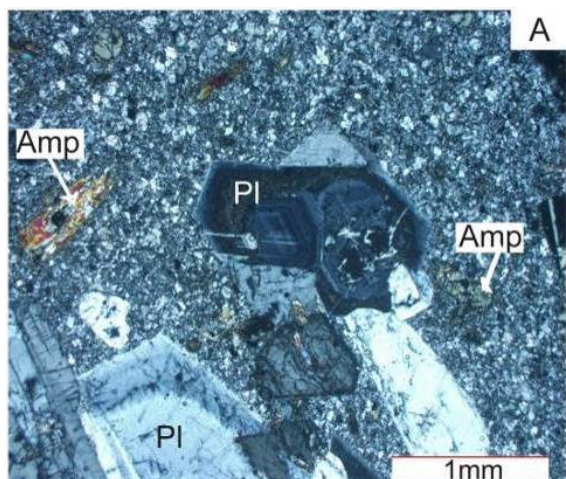
پتروگرافی

سنگ‌های نیمه عمیق آداکیتی فلسیک موجود در بخش جنوبی و جنوب‌غربی پهنه افیولیتی سبزوار، ترکیب داسیت تا ریولیت دارند. نمونه‌های داسیتی دارای بافت پورفیری حاوی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، بیوتیت و به مقدار کمتر آمفیبول در یک

زمینه ریزبلور از همین کانی‌ها به همراه مقادیر کمتری کوارتز و فلدسپار آکالن هستند (شکل ۴- A). ترکیبات ریولیتی نیز حاوی فنوکریست‌های کوارتز، سانیدین و پلاژیوکلاز در یک زمینه بسیار ریزبلور است (شکل ۴- B) اما تعدادی از این ترکیبات فاقد فنوکریست بوده و بافت ریزبلور دارند. اگرچه برخی از

شکل‌دار و غالباً دگرسان شده دیده می‌شوند. به طوری که فنوکریست‌های به شدت دگرسان شده آنها دارای ظاهری غبارآلود و کدر است.

فنوکریست‌های کوارتز دارای لبه‌های صاف هستند اما بسیاری از آنها، حاشیه‌های خلیج‌خوردگی دارند. سانیدین‌های سفید رنگ به صورت شکل‌دار تا نیمه



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی (XPL) از سنگ‌های گنبد‌های نیمه عمیق آداکیتی پسا‌فیولیتی موجود در افیولیت سبزوار. (A) بافت پورفیری و حضور درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز با منطقه‌بندی ترکیبی به همراه آمفیبول در یک نمونه داسیتی؛ (B) یک نمونه ریولیتی همراه با بافت پورفیری و حضور فنوکریست‌های کوارتز با حاشیه خلیج‌خوردگی و سانیدین.

بحث

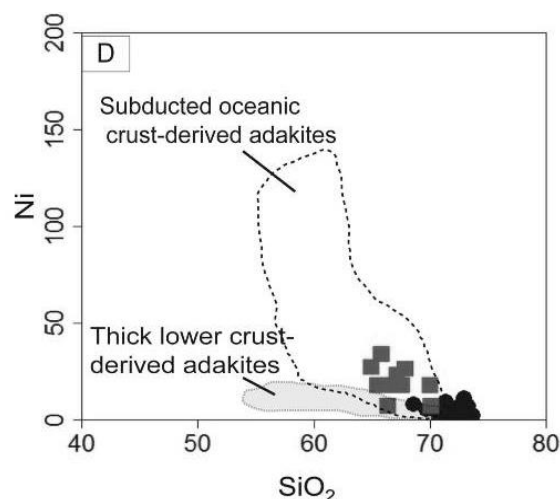
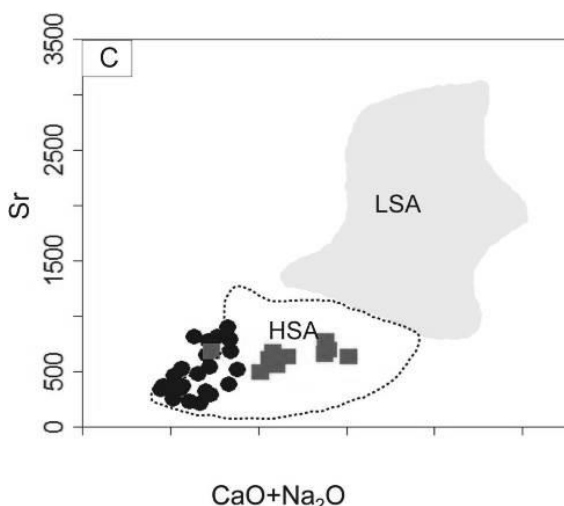
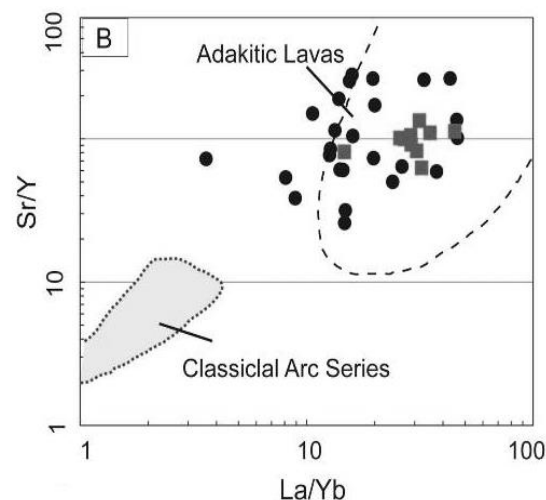
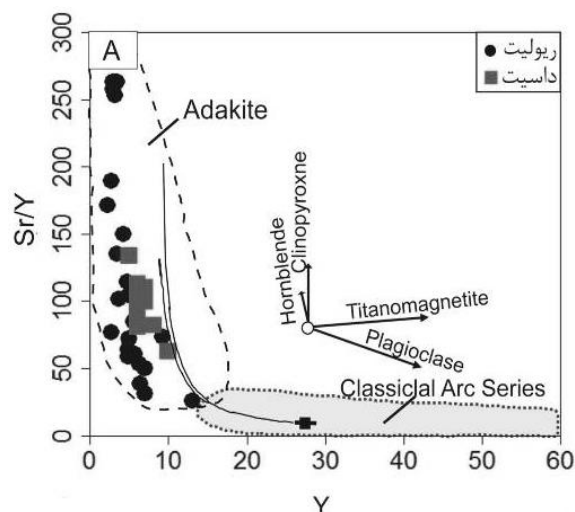
ژئوشیمی

معمول کمان و در میدان ترکیبی آداکیت واقع شده‌اند (شکل ۵-B). ماگماهای آداکیتی را بر اساس مقدار سیلیس آنها به دو نوع آداکیتی غنی از سیلیس (HAS) و آداکیتی با سیلیس پایین (LSA) تقسیم می‌کنند (Martin and Moyen, 2002). این دو گروه از نظر ویژگی‌های کانی‌شناختی، ژئوشیمیایی و پتروژنتیکی با هم متفاوت هستند. در یک نگاه کلی می‌توان گفت که گروه HSA در مقایسه با گروه LSA، حاوی مقادیر پایین‌تر MgO (0.5 تا 3 درصد وزنی)، $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ ($11 <$ درصد وزنی) و Sr ، مقادیر کمتر LREE و نسبت پایین‌تر Sr/Y در یک مقدار معین از Y هستند (Martin et al., 2005). سنگ‌های بررسی شده، ویژگی‌های آداکیت‌های پرسیلیس را نشان می‌دهند (شکل ۵-C). در نمودار تغییرات Ni به عنوان عنصر کمیاب سازگار در مقابل SiO_2 ، نمونه‌های داسیتی ویژگی آداکیت‌های مرتبط با فروران‌ش پوسته اقیانوسی را

همان طور که در بخش مقدمه اشاره شد، سنگ‌های پسا‌فیولیتی اسیدی و حد واسط پهنه سبزوار با ماهیت کالک‌آلکان، متا‌آلمین تا پرا‌آلمین، ویژگی ماگماهای آداکیتی را نشان می‌دهند (Jamshidi et al., 2014, 2015). با توجه به نمودار Sr/Y در مقابل Y (Defant and Drummond, 1990) که محدوده ترکیبات معمول کمان را از ترکیبات غیرمعمول کمان تفکیک می‌کند، نمونه‌های مطالعه شده در میدان آداکیت قرار گرفته‌اند (شکل ۵-A). با توجه به این نمودار، روند تغییرات سنگ‌های آداکیتی پسا‌فیولیتی حد واسط تا اسیدی با روند ناشی از تفریق بلوری آمفیبول مطابقت دارد. همچنین، بر اساس نمودار نسبت Sr/Y در مقابل نسبت La/Yb (Kamber et al., 2002) نمونه‌های فلسیک مطالعه شده، به دور از محدوده ترکیبات

ذوب پوسته اقیانوسی فرورونده و آداکیت‌های حاصل از ذوب پوسته تحتانی واقع شده‌اند (شکل ۵- D).

نشان می‌دهند. در صورتی که نمونه‌های اسیدی‌تر ریولیتی، در محدوده همپوشان آداکیت‌های حاصل از

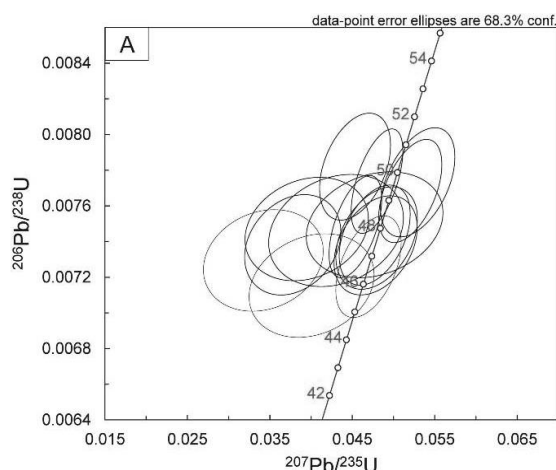


شکل ۵- A) موقعیت نمونه‌های فلسیک پسا‌فیولیتی موجود در پهنه افیولیتی سبزوار در نمودار Sr/Y در مقابل Y (Defant and Drummond, 1990) B) Sr/Y در مقابل La/Yb (Kamber et al., 2002) که در محدوده ترکیبات آداکیتی قرار گرفته‌اند؛ C) موقعیت قرارگیری این نمونه‌ها در نمودارهای تمایز انواع آداکیت‌ها (Martin et al, 2005) که در قلمرو HSA است؛ D) نمودار تغییرات Ni در برابر SiO_2 (Wang et al., 2005).

بیشتر از این نسبت در زیرکن‌های دگرگونی ($Th/U < 0.1$) است و با مقدار این نسبت در زیرکن‌های ماگمایی سازگاری دارد (Hoskin and Black, 2000). تجزیه‌های نقطه‌ای $U-Pb$ این زیرکن‌ها، بیانگر سن‌های بین ۴۶ تا ۵۰/۲ میلیون سال است. با توجه به منحنی سازگاری و نمودار

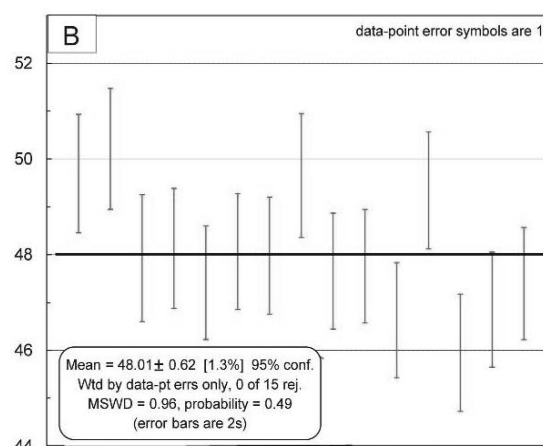
سن‌سنجی $U-Pb$ روی زیرکن‌های جدا شده: نتایج سن‌سنجی ایزوتوپی $U-Pb$ با روش SHERIMP II روی زیرکن‌های جدا شده در جدول ۲ آمده است. مقدار Th در زیرکن‌های تجزیه شده بین ۱۳۸ تا ۳۳۵ پی‌پی‌ام و نسبت Th/U بین ۰/۱۵ تا ۰/۴۷ متغیر است که بسیار

آداکیتی منطقه سلطان آباد در شرق منطقه مورد بررسی، سن انتهای پالئوسن (۵۸ Ma) را برای این واحدهای سنگی گزارش کرده اند. با این وجود، Spies و همکاران (۱۹۸۳) و Ghasemi و همکاران (۲۰۱۰) با سن سنجی با روش K-Ar روی نمونه های سنگ کل برخی از گنبد های آداکیتی جنوب قوچان (شمال منطقه مورد بررسی) سن جایگزینی دو میلیون سال را برای آنها به دست آورده اند. به اعتقاد Ghasemi و همکاران (۲۰۱۰) تداوم فرو رانش و حرکت جبهه آتشفشانی به سمت شمال در پلیوسن-پلیوستوسن، سبب تشکیل آخرین فراورده های ماگمایی جوان آداکیتی در جنوب قوچان، به دور از پهنه افیولیتی سبزوار شده است.



میانگین سن، سن $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ با 48.01 ± 0.62 (Ma) با MSWD برابر با ۰/۹۶ و با حد اطمینان ۹۵ درصد برای سنگ های یاد شده به دست آمده است (شکل ۶- A و B). شایان ذکر است که به دلیل ناسازگاری (Discordance) و قرار گرفتن خارج از ردیف نقطه (S-8-9.1)، داده سنی این نقطه از نمودارهای سازگاری و میانگین سنی حذف شده است.

سن به دست آمده برای سنگ های گفته شده با تعیین سن های انجام شده توسط Spies و همکاران (۱۹۸۳) با روش K-Ar سنگ کل (Ma) ۴۲ روی برخی از این سنگ ها همخوانی نزدیکی دارد. Rossetti و همکاران (۲۰۱۴) نیز با تعیین سن U-Pb زیرکن روی تعدادی از گنبد های



شکل ۶- A و B) نمودارهای تعیین سن سازگاری و میانگین سن بر اساس نتایج تجزیه های ایزوتوپی U-Pb روی زیرکن جدا شده از یک نمونه گنبد ریولیتی موجود در پهنه افیولیتی سبزوار.

پتروژنز

مذاب هایی با ویژگی های ژئوشیمیایی آداکیت ها است (Defant and Drummond, 1990; Rapp et al., 1993; Atherton and Petford, 1993; Guo et al., 1999; Wang et al., 2005, 2008). فروافتادن بخش هایی از مواد پوسته قاره ای زیرین به داخل گوشته و ذوب بخشی آن نیز ممکن است فرآیندی مؤثر در تولید مذاب های

سنگ های مطالعه شده دارای ویژگی های آداکیت های با سیلیس بالا هستند. مطالعات پژوهشگران مختلف نیز نشان می دهد که ذوب بخشی سنگ های متابازیک در رخساره اکلوزیت تا آمفیبولیت، هم در پوسته اقیانوسی فرو رانده شده و هم در پوسته قاره ای ضخیم شده، قادر به تولید

دارا بودن مقادیر پایین تر $Mg\#$ (۲۵ تا ۵۰)، غالباً در محدوده همپوشان با مذاب‌های تجربی حاصل از اکلوزیست و آمفیبولیست ($P=1/4-4\text{ Ga}$) و آداکیت‌های مشتق شده از پوسته قاره‌ای زیرین قرار می‌گیرند. از طرف دیگر، تمامی نمونه‌ها شامل: داسیت‌ها و ریولیت‌ها، حاوی مقادیر پایین عناصر ناسازگار U (۰/۶ تا ۲/۶ ppm)، Th (۰/۱ تا ۴/۸) و نسبت Th/U (۰/۱ تا ۳/۶) هستند که مشابه با ویژگی‌های آداکیت‌های حاصل از ذوب ورقه‌های اقیانوسی فرورانده شده سنوزوئیک است (Wang et al., 2008) و احتمال دخالت یک منشأ پوسته تحتانی را برای آنها منتفی می‌سازد. با توجه به نمودار تغییرات U در برابر Th/U ، نمونه‌های پساافیولیتی مطالعه شده، به دور از محدوده مذاب‌های پوسته قاره‌ای زیرین و در نزدیکی محدوده مذاب‌های مشتق شده از MORB قرار می‌گیرند (شکل ۸-۴). با توجه به نمودار Th مقابل Th/Ce نیز سنگ‌های پساافیولیتی مورد بررسی در میدان آداکیت‌های مشتق از ذوب ورقه فرورانده شده کمان سنوزوئیک قرار گرفته‌اند (شکل ۸-۵).

ج) با توجه به داده‌های ایزوتوپی Sr و Nd سنگ کل نمونه‌ها (جدول ۱) و بر اساس سن به دست آمده با روش $U-Pb$ (میانگین ۴۸ میلیون سال) از کانی‌های زیرکن جدا شده، نسبت‌های ایزوتوپی انخستین Sr و Nd نمونه‌ها محاسبه شده است. نتایج این محاسبات نیز با یک منشأ ذوب ورقه اقیانوسی مطابقت دارد. تمامی نمونه‌های مطالعه شده دارای ویژگی‌های ایزوتوپی $Nd-Sr$ بسیار مشابه هستند. مقادیر نسبت $^{143}Nd/^{144}Nd$ نخستین در محدوده ۰/۵۱۲۸۴۶ تا ۰/۵۱۲۹۱۱ قرار دارد و مقادیر نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ نخستین بین ۰/۷۰۳۸۲۱ تا ۰/۷۰۴۴۳۶ متغیر است. این سنگ‌های آذرین آداکیتی پساافیولیتی، دارای

آداکیتی باشد (Xu et al., 2002, 2006). چنین مذابی در اثر واکنش با پریدوتیت گوشته‌ای، حاوی مقادیر بالاتری از MgO ، Ni و مقادیر پایین تری از SiO_2 و Na_2O ، Al_2O_3 (میانگین ۰/۷۴ درصد وزنی) و Ni (میانگین ۹/۱ ppm) و مقادیر بالای SiO_2 (۶۵ تا ۷۳/۵ درصد وزنی)، Al_2O_3 (۱۵ تا ۲۱ درصد وزنی) و Na_2O (۳/۵ تا ۷ درصد وزنی) در ترکیبات آداکیتی مورد مطالعه، احتمال وجود چنین منشأیی را برای آنها منتفی می‌سازد (Jamshidi et al., 2014, 2015). اگرچه بالا بودن مقادیر K_2O ماهیت پرآلومین این سنگ‌ها در مقایسه با ترکیبات آداکیتی معمول، احتمال نقش داشتن یک منشأ پوسته قاره‌ای را در تشکیل ماگمای سازنده این سنگ‌ها محتمل می‌سازد (Wang et al., 2008) اما مجموع داده‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی به دست آمده از این پژوهش، با منشأ مذاب حاصل از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی فرورانده شده، سازگارتر است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

الف) سنگ‌های آذرین پساافیولیتی پهنه سبزوار از نوع آداکیت‌های پرسیلیس هستند (Jamshidi et al., 2014, 2015). به طور کلی، آداکیت‌های پرسیلیس به عنوان مذاب‌های حاصل از ذوب ورقه اقیانوسی فرورونده با ترکیب اکلوزیت یا گارنت آمفیبولیت در فشار معادل با محدوده پایداری گارنت تفسیر می‌شوند که در طول صعود از گوه گوشته‌ای با پریدوتیت آن واکنش داده‌اند (Martin et al., 2005).

ب) با توجه به نمودار SiO_2 در مقابل عدد منیزیوم ($Mg\#$) نمونه‌های داسیتی (۴۳ تا ۶۸ $Mg\#$) موجود در پهنه افیولیتی سبزوار، ویژگی آداکیت‌های مشتق شده از ذوب ورقه فرورونده را نشان می‌دهند (شکل ۷) اما ترکیبات ریولیتی با

ترکیبات آداکیتی و TTG، بیانگر ذوب بخشی یک محل منشأ با ترکیب آمفیبولیت یا اکلوژیت هورنبلنددار است. ضریب توزیع بالای آمفیبول برای عناصر HFS (مانند: Nb و Ta) به همراه انطباق منفی در نمودار تغییرات نسبت Nb/Ta در برابر Zr/Sm (شکل ۱۰) با حضور آمفیبول به عنوان فاز باقیمانده در طول ذوب بخشی پوسته اقیانوسی سازگاری دارد (Klemme *et al.*, 2002؛ Xiong *et al.*, 2005). منشأ آمفیبولیتی می‌تواند به وسیله روند مثبت Sr/Y و همبستگی منفی La/Yb در مقابل افزایش SiO₂ مورد تأیید قرار گیرد (Jamshidi *et al.*, 2015). مقادیر پایین La/Yb سنگ‌های آداکیتی پسا‌فیولیتی مورد بررسی در مقایسه با مقادیر این نسبت در آداکیت‌های معمول به همراه مقادیر بسیار پایین Yb را می‌توان با حضور گارنت و نیز فازهای حاوی LREE مانند اپیدوت در محل منبع توجیه کرد (Rossetti *et al.*, 2014).

سنگ‌های آداکیتی پسا‌فیولیتی ریولیتی پهنه سبزوار به طور قابل ملاحظه‌ای ماهیت پرآلومین نشان می‌دهند و حاوی مقادیر بالاتر K در مقایسه با آداکیت‌های معمول کمان‌ها هستند (Jamshidi *et al.*, 2015). ماهیت پرآلومینی مذاب مشتق شده از یک منشأ متبازیتی قابل تأمل است. این ویژگی به همراه بالا بودن مقادیر K در سنگ‌های ریولیتی را می‌توان با تأثیر رسوبات فرورونده شده و مشارکت آنها در ذوب توجیه نمود (Lázaro *et al.*, 2011). در محیط‌های کم‌انی امروزی که مقادیر در خور توجهی رسوب به همراه پوسته اقیانوسی، فرورانده می‌شود، نسبت Th/Yb در مذاب از دو بیشتر است. اما در محیط‌های کم‌انی بدون مشارکت رسوبات این نسبت در مذاب حاصله به کمتر از یک می‌رسد (Woodhead *et al.*, 2001؛ Nebel *et al.*, 2007). مقادیر نسبت Th/Yb در سنگ‌های آداکیتی جنوب

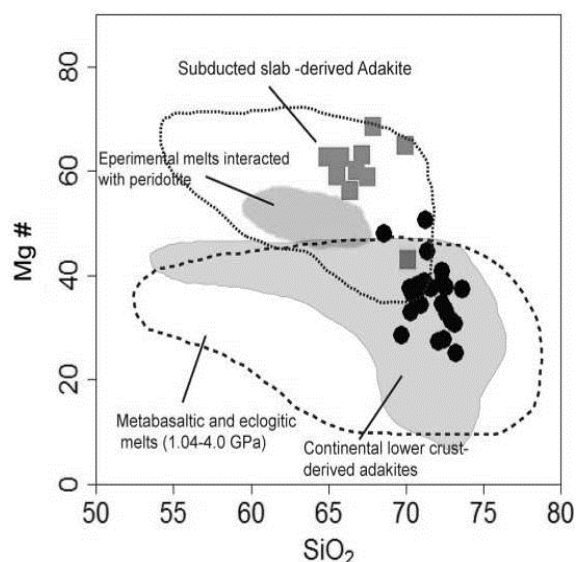
مقادیر εNd (۴۸ Ma) بالا و مثبت (+۵/۳۰) تا (+۶/۱۸) هستند و در نمودار تغییرات I_{sr} در مقابل εNd، در محدوده آداکیت‌های مشتق شده از پوسته اقیانوسی فرورانده شده سنوزوئیک قرار می‌گیرند (شکل ۹-A). همچنین، با توجه به نمودار ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr در برابر Rb (Defant *et al.*, 1991) نیز نمونه‌های مورد نظر در میدان آداکیت‌های مشتق شده از پوسته اقیانوسی فرورانده سنوزوئیک قرار می‌گیرند (شکل ۹-B).

ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های آذرین آداکیتی پسا‌فیولیتی پهنه سبزوار با ترکیبات آداکیتی جدید پرسیلیس معرفی شده توسط Martin و همکاران (۲۰۰۵) و همچنین آداکیت‌های حاصل از ذوب ورقه اقیانوسی مطابقت دارد. تهی‌شدگی از HREE به همراه مقادیر بالای Sr/Y و (Gd/Yb)_N > ۱ در سنگ‌های مطالعه شده، شاخص حضور گارنت به عنوان فاز باقیمانده در محل منشأ در طول ذوب بخشی و شرایط فشار بالای ذوب است (Rapp *et al.*, 2003). تهی‌شدگی از عناصر Nb و Ti نیز بر حضور فازهای باقی‌مانده روتیل یا آمفیبول تیتان‌دار در محل منشأ حکایت دارد (Xiong *et al.*, 2005). از طرف دیگر، بالا بودن مقادیر Sr و Sr/Y نشان می‌دهد که پلاژیوکلاز نمی‌تواند به عنوان یک فاز باقیمانده معمول در محل منشأ به شمار آید. تمامی این شواهد بازگو کننده تشکیل ماگمای سازنده سنگ‌های آداکیتی پسا‌فیولیتی مورد بررسی از ذوب بخشی یک منبع گارنت‌آمفیبولیتی یا اکلوژیتی ناشی از دگرگونی ورقه اقیانوسی فرورونده سبزوار است.

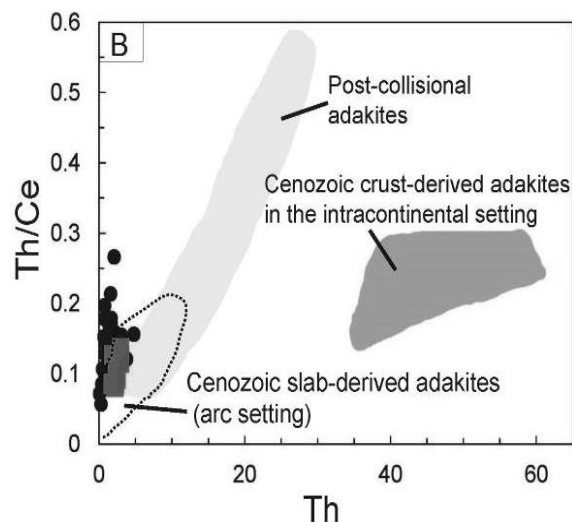
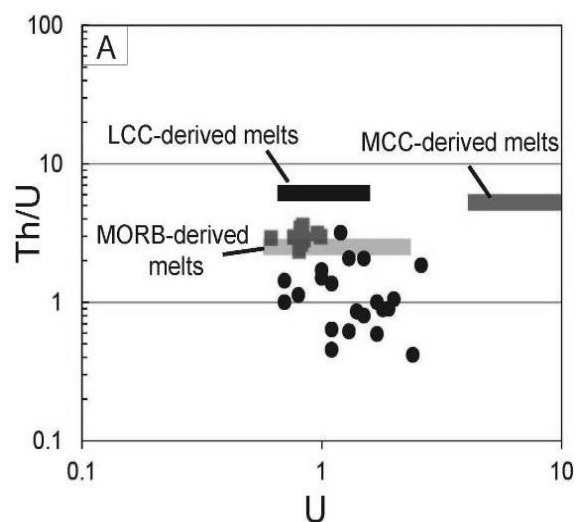
برای تأیید این مطلب از نمودار تغییرات Nb/Ta در برابر Zr/Sm (Condie, 2005) نیز استفاده شده است (شکل ۱۰). موقعیت قرارگیری نمونه‌های آداکیتی پسا‌فیولیتی مطالعه شده در محدوده

نمودار تغییرات Th/Yb در برابر Th/Sm که از یک روند خطی برخوردار است (شکل ۱۱) بیانگر ذوب ورقه فرورنده به همراه مشارکت رسوبات در تشکیل ماگمای سازنده سنگ‌ها است (Zhu et al., 2009).

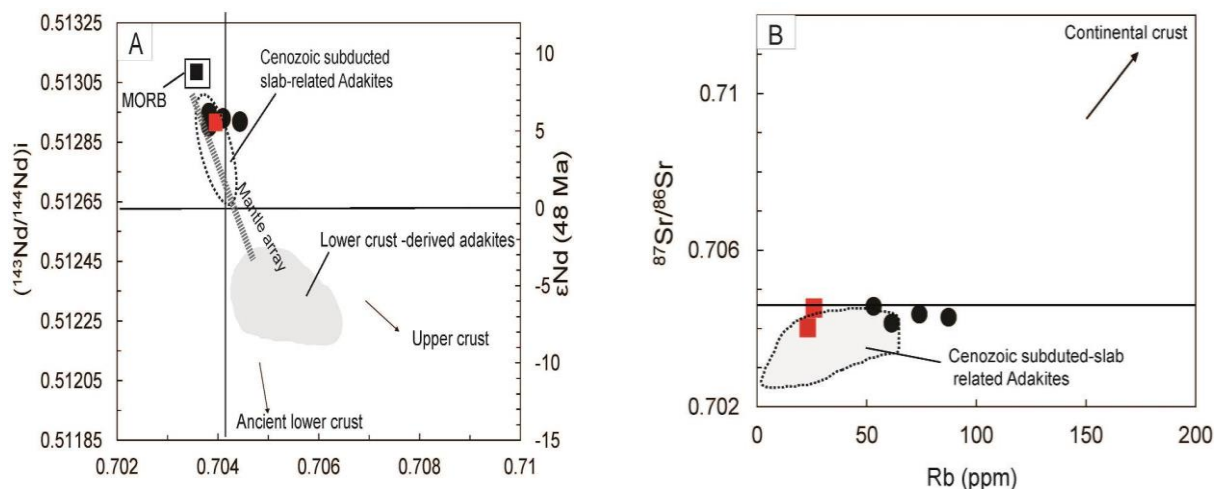
سبزواری بین ۱/۵ تا ۵/۸ متغیر است و می‌تواند مشارکت رسوبات روی ورقه فرورنده را در تشکیل مذاب سازنده سنگ‌های یاد شده پیشنهاد کند. موقعیت قرارگیری نمونه‌های سنگی بیان شده در



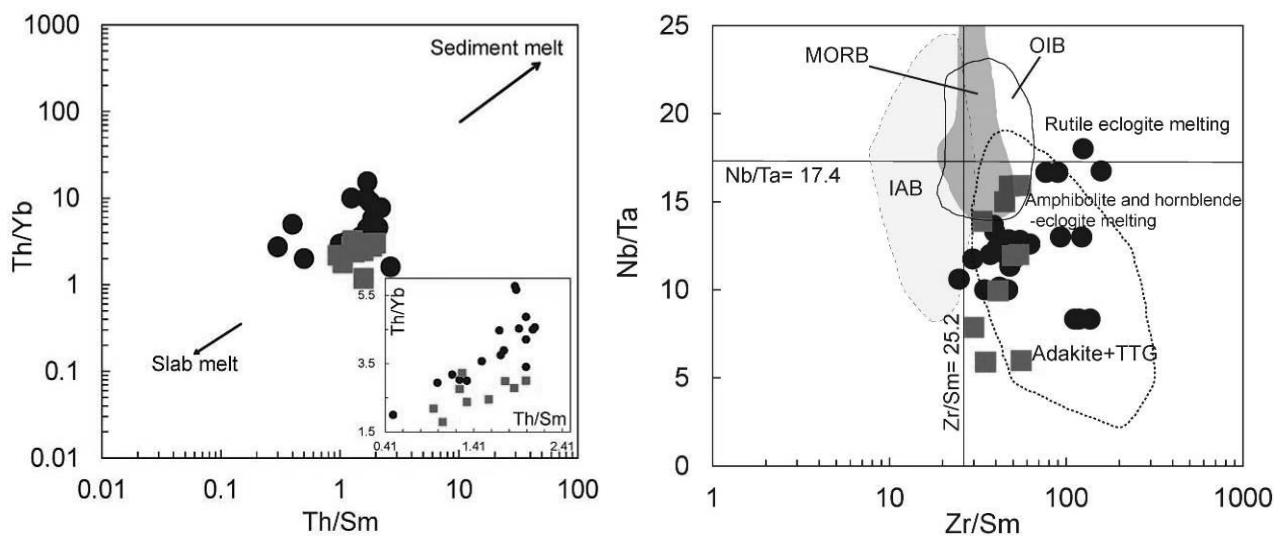
شکل ۷- نمودار تغییرات SiO_2 در مقابل $Mg\#$ برای سنگ‌های داسیتی و ریولیتی پسالفیولیتی موجود در پهنه سبزواری. محدوده‌های مشخص شده روی نمودار از Wang و همکاران (۲۰۰۵) هستند.



شکل ۸- (A) نمودار تغییرات U در مقابل Th/U برای نمونه‌های داسیتی و ریولیتی آداکیتی پسالفیولیتی موجود در پهنه سبزواری. محدوده LCC (پوسته قاره‌ای زیرین) و MCC (پوسته قاره‌ای میانی) از Rudnick و Gao (۲۰۰۳) و محدوده MORB از Sun و همکاران (۲۰۰۸) گرفته شده است و (B) نمودار تغییرات Th در مقابل Th/Ce که میدان‌های مشخص شده روی نمودار از Wang و همکاران (۲۰۰۸) است.

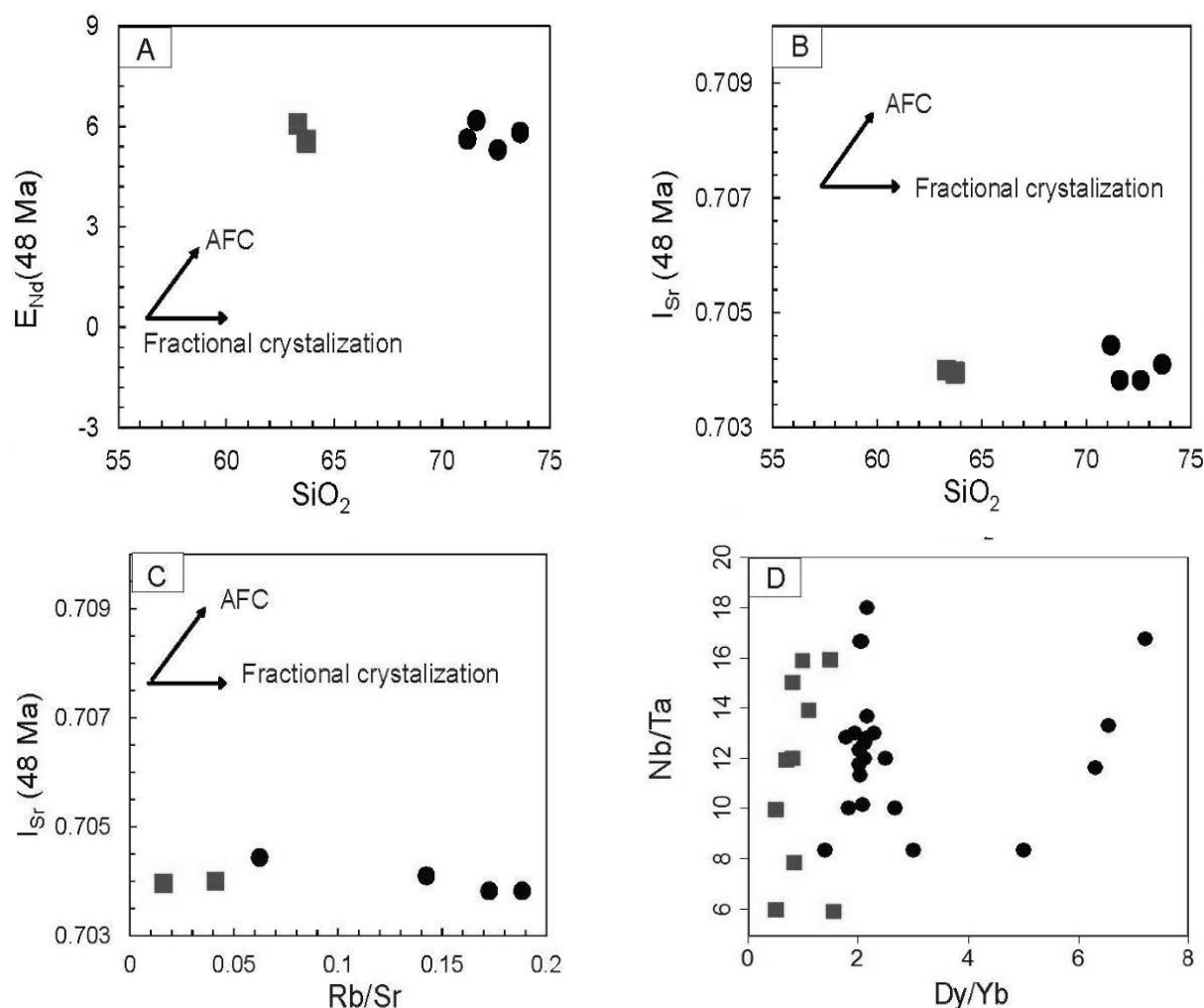


شکل ۹- A) نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نخستین در برابر نسبت $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ نخستین به همراه مقادیر ϵNd (48 Ma) برای سنگ‌های آداکیتی پسا‌فیولیته پهنه افیولیته سبزوار. میدان آداکیت‌های مرتبط با فرورانش سنوزوئیک از Kepezhinskas و Defant (۲۰۰۱) و میدان آداکیت‌های مرتبط با ذوب پوسته قاره‌ای زیرین از Liu و همکاران (۲۰۰۹) است؛ B) نمودار تغییرات Rb برابر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Defant et al., 1991) و موقعیت قرارگیری نمونه‌های آداکیتی پسا‌فیولیته پهنه افیولیته سبزوار روی آن.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات Th/Yb در برابر Th/Sm برای سنگ‌های آداکیتی پسا‌فیولیته پهنه سبزوار. نمونه‌ها در بین مذاب‌های حاصل از ذوب ورقه فرورونده و رسوبات قرار گرفته‌اند. (موقعیت Slab melt) به وسیله Sun و McDonough (۱۹۸۹) معرفی شده است.

شکل ۱۰- نمودار تغییرات نسبت‌های Nb/Ta در برابر Zr/Sm (Condie, 2005) برای سنگ‌های پسا‌فیولیته موجود در پهنه افیولیته سبزوار.



شکل ۱۲- A و B) نمودارهای تغییرات $\epsilon_{Nd}(t)$ و $I_{Sr}(t)$ در مقابل SiO_2 (C) نمودار تغییرات $I_{Sr}(t)$ در مقابل Rb/Sr و D) نمودار تغییرات نسبت Nb/Ta در برابر Dy/Yb برای نشان دادن نقش تبلور تفریقی در تحول ماگمای سازنده سنگ‌های آذرین پسافیولیتی پهنه سبزوار.

نتیجه‌گیری

بخشی فشار بالای یک منبع گارنت آمفیبولیتی یا اکلوژیته ناشی از دگرگونی ورقه اقیانوسی فرورانده شده نئوتتیس سبزوار در ائوسن آغازین است. تبلور تفریقی آمفیبول از این ماگمای حد واسط اولیه، نقش اساسی در ایجاد ترکیبات تحول یافته تر ریولیتی با ویژگی‌های آداکیتی برجسته‌تر داشته است.

سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از یافته‌های حاصل از اجرای طرح پژوهشی به شماره ۹۱۰۰۵۴۸ صندوق

سن سنجی U-Pb با روش SHRIMP II روی زیرکن‌های جدا شده از سنگ‌های آداکیتی سیلیس بالای پسافیولیتی پهنه سبزوار بیانگر جایگزینی ماگمای سازنده این سنگ‌ها در پهنه افیولیتی در حدود ۴۸ میلیون سال پیش (ائوسن پیشین) است. مجموعه ویژگی‌های ژئوشیمیایی این سنگ‌های پساافیولیتی به همراه مقادیر مثبت $\epsilon_{Nd}(t)$ (+۵/۳۰ تا +۶/۱۸) و نسبت نخستین $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (۰/۷۰۳۸۲۱ تا ۰/۷۰۴۴۳۶) آنها، بیانگر تشکیل ماگمای سازنده این سنگ‌ها از ذوب

حمایت از پژوهشگران، معاونت محترم علمی و فناوری ریاست جمهوری و پایان‌نامه دکتری خدیجه جمشیدی است. نگارندگان بر خود لازم می‌دانند که از همکاری ارزشمند مسؤولین محترم آن صندوق و حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه شاهرود برای تأمین هزینه‌های اجرای پژوهش تقدیر نمایند.

منابع

- Atherton, M. P. and Petford, N. (1993) Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature* 362: 144-146.
- Bahroudi, A. and Omrani, J. (1999) Explanatory text of Bashtin, Geological Quadrangle Map 1:100000, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran.
- Condie, K. C. (2005) TTGs and adakites: are they both slab melts?. *Lithos* 80: 33-44.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347: 662-665.
- Defant, M. J., Richerson, M., De Boer, J. Z., Strwart, R. H., Maury, R. C., Bellon, H., Drummond, M. S. and Jackson, T. E. (1991) Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama. *Journal of Petrology* 32: 1101-1142.
- Defant, M. J. and Kepezhinskas, P. (2001) Evidence suggests slab melting in arc magmas. *Eos Transactions, American Geophysical Union* 82: 65-69.
- Drummond, M. S. and Defant, M. J. (1990) A model for trondhjemite tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research* 95: 21503-21521.
- Ghasemi, H., Sadeghian, M., Khanalizadeh, A. and Tanha, A. (2010) Petrography, geochemistry and radiometric ages of high-silica adakitic domes of Neogene continental arc, south of Quchan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 3: 347-370.
- Ghasemi, H., Barahmand, M. and Sadeghian, M. (2011) The Oligocene basaltic lavas of east and southeast of Shahrud: implication for back-arc basin setting of Central Iran Oligo-Miocene basin. *Journal of Petrology* 2: 77-94 (in Persian).
- Guo, Z. F., Wilson, M. and Liu, J. Q. (2007) Post-collisional adakites in south Tibet: products of partial melting of subduction-modified lower crust. *Lithos* 96: 205-224.
- Hoskin, P. W. O. and Black, L. P. (2000) Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology* 18: 423-439.
- Jamshidi, K., Ghasemi, H. and Sadeghian, M. (2014) Petrology and geochemistry of the Sabzevar post-ophiolitic high silica adakitic rocks. *Journal of Petrology* 17: 51-68 (in Persian).
- Jamshidi, K., Ghasemi, H., Troll, V. R., Sadeghian, M. and Dahren, B. (2015) Magma storage and plumbing of adakite-type post-ophiolite intrusions in the Sabzevar ophiolitic zone, NE Iran. *Solid Earth* 6: 49-72.
- Kay, R. W. (1978) Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 4: 117-132.
- Kamber, B. S., Ewart, A., Collerson, K. D., Bruce, M. C. and McDonald, G. M. (2002) Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144: 38-56.
- Klemme, S., Blundy, J. D. and Wood, B. J. (2002) Experimental constraints on major and trace element partitioning during partial melting of eclogite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66: 3109-3123.

- Lázaro, C., Blanco-Quintero, I. F., Marchesi, C., Bosch, D., Rojas-Agramonte, Y. and García-Casco, A. (2011) The imprint of subduction fluids on subducted MORB derived melts (Sierra del Convento mélange, Cuba). *Lithos* 126: 341-354.
- Lensch, G., Mihn, A. and Alavi-Tehrani, N. (1997) Petrography and geology of the ophiolite belt north of Sabzevar/Khorasan (Iran). *Neues Jahrb* 131: 156-178.
- Li, C. Feng, Li, X. Hua, Li, Q.L., G. J. H., Li, X. H. and Yang, Y. H. (2012) Rapid and precise determination of Sr and Nd isotopic ratios in geological samples from the same filament loading by thermal ionization mass spectrometry employing a single-step separation scheme. *Analytica Chimica Acta* 727: 54-60.
- Liu, S., Hu, R. Z., Gao, S., Feng, C. X., Yu, B. B., Qi, Y. Q., Wang, T., Feng, G. Y. and Coulson, I. M. (2009) Zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of adakitic volcanic rocks from Jiaodong, Shandong province, eastern China: constraints on petrogenesis and implications. *Journal of Asian Earth Sciences* 35: 445-458.
- Martin, H. and Moyen, J. F. (2002) Secular changes in TTG composition as markers of the progressive cooling of the earth. *Geology* 30 (4): 319-322.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F. and Champion, D. (2005) An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79: 1-24.
- Nebel, O., Münker, C., Nebel-Jacobsen, Y. J., Kleine, T., Mezger, K. and Mortimer, N. (2007) Hf-Nd-Pb isotope evidence from Permian arc rocks for the long-term presence of the Indian-Pacific mantle boundary in the SW Pacific. *Earth and Planetary Science Letters* 254: 377-392.
- Prouteau, G. and Scaillet, B. (2003) Experimental constraints on the origin of the 1991 Pinatubo dacite. *Journal of Petrology* 44: 2203-2241.
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D. and Applegate, G. S. (1999) Reaction between slab derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology* 160: 335-356.
- Rapp, R. P., Shimizu, N. and Norman, M. D. (2003) Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature* 425: 605-609.
- Rossetti, F., Nasrabad, M., Theye, T., Gerdes, A., Monié, P., Lucci, F. and Vignaroli, G. (2014) Adakite differentiation and emplacement in a subduction channel: the late Paleocene Sabzevar magmatism (NE Iran). *Geological Society of America Bulletin* 126: 317-343.
- Rudnick, R. L. and Gao, S. (2003) Composition of the continental crust. In: *Treatise on geochemistry* (Eds. Holland, H.D., Turekian, K.K.) 3: 1-64. Elsevier, Amsterdam.
- Salehinejad, H. (2008) Petrological and geochemical investigation of subvolcanic domes of Bashtin area (SW of Sabzevar). MSc thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Shabanian, E., Acocella, V., Gioncada, A., Ghasemi, H. and Bellier, O. (2012) Structural control on volcanism in intraplate post collisional settings: late Cenozoic to Quaternary examples of Iran and eastern Turkey. *Tectonics* 31: 3013-3042.
- Shafaei Moghadam, H., Corfu, F., Chiaradia, M., Stern, R. and Ghorbani, G. (2014) Sabzevar Ophiolite, NE Iran: progress from embryonic oceanic lithosphere into magmatic arc constrained by new isotopic and geochemical data. *Lithos* 210-211: 224-241.
- Shojaat, B., Hassanipak, A. A., Mobasher, K. and Ghazi, A. M. (2003) Petrology, geochemistry and tectonics of the Sabzevar ophiolite, north Center Iran. *Journal of Asian Earth Science* 21: 1053-1067.
- Spies, O., Lensch, G. and Mihem, A. (1983) Geochemistry of the post-ophiolitic Tertiary volcanics

- between Sabzevar and Quchan (NE Iran). Geological Survey of Iran, Report 51: 247-266.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic of basalts: implication for mantle composition and processes. In: *Magmatism in oceanic basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) 42: 313-345. Geological Society, London.
- Sun, W. D., Hu, Y. H., Kamenetsky, V. S., Eggins, S. M., Chen, M. and Arculus, R. J. (2008) Constancy of Nb/U in the mantle revisited. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 3542-3549.
- Wang, Q., McDermott, F., Xu, J. F., Bellon, H. and Zhu, Y. T. (2005) Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: lower-crustal melting in an intracontinental setting. *Geology* 33: 465-468.
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., Wan, Y. S., Li, C. F., Zi, F., Jiang, Z. Q., Qiu, H. N., Chu, Z. Y., Zhao, Z. H. and Dong, Y. H. (2008) Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 155: 473-490.
- Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Davidson, J. P. and Eggins, S. M. (2001) Hafnium isotope evidence for conservative element mobility during subduction zone processes. *Earth and Planetary Science Letters* 192: 331-346.
- Xiong, X. L., Adam, J. and Green, T. H. (2005) Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis. *Chemical Geology* 218: 339-359.
- Xu, J. F., Shinjio, R., Defant, M. J., Wang, Q. and Rapp, R. P. (2002) Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology* 12: 1111-1114.
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Wang, D. Y., Guo, J. H. and Pei, F. P. (2006) Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *Journal of Asian Earth Sciences* 27: 454-464.
- Yang, Y. Heng, Zhang, H. F., Chu, Z. Y., Xie, L. W. and Wu, F. Y. (2010) Combined chemical separation of Lu, Hf, Rb, Sr, Sm and Nd from a single rock digest and precise and accurate isotope determinations of Lu-Hf, Rb-Sr and Sm-Nd isotope systems using multi-collector ICP-MS and TIMS. *International Journal of Mass Spectrometry* 290: 120-126.
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Pan, G., Lee, H. Y., Kang, Z. Q., Liao, Z. L., Wang, L. Q., Li, G. M., Dong, G. C. and Liu, B. (2009) Early cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdese belt, southern Tibet: products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? *Journal of Asian Earth Sciences* 34: 298-309.

U-Pb age dating and determination of source region composition of post-ophiolite adakitic domes of Sabzevar

Khadije Jamshidi ¹, Habibollah Ghasemi ^{1*} and Laicheng Miao ²

¹ Department of Petrology, School of Geosciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Abstract

The post-ophiolite igneous rocks with dacite/rhyolite composition outcropped in the ophiolitic complex of Sabzevar zone. The calc-alkaline and high silica adakitic nature of these rocks has been proved previously. The rocks display initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and $\epsilon\text{Nd}(t)$ values of 0.70444 to 0.70382 and +5.30 to +6.18 respectively, as same as these values in MORB compositions. These isotopic signatures are corresponding to adakitic compositions derived from melting of the Cenozoic oceanic subducted slabs. The emplacement age of these rocks into the Sabzevar ophiolitic zone obtained about 48 Ma by SHRIMP II U–Pb method on separated zircons. The results show that parental magma of the Sabzevar adakitic rocks generated by partial melting of a garnet-amphibolite or eclogite source derived from metamorphism of Sabzevar subducted oceanic lithosphere in early Eocene time. Magma differentiation via amphibole fractionation was the main factor in the manifestation of more adakitic signatures in more-evolved rocks (rhyolites).

Key words: Isotopic age dating, Rhyolitic/dacitic domes, Adakite, Sabzevar, Central Iran

* h-ghasemi@shahroodut.ac.ir