

Petrogenesis of low Silica Adakitic domes of Sahl (South of Shahrood, southeast of Semnan Province)

**Fazilat Yousefi *, Mahmoud Sadeghian, Seyedeh Zahra Sadati Jamali,
Batoul Mansouri Moghaddam and Habibollah Ghasemi**

Department of Petrology and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of
Technology, Shahrood, Semnan, Iran

Abstract

Sahl area, in the south of Shahrood, is a part of the northern portion of the Central Iran Structural Zone. The area is dominated by a thick sequence of the Paleocene to the middle Eocene volcanic and volcano-sedimentary rocks. Hypabyssal igneous rocks as dome, dike and sill with trachybasaltic andesite and trachyandesite composition intruded the sequence. Various enclaves with amphibolitic, gneissic, hornblenditic, pyroxenitic, tonalitic, gabbroic, tuffaceous sandstone and siltstone nature with different sizes and shapes are present in the rocks studied which can be taken as an evidence of contamination and magma mixing processes. With respect to geochemical characteristics, the studied rocks are belonging to low silica adakites, with calc-alkaline to high potassium calc-alkaline affinity, enriched in LREE and LILE and depleted in HREE and HSFE. Overall, the mentioned adakites resulted from crystallization of melts originated from partial melting of metasomatized or modified mantle wedge, above the subduction zone of the Neotethys oceanic slab (Sabzevar - Daruneh branch).

Keywords: Trachyandesite, Enclave, Metasomatized mantle wedge, Adakite, Sahl, Shahrood

* f.yousefi@shahroodut.ac.ir

پتروژنز گنبد‌های آداکیتی کم‌سیلیس سهل (جنوب شاهرود، جنوب‌خاوری استان سمنان)

فضیلت یوسفی*، محمود صادقیان، سیده زهرا ساداتی جمالی، بتول منصوری‌مقدم و حبیب‌اله قاسمی
گروه پتروولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

منطقه سهل در جنوب شاهرود، بخشی از شمال پهنه ساختاری ایران مرکزی است که در آن توالی ستبری از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی، به سن پالئوسن تا ائوسن میانی، رخنمون دارند. در درون این توالی، سنگ‌های آذرین نیمه‌ژرف، به شکل گنبد، دایک و سیل با ترکیب بیشتر تراکی‌اندزی‌بازالتی و تراکی‌اندزیتی، نفوذ کرده و جای گرفته‌اند. در این سنگ‌های آذرین، انکلاوهای گوناگونی با سرشت آمفیبولیتی، گنیسی، هورنبلندی، پیروکسنیتی، تونالیتی، گابرویی، توفی سیلتستونی و توفی ماسه‌سنگی با اندازه و شکل‌های گوناگون یافت می‌شود که نشان‌دهنده آرایش و آمیزش ماگمایی هستند. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، این سنگ‌ها از آداکیت‌های کم‌سیلیس به‌شمار می‌روند و دارای سرشت کالک‌آلکان تا کالک‌آلکان پتاسیم بالا هستند. همچنین، دارای غنی‌شدگی از LILE و LREE و تهی‌شدگی از HSE و HREE هستند. با توجه به همه ویژگی‌های زمین‌شناسی، این آداکیت‌ها از تبلور مذاب برآمده از ذوب‌بخشی گوه‌گوشته‌ای متاسوماتیسم شده در بالای پهنه فرورانش لیتوسفر اقیانوسی (شاخه سبزوار - درونه) پدید آمده‌اند. واژه‌های کلیدی: تراکی‌اندزیت، انکلاو، گوه‌گوشته‌ای متاسوماتیسم شده، آداکیت، سهل، شاهرود

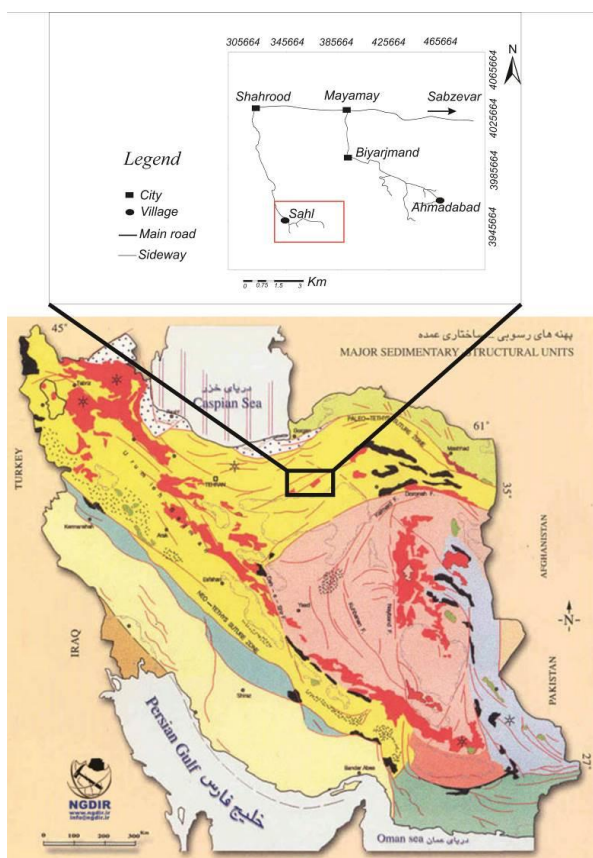
مقدمه

پهنه‌های خشکی و آبی، و همچنین، نفوذ و جایگزینی توده‌های نفوذی با گستره ترکیبی گوناگون، نمودار شده‌اند (Emami, 2001). سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی پالئوسن تا ائوسن میانی به‌گونه گسترده‌ای در ایران رخنمون دارند (به‌ویژه در پهنه‌های ساختاری ارومیه-دختر و شمال ایران مرکزی). در بخش‌های شمالی ایران مرکزی که منطقه سهل بخشی از

رویدادهای ماگمایی سنوزوییک ایران از اواخر پالئوسن آغاز شده و تا کواترنر ادامه پیدا کرده است و آثار آنها را می‌توان در پهنه‌های ساختاری ارومیه-دختر، ایران مرکزی، البرز، آذربایجان، فلیش خاور ایران و لوت دید. این رویدادهای ماگمایی در دوره‌های زمانی گوناگون به‌صورت خروج گدازه، فوران گدازه در

* f.yousefi@shahroodut.ac.ir

۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش رژه و در محدوده $38^{\circ}55'$ تا $35^{\circ}58'$ طول‌های جغرافیایی خاوری و $35^{\circ}61'$ تا $35^{\circ}61'$ عرض‌های جغرافیایی شمالی جای دارد (شکل ۱). این منطقه بخشی از شمال خردقاره ایران مرکزی به‌شمار می‌رود.



شکل ۱- جایگاه جغرافیایی منطقه سهل (جنوب شاهرود، جنوب‌خاوری استان سمنان) بر روی نقشه پهنه‌های زمین‌ساختاری ایران و راه‌های دسترسی به آن (نقشه زمین‌شناسی برگرفته از Aghanabati (۲۰۰۴) است).

در دوران مزوزویک و سنوزویک، ایران مرکزی از نظر زمین‌ساختی منطقه پرتکاپویی بوده است؛ به‌گونه‌ای که افزون‌بر چندین دگرریختی بسیار آشکار، رویدادهای ماگمایی، به‌صورت پیدایش سنگ‌های آتشفشانی، آتشفشانی رسوبی و توده‌های آذرین نیمه‌ژرف، در آن دیده می‌شود (Rahmati Ilkhchi et al., 2006). این رویدادهای

آن است نوار گسترده‌ای شامل سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی رخنمون دارند. توده‌های آذرین نیمه‌ژرف و دایک‌های فراوانی به درون توالی آتشفشانی- رسوبی پالئوسن تا ائوسن میانی منطقه سهل (نزدیک به ۱۲۰ کیلومتری جنوب شاهرود) نفوذ کرده‌اند. این پژوهش به بررسی سنگ‌شناسی، زمین‌شیمیایی، خاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی آنها پرداخته است. گفتنی است، از آنجایی که منطقه سهل از مراکز جمعیتی بزرگ دور بوده و راه‌های دسترسی مناسب ندارد، تاکنون بررسی‌های سنگ‌شناسی جامعی درباره توده‌های آذرین نیمه‌ژرف، دایک و سیل‌های این منطقه انجام نشده است. از این‌رو، این بررسی در روشن شدن بخشی از تاریخچه زمین‌شناسی این منطقه از ایران، ضروری و سودمند است.

روش انجام پژوهش

از میان ۲۰۰ نمونه سنگی برداشت‌شده، ۷۰ مقطع نازک تهیه و سنگ‌نگاری آنها بررسی شد. با توجه به کمترین دگرسانی و بیشترین گوناگونی ترکیبی، ۱۶ نمونه از نمونه‌های سنگی گنبدها، دایک‌ها و سیل‌ها برگزیده شدند و برای انجام تجزیه شیمیایی و اندازه‌گیری عناصر اصلی (به روش ICP-AES) و عناصر فرعی و عناصر خاکی نادر (به روش ICP-MS) به آزمایشگاه زمین‌شیمی ACME LAB کانادا فرستاده شدند. سپس با نرم‌افزارهای زمین‌شناسی، نمودارها و نقشه‌های زمین‌شناسی لازم تهیه شد. از داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی نمونه‌های برگزیده، برای تفسیرهای سنگ‌شناسی و شناسایی پهنه زمین‌ساختی بهره گرفته شده است.

جایگاه جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی در استان سمنان، در ۱۲۰ کیلومتری جنوب شهر شاهرود جای دارد. این منطقه در بخش شمالی نقشه زمین‌شناسی

دربرگیرندشان مافیک‌تر هستند. در پی دارا بودن مقدار چشمگیری هورنبلند، این انکلاوها دارای آب بیشتری هستند. انکلاوهای هم‌خاستگاه نشانه آمیزش و آمیختگی ماگما در هنگام بالآمدن هستند (Hibbard and Sabatire, 1998). انکلاوهای میکروگرانولار مافیک و لخته‌های مافیک از شواهد آشکار آمیزش ماگمایی هستند. لخته‌های مافیک، بخش‌های نخست تبلور یافته‌ای هستند که در پی تزریق دوباره ماگما به درون آشیانه ماگمایی، گسیخته شده و با ماگما به ترازهای بالاتر برده شده‌اند. تجزیه شیمیایی این انکلاوها، درستی این نکته را نشان می‌دهد (Jamali, 2015)

انکلاوهای نا هم‌خاستگاه شامل انکلاوهای گابرویی، لوکوگابرویی، تونالیتی، آمفیبولیتی، گنیسی، میکاشیستی و توفی ماسه‌سنگی هستند (شکل ۲). بیشتر این انکلاوها زاویه‌دار هستند. اندازه آنها از چند سانتیمتر تا چند دسیمتر است. برخی از آنها، به‌ویژه انکلاوهای میکاشیستی، گنیسی و آمفیبولیتی، برگوارگی آشکاری نشان می‌دهند. انکلاوهای لوکوگابرویی و تونالیتی با رنگ بسیار روشن و ساخت دانه‌درشت از سنگ‌های تراکی‌اندزیتی میزبان خود شناخته می‌شوند. انکلاوهای بازالتی، توفی سندستونی، توفی سیلتستونی و لیتیک‌توف‌ها تکه‌های سنگی هستند که از سنگ‌های میزبان آنها (توالی آتشفشانی و آتشفشانی‌رسوبی ائوسن کنده شده و به درون آنها راه یافته‌اند. انکلاوهای گنیسی، لوکوگابرویی و توفی سیلتستونی نیز نشانه‌های آشکاری از آرایش پوسته‌ای هستند.

برای دستیابی به نشانه‌های بیشتر درباره انکلاوهای درون سنگ‌های آذرین نیمه‌ژرف ائوسن میانی منطقه جنوب و جنوب‌خاوری شاهرود، یافته‌های Jamali و همکاران (۲۰۱۴)، Jamali (۲۰۱۵) و Mansouri (۲۰۱۵) بررسی شدند. درباره این‌گونه سنگ‌های آذرین نیمه‌ژرف به سن ائوسن میانی در شمال و خاور ایران مرکزی بررسی‌های مشابهی انجام شده است که از میان

آتشفشانی در پی فرورانش ورقه اقیانوسی سبزوار - درونه به‌سوی شمال - شمال‌خاوری رخ داده‌اند و معمولاً گوه‌ای از مجموعه‌های اقیانوسی به‌هم نزدیک شده (Island Arc) هستند که به زیر لبه جنوبی توران رانده شده است (Ghasemi and Rezaei, 2015). در این منطقه سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی‌رسوبی به سن پالئوسن تا ائوسن میانی رخنمون دارند که تعداد چشمگیری از توده‌های آذرین نیمه‌ژرف، دایک و به ندرت سیل، در آنها نفوذ کرده است.

در این سنگ‌ها، انکلاوها به دو گروه «هم‌خاستگاه» و «نا هم‌خاستگاه» رده‌بندی می‌شوند. Didier (۱۹۶۴)، Valizadeh و همکاران (۲۰۰۲) انکلاوها را به چهار گروه رده‌بندی می‌کند:

۱) زینولیت‌ها (نا هم‌خاستگاه) که برخی ممکن است ذوب شوند و در شرایط فیزیکی ویژه‌ای به ترکیب‌های رستیتی تغییر یابند؛

۲) رستیت‌ها که همراه با میگماتیت‌ها یافت می‌شوند؛

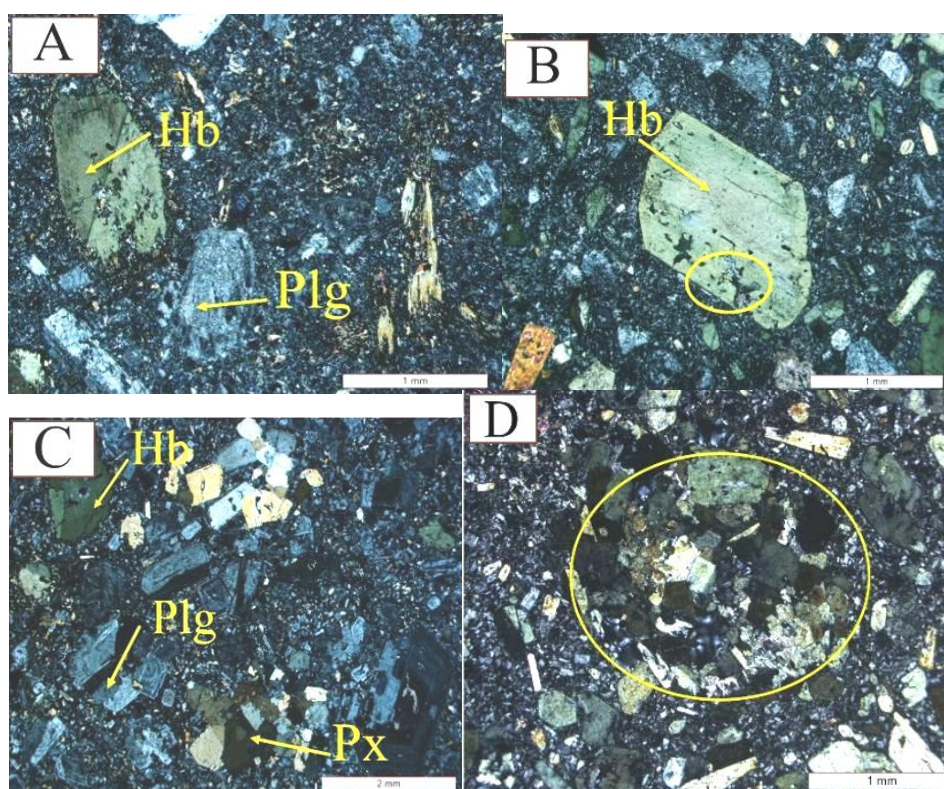
۳) میکروگرانولارها که به مافیک و فلسیک رده‌بندی می‌شوند؛

۴) اتولیت‌ها (هم‌خاستگاه) که شامل تکه‌های سنگی از جنس خود ماگما هستند و زودتر سرد شده‌اند و با ماگما به ترازهای بالاتر راه یافته‌اند.

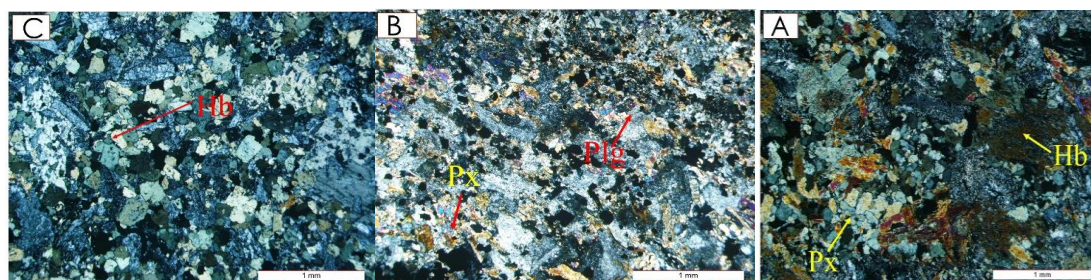
در این سنگ‌های آذرین نیمه‌ژرف، انکلاوهای هم‌خاستگاه شامل لخته‌های مافیک هورنبلندیتی، پیروکسنیتی و لخته‌های سرشار از هورنبلند سبز و اوژیت هستند. بخشی از این انکلاوها دارای لبه‌های انحنادار یا کنگره‌دار هستند که نشان‌دهنده شکل‌پذیری بودن آنها در هنگام اقامت در درون ماگماها یا در هنگام بالآمدن آنها هستند. این انکلاوها از زمینه سنگ تیره رنگ‌تر هستند و مقدار هورنبلند و اوژیت در آنها فراوانی بیشتری دارد. این انکلاوها دارای شکل‌های گرد شده تا زاویه‌دار هستند. همچنین، اندازه آنها از چند میلیمتر تا چند دسیمتر است و از سنگ‌های

منطقه‌بندی ترکیبی در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و هورنبلندها دیده می‌شود. کلریت و اپیدوت کانی‌های ثانویه این سنگ‌ها هستند. از پدیده‌های جالب در این سنگ‌ها حضور میکروانکلاوهاست (شکل ۳- D). در شکل ۴ برخی از ویژگی‌های میکروسکوپی آشکار انکلاوهای درون گنبد‌های آداکیتی جنوب سهل نشان داده شده‌اند.

کوارتز، بیوتیت، آپاتیت، مگنتیت، زیرکن و اسفن، کانی‌های فرعی و کلریت، اپیدوت و کلسیت، کانی‌های ثانویه در این سنگ‌ها هستند. آندزی‌بازالت‌ها بیشتر بافت‌های پورفیری و میکرولیتی دارند. فراوان‌ترین کانی‌های سازنده این سنگ‌ها، پلاژیوکلاز، هورنبلند و اوژیت هستند که در خمیره‌ای ریز بلور از همین کانی‌ها یافت می‌شوند (شکل ۳- C).



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی در نور پلاریزه متقاطع از حضور هورنبلند، اوژیت، پلاژیوکلاز در سنگ‌های آداکیتی منطقه سهل (جنوب شاهرود، جنوب‌خاوری استان سمنان): (A و B) آندزیت‌ها و تراکی‌آندزی‌بازالت‌ها؛ (C) تراکی‌آندزی‌بازالت‌ها؛ (D) میکروانکلاو گابرویی در تراکی‌آندزی‌بازالت‌ها. به بافت پورفیری و گلومروپورفیری در این سنگ‌ها توجه شود (نام اختصاری کانی‌ها از Schmitt Riegraf و Pichler (۱۹۹۷) برگرفته شده است).



شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی در نور پلاریزه متقاطع از انکلاوهای درون گنبد‌های آداکیتی جنوب سهل (جنوب شاهرود، جنوب‌خاوری استان سمنان): (A) لخته مافیک ساخته‌شده از هورنبلند و پیروکسن؛ (B) پلاژیوکلاز و پیروکسن (اوژیت) به‌صورت تیغه‌ای در انکلاو گابرویی؛ (C) انکلاو آمفیبولیتی.

زمین‌شیمی

نمونه‌های سنگی در محدوده کالک‌آلکان پتاسیم بالا جای گرفته‌اند (شکل ۵- B). جای گرفتن چند نمونه در محدوده مرزی کالک‌آلکان پتاسیم بالا و آلکان تنها در پی وجود K_2O بیشتر است. گفتنی است که ویژگی‌های دیگر زمین‌شناسی منطقه‌ای، سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی، آلکان بودن این سنگ‌ها را نشان نمی‌دهد.

بر پایه داده‌های تجزیه زمین‌شیمیایی (جدول ۱) و نمودارهای رده‌بندی مانند نمودار Na_2O+K_2O در برابر SiO_2 (Le Bas *et al.*, 1986)، بیشتر این سنگ‌ها در محدوده تراکی‌آندزیت جای می‌گیرند (شکل ۵- A). برپایه نمودار K_2O در برابر SiO_2 (Taylor, 1976) برای شناسایی سری ماگمایی این

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های سنگی متعلق به گنبد‌های آداکیتی منطقه سهل و رزه (جنوب شاهرود، جنوب‌خاوری استان سمنان) مقدار عنصرهای اصلی برپایه درصد وزنی و مقدار عنصرهای کمیاب و خاکی نادر برپایه ppm است.

Sample No.	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10
SiO ₂	48.15	48.27	48.35	48.77	51.38	52.58	52.67	54.01	54.06	55.11
Al ₂ O ₃	14.58	17.23	15.11	17.73	16.7	16.42	17.09	16.42	15.24	15.26
TiO ₂	0.66	0.70	0.68	0.68	0.65	0.64	0.53	0.52	0.51	0.49
Fe ₂ O ₃	9.34	9.81	9.26	9.02	8.71	8.3	7.64	7.31	7.94	7.13
MgO	8.70	5.47	8.26	4.85	5.98	6.09	4.18	4.10	6.27	5.77
MnO	0.18	0.19	0.25	0.22	0.15	0.15	0.14	0.12	0.08	0.11
CaO	7.92	7.78	7.17	8.57	8.22	7.62	5.04	5.05	8.43	6.51
Na ₂ O	4.05	4.18	4.38	4.31	4.81	4.90	5.85	5.84	4.29	4.96
K ₂ O	2.20	2.28	2.16	2.13	2.52	3.01	2.98	3.01	2.47	3.46
P ₂ O ₅	0.33	0.35	0.34	0.33	0.33	0.31	0.32	0.32	0.25	0.27
L.O.I	3.50	3.30	3.60	3.00	0.55	0.02	3.30	3.10	0.89	0.93
Pb	19.6	4.3	9.5	15	4.2	12.4	8.1	8.5	7.4	3.8
Ta	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1
Rb	40.2	44.9	35.4	42.6	55.1	57.7	82.6	80.5	61	59.8
Sr	765	1247	849.3	1506.2	826.4	1021.1	657.2	566.1	707.3	479.7
Y	15.2	17.3	14.8	15.5	14.5	12.7	14.9	14.8	10.7	11.6
Zr	68.2	73.1	68.1	69	75.3	66.1	89	97.8	65	72.6
Nb	3.1	3.3	2.8	2.9	2.9	2.4	3.1	3.2	2.6	3.2
Cs	17.1	5.1	7.7	1.7	4.3	1.8	3.6	3	1.1	1.3
Ba	290	331	278	249	290	425	360	324	316	477
La	15.8	16.6	15.6	13.3	13.5	11.9	13.3	13.6	11.1	15.3
Ce	30.2	34.6	31.6	27.7	28.5	25.5	26.9	28.8	21.9	35.2
Pr	3.94	4.37	4.09	3.64	3.93	3.30	3.70	3.66	2.76	4.39
Nd	17.8	19.1	17	16.1	16.4	14.2	15.4	15.9	11.8	18.1
Sm	3.57	3.92	3.56	3.50	3.62	3.26	3.67	3.40	2.64	3.32
Eu	1.06	1.17	1.08	1.06	1.05	.94	1.03	1.02	.8	1.03
Gd	3.59	3.8	3.43	3.48	3.6	3.03	3.35	3.26	2.45	2.83
Tb	0.52	0.56	0.52	0.53	0.51	0.45	0.49	0.47	0.37	0.38
Dy	2.80	3.14	2.85	2.73	2.70	2.51	2.76	2.46	1.95	2.20
Ho	0.60	0.65	0.55	0.58	0.57	0.47	0.51	0.48	0.39	0.39
Er	1.60	1.74	1.49	1.59	1.58	1.31	1.45	1.39	1.03	1.17
Tm	0.22	0.25	0.22	0.23	0.21	0.2	0.23	0.22	0.16	0.16
Yb	1.43	1.48	1.36	1.51	1.44	1.25	1.39	1.31	1.03	1.04
Lu	0.21	0.26	0.22	0.23	0.23	0.19	0.23	0.22	0.17	0.18
U	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.2	1.2	0.7	0.7
La _N /Yb _N	6.995	7.652	9.918	6.929	7.183	7.992	7.652	6.418	7.562	7.449
Sr/Y	50.32895	72.08092	57.38514	97.17419	56.9931	80.40157	44.10738	38.25	66.1028	41.37069

جدول ۱- ادامه.

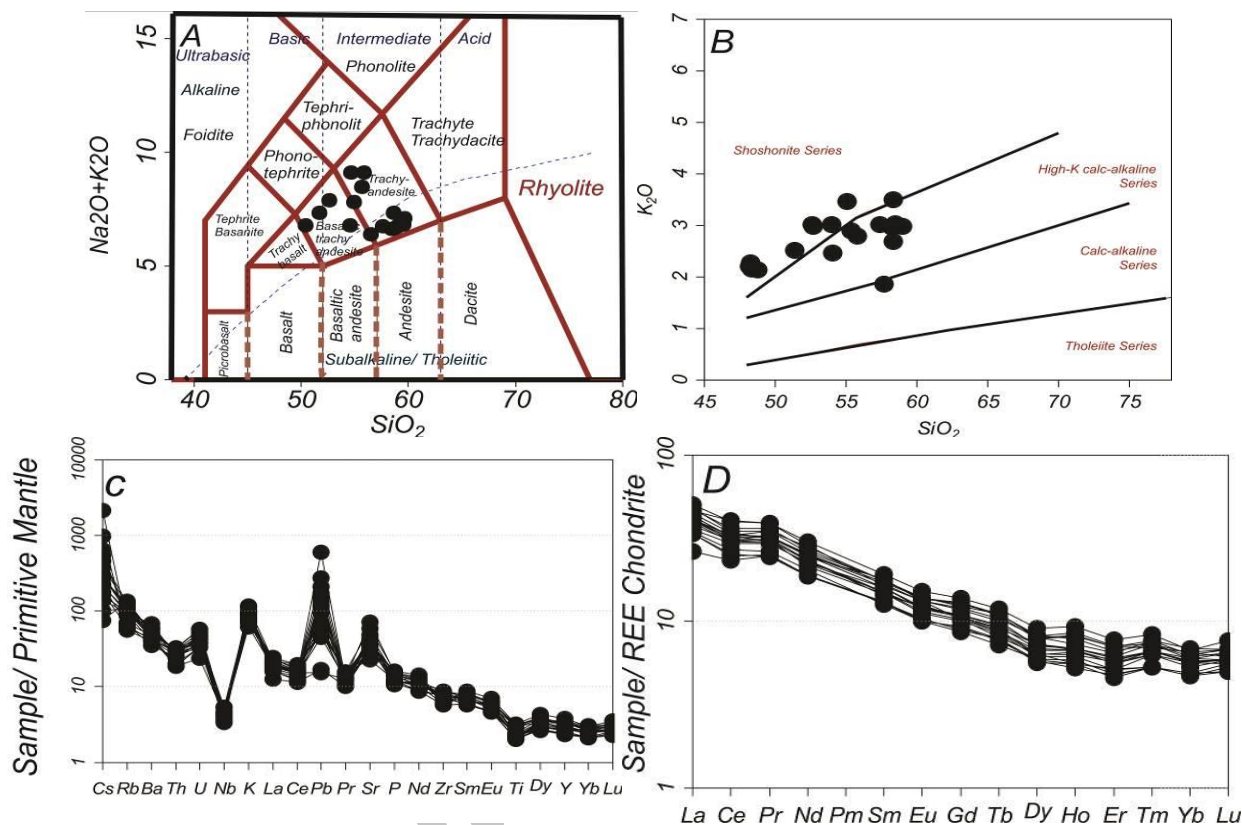
Sample No.	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15	S-16	S-17	S-18	S-19	S-20
SiO ₂	55.37	55.81	57.39	57.72	58.26	58.26	58.32	58.33	58.51	59.02
Al ₂ O ₃	16.17	16.35	16.00	17.83	16.21	16.21	16.62	15.78	16.2	16.2
TiO ₂	0.51	0.48	0.48	0.47	0.48	0.48	0.48	0.44	0.46	0.45
Fe ₂ O ₃	7.80	7.01	6.24	5.96	6.70	6.70	6.79	6.01	6.70	6.37
MgO	6.04	4.30	3.97	2.61	8.00	3.97	3.95	4.10	3.94	4.31
MnO	0.10	0.12	0.12	0.09	0.12	0.12	0.16	0.10	0.11	0.12
CaO	6.65	6.06	6.22	5.41	6.58	6.58	6.61	5.82	6.31	5.69
Na ₂ O	5.01	3.79	4.19	4.77	3.68	3.68	3.94	3.48	3.68	3.94
K ₂ O	2.90	2.79	3.02	1.86	2.97	2.97	2.69	3.50	3.04	2.98
P ₂ O ₅	0.27	0.30	0.26	0.25	0.25	0.25	0.26	0.24	0.26	0.23
L.O.I	0.82	2.70	1.90	2.80	3.25	0.78	0.18	2.00	0.79	0.83
Pb	11	3.8	1.1	42.4	6.8	6.8	5	1.2	3.2	4.3
Ta	0.1	0.2	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2
Rb	69.6	61.3	77.8	39.4	70.2	70.2	63.9	86.2	71.7	63.3
Sr	645.9	780.7	809.4	846.4	904.3	904.3	872.1	741.1	909.6	709.2
Y	10.6	13.4	12.7	12.4	13.1	13.1	12.5	10.8	12.3	10.8
Zr	65.3	84.6	86.4	88.4	96	96	87.4	83.6	92.8	79.7
Nb	2.5	3.0	3.3	3.0	3.8	3.8	3.2	3.0	3.7	3
Cs	0.8	1.3	2.2	1.4	2.2	2.2	1.7	0.6	2.3	2.3
Ba	326	354	300	300	411	411	314	364	395	352
La	11.1	13.1	13.5	12.4	14.3	14.3	14.7	8.7	13.8	11.4
Ce	21.4	26.1	27.5	26.9	28.3	28.3	26.9	20.3	26	23.3
Pr	2.82	3.33	3.48	3.42	3.62	3.62	3.56	2.78	3.48	2.97
Nd	11.9	14	14.5	14.8	15.7	15.7	14.8	11.9	13.6	12.8
Sm	2.65	3.04	3.01	2.91	3.24	3.24	3.07	2.67	2.98	2.58
Eu	0.77	0.93	0.86	0.97	0.92	0.92	0.89	0.78	0.94	0.77
Gd	2.57	3.01	2.79	2.94	2.96	2.96	2.84	2.55	2.92	2.93
Tb	0.37	0.44	0.40	0.42	0.43	0.43	0.41	0.36	0.41	0.34
Dy	2.02	2.37	2.11	2.2	2.51	2.51	2.29	1.98	2.17	2.07
Ho	0.39	0.47	0.43	0.44	0.48	0.48	0.47	0.37	0.46	0.41
Er	1.15	1.25	1.16	1.29	1.35	1.35	1.26	1.07	1.32	1.09
Tm	0.16	0.2	0.19	0.19	0.20	0.20	0.19	0.16	0.20	0.16
Yb	1.08	1.28	1.17	1.25	1.26	1.26	1.24	1.08	1.33	1.07
Lu	0.17	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.19	0.16	0.2	0.17
Th	1.6	2.6	2.4	1.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.7
U	0.7	1.1	0.9	0.5	1	1	0.7	0.9	1	0.9
La _N /Yb _N	5.938	6.9	6.999	6.451	7.733	7.779	5.431	6.688	6.321	7.266
Sr/Y	60.93396	58.26119	63.73228	68.25806	69.03053	69.03053	69.768	68.62037	73.95122	65.66667

ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، عناصر Sr، Ba و Rb ناهنجاری مثبت نشان می‌دهند، که با ناسازگار بودن این عناصر توجیه‌شدنی است. همچنین، آنومالی مثبت Sr می‌تواند به نبود وجود پلاژیوکلاز در بخش برجامانده از ذوب‌بخشی وابسته باشد. همچنین، سیال‌های پهنه‌های فرورانش، گوشته خاستگاه این ماگما را از این عناصر غنی می‌کند (Wilson, 1989).

بررسی فراوانی عناصر خاکی نادر این نمونه‌ها در نمودار بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (Sun. and McDonough, 1989) نشان می‌دهد که همه نمونه‌ها تا اندازه‌ای از عناصر خاکی نادر سبک (LREE) غنی‌شدگی و از عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۵- C). در نمودار عنکبوتی بهنجار شده در برابر

ویژگی‌هایی از ویژگی‌هایی شناخته‌شده ماگماهای وابسته به کمان (Gill, 1981) و به‌ویژه ماگماهای کالک‌آلکان کمان‌های پهنه‌های فرورانش حاشیه قاره‌ها به‌شمار می‌آید.

الگوی نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار (Nakamura, 1989) شده در برابر ترکیب کندریت (McDonough, 1989) نشان‌دهنده غنی‌شدگی از عناصر LREE و تهی‌شدگی از HREE است (شکل ۵- D). چنین



شکل ۵- جایگاه نمونه‌ها بر روی نمودار رده‌بندی و شناسایی سری ماگمایی سن‌های آذرین (Le Bas et al., 1986)؛ (B) نمودار K_2O در برابر SiO_2 برای شناسایی سری ماگمایی (Peccerillo and Taylor, 1976)؛ (C) نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)؛ (D) الگوی عناصر خاکی نادر بهنجار شده به ترکیب کندریت (Nakamura, 1974).

نمونه‌ها دارای ناهنجاری منفی از Ti و Nb هستند. ماگمایی که از ذوب بخشی گوشته جدا می‌شود چه‌بسا در هنگام بالا آمدن با سنگ‌های پوسته‌ای قاره‌ای آغشتگی یا آرایش پیدا کند و در نمودارهای عنکبوتی ناهنجاری منفی Nb نشان دهد. Wilson (۱۹۸۹) و Gill (۱۹۸۱) بر این باورند که غنی‌شدگی از عناصر ناسازگار مانند سرب، سزیم، باریم و روبیدیم (LILE) همراه با تهی‌شدگی نسبی از عناصر ناسازگار مانند نیوبیم، تیتانیوم و زیرکونیم (HFSE) در گدازه‌های مناطق کمان پدیده‌ای معمول و متداول است. از دیدگاه

کم بودن مقدار HREE در برابر LREE می‌تواند نشان‌دهنده درجه کم ذوب بخشی در خاستگاه گوشته‌ای و آلودگی ماگمای برخاسته از ذوب بخش گوشته‌ای با مذاب‌های برخاسته از ذوب بخش پوسته‌ای (Srivastava and Singh, 2004)، به‌جاماندن گارنت در سنگ خاستگاه (Clague et al., 1982) و یا نقش سیال در ماگمای اسیدی به‌هنگام جدایش ماگما باشد. بالا بودن LREE/HREE نشان‌دهنده ژرفای بسیار پیدایش ماگما یا همان خاستگاه گارنت‌لرزلرولیتی است. در نمودار بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه، این

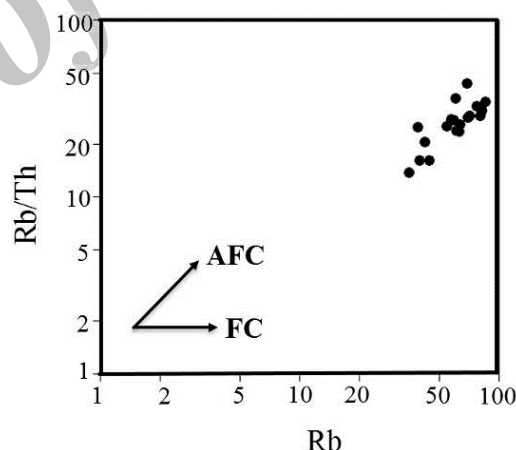
متفاوتی هستند. می‌توان گفت که ماگمای آداکیتی جدایش یافته در هنگام بال‌آمدن به ترازهای بالاتر پوسته با سنگ‌های میزبان آرایش یافته است.

بحث

این سنگ‌ها با دارابودن ویژگی‌هایی مانند HREE کم و LREE بالا، به همراه ویژگی‌های دیگر (مانند: SiO_2 ۴۸/۱۵ تا ۵۹/۰۲ درصد وزنی)، Na_2O بیش از ۴ درصد وزنی، Al_2O_3 بیش از ۱۶ درصد وزنی، Y کمتر از ۱/۸ پی‌پی‌ام و Y کمتر از ۱۸ پی‌پی‌ام)، دارای سرشت آداکیتی هستند. نبود آنومالی منفی Eu، آنومالی منفی Nb و آنومالی مثبت در Sr از ویژگی‌های دیگر سنگ‌های آداکیتی هستند. با توجه به نمودارهای Sr/Y در برابر Y و La_N/Yb_N در برابر Yb_N (شکل‌های A-۷ و B-۷)، این نمونه‌ها در گستره آداکیت‌ها جای گرفته‌اند.

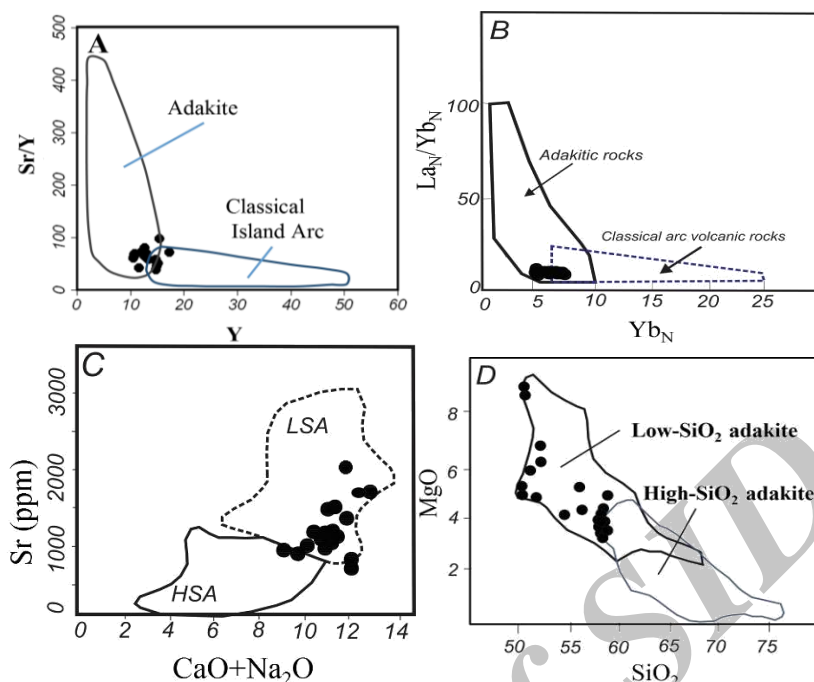
بر پایه نمودار Sr در برابر $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ و نمودار MgO در برابر SiO_2 (Castillo, 2012) و نمودار $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ در برابر SiO_2 (Martin *et al.*, 2005)، این سنگ‌ها در بخش آداکیت‌های کم‌سیلیس جای دارند (شکل‌های C-۷ و D-۷). در جدول ۳ ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آداکیتی از دیدگاه Castillo (۲۰۱۲) با سنگ‌های این منطقه مقایسه شده است. برپایه جدول ۳ و منابع علمی منتشر شده دیگر درباره آداکیت‌ها، آداکیت‌های پر سیلیس (HSA) از ذوب ورقه‌های اقیانوسی فرورو و دگرگون‌شده پدید آمده‌اند. آداکیت‌های کم سیلیس (LSA) نیز از تبلور مذاب‌های پدیدآمده از ذوب گوه‌گوشته‌ای پریدوتیتی متاسوماتیسم‌شده پدید آمده‌اند (Castillo, 2012; Macpherson *et al.*, 2006).

سنگ‌زایی (پتروژنتیک)، ناهنجاری منفی نیوبیم از ویژگی‌های آشکار ماگما‌های کمان‌قاره‌ای است. الگوی موازی روند تغییر عناصر کمیاب و خاکی نادر نمونه‌ها نشان‌دهنده خاستگاه مشترک نمونه‌ها و نقش برجسته جدایش بلورین در پیدایش ماگمای سازنده آنهاست (Rollinson, 1993). نمودار Rb/Th در برابر Rb (Pearce, 1983)، نقش فرایند جدایش بلورین (تبلور تفریقی) همراه با هضم (AFC) و فرایند جدایش بلورین (FC) را در تکامل ماگمای سازنده سنگ‌های منطقه رژه و سهل نشان می‌دهد (شکل ۶). شواهد زمین‌شیمیایی دیگر مانند غنی‌شدگی از عناصر لیتوفیل بزرگ یون مانند K، Rb، Th و U نیز نشان‌دهنده این نکته هستند.



شکل ۶- نمودار Rb/Th در برابر Rb (Pearce, 1983) نشان‌دهنده نقش فرایند AFC و FC در تکامل ماگمای سازنده سنگ‌های آذرین نیمه‌ژرف منطقه سهل و رژه (جنوب شاهرود، جنوب‌خاوری استان سمنان).

شواهد صحرائی مانند حضور گسترده انکلاوها به‌ویژه انکلاوهای نا هم‌خاستگاه دارای سرشت میکاشیستی، گنیسی، آمفیبولیتی، گابرویی و تونالیتی نیز نشان‌دهنده آرایش ماگمایی هستند. انکلاوهای نا هم‌خاستگاه نام‌برده دارای سرشت متفاوت، نقطه ذوب متفاوت و نقش آلیشی



شکل ۷- A) نمودار Sr/Y در برابر Y (Drummond and Defant, 1990)؛ B) نمودار La_N/Yb_N در برابر Yb_N (Martin, 1999)، که جایگاه این نمونه‌ها در بخش آداکیت‌ها را نشان می‌دهند؛ C و D) نمودارهای شناسایی آداکیت‌های پرسیلیس (HSA) و کم‌سیلیس (LSA) از یکدیگر و جایگاه نمونه‌ها بر روی آن؛ C) نمودار Sr در برابر $CaO+Na_2O$ (Castillo, 2012)؛ D) نمودار MgO در برابر SiO_2 (Martin et al., 2005).

جدول ۳- بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های آداکیتی از دیدگاه Castillo (۲۰۱۲) و مقایسه با سنگ‌های منطقه سهل (جنوب شاهرود، جنوب‌خاوری استان سمنان).

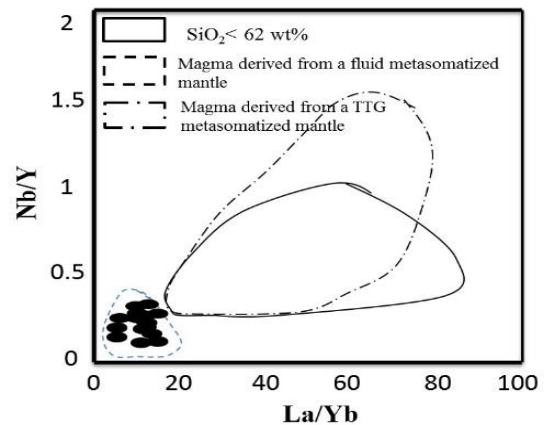
آداکیت‌های منطقه سهل (آداکیت‌های کم سیلیس)	احتمال ارتباط با ذوب ورقه اقیانوسی بازالتی فرورونده	معیارهای شاخص آداکیت‌ها
	ذوب‌بخشی فشار بالای اکلوزیت یا آمفیبولیت	SiO_2 بیش از ۵۶ درصد وزنی
	تداخل مذاب‌های حاصل از ذوب‌بخشی پوسته اقیانوسی اکلوزیتی و رسوب‌های فرورانده‌شده با مذاب‌های برآمده از ذوب‌بخشی گوشت‌های SiO_2 (۴۸/۱۵ تا ۵۹/۰۲ درصد وزنی) بالای ورقه فرورو (Xu et al., 2000)	SiO_2 از ۵۴ تا ۵۸ درصد وزنی
Al_2O_3 بیش از ۱۶ درصد وزنی (با میانگین ۱۶/۳۵ درصد وزنی)	ذوب‌بخشی فشار بالای اکلوزیت یا آمفیبولیت	Al_2O_3 بیش از ۱۵ درصد وزنی
MgO بیش از ۳ درصد وزنی (با میانگین ۵/۰۶۲ درصد وزنی)	به‌همراه Ni کم چنانچه پیامد ذوب اولیه باشد، از گوشته پریدوتیتی ریشه‌نگرفته است.	MgO کمتر از ۳ درصد وزنی
MgO بیش از ۳ درصد وزنی (با میانگین ۵/۰۶۲ درصد وزنی)	به‌همراه Ni و Cr بالا، ذوب تعادلی یا ذوب‌بخشی پریدوتیت	MgO بیش از ۳ درصد وزنی
Na_2O بیش از ۳ درصد وزنی (با میانگین ۴/۳۸۶ درصد وزنی)	ذوب‌بخشی فشار بالای اکلوزیت یا آمفیبولیت	Na_2O بیش از ۳ درصد وزنی
Sr بیش از ۳۰۰ پی‌پی‌ام (با میانگین ۸۳۷/۴۲۵ پی‌پی‌ام) بیش از ۱۰ پی‌پی‌ام Y (۱۳/۱۸۵ پی‌پی‌ام) Sr/Y بیش از ۲۰ (۶۳/۵۷) Yb کمتر از ۱۰ پی‌پی‌ام (۱/۲۶۳ پی‌پی‌ام) La/Yb کمتر از ۲۰ (۱۰/۶۲۴)	ذوب پلاژیوکلاز یا نبود پلاژیوکلاز در بخش برجامانده از فرایند ذوب نشان‌دهنده وجود گارنت، هورنبلند و کلینوپیروکسن در خاستگاه نشان‌دهنده وجود گارنت، هورنبلند و کلینوپیروکسن در خاستگاه با محتوای HREE کم، نشان‌دهنده گارنت‌دار بودن خاستگاه غنی‌شدگی از LREE در برابر HREE، نشان‌دهنده گارنت‌دار بودن خاستگاه در بیشتر گدازه‌های کم‌انی، وجود فازهای کانیایی Ti دار یا هورنبلند در خاستگاه	Sr بیش از ۳۰۰ پی‌پی‌ام Y کمتر از ۱۰ پی‌پی‌ام بیش از ۲۰ Sr/Y Yb کمتر از ۱۰ پی‌پی‌ام La/Yb بیش از ۲۰ پی‌پی‌ام HFSE، Nb و Ti کم
HFSE، Nb و Ti کم		

نتیجه گیری

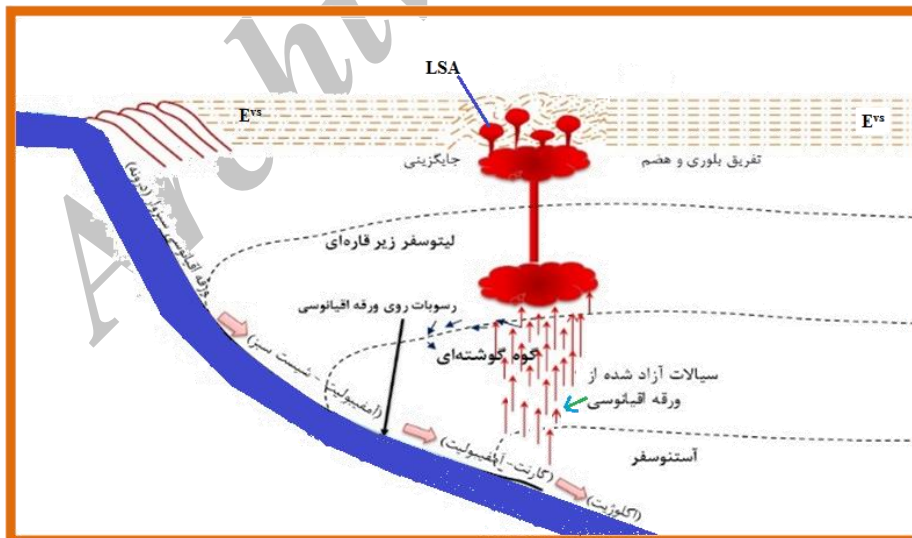
در منطقه سهل در جنوب شاهرود، سنگ‌های آذرین نفوذی نیمه‌ژرف به‌صورت دایک و گنبد، رخنمون دارند. سنگ‌های آذرین نامبرده، سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی رسوبی آئوسن نوار ماگمایی شمال پهنه ایران مرکزی را قطع کرده‌اند. بر پایه بررسی‌های سنگ‌نگاری و رده‌بندی شیمیایی، این سنگ‌های آذرین نیمه‌ژرف دارای ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت بازال هستند.

در این سنگ‌ها دو گروه انکلاو زینولیتی (نا هم‌خاستگاه) و اتولیتی (هم‌خاستگاه) دیده می‌شود. انکلاوهای زینولیتی (میکاشیستی، گنیسی، آمفیبولیتی و ...) تکه‌هایی از سنگ‌هایی است که در راه بالآمدن ماگما بوده‌اند و در پی گسیختگی به درون مواد مذاب راه یافته‌اند و سپس به‌سوی بالا برده شده‌اند و بیشتر آنها دارای سرشت پوسته‌ای هستند.

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی به‌همراه سرشت سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی این منطقه، ریشه‌گرفتن ماگماهای آداکیتی سازنده این سنگ‌ها از ذوب‌بخشی گوه‌گوشته‌ای پریدوتیتی همراه با مشارکت سیال‌های آزاد شده از ورقه اقیانوسی فرورونده را تأیید می‌کند (شکل ۸). تصویر نمادین از چگونگی پیدایش این آداکیت‌ها در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۸- نمودار Nb/Y در برابر La/Y برای شناسایی خاستگاه آداکیت‌های منطقه سهل (Macpherson et al., 2006).



E^{vs} = Eocene volcanic and volcanosedimentary rocks

LSA = Low Silica Adakites

شکل ۹- الگوی نمادین پیدایش آداکیت‌های کم‌سیلیس منطقه سهل (جنوب شاهرود، جنوب خاوری استان سمنان).

نمونه‌هاست. غنی‌شدگی از LILE و آنومالی منفی از Nb، Ti و تا اندازه‌ای Ta نشان می‌دهند که این سنگ‌ها در پهنه فرورانش ورقه اقیانوسی نئوتیس (شاخه سبزوار- درونه) به زیر بخش شمالی ورقه قاره‌ای ایران مرکزی پدید آمده‌اند. همچنین، این سنگ‌ها از ذوب‌بخشی گوه‌گوشته‌ای پریدوتیتی همراه با مشارکت سیال‌های آزاد شده از ورقه اقیانوسی فرورو پدید آمده‌اند. در پی پدیده‌های هضم، آلیش و جدایش ماگمایی، این ماگماها در هنگام بالآمدن اندکی دچار تغییر ترکیبی شده‌اند.

انکلاوهای اتولیتی، لخته‌های مافیک سرشار از هورنبلند و پیروکسن متعلق به بخش‌های پیش‌تبلور یافته ماگما هستند که در پی تزریق دوباره ماگما به درون آشیانه ماگمایی، گسیخته شده و با ماگما به ترازهای بالاتر برده شده‌اند. داده‌های زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده سرشت کالک‌آلکان پتاسیم بالای این نمونه‌ها هستند. بالابودن نسبت LREE/HREE، مقادیر مطلوب SiO_2 ، Al_2O_3 و Sr این سنگ‌ها و کم‌بودن مقادیر Y و Yb نشان‌دهنده سرشت آداکیتی این

منابع

- Aghanabati, A. (2004) Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Castillo, P. R. (2012) Adakite petrogenesis. *Lithos* 134: 304-316.
- Clague, D. A. and Frey, F. A. (1982) Petrology and trace element geochemistry of the Honolulu volcanoes, Oahu: Implications for the oceanic mantle below Hawaii. *Journal of Petrology* 23: 447-504.
- Dehnavi, N. (2009) Petrology and geochemistry of igneous rock of Shahr-e-Firoozeh region (West of Neyshabour) and their related mineralization. M. Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Delavar, Z. (2010) Petrology and geochemistry of Subvolcanic domes of South West of Birjand. M. Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Didier, J. (1964) Etude petrographique des enclaves de quelques granites du Massif Central Français. *Annales Scientifiques de l'Université de Clermont-Ferrand* 23: 254.
- Didier, J. (1973) Granite and Their Enclaves: On the origin of enclave bearing granites. *Developments in petrology*, Elsevier, Amsterdam.
- Drummond, M. S. and Defant M. J. (1990) A model for trondhjemitic tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research* 95: 21503-21521.
- Emami, M. H. (2001) Magmatism in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Ghasemi, H. and Rezaei Kahkhaei, M. (2015) Petrochemistry and tectonic setting of the Davarzan Abbasabad Eocene volcanic (DAEV) rocks, NE Iran. *Journal of Mineralogy and Petrology* 108(6): 1-20.
- Gill, J. B. (1981) Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-berlin: 43-489.
- Hibbard, M. and Sabatire J. (1998) The magma mixing and origin of mantle feldspars. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 79: 158-170.
- Jamali, Z. (2015) Geology, petrology and geochemistry of subvolcanic domes of Razzeh Area (south of Shahrood). MSc thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).

- Jamali, Z., Sadeghian, S. and Ghasemi, H. (2014) Mineralogical changes of enclaves in subvolcanic domes of east Razzeh Area. 18th Congress of the Geological Society of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Jamshidi, K., Ghasemi, H. and Miao, L. (2015a) U-Pb age dating and determination of source region composition of post- ophiolite adakitic domes of Sabzevar. *Petrology* 23: 121-138 (in Persian).
- Jamshidi, K., Ghasemi, H., Troll, V. R., Sadeghian, M. and Dahren, B. (2015b) Magma storage and plumbing of adakite-type post-ophiolite intrusions in the Sabzevar ophiolitic zone, northeast Iran. *Solid Earth* 6: 49–72.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745–750.
- Macpherson, C. G., Dreher S. T. and Thirlwall M. F. (2006) Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters* 243: 581-593.
- Mansouri, B. (2015) Petrology and geochemistry of subvolcanic domes in southeast of Sahl area (NE Torud). M. Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Martin, H. (1999) Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos* 46: 411-429.
- 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.
- Middlemost, E. A. (1986) Magmas and magmatic rocks: An introduction to igneous petrology.
- Nakamura, N. (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38: 757-775.
- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental basalts and mantle xenoliths* (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230–249. Cheshire, Shiva Publications.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. (1976) Geochemistry of Eocene calc- alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81.
- Pichler, H. and Schmitt Riegraf, C. (1997) *Rock- forming minerals in thin section*. Translated by L. Hoke, Chapman and Hall.
- Rahmati Ilkhchi, M., Faryad, S., Schulmann, K. and Kosler, J. (2006) Metamorphic and exhumation processes of the Shotur Kuh metamorphic complex, Semnan Province (Central Iran Zone). *Geo Lines* 20.
- Rollinson, H. R. (1993) *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, UK.
- Rutherford, M. J. and Devine, A. D. (2003) Magmatic conditions and magma ascent as indicated by Hornblende phase equilibria and reaction in the 1995-2002, Soufriere Hills Magma. *Journal of Petrology* 44(8): 1433-1484.
- Saeidi, S. (2010) Petrology and geochemistry of subvolcanic domes of Birjand area. M. Sc. thesis, Azad University of Shahrood, Shahrood, Iran (in Persian).
- Salehinejad, H. (2008) Petrology and Geochemistry Bashtine Area Subvolcanic Domes, in the west of Sabzevar. M. Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Srivastava, R. K., Singh R. K. (2004) Trace element geochemistry and genesis of Precambrian subalkaline mafic dykes from the central Indian craton: evidence for mantle metasomatism. *Journal of Asia Earth sciences* 23 :373-389.

- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) A chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. Geological Society Special Publication 42: 313-345.
- Valizadeh, M. V., Sadeghian, M. and Akrami, M. A. (2002) Enclaves and granite petrology. Tehran University Publications 2533 (in Persian).
- Wilson, M. (1989) Igneous petrogenesis, a global tectonic approach: Unwin Hyman, London.
- Xu, J. F., Wang, Q. and Yu, X. Y. (2000) Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic mélange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan oceanic crust. *Geochemical Journal* 34: 359- 377.
- Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S. and Yousefi, F. (2011) Geochemistry and petrogenesis of Givshad volcanic and subvolcanic rocks (southwest of Birjand, east of Iran). *Petrology* 7: 39-50 (in Persian).

Archive of SID