

پتروژنز و سن سنجی U-Pb متاریولیت‌های نئوپروتروزوئیک پسین مجموعه دگرگونی-آذرین ماجراد (جنوب شرق شاهرود): شاهدی بر تشکیل و توسعه حوضه‌های کشتی درون قاره‌ای در سرزمین‌های گندوانایی ایران

مرضیه ویس کرمی*، محمود صادقیان، حبیب قاسمی، سکینه شکاری؛

دانشگاه صنعتی شاهرود

مینگو جای؛ دانشگاه نورث وست شیان

پذیرش ۹۷/۰۴/۲۵

دریافت ۹۶/۱۰/۱۲

چکیده

متاریولیت‌های رخنمون یافته در مجموعه دگرگونی-آذرین ماجراد در جنوب شرق شاهرود و در لبه شمالی زون ساختاری ایران مرکزی واقع شده‌اند. متاریولیت‌ها بخش مهمی از طیف ترکیب این کمپلکس هستند که به شکل گنبد و یا میان‌لایه با مرمرهای کلسیتی و دولومیتی، متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌ها رخنمون دارند. در اثر دگرگونی و میلونیتی‌شدن، برگوارگی و خطوارگی بارزی در آن‌ها توسعه یافته است. بر اساس شواهد ژئوشیمیایی، متاریولیت‌ها دارای ماهیت کالک-آلکان پتاسیم متوسط تا پتاسیم بالا هستند. این سنگ‌ها در نمودار عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده به‌کندریت از عناصر نادر خاکی سبک (به استثنای Eu) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین غنی‌شدگی دارند، و در نمودار عنکبوتی به‌هنگار شده به‌گوشته اولیه از U, Th, Pb و K غنی‌شدگی و از Ti, P, Sr, Zr و Nb تهی‌شدگی نشان می‌دهند. متاریولیت‌ها به دسته ریولیت‌های خشک یا دمای زیاد تعلق دارند و در محیط‌های کشتی درون قاره‌ای تشکیل شده‌اند. سن سنجی‌های انجام شده به‌روش U-Pb روی زیرکن‌های جدا شده از آن‌ها، نشان‌گر دامنه سنی ۵۸۷/۶ تا ۵۰۸ میلیون سال (نئوپروتروزوئیک پایانی-کامبرین‌زیرین) است؛ ولی با توجه به سن توده‌های گرانیتوئیدی قطع‌کننده این مجموعه (۵۵۳ ± ۳٪ میلیون سال)، سن نئوپروتروزوئیک پایانی (ادیاکارن) برای آن‌ها منطقی‌تر است و تعلق آن‌ها را به مناطق پی‌سنگی و گندوانایی ایران تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: متاریولیت، نئوپروتروزوئیک پایانی، محیط‌های کشتی درون قاره‌ای، ماجراد، شاهرود.

مقدمه

سنگ‌های گرانیتوئیدی و معادل بیرونی آن‌ها یعنی ریولیت‌ها، مهم‌ترین سازندگان پوسته بالایی هستند. به‌رغم پژوهش‌های گسترده در زمینه گرانیتوئیدها، درک پتروژنز ماگماهای سیلیکاته به‌ویژه ماگماهای ریولیتی چالش مهمی در علم پتروژن محسوب می‌شود. به‌طور کلی دو سازوکار مهم برای تشکیل ماگما از گوشته شناخته شده است که شامل: ۱. ذوب بخشی آبدار در حضور آب: نظیر ذوب گوه گوشته‌ای تحت تأثیر مواد فرار آزاد شده از ورقه فرورو [۱]، [۲] [۳]، [۴]. ۲. ذوب خشک یا بدون حضور آب که شامل بالا آمدن ستون‌های گوشته‌ای، کاهش فشار و تشکیل مذاب در مناطقی مانند نقاط داغ، کافت‌های درون قاره‌ای و پشته‌های میان‌اقیانوسی است [۵]. پژوهش‌گران مختلف سازوکارهای متفاوتی را برای تشکیل ریولیت‌ها بیان کرده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها شامل:

۱. تبلور تفریقی ماگماهای گوشته‌ای [۶]، [۷]، [۸].

۲. ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای در اثر گرمای ناشی از تزریق ماگماهای بازیک [۹]، [۱۰].

۳. ذوب هیبرید با مشارکت ماگماهای گوشته‌ای و مواد برگرفته شده از پوسته قاره‌ای [۱۱]، [۱۲].

کریستینسن [۱۳] بر این باور است که ریولیت‌ها شامل دو دسته هستند: (آ) ریولیت‌های داغ، خشک و احیایی که در کافت‌های قاره‌ای و نقاط داغ تشکیل می‌شوند و (ب) ریولیت‌های سرد، مرطوب و اکسیدی که در زون‌های فرورانش تشکیل می‌شوند. مجموعه‌های دگرگونی-آذرین دلبر، بندهازارچاه بیارجمند، شترکوه، جنوب دوجاه و ماجراد در جنوب-شرق شاهرود، از جمله مناطق پی‌سنگی ایران هستند که در سالیان اخیر، بررسی‌های زیادی روی آن‌ها انجام گرفته است. این پژوهش‌ها، گام‌های ارزشمندی در شناخت تحولات بازه زمانی نئوپروتروزویک پایانی-اوایل کامبرین و هم‌چنین شناخت و بازسازی قلمرو ابرقاره گندوانا در ایران محسوب می‌شوند [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸]، [۱۹] [۲۰]، [۲۱]، [۲۲].

مجموعه دگرگونی-آذرین ماجراد طیف متنوعی از سنگ‌های دگرگونی شامل متاکربنات، متاپلیت، متاسندستون، متابازیت و متاریولیت را شامل می‌شود که در برخی مناطق به‌وسیله توالی رسوبی-تخریبی دارای میان‌لایه‌های بازالتی به سن تریاس پایانی-ژوراسیک آغازین پوشیده شده‌اند. توالی ژوراسیک، دگرگونی درجه پایینی در حد رخساره شیست سبز را متحمل شده است و به اسلیت، فیلیت، میکاشیست، آهک‌های دوباره تبلور یافته و شیست سبز (متابازیت‌های حاصل از دگرگونی بازالت‌ها) تحول یافته‌اند. در برخی نقاط، ماگماتیسیم بازی-حدواسط اواخر تریاس-ژوراسیک میانی به‌صورت توده‌های نفوذی کوچک گابرویدیوریتی یا دسته دایک‌های دیابازی متعلق به ژوراسیک میانی، مجموعه‌های دگرگونی نئوپروتروزویک پایانی و هم‌چنین توالی رسوبی-تخریبی (یا مجموعه دگرگونی) ژوراسیک را قطع کرده‌اند. از آن‌جاکه مجموعه ماجراد از واحدهای مختلف سنگی تشکیل شده و هر کدام از این واحدها مانند حلقه‌ای زنجیر به هم پیوسته‌اند، بررسی دقیق هر کدام از این واحدها می‌تواند به رسیدن دید جامع و کامل در مورد تحولات سرزمین‌های نئوپروتروزویک پسین مؤثر باشد. از آن‌جاکه متاریولیت‌ها به‌صورت بین‌لایه‌ای با سایر واحدهای سنگی مجموعه ماجراد ظاهر شده‌اند و هم‌چنین در نقشه‌های زمین‌شناسی هیچ اشاره‌ای به این واحدها نشده است، در این نوشتار، با تکیه بر پژوهش‌های دقیق صحرایی، سنگ‌نگاری، شیمی کانی، شیمی سنگ کل و به‌ویژه سن‌سنجی به‌روش اورانیم-سرب روی زیرکن‌های استخراج شده از متاریولیت‌ها، به بررسی دقیق این سنگ‌ها می‌پردازیم.

روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر بر مبنای برداشت‌های دقیق صحرایی، بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی، تجزیه شیمیایی نمونه‌های سنگی، سن‌سنجی ایزوتوپی به‌روش U-Pb و پردازش و تفسیر این داده‌ها انجام شده است. در این راستا، ۴ نمونه متاریولیتی در آزمایشگاه ژئوشیمی مؤسسه زمین‌شناسی و ژئوفیزیک آکادمی علوم چین تجزیه شیمیایی شد، مقادیر عناصر اصلی به‌روش XRF و عناصر کمیاب به‌روش ICP-MS تعیین شدند. تعیین سن و اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپ‌های U و Pb به‌روش LA-ICP-MS^۱ و تجزیه مابکروپروپ کانی‌ها (EPMA) با استفاده از دستگاه ریزپردازنده

1. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry

نوع JXA-8230 در شرایط آزمایش شامل ولتاژ 15kV، جریان ریز کاو 10nA در آزمایشگاه State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Northwest University Xian, China انجام شده است.

زمین‌شناسی

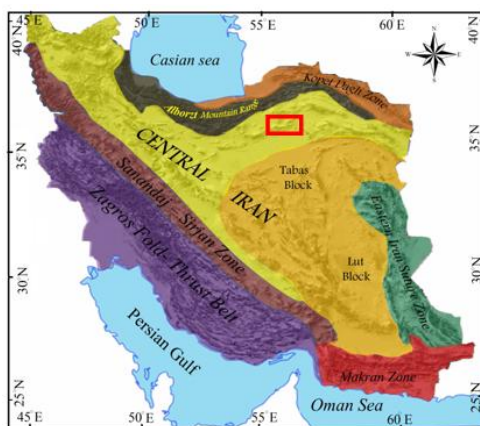
مجموعه دگرگونی-آذرین ماجراد با روند شمال شرق-جنوب غرب تا شرقی-غربی با طول تقریبی ۱۵۰ و عرض ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر در جنوب شرق شاهرود در لبه شمالی ایران مرکزی رخنمون دارند (شکل ۱). این مجموعه شامل طیف گسترده‌ای از سنگ‌های دگرگونی و آذرین است، سنگ‌های دگرگونی آن شامل مجموعه‌ای از متاپسامیت‌ها، متاپلیت‌ها، متابازیت‌ها و متاریولیت‌ها هستند. متاپلیت‌ها شامل فیلیت، میکاشیست، گنیس و گارنت گنیس هستند. شرایط دما و فشار دگرگونی حاکم بر گنیس‌ها به بروز آناتکسی و تشکیل گرانیته منجر شده است که آثار ذوب‌شدگی به صورت لایه‌های نازک آپلیتی، بسته‌ها و رگه‌های پگماتی، آپوفیزهای کوچک و توده‌های کوچک مقیاس رخنمون دارند. متاکرینات‌ها شامل مرمهرهای آهکی و دولومیتی هستند که در بالاترین بخش توالی‌های سنگی اولیه، ضخامت چشم‌گیری را به خود اختصاص داده‌اند. در برخی مناطق مانند معدن فیروزه ماجراد، کانه‌زایی مس با ترکیب کانی-شناسی مالاکیت و آزوریت همراه این مرمهرها مشاهده می‌شود. متابازیت‌ها که حجم عمده‌ای از دگرگونی‌های منطقه را به خود اختصاص داده‌اند نیز شامل شیست‌سبز، آمفیبولیت و گارنت‌آمفیبولیت هستند. سنگ‌مادر متابازیت‌ها شامل روانه‌های بازالتی زیردریایی، آتشفشانی-تخریبی‌های وابسته، اجتماعات دایکی دیابازی و توده‌های نفوذی بازیک کوچک بوده‌اند.

در شمال تنگه ماجراد متاریولیت‌ها به شکل گنبد یا میان لایه با متابازیت‌ها و متاکرینات‌ها رخنمون دارند که در برخی نقاط توسط کنگلومرای قاعده‌ای ژوراسیک که سرشار از قطعات سنگ‌های آذرین و دگرگونی نظیر گنیس، گرانیته و میکاشیست است به ضخامت حدود ۱۵۰-۵۰ متر پوشیده شده‌اند (شکل ۲-الف و ب). متاریولیت‌ها به رنگ سفید تا کرم هستند و برگوارگی بارزی نشان می‌دهند. در سطوح برگوارگی این سنگ‌ها، بلاستوفیرهای درشت کوارتز به خوبی قابل مشاهده است. در برخی نقاط، رگه‌های سیلیسی با مقیاس میلیمتری تا دسیمتری به موازات یا عمود بر سطوح برگوارگی متاریولیت‌ها مشاهده می‌شوند. در سطح برخی متاریولیت‌ها دگرسانی پیریت به هماتیت رنگ قرمز آجری به سنگ بخشیده است (شکل ۲ پ تا ج).

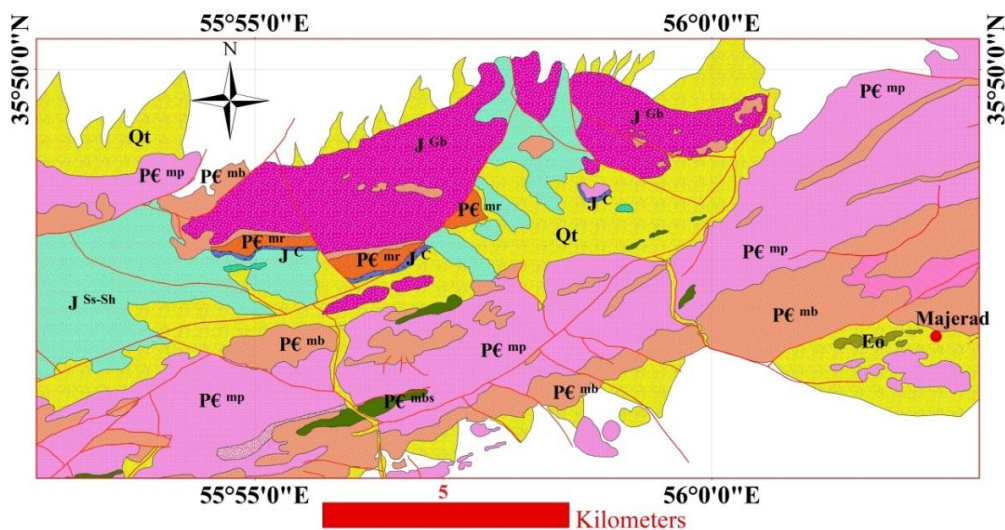
پتروگرافی

کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده متاریولیت‌ها شامل کوارتز، آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز هستند. بافت غالب این سنگ‌ها بلاستوفیری، پورفیریک با خمیره فلسیک و دانه‌ریز و کمی جهت‌یافته است. در متاریولیت‌ها در اثر تبدیل آلکالی فلدسپار به سریسیت بافت لپیدوبلاستیک ناشی از جهت‌یافتگی سریسیت‌ها به‌ویژه در اطراف بلاستوفیرهای کوارتز و آلکالی فلدسپار مشاهده می‌شود (شکل ۳ ث و ج). آلکالی فلدسپارها که اغلب سانیدین هستند به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با مرزهای نامنظم و سرنیزه‌ای به صورت درشت بلور یا بلاستوفیر و با خاموشی موجی مشاهده می‌شوند (شکل ۳ پ، ت و ث). پلاژیوکلازها به صورت نیمه‌شکل‌دار با شکستگی‌های فراوان دیده می‌شوند که شکستگی‌ها آن‌ها اغلب با کوارتز پر شده‌اند (شکل ۳ ب). کوارتز نیز به صورت بلورهای شکل‌دار تا بی‌شکل با خلیج-

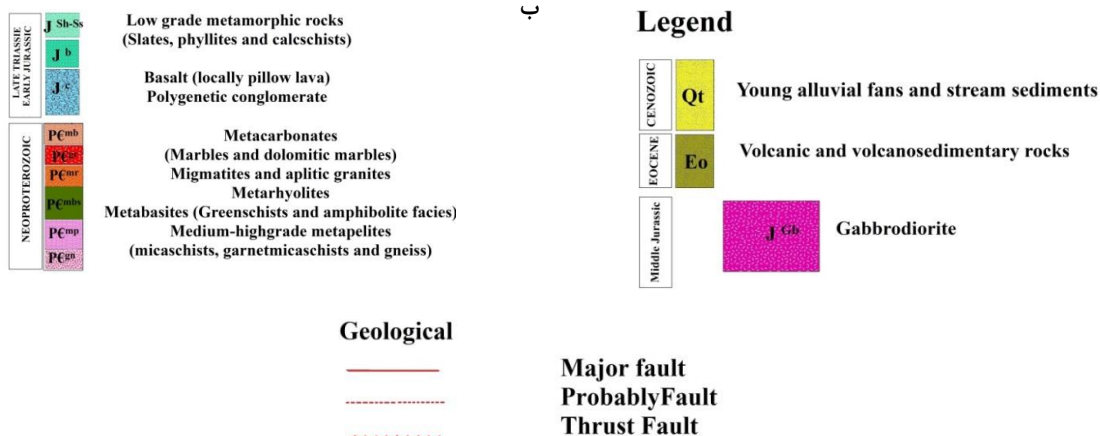
خوردگی در حاشیه‌های بلور در خمیره‌ای از کانی‌های فلسیک ریزدانه مشاهده می‌شود. درز و شکاف‌ها و رگچه‌های پر شده به‌وسیله کوارتز، کربنات و اکسید آهن نیز در این سنگ‌ها به فراوانی مشاهده می‌شود (شکل ۳ آ و ج).



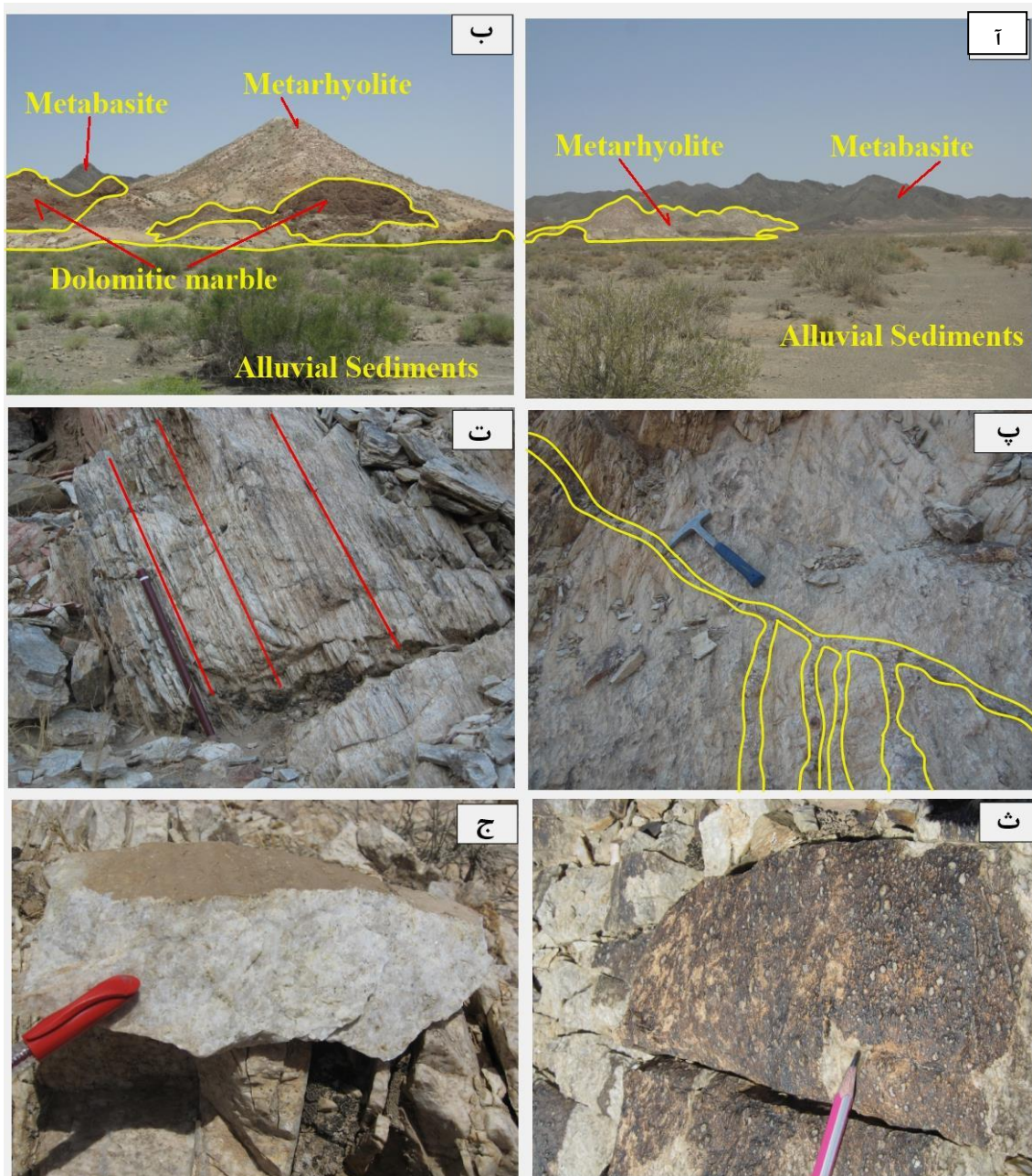
آ



ب

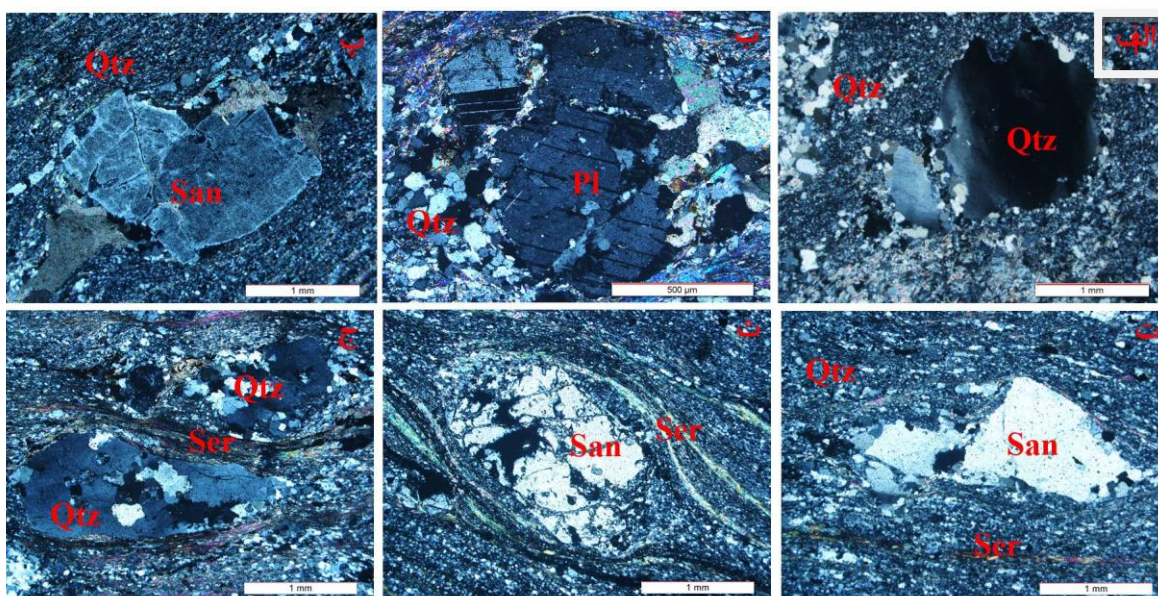


شکل ۱. الف) موقعیت منطقه بررسی شده در نقشه پهنه‌های ساختاری و زمین‌شناسی ایران [۲۲] که با کادر قرمز مشخص شده است. ب) نقشه زمین‌شناسی مجموعه دگرگونی - آذرین ماجراد که بر اساس تصاویر ماهواره‌ای گوگل-ارث و برداشت‌های صحرایی تهیه شده است.

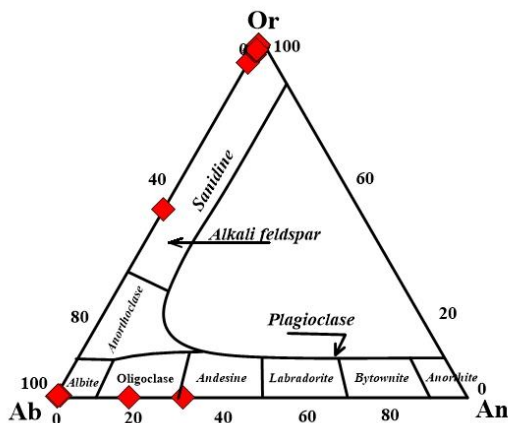


شکل ۲. تصاویری از ویژگی‌های بارز متاریولیت‌های مجموعه دگرگونی ماجراد: آ و ب) دورنمایی از رخنمون‌های متاریولیت‌ها به شکل گنبد و میان لایه با مرمرهای دولومیتی و متابازیت‌ها. پ) حضور رگچه‌های سیلیسی در متاریولیت‌ها. ت) خطوارگی و برگوارگی بارز در متاریولیت‌ها. ث و ج) نمایی از بلاستوفیرهای کوارتز که در سطح متاریولیت‌ها. ت) خطوارگی و برگوارگی بارز در متاریولیت‌ها. ث و ج) نمایی از بلاستوفیرهای کوارتز که در سطح متاریولیت‌ها به خوبی قابل مشاهده هستند.

به‌منظور تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده متاریولیت‌های مجموعه دگرگونی-آذرین ماجراد، ۲۶ نقطه از کانی‌های اصلی این سنگ‌ها مورد تجزیه نقطه‌ای (مایکروپروب) قرار گرفت (جدول ۱). براساس نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای (مایکروپروب) کانی‌ها و براساس رده‌بندی دیبر و همکاران [۲۲] ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازها در حد آلبیت و الیگوکلاز است و آلکالی فلدسپارها نیز از نوع سانیدین (معادل ارتوکلاز) هستند (شکل ۴).



شکل ۳. آ) کوارتز با بافت خلیج خوردگی که به وسیله موزائیکی از دانه‌های تبلوردوباره یافته احاطه شده است. ب) شکستگی بلور پلاژیوکلاز تحت تأثیر میلونیتی شدن که شکستگی‌ها به وسیله کوارتزهای تبلور مجدد یافته پر شده‌اند. پ، ت و ث) تصاویری از حضور بلاستوفیرهای سانیدین و نیز تشکیل سریسیت در حاشیه‌های آن‌ها به خاموشی موجی، دانه‌ریز شدن (ساب‌گرین شدن)، بافت لپیدوبلاستی ناشی از حضور سریسیت‌ها، و دیگر تغییرات مکانیکی این سنگ‌ها در جریان میلونیتی شدن توجه نمایید، ج) تبلور دوباره کوارتز در حاشیه و درون پورفیروکلاست‌های کوارتز. (تمامی تصاویر در نور پلاریزه متقاطع تهیه شده‌اند، نشانه‌های اختصاری کانی‌ها عبارتند از Qtz کوارتز، Pl پلاژیوکلاز، Ser سریسیت و San سانیدین)



شکل ۴. آ) ترکیب شیمیایی فلدسپارها بر اساس رده‌بندی [۲۳].

بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهند که متاریولیت‌ها متحمل فرایندهای دگرگونی و دگرریختی شده و ریزساخت‌های حاصل از این فرایندها در نمونه‌های بررسی شده مشاهده می‌شوند. بررسی‌های پتروگرافی نشان می‌دهند که فنوکریست‌های کوارتز دارای خاموشی موجی و سطوح تماس منحنی یا کنگره‌دار هستند (شکل ۳ آ و ج). در دماهای کم، شکستگی شکننا، انحلال فشاری و حمل مواد از سازوکارهای دگرریختی در کوارتز هستند [۲۴]. ساختارهای تشکیل شده در دماهای اندک شامل شکستگی دانه‌ها، خاموشی موجی، خم‌شدگی، انحلال فشاری و رسوب‌گذاری دوباره به شکل رگه هستند، که اغلب این شواهد در متاریولیت‌های بررسی شده مشاهده می‌شوند.

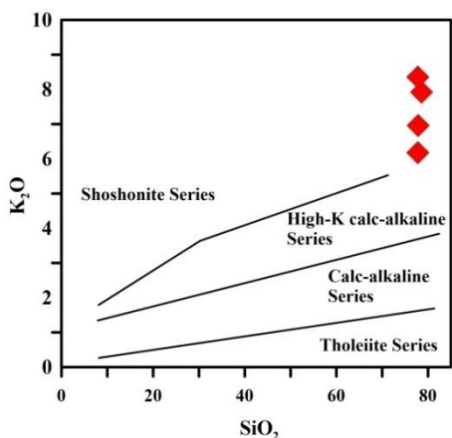
آلکالی فلدسپارها به صورت بلاستوفیرهای عدسی شکل با پوششی از دانه‌های ریز حاصل از ساب‌گرین‌شدن مشاهده می‌شوند. در برخی موارد، برگوارگی در اطراف آن‌ها چرخیده و نشان می‌دهد که این کانی رفتار شکل‌پذیر و خمیری داشته و به صورت عدسی شکل در آمده است. این رفتار، بر زیاد بودن دما در زون‌های بُرشی دلالت دارد و نشان می‌دهد که حداقل دمای حاکم بر دگرریختی حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است [۲۵]. در سایه‌های فشاری دو سوی این بلاستوفیرها، و به دور از تنش‌های حاکم، ته‌نشست کوارتزهای ریزدانه انجام شده است. در برخی موارد، فلدسپارها به انبوه‌هایی ریز دانه و غنی از سریسیت دگرسا شده‌اند و خمیره ریزدانه پیرامون درشت‌بلورها را فرا گرفته‌اند (شکل ۳ ث و ج). دگرریختی فلدسپار به شرایط دگرگونی وابسته است. در درجه‌های پایین دگرگونی، فلدسپارها با شکستگی و دگرریختی شکنا همراه هستند. در درجه‌های کمی بیش‌تر، در حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، هنوز هم دگرریختی با ایجاد ریزشکستگی‌های داخلی همراهی می‌شود، اما با جابه‌جایی لغزشی ضعیفی نیز همراهی دارد. در این درجه‌ها، ماکل‌های دگرریختی نوک تیز، ماکل‌های خمیده، خاموشی موجی، نوارهای دگرریختی و نوارهای پیچ و تاب خورده با مرزهای تیز نیز ممکن است وجود داشته باشند [۲۶].

ژئوشیمی

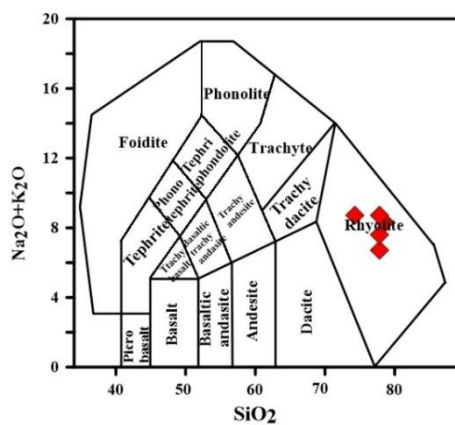
نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی (عناصر کمیاب و نادر خاکی) ۴ نمونه متاریولیتی در جدول ۲ ارائه شده است. نمونه‌های بررسی شده با ترکیب ریولیتی [۲۷] در سری کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی قرار می‌گیرند [۲۸]. در نمودار درجه اشباع از آلومین شاند [۲۹]، نیز نمونه‌ها در محدوده پراآلمین قرار گرفته‌اند. این سنگ‌ها در نمودار CaO در برابر FeO^t هسیه و همکاران [۳۰] در گستره گرانیتهای نوع S (معادل درونی متاریولیت‌ها) قرار می‌گیرند که نشان‌گر منشأ ذوب پوسته قاره‌ای برای ماگمای سازنده آن‌ها است (شکل ۵).

در الگوی تغییرات عناصر نادرخاکی بهنجار شده به گوشته اولیه سان و مک‌دونوف [۳۱]، متاریولیت‌های مجموعه ماجراد غنی‌شدگی از عناصر نادرخاکی سبک (LREEs) نسبت به عناصر نادرخاکی سنگین (HREEs) و ناهنجاری منفی Eu نشان می‌دهند (شکل ۶ آ). کانی‌های کلسیم‌دار به‌ویژه پلاژیوکلاز و آمفیبول میزبان عنصر یورپیم هستند و چون این کانی‌ها در متاریولیت‌ها حضور ندارند یا مقدار آن‌ها بسیار کم است، بنابراین در الگوی بهنجار شده نسبت به کندریت این سنگ‌ها تهی‌شدگی از این عنصر مشاهده می‌شود. عناصر LREEs در جریان ذوب‌بخشی، زودتر از بقیه عناصر وارد فاز مذاب می‌شوند، از این رو، محصولات اولیه ذوب‌بخشی، (به‌ویژه محصولات با نرخ ذوب‌بخشی کم)، غنی‌شدگی از این عناصر را نشان می‌دهند [۳۲].

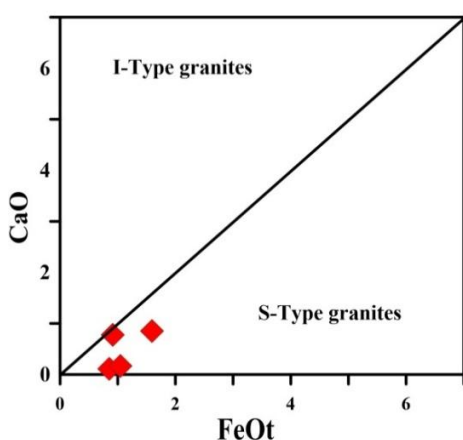
الگوی تغییرات در نمودار عنکبوتی به‌هنجار شده به گوشته اولیه سان و مک‌دونوف [۳۱]، نشان می‌دهد که متاریولیت‌های ماجراد از عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILEs) مانند Cs, Rb, K, Ba و Th غنی‌شدگی و از عناصر با پتانسیل یونی زیاد (HFSEs) مانند Nb و Zr تهی‌شدگی نشان می‌دهند. آنومالی منفی Ti و Nb به‌همراه غنی‌شدگی از U, Th, Pb و K حاکی از نقش سنگ‌های پوسته‌ای در تشکیل ماگما است (شکل ۶ ب) [۳۳]، [۳۴]، [۳۵].



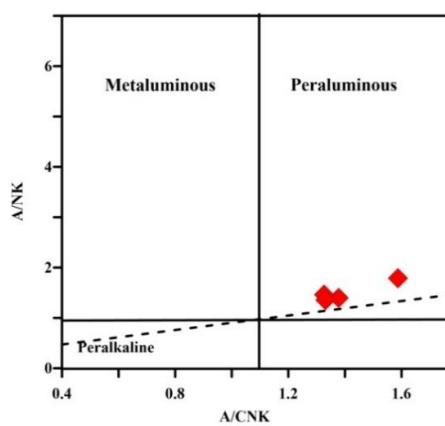
ب



آ

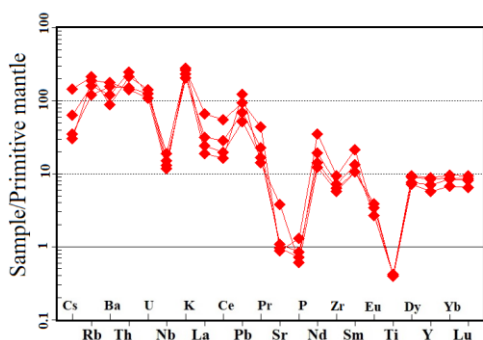


ت

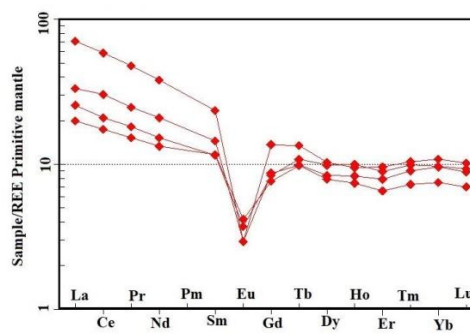


پ

شکل ۵. موقعیت نمونه‌های متاریولیتی مجموعه دگرگونی - آذرین ماجراد در نمودارها: (آ) (Na_2O+K_2O) در مقابل SiO_2 میدلموست و همکاران [۲۷]، (ب) K_2O در مقابل SiO_2 پکسریلو و همکاران [۲۸]، (پ) A/NK در مقابل A/CNK شانند [۲۹]، (ت) CaO در برابر FeO^t هسیه و همکاران [۳۰]



ب

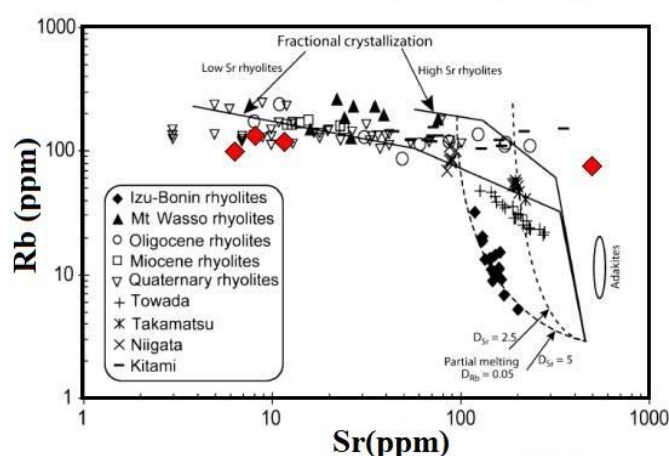


آ

شکل ۶. الگوهای تغییرات فراوانی عناصر کمیاب و خاکی نادر در متاریولیت‌های موجود در مجموعه‌های دگرگونی جنوب شرق شاهرود. (آ) الگوی عناصر خاکی نادر به‌هنجار شده به گوشته اولیه سان و مک‌دونوف [۳۱]، (ب) نمودار چند عنصری به‌هنجار شده به گوشته اولیه سان و مک‌دونوف [۳۱]

نمونه‌های متاریولیتی ماجراد در نمودار آیالو و ایشیواتاری [۳۶] رفتاری مشابه نمونه‌های متعلق به ریفتهای قاره‌ای و کمان‌های قاره‌ای را نشان می‌دهند. در این نمودار نمونه‌های متعلق به ریفتهای قاره‌ای و کمان‌های قاره‌ای روند

افقی و نمونه‌های متعلق به کمان‌های جزایر اقیانوسی روندی نزدیک به عمودی نشان می‌دهند (شکل ۷). روندهای تقریباً عمودی مشاهده شده در این نمودار معرف ماگماهای ریولیتی است که از طریق ذوب‌بخشی حاصل شده و تمرکز عناصر فرعی ناسازگار در آن‌ها تغییرات زیادی نشان می‌دهد. در مقابل ریولیت‌های مرتبط با ریفت‌های قاره‌ای و کمان قاره‌ای از لحاظ مقدار Sr تغییرات زیادی نشان می‌دهند در حالی که تغییرات Rb در آن‌ها محدود است. این امر معرف وقوع تبلور تفریقی در این گونه ماگماها است که تمرکز عناصر فرعی سازگار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تبلور تفریقی فرآیند غالب در ریفت‌های قاره‌ای و کمان قاره‌ای است در حالی که در ریولیت‌های کمان‌های جزایر اقیانوسی فرآیند حاکم ذوب‌بخشی است [۳۶]. چنان‌که مشاهده می‌شود نمونه‌های متاریولیتی ماجراد روندی مشابه با ریفت‌های قاره‌ای نشان می‌دهند که تأییدی بر تشکیل این سنگ‌ها در محیط مشابه محیط‌های کششی درون قاره‌ای و غالب بودن تبلور تفریقی در تشکیل این سنگ‌ها است.

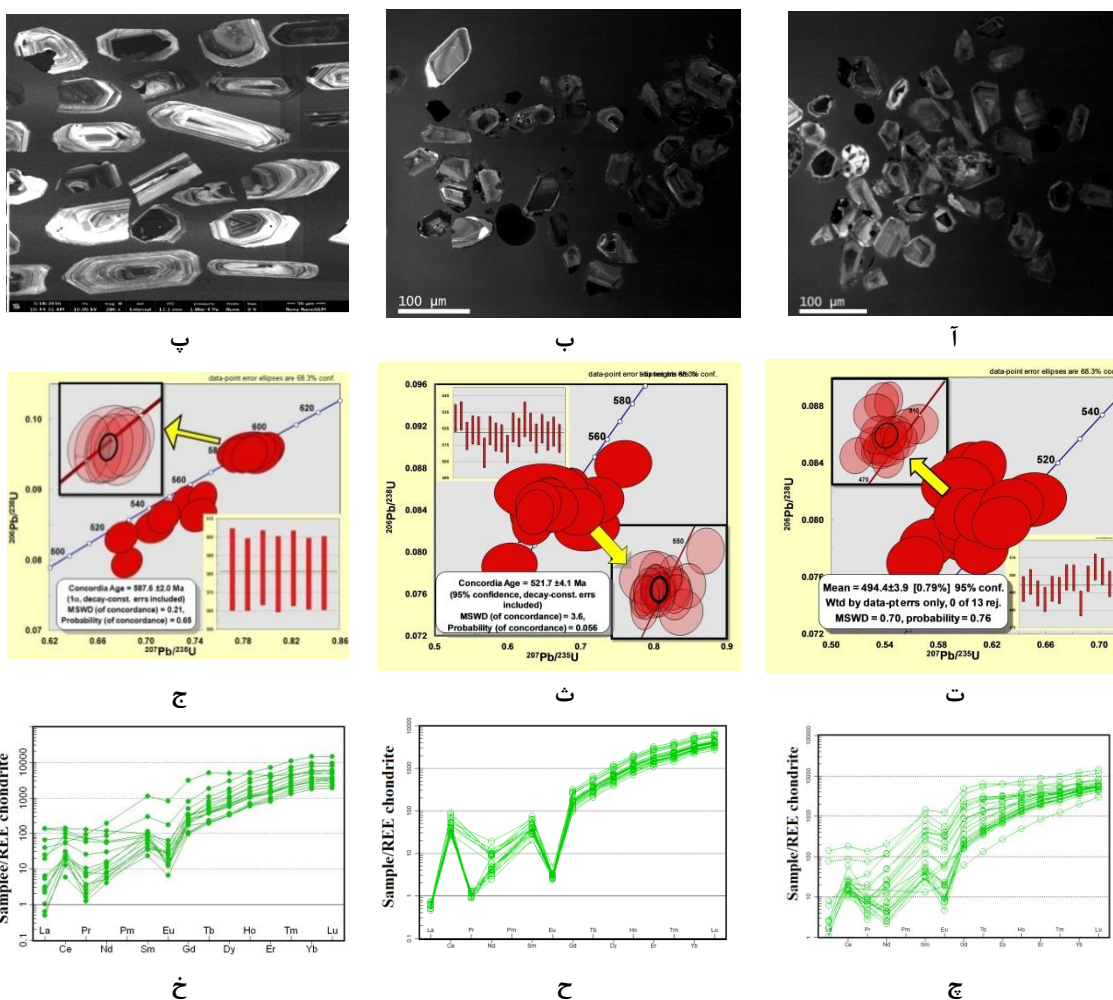


شکل ۷. نمودار Rb در برابر Sr برای ریولیت‌های ریفت قاره‌ای، کمان قاره‌ای و کمان جزایر اقیانوسی از آیالو و ایشیواتاری [۳۶] (متاریولیت‌های ماجراد با لوزی قرمز رنگ مشخص شده‌اند).

سن‌سنجی U-Pb

تصاویر کاتدولومینسانس زیرکن‌های جدا شده از متاریولیت‌های مجموعه ماجراد نشان می‌دهند که زیرکن‌ها دارای اشکال منشوری کوتاه تا طویل هستند بعضی از آن‌ها نیز منطقه‌بندی ترکیبی نشان می‌دهند. اغلب زیرکن‌ها خود شکل تا نیمه‌خود شکل بوده و اندازه آن‌ها حدود ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون است. تجزیه دانه‌های زیرکن جدا شده از سه نمونه متاریولیتی نشان می‌دهد که مقدار U از ۵۶ تا ۲۶۴۹ ppm و مقدار Th از ۴۴ تا ۳۵۱۲ ppm متغیر است. هم‌چنین نسبت Th/U در گستره ۰/۳۱ تا ۰/۷۶ قرار می‌گیرد. نتایج تجزیه شیمیایی اورانیوم-سرب روی زیرکن‌های جدا شده از نمونه‌های متاریولیتی در جدول ۳ ارائه شده و در ترسیم نمودارهای سازگاری از آن‌ها استفاده شده است. نمونه‌های متعلق به مجموعه دگرگونی-آذرین ماجراد (KM-169 و KM-196) سن‌های سازگار $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ در حدود ۴ $\pm 521/7$ و $3/9 \pm 494/4$ میلیون سال نشان می‌دهند. برای مقایسه از یک نمونه متاریولیتی مجموعه دگرگونی-آذرین شترکوه نیز برای تعیین سن استفاده شد (SS-222) که این نمونه، سن سازگاری $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ حدود $2 \pm 587/6$ میلیون سال، معادل نوپروتروژنیک پایانی (ادیاکارن) را نشان می‌دهد (شکل ۸ ت تا ج). با توجه به بررسی‌های انجام

شده روی این مناطق به نظر می‌رسد بازه زمانی به دست آمده از نمونه متاریولیتی شترکوه به واقعیت نزدیک تر بوده است و اندک تفاوت مشاهده شده در سن‌های متاریولیت‌های ماجراد را می‌توان به حوادث بعدی تحمیل شده بر این سنگ‌ها (دگرگونی و دگرریختی میلونیتی) و از دست رفتن اورانیم و سرب سنگ، نسبت داد. نتایج سن‌سنجی به دست آمده برای متاریولیت‌های دیگر مجموعه‌های پی‌سنگی ایران مانند متاریولیت‌های منطقه برنورد به سن $(۵۵۲/۲۳ \pm ۴/۷۳)$ [۳۷] و هرمز به سن‌های (۵۶۷ ± ۱۵) و $(۵۵۸ \pm ۶/۷)$ [۳۸] نیز تأییدی بر این مطلب است. لازم به یادآوری است که در منطقه دوچاه در همین ناحیه در جنوب شرق شاهرود، تعدادی توده‌های گرانیتوئیدی لوکوکرات به درون مجموعه‌های دگرگونی-آذرین نئوپروتروزوییک پایانی نفوذ کرده‌اند که تعیین سن انجام شده به روش U-Pb بر روی آن‌ها، سن $۳/۸ \pm ۵۵۳$ معادل آشکوب ادیاکارن (نئوپروتروزوییک پایانی) را نشان می‌دهد [۱۸]. از آن‌جا که این گرانیت‌ها، جوان‌ترین واحدهای سنگی مجموعه هستند، دامنه سنی ۵۶۰-۵۸۰ معادل با اواخر نئوپروتروزوییک (ادیاکارن) برای متاریولیت‌ها منطقی تر است.



شکل ۸. الف، ب و پ) تصاویر کاتادلومینسانس از زیرکن‌های استخراج شده از متاریولیت‌های ماجراد و شترکوه. ت، ث و ج) نمودارهای سازگاری مبتنی بر نتایج سن‌سنجی به روش U-Pb. چ، ح، خ) نمودارهای تغییرات عناصر خاکی-نادر به‌هنگار شده نسبت به کندریت بونتون [۳۹] برای زیرکن‌های استخراج شده از نمونه‌های متاریولیتی ماجراد.

از مقادیر تمرکز عناصر خاکی نادر زیرکن‌های استخراج شده از متاریولیت‌ها در ترسیم نمودار REE به‌هنجارشده نسبت به کندریت بوینتون [۳۹]، استفاده شده است. الگوهای مشاهده شده دارای طرح‌های پرشیب، آنومالی مثبت Ce و آنومالی منفی Eu هستند (شکل ۸ چ تا خ) که از ویژگی‌های شاخص سنگ‌های آذرین است [۴۰] و [۴۱] (شکل ۸ ث). کانی‌ها و سنگ‌های آذرین معمول، غالباً آنومالی منفی Ce نشان نمی‌دهند، با این حال به‌نظر می‌رسد به‌علت تشابه شعاع یونی سریم ($Ce^{+4}(0.96\text{\AA})$) با شعاع یونی زیرکونیم ($Zr^{+4}(0.84\text{\AA})$) کانی زیرکن به‌عنوان محلی برای جمع‌شدن Ce^{+4} در مذاب عمل می‌کنند. از طرف دیگر به‌علت این‌که Eu^{+2} حالت پایدار عنصر Eu در شرایط احیایی در سنگ‌های آذرین است آنومالی منفی Eu غالباً در سنگ‌های آذرین مشاهده می‌شود.

جدول ۱. نتایج تجزیه میکروپروب (EPMA) فلدسپارهای نمونه متاریولیتی (KM-196) مجموعه دگرگونی-آذرین ماجراد.

| Spots | Core to rim | | | | Core to rim | | | | Core to rim | | | | Core to rim | | | |
|--------------------------------|-------------|-------|--------|-------|-------------|--------|-------|-------|-------------|--------|--------|-------|-------------|--------|--------|--|
| SiO ₂ | ۶۵/۵۳ | ۶۴/۵۰ | ۶۴/۹۱ | ۶۴/۷۷ | ۶۴/۲۷ | ۶۵/۳۵ | ۶۴/۴۲ | ۶۸/۷۵ | ۶۴/۸۷ | ۶۵/۰۰ | ۶۵/۴۵ | ۶۴/۶۴ | ۶۴/۹۷ | ۶۵/۳۰ | ۶۵/۸۵ | |
| TiO ₂ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | |
| Al ₂ O ₃ | ۱۷/۹۴ | ۱۷/۶۵ | ۱۷/۶۶ | ۱۷/۶۴ | ۱۷/۱۰ | ۱۷/۸۹ | ۱۷/۹۰ | ۱۸/۸۵ | ۱۷/۹۳ | ۱۸/۰۷ | ۱۷/۶۶ | ۱۸/۰۲ | ۱۷/۷۸ | ۱۷/۹۸ | ۱۷/۹۸ | |
| FeO | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۴۵ | ۰/۳۵۳ | ۰/۰۳۰ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۲۸ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۶ | |
| CaO | ۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۸ | ۰/۰۲ | ۰/۰۷ | ۰/۰۰ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴ | ۰/۰۳ | ۰/۰۱ | ۰/۰۸ | ۰/۰۶ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۲ | |
| Na ₂ O | ۰/۱۶ | ۰/۲۹ | ۰/۳۳ | ۰/۳۷ | ۰/۴۰ | ۰/۲۰ | ۰/۲۴ | ۱۱/۶۶ | ۰/۲۹ | ۰/۱۴ | ۰/۲۹ | ۰/۲۶ | ۰/۲۵ | ۰/۳۴ | ۰/۳۱ | |
| K ₂ O | ۱۶/۸۵ | ۱۶/۳۴ | ۱۶/۷۸ | ۱۶/۰۴ | ۱۵/۵۰ | ۱۶/۸۵ | ۱۶/۵۲ | ۰/۰۹ | ۱۶/۳۵ | ۱۶/۶۷ | ۱۶/۵۲ | ۱۶/۶۵ | ۱۶/۶۰ | ۱۶/۳۳ | ۱۶/۷۷ | |
| BaO | ۰/۴۵ | ۰/۵۷ | ۰/۵۷ | ۰/۶۲ | ۰/۶۰ | ۰/۴۵ | ۰/۳۷ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۳۰ | ۰/۱۳ | ۰/۰۰ | ۰/۱۱ | ۰/۵۵ | ۰/۰۰ | |
| Total | ۱۰۰/۹۴ | ۹۹/۴۲ | ۱۰۰/۳۷ | ۹۹/۸۲ | ۹۷/۹۷ | ۱۰۰/۷۸ | ۹۹/۴۸ | ۹۹/۴۰ | ۹۹/۴۸ | ۱۰۰/۲۱ | ۱۰۰/۱۵ | ۹۹/۶۵ | ۹۹/۷۷ | ۱۰۰/۵۱ | ۱۰۰/۹۴ | |
| Si | ۳/۰۱ | ۳/۰۱ | ۳/۰۱ | ۳/۰۱ | ۳/۰۴ | ۳/۰۱ | ۳/۰۱ | ۳/۰۲ | ۳/۰۱ | ۳/۰۱ | ۳/۰۲ | ۳/۰۰ | ۳/۰۲ | ۳/۰۱ | ۳/۰۲ | |
| Ti | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | |
| Al | ۰/۹۷ | ۰/۹۷ | ۰/۹۷ | ۰/۹۷ | ۰/۹۵ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹ | ۰/۹۸ | ۰/۹۸ | ۰/۹۹ | ۰/۹۶ | ۰/۹۹ | ۰/۹۷ | ۰/۹۸ | ۰/۹۷ | |
| Na | ۰/۰۱ | ۰/۰۳ | ۰/۰۳ | ۰/۰۳ | ۰/۰۴ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۳ | ۰/۰۱ | ۰/۰۳ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۳ | ۰/۰۳ | |
| K | ۰/۹۹ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹ | ۰/۹۵ | ۰/۹۳ | ۰/۹۹ | ۰/۹۸ | ۰/۰۱ | ۰/۹۷ | ۰/۹۸ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹ | ۰/۹۸ | ۰/۹۶ | ۰/۹۸ | |
| Ba | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰ | |
| Or (K+Ba) | ۹۸/۶۰ | ۹۷/۳۶ | ۹۶/۷۹ | ۹۶/۵۷ | ۹۵/۹۷ | ۹۸/۲۲ | ۹۷/۷۱ | ۰/۵۰ | ۹۷/۲۳ | ۹۸/۶۸ | ۹۷/۰۶ | ۹۷/۳۵ | ۹۷/۷۵ | ۹۶/۹۵ | ۹۷/۱۷ | |
| Ab (Na) | ۱/۴۰ | ۲/۵۹ | ۲/۸۴ | ۳/۳۵ | ۳/۶۸ | ۱/۷۸ | ۲/۱۱ | ۹۹/۳۰ | ۲/۶۱ | ۱/۲۵ | ۲/۵۵ | ۲/۳۵ | ۲/۲۵ | ۳/۰۵ | ۲/۷۲ | |
| An (Ca+Mn+Mg) | ۰/۰۰ | ۰/۰۴ | ۰/۳۷ | ۰/۰۸ | ۰/۳۵ | ۰/۰۰ | ۰/۱۸ | ۰/۱۹ | ۰/۱۵ | ۰/۰۷ | ۰/۳۹ | ۰/۳۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۱۱ | |

تعیین منشأ و جای‌گاه زمین‌ساختی متاریولیت‌ها

بازه زمانی نئوپروتروزویک پایانی-کامبرین با رشد ابرقاره گندوانا شناخته می‌شود. رشد ابرقاره گندوانا دارای تاریخچه‌ای طولانی از حوادث کوهزایی است که از شکسته شدن ابرقاره رودینیا (در ۸۰۰-۸۷۰ میلیون سال قبل) شروع شده و در کامبرین با چسبیدن قطعات جدا شده به یک‌دیگر، پایان یافته است [۴۲]، [۴۳]، [۴۴]، [۴۵]، [۴۶]. پیدایش ماگماتیسم عظیم مرتبط با فرورانش کادومین (ادیاکارن-کامبرین) در سرزمین‌های پی‌سنگی هیمالیا تا ایران،

ترکیه و یونان، تأییدی بر ماگمازایی در حاشیه فعال قاره‌ای نوع آندی در امتداد حاشیه شمالی ابرقاره گندوانا است [۲۲]، [۴۷]، [۴۷]، [۴۸]، [۴۹]، [۵۰]، [۵۱]، [۵۲]، [۵۳].

بر اساس یافته‌های جدید و بررسی‌های دقیقی که روی برخی از مناطق پی‌سنگی جنوب‌شرق شاهرود انجام شده است، تحولات سنگ‌شناسی در این مناطق را می‌توان به دو بخش کلی تقسیم کرد:

الف) ماگمازایی هم‌زمان با تشکیل حوضه‌های بازشونده درون قاره‌ای (از نوع پشت کمانی یا کافتی).

ب) فعالیت‌های ماگمایی مرتبط با بسته شدن حوضه‌های آتشفشانی-رسوبی قدیمی در اوج شرایط دما و فشار دگرگونی.

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل متاریولیت‌های مجموعه دگرگونی - آذرین ماجراد به روش‌های XRF و ICP-MS. اکسیدهای عناصر اصلی (بر حسب درصد وزنی) و مقادیر عناصر فرعی بر حسب قسمت در میلیون (می-باشند)

| Sample name | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O _{3t} | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | L.O.I | Total |
|-------------|------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------|------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------|--------|
| KM167 | ۷۴/۱۲ | ۰/۰۸۲۳ | ۱۱/۴۷ | ۱/۵۲ | ۰/۰۲ | ۰/۸۲ | ۰/۸۱ | ۰/۵۲۸۱ | ۵/۸۹ | ۰/۰۱۵ | ۱/۹۶ | ۹۷/۲۳ |
| KM196 | ۷۷/۴۱ | ۰/۰۸۸۹ | ۱۱/۴۶ | ۰/۸۴ | ۰/۰۱ | ۰/۳۲ | ۰/۱۱ | ۰/۴۰۸۲ | ۷/۸۰ | ۰/۰۲۸ | ۰/۷۶ | ۹۹/۲۳ |
| KM288 | ۷۵/۹۶ | ۰/۰۸۴۸ | ۱۱/۵۳ | ۱/۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۳۷ | ۰/۱۶ | ۰/۳۳۸۶ | ۸/۱۶ | ۰/۰۱۸ | ۵/۸۲ | ۱۰۳/۴۷ |
| KM169 | ۷۵/۹۱ | ۰/۰۸۳۴ | ۱۰/۸۲ | ۰/۸۹ | ۰/۰۲ | ۰/۳۴ | ۰/۷۶ | ۰/۶۱۰۹ | ۶/۷۸ | ۰/۰۱۳ | ۱/۲۲ | ۹۷/۴۵ |
| | Cr | Cu | Li | Be | Sc | V | Co | Ni | Zn | Ga | Rb | Sr |
| KM167 | ۱۱/۴ | ۴/۲۷ | ۱۴/۸ | ۱/۹۳ | ۱/۱۱ | ۴/۰۹ | ۰/۶۱۶ | ۲/۱ | ۱۱/۲ | ۱۵/۵ | ۱۳۶ | ۲۰/۳ |
| KM196 | ۱۷/۶ | ۵/۳۶ | ۵/۸۲ | ۰/۶۱ | ۸/۳۵ | ۳/۳۲ | ۰/۷۷۱ | ۲/۹ | ۸/۴۴ | ۱۳/۷ | ۱۰۲ | ۱۸/۷ |
| KM288 | ۱۹/۲ | ۵/۶۱ | ۴/۷۷ | ۰/۷۹ | ۱۱/۹ | ۴/۵۳ | ۰/۶۴ | ۲/۵۵ | ۱۹ | ۱۶/۱ | ۱۲۰ | ۲۲/۹ |
| KM169 | ۲۶/۹ | ۶/۳۹ | ۳/۸۵ | ۰/۶۴ | ۹/۷۵ | ۴/۰۶ | ۱/۰۶ | ۴/۳۸ | ۹/۵۲ | ۱۴/۳ | ۷۷/۱ | ۷۹/۷ |
| | Y | Mo | Cd | In | Sb | Cs | Ba | La | Ce | Pr | Nd | Sm |
| KM167 | ۳۲ | ۰/۵۷ | ۰/۰۵۶ | ۰/۰۷۷ | ۰/۶۴ | ۱/۱۴ | ۶۱۳ | ۲۱/۶ | ۵۰/۷ | ۶/۲۷ | ۲۶/۱ | ۵/۸۹ |
| KM196 | ۴۰/۱ | ۰/۹۳ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۲۷ | ۰/۷۵ | ۰/۵۰ | ۸۳۷ | ۴۵/۷ | ۹۷/۹ | ۱۲/۱ | ۴۷/۶ | ۹/۵۶ |
| KM288 | ۳۸/۵ | ۰/۶۲ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۴۶ | ۰/۷۳ | ۰/۲۴ | ۱۲۳۹ | ۱۶/۶ | ۳۵ | ۴/۶۲ | ۱۹ | ۴/۷ |
| KM169 | ۲۶/۳ | ۰/۵۹ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۲۹ | ۰/۸۷ | ۰/۲۸ | ۱۱۰۷ | ۱۲/۹ | ۲۹/۱ | ۳/۸۷ | ۱۶/۶ | ۴/۷۴ |
| | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | W | Re | Tl |
| KM167 | ۰/۴۵ | ۴/۷۲ | ۰/۹۸۱ | ۵/۶۳ | ۱/۲۴ | ۳/۴۴ | ۰/۶۱ | ۴/۲۱ | ۰/۶۰۳ | ۲/۴۶ | <۰/۰۰۲ | ۰/۳۱ |
| KM196 | ۰/۴۵ | ۷/۴۳ | ۱/۳۳ | ۶/۹۶ | ۱/۴۲ | ۴/۲ | ۰/۷۱۱ | ۴/۷۷ | ۰/۶۹۱ | ۱/۲۸ | <۰/۰۰۲ | ۰/۳۵۹ |
| KM288 | ۰/۵۷۳ | ۴/۵۶ | ۱/۰۷ | ۶/۶۴ | ۱/۴۹ | ۳/۹۱ | ۰/۶۷۱ | ۴/۲۵ | ۰/۶۳۴ | ۱/۵۸ | <۰/۰۰۲ | ۰/۳۶۴ |
| KM169 | ۰/۶۴۴ | ۴/۱۶ | ۰/۹۶۹ | ۵/۳۲ | ۱/۱ | ۲/۸۷ | ۰/۴۹۶ | ۳/۳۱ | ۰/۴۷۶ | ۲/۳۶ | <۰/۰۰۲ | ۰/۲۶ |
| | Pb | Bi | Th | U | Nb | Ta | Zr | Hf | | | | |
| KM167 | ۴/۸۹ | ۰/۰۳۳ | ۱۸/۳ | ۲/۹۷ | ۱۰/۸ | ۱۰/۸ | ۸۰/۳ | ۳/۹۸ | | | | |
| KM196 | ۶/۶۶ | ۰/۰۱۴ | ۲۱ | ۲/۶۴ | ۱۳/۴ | ۱/۵ | ۱۰۵ | ۴/۳ | | | | |
| KM288 | ۳/۶۷ | ۰/۰۳۴ | ۱۲/۲ | ۲/۲۸ | ۸/۴۲ | ۰/۹۰ | ۷۰/۸ | ۳/۸۵ | | | | |
| KM169 | ۸/۷۳ | <۰/۰۰۲ | ۱۲/۹ | ۲/۶۶ | ۹/۲۳ | ۰/۸۶ | ۶۳/۷ | ۳/۲۹ | | | | |

جدول ۳. نسبت‌های ایزوتوپی و سن سنجی U-Pb به روش LA-ICPMS بر روی زیرکن‌های نمونه‌های ریولیتی مجموعه‌های دگرگونی-آذرین ماجراد و شترکوه.

| Sample spots | Isotopic ratio | | | | | | | |
|--------------|---|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|---|-----------------|
| | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | $\pm \sigma \%$ |
| KM169-01 | ۰.۵۴۲۲ | ۰.۱۶۸ | ۰.۵۹۴۸۴ | ۰.۱۶۰۳ | ۰.۷۹۳۵ | ۰.۱۱۹ | ۰.۱۹۸۵ | ۰.۰۰۴ |
| KM169-02 | ۰.۵۵۳۹ | ۰.۱۶ | ۰.۶۱۲۶۲ | ۰.۱۴۹۶ | ۰.۸۰۰۲ | ۰.۱۱۹ | ۰.۲۶۳۸ | ۰.۰۰۴۹ |
| KM169-03 | ۰.۵۵۳۶ | ۰.۱۷۳ | ۰.۶۰۳۴۷ | ۰.۱۶۳۳ | ۰.۷۸۹۲ | ۰.۱۲ | ۰.۳۳۹۲ | ۰.۰۰۴۸ |
| KM169-04 | ۰.۵۲۹۱ | ۰.۱۵۱ | ۰.۵۷۳۴۷ | ۰.۱۳۷۷ | ۰.۷۸۳۶ | ۰.۱۱۶ | ۰.۲۴۰۶ | ۰.۰۰۴۶ |
| KM169-05 | ۰.۵۲۳۵ | ۰.۱۴۷ | ۰.۶۰۳۸۹ | ۰.۱۴۲۴ | ۰.۸۳۶ | ۰.۱۲۴ | ۰.۲۷۶۸ | ۰.۰۰۴۷ |
| KM169-06 | ۰.۶۹۶۹ | ۰.۵۱۴ | ۰.۲۱۸۳۸ | ۰.۱۵۵۶ | ۰.۲۲۷۲ | ۰.۰۴۳ | ۰.۱۰۹۲ | ۰.۰۰۴۱ |
| KM169-07 | ۰.۵۲۹۹ | ۰.۱۵۵ | ۰.۵۶۳۴۵ | ۰.۱۳۹۵ | ۰.۷۷۱۳ | ۰.۱۱۶ | ۰.۲۲۴۱ | ۰.۰۰۴۱ |
| KM169-08 | ۰.۵۳۱۴ | ۰.۱۳۱ | ۰.۶۱۳۰۴ | ۰.۱۱۸۳ | ۰.۸۳۷۱ | ۰.۱۲۲ | ۰.۲۴۳۴ | ۰.۰۰۳۸ |
| KM169-09 | ۰.۵۱۸ | ۰.۱۸ | ۰.۵۱۴۹۹ | ۰.۱۵۹۴ | ۰.۷۲۲۲ | ۰.۱۱۲ | ۰.۱۶۲۱ | ۰.۰۰۳۳ |
| KM169-10 | ۰.۵۵۵۲ | ۰.۱۴۴ | ۰.۶۰۶۴۹ | ۰.۱۲۵۶ | ۰.۷۹۳۵ | ۰.۱۱۸ | ۰.۲۰۶۲ | ۰.۰۰۳۳ |
| KM169-11 | ۰.۵۲۴۳ | ۰.۱۷۶ | ۰.۵۹۴۹۱ | ۰.۱۷۵۷ | ۰.۸۲۴۴ | ۰.۱۲۸ | ۰.۲۴۶۲ | ۰.۰۰۵۱ |
| KM169-12 | ۰.۵۶۰۳ | ۰.۱۹۹ | ۰.۶۱۰۵۸ | ۰.۱۹۳ | ۰.۷۹۲ | ۰.۱۲۵ | ۰.۲۳۹۵ | ۰.۰۰۵۵ |
| KM169-13 | ۰.۵۶۲۷ | ۰.۱۴۸ | ۰.۶۲۲۷۳ | ۰.۱۳۱۶ | ۰.۸۰۴۴ | ۰.۱۲ | ۰.۲۴۵۴ | ۰.۰۰۴۱ |
| KM169-14 | ۰.۵۴۲ | ۰.۱۵۷ | ۰.۵۹۹۲۹ | ۰.۱۴۵۸ | ۰.۸۰۴ | ۰.۱۲۲ | ۰.۲۴۸۵ | ۰.۰۰۴۴ |
| KM169-15 | ۰.۵۷۱۲ | ۰.۱۵۴ | ۰.۶۱۲۵۱ | ۰.۱۳۴۶ | ۰.۷۷۹۷ | ۰.۱۱۷ | ۰.۲۲۹۲ | ۰.۰۰۴ |
| KM169-16 | ۰.۴۶۵۷ | ۰.۰۷۴ | ۰.۱۵۵۹۷ | ۰.۲۴۵۴ | ۰.۲۴۳۶ | ۰.۰۵۵ | ۰.۰۷۷ | ۰.۰۰۵ |
| KM169-17 | ۰.۵۵۶۱ | ۰.۱۵۷ | ۰.۶۱۴۰۹ | ۰.۱۴۳۱ | ۰.۸۰۳۱ | ۰.۱۲۲ | ۰.۲۳۵۱ | ۰.۰۰۴۱ |
| KM169-18 | ۰.۵۷۶۲ | ۰.۱۹۱ | ۰.۵۷۹۵۶ | ۰.۱۶۸۱ | ۰.۷۳۱۶ | ۰.۱۱۵ | ۰.۲۲۳۴ | ۰.۰۰۴۵ |
| KM169-19 | ۰.۵۸۱۱ | ۰.۱۷۸ | ۰.۶۵۰۴۶ | ۰.۱۶۹۶ | ۰.۸۱۴۴ | ۰.۱۲۶ | ۰.۲۵۱۲ | ۰.۰۰۴۷ |
| KM169-20 | ۰.۵۷۰۴ | ۰.۱۶۷ | ۰.۶۳۵۲۱ | ۰.۱۵۶۲ | ۰.۸۱۰۲ | ۰.۱۲۵ | ۰.۲۳۵ | ۰.۰۰۴۳ |
| KM169-21 | ۰.۵۷۲ | ۰.۱۶ | ۰.۶۲۷۶۶ | ۰.۱۴۴۳ | ۰.۷۹۸۲ | ۰.۱۲۲ | ۰.۲۳۳ | ۰.۰۰۳۹ |
| KM169-22 | ۰.۵۸۱۳ | ۰.۱۶ | ۰.۶۹۷۷۴ | ۰.۱۵۶۳ | ۰.۸۷۳۲ | ۰.۱۳۳ | ۰.۲۴۶۵ | ۰.۰۰۴۱ |
| KM169-23 | ۰.۴۸۰۲ | ۰.۰۵۵۱ | ۰.۱۴۶۶۴ | ۰.۱۶۵۶ | ۰.۲۲۲۱ | ۰.۰۴۴ | ۰.۰۶۸۱ | ۰.۰۰۳۱ |
| KM169-24 | ۰.۵۶۱۸ | ۰.۰۴۸۸ | ۰.۱۸۰۹۷ | ۰.۱۵۲۷ | ۰.۲۳۴۳ | ۰.۰۴۸ | ۰.۰۹۹۷ | ۰.۰۰۵۵ |
| KM169-25 | ۰.۵۶۸ | ۰.۱۸۵ | ۰.۶۸۳۳۶ | ۰.۱۹۳۲ | ۰.۸۷۴۷ | ۰.۱۳۹ | ۰.۱۸۳ | ۰.۰۰۳۶ |
| KM169-26 | ۰.۶۲۳۳ | ۰.۰۲۳۱ | ۰.۶۴۵۱۶ | ۰.۲۰۲۶ | ۰.۷۵۲۵ | ۰.۱۲۲ | ۰.۲۱۶۴ | ۰.۰۰۴۶ |
| KM169-27 | ۰.۶۲۹ | ۰.۰۲۴۵ | ۰.۶۸۲۲ | ۰.۲۴ | ۰.۷۸۸۵ | ۰.۱۳۱ | ۰.۲۲۹۳ | ۰.۰۰۵۱ |
| KM196-01 | ۰.۱۳۸۱ | ۰.۰۴۴۲ | ۱/۱۷۱۶۸ | ۰.۴۷۲۶ | ۰.۹۰۴۵ | ۰.۱۵۳ | ۰.۶۹۲۴ | ۰.۰۱۴۸ |
| KM196-02 | ۰.۷۱۴۹ | ۰.۰۲۳۵ | ۰.۸۳۲۷۱ | ۰.۲۴۱۲ | ۰.۸۴۶۶ | ۰.۱۳۸ | ۰.۳۲۰۹ | ۰.۰۰۶۹ |
| KM196-03 | ۰.۸۰۰۵ | ۰.۰۲۴۲ | ۰.۹۴۴۱۶ | ۰.۲۴۵۳ | ۰.۸۵۷ | ۰.۱۳۸ | ۰.۳۷۶۴ | ۰.۰۰۷۵ |
| KM196-04 | ۰.۸۸۵۸ | ۰.۰۲۹۱ | ۱/۱۴۱۸۶ | ۰.۳۲۹۶ | ۰.۹۳۶۴ | ۰.۱۵۶ | ۰.۴۹۹۲ | ۰.۰۱۱ |
| KM196-05 | ۰.۶۲۳۱ | ۰.۰۲۲۳ | ۰.۷۵۸۵۹ | ۰.۲۵۶۸ | ۰.۸۸۴۱ | ۰.۱۴۹ | ۰.۳۲۴۳ | ۰.۰۰۷۵ |
| KM196-06 | ۰.۵۸۰۶ | ۰.۱۶۶ | ۰.۶۸۷۴ | ۰.۱۶۹ | ۰.۸۵۹۲ | ۰.۱۳۷ | ۰.۲۷۵۹ | ۰.۰۰۵۳ |
| KM196-07 | ۰.۹۰۳۳ | ۰.۰۲۶۶ | ۱/۰۶۹۰۲ | ۰.۲۷۱۹ | ۰.۸۵۸۵ | ۰.۱۴ | ۰.۴۱۰۶ | ۰.۰۰۸ |
| KM196-08 | ۰.۱۵۲۳۷ | ۰.۰۴۳۸ | ۲/۰۶۹۱۶ | ۰.۴۸۵۸ | ۰.۹۵۳۷ | ۰.۱۵۸ | ۰.۸۱۳۵ | ۰.۰۱۵۵ |
| KM196-09 | ۰.۱۱۵۳۶ | ۰.۰۳۲۳ | ۱/۵۱۴۹۹ | ۰.۳۶۱۱ | ۰.۹۵۲۳ | ۰.۱۵۶ | ۰.۵۷۹۴ | ۰.۰۱۱۱ |
| KM196-10 | ۰.۵۵۱۲ | ۰.۱۹۵ | ۰.۶۵۴۸۲ | ۰.۲۱۰۳ | ۰.۸۶۱۳ | ۰.۱۴۳ | ۰.۲۷۲۱ | ۰.۰۰۶۲ |
| KM196-11 | ۰.۵۴۵۹ | ۰.۱۷۹ | ۰.۶۳۳۷۷ | ۰.۱۸۷۵ | ۰.۸۴۱۱ | ۰.۱۳۸ | ۰.۲۵۲۴ | ۰.۰۰۵۳ |
| KM196-12 | ۰.۵۵۵۲ | ۰.۰۲۴۴ | ۰.۶۰۳۸۵ | ۰.۲۴۹ | ۰.۷۸۷۸ | ۰.۱۳۹ | ۰.۲۵۳۱ | ۰.۰۰۷۱ |
| KM196-13 | ۰.۵۹۳۴ | ۰.۰۲۰۳ | ۰.۶۹۴۱۳ | ۰.۲۱۶ | ۰.۸۴۷۳ | ۰.۱۴۲ | ۰.۲۸۱۷ | ۰.۰۰۶۱ |
| KM196-14 | ۰.۵۶۲۲ | ۰.۱۸۹ | ۰.۶۵۷۱۹ | ۰.۲۰۱۲ | ۰.۸۴۶۵ | ۰.۱۴۱ | ۰.۲۵۴۲ | ۰.۰۰۵۵ |
| KM196-15 | ۰.۶۲۲۸ | ۰.۰۲۷۷ | ۰.۷۰۸۸۳ | ۰.۲۹۵۷ | ۰.۸۲۴۱ | ۰.۱۵ | ۰.۲۵۵۴ | ۰.۰۰۷۴ |
| KM196-16 | ۰.۵۷۱ | ۰.۱۹۴ | ۰.۶۶۷۷۲ | ۰.۲۰۶۶ | ۰.۸۴۶۷ | ۰.۱۴۲ | ۰.۲۵۱۸ | ۰.۰۰۵۶ |
| KM196-17 | ۰.۵۶۵۷ | ۰.۱۹۳ | ۰.۶۵۶۳۴ | ۰.۲۰۵ | ۰.۸۳۹۸ | ۰.۱۴۲ | ۰.۲۴۰۱ | ۰.۰۰۵۴ |
| KM196-18 | ۰.۵۴۳ | ۰.۱۵۹ | ۰.۶۲۹۲۲ | ۰.۱۶۴۹ | ۰.۸۳۸۷ | ۰.۱۳۸ | ۰.۲۵۷۹ | ۰.۰۰۴۸ |
| KM196-19 | ۰.۵۵۵۴ | ۰.۱۷۷ | ۰.۶۳۵۳۶ | ۰.۱۸۳۳ | ۰.۸۲۷۹ | ۰.۱۳۹ | ۰.۲۵۰۵ | ۰.۰۰۵ |
| KM196-20 | ۰.۶۱۴۴ | ۰.۰۲۳۱ | ۰.۷۲۱۵۳ | ۰.۲۵۲۹ | ۰.۸۴۹۸ | ۰.۱۴۷ | ۰.۲۷۱۲ | ۰.۰۰۶۵ |
| KM196-21 | ۰.۵۹۷۲ | ۰.۰۲۰۳ | ۰.۶۹۷۰۳ | ۰.۲۱۷۳ | ۰.۸۴۴۷ | ۰.۱۴۴ | ۰.۲۷۰۱ | ۰.۰۰۰۶ |
| KM196-22 | ۰.۵۴۵۴ | ۰.۰۳۶۵ | ۰.۶۴۶۵۷ | ۰.۴۱۹۹ | ۰.۸۵۷۸ | ۰.۱۷۶ | ۰.۱۵۰۲ | ۰.۰۰۵۳ |

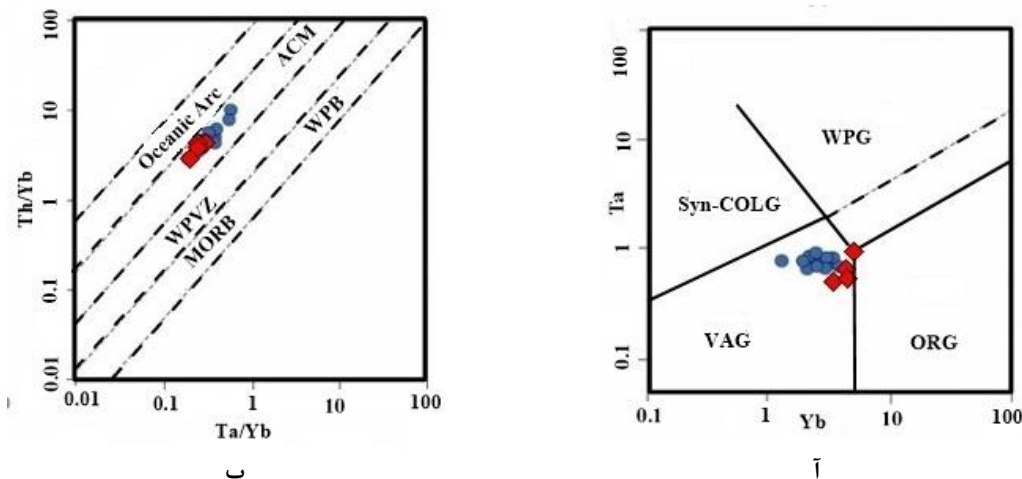
| Isotopic ratio | | | | | | | | |
|----------------|---|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|---|-----------------|
| Sample spots | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | $\pm \sigma \%$ |
| KM196-23 | ۰/۰۵۵۷۴ | ۰/۰۰۱۶۱ | ۰/۶۵۴۸۳ | ۰/۰۱۷۱۱ | ۰/۰۸۵ | ۰/۰۰۱۴۳ | ۰/۰۲۴۹۴ | ۰/۰۰۰۴۷ |
| KM196-24 | ۰/۰۶۰۲۳ | ۰/۰۰۲۱۳ | ۰/۶۹۸۱۳ | ۰/۰۲۳۹۵ | ۰/۰۸۳۸۶ | ۰/۰۰۱۴۶ | ۰/۰۲۴۵۶ | ۰/۰۰۰۵۸ |
| KM196-25 | ۰/۰۵۶۰۱ | ۰/۰۰۱۷۹ | ۰/۶۵۶۸۷ | ۰/۰۱۹۳۲ | ۰/۰۸۴۸۵ | ۰/۰۰۱۴۵ | ۰/۰۲۴۷۷ | ۰/۰۰۰۰۵ |
| KM196-26 | ۰/۰۵۷۳۵ | ۰/۰۰۱۸۷ | ۰/۶۶۶۷۲ | ۰/۰۲۰۱۵ | ۰/۰۸۴۱۲ | ۰/۰۰۱۴۵ | ۰/۰۲۴۵۹ | ۰/۰۰۰۵۳ |
| KM196-27 | ۰/۰۵۵۰۴ | ۰/۰۰۱۸۷ | ۰/۶۴۲۹۹ | ۰/۰۲۰۴ | ۰/۰۸۴۵۴ | ۰/۰۰۱۴۷ | ۰/۰۲۴۱۴ | ۰/۰۰۰۵۲ |
| KM196-28 | ۰/۰۵۵۱۱ | ۰/۰۰۱۵۸ | ۰/۶۳۸۶۲ | ۰/۰۱۶۷۲ | ۰/۰۸۳۸۵ | ۰/۰۰۱۴۲ | ۰/۰۲۲۹۸ | ۰/۰۰۰۴۲ |
| SS-222-01 | ۰/۰۵۹۶ | ۰/۰۰۱۴ | ۰/۷۸۳۶ | ۰/۰۱۶۶ | ۰/۰۹۵۴ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۳۲۴ | ۰/۰۰۰۰۸ |
| SS-222-02 | ۰/۰۵۹۷ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۷۸۱۴ | ۰/۰۰۸۱ | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۸۳ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| SS-222-03 | ۰/۰۶۰۵ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۷۹۷۵ | ۰/۰۱۰۸ | ۰/۰۹۵۶ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| SS-222-04 | ۰/۰۶۰۶ | ۰/۰۰۱ | ۰/۷۹۳۲ | ۰/۰۱۱۹ | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۸۲ | ۰/۰۰۰۰۶ |
| SS-222-05 | ۰/۰۶۰۲ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۷۳۲۳ | ۰/۰۰۷۴ | ۰/۰۸۸۳ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۷۴ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| SS-2220-6 | ۰/۰۶۲۳ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۶۸۴۲ | ۰/۰۰۸۵ | ۰/۰۷۹۷ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۲۱۱ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| SS-222-07 | ۰/۰۶۰۴ | ۰/۰۰۱ | ۰/۷۰۷۱ | ۰/۰۱۰۹ | ۰/۰۸۴۸ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۸۳ | ۰/۰۰۰۰۶ |
| SS-222-08 | ۰/۰۵۹۲ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۶۷۹۸ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۸۳۳ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۴۶ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| SS-222-09 | ۰/۰۶۱ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۷۴۶۶ | ۰/۰۰۷۷ | ۰/۰۸۸۹ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۶۸ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| SS-222-10 | ۰/۰۶ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۷۹۰۱ | ۰/۰۱۱۲ | ۰/۰۹۵۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۳۱۱ | ۰/۰۰۰۰۶ |
| SS-222-11 | ۰/۰۶۲۴ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۷۴۳۲ | ۰/۰۱ | ۰/۰۸۶۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۴۲ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| SS-222-12 | ۰/۰۶۰۱ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۷۱۴۷ | ۰/۰۰۸۸ | ۰/۰۸۶۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۳۷۹ | ۰/۰۰۰۰۵ |
| SS-222-13 | ۰/۰۵۹۱ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۷۷۴۳ | ۰/۰۰۷۴ | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۳۷۷ | ۰/۰۰۰۰۴ |
| SS-222-14 | ۰/۰۵۹۹ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۷۸۵۴ | ۰/۰۰۹۸ | ۰/۰۹۵۱ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲۸۴ | ۰/۰۰۰۰۵ |

| Age estimated | | | | | | | | | | |
|---------------|---|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|---|-----------------|-------------------|------------------|
| Sample spots | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | $\pm \sigma \%$ | ^{232}Th | ^{238}U |
| KM169-01 | ۳۷۹/۸ | ۶۸/۱ | ۴۷۴ | ۱۰/۲۱ | ۴۹۲/۲ | ۷/۱ | ۳۹۷/۲ | ۷/۸۵ | ۴۵۴/۲۵ | ۸۰۶/۹ |
| KM169-02 | ۴۲۶/۷ | ۶۲/۶۲ | ۴۸۵/۲ | ۹/۴۲ | ۴۹۶/۲ | ۷/۰۹ | ۵۲۶/۳ | ۹/۷۳ | ۴۳۶/۶۱ | ۱۰۶۶/۲ |
| KM169-03 | ۴۲۶/۶ | ۶۷/۷۹ | ۴۷۹/۴ | ۱۰/۳۴ | ۴۸۹/۷ | ۷/۱۴ | ۴۷۷/۷ | ۹/۴۹ | ۶۵۱/۰۷ | ۱۳۴۷/۹۶ |
| KM169-04 | ۳۲۵/۱ | ۶۳/۵۱ | ۴۵۹/۶ | ۸/۸۹ | ۴۸۶/۳ | ۶/۹۶ | ۴۸۰/۶ | ۹/۰۸ | ۵۸۱/۴۹ | ۱۴۶۲/۷ |
| KM169-05 | ۳۰۰/۸ | ۶۲/۸۱ | ۴۷۹/۷ | ۹/۰۲ | ۵۱۷/۶ | ۷/۲۷ | ۵۵۱/۹ | ۹/۱۵ | ۸۲۱/۴ | ۱۲۱۴/۳۳ |
| KM169-06 | ۹۱۹/۳ | ۱۴۴/۷۱ | ۲۰۰/۶ | ۱۲/۹۷ | ۱۴۴/۸ | ۲/۷۱ | ۲۱۹/۵ | ۸/۲۲ | ۱۵۲/۲ | ۳۶۶/۵۱ |
| KM169-07 | ۳۲۸/۵ | ۶۴/۹۹ | ۴۵۳/۸ | ۹/۰۶ | ۴۷۸/۹ | ۶/۹۲ | ۴۴۷/۹ | ۸/۰۷ | ۸۲۰/۴۶ | ۱۵۰۹/۰۷ |
| KM169-08 | ۳۳۴/۶ | ۵۴/۸۹ | ۴۸۵/۵ | ۷/۴۵ | ۵۱۸/۲ | ۷/۲۸ | ۴۸۶/۲ | ۷/۴۷ | ۳۲۸۶/۷۴ | ۴۳۵۱ |
| KM169-09 | ۲۷۶/۴ | ۷۷/۷۹ | ۴۲۱/۸ | ۱۰/۶۹ | ۴۴۹/۵ | ۶/۷۵ | ۳۲۵ | ۶/۵۶ | ۸۲۲/۵۵ | ۱۱۴۷/۷۹ |
| KM169-10 | ۴۳۳/۱ | ۵۶/۳۷ | ۴۸۱/۳ | ۷/۹۴ | ۴۹۲/۳ | ۷/۰۲ | ۴۱۲/۷ | ۶/۵۹ | ۲۶۴۹/۱۲ | ۳۵۱۲/۱۷ |
| KM169-11 | ۳۰۴/۴ | ۷۴/۵۶ | ۴۷۴ | ۱۱/۱۹ | ۵۱۰/۷ | ۷/۶۱ | ۴۹۱/۸ | ۱۰/۱۳ | ۴۱۹/۴۴ | ۹۱۰/۸۳ |
| KM169-12 | ۴۵۳/۱ | ۷۶/۸۴ | ۴۸۳/۹ | ۱۲/۱۷ | ۴۹۱/۴ | ۷/۴۷ | ۴۷۸/۳ | ۱۰/۸۳ | ۴۹۴/۶۵ | ۱۱۸۱/۰۲ |
| KM169-13 | ۴۶۲/۳ | ۵۷/۷۱ | ۴۹۱/۶ | ۸/۲۴ | ۴۹۸/۸ | ۷/۱۵ | ۴۹۰/۱ | ۸/۱۲ | ۷۷۶/۴۹ | ۱۶۷۵/۶۸ |
| KM169-14 | ۳۷۹/۱ | ۶۳/۷۵ | ۴۷۶/۸ | ۹/۲۵ | ۴۹۸/۵ | ۷/۲۶ | ۴۹۶/۲ | ۸/۶۶ | ۷۰۲/۳ | ۱۳۴۴/۵۶ |
| KM169-15 | ۴۹۵/۹ | ۵۹/۰۱ | ۴۸۵/۱ | ۸/۴۸ | ۴۸۴ | ۷ | ۴۵۸/۱ | ۷/۸۱ | ۷۸۱/۶۲ | ۱۷۱۴/۰۲ |
| KM169-16 | ۲۷/۳ | ۳۴۲/۴۶ | ۱۴۷/۲ | ۲۱/۵۵ | ۱۵۵/۱ | ۳/۴۳ | ۱۵۵/۱ | ۹/۹۵ | ۱۴۷/۱۸ | ۳۲۷/۹۵ |
| KM169-17 | ۴۳۶/۷ | ۶۱/۲۵ | ۴۸۶/۱ | ۹ | ۴۹۸ | ۷/۲۵ | ۴۶۹/۷ | ۸/۱۷ | ۶۳۴/۷۱ | ۱۳۰۵/۶۴ |
| KM169-18 | ۵۱۵/۱ | ۷۱/۶۲ | ۴۶۴/۲ | ۱۰/۸۱ | ۴۵۵/۲ | ۶/۸۹ | ۴۴۶/۶ | ۸/۹۳ | ۷۶۲/۶۶ | ۱۵۱۵/۵۵ |
| KM169-19 | ۵۳۳/۴ | ۶۶/۱۲ | ۵۰۸/۸ | ۱۰/۴۳ | ۵۰۴/۷ | ۷/۵ | ۵۰۱/۵ | ۹/۳۶ | ۴۳۳/۵۵ | ۹۶۵/۱۴ |
| KM169-20 | ۴۹۲/۵ | ۶۳/۹۷ | ۴۹۹/۳ | ۹/۷ | ۵۰۲/۲ | ۷/۴۳ | ۴۶۹/۵ | ۸/۵۵ | ۵۴۶/۳ | ۱۲۳۰/۲ |
| KM169-21 | ۴۹۸/۹ | ۶۰/۹۶ | ۴۹۴/۶ | ۹ | ۴۹۵/۱ | ۷/۲۸ | ۴۶۵/۵ | ۷/۸ | ۱۰۶۰/۹۵ | ۱۸۷۰/۴۲ |
| KM169-22 | ۵۳۴/۱ | ۵۹/۶۸ | ۵۳۷/۴ | ۹/۳۵ | ۵۳۹/۷ | ۷/۹۱ | ۴۹۲/۲ | ۸/۱۴ | ۱۱۰۲/۲۵ | ۱۸۹۰/۴۸ |
| KM169-23 | ۱۰۰/۴ | ۲۵/۸۹ | ۱۳۸/۹ | ۱۴/۶۷ | ۱۴۱/۶ | ۲/۷۹ | ۱۳۷/۱ | ۶/۲۴ | ۲۴۰/۶۶ | ۴۶۰/۴۶ |
| KM169-24 | ۴۵۸/۶ | ۱۸۲/۵۵ | ۱۶۸/۹ | ۱۳/۱۳ | ۱۴۹/۳ | ۳ | ۲۰۰/۵ | ۱۰/۹۶ | ۱۵۴/۱۸ | ۶۵۸/۵۸ |
| KM169-25 | ۴۸۳/۳ | ۷۱/۱۳ | ۵۲۸/۷ | ۱۱/۶۶ | ۵۴۰/۵ | ۸/۲۳ | ۳۶۶/۶ | ۷/۱۷ | ۱۴۷۶/۳۶ | ۲۱۱۷/۸۶ |
| KM169-26 | ۶۸۵/۶ | ۷۳/۹۸ | ۵۰۵/۵ | ۱۲/۵۱ | ۴۶۷/۷ | ۷/۳۲ | ۴۳۲/۶ | ۹/۰۷ | ۶۲۲/۰۷ | ۱۱۱۷/۰۱ |
| KM169-27 | ۷۰۴/۸ | ۸۰/۷۷ | ۵۲۸/۱ | ۱۴/۴۸ | ۴۸۹/۲ | ۷/۸۱ | ۴۵۸/۳ | ۱۰/۰۷ | ۴۲۱/۶۴ | ۶۸۱/۷۵ |
| KM196-01 | ۲۲۰۳/۵ | ۵۴/۵۱ | ۱۰۱۵/۲ | ۱۷/۶۶ | ۵۵۸/۲ | ۹/۰۷ | ۱۳۵۳/۲ | ۲۷/۹۷ | ۳۷۰/۴۸ | ۷۷۷/۱۹ |

| Sample spots | Age estimated | | | | | | | | | |
|--------------|---|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|---|-----------------|-------------------|------------------|
| | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\pm \sigma \%$ | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | $\pm \sigma \%$ | ^{232}Th | ^{238}U |
| KM196-02 | ۹۷۱/۴ | ۶۵/۷۵ | ۶۱۵/۱ | ۱۳/۳۶ | ۵۳۳/۹ | ۸/۲۱ | ۶۳۸/۳ | ۱۳/۵۸ | ۴۰۷/۸۱ | ۸۱۴/۴۷ |
| KM196-03 | ۱۱۹۸/۳ | ۵۸/۴۵ | ۶۷۵/۱ | ۱۲/۸۱ | ۵۳۰ | ۸/۲۲ | ۷۴۶/۸ | ۱۴/۶۲ | ۶۰۵/۵۵ | ۱۱۴۲/۶۸ |
| KM196-04 | ۱۳۹۵/۱ | ۶۱/۵۹ | ۷۷۳/۴ | ۱۵/۶۲ | ۵۷۷ | ۹/۱۷ | ۹۸۴/۶ | ۳۱/۱۳ | ۲۸۷/۲۸ | ۶۹۱/۹۴ |
| KM196-05 | ۶۸۴/۸ | ۷۷/۷۶ | ۵۷۳/۲ | ۱۴/۸۳ | ۵۴۶/۱ | ۸/۸۴ | ۶۴۵/۱ | ۱۴/۶۱ | ۷۷۱/۲۶ | ۱۳۸۲/۰۸ |
| KM196-06 | ۵۳۱/۴ | ۶۲/۲ | ۵۳۱/۲ | ۱۰/۱۷ | ۵۳۱/۴ | ۸/۱۳ | ۵۵۰ | ۱۰/۳۷ | ۶۶۸/۰۱ | ۱۳۰۶/۴ |
| KM196-07 | ۱۴۳۲/۵ | ۵۵/۳۳ | ۷۳۸/۳ | ۱۳/۳۵ | ۵۳۱ | ۸/۳۲ | ۸۱۳/۴ | ۱۵/۴۷ | ۵۸۱/۹۹ | ۱۱۰۸/۶۱ |
| KM196-08 | ۲۴۲۷/۶ | ۴۶/۴۶ | ۱۱۳۸/۷ | ۱۶/۰۷ | ۵۸۷/۲ | ۹/۳۱ | ۱۵۸۰/۹ | ۲۹ | ۴۷۷/۷۵ | ۱۰۲۹/۹۶ |
| KM196-09 | ۱۸۸۵/۵ | ۴۹/۵۸ | ۹۳۶/۵ | ۱۴/۵۸ | ۵۸۶/۴ | ۹/۱۷ | ۱۱۳۸/۴ | ۲۱/۲ | ۴۱۷/۹۳ | ۹۰۴/۲۶ |
| KM196-10 | ۴۱۶/۹ | ۷۶/۶۶ | ۵۱۱/۴ | ۱۲/۹ | ۵۳۲/۶ | ۸/۵ | ۵۴۲/۵ | ۱۲/۲ | ۳۳۶/۰۷ | ۷۵۶/۳۲ |
| KM196-11 | ۳۹۵/۴ | ۷۱/۲۱ | ۴۹۸/۴ | ۱۱/۶۵ | ۵۲۰/۶ | ۸/۲۳ | ۵۰۳/۷ | ۱۰/۵۱ | ۳۹۷/۷۴ | ۸۴۳/۵۶ |
| KM196-12 | ۴۳۳/۱ | ۹۴/۹۲ | ۴۷۹/۷ | ۱۵/۷۶ | ۴۸۸/۸ | ۸/۳۳ | ۵۰۵/۲ | ۱۴/۰۹ | ۳۳۲/۹۹ | ۸۰۹/۷۸ |
| KM196-13 | ۵۷۹/۵ | ۷۲/۶۶ | ۵۳۵/۳ | ۱۲/۹۵ | ۵۲۴/۳ | ۸/۴۵ | ۵۶۱/۴ | ۱۲/۰۷ | ۴۳۵/۳۴ | ۸۹۸/۸۵ |
| KM196-14 | ۴۶۰/۳ | ۷۳/۲۵ | ۵۱۲/۹ | ۱۲/۳۳ | ۵۲۳/۸ | ۸/۳۸ | ۵۰۷/۴ | ۱۰/۹۱ | ۳۲۲/۴۴ | ۸۰۰/۱۸ |
| KM196-15 | ۶۸۳/۶ | ۹۲/۱ | ۵۴۴ | ۱۷/۵۷ | ۵۱۰/۵ | ۸/۹۴ | ۵۰۹/۷ | ۱۴/۵۲ | ۳۴۷/۷۴ | ۷۱۴/۳۳ |
| KM196-16 | ۴۹۴/۷ | ۷۳/۶۴ | ۵۱۹/۳ | ۱۲/۵۸ | ۵۲۳/۹ | ۸/۴۶ | ۵۰۲/۶ | ۱۱/۱۲ | ۳۷۱/۴۵ | ۸۱۶/۹۶ |
| KM196-17 | ۴۷۴/۱ | ۷۴/۴۷ | ۵۱۲/۴ | ۱۲/۵۷ | ۵۱۹/۹ | ۸/۴۴ | ۴۷۹/۵ | ۱۰/۵۹ | ۳۱۹/۴۶ | ۶۸۴/۲ |
| KM196-18 | ۳۸۳/۳ | ۶۴/۴۶ | ۴۹۵/۶ | ۱۰/۲۸ | ۵۱۹/۲ | ۸/۳۳ | ۵۱۴/۶ | ۹/۵۲ | ۷۹۳/۹ | ۱۳۸۵/۳۷ |
| KM196-19 | ۴۳۳/۹ | ۶۹/۱۴ | ۴۹۹/۴ | ۱۱/۳۸ | ۵۱۲/۷ | ۸/۲۸ | ۵۰۰/۲ | ۹/۸۱ | ۹۶۶/۹۵ | ۱۵۸۰/۲۵ |
| KM196-20 | ۶۵۴/۸ | ۷۸/۷۴ | ۵۵۱/۶ | ۱۴/۹۲ | ۵۲۵/۸ | ۸/۷۳ | ۵۴۰/۹ | ۱۲/۸۳ | ۲۲۲/۵۶ | ۶۱۰ |
| KM196-21 | ۵۹۳/۵ | ۷۱/۶۴ | ۵۳۷ | ۱۳ | ۵۲۲/۷ | ۸/۵۵ | ۵۳۸/۶ | ۱۱/۷۲ | ۳۵۵/۱۱ | ۷۸۰/۹۵ |
| KM196-22 | ۳۹۳/۵ | ۱۴۳/۱ | ۵۰۶/۴ | ۲۵/۸۹ | ۵۳۰/۵ | ۱۰/۴۵ | ۳۰۱/۳ | ۱۰/۴۸ | ۲۳۷/۳۲ | ۵۷۶/۴۴ |
| KM196-23 | ۴۴۱/۸ | ۶۲/۹۶ | ۵۱۱/۴ | ۱۰/۵ | ۵۲۵/۹ | ۸/۴۹ | ۴۹۸ | ۹/۳۹ | ۹۳۳/۲ | ۱۵۵۹/۰۱ |
| KM196-24 | ۶۱۱/۹ | ۷۴/۵۱ | ۵۳۷/۷ | ۱۳/۷۲ | ۵۱۹/۲ | ۸/۶۸ | ۴۹۰/۴ | ۱۱/۳۷ | ۳۲۷/۳۸ | ۶۸۲/۳۹ |
| KM196-25 | ۴۵۲/۶ | ۶۹/۵۱ | ۵۱۲/۷ | ۱۱/۸۴ | ۵۲۵ | ۸/۶۱ | ۴۹۴/۵ | ۹/۸۹ | ۴۳۸/۹۷ | ۹۳۱/۳۵ |
| KM196-26 | ۵۰۴/۶ | ۷۰/۷۵ | ۵۱۸/۷ | ۱۲/۲۷ | ۵۲۰/۶ | ۸/۶ | ۴۹۱/۱ | ۱۰/۵۲ | ۴۰۰/۴۹ | ۸۷۳/۸ |
| KM196-27 | ۴۱۳/۶ | ۷۳/۸۲ | ۵۰۴/۲ | ۱۲/۶۱ | ۵۲۳/۲ | ۸/۷۱ | ۴۸۲/۲ | ۱۰/۳۵ | ۴۶۳/۲۶ | ۹۴۱/۴۱ |
| KM196-28 | ۴۱۶/۶ | ۶۲/۳۸ | ۵۰۱/۵ | ۱۰/۳۶ | ۵۱۹/۱ | ۸/۴۷ | ۴۵۹/۲ | ۸/۳۸ | ۱۴۳۱/۳۷ | ۲۰۴۹/۹۵ |
| SS-222-01 | ۵۸۸/۳ | ۴۹/۴ | ۵۸۷/۵ | ۱۱/۱ | ۵۸۷/۶ | ۹/۵ | ۶۴۴/۹ | ۱۶ | ۵۵/۶ | ۱۰۹/۷ |
| SS-222-02 | ۵۹۲/۸ | ۲۳/۸ | ۵۸۴/۸ | ۹/۸ | ۵۸۶/۳ | ۴/۶ | ۵۶۳/۵ | ۷/۹ | ۱۶۵۳ | ۲۶۰/۶۷ |
| SS-222-03 | ۶۲۲ | ۳۱/۷ | ۵۸۸/۵ | ۱۰/۲ | ۵۹۵/۴ | ۶/۱ | ۴۵۹/۴ | ۷/۹ | ۳۵۷/۳ | ۵۰۳/۲ |
| SS-222-04 | ۶۲۳/۷ | ۳۵/۱ | ۵۸۵ | ۱۰/۳ | ۵۹۳ | ۶/۷ | ۵۶۲/۸ | ۱۱/۱ | ۲۰۱/۹ | ۴۲۰ |
| SS-222-05 | ۶۰۹/۵ | ۲۳/۹ | ۵۴۵/۴ | ۹/۱ | ۵۵۷/۹ | ۴/۳ | ۵۴۶ | ۷/۸ | ۹۲۵/۴ | ۲۰۹۷ |
| SS-222-06 | ۶۸۲/۷ | ۲۹ | ۴۹۴/۵ | ۸/۵ | ۵۲۹/۳ | ۵/۱ | ۴۲۱/۴ | ۷/۳ | ۵۰۱/۸ | ۱۰۲۶/۷ |
| SS-222-07 | ۶۱۹/۴ | ۳۶ | ۵۲۵ | ۹/۳ | ۵۴۳ | ۶/۵ | ۵۶۴/۶ | ۱۰/۸ | ۱۶۹/۷ | ۳۳۳/۳ |
| SS-222-08 | ۵۷۴/۸ | ۳۱/۴ | ۵۱۵/۷ | ۸/۹ | ۵۲۶/۶ | ۵/۵ | ۴۹۰/۵ | ۸/۵ | ۱۸۳/۵ | ۳۴۳/۴ |
| SS-222-09 | ۶۳۷/۹ | ۲۴/۱ | ۵۴۸/۷ | ۹/۲ | ۵۶۶/۳ | ۴/۵ | ۵۳۴/۳ | ۸/۱ | ۵۱۰/۲ | ۱۶۲۳/۴ |
| SS-222-10 | ۶۰۳/۷ | ۳۳/۳ | ۵۸۸/۱ | ۱۰/۲ | ۵۹۱/۲ | ۶/۴ | ۶۱۸/۹ | ۱۱/۳ | ۱۵۶/۴ | ۳۲۸/۹ |
| SS-222-11 | ۶۸۶/۲ | ۳۱/۲ | ۵۳۴/۶ | ۹/۳ | ۵۶۴/۳ | ۵/۸ | ۴۸۲/۶ | ۸/۶ | ۲۱۳/۲ | ۳۹۱/۶ |
| SS-222-12 | ۶۰۸/۱ | ۲۸/۹ | ۵۳۳/۲ | ۹/۱ | ۵۴۷/۶ | ۵/۲ | ۵۵۵/۵ | ۹ | ۲۴۴/۵ | ۵۰۰/۳ |
| SS-222-13 | ۵۷۰/۷ | ۲۳ | ۵۸۵/۳ | ۹/۷ | ۵۸۲/۲ | ۴/۳ | ۵۵۱/۹ | ۷/۷ | ۶۰۰/۹ | ۱۶۴۸/۴ |
| SS-222-14 | ۶۰۰/۲ | ۲۹/۵ | ۵۸۵/۶ | ۱۰ | ۵۸۸/۶ | ۵/۶ | ۵۶۶/۶ | ۹/۳ | ۲۸۷ | ۵۱۶/۴ |

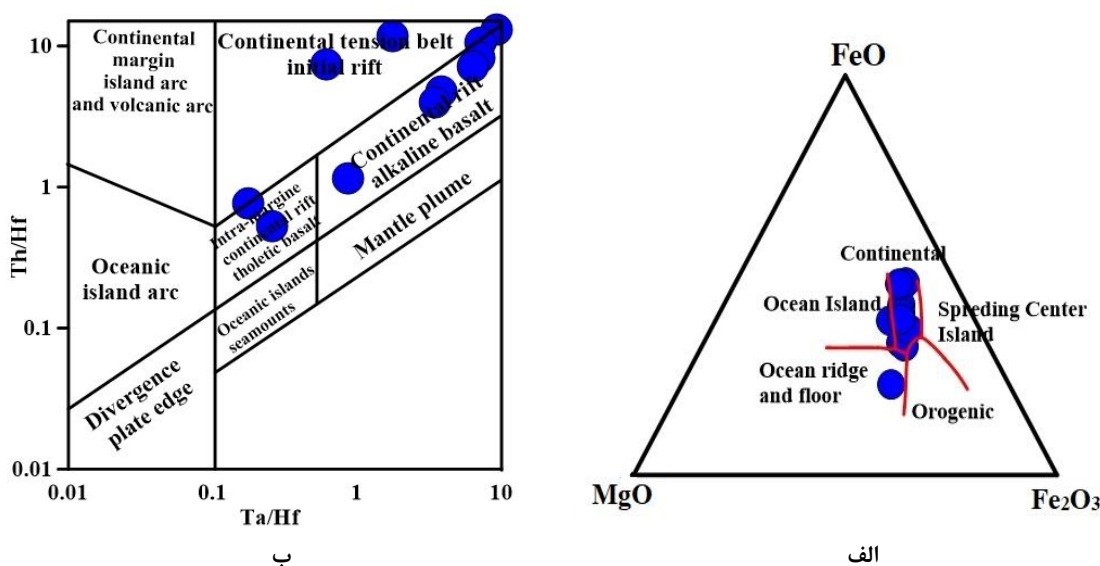
اغلب فعالیت‌های ماگمایی که از آن‌ها به‌عنوان فعالیت‌های ماگمایی حاشیه قاره‌ای نوع آندی یاد می‌شود، در واقع فعالیت‌های محیط‌های برخوردی و یا مرتبط با فرورانش‌های ناقص هستند. اگرچه در نمودارهای ژئوشیمیایی، بخشی از این سنگ‌ها شواهد ماگماتیسیم حاشیه قاره‌ای نشان می‌دهند ولی بررسی‌های دقیق صحرایی این موضوع را تأیید نمی‌کنند. به‌عنوان مثال، میان لایه‌ها و گنبد‌های ریولیتی هم‌زمان با کشش و توسعه حوضه‌های رسوبی اواخر نئوپروتروزوئیک که غالباً به‌صورت بین لایه‌ای با کربنات‌ها (متاکربنات‌های کنونی) یافت می‌شوند، در نمودارهای

ژئوشیمیایی شواهد محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای را نشان می‌دهند. در شکل ۹ موقعیت متاریولیت‌های مجموعه ماجراد و ریولیت‌های مشابه در جزیره هرمز روی نمودارهای تعیین جای‌گاه تکتونیکی مشخص شده است که همگی نمونه‌ها جای‌گاه کمان آتشفشانی و حاشیه فعال قاره‌ای را نشان می‌دهند.



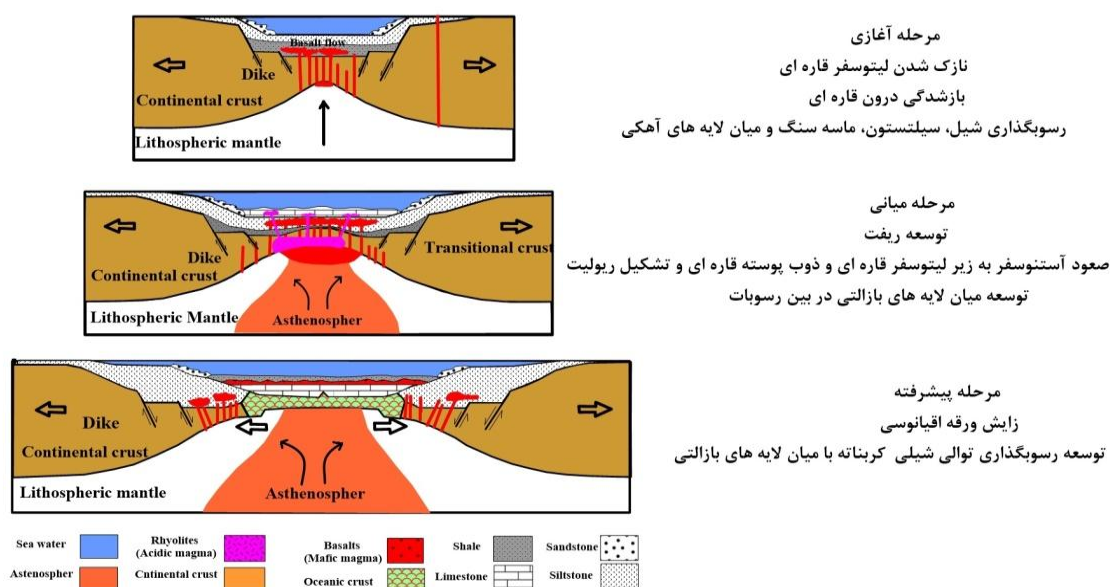
شکل ۹. موقعیت متاریولیت‌های مجموعه دگرگونی ماجراد (لوزی قرمز) و ریولیت‌های جزیره هرمز (دایره آبی) [۳۸] روی: الف) نمودار Ta در برابر Yb [۵۴]. ب) نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb [۵۵]

در حالی که ویژگی‌های ژئوشیمیایی سایر سنگ‌های آذرین یا دگرگونی همراه نظیر متابازیت‌ها که به صورت میان لایه با متاریولیت‌ها مشاهده می‌شوند، این موضوع را به طور آشکار نقض می‌کنند و محیط‌های زمین‌ساختی کششی پشت کمانی تا کافتی را برای سنگ‌های آذرین والد متابازیت‌ها نشان می‌دهند (شکل ۱۰)، که با شواهد صحرایی و توالی سنگی اواخر نئوپروتریویک کاملاً سازگار است [۲۰]. بنابراین در استفاده از نمودارهای ژئوشیمیایی برای تعیین جای‌گاه زمین‌ساختی سنگ‌های دگرگونی اواخر نئوپروتریویک باید با احتیاط عمل شود.



شکل ۱۰- موقعیت نمونه‌های سنگ مادر متابازیت‌های مجموعه دگرگونی - آذرین ماجراد در: الف) نمودار $MgO-Al_2O_3-FeO^T$ [۵۶]. ب) نمودار Th/Hf در برابر Ta/Hf [۵۶].

از آن جاکه متاریولیت‌های بررسی شده در این مقاله به صورت بین لایه‌ای با متاکربنات‌ها، متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌ها یافت می‌شوند، در نتیجه جای‌گاه زمین‌ساختی تشکیل آن‌ها در واقع همان جای‌گاه تشکیل حوضه‌های آتشفشانی-رسوبی درون قاره‌ای از نوع پشت کمان تا کافتی است [۲۰]. جمیع شواهد ارائه شده در مورد محیط تکتونیکی و ویژگی‌های متاریولیت‌های ماجراد با متاریولیت‌های خشک و احیایی عنوان شده به وسیله کریستینسن مطابقت دارد. نتایج سنسجی انجام شده روی متاریولیت‌ها، متابازیت‌ها و گنیس‌های این مجموعه دگرگونی، بازه‌های زمانی نزدیک به هم برای تشکیل این سنگ‌ها را تأیید می‌کند. به علت پیچیدگی زیاد تحولات تحمیل شده بر مجموعه‌های پی‌سنگی پرکامبرین، در صورتی که پژوهش‌های صحرایی صورت گرفته بر اساس شواهد صحرایی و زمین‌شناسی دقیق استوار نباشد، امکان نتیجه‌گیری و ارائه تفسیرهای اشتباه بسیار زیاد است و ارائه تفسیر درست در مورد آن‌ها نیازمند بررسی دقیق و نگاه همه جانبه است. در شکل ۱۱ الگوی زمین‌ساختی نمادین مجموعه دگرگونی ماجراد در بازه زمانی نئوپروتروزوئیک پایانی نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. مدل زمین‌ساختی نمادین برای تحولات زمین‌ساختی مجموعه دگرگونی - آذرین ماجراد در بازه زمانی نئوپروتروزوئیک پایانی با الهام از [۵۷]

برداشت

با توجه به شواهد صحرایی نظیر وضعیت میان‌لایه‌ای متاریولیت‌ها، همراهی آن‌ها با متاکربنات‌ها، متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌ها و همچنین شواهد به‌دست آمده از بررسی دقیق متابازیت‌های این مجموعه می‌توان ادعان داشت که این سنگ‌ها در حوضه‌ای کششی درون‌قاره‌ای (حوضه کششی پشت‌کمانی یا کافتی) تشکیل شده‌اند. با توجه به داده‌های ژئوشیمیایی الگوی تغییرات عناصر کمیاب و نادر خاکی به‌هنجار شده به گوشته اولیه، این سنگ‌ها از عناصر نادر خاکی سبک LREEs و عناصر لیتوفیل بزرگ یون LHLEs غنی‌شدگی و از عناصر با قدرت میدانی زیاد HFSEs تهی‌شدگی نشان می‌دهند. مجموعه شواهد صحرایی و ژئوشیمیایی حاکی از تشکیل متاریولیت‌ها از ذوب بخشی پوسته قاره‌ای زیرین تحت تأثیر گرمای آزاد شده از جای‌گزینی ماگماهای بازیک در اعماق پوسته است. با توجه به نتایج سنسجی انجام شده روی متاریولیت‌های مجموعه‌های دگرگونی ماجراد و شترکوه که برای اولین بار انجام شده است و همچنین

سن‌سنجی گرانیت‌های قطع‌کننده این مجموعه، دامنهٔ سنی اواخر نئوپروتروزویک (ادیاکارن) برای این متاریولیت‌ها منطقی‌تر است و پژوهش‌های انجام شده روی سایر مناطق پی‌سنگی نیز این مطلب را تأیید می‌کنند.

منابع

1. Davies J. H. Stevenson D. J., "Physical model of source region of subduction zone volcanics", *Journal of geophysical Research*, 92 (1992) 2037-2070.
2. Schmiedel T., Breikreuz C., Görz I., Ehling B.C., "Geometry of laccolith margins: 2D and 3D models of the Late Paleozoic Halle Volcanic Complex (Germany)", *International Journal of Earth Sciences*, 104 (2015) 323-333.
3. Ulmer P., "Partial melting in the mantle-wedge the role of H₂O in the genesis of mantle-derived 'arc-related' magmas", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 127 (2001) 581-593.
4. Parman S.W., Grove T. L., "Harzburgite melting with and without H₂O: Experimental data and predictive modeling", *Journal of Geophysical Research*, 109 (2004) B02201.
5. Kushiro I., "Partial melting experiments on peridotite and origin of mid-ocean ridge basalt", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29 (2001) 71-107.
6. Chen S. S., Shi R. D., Gong X. H., Liu D. L., Huang Q. S., Yi G. D., Wu K., Zou H. B., "A syn-collisional model for Early Cretaceous magmatism in the northern and central Lhasa subterranean". *Gondwana Research*, 41 (2017) 93-109.
7. Zou H. B., Fan Q. C., Zhang H. F., "Rapid development of the great Millennium Eruption of Changbaishan (Tianchi) volcano: Evidence from U-Th zircon dating. *Lithos* 119, 289-296.
8. Hildreth, W., Moorbath, S., "Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98 (1988) 455-489.
9. Samuel M. D., Moussa H. E., Azer M. K., "A-type volcanic in Central Eastern Sinai, Egypt", *Journal of African Earth Sciences*, 47 (2007) 203-226.
10. Dufek J., Bergantz G. W., "Lower crustal magma genesis and preservation: a stochastic framework for the evaluation of Basalt-crust interaction", *Journal of Petrology*, 46 (2005) 2167-2195.
11. Sylvester P. J., "Post-collisional strongly peraluminous granites", *Lithos*, 45 (1998) 29-44.
12. Karsli O., Caran Ş., Dokuz A., Çoban H., Chen B., Kandemir R., "A-type granitoids from the Eastern Pontides, NE Turkey: Records for generation of hybrid A-type rocks in a subduction-related environment", *Tectonophysics*, 530-531 (2012) 208-224.

13. Christiansen E. H., "Contrasting processes in silicic magma chambers: evidence from very large volume ignimbrites", *Geological Magazine*, 142 (2005) 669-681.
14. Hassanzadeh J., Stockli D. F., Horton B. K., Axen G. J., Stockli L. D., Grove M., Schmitt A. K., and Walker J. D., "U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic -Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement", *Tectonophysics*, 451 (2008) 71-96.
15. Hosseini H., Sadeghian M., Zhai M., Ghasemi H., "Petrology, geochemistry and Zircon U-Pb dating of Band-e-Hezar Chah metabasites (NE Iran): An evidence for back-arc magmatism along the northern active margin of Gondwana", *Chemie der Erde*, 75 (2015) 207-218.
16. Balaghi Einaloo M., Sadeghian M., Zhai M., Ghasemi H., Mohajjel M., "Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and geochemistry of schists, gneisses and granites in Delbar metamorphic-igneous Complex, SE of Shahrood (Iran)", *Journal of Asian Earth Science*, 92 (2014) 92-124.
17. Rahmati-Ilkhchi M., Jerabek P., Faryad S. W., Koyi H. A., "Mid-Cimmerian, Early Alpine and Late Cenozoic orogenic events in the Shotor Kuh Metamorphic complex, Great Kavir Block, NE Iran", *Tectonophysics* 494 (2010) 101-117.
۱۸. ویس‌کرمی م.، صادقیان م.، شکاری س.، "ژئوکرونولوژی گرانیتوئیدهای نئوپروتروزوئیک پایانی شمال آغل کندو (جنوب دو چاه - جنوب شرق شاهرود)"، بیست و چهارمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران (۱۳۹۵).
۱۹. صادقیان م.، حسینی س. ح.، همتی ع.، شکاری س.، "سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی، زمین‌زمان‌سنجی گرانیتوئیدهای جنوب-باختر میامی"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰۳، (۱۳۹۵) ۴۱-۶۰.
۲۰. ویس‌کرمی م.، صادقیان م.، قاسمی ح.، جای م.، "پتروولوژی، ژئوشیمی و سن‌سنجی متابازیت‌های پروتروزوئیک پایانی مجموعه دگرگونی ماجراد (جنوب شرق شاهرود): گامی به سوی شناخت تحولات ژئودینامیکی سرزمین‌های گندوانایی ایران، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، در دست چاپ.
۲۱. شکاری س.، صادقیان م.، جای م.، قاسمی ح.، "شیمی کانی و پتروژنز متابازیت‌های مجموعه دگرگونی-آذرین شترکوه (جنوب شرق شاهرود) شاهدی بر تکوین حوضه‌های ریفتی اواخر نئوپروتروزوئیک"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰۵، (۱۳۹۶) ۱۶۷-۱۸۲.
22. Rossetti F., Nozaem R., Lucci F., Vignaroli G., Gerdes A., Nasrabadi M., Theye T., "Tectonic setting and geochronology of the Cadomian (Ediacaran-Cambrian) magmatism in Central Iran, Kuh-e-Sarhangi region (NW Lut Block) ". *Journal of Asian Earth Sciences*, (2014) 1-21.
23. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "An introduction to the rock forming minerals", Longman Ltd, (1992) 528.
24. Dunlap W. J., Hirth G., Teyssier C., "Thermo mechanical evolution of ductile duplex", *Tectonics*, 16 (1997) 983-1000.

25. Passchier C. W., "Flow in the natural shear zones: the consequences of spinning flow regimes", *Earth and planetary Science Letters*, 77 (1986) 70-80.
26. Prior D. J., "Sub-critical fracture and associated retrogression of crystal misorientation axes for small angular misorientation, using electron back scatter diffraction in the SEM", *J Microsc*, 195 (1993) 217-225.
27. Middlemost E. A. K., "Magma and magmatic rocks, an introduction to igneous petrology", Longman Group U.K, (1985) 73-86.
28. Peccerillo R., Taylor S. R., "Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey", *Contrib Mineral, Petrol*, 58 (1976) 63-81.
29. Shand S. J., "Eruptive rocks. Their genesis, composition, classification and their relation to deposits", Thomas Murby and co, London, (1943) 488.
30. Hsieh P. S., Chen C. H., Yang H. J., Lee C. Y., "Petrogenesis of the Nanling Mountains granites from South China: constraints from systematic apatite geochemistry and whole-rock geochemical and Sr-Nd isotope compositions", *Journal of Asian Earth Sciences*, 33 (2008) 428-451.
31. Sun S. S., Mc Donough W. F., "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: A.D., Saunders and M. J., Norry (Eds): *Magmatism in ocean basins*", Geological Society of London, U.K Special Publication, 42 (1989) 313-345.
32. Hoskin P. W., Kinny P. D., Wyborn D., Chappell B. W., "Identifying accessory mineral saturation during differentiation in granitoid magmas: an integrated approach", *Journal of Petrology*, 41 (2000) 1356-1396
33. Almeida M. E., Macambira M. J. B., Oliveira E. C., "Geochemistry and zircon geochronology of the I-Type high K calc-alkaline and S-Type granitoid rocks from Southeastern Roraima, Brazil: Orosirian collisional magmatism evidence", (1.97-1.96 Ga) in central portion of Guyana shield". *Precambrian Research*, 155 (2007) 69-97.
34. Harris N., Inger S., Massey J., "The role of fluids in the formation of High Himalayan leucogranites", In: M. P. Searle and P. J. Treloar (Eds.), *Himalayan Tectonics*", Geological Society of London, Special Publications, 74 (1993) 391-400.
35. Thuy N. T. B., Satir M., Siebel W., Vennemann, "T and Long, T.V., "Geochemical and isotopic constrains on the petrogenesis of granitoids from the Dalat zone, southern Vietnam", *Journal of Asian Earth Sciences*, 23 (2004) 467-482.
36. Ayalew D., Ishiwatari A., "Comparison of rhyolites from continental rift, continental arc and oceanic island arc: Implication for the mechanism of silicic magma generation", *Island Arc*, 20 (2011)78-93.

37. Monazzami Bagherzadeh R., Karimpour M. H., Lang Farmer G., Stern C.R., Santos J. F., Rahimi B., Heidarian Shahri M.R., "U-Pb Zircon geochronology petchemical and Sr-Nd isotopic characteristic of late Neoproterozoic granitoid of the Bornaward complex (Bardaskan NE Iran) ", *Journal of Earth Sciences*, 111 (2015) 54-71.
38. Faramarzi N., Amini S., Schmitt A.K., Hassanzadeh J., Gregor B., McKeegan K., Razavi S.M.H., Mortazavi S.M., "Geochronology and geochemistry of rhyolites from Hormuz Island, southern Iran: A new record of Cadomian arc magmatism in the Hormuz Formation", *Lithos*, 236–237 (2015) 203-211.
39. Boynton W. V., "Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (ed), *Rare Earth Element Geochemistry*", Elsevier, (1984) 63-114.
40. Rubatto D., "Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism", *Chemical Geology*, 184 (2002) 123-138.
41. Belousova E. A., Kostitsyn Y. A., Griffin W. L., Begg G. C., O'Reilly S. Y., Pearson N. J., "The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data", *Lithos*, 119 (2010) 457-466.
42. Boger S. D., Miller J. M., "Terminal suturing of Gondwana and the onset of the Ross Delamerian Orogeny: the cause and effect of an Early Cambrian reconfiguration of plate motions", *Earth Planetary Science Letters*, 219 (2004) 35-48.
43. Meert J. G., Lieberman B. S., "The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian radiation", *Gondwana Res*, 14(2008) 5-21.
44. Cawood P. A., "Terra Australis Orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic", *Earth-Science Review*, 69 (2005) 249-279.
45. Dalziel I.W. D., "Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugate rift pair: evidence and implications for an Eocambrian supercontinent", *Geology*, 19 (1991) 598-601.
46. Ramezani J., Tucker R. D., "The Saghand Region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics", *American Journal of Science*, 303 (2003) 622-665.
47. Berberian M., King G. C. P., "Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal of Earth Sciences* 18(1981) 210-265.
48. Stampfli G. M., "Tethyan oceans. In: Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D. (Eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and Surrounding Area*", Geological Society London Special Publications, 173 (2000) 1-23.

49. Verdel C., Wernicke B. P., Ramezani J., Hassanzadeh J., Renne P. R., Spell T. L., "Geology and thermochronology of Tertiary Cordilleran-style metamorphic core complexes in the Saghand region of central Iran", *Geological Society of America Bulletin*, 119 (2007) 961-977.
50. Samani B. A., "Metallogeny of the Precambrian in Iran", *Precambrian Research*, 39(1988) 85-106.
51. Haghypour A., "Precambrian in central Iran: lithostratigraphy, structural history and petrology", *Iranian Petroleum Institute Bulletin*, 81(1981) 1-17.
52. Bagheri S., Stampfli G. M., "The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications", *Tectonophysics*, 451 (2008) 123-155.
- 53 Malekpour-Alamdari A. Axen G. Heizler M. Hassanzadeh J, "Largemagnitude continental extension in the northeastern Iranian Plateau: Insight from Kfeldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology from the Shotor Kuh–Biarjmand metamorphic core complex", *Geosphere*, 13 (2017) 1207-1233.
54. Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G., "Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks". *Journal of Petrology*, 25 (1984) 956 -983
55. Schandl E. S., Gorton M. P., "Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments". *Economic Geology*, 97 (2002) 629-642.
56. Pearce J. A., "Statistical analyses of major element patterns in basalts", *J. Petrol* 17 (1976) 15-43.
57. Rasul Najeeb M. A., Stewart Ian C. F., "The Red sea The Formation, Morphology, Oceanography and Environment of a Young Ocean Basin", *Springer Earth System Sciences*, (2015) 638.