

سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی مناطق چشمه‌خوری و شکسته‌سبز، خور (شمال‌باختری بیرجند، خاور ایران)

مریم جاویدی مقدم^۱، محمدحسن کریم‌پور^{۲*}، خسرو ابراهیمی نصرآبادی^۲، آزاده ملکزاده سفارودی^۲
و محمدرضا حیدریان‌شهری^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ گروه پژوهشی اکتشافات ذخایر معدنی خاور ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

محدوده خور در خاور ایران و شمال‌باختر بیرجند جای دارد. این محدوده دارای برونزدهایی از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن-ایگوسن با ترکیب آندزیت‌بازالتی تا ریولیتی است که سنگ‌های آذرین نیمه‌درونی و درونی گرانودیوریتی تا گابرویی در آنها نفوذ کرده‌اند. در این پژوهش، سنگ‌زایی (پتروژنز) سنگ‌های آتشفشانی مناطق چشمه‌خوری و شکسته‌سبز که در محدوده خور بیشترین گسترش را دارند، بررسی شده است. سنگ‌های ریولیت، داسیت، آندزیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت‌بازالتی در منطقه چشمه‌خوری و تراکی‌آندزیت در منطقه شکسته‌سبز شناسایی شدند. بافت بیشتر این سنگ‌ها پورفیری، هیالوپورفیری و میکرولیتی است و دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، اوژیت، آلکالی‌فلدسپار، هورنبلند، بیوتیت و کوارتز هستند. سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری سرشت کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا دارند. غنی‌شدگی LREEها در برابر HREEها و غنی‌شدگی عناصر LILE در برابر HFSE نشان می‌دهد که این سنگ‌ها در پهنه ماگمایی فرورانش پدید آمده‌اند. نسبت ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در سنگ‌های آندزیتی و داسیتی نشان‌دهنده پیدایش ماگمای آنها از ذوب‌بخشی گوشته غنی‌شده‌ای است که در هنگام تفریق، دچار آلودگی پوسته‌ای شده است. تراکی‌آندزیت‌های شکسته‌سبز سرشت شوشونیتی دارند. این سنگ‌ها دارای نسبت بالای $\text{FeO}/\text{FeO}^* + \text{MgO}$ ، $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ و نیز $\text{Zr} > 360 \text{ ppm}$ ، $\text{Y} > 39 \text{ ppm}$ ، $\text{Ce} > 100 \text{ ppm}$ هستند. همچنین، دارای غنی‌شدگی شدید از عناصر LREE و HFSE، تهی‌شدگی از Eu و کاهش در Ba و Sr هستند. تراکی‌آندزیت‌های منطقه شکسته‌سبز در محدوده آتشفشانی‌های پس از برخورد جای می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی، پهنه فرورانش، پهنه کششی، چشمه‌خوری، شکسته‌سبز، شمال بلوک لوت

مقدمه

بین طول‌های جغرافیایی $58^{\circ}20'$ تا $58^{\circ}27'$ خاوری و

عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}8'$ تا $33^{\circ}15'$ شمالی و در

محدوده چشمه‌خوری، در خاور ایران و در گستره‌ای

* karimpur@um.ac.ir

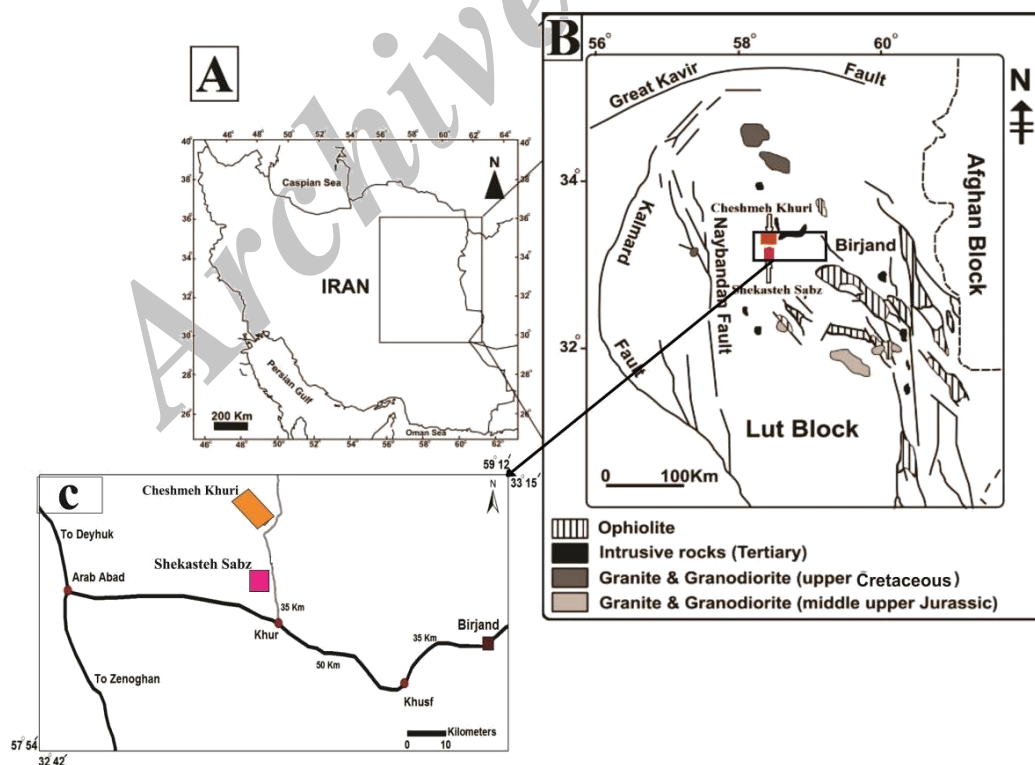
Copyright©2016, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

بر روی توده‌های آذرین نیمه‌درونی و آتشفشانی بلوک لوت انجام شده است که از میان آنها می‌توان مناطق طبس (Hashemi *et al.*, 2007)، چاه شلجمی (Arjmandzadeh *et al.*, 2011)، نجم‌آباد (Moradi Noghondar *et al.*, 2012)، ماهرآباد و خوپیک (Malekzadeh Shafaroudi *et al.*, 2010)، شمال خاور ناینند (Malekzadeh Shafaroud *et al.*, 2014) و رودگز (Hamooni *et al.*, 2013) را نام برد.

محدوده شمال روستای خور به علت حجم بزرگ سنگ‌های آتشفشانی ترسیری، رویداد کانی‌سازی‌های رگه‌ای نوع سرب، روی و مس (شورک) و مس (در مناطق شکسته‌سبز (Javidi Moghaddam *et al.*, 2014) (شکل ۱)، حوض‌دغ، مهرخش، رشیدی و غار کفتری)، کائولن (چشمه‌خوری)، وجود حفاری‌های قدیمی و سرباره‌های فراوان، سیستم شکستگی‌ها و نفوذ دایک‌های فراوان دارای اهمیت است.

فاصله ۸۵ کیلومتری شمال‌باختر بیرجند و ۱۸ کیلومتری شمال روستای خور در استان خراسان جنوبی جای دارد. محدوده شکسته‌سبز نیز در گستره‌ای میان طول‌های جغرافیایی $58^{\circ}19'$ تا $58^{\circ}31'$ خاوری و عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}01'$ تا $33^{\circ}05'$ شمالی و در فاصله ۶ کیلومتری شمال روستای خور است (شکل‌های A-1 تا C-1). از دید پهنه‌بندی‌های ساختاری، محدوده‌های چشمه‌خوری و شکسته‌سبز در شمال بلوک لوت جای دارند (Jung *et al.*, 1983).

از ویژگی‌های مهم بلوک لوت، ماگماتیسم گسترده آن، به‌ویژه در بخش‌های شمالی است که از ژوراسیک آغاز شده و در ترسیری به اوج خود رسیده است؛ به‌گونه‌ای که ضخامت سنگ‌های ترسیری، به‌ویژه آئوسن، به ۲۰۰۰ متر می‌رسد (Jung *et al.*, 1983; Karimpour *et al.*, 2011). در سال‌های پیشین، بررسی‌های سنگ‌زایی (پتروژئولوژی) و سن‌سنجی فراوانی



شکل ۱- جایگاه جغرافیایی مناطق اکتشافی چشمه‌خوری و شکسته‌سبز در: (A) خاور ایران؛ (B) شمال بلوک لوت (Tarkian *et al.*, 1983)؛ (C) راه‌های دسترسی به چشمه‌خوری و شکسته‌سبز.

شکسته‌سبز گسترش بسیاری دارند. این دو منطقه بخشی از محدوده خور هستند (شکل ۱). در منطقه چشمه‌خوری سنگ‌های آذرآواری توف برش‌آندزیتی، توف برش اسیدی و توف اسیدی به‌صورت توالی‌های لایه‌ای جای گرفته‌اند. سنگ‌های آتشفشانی در بخش بالایی سنگ‌های آذرآواری جای گرفته و سنگ‌های آذرین درونی و نیمه‌درونی، با ترکیب گرانودیوریتی تا گابرویی، در آنها نفوذ کرده‌اند (شکل ۲). بر پایه بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، ریولیت، داسیت، آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت‌بازالتی با بافت‌های پورفیری، میکرولیتی و هیالوپورفیری از سنگ‌های آتشفشانی این منطقه هستند. آندزیت، در برابر سنگ‌های آتشفشانی دیگر، بیشترین گسترش، و آندزیت‌بازالتی کمترین گسترش را در منطقه چشمه‌خوری نشان می‌دهند (شکل ۲). آندزیت‌بازالتی در رخنمون‌های سطحی دارای حفرات گرد تا بادامکی با اندازه‌ای نزدیک به ۲ میلیمتر بوده که با کانی‌های دگرسانی، مانند کلریت، کوارتز و کلسیت پر شده و ساخت بادامکی را پدید آورده‌اند. بافت بادامکی نشان‌دهنده میزان چشمگیر سیال در ماگماست. کاهش فشار در هنگام بالا آمدن و گرانروی کم ماگما مایه به‌هم‌پیوستن سیال‌ها در بالای ستون ماگمایی، رویداد فوران و در پایان پیدایش سنگ‌های حفره‌دار می‌شود (Barker, 1983). در برخی بخش‌ها، جریان‌های داسیتی نیز ساخت لایه‌ای نشان می‌دهند. در منطقه شکسته‌سبز توف برش‌آندزیتی و توف برش اسیدی برونزد دارند و به‌صورت توالی‌های لایه‌ای جای گرفته‌اند. سنگ‌های آتشفشانی در بخش بالایی آن جای گرفته‌اند و سنگ‌های آذرین نیمه‌درونی با ترکیب گرانودیوریتی تا مونزونیتی در آنها نفوذ کرده است (شکل ۳). بر پایه بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، هورنبلند آندزیت و تراکی‌آندزیت با بافت‌های پورفیری، میکرولیتی و تراکیتی از سنگ‌های آتشفشانی این منطقه هستند.

از بررسی‌های انجام شده پیشین در منطقه می‌توان پژوهش‌های Jung و همکاران (۱۹۸۳) درباره ماگماتیسم ترسیری در شمال لوت، تهیه نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه به‌دست Lotfi (۱۹۹۵)، پروژه‌های اکتشاف نیمه‌تفصیلی و تفصیلی مواد معدنی در شهرستان سرایان به‌دست سازمان صنعت، معدن و تجارت خراسان جنوبی را نام برد. منطقه شکسته‌سبز و مهرخش نیز بخشی از این پروژه اکتشافی بوده‌اند (Jamie, 2007, 2008). Abbasi Niazabadi (۲۰۱۰) به پژوهش درباره کانی‌سازی آهن و مس در میان مناطق شکسته‌سبز و مهرخش پرداخته است. Mir Baloch (۲۰۱۲) و Ya Hosseini (۲۰۱۲) به ترتیب کانی‌سازی و دگرسانی در خاور و باختر را بررسی کرده‌اند. Salim (۲۰۱۲) به بررسی زمین‌شیمی و شناسایی پهنه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی و آذرین نیمه‌درونی پرداخته است. Kaviani Sadr (۲۰۱۲) نیز به پژوهش‌های ساختاری در بخش مرکزی منطقه چشمه‌خوری پرداخته است؛ اما تاکنون پژوهش‌های سنگ‌شناسی درباره سنگ‌های آتشفشانی منطقه شکسته‌سبز انجام نشده است. از این‌رو، این پژوهش با هدف بررسی زمین‌شیمی و شناسایی پهنه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی شکسته‌سبز و گستره وسیع‌تری از سنگ‌های آتشفشانی محدوده چشمه‌خوری (شکل ۱) و مقایسه این دو محدوده انجام شده است.

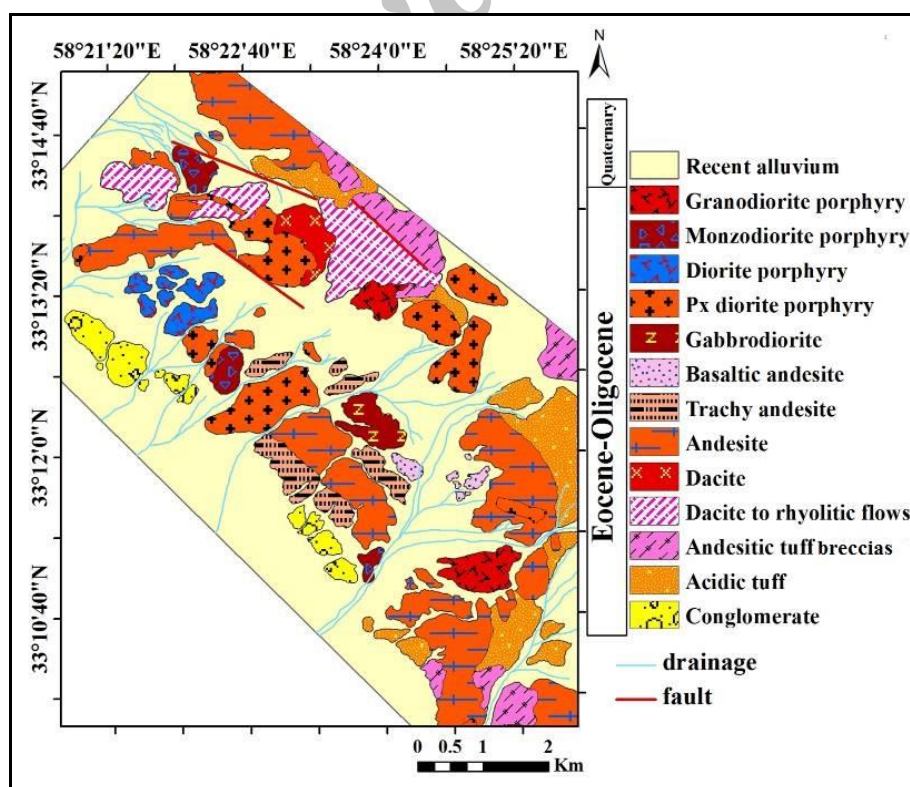
زمین‌شناسی منطقه

محدوده خور در شمال‌باختر بیرجند و در برکه ۱/۲۵۰۰۰۰ بشرویه (Stocklin and Nabavi, 1969) و در بخش جنوب‌خاور نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ سارغنج (Lotfi, 1995) جای دارد. کهن‌ترین واحد سنگی که در منطقه شکسته‌سبز و چشمه‌خوری برونزد دارد کنگلومرای ژوراسیک است (Lotfi, 1995). سنگ‌های آتشفشانی با سن ائوسن-الیگوسن در مناطق چشمه‌خوری و

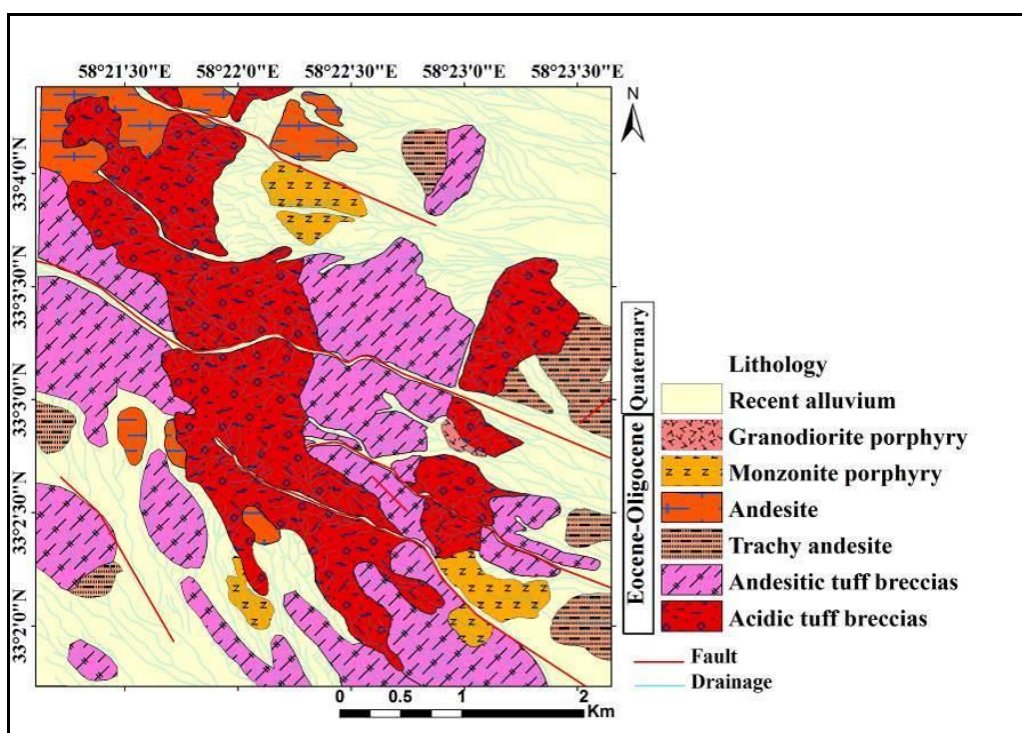
روش انجام پژوهش

در راستای تهیه نقشه زمین‌شناسی از دو منطقه چشمه‌خوری و شکسته‌سبز، نخست برداشت‌های صحرایی و نمونه‌برداری از سنگ‌های آتشفشانی در منطقه چشمه‌خوری (با گستردگی نزدیک به ۵۰ کیلومتر مربع) و منطقه شکسته‌سبز (با گستردگی نزدیک به ۲۰ کیلومتر مربع) انجام شد. بیش از ۴۰۰ نمونه از سطح منطقه گردآوری شد و از میان آنها، در منطقه چشمه‌خوری نزدیک به ۱۲۰ نمونه مقطع نازک از سنگ‌های آتشفشانی و در منطقه شکسته‌سبز ۸۰ نمونه مقطع نازک تهیه و بررسی شدند. سپس نقشه زمین‌شناسی هر دو منطقه با نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری ۱۰ نمونه با کمترین میزان دگرسانی و هوازدگی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی برگزیده شدند. در منطقه شکسته‌سبز از آندزیت با اینکه گسترش بسیاری دارد؛ اما نمونه خوبی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی یافت نشد؛ زیرا

پژوهش‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که بیشتر این سنگ‌ها دچار دگرسانی آرژیلیکی و پروپیلیتیکی شده‌اند. نمونه‌ها پس از خردایش و آماده‌سازی، برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی به روش فلوئورسانس پرتو X (XRF)، در شرکت طیف‌کارساران بینالود مشهد تجزیه شد. همچنین، همین نمونه‌ها برای تجزیه عناصر فرعی و حاکی نادر به آزمایشگاه ACME کانادا فرستاده و به روش پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS)، روش محلول‌سازی ذوب قلیایی تجزیه شدند (جدول ۱). برای تفسیر زمین‌شیمیایی دقیق‌تر از داده‌های ICP-MS به دست Salim (۲۰۱۲) که در بخش مرکزی منطقه چشمه‌خوری انجام شده نیز بهره گرفته شد (جدول ۱). همچنین، از داده‌های ایزوتوپی Rb-Sr به دست Lotfi (۱۹۸۲) که در گستره بزرگی از مناطق شوراب، قلعه چاه و شمال‌باختر خور انجام شده است (منطقه چشمه‌خوری نیز بخشی از این بررسی بوده است) بهره گرفته شد.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه چشمه‌خوری (شمال‌باختری بیرجند، خاور ایران)



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی منطقه شکسته‌سبز (شمال‌باختری بیرجند، خاور ایران).

حجمی)، پیروکسن (۱۵-۱۰ درصد حجمی)، هورنبلند (۱۰-۵ درصد حجمی) و کانی‌های کدر (۵ درصد حجمی) ساخته شده است.

آندزیت: بافت این سنگ‌ها بیشتر پورفیری است. در این سنگ‌ها، بافت ارتوفیری نیز در برخی بخش‌ها دیده می‌شود. در بافت ارتوفیری پلاژیوکلاز بلورهای مستطیلی کوتاه، ضخیم و بدون جهت‌یافتگی هستند. این سنگ‌ها نزدیک به ۲۰ تا ۲۵ درصد حجمی درشت‌بلور دارند. این بلورها شامل پلاژیوکلاز تا ۱ میلی‌متر (۱۰ تا ۱۲ درصد حجمی)، هورنبلند تا اندازه ۰/۶ میلی‌متر (۴ تا ۵ درصد حجمی)، بیوتیت تا اندازه ۰/۲ میلی‌متر (۳ تا ۵ درصد حجمی) و پیروکسن تا اندازه ۰/۵ میلی‌متر (۲ تا ۳ درصد حجمی) هستند. زمینه سنگ از پلاژیوکلازهای دانه‌ریز و کانی‌های کدر با اندازه نزدیک به ۰/۴ میلی‌متر است (شکل ۴-B). پلاژیوکلازها آندزین-لابرادوریت هستند و گاه با

سنگ‌نگاری

(الف) سنگ‌نگاری سنگ‌های آتشفشانی در منطقه چشمه‌خوری

آندزیت‌بازالتی: بافت این سنگ‌ها بیشتر پورفیری است. همچنین، بافت‌های گلومروپورفیری و میکرولیتی در برخی بخش‌ها دیده می‌شود. این سنگ‌ها کمتر از سنگ‌های دیگر دچار دگرسانی شده‌اند. این سنگ‌ها نزدیک به ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی درشت‌بلور دارند. این کانی‌ها عبارتند از: پلاژیوکلازها تا اندازه ۰/۷ میلی‌متر (۱۵-۱۰ درصد حجمی) و از نوع الیگوکلاز با ماکل پلی‌سنتتیک و منطقه‌بندی نوسانی؛ پیروکسن تا اندازه ۰/۴ میلی‌متر (۷-۵ درصد حجمی) با ماکل کارلسباد؛ هورنبلند تا اندازه ۰/۳ میلی‌متر (۳ تا ۵ درصد حجمی) (شکل ۴-A)؛ الیوین تا اندازه ۰/۴-۰/۶ میلی‌متر (۲-۳ درصد حجمی) با آثار خوردگی خلیجی. زمینه سنگ از پلاژیوکلاز (۴۰-۳۵ درصد

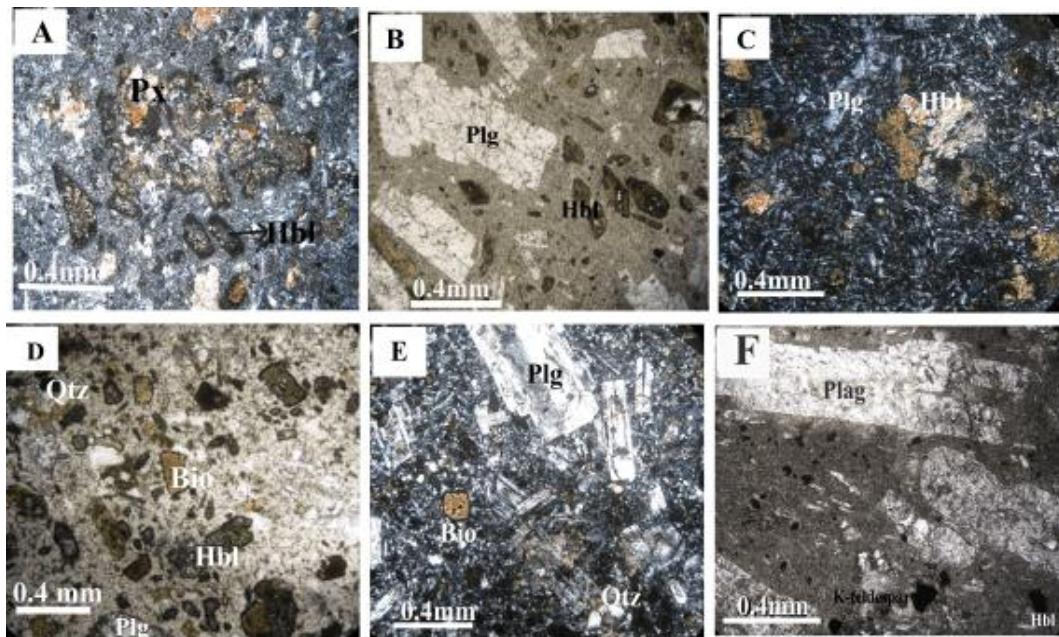
تکه‌های سنگی، دگرسان شده و در بخش‌هایی به اپیدوت و کربنات دگرسان شده‌اند. کانی‌های هورنبلند نیز در بخش‌هایی کلریتی شده‌اند.

داسیت: بافت اصلی داسیت‌ها پورفیری هستند و همچنین، بافت میکروولیتی نیز در آنها دیده می‌شود. نزدیک به ۲۰ تا ۲۵ درصد درشت‌بلور دارند که شامل بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار کوارتز تا اندازه ۰/۳ میلیمتر (۳ تا ۵ درصد حجمی)، پلاژیوکلاز از نوع آلبیت تا اندازه ۰/۷ میلیمتر (۷ تا ۹ درصد حجمی)، آلکالی‌فلدسپار بیشتر از نوع سانیدین تا ۰/۸ میلیمتر (۴ تا ۵ درصد حجمی)، بیوتیت تا اندازه ۰/۳ میلیمتر (۲-۳ درصد حجمی) هورنبلند تا اندازه ۰/۵ میلیمتر (۲-۳ درصد حجمی) هستند (شکل ۴-D). در این سنگ‌ها، بیوتیت‌ها و هورنبلندها به‌ندرت دارای کناره‌های سوخته هستند. زمینه سنگ از پلاژیوکلاز (۴۵-۴۰ درصد حجمی)، سانیدین (۵-۳ درصد حجمی)، هورنبلند (۱۰-۵ درصد حجمی) و کوارتز (۱۵-۱۰ درصد حجمی) است.

گدازه‌های ریولیتی: این سنگ‌ها بیشتر دارای بافت پورفیری تا هیالوپورفیری هستند. نزدیک به ۲۵ تا ۳۰ درصد درشت‌بلور دارند که شامل کوارتز خلیجی تا اندازه ۰/۲ میلیمتر (۳-۵ درصد حجمی)، آلکالی‌فلدسپار تا اندازه ۰/۸ میلیمتر (۱۲-۱۵ درصد حجمی)، پلاژیوکلاز تا اندازه ۱ میلیمتر (۸ تا ۱۰ درصد حجمی) با نشانه‌هایی از خوردگی هستند. همچنین، بیوتیت و کانی‌های کدر و به اندازه کمتر هورنبلند نیز به‌صورت فنوکریست دیده می‌شوند (شکل ۴-E). آلکالی‌فلدسپارها نیز بسیار دگرسان (آرژیلیکی) شده‌اند و شناسایی نوع آنها بسیار دشوار است. زمینه در این سنگ‌ها سیلیسی شده است.

اپیدوت، سرسیت و کلسیت جایگزین شده‌اند. در برخی پلاژیوکلازها منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی دیده می‌شود. ویژگی‌های بافتی در فنوکریست‌ها، مانند منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی، همگی نشان‌دهنده نبود تعادل شیمیایی و تند بالا آمدن ماگما و کاهش ناگهانی فشار در آن است و نقش آرایش پوسته‌ای را نشان می‌دهد (Raymond, 2002). پیروکسن‌ها اوژیت هستند و کانی‌های کدر بیشتر مگنتیت و پیریت هستند. بیشتر هورنبلندها در سنگ‌های آندزیتی دارای کناره‌های سوخته هستند و در برخی بخش‌ها، بیشتر تنها هورنبلندها به‌جای مانده است. حفرات درون آندزیت‌ها با کلسیت و کلریت پر شدند.

تراکی آندزیت: بافت این سنگ‌ها بیشتر تراکیتی است و ۲۲ تا ۲۸ درصد درشت‌بلور دارند. این درشت‌بلورها شامل پلاژیوکلاز تا اندازه ۰/۶ میلیمتر (۱۲ تا ۱۴ درصد حجمی)، هورنبلند تا اندازه ۰/۶ میلیمتر (۵ تا ۷ درصد حجمی) و آلکالی‌فلدسپار تا اندازه ۰/۸ میلیمتر (۵ تا ۷ درصد حجمی) هستند. برخی پلاژیوکلازها دارای منطقه‌بندی نوسانی هستند (شکل ۴-C). آلکالی‌فلدسپارها در تراکی آندزیت‌های منطقه بیشتر فنوکریست تا میکروولیت‌های سانیدین با ماکل کارلسباد هستند. زمینه سنگ از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز (۵۰ درصد حجمی) و آلکالی‌فلدسپار (۲۰ درصد حجمی) از نوع سانیدین ساخته شده است. کانی‌های کدر و هورنبلند نیز در زمینه سنگ دیده می‌شود. ویژگی‌های بافتی در بلورها مانند خوردگی و منطقه‌بندی در پلاژیوکلازها همگی نشان‌دهنده نبود تعادل شیمیایی و تند بالا آمدن ماگما و کاهش ناگهانی فشار در آن است و نقش آرایش پوسته‌ای را نشان می‌دهد (Raymond, 2002). پلاژیوکلازهای درون



شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی از: A) سنگ‌های آندزیت‌بازالتی (تصویر XPL یا cross polarized light؛ B) هورنبلندآندزیت (تصویر PPL یا plane polarized light؛ C) تراکی‌آندزیت (تصویر XPL؛ D) داسیت (تصویر PPL؛ E) ریولیت در منطقه چشمه‌خوری (تصویر XPL؛ F) تراکی‌آندزیت در منطقه شکسته‌سبز (تصویر PPL). نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Kretz (۱۹۸۳) است: Plg: پلاژیوکلاز؛ Hbl: هورنبلند؛ Bio: بیوتیت؛ Qtz: کوارتز؛ Px: پیروکسن.

فوران، کاهش فشار جانبی و فوگاسیته اکسیژن بالا روی می‌دهد (Rutherford and Devine, 2003). هورنبلند با کناره‌های سوخته نشان‌دهنده افت ناگهانی فشار بخار آب در هنگام بالآمدن ماگماست (Pearce *et al.*, 1987).

زمین‌شیمی

داده‌های تجزیه اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و خاکی نادر برای سنگ‌های آتشفشانی دارای کمترین دگرسانی در این دو منطقه در جدول ۱ آورده شده‌اند.

نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری

SiO₂ در سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری و شکسته‌سبز، ۵۲/۶ تا ۶۹/۸ درصد وزنی است (جدول ۱). برای نامگذاری این سنگ‌ها، نمودار Middlemost (۱۹۹۴) به کار برده شد. نمونه‌ها در بخش ریولیت، داسیت، آندزیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت‌بازالتی جای گرفته‌اند (شکل ۵- A).

(ب) سنگ‌نگاری سنگ‌های آتشفشانی در منطقه شکسته‌سبز

تراکی‌آندزیت: این سنگ‌ها بیشتر بافت تراکیتی دارند. نزدیک به ۲۵ تا ۳۰ درصد درشت بلور دارند که شامل پلاژیوکلاز تا اندازه ۲ میلیمتر (۱۰ تا ۱۵ درصد)، هورنبلند با کناره‌های سوخته تا اندازه ۰/۴ میلیمتر (۵ تا ۷ درصد)، آلکالی‌فلدسپار تا اندازه ۰/۸ میلیمتر (۵ تا ۸ درصد حجمی) هستند (شکل ۴- F). در برخی بخش‌ها، هورنبلندها سراسر با کانی‌های کدر جایگزین شده‌اند. ویژگی این سنگ‌ها داشتن بافت تراکیتی است. زمینه سنگ از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز (۳۰-۴۰ درصد حجمی)، آلکالی‌فلدسپار از نوع سانیدین (۱۵ درصد حجمی)، هورنبلند (۵-۱۰ درصد حجمی) و کانی‌های کدر (۵ درصد حجمی) ساخته شده است. در تراکی‌آندزیت منطقه شکسته‌سبز، کناره بلورهای هورنبلندها سوخته شده است. این ویژگی در پی اکسیدشدن گرمایی، تغییرات دما، نرخ سردشدگی و

جدول ۱- تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی (بر پایه درصد وزنی) و عناصر فرعی (بر پایه ppm) سنگ‌های آتشفشانی در مناطق شکسته‌سبز (SH) و چشمه‌خوری (CH) و نمونه‌های Salim (۲۰۱۲) که با شماره‌های S-P و * نشان داده شده‌اند.

Sample No.	SH4	SH5	SH8	SH19	SH33	CH3	CH5
X	58°23'18"	58°23'36"	58°23'38"	58°22'31"	58°23'31"	58°25'10"	58°25'25"
Y	33°2'57"	33°2'58"	33°2'55.1"	33°3'6"	33°1'55"	33°9'19.3"	33°9'18"
Rock Type	Trachy andesite	Trachy andesite	Trachy andesite	Trachy andesite	Trachy andesite	Dacite	Dacite
SiO ₂	56.52	55.76	57.63	60.17	55.47	63.11	63.73
TiO ₂	1.64	1.68	1.57	1.08	1.76	0.51	0.45
Al ₂ O ₃	16.1	16.28	16.06	15.59	16.25	17.09	16.98
FeO*	7.56	7.76	6.35	6.06	7.05	4.34	3.9
MnO	0.13	0.16	0.12	0.11	0.15	0.08	0.05
MgO	2.41	2.09	2.21	1.88	2.38	1.23	1.64
CaO	5.85	6.03	5.59	4.95	6.14	3.88	3.31
Na ₂ O	3.2	3.18	3.31	3.24	3.05	2.98	2.82
K ₂ O	3.47	3.68	3.47	3.84	3.68	2.92	3.01
P ₂ O ₅	0.98	1	1.01	0.62	0.92	0.21	0.18
LOI	1.05	1.26	1.73	1.55	2.11	3	3.33
Total	98.91	98.88	99.05	99.09	98.96	99.35	99.4
Ba	515	514	490	581	515	467	469
Be	4	3	4	4	3	2	3
Co	18.3	18.9	17.1	12.5	17.0	5.5	5.1
Cs	4.8	7.3	5.5	6.4	3.8	4.1	2.8
Ga	18.5	18.6	17.7	18.5	19.0	17.1	16.1
Hf	9.1	9.2	9.0	8.5	9.2	4.1	4.1
Nb	15.4	15.1	15.2	14.3	16.6	7.0	7.0
Rb	158.6	179.7	156.1	169.4	150.0	96.6	98.5
Sn	3	3	3	2	3	1	<1
Sr	401.1	419.6	388.6	400.6	408.6	368.7	338.9
Ta	0.9	1.2	1.1	0.9	1.1	0.4	0.5
Th	19.9	20.9	20.2	18.4	20.5	9.7	9.7
U	4.9	4.9	5.0	4.6	4.8	2.4	2.7
V	176	179	162	99	176	42	66
W	1.7	2.2	2.6	2.5	2.3	1.4	1.4
Zr	385.9	398.5	389.9	360.0	400.2	160.9	156.7
Y	45.3	49.5	43.7	39.1	48.1	10.7	10.8
La	52.6	52.5	52.6	46.2	54.0	27.1	26.9
Ce	105.3	110.7	106.8	94.0	109.8	55.8	55.2
Pr	12.50	13.00	12.44	10.74	13.00	6.03	5.99
Nd	48.0	52.6	50.1	41.7	52.8	22.5	23.5
Sm	9.81	10.62	9.92	8.15	10.34	4.21	4.20
Eu	2.23	2.34	2.17	1.94	2.25	1.04	1.00
Gd	9.50	9.59	9.01	7.60	9.55	3.33	3.21
Tb	1.53	1.53	1.43	1.24	1.51	0.47	0.46
Dy	8.60	8.75	8.37	7.26	8.62	2.31	2.50
Er	5.10	5.29	4.82	4.48	5.10	1.10	1.21
Tm	0.76	0.79	0.71	0.64	0.75	0.14	0.16
Yb	5.02	5.08	4.40	4.21	4.96	0.95	1.07
Lu	0.74	0.79	0.70	0.67	0.74	0.15	0.14
Ratios							
K ₂ O/Na ₂ O	1.084	1.157	1.048	1.185	1.206	0.979	1.067
Eu/Eu*	0.706	0.709	0.702	0.754	0.692	0.849	0.833
(La/Yb) _N	7.064	6.968	8.06	7.399	7.34	19.232	16.949

جدول ۱- ادامه.

Sample No.	CH16	CH19	CH31	S-P-21*	S-P-24*	S-P-35*	S-P-38*
X	58° 24' 21"	58° 24' 30"	58° 24' 8"	58° 23' 14"	58° 23' 14"	58° 24' 27"	58° 23' 57"
Y	33° 11' 52"	33° 13' 13"	33° 11' 41"	33° 13' 24"	33° 13' 24"	33° 13' 14"	33° 12' 34"
Rock Type	Basaltic Andesite	Andesite	Andesite	Andesite	Andesite	Rhyo dacite	Trachy andesite
SiO ₂	55.13	60.81	59.18	57.2	56.5	69.8	55.9
TiO ₂	0.96	0.67	0.84	0.83	0.75	0.29	0.91
Al ₂ O ₃	16.75	15.34	16.05	17.8	17.4	15.3	17.3
FeO*	7.5	5.37	6.59	6.84	6.24	2.73	6.93
MnO	0.15	0.1	0.14	0.11	0.11	0.04	0.13
MgO	4.3	3.49	3.94	3.83	3.7	0.58	4.3
CaO	7.29	4.79	6.17	5.93	6.64	3.27	6.49
Na ₂ O	3.06	3.42	3.05	3.2	3	3.7	3.4
K ₂ O	2.46	3.13	2.59	2.6	2.12	3.53	2.89
P ₂ O ₅	0.32	0.16	0.19	0.17	0.15	0.18	0.17
LOI	0.96	1.85	0.28	1.37	3.23	1.48	1.62
Total	98.88	99.13	99.02	99.05	99.84	100.9	100.04
Ba	655	867	581	540	460	450	730
Be	1	<1	<1	-	-	-	-
Co	16.8	27.5	23.2	23.9	22.7	3.2	25.3
Cs	1.9	2.1	2.4	3.5	2.2	3.5	2.3
Ga	15.5	16.5	16.3	20	19	17	21
Hf	3.3	3.5	3.5	4	4	4	4
Nb	8.6	7.1	7.9	13	12	13	12
Rb	74.8	69.4	70.5	81.5	63.9	128	81.7
Sn	1	<1	1	2	2	3	2
Sr	613.6	1135.0	699.4	650	620	340	1030
Ta	0.5	0.6	0.6	1.3	1.2	1.6	<0.5
Th	7.4	9.8	6.9	9.6	8	10.5	10.1
U	3.6	2.5	2.1	2.69	2.23	2.65	2.82
V	114	250	160	186	148	33	183
W	1.4	0.8	0.7	2	1	3	1
Zr	130.5	123.1	134.6	130	115	128	137
Y	13.0	20.4	16.3	20.7	17.6	7.3	20.5
La	21.7	33.9	21.3	27.2	18.9	30.1	33
Ce	39.4	69.3	43.9	51	39.1	57.2	64.6
Pr	4.25	7.83	4.91	6.46	4.44	6.53	7.72
Nd	15.9	31.7	19.3	24.1	17.6	22.2	30
Sm	2.84	6.32	3.83	4.5	3.7	3.7	5.8
Eu	0.80	1.55	1.09	1.34	0.96	1	1.42
Gd	2.61	5.12	3.66	4.02	3.39	2.36	4.49
Tb	0.40	0.72	0.56	0.76	0.57	0.34	0.64
Dy	2.21	4.13	3.36	3.96	3.06	1.41	3.67
Er	1.37	2.20	2.05	2.41	1.77	0.72	2.22
Tm	0.18	0.34	0.30	0.37	0.29	0.11	0.35
Yb	1.40	2.36	2.04	2.3	1.8	0.7	2.1
Lu	0.21	0.34	0.30	0.34	0.28	0.11	0.32
Ratios							
K ₂ O/Na ₂ O	0.803	0.915	0.849	0.812	0.706	0.954	0.85
Eu/Eu*	0.898	0.833	0.89	0.963	0.829	1.035	0.851
(La/Yb) _N	10.45	9.684	7.039	7.973	7.079	28.99	10.594

جدول ۱- ادامه.

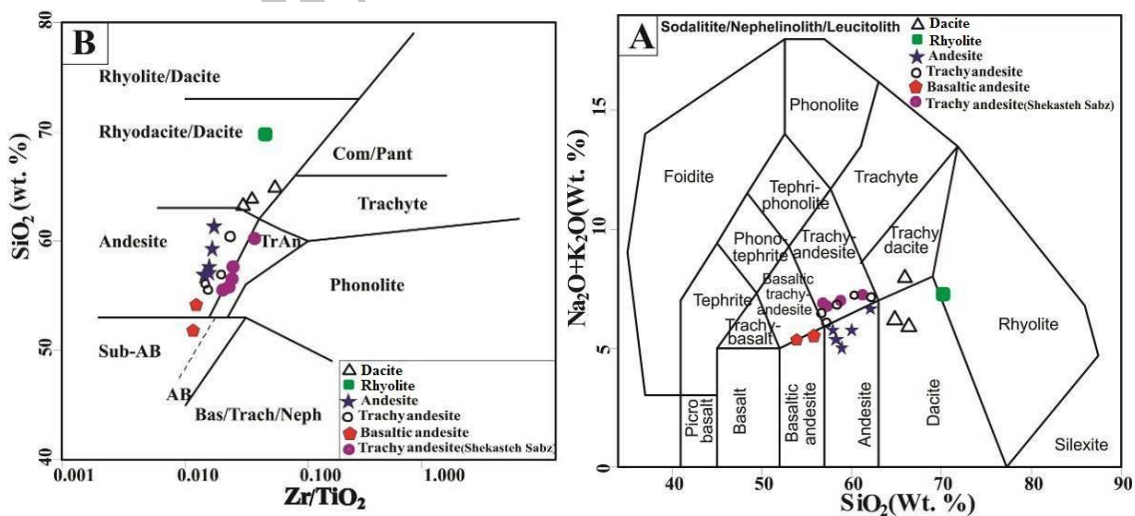
Sample No.	S-P-41.1*	S-P-50*	S-P-66*	S-P-71*	S-P-98*	S-P-101*
X	58° 24' 10"	58° 24' 9"	58° 23' 5"	58° 22' 21"	58° 24' 52"	58° 24' 47"
Y	33° 13' 57"	33° 11' 41"	33° 11' 52"	33° 12' 45"	33° 12' 59"	33° 11' 37"
Rock Type	Dacite	Trachy andesite	Trachy andesite	Trachy andesite	Andesitic basalt	Andesite
SiO ₂	64.7	55.8	60.2	56.8	52.6	56.6
TiO ₂	0.32	0.81	0.59	0.86	0.74	0.86
Al ₂ O ₃	17.29	17.1	16.9	16.4	16.7	16.6
FeO*	3.02	7	4.79	6.49	6.59	7.2
MnO	0.08	0.13	0.1	0.08	0.09	0.13
MgO	1.11	4.52	2.98	3.92	7.47	3.96
CaO	3.07	6.42	4.39	5.97	8.08	6.12
Na ₂ O	4.2	3.3	3.9	3	3.4	3.6
K ₂ O	3.66	2.51	3.05	3.72	1.89	1.8
P ₂ O ₅	0.19	0.16	0.12	0.25	0.08	0.11
LOI	2.24	1.53	2.09	2.37	2.18	1.55
Total	99.88	99.28	99.11	99.86	99.82	99.53
	ppm					
Ba	700	530	650	660	430	440
Co	2.6	25.5	16	22.7	33.1	25.5
Cs	2.5	3.5	2.9	4.6	2.8	5
Ga	19	19	19	19	18	20
Hf	5	4	4	5	3	4
Nb	13	9	8	11	6	10
Rb	113	78.9	92.1	124	48	92.5
Sn	2	2	2	2	1	2
Sr	760	670	750	780	1010	530
Ta	0.6	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Th	11.4	6.9	11.3	14.6	7	8.5
U	3.58	2.19	3.45	3.86	2.36	2.47
V	28	178	120	193	171	188
W	2	>1	2	2	>1	2
Zr	179	121	133	166	99.7	139
Y	13.8	19.8	16.4	23.2	17.2	22.6
La	34.4	23	24.7	37.3	26.6	24.7
Ce	64.5	44.6	47	74.2	48	50.2
Pr	7.04	5.24	5.28	8.79	5.54	5.97
Nd	24	20.6	19.8	34.4	20.2	23.2
Sm	4.1	4.2	3.8	6.5	3.9	4.8
Eu	1.01	1.12	0.92	1.49	1.13	1.16
Gd	2.98	3.63	3.27	5.21	3.48	4.4
Tb	0.46	0.61	0.48	0.75	0.54	0.71
Dy	2.45	3.56	2.8	3.99	3.22	3.85
Er	1.49	2.21	1.83	2.44	1.85	2.4
Tm	0.26	0.34	0.28	0.35	0.29	0.4
Yb	1.6	2.1	1.8	2.4	1.7	2.4
Lu	0.26	0.33	0.26	0.34	0.27	0.35
Ratios						
K ₂ O/Na ₂ O	0.871	0.760	0.782	1.24	0.555	0.5
Eu/Eu*	0.883	0.877	0.798	0.783	0.938	0.772
(La/Yb) _N	14.495	7.384	9.251	10.478	10.549	6.939

نمودار، نمونه‌ها در بخش سنگ‌های کالک‌آلکان K-High و شوشونیتی و بخش ریولیت، داسیت، آندزیت، آندزیت بازالتی و بازالت هستند (شکل ۶- B).

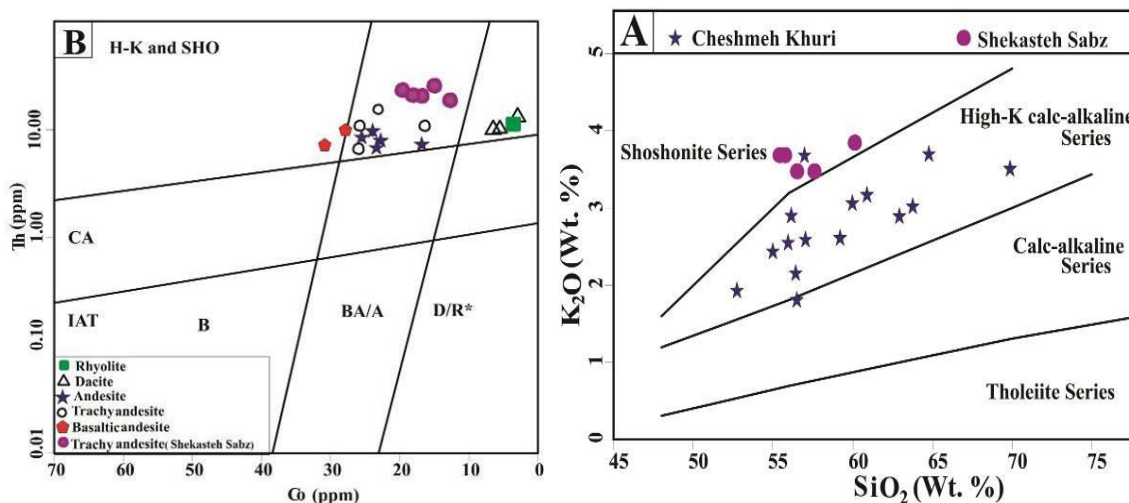
نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی شکسته‌سبز

میزان SiO_2 در سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری و شکسته‌سبز، ۵۵/۴۷ تا ۶۰/۱۷ درصد وزنی است. برای نام‌گذاری این سنگ‌ها از نمودار Middlemost (۱۹۹۴) بهره گرفته شد. نمونه‌های چشمه‌خوری و شکسته‌سبز در بخش تراکی آندزیت جای گرفته‌اند (شکل ۵- A). در نمودار SiO_2 در برابر Zr/TiO_2 پیشنهادی Winchester و Floyd (۱۹۷۷)، سنگ‌های آتشفشانی شکسته‌سبز در بخش تراکی آندزیت جای گرفته‌اند (شکل ۵- B). اندازه K_2O سنگ‌های آتشفشانی ۳/۴۷ تا ۳/۸۴ درصد وزنی است. در نمودار K_2O در برابر SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976)، همه نمونه‌ها در بخش شوشونیتی جای گرفته‌اند (شکل ۶- A). در نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007)، نمونه‌ها در بخش سنگ‌های کالک‌آلکان High-K و شوشونیتی و بخش آندزیت جای گرفته‌اند (شکل ۶- B).

از آنجایی که احتمال دگرسانی برای سنگ‌های آتشفشانی بیشتر از سنگ‌های آذرین درونی است، پس این سنگ‌ها را بر پایه عناصری که امکان جابجایی کمتری دارند می‌توان نامگذاری کرد (Karimpour, 2010). در نمودار SiO_2 در برابر Zr/TiO_2 پیشنهادی Winchester و Floyd (۱۹۷۷)، سنگ‌های آتشفشانی در بخش ریولیت، داسیت، آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت‌بازالتی جای گرفته‌اند (شکل ۵- B). مقدار K_2O سنگ‌های آتشفشانی ۱/۸ تا ۳/۷ درصد وزنی است. در نمودار K_2O در برابر SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976)، بیشتر نمونه‌ها در بخش کالک‌آلکان پتاسیم بالا جای گرفته‌اند (شکل ۶- A). نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007) برای شناسایی سری‌های ماگمایی کاربرد دارد. این نمودار بر پایه دو عنصر با رفتارهای بسیار متفاوت پیشنهاد شده است. Th یک عنصر ناسازگار است که در درجه کم ذوب‌بخشی وارد مذاب می‌شود؛ اما Co که دارای پایداری میدان بلوری بوده و شعاع مؤثر آن با عنصر Mg همانند است در درجه ذوب‌بخشی بالاتر وارد مذاب می‌شود. در این



شکل ۵- A) نمودار نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی (Middlemost, 1994)؛ B) نمودار نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی (Winchester and Floyd, 1977)



شکل ۶- A) نمودار بررسی میزان پتاسیم (Peccerillo and Taylor, 1976)؛ B) نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007)؛ B: بازالت؛ BA/A: آندزیت‌بازالتی و آندزیت؛ D/R*: لاتیت و تراکیت، که در این محدوده جای می‌گیرند.

(Taylor and McLennan, 1985). سنگ‌های گدازه‌ای

منطقه چشمه‌خوری دارای ناهنجاری منفی (۰/۷۷۲ تا ۰/۹۶۳) هستند و تنها یکی از نمونه‌ها (نمونه S-P-35) ناهنجاری مثبت (۱/۰۳۵) نشان می‌دهد (جدول ۱، شکل ۷- A).

در برابر ترکیب گوشته اولیه، همه نمونه‌های چشمه‌خوری از عناصر LILE (K, Rb و Cs) و عناصر ناسازگار (که رفتار همانند آنها دارند، مانند Th) در برابر عناصر HFSE (Ti, Nb, Zr, Y) دارای غنی‌شدگی هستند و تفاوت‌های اندک، مربوط به تغییر ترکیب کلی سنگ است (شکل ۷- B). غنی‌شدگی در عناصر LILE در برابر HFSE نشان‌دهنده ماگمای وابسته به پهنه‌های فرورانش است (Wilson, 1983; Pearce, 1983; Gill, 1981; Rollinson, 1993; 1989). احتمال اینکه عناصر HFSE در کانی‌هایی مانند روتیل و یا ایلمینیت وارد شوند بسیار بالاست و این نکته، وجود تخته (slab) فرورانده شده را نشان می‌دهد (Ryerson and Watson, 1987).

Edwards و همکاران (۱۹۹۴) بر این باور هستند که تهی‌شدگی از Ti در ماگماتیسم، وابسته به فرورانش و فوگاسیته اکسیژن است. هنگامی که فوگاسیته اکسیژن بالا باشد، دمای بیشتری نیاز است تا کانی‌های دارای Ti

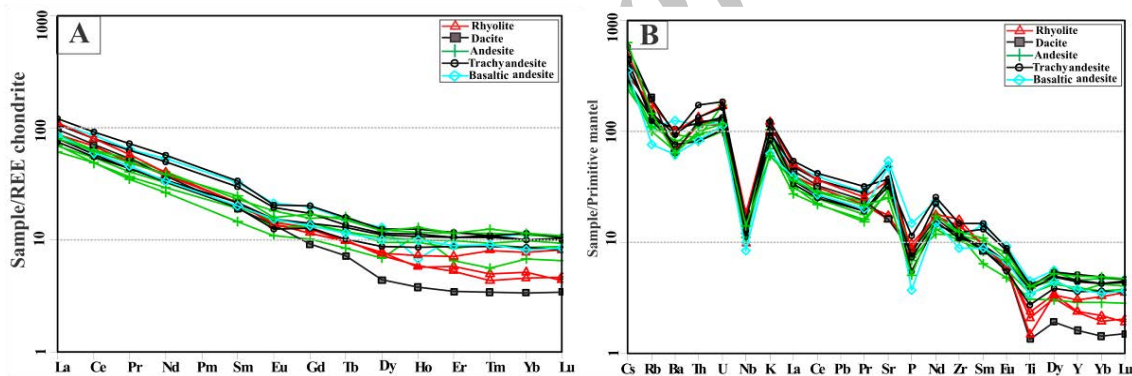
نمودارهای عنکبوتی و REE

(الف) منطقه چشمه‌خوری: عناصر خاکی نادر (REE) در برابر عناصر دیگر کمتر دچار هوازدگی و دگرسانی‌های گرمایی می‌شوند. از این رو، الگوی فراوانی آنها می‌تواند خاستگاه آذرین سنگ‌ها را نشان بدهد (Wilson, 1993; Bynton, 1985). به باور Rollinson (۱۹۸۹)، در نمودارهای عنکبوتی، روندهای کمابیش همانند و موازی فراوانی عناصر در نمونه‌ها (بدون در نظر گرفتن برخی آنومالی‌ها که برآمده از آرایش پوسته‌ای هستند) می‌تواند نشان‌دهنده خاستگاه یکسان این سنگ‌ها باشد. در نمودار عناصر خاکی نادر برای سنگ‌های آتشفشانی که در برابر ترکیب کندریت (Boynton, 1984) بهنجار شده، عناصر خاکی نادر سبک (LREE) در برابر عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) غنی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند. همچنین، HREE نیز یک روند کمابیش هموار دارد (شکل ۷- A). روند غنی‌شدگی از LREE در برابر HREE نشان‌دهنده یک ماگمای پدیدآمده در پهنه فرورانش است (Wilson, 1989; Pearce, 1983; Rollinson, 1981; 1993). هرگاه Eu/Eu^* بیش از یک باشد، ناهنجاری مثبت و هرگاه کمتر از یک باشد، ناهنجاری منفی است

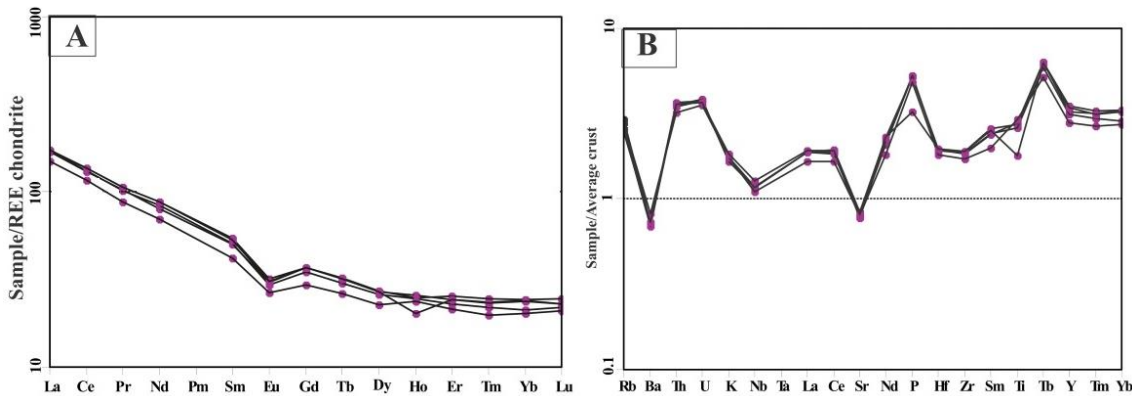
(A). همچنین، Eu/Eu^* (۰/۶۹۲ تا ۰/۷۵۴) نیز ناهنجاری منفی نشان می‌دهد هرچند سنگ‌های آتشفشانی منطقه چشمه‌خوری ناهنجاری منفی نشان نمی‌دهند (جدول ۱، شکل ۸- A). Eu عنصری سازگار در فلدسپارهاست و بی‌هنجاری منفی آن بر اثر جدایش فلدسپار در هنگام تبلور ماگما یا در پی به‌جای‌ماندن فلدسپار در خاستگاه در هنگام ذوب‌بخشی، در شرایطی که اکتیویته H_2O پایین است، روی می‌دهد (Tepper *et al.*, 1993). همچنین، در پی شرایط احیایی محیط ناهنجاری منفی Eu می‌تواند روی دهد. در نمودار به‌نچار شده در برابر ترکیب میانگین پوسته نیز غنی‌شدگی از عناصر HFSE مانند Zr , Nb , Ga , Ta , Y و Hf و کاهش شدید در Ba و Sr دیده می‌شود (شکل ۸- B).

در مذاب‌های جداشده از پهنه فرورانش تهی شوند. بنابراین، Ti تهی نمی‌شود و این عنصر ناهنجاری منفی نشان می‌دهد. همچنین، آنومالی منفی Ti می‌تواند نشان‌دهنده نقش اکسیدهای $Fe-Ti$ باشد (Rollinson, 1993). همچنین، مقادیر Nb و Ta می‌تواند نشان‌دهنده تهی‌شدگی رخ داده پیشین در سنگ‌های مخزن گوشته باشد (Walker *et al.*, 2001; Gust *et al.*, 1997). تهی‌شدگی فسفر در نمونه‌ها به جدایش آپاتیت از ماگما وابسته است (Wu *et al.*, 2003).

(ب) منطقه شکسته‌سبز: در نمودار عناصر خاکی نادر (REE) برای سنگ‌های آتشفشانی که به ترکیب کندریت به‌نچار شده (Boynton, 1984)، عناصر خاکی نادر سبک (LREE) در برابر عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) غنی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند (شکل ۸- A).



شکل ۷- سنگ‌های آتشفشانی منطقه چشمه‌خوری (خور ایران) بر روی (A) نمودار عناصر خاکی نادر به‌نچار شده در برابر ترکیب کندریت (Sun and McDonough, 1989)؛ (B) نمودار عناصر کمیاب به‌نچار شده در برابر ترکیب گوشته اولیه (Boynton, 1984).



شکل ۸- سنگ‌های آتشفشانی منطقه شکسته‌سبز (خور ایران) بر روی (A) نمودار عناصر خاکی نادر به‌نچار شده در برابر ترکیب کندریت (Boynton, 1984)؛ (B) نمودار به‌نچار شده برخی عناصر فرعی و خاکی نادر نسبت به میانگین پوسته (Weaver and Tarney, 1984).

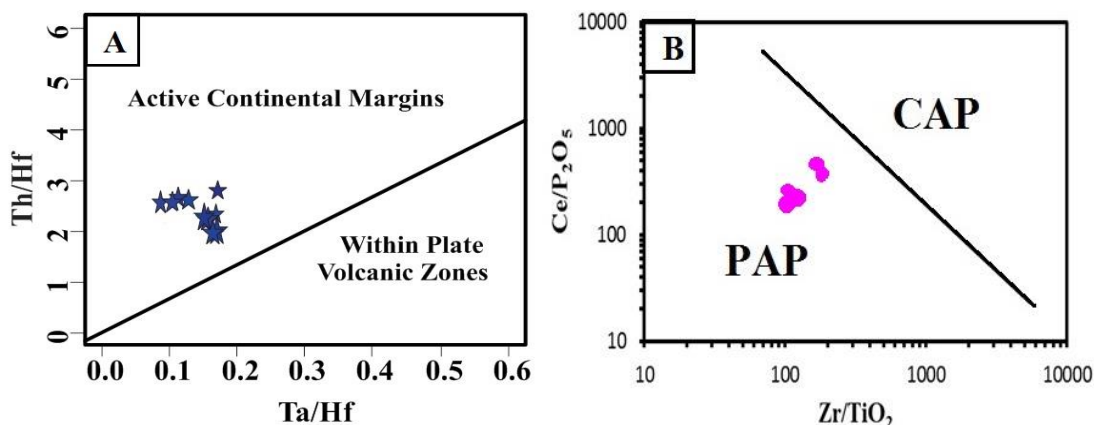
شناسایی جایگاه زمین‌ساختی

آندزیت، داسیت و ریولیت‌ها در پهنه‌های زمین‌ساختی گوناگونی یافت می‌شوند؛ اما بیشتر آنها در پهنه‌های فرورانش (جزایر کمانی و حاشیه قاره‌ای فعال) هستند و ترکیب آنها در این‌گونه پهنه‌ها با فرایندهای درون مرزهای همگرا بستگی دارد (Gill, 2010).

برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه چشمه‌خوری، نمودار Th/Hf در برابر Ta/Hf (Schandl and Gorton, 2000) (شکل ۹- A) به کار رفته که در آن سنگ‌های آتشفشانی در محدوده حواشی فعال قاره جای گرفته‌اند. برای شناسایی کمان‌های ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای و کمان‌های ماگمایی پس از برخورد، نمودار Muller and Groves (1997) به کار برده شد. در این نمودار، نمونه‌های شکسته‌سبز در گستره کمان‌های پس از برخورد (PAP) جای گرفته‌اند (شکل ۹- B).

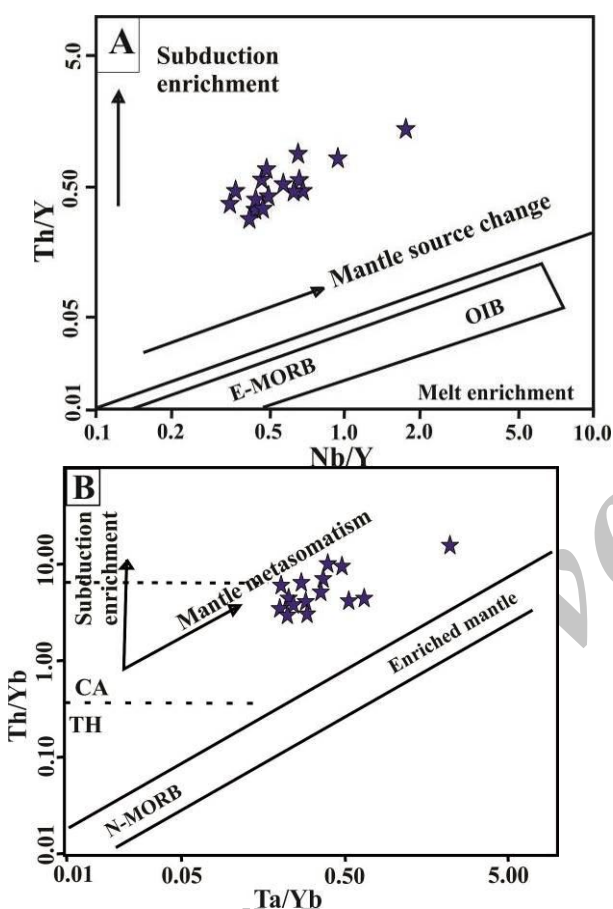
نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Siddiqui et al., 2007; Helvacı et al., 2009) نیز برای شناسایی جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه چشمه‌خوری به کار برده شد (شکل ۱۰). برای شناخت

گونه‌گوشته‌ای و پوسته فرورونده و رسوب‌ها از یکدیگر، با به‌کارگیری نسبت‌های عناصر نادر Ta/Yb-Th/Yb، دو نکته در نظر گرفته می‌شود (Pearce, 1983). نخست با جای‌دادن Yb در مخرج کسر، برای هر دو محور عمودی و افقی نمودار، آثار ذوب‌بخشی و تبلوربخشی در پیدایش ماگما به کمترین می‌رسد. در مرحله دوم، با به‌کارگیری دو عنصر بسیار ناسازگار در صورت کسر، برای هر دو محور عمودی و افقی نمودار، می‌توان درباره این‌که آیا سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده به گوشته غنی‌شده و یا گوشته تهی‌شده وابسته هستند، به یافته‌های خوبی دست یافت (Zarasvandi et al., 2013). بر پایه این نمودار آشکار شد که این سنگ‌ها وابسته به حاشیه قاره‌ای فعال هستند و ماگمای مادر آنها در پی ذوب‌بخشی خاستگاه گوشته غنی‌شده پدید آمده است. نسبت Th/Yb برای سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری در برابر ترکیب گوشته بالاست. این پدیده به فرایندهای وابسته به فرورانش نسبت داده می‌شود. بیشتر ماگماهای کمان در پی ذوب‌بخشی در گونه‌گوشته‌ای وابسته به فرورانش، و با افزوده‌شدن اجزای متاسوماتیک آزادشده از لیتوسفر اقیانوسی فرورونده پدید می‌آیند.



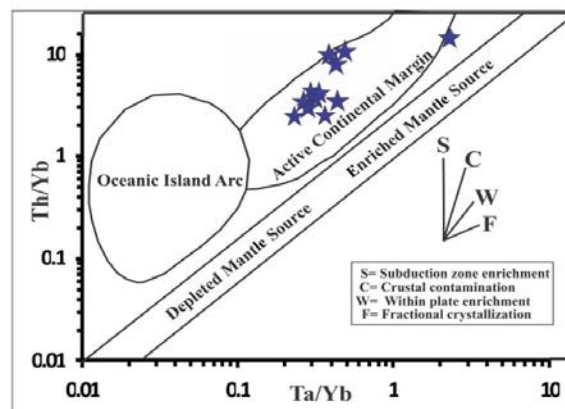
شکل ۹- A) نمودار Th/Hf در برابر Ta/Hf (Schandl and Gorton, 2000) برای سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری (خاور ایران)؛ B) نمودار Ce/P₂O₅-Zr/TiO₂ (Muller and Groves, 1997) برای سنگ‌های آتشفشانی شکسته‌سبز (خاور ایران): CAP: کمان حواشی فعال قاره ای؛ PAP: کمان پس از برخورد).

به گوشته زیر قاره‌ای در ناحیه کمان جابه‌جا می‌کند (Hermann *et al.*, 2006). افزوده‌شدن رسوب‌های پلاژیک و یا پوسته اقیانوسی دگرسان‌شده به خاستگاه ذوب‌شدگی، پیدایش آنومالی مثبت U و Th در نمودارهای عنکبوتی (شکل ۷- A) را در پی دارد (Fan *et al.*, 2003).



شکل ۱۰- جایگاه سنگ‌های منطقه چشمه‌خوری (خاور ایران) در: نمودار A) نمودار Th/Y در برابر Nb/Y (Pearce, 1983); B) نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983) (محدوده کالک‌آلکان برگرفته از McCulloch و Gamble (۱۹۹۱) است).

بر پایه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی (شکل‌های ۷- A و B) و نمودارهای رسم‌شده، می‌توان چنین برداشت کرد که در خاستگاه نمونه‌های بررسی شده، از میان اجزای فرورانشی، متاسوماتیسم وابسته به رسوب‌های فرورونده

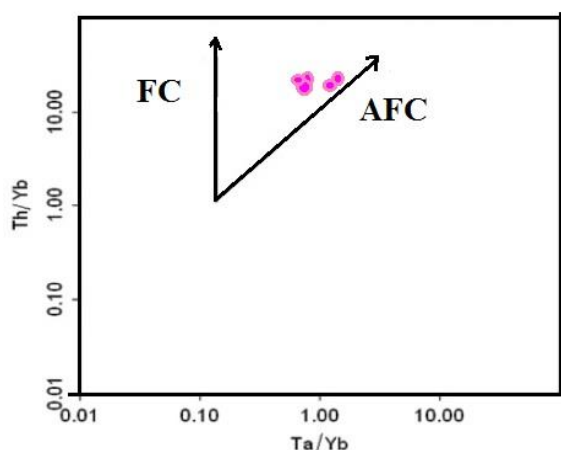


شکل ۱۱- جایگاه سنگ‌های منطقه چشمه‌خوری (خاور ایران) بر روی نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Siddiqui, *et al.*, 2007; Helvacı *et al.*, 2009).

بررسی خاستگاه

بر پایه نمودار Th/Yb در برابر Nb/Y که Pearce (۱۹۸۳) پیشنهاد کرده، نمونه‌های منطقه چشمه‌خوری در محدوده میان گوشته تغییر یافته و غنی‌شدگی فرورانش جای گرفته‌اند (شکل ۱۱- A). این ویژگی، نشان‌دهنده خاستگاه گوشته متاسوماتیسم شده با سیال‌های است. در نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983)، بیشتر نمونه‌های چشمه‌خوری و شکسته‌سبز در محدوده کالک‌آلکان پیشنهادی McCulloch و Gamble (۱۹۹۱) جای گرفته‌اند و از روند گوشته متاسوماتیسم شده پیروی می‌کنند (شکل ۱۱- B). نسبت بالای Th/Yb چه‌بسا ویژگی خاستگاهی باشد که در پی غنی‌شدگی فرورانش و یا غنی‌شدگی وابسته به آلیش پوسته، یا هر دو فرایند، دچار متاسوماتیسم شده است (Gencalioglu Kusu and Geneli, 2010). عناصر LREE، مانند Ce، La، Nd، Pr و Th، در سیال‌ها تحرک‌پذیری بالایی ندارند؛ اما رسوب‌ها از این عناصر غنی‌شده هستند (Elliott *et al.*, 1997). سیال آبدار جداشده از صفحه فرورونده می‌تواند برخی عناصر ناسازگار را از پوسته فرورونده

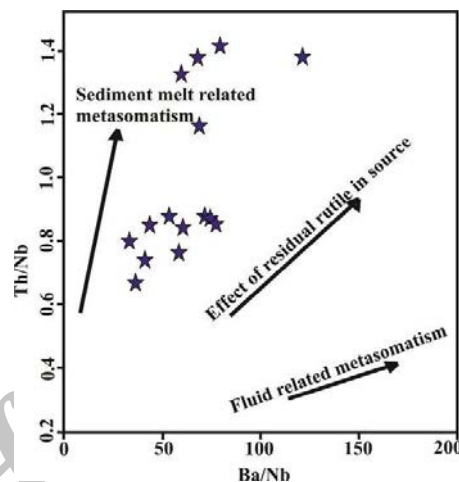
روندهای FC و AFC در این نمودار نشان‌دهنده دخالت فرایندهای آلیش پوسته‌ای در سنگ‌زایی ماگمای مادر سنگ‌های آتشفشانی در منطقه شکسته‌سبز است.



شکل ۱۳- نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 1983) برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه شکسته‌سبز (خاور ایران).

پیش، 0.7051 تا 0.7059 است. بر پایه مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه که برای سنگ‌های آندزیتی کمتر از 0.7060 است، خاستگاه ماگما از ذوب‌بخشی گوه‌گوشته‌ای است. برای سنگ‌های داسیتی مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه بیشتر از 0.7060 است که نشان می‌دهد نمونه‌ها در محدوده ایزوتوپی ماگمای پهنه فرورانش و متمایل به محیط ماگمای برگرفته از پوسته هستند.

بیشترین نقش را دارد و نمونه‌ها در راستای این روند جای گرفته‌اند (شکل ۱۲). برای بررسی تأثیر فرایندهای AFC، نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (شکل ۱۳) به کار برده می‌شود (Pearce, 1983).



شکل ۱۲- نمودار Th/Nb در برابر Ba/Nb (Ersoy et al., 2010) برای سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری (خاور ایران).

ایزوتوپ‌های Rb-Sr:

مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه در منطقه چشمه‌خوری با تجزیه نمونه سنگ کل و بر پایه سن به‌دست‌آمده به‌روش Rb-Sr در جدول ۲ آورده شده است (Lotfi, 1982). نسبت ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برای گدازه‌های داسیتی با توجه به سن $43/6$ میلیون سال پیش، 0.7060 تا 0.7075 است. این مقدار برای واحد آندزیتی با سن 39 میلیون سال

جدول ۲- داده‌های ایزوتوپی Rb-Sr برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه چشمه‌خوری (خاور ایران) (Lotfi, 1982)

Sample No.	Rock Type	Age (Ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$
236	Dacite	43.6	128.4	330.3	1.1258	0.70724	0.7065
235	Dacite	-	126.2	274.6	1.3226	0.70708	0.7063
317A	Dacite	-	141	314.9	1.2971	0.70825	0.7075
496A	Dacite	-	98	353.8	0.8024	0.70644	0.7060
203	Andesite	39	80.4	2725	0.0855	0.70553	0.7055
193	Andesite	-	88.3	665.7	0.3841	0.70613	0.7059
206	Andesite	-	83.8	717.6	0.3380	0.70524	0.7051

است. برای سنگ‌های داسیتی، $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه بیشتر از ۰/۷۰۶۰ است. ویژگی‌های زمین‌شیمی این سنگ‌ها نشان می‌دهد که آنها در پهنه فرورانش پدید آمده‌اند. ماگمای آنها از ذوب‌بخشی گوشته غنی شده ریشه گرفته و سپس در هنگام تفریق، دچار آلودگی پوسته‌ای شده است.

۲- سنگ‌های آتشفشانی تراکی‌آندزیتی در منطقه شکسته‌سبز گسترش یافته است. این سنگ‌ها دارای نسبت بالای $\text{FeO}^*/\text{FeO}^*+\text{MgO}$ (۲/۸۸ تا ۳/۴۱)، $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (۱/۰۸ تا ۱/۲)، مقادیر بالای ppm Nb, Ce > ۱۰۰ ppm, Y > ۳۹ ppm, Zr > ۳۶۰ ppm (۱۷/۷ تا ۱۹)، Ga (۱۴/۳ تا ۱۶/۶)، غنی‌شدگی شدید از عناصر REE، به‌ویژه LREE، و تهی‌شدگی از Eu هستند. در نمودار به‌نچار شده به ترکیب میانگین پوسته نیز غنی‌شدگی از عناصر HFSE، مانند Zr, Nb, Ta, Y, Hf، و کاهش شدید Sr و Ba دیده می‌شود. نمونه‌های تراکی‌آندزیتی منطقه شکسته‌سبز در محدوده آتشفشانی‌های پس از برخورد جای گرفته‌اند. از این‌رو، سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری و شکسته‌سبز دارای وابستگی زمین‌ساختی و ماگمایی با همدیگر هستند. سنگ‌های آتشفشانی چشمه‌خوری وابسته به پهنه فرورانش حاشیه‌قاره هستند و تراکی‌آندزیت‌های شکسته‌سبز در پی فعالیت‌های زمین‌ساختی یک پهنه کششی پس از برخورد پدید آمده‌اند.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با پشتیبانی مالی دانشگاه فردوسی مشهد و در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۲۲۷۳۱/۳ انجام شده است. نگارندگان از شرکت طیف‌کنسازان بینالود مشهد برای انجام تجزیه شیمیایی XRF سپاس‌گزارند.

کانی‌شناسی و زمین‌شیمی این سنگ‌ها نشان می‌دهد که آنها در پهنه فرورانش پدید آمده‌اند. از این‌رو، ماگمای آنها از ذوب‌بخشی گوشته غنی شده ریشه گرفته و سپس در هنگام جدایش، دچار آلودگی پوسته‌ای شده است. همچنین، مقدار نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه از سنگ‌های داسیتی به‌سوی سنگ‌های آندزیتی با کاهش سن، از ۰/۷۰۷ به ۰/۷۰۵۵ کاهش می‌یابد (جدول ۲).

نتیجه‌گیری

در دو منطقه چشمه‌خوری و شکسته‌سبز با فاصله ۱۲ کیلومتر از یکدیگر، دو نوع ماگماتیسم مختلف دیده می‌شود:

۱- سنگ‌های آتشفشانی داسیت، آندزیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت‌بازالتی در منطقه چشمه‌خوری گسترش یافته‌اند. بر پایه Gill (۱۹۸۱)، Pearce (۱۹۸۳)، Wilson (۱۹۸۹) و Rollinson (۱۹۹۳)، غنی‌شدگی از LREE در برابر HREE و غنی‌شدگی از عناصر LILE در برابر HFSE شواهد مهمی هستند که نشان می‌دهند این سنگ‌ها در پهنه ماگمایی فرورانش پدید آمده‌اند. آتشفشانی‌های محدوده چشمه‌خوری وابسته به حاشیه‌قاره‌ای فعال هستند و ماگمای مادر آنها در پی ذوب‌بخشی خاستگاه گوشته غنی شده پدید آمده است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شیمیایی می‌توان چنین برداشت کرد که درباره خاستگاه نمونه‌های بررسی شده، متاسوماتیسم وابسته به رسوب‌های صفحه فرورونده، بالاترین نقش را در میان اجزای فرورانشی داشته است. از آنجایی که مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه برای آندزیت‌ها کمتر از ۰/۷۰۶۰ است، خاستگاه ماگما از ذوب‌بخشی گونه‌گوشته‌ای

منابع

- Abbasi Niazabadi, H. (2010) Studies of economic geology on Fe and Cu mineralization in north of Khur area. M.Sc. thesis, University of Payam Noor of Tabriz, Tabriz, Iran (in Persian).
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M. and Homam, S. M. (2011) Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut block, eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 41(3): 283-296.
- Barker, D. S. (1983) *Igneous rocks*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Boynton, W. V. (1984) Cosmochemistry of rare earth elements: meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry* (Ed. Henderson, P.) 2: 63-114. *Developments in Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam.
- Edwards, C. M., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F., Morris, J. D., Leeman, W. P. and Harmon, R. S. (1994) The transition to potassic alkaline volcanism in island arcs: the Ringgit-Beser complex, east Java, Indonesia. *Petrology* 35(6): 1557-1595.
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., White, W. and Bourdon, B. (1997) Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research* 102(B7): 14991-15019.
- Ersoy, E. Y., Helvacı, C. and Palmer, M. R. (2010) Mantle source characteristics and melting models for the early-middle Miocene mafic volcanism in western Anatolia: implications for enrichment processes of mantle lithosphere and origin of K-rich volcanism in post-collisional settings. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198(1-2): 112-128.
- Fan, W., Gue, F., Wang, Y. J. and Lin, G. (2003) Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of postorogenic extension in the northern Da Hinggan mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 121: 115-135.
- Gencalioglu Kuscı, G. and Geneli, F. (2010) Review of post-collisional volcanism in the Central Anatolian volcanic province (Turkey), with special reference to the Tepekoy volcanic complex, international. *Journal of Earth Sciences* 99(3): 593-621.
- Gill, J. B. (1981) *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer, New York.
- Gill, R. (2010) *igneous rocks and processes*, Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey.
- Gust, D. A., Arculus R. A. and Kersting A. B. (1997) Aspects of magma sources and processes in the Honshu arc. *The Canadian Mineralogist* 35(2): 347-365.
- Hamooni, s. J., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Hajimirzajan, H. (2013) Geology, mineralization, geochemistry and petrology of intrusions of the Roud Gaz prospect area southeast of Gonabad. *Petrology* 4(15): 77-96 (in Persian).
- Hashemi, S. M., Emami, M., Vossough Abedini, M., Pourmoafi, M. and Ghorbani, M. (2007) Petrology of Quaternary basalts of Tabas (east of Iran). *Geosciences* 68: 26-39 (in Persian).
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. and Mitchell, S. F. (2007) Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Petrology* 48(12): 2341-2357.
- Helvacı, C., Ersoy, E. Y., Sözbilir, H., Erkül, F., Sümer, Ö. and Uzel, B. (2009) Geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, western Anatolia. *Volcanology and Geothermal Research* 185(3): 181-202.

- Hermann, J., Spandler, C., Hack, A. and Korsakov, A. V. (2006) Aqueous fluids and hydrous melts in high-pressure and ultra-high pressure rocks: implications for element transfer in subduction zones. *Lithos* 92(3): 399-417.
- Jamie, A. R. (2007) Semi-detailed exploration of minerals in Sarayan county, Mineral industries research and development company, Pars Kani, Birjand (in Persian).
- Jamie, A. R. (2008) Detailed exploration of minerals in Sarayan County, Industry, mining and trade organization of South Khorasan province, Birjand (in Persian).
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Heidariane Shahri, M. R. (2014) Geology, alteration, mineralization and geochemistry of Shekaste Sabz area prospect, north west of Birjand. *Iranian Journal of crystallography and mineralogy* 22(3): 507-520 (in Persian).
- Jung, D., Keller, J., Khorasani, R., Marcks, Chr., Baumann, A. and Horn, P. (1983) Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran. Geodynamic project (Geotraverse) in Iran. Geological Survey of Iran, Report no. 1: 285-336.
- Karimpour, M. H. (2010) Geochemistry, Igneous petrology and magmatic ore deposits. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (in Persian).
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., Farmer, L., Saadat, S. and Malekezadeh, A. (2011) Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Geopersia* 1(1): 19-36.
- Kaviani Sadr, Kh. (2012) Effect of structural controllers on ore mineral deposits in Cheshme Khuri area (Northwest of Birjand). M.Sc. thesis, Birjand University, Birjand, Iran (in Persian).
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68(1-2): 277-279.
- Lotfi, M. (1982) Geological and geochemical investigations on the volcanogenic Cu, Pb, Zn, Sb ore-mineralizations in the Shurab-GaleChah and northwest of Khur (Lut, east of Iran). Ph.D. thesis, Hamburg Universitat, Hamburg, Germany.
- Lotfi, M. (1995) Explanatory text of Sarghanj. Geological Quadrangle Map 1:100,000, No. 7756, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Esfandiarpour, A. (2014) Petrography and petrogenesis of intrusive rocks in the northeast of Nayband, east of Iran. *Petrology* 4(16): 105-124 (in Persian).
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Stern, C. R. (2012) Zircon U-Pb dating of Maherabad porphyry copper-gold prospect area: evidence for a late Eocene porphyry-related metallogenic epoch in east of Iran. *Economic Geology* 3(1): 41-60 (in Persian).
- McCulloch, M. T. and Gamble, J. A. (1991) Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters* 102(3): 358-374.
- Middlemost, E. A. K. (1994) Naming materials in the magma /igneous rock system. *Earth-Science Reviews* 37(3-4): 215-224.
- Mir Baloch, A. (2012) Geology, mineralization, geochemistry and processing of satellite images in east of Cheshme Khuri area, Birjand. M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (in Persian).
- Moradi Noghondar, M., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Farmer, G. L. and Stern, C. R. (2012) Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Rb-Sr and Sm-Nd isotopes of Najmabad monzonitic rocks south of Ghonabad. *Petrology* 3(11): 77-96 (in Persian).

- Muller, D. and Groves, D. I. (1997) Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. Springer-Verlag, Berlin.
- 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. Shiva, Nantwich.
- Pearce, T. H., Russell, J. K. and Wolfson, I. (1987) Laser-interference and normarski interference imaging of zoning profiles in plagioclase phenocrysts from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington. *American Mineralogist* 72 (11-12): 1131-1143.
- 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 (1): 63-81.
- Raymond, L. A. (2002) The study of igneous sedimentary and metamorphic rocks. 2nd edition, McGraw-Hill, New York.
- Rollinson, H. (1993) Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, London.
- 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. *Petrology* 44(8): 1433-1484.
- Ryerson F. J. and Watson, E. B. (1987) Rutile saturation in magmas: implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts. *Earth and Planetary Science Letters* 86(2-4): 225-239.
- Salim, L. (2012) Geology, petrology and geochemistry of volcanic and sub volcanic rocks in Cheshme Khuri area (North west of Birjand). M.Sc. thesis, Birjand University, Birjand, Iran (in Persian).
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P. (2000) From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist* 38 (5): 1065-1073.
- Siddiqui, R. H., Asif Khan, M. and Qasim Jan, M. (2007) Geochemistry and petrogenesis of the Miocene alkaline and sub-alkaline volcanic rocks from the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan: Implications for porphyry Cu-Mo-Au deposits. *Himalayan Earth Sciences* 40: 1-23.
- Stocklin, J. and Nabavi, M. H. (1969) Explanatory text of Boshruyeh. Geological Quadrangle Map 1:250,000, No. 37, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Sun, S. S. and Mc Donough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Magmatism in the ocean basins (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publications 42: 313-345. Geological Society, London.
- Tarkian, M., Lotfi M. and Baumann, A. (1983) Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran, Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran 51: 357-383.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) The continental crust, its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, Oxford.
- Tepper, J.H., Nelson, B.K., Bergantz, G.W. and Irving, A.J. (1993) Petrology of the Chilliwack atholith, North Cascades, Washington: generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 113 (3): 333-351.
- Walker, J. A., Patino, L. C., Carr, M. J. and Feigenson, M. D. (2001) Slab control over HFSE depletions in central Nicaragua. *Earth and Planetary Science Letters* 192 (4): 533-543.

- Weaver, B. L. and Tarney, J. (1984) Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. *Nature* 310 (5978): 575-577.
- Wilson, M. (1989) *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation prototextures and setting of VMS mineralization in the Pilbara ducts using immobile elements. *Chemistry Geology* 20: 325-344.
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., Lo, C. H., Yui, T. F., Lin, Q., Ge, W. C. and Sun, D. Y. (2003) Highly fractionated I-type granites in China (I): geochronology and petrogenesis. *Lithos* 66 (3-4): 241-273.
- Ya Hosseini, A. (2012) *Geology, mineralization and geochemistry with special reference on industrial applications clay deposits in west of Cheshme Khuri area, Birjand*. M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (in Persian).
- Zarasvandi, A., Pourkaseb, H., Saki, A. and Karevani, M. (2013) Investigation of petrology and geochemistry of volcanic rocks in the Kasian area, northeast of Khorramabad. *Petrology* 4(14): 39-50 (in Persian).

Archive of SID

Petrology and geochemistry of volcanic rocks of Cheshmeh Khuri and Shekasteh Sabz areas, Khur, northwest of Birjand

Maryam Javidi Moghaddam ¹, Mohammad Hassan Karimpour ^{2*}, Khosrow Ebrahimi Nasrabadi ², Azade Malekzadeh Shafaroudi ² and Mohammad Reza Haidarian Shahri ²

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Research Center for Ore Deposits of Eastern Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

Khur area is located in east of Iran and northwest of Birjand. The area comprises outcrops of Eocene to Oligocene volcanics with basaltic andesite to rhyolite composition, which were intruded by subvolcanic and intrusive bodies of granodiorite to gabbro. In the present work, petrogenesis of volcanic units in Cheshmeh Khuri and Shekasteh Sabz areas was studied, which are located in Khur area and these volcanics have most widespread in them. Rhyolite, dacite, andesite, trachyandesite and basaltic andesite units in Cheshmeh Khuri and trachyandesite unit in Shekasteh Sabz were identified. The main textures of these units are porphyritic, hialoporphyritic and microlitic and plagioclase, pyroxene, K-feldspar, hornblende, biotite and quartz are the main minerals. Volcanic units of Cheshmeh Khuri have characteristic of high-K Calc-alkaline. Enrichment of LREE relative to HREE and LILE to HFSE are important evidences that magma was formed in a magmatic belt of a subduction zone. Based on the initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of andesite and dacite, their magma has originated from partial melting of an enriched mantle and contaminated with the crust through its differentiation. Trachyandesites of Shekaste Sabz have characteristic of shoshonitic nature. These units are characterized by high FeOt/FeOt+MgO, K₂O/Na₂O and Zr>360 ppm, Y>39 ppm, and Ce> 100 ppm. Also, they are enrichment in REE particularly in LREE, depletion of Eu, strong enrichment in HFSE, and depletion in Ba and Sr. Therefore, trachyandesites of Shekaste Sabz belong to post collision volcanics.

Key words: Geochemistry, Subduction zone, Extension zone, Cheshmeh Khuri, Shekasteh Sabz, north of Lut block

* karimpur@um.ac.ir