پتـــــرولوژی، سال هشتم، شماره سیام، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۸۱-۹۸
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۶

بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی دایک‌های همراه با کانی‌سازی مس در جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان)

مریم صالحی [۱]، زهرا اعلمی‌نیا [۱] * و مهین منصوری‌اصفهانی [۲]
[۱] گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌پایه، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
[۲] دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان ، اصفهان، ایران

چکیده

منطقـــه بررســـی‌شـــدهٔ اردســـتان در شـــمال‌خـــاوری اصـــفهان و در حاشـــیه بیرونـــی کمـــان آتشفشـــانی ارومیـــه-دختـــر جـــای دارد. در ایـــن منطقـــه، کانـــه‌زایـــی مـــس همـــراه بـــا دایـــک‌هاســـت و کانـــه‌زایـــی بـــه‌صـــورت ســـولفیدی (کالکوســـیت، کالکوپیریـــت و بورنیـــت) و اکســـیدی (مالاکیـــت و آزوریـــت) اســـت. بررســـی‌هـــای صـــحرایی، ســـنگ‌نگـــاری و زمـــین‌شـــیمیایی در ایـــن منطقـــه، دو گـــروه دایـــک گونـــاگون را نشـــان مـــی‌دهـــد. دایـــک‌هـــای گـــروه اول رونـــد شـــمال‌بـــاختری- جنـــوب‌خـــاوری دارنـــد و از گـــابرو دانـــه‌ریـــز ســـاخته شـــده‌انـــد. دایـــک‌هـــای گـــروه دوم رونـــد کمـــابیش خـــاوری- بـــاختری دارنـــد و از جـــنس گـــابرو و پیروکســـن دیوریـــت هســـتند. از دیـــدگاه زمـــین‌شـــیمیایی، دایـــک‌هـــا دارای SiO_2 از ۴۵/۸ تـــا ۵۲/۸ درصـــد وزنـــی، MgO بـــا میـــانگین ۶/۹ درصـــد وزنـــی، Na_2O+K_2O بـــا ۵/۶ درصـــد وزنـــی و نســـبت Al_2O_3/TiO_2 برابـــر ۱۶/۸ معرفـــی مـــی‌شـــوند. همـــه دایـــک‌هـــا، دارای سرشـــت آلکـــالن بـــوده و بـــه مفهـــوم وســـیع‌تـــر، بـــا محـــیط زمـــین‌ســـاختی پشـــت کمـــان همـــراه بـــا تحـــولات شـــیمیایی در خاســـتگاه ماگمـــا وابســـته هســـتند. دایـــک‌هـــای گـــروه دوم در برابـــر دایـــک‌هـــای گـــروه اول، از عنصـــرهای Ba، Sr، Rb، K، Zr، Nb، Ti، Cr و Ni غنـــی‌شـــدگی نشـــان مـــی‌دهنـــد. دایـــک‌هـــای گـــروه اول از یـــک گوشـــته تغییریافتـــهٔ فرورونـــده در مرحلـــه کمـــان نابـــالغ پدیـــد آمـــده‌انـــد و دایـــک‌هـــای گـــروه دوم دارای خاســـتگاه گوشـــته آستنوســـفری غنـــی‌شـــده در مرحلـــه کمـــان عـــادی هســـتند. همبســـتگی انـــدکی میـــان عنصـــر مـــس بـــا عنصـــرهای فـــرار در ترکیـــب دایـــک‌هـــا دیـــده مـــی‌شـــود. بـــه‌طـــورکلی، نیروهـــای زمـــین‌ســـاختیِ مشـــابه عامـــل کنترلـــی مهمـــی در پیـــدایش دایـــک‌هـــای گـــروه دوم (خـــاوری- بـــاختری) به‌همراه کانی‌سازی هستند.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی مس، دایک، زمین‌شیمی، جنوب‌خاوری اردستان، پهنه ارومیه‌دختر

* z.alaminia@sci.ui.ac.ir; alaminia_geo@yahoo.com
Copyright©2017, 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.

مقدمه

از دیرباز بررسی‌های گوناگونی درباره وابستگی عمومی کانسارها با دایک‌ها انجام شده است (Lewis, 1955; Mookher Jee, 1970; Papezik *et al.*, 1981; Alaminia *et al.*, 2013). برای نمونه، در معدن‌های مس شمال شیلی، کانی‌سازی مسِ نوع استراتاباند با دایک‌ها و سنگ‌های آتشفشانی میزبان ارتباط سنی دارند (Aguilera *et al.*, 2005; Ramirez *et al.*, 2006). همچنین، دسته دایک‌های کوینناوی همراهی خوبی با کانسارهای سولفیدی در بسیاری از معدن‌های مس انتاریو و شمال‌باختریِ کبک (کانادا) نشان می‌دهند (Bornhorst and Barron, 2011). در جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) رخنمون‌های فراوانی از کانی‌سازی مس همراه با دسته دایک‌های فراوان دیده می‌شوند.

بررسی‌های بسیاری روی دایک‌های اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) انجام شده است. برخی از آنها عبارتند از بررسی‌های Zahedi و Amini (۱۹۸۳) و Radfar (۱۹۹۹) که به‌ترتیب نقشه‌های زمین‌شناسی کاشان و اردستان را تهیه کرده‌اند. همچنین، Mohmmadi (۱۹۹۵) آغاز فعالیت آتشفشانی جنوب‌خاوری اردستان را ائوسن زیرین و اوج فعالیت آنها را در ائوسن میانی و بالایی می‌داند. برپایه پیشنهاد Yeganefar (۲۰۰۷)، آنها از سری ماگمایی کالک‌آلکالن هستند و در پهنه فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای پدید آمده‌اند. Jabbari و همکاران (۲۰۱۰) پیدایش دایک‌های بازالتی جنوب‌باختری اردستان را پیامد آمیختگی ماگمایی دو ماگمای بازالتی دانسته‌اند. Sadeghian و Ghaffari (۲۰۱۱) دایک‌های پیش از توده ظفرقند و همزمان با آن را گواهی برای رویداد آمیختگی ماگمایی دانسته‌اند. Yeganefar و همکاران (۲۰۱۳) سنگ‌های آتشفشانی در باختر نایین تا جنوب اردستان را از دیدگاه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی به پنج گروه (زیرکونیم پایین، پتاسیم بالا، توریم بالا، نیوبیم بالا و دسته آداکیت) رده‌بندی کرده‌اند که در فاصله ۲۶/۵ تا ۱۸/۷ میلیون سال پیش پدید آمده‌اند. Kananian و همکاران (۲۰۱۴)، دایک‌های منطقه نصرند (جنوب‌خاوری اردستان) را بررسی کرده و این سنگ‌ها را از یک خاستگاه متابازالتی و آلایش با پوسته قاره‌ای دانسته‌اند. با وجود این، برخی دایک‌های مافیک که دارای کانی‌سازی مس هستند تا کنون بررسی نشده‌اند. پیدایش این دایک‌ها پس از فعالیت آتشفشانی ائوسن میانی تا بالایی روی داده است؛ به‌گونه‌ای‌که سنگ‌های آذرین ائوسن بالایی را قطع کرده‌اند.

بررسی‌های دقیق زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی دایک‌ها و بررسی رابطه آنها با کانی‌سازی منطقه ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش، روابط صحرایی میان دایک‌ها با کانی‌سازی بررسی شده و یافته‌های جدیدی از سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی و پهنه زمین‌ساختی دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان به‌دست آمده است که می‌تواند به شناخت پیدایش کانی‌سازی همراهشان کمک کند.

روش انجام پژوهش

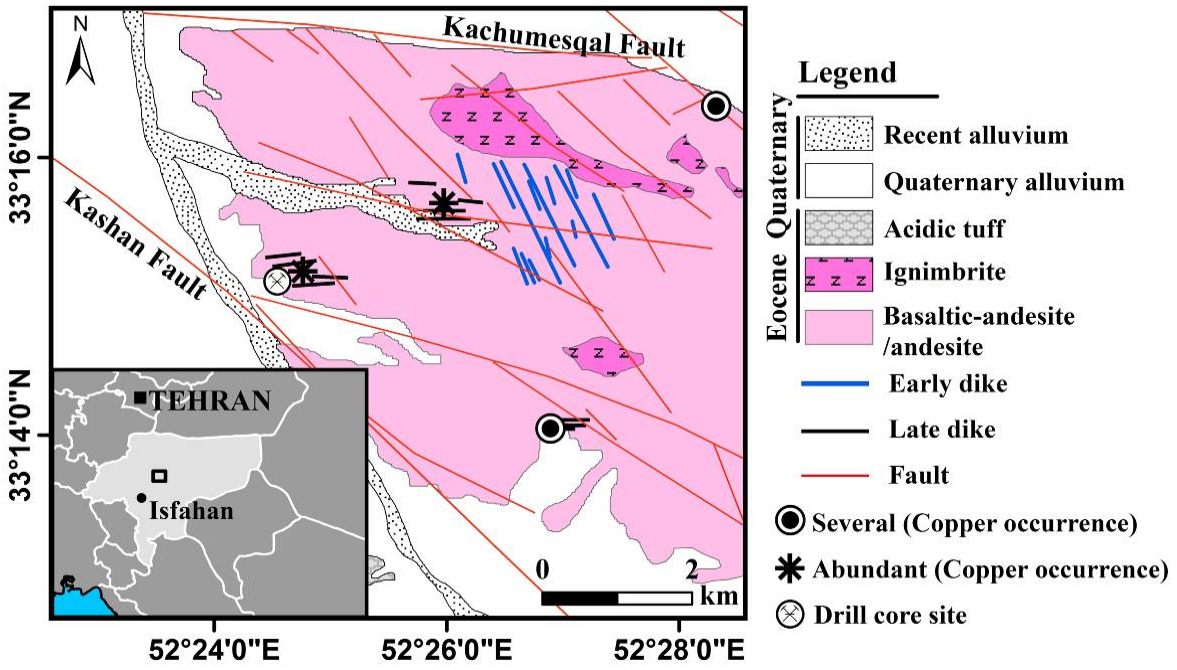
برای دست‌یابی به اهداف این پژوهش، دایک‌ها از بیش از ۲۰ نقطه گوناگون بازدید و نمونه‌برداری شد. افزون‌بر بررسی‌های صحرایی، بررسی‌های سنگ‌نگاری روی ۳۰ مقطع نازک و ۱۲ مقطع صیقلی انجام شد. پس از بررسی میکروسکوپیِ کانی‌شناسی، ۵ نمونه از دایک‌های خاوری-باختری و ۴ نمونه از دایک‌های شمال‌باختری-

جنوب‌خاوری که کمترین هوازدگی و دگرسانی را داشتند و همچنین، یک نمونه دگرسان برگزیده شدند. سپس با چکش دستی خرد و در هاون آگات تا اندازه ۲۰۰ مش پودر شده و برای تجزیه اکسیدهای اصلی و عنصرهای فرعی به دانشگاه سالزبورگ اتریش فرستاده شدند. مقدار عنصرهای اصلی و فرعی کل سنگ، به‌جز عنصرهای خاکی نادر، به روش MicroXRF (مجهز به ابزار Bruker S4) تجزیه شد. مقدار توریم در ۵ نمونه از دو دسته دایک، با پرتوسنج گاما اندازه‌گیری شد. نمودارهای پترولوژیک با نرم‌افزارهای GCDKIT (۲۰۰۸ ©) و EXCEL (۲۰۱۳ ©) رسم شدند.

زمین‌شناسی

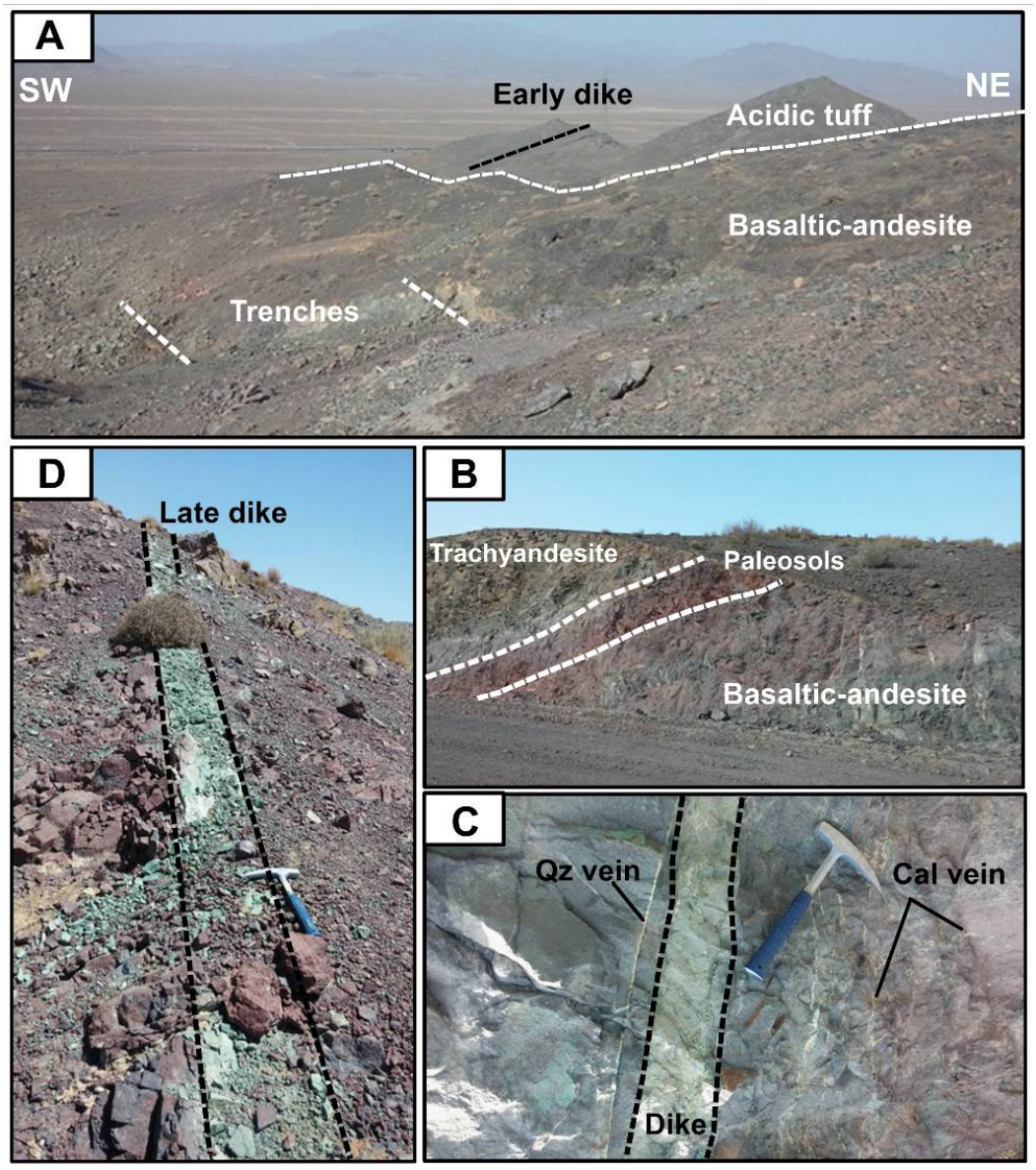
گستره بررسی‌شده در ۱۲ کیلومتری جنوب‌خاوری اردستان، در بخش میانی و حاشیه بیرونی پهنه آتشفشانی ارومیه-دختر و درکنار پهنه ایران مرکزی جای دارد. این منطقه با گستردگیِ نزدیک به ۳۰ کیلومتر مربع در محدوده ´۲۴ °۵۲ تا ´۲۸ °۵۲ طول جغرافیایی خاوری و ´۱۴ °۳۳ تا ´۱۷ °۳۳ عرض جغرافیایی شمالی در خاوری‌ترین بخش نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان است (Radfar, 1999).

در این منطقه، سنگ‌های آتشفشانی از کهن‌ترین و گسترده‌ترین رخنمون‌ها و دایک‌ها از جوان‌ترین سنگ‌های آذرین هستند. بیشتر دایک‌ها به‌صورت دسته دایک در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند (شکل ۱). سنگ‌های آتشفشانی در مناطق کم‌ارتفاع با کنگلومرای پلی‌ژنتیک نئوژن و رسوب‌های آبرفتی پوشیده شده‌اند.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه بررسی‌شده در جنوب‌خاوری اردستان (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان، با تغییرات اندک از Radfar (۱۹۹۹). در باختر و مرکز این محدوده، کانی‌سازی عیار بالای مس رخ داده است.

(الـف) سـنگ‌هـای آتشفشـانی و آذرآواری: بیشتر بلندی‌هـای منطقـه از سـنگ‌هـای آتشفشـانی و آذرآواری سـاخته شـده‌انـد (شـکل ۲- A). بـازه ترکیبی آنها آنـدزیت، آنـدزیت‌بازالـت و تراکـی‌آنـدزیت بـوده و دارای سـن ائوسـن میـانی تـا بـالایی هسـتند (Radfar, 1999). در میـان سـنگ‌هـای آتشفشـانی بازالتی و آندزیت‌بازالتی، بخش‌هـای سـرخ‌رنگـی اسـت که هماتیتی‌شدن گسترده در آنها تغییر رنگ‌شان را در پـی داشـته و نشـان‌دهنـدۀ رویـداد موضـعی هوازدگی در محیط ساحلی هستند (شکل ۲- B).



شکل ۲- تصـویرهای صـحرایی از منطقـه بررسـی‌شـده در جنـوب‌خـاوری اردسـتان (شـمال‌خـاوری اصـفهان): A) بلنـدی‌هـای منطقـه کـه از آندزیت‌بازالت‌ها ساخته شده‌اند و سـنگ میزبـان کـانی‌سـازی مـس هسـتند (دیـد بـه‌سـوی جنـوب‌بـاختری)؛ B) مـرز آشـکارِ آنـدزیت‌بازالـت هماتیتی شده (paleosols) با تراکـی‌آنـدزیت؛ C) رگـه‌هـای کـوارتز و کلسـیت کـه بـه مـوازات دایـک مافیـک کلریتـی‌شـده دیـده مـی‌شـوند؛ D) دایک مافیک کلریتی‌شده و دارای کانی‌سازی مس، آندزیت‌بازالت هماتیتی‌شده را قطع کرده است.

نبود گدازه‌های بالشی در واحد آتشفشانی این پهنه نشان می‌دهد که واحدهای سنگی در محیط زیردریایی ژرف پدید نیامده‌اند. در بخش‌های باختری و جنوبی این محدوده، سنگ‌های آذرآواری اسیدی به‌صورت نهشته‌های ایگنمبریت با بافت جریانی و با سن ائوسن میانی تا بالایی (Radfar, 1999) رخنمون کمی دارند. دارابودن سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری نشانهٔ پیدایش این سنگ‌ها در محیط خشکی و نزدیک به خشکی و یا دریایی کم‌ژرف است (Radfar, 1999). توف‌های اسیدی بیشتر با ترکیب داسیت و به‌صورت رخنمون کوچکی در جنوب‌باختری منطقه دیده می‌شوند. در سن‌سنجی جدیدِ Chiu و همکاران (۲۰۱۳)، سن سنگ‌های آتشفشانی منطقه نایین (جنوب‌خاوری منطقه بررسی‌شده) ۲۶ تا ۳۰ میلیون سال (الیگوسن) به‌دست آمده است.

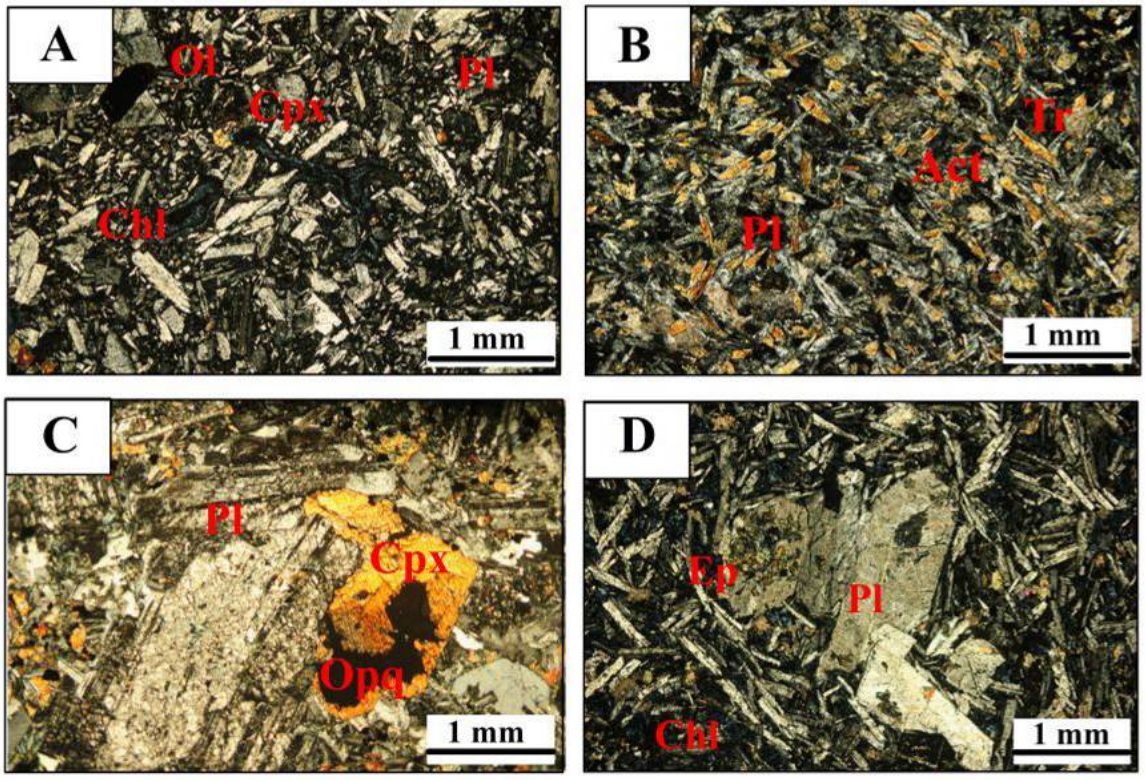
(ب) سنگ‌های نیمه‌ژرف: جوان‌ترین واحد سنگ‌شناسی آذرین، دایک‌ها و گاه استوک‌های کوچک هستند. این دایک‌ها بیشتر به‌صورت دسته دایک و به موازات یکدیگر در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند. بیشترین رخنمون دایک‌ها در بخش مرکزی محدوده درفاصلهٔ گسل خاوری- باختری کچومثقال و گسل شمال‌باختری- جنوب‌خاوری کاشان دیده می‌شود (شکل ۱). دایک‌ها ترکیب گابرو، گابرودیوریت و پیروکسن‌دیوریت دارند و به رنگ‌های سبز و خاکستری تا سیاه و به‌صورت صلب و سخت در سطح زمین دیده می‌شوند. آنها رخنمون‌هایی با پهنای کمتر از ۰/۱ تا ۲ متر، درازای نزدیک‌به ۵ تا بیش از ۱۰۰ متر دارند و بیشترشان را می‌توان با شیب ۶۰ تا ۸۵ درجه به‌سوی جنوب‌خاوری روی زمین ردیابی کرد (شکل‌های ۲- C و ۲- D). دایک‌های این منطقه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان (Radfar, 1999)، روند شمال‌باختری- جتوب‌خاوری دارند؛ اما در بررسی‌های صحرایی دو روند کمابیش خاوری- باختری و شمال‌باختری- جنوب‌خاوری برای آنها شناسایی شد. برپایه ترکیب و ارتباطات زمانی، دایک‌ها به دو گروه رده‌بندی می‌شوند: دایک‌های گروه اول شمال‌باختری- جنوب‌خاوری بوده و در راستای گسل‌های اصلی منطقه هستند؛ دایک‌های گروه دوم خاوری- باختری بوده و کمابیش بر گسل‌های فرعی عمود هستند (شکل ۱). حضور این دایک‌ها و پراکندگی آنها در سراسر منطقه بررسی‌شده نشان‌دهندهٔ جای‌داشتن مخزن ماگمایی در زیر این منطقه است که پس از پایان فوران ماگمایی به شکل تأخیری در واحدهای آتشفشانی تزریق شده‌اند. به‌نظر می‌رسد دایک‌ها در مسیر گسل‌ها پدید آمده‌اند. بر پایه یافته‌های صحرایی، Jabbari و همکاران (۲۰۱۰) دایک‌های جنوب اردستان را جوان‌تر از الیگوسن دانسته‌اند و سن آنها را میوسن می‌دانند. برپایه سن توده‌های مشابه در نقاط همجوار محدوده جنوب‌خاوری اردستان، Chiu و همکاران (۲۰۱۳) سن ماگماتیسم کالک‌آلکالن ارومیه-دختر را میوسن میانی (Ma ~۱۰) دانسته‌اند.

(پ) سنگ‌های رسوبی: سنگ‌های رسوبی شامل کنگلومرای نئوژن و رسوب‌های آبرفتی جوان هستند. کنگلومرای نئوژن یک کنگلومرای پلی‌ژنتیک است که بخش‌های سازندهٔ آن از قطعات سنگ‌های آذرین شامل گابرو، گرانودیوریت‌های اپیدوتی‌شده و کلریتی‌شده، آتشفشانی‌های کلریتی‌شده و زئولیتی‌شده، قطعات

میلونیتی، رگه‌های کوارتزی تخریب شده و قطعات از سنگ‌های دارای اکسیدهای مس ساخته شده‌اند. اندازه قطعات یادشده بسیار متغیر بوده و از چند میلیمتر تا نزدیک به نیم متر است. رسوب‌های آبرفتی جوان بیشتر در منطقه پست و کم‌ارتفاع یا مسیر آبراهه‌ها یافت می‌شوند. این رسوب‌ها دارای ترکیب متنوعی هستند و بیشتر از لیتولوژی سنگ‌های مجاور و پیرامون خود پیروی می‌کنند.

سنگ‌نگاری دایک‌ها

رخنمون‌های دایک‌های گروه اول با رنگ خاکستری سیاه و در راستای گسل‌های اصلی منطقه، دورتر از ناحیه کانی‌سازی دیده می‌شوند. این دایک‌ها ترکیب گابرو و گابرودیوریت دارند و به‌صورت ریزدانه با بافت اینترگرانولار و میکرولیتی هستند. پلاژیوکلاز و گاه کلینوپیروکسن (کمتر از ۵ درصد حجمی) و الیوین از کانی‌های اصلی سنگ و مگنتیت از کانی‌های فرعی آن هستند. پلاژیوکلازها گاه سوسوریتی شده‌اند و کلینوپیروکسن‌ها اورالیتی شده و به آمفیبول (ترمولیت و اکتینولیت)، کلریت و اپیدوت تجزیه شده‌اند (شکل‌های ۳- B و ۳- A).



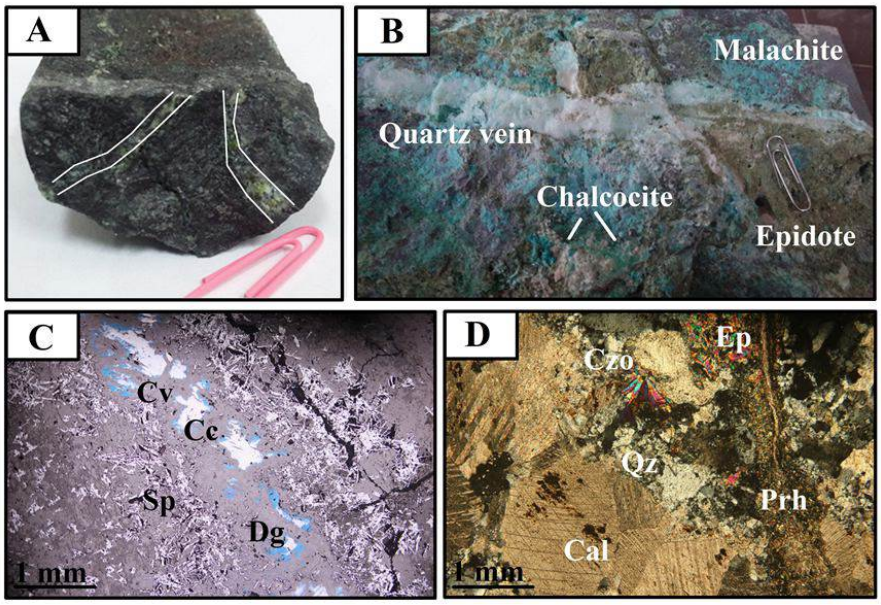
شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی از دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان): A) بافت میکرولیتی در میکروگابرو (دایک‌های دسته اول)؛ B) کانی اکتینولیت به‌صورت ثانویه در زمینه سنگ میکروگابرو پدید آمده است (دایک‌های دسته اول)؛ C) پیروکسن‌دیوریت (دایک‌های دسته دوم)؛ D) گابرو دیوریت با بافت پورفیری و زمینهٔ کمی کلریتی‌شده و اپیدوتی‌شده (دایک‌های دسته دوم) (Pl=plagioclase; Opq=opaque mineral; Cpx=clinopyroxene; Act=actinolite; Ep=epidote; Chl= (chlorite; Whitney and Evans, 2010

دایک‌های گروه دوم که در نزدیک کانی‌سازی دیده می‌شوند دارای ترکیبی از پیروکسن‌دیوریت، سینوگابرو و گابرو بوده به رنگ سبز هستند و نسبت به گسل‌های فرعی منطقه روند کمابیش عمودی دارند. این دایک‌ها بافت پورفیری، غربالی و اینترگرانولار دارند. بافت غربالی می‌تواند نشان‌دهندهٔ نبود شرایط تعادل در پهنه پیدایش باشد. دیدگاه تبلور، ابعاد این گروه درشت‌تر از دایک‌های گروه اول است. پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن (اوژیت) از کانی‌های اصلی (شکل ۳- C) و آپاتیت، مگنتیت و اندکی پیریت از کانی‌های فرعی سنگ به‌شمار می‌روند. کانی‌های کدر با فراوانی تا ۵ درصد حجمی، فراوان‌ترین کانی‌های فرعی در این گروه از دایک‌ها هستند. سوزن‌های آپاتیت به‌فراوانی درون پلاژیوکلازها دیده می‌شود. کانی‌های مافیک گاه به کلریت، ترمولیت، اکتینولیت و کلسیت تجزیه شده‌اند (شکل ۳- D).

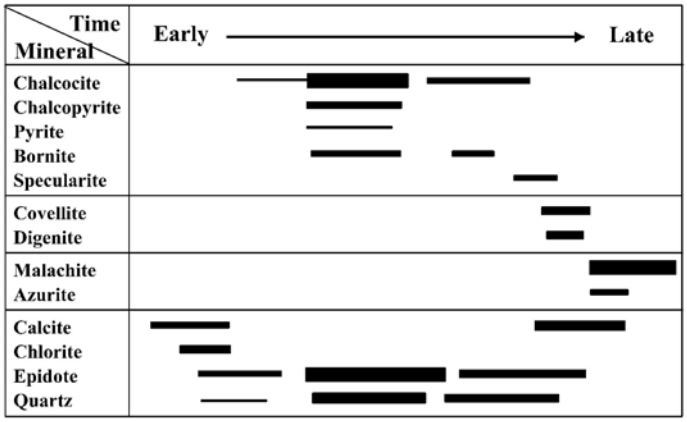
برپایه بررسی‌های سنگ‌نگاری، پیدایش این دایک‌ها در دو مرحله روی داده است. در مرحله اول کانی‌های بی‌آب (مانند: الیوین، کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز، مگنتیت و پیریت) پدید آمده‌اند. کانی‌های سنگین در بخش زیرین و کانی‌های سبک (مانند: پلاژیوکلازها) در بخش بالای مخزن ماگمایی انباشته می‌شوند. به این ترتیب مذاب بجامانده که آب‌دار بوده است توانسته با کانی‌های نخستین واکنش داده و در مرحله دوم کانی‌های آب‌دار آمفیبول (اکتینولیت و ترمولیت) را پدید آورد.

کانی‌سازی

رخنمون‌های فراوانی از کانی‌سازی مس در فاصله میان دو گسل راستگرد کچومثقال و کاشان در جنوب‌خاوری اردستان دیده می‌شوند (شکل ۱). کانی‌سازی مس در توالی ستبری از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت و آندزیت‌بازالت‌ها به سن ائوسن میانی تا بالایی رخ داده است. کانی‌سازی بیشتر به‌صورت رگه‌ای (شکل ۴- A) و به موازات دایک‌های گروه دوم روی داده است (شکل ۲- C). رخنمون بسیار محدودی از برش‌های گرمابی (هیدروترمالی) همراه با کانی‌سازی در منطقه دیده می‌شود. روند رگه‌ها از راستای گسل‌های منطقه پیروی می‌کند و بیشتر روند خاوری- باختری نشان می‌دهد. ستبرای ناحیه‌های کانی‌سازی ۰/۱ تا ۴ متر با درازای ۱۰ متر و بیشتر است و گاه تا درازای کمتر از ۱۰۰ متر نیز دنبال می‌شوند. شیب رگه‌ها از ۵۰ تا ۸۵ درجه است. عیار مس ۱/۱۷ تا ۱۱/۴۷ درصد و عیار نقره ۱/۸ تا ۱۹۸ گرم‌درتن است (Salehi *et al.*, 2016) و با دور شدن از دو گسل اصلی، عیار آنها کاهش می‌یابد. کانه‌های اصلی سولفیدهای مس بیشتر کالکوسیت، بورنیت، کوولیت و دیژنیت و کانی‌های منطقه اکسیدی بیشتر مالاکیت و آزوریت هستند (شکل‌های ۴- B و ۴- C). کانی‌سازی در مناطق نفوذپذیر سنگ دیواره شناسایی شد و در سطح زمین، ترکیبی از سولفیدها و اکسیدهای مس رخنمون دارند (شکل ۴- A). مجموعه کانی‌های کالکوپیریت، اسپیکیولاریت، اپیدوت، کوارتز و کلسیت (شکل ۵) از کانی‌های همراه است. بافت اصلی کانی‌سازی شامل پرکننده فضای خالی، قشرگونه، افشان، رگه، رگچه‌ای، جانشینی (کوولیت و دیژنیت اطراف کالکوسیت) و در هم رشدی بورنیت با کالکوسیت (پیدایش همزمان) است (شکل ۴- D).



شکل ۴- کانی‌سازی و دگرسانی منطقه جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان): A) کانی‌های اپیدوت و مالاکیت کانی‌سازی کالکوسیت و رگه کوارتز را در برگرفته‌اند؛ B) حضور کالکوسیت و مالاکیت در رگچه‌ها؛ C) کالکوسیت به‌صورت پرکننده فضا و کوولیت و دیژنیت به‌صورت جانشینی و اسپیکیولاریت، در پیرامون کانی‌سازی دیده می‌شوند؛ D) کلسیت به‌صورت تأخیری کانی‌های دگرسانی کلینوزوئیزیت، اپیدوت و پرهنیت را فراگرفته است (Cal=calcite; Ep=epidote; Qz=quartz; Prh=prehnite; Czo=clinozoisite; Cc=chalcocite; Cv=covellite; Dg=digenite; Sp=Specularite; Whitney and Evans, 2010)



شکل ۵- نمودار کانی‌های همایند (پاراژنز) فلزی و باطله همراه، از محدوده جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان)

زمین‌شیمی دگرسانی

اپیـــــدوتی‌شـــــدن، کلریتـــــی‌شـــــدن و کلســـیتی‌شـــدن از دگرســـانی‌هـــای پراکنـــده در منطقـــه هســـتند. همراهـــی اپیـــدوت و کـــوارتز بیشـتر در نزدیـک رگـه‌هـای کـانی‌سـازی بـه‌چشـم مـــی‌خـــورد. شـــدت دگرســـانی بـــا دو نشـــانه زمین‌شیمیایی AI و CCPI بررسی شد.

نشانه دگرسانی ایشیکاوا:

$[AI=100\times(MgO+K_2O/(MgO+K_2O+CaO+Na_2O]$ (Ishikawa *et al.*, 1976)

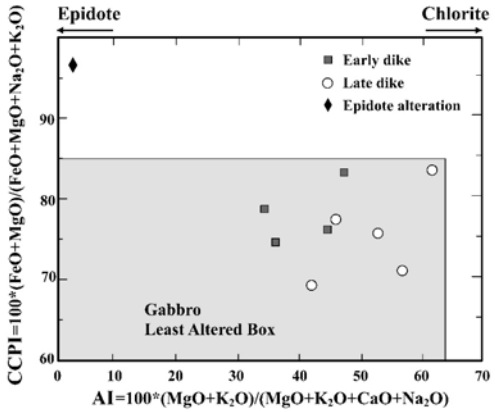
نشانه کلریت-کربنات:

$[CCPI=100\times(FeO+MgO)/(FeO+MgO+Na_2O+K_2O)]$ (Large *et al.*, 2001)

نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی همه نمونه‌های دایک (جدول ۱) در نمودار دگرسانی جای گرفتند. همه نمونه‌ها دگرسانی کلریتی-اپیدوتی کمی را نشان می‌دهند (شکل ۶). نمونه دگرسانی در گسترهٔ اپیدوتی جای گرفته است (شکل ۶).

جدول ۱- داده‌های تجزیه زمین‌شیمیایی دایک‌های منطقه جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) با روش XRF. عنصرهای اصلی و عنصر فلوئور برپایه درصد وزنی و عنصرهای فرعی برپایه گرم در تن هستند (a= گابرو؛ b= پیروکسن‌دیوریت؛ C= آندزیت دگرسان)

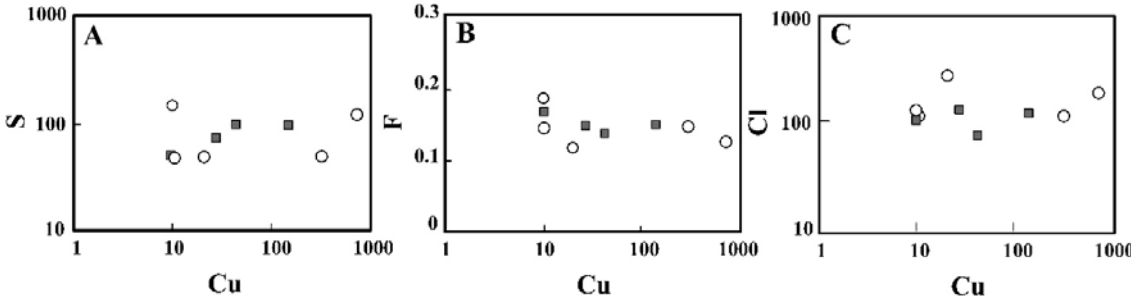
Sample No.	Early dike				Late dike					Alteration
	Cu III S44	Cu I S101	Cu II S159	Cu I S20	Cu III S132	BH 5, 5.2	BH 14, 6.5	BH5, 25	Cu II S161	Al II S41
	a	**a**	**b**	**b**	**a**	**a**	**a**	**a**	**b**	**c**
SiO_2	45.81	46.72	51	52.79	46.73	46.92	48.99	49.87	50	59.79
TiO_2	1.09	0.9	1.05	0.8	1.06	1.15	1.05	1.01	1.3	0.7
Al_2O_3	16.76	16.97	16.41	17.89	15.71	17.34	16.71	16.91	16.78	12.42
Fe_2O_3	9.95	10.37	8.18	8.09	8.54	9.89	8.87	8.77	10.6	9.08
FeO_t	8.95	9.33	9.38	7.28	7.68	8.90	7.98	7.89	7.36	8.17
MnO	0.38	0.53	0.16	0.14	0.23	0.34	0.2	0.16	0.17	0.24
MgO	6.87	7.68	6.01	5.01	7.81	10.14	6.24	7.06	5.81	0.3
CaO	5.58	5.7	6.51	7.71	8.39	3.92	4.73	4.66	5.01	15.03
Na_2O	4.61	3.97	4.54	3.49	3.5	3.43	3.07	3.31	5.08	0.21
K_2O	1.4	0.92	1.95	0.76	2.09	1.95	2.41	3.51	1.35	0.06
P_2O_5	0.27	0.19	0.39	0.18	0.46	0.41	0.41	0.38	0.47	0.18
LOI	6.89	5.64	3.43	2.82	5.01	3.95	6.84	3.61	3.05	1.62
Total	108.56	108.92	109.01	106.96	107.21	108.34	107.50	98.37	8.77	106.98
F	0.17	0.15	0.15	0.14	0.15	0.13	0.19	0.12	0.13	0.13
Cl	114.7	150.2	131.9	85.4	127.9	214.8	149.1	313.3	130.8	55.2
S	50	75	50	100	150	125	50	50	75	50
As	5	28.7	17.5	8.2	5.2	5	24.7	7.8	5	34.5
Ba	604.5	466.2	784.4	315.9	603.7	2036.8	1334	4296	665	9.5
Rb	42.3	24.2	49.5	24.6	59.9	74.1	65.1	108.5	39.3	< 5
Th	-	3.1	-	3.1	-	-	3.3	3.2	3.3	-
Sr	202.1	361.5	239.4	380.4	432	433.3	319.4	507.1	365.9	1414
Zr	104.5	71.1	132.9	106.2	113.4	119.3	133.4	136.4	132	67.7
Nb	7	5.1	15.4	5.5	11.1	9.4	14.9	17	6.3	10
Ni	42.6	38.1	51.3	33.6	126.4	47.5	61.1	59.2	14.8	10.6
Pb	5.6	40.9	9.4	16	9.9	6.2	13.2	3	110.9	120
Co	34.7	34.2	25.1	23.1	32	35.2	27.6	28	29.3	4.1
Zn	334.6	681.1	107.2	95.1	286.3	286.4	125.8	140.2	99.3	15.5
Cr	60.6	85.9	91.7	43.9	230.3	105.9	128	110.6	38.1	82.7
V	243.3	249.3	179.9	185.8	197	247	186.6	200.6	286.9	322.3
Y	22.4	17.8	21.3	25	20.2	26.3	22.9	21.6	28	14.8
Ga	17.7	20	15.6	16.7	16.7	17.5	16.8	12.7	18.5	27.6
Sc	28.1	26.2	21.4	22.8	18.8	30.3	21.6	19.5	28.5	21.1
La	28.9	21.4	27	18.8	35.8	32.1	31.9	41.2	28	25.4
Ce	57.7	32.4	54.2	24.8	72	44.8	51.3	30.3	70.9	44.1
Nd	16.8	7.3	24.9	12	32.7	24.3	30.2	31.6	26.3	5.2
W	8.2	12.9	11.7	5.2	< 5	7.2	5.9	6.4	21.7	12.5
Cu	< 10	27	310	43	10	704	< 10	20	1450	< 10
Rb/Sr	0.14	0.17	0.21	0.20	0.21	0.06	0.07	0.10	0.21	
Sr/Y	21.39	16.48	11.24	13.95	23.48	15.22	20.31	24.83	9.02	
La/Nb	3.23	3.41	1.75	2.14	2.42	3.42	4.20	3.13	4.13	
Ba/Nb	54.39	216.68	50.94	89.53	252.71	57.44	91.41	64.77	86.36	
Zr/Nb	10.22	12.69	8.63	8.95	8.02	19.31	13.94	11.71	14.93	



شـــکل ۶- نمـــودار دگرســـانی AI-CCPI (Gifkins *et al.*, 2005) بـــر پایـــه نشـــانه AI در برابـــر CCPI بـــرای دایـــک‌هـــای جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان)

زمین‌شیمی عنصرهای فرار در دایک‌ها

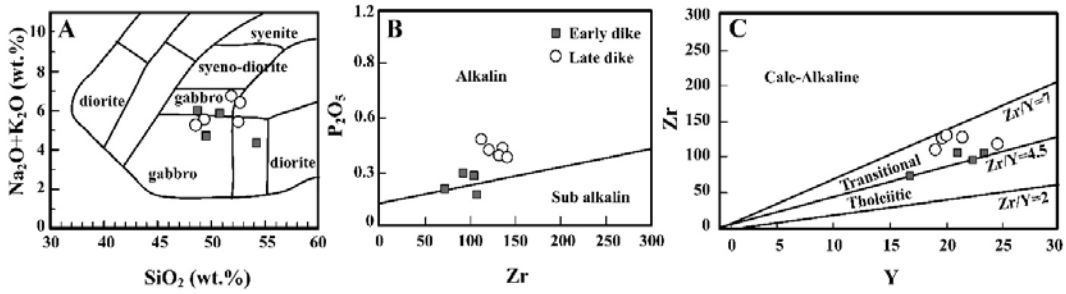
عنصـرهای فـرار کلـر، فلوئـور و آب در شناسـایی و اکتشاف توده‌های کانی‌سـاز از تـوده‌هـای نابـارور نقـش مهمی دارند. محتوای کلر به دمـا و فشـار ماگمـا بسـیار حساس اسـت (Kesler *et al.*, 1975; Webster *et al.*, 2009). تغییـرات کلـر، فلوئـور و سـولفور در دایـک‌هـا به‌ترتیب ۸۵/۹ تـا ۳۱۳/۳ گـرم در تـن، ۰/۱۲ تـا ۰/۱۹ درصد وزنی و ۵۰ تا ۱۵۰ گرم در تن است. در نمونه‌های دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان، همبستگی میان مـس با عنصرهای فرار کلر، فلوئور و گوگرد کم و به‌ترتیب بـه مقدار ۰/۲۲، ۰/۵۳- و ۰/۲۶ است (شکل ۷).



شکل ۷- نمودار لگاریتمی تغییرات عنصرهای فرار در دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان): A) Cu در برابر S؛ B) Cu در برابر F؛ C) Cu در برابر Cl (عنصرها برپایه ppm هستند)

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و سنگ‌شناختی دایک‌ها

داده‌هـای تجزیـه نمونـه‌هـای دایـک‌هـای منطقـه جنـوب‌خـاوری اردسـتان در جـدول ۱ آورده شـده‌انـد. سـیلیس در دایـک‌هـا از ۴۵/۸ تـا ۵۲/۸ درصـد وزنـی اسـت. نمونـــه‌هـــای دایـــک مقـــدار بـــالایی از Na_2O+K_2O (میـــانگین ۵/۶ درصـــد وزنـــی)، نســـبت بـــالای Al_2O_3/TiO_2 (میـــانگین ۱۶/۸) و MgO (میـــانگین ۶/۹ درصـــد وزنـــی) دارنـــد (جـــدول ۱). در نمـودار زمـین‌شـیمیایی نـام‌گـذاری سـنگ‌هـا (TAS) برپایـــه تغییـــرات Na_2O+K_2O در برابـــر SiO_2، دایـــک‌هـــای بررســـی‌شـــدهٔ منطقـــه جنـــوب‌خـــاوری اردســـتان در گســـترهٔ گـــابرو و گابرودیوریـــت جـــای دارند (شکل ۸- A). بـا توجـه بـه مقـدار بـالای اکسـید عنصـرهای آلکـالن، نمودارهـای شناسـایی سـری‌هـای ماگمـایی بـر پایـه عنصـرهای نـامتحرک بـه‌کـار بـرده شـــدند. در نمـــودار Zr در برابـــر P_2O_5، بیشـــتر نمونـه‌هـای دایـک در گسـترهٔ آلکـالن (شـکل ۸- B) و در نمـــودار Zr در برابـــر Y در گســـترهٔ گابروهـــای انتقالی جای مـی‌گیرنـد (شـکل ۸- C). در شـکل‌هـای ۸- B و ۸- C، دو دسـته دایـک بـه‌خـوبی از یکـدیگر شناخته شده‌اند.



شکل ۸- جایگاه ترکیبی دایک‌های منطقه جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) در نمودارهای زمین‌شیمیایی. A) رده‌بندی و نام‌گذاری زمین‌شیمیایی با نمودار TAS (Maitre *et al.*, 1989). در نمودار TAS، به‌علت دگرسانی نمونه‌ها مقادیر نورم SiO_2 به‌کار برده شده است؛ B) شناسایی سری ماگمایی در نمودار P_2O_5 (برپایه درصد وزنی) در برابر Zr (برپایه ppm) (Winchester and Floyd, 1977). بیشتر نمونه‌ها سرشت آلکالن دارند؛ C) نمودار رده‌بندی Zr (برپایه ppm) در برابر Y (برپایه ppm) برای شناسایی سری ماگمایی به‌کار برده شده است (Ross and Bedard, 2009). نمونه‌ها سرشت گابروهای انتقالی دارند.

در ترکیب سنگ‌کل هر دو دسته دایک در نمودارهای تغییرات، عنصرهای اصلی و فرعی در برابر SiO_2 و MgO روند پیوسته و آشکاری نشان نمی‌دهند. این ناپیوستگی می‌تواند پیامد وقفهٔ میان پیدایش دو دسته دایک دانسته شود. از سوی دیگر، در نمودارهای اکسیدهای اصلی در برابر SiO_2 برای ۹ نمونه دایک، همبستگی منفی با اکسیدهای Ca، Mg، Fe، Ti و Mn دیده می‌شود و اکسید عنصرهای K، Na، P و Al توزیع پراکنده دارند (جدول ۲). همبستگی منفی را می‌توان پیامد ورود این اکسیدها در کانی پیروکسن و اکسیدهای آهن-تیتانیم دانست که در مرحله‌های آغازین تبلور از ماگمای مادر جدا شده‌اند. به‌طور کلی، مقدار عنصرها در دو گروه دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان همانند یکدیگر است و همان‌گونه‌که در ادامه به آن پرداخته شده، در این دو گروه دایک، فراوانی عنصرهای Zr، Ti، Nb، Cr و Ni متفاوت است.

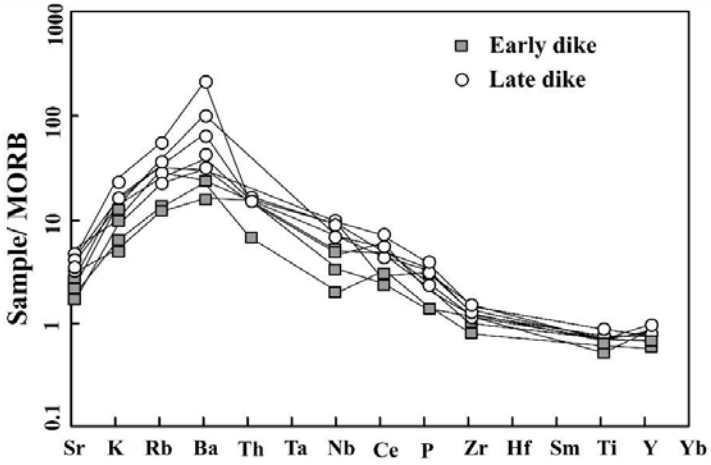
جدول ۲ – مقادیر همبستگی اکسید عنصرهای اصلی در دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان)

	SiO_2									
SiO_2	1.00	TiO_2								
TiO_2	-0.75	1.00	Al_2O_3							
Al_2O_3	0.08	-0.37	1.00	FeO						
FeO	-0.58	0.25	0.27	1.00	MnO					
MnO	-0.84	0.48	-0.13	0.71	1.00	MgO				
MgO	-0.78	0.51	-0.32	0.22	0.66	1.00	CaO			
CaO	0.32	-0.29	-0.07	-0.30	-0.24	-0.42	1.00	Na_2O		
Na_2O	-0.18	0.19	-0.10	0.25	0.29	-0.22	0.42	1.00	K_2O	
K_2O	-0.03	0.29	-0.58	-0.17	-0.19	0.35	-0.39	-0.54	1.00	P_2O_5
P_2O_5	-0.29	0.63	-0.65	-0.16	0.06	0.51	-0.17	-0.35	0.79	1.00

مقدار عنصرهای LILE در دو دسته دایک همانند یکدیگر نیست؛ به‌گونه‌ای‌که بیشترین فراوانی Sr در دایک‌های گروه اول و دوم، به‌ترتیب به ۳۸۰/۴ و ۵۰۷/۱ گرم در تن، فراوانی Rb به‌ترتیب به ۴۹/۵ و ۱۰۸/۵ گرم در تن، فراوانی Ba به‌ترتیب به ۶۰۴/۵ و ۴۲۹۶ گرم در تن و فراوانی Y به‌ترتیب ۲۵/۰ و ۲۸ گرم در تن می‌رسد. با وجود این، مقدار Rb/Sr در هر دو دسته دایک به‌یکدیگر نزدیک بوده و در گروه اول و دوم

به‌ترتیب به ۰/۲۱ و ۰/۲۱ و نسبت Sr/Y به‌ترتیب به ۲۱/۳۹ و ۲۴/۸۳ می‌رسد. همچنین، دایک‌ها در فراوانی عنصرهای HFSE نیز غنی‌شدگی متفاوتی نشان می‌دهند (جدول ۱). برای نمونه، بیشترین فراوانی Zr در دایک‌های گروه اول و دوم به‌ترتیب به ۱۰۶/۲ و ۱۳۶/۴ گرم در تن و Nb به‌ترتیب به ۱۵/۴ و ۱۷ گرم در تن و TiO_2 به‌ترتیب به ۱/۰۹ و ۱/۳ گرم در تن می‌رسد. میانگین نسبت Zr/Nb در دایک‌های گروه اول ۱۹/۳ گرم در تن و در دایک‌های گروه دوم ۱۲/۷ گرم در تن است. میزان عنصر فرعی Cr در دایک‌های دسته اول ۴۳/۹ تا ۹۱/۷ گرم‌درتن و در دایک‌های دسته دوم ۳۸/۱ تا ۲۳۰/۳ گرم در تن بوده و عنصر Ni در دایک‌های دسته اول از ۳۳/۶ تا ۵۱/۳ گرم در تن و در دایک‌های دسته دوم از ۱۴/۸ تا ۱۲۶/۴ گرم در تن است (جدول ۱). افزایش نیکل و کروم نرخ بالای ذوب در گوشته را نشان می‌دهد و این نمی‌تواند با مقدار بالای Zr و Nb در دایک‌ها سازگاری داشته باشد. ازاین‌رو، افزایش مقدار کروم و نیکل به فراوانی بیشتر مگنتیت، به‌ویژه در دایک‌های گروه دوم، بستگی دارد.

برای بررسی بیشترِ تغییرات عنصرهای فرعی، از نمودار بهنجارشده به ترکیب MORB برای دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان بهره گرفته شد (شکل ۹- A). همان‌گونه‌که در شکل دیده می‌شود، نمودار عنکبوتی، الگوی قله‌مانندی با غنی‌شدگی در عنصرهای Ba، Rb و K و کمبود در مقدار عنصرهای Nb، P، Ti، Sr و Zr نشان می‌دهد.

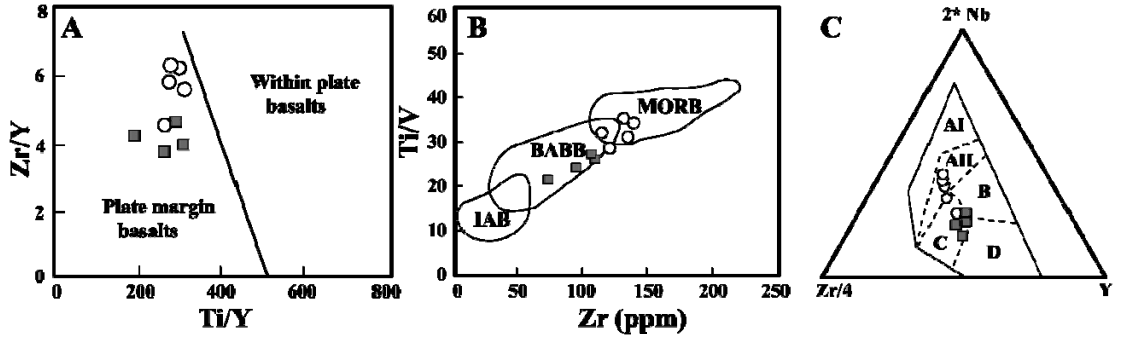


شکل ۹- نمودار عنکبوتی بهنجارشده در برابر ترکیب MORB (Pearce, 1983) برای عنصرهای فرعی در دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان)

کاهش مقدار عنصرهای Ti، Zr، P و Sr پهنه زمین‌ساختی وابسته به کمان آتشفشانی را نشان می‌دهد (Rollinson, 1993). ناهنجاری منفی Nb می‌تواند پیامد دخالت سیال‌های فرورانشی و برخاستن ماگما از یک گوشته غنی‌شده یا آلایش ماگمایی باشد (Kurt *et al.*, 2008). تهی‌شدگی از عنصرهای HFSE به‌علت به‌جای‌ماندن این عنصرها در صفحه فرورونده در پهنه فرورانش است (Pearce, 1983). غنی‌شدگی عنصرهای LILE در برابر ترکیب گوشته اولیه می‌تواند نشان‌دهندهٔ آلایش مواد پوسته‌ای باشد. میزان بالا و صد برابریِ Ba در برابر ترکیب گوشته اولیه می‌تواند پیامد آلایش در هنگام بالاآمدن از مجرای فورانی در پهنه پشت‌کمان باشد (Kamber, 2012).

نسبت بالای Ba/Nb (۵۰/۹۴ تا ۲۵۲/۷۱) نشانه مذاب پدیدآمده از گوشته متاسوماتیسم‌شده در بالای صفحه فرورونده است (Hildreth and Moorbath, 1998). میانگین نسبت La/Nb برای دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان از ۱/۸ تا ۴/۲ است که نشان‌دهندهٔ وابستگی این سنگ‌ها به ماگمایی برخاسته از گوشته غنی‌شده یا آلایش‌یافته با پوسته قاره‌ای (Aldanmaz, 2012) است (جدول ۱).

با به‌کارگیری عنصرهای نامتحرک، نمودارهای تفکیک‌کنندهٔ بسیاری به‌کار گرفته شده‌اند تا موقعیت زمین‌ساختی سازگار با زمین‌شیمی دایک‌های بررسی‌شدهٔ جنوب‌خاوری اردستان را بازسازی کنند. در نمودار تغییرات Zr/Y در برابر Y، دایک‌ها در گسترهٔ وابسته به حاشیه ورقه جای گرفته‌اند؛ هرچند دایک‌های گروه دوم نزدیک به گسترهٔ بازالت‌های درون صفحه‌ای هستند (شکل ۱۰- A). در نمودار تغییرات Ti/V در برابر Zr، برای شناسایی بازالت‌های پشت‌کمان از جزایر قوسی و MORB، دایک‌های گروه اول در جایگاه پشت‌کمان و دایک‌های گروه دوم در پهنه کششیِ MORB جای می‌گیرند (شکل ۱۰- B). همان‌گونه‌که در نمودار سه‌تایی Y-Zr-Nb (شکل ۱۰- C) دیده می‌شود، همه دایک‌های دسته اول در پهنه زمین‌ساختی بازالت‌های مرتبط با کمان پدید آمده‌اند و دایک‌های دسته دوم به‌سوی گسترهٔ بازالت‌های درون‌صفحه‌ای کشیده شده‌اند (شکل ۱۰- C).

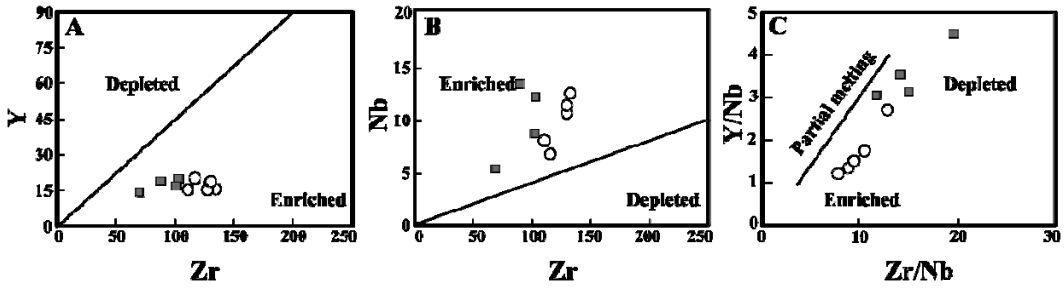


شکل ۱۰- دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) در: A) نمودار Zr/Y در برابر Ti/Y (Pearce and Gale, 1997)؛ B) نمودار Ti/V در برابر Zr (Gribble *et al.*, 1996) (نمونه دایک‌های گروه اول در محدوده Back-arc basin basalt (BABB) و دایک‌های گروه دوم به محدوده MORB کشیده شده‌اند)؛ C) نمودار سه‌تایی Nb-Zr-Y (Meschede, 1986) برای شناسایی جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های کمان و MORB از بازالت‌های درون صفحه‌ای (دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان در محدوده بازالت‌های کمان‌های آتشفشانی با تمایل به‌سوی بازالت‌های درون صفحه‌ای جای گرفته‌اند) (AI, AII= fields of intraplate alkali basalts; AII, C= fields of intraplate tholeiites; B= field of P-type MORB; D= field of N-type MORB; C, D= fields of volcanic arc basalts) (دایک‌های گروه اول با مربع و دایک‌های گروه دوم با دایره نشان داده شده‌اند)

ماگمای سازنده

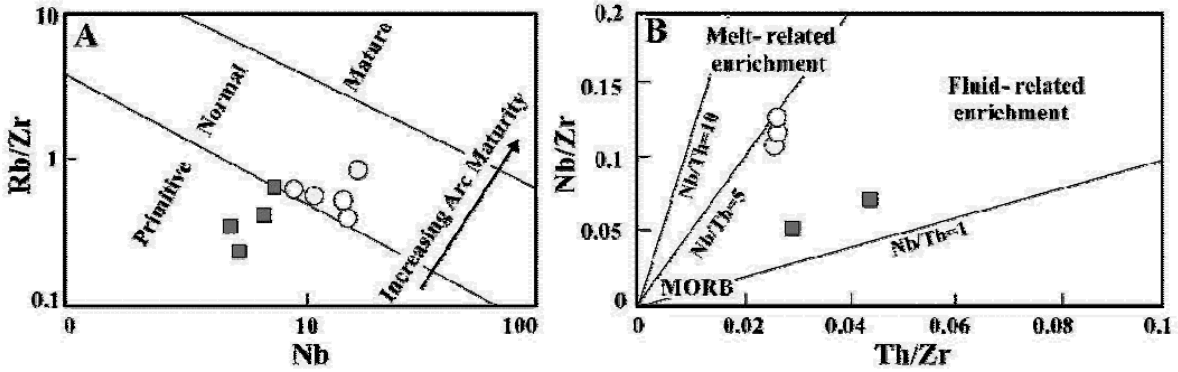
فراوانی و نسبت عنصرهای ناسازگار می‌تواند در ارتباط با خاستگاه مناسب گوشته به‌کار رود. عنصرهای فرعی ناسازگار (مانند: Th، Ta، Nb و La) دچار تفریق بلوری نمی‌شوند و بازتابی از ترکیب خاستگاه هستند (Condie, 2005)؛ اما متأثر از فرآیندهای ذوب‌بخشی می‌شوند (Pearce and peate, 1995). برای شناسایی غنی‌شدگی خاستگاه دایک‌ها، نمودار نسبت‌های عنصرهای Zr-Nb و Zr-Y به‌کار برده شد. در این نمودارها، همه

نمونـــه‌هـــا در محـــدوده گوشـــته غنـــی‌شـــده جـــای مـــی‌گیرنـــد (شـــکل‌هـــای ۱۱–A و ۱۱–B). در نمـــودار Y/Nb در برابـــر Zr/Nb، همـــه نمونـــه‌هـــا رونـــد ذوب‌بخشی نشان می‌دهند (شکل ۱۱–C).



شکل ۱۱- بررسی خاستگاه ماگمای سازنده دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) در: A) نمودار تغییرات Y (برپایه ppm) در برابر Zr (برپایه ppm)؛ B) نمودار Nb (برپایه ppm) در برابر Zr (برپایه ppm) (Sun and McDonough, 1989). همه دایک‌ها در بخش گوشته غنی‌شده جای گرفته‌اند؛ C) نمودار تغییرات Y/Nb در برابر Zr/Nb برای بررسی روند ذوب‌بخشی گوشته

با توجـه بـه اثـر مهـم بلـوغ کمـان در پیـدایش دایـک‌هـا و برپایـه نمـودار لگـاریتمی Rb/Zr در برابـر لگـاریتم Nb، دایـک‌هـای دسـته اول در گسـترهٔ کمـان ماگمایی جـوان (مرحلـه‌هـای آغـازین پیـدایش کمـان) و دایـک‌هـای دسـته دوم در گسـتره کمـان عـادی جـای مـی‌گیرنـد (شـکل ۱۲–A). عنصـر تـوریم در شناسـایی نقـش رسـوب‌هـای فرورونـده در پهنـه‌هـای کمـان ماگمـایی پدیدآمـده در هنگـام فـرورانش بسـیار پـر اهمیـت اسـت. ایـن عنصـر بـه‌شـدت نـامتحرک یـا سـاکن اسـت و در جریـان آب‌زدایـی پوسـته اقیانوسـی فرورونـده بـه سـیال‌هـای غنـی از عنصـرهای متحـرک (ماننـد: LILE) وارد نمـی‌شـود (Kelemen *et al.*, 2004). نمـودار تغییـرات Nb/Zr در برابـر Th/Zr، نقـش سـیال‌هـا در متاسوماتیسـم ماگمـای سـازنده دایـک‌هـا را نشـان مـی‌دهـد (شـکل ۱۲– B). از سـوی دیگـر، فراوانـی عنصـرهای LILE و تهـی‌شـدگی از عنصـرهای HFSE مـی‌توانـد نشـان‌دهنـدهٔ سـیال در هنگام پیدایش ماگما باشد.



شکل ۱۲- جایگاه ترکیبی دایک دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) در: A) نمودار تغییرات Rb/Zr در برابر Nb برپایه ppm (Brown *et al.*, 1984). دایک‌های گروه اول در گسترهٔ کمان نابالغ و دایک‌های گروه دوم در محدوده کمان عادی جای دارند؛ B: تغییرات Nb/Zr در برابر Th/Zr (Zhao and Zhou, 2007). دایک‌ها در بخش غنی‌شدگی با سیال آزادشده از صفحه فرورونده جای دارند. سیال‌ها در متاسوماتیسم ماگمای سازنده دایک‌ها نقش داشته است.

بحث و نتیجه‌گیری

رگه‌های مس‌دار جنوب‌خاوری اردستان، از کانی‌های کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت، مالاکیت و آزوریت ساخته شده است. دگرسانی منطقه بیشتر اپیدوت- کلریت است که در نزدیک رگه‌ها به‌صورت هم‌رشدی کانی‌های اپیدوت با کوارتز به‌چشم می‌خورد. کانی‌سازی بیشتر به موازات دایک‌های با روند خاوری- باختری (گروه دوم) دیده می‌شود. نبود همبستگی میان عنصر مس با عنصرهای فرار در دایک‌ها، نقش دایک‌ها در پیدایش کانی‌سازی را کم‌رنگ می‌کند. از سوی دیگر، همسوبودن آنها با کانی‌سازی به فضاهای پدیدآمده در پی نیروهای زمین‌ساختی همانند می‌تواند بستگی داشته باشد که همراهی رگه‌های کانی‌سازی با دایک‌های خاوری- باختری را در پی داشته است.

دایک‌های مافیک جنوب‌خاوری اردستان به دو گروه رده‌بندی می‌شوند: دایک‌هایی با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری که به موازات زاگرس دیده می‌شوند؛ دایک‌های با روند خاوری- باختری که کمابیش عمود بر گسل‌های فرعی منطقه هستند. هر دو گروه دایک، پرشیب هستند. ازاین‌رو، چه‌بسا همراه با آزادشدن انرژی مکانیکی در راستای شکستگی‌ها و در پی تبلور ماگما (Burnham, 1979) پدید آمده‌اند. چنین شکستگی‌هایی در راستای عمود بر فشار وارده منطقه پدید آمده‌اند. تغییر جهت دو دسته دایک می‌تواند چرخش سوی نیروها را نشان بدهد. چرخش روند دایک‌ها می‌تواند با فعالیت طولانی ماگما یا تغییرات فشارهای زمین‌ساختی در منطقه وابسته باشد (Delaney and Gartner, 1997).

دایک‌های آلکالن منطقه جنوب‌خاوری اردستان از دایک‌های کالک‌آلکالن معمول در کمان ارومیه-دختر متفاوت هستند. برپایه یافته‌های زمین‌شیمیاییِ این پژوهش و از نگاه وسیع‌تر، به‌نظر می‌رسد دایک‌های الیگومیوسن جنوب‌خاوری اردستان -که در دورترین فاصله از محل فرورانش هستند- در پهنه زمین‌ساختی پشت‌کمان مرتبط با فرورانش نئوتتیس پدید آمده‌اند؛ هر چند نسبت Th/Nb دایک‌ها بر خلاف منطقه پشت کمان، چندان بالا نیست. همچنین، ماگمای پدیدآورنده دو دسته دایک، با گذر زمان تغییر کرده است و همان‌گونه‌که Yeganefar و همکاران (۲۰۱۳) نیز برای آندزیت بازالت‌های منطقه باختر نایین پیشنهاد داده‌اند، دایک‌های دسته اول در مرحله جوانی کمان از یک گوشته تغییر یافته فرورونده و دایک‌های دسته دوم از یک خاستگاه گوشته آستنوسفری غنی‌شده و شاید یک پلوم پدید آمده‌اند. در این صورت، موقعیت حرارتی زیر کمان ماگمایی، باید تغییر کند و یا در منطقه، تغییراتی از سیستم فشارشی به کششی به‌صورت موقتی و زودگذر روی داده باشد. وجود گسل‌های پلکانی (عادی فلسی‌شکل) و دره‌های ژرف در محدوده جنوب‌خاوری اردستان می‌تواند گویای حضور فازهای کششی در منطقه باشد (Salehi, 2016). در پی کشش پدیدآمده، فشارش در بخش‌های شمالی منطقه روی داده است؛ به‌گونه‌ای‌که واحدهای آتشفشانی-آذرآواری الیگومیوسن هم‌ارز سازند قم به‌صورت چین‌خوردگی در شمال گسل کچومثقال (شکل ۱) رخنمون پیدا کرده‌اند. سازند قم یک حوضه دریایی کم‌ژرفا مرتبط با پشت کمان است.

سپاس‌گزاری

این مقاله بخشی از پایان‌نامه نگارنده اول است. از پشتیبانی‌های دانشگاه اصفهان سپاس‌گزاری می‌شود. از پروفسور فینگر (دانشگاه سالزبورگ اتریش) برای تجزیه نمونه‌ها و همچنین، از هیات تحریریه و داوران گرامی مجله برای پیشنهادهای ارزشمندشان سپاسگزاری می‌شود.

منابع

Aguilera, D. T., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Mendoza, O. T., Kojima, S. and Ferraris, F. (2005) Re–Os isotope systematics for the Lince–Estefanía deposit: constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. Mineral Deposita 41: 99 – 105.

Alaminia, Z., Karimpour, M. H., Homam, S. M. and Finger, F. (2013) Petrology, geochemistry and mineralization of Tertiary volcanic rocks associated with subvolcanic intrusive bodies, with special reference to age dating and origin of granites from Arghash – Ghasem-Abad area, NE Iran. Journal of Economic geology 5(1): 1-22.

Aldanmaz, E. (2012) Trace element geochemistry of primary mantle minerals in spinel-peridotites from polygenetic MOR SSZ suites of SW Turkey: constraints from an LA-ICP-MS study and implications for mantle metasomatism. Geological Journal 47: 59-76.

Bornhorst, T. J. and Barron, R. J. (2011) Copper deposits of the western Upper Peninsula of Michigan. Geological Society of America Field Guide 24: 83–99.

Brown G. C., Thorpe R. S. and Webb P. C. (1984) The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. Journal of Geological Society London 141: 413-426.

Burnham, C. W. (1979) Magmas and hydrothermal fluids, In: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposit (Ed. Barnes, H. L.) 71–135. 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York.

Chiu, H. Y., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S., Khatib, M. M. and Iizuka, Y. (2013) Zircon U–Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. Lithos 162: 70-87.

Condie, K. C. (2005) High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources or mantle plumes? Lithos 79: 491–504.

Delaney, P. T. and Gartner, A. E. (1997) Physical processes of shallow mafic dike emplacement near the San Rafael Swell, Utah. Geological Society of America Bulletin 109: 1177–1192.

Gifkins, C., Herrmann, W. and Large, R. (2005) Altered volcanic rocks: a guide for description and interpretation. University of Tasmania, Centre for Ore research.

Gribble, R. F., Stern, R. J., Bloomer, S. H., Stüben, D., O'Hearn, T. and Newman, S. (1996) MORB mantle and subduction components interact to generate basalts in the southern Mariana Trough back-arc basin. Geochimica et Cosmochimica Acta 60: 2153–2166.

Hildreth, W. and Moorbath, S. (1988) Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile. Contributions to Mineralogy and Petrology 98: 455-489.

Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S. and Horiuchi, M. (1976) Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism underlying dacite and alteration halos. Mining Geology 26: 105–117.

Jabbari, A., Ghorbani, M., Koepke, J., Torabi, G. and Shirdashtzadeh, N. (2010) Petrography and mineral chemistry of basaltic dykes in the west of Borooni (SW of Ardestan, Iran): evidences of magma mixing. Petrology 1(2): 17-30 (in Persian).

Kamber, E. (2012) Back arc basing in the Coatmalia zone in Africa. Journal of Geophysical 92: 34-62.

Kananian, A., Hamzei, Z., Sarjoughian, F. and Ahmadian, J. (2014) Origin and tectonic setting of granitic rocks and dolerite dikes in the Nasrand pluton, southeast of Ardestan. Petrology 5(17): 103-118 (in Persian).

Kelemen, P. B., Hanghoj, K. and Greene, A. R. (2004) one view of the Geochemistry of subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on primitive Andesite and Lower Crust. Treatise on Geochemistry 3: 593-659.

Kesler, S. E., Jones, K. and Walker, J. (1975) Intrusive rocks associated with copper mineralization in island-arcs. Economic Geology 70: 5151–5526.

Large, R. R., Gemmell, J. B. and Paulick, H. (2001) The alteration box plot – a simple approach to understanding the relationship between alterationmineralogy and lithogeochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. Economic Geology 96: 957–971.

Lewis, D. V. (1955) Relationship of ore bodies to dykes and sills. Economic Geology 50: 495-516.

Maitre, R. W. L., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lemeyre, J., Bas, M. J. L., Sabine, P. A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Wooley, A. R. and Zanettin, B. (1989) A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell, Oxford.

Meschede, M. (1986) A method of discrimination between types of Mid-Ocean - Ridge basalt and continental tholeiites with the Nb- Zr- Y diagram. Chemical Geology 56: 207-218.

Mohamadi, S. (1995) Evaluation of the Tertiary volcanism in Ardestan (Central Iran). MSc thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (in Persian).

Mookher Jee, A. (1970) Dykes, Sulphide deposits, and regional metamorphism: criteria for determining their time relationship. Mineral deposita 5: 120-144.

Papezik, V. S. and Barr, S. M. (1981) The Shelburne dike, an early Mesozoic diabase dike in Nova Scotia: mineralogy, chemistry, and regional significance. Canadian Journal of Earth Sciences 18: 1346-1355.

Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margin. In: Continental Basalts and Mantle Xenoliths (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230–249. Shiva, Nantwich.

Pearce, J. A. and Gale, G. H. (1997) Identification of ore-deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks. Geological Society of London, Special Publications 7(1): 14-24.

Pearce, J. A., Peate, D. W. (1995) Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. Ann. Rev. Earth Planet. Sci 23: 251–286.

Radfar, j. (1999) The Geological Map of Ardestan, scale 1:100,000 Geological Survey of Iran, Tehran.

Ramirez, L. E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M. A., Sial, A. N., Turiel, J. L. F., Gimeno, D., Valles, M. G. and Lehmann, B. (2006) The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the Coastal Range of northern Chile. Miner Deposita 41: 246-258.

Rollinson, H. R. (1993) Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Group UK Ltd., London, United Kingdom.

Ross, P. S. and Bedard, J. H. (2009) Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace element discrimination diagram. Canadian Journal of Earth Sciences 46: 823–829.

Sadeghian, M. and Ghaffari, M. (2011) The petrogenesis of Zafarghand granitoid pluton (SE of Ardestan). Petrology 2(6): 47-70 (in Persian).

Salehi, M., Alaminia, Z. and Mackizadeh M. A. (2016) Mineralogical study in Hendou Abad Copper district (Southeast Ardestan). Proceeding of 34th and the 2nd Internatioal Congress of Earth Sciences, Tehran, Iran (in Persian).

Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications 42(1): 313-345.

Webster, J. D., Tappen, C. M. and Mandeville, C. W. (2009) Partitioning behavior of chlorine and fluorine in the system apatite-melt-fluid. II: Felsic silicate systems at 200 MPa. Geochimica et Cosmochimica Acta 73: 559-581.

Whitney, D. and Evans, B. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist 95: 185–187.

Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology 20: 325–343.

Yeganehfar, H. (2007) Geochemistry and petrology of south Ardestan volcanic rocks. MSc thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (in Persian).

Yeganehfar, H., Ghorbani, M. R., Shinjo, R. and Ghaderi, M. (2013) Magmatic and geodynamic evolution of Urumieh–Dokhtar basic volcanism, Central Iran: Major, trace element, isotopic, and geochronologic implications. International Geology Review 55(6): 767-786.

Zahedi, M. and Amidi, S. M. (1991) The Geological Map of Kashan, scale 1: 250000, No. F7. Geological Survey of Iran, Tehran.

Zhao, J. H. and Zhou, M. F. (2007) Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle. Precambrian Research 152: 27-47.

Investigation of the geochemical and mineralogical characteristics of the dikes associated with copper mineralization at the southeastern Ardestan

Maryam Salehi [1], Zahra Alaminia [1]* and Mahin Mansouri Esfahani [2]

[1] Department of Geology, Faculty of sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

[2] Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

Ardestan study area is located at the northeastern Isfahan and outer margin of Urumieh -Dokhtar Volcanic Arc (UDMA). In this area, copper mineralization is associated with dikes. Mineralization is summarized as sulfides (chalcocite, chalcopyrite and bornite) and oxides (malachite and azurite). Field studies, petrographical and geochemical investigations show two different types of dikes in the research area. The first group of dikes show NW-SE trend. They comprise fine crystalline gabbro. The second types of dikes show relatively E-W trend. They are gabbro and pyroxene diorite. Dikes geochemically, characterized by 45.8 to 52.8% of SiO_2, average 6.9% of MgO and 5.6% of Na_2O+K_2O, and 16.8% of Al_2O_3/TiO_2 ratio. All dikes are alkaline, related to back-arc tectonic setting in a wider concept associated with changing in source of magmatism. Second group of dikes show enrichment of Ba, Sr, Rb, K, Zr, Nb, Ti, Cr and Ni elements compared to first group. First group of dikes are generated as a result of a subducted modified mantle and second dikes show an enriched astenospheric mantle source. It appears to be weak correlation between ore-forming and volatile elements in mafic dikes. Overall, the same tectonic stresses are an essential controlling factor for formation of E-W dikes with mineralization.

Key words: copper mineralization, dike, geochemistry, SE Ardestan, Urumieh-Dokhtar zone