

## Investigation of the geochemical and mineralogical characteristics of the dikes associated with copper mineralization at the southeastern Ardestan (NE Isfahan)

Maryam Salehi<sup>1</sup>, Zahra Alaminia<sup>1\*</sup> and Mahin Mansouri Esfahani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

### Abstract

The Ardestan study area lies in the northeast of Isfahan and at the outer margin of Urumieh -Dokhtar Volcanic Arc (UDMA). In this area, copper mineralization is associated with dikes. Mineralization occurred as sulfides (chalcocite, chalcopyrite and bornite) and oxides (malachite and azurite). According to field studies as well as petrographic and geochemical investigations, two different types of dikes are present. The first type, trending NW-SE and comprising fine crystalline gabbro, whereas the second type with relatively E-W trend are gabbro and pyroxene diorite. Geochemically, these rock are characterized by SiO<sub>2</sub> = 45.8 to 52.8 wt.%, MgO with 6.9 wt.% (average), Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O = 5.6 wt.%, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> = 16.8%. All dikes are alkaline, related to back-arc tectonic setting in a wider concept associated with changing in source of magmatism. The second type shows enrichment in Ba, Sr, Rb, K, Zr, Nb, Ti, Cr and Ni in comparison to the first type. The first type is generated as a result of a subducted modified mantle while the latter shows an enriched asthenospheric mantle source. It appears that there is a weak correlation between ore-forming and volatile elements in the mafic dikes. Overall, the same tectonic stresses are an essential controlling factor for the formation of second type E-W dikes associated with mineralization.

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

\* z.alaminia@sci.ui.ac.ir

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

## بررسی ویژگی های زمین شیمیایی و کانی شناسی دایک های همراه با کانی سازی مس در جنوب خاوری اردستان (شمال خاوری اصفهان)

مریم صالحی<sup>۱</sup>، زهرا اعلمی نیا<sup>۱\*</sup> و مهین منصوری اصفهانی<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup> گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

### چکیده

منطقه بررسی شده اردستان در شمال خاوری اصفهان و در حاشیه بیرونی کمان آتشفشانی ارومیه- دختر جای دارد. در این منطقه، کانه زایی مس همراه با دایک هاست و کانه زایی به صورت سولفیدی (کالکوسیت، کالکوپیریت و بوزنیت) و اکسیدی (مالاکیت و آزوریت) است. بررسی های صحرایی، سنگ نگاری و زمین شیمیایی در این منطقه، دو گروه دایک گوناگون را نشان می دهد. دایک های گروه اول روند شمال باختری- جنوب خاوری دارند و از گابرو دانه ریز ساخته شده اند. دایک های گروه دوم روند کمابیش خاوری- باختری دارند و از جنس گابرو و پیروکسن دیوریت هستند. از دیدگاه زمین شیمیایی، دایک ها دارای SiO<sub>2</sub> از ۴۵/۸ تا ۵۲/۸ درصد وزنی، MgO با میانگین ۶/۹ درصد وزنی، Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O با ۵/۶ درصد وزنی و نسبت Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> برابر ۱۶/۸ معرفی می شوند. همه دایک ها، دارای سرشت آکالن بوده و به مفهوم وسیع تر، با محیط زمین ساختی پشت کمان همراه با تحولات شیمیایی در خاستگاه ماگما وابسته هستند. دایک های گروه دوم در برابر دایک های گروه اول، از عنصرهای Ba, Sr, Rb, K, Zr, Nb, Ti, Cr, Ni غنی شدگی نشان می دهند. دایک های گروه اول از یک گوشته تغییر یافته فرورونده در مرحله کمان نابالغ پدید آمده اند و دایک های گروه دوم دارای خاستگاه گوشته آستوسفری غنی شده در مرحله کمان عادی هستند. همبستگی اندکی میان عنصر مس با عنصرهای فرار در ترکیب دایک ها دیده می شود. به طور کلی، نیروهای زمین ساختی مشابه عامل کنترلی مهمی در پیدایش دایک های گروه دوم (خاوری- باختری) به همراه کانی سازی هستند.

واژه های کلیدی: کانی سازی مس، دایک، زمین شیمی، جنوب خاوری اردستان، پهنه ارومیه دختر

\* 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 مس نوع استراتاباند با دایک‌ها و سنگ‌های آتشفشانی میزبان ارتباط سنی دارند (Aguilera et al., 2005; Ramirez et al., 2006). همچنین، دسته دایک‌های کوبیناوی همراهی خوبی با کانسارهای سولفیدی در بسیاری از معدن‌های مس انتاریو و شمال‌باختری 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 Amini و Zahedi (۱۹۸۳) و Radfar (۱۹۹۹) که به ترتیب نقشه‌های زمین‌شناسی کاشان و اردستان را تهیه کرده‌اند. همچنین، Mohammadi (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 ناین 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 متبازالتی و آرایش 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؛ به گونه‌ای که سنگ‌های آذرین ائوسن بالایی را قطع کرده‌اند.

بررسی‌های دقیق زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی دایک‌ها و بررسی رابطه آنها با کانی‌سازی منطقه ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، روابط صحرائی میان دایک‌ها با کانی‌سازی بررسی شده و یافته‌های جدیدی از سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی و پهنه زمین‌ساختی دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان به دست 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 صحرائی، بررسی‌های سنگ‌نگاری روی ۳۰ مقطع نازک و ۱۲ مقطع صیقلی انجام شد. پس از بررسی میکروسکوپی کانی‌شناسی، ۵ نمونه از دایک‌های خاوری-باختری و ۴ نمونه از دایک‌های شمال‌باختری-

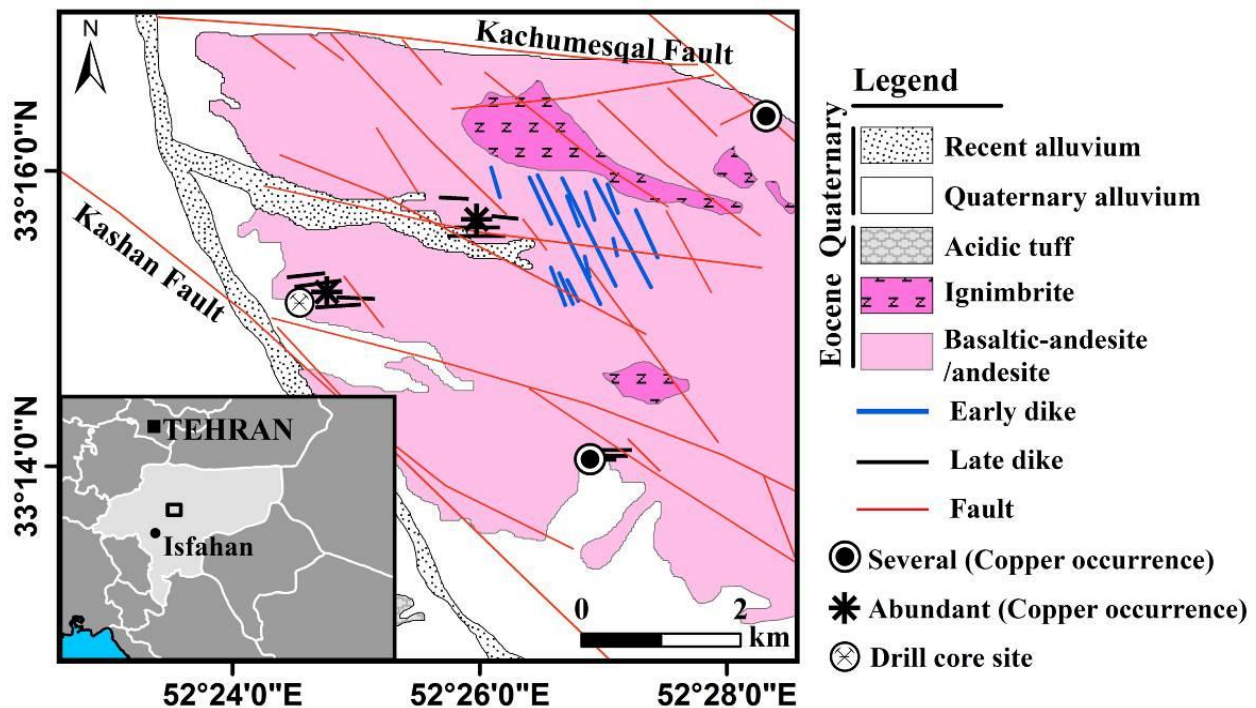
حاشیه بیرونی پهنه آتشفشانی ارومیه-دختر و در کنار پهنه ایران مرکزی جای دارد. این منطقه با گستردگی نزدیک به ۳۰ کیلومتر مربع در محدوده  $۵۲^{\circ} ۲۴'$  تا  $۵۲^{\circ} ۲۸'$  طول جغرافیایی خاوری و  $۳۳^{\circ} ۱۴'$  تا  $۳۳^{\circ} ۱۷'$  عرض جغرافیایی شمالی در خاوری‌ترین بخش نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان است (Radfar, 1999).

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

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، به جز 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 و EXCEL (۲۰۱۳ ©) رسم شدند.

### زمین‌شناسی

گستره بررسی‌شده در ۱۲ کیلومتری جنوب‌خاوری اردستان، در بخش میانی و

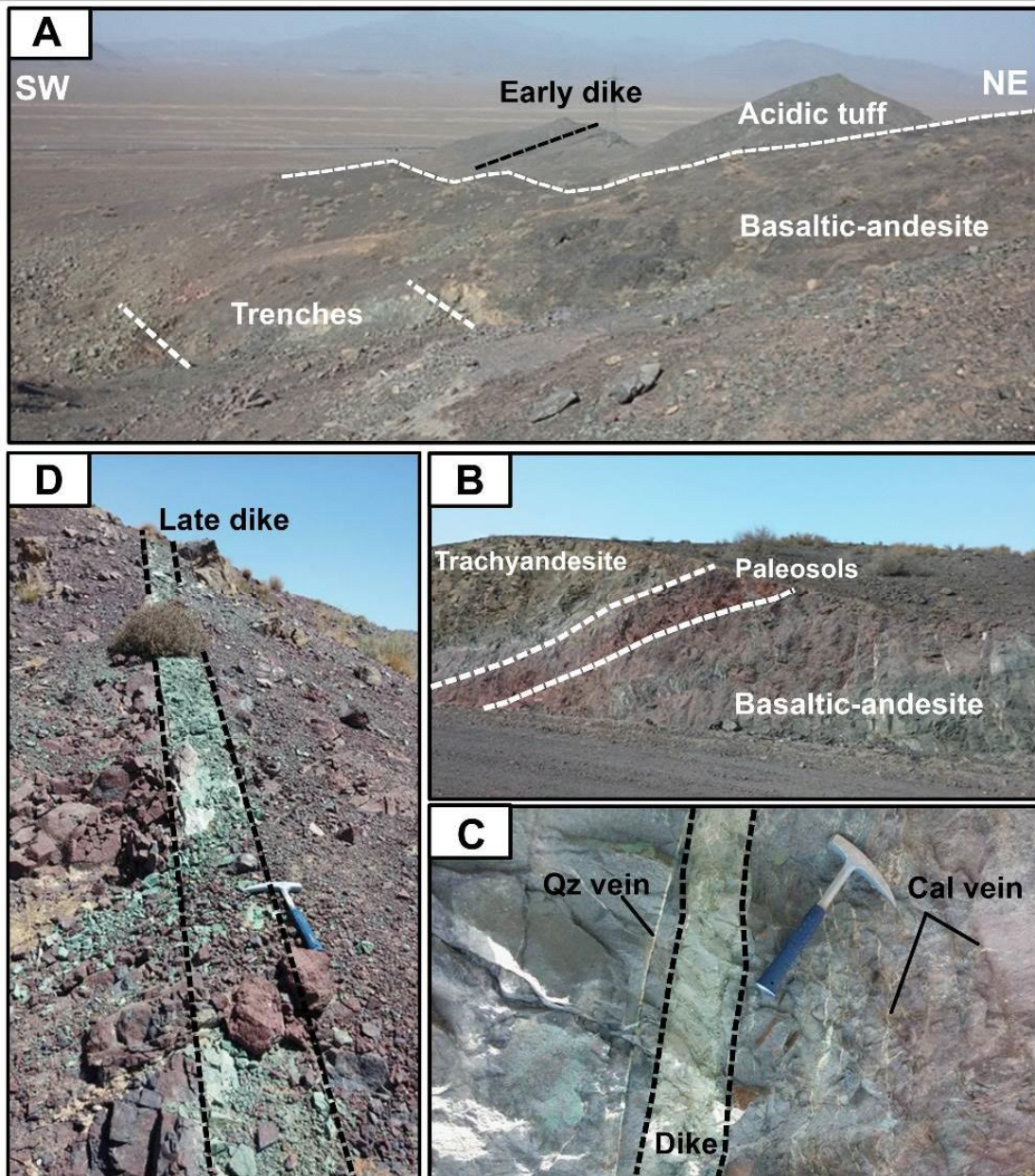


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه بررسی‌شده در جنوب‌خاوری اردستان (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان، با تغییرات اندک از Radfar (۱۹۹۹). در باختر و مرکز این محدوده، کانی‌سازی عیار بالای مس رخ داده است.

(Radfar, 1999). در میان سنگ‌های آتشفشانی بازالتی و آندزیت‌بازالتی، بخش‌های سرخ‌رنگی است که هماتیته شدن گسترده در آنها تغییر رنگ‌شان را در پی داشته و نشان‌دهنده رویداد موضعی هوازدگی در محیط ساحلی هستند (شکل ۲- B).

### (الف) سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری:

بیشتر بلندی‌های منطقه از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ساخته شده‌اند (شکل ۲- A). بازه ترکیبی آنها آندزیت، آندزیت‌بازالت و تراکی‌آندزیت بوده و دارای سن ائوسن میانی تا بالایی هستند



شکل ۲- تصویرهای صحرایی از منطقه بررسی شده در جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان): (A) بلندی‌های منطقه که از آندزیت‌بازالت‌ها ساخته شده‌اند و سنگ میزبان کانی‌سازی مس هستند (دید به‌سوی جنوب‌باختری)؛ (B) مرز آشکار آندزیت‌بازالت هماتیته شده (paleosols) با تراکی‌آندزیت؛ (C) رگه‌های کوارتز و کلسیت که به موازات دایک مافیک کلریتی شده دیده می‌شوند؛ (D) دایک مافیک کلریتی شده و دارای کانی‌سازی مس، آندزیت‌بازالت هماتیته شده را قطع کرده است.

(شکل‌های ۲-C و ۲-D). دایک‌های این منطقه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان (Radfar, 1999)، روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری 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 بررسی شده نشان‌دهنده جای‌داشتن مخزن ماگمایی در زیر این منطقه است که پس از پایان فوران ماگمایی به شکل تأخیری در واحدهای آتشفشانی تزییق شده‌اند. به نظر 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 کالک‌آلکان 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 سازنده آن از قطعات سنگ‌های آذرین شامل گابرو، گرانودیوریت‌های اپیدوتی‌شده و کلریتی‌شده، آتشفشانی‌های کلریتی‌شده و زئولیتی‌شده، قطعات

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 به صورت نهشته‌های ایگنمبریت با بافت جریان‌ی و با سن ائوسن میانی تا بالایی (Radfar, 1999) رخنمون کمی دارند. دارابودن سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری نشانه پیدایش این سنگ‌ها در محیط خشکی و نزدیک به خشکی و یا دریایی کم‌ژرف است (Radfar, 1999). توف‌های اسیدی بیشتر با ترکیب داسیت و به صورت رخنمون کوچکی در جنوب‌باختری منطقه دیده می‌شوند. در سن‌سنجی جدید Chiu و همکاران (۲۰۱۳)، سن سنگ‌های آتشفشانی منطقه پایین (جنوب‌خاوری منطقه بررسی‌شده) ۲۶ تا ۳۰ میلیون سال (الیگوسن) به دست آمده است.

#### (ب) سنگ‌های نیمه‌ژرف: جوان‌ترین واحد

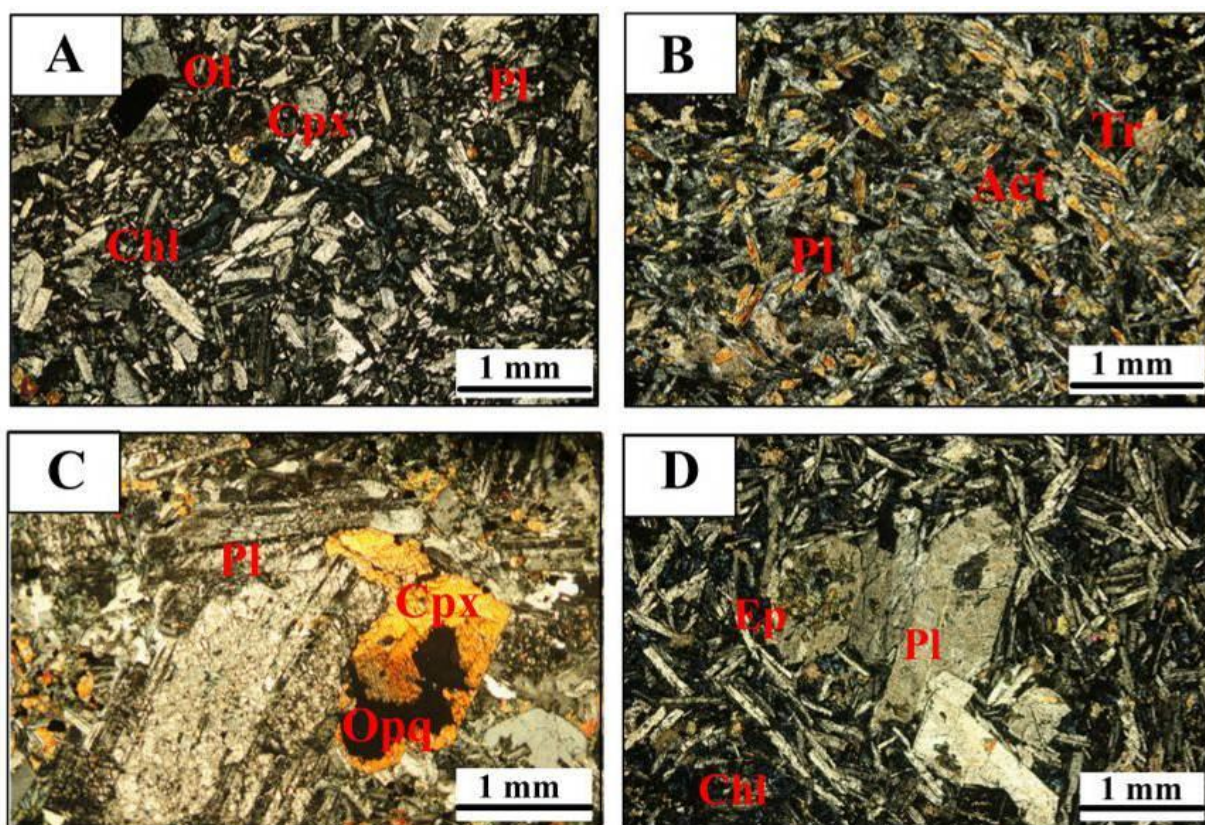
سنگ‌شناسی آذرین، دایک‌ها و گاه استوک‌های کوچک هستند. این دایک‌ها بیشتر به صورت دسته دایک و به موازات یکدیگر در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند. بیشترین رخنمون دایک‌ها در بخش مرکزی محدوده درفاصله گسل خاوری- باختری کچومتقال و گسل شمال‌باختری- جنوب‌خاوری کاشان دیده می‌شود (شکل ۱). دایک‌ها ترکیب گابرو، گابرودیوریت و پیروکسن‌دیوریت دارند و به رنگ‌های سبز و خاکستری تا سیاه و به صورت صلب و سخت در سطح زمین دیده می‌شوند. آنها رخنمون‌هایی با پهنای کمتر از ۰/۱ تا ۲ متر، درازای نزدیک به ۵ تا بیش از ۱۰۰ متر دارند و بیشترشان را می‌توان با شیب ۶۰ تا ۸۵ درجه به‌سوی جنوب‌خاوری روی زمین ردیابی کرد

خاکستری سیاه و در راستای گسل‌های اصلی منطقه، دورتر از ناحیه کانی‌سازی دیده می‌شوند. این دایک‌ها ترکیب گابرو و گابرو دیوریت دارند و به صورت 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).

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



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی از دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان): (A) بافت میکرولیتی در میکروگابرو (دایک‌های دسته اول)؛ (B) کانی اکتینولیت به صورت ثانویه در زمینه سنگ میکروگابرو پدید آمده است (دایک‌های دسته اول)؛ (C) پیروکسن دیوریت (دایک‌های دسته دوم)؛ (D) گابرو دیوریت با بافت پورفیری و زمینه کمی کلریتی شده و اپیدوتی شده (دایک‌های دسته دوم) (Chl= chlorite; Whitney and Evans, 2010)

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 کالکوپیریست، 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).

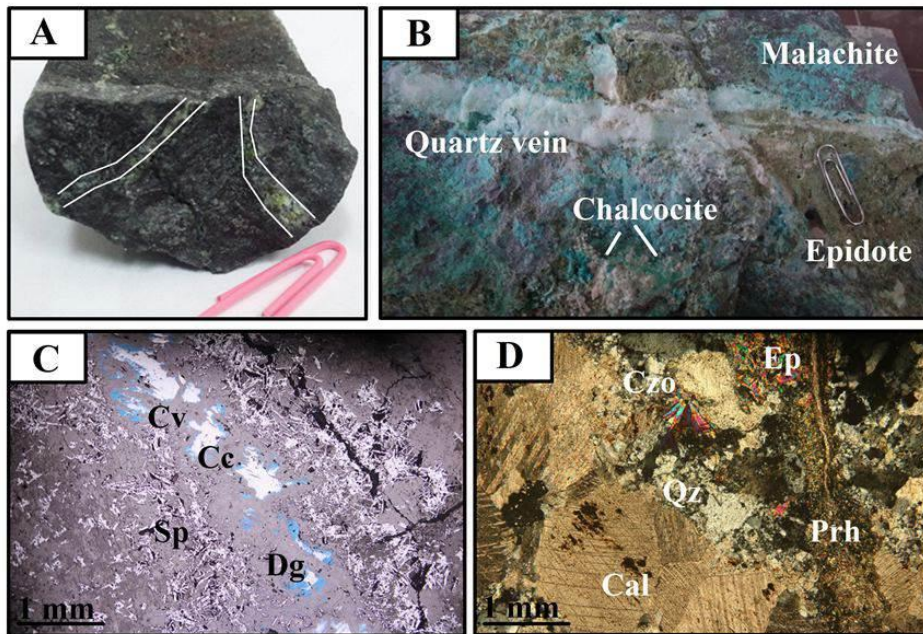
دایک‌های گروه دوم که در نزدیک کانی‌سازی دیده می‌شوند دارای ترکیبی از پیروکسن دیوریت، سینوگابرو و گابرو بوده به رنگ سبز هستند و نسبت به گسل‌های فرعی منطقه روند کمابیش عمودی دارند. این دایک‌ها بافت پورفیری، غربالی و اینترگرانولار دارند. بافت غربالی می‌تواند نشان‌دهنده نبود شرایط تعادل در پهنه پیدایش باشد. دیدگاه تبلور، ابعاد این گروه درشت‌تر از دایک‌های گروه اول است. پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن (اوژنیت) 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





شکل ۴- کانی‌سازی و دگرسانی منطقه جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان): (A) کانی‌های اپیدوت و مالاکیت کانی‌سازی کالکوسیت و رگه کوارتز را در بر گرفته‌اند؛ (B) حضور کالکوسیت و مالاکیت در رگچه‌ها؛ (C) کالکوسیت به صورت پرکننده فضا و کوولیت و دیژنیت به صورت جانشینی و اسپیکیولاریت، در پیرامون کانی‌سازی دیده می‌شوند؛ (D) کلسیت به صورت 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

Time Mineral	Early	Late
Chalcocite	██████████	██████████
Chalcopyrite	██████████	
Pyrite	██████████	
Bornite	██████████	██████████
Specularite		██████████
Covellite		██████████
Digenite		██████████
Malachite		██████████
Azurite		██████████
Calcite	██████████	██████████
Chlorite	██████████	
Epidote	██████████	██████████
Quartz	██████████	██████████

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

زمین‌شیمیایی AI و CCPI بررسی شد.

نشانه دگرسانی ایشیکاوا:

$$[AI=100 \times (MgO+K_2O)/(MgO+K_2O+CaO+N_2O)] \text{ (Ishikawa et al., 1976)}$$

نشانه کلریت-کربنات:

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

### زمین‌شیمی دگرسانی

اپیدوتی‌شدن، کلریتی‌شدن و کلسیتی‌شدن از دگرسانی‌های پراکنده در منطقه هستند. همراهی اپیدوت و کوارتز بیشتر در نزدیک رگه‌های کانی‌سازی به چشم می‌خورد. شدت دگرسانی با دو نشانه

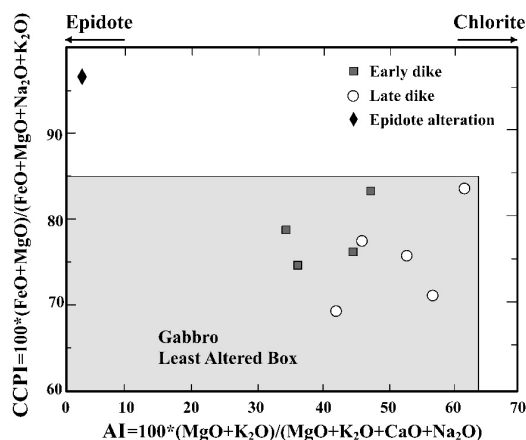
نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی همه دگرسانی‌های دایک (جدول ۱) در نمودار دگرسانی جای گرفتند. همه نمونه‌ها دگرسانی کلریتی-اپیدوتی کمی را نشان می‌دهند (شکل ۶). نمونه دگرسانی در گستره اپیدوتی جای گرفته است (شکل ۶).

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

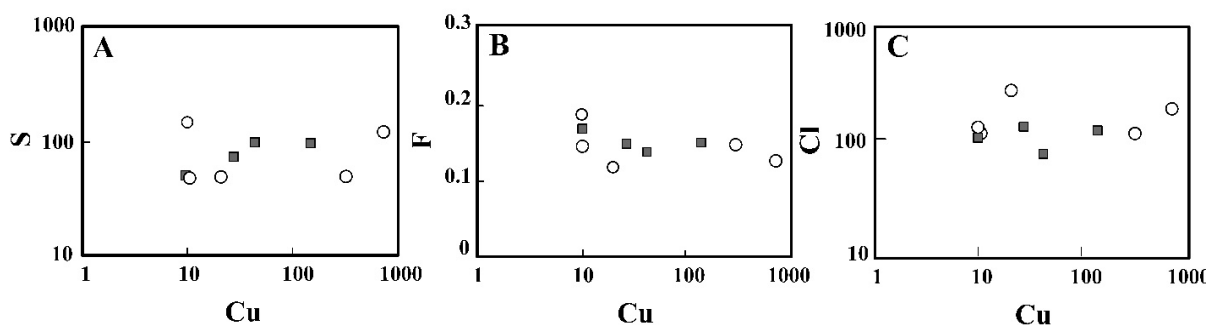
Sample No.	Early dike				Late dike					Alteration
	Cu III S44	Cu I S101	Cu II S159	Cu I S20	Cu III S132	BH 5, 5.2	BH 14, 6.5	BH5, 25	Cu II S161	Al II S41
	a	a	b	b	a	a	a	a	b	c
SiO <sub>2</sub>	45.81	46.72	51	52.79	46.73	46.92	48.99	49.87	50	59.79
TiO <sub>2</sub>	1.09	0.9	1.05	0.8	1.06	1.15	1.05	1.01	1.3	0.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.76	16.97	16.41	17.89	15.71	17.34	16.71	16.91	16.78	12.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.95	10.37	8.18	8.09	8.54	9.89	8.87	8.77	10.6	9.08
FeO <sub>t</sub>	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 <sub>2</sub> O	4.61	3.97	4.54	3.49	3.5	3.43	3.07	3.31	5.08	0.21
K <sub>2</sub> O	1.4	0.92	1.95	0.76	2.09	1.95	2.41	3.51	1.35	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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	

### زمین‌شیمی عنصرهای فرار در دایک‌ها

عنصرهای فرار کلر، فلئور و آب در شناسایی و اکتشاف توده‌های کانی‌ساز از توده‌های نابارور نقش مهمی دارند. محتوای کلر به دما و فشار ماگما بسیار حساس است (Kesler *et al.*, 1975; Webster *et al.*, 2009). تغییرات کلر، فلئور و سولفور در دایک‌ها به ترتیب ۸۵/۹ تا ۳۱۳/۳ گرم در تن، ۰/۱۲ تا ۰/۱۹ درصد وزنی و ۵۰ تا ۱۵۰ گرم در تن است. در نمونه‌های دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان، همبستگی میان مس با عنصرهای فرار کلر، فلئور و گوگرد کم و به ترتیب به مقدار ۰/۲۲، ۰/۵۳- و ۰/۲۶ است (شکل ۷).



شکل ۶- نمودار دگرسانی AI-CCPI (Gifkins *et al.*, 2005) بر پایه نشانه AI در برابر CCPI برای دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان)

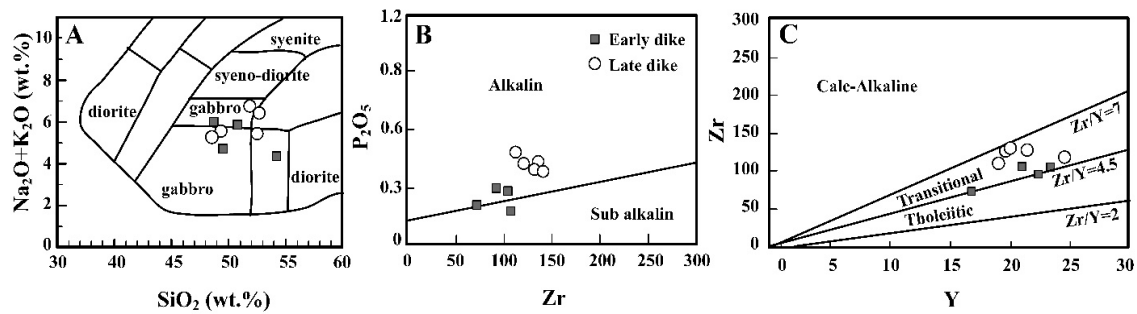


شکل ۷- نمودار لگاریتمی تغییرات عنصرهای فرار در دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان): A) Cu در برابر S؛ B) Cu در برابر Cl؛ C) Cu در برابر F (عنصرها بر پایه ppm هستند)

دایک‌های بررسی‌شده منطقه جنوب‌خاوری اردستان در گستره گابرو و گابرودیوریت جای دارند (شکل ۸- A). با توجه به مقدار بالای اکسید عنصرهای آلکالن، نمودارهای شناسایی سری‌های ماگمایی بر پایه عنصرهای نامتحرک به کار برده شدند. در نمودار Zr در برابر  $P_2O_5$ ، بیشتر نمونه‌های دایک در گستره آلکالن (شکل ۸- B) و در نمودار Zr در برابر Y در گستره گابروهای انتقالی جای می‌گیرند (شکل ۸- C). در شکل‌های ۸- B و ۸- C، دو دسته دایک به خوبی از یکدیگر شناخته شده‌اند.

### ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و سنگ‌شناختی دایک‌ها

داده‌های تجزیه نمونه‌های دایک‌های منطقه جنوب‌خاوری اردستان در جدول ۱ آورده شده‌اند. سیلیس در دایک‌ها از ۴۵/۸ تا ۵۲/۸ درصد وزنی است. نمونه‌های دایک مقدار بالایی از  $Na_2O+K_2O$  (میانگین ۵/۶ درصد وزنی)، نسبت بالای  $Al_2O_3/TiO_2$  (میانگین ۱۶/۸) و  $MgO$  (میانگین ۶/۹ درصد وزنی) دارند (جدول ۱). در نمودار زمین‌شیمیایی نام‌گذاری سنگ‌ها (TAS) بر پایه تغییرات  $Na_2O+K_2O$  در برابر  $SiO_2$



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  $\text{SiO}_2$  به‌کار برده شده است؛ (B) شناسایی سری ماگمایی در نمودار  $\text{P}_2\text{O}_5$  (برپایه درصد وزنی) در برابر Zr (برپایه ppm) (Winchester and Floyd, 1977). بیشتر نمونه‌ها سرشت آکالین 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.

دارند (جدول ۲). همبستگی منفی را می‌توان پیامد ورود این اکسیدها در کانی‌پیروکسن 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.

در ترکیب سنگ‌کل هر دو دسته دایک در نمودارهای تغییرات، عنصرهای اصلی و فرعی در برابر  $\text{SiO}_2$  و MgO روند پیوسته و آشکاری نشان نمی‌دهند. این ناپیوستگی می‌تواند پیامد وقفه میان پیدایش دو دسته دایک دانسته شود. از سوی دیگر، در نمودارهای اکسیدهای اصلی در برابر  $\text{SiO}_2$  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

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

	$\text{SiO}_2$													
$\text{SiO}_2$	1.00													
$\text{TiO}_2$	-0.75	1.00												
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.08	-0.37	1.00											
$\text{FeO}$	-0.58	0.25	0.27	1.00										
$\text{MnO}$	-0.84	0.48	-0.13	0.71	1.00									
$\text{MgO}$	-0.78	0.51	-0.32	0.22	0.66	1.00								
$\text{CaO}$	0.32	-0.29	-0.07	-0.30	-0.24	-0.42	1.00							
$\text{Na}_2\text{O}$	-0.18	0.19	-0.10	0.25	0.29	-0.22	0.42	1.00						
$\text{K}_2\text{O}$	-0.03	0.29	-0.58	-0.17	-0.19	0.35	-0.39	-0.54	1.00					
$\text{P}_2\text{O}_5$	-0.29	0.63	-0.65	-0.16	0.06	0.51	-0.17	-0.35	0.79	1.00				

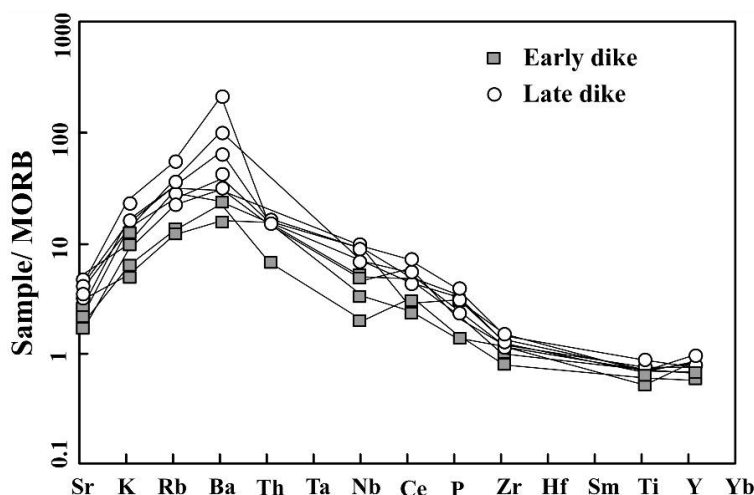
در تن، فراوانی Ba به‌ترتیب به  $۶۰۴/۵$  و  $۴۲۹۶$  گرم در تن و فراوانی Y به‌ترتیب به  $۲۵/۰$  و  $۲۸$  گرم در تن می‌رسد. با وجود این، مقدار Rb/Sr در هر دو دسته دایک به‌یکدیگر نزدیک بوده و در گروه اول و دوم

مقدار عنصرهای LILE در دو دسته دایک همانند یکدیگر نیست؛ به‌گونه‌ای که 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

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. از این رو، افزایش مقدار کروم و نیکل به فراوانی بیشتر مگنتیت، به‌ویژه در دایک‌های گروه دوم، بستگی دارد.

برای بررسی بیشتر تغییرات عنصرهای فرعی، از نمودار بهنجار شده به ترکیب MORB برای دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان بهره گرفته شد (شکل ۹ - A). همان‌گونه که 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.

به ترتیب به ۰/۲۱ و ۰/۲۱ و نسبت Sr/Y به ترتیب 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 به ترتیب به ۱۰۶/۲ و ۱۳۶/۴ گرم در تن و Nb به ترتیب به ۱۵/۴ و ۱۷ گرم در تن و TiO<sub>2</sub> به ترتیب 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 گرم در تن 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



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

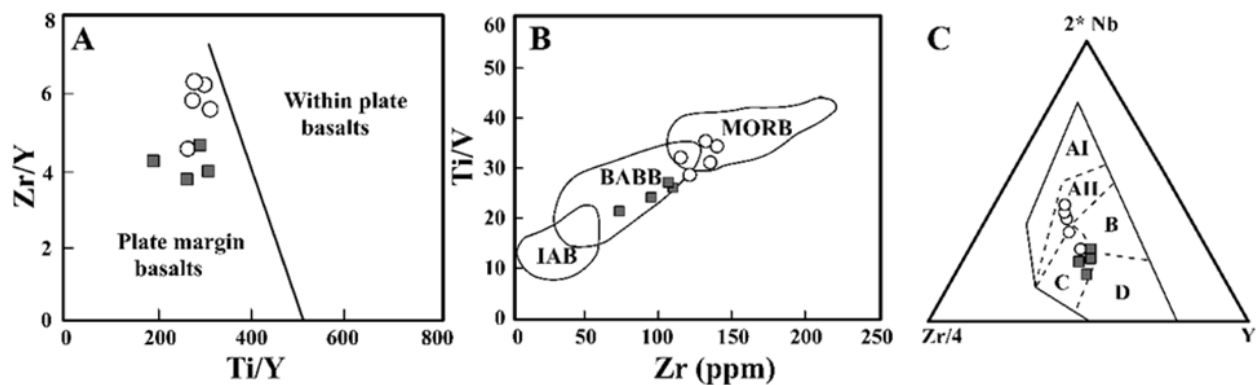
در صفحه فرورونده در پهنه فرورانش است (Pearce, 1983). غنی‌شدگی عنصرهای LILE در برابر ترکیب گوشته اولیه می‌تواند نشان‌دهنده آرایش مواد پوسته‌ای باشد. میزان بالا و صد برابری Ba در برابر ترکیب گوشته اولیه می‌تواند پیامد آرایش در هنگام بالآمدن از مجرای فورانی در پهنه پشت‌کمان باشد (Kamber, 2012).

کاهش مقدار عنصرهای Zr, Ti, 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 آرایش ماگمایی باشد (Kurt et al., 2008). تهی‌شدگی از عنصرهای HFSE به علت به‌جای‌ماندن این عنصرها

نمودار تغییرات  $Zr/Y$  در برابر  $Y$ ، دایک‌ها در گستره وابسته به حاشیه ورقه جای گرفته‌اند؛ هرچند دایک‌های گروه دوم نزدیک به گستره 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 کششی 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 گستره بازالت‌های درون صفحه‌ای کشیده شده‌اند (شکل ۱۰- C).

نسبت بالای  $Ba/Nb$  (۵۰/۹۴ تا ۲۵۲/۷۱) نشانه مذب 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 نشان‌دهنده وابستگی این سنگ‌ها به ماگمایی برخاسته از گوشته غنی‌شده یا آرایش‌یافته با پوسته قاره‌ای (Aldanmaz, 2012) است (جدول ۱).

با به‌کارگیری عنصرهای نامتحرک، نمودارهای تفکیک‌کننده بسیاری به‌کار گرفته شده‌اند تا موقعیت زمین‌ساختی سازگار با زمین‌شیمی دایک‌های بررسی‌شده جنوب‌خاوری اردستان را بازسازی کنند. در



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 (BABBB) 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) (B= field of P-type)؛ (AI, AII= fields of intraplate alkali basalts; AII, C= fields of intraplate tholeiites; B= field of P-type)؛ (D= field of N-type MORB; C, D= fields of volcanic arc basalts)؛ (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)

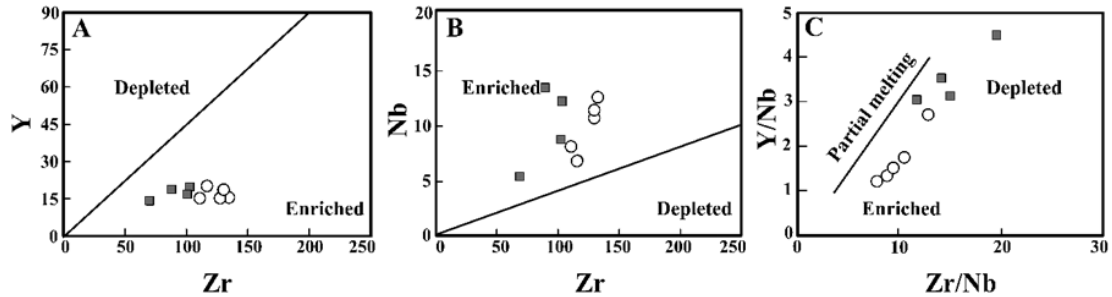
### ماگمای سازنده

فراوانی و نسبت عنصرهای ناسازگار می‌تواند در ارتباط با خاستگاه مناسب گوشته به‌کار رود. عنصرهای فرعی ناسازگار (مانند:  $Nb$ ,  $Ta$ ,  $Th$ ) 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

نمونه‌ها در محدوده گوشته غنی‌شده جای می‌گیرند (شکل‌های A-۱۱ و B-۱۱). در نمودار Y/Nb در برابر Zr/Nb، همه نمونه‌ها روند ذوب‌بخشی نشان می‌دهند (شکل C-۱۱).

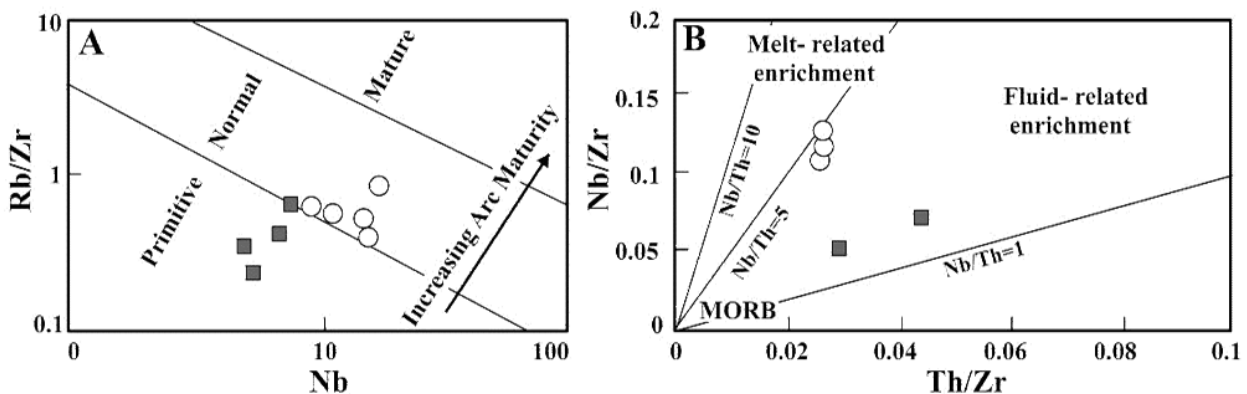
نمونه‌ها در محدوده گوشته غنی‌شده جای می‌گیرند (شکل‌های A-۱۱ و B-۱۱). در نمودار Y/Nb در برابر Zr/Nb، همه نمونه‌ها روند ذوب‌بخشی نشان می‌دهند (شکل C-۱۱).



شکل ۱۱- بررسی خاستگاه ماگمای سازنده دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) در: (A) نمودار تغییرات Y (بر پایه ppm) در برابر Zr (بر پایه ppm)؛ (B) نمودار Nb (بر پایه ppm) در برابر Zr (بر پایه 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

ساکن است و در جریان آب‌زدایی پوسته اقیانوسی فرورونده به سیال‌های غنی از عنصرهای متحرک (مانند: LILE) وارد نمی‌شود (Kelemen *et al.*, 2004). نمودار تغییرات Nb/Zr در برابر Th/Zr، نقش سیال‌ها در متاسوماتیسم ماگمای سازنده دایک‌ها را نشان می‌دهد (شکل B-۱۲). از سوی دیگر، فراوانی عنصرهای LILE و تهی‌شدگی از عنصرهای HFSE می‌تواند نشان‌دهنده سیال در هنگام پیدایش ماگما باشد.

با توجه به اثر مهم بلوغ کمان در پیدایش دایک‌ها و برپایه نمودار لگاریتمی Rb/Zr در برابر لگاریتم Nb، دایک‌های دسته اول در گستره کمان ماگمایی جوان (مرحله‌های آغازین پیدایش کمان) و دایک‌های دسته دوم در گستره کمان عادی جای می‌گیرند (شکل A-۱۲). عنصر توریم در شناسایی نقش رسوب‌های فرورونده در پهنه‌های کمان ماگمایی پدیدآمده در هنگام فرورانش بسیار پر اهمیت است. این عنصر به شدت نامتحرک یا



شکل ۱۲- جایگاه ترکیبی دایک دایک‌های جنوب‌خاوری اردستان (شمال‌خاوری اصفهان) در: (A) نمودار تغییرات Rb/Zr در برابر Nb (بر پایه ppm) (Brown *et al.*, 1984). دایک‌های گروه اول در گستره 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 به صورت هم‌رشدی کانی‌های اپیدوت با کوارتز به چشم 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، همسبودن آنها با کانی‌سازی به فضاها 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. از این رو، 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 زمین‌شیمیایی این

پژوهش و از نگاه وسیع‌تر، به نظر 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 پشت‌کمان، چندان بالا نیست. همچنین، ماگمای پدیدآورنده دو دسته دایک، با گذر زمان تغییر کرده است و همان‌گونه که 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 غنی شده 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 به صورت 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؛ به‌گونه‌ای که واحدهای آتشفشانی-آذرآواری الیگومیوسن هم‌ارز سازند قم به صورت چین‌خوردگی در شمال گسل کچومثال (شکل ۱) رخمون پیدا کرده‌اند. سازند قم یک حوضه دریایی کم‌ژرفا مرتبط با پشت‌کمان 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.
- Alamina, 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. 2<sup>nd</sup> 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., Hanghøj, 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 alteration mineralogy and litho geochemistry 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 34<sup>th</sup> and the 2<sup>nd</sup> 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.