

# شیمی کانی و پتروژنز دایک‌های لامپروفیری کالک‌آلکانل معادن سونگون و هفت‌چشمه (استان آذربایجان شرقی، ایران)

زهرا قره‌چاهی<sup>۱</sup>، محسن مؤید<sup>۲</sup>، جمشید احمدیان<sup>۳</sup> و مامورو مورانا<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دکتر، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup>استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

<sup>۴</sup>استاد، بخش علوم زمین، دانشگاه ناروتو، توکوشیما، ژاپن

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴

## چکیده

معادن سونگون و هفت‌چشمه در یک کمپلکس آتشفشانی - نفوذی در شمال باختر کشور (استان آذربایجان شرقی) و در پهنه مس ارسباران قرار گرفته‌اند. دایک‌های لامپروفیری سونگون با سنی جوان‌تر از الیگومیوسن شامل کانی‌های بیوتیت، پلاژیوکلاز و پیروکسن و با بافت اصلی پورفیریتیک، جزو لامپروفیرهای کالک‌آلکانل - کرسانتیت رده‌بندی می‌شوند و توده کوارتز مونزونیت پورفیری سونگون را گسسته‌اند. دایک‌های لامپروفیری هفت‌چشمه با سنی جوان‌تر از الیگومیوسن، شامل کانی‌های بیوتیت، فلدسپار قلیایی و پیروکسن و با بافت‌های اصلی هیالومیکرولیتیک پورفیری و جریانی، جزو لامپروفیرهای کالک‌آلکانل - مینت به شمار می‌روند و توده کوارتز پوریت هفت‌چشمه را گسسته‌اند. بررسی نمودارهای عنکبوتی، نشان‌دهنده غنی‌شدگی LREEها نسبت به MREEها و HREEها در آنهاست که احتمال تشکیل این سنگ‌ها از یک منشأ غنی شده را نشان می‌دهد. بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی لامپروفیرهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که نوع ماگمای تشکیل دهنده آنها از نوع لامپروفیرهای کالک‌آلکانل و محیط زمین‌ساختی آنها وابسته به کمان ماگمایی است. این لامپروفیرها از درجه پایین ذوب‌بخشی گارنت‌لرزلویت به وجود آمده‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** لامپروفیر کالک‌آلکانل، کرسانتیت، مینت، استان آذربایجان شرقی، سونگون، هفت‌چشمه.

\*نویسنده مسئول: محسن مؤید

E-mail: moayyed@tabrizu.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

شمال باختر ایران به دلیل رخنمون گسترده سنگ‌های آتشفشانی ترشیر تا کواترنی یک ایالت آتشفشانی به شمار می‌رود. فعالیت ماگمایی گسترده درائوسن - الیگوسن و همزمان با فعالیت پهنه ارومیه - دختر و در پی آن فعالیت آتشفشانی بایمودال در پلوی - کواترنی با کاراکتر آلکانل سدیک و اولتراباسیک با تزریق دایک‌های لامپروفیری همراه بوده است؛ که از آن جمله می‌توان به دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون، هفت‌چشمه و کمپلکس نفوذی مونزونیت پورفیری سونگون اشاره کرد. این توده توسط دایک‌های مختلف با ترکیب کوارتز پوریت، گابرو پوریت، دیوریت، داسیت، میکرودیوریت و دایک‌های لامپروفیری با ماهیت کرسانتیت - کالک‌آلکانل قطع شده است، (کمالی و همکاران، ۱۳۹۵). در منطقه قخلار مرند دایک لامپروفیری به درون سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری پلیوسن تزریق شده است. رنگ آنها در نمونه دستی خاکستری تیره تا سیاه و ترکیب کانی‌شناسی آنها شامل درشت‌بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و زونه میکا، کلیئوپروکسن و فلدسپار قلیایی است. ماهیت این دایک نوع مینت و کالک‌آلکانل است. ترکیب این دایک‌ها تراکی‌آندزیت بازالتی بوده و سری ماگمایی این دایک لامپروفیری شوشنیتی و التراپتاسیک است (مؤذن و همکاران، ۱۳۸۲). ویژگی ژئوشیمیایی این دایک‌های لامپروفیری شبیه به مینت جوان ایالت متحده آمریکا بوده و ماگمای نوع M6 کالک‌آلکانل پیشنهادی (Rock, 1991) به عنوان ماگمای مادر آن در نظر گرفته شده است. این دایک‌های لامپروفیری در یک محیط پس‌برخوردی جایگیری کرده‌اند. در جزیره اسلامی دایک‌های کم‌عرض لامپروفیر (۱ تا ۳ متر) در جنوب و جنوب خاور کوه داشکسن رخنمون دارند و با درشت‌بلورهای براق میکا مشخص می‌شوند (Moayyed et al., 2008). کانی‌شناسی اصلی آن شامل درشت‌بلورهای شکل‌دار بیوتیت، در خمیره ریزبلوری از فلدسپار آلکانل، اسفن، آپاتیت و کانی‌های تیره با بافت پورفیری است. از دید ترکیب کانی‌شناسی همانندی زیادی به مینت دارند و ترکیب سنگ‌شناسی آنها در حد تفریت و بازایت است. ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب (REE) نشان‌دهنده متاسوماتیسم گسترده غنی از روتیل در محل منشأ ماگماست (Moayyed et al., 2008). از دید جایگاه زمین‌ساختی

اصطلاح لامپروفیر به وسیله Gumble (1874) برای توصیف گروهی از دایک‌های تیره، غنی از بیوتیت معرفی شد. نام این سنگ از کلمه یونانی لامپروس (Lampros) به معنی درخشان یا براق گرفته شده است که با حضور گسترده ورقه‌های بیوتیت در این سنگ‌ها مناسب است. این اصطلاح برای گروهی از سنگ‌های ملانوکرات و بدون توجه به ماهیت کانی‌های فرمونیزین که این سنگ‌ها بیشتر از آن تشکیل شده‌اند به کار برده می‌شود. الیون، بیوتیت، پیروکسن و آمفیبول این سنگ‌ها معمولاً در زمینه‌ای از فلدسپار قرار دارند. لامپروفیرها طیف گسترده‌ای از ترکیبات سنگی را پوشش می‌دهند که شامل سنگ‌های اولترامافیک تا انواع مزوتیپ و اولترابازیک، سنگ‌های اولتراباسیک، سنگ اولترابازیک غنی از Na تا غنی از K دارای ملیت تا کوارتز و پراآلمین تا پرتاسیک هستند. این سنگ‌ها تابع تقسیم‌بندی بر پایه خواص مودال و نمودارهای توصیف ترکیب نیستند و بر پایه ترکیب کانی‌شناسی و ماهیت ژئوشیمیایی مطالعه می‌شوند. (Streckeisen, 1979) برای لامپروفیرها ویژگی‌های زیر را در نظر گرفت: الف) سنگ‌های پورفیری مزوکرات تا ملانوکرات و کمتر اولترامافیک هستند؛ ب) الیون، کلیئوپروکسن، آمفیبول، بیوتیت - فلوگوپیت و ملیت دارند؛ ج) اگر فلدسپار یا فلدسپاتوئید وجود داشته باشد تنها در خمیره است؛ د) دگرسانی گرمابی فلوگوپیت، پیروکسن، بیوتیت، الیون و پلاژیوکلاز در آنها امری عادی است؛ ه) کلسیت، زئولیت و دیگر کانی‌های گرمابی هم حضور دارند؛ و) معمولاً دارای  $K_2O / (K_2O + Na_2O)$  نسبت بالا و  $SiO_2$  پایینی هستند. ز) نسبت به سنگ‌های با  $SiO_2$  مشابه مقادیر بالای  $H_2O, CO_2, P_2O_5, S$  و کانی‌های آب‌دار کربناته، سولفید، آپاتیت و زئولیت فراوانی دارند و به علت محتوای بسیار متغیر  $H_2O$  و  $CO_2$  لامپروفیرها، در برخی نمونه‌ها اولیه و در برخی دیگر ثانویه هستند. از این رو، تقسیم‌بندی کانیایی یا شیمیایی این سنگ‌ها با مشکلات فراوانی روبه‌روست (Woolley et al., 1996). لامپروفیرها افزون بر مباحث سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی از دید اقتصادی نیز مهم هستند و نقش مهمی در کانه‌زایی دارند (Rock, 1991). لامپروفیرهای کالک‌آلکانل (Kersantites, Minettes)، و به صورت کمیاب لامپروفیرهای آلکانل (Camptonites, Monchiquites) همراه با نهشته‌های فلزات با ارزش هستند (Stemprok and Seifert, 2011).

منطقه رخ داده است. قدیمی‌ترین پالس نفودی متعلق به توده نفودی کوارتزومونزیتی سونگون است؛ کانی‌سازی مس-مولیبدن پورفیری دارد و خود توسط دو توده تأخیری کوارتزودیوریت-گرانودیوریت و دیوریت نابارور قطع شده است. همچنین دایک‌های پس از کانی‌سازی که از توده‌های اخیر منشأ گرفته‌اند؛ با راستای NW-SE و با شیب به سوی SW و کمتر با راستای N-S توده اصلی دارای کانی‌سازی نوع پورفیری را قطع کرده‌اند. موید (۱۳۸۳) این دایک‌ها را بر پایه تقدم و تأخر به ۴ نسل تقسیم کرده است: الف) دایک‌های نسل اول که از توده تأخیری کوارتزودیوریت تا گرانودیوریت منشأ گرفته‌اند و خود شامل سه زیررده هستند؛ ب) دایک‌های نسل دوم که دارای ترکیب گابرویی-دیوریتی هستند و بیرون از پیت اصلی سونگون برونزد دارند؛ ج) دایک‌های نسل سوم که دارای ترکیب دیوریتی هستند؛ د) دایک‌های نسل چهارم که ترکیب لائیت تا تراکی‌آندزیت دارند. با توجه به مطالعات انجام شده (علوی، ۱۳۹۲؛ کامالی، ۱۳۹۵؛ کامالی و همکاران، ۱۳۹۵) دایک‌های نسل پنجمی با ترکیب لامپروفیر بررسی خواهند شد. سبترای این دایک‌های لامپروفیری از یک متر بیشتر است و بیشتر آنها حواشی مشخص با سنگ درونگیر دارند. این دایک‌ها در نمونه دستی خاکستری رنگ و دارای درشت‌بلورهای درشت بیوتیت هستند و به‌طور آشکاری ویژگی پورفیری نشان می‌دهند (شکل ۲-الف).

### ۳- زمین‌شناسی عمومی معدن هفت چشمه

معدن هفت چشمه دارای کانی‌سازی مس پورفیری است که درون یک کمپلکس آتشفشانی-نفودی در شمال باختر کشور و در پهنه مس ارسباران قرار گرفته است. در محدوده مطالعاتی سنگ‌های کهن تر از کرتاسه برونزد ندارد. از دید نوع کانی‌سازی همانند کانسار سونگون و از نوع مس مولیبدن‌دار است (قریبانی، ۱۳۸۴). در خاور و جنوب خاور روستای بالوجه و در ارتفاعات حاشیه خاوری جاده هفت چشمه رخنمون قابل توجهی از توده گابرو-دیوریتی دیده می‌شود که با سنگ‌های آتشفشانی و آهک‌های پلاژیک کرتاسه بالایی همبری مشخصی دارد. دایک‌هایی از این توده گابرویدیوریتی درون توده کوارتزودیوریت پورفیری دیده شده است که با بافت گرانولار و گرانولارپورفیری از توده میکرویدیوریتی تا کوارتزیدیوریتی متمایز می‌شود. همچنین دایک‌هایی با ترکیب هورنبلندآندزیت، گرانودیوریت و لامپروفیر در این محدوده شناسایی شده‌اند. افزون بر این، مطالعه لاگ گمانه‌های حفاری شده در سایت هفت چشمه نشان داده است که دایک‌هایی با ترکیب دیوریتی تا کوارتزیدیوریتی، لامپروفیری و گابرو-دیوریتی که به احتمال زیاد منشعب از توده گابرو-دیوریتی هستند؛ به درون توده کوارتزیدیوریتی تا میکرویدیوریتی بالوجه تریق شده‌اند که تأخر سنی نفوذ این توده را نسبت به توده پورفیری نشان می‌دهد (علیپور، ۱۳۹۲). دایک‌های لامپروفیری مورد بررسی در این پژوهش در نمونه‌های دستی به رنگ خاکستری روشن هستند و درشت‌بلورهای بیوتیت در آنها دیده می‌شود. شبکه دایک‌های این منطقه نیز همانند منطقه سونگون متراکم است و بیشتر با روند NW-SE و شیب نزدیک به قائم درون مجموعه سنگی دیوریتی تا کوارتزیدیوریتی نفوذ کرده است (شکل ۲-ب).

### ۴- روش انجام کار

پس از بررسی، لاگ گمانه‌های حفاری شده در سایت هفت چشمه و سونگون ۴۵ نمونه از دایک‌های لامپروفیری برداشت و از میان آنها ۲۰ نمونه برای تهیه مقطع نازک انتخاب شد. مطالعات شیمی کانی‌ها در دو مقطع (یک مقطع از معدن سونگون و یک مقطع معدن هفت چشمه) -۴۰ نقطه- با ولتاژ شتاب‌دهنده 15keV و شدت 15nA در آزمایشگاه دانشگاه Naruto ژاپن توسط دستگاه میکروپروپ JEOL مدل JXA-8800R (WDS) صورت گرفت. فرمول ساختمانی کانی‌ها با استفاده از داده‌های تجزیه میکروپروپ، برنامه تصحیح گر ZAF و نرم‌افزار Minpet 2.02 به دست آمد. تفکیک آهن ۲ و ۳ با استفاده از روش (Droop, 1987) انجام شده است. در مرحله بعد برای تکمیل مطالعات، ۱۰ نمونه از سنگ‌هایی که سالم و غیر دگرسان

این لامپروفیرها به کمان ماگمایی پس‌برخورد تعلق دارند. اولین مطالعه در منطقه ورزقان به‌صورت نقشه چهارگوش اهر به مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ به‌وسیله باباخانی و همکاران (۱۳۵۵) تهیه شد. وثوق‌زاده و تدین‌اسلامی (۱۳۵۳)، در گزارش اکتشافی و ژئوشیمیایی تفصیلی و نیمه‌تفصیلی مناطق شمال باختری اهر: بارملک، کیقال، سونگون و بالوجا، به‌وجود چند ترائشه و یک تونل کوچک متروکه که در ۲ کیلومتری شمال خاور بالوجا از دید وجود شواهد کانی‌سازی مس اشاره کرده‌اند. از مطالعات انجام گرفته در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ ورزقان توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور می‌توان به گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک ورقه ورزقان (شمال باختر اهر) مهرپرتو و امینی‌فضل (۱۳۷۱)، آزر و میرزایی نوبری (۱۳۷۲) و گزارش اکتشافات در برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ ورزقان توسط نوبری و همکاران (۱۳۸۰) اشاره کرد. از مطالعات انجام شده در منطقه سونگون می‌توان به ژئوشیمی و بررسی میانبراهای سیال کانسار مس-مولیبدن سونگون (Mehrpertou, 1993)، ژئوشیمی ایزوتوپ‌های پایدار گازهای نجیب و بررسی سیالات درگیر منطقه سونگون، ژئوشیمی ایزوتوپ‌های پایدار گازهای نجیب و بررسی میانبراهای سیال منطقه سونگون (Calagari, 1997)، کنترل فیزیکوشیمیایی روی دگرسانی و کانی‌زایی مس در کانسار مس پورفیری سونگون (Hezarkhani, 1997)، مطالعه دایک‌های لامپروفیری سونگون توسط موید (۱۳۸۳) در قالب گزارش زمین‌شناسی، گوناگونی‌های سنگی معدن مس و اسکارن خاوری معدن مس سونگون و معرفی دایک‌های پس از کانی‌سازی معدن سونگون توسط علوی (۱۳۹۲)، علوی و همکاران (۱۳۹۲)، کامالی و همکاران (۱۳۹۵) و کامالی (۱۳۹۵) اشاره کرد.

از مطالعات انجام شده در منطقه هفت چشمه می‌توان به مطالعه دایک‌های لامپروفیری هفت چشمه توسط موید (۱۳۸۸) در قالب گزارش زمین‌شناسی و گوناگونی‌های سنگی محدوده اکتشافی هفت چشمه، زمین‌شناسی-دگرسانی و کانی‌سازی در ذخیره مس هفت چشمه توسط حسن‌پور و همکاران (۱۳۸۹)، چگونگی تشکیل و کانی‌سازی معدن مس هفت چشمه توسط عادل (۱۳۹۱) و بررسی دگرسانی و کانی‌سازی معدن هفت چشمه توسط علیپور (۱۳۹۲) و حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) اشاره کرد. در سال‌های اخیر نیز تعداد بیشماری از موضوعات رساله‌های کارشناسی ارشد، دکترا و مطالعات صورت گرفته در این مناطق، به دلیل قرار گرفتن در پهنه مس ارسباران بیشتر بر فلزایی مس استوار بوده و دایک‌های لامپروفیری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش بررسی دقیق کانی‌شناسی، ویژگی‌های بافتی، ترکیب سنگ‌شناسی و ژئوشیمی دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت چشمه است که بر این اساس ویژگی‌های ژئوشیمیایی، پتروژنز و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های مورد مطالعه تعیین خواهد شد. مناطق مورد مطالعه این پژوهش، در استان آذربایجان شرقی، میان طول‌های جغرافیایی ۳۰° ۳۸' تا ۳۹° ۰۰' خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۳۰° ۴۶' تا ۴۷° ۰۰' شمالی قرار گرفته‌اند (شکل ۱).

### ۲- زمین‌شناسی عمومی معدن سونگون

معدن مس سونگون در استان آذربایجان شرقی، شهرستان ورزقان و دهستان بکرآباد جای شده است. این معدن در یک منطقه کوهستانی با میانگین ارتفاع ۲۰۰۰ متر بالای سطح دریا جای گرفته و در شمال باختری ایران روی کمر بند مس جهانی قرار دارد. این کانسار به‌صورت توده نفودی، روی رشته کوه‌های ارسباران (قره‌داغ) قرار گرفته است. توده پورفیری سونگون با سن الیگومیوسن در سنگ‌های کربناته کرتاسه بالایی نفوذ کرده است (Mehrpertou, 1993). قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه شامل سکانسی به سبترای ۵۰۰ متر از آهک کرتاسه با میان‌لایه‌هایی از شیل و سکانس دیگری به سبترای ۱۵۰۰ متر از گدازه‌های کالک‌آلکانل و سنگ‌های توفی است که دایک‌های آندزیتی کالک‌آلکانل در آنها نفوذ کرده‌اند (Hezarkhani, 1997). فعالیت ماگمایی پس از جایگیری توده کوارتزومونزیتی به‌صورت تریق سامانه دایک‌های بسیار درون توده بوده است. بررسی‌های جدید گوناگونی‌های سنگی، در قالب اکتشافات تکمیلی (موید، ۱۳۸۳) نشان می‌دهد که سه پالس اصلی نفوذ در

تا ۰/۷۸ است (شکل ۴- الف). نتایج حاصل از این تجزیه پلاژیوکلازهای دایک سونگون نشان می‌دهد An% در بازه‌ای از ۲۰/۵ تا ۲۲/۷ قرار می‌گیرد و الیگوکلاز نام دارد؛ تجزیه فلدسپار قلیایی دایک هفت‌چشمه An% را ۰/۴۳ و Or% را ۹۷/۲ تا ۹۴ و Ab% آن ۲/۵ تا ۵/۷ درصد نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شیمی شکل ۴- ب، کانی تجزیه شده در محدوده ارتوکلاز قرار می‌گیرد. بلورهای پیروکسن مورد بررسی در زمینه از نوع Ca، Mg، Fe (Quad) هستند و در این بلورها میزان  $Q (Fe^{2+}+Mg+Ca)$  بیش از ۱/۶ و میزان  $J(2Na)$  کمتر از ۰/۱ است. بیشتر بلورهای کالینوپروکسن بررسی شده ترکیب اوژیت نشان می‌دهند.

از ترکیب درشت‌بلورهای بیوتیت می‌توان در تعیین دما، ماهیت ماگمایی و جایگاه زمین‌ساختی استفاده کرد (Abdel-Rahman, 1994). با توجه به قرارگیری بیوتیت‌های مورد مطالعه در محدوده آذرین، از نمودار  $Mg/Mg+Fe$  در برابر  $Ti$  (Henry et al., 2005)، دمای تبلور بیوتیت‌های دایک‌های لامپروفیری بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین می‌شود (شکل ۴- پ) در حالی که در مطالعه کمالی و همکاران (۱۳۹۵) دمای تبلور کانی بیوتیت ۶۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است؛ همچنین ماهیت ماگمای دایک‌های لامپروفیری سونگون و هفت‌چشمه کالک-آلکانل (شکل ۴- ت)، جایگاه ماگماهای کالک‌آلکانل نواحی کوهزایی (شکل ۴- ث) تعیین می‌شود (Abdel-Rahman, 1994).

#### ۷- بررسی ژئوشیمی دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه

نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و خاکی کمیاب دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه در جدول ۴ آورده شده است.

مقایسه تجزیه اکسیدهای عناصر اصلی و کمیاب دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه، با میانگین تجزیه‌های ارائه شده توسط Rock (1991) برای پنج نوع اصلی لامپروفیر و Stempork et al. (2014) برای دایک‌های لامپروفیری کالک‌آلکانل (مینت و کرسانتیت) نشان می‌دهد که تشابه زیادی میان درصد این عناصر با درصد اکسیدهای عناصر اصلی و کمیاب سری کالک‌آلکانل وجود دارد. درصد اکسیدها در دایک لامپروفیری سونگون به شرح ذیل است:  $SiO_2$ : ۵۷ تا ۵۸،  $K_2O/Na_2O$ : ۱/۶۶ تا ۱/۹۸،  $TiO_2$ : ۰/۶۶ تا ۰/۷۵،  $MgO$ : ۳/۰۸ تا ۳/۳۰،  $CaO$ : ۲/۴۰ تا ۴/۶۰،  $P_2O_5$ : ۰/۲۴ تا ۱/۲۳ و میزان درصد این اکسیدها در دایک لامپروفیری هفت‌چشمه  $SiO_2$ : ۴۷ تا ۵۷،  $K_2O/Na_2O$ : ۱/۸۸ تا ۲/۹۱،  $TiO_2$ : ۱/۰۱ تا ۰/۵۴،  $MgO$ : ۴/۳۱ تا ۷/۳۴،  $CaO$ : ۱/۲۵ تا ۳/۶۰ و  $P_2O_5$ : ۰/۴۳ تا ۰/۸۰ در حال تغییر است.

به منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی و فرایندهای سنگ‌شناسی مربوط به دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه از داده‌های عناصر اصلی، فرعی و کمیاب استفاده شد. دایک‌های معادن سونگون در نمودار  $K_2O+Na_2O$  نسبت به  $SiO_2$  (Le Bas et al., 1986) در گستره تراکی‌آندزیت و تراکی‌آندزیت-بازالت (در مطالعه کمالی و همکاران (۱۳۹۵) دایک‌های لامپروفیری سونگون دارای ترکیب آلکالی‌بازالت هستند)، و دایک‌های معادن هفت‌چشمه در گستره تراکیت-تراکی داسیت‌جانمایی می‌شوند (شکل ۵- الف). به منظور کاهش خطای ایجاد شده توسط دگرسانی‌های احتمالی روی لامپروفیرهای مورد مطالعه، استفاده از نمودارهای عناصر کمیاب و نامتحرک (Immobile Elements) که در درجات کم دگرسانی نامتحرک باقی می‌مانند (همچون Zr, Ti, Nb, Y) مفیدتر خواهد بود. از جمله این نمودارها می‌توان به نمودار Winchester and Floyd (1997) اشاره کرد. مطابق با این رده‌بندی، دایک لامپروفیر معادن سونگون و هفت‌چشمه در نمودار  $Zr/TiO_2-SiO_2$  به ترتیب در محدوده آندزیت-تراکی‌آندزیت و داسیت-یوداسیت‌جانمایی شده‌اند (شکل ۵- ب).

#### ۸- رده‌بندی و تعیین سری ماگمایی دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه

برای تعیین نوع و ماهیت نمونه‌های لامپروفیری، از نمودارهای مربوط به اکسیدهای عناصر اصلی، رده‌بندی بر پایه کاتیون‌ها و عناصر کمیاب استفاده شده است. بر پایه

و شاخص‌های مناسبی برای دیگر سنگ‌های موجود در منطقه بودند؛ انتخاب و برای تعیین درصد اکسیدهای عناصر اصلی، فرعی و کمیاب به روش ICP-MS توسط شرکت زرآرما (۲ مورد)، SGS کانادا (۲ مورد) و Naruto ژاپن (۶ نمونه) مورد تجزیه قرار گرفتند. نشانه‌های اختصاری استفاده شده در تصاویر میکروسکوپی برگرفته از (Whitney and Evans, 2010) است.

#### ۵- سنگ‌نگاری

در مطالعه کمالی و همکاران (۱۳۹۵) روی دایک‌های لامپروفیری منطقه سونگون، کانی‌های اصلی دایک شامل بیوتیت، پلاژیوکلاز (۳ تا ۲۰ % حجمی)، ارتوز، آمفیبول (۵ تا ۱۰ % حجمی) و پیروکسن است و بافت پورفیری و میکرولیتیک پورفیری دارد. علت اصلی مطالعه دوباره دایک‌ها معرفی نسل جدیدی از دایک‌های لامپروفیری در منطقه سونگون بود؛ چرا که در مطالعات سنگ‌نگاری و با توجه به کانی‌شناسی آنها دایک‌های مورد مطالعه نیز ماهیت کرسانتیت دارند اما بدون آمفیبول هستند. ویژگی‌های سنگ‌نگاری دایک‌های لامپروفیری معدن سونگون به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

بافت اصلی موجود در آنها پورفیریتیک (شکل ۳- الف)، و بافت‌های فرعی آنها پویی‌کیلیتیک و اوسلار (شکل ۳- ب) است. بافت اوسلار از تجمع پلاژیوکلازها به صورت شعاعی یا در خمیره لامپروفیر رشد کرده است. به باور (Rock 1991) بافت اوسلار با حوضه عدم امتزاج سیلیکات-سیلیکات تحت فشار بالای مواد فرار گسترش می‌یابد. این دایک‌ها از دید کانی‌شناسی شامل درشت‌بلورهای شکل‌دار بیوتیت و پیروکسن (شکل ۳- ب) هستند. از کانی‌های فرعی می‌توان به بلورهای آپاتیت (شکل ۳- پ)، اپیدوت، اسفن و زیرکن اشاره کرد. کلسیت، اورالیت، سریست، زئولیت و کلریت از جمله کانی‌های تجزیه‌ای نمونه‌ها هستند. زمینه سنگ (۰/۶ تا ۰/۱۵ میلی‌متر) نیز بیشتر از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز، کلریت، کلسیت و کانی‌های کدر تشکیل شده است. درصد حجمی کانی‌ها در این دایک‌های لامپروفیری به شرح زیر است: بیوتیت ۳۵ تا ۴۵، پلاژیوکلاز ۵۰ تا ۶۰، آلکالی‌فلدسپار کمتر از ۱۰ و پیروکسن کمتر از ۵ درصد حجمی است.

بافت‌های اصلی موجود در دایک‌های لامپروفیری معادن هفت‌چشمه جریانی (شکل ۳- ت) و هیالومیکرولیتیک پورفیری و بافت‌های فرعی آنها پویی‌کیلیتیک (شکل ۳- ث) و اوسلار (شکل ۳- ج) هستند. این دایک‌ها از دید کانی‌شناسی شامل درشت‌بلورهای شکل‌دار بیوتیت و پیروکسن هستند. از کانی‌های فرعی می‌توان به بلورهای آپاتیت و اسفن اشاره کرد. درشت‌بلورهای بیوتیت به کلریت و کربنات تجزیه شده‌اند و پرشدگی حفرات با کلسیت و کلریت در متن مقاطع دیده می‌شود. بنابراین کلسیت و کلریت از جمله کانی‌های تجزیه‌ای نمونه‌ها هستند. زمینه سنگ (اندازه دانه‌ها بالای ۰/۳ میلی‌متر) نیز بیشتر از میکرولیت‌های فلدسپار قلیایی و به مقدار کمتر پلاژیوکلاز، کلریت، کلسیت و کانی‌های کدر تشکیل شده است. درصد حجمی کانی‌ها در این دایک‌های لامپروفیری به شرح زیر است: بیوتیت ۴۰ تا ۴۵، فلدسپار قلیایی ۴۵ تا ۶۰، پلاژیوکلاز کمتر از ۱۰ و پیروکسن کمتر از ۵ درصد حجمی است.

#### ۶- کانی‌شناسی

به منظور بررسی ترکیب شیمیایی و فرایندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر تشکیل کانی‌های مختلف موجود در دایک‌های لامپروفیری، این کانی‌ها تجزیه شده‌اند (شماره از نتایج به صورت معرف در جدول‌های ۱ تا ۳ ضمیمه شده است). بیوتیت‌ها در واقع سری‌های محلول جامد میان چهار عضو انتهایی هستند. چهار عضو انتهایی شامل آنیت، فلوگوپیت، سیدروفیلیت و استونیت هستند. ترکیب میکاهای لامپروفیرهای بررسی شده در نمودار  $Fe/(Fe+Mg)$  نسبت به  $Al^{IV}$  در گستره فلوگوپیت قرار می‌گیرند. مقدار #Fe در لامپروفیرهای سونگون ۰/۱۴ تا ۰/۴۳ و #Mg آنها ۰/۵۷ تا ۰/۸۶ و در لامپروفیرهای هفت‌چشمه به ترتیب ۰/۳ تا ۰/۳۲ و ۰/۶۸ و

### ۱۱- پتروژنز دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه

ماگمای لامپروفیری اولیه دارای ویژگی‌های زیر است:  $\text{Mg} \# = 65$  تا  $80$ ;  $\text{Sc} = 15$  ppm تا  $30$ ;  $\text{Cr} = 200$  تا  $500$  ppm;  $\text{Co} = 25$  تا  $80$  ppm;  $\text{Ni} = 90$  تا  $700$  ppm (Rock, 1991). بر پایه نتایج تجزیه‌های شیمیایی معادن سونگون ( $\text{Ni} = 111-138$ ,  $\text{Co} = 34-41$ ,  $\text{Cr} = 161-509$ ), و هفت‌چشمه ( $\text{Ni} = 113-120$ ,  $\text{Co} = 18-19$ ,  $\text{Cr} = 143-161$ ),  $\text{Mg} \# = 39-62$ )، نمی‌توان ماهیت دایک‌های معادن سونگون و هفت‌چشمه را مذاب‌های سست‌کره‌ای مستقیم مشتق شده از پلوم‌های گوشته‌ای در نظر گرفت (Rock, 1991) و به احتمال زیاد نشانه‌هایی از آرایش ماگمایی در آنها دیده می‌شود (Stempork et al., 2014).

آنچه که مسلم است در تشکیل بلورهای درشت در لامپروفیرها، شرایط فوق بحرانی و سیال‌های گرمایی دخالت مستقیم داشته‌اند (Rock, 1991). همه درشت‌بلورهای موجود در لامپروفیرها الزاماً فازهای لیکویدوس نیستند و برای رشد بلورهای درشت یک فاز غنی از مواد فرار به همراه مواد اولیه آن کانی الزامی است. یکی از دلایل پذیرش ماگمای هیبرید شده گوناگونی‌های کانی‌شناسی موجود در لامپروفیرهاست. به موازات این مسئله اوتوماتوسوماتیزم و انجماد مایعات غنی از مواد فرار نیز به گوناگونی‌های کانی‌شناسی کمک می‌کند (Rock, 1991). معمولاً بالا بودن مقادیر  $\text{Sc}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Mg}$  در یک ماگما نشان‌دهنده اولیه بودن آن است (Rock, 1991). به منظور ارزیابی این فرضیه مقدار REE (نسبت بالای  $\text{La/Yb}$  با مقدار کم عناصر HREE) دیده شده در لامپروفیرهای معادن سونگون و هفت‌چشمه، با دسته مودال منحنی‌های مذاب اسپینل-لرزلولیت و گارنت‌لرزلولیت مقایسه شده‌اند (Nédli and Tóth, 2007). بخش بالای خط موازی با محور  $\text{Yb}$  (خط صورتی رنگ) ذوب بخشی از گوشته با منشأ گارنت‌لرزلولیت را شامل می‌شود (Chalapaty Rao et al., 2012). با توجه به موقعیت لامپروفیرها در پایین خط و مقدار بالای نسبت  $\text{La/Yb}$ ، منشأ گرفتن ماگمای مادر لامپروفیرها از گوشته اسپینل‌لرزلولیت نفی می‌شود و منشأ آن از گوشته گارنت‌لرزلولیتی مورد تأیید قرار می‌گیرد (شکل ۹-الف). نسبت  $\text{Sm/Yb}$  به درصد گارنت در سنگ منشأ بستگی دارد.  $\text{Yb}$  جزو عناصر خاکی کمیاب سنگین است و در گارنت به صورت عنصری سازگار رفتار می‌کند. با توجه به اینکه گارنت در گوشته به صورت فازی پایدار می‌باشد از این رو می‌توان برای مشخص کردن کانی‌شناسی سنگ منشأ لامپروفیرهای معادن سونگون و هفت‌چشمه از نسبت  $\text{Sm/Yb}$  استفاده کرد (Alici Sen et al., 2004). نسبت  $\text{Sm/Yb}$  دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه برای به دست آوردن سنگ منشأ آنها در شکل ۹-ب در برابر  $\text{Sm}$  و  $\text{La/Yb}$  رسم شد. در شکل ب نمونه‌ها دارای روندی هم‌راستا با منحنی ذوب کلی گارنت‌پریدوتیت هستند؛ از این رو می‌توان سنگ منشأ مذاب سازنده دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه را یک گارنت‌پریدوتیت دانست.

برای تکوین لامپروفیرهای نوع کالک‌آلکانل ماگمای  $\text{M6}$  و  $\text{M7}$  پیشنهادی (Rock, 1991) به عنوان منابع اصلی پیشنهاد شده‌اند که در ماگمای  $\text{M6}$  آرایش مذاب‌های گوشته‌ای و در انواع  $\text{M7}$  آرایش زیاد با مواد پوسته‌ای در نظر گرفته شده است. با توجه سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و نمودارهای شکل ۶ ماگمای با ترکیب  $\text{M7}$  به عنوان ماگمای مواد لامپروفیری کالک‌آلکانل در نظر گرفته می‌شود که در واقع بازتابی از آرایش بسیار ناچیز ماگمای اولیه با مواد پوسته‌ای است (جدول ۵). در مقایسه با نوع  $\text{M6}$ ، نوع  $\text{M7}$  آثار و شواهدی واضح‌تری از دخالت پوسته‌ای را نشان می‌دهد؛ این امر سبب غنی‌تر شدن از  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ، و به‌طور جزئی فقیر شدن از  $\text{MgO}$ ،  $\text{CaO}$  می‌شود (Rock, 1991).

پژوهشگران برای منشأ مذاب‌های  $\text{M7}$  تأثیر رودروی پوسته قاره‌ای + بازالت را مورد بحث قرار داده‌اند. در بسیاری از نواحی، لامپروفیرهای کالک‌آلکانل که از زینولیت‌های پوسته‌ای تهی شده‌اند؛ غنی‌شدگی محسوس‌تری از برخی عناصر را به نمایش می‌گذارند و این امر آرایش پوسته‌ای را در آنها آشکار می‌سازد. در حال حاضر هیچ دلیل مستندی از هیچ محلی برای تأثیر رودروی بازالت + پوسته برای

نمودارهای دوتایی  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  (Foley et al., 1987) و مثلثی  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Bergman, 1987)  $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O-SiO}_2$  (Middlemost, 1991) ،  $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$  (Rogers et al., 1998) دایک‌های مورد مطالعه در معادن سونگون و هفت‌چشمه، در محدوده سنگ‌های لامپروفیری، ساب‌آلکانل و اولتراپتاسیک قرار می‌گیرند (شکل ۶).

### ۹- بررسی نمودارهای عنکبوتی

بررسی نمودار عنکبوتی (Sun and McDonough (1989) معادن سونگون و هفت‌چشمه (شکل ۷) با ۵ لامپروفیر کالک‌آلکانل مشهور دیگر (لامپروفیرهای کالک‌آلکانل (Rock, 1991)، لامپروفیرهای منطقه کروپکا (Stempork et al., 2014) و لامپروفیرهای کرسانتیتی معدن سونگون (کمالی و همکاران، ۱۳۹۵)) که بر پایه کاهش ناسازگاری عناصر LILE و HFSE با گوشته اولیه بهنجار شده‌اند (شکل ۷-الف)؛ تهی‌شدگی مشخصی از عناصر  $\text{Ti}$  و  $\text{Nb}$  نشان می‌دهد. از سوی دیگر دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه غنی‌شدگی از عناصری مانند  $\text{Ba}$ ،  $\text{U}$  و  $\text{Th}$ ،  $\text{K}$ ،  $\text{La}$ ،  $\text{Sr}$  و  $\text{Ni}$  (Saunders et al., 1980; Foley and Wheller, 1990) مقدار  $\text{Cr}$  و  $\text{Ni}$  بالا و  $\text{V/Cr}$  پایین (Stempork et al., 2014) از ویژگی‌های ماگماهای شوشونیتی و کالک‌آلکانل شمرده می‌شود و همچنین نشانه ایجاد از گوشته سنگ‌کره‌ای غنی شده است (Seifert, 2008).

تهی‌شدگی  $\text{Ti-Nb-Ta}$  (TNT) به جدایش کانی‌های تیتان‌دار (مانند اسفن، ایلمنیت) و دخالت سیال‌های فرورانشی در تکوین ماگما نیز مرتبط است. از سوی دیگر برخی از پژوهشگران مانند Edwards et al. (1994) تهی‌شدگی یاد شده را به بالا بودن فوگاسیته اکسیژن مرتبط دانسته‌اند؛ زیرا در شرایطی که فوگاسیته اکسیژن بالا باشد، دمای بیشتری برای ذوب کانی‌های تیتان‌دار نیاز است. فراوانی عناصر LILE که تحرک زیادی دارند؛ نشانگر حضور سیال‌های آب‌دار در محیط تشکیل ماگما و یا دخالت پوسته قاره‌ای در تکوین ماگماست. عنصر  $\text{Y}$ ، به عنوان یک عنصر ناسازگار شبیه HREE رفتار می‌کند و به راحتی در آمفیبول و به مقدار کم در پیروکسن قرار می‌گیرد. تهی‌شدگی این عنصر می‌تواند در اثر پدیده تفریق یا ذوب‌بخشی در ژرفا باشد. بالا بودن فراوانی عناصر LREE و LILE بیانگر متاسوماتیزه شدن گوشته غنی شده است؛ بنابراین گوشته متاسوماتیزه شده می‌تواند به عنوان منبع ماگمایی نمونه‌های لامپروفیری در نظر گرفته شود (Menzies and Wass, 1983).

الگوی عناصر خاکی کمیاب که بر پایه داده‌های (Sun and McDonough (1989) با کندریت‌ها بهنجار شده‌اند (شکل ۷-ب)، غنی‌شدگی مشخصی از LREE نسبت به HREE به نمایش می‌گذارند. ویژگی ماگمای شوشونیت-کالک‌آلکانل، غنی‌شدگی بسیار زیاد این ماگما از LREE و درصد ذوب بخشی بسیار کم ماگماست که اجازه ورود بسیار زیاد عناصر ناسازگار را به ماگمای اولیه داده است. الگوهای کاهش یاد شده به تفریق آمفیبول نسبت داده می‌شود (Altherr et al 2000).؛ زیرا تفریق این کانی سبب افزایش نسبت  $\text{La/Yb}$  در مذاب می‌شود.

### ۱۰- تعیین محیط زمین‌ساختی دایک‌های لامپروفیری

جهت تعیین موقعیت زمین‌ساختی دایک لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه از نمودارهای دومتغیره  $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  (Muller and Groves, 1997) و  $\text{Ba/Nb-La/Nb}$  (Jahn and Zhang, 1984) استفاده شده است (شکل‌های ۸-الف و ب). همچنین بر پایه مطالعات Semiz et al. (2012) و Willson (1989) مقدار  $\text{Nb}$  (۱۰ تا ۴۵) خاص لامپروفیرهای مناطق کوهزایی به شمار می‌روند (شکل ۸-ب)، بر این اساس با توجه به مقدار  $\text{Nb}$  پایین موجود در دایک‌های لامپروفیری این مناطق (هفت‌چشمه ۱۴/۶ تا ۱۷ و سونگون ۱۳/۷ تا ۱۹/۵) و با توجه به نمودارهای شکل ۸، محیط زمین‌ساختی وابسته به کمان ماگمایی برای تشکیل دایک لامپروفیری در نظر گرفته می‌شود.



اصلی هیالومیکرولیتیک پورفیری و جریانی، جزو لامپروفیرهای مینت) با سنی مشابه هستند. دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت‌چشمه به ترتیب در محدوده آندزیت- تراکی آندزیت و داسیت- ریوداست رده‌بندی می‌شوند. در نمودار عنکبوتی، بی‌هنجاری مثبت و مشخص عناصری همچون U, Ba, Rb, Th, K, La و دیده می‌شود. بی‌هنجاری منفی Nb و Ti در دایک‌ها، احتمالاً بیانگر دخالت سیال‌های فرورانشی و یا فرایند آرایش با مواد پوسته‌ای در تکوین آنهاست. بی‌هنجاری منفی Nb (در شماری از نمونه‌ها) شاخص سنگ‌های قاره‌ای است و ممکن است نشانگر مشارکت پوسته در طی فرایندهای ماگمایی باشد. ماگمای نوع M7 به عنوان ماگمای تشکیل دهنده لامپروفیرهای کالک‌آلکالک معرفی شده است. با توجه به مقدار REE دیده شده در لامپروفیرهای منطقه و مقایسه آنها با دسته مودال منحنی‌های مذاب اسپینل و گارنت لرزولیت، منشأ ماگمای مادر لامپروفیرها از نوع گارنت لرزولیت است.

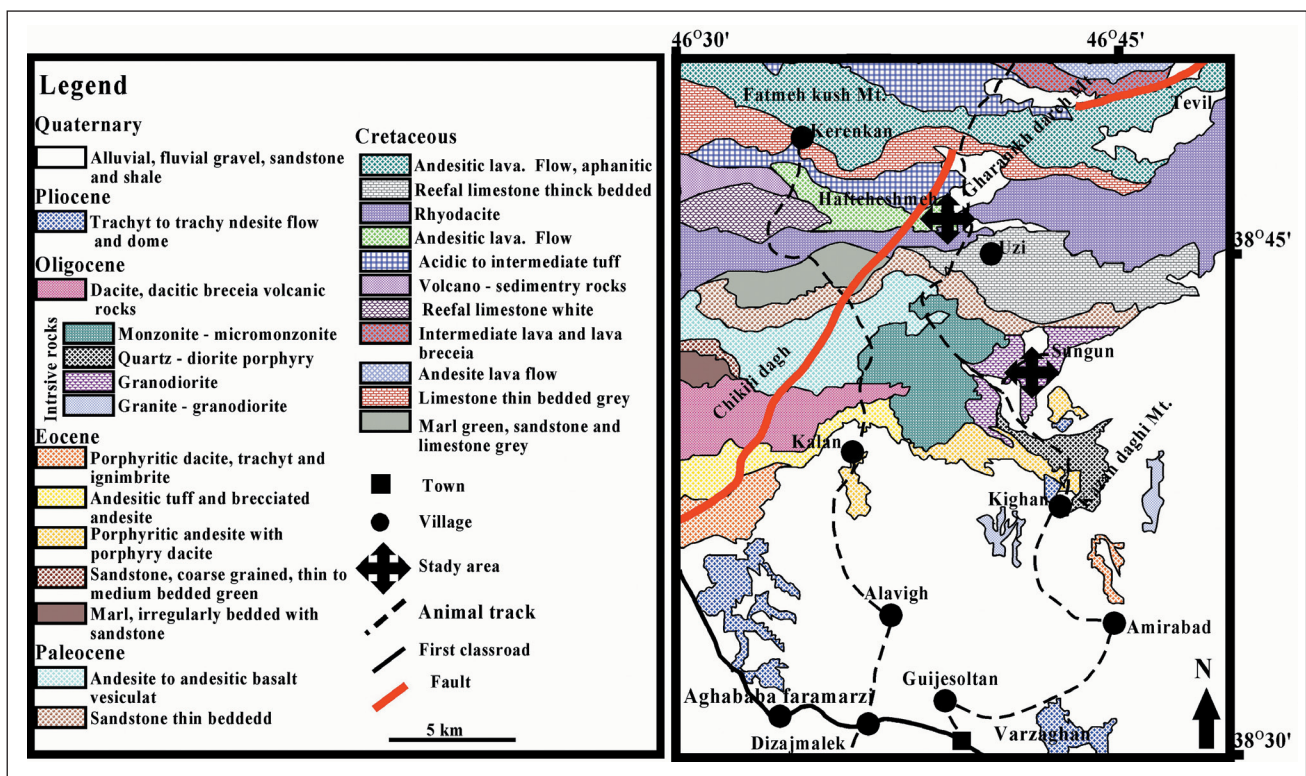
### سپاسگزاری

نگارندگان این مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز به سبب حمایت‌های مالی سپاسگزاری می‌کنند.

مینت‌ها شناخته نشده است. به باور (Rock, 1984) ماگمای نوع M7 از تأثیر رودرویی پوسته- بازالت تولید نمی‌شود؛ بلکه از تأثیر رودرویی پوسته- لامپرویت (M5) تولید می‌شود. این موضوع تا اندازه‌ای بر گزارش (Holmes, 1945) از سنگ‌های لویست- الیون‌دار که توسط هضم زینولیت‌های گرانیتی در لاواهای اوگاندیت تشکیل شده‌اند و همین‌طور بر تغییر طیف ژئوشیمیایی به ترتیب: پوسته → M7 → M6 → M5 تکیه دارد (Rock, 1984).

### ۱۲- نتیجه‌گیری

دایک‌های لامپروفیری مورد مطالعه در این پژوهش در معادن سونگون و هفت‌چشمه (شمال باختر استان آذربایجان شرقی) رخنمون دارند. بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی، لامپروفیرهای مورد نظر در گروه لامپروفیرهای کالک‌آلکالک رده‌بندی می‌شوند. دایک‌های لامپروفیری سونگون (از دید سنگ‌نگاری شامل کانی‌های فلوگوپیت، الیگوکلاز و دیوپسید، بافت اصلی پورفیریتیک، جزو لامپروفیرهای کرسانتیت) با سنی جوان‌تر از الیگوموسن و دایک‌های لامپروفیری هفت‌چشمه (از دید سنگ‌نگاری شامل کانی‌های فلوگوپیت، ارتوکلاز و دیوپسید، بافت‌های

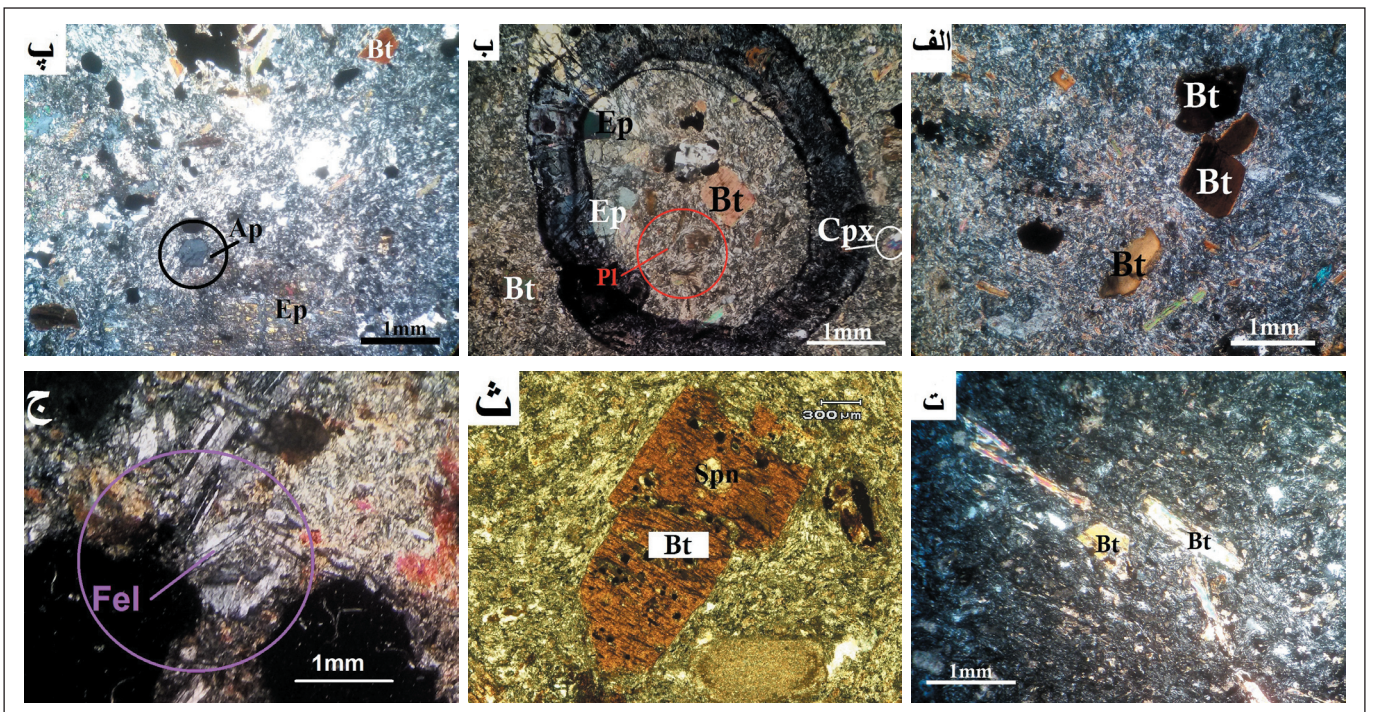


شکل ۱- موقعیت محدوده هفت‌چشمه و سونگون روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و ورزقان، با کمی تغییرات.



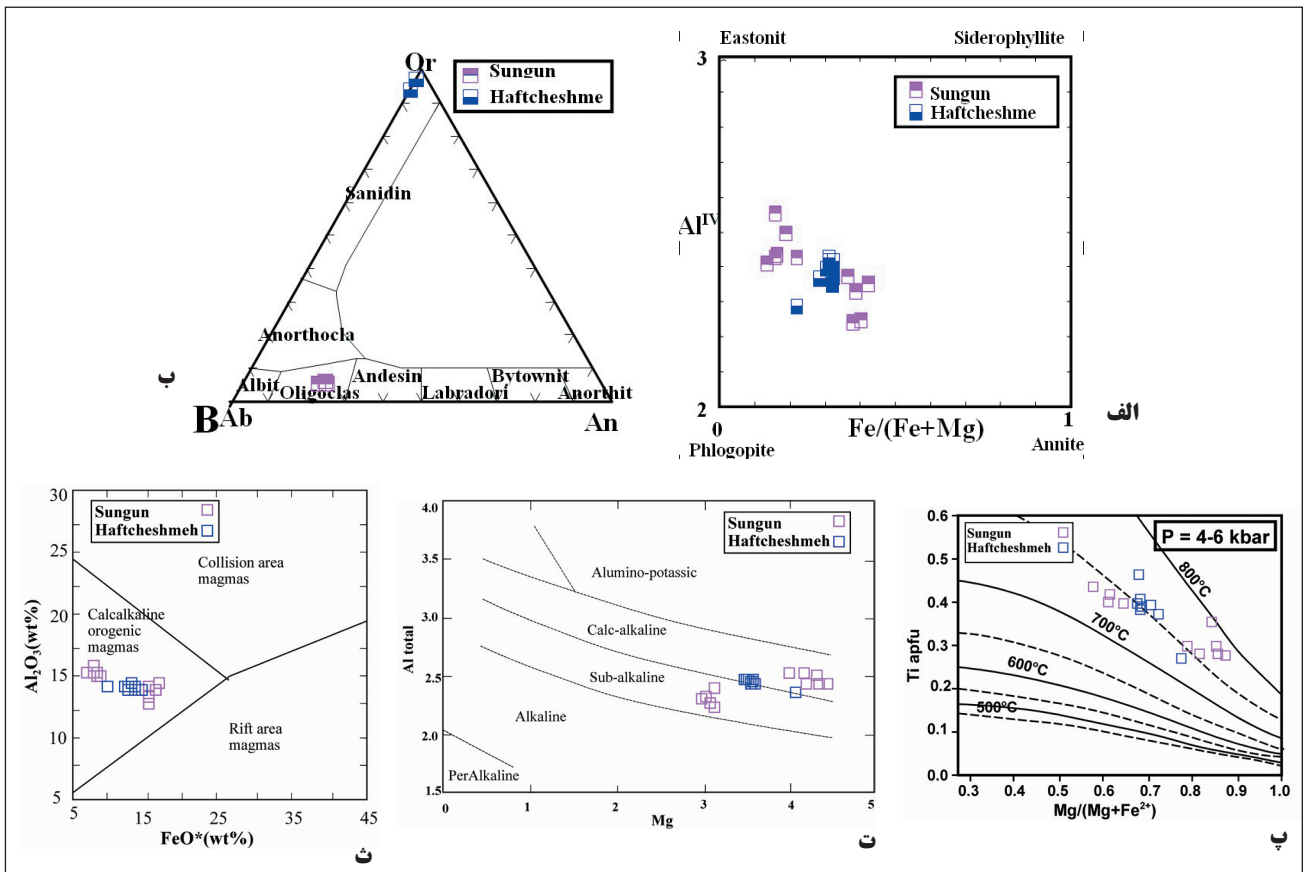


شکل ۲- الف) نمای کلی از معدن سونگون (دید به سوی جنوب باختر)؛ ب) نمایی از معدن هفت چشمه (دید به سوی جنوب).

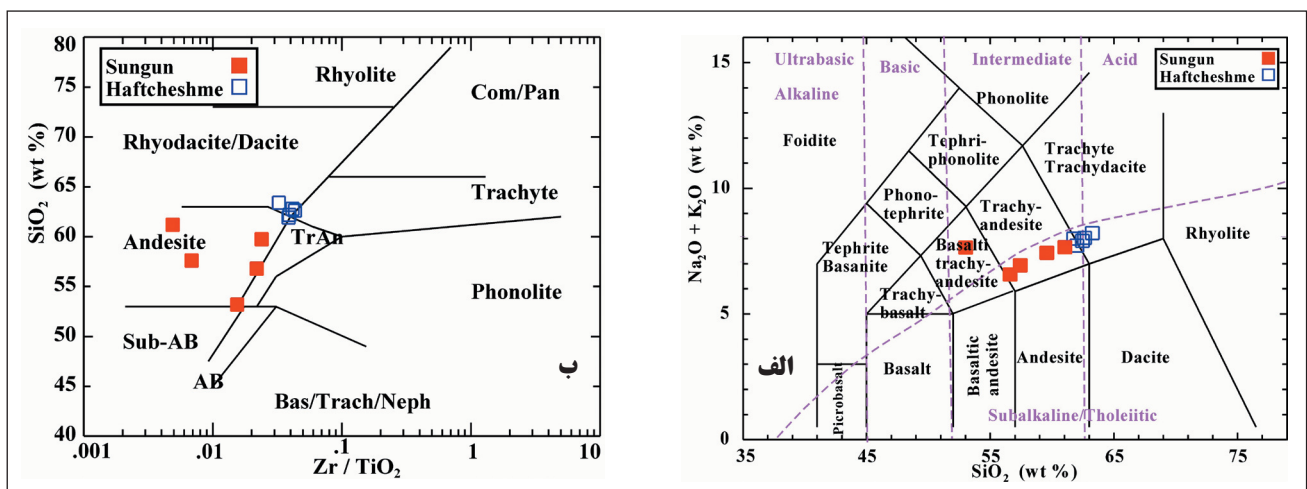


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون (الف تا پ) و هفت چشمه (ت تا ج). الف) درشت‌بلورهای زونه بیوتیت در زمینه‌ای از میکروولیت‌های فلدسپار، بافت پورفیری را در دایک لامپروفیری سونگون ایجاد کرده‌اند (xpl)؛ ب) درشت‌بلور بیوتیت دایک سونگون، پیروکسن ریزبلور و اپیدوت در زمینه‌ای از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز که در برخی بخش‌ها بافت شعاعی دارند و بافت اوسلار (دایره سرخ رنگ) را به نمایش گذاشته‌اند (xpl)؛ پ) مقطع عرضی از منشور سوزنی آپاتیت دایک سونگون در زمینه‌ای از میکروولیت‌های فلدسپار و کانی‌های کدر (xpl)؛ ت) درشت‌بلور بیوتیت موجود در دایک لامپروفیری هفت چشمه در زمینه‌ای از میکروولیت‌های فلدسپار که بیانگر بافت جریان‌ی هستند (xpl)؛ ث) درشت‌بلورهای زونه بیوتیت دارای ادخال‌های از کانی اسفن نمایانگر بافت فرعی پویی کیلیتیک در دایک لامپروفیری هفت چشمه است (ppl)؛ ج) بافت فرعی اوسلار (دایره صورتی رنگ) ناشی از تجمع شعاعی پلاژیوکلازها در خمیره لامپروفیر (xpl). (xpl) = مخفف کلمه نور پلاریزه = Crossed polarized light و ppl = مخفف نور طبیعی = Plane polarized light، Bt = بیوتیت، Ep = اپیدوت، Cpx = کلینوپیروکسن، Pl = پلاژیوکلاز، Spn = آپاتیت، Fel = فلدسپار.

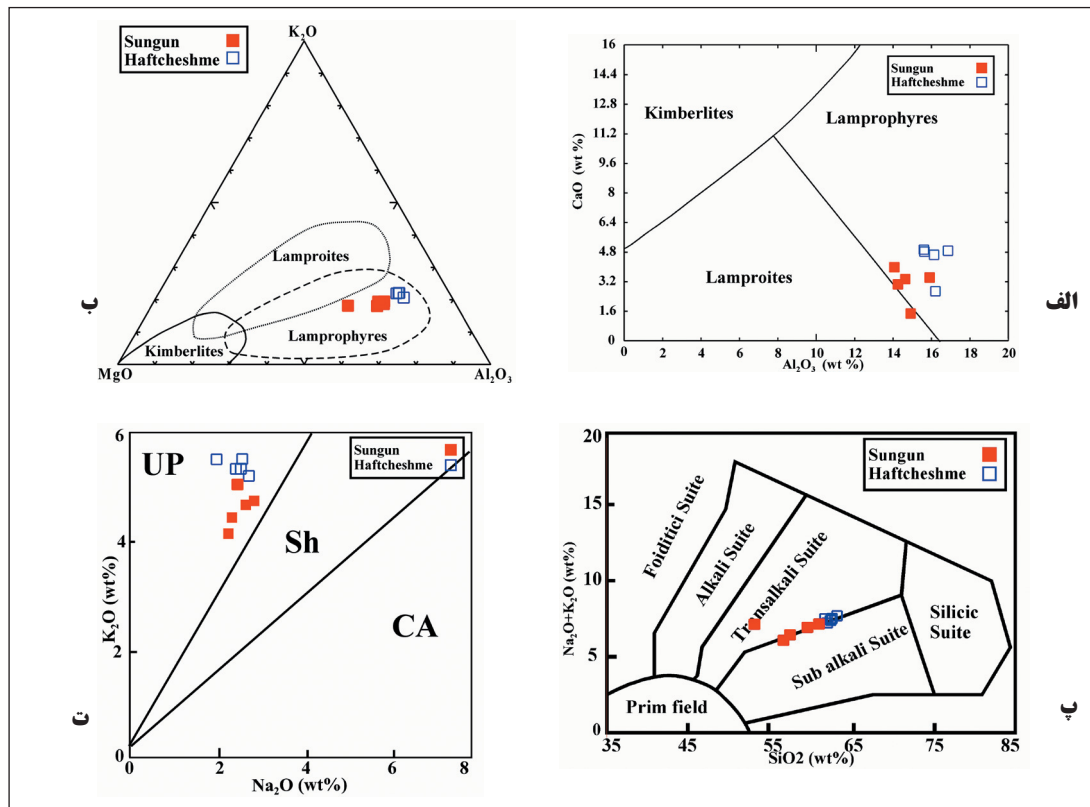




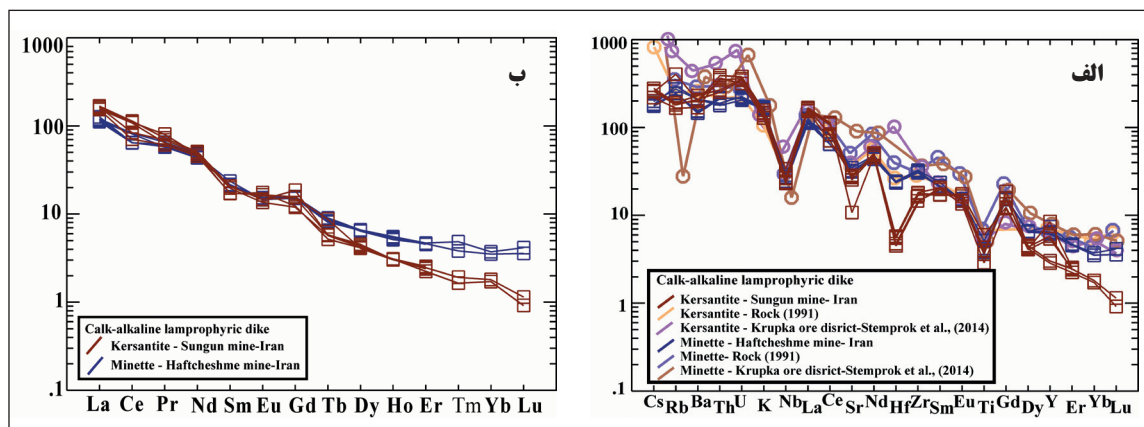
شکل ۴- الف) در نمودار  $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$  در برابر  $Al^{IV}$  ترکیب میکافلوگوئیت تعیین شده است (Deer et al., 1991)؛ ب) نمودار نام‌گذاری فلدسپارهای لامپروفیرهای سونگون و هفت‌چشمه (Deer et al., 1991)؛ پ) نمودار  $Ti$  در برابر  $Mg/(Mg+Fe)$  برای برآورد دمای تبلور بیوتیت‌های لامپروفیرهای سونگون و هفت‌چشمه. ت و ث) نمودارهای تعیین ماهیت ماگمایی و جایگاه زمین‌ساختی لامپروفیرهای مورد مطالعه (Abdel-Rahman, 1994).



شکل ۵- الف) نمودار آلکالی در برابر  $SiO_2$  و موقعیت لامپروفیرهای معادن سونگون و هفت‌چشمه در آن (Le Bas et al., 1986)؛ ب) موقعیت نمونه‌ها در نمودار  $Zr/TiO_2-SiO_2$  (Winchester and Floyd, 1997).

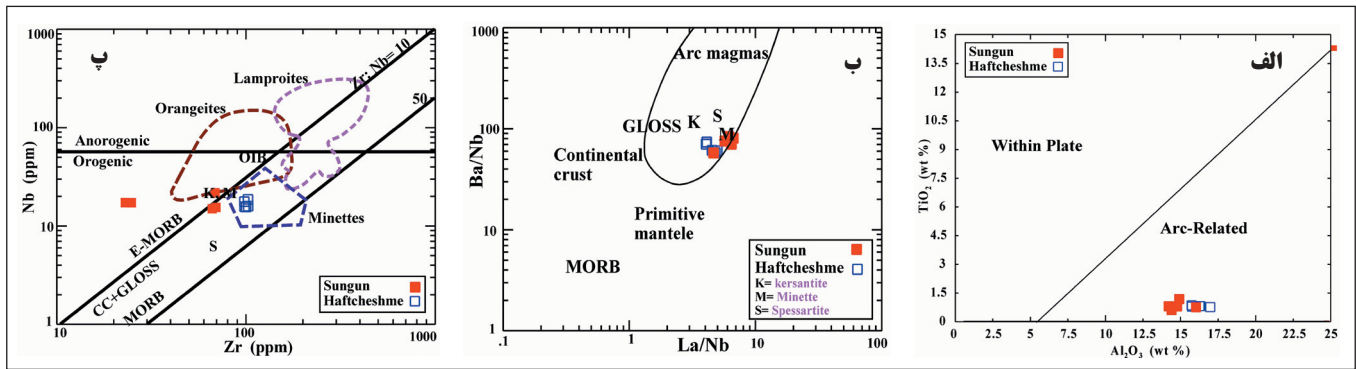


شکل ۶- الف) موقعیت نمونه‌ها در نمودار  $CaO$  در برابر  $Al_2O_3$  (Foley et al., 1987)؛ ب) موقعیت نمونه‌ها در نمودار  $Al_2O_3$ ،  $MgO$ ،  $K_2O$  (Bergman, 1987)؛ پ) موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار  $Na_2O+K_2O - SiO_2$  (Middlemost, 1991)؛ بر پایه این نمودار نمونه‌ها در محدوده ساب‌آلکالن جانمایی شده‌اند؛ ت) نمودار  $Na_2O-K_2O$ ، برای تعیین سری‌های ماگمایی (Rogers et al., 1998)؛ بر پایه این نمودار نمونه‌ها در محدوده اولتراباسیک جانمایی شده‌اند.

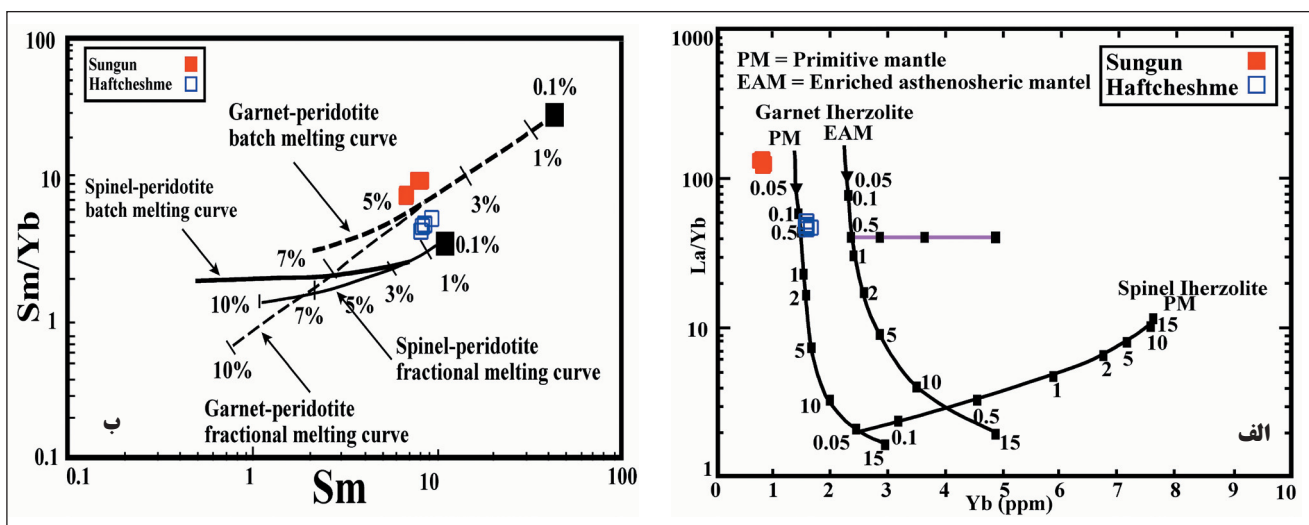


شکل ۷- الف) نمودار عنکبوتی بهنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)؛ ب) الگوهای عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده بر پایه داده‌های (Sun and McDonough, 1989).





شکل ۸- تعیین محیط زمین‌ساختی لامپروفیرها با استفاده از نمودار: الف) دو متغیره  $TiO_2-Al_2O_3$  (Muller and Groves, 1997)؛ ب)  $Ba/Nb-La/Nb$  (Jahn and Zhang, 1984)؛ پ)  $Nb-Zr$  (Semiz et al., 2012).



شکل ۹- الف) موقعیت نمونه‌های لامپروفیری در نمودار  $La/Yb - Yb$  (Nédli and Tóth, 2007)؛ ب) نمودار  $Sm/Yb-Sm$  نشان‌دهنده منحنی‌های ذوب به دست آمده از ذوب جزئی و ذوب با درجه بالا با استفاده از معادلات Shaw (1970) و محاسبات مقادیر  $La, Sm$  و  $Yb$  در اسپینل و گارنت پریدوتیت‌ها برگرفته از McDonough (1990). گفتنی است که از نمودار تکمیل شده توسط Alici Sen et al. (2004) استفاده شده است.

جدول ۱- نتایج تجزیه مایکروپروب و فرمول ساختاری بیوتیت‌های موجود در دایک‌های لامپروفیری معدن سونگون.

Mineral	B10	B11	Bi1	Bi2	Bi3	Bi4	Bi5	Bi6	Bi7	Bi8	Bi9
SiO <sub>2</sub>	38.39	37.69	37.62	37.78	37.51	37.36	37.31	36.83	36.40	38.37	38.67
TiO <sub>2</sub>	2.96	2.73	3.69	3.68	3.66	2.76	2.65	3.79	3.99	3.03	2.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.97	15.16	13.27	14.11	13.20	14.47	15.43	13.61	13.69	14.94	14.84
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.00	0.06	0.02	0.02	0.15	0.22	0.01	0.06	0.02	0.04
FeO*	7.23	8.39	16.86	15.08	15.91	9.47	7.04	15.96	17.40	7.29	6.27
MnO	0.08	0.05	0.18	0.08	0.08	0.04	0.05	0.11	0.14	0.05	0.02
MgO	21.47	20.29	14.04	14.73	14.58	18.87	20.80	14.05	13.20	20.81	22.09
CaO	0.03	0.05	0.00	0.02	0.00	0.06	0.02	0.00	0.01	0.04	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.26	0.24	0.15	0.07	0.16	0.05	0.17	0.10	0.21	0.16	0.28
K <sub>2</sub> O	10.10	9.85	10.26	9.83	10.40	10.51	9.73	10.18	9.82	10.51	10.03
Total	95.52	94.45	96.12	95.40	95.51	93.74	93.40	94.64	94.93	95.21	94.87
Structural formula based on the 22 Oxygens											
Si	5.283	5.271	5.404	5.395	5.404	5.318	5.242	5.355	5.311	5.308	5.326
Al <sup>IV</sup>	2.426	2.496	2.246	2.372	2.239	2.425	2.553	2.330	2.353	2.434	2.408
Al <sup>VI</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.306	0.287	0.398	0.395	0.396	0.295	0.280	0.415	0.438	0.315	0.275

ادامه جدول ۱

Mineral	B10	B11	Bi1	Bi2	Bi3	Bi4	Bi5	Bi6	Bi7	Bi8	Bi9
Fe <sup>3+</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe <sup>2+</sup>	0.832	0.981	2.026	1.801	1.917	1.127	0.827	1.941	2.124	0.843	0.722
Cr	0.005	0.000	0.007	0.002	0.002	0.017	0.024	0.001	0.007	0.002	0.004
Mn	0.009	0.006	0.022	0.009	0.009	0.005	0.005	0.014	0.017	0.006	0.002
Mg	4.405	4.230	3.006	3.136	3.131	4.004	4.356	3.046	2.871	4.292	4.536
Ca	0.004	0.008	0.000	0.003	0.000	0.009	0.003	0.000	0.002	0.006	0.000
Na	0.070	0.064	0.041	0.018	0.045	0.014	0.047	0.028	0.060	0.042	0.074
K	1.773	1.757	1.881	1.790	1.912	1.909	1.745	1.889	1.829	1.854	1.762
Cations	15.113	15.100	15.031	14.921	15.055	15.123	15.082	15.019	15.012	15.102	15.109
#Fe	0.16	0.19	0.4	0.36	0.38	0.22	0.16	0.39	0.43	0.16	0.14
#Mg	0.84	0.81	0.6	0.64	0.62	0.78	0.84	0.61	0.57	0.84	0.86

جدول ۲- نتایج تجزیه مایکروپروب و فرمول ساختاری بیوتیت‌های موجود در دایک‌های لامپروفیری معدن هفت‌چشمه.

Mineral	Bt1	Bt2	Bt3	Bt4	Bt5	Bt6	Bt7	Bt8	Bt9
SiO <sub>2</sub>	36.48	37.18	37.60	36.84	37.16	38.62	37.43	37.12	36.89
TiO <sub>2</sub>	4.27	3.83	3.55	3.66	3.72	2.38	3.50	3.77	3.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.85	14.12	14.52	14.22	14.29	13.88	14.18	14.50	14.47
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.05	0.34	0.00	0.00	0.28	0.02	0.00	0.01
FeO*	13.80	13.72	13.78	12.99	13.83	9.93	12.27	13.27	13.53
MnO	0.15	0.11	0.11	0.12	0.09	0.07	0.10	0.07	0.16
MgO	16.32	16.00	16.17	16.77	16.31	19.64	17.36	16.33	16.63
CaO	0.05	0.03	0.02	0.03	0.00	0.04	0.02	0.03	0.02
Na <sub>2</sub> O	0.48	0.56	0.48	0.60	0.59	0.59	0.49	0.58	0.61
K <sub>2</sub> O	8.63	9.75	9.26	9.50	9.80	9.56	9.89	9.50	9.44
Total	94.03	95.36	95.82	94.71	95.79	94.98	95.26	95.16	95.60
<b>Structural formula based on the 22 Oxygens</b>									
Si	5.247	5.298	5.309	5.265	5.274	5.405	5.303	5.278	5.234
Al <sup>IV</sup>	2.349	2.370	2.415	2.393	2.388	2.288	2.365	2.428	2.417
Al <sup>VI</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.463	0.411	0.377	0.393	0.397	0.251	0.373	0.403	0.411
·Fe <sup>3</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
·Fe <sup>2</sup>	1.663	1.635	1.628	1.552	1.642	1.162	1.454	1.578	1.605
Cr	0.000	0.005	0.038	0.000	0.000	0.031	0.002	0.000	0.001
Mn	0.018	0.013	0.013	0.014	0.011	0.008	0.012	0.008	0.019
Mg	3.504	3.399	3.403	3.573	3.452	4.098	3.666	3.461	3.516
Ca	0.008	0.005	0.003	0.004	0.000	0.006	0.003	0.005	0.003
Na	0.133	0.155	0.130	0.165	0.163	0.160	0.133	0.160	0.168
K	1.586	1.773	1.667	1.732	1.775	1.707	1.787	1.724	1.707
Cations	14.971	15.064	14.983	15.091	15.102	15.116	15.098	15.045	15.081
#Fe	0.32	0.32	0.32	0.30	0.32	0.22	0.28	0.31	0.31
#Mg	0.68	0.68	0.68	0.70	0.68	0.78	0.72	0.69	0.69

جدول ۳- نتایج تجزیه مایکروپروب و فرمول ساختاری دیگر کانی‌ها (فلدسپار و پیروکسن) لامپروفیرهای معادن سونگون و هفت چشمه.

Sample	Kfel-haf	Kfel-haf	Pl-Sun	Pl-Sun	Pl-Sun	Px-Sun	Px-haf
SiO <sub>2</sub>	64.38	64.76	61.87	62.36	61.91	51.32	52.77
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.80	0.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.96	17.28	23.06	22.69	22.83	3.08	0.53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
FeO	0.19	0.30	0.18	0.16	0.12	9.68	10.53
MnO	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.30	0.33
MgO	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	14.82	14.79
CaO	0.07	0.07	4.71	4.36	4.50	20.13	20.35
Na <sub>2</sub> O	0.67	0.28	8.26	8.70	8.10	0.47	0.38
K <sub>2</sub> O	16.81	16.84	0.93	0.94	1.06	0.00	0.02
Total	100.09	99.61	99.02	99.23	98.51	100.64	100.04
#O	8	8	8	8	8	6	6
Si	2.992	3.021	2.776	2.792	2.788	1.892	1.966
Ti	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.022	0.009
Al	0.983	0.949	1.218	1.196	1.211	Al <sup>IV</sup> =0.108	Al <sup>IV</sup> =0.023
						Al <sup>IV</sup> =0.026	0.000
Fe <sup>3+</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.299	0.328
Fe <sup>2+</sup>	0.007	0.012	0.007	0.006	0.004	0.000	0.000
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.009	0.010
Mg	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.815	0.821
Ca	0.003	0.003	0.226	0.209	0.217	0.795	0.812
Na	0.061	0.026	0.718	0.755	0.707	0.034	0.028
K	0.997	1.002	0.053	0.054	0.061	0.000	0.001
Cations	5.043	5.015	4.999	5.013	4.988	4.000	3.999
Ab	5.70	2.50	72.00	74.20	71.80	Wo= 41.46	41.19
An	0.30	0.30	22.70	20.50	22.00	En= 41.46	41.64
Or	94.00	97.20	5.30	5.30	6.20	Fs= 16.06	17.17

جدول ۴- داده‌های مربوط به تجزیه شیمیایی دایک‌های لامپروفیری معادن سونگون و هفت چشمه (عناصر اصلی بر حسب wt% و عناصر کمیاب بر حسب ppm).

Sample	haf1	haf2	haf3	hafsgs	haflamp5	sun1	sun2	sun3	sunsgs	sunlamp2
SiO <sub>2</sub> (wt%)	57.86	57.93	58.23	57.80	58.51	51.98	55.38	47.55	57.01	56.62
TiO <sub>2</sub>	0.68	0.71	0.75	0.69	0.66	0.69	0.69	1.01	0.54	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.38	14.97	14.61	14.71	15.65	12.80	13.50	13.14	14.03	14.65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.14	1.19	1.23	1.24	0.79	2.45	1.95	2.46	3.47	1.43
FeO	3.14	3.26	3.40	3.41	2.13	9.01	6.15	9.02	8.38	3.93
MnO	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03
MgO	3.08	3.21	3.30	3.10	3.09	4.56	4.62	7.34	4.31	4.59
CaO	4.42	4.30	4.60	2.40	4.50	3.60	3.05	1.25	2.97	3.12
Na <sub>2</sub> O	2.32	2.00	2.45	2.40	2.57	2.17	2.50	2.27	2.41	2.64
K <sub>2</sub> O	4.92	5.13	5.01	5.02	4.84	3.78	4.32	4.50	3.38	4.38
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.38	0.39	0.38	0.30	0.35	0.47	0.50	0.80	0.43	0.49
LOI	7.71	6.75	6.08	8.73	6.75	8.36	7.12	9.81	3.16	7.36
Total	100.11	99.92	100.13	99.88	99.93	99.90	99.81	99.17	101.12	99.89
# Mg	58.77	58.82	58.53	56.90	67.70	44.07	53.04	55.87	39.91	62.91
Cr (ppm)	150	150	161	154	143	180	193	509	198	161
Ni	150	113	115	120	117	134	111	138	130	124
Co	19	19	18	19	19	40	39	41	36	36
Sc	9	9	8	10	9	14	12	17	8	10

Sample	haf1	haf2	haf3	hafsgs	haflamp5	sun1	sun2	sun3	sungsgs	sunlamp2
Rb	126	126	127	150	141	85	98	200	99	98
Cs	1.19	1.18	1.15	1.17	1.30	1.40	1.70	1.60	1.80	1.80
Ba	891	850	899	1200	1220	964	1158	1125	1290	1340
Sr	548	570	573	600	565	496	482	181	475	471
Ta	0.98	0.95	1.10	1.10	0.96	0.65	0.80	0.60	0.90	0.80
Nb	14.7	14.6	14.7	17.0	16.5	13.7	14.3	19.5	17.0	16.0
Hf	6.32	6.20	6.18	6.21	6.15	1.42	1.48	1.45	1.24	1.23
Zr	295	278	290	290	278	151	165	156	37	31
Ti	4077	4256	4496	5336	4010	4137	4137	6055	3237	3800
Y	27	23	24	23	22	19	21	30	11	11
Th	17.40	17.40	18.00	15.10	14.60	29.50	28.50	30.60	22.01	21.80
U	4.30	4.50	4.40	4.50	4.20	6.35	7.30	7.45	7.50	7.30
La	73.60	70.10	66.50	69.00	67.90	88.40	95.50	90.80	96.90	97.80
Ce	95.30	95.30	96.10	120.00	121.00	102.60	123.90	155.60	170.00	167.00
Pr	13.50	14.50	14.00	15.00	13.50	14.00	16.10	18.10	16.00	17.00
Nd	51.50	52.50	51.00	53.00	48.80	50.40	55.60	51.60	57.00	57.20
Sm	8.70	7.80	8.10	7.50	8.04	6.30	7.60	6.10	7.80	7.68
Eu	2.02	2.15	2.05	2.11	2.15	2.26	2.05	2.35	2.01	2.03
Gd	7.45	7.70	7.75	7.65	7.61	7.65	7.61	5.90	6.31	9.17
Tb	0.73	0.80	0.75	0.80	0.76	0.78	0.53	0.45	0.55	0.52
Dy	4.02	3.95	4.05	3.98	4.02	2.48	2.69	2.45	2.75	2.78
Ho	0.70	0.71	0.75	0.75	0.74	0.41	0.42	0.41	0.45	0.42
Er	1.85	1.86	1.84	1.85	1.86	0.97	0.96	0.98	0.96	0.98
Tm	0.24	0.22	0.22	0.30	0.24	0.11	0.10	0.11	0.11	0.12
Yb	1.45	1.46	1.48	1.50	1.45	0.74	0.74	0.74	0.75	0.74
Lu	0.23	0.23	0.23	0.25	0.22	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07

جدول ۵- انواع تیپ‌های ماگمایی لامپروفیرها (Rock, 1991).

Type magmatic	M1	M2	M3 - M4	M5	M6	M7
Lamprophyre name	Ultramafic and Alkaline lamprophyres	Ultramafic lamprophyres	Kimberlites and Olivine lamproites	Lamproites lamprophyres	Fenitic and Alkaline	Calc Alkaline lamprophyres

### کتابنگاری

- آزرم، ف. و میرزایی نوبری، ر.، ۱۳۷۲- گزارش اکتشاف معدنی، اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک ورقه ۱/۸۰۰۰۰۰ و رزقان (شمال غرب اهر).
- باباخانی، ع.، لسکوویه، ر. و ریو، ل.، ۱۳۵۵- نقشه زمین‌شناسی اهر ۱/۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حسن پور، ش.، رسا، ا.، حیدری، م.، متکان، ع. ا. و موید، م.، ۱۳۸۹- زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی در ذخیره مس- مولیدن پورفیری هفت چشمه، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ش. ۱۵، صص. ۱۵ تا ۲۸.
- حسین‌زاده، م.، ر.، موید، م.، مغفوری، س.، علیپور، س. و حاج علیلو، ب.، ۱۳۹۴- زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی و مطالعات میانبارهای سیال در کنسار بالوجه؛ نمونه‌ای از کنسارهای مس- مولیدن پورفیری در زون ماگمایی ارسباران، فصلنامه علوم زمین سازمان زمین‌شناسی کشور، ش. ۹۵، صص. ۲۹۷ تا ۳۰۸.
- عادلی، ز.، ۱۳۹۱- کانی‌شناسی، ژئوشیمی، نحوه تشکیل و مدلسازی کنسار هفت‌چشمه (آذربایجان شرقی)، رساله دکترا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۲۶۵ ص.
- علوی، غ.، ۱۳۹۲- بررسی کنسارهای اسکارنی حاشیه باتولیت شیورداغ و مقایسه آنها با اسکارن‌های پورفیری سونگون، رساله دکترا، دانشگاه تبریز، ۴۰۰ ص.
- علوی، غ.، حسین‌زاده، م.، ر. و موید، م.، ۱۳۹۲- سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی توده پورفیری کنسار مس سونگون و دایک‌های پس از کانی‌سازی، با نگرشی بر اسکارن همراه (شمال و رزقان- آذربایجان شرقی)، مجله پترولوژی اصفهان، ش. ۱۷، صص. ۱۷ تا ۳۲.
- علیپور، س.، ۱۳۹۲- بررسی دگرسانی و کانی‌سازی در منطقه هفت‌چشمه با نگرشی خاص بر ژنز مولیدنیت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه پیام نور تبریز، ۱۶۷ ص.
- قربانی، م.، ۱۳۸۴- دیاچهای بر زمین‌شناسی اقتصادی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۲۳۷ ص.



- کمالی، ا.، ۱۳۹۵- پترولوژی و مینرال شیمی دایک‌های بعد کانی‌سازی کانسار مس-مولیبدن پورفیری سونگون (شمال ورزقان، استان آذربایجان شرقی)، رساله دکترا، دانشگاه تبریز، ۴۰۰ ص.
- کمالی، ا.، مویده، م.، عامل، ن. و حسین‌زاده، ق.، ۱۳۹۵- مینرال‌شیمی و ژئوشیمی دایک‌های لامپروفیری کانسار مولیبدن-مس پورفیری سونگون ورزقان (شمال غرب ایران)، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، شماره ۱۰۲، ۷۳ تا ۹۰.
- مؤذن، م.، مویده، م. و حسین‌زاده، ق.، ۱۳۸۲- پتروگرافی و پترولوژی دایک لامپروفیری قخلار (غرب مرنده)، مجموعه مقالات هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه اصفهان. صص. ۵۶۶ تا ۵۷۶.
- مویده، م.، ۱۳۸۸- گزارش اکتشافات نیمه تفصیلی و تفصیلی، کانسار پورفیری هفت‌چشمه ایران، ۴۳۰ ص.
- مویده، م.، ۱۳۸۳- گزارش تنوعات سنگی کانسار مس پورفیری سونگون (نسخه ۱)، مهندسین مشاور پارس اولنگ.
- مهرپرتو، م. و امینی‌فضل، ع.، ۱۳۷۱- نقشه زمین‌شناسی ورزقان ۱/۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نوری، ر.، اکبریپور، ا. و فرجندی، ف.، ۱۳۸۰- برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ ورزقان، ۱۳۸۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
- وثوق‌زاده، م. و تدین اسلامی، ع.، ۱۳۵۳- گزارش اکتشافی و ژئوشیمیایی تفصیلی و نیمه تفصیلی مناطق شمال‌غرب اهر: بورملک، کيقال، سونگون و بالوجا، شرکت ملی صنایع مس ایران.

## References

- Abdel-Rahman A, M. 1994- Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas, *Journal of Petrology* 35: 525 – 541.
- Alici Sen, p., Abidin, T. and Alain, G., 2004- Petrogenetic modelling of Quaternary post-collisional volcanism, a case study of central and eastern Anatolia, *Geology Magazine* 141: 81-98.
- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., Langer, C. and Kreuzer, H. 2000- High- potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides, northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany), *Lithos* 50: 51-73.
- Bergman, S. C., 1987- Lamproites and other potassium-rich igneous rocks: a review of their occurrence, mineralogy and geochemistry, In: *Fitton and Upton* 103-109.
- Calagari, A. A., 1997- Geochemical, stable isotope, noble gas and fluid inclusion studies of mineralization and alteration at Sungun porphyry copper deposit, East - Azarbaijan, Iran: Implication for genesis. PH.D Thesis, Department of Earth Sciences, Manchester university, Manchester, UK, 537.
- Chalapathi Rao, N. V., Dharma Rao, C. V. and Das, S. 2012- Petrogenesis of lamprophyres from - Chhota Udepur area, Narmada rift zone, and its relation to Deccan magmatism, *Journal of Asian Earth Sciences* 45: 24–39.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J., 1991- *An Introduction to the rock – forming minerals*, Longman, London.
- Droop, G. T. R., 1987- A general equation for estimating Fe<sup>+3</sup> concentrations. in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine* 51: 431-435.
- Edwards, C. M. H., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F., Morrid, 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 Journal of Petrology* 35: 1557-1595.
- Foley, S. F. and Wheller, G. E., 1990- Parallels in the origin of the geochemical signature of island arc volcanic rocks and continental potassic igneous rocks, The role of titanites: *Chemical Geology* 85: 1-18.
- Foley, S. F., Venturelli, G., Green, D. H. and Toscani, L., 1987- The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models, *Earth Science Direct* 24: 81-134.
- Gumbel, C. W. V., 1874- *Die palaeolithischen eruptivgesteine des fichtelgebirges*. Franz, Munchen.
- Henry, D. J., Guidotti, C. V. and Thomson, J. A., 2005- The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotite: Implications for Geothermometry and Ti-substitution Mechanisms, *American Mineralogist* 90: 316-328.
- Hezarkhani, A., 1997- Physicochemical controls on Alteration and copper mineralization in the Sungun Porphyry copper deposit, Iran, PH. D Thesis, McGill university, Canada, 281.
- Holmes, A., 1945- Leucitized granite xenoliths from the potash-rich lavas of Bunyaruguru, SW Uganda, *American Journal of Science*, 243A: 313-332.
- Jahn, B. M. and Zhang, Z. Q., 1984- Archean granulite gneisses from eastern Hebei province, China: rare earth geochemistry and tectonic implication. *Contrib Mineral Petrol* 85: 224–243
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986- A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram, *Journal of Petrology* 27: 745-750.
- McDonough, W. F., 1990- Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle: *Earth and Planetary Science letters* 101: 1-18.
- Mehrpertou, M., 1993- Contributions to the geology, geochemistry, or genesis and fluid inclusion in investigations on sungun Cu - Mo porphyry deposit, NW of Iran, PH. D dissertation, university of Humburg, Germany, 245.
- Menzies, M. A. and Wass, S. Y., 1983- CO<sub>2</sub> and LREE-rich mantle below eastern Australia: a REE and isotopic study of alkaline magmas and apatite-rich mantle xenoliths from the southern highlands province, Australia, *Earth and Planetary Science Letters* 65: 287-302.

- Middlemost, E. A. K., 1991- The Canobolas complex N.S.W., an alkaline shield volcano, *The Australian Journal of Earth Sciences* 28: 33-49.
- Moayyed, M., Moazzen, M., Calagari, A. A., Jahangiri, A. and Modjarrad, M., 2008- Geochemistry and petrogenesis of lamprophyric dykes and the associated rocks from Eslamy peninsula, NW Iran: Implications for deep-mantle metasomatism, *Chemie der Erde/ Geochemistry* 68: 141-154.
- Muller, D. and Groves, D. I., 1997- *Potassic Igneous Rocks and Associated Gold- Copper Mineralization*. Sec. Updated. Springer, Berlin. 242 pp.
- Nédli, Zs. and Tóth, T. M., 2007- Origin and geodynamic significance of Upper Cretaceous lamprophyres from the Villány Mts (Hungary), *Mineralogy and Petrology* 90: 73-107.
- Rock, N. M. S., 1984- Nature and origin of calc-alkaline Lamprophyres: minettes, vogesites, kersantites and spessartites, *Tr. R. Soc. Edinburgh: Earth Science Direct* 74: 193-227.
- Rock, N. M. S., 1991- *Lamprophyres*, Blackie, Glasgow 285.
- Rogers, N. W., James, D., Kelley, S. P. and Muller, M., 1998- The generation of potassic lavas from the eastern Virunga province, Rwanda, *Journal of Petrology* 39: 1223 - 1247.
- Saunders, A. D., Tarncy, J. and Weaver, S. D., 1980- Transverse geochemical variations across the Antarctic peninsula, implications for the genesis of calc-alkaline magmas: *Earth and Planetary Science Letters* 6: 344-360.
- Seifert, T., 2008- *Metallogeny and Petrogenesis of lamprophyres in the Mid-European Variscides*. IOS Millpress, Amsterdam 1-303.
- Semiz, B., Çoban, H., Roden, M. F., Özpınar, Y., Flower, M. F. J. and McGregor, H., 2012- Mineral composition in cognate inclusions in Late Miocene-Early Pliocene potassic lamprophyres with affinities to lamproites from the Denizli region, Western Anatolia, Turkey: implications for uppermost mantle processes in a back-arc setting, *Lithos* 134(135): 253-272.
- Shaw, D. M., 1970- Trace element fractionation during anatexis: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 34: 137-243.
- Stemprok, M. and Seifert, Th., 2011- An overview of the association between lamprophyric intrusions and rare-metal mineralization, *Mineralogia* 42(2-3): 121-162.
- Stemprok, M., Dolejš, D. and Holbb, F. V., 2014- Late Variscan calc-alkaline lamprophyres in the Krupka ore district, Eastern Krušné hory/ Erzgebirge: their relationship to Sn-W mineralization, *Journal of Geosciences* 59, XX-XX DOI: 10.3190/jgeosci.156Original paper.
- Streckeisen, A., 1979- Classification and nomenclature of volcanic rocks, Lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks, *Geology* 7: 331-335.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F., 1989- Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts, implications for mantle compositions and processes, In, A. D. Saunders and M. J. Norry (editors), *Magmatism in the ocean basins: Geological Society of London* 313-345.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Wilson, M., 1989- *Igneous Petrogenesis. A Global Tectonic Approach*. Chapman and Hall, London 1-466.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A., 1997- Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, *Chemical Geology* 20: 325-342.
- Woolley, A. R., Bergman, S. C., Edgar, A. D., Le Bas, M. J., Mitchell, R. H., Rock, N. M. S., and Scott-Smith, B. H., 1996- Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites and the kalsilitemellitic and leucitic rocks. *Canadian Mineralogist* 34: 175-186.

# Mineral chemistry and petrogenesis of calc-alkaline lamprophyric dikes at Sungun and Haftcheshme mines (Alborz- Azarbaijan zone, Iran)

Z. Gharehchahi<sup>1</sup>, M. Moayyed<sup>2\*</sup>, J. Ahmadiyan<sup>3</sup> and M. Murata<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Professor, Natural Science Education, Naruto University of Education, Tokushima, Japan

Received: 2016 August 30

Accepted: 2017 January 23

## Abstract

Sungun and Haftcheshme mines are located in the Arasbaran volcano-plutonic complex at the North West of Azarbaijan province. Lamprophyric dikes of Sungun with ages younger than Oligo-Miocene contain biotite, plagioclase and pyroxene with porphyritic texture and are classified as calc-alkaline and kersantite. They are intruded into the Sungun quartz - monzonite. Lamprophyric dikes of Haftcheshme with ages younger than Oligo-Miocene include minerals such as biotite, alkali feldspar and pyroxene. The main textures are microlithic porphyry and flow texture. These calc-alkaline lamprophyres are classified as minette, intruding the Haftcheshme quartz - diorite. The behavior of trace elements studied by the means of spider diagrams show low enrichment of LREE relative to MREE and HREE. Investigations on geochemical characteristics of the studied lamprophyres show that the lamprophyric rocks are of calc-alkaline type, formed in a magmatic arc tectonic setting. These lamprophyres are generated from low degree partial melting of a garnet lherzolite source.

**Keywords:** Calc-alkaline Lamprophyre, Kersantite, Minette, East Azarbaijan province, Sungun, Haftcheshme.

For Persian Version see pages 47 to 60

\*Corresponding author: M. Moayyed; E-mail: moayyed@tabrizu.ac.ir