

پتروولوژی و مطالعه جایگاه تکتونوماگمایی توده‌های گرانیتوئیدی ماهور جنوب غرب نهبندان

روح‌اله میری بیدختی، محمدحسن کریم‌پور و سید احمد مظاهری*
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

محدوده ماهور در ۱۳۵ کیلومتری جنوب غرب نهبندان و در بخش مرکزی بلوک لوت واقع شده است. این محدوده شامل: سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری با سن ائوسن است که توده‌های نفوذی با ترکیب عمدتاً دیوریتی به صورت استوک و دایک در آن نفوذ کرده‌اند. بر اساس رده‌بندی شیمیایی، واحدهای نفوذی منطقه شامل: گابرو دیوریت، دیوریت، مونزودیوریت و تونالیت است. این گرانیتوئیدها کالک‌آلکالن پتاسیم بالا و با ماهیت متاآلومینوس هستند. پذیرفتاری مغناطیسی (به طور میانگین $SI \times 10^{-4}$ ۱۴۸۵)، ترکیب کانی‌شناسی و ویژگی‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد گرانیتوئیدهای ماهور به سری مگنتیت (نوع I) تعلق دارد. غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و غنی‌شدگی LILE نسبت به HFSE و همچنین، بی‌هنجاری Nb، Ta و Ti شواهد مهمی است که نشان می‌دهد گرانیتوئیدهای ماهور در کمربند ماگمایی پهنه فروانش تشکیل شده‌اند. عنصر Eu ناهنجاری منفی نشان می‌دهد. و مقدار Eu/Eu^* از ۰/۶۵ تا ۰/۸۸ در تغییر است. ناهنجاری منفی Eu شاید به علت حضور کانی پلاژیوکلاز در سنگ منشأ ماگما باشد. مطالعات ژئوشیمیایی این پژوهش نشان می‌دهد که گرانیتوئیدهای ماهور هم‌خاستگاه بوده و در پهنه فروانش و در ارتباط با کمان‌های آتشفشانی کالک‌آلکالن حاشیه فعال قاره تشکیل شده‌اند. کانی‌سازی به شکل افشان و رگه‌ای در ارتباط با توده‌های مونزونیت و دیوریت پورفیری است.

واژه‌های کلیدی: پتروولوژی، ژئوشیمی، پهنه فروانش، ماهور، نهبندان، بلوک لوت

مقدمه

که توسط گسل نهبندان در شرق، گسل درونه در شمال، گسل نایبند در غرب و گسل جازموریان در جنوب احاطه شده است (Berberian and King, 1981). یکی از ویژگی‌های با اهمیت بلوک لوت، فعالیت‌های ماگمایی گسترده آن بوده است که از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیاری به اوج خود

محدوده ماهور در شرق ایران و در ۱۳۵ کیلومتری جنوب غرب نهبندان در استان خراسان جنوبی واقع شده است (شکل ۱). از نظر تقسیمات ساختاری این منطقه در بلوک لوت قرار گرفته است. بلوک لوت دارای روند شمالی-جنوبی است

* mazaheri@ferdowsi.um.ac.ir

زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ده‌سلم (Griffis *et al.*, 1991) در گستره‌ای بین طول‌های $58^{\circ} 51' 20''$ تا $58^{\circ} 56' 08''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $31^{\circ} 06' 00''$ تا $31^{\circ} 12' 50''$ شمالی واقع شده است. واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده در محدوده مطالعه شده را می‌توان به سه بخش زیر تقسیم کرد: الف) سنگ‌های آتشفشانی و پیروکلاستیک پالئوسن-اؤسن که توده‌های نیمه‌عمیق و عمیق در آن نفوذ کرده است، ب) توده‌های نیمه عمیق و عمیق حد واسط با سن نسبی بعد از اؤسن که با شدت‌های مختلف دگرسان شده‌اند و ج) تراس‌های آبرفتی متعدد، ماسه بادی، دق‌های رسی و رسوبات رودخانه‌ای عهد حاضر (شکل ۲).

روش انجام پژوهش

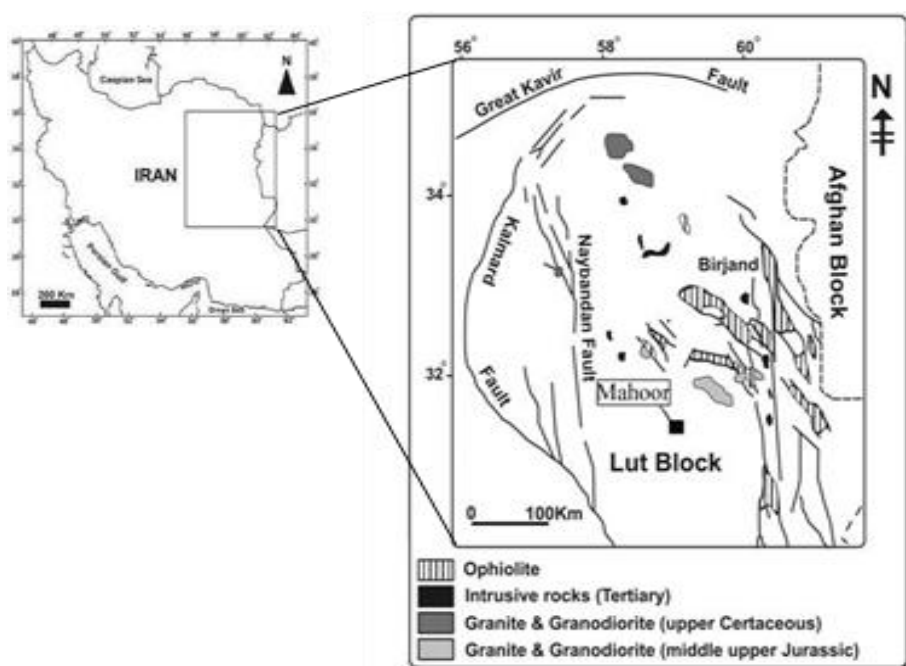
نقشه‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی محدوده اکتشافی ماهور تهیه شد. از گستره مورد نظر، بیش از ۲۰۰ نمونه برداشت گردید. تعداد ۱۵۰ مقطع نازک میکروسکوپی از نمونه‌های برداشت شده، برای مطالعات پتروگرافی تهیه شد. پس از مطالعه مقاطع نازک، تعداد ۱۷ نمونه از توده‌های گرانیتوئید و آتشفشانی که دگرسان نبود برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی با روش XRF (دستگاه فیلیپس مدل II) به آزمایشگاه طیف کانساران بینالود ارسال شد. پس از بررسی نتایج تجزیه عناصر اصلی، تعداد ۱۳ نمونه از توده‌های بیان شده، با روش ICP-MS برای عناصر فرعی و نادر خاکی در آزمایشگاه ACME کانادا (با روش آماده‌سازی ذوب قلیایی) تجزیه شد. مقدار حساسیت مغناطیسی نمونه‌های دستی ماهور، توسط دستگاه حساسیت‌سنج مدل GM-S2 در دانشگاه فردوسی مشهد اندازه‌گیری گردید.

رسیده است. به طوری که سنگ‌های آتشفشانی-نفوذی ترسیر (اؤسن-الیگوسن) محدوده وسیعی به ابعاد حداقل 400×300 کیلومتر را می‌پوشاند (Karimpour, Pang *et al.*, 2013) و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند بازه زمانی بین ۳۳ تا ۴۲ میلیون سال قبل (اؤسن میانی تا اوایل الیگوسن)، مهم‌ترین محدوده زمانی کانی‌سازی در شرق ایران است و بنابراین، گرانیتوئیدهای تشکیل شده در این پنجره زمانی برای انواع کانی‌سازی مس-طلای پورفیری، طلای اپی‌ترمال سولفید بالا، اسکارن آهن، رگه‌های IOCG، Pb، Sb و Zn پتانسیل دارد. محدوده اکتشافی مس-روی ماهور در بخش مرکزی بلوک لوت واقع شده و از سال ۱۳۸۶ عملیات اکتشاف توسط بخش خصوصی بر روی رگه‌های کانه‌دار آغاز شده است.

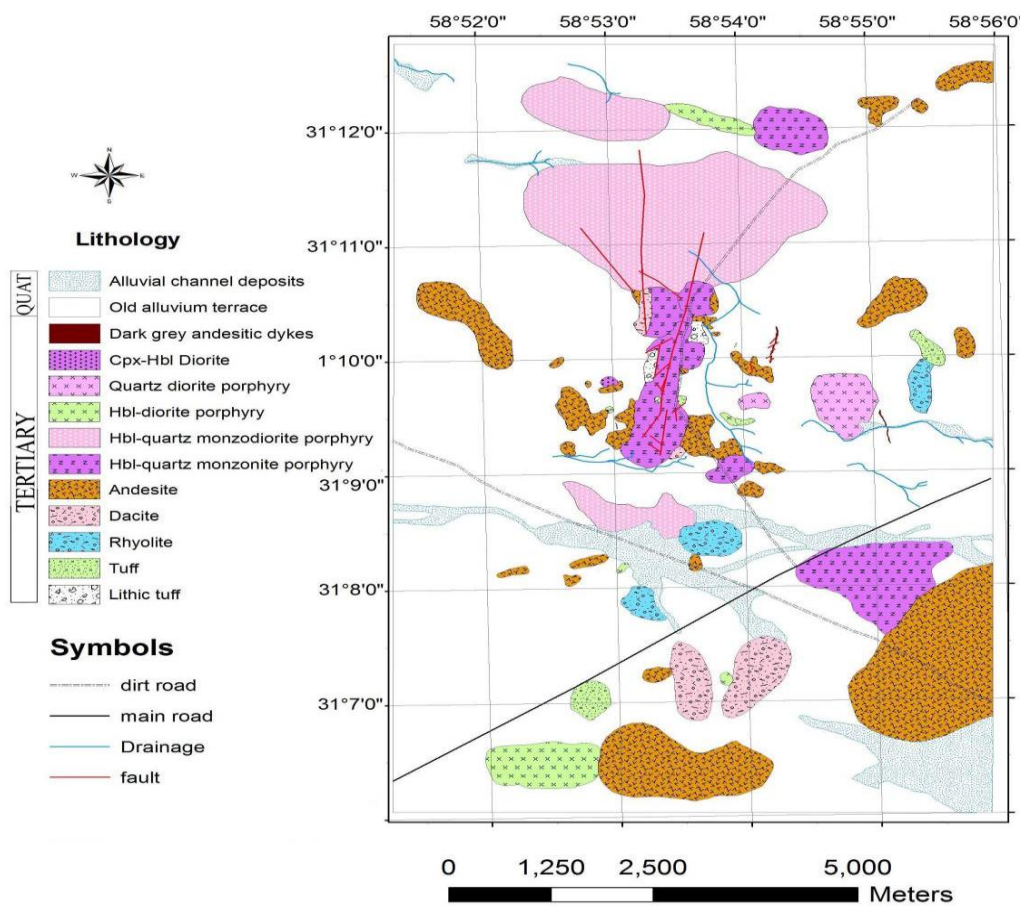
در بررسی‌های قبلی انجام شده توسط Mirzaei Rayeni و همکاران (۲۰۱۲-a و b)، کانی‌سازی محدوده ماهور از نوع اپی‌ترمال تا مزوترمال رگه‌ای معرفی شده است. Boomeri و همکاران (۲۰۱۳) نیز شیمی کانی‌ها و نحوه کانی‌زایی برون‌زاد را در محدوده اکتشافی ماهور بررسی نمودند. در ضمن، در پژوهشی که توسط Esform و همکاران (۲۰۱۲) به چاپ رسیده، بر اساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ ده‌سلم، کلیه واحدها آتشفشانی و پیروکلاستیک گزارش شده و مورد بررسی‌های پترولوژیکی قرار گرفته است. در این پژوهش، برای نخستین بار توده‌های نیمه نفوذی محدوده ماهور معرفی شده و به بررسی پتروولوژی، ژئوشیمی، تعیین سری ماگمایی و جایگاه تکتونوماگمایی آنها پرداخته شده است.

زمین‌شناسی منطقه

محدوده ماهور در بخش جنوبی نقشه



شکل ۱- موقعیت محدوده اکتشافی ماهور با اندکی تغییر از (Malekzadeh *et al.*, 2009)



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی ماهور

پتروگرافی:

بر اساس بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی، گدازه‌های آندزیتی-داسیتی، لیتیک-توف، توف، هورنبلند دیوریت پورفیری، کوارتز دیوریت پورفیری، هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری و پیروکسن هورنبلند دیوریت واحدهای تشکیل دهنده محدوده بررسی شده هستند.

آندزیت: گدازه‌های آندزیتی در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن تا متمایل به قرمز است. این واحد دارای بافت پورفیری بوده و از گسترش قابل ملاحظه‌ای در منطقه برخوردار است.

لیتیک توف: این واحد دارای قطعات پیروکلاستیک است. این قطعات اغلب با اندازه‌های بیش از یک میلی‌متر هستند.

توف: توف‌ها بافت جریان و قطعات پیروکلاستیک اندک و با قطر کمتر از یک میلی‌متر دارد.

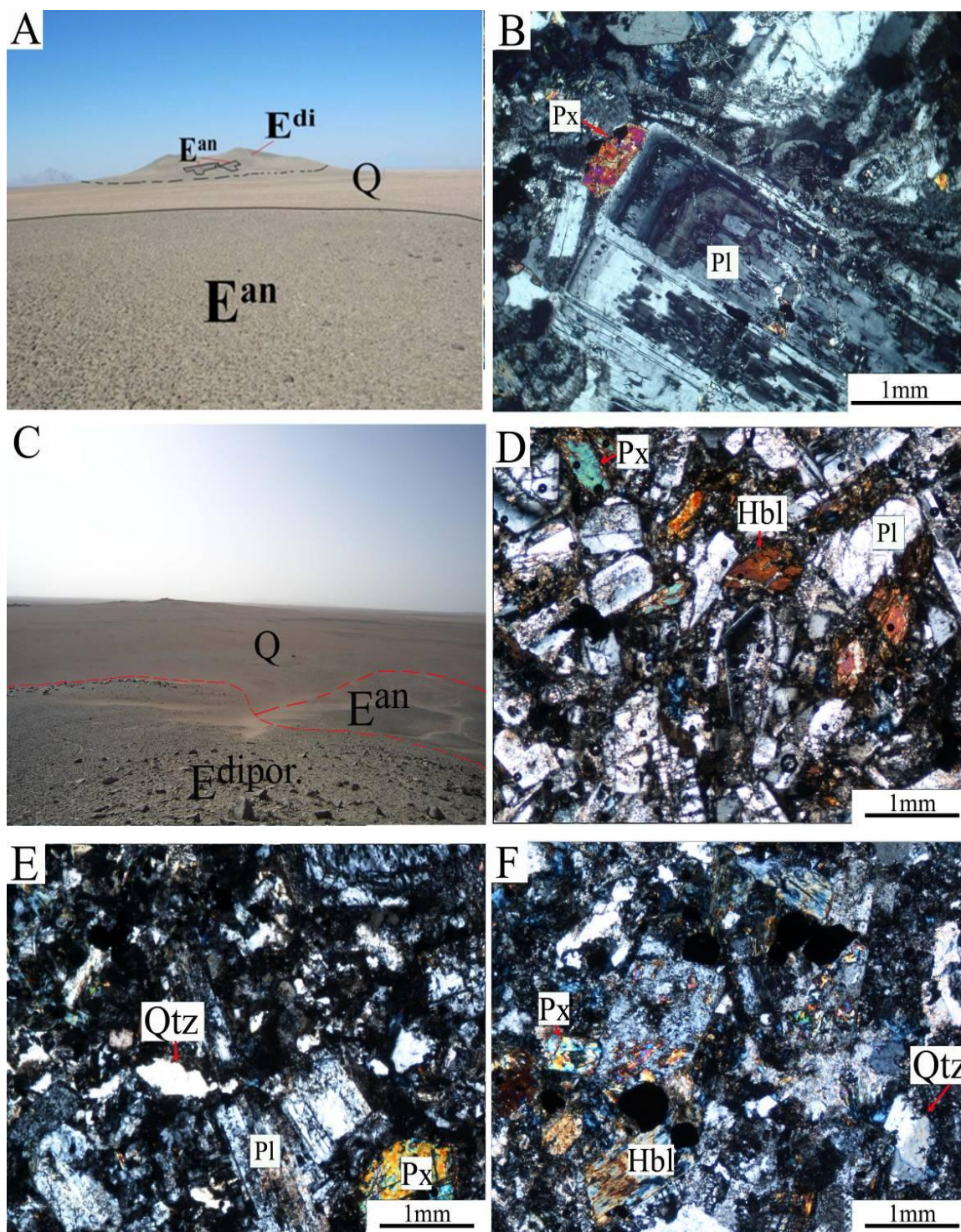
پیروکسن هورنبلند دیوریت: این واحد به صورت تپه ماهوری در بخش غربی کانی‌سازی گسترش دارد (شکل ۳-۸) و دارای بافت گرانولار است. پلاژیوکلاز به مقدار ۵۰ تا ۵۵ درصد به صورت شکل‌دار تا بی شکل مشاهده می‌شود. بر اساس ویژگی‌های نوری، این پلاژیوکلازها از نوع اولیگوکلاز تا آندزین است. در حدود ۳ تا ۴ درصد کوارتز به صورت نیمه شکل‌دار تا بی شکل در بین دیگر کانی‌ها مشاهده می‌شود. پیروکسن در حدود ۵ تا ۶ درصد از نوع اوژیت حضور دارد. این کانی‌ها به صورت شکل‌دار تا بی شکل و در برخی موارد با ماکل دوقلو در متن سنگ مشاهده می‌شود. آمفیبول در حدود ۸ تا ۱۰ درصد به صورت ستونی، شکل‌دار تا بی شکل در متن سنگ حضور دارد (شکل ۳-۸).

هورنبلند دیوریت پورفیری: این واحد نیز در

بخش غربی کانی‌سازی گسترش دارد (شکل ۳-۸) و دارای بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز تا دانه متوسط است. درصد درشت‌بلورها حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد است. کانی‌های درشت‌بلور شامل: ۳۰ تا ۳۵ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه چهار میلی‌متر، ۵ تا ۶ درصد هورنبلند تا اندازه یک میلی‌متر، ۲ تا ۳ درصد پیروکسن تا اندازه ۰/۵ میلی‌متر و ۱ تا ۲ درصد کوارتز تا اندازه ۰/۲ میلی‌متر است. کانی‌های کدر، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده و اندازه آنها تا ۰/۱ میلی‌متر و مقدار آنها تا ۲ درصد می‌رسد. (شکل ۳-۸).

کوارتز دیوریت پورفیری: این واحد بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز دارد. درصد درشت‌بلورها حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد است. کانی‌های درشت‌بلور شامل: ۲۵ تا ۳۰ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه پنج میلی‌متر، ۵ تا ۶ درصد کوارتز تا اندازه ۰/۵ میلی‌متر، ۲ تا ۳ درصد هورنبلند تا اندازه دو میلی‌متر و ۱ تا ۲ درصد پیروکسن تا اندازه یک میلی‌متر است. کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل: پلاژیوکلاز و کوارتز است. کانی‌های کدر، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده و مقدار آنها تا یک درصد می‌رسد (شکل ۳-۸).

هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری: این واحد بافت پورفیری دارد. درصد درشت‌بلورها حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد است. کانی‌های درشت‌بلور شامل: ۲۰ تا ۲۵ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه سه میلی‌متر، ۷ تا ۱۰ درصد آلكالی‌فلدسپار تا اندازه دو میلی‌متر، ۵ تا ۶ درصد هورنبلند تا اندازه یک میلی‌متر و ۴ تا ۵ درصد کوارتز تا اندازه یک میلی‌متر است. کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل: فلدسپار و کوارتز است. کانی‌های کدر نیمه شکل‌دار تا بی شکل بوده و مقدار آنها تا دو درصد می‌رسد (شکل ۳-۸).



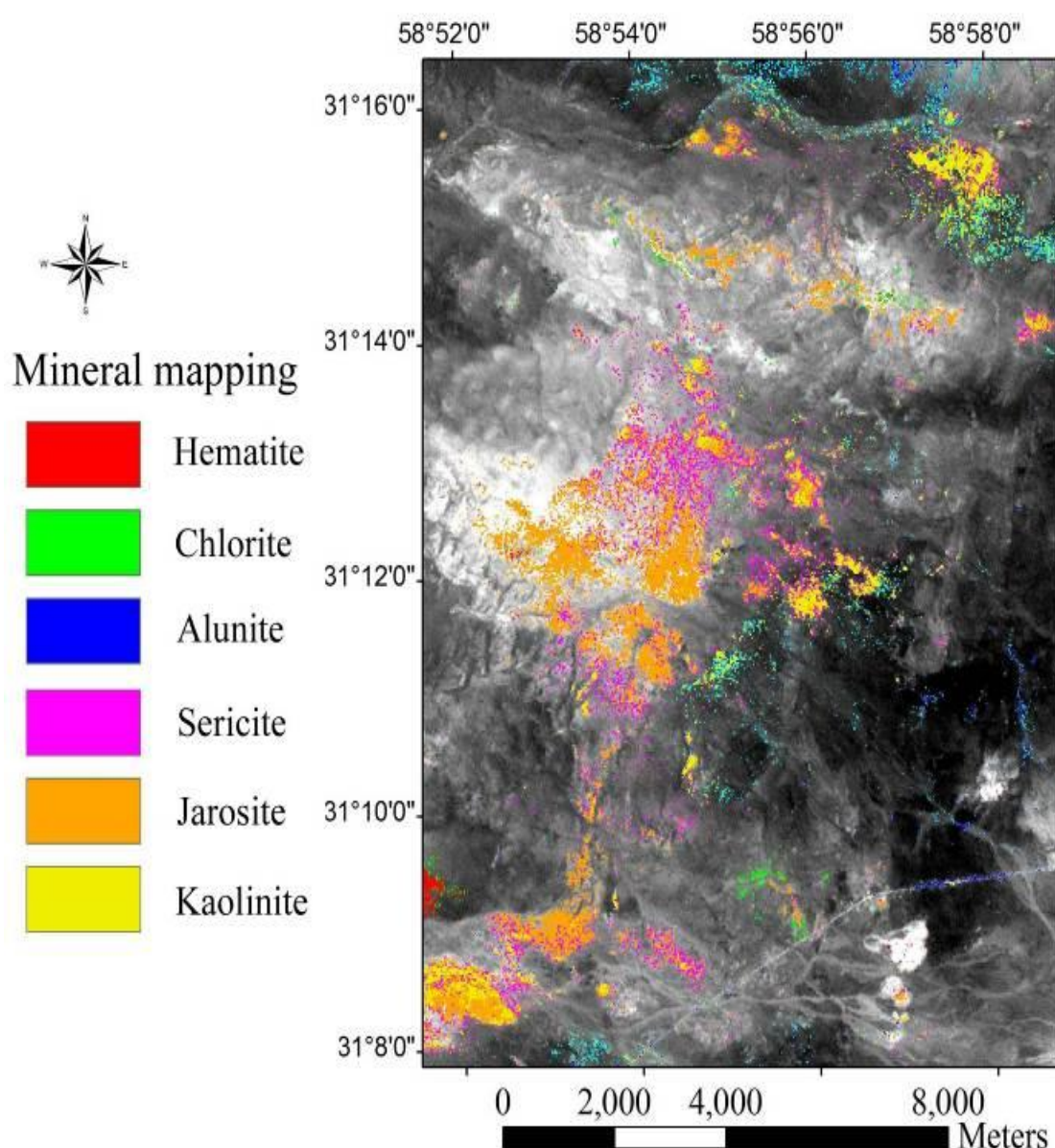
شکل ۳- (A) - نمایی از واحد پیرکسن‌هورنبلند دیوریت (Edi)، دید به طرف شمال؛ (B) - مقطع نازک میکروسکوپی از واحد پیرکسن‌هورنبلند دیوریت؛ (C) - نمایی از واحد هورنبلند دیوریت پورفیری (Edipor)، دید به طرف جنوب شرق؛ (D) - مقطع نازک میکروسکوپی از واحد هورنبلند دیوریت پورفیری؛ (E) - مقطع نازک میکروسکوپی از واحد کوارتز دیوریت پورفیری؛ (F) - مقطع نازک میکروسکوپی از واحد هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری؛ علائم اختصاری از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده و تمامی تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی در نور XPL گرفته شده است.

بحث

مطالعات دورسنجی

محدوده اکتشافی ماهور در مناطق خشک و کویری واقع شده و به علت نداشتن پوشش گیاهی برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مشخص نمودن مناطق دگرسانی احتمالی، مناسب است. بررسی‌های دورسنجی در این منطقه به کمک داده‌های ماهواره‌ای ASTER انجام شد. برای

پردازش این داده‌ها از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی (Spectral Angle Mapper) SAM استفاده شده است. در این روش، کانی‌های کوارتز، کلسیت، هماتیت، کائولینیت، سربیسیت، ژاروسیت، کلریت و اپیدوت بارزسازی شدند (شکل ۴). مشاهدات صحرایی نیز حضور دگرسانی‌های آرژیلیک، پروپلیتیک، فلیک و سیلیسی را در محدوده نشان می‌دهد.



شکل ۴- پردازش داده‌های ASTER برای کانی‌های کائولینیت، سربیسیت، کلریت، آلونیت، هماتیت و ژاروسیت با روش SAM

کانی‌سازی

کانی‌سازی مس و روی در بخش مرکزی محدوده اکتشافی ماهور به دو صورت رگه‌ای و رگچه‌ای-پراکنده مشاهده می‌شود.

کانی‌سازی رگه‌ای: کانی‌سازی رگه‌ای ماهور، با روند N18W و با شیب 80NE درجه به سمت شرق و ضخامت متغیر بین کمتر از یک تا حدود دو متر و طول تقریبی تا حداکثر ۳۰۰ متر مشاهده می‌شود. سنگ درون‌گیر رگه، هورنبلنددیوریت پورفیری است که دارای دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک و سریسیتیک است. دگرسانی در حاشیه رگه شدت بیشتری دارد. در این رگه در پهنه اکسیدان تا عمق تقریبی ۴۰ متر، کانی‌های آتاکامیت، گوتیت، پیرولوژیت، هماتیت، لیمونیت، آزوریت و ملاکیت و در پهنه هیپوژن از عمق ۴۰ به بعد، کانی‌های اسفالریت، کالکوپیریت، گالن و پیریت مشاهده می‌شود. رگه یاد شده توسط گسل‌های عرضی امتدادلغز بریده و جابجا شده است (Miri Bydokhti et al, 2013). عیار متوسط به دست آمده برای عناصر مس و روی به ترتیب برابر با ۲/۵ و ۰/۵ درصد است (Goorabjiripour, 2013).

کانی‌سازی پراکنده-رگچه‌ای: بخش عمده کانی‌سازی در محدوده اکتشافی ماهور به صورت کانی‌سازی پراکنده و رگچه‌ای است. در این پهنه بر خلاف بخش رگه‌ای، حضور کانی‌سازی عنصر روی شاخص بوده و در کنار آن کانی‌سازی مس نیز دیده می‌شود. سنگ میزبان کانی‌سازی، هورنبلنددیوریت پورفیری و مونزونیت پورفیری بوده که دارای دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک و کلریت-سریسیت-پیریت-کوارتز است. در این بخش نیز پهنه اکسیدان تا عمق تقریبی ۴۰ متر بوده و با کانی‌های گوتیت، هماتیت، لیمونیت،

آزوریت و ملاکیت مشخص می‌شود و پهنه هیپوژن از عمق تقریبی ۴۰ متر شروع شده و تا بیش از ۳۸۰ متر ادامه دارد (Miri Bydokhti et al, 2013). کانی‌های پهنه هیپوژن شامل: اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت است. عیار متوسط به دست آمده از گمانه‌های حفاری برای عناصر مس و روی به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۲/۲ درصد است (Goorabjiripour, 2013).

پذیرفتاری مغناطیسی (Magnetic Susceptibility)

ویژگی‌های مغناطیسی سنگ با اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی مشخص می‌شود. سنگ‌های گرانیتی توسط Ishihara (۱۹۷۷) به دو گروه سری مگنتیت و سری ایلمنیت تقسیم شده‌اند. Ishihara (۱۹۸۱) مقدار پذیرفتاری مغناطیسی گرانیتوئیدهای سری مگنتیت (به علت حضور کانی فرعی مگنتیت) را بیش از $SI \times 10^{-5} 50$ معرفی کرد. پذیرفتاری مغناطیسی در بیش از ۱۰۰ نمونه بدون دگرسانی یا با دگرسانی اندک از توده‌های نفوذی منطقه مطالعه شده، اندازه‌گیری شد. میانگین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی برای هر واحد زمین‌شناسی در جدول ۱ آمده است. در مناطق با حداقل دگرسانی، بالاترین میزان پذیرفتاری $SI \times 10^{-5} 2788$ ، پایین‌ترین $SI \times 10^{-5} 480$ و به‌طور میانگین در این توده‌ها $SI \times 10^{-5} 1485$ است. موقعیت نمونه‌ها در نمودار نسبت Rb/Sr در مقابل پذیرفتاری مغناطیسی نشان می‌دهد که کلیه توده‌های نفوذی منطقه ماهور از نوع سری مگنتیت یا اکسیدان هستند (شکل ۵).

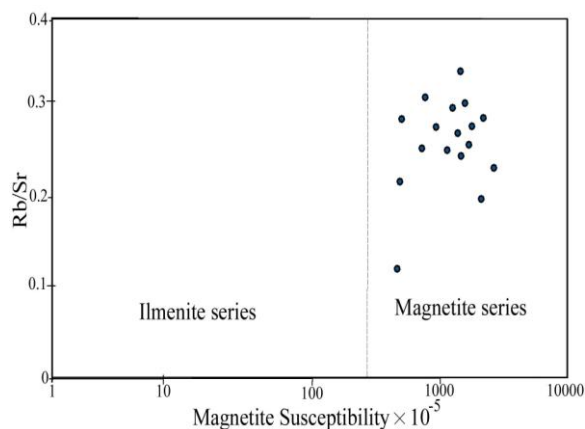
زمین‌شیمی

نتایج تجزیه عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی

توده‌های گرانیتوئید و آتشفشانی ماهور در جدول ۲ آورده شده است. میزان سیلیس توده‌های نفوذی محدوده اکتشافی ماهور بین ۵۱/۷ تا ۶۴/۳ درصد متغیر است.

جدول ۱- پذیرفتاری مغناطیسی گرانیتوئیدهای منطقه ماهور

Sample	X	Y	Susceptibility ($\times 10^{-5}$ SI)	Lithology
367	679460	3449258	1769	Diorite
366	679462	3449261	1977	Diorite
442	680900	3444472	2208	Hornblende diorite porphyry
441	680924	3444397	2788	Hornblende diorite porphyry
389	681124	3448939	2241	Quartz diorite porphyry
395	682547	3449296	480	Pyroxene. Hornblende diorite porphyry
443	680863	3444386	1350	Hornblende diorite porphyry
431	682884	3448496	937	Quartz monzodiorite porphyry
464	678495	3443123	702	Hornblende pyroxene diorite porphyry
396	682529	3449213	556	Pyroxene Hornblende quartz diorite porphyry
404	682947	3449133	1577	Hornblende diorite porphyry
426	698698	3448594	1244	Hornblende Quartz diorite porphyry



شکل ۵- موقعیت فرارگیری نمونه‌های منطقه ماهور در نمودار تفکیک گرانیت‌های سری مگنتیت و ایلمنیت

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی سنگ‌های نفوذی، نیمه نفوذی و آتشفشانی منطقه ماهور. D=دیوریت، Gd=گابرویدیوریت، Dph=دیوریت پورفیری، Tph=تونالیت پورفیری، Gdph=گابرویدیوریت پورفیری، Mzdph=مونزودیوریت پورفیری، Anb=آندزیت بازالت، An=آندزیت

Sample No	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Rock type	D	D	Gd	Anb	Anb	Tph	An	An	Tph
X	679458	679460	679462	680065	680060	678109	680924	680900	682529
Y	3449262	3449258	3449261	3448926	3448930	3443177	3444397	3444472	3449213
SiO ₂	57.53	57.85	56.34	55.98	56.18	63.75	56.95	57.18	61.93
TiO ₂	0.82	0.84	0.88	0.93	0.89	0.69	0.75	0.77	0.7
Al ₂ O ₃	15.65	15.54	15.61	16.37	16.37	14.6	16.14	16	14.44
FeO _t	7.41	7.4	7.99	8.33	7.8	5.57	7.56	7.47	6.29
MnO	0.15	0.15	0.17	0.16	0.19	0.11	0.18	0.15	0.12
MgO	4.28	4.15	4.59	3.69	4.36	3.16	5.35	4.88	3.04
CaO	6.13	6.35	7.5	7.82	7.31	3.21	6.08	6.36	4.26
Na ₂ O	3.42	3.18	2.9	3.38	3.01	3.46	2.89	2.86	3.68
K ₂ O	2.44	2.47	2.24	2.44	2.6	3.75	1.41	1.67	3.16
P ₂ O ₅	0.3	0.32	0.3	0.24	0.24	0.19	0.28	0.27	0.24
LOI	1.64	1.52	1.27	0.41	0.8	1.3	2.17	2.15	1.92
SO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	99.77	99.77	99.79	99.75	99.75	99.79	99.76	99.76	99.78

Sample No	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Rock type	D	D	Gd	Anb	Anb	Tph	An	An	Tph
X	679458	679460	679462	680065	680060	678109	680924	680900	682529
Y	3449262	3449258	3449261	3448926	3448930	3443177	3444397	3444472	3449213

ادامه جدول ۲-....

Ba	-	387	347	438	-	460	-	457	465
Hf	-	3.5	2.8	3.8	-	6	-	3.3	5
Ta	-	0.4	0.4	0.4	-	0.9	-	0.5	0.8
Cs	-	1.7	1.6	4.7	-	3.6	-	8.2	1.6
Co	-	15.8	19.4	21.7	-	11.7	-	16.9	11.5
Nb	-	7.6	6.9	6.7	-	10.9	-	8.8	9.3
Ce	-	41.1	37	38	-	59.1	-	48.4	49.6
Sr	-	397.2	454	428.4	-	326.6	-	581	412.3
Rb	-	63.1	51	76.3	-	154.3	-	74.4	82.3
Zr	-	133.4	121.5	115.8	-	۲۲۰,۱	-	140.7	171.4
La	-	20.1	17.3	18.2	-	29	-	25.4	24.9
Pr	-	4.89	4.61	4.56	-	6.5	-	5.67	5.84
Nd	-	20.1	17.3	19.4	-	23.6	-	20.4	22.8
Sm	-	4.13	4.35	4.22	-	5.12	-	4.39	4.63
Eu	-	1.13	1.11	1.17	-	1.03	-	1.08	1.11
Gd	-	4.35	4.51	4.39	-	4.55	-	4.06	4.67
Tb	-	0.64	0.61	0.66	-	0.64	-	0.61	0.66
Dy	-	3.6	3.94	4.05	-	4.65	-	3.66	4.39
Ho	-	0.83	0.72	0.83	-	0.84	-	0.74	0.84
Er	-	2.54	2.24	2.41	-	۲,۶	-	2.16	۲,۴۲
Tm	-	0.34	0.32	0.36	-	0.34	-	0.31	0.38
Yb	-	2.04	2.2	2.37	-	2.58	-	2.04	2.49
Lu	-	0.33	0.32	0.34	-	0.37	-	0.28	0.38
Y	-	23.5	23.5	22.5	-	24.1	-	20.7	26.9
Co	-	15.8	19.4	21.7	-	11.7	-	16.9	11.5
Th	-	4.9	5.4	5.2	-	14.3	-	7	9.4
U	-	1	1.2	1.3	-	3.3	-	1.6	1.9
Eu/Eu*	-	0.82	۰.77	0.83	-	0.65	-	0.78	0.73
(La/Yb)N	-	6.64	5.3	5.18	-	7.58	-	8.39	6.74
(Yb)N	-	9.8	10.5	11.3	-	12.3	-	9.8	11.9

Sample No	M10	M13	M14	M15	M16	M18	M19	M21
Rock type	Tph	Dph	Mzdph	Tph	Gd	Dph	Tph	Gdph
X	682547	679122	678495	681124	679460	679070	680736	681251
Y	3449296	3443282	3443123	3448939	3449260	3443272	3443055	3448887

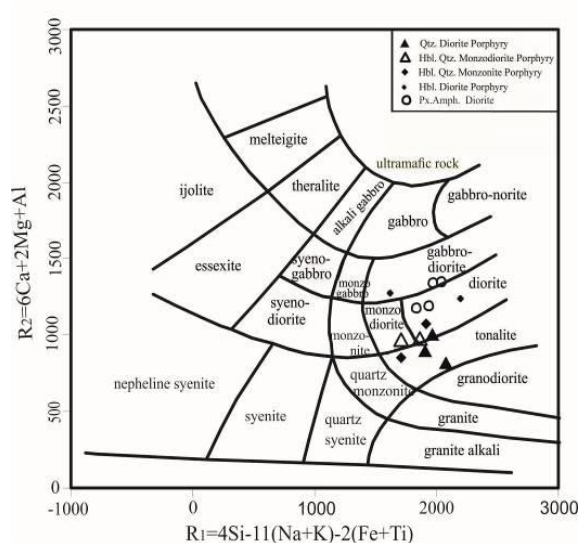
ادامه جدول ۲-....

SiO ₂	63.88	59.8	59.18	63.44	56.37	60.28	64.34	51.65
TiO ₂	0.63	0.74	0.69	0.6	0.86	0.72	0.64	1.21
Al ₂ O ₃	14.46	14.92	14.85	14.77	15.59	14.6	14.91	15.45
FeO _i	5.39	6.49	7.02	5.48	7.81	6.62	3.76	9.52
MnO	0.11	0.11	0.13	0.11	0.16	0.12	0.05	0.2
MgO	2.62	4.57	4.64	2.66	4.98	4.28	2.64	۴,۸
CaO	3.47	4.18	4.11	3.63	7.42	4.67	4.19	6.99
Na ₂ O	3.74	3.35	3.64	3.14	2.75	2.93	4.92	2.78
K ₂ O	3.39	3.2	3.18	3.75	2.22	3.52	3.38	2.42
P ₂ O ₅	0.2	0.25	0.28	0.27	0.31	0.22	0.24	0.49
LOI	1.52	2.16	2.06	1.87	1.32	1.83	0.61	4.29
SO ₃	0.34	0	0	0	0	0	0.06	0
Total	99.75	99.77	99.78	99.72	99.79	99.79	99.74	99.8
Ba	496	387	430	520	-	442	483	310
Hf	4.9	4.5	4.2	4.4	-	5.4	5.5	3.3

Sample No	M10	M13	M14	M15	M16	M18	M19	M21
Rock type	Tph	Dph	Mzdph	Tph	Gd	Dph	Tph	Gdph
X	682547	679122	678495	681124	679460	679070	680736	681251
Y	3449296	3443282	3443123	3448939	3449260	3443272	3443055	3448887
ادامه جدول ۲-۱...								
Ta	0.8	0.7	0.9	0.7	-	0.6	۰٫۸	0.5
Cs	2.2	3.7	5.3	2.6	-	5.2	1.8	5.4
Co	9.5	15.7	14.4	10.2	-	13.6	6.1	17.9
Nb	9.9	9.8	9.8	8.4	-	9.7	10.3	8.8
Ce	52.6	50.5	55.4	50.8	-	49	51	48.6
Sr	368	428.5	388.4	422.7	-	378	260.9	434.8
Rb	107.7	116.4	124.9	106.6	-	128.9	76.1	63.3
Zr	181.1	178	175.2	159.2	-	176.3	185.5	125.8
La	25.9	24.9	25.4	25.2	-	24.9	26	22.6
Pr	6	5.59	5.82	5.63	-	5.77	5.87	6.04
Nd	22	22.1	21.4	23.1	-	22.1	23	24.3
Sm	4.53	4.51	4.14	4.34	-	4.47	4.41	5.48
Eu	1.19	0.97	1	1.06	-	1.13	1.05	1.6
Gd	4.46	4.21	4.17	4.3	-	4.25	4.44	5.66
Tb	0.66	0.58	0.61	0.59	-	0.6	0.72	0.82
Dy	4.28	4.37	4.38	3.74	-	4	4.4	5.42
Ho	0.8	0.77	0.67	0.75	-	0.74	0.8	1.12
Er	2.64	2.24	2.02	2.01	-	2.19	2.53	2.94
Tm	0.37	0.34	0.33	0.32	-	0.33	0.39	0.44
Yb	2.83	2.07	2.19	2.18	-	2.09	2.7	3.13
Lu	0.36	0.37	0.35	0.33	-	0.34	0.39	0.45
Y	21	21.3	22.6	21.4	-	22.9	25.9	26.7
Co	9.5	15.7	14.4	10.2	-	13.6	6.1	17.9
Th	9.8	10.3	10.6	8.8	-	10.7	11.5	5.8
U	2.3	2.6	2.5	2.1	-	2.8	2.9	1.1
Eu/Eu*	0.81	0.68	0.74	0.75	-	0.79	0.73	0.88
(La/Yb)N	6.17	8.11	7.82	7.79	-	8.03	6.49	4.87
(Yb)N	13.5	9.9	10.5	10.4	-	10	۱۲٫۹	15

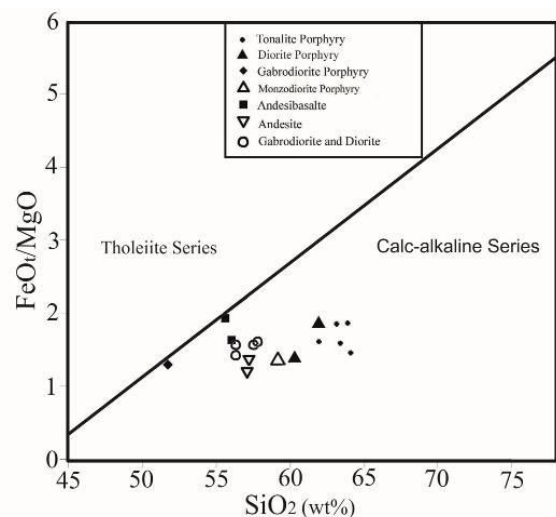
در نمودار تمایزی سری ماگمایی (FeO/MgO) در برابر SiO_2 (Miyashiro, 1974) تمامی نمونه‌ها در محدوده سنگ‌های سری کالک‌آلکان قرار می‌گیرد (شکل ۷-۱). مقدار K_2O توده‌ها نیز از ۱/۴۱ تا ۳/۷۵ درصد متغیر است و نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976) نشان می‌دهد توده‌های گرانیتوئیدی و واحدهای آتشفشانی ماهور در محدوده سنگ‌های سری کالک‌آلکان پتاسیم بالا قرار می‌گیرد (شکل ۷-۲).
 بر اساس نمودار $A/NK = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ در مقابل $A/CNK = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (Shand, 1969) تمامی نمونه‌ها در محدوده متآلومینوس قرار می‌گیرد (شکل ۸).

بر اساس نمودار Dela Roche و همکاران (۱۹۸۰) که یک نمودار جامع برای رده‌بندی سنگ‌های آذرین نفوذی بر پایه نسبت‌های کاتیونی است، گرانیتوئیدهای ماهور در محدوده سنگ‌شناختی گابرودیوریت، دیوریت، مونزودیوریت و تونالیت قرار می‌گیرد (شکل ۶). مقایسه نام‌های حاصل از این رده‌بندی و نام‌های حاصل از بررسی‌های پتروگرافی، مقداری تفاوت نشان می‌دهد. این تفاوت شاید به علت دگرسانی کانی آمفیبول و حضور کوارتز ثانویه باشد. مزیت استفاده از این نمودار نسبت به دیگر نمودارهای طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین، استفاده از شیمی تمام عناصر اصلی سنگ در رده‌بندی است (Rollinson, 1993).

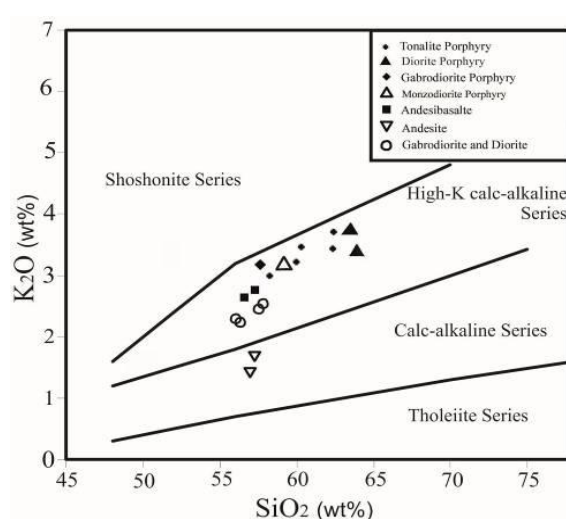


شکل ۶- نمودار نامگذاری سنگ‌های آذرین درونی با استفاده از نسبت کاتیون‌ها (Dela Roche et al, 1980)

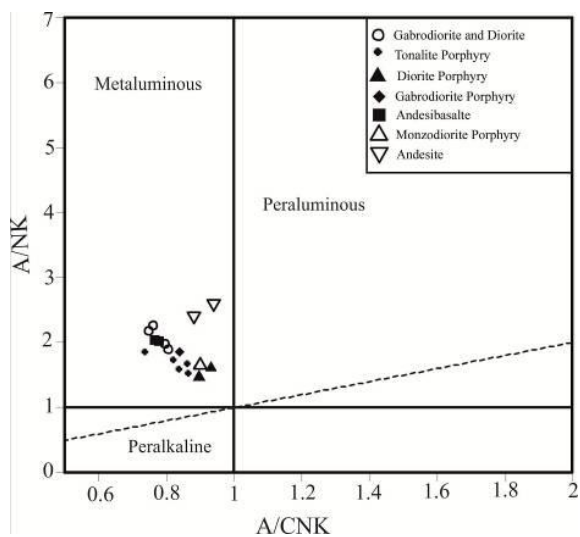
A



B



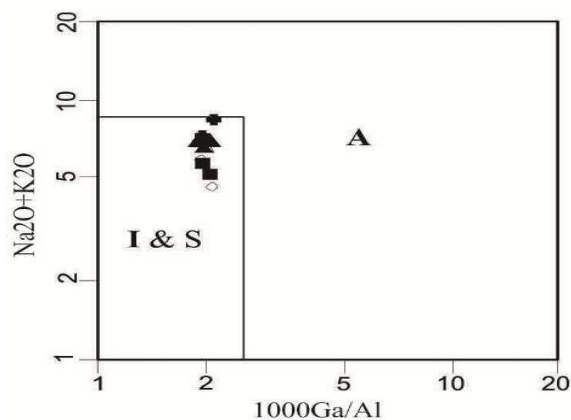
شکل ۷- موقعیت قرارگیری نمونه‌های محدوده ماهور؛ (A) نمودار (FeO/MgO) در برابر SiO₂ (Miyashiro, 1974)؛ (B) نمودار تعیین اندیس پتاسیم (Peccherillo and Taylor, 1976)



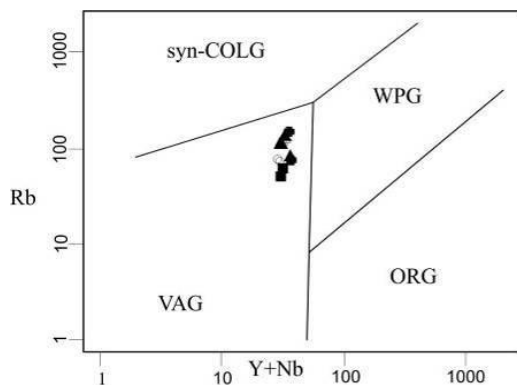
شکل ۸- نمودار تعیین اندیس آلومینیم (Shand, 1969)

تشکیل شده‌اند (شکل ۱۱).

نمودار عنکبوتی عناصر فرعی و برخی عناصر کمیاب که نسبت به گوشته اولیه بهنجار شده‌اند در شکل ۱۲ نشان داده شده است. تهی‌شدگی مشخصی در عناصر با شدت میدان زیاد (HFSE) نظیر: Nb، P و Ti مشاهده می‌شود و در مقابل غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) نظیر: Ba، Cs، K، Rb و همچنین، Th دیده می‌شود. غنی‌شدگی در LILE و عناصر نادر خاکی سبک و تهی‌شدگی در HFSE از نشانه‌های ماگمای مرتبط با پهنه فرورانش است (Rollinson, 1993; Pearce, 1983; Gill, 1981). کاهیدگی Nb و Ti منعکس کننده حضور کانی‌های Ti دار در منشأ است و تهی‌شدگی فسفر در نمونه‌ها مربوط به تفریق آپاتیت از ماگما است (Pearce and Parkinson, 1993).



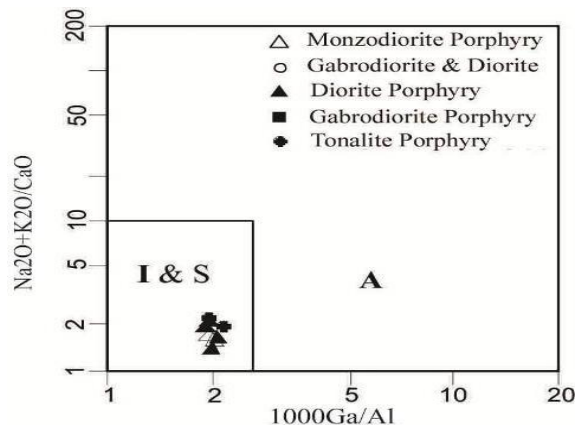
شکل ۹- موقعیت گرانیتوئیدهای ماهور در نمودار متمایز کننده گرانیتوئیدها (Whalen, 1987)



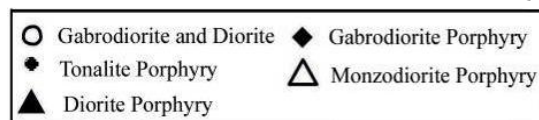
در نمودار تفکیک گرانیتوئیدهای تیپ A از تیپ S و I که بر اساس اکسیدهای اصلی و عناصر آلومینیم و گالیوم است، گرانیتوئیدهای ماهور در محدوده تیپ S یا I قرار می‌گیرد و ماهیت ژئوشیمی آنها با گرانیتوئیدهای تیپ A متفاوت است (شکل ۹). به واسطه این که مقدار A/CNK در تمامی نمونه‌ها کمتر از یک است، در محدوده گرانیتوئیدهای سری I قرار می‌گیرد (Chappell and White, 1992; 2001).

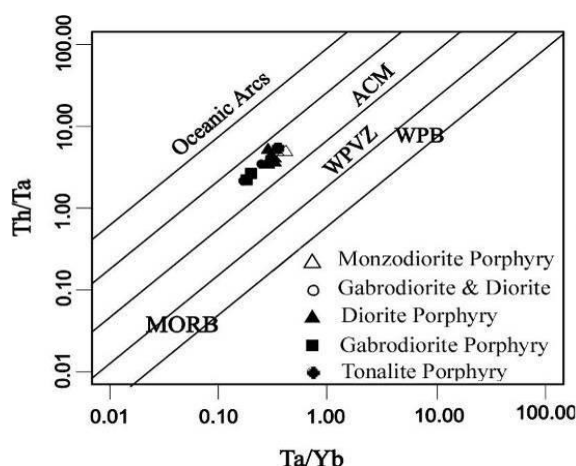
بر پایه مقدار عناصر Nb، Rb و Y در نمودارهای Pearce و همکاران (۱۹۸۴) موقعیت تکتونیکی تشکیل توده‌های نفوذی ماهور کمرندهای آتشفشانی پهنه فرورانش (VAG) است (شکل ۱۰).

بر مبنای نمودار Schandl و Gorton (۲۰۰۲) گرانیتوئیدهای ماهور در حاشیه‌های قاره‌ای فعال

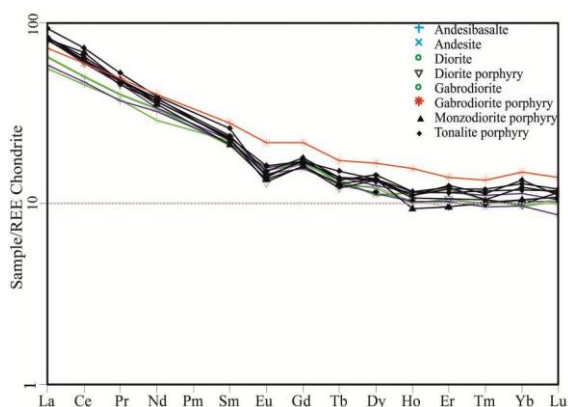
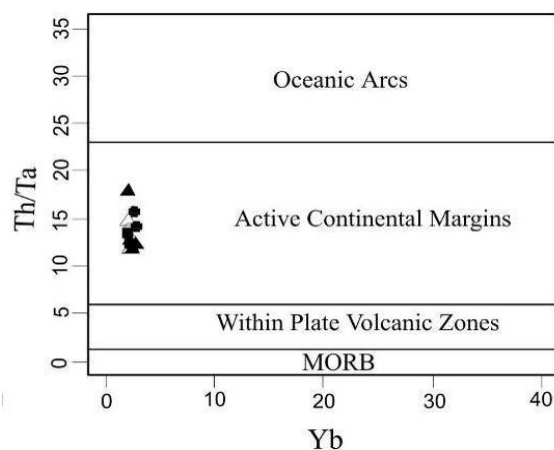


شکل ۱۰- موقعیت نمونه‌ها در نمودار تعیین موقعیت تکتونیکی گرانیتوئیدها (Pearce et al., 1984)

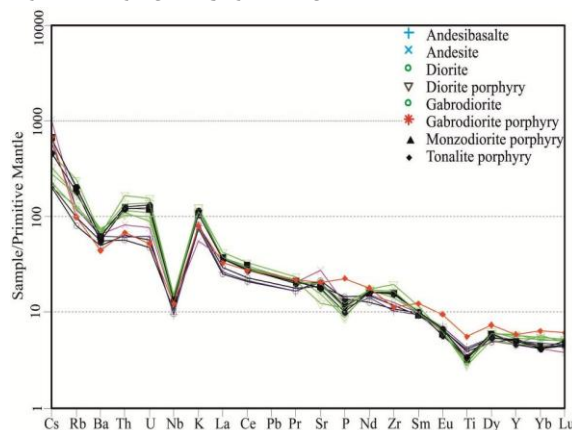




شکل ۱۱- نمودار تعیین موقعیت تکتونیکی گرانیتوئیدها (Schandl and Gorton, 2002)



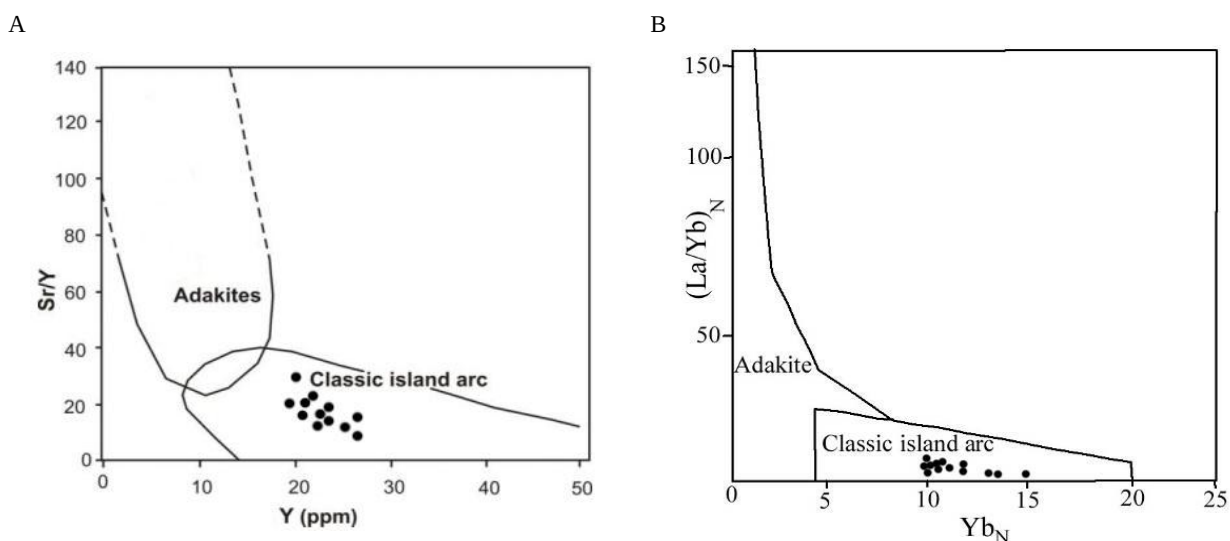
شکل ۱۳- نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی بهنجار شده با REE کندریت؛ داده‌های کندریت از (Boynton, 1985)



شکل ۱۴- نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه؛ داده‌های گوشته اولیه از (Sun and McDonough, 1989)

تغییر است. ناهنجاری منفی Eu به علت حضور کانی پلاژیوکلاز در سنگ منشأ ماگما است. میزان Sr پایین در نمونه‌هایی که Eu پایین تری دارد این موضوع را اثبات می‌کند (Moradi et al, 2011). با توجه به موازی بودن روندهای وابسته به نمونه‌های گرانیتوئیدی منطقه، می‌توان به هم خاستگاه بودن آنها پی برد. در نمودار Defant و Drummond (۱۹۹۰) بر اساس نسبت Sr/Y در مقابل Y، نمونه‌های گرانیتوئید ماهور در موقعیت کمان ماگمایی نرمال واقع می‌شود (شکل ۱۴-A). همچنین، در نمودار $(La/Yb)_N$ در مقابل Yb_N تمامی توده‌های منطقه ماهور در محیط ماگمایی کالک‌آلکان نرمال واقع شده‌اند (شکل ۱۴-B).

غنی‌شدگی نسبی در عناصر نادر خاکی سبک نسبت به الگوی سطح عناصر نادر خاکی متوسط و سنگین، در کلیه نمونه‌ها دیده می‌شود؛ اما این مقدار زیاد نبوده و مقدار اندک $(La/Yb)_N$ نمونه‌ها (حداکثر ۸/۳۹) این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۲) و نشان می‌دهد گارنت در منطقه ذوب بخشی حضور نداشته است. این الگوی عناصر نادر خاکی، ویژگی ماگماهای تشکیل شده در پهنه فرورانش و در کمان‌های آتشفشانی کالک‌آلکان حاشیه فعال قاره است (Gill, 1981؛ Pearce, 1983؛ Wilson, 1989؛ Walker et al., 2001). این نمودار، عنصر Eu ناهنجاری منفی نشان می‌دهد. و مقدار Eu/Eu^* از ۰/۶۵ تا ۰/۸۸ در



شکل ۱۴- (A) نمودار Sr/Y در مقابل Y (Defant and Drummond, 1990)؛ (B) نمودار (La/Yb)_N در مقابل Yb_N (Martin, 1994)

عنصر Nb ناهنجاری منفی نشان می‌دهد که نشان از ماگماتیسم در پهنه فرورانش بوده و آغستگی اندک با پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهد. در نمودار تفکیک محیط‌های تکتونیکی، سنگ‌های گرانیتوئیدی ماهور در محیط کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره واقع شده‌اند. بر اساس نتایج سنگ‌شناسی و اطلاعات ژئوشیمیایی، نوع و شکل کانی‌سازی (رگه‌ای، رگچه‌ای و پراکنده) و همچنین، پهنه‌های گسترده دگرسانی که نمایانگر فعالیت وسیع سیالات هیدروترمال در محدوده هستند، شرایط برای کانی‌سازی از نوع پورفیری مهیا است. البته اثبات این مسأله نیاز به بحث بیشتری دارد که خارج از موضوع این مقاله است.

سپاسگزاری

نگارندگان از مساعدت شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس‌کانی در امر استقرار در کمپ و در اختیار قرار دادن وسایل نقلیه، به ویژه مساعدت آقایان صادقی و مابشری و همچنین، دقت نظر داوران محترم، صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

نتیجه‌گیری

بررس‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی گرانیتوئیدهای محدوده اکتشافی ماهور نشان می‌دهد که ترکیب این توده‌ها از دیوریت تا تونالیت متغیر است.

بر اساس ویژگی‌های ژئوشیمیایی، سری ماگمایی این توده‌ها از نوع کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا است. حضور کانی‌های هورنبلند و مگنتیت در مطالعات کانی‌شناسی این توده‌ها و داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی آنها نمایانگر ماهیت اکسیدان (سری مگنتیت) است. این توده‌ها از نظر شاخص آلومینیم، از نوع متاآلومینوس بوده و در کمربند پهنه فرورانش تشکیل شده‌اند. مقادیر پایین Nb، Y و Zr نشان می‌دهد که سنگ‌های گرانیتوئیدی منطقه ماهور، گرانیتوئیدهای سری I است که در یک محیط کمانی شکل گرفته‌اند. غنی‌شدگی در LREE نسبت به الگوی HREE در کلیه توده‌های نفوذی منطقه مشاهده می‌شود که شاخص ماگماهای تشکیل شده در پهنه فرورانش است. تمامی نمونه‌ها ناهنجاری منفی عنصر Eu دارند که بیانگر حضور پلاژیوکلاز در منشأ است.

منابع

- Berberian, M. and King, G. C. (1981) Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* (18): 210-265.
- Boomeri, M., Biabangard, H., Nakashima, K., Mehran, M. and Esform, M. (2013) Occurrence and chemistry of supergene sulfide and oxide minerals in Mahour polymetal ore deposit west of Nehbandan. *Petrology* (14): 17-30 (in Persian).
- Boynton, W. V. (1985) Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies, in rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam.
- Chappell, B. W. and White, A. J. R. (1992) I- and S- type granites in the Lachlan Fold belt, *Transactions of the Royal Society of Edinburg. Earth Science* (83): 1-26.
- Chappell, B. W. and White, A. J. R. (2001) Two contrasting granite type: 25 years later. *Australian Journal of Earth Science* (48): 489-499.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* (347): 662-665.
- Dela Roche, H., Leterrier, J., Grande Claude, P. and Marchal, M. (1980) A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major element analyses its relationships and current nomenclature. *Chemical Geology* (29): 183-210.
- Esform, M., Biabangard, H., Zarrinkoub, M. H., Mehran, M. and Abrahimi, V. (2012) Geochemistry and petrology of volcanic rocks in the Mahour copper deposit, northwest of Nehbandan, east of Iran. *Mineralogy and Crystallography Magazine* (20): 241-252 (in Persian).
- Gill, J. B. (1981) *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer, New York.
- Goorabjiripour, A. (2013) Final exploration report in Mahoor prospecting area, South Khorasan province, Iran). industry and mine organization of south Khorasan, Birjand, Iran (in Persian).
- Griffis, A. R., Magries, H., Abedian, N. and Behrozi, A. (1991) Explanatory text of Dehsalm (Chahvak). Geological Quadrangle Map 1:250000, No. K6, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Ishihara, S. (1977) The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology* (27): 293-305.
- Ishihara, S. (1981) The granitoid series and mineralization. *Economic Geology* (75): 458-484.
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., Farmer, L., Saadat, S. and Malekzadeh, A. (2011) Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut block, eastern Iran. *Geopersia* (1): 19-36.
- Malekzadeh, A., Heydarian, M. R., and Karimpour, M. H. (2009) Mineralization and geophysical exploration by IP/RS and ground magnetic survey in MA-I and surrounding area, Maherabad porphyry Cu-Au prospect area, east of Iran. *Journal of economic geology* (1): 1-17 (in Persian).
- Martin, H. (1994) The Archaean grey gneisses and the genesis of the continental crust: in *Archean crustal evolution*. Elsevier, Amsterdam.
- Miri Bydokhti, R., Karimpour, M. H. and Mazaheri, S. A. (2013) Geology, alteration, mineralization and petrography of subvolcanic rocks in Mahoor deposit, east of Iran. In: *Proceeding of the 5th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Mashhad, Iran* (in Persian).
- Mirzaei Rayeni, R., Ahmadi, A. and Mirnejad, H. (2012a) Mineralogy and fluid inclusions studies in the Mahour polymetal ore deposit, east of Lut block, Central Iran. *Mineralogy and Crystallography Magazine* (20): 307-318 (in Persian).
- Mirzaei Rayeni, R., Ahmadi, A. and Mirnejad, H. (2012b) The origin of ore-forming fluids in the Mahour

- polymetal ore deposit, using electron microprobe data and sulfur isotopes, east of Lut block, Central Iran. *Petrology* (10): 1-12 (in Persian.)
- Miyashiro, A. (1974) Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science* (274): 321-355.
- Moradi, M., Karimpour, M. H., Malekzadeh, A., Farmer, J. L. and Estern, C. (2012) Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Rb-Sr and Sm-Nd isotopes of Najmabad monzonitic rocks south of Gonabad. *Petrology* (11): 77-96 (in Persian).
- Pang, K. N., Chung, S., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H., Chu, C., Lee, H. and Lo, C. (2013) Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: magma genesis and tectonic implications. *Lithos* (180-181): 234-251.
- Pearce, A. J. and Parkinson, I. J. (1993) Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. *Geological Society* (76): 373-403.
- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230-249. Shiva, Nantwich.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* (25): 956-983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area (northern Turkey). *Contributions to Mineralogy and Petrology* (58): 63-81.
- Rollinson, H. R. (1993) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Science and Technical, London.
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* (97): 629-642.
- Shand, S. J. (1969) *Eruptive rocks: their genesis, composition, classification and their relation to ore deposits*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, magmatism in ocean basins. *Journal of Geological Society of London* (42): 313-345.
- Walker, J. A., Patino, L. C., Carr, M. J. and Feigenson, M. D. (2001) Slab control over HFSE depletions in Central Nicaragua. *Earth and Planetary Science Letters* (192): 533-543.
- Whalen, J. B., Currie, K. L. and Chappell, B. W. (1987) A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (95): 407-419.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* (95): 277-279.
- Wilson, M. (1989) *Igneous petrogenesis: A global tectonic approach*. Harper Collins Academic, New York.

Petrology and tectonomagmatic setting of granitoid intrusions of Mahoor area, southwest of Nehbandan

Roohollah Miri Bydokhti, Mohammad Hassan Karimpour and Seyed Ahmad Mazaheri *

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

Abstract

The Mahoor area is located, about 135 km south-west of Nehbandan in the center of Lut Block. The area comprises outcrops of Eocene volcanic and pyroclastic (Eocene) that were intruded by several intrusive rocks consist mainly of diorite as dykes and stocks. Chemical classification shows that plutonic rocks are gabbro-diorite, diorite, monzodiorite and tonalite. These granitoids are high-K calc-alkaline series and they are meta-aluminous. Magnetite suitability (1485×10^{-5} SI) mineralogical and geochemical features show that they belong to magnetite granitoid series (I type). Enrichment in LREE rather than HREE and enrichment in LILE rather than HFSE, and typical anomalies of Nb, Ta and Ti are important evidences that show the intrusions were formed in a magmatic belt of subduction zone. Eu element show negative anomaly and Eu/Eu* ratios are from 0.65 to 0.88. Negative anomaly of Eu is due to presence of plagioclase in magma source. Geochemical studies show that Mahoor granitoids are co-genetic and they formed in subduction zone and belong to calc-alkaline volcanic arc setting in active continental margins. Mineralization is present as disseminated and hydrothermal vein related to monzonite and diorite porphyry.

Key words: Petrology, Geochemistry, Subduction zone, Mahoor, Nehbandan, Lut Block

* mazaheri@ferdowsi.um.ac.ir