مجله زمین‌شناسی اقتصادی
سال 1393، شماره 1، (جلد 6)
صفحه 107 تا 135

Journal of Economic Geology
2014 No. 1 (Vol. 6)
ISSN 2008-7306

سن‌سنجی U-Pb زیرکن، ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd و پتروژنز توده‌های گرانیتوئیدی منطقه اکتشافی کجه، شمال‌باختر فردوس: شاهدی بر ماگماتیسم کرتاسه پسین در بلوک لوت

علی نجفی*[1]، محمدحسن کریم‌پور[1]، مجید قادری[2]، چارلز استرن[3]، جی لنگ فارمر[3]

1) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
2) گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
3) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه کلرادو، بولدر امریکا

دریافت مقاله: 1392/5/11، پذیرش: 1393/3/12

چکیده

توده‌های گرانیتوئیدی منطقه کجه در شمال‌باختر فردوس، با ترکیب دیوریت، مونزودیوریت، مونزونیت، مونزوگرانیت، سینوگرانیت و گرانیت، با ماهیت کالک‌آلکان و پتاسیم بالا، ویژگیهای ژئوشیمیایی عناصر کمیاب و نادر خاکی مشابه زون‌های فرورانش متعلق به تیپ I دارند. این توده‌ها اغلب مربوط به سری اکسیدان بوده و تنها یک توده مربوط به سری احیایی در منطقه برون‌زد داشته و ویژگیهایی از تیپ S را نشان می‌دهد. سه نمونه از واحدهای گرانیتوئیدی منطقه به‌روش U-Pb زیرکن سن‌سنجی شده‌اند. از نظر سنی، توده‌های نفوذی منطقه متعلق به کرتاسه پسین هستند. گرانیت پورفیری با سن 1/3 ± 84/2 میلیون سال (آشکوب سانتونین) قدیمی‌ترین توده و بعد از آن توده بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت با سن 1/4 ± 70/8 میلیون سال (آشکوب کامپانین) و جوانترین آنها، توده هورنبلند کوارتز دیوریت با سن 1± 67/9 میلیون سال (آشکوب ماستریشتین) است. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه و ϵ_{Nd} برای توده گرانیت پورفیری به‌ترتیب برابر 0/708080، 0/512129 و 7/81- است. همین نسبتها برای توده بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت 0/706125، 0/512416 و 2/55- و برای توده هورنبلند کوارتز دیوریت 0/707491، 0/512221 و 6/43- است. با توجه به مجموعه اطلاعات ژئوشیمیایی و ایزوتوپی، سه گروه سنگی با ویژگیهای متفاوت و منشأ متفاوت در منطقه قابل تمایز است. دسته اول، گرانیت پورفیری (قدیمی‌ترین توده) که احتمالاً منشأ پوسته‌ای داشته و دسته دوم مونزونیت‌ها و مونزودیوریت‌ها و دسته سوم دیوریت‌ها که احتمالاً منشأ گوشته‌ای داشته و با توجه به متفاوت بودن منشأ و عمق تشکیل و جای‌گزینی این توده‌ها، نسبتهای متفاوتی از آلایش را تحمل نموده‌اند. توده‌های نفوذی منطقه در مقایسه با دیگر توده‌های کرتاسه پسین بلوک لوت در منطقه بزمان و گزو از میزان بالاتری $(^{87}Sr/^{86}Sr)i$ برخوردار بوده و نسبت به منطقه بجستان، این میزان در سنگهای منطقه کمتر است. توده گرانیت پورفیری منطقه از نظر پتروشیمی، شباهت فراوانی به سنگهای منطقه بجستان داشته، ولی از نظر سنی حدود 10 میلیون سال قدیمی‌تر است. دو گروه دیگر توده‌های منطقه نیز از نظر ژئوشیمی و منشأ به منطقه بزمان و گزو شباهت دارند، با این تفاوت که به نظر می‌رسد میزان آلایش بیشتری را متحمل شده‌اند.

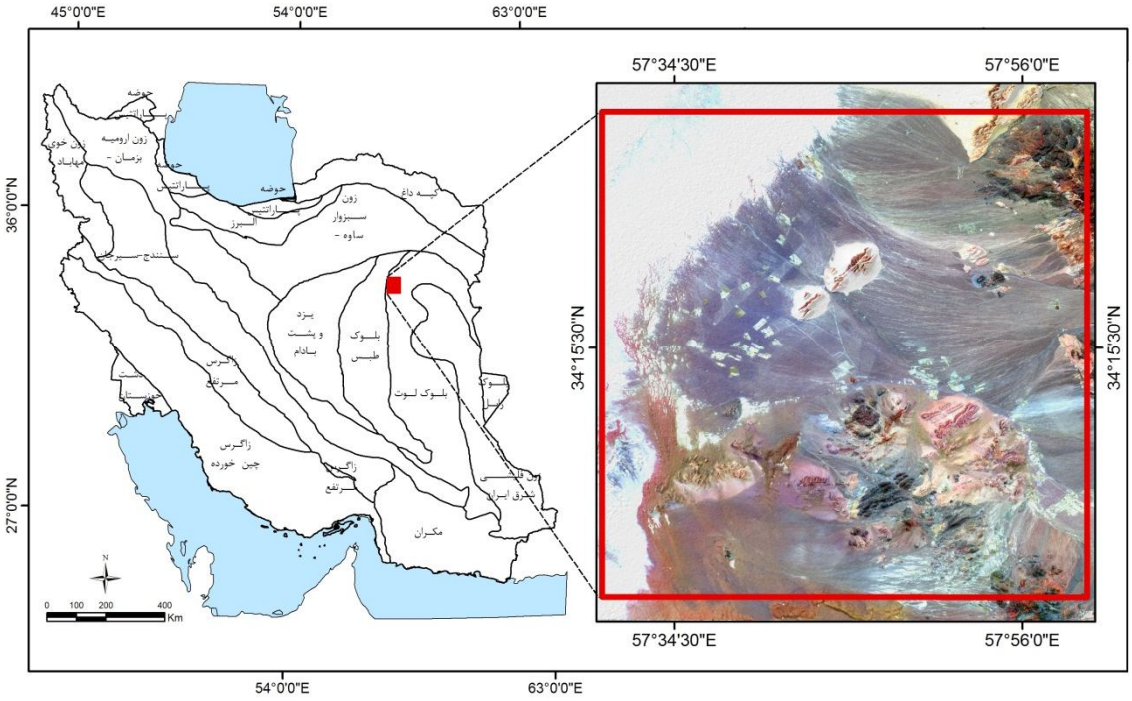
واژه‌های کلیدی: *گرانیتوئید، کرتاسه پسین، آلایش، بلوک لوت، کجه، ایران*

مقدمه

منطقه اکتشافی کجه در 45 کیلومتری شمال‌باختر فردوس، در برگه‌های زمین‌شناسی 1:250000 فردوس و 1:100000 طاهرآباد، در عرض جغرافیایی ″30 '08 °35 تا ″00 '12 °35 و طول جغرافیایی ″30 '43 °57 تا ″30 '49 °57 و از نظر تقسیمات رسوبی- ساختاری [1] در شمال بلوک لوت قرار

* مسؤول مکاتبات: a_najafi79@yahoo.com

دارد (شکل 1). با توجه به ماگماتیسم و شرایط ویژه تکتونیکی لوت که در زمانهای مختلف در این بلوک وجود داشته، نظرات مختلفی در ارتباط با تکوین زمین‌شناسی بلوک لوت ارائه شده است. برخی یک چرخه کامل کوه‌زایی از ریفت، تشکیل پوسته اقیانوسی میان بلوک لوت و افغان، فرورانش پوسته اقیانوسی، بسته شدن اقیانوس و تصادم را مطرح می‌کنند و بعضی نیز تشکیل بلوک لوت را نتیجه حرکات کششی می‌دانند [2]. از طرفی، حجم عظیمی (بیش از 50 درصد رخنمون سنگی) از این بلوک را سنگهای ماگمایی تشکیل می‌دهد (از زمان ژوراسیک میانی تا ترشیری ماگماتیسم فعال بوده است). از این رو، مطالعه تعیین سن، منشأ و ماهیت ماگماتیسم می‌تواند کمک قابل توجهی به تعیین جایگاه ژئودینامیکی منطقه نماید. از سوی دیگر، پتانسیل بالای کانی‌زاییهای فلزی و غیرفلزی همراه و یا مرتبط با ماگماتیسم، شناخت دقیق این بلوک را جهت روشن ساختن ماهیت متالوژنیکی خاور کشور ضروری می‌سازد.



شکل 1. موقعیت جغرافیایی منطقه اکتشافی کجه در بلوک لوت (تقسیم‌بندی حوضه‌های رسوبی- ساختاری از آقانباتی اقتباس شده است [1]).

روش مطالعه

مطالعات این پژوهش بر مبنای مشاهدات صحرایی، تجزیه شیمیایی نمونه‌ها و بررسیهای آزمایشگاهی در قالب تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون و کانه‌زایی در مقیاس 1:25000 در برگه کجه صورت گرفته است. تعداد 158 نمونه مورد مطالعه پتروگرافی قرار گرفت و با توجه به شواهد و روابط صحرایی، 33 نمونه با کمترین اثر آلتراسیون از توده‌های نفوذی و آتشفشانی به‌منظور آنالیز عناصر اصلی با دستگاه XRF دانشگاه فردوسی مشهد انتخاب و آنالیز شد. پس از بررسی نتایج آنالیز عناصر اصلی، 21 عدد از این نمونه‌ها برای آنالیز عناصر کمیاب و نادر خاکی به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال شد و با استفاده از دستگاه ICP-MS با حلال لیتیم متابورات/ تترابورات و اسید نیتریک مورد تجزیه قرار گرفت. 12 عدد از این نمونه‌ها، مربوط به توده‌های نفوذی است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته شده است. سه نمونه از واحدهای گرانیتوئیدی منطقه بعد از مطالعات دقیق پتروگرافی و پترولوژیکی برای سن‌سنجی به روش U-Pb انتخاب و در دانشگاه آریزونا به‌روش Laser-Ablation multi collector ICP-MS مورد سن‌سنجی قرار گرفت. نمونه‌های انتخاب‌شده برای تعیین سن به‌منظور تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک Rb-Sr و Sm-Nd به دانشگاه کلرادو در امریکا ارسال گردید که از نتایج این آنالیزها در این تحقیق استفاده شده است.

زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه، بخشی از برگه 1:100000 طاهرآباد است که طبق نقشه زمین‌شناسی تهیه شده [3] در منطقه مورد مطالعه سنگهای پرکامبرین و پالئوزوئیک پیشین رخنمون ندارند. براساس داده‌های زمین‌شناسی برگه طاهرآباد، کهن‌ترین واحد سنگی منطقه را سنگهای هم‌ارز سازند سردر، به سن کربنیفر، تشکیل می‌دهد. سازند جمال، به سن پرمین و سازندهای سرخ شیل و شتری، مربوط به تریاس، از دیگر واحدهای سنگ‌چینه‌ای شناخته‌شده در منطقه هستند که به‌همراه واحدهای K22 و K23 به سن کرتاسه؛ و واحد سنگ‌چینه‌ای معادل کنگلومرای کرمان، کرتاسه تا پالئوسن، مجموعه واحدهای رسوبی منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. افزون بر این، حدود دو سوم منطقه دارای پوشش نهشته‌های کواترنر است که رسوبات رودخانه‌ای، تپه ماسه‌های بادی و پهنه‌های نمکی- رسی را شامل می‌شود. در ارتباط با ماگماتیسم منطقه، با توجه به این‌که در کنگلومرای هم‌ارز سازند کرمان، قطعات سنگهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی مشاهده نشد، از این‌رو، نخستین تکاپوهای ماگمایی در این ورقه به بعد از تشکیل این کنگلومراها نسبت داده شده است. طبق بررسیهای صورت‌گرفته در مقیاس 1:25000 از منطقه مورد مطالعه، قدیمی‌ترین واحد سنگی رخنمون‌یافته، واحدهای رسوبی کرتاسه است که عمدتاً از سنگ‌آهک تشکیل‌شده و در بخش خاوری منطقه، رخنمون گسترده‌ای دارند. واحدهای رسوبی کرتاسه، شامل دو واحد هستند: واحد اول با کنگلومرا، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک از واحد دوم که در این منطقه عمدتاً سنگ‌آهکهای لایه‌ای و توده‌ای سرشار از فسیل و سنگ‌آهکهای دوباره حمل‌شده می‌باشند، قابل تمایز است.

عمده سنگهای رخنمون‌یافته در گستره برگه 1:25000 کجه، مرتبط با فعالیتهای آتشفشانی است (شکل 2). این واحدها، طیف ترکیبی از بازالت تا ریولیت دارند و از نظر نوع فعالیت آتشفشانی نیز انواع گدازه، پیروکلاستیک، توف، لاپیلی‌توف، لاپیلی‌استون، توف برشی و ایگنمبریت در این گستره مشاهده می‌شود. در این منطقه، براساس بررسیهای صحرایی، مطالعات پتروگرافی و نتایج حاصل از آنالیزهای شیمیایی، تعداد 28 واحد آتشفشانی مختلف شناسایی شده‌اند. کهن‌ترین واحد آتشفشانی رخنمون‌یافته در این منطقه، شامل لاپیلی‌استون و توف برشی با ترکیب آندزیتی است. براساس ارتباطات صحرایی، گسترش، نوع فعالیت آتشفشانی و طیف ترکیبی به‌نظر می‌رسد می‌توان این 28 واحد آتشفشانی را به حداقل 3 دوره فعالیت ولکانیسم در منطقه نسبت داد که هر مرحله فعالیت (به غیر از چرخه اول که واحدهای آغازین چرخه آن در خارج از محدوده مورد بررسی است)، با طیف ترکیبی اسیدی (داسیت، ریوداسیت و ریولیت) آغاز و به‌تدریج ترکیب به‌سمت سنگهای حدواسط تا بازیک (لاتیت، آندزیت، آندزیت- بازالت) پیش می‌رود و طی آن فعالیت آتشفشانی به شکل انفجاری، سنگهای آذرآواری و گدازه گسترش‌یافته و گاه همراه با ورود مقداری رسوب (چرت و کربنات) است و بر روی آنها، یک واحد کنگلومرایی که از قطعات سنگهای آتشفشانی و رسوبی پیشین تشکیل یافته قرار می‌گیرد و در انتها، هر مرحله فعالیت آتشفشانی با یک گدازه بازالتی و یا آندزیتی خاتمه می‌یابد. وجود واحدهای توفی با ترکیب ریولیتی و میان‌لایه‌هایی از چرت و توف‌های آهکی- کربناته، نشانگر فعالیت‌های آتشفشانی در حوضه دریایی است. این سنگها، دگرسانیهای متعددی دارند و سنگ میزبان کانه‌زاییهای مشاهده‌شده در این منطقه هستند.

11 توده نفوذی در این منطقه شناسایی شده است که به‌طور نیمه‌عمیق تا عمیق و به‌شکل استوک‌های کوچک تا متوسط و آپوفیزهای انگشتی، رخنمون‌یافته و ترکیب حدواسط تا اسیدی و تنوع سنگی دیوریت، مونزودیوریت، مونزونیت، مونزوگرانیت، سینوگرانیت و گرانیت دارند. این توده‌ها بافت پورفیری و همچنین بافت گرانولار دارند و دارای مقادیر مختلفی کانیهای مافیک هورنبلند، بیوتیت و پیروکسن هستند. این توده‌ها دگرسانیهای مختلفی با شدتهای متفاوت دارند. دگرسانیهای پروپیلیتیک، آرژیلیک، کوارتز- سریسیت، سیلیسی و در یک مورد اندواسکارن در آنها مشاهده می‌شود و گاه واجد پیریت± کالکوپیریت پراکنده هستند (شکل 2).

وضعیت ساختاری منطقه

گسلهای منطقه عمدتاً در یک سامانه گسلهای راستالغز (strike slip) و پلکانی یا نردبانی (enechlon) در دستگاه برشی ساده (simple shear) و رژیم کینماتیکی همگرا شکل گرفته‌اند. گسل برشی اصلی (first order fault) و گسلهای موازی با آن در میان سامانه یادشده به‌طور عمده روند باختر-

شمال‌باختری تا خاور- جنوب‌خاوری (به‌طور متوسط – N80 85W) داشته و مؤلفه اصلی حرکت آن راستالغز چپ‌رو است. در اثر جابه‌جایی گسلهای برشی و گسلهای موازی با آن، سامانه گسلهای مرتبط با پهنه برشی به‌صورت شکستگیهای مزدوج P',P,R',R (conjugate) در دو سری گسل اصلی شکل گرفته، به‌طوری‌که در منطقه مورد مطالعه، حداقل تا نسل سوم توسعه یافته‌اند و در برخی موارد در اثر پیش‌روی شکستگیهای نسلهای مختلف در طی مراحل دگرشکلی، تشخیص نسل شکستگیها را مشکل ساخته است. تکامل سامانه شکستگی Riedal موجب گسترش گسلهایی با حرکات گوناگون راستالغز راست‌رو (dextral strike slip fault) و راستالغز چپ‌رو (synstral strike slipe fault) در میان قطعات گوناگون P',P,R',R شده است [3].

دگرسانی

سنگهای آتشفشانی منطقه کجه، دگرسانیهای متعددی نشان می‌دهند که با توجه به ارتباط آنها با توده‌های نفوذی، گسلها و نفوذپذیری و واکنش‌پذیری سنگهای منطقه (آذرآواری و سنگ‌آهک) و همچنین برهم‌پوشی این عوامل، از شکل، گسترش و زون‌بندی مختلفی برخوردارند. دگرسانی پروپیلیتیک در این منطقه بسیار گسترده است و با سه شدت شدید، متوسط و ضعیف مشاهده می‌شود. مجموعه کانیهای مشاهده‌شده در این زون شامل کلریت (عمدتاً غنی از آهن)، خانواده اپیدوت (اپیدوت، زوئزیت و کلینوزوئزیت)، کلسیت، پیریت و مقداری کانیهای رسی است. اغلب واجد رگه‌چه‌های اپیدوت و کلریت و اپیدوت به‌صورت پرکننده حفرات است. دست‌کم سه دسته دگرسانی مرتبط با کانه‌سازی رگه‌ای، پورفیری و اسکارنی‌شدن در منطقه قابل مشاهده است (شکل 3).

دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی رگه‌ای: مجموعه زون‌های دگرسانی همراه با کانی‌سازی رگه‌ای که عمدتاً هم‌روند با گسلهای اصلی منطقه (زون‌های گسلی رحیمی و کجه)، هستند که با توجه به نفوذپذیری سنگ دیواره (گدازه و یا واحد آذرآواری) عمود بر روند رگه‌ها، زون‌بندی نشان می‌دهند. این دگرسانیها شامل دگرسانی سیلیسی- اکسید آهن (±کلریت ±سرسیت) در بلافصل رگه‌ها، کلریت- سیلیسی، آرژیلیک- سیلیسی- کربناته و سیلیسی است. در تداخل این دگرسانی با دگرسانی اطراف توده‌های نفوذی، بر شدت دگرسانیهای سیلیسی، سریسیتی و همچنین کلریتی افزوده می‌شود (شکل 3).

دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی پورفیری: مجموعه دگرسانیهای تیپ پورفیری با دو گستره جداگانه در باختر و خاور منطقه به‌ترتیب همراه با توده‌های نفوذی مونزونیتی- دیوریتی و توده گرانیتی در سنگهای آتشفشانی مشاهده می‌شوند و شامل زون‌های دگرسانی کوارتز- سریسیت- پیریت، آرژیلیک- کلریت، کلریت- سیلیسی، پروپیلیتیک، آرژیلیک- سیلیسی- کربناته و کربنات-کلریت می‌باشند. همچنین گاه در سنگهای توفی دانه‌ریز، هورنفلس با مجموعه کانیهای متغیر (اپیدوت- گارنت، پیروکسن- گارنت، بیوتیت- گارنت و کلریت- تورمالین) تشکیل شده است (شکل 3).

اسکارنی‌شدن: دگرسانی نوع اسکارنی که رخنمونهای کوچکی در برون‌زدهای منفرد در بخش خاوری و خاور مرکز منطقه دارد و به‌ترتیب در سنگ‌آهک و توف کربناته که در مجاورت توده‌های نفوذی قرار گرفته‌اند، رخ داده است. مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی (میکروسکپی، XRD و ژئوشیمی) صورت‌گرفته، مشخص نمود که این اسکارن‌ها از نوع کلسیمی بوده و کانی کلسیت، کانی اصلی کربناته تشکیل‌دهنده آنهاست. کانیهای اصلی این دگرسانی عبارتند از کلسیت، دولومیت، دیوپسید، اوژیت، گارنت، ولاستونیت و وزوویانیت و همچنین رگه‌های درشت بلور کلسیت و ولاستونیت (شکل 3).

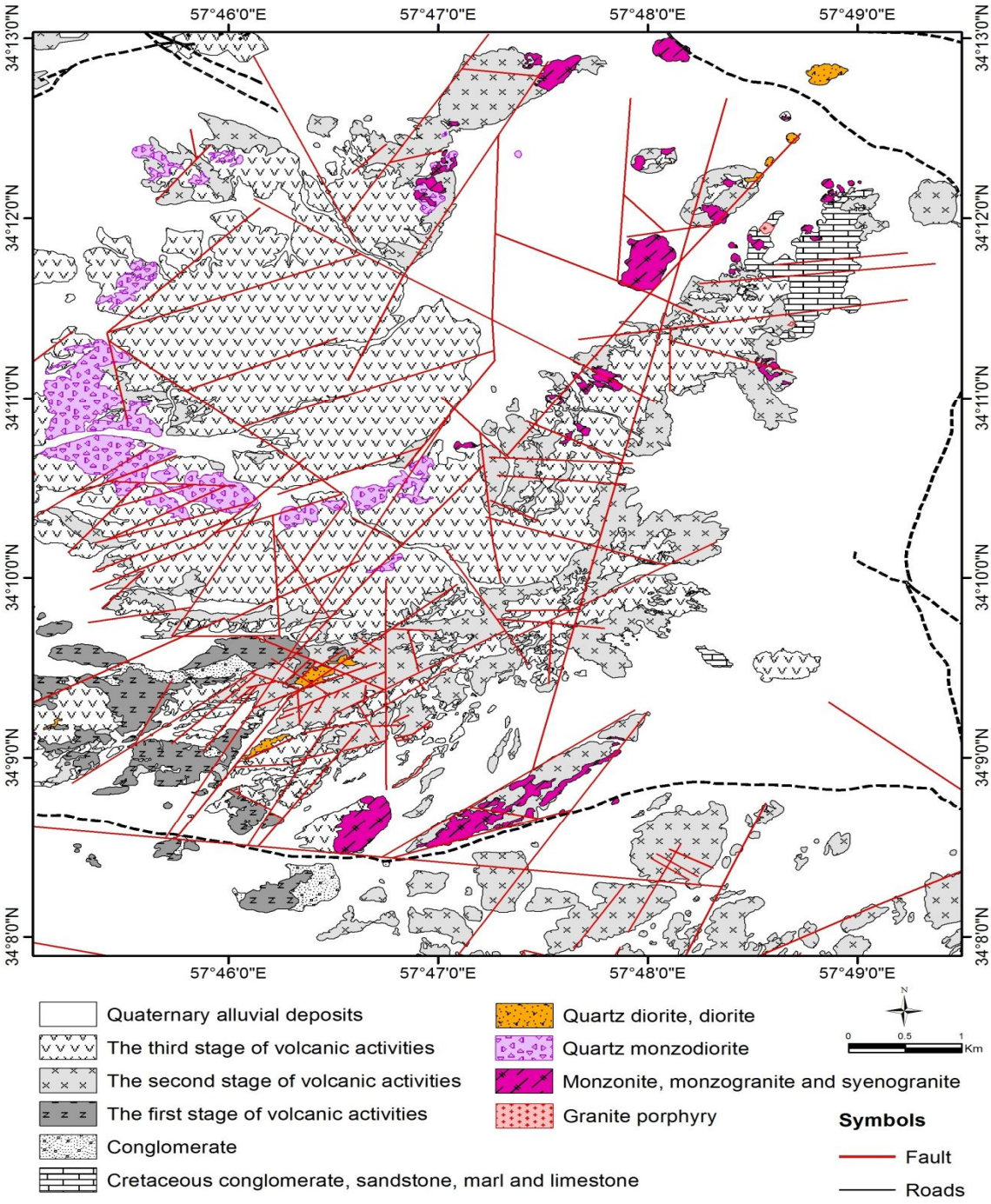
کانه‌زایی

کانی‌سازی در منطقه کجه با توجه به مطالعات و شواهد صحرایی و میکروسکپی و ژئوشیمی به سه شکل رخ داده است (شکل 4):

1- کانی‌سازی رگه‌ای: تعداد 6 رگه کانه‌دار (ناپیوسته) که برون‌زدهای متعدد و ابعاد مختلف دارند که اغلب هم‌روند گسلهای اصلی منطقه هستند.

2- کانی‌سازی تیپ پورفیری: کانه‌زایی دانه‌پراکنده وابسته به توده‌های مونزونیت- دیوریت پورفیری (کانی‌سازی پورفیری 1) و کانه‌زایی دانه‌پراکنده وابسته به توده گرانیت پورفیری (کانی‌سازی پورفیری 2).

3- کانی‌سازی تیپ اسکارن: در دو برون‌زد مختلف در شمال- خاور (اسکارن 1) و خاور مرکز منطقه (اسکارن 2).



شکل 2. نقشه ساده‌شده 1:25000 منطقه اکتشافی کجه

کانی‌سازی رگه‌ای: کانی‌سازی رگه‌ای مس در این منطقه، به‌صورت رگه‌های کوارتزی با روند عمومی شمال‌خاور-جنوب‌باختر (تقریباً N50E) و روند فرعی شمال‌باختری-جنوب‌خاوری (رگه شماره 6) و شیب قائم تا نزدیک به قائم، در راستای گسل رحیمی (از نوع گسل عادی با راستای شمال‌خاوری- جنوب‌باختری، به طول 3/5 کیلومتر و عرض 50 متر و شیبی معادل 85-80 درجه به‌سمت شمال‌باختری) و در سنگهای ولکانیکی- پیروکلاستیک دگرسان رخ داده

است. رخنمون متعدد رگه‌ها به‌شکل پراکنده و در ابعاد مختلف با عرض چند سانتی‌متر تا 4 متر و طول چند متر تا چند کیلومتر است. اما به‌طورکلی، رگه‌های حاوی کانی‌سازی با عرض بیش از 50 سانتی‌متر به 6 دسته رگه قابل تمایز هستند. وجود کنده‌کاریهای قدیمی متعدد در امتداد رگه‌ها و بهره‌برداریهای اخیر، نشانگر جذابیت و امتیاز ویژه کانی‌سازی در این منطقه است.

کانی‌سازی عموماً به‌شکل پرکننده فضای خالی، جعبه‌ای، جانشینی، پراکنده در کوارتز، برشهای هیدروترمالی- گسلی در داخل رگه، کلوفرم و رگه‌چه‌های تأخیری است. کانی‌سازی اولیه براساس مطالعات صحرایی و مقاطع نازک- صیقلی شامل اسپکیولاریت، مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت (به مقدار جزئی)، گالن، اسفالریت، کانیهای سولفوسالت (ادخال در کالکوپیریت) و طلا (آزاد و الکتروم) است. کانی‌سازی ثانویه که ناشی از اکسیداسیون است، شامل کالکوزیت، کوولیت، دیژنیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، فیروزه، آتاکامیت، همی‌مورفیت و اکسیدهای آهن (گوتیت، هماتیت، لیمونیت و غیره) است. کانیهای گانگ اصلی کوارتز (شانه‌ای، دندان‌سگی) و آمتیست است که به‌همراه کلسدونی، کلریت (غنی از آهن)، اپیدوت، فلدسپار، سریسیت، کانیهای رسی و کانیهای کربناته (کلسیت، سیدریت، سروزیت) نیز در بخشهایی از آن مشاهده می‌شود.

کانی‌سازی پورفیری 1: همراه با توده‌های نفوذی مونزونیت- دیوریت پورفیری در واحدهای آتشفشانی به‌شکل دانه‌پراکنده و به‌صورت محدود رگه- رگه‌چه، در زون‌های دگرسانی کوارتز- سریسیت- پیریت و آرژیلیک- کلریت رخ داده است. پاراژنز مینرالی مشاهده‌شده در بخش دانه‌پراکنده ساده و شامل پیریت، کالکوپیریت، به‌ندرت مگنتیت به‌صورت اولیه و اکسیدهای آهن، کالکوزیت و به‌ندرت مالاکیت به‌صورت ثانویه است. کانیهای تورمالین و رگه‌چه‌های کوارتز- گارنت در برخی رخنمونهای توده مونزونیت- دیوریت پورفیری در این کانی‌سازی مشاهده می‌شود. در این بخش، نقشه کانی‌سازی در مقیاس 1:5000 تهیه شده است. زون‌های کانی‌سازی برحسب پراکندگی کانیهای سولفیدی و میزان اکسید آهن دسته‌بندی شده‌اند و بیشترین مقدار آن منطبق بر زون کوارتز- سریسیت- پیریت است.

کانی‌سازی پورفیری 2: همراه با توده گرانیت پورفیری که اغلب در واحد آتشفشانی ریولیت پورفیری رخ داده است، همراه با سیلیسی شدن شدید در سنگها به‌شکل رگه- رگه‌چه، رگه و زون‌های سیلیسی متعدد است. کانی‌سازی به‌شکل دانه‌پراکنده و استوک‌ورک است. زون کوارتز- سریسیت- پیریت، زون اصلی کانی‌سازی است و به‌طور محدودتر، کانی‌سازی همراه با زون آرژیلیک- کلریت و سیلیسی مشاهده می‌شود. پاراژنز مینرالی شامل پیریت و به‌ندرت کالکوپیریت به‌صورت اولیه و اکسیدهای آهن به‌صورت ثانویه است. رگه‌چه‌های استوک‌ورک کوارتز- پیریت و کوارتزی در زون کوارتز- سریسیت- پیریت، مشاهده می‌شود. در نقشه کانی‌سازی با مقیاس 1:5000 تهیه شده از این بخش، زون‌های کانی‌سازی برحسب پراکندگی کانیهای سولفیدی به چهار رده کمتر از 0/5، بین 0/5 تا 1، بین 1 تا 2 و بین 2 تا 3 درصد سولفید و برحسب میزان اکسید آهن به سه رده کمتر از 1، بین 1 تا 2 و بین 2 تا 3 درصد اکسید آهن، قابل تقسیم‌بندی هستند که بیشترین میزان سولفید و اکسید آهن، منطبق بر بخشهایی از زون کوارتز- سریسیت- پیریت است که در مجاورت توده‌های نفوذی با دگرسانی کوارتز- سریسیت و یا کلریت- سیلیسی قرار گرفته‌اند (شکل 4).

اسکارن 1: این کانی‌سازی به‌شکل اسکارن مجاورتی به دو صورت اندواسکارن و اگزواسکارن مشاهده می‌شود. زون اندواسکارن در توده نفوذی کوارتز دیوریت پورفیری مشاهده می‌شود و کانیهای اسکارنی دیوپسید، تیتان- اوژیت، وزوویانیت و رگه‌چه‌های کوارتز- دیوپسید مشاهده می‌شود. زون اگزواسکارن در واحد سنگ‌آهک رخ داده و از نوع کلسیمی و اکسیدان (حضور گارنت) است.

اسکارن 2: این کانی‌سازی به‌صورت اسکارن دور از منشأ در واحد توف کربناته رخ داده است، لکن در مجاورت آن رخنمون کوچکی از یک زون کوارتز- سریسیت- پیریت که در واحد ریولیت پورفیری رخ داده، قرار گرفته است. کانی‌شناسی اسکارن در این بخش، حاوی کلسیت، گارنت، دیوپسید، وزوویانیت، ولاستونیت، کوارتز، کلریت و رگه‌های کلسیت است.

لازم به ذکر است در مطالعات میکروسکپی و آنالیزهای ژئوشیمیایی مربوط به رخنمونهای سطحی هیچ‌کدام از

کانی‌سازیهای اسکارنی ذکر شده، کانی فلزی و آنومالی امیدبخشی مشاهده نشده است.

پتروگرافی توده‌های نفوذی

همان‌طور که اشاره شد 11 توده نفوذی در منطقه تفکیک شده است. این توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق تا عمیق، برحسب ترکیب سنگی در چهار دسته 1- کوارتز دیوریت، دیوریت 2- مونزونیت، مونزوگرانیت، سینوگرانیت 3- کوارتز مونزودیوریت 4- گرانیت پورفیری قابل بررسی هستند (شکل 2). این توده‌ها برحسب تغییر در کانیهای کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار و فنوکریست‌های فرومنیزین، از یکدیگر تفکیک شده‌اند. کانیهای فنوکریست عموماً آلکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و کانیهای مافیک هستند. کانیهای فرعی مشاهده شده در این توده‌ها شامل آپاتیت، زیرکن و در مواردی اسفن است که به شکل ادخال در بیوتیت، هورنبلند و پلاژیوکلاز مشاهده می‌شود. کانی تورمالین در برخی از رخنمونهای توده‌های مونزونیتی- مونزوگرانیتی مشاهده می‌شود. کانیهای اپاک نیز شامل مگنتیت (به غیر از توده گرانیت پورفیری)، پیریت و گاه کالکوپیریت است (جدول 1).

1- گرانیت پورفیری: این توده به‌شکل استوک و آپوفیزهایی کوچک به رنگ سفید تا صورتی مشاهده می‌شود و از نظر ترکیبی، آلکالی‌گرانیت است. این توده بافت پورفیری در زمینه دانه‌ریز تا بسیار دانه‌ریز دارد. در حدود 25% فنوکریست دارد که اغلب کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و نیز بیوتیت است. کانی فرعی مشاهده‌شده زیرکن است. این توده فاقد کانی مافیک هورنبلند است و همچنین مگنتیت در آن حضور ندارد. کانی مافیک عمده آن پیریت است که بین 1-2% می‌باشد. این توده، دگرسانی کوارتز- سریسیت شدید، پیریت پراکنده به‌همراه استوک‌ورک کوارتز- اکسید آهن و رگه‌چه سریسیتی نشان می‌دهد (جدول 1).

2- مونزونیت، مونزوگرانیت، سینوگرانیت: بافت این سنگها، پورفیری تا گرانولار است و بافتهای فرعی گرانوفیر، میرمکیت، گرافیکی، راپاکیوی، پرتیت و آنتی‌پرتیت نیز در آنها گسترش دارد. این سنگها محتوی 25-30% پلاژیوکلاز، 35-40% آلکالی‌فلدسپار، 5-25% کوارتز و 7-15% کانیهای مافیک بیوتیت، هورنبلند، کلینوپیروکسن و گاه تورمالین هستند. کانیهای فرعی اسفن، آپاتیت و زیرکن می‌باشد. اپاک‌های مگنتیت و پیریت در آنها مشاهده می‌شود. این توده‌ها معمولاً به مجموعه پروپیلیتیک و کلریتی- سریسیتی- کربناتی دگرسان شده‌اند (جدول 1).

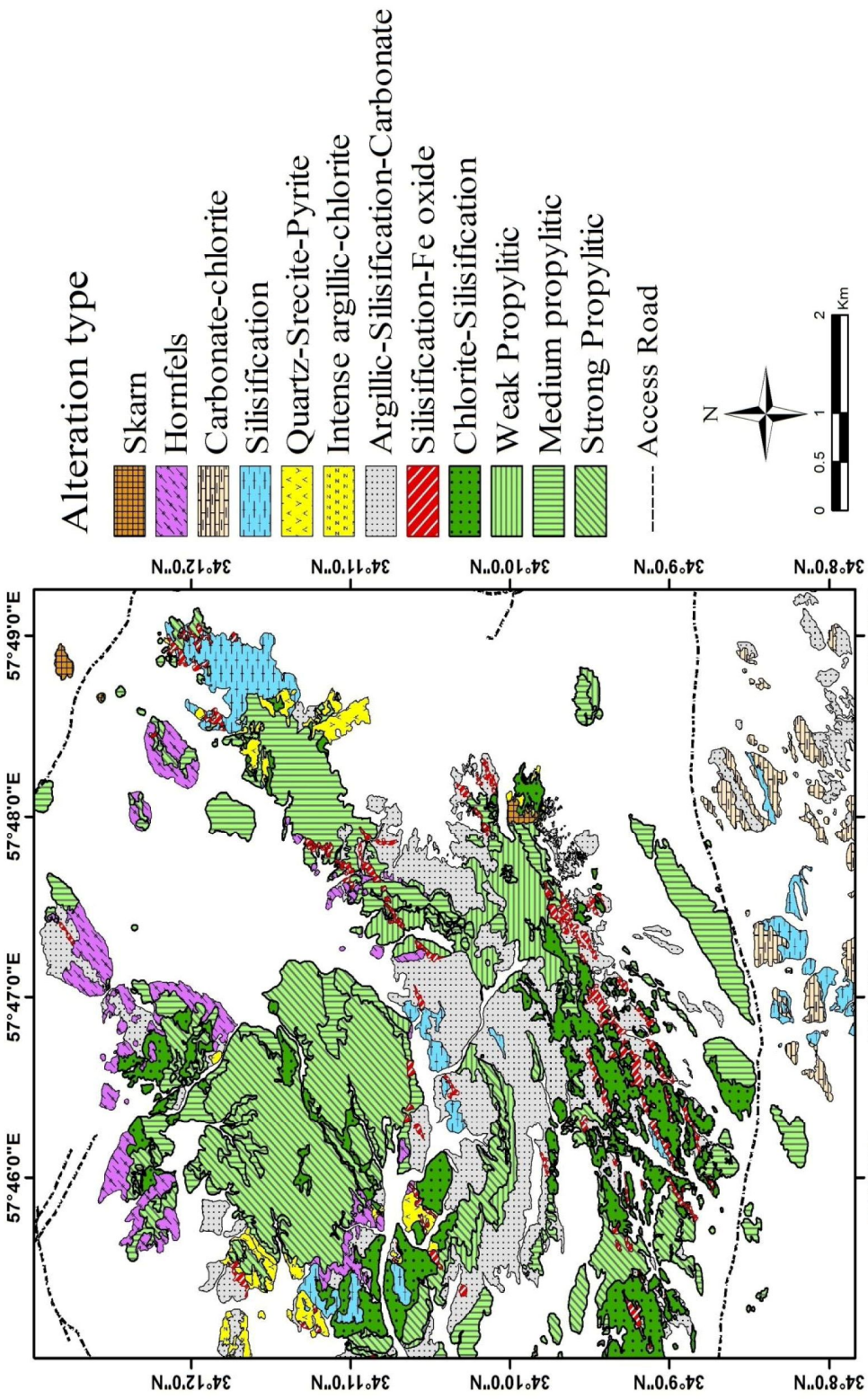
3- کوارتز مونزودیوریت: این توده‌های نفوذی اغلب بافت گرانولار درشت‌بلور (2-8 میلی‌متر) را دارا هستند و گاه بافت پورفیری در زمینه دانه‌ریز با 40% فنوکریست دارند. بافتهای فرعی تارتن، میرمکیتی و گرافیکی در آنها مشاهده می‌شود. این سنگها از 35-40% پلاژیوکلاز، 8-15% آلکالی‌فلدسپار، 10-15% کوارتز و 10-35% کانیهای مافیک هورنبلند، پیروکسن و بیوتیت تشکیل شده‌اند. کانیهای فرعی شامل آپاتیت، اسفن و زیرکن است. کانیهای اپاک شامل مگنتیت و پیریت و گاه کالکوپیریت است. این توده‌ها دگرسانی پروپیلیتیک، آرژیلیک، سیلیسی- سریسیت و سیلیسی- سریسیت- پیریت نشان می‌دهند (جدول 1).

4- کوارتز دیوریت، دیوریت: بافت این سنگها، پورفیری با زمینه دانه‌ریز و به‌صورت فرعی گلومروپورفیری است. در حدود 30-50% فنوکریست در ابعاد 1-8 میلی‌متر دارند که بیشتر پلاژیوکلاز (25-30%)، آلکالی‌فلدسپار (5-10%) و کانیهای مافیک (10-15%) بیوتیت، هورنبلند و کلینوپیروکسن است. کانیهای فرعی مشاهده شده آپاتیت و گاه زیرکن می‌باشند. کانی اپاک عمدتاً مگنتیت و گاه پیریت و کالکوپیریت است. آلتراسیون‌های مشاهده شده در این توده‌ها شامل پروپیلیتیک، کلریتی، سریسیتی- رسی و گاه گارنت- کربنات و اندواسکارن است (جدول 1).

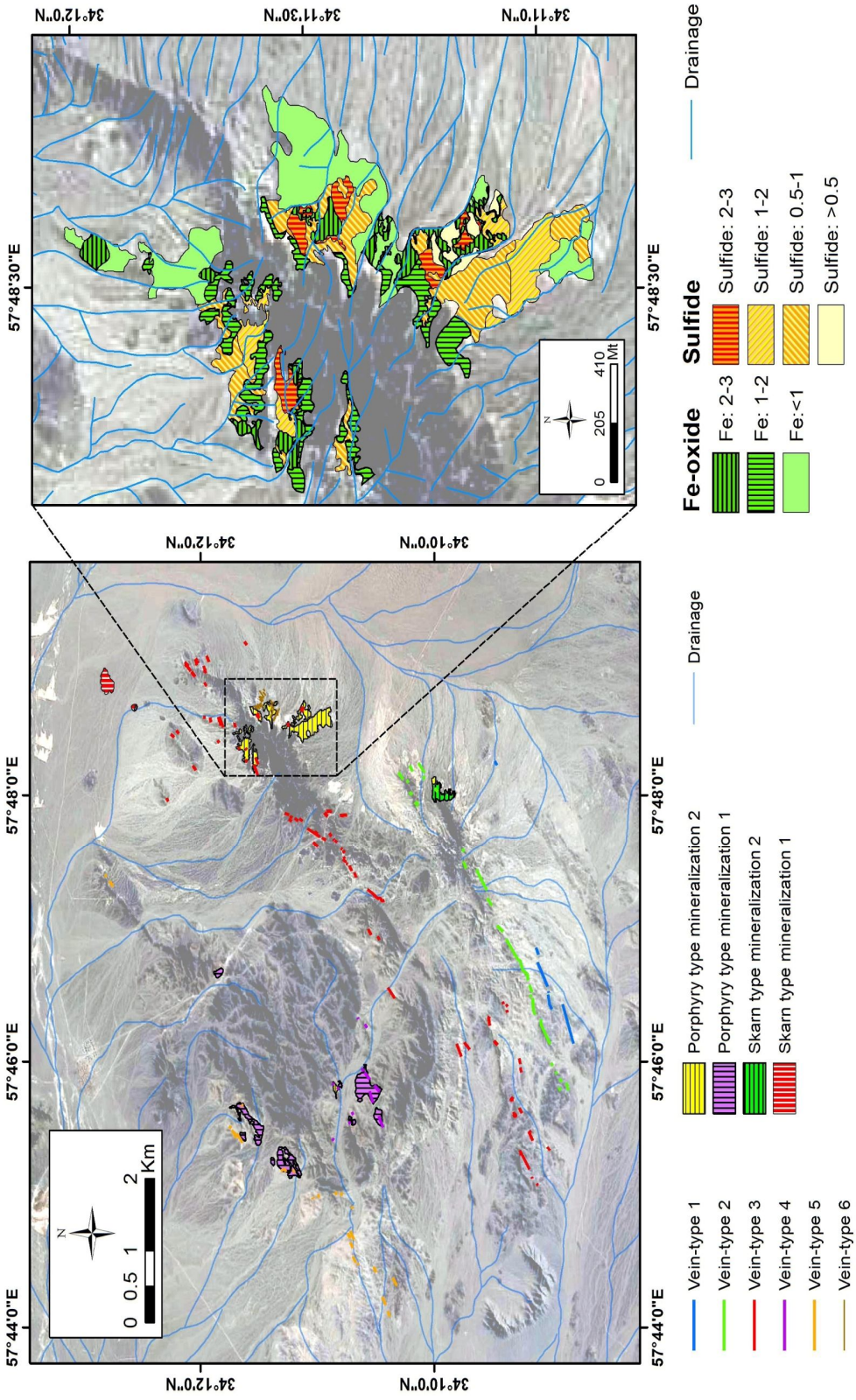
ژئوشیمی توده‌های نفوذی

عناصر اصلی

براساس نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی (اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی و کمیاب) که در جدول 2 آمده است و به‌منظور نامگذاری سنگها براساس اکسیدهای اصلی توده‌های نفوذی از نمودار Na_2O+K_2O در مقابل SiO_2 استفاده شده است [4]. طبق طبقه‌بندی میدل‌موست، توده‌های نفوذی منطقه در گستره گرانیت، گرانودیوریت، کوارتزمونزونیت، مونزونیت، مونزودیوریت و دیوریت قرار می‌گیرند (شکل 5). نکته قابل توجه، میزان بالای SiO_2 (بیش از 70 درصد وزنی) و مقدار پایین Na_2O (کمتر از 0/5 درصد وزنی) در نمونه‌های مربوط به گرانیت پورفیری است که آن را از دیگر مجموعه‌های سنگی مجزا کرده است.



شکل ۳. نقشه ساده شده آلتراسیون منطقه اکتشافی کجه



شکل ۴. بخشی از نقشه ساده شده کانه‌زایی منطقه اکتشافی کجه (مقادیر سولفید و اکسید آهن به درصد است).

جدول 1. خلاصه پتروگرافی گرانیتوئیدهای محدوده اکتشافی کجه.

Group	Name	Lithology	Mineral assemblage
Diorite	Dio1	Qtz diorite porphyry	Plg+Qtz+Cpx+Kfs+(Bt)+Mt+Ap
	Dio2	Cpx diorite porphyry	Plg+Cpx+Tur+(Kfs)+(Qtz)+Mt+Ap+Sphn
	Dio3	Hbld qtz diorite porphyry to qtz monzodiorite porphyry	Plg+Hbl+Kfs+Qtz+(Cpx)+Mt+Py+Ap
Monzodiorite	Mzd1	Cpx hbld qtz monzodiorite-qtz diorite	Plg+Kfs+Cpx+Hbld+Qtz+Mt+Py+Ap+Zrn
	Mzd2	Qtz monzodiorite to qtz monzonite porphyry	Plg+Kfs+Qtz+Hbld+Mt+Py+Ap+Zrn+Sphn
Monzonite and Monzogranite	Mz1	Bio Hbld Monzogranite	Plg+Kfs+Qtz+Bt+Hbl+Tur+Py+Mt+Zrn+Ap
	Mz2	Hbld Monzonite porphyry	Plg+Kfs+Hbl+Qtz+Bt+Tur+Mt+Py+Zrn+Ap
	Mz3	Cpx bio hbld monzogranite porphyry	Plg+Kfs+Qtz+Cpx+Bt+Hbl+Tur+Mt+Zrn+Ap+Sphn
	Mz4	Hbld cpx monzonite porphyry to qtz diorite porphyry	Plg+Qtz+Kfs+Hbld+Cpx+Mt+(Py)+Zrn+Ap+Sphn
Granite	Gr	Light pink to white bio granite	Kfs+Qtz+Plg+Bt+Py+Zrn

Mineral abbreviations: Ab, Albite; Act, Actinolite; Alu, Alunite; Ap, Apatite; Aug, Augite; Bt, Biotite; Cal, Calcite; Chl, Chlorite; Clm, Clay minerals; Cpy, Chalcopyrite; Cpx, Clinopyroxene; Dio, Diopside; Ep, Epidote; Hbl, Hornblende; Hem, Hematite; Kfs, K–feldspar; Mt, Magnetite; Plg, Plagioclase; Py, Pyrite; Qtz, Quartz; Rt, Rutile; Schl, Schorl; Ser, Sericite; Sphn, Sphene; Tur, Tourmaline; Zrn, Zircon, Ves, Vesuvianite.

ادامه جدول 1. خلاصه پتروگرافی گرانیتوئیدهای محدوده اکتشافی کجه

Group	Name	Alteration	Alteration assemblage
Diorite	Dio1	Endo-Skarn	Dio, Aug, Ves, Qtz
	Dio2	Medium Propylitic	Schl, Ser,Qtz, Gar, Chl, Ep, Cal, Clm
	Dio3	Silicification-Weak Propylitic	Si, Qtz, Chl, Cal, Clm, Ser
		Argillic-Silicification-Carbonate	Clm, Si, Cal, Chl, Sre, Qtz
Monzodiorite	Mzd1	Medium propylitic	Chl, Cal, Clm, Ser, Hem
	Mzd2	Silicification-Weak Propylitic	Si, Qtz, Chl, Clm, Ser
		Qtz-Sericite	Qtz, Ser, Clm
		Quartz-Sericite-Pyrite	Qtz, Ser, Py, Lim
		Strong propylitic (Garnet veinlet)	Ep, Clz, Cal, chl, Qtz, Gar, Dio, Act
		Medium propylitic	Chl, Cal, Clm, Ser, Hem
		Chlorite-Silicification	Chl, Si, Py, Qtz
Monzonite and Monzogranite	Mz1	Medium propylitic	Chl, Cal, Clm, Ser, Hem
		Medium Propylitic-Sericite	Schl, Ser, Mus, Qtz, Gar, Chl, Ep, Clm
		Propylitic-Sericite	Chl, Ser, Cal, Ep, Schl
	Mz2	Medium propylitic	Chl, Cal, Clm, Ser, Hem
		Propylitic-Sericite	Chl, Ser, Cal, Ep, Schl
	Mz3	Propylitic-Sericite	Chl, Ser, Cal, Ep, Schl
		Medium propylitic	Chl, Cal, Clm, Ser, Hem
	Mz4	Medium propylitic	Chl, Cal, Clm, Ser, Hem
Granite	Gr	Qtz-Sericite	Qtz, Ser, Clm

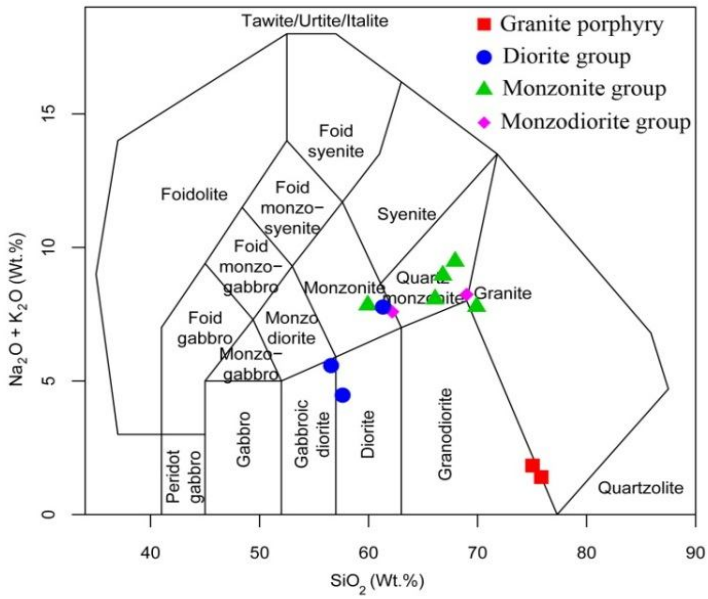
Mineral abbreviations: Ab, Albite; Act, Actinolite; Alu, Alunite; Ap, Apatite; Aug, Augite; Bt, Biotite; Cal, Calcite; Chl, Chlorite; Clm, Clay minerals; Cpy, Chalcopyrite; Cpx, Clinopyroxene; Dio, Diopside; Ep, Epidote; Hbl, Hornblende; Hem, Hematite; Kfs, K–feldspar; Mt, Magnetite; Plg, Plagioclase; Py, Pyrite; Qtz, Quartz; Rt, Rutile; Schl, Schorl; Ser, Sericite; Sphn, Sphene; Tur, Tourmaline; Zrn, Zircon, Ves, Vesuvianite.

جدول 2. نتایج آنالیز عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی گرانیتوئیدها (از چپ به راست سن نسبی کم می‌شود).

Sample	NKj-219	NKj-234	NKj-12	NKj-15	NKj-252	NKj-257
Lon.	**57/8116**	**57/8094**	**57/8133**	**57/8114**	**57/7689**	**57/7510**
Lat.	**34/1903**	**34/1987**	**34/2131**	**34/2075**	**34/1510**	**34/1522**
SiO_2	74/56	73/99	55/53	56/81	60/33	67/16
TiO_2	0/32	0/36	0/64	0/91	0/63	0/45
Al_2O_3	20/37	20/18	15/03	14/33	17/98	14/03
FeOt	0/84	0/98	9/69	8/55	4/25	4/48
MnO	0	0/02	0/07	0/15	0/12	0/07
MgO	0/11	0/43	3/19	4/02	2/79	1/35
CaO	0/59	0/68	8/27	9/2	4/47	1/79
Na_2O	0/26	0/44	3/16	3/22	3/46	1/34
K_2O	1/12	1/37	1/32	1/19	4/19	8/03
P_2O_5	0/14	0/15	0/27	0/21	0/16	0/15
Total	98/31	98/6	98/17	98/59	98/38	98/89
Ba	116	113	641	275	481	778
Rb	37/6	39	57/8	41/7	168/4	407/1
Sr	1314/6	1318/4	758/1	468/7	542/6	144/3
Zr	95/2	100	210/8	147/8	132/5	186/2
Nb	12	11/9	6/3	13/1	7/1	16/1
Ga	14/3	14/9	15/4	20/1	19/1	16/3
Rb/Sr	0/03	0/03	0/08	0/09	0/31	2/82
Rb/Ba	0/32	0/35	0/09	0/15	0/35	0/52
La	27/5	26/5	19/4	29/9	19/7	37/8
Ce	50/5	49/5	38/9	56/5	42/7	67/2
Pr	5/74	5/63	5/04	6/46	4/92	7/44
Nd	17/7	19/8	22	21/9	17/7	26
Sm	3/24	3/11	4/46	4/6	3/56	4/67
Eu	0/56	0/55	1/16	1/21	0/94	0/64
Gd	2/33	2/24	4/1	4/51	2/7	3/71
Tb	0/29	0/26	0/61	0/7	0/44	0/58
Dy	1/06	0/95	3/39	4/07	2/22	3/25
Ho	0/16	0/14	0/69	0/77	0/41	0/63
Er	0/47	0/35	1/92	2/34	1/16	1/68
Tm	0/07	0/06	0/32	0/36	0/17	0/29
Yb	0/49	0/53	2/04	2/37	1/31	1/94
Lu	0/08	0/08	0/32	0/33	0/15	0/27
Y	5	3/8	19/8	23/5	13	19/8
Eu/Eu*	0/62	0/64	0/83	0/81	0/93	0/47
(La/Yb)N	37/84	33/71	6/41	8/51	10/14	13/14

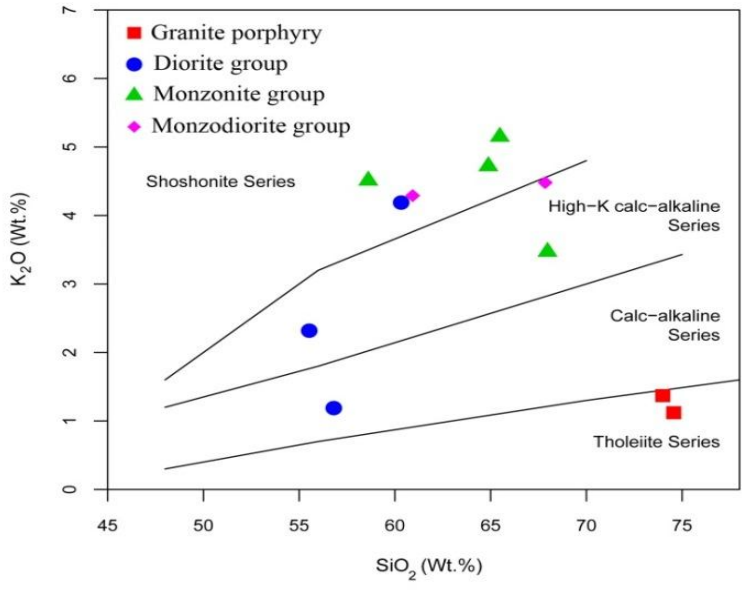
ادامه جدول 2. نتایج آنالیز عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی گرانیتوئیدها (از چپ به راست سن نسبی کم می‌شود).

Sample	NKj-290	NKj-218	NKj-156	NKj-255	NKj-46	NKj-143
Lon.	**57/7858**	**57/8103**	**57/7857**	**57/7757**	**57/7842**	**57/7598**
Lat.	**34/1789**	**34/1856**	**34/1435**	**34/1412**	**34/2053**	**34/1789**
SiO_2	67/97	65/48	58/61	64/88	60/93	67/85
TiO_2	0/31	0/48	0/86	0/59	0/86	0/29
Al_2O_3	13/79	15/81	14/68	13/64	13/89	12/82
FeOt	4/25	4/68	7/01	4/31	6/48	5/47
MnO	0/03	0/1	0/12	0/12	0/1	0/08
MgO	0/57	1/23	2/57	1/51	3/14	0/61
CaO	2/64	1/29	6/07	5/01	4/9	3/06
Na_2O	4/1	3/63	3/16	3/2	3/15	3/62
K_2O	3/47	5/15	4/51	4/72	4/29	4/48
P_2O_5	0/09	0/16	0/21	0/17	0/27	0/07
Total	98/22	97/01	97/8	98/15	98/01	98/35
Ba	627	753	438	510	522	632
Rb	187/4	230/4	184/2	200/9	175/9	206/7
Sr	171/4	419/7	242/3	257/6	316/1	257/7
Zr	276/8	117/5	215/4	228/8	288/1	263/9
Nb	21/5	8/7	18/4	18/1	25/4	21/1
Ga	19/4	16/7	17/2	17/7	18/5	19/7
Rb/Sr	1/09	0/55	0/76	0/78	0/56	0/80
Rb/Ba	0/30	0/31	0/42	0/39	0/34	0/33
La	49/4	18/8	41/3	46/7	49/3	53/9
Ce	92/1	41/2	77/1	84/3	94/9	99/8
Pr	10/08	4/49	8/48	9/24	10/52	10/76
Nd	35/9	16/1	29/2	30/9	38/3	36/1
Sm	6/02	2/99	5/25	5/46	6/58	6/55
Eu	0/94	0/7	1/1	0/94	1/19	0/95
Gd	5/22	2/25	4/44	4/44	5/51	5/83
Tb	0/82	0/34	0/72	0/69	0/89	0/92
Dy	4/46	1/62	/4	3/79	4/87	5/3
Ho	1/02	0/3	0/76	0/75	0/96	1/08
Er	2/77	0/85	2/08	2/14	2/74	3/09
Tm	0/46	0/14	0/34	0/34	0/41	0/49
Yb	3/05	0/97	2/23	2/34	2/6	3/22
Lu	0/41	0/12	0/32	0/3	0/34	0/48
Y	28/8	9/9	23	23/4	28/8	32/2
Eu/Eu*	0/51	0/83	0/7	0/58	0/6	0/47
(La/Yb)N	10/92	13/07	12/49	13/46	12/78	11/29



شکل 5. نمودار نام‌گذاری سنگهای آذرین درونی Na_2O+K_2O در مقابل SiO_2 [4].

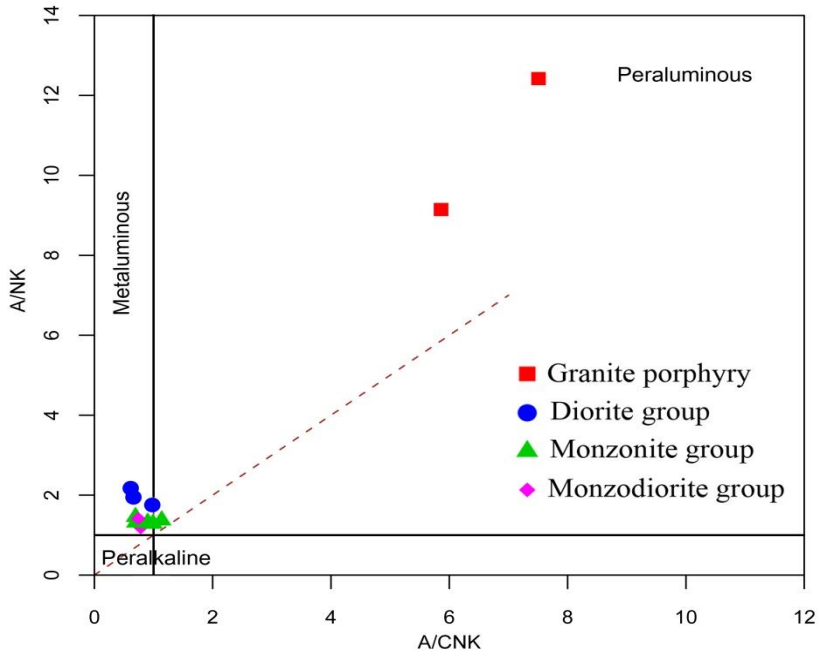
با توجه به نمودار SiO_2 نسبت به K_2O [5] سنگهای دیوریت، مونزونیت و مونزودیوریتی، متعلق به سری کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند (شکل 6)، اما نمونه‌های مربوط به گرانیت پورفیری در قسمت تولئیتی واقع می‌شوند که ناشی از نسبت پایین اکسید پتاسیم در این سنگها نسبت به دیگر توده‌های نفوذی منطقه است، با توجه به دگرسان‌بودن این توده و تحرک بالای پتاسیم حین دگرسانی، این امر طبیعی است.



شکل 6. نمودار اکسید پتاسیم در مقابل سیلیس به‌منظور تعیین ماهیت ماگمایی [5].

به‌منظور تعیین شاخص آلومینیم از نسبت A/CNK در مقابل A/NK استفاده شده است. نمودار طبقه‌بندی سنگهای منطقه براساس شاخص آلومینیم [6] نشان می‌دهد که کلیه نمونه‌های منطقه به‌جز گرانیت پورفیری، در محدوده

متاآلومینوس قرار دارند و واحد گرانیت پورفیری در محدوده پرآلومینوس واقع شده است (شکل 7) که حاکی از میزان بالای آلومینیم نسبت به عناصر آلکالی در این واحد است.



شکل 7. نمودار تعیین اندیس آلومینیم [6].

عناصر فرعی و نادر خاکی

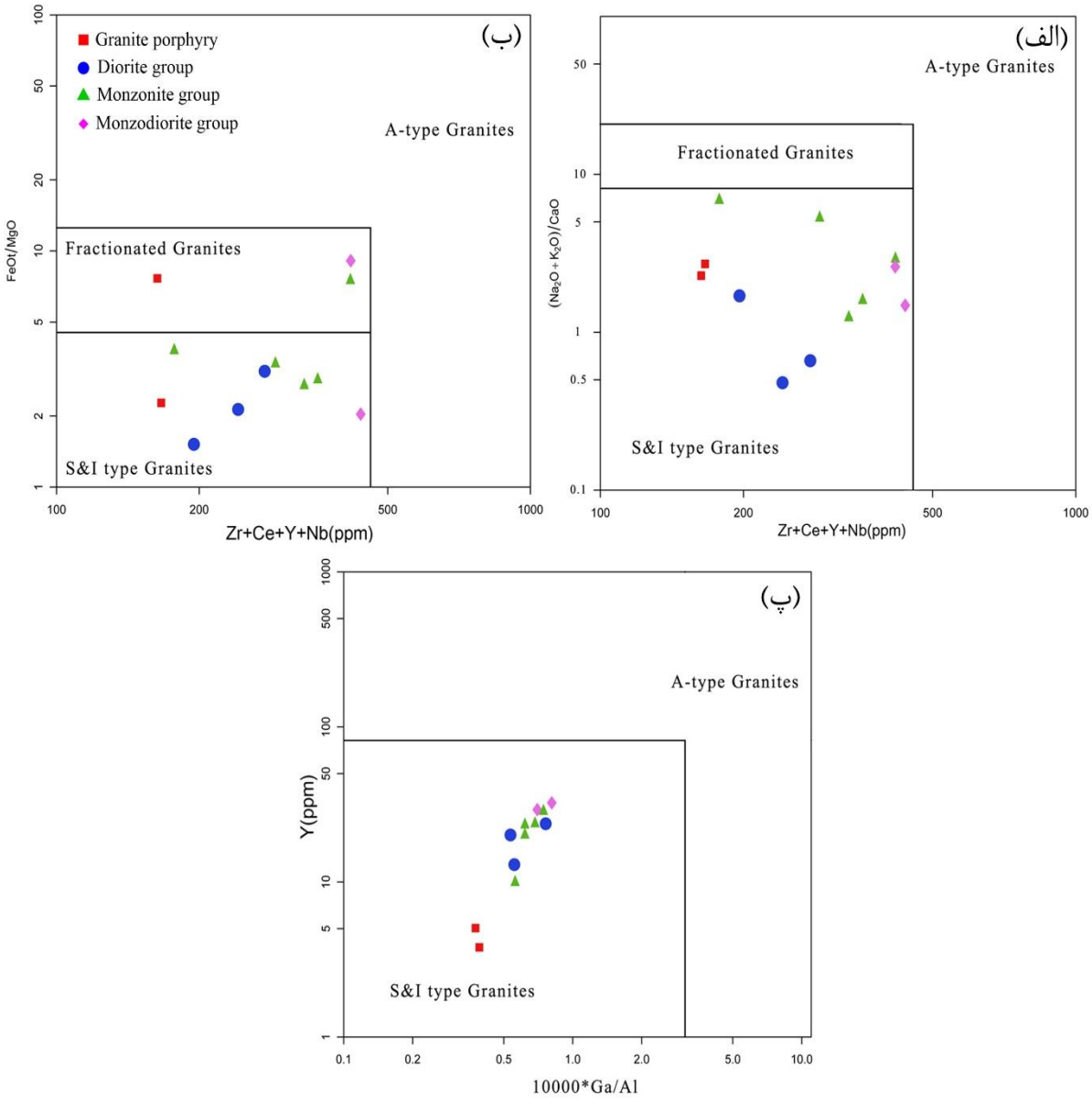
به‌منظور تفکیک تودههای گرانیتوئیدی تیپ A از I و S از نمودار $Zr+ Ce + Y+ Nb$ در مقابل $(Na_2O + K_2O)/CaO$ (شکل 8 الف)، نمودار $Zr + Ce + Y+ Nb$ در مقابل FeOt/MgO (شکل 8 ب) و نمودار $10000*Ga/Al$ در مقابل Y (شکل 8 پ) [7] استفاده شده است، همان‌طور که در شکل 8 الف، ب و پ مشخص است، در هر سه نمودار، تودههای نفوذی منطقه در محدوده گرانیتوئیدهای تیپ S و I قرار می‌گیرند.

به‌منظور تعیین موقعیت تکتونوماگمایی تودههای نفوذی منطقه، از نمودارهای عناصر کمیاب متمایزکننده محیط تکتونوماگمایی گرانیتوئیدها [8] استفاده شده است. همان‌طور که در شکل 9 (الف تا ت) مشاهده می‌شود، تودههای منطقه متعلق به گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی (volcanic arc granitoid) و همزمان با برخورد (syn-collision granitoid) هستند.

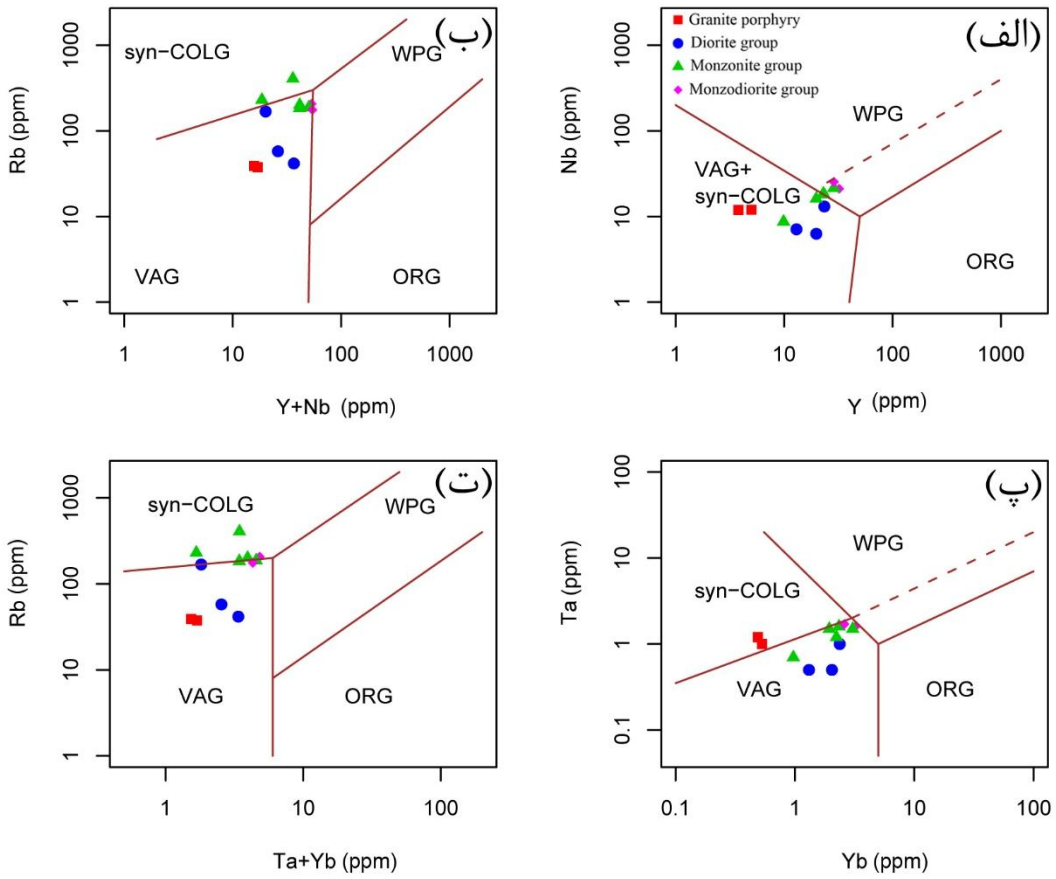
عناصر کمیاب نسبت به بازالت پشته میان‌اقیانوسی [9] به‌هنجار شده‌اند، همان‌طور که از مجموع نمودارها پیداست، نمودار عنکبوتی واحدهای سنگی منطقه، الگویی شبیه به گرانیتوئیدهای تیپ I و S نشان می‌دهد، به نحوی که آنومالی منفی مشخصی در عناصر واسطه با شدت میدان زیاد (HFSE) نظیر Nb و Ti نشان می‌دهد. در مقابل، عناصر واسطه با شدت میدان کم (LFSE) نظیر Rb آنومالی مثبت نشان می‌دهند (شکل10 الف تا ت). آنومالی منفی Nb و Ti نشان‌دهنده ماگمای وابسته به فرورانش است.

با توجه به تغییرات مشاهده‌شده در گروههای سنگی منطقه می‌توان سه الگوی مختلف متعلق به سه دسته مجزا از رخدادهای ماگمایی را در منطقه متمایز نمود. سه رخداد ماگمایی شامل 1- گرانیت پورفیری، 2- دیوریت‌ها و 3- سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی است. الگوی متعلق به گرانیت پورفیری منطقه، دارای بیشترین غنی‌شدگی نسبت به بازالت پشته میان‌اقیانوسی و مقدار Sr (میانگین 1316 گرم بر تن) و الگوی متعلق به سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی دارای کمترین غنی‌شدگی نسبت به بازالت پشته میان‌اقیانوسی و مقدار Sr (میانگین 260 گرم بر تن) و سنگهای دیوریتی حد بینابینی (میانگین 590 گرم بر تن)

دارند. مقدار Y نیز به‌ترتیب دارای کمترین مقدار در گرانیت پورفیری با میانگین 4 گرم بر تن، بعد از آن توده‌های دیوریتی با میانگین 19 گرم بر تن و بیشترین مقدار Y در سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی با میانگین 26 گرم بر تن است. غنی‌شدگی از Sr و تهی‌شدگی از Y عمدتاً به ذوب عمیق و ناپایدار شدن پلاژیوکلاز تعبیر می‌شود که باعث آزاد سازی Sr از پلاژیوکلاز می‌گردد، در حالی که در این وضعیت گارنت پایدار بوده و میزان Y به‌دلیل سازگار بودن در گارنت پایین است. میانگین میزان Sr/Y در گرانیت پورفیری 305، در توده‌های دیوریتی 33 و در سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی برابر 12 گرم بر تن است. میزان Ba نیز در سه الگو با یکدیگر متفاوت است، به نحوی که میانگین گرانیت پورفیری، کمترین مقدار (115 گرم بر تن)، میانگین توده‌های دیوریتی برابر 466 گرم بر تن و میانگین سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی بیشترین مقدار را دارد (599 گرم بر تن). میزان Ba می‌تواند ناشی از تأثیر بیوتیت و پتاسیم فلدسپات در سنگ مادر باشد. با توجه به تمرکز این عنصر در بیوتیت و پتاسیم فلدسپات، افزایش آن می‌تواند ناشی از ذوب این کانیها در سنگ منشأ باشد.



شکل 8. نمودار تفکیک گرانیت‌های تیپ I و S از تیپ A [7].



شکل 9. نمودار تعیین موقعیت تکتونوماگمایی توده‌های نفوذی منطقه [8].

نتایج حاصل از داده‌های عناصر نادر خاکی که نسبت به کندریت به‌هنجار شده‌اند [10] همانند آنچه در الگوی عناصر کمیاب نیز مشاهده شد در شکل 11 الف تا ت به‌صورت سه دسته الگوی توزیع مشاهده می‌شود. میانگین ∑REE در گرانیت پورفیری کمترین مقدار (110 گرم بر تن)، در توده‌های دیوریتی برابر 113 گرم بر تن و در سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی بیشترین مقدار (195 گرم بر تن) است. در توده‌های دیوریتی، غنی‌شدگی در LREE نسبت به HREE کمتر از دو گروه دیگر و آنومالی منفی Eu بسیار ناچیز است. در الگوی مربوط به گرانیت پورفیری، غنی‌شدگی در LREE نسبت به HREE بیشتر از دو گروه دیگر بوده و آنومالی منفی Eu به‌صورت شاخص مشخص می‌شود. در الگوی سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی، در عین حال که آنومالی منفی Eu مشاهده می‌شود، توزیع HREE ها یک تخت‌شدگی نشان می‌دهد. غنی‌شدگی در LREE نسبت به HREE می‌تواند ناشی از حضور گارنت در سنگ منشأ باشد، چرا که ضریب توزیع Ce در گارنت بسیار کم است. چنانچه در سنگ منشأ گارنت وجود داشته باشد و ذوب‌بخشی انجام شود، ماگما نسبت به Ce غنی خواهد شد. همچنین Eu دارای آنومالی مثبت در پلاژیوکلاز است و توسط اکسیژن ماگما و دما کنترل می‌شود.

با توجه به ژئوشیمی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی، به نظر می‌رسد می‌توان رخدادهای ماگمایی در منطقه را در سه دسته گرانیت پورفیری، دیوریت‌ها و مونزونیت‌ها طبقه‌بندی نمود که از سه منشأ در اعماق مختلف تشکیل شده‌اند.

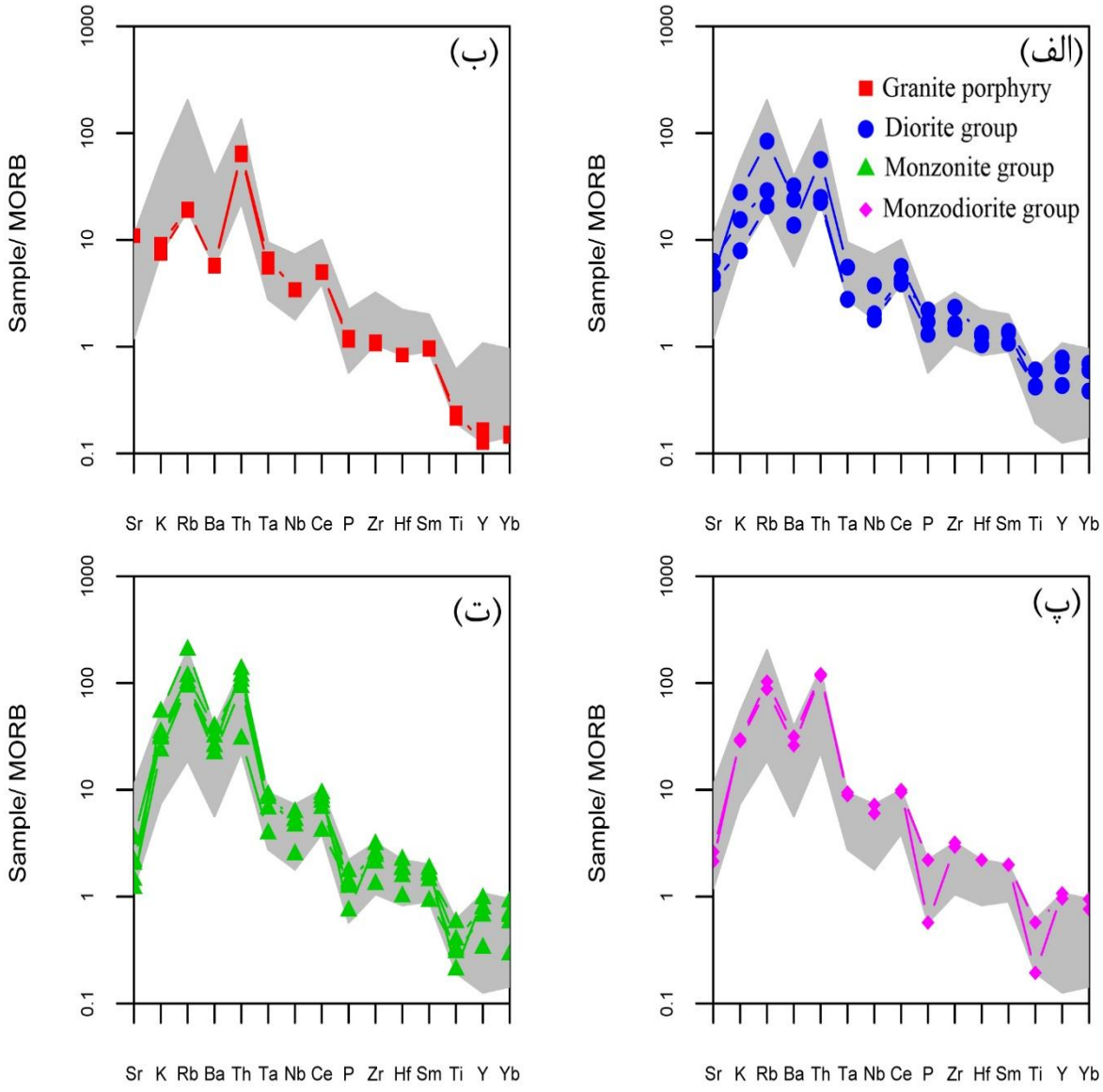
پذیرفتاری مغناطیسی

تعداد 480 نقطه از توده‌های نفوذی، مورد اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی با استفاده از دستگاه GMS-2 قرار گرفت. نمایش میزان درصد وزنی SiO_2 در مقابل پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی منطقه نشان می‌دهد که می‌توان توده‌های نفوذی منطقه را به دو دسته مگنتیت و ایلمنیت

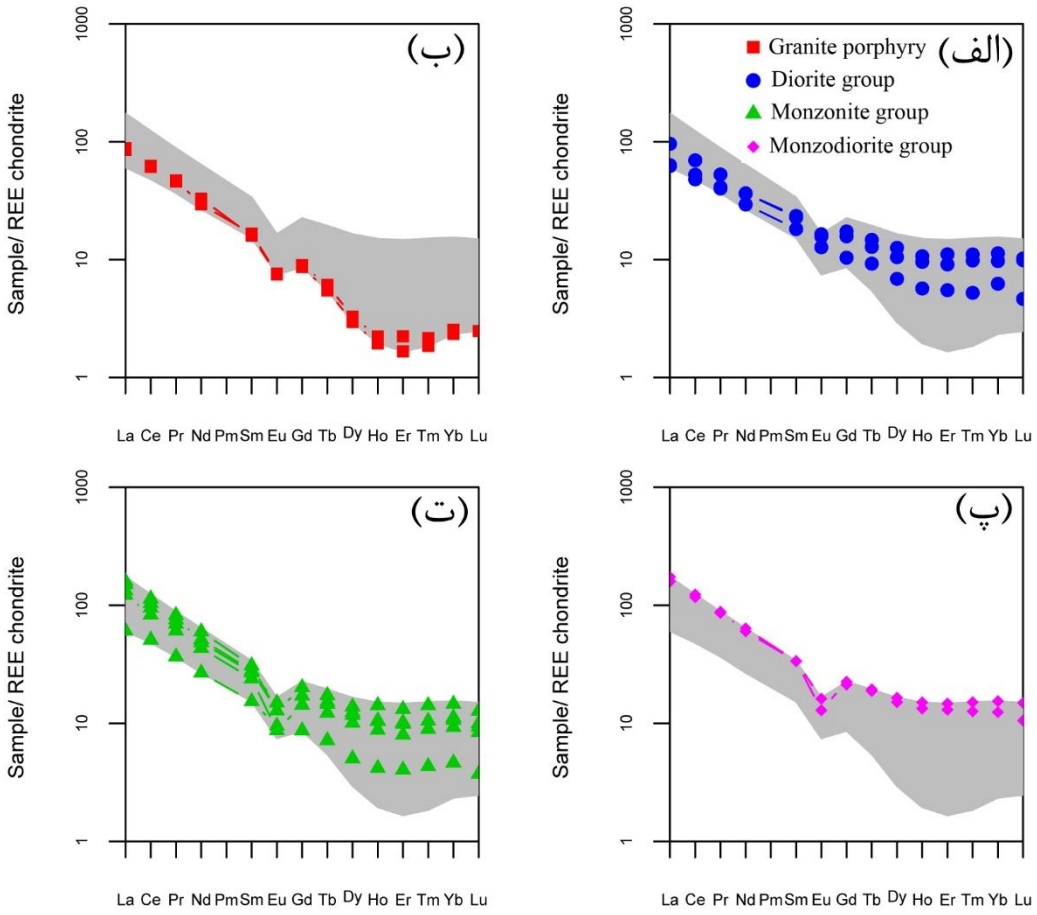
تقسیم نمود. کلیه توده‌های نفوذی منطقه به‌جز توده گرانیت پورفیری، واجد کانیهای مگنتیت ± هورنبلند هستند و از پذیرفتاری بالایی برخوردارند (بین 500 تا 9800 در 10^{-5} SI)، که مطابق تقسیم‌بندی ایشی‌هارا [11] منطبق بر گرانیتوئیدهای سری اکسیدان هستند. توده گرانیت پورفیری، فاقد کانیهای مگنتیت و هورنبلند است و از نظر پذیرفتاری مغناطیسی نیز مقدار پایینی دارد (9 تا 80 در 10^{-5} SI) که طبق تقسیم‌بندی ایشی‌هارا منطبق بر سری احیایی است (شکل 12).

سن‌سنجی زیرکن به روش U-Pb

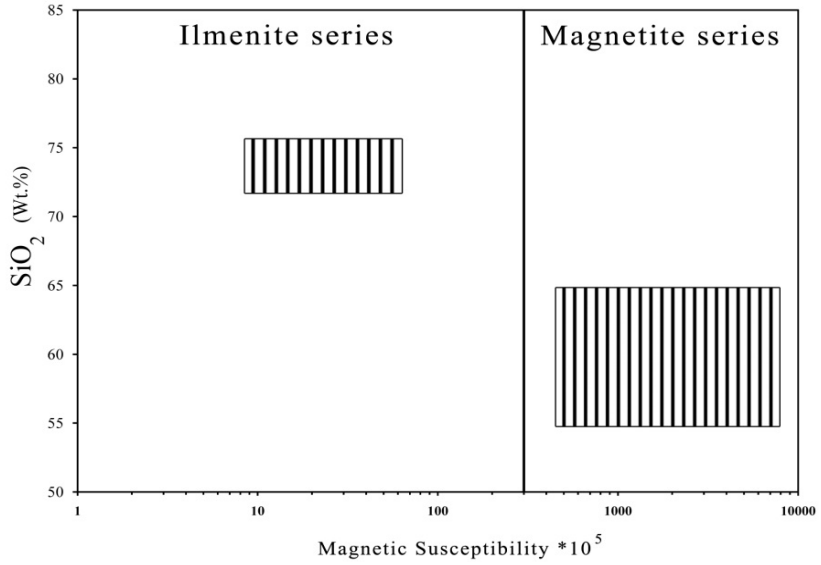
سه نمونه از واحدهای گرانیتوئیدی منطقه بعد از مطالعات دقیق پتروگرافی و پترولوژیکی برای سن‌سنجی به روشU-Pb انتخاب گردید (نمونه گرانیت پورفیری با شماره N-Kj-219، نمونه بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت با شماره N-Kj-290 و هورنبلند کوارتز دیوریت با شماره N-Kj-252). از هر نمونه در حدود 70 دانه زیرکن، به روش استاندارد، جداسازی و تفکیک گردید. زیرکن‌ها برای تعیین سن به مرکز Laser Chron آریزونا در دانشگاه آریزونا ارسال و به‌روش Laser-Ablation multi collector ICP-MS مورد آنالیز قرار گرفت [12].



شکل 10. نمودار عناصر فرعی و برخی عناصر نادر خاکی که نسبت به بازالت پشته میان‌اقیانوسی به‌هنجار شده‌اند [9].



شکل 11. نمودار عناصر خاکی کمیاب که نسبت به کندریت به‌هنجار شده است [10].



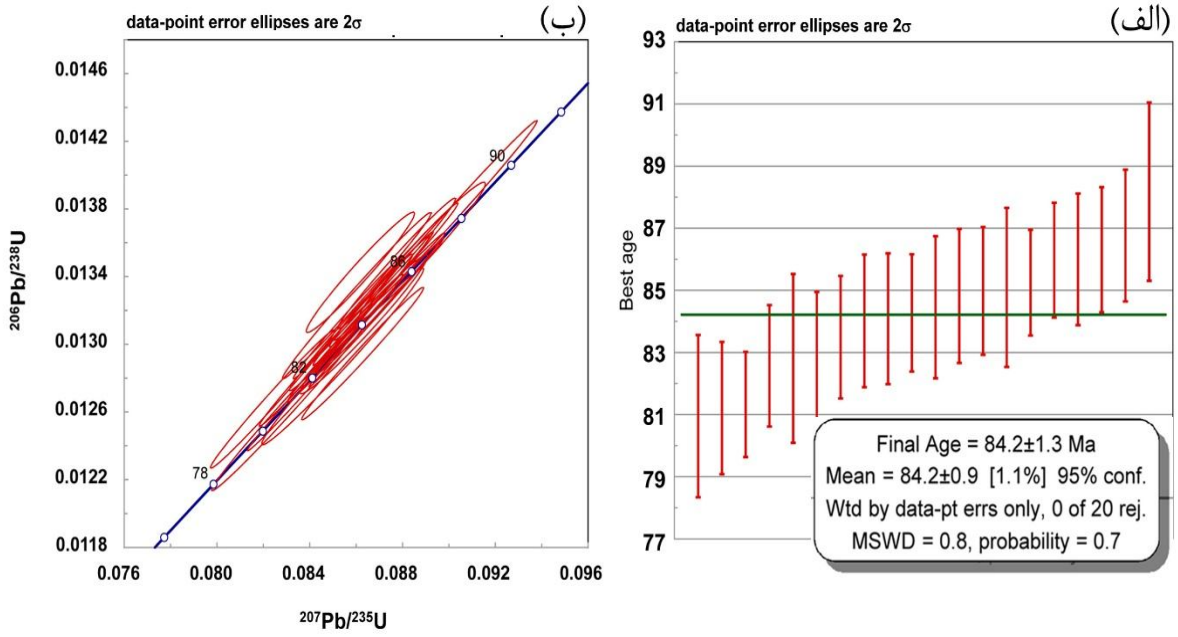
شکل 12. نمودار تفکیک گرانیت‌های سری مگنتیت (اکسیدان) از ایلمینیت (احیایی) [11].

زیرکن‌ها ابتدا در یک پلاک اپاکسی همراه با خرده‌هایی از زیرکن استاندارد و شیشه‌های NBS 610 قالب‌گیری شده و تا ۲۰μm صیقل می‌خورند. در زیر میکروسکپ کاتدولومینسانس (CL) از نمونه‌ها عکس تهیه می‌شود. عکس تهیه شده، ساختار درونی دانه‌های زیرکن برش خورده را نشان می‌دهد و با استفاده از آن، مکانهای مناسب برای پرتو لیزر انتخاب می‌شوند. این تصویر همچنین می‌تواند به تعیین منشأ دانه‌های زیرکن (آذرین، دگرگونی یا گرمابی) کمک کند. این روش به‌طور معمول با یک پرتو به قطر 35 یا 25 میکرون و اگر لازم باشد در دانه‌های ریزتر به قطر 15 یا 10 میکرون صورت می‌پذیرد. پرتو 35 یا 25 میکرونی با بسامد 8 هرتز و انرژی 100 میکروژول تنظیم می‌شود که می‌تواند یک سیگنال کم و بیش 100000cps در گرم در تن برای U در زیرکن تولید کند. برای اندازه‌های کوچکتر پرتو لیزر، انرژی به 60 میکروژول و نرخ تکرار 4 هرتز کاهش می‌یابد. در هر دو حالت بیان‌شده، مواد برانگیخته شده توسط پرتو لیزر از یک اتاقک گاز هلیم عبور می‌کنند. گاز هلیم و نمونه برانگیخته شده پیش از ورود به محیط پلاسما ICP-MS با گاز آرگن مخلوط می‌شوند. مقدار Pb ایزوتوپی نسبت به Th و U به کمک نمونه استانداردی که همراه با زیرکن‌ها قالب‌گیری شده و هر بار با اندازه‌گیری سه تا پنج نمونه مجهول اندازه‌گیری آن تکرار می‌شود، محاسبه می‌شود. نتایج اندازه‌گیریهای U-Th-Pb برای نمونه‌ها در جدول 3 آمده است.

نتایج محاسبات نمونه گرانیت پورفیری با شماره N-Kj-219 در شکل 13 الف و ب نشان داده شده است. براساس تجزیه 20 نقطه، میانگین سن به‌دست آمده 1/3 ± 84/2 میلیون سال (آشکوب سانتونین از دوره کرتاسه پسین) است (با خطای 2 سیگما).

نتایج محاسبات نمونه بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت با شماره N-Kj-252 در شکل 14 الف و ب نشان داده شده است. براساس تجزیه 20 نقطه، میانگین سن به‌دست آمده 1/4 ± 70/8 میلیون سال (آشکوب کامپانین از دوره کرتاسه پسین) است (با خطای 2 سیگما).

نتایج محاسبات نمونه هورنبلند کوارتز دیوریت با شماره N-Kj-290 در شکل 15 الف و ب نشان داده شده است. براساس تجزیه 19 نقطه، میانگین سن به‌دست آمده 1± 67/9 میلیون سال (آشکوب ماسترشتین از دوره کرتاسه پسین) است (با خطای 2 سیگما).



شکل 13. نمودار کنکوردیا و پلات تعیین سن میانگین نمونه N-Kj-219 از اطلاعات ایزوتوپی U-Pb

جدول 3. نتایج آنالیز سن‌سنجی U-Th-Pb نمونه‌های گرانیتوئیدی منطقه کجه.

Analysis	U (ppm)	$^{206}Pb/^{204}Pb$	U/Th	$^{206}Pb/^{207}Pb$	± (%)	$^{207}Pb/^{235}U$	± (%)	$^{206}Pb/^{238}U$	± (%)	Age (Ma)	± (Ma)
N-Kj-219											
219-25	830	60620	1/7	20/9683	0/4	81	2/5	81	2/6	81	2/6
219-24	638	30520	4/6	21/2126	0/3	80/4	2/1	81/2	2/1	81/2	2/1
219-7	2106	170354	3	20/9742	0/2	81/4	1/6	81/3	1/7	81/3	1/7
219-19	1338	133604	5/7	21/0881	0/3	82/2	1/9	82/6	2	82/6	2
219-20	360	45044	4/7	20/8683	0/5	83/2	2/7	82/8	2/7	82/8	2/7
219-21	927	125964	4	20/6867	0/3	84	2	82/9	2	82/9	2
219-28	1365	137301	3/3	21/0162	0/3	83/3	1/9	83/5	2	83/5	2
219-6	231	55939	2/4	20/9519	0/5	84/1	2/1	84	2/1	84	2/1
219-23	726	32648	3/5	21/1031	0/3	83/6	2	84/1	2/1	84/1	2/1
219-31	1078	58307	0/8	21/1800	0/2	83/5	1/8	84/3	1/9	84/3	1/9
219-29	2130	218494	15	20/9323	0/2	84/6	2/2	84/5	2/3	84/5	2/3
219-32	922	327280	4	20/9710	0/3	84/8	2/1	84/8	2/2	84/8	2/2
219-8	1357	274943	6/7	21/0966	0/2	84/5	2	85	2/1	85	2/1
219-13	719	29561	3/1	21/2963	0/4	83/8	2/5	85/1	2/6	85/1	2/6
219-10	1690	157309	2/9	21/0964	0/3	84/7	1/6	85/2	1/7	85/2	1/7
219-12	452	17872	3/2	21/4796	0/5	83/9	1/8	86	1/8	86	1/8
219-1	900	64140	22/3	21/1101	0/3	85/4	2	86	2/1	86	2/1
219-14	556	28420	3/6	21/1785	0/3	85/4	1/9	86/3	2	86/3	2
219-5	284	23386	1/4	21/0320	0/5	84/4	2/1	86/8	2/1	86/8	2/1
219-27	740	51642	3/3	21/0571	0/3	87/7	2/8	88/2	2/9	88/2	2/9
N-KJ-252											
252-3c	49	2089	2/6	21/9944	2/9	65/2	2/3	67/8	1/5	67/8	1/5
252-18r	420	59076	3/5	20/8352	0/4	68/7	1/6	67/8	1/6	67/8	1/6
252-13c	169	14851	3	20/5686	0/7	70/1	2	68/3	1/9	68/3	1/9
252-10r	210	12355	2/3	21/1340	0/6	69/9	1/4	70/1	1/4	70/1	1/4
252-19r	194	16216	1/3	21/2272	0/7	70	1/5	70/4	1/5	70/4	1/5
252-8r	148	46204	3/8	20/8731	0/7	71/2	1/5	70/5	1/4	70/5	1/4
252-4r	100	8627	2/4	20/9290	1/2	71/1	1/5	70/5	1/3	70/5	1/3

ادامه جدول 3. نتایج آنالیز سن‌سنجی U-Th-Pb نمونه‌های گرانیتوئیدی منطقه کجه.

Analysis	U (ppm)	$^{206}Pb/^{204}Pb$	U/Th	$^{206}Pb/^{207}Pb$	± (%)	$^{207}Pb/^{235}U$	± (%)	$^{206}Pb/^{238}U$	± (%)	Age (Ma)	± (Ma)
N-KJ-252											
252-2r	137	16993	3	21/1090	0/7	70/6	1/4	70/7	1/3	70/7	1/3
252-17r	141	12006	3/4	20/9132	0/9	71/7	2/2	71/2	2/1	71/2	2/1
252-16r	199	18096	2/2	20/7352	0/7	73	1/4	71/9	1/3	71/9	1/3
252-14r	299	29237	1/6	20/9416	0/6	73/3	1/4	72/8	1/3	72/8	1/3
252-15c	121	10416	2/1	19/9624	1	67/7	1/6	72/9	1/3	72/9	1/3
252-9c	210	7239	2/6	21/4661	0/8	71/9	1/8	73/2	1/7	73/2	1/7
252-6r	1143	81047	9/2	21/2045	0/3	75/9	1/3	76/4	1/4	76/4	1/4
252-7c	121	7892	3/1	21/1363	0/9	82/1	2/3	82/7	2/3	82/7	2/3
N-KJ-290											
290-13	217	10922	0/8	20/6311	2/2	65/7	1/8	64/2	1/1	64/2	1/1
290-2	722	22157	16/5	20/2042	1/7	67/2	1/5	64/3	1/1	64/3	1/1
290-1	564	26689	37	20/7278	1/2	66/8	1/4	65/6	1/2	65/6	1/2
290-10	271	12156	3	20/8942	1/2	66/5	1/1	65/8	0/8	65/8	0/8
290-2_1	651	28080	4/7	20/7213	1/2	68/5	2/1	67/3	1/9	67/3	1/9
290-4	728	37953	25/6	20/7722	0/8	68/4	1/7	67/3	1/7	67/3	1/7
290-9	849	31665	5/3	20/8187	0/9	68/5	1/1	67/6	0/9	67/6	0/9
290-14	535	19316	11/8	18/1806	22/1	78/1	16/7	67/6	1/2	67/6	1/2
290-16	719	48006	4	20/7976	0/7	68/6	1/1	67/7	1	67/7	1
290-18	988	24716	5/5	20/9343	0/5	68/6	1/5	68/1	1/4	68/1	1/4
290-11	802	33724	41/5	20/8559	0/9	69/1	0/9	68/3	0/7	68/3	0/7
290-8	341	7251	4/1	21/0557	0/7	68/5	0/7	68/4	0/6	68/4	0/6
290-6	938	74191	5/8	20/7581	0/8	69/6	1/8	68/5	1/8	68/5	1/8
290-15	1647	164478	12	20/8515	1/1	69/7	1/9	68/9	1/8	68/9	1/8
290-12	646	13266	22	20/9043	1/2	69/6	1/7	69	1/5	69	1/5
290-11_1	446	12408	33/4	21/1073	0/8	70	1/8	70	1/7	70	1/7
290-8_1	187	6081	2/5	21/0707	1/6	70/9	1/6	70/8	1/2	70/8	1/2
290-19	328	11552	18/3	20/6548	2/1	75/5	1/6	74/1	0/5	74/1	0/5
290-7	2946	95263	27/7	20/0294	0/6	80/1	3/9	76/4	3/8	76/4	3/8

ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd

تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک Rb-Sr و Sm-Nd نیز روی تمامی نمونه سنگهایی که برای سن‌سنجی فرستاده شدند توسط دستگاه 6-collector Finnigan MAT 261 Thermal Ionization Mass Spectrometer در دانشگاه کلرادوی امریکا صورت گرفته است. مقدار $^{87}Sr/^{86}Sr$ با استفاده از four-collector static mode measurements اندازه‌گیری و نتیجه با نمونه استاندارد SRM-987 با مقدار $^{87}Sr/^{86}Sr$ =0/71028 (خطای 2 سیگما از میانگین) که همزمان با اندازه‌گیری نمونه‌های مجهول تجزیه شده بود و مقدار 0/71032 را نشان داده بود، اصلاح شد. همچنین مقدار $^{143}Nd/^{144}Nd$ با مقدار $^{143}Nd/^{144}Nd$= 0/7219 نمونه استاندارد به‌هنجار و تجزیه با dynamic mode, three-collector measurements انجام گرفت و در طول انجام تجزیه نمونه استاندارد LaJolla Nd نیز بارها تکرار شد که مقدار 8± 0/511838 (خطای 2 سیگما از میانگین) را مشخص کرد.

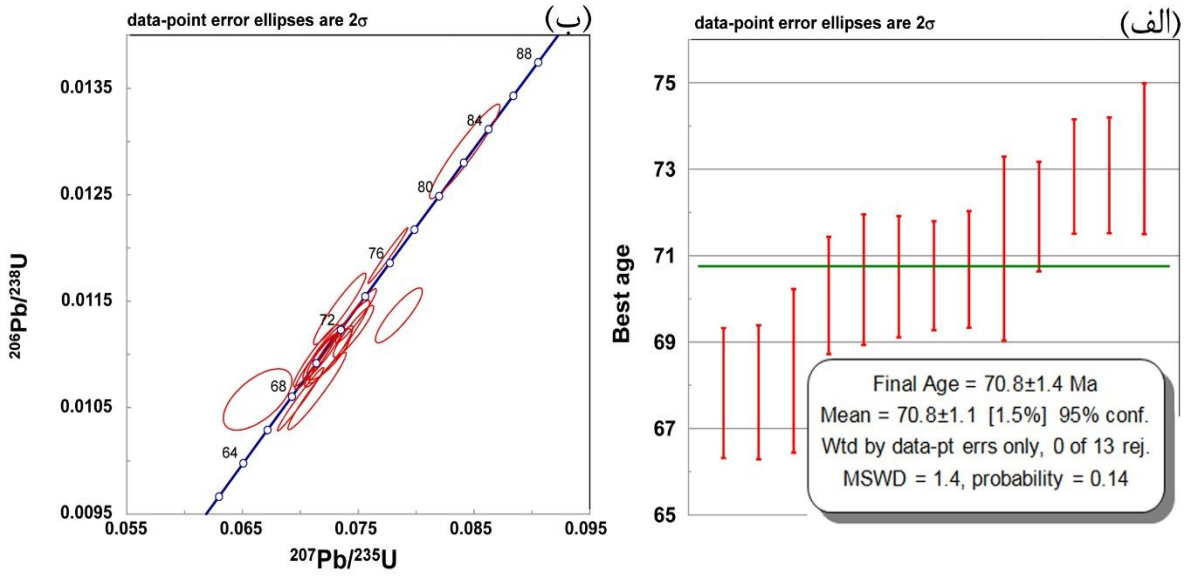
اطلاعات ایزوتوپی Rb-Sr و Sm-Nd نمونه‌های N-Kj-219، N-Kj-252 و N-Kj-290 به‌ترتیب در جدولهای 4 و 5 ارائه شده است. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه براساس سن میانگین هر توده محاسبه شده است. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه برای توده گرانیت پورفیری (N-Kj-219) با توجه به سن 84/2 به ترتیب برابر 0/708080 و 0/512129 است. میزان ϵ_{NdI} در نمونه مورد نظر برابر با 7/81- است. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه برای توده بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت (N-Kj-252) با توجه به سن 70/8 به‌ترتیب برابر 0/706125 و 0/512416 است. میزان ϵ_{NdI} در نمونه مورد نظر برابر با 2/55- است. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه برای توده هورنبلند کوارتز دیوریت (N-Kj-290) با توجه به سن 67/9 به‌ترتیب برابر 0/707491 و 0/512221 است. میزان ϵ_{NdI} در نمونه مورد نظر برابر با 6/43- است.

منشأ ماگما

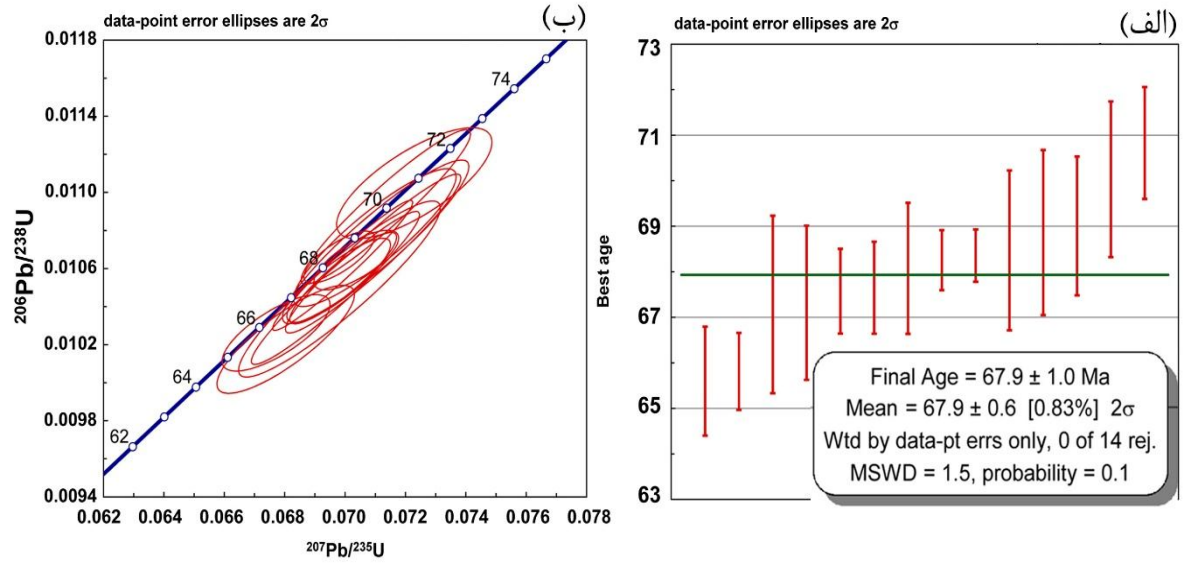
نسبت مقادیر $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه به $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه در شکل 16 و نسبت ϵ_{Nd} اولیه به $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه در شکل 17 ترسیم شده است. با توجه به مقدار $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه بیش از 0/706، مقدار $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه بیش از 0/512 و ϵ_{Nd} اولیه کمتر از 2/5- برای گرانیتوئیدهای منطقه کجه، منشأ ماگمای این توده‌ها در محدوده بین زون فرورانش و پوسته قاره‌ای قرار می‌گیرد. با توجه به ویژگیهای کانی‌شناختی و ژئوشیمیایی، توده‌های منطقه از نوع I هستند و در کمربند زون فرورانش تشکیل شده‌اند. با توجه به میزان بالای $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه، میزان $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه و ϵ_{Nd} اولیه نمونه‌ها خارج از محدوده ماگماهای منشأ گرفته از پوسته میان‌اقیانوسی و متمایل به پوسته قاره‌ای قرار می‌گیرند. سن سنگ منشأ ماگما (TDM) را می‌توان با استفاده از نتایج ایزوتوپ m ($^{143}Nd/^{144}Nd$)، initial ($^{143}Nd/^{144}Nd$)، $\epsilon_{Nd}m$ و $\epsilon_{Nd}I$ به‌دست آورد. براساس محاسبات (جدول 5) قدیمی‌ترین توده منطقه (NKJ-219) به سن سانتونین با ماهیت احیایی از سنگ منشأ با سن 1/19 میلیارد سال و جدیدترین توده (NKJ-290) در زمان ماستریشتین با ماهیت اکسیدان از قدیمی‌ترین سنگ منشأ با سن حداقل 1/21 میلیارد سال حاصل شده، در حالی‌که توده (NKJ-252) با سنی بینابین این توده‌ها (کامپانین)، از سنگ منشأ با سن 830 میلیون سال تشکیل شده است.

مطابق نمودارهای عناصر کمیاب متمایز کننده محیط تکتونوماگمایی، توده‌های منطقه متعلق به گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی (volcanic arc granitoid) و همزمان با برخورد (syn-collision granitoid) هستند. از طرفی، مقادیر P_2O_5 و TiO2 در کلیه نمونه‌های منطقه به‌ترتیب کمتر از 0/5 و 1 درصد است که از ویژگیهای سنگهای مرتبط با فرورانش (volcanic arc) است [13]. ماگمای تولید شده در این نواحی، می‌تواند در نتیجه عواملی چون 1- گوشته غنی‌شده (به احتمال پریدوتیت)، 2- پوسته اقیانوسی فرورونده و 3- پوسته قاره‌ای که گرمای لازم برای ذوب آن توسط ماگمای گوشته‌ای جای‌گزین شده زیر پوسته تأمین می‌شود، تشکیل می‌شوند.

توده گرانیت پورفیری (قدیمی‌ترین توده منطقه) به سن 84 میلیون سال با توجه به نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه (0/708)، $^{143}Nd/^{144}Nd$ (0/512)، ϵ_{NdI} (7/81-)، Sr (1316 گرم بر تن) و Y (4/4 گرم بر تن) احتمالاً منشأ پوسته‌ای داشته و در عمقی ذوب صورت گرفته که پلاژیوکلاز ناپایدار بوده و گارنت در سنگ منشأ باقی مانده است.



شکل 14. نمودار کنکوردیا و پلات تعیین سن میانگین نمونه N-Kj-252 از اطلاعات ایزوتوپی U-Pb



شکل 15. نمودار کنکوردیا و پلات تعیین سن میانگین نمونه N-Kj-290 از اطلاعات ایزوتوپی U-Pb

جدول 4. داده‌های ایزوتوپ Rb-Sr نمونه‌های منطقه کجه.

Sample	Age Ma	Rb(ppm)	Sr (ppm)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)$ m (2σ)	R0(Sr)
NKJ-219	84/2	31	1047	0/0797	0/708182	0/708080
NKJ-252	70/8	150	489	0/8259	0/707017	0/706125
NKJ-290	67/9	162	265	1/6458	0/709195	0/707491

m = measured. Errors are reported as 2σ (95% confidence limit). R0(Sr) is the initial ratio of $^{87}Sr/^{86}Sr$ for each sample, calculated using $^{87}Rb/^{86}Sr$ and $(^{87}Sr/^{86}Sr)_m$ and an age of 84.2 Ma (NKJ-219), 70.8 Ma (NKJ-252) and 67.9 Ma (NKJ-290) (age based on zircon).

جدول 5. داده‌های ایزوتوپ Sm-Nd نمونه‌های منطقه کجه.

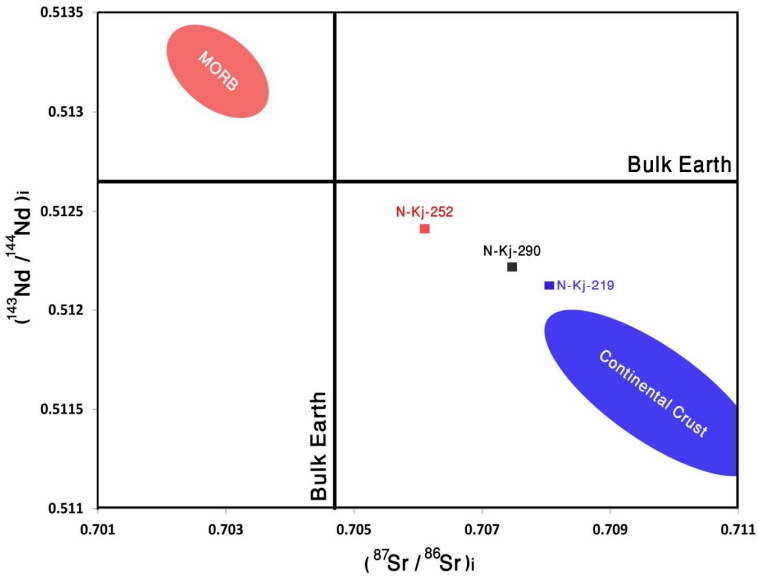
Sample	Age Ma	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_m$ (2σ)	R0(Nd)	ϵNdI	T_{DM}
NKJ-219	84/2	2/76	16	0/104428	0/512187	0/51219	-7/81	1/19
NKJ-252	70/8	3/84	21/7	0/107167	0/512466	0/512416	-2/55	0/83
NKJ-290	67/9	6	31	0/117175	0/512273	0/512221	-6/43	1/21

m = measured. Errors are reported as 2σ (95% confidence limit). R0(Nd) is the initial ratio of $^{143}Nd/^{144}Nd$ for each sample, calculated using $^{147}Sm/^{144}Nd$ and $(^{143}Nd/^{144}Nd)_m$ and an age of 84.2 Ma (NKJ-219), 70.8 Ma (NKJ-252) and 67.9 Ma (NKJ-290) (age based on zircon).ϵNdI= initial ϵNd value.

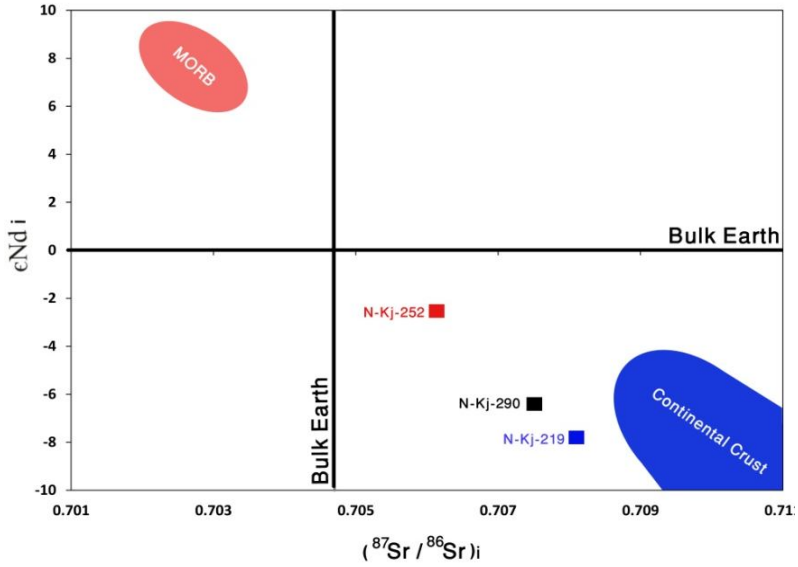
ماگماهای مشتق شده از پوسته اقیانوسی فرورانده با عنوان آداکیت‌ها، ویژگیهایی همچون Sr/Y> 40، (La/Yb)N>16 و Y<8 دارند، اما در توده‌های خانواده‌های مونزونیتی و دیوریتی، میانگین نسبت Sr/Y به‌ترتیب برابر 12 و 33، میانگین نسبت (La/Yb)N به‌ترتیب برابر 12 و 8 و میزان میانگین Y نیز به‌ترتیب 25 و 18 است.

بنابراین با توجه به تفاوتهای ژئوشیمیایی توده‌های مونزونیتی و دیوریتی با آداکیت‌ها، نمی‌توان منشأ ماگمای سازنده آنها را ذوب‌بخشی پوسته اقیانوسی فرورونده در نظر گرفت. توده بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت به‌عنوان نماینده‌ای از خانواده سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی به سن 70 میلیون سال با توجه به نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه (0/706)، $^{143}Nd/^{144}Nd$ (0/512)، ϵ_{NdI} (-2/55)، Sr (542 گرم بر تن) و Y (13 گرم بر تن) احتمالاً منشأ گوشته‌ای داشته و از اعماقی نشأت گرفته که گارنت از منشأ ذوب‌شده و حین صعود مورد آلایش قرار گرفته است. توده هورنبلند کوارتز دیوریت به‌عنوان نماینده‌ای از خانواده دیوریت‌های منطقه به سن 67/9 با توجه به نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه (0/707)، $^{143}Nd/^{144}Nd$ (0/512)، ϵ_{NdI} (-6/43)، Sr (171گرم بر تن) و Y (28 گرم بر تن) احتمالاً از منشأ گوشته‌ای و در اعماقی که مقدار گارنت بیشتری نسبت به توده‌های مونزوگرانیتی از سنگ مادر ذوب‌شده، تشکیل شده، به‌همین دلیل حین صعود و جای‌گزینی، میزان بیشتری آلایش را تحمل نموده است.

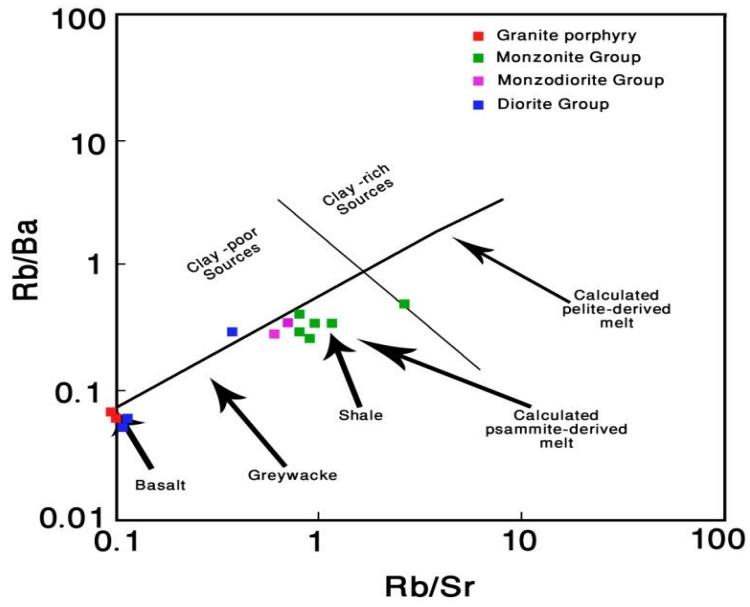
به‌منظور تعیین نوع سنگ مادر که در تشکیل ماگما نقش داشته، از نمودار سیلوستر [14] استفاده شده است. توده‌های نفوذی منطقه در محدوده حداقل دو منشأ قرار می‌گیرند، توده گرانیت پورفیری و خانواده دیوریت‌ها در محدوده سنگ منشأ بازالت و توده‌های خانواده مونزونیتی و مونزودیوریتی در محدوده سنگهای شیلی فقیر از رس قرار می‌گیرند (شکل 18).



شکل 16. موقعیت قرارگیری نمونه‌های منطقه کجه در نمودار $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه در مقابل $^{143}Nd/^{144}Nd$



شکل 17. موقعیت قرارگیری نمونه‌های منطقه کجه در نمودار $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه در مقابل ϵ_{Nd}



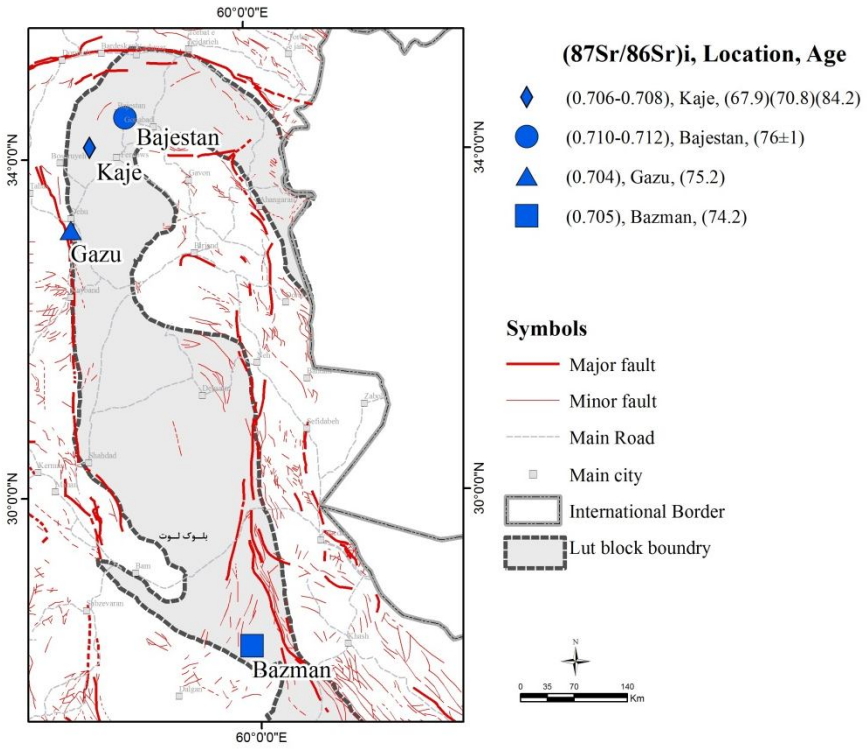
شکل 18. نمودار تعیین نوع مواد اولیه که در تشکیل ماگما نقش دارند [14].

تاکنون در سه منطقه دیگر در بلوک لوت، توده‌هایی با سن کرتاسه پسین گزارش شده است (شکل 19). دو منطقه که در حاشیه بلوک لوت قرار دارند عبارتند از توده کالک‌آلکالن با ترکیب دیوریت تا گرانیت آلکالن منطقه بزمان در حاشیه جنوبی بلوک با سن 74/2 میلیون سال [15] و منطقه گزو در حاشیه باختری بلوک با سن 75/2 میلیون سال [16] و منطقه بجستان در شمال‌خاور منطقه کجه به سن 1± 77 میلیون سال [17].

مقایسه میزان $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه این توده‌ها نشان می‌دهد که میزان این نسبت در توده‌های بزمان و گزو، پایین‌تر از منطقه و کمتر از 0/706 و همین نسبت در سنگهای منطقه بجستان، بیشتر از 0/710 است (جدول 6).

با توجه به ژئوشیمی و میزان $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه منطقه بزمان، این توده‌های حلقوی گرانیتوئیدی، حاصل مراحل آغازین فرورانش پوسته اقیانوسی عمان به زیر حاشیه جنوب‌خاوری ایران است [15]. منطقه اکتشافی مس پورفیری گزو در 15

کیلومتری جنوب‌باختری دیهوک و در زون گسله نایبند قرار دارد که توده‌های گرانیتوئیدی، بخشی در سنگ‌آهکهای سازند شتری و بخشی در شیل و ماسه‌سنگهای ژوراسیک پیشین سازند شمشک نفوذ کرده‌اند. از نظر ژئوشیمیایی، در خانواده ماگماهای تیپ I کالک‌آلکالن بوده و حاوی SiO_2 بین 61-63 درصد وزنی، K_2O بین 1/6 تا 2/7 درصد وزنی و Na_2O بین 3/1 تا 5/8 درصد وزنی است. با توجه به میزان $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه، گرانیتوئیدهای این منطقه از قسمتهای بالایی گوشته فوقانی منشأ گرفته‌اند [16].



شکل 19. موقعیت مکانی توده‌های کرتاسه گزارش‌شده در بلوک لوت.

جدول 6. داده‌های ایزوتوپ Rb-Sr توده‌های نفوذی گزارش‌شده به سن کرتاسه بلوک لوت.

Area	Sample Name	Age:Rb-Sr (Ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)m$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)i$
Bajestan	Hornblende granite (LU-152)	77	223/6	274/4	2/3609	0/7128	0/712
	Granite (Ta 561)	76/6	232	233/4	2/8811	0/7157	0/7126
	Granite porphyry (LU 1080)	76/6	250/3	135/5	5/3521	0/71435	0/7101
Gazu	Granodiorite	275	48	634	0/5622	0/7047	0/7045
Bazman	Granodiorite	74/2	91	514	0/516	0/70619	0/70565

توده‌های نفوذی منطقه بجستان، حدواسط تا اسیدی بوده و ترکیب شیمیایی کالک‌آلکالن غنی از پتاسیم دارند. با توجه به میزان پایین پذیرفتاری مغناطیسی، توده‌های گرانیتوئیدی این منطقه، متعلق به سری ایلمنیت یا احیایی هستند [3]. از نظر موقعیت تکتونیکی، این توده‌ها متعلق به زون تصادم قاره‌ای هستند و با توجه به کاهیدگی شدید عناصر LREE نظیر La و Ce، احتمالاً عمق منشأ این ماگما کم بوده و سنگ مادر در محدوده سنگهای پلیتی غنی از رس است [18]. روزنبرگ [19] با توجه به میزان بالای $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه (بیش از 0/710) منشأ ماگمای این توده‌ها را پوسته قاره‌ای می‌داند.

نتیجه‌گیری

توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق تا عمیق منطقه اکتشافی کجه به شکل استوک‌های کوچک تا متوسط رخنمون یافته و ترکیب حدواسط تا اسیدی و تنوع سنگی دیوریت، مونزودیوریت، مونزونیت، مونزوگرانیت، سینوگرانیت و گرانیت دارند. این توده‌ها، بافت پورفیری و گرانولار داشته و دارای مقادیر مختلفی از کانیهای مافیک هورنبلند، بیوتیت و پیروکسن هستند. توده‌های مزبور، دگرسانیهای مختلفی با شدتهای متفاوت دارند. از نظر ماهیت ماگمایی، متعلق به سری کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند. از نظر اندیس آلومینیم، تمامی نمونه‌های منطقه به‌جز گرانیت پورفیری، در محدوده متاآلومینوس و واحد گرانیت پورفیری در محدوده پرآلومینوس قرار دارند. الگوی تغییرات عناصر کمیاب و فرعی و نمودارهای مربوطه، همگی مؤید تعلق سنگهای منطقه به گرانیت‌های تیپ I مربوط به فرورانش هستند به‌جز توده گرانیت پورفیری که شواهدی از ماگماتیسم تیپ S نمایش می‌دهد. از نظر موقعیت تکتونیکی، توده‌های منطقه متعلق به گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی و همزمان با برخورد هستند. از نظر پذیرفتاری مغناطیسی، می‌توان توده‌های نفوذی منطقه را به دو دسته مگنتیت و ایلمنیت تقسیم نمود. کلیه توده‌های نفوذی منطقه به‌جز توده گرانیت پورفیری، واجد کانیهای مگنتیت ± هورنبلند بوده و از پذیرفتاری بالایی برخوردارند که مطابق تقسیم‌بندی ایشی‌هارا، منطبق بر گرانیتوئیدهای سری اکسیدان هستند. توده گرانیت پورفیری، فاقد کانی‌های مگنتیت و هورنبلند است و از نظر پذیرفتاری مغناطیسی نیز مقدار پایینی دارد که منطبق بر سری احیایی است. از نظر سنی، توده‌های نفوذی منطقه، متعلق به کرتاسه پسین هستند. گرانیت پورفیری با سن 1/3 ± 84/2 میلیون سال (آشکوب سانتونین)، قدیمی‌ترین توده و بعد از آن توده بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت با سن 1/4 ± 70/8 میلیون سال (آشکوب کامپانین) و جوانترین آنها توده هورنبلند کوارتز دیوریت با سن 1± 67/9 میلیون سال (آشکوب ماسترشتین) است. با توجه به مجموعه ویژگیهای ژئوشیمیایی، حداقل سه خانواده یا گروه سنگی با ویژگیهای ژئوشیمیایی، منشأ و سن متفاوت در منطقه قابل تفکیک است، 1- گرانیت پورفیری، 2- سنگهای مونزونیتی و مونزودیوریتی و 3- دیوریت‌ها. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه برای توده گرانیت پورفیری با توجه به سن 84/2 میلیون سال به‌ترتیب برابر 0/708080 و 0/512129 است. میزان ϵ_{NdI} در نمونه مورد نظر برابر با 7/81- است. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه برای توده بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت از خانواده مونزونیت و مونزودیوریت‌ها با توجه به سن 70/8 میلیون سال به‌ترتیب برابر 0/706125 و 0/512416 است. میزان ϵ_{NdI} در نمونه مورد نظر برابر با 2/55- است. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه برای توده هورنبلند کوارتز دیوریت با توجه به سن 67/9 میلیون سال به‌ترتیب برابر 0/707491 و 0/512221 است. میزان ϵ_{NdI} در نمونه مورد نظر برابر با 6/43- است. از نظر منشأ ماگمایی، این توده‌ها در محدوده بین زون فرورانش و پوسته قاره‌ای قرار می‌گیرند. سه توده مورد بررسی منطقه از سه سنگ منشأ با سنهای متفاوت تشکیل‌شده و میزان متفاوتی از آلایش را تحمل نموده‌اند، به نحوی‌که جدیدترین توده منطقه (هورنبلند کوارتز دیوریت) در زمان ماستریشتین با ماهیت اکسیدان از قدیمی‌ترین سنگ منشأ (با سن 1/21 میلیارد سال) در این منطقه از بلوک لوت حاصل شده است. توده (گرانیت پورفیری) به سن سانتونین با ماهیت احیایی از سنگی با تقریباً نزدیک به قدیمی‌ترین سنگ منشأ (با سن 1/19 میلیارد سال) تشکیل شده و توده (بیوتیت هورنبلند مونزوگرانیت) به سن کامپانین با ماهیت اکسیدان از سنگ منشأ جوانتر (با سن 830 میلیون سال) حاصل شده است. قدیمی‌ترین توده منطقه منشأ پوسته‌ای داشته و دو گروه دیگر منشأ گوشته‌ای از اعماق مختلف و میزان آلایش متفاوتی دارند. توده‌های نفوذی منطقه در مقایسه با دیگر توده‌های کرتاسه پسین گزارش شده در بلوک لوت، نسبت به

منطقه بزمان و گزو از میـزان بـالاتری $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ برخـوردار بوده و نسـبت بـه منطقـه بجسـتان، ایـن میـزان در سـنگهای منطقـه کمتـر اسـت. تـوده گرانیـت پـورفیری منطقـه از نظـر ژئوشیمی و منشأ، شباهت فراوانی به سنگهای منطقه بجسـتان داشته، ولی از نظر سـنی حـدود 10 میلیـون سـال قـدیمی‌تـر است. دو گروه دیگر سنگهای منطقـه نیـز از نظـر ژئوشـیمی و منشأ به منطقه بزمان و گزو شباهت دارند، با این تفاوت که به نظر می‌رسد میزان آلایـش بیشـتری را متحمـل شـده‌انـد کـه احتمالاً عمق تشکیل و ضخامت متفاوت پوسـته در قسـمتهای مختلف بلوک لوت، در این زمینه مؤثر بوده است.

منابع

[1] آقانباتی ع، "*زمین‌شناسی ایران*"، سازمان زمین‌شناسـی و اکتشافات معدنی کشور، (1383) 606 ص.

[2] جزی م. ع، کریم‌پور م. ح، ملکزاده شفارودی آ، "*مروری بر ژئوشیمی و ایزوتوپ Sm/Nd و Rb/Sr تـوده‌هـای نفـوذی گرانیتوئیدی ژوراسیک میانی و ترشیاری: دیدگاهی نـوین بـر تکتونو- ماگماتیسم و کانی‌سازی این دوره زمانی ایران*"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره 2 (1391) ص 171-198.

[3] Karimpour M. H., Ashouri A., Saadat S., "*Geological map of Taherabad, scale 1:100,000*", Geological Survey of Iran (2009).

[4] Middlemost E. A. K., "*Magmas and magmatic rocks*", Longman, London & New York (1985) 266 p.

[5] Peccerillo A., Taylor S. R., "*Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey*", Contributions to Mineralogy and Petrology 58 (1976) 63–81.

[6] Shand S. J., "*Eruptive rocks; Their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits*", Hafner Publishing Co., New York (1947) 488 p.

[7] Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W., "*A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis*", Contributions to Mineralogy and Petrology 95 (1987) 407–419.

[8] Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G., "*Trace element discrimination diagram s for the tectonic interpretation of granitic rocks*", Journal of Petrology 25 (1984) 956-983.

[9] Pearce J. A., "*Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continenta l margins*", In: Hawkesworth C. J., Norry M. J. (Eds.), Continental Basalts and Mantle Xenoliths-Nantwich, UK: Shiva (1983) 230-249.

[10] Boynton W. V., "*Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies*",. In: Henderson P. (Eds.), Rare Earth Element Geochemistry", Elsevier, Amsterdam (Developments in Geochemistry 2) (1984) 115-152.

[11] Ishihara S., "*The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks*", Mining Geology 27 (1977) 293–305.

[12] Gehrels G. E., Valencia V., "*A Pullen in geochronology: emerging opportunities*", In: Loszewski T., Huff W. (Eds.)", Paleontology Society, Short Course 12 (2006) 67–76.

[13] Defant M. J., Jackson T. E., Drummond M. S., De Boer J. Z., Bellon H., Feigenson M. D., Maury R. C., Stewart R. H., "*The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview*", Journal of the Geological Society, London 149 (1992) 569–579.

[14] Sylvester P. J., "*Post-collisional strongly peraluminous granites*", Lithos 45 (1998) 29-44.

[15] Berberian F., "*Petrogenesis of Iranian plutons: a study of the Natanz and Bazman complex*", unpublished Ph.D. Thesis, University of Cambridge (1981) 300 p.

[16] Tarkian M., Lotfi M., Baumann A., "*Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran*", Ministry of Mines and Metals, GSI, Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran 51 (1983) 357-383.

[17] Jung D., Keller J., Khorasani R., Marcks C., Baumann A., Horn P., "*Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran*", Ministry of Mines and Metals, GSI, Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran 51 (1983) 285-336.

[18] کریم‌پـور م. ح، عاشـوری ع، سـعادت س، قـورچی م، "*پترولـوژی، پـذیرفتاری مغناطیسـی، موقعیـت تکتـونیکی و کانی‌سازی توده‌های نفوذی و سنگهای آتشفشـانی طاهرآبـاد و شـرق بجسـتان*"، مجلـه مطالعـات زمـین‌شناسـی، شـماره 1 (1378) ص 75-93.

[19] Rosenberg R., "*Geochemische and petrologische untersuchungen und Magmatiten der Intrusion Bejestan Ostiran Diplomarbeit*", Mineralogy and Petrology (1981) 122-149.