

ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd، سن‌سنجی زیرکن U-Pb و پتروژنز باتولیت گرانودیوریتی - گرانیتی نجم‌آباد، گناباد

محراب مرادی نقندر^{۱*}، محمدحسن کریم‌پور^۱، ج لنگ فارمر^۲ و چالرز استرن^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

2-Department of Geological Sciences, University of Colorado, CB-399, Boulder, CO 80309-399, USA

دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۸/۱۸، پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۱۱

چکیده

منطقه مورد مطالعه در شرق ایران و جنوب شهر گناباد قرار گرفته است. این منطقه در شمال پهنه برشی گسل دشت بیاض و نواحی جنوبی گسل درونه واقع شده است. حرکات این دو گسل موجب جابه‌جایی و تغییر مکان نسبتاً زیاد این بلوک شده است. باتولیت گرانودیوریتی - گرانیتی نجم‌آباد با روند شرقی - غربی دارای رخنمونی در حدود ۲×۸ کیلومتر است. کانی‌سازی منطقه در ارتباط با توده‌های گرانیتی و مونزونیتی می‌باشد. آلتراسیون در این توده‌ها شامل پروپلیتیک، سرسیتی، آرژیلیک و سیلیسی می‌باشد. باتولیت گرانیت - گرانودیوریت نجم‌آباد به لحاظ شاخص آلومینیوم، از نوع مت‌آلومینوس است. نمودار عنکبوتی نرمالیزه شده نسبت به بخش تحتانی پوسته قاره‌ای غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بزرگ (LILE) مانند Rb، Cs، K و عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) (Ce و La) و کاهیدگی عناصر Ba، Nb، Ta، Sr، Ti به خوبی دیده می‌شود. بر پایه پذیرفتاری مغناطیسی پایین (5 to 11×10^{-5} SI units)، گرانیت و گرانودیوریت متعلق به سری ایلمنیت هستند. سن باتولیت براساس روش U-Pb در کانی زیرکن ۱۶۱/۸۵ میلیون سال (ژوراسیک میانی کالوین) تعیین شد. براساس مقادیر ایزوتوپ اولیه $\epsilon_{Nd} = -6.51$ ، نسبت ایزوتوپ $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه ۰/۷۰۹۱۳۱ و نسبت ایزوتوپ $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه به میزان ۰/۵۱۲۰۹۵، ماگمای گرانیت - گرانودیوریت نجم‌آباد از پوسته قاره‌ای منشأ گرفته است. در محدوده زمانی ژوراسیک میانی (قبل از کالوین) به دلیل تصادم و در نتیجه کوهزایی سنگهای تریاس فوقانی - ژوراسیک تحتانی تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای واقع شده‌اند. همزمان با کوهزایی ژوراسیک میانی (۱۶۴-۱۶۲ میلیون سال قبل) گرانیتوئیدهای احیایی (سری ایلمنیت ذوب پوسته قاره‌ای) در منطقه نجم‌آباد، شاه کوه و سرخ کوه تشکیل و در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای این مناطق نفوذ نموده‌اند.

واژه‌های کلیدی: نجم‌آباد، گرانیت، سن‌سنجی زیرکن، تصادم قاره، منشأ ماگما.

مقدمه

مختلفی در مورد شکل‌گیری بلوک لوت وجود دارد. بیشتر آنها وجود یک چرخه کامل کوهزایی شامل ریفتی شدن، تشکیل اقیانوس کوچک بین بلوک لوت و افغان، فرورانش پوسته اقیانوسی، بسته شدن اقیانوس و تصادم لوت و افغان را مطرح کرده‌اند [۲ - ۳]. برخی از تئوریهای دیگر تشکیل بلوک لوت را مربوط به شرایط کششی می‌دانند [۴]. در حال حاضر به دلیل وجود کانی‌سازیهایی مختلف از قبیل قلع و تنگستن پورفیری و وجود توده‌های نفوذی نوع S در منطقه می‌توان شرایط دیگری را برای مشخص کردن جایگاه بلوک لوت در نظر گرفت. به طور

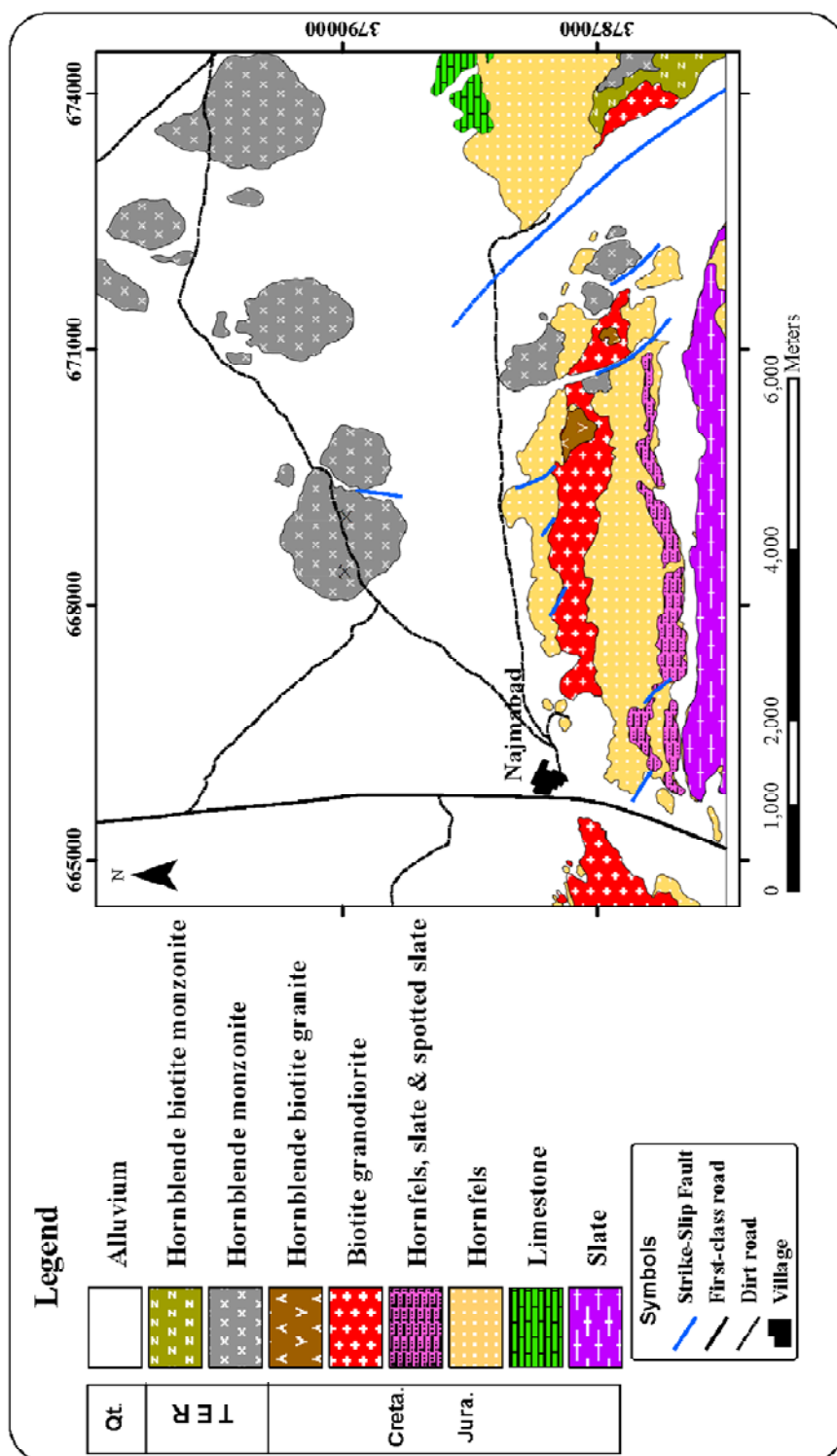
محدوده مورد مطالعه در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شهر گناباد در منطقه نجم‌آباد قرار دارد. منطقه مطالعاتی بخشی از بلوک لوت است که بلوک لوت خود بخشی از خرد قاره شرق مرکز ایران به شمار می‌آید. ماگماتیسم بلوک لوت از ژوراسیک به بعد با نفوذ توده‌های نفوذی سرخ‌کوه و غیره آغاز شده و در ترشیاری به اوج خود رسیده است، به طوری که ضخامت واحدهای آتشفشانی ترشیاری در بلوک لوت حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر تخمین زده شده است [۱]. نظریات تکتونیکی

آهک کرتاسه که در معرض دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین قرار گرفته، رخنمون کوچکی در شرق محدوده دارد (شکل ۱). مطالعات پالینولوژی بر روی نمونه‌های برداشت شده از این واحد، سن Rhaetian تا Liassic را برای آن مشخص می‌کند که این فسیل‌ها شامل؛ *Cycadopites*، *sp. Classopollis*، *Duplexixporites sp.* و *sp. Punctatosporites* می‌باشند [۷]. توده‌های نفوذی زیادی در این منطقه رخنمون دارد که می‌توان از مهمترین آنها به بیوتیت گرانودیوریت پورفیری، مونزونیت پورفیری، مونزونیت پورفیری شدیداً سیلیسی شده، هورنبلند مونزونیت پورفیری، کوارتز سینیت، بیوتیت هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری و بیوتیت گرانیات و بیوتیت مونزونیت پورفیری اشاره کرد (شکل ۱). واحد بیوتیت گرانودیوریت پورفیری بزرگترین توده نفوذی منطقه است که به صورت باتولیت با روند تقریبی شرقی- غربی در شیل‌ها و ماسه سنگهای دگرگون شده (اسلیت- کوارتزیت) نفوذ کرده است (شکل ۱). این واحد توسط گسل امتداد لغز با سنس حرکت چپ‌رو در محدوده شرقی قطع شده و آن را از گرانودیوریت قسمت غربی جدا کرده است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه به شدت گسلیده و چین‌خورده است. داوودزاده و اشمیت [۸] چرخش ۱۳۵ درجه‌ای در جهت خلاف عقربه‌های ساعت را برای بلوک ایران مرکزی قائل شده‌اند. ساختمانهای تکتونیکی اصلی در چنین رژیم تکتونیکی، گسلهای راستالغز عمیق با حرکت خمیده است، که سبب می‌شود بلوکهای مختلف در کنار یکدیگر حرکت کنند [۹]. به همین دلیل خرد قاره ایران مرکزی به بلوکهای کوچکتری تقسیم شده که هر یک از آنها حالت خمیده پیدا کرده و نسبت به یکدیگر از خود حرکت انجام می‌دهند. تشکیل طاق‌دیس‌ها و گسل‌های امتداد لغز نتیجه حرکت و چرخش بلوک لوت است. در منطقه حداقل دو مجموعه گسل شناسایی شدند [۷]: ۱- گسل‌های اصلی موجود در منطقه از نوع راستالغز بوده و بیشتر دارای راستای شمال غرب- جنوب شرق هستند. ۲- گسل‌های چپ لغز (قدیمی‌تر) انواع شمال- جنوب و یا شمال شرقی- جنوب غربی می‌باشند. گسل‌های امتداد لغز دشت بیاض و کوه هنگام از اصلی‌ترین گسل‌ها در منطقه می‌باشند [۷].

کلی‌فعالیت‌های ماگمایی بلوک لوت از ژوراسیک آغاز شده، در کرتاسه ادامه داشته و در ترشیاری به اوج خود رسیده است. به طوری که سنگهای آتشفشانی ترشیاری، به ویژه ائوسن، با ضخامت حدود ۲۰۰۰ متر، بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشاند. ترکیان و همکاران [۵] قدیمی‌ترین توده نفوذی لوت مرکزی را توده گرانیتی- گرانودیوریتی سرخ‌کوه به سن اواسط تا اواخر ژوراسیک در جنوب‌غربی بیرجند معرفی نموده‌اند. آقناباتی [۶] دو باتولیت بزرگ گرانیتی شاه‌کوه و چهارفرسخ به سن ژوراسیک میانی را در بلوک لوت معرفی کرده است. ترکیان و همکاران [۵]، گرانودیوریت گزو در ۱۵ کیلومتری جنوب دیهوک را که همراه با کانی‌سازی مس است، به اواخر کرتاسه نسبت داده است. ترکیان [۵] همچنین گرانودیوریت بجستان را معادل گرانودیوریت گزو در نظر گرفته است. هدف از این تحقیق تعیین دقیق سن توده‌های نفوذی و منشأ، در ارتباط با ذخایر قلع پورفیری است که مطالعات در محدوده رخنمون باتولیت گرانودیوریتی- گرانیتی نجم‌آباد انجام گرفت.

زمین‌شناسی

شیل ماسه‌سنگهای ژوراسیک قدیمترین واحد سنگی در منطقه مطالعاتی است. این عضو شامل تناوبی از اسلیت، به رنگ خاکستری تیره و سنگ ماسه دگرگونه تیره رنگ نازک لایه تا متوسط لایه است. شیل‌های دگرگونه این قسمت به طور عمده، سیلتی آرژیل دارند که دارای میکا و سرسیت فراوان هستند. ماسه‌سنگها نیز به طور عمده کوارتز فلدسپاتیک هستند. فیلیت نیز به صورت میان لایه‌هایی نازک تا متوسط لایه همراه این عضو دیده می‌شود. کانیهای تورمالین، زیرکن و آپاتیت به عنوان کانیهای همراه در این عضو یافت می‌شود. این واحدهای سنگی دست کم در دو مقطع زمانی تحت تأثیر دگرگونی قرار گرفته‌اند (شکل ۱). عضو ماسه سنگ شمشک زیر نفوذ توده گرانیتی قرار گرفته که سبب گردیده سنگ ماسه در مجاورت توده تحت تأثیر دگرگونی همبری قرار بگیرد. دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیبست سبز موجب تشکیل اسلیت و کوارتزیت شده است. در مرحله بعد اسلیت و کوارتزیت تحت تأثیر توده‌های گرانودیوریتی (دگرگونی همبری) و براساس موقعیت نسبت به توده به انواع شیبست و اسلیت لکه‌ای دگرگون شده‌اند. سنگ



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه نجم‌آباد.

روش مطالعه

الف) تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون و کانی‌سازی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ در منطقه‌ای به وسعت ۵۰ کیلومتر مربع.

ب) مطالعه پتروگرافی بیش از ۱۲۰ نمونه از توده‌های نفوذی منطقه. انتخاب ۱۱ نمونه از باتولیت گرانودیوریتی-گرانیتی و تجزیه برای اکسیدهای اصلی با دستگاه XRF فیلیپس (مدل X Unique II) در گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد.

رسم نمودار کنکردیا، رسم نمودارهای تراکمی و محاسبات سنهای میانگین از داده‌های $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ و $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ توسط ISOPLLOT/EX انجام می‌گیرد. سنهای میانگین $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ با حد اطمینان ۹۵/۹ تا ۹۶/۹ درصد در این روش محاسبه می‌شود. آنالیز ایزوتوپ‌های Sr و Nd با دستگاه 6-collector Finnigan MAT 261 Thermal Ionization Mass Spectrometer در دانشگاه بولدر کلرادو (امریکا) انجام شد. نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ با استفاده از اندازه‌گیری چهار حالت کلکتور استاتیک به دست آمد. بر طبق ۳۰ اندازه‌گیری مختلف SRM-987 در طول مدت مطالعه نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بین 2 ± 0.71032 تعیین شد (با محاسبه خطای میانگین ۲ سیگما). نسبت اندازه‌گیری شده $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بوسیله $0.71028 = \text{SRM-987}$ تصحیح گردید. نسبت $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اندازه‌گیری شده با $0.7219 = ^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ نرمالایز شد. اندازه‌گیری‌ها به صورت تکراری نیز انجام گرفت. در طول مطالعات ۳۳ آنالیز با استاندارد La Jolla Nd انجام گرفت که میانگین $8 \pm 0.511838 = ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ به دست آمد (بر مبنای محاسبه خطای ۲ سیگما).

پتروگرافی

باتولیت نجم‌آباد با روند شرقی- غربی با طول تقریبی ۸ کیلومتر و عرض ۱/۵ کیلومتر (مساحت رخنمون ۱۲ کیلومتر بر روی سطح زمین)، دارای ترکیب گرانیتی تا گرانودیوریتی است (شکل ۱). بیوتیت گرانودیوریت بزرگترین توده نفوذی منطقه است (۵ کیلومترمربع) که به صورت باتولیت با روند شرقی- غربی در اسلیت‌ها ژوراسیک نفوذ نموده و به دگرگونی همبری در آنها منجر شده است (شکل ۱). این واحد دارای بافت سری‌آیت با زمینه دانه درشت است. درصد درشت بلورها حدود ۳۵ درصد است. کانیه‌های درشت بلور شامل ۷ تا ۱۰ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه ۲/۵ میلیمتر، ۱۰ تا ۱۵ درصد فلدسپات پتاسیم تا اندازه ۱/۲ میلیمتر و ۱۰ تا ۱۵ درصد کوارتز در زمینه تا ۲ میلیمتر می‌باشد. کانیه‌های قابل رویت در زمینه سنگ نیز شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپات و بیوتیت است. کانیه‌های اپک شکل‌دار تا اندازه ۰/۴ میلیمتر بوده و مقدار آنها تا ۰/۲ درصد می‌رسد. بیوتیت گرانیت فقط در قسمت‌های شرق روستای نجم‌آباد رخنمون دارد و وسعت آن در این منطقه به حدود ۰/۵ کیلومترمربع می‌رسد (شکل ۱). بیوتیت گرانیت

(پ) تجزیه نمونه برای عناصر جزئی و نادر خاکی (REE) در آزمایشگاه ACME (کانادا) به روش ذوب قلیایی با دستگاه ICP-MS

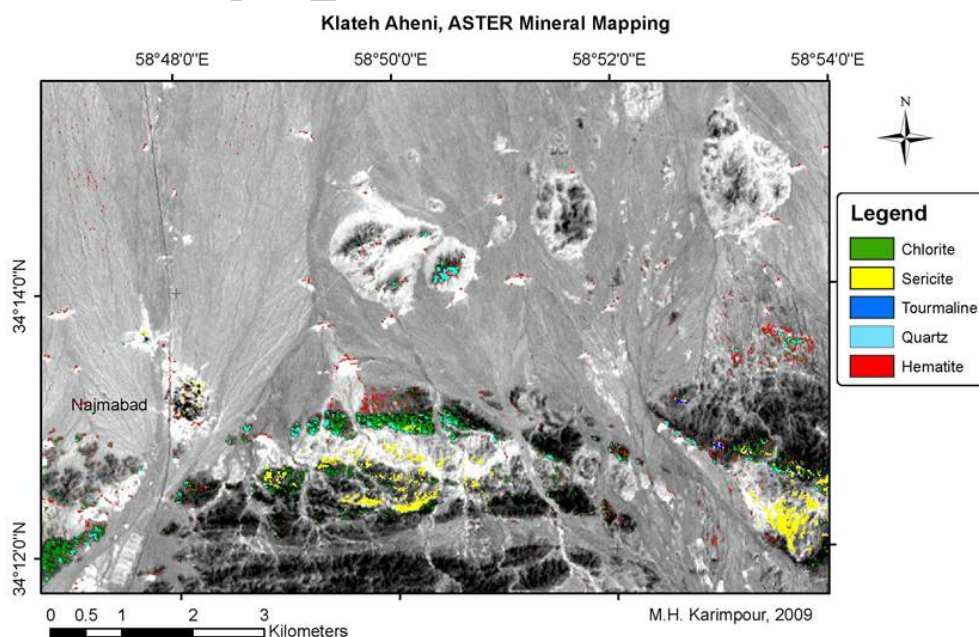
زیرکن‌های جدا شده برای تعیین سن به مرکز Laser Chron آریزونا در دانشگاه آریزونا آمریکا فرستاده شدند. در آن جا از روش Laser-Ablation multi collector ICP-MS برای سن‌سنجی استفاده می‌شود. زیرکن‌ها ابتدا در یک پلاک اپاکسی به قطر ۱ اینچ همراه با خرده‌هایی از زیرکن استاندارد ID-TIMS و شیشه‌های NIST SPM610 قالب‌گیری شده، سپس این پلاکها نصف شده و صیقل می‌خورند. عکس زیرکن‌ها در نور عبوری، انعکاسی و نیز در زیر میکروسکپ کاندولومینسانس (CL) گرفته می‌شود. تصویر CL ساختار داخلی دانه‌های زیرکن برش خورده را نشان می‌دهد و با استفاده از آن مکانهای مناسب برای اشعه لیزر در قسمت‌های هموزن بلور انتخاب می‌گردند. روش Laser-Ablation ICP-MS قادر است تا سن‌سنجی به روش اندازه‌گیری U-Pb را با صحت بهتر از ۲٪ (۲ سیگما) و تفکیک مکانی چند میکرون انجام دهد. این روش معمولاً با یک اشعه به قطر ۳۵ یا ۲۵ میکرون و اگر لازم باشد در دانه‌های ریزتر به قطر ۱۵ یا ۱۰ میکرون، صورت می‌پذیرد. اشعه ۳۵ یا ۲۵ میکرونی با بسامد ۸ هرتز و انرژی ۱۰ میکروژول تنظیم می‌شود که می‌تواند یک سیگنال تقریباً cps ۱۰۰۰۰۰ در گرم در تن برای U در زیرکن تولید کند. برای اندازه‌های کوچکتر اشعه لیزر، انرژی (۶۰ میکروژول) و نرخ تکرار (۴ هرتز) کاهش می‌یابد. در هر دو حالت ذکر شده مواد برانگیخته شده توسط اشعه لیزر از یک اتاقک گاز هلیوم عبور می‌کنند. گاز هلیوم و نمونه برانگیخته شده قبل از ورود به محیط پلازما ICP-MS با گاز آرگون مخلوط می‌شوند. مقدار Pb ایزوتوپی نسبت به Th و U به کمک نمونه استاندارد که همراه با زیرکن‌ها قالب‌گیری شده و هر بار با اندازه‌گیری سه تا پنج نمونه مجهول، اندازه‌گیری آن تکرار می‌شود، محاسبه می‌گردد. نمونه استاندارد زیرکن ID-TIMS نمونه ای زیرکن از سری لانکا با سن $3/2 \pm 563/5 \text{ Ma}$ می‌باشد. همچنین مقدار Th و U نمونه‌های مجهول با شیشه‌های NIST SRM610 مورد سنجش قرار می‌گیرد. مقدار U این شیشه‌ها ۴۶۲ گرم در تن و مقدار Th آن ۴۵۷ گرم در تن می‌باشد. قطعیت آنالیزهای انجام شده حدود ۲ سیگما (تقریباً ۱ درصد) برای $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ و $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ است. پس از اتمام کار،

پردازش از تجربیات و روشهای روان [۱۰]، یاماگوچی [۱۱]، روان و مارس [۱۲] و هوبارد [۱۳] استفاده شد. زون‌های آلتراسیون مهم که در محدوده بیوتیت گرانودیوریت شناسایی شدند عبارتند از: زون سرسیتیک، زون پروپلیتیک، زون سیلیسی، زون آرژیلیک و زون تورمالین. زون سرسیتیک نسبتاً گسترده است و موجب آلتزه شدن گرانودیوریت و سنگهای مجاور شده است (شکل ۲). زون پروپلیتیک عمدتاً با حضور کانی کلریت و خیلی محدود اپیدوت همراه است (شکل ۲). علت این موضوع شرایط احیایی محلول ماگمایی بوده است. بیوتیت گرانودیوریت و سنگهای مجاور تحت تأثیر این آلتراسیون قرار گرفته‌اند (شکل ۲). توده‌های مونزونیتی خیلی جزئی کلریتی شده‌اند. زون سیلیسی عمدتاً در مرز شمالی بیوتیت گرانودیوریت تشکیل شده است (شکل ۲). زون تورمالین فقط در بیوتیت گرانودیوریت و سنگهای مجاور تشکیل شده است (شکل ۲). تورمالین به صورت پراکنده در متن سنگ، رگه‌ای و به همراه رگه‌های کوارتز مشاهده شد. زون آرژیلیک در توده بیوتیت گرانودیوریت و در بخش شرقی آن مشاهده می‌شود. کانی‌سازی به صورت اکسیدهای آهن ثانویه (سولفیدهای اکسیده شده) در متن سنگ و در رگه‌ها در اطراف بیوتیت گرانودیوریت متمرکز است (شکل ۲).

دارای بافت گرانولار دانه درشت است. کانیهای اولیه سنگ شامل ۲۴ تا ۲۵ درصد کوارتز تا اندازه ۰/۸ میلیمتر، ۱۰ تا ۱۲ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه ۰/۶ میلیمتر، ۶۲ تا ۶۵ درصد فلدسپات پتاسیم تا ۱/۵ میلیمتر می‌باشد. کانی بیوتیت نیز در این سنگ تا اندازه ۰/۸ میلیمتر می‌رسد و مقدار آن ۵ تا ۶ درصد است. کانی‌های اپیک بی شکل تا اندازه ۰/۱ میلیمتر بوده و مقدار آنها تا ۰/۲ درصد می‌رسد. هورنبلند-بیوتیت گرانیت در شرقی‌ترین قسمت محدوده مورد مطالعه رخنمون دارد. وسعت برون‌زد این واحد بر روی زمین ۰/۲ کیلومتر مربع است. این واحد بافت گرانولار یا دانه درشت دارد. کانیهای اصلی و اولیه موجود در این واحد شامل کوارتز، فلدسپات، پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند است. کانیهای اولیه سنگ شامل ۱۲ تا ۱۳ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه ۱/۸ میلیمتر، ۳۷ تا ۴۰ درصد فلدسپات پتاسیم تا اندازه ۳ میلیمتر و ۳۰ تا ۳۲ درصد کوارتز تا ۳/۵ میلیمتر می‌باشد. کانی بیوتیت نیز در این سنگ تا اندازه ۲/۲ میلیمتر می‌رسد و مقدار آن ۵ تا ۶ درصد است و کانی هورنبلند دارای فراوانی ۳ تا ۴ درصد با اندازه ۰/۱ تا ۰/۵ میلیمتر است. کانیهای اپیک بی شکل تا اندازه ۰/۱ میلیمتر بوده و مقدار آنها تا ۰/۲ درصد می‌رسد.

آلتراسیون و کانی‌سازی

داده‌های ماهواره استر به منظور شناسایی کانیهای معرف زونهای آلتراسیون پردازش شدند (شکل ۲). در خصوص روش



شکل ۲. نقشه کانیهای آلتراسیون با استفاده از پردازش داده‌های ماهواره.

ژئوشیمی

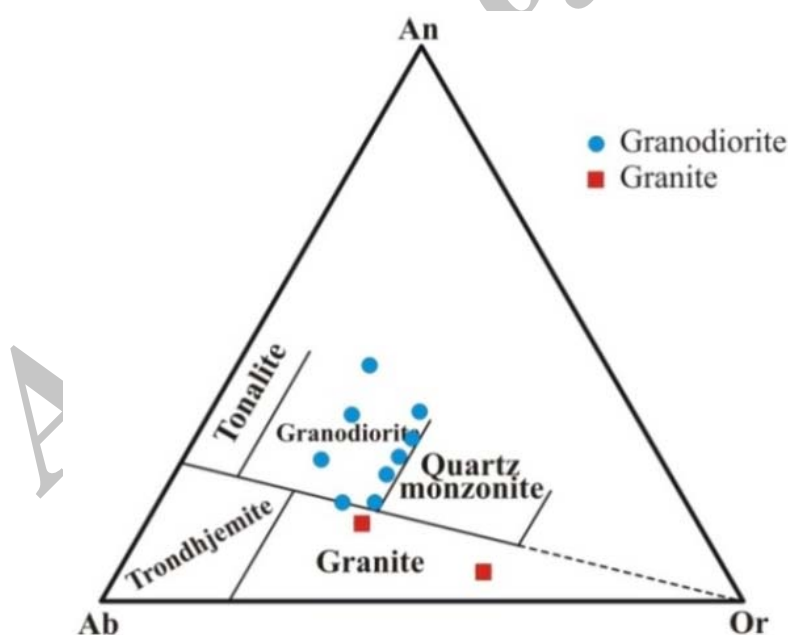
عناصر اصلی (Major Elements)

نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی توده‌های نفوذی گرانیتی-گرانودیوریتی منطقه نجم‌آباد در جدول (۱) آمده است. مقدار SiO_2 توده‌ها از ۶۳/۵۲ تا ۷۳/۹۸ درصد متغیر است. نمودار مثلثی Ab-Or-An نشان می‌دهد که نمونه‌ها در محدوده گرانیت و گرانودیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۳). بر طبق رده‌بندی میدلموست [۱۴] در نمودار سنگ‌های پلوتونیک $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 توده‌ها در محدوده گرانیت و گرانودیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۴). مقدار $A/\text{CNK}<1$ و برای توده‌های نفوذی گرانیتی و گرانودیوریتی منطقه نجم‌آباد نشان می‌دهد که غالب این توده‌های کالک‌آلکان از نوع متاآلومینوس هستند (شکل ۵). از نکات مورد توجه، مقدار K_2O و نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ بالاست. میزان K_2O از ۱/۹۸ تا ۶/۲۵ درصد متغیر است (جدول ۱). نمودار K_2O در مقابل SiO_2 نشان می‌دهد که توده گرانودیوریتی در

ناحیه کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و توده گرانیتی در سری کالک‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل ۶).

عناصر فرعی و نادر خاکی

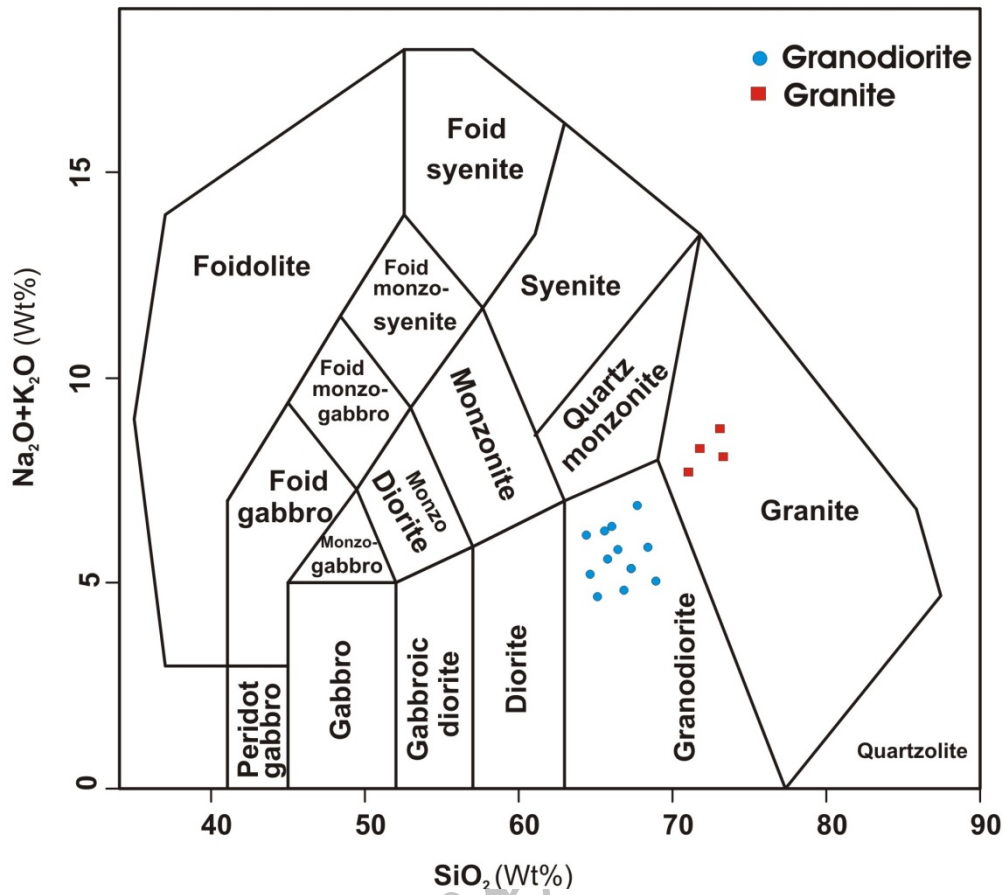
نتایج تجزیه عناصر فرعی و خاکی کمیاب سبک و سنگین در جدول (۲) ارائه شده است. عناصر LILE شامل Sr, Rb و Ba از نسبت تقریباً بالایی برخوردار هستند. نسبت Rb/Sr بین ۰/۱۱ تا ۲/۱۹ متغیر است. مقدار Ba در توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی بین ۱۱۵ تا ۹۵۳ گرم در تن می‌باشد که این نشان‌دهنده ذوب پتاسیم فلدسپار موجود در منشأ به وجود آورنده توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی منطقه نجم‌آباد است. با استفاده از نسبت $1000\text{Ga}/\text{Al}$ به Y نشان می‌دهد که توده‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه مربوط به سری‌های I و S هستند (شکل ۷).



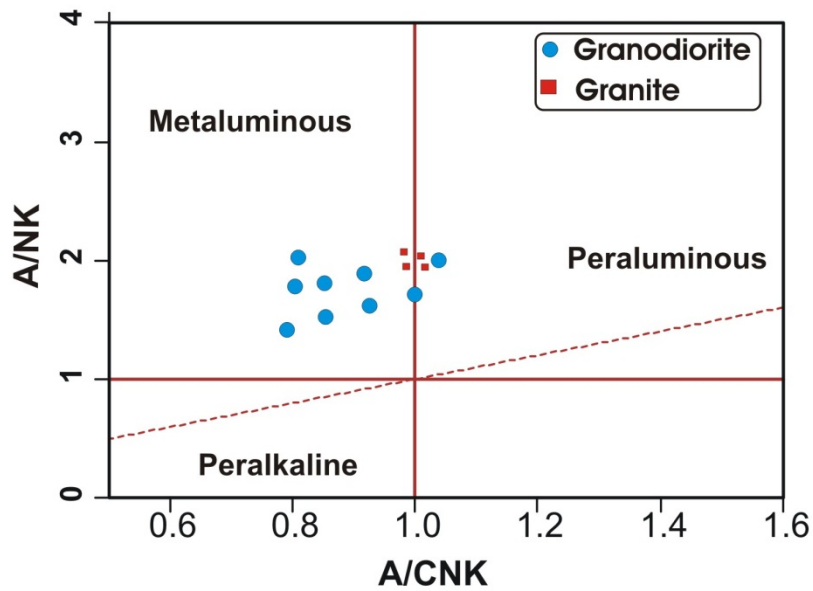
شکل ۳. مثلث An-Ab-Or نشان می‌دهد که توده‌ها در دو قسمت گرانیت و گرانودیوریت قرار می‌گیرند.

جدول ۱. میزان اکسیدهای اصلی (%) و عناصر فرعی (ppm) و کانیهای محاسبه نورم (CIPW) باتولیت نجم‌آباد.

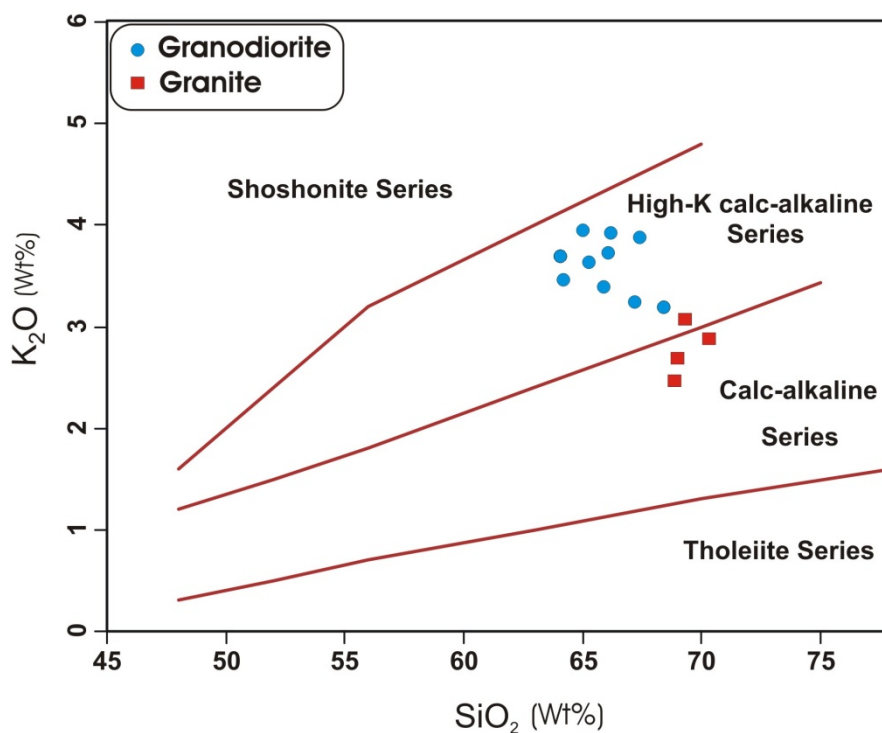
	KAP-6	KAP-1	KAP-29	KC-118	KC-119	KC-127	KC-114	KC-126	KAP-2	KAP-9	KAP-27
X	674216	673751	672050	682893	681546	673921	680127	681527	673785	674236	671695
Y	3786841	3787007	3786666	3782659	3784247	3787093	3787187	3784253	3787059	3786573	3786913
<i>Oxides %</i>											
SiO ₂	۶۲/۵۳	۶۴/۳۲	۶۳/۵۲	۶۲/۲۵	۶۳/۴۳	۶۳/۸۳	۶۵/۶۸	۶۴/۳۷	۷۲/۹۸	۶۲/۶	۵۵/۸۴
TiO ₂	-/۵۹	-/۵۸	-/۵۶	-/۶۱	-/۶	-/۶۲	-/۳۲	-/۵۸	-/۰۷	-/۵۸	-/۴
Al ₂ O ₃	۱۴/۳۲	۱۳/۸۱	۱۵/۰۹	۱۳/۳۵	۱۴/۰۵	۱۳/۸۸	۱۳/۲۹	۱۳/۰۴	۱۳/۴۹	۱۴/۸۱	۸/۱۵
FeO	۴/۵۳	۳/۸	۴/۰۶	۶/۳	۴/۸۱	۶/۴	۴/۷	۴/۷۴	-/۳۲	۳/۶۳	۳/۳۷
Fe ₂ O ₃	۲/۰۹	۲/۰۸	۲/۰۶	۲/۱۱	۲/۱	۱/۱۲	۱/۸۲	۲/۰۸	۱/۵۷	۲/۰۸	۱/۹
MnO	-/۰۹	-/۰۹	-/۰۵	-/۱۱	-/۱	-/۱	-/۰۳	-/۱	-/۰۲	-/۱	-/۲
MgO	۳/۵۸	۲/۲۷	۲/۹۷	۳/۲۵	۳/۲۷	۳/۸۵	۲/۳۸	۳/۱۶	-/۳۴	۲/۳	۱/۶۵
CaO	۴/۲۸	۵/۴۵	۲/۹۵	۳/۳۶	۳/۲۸	۳/۷۳	۲/۱	۳/۵۳	۱/۴۵	۴/۹۳	۲/۳۵
Na ₂ O	۲/۰۱	۲/۰۵	۲/۴۷	۲/۹۲	۲/۸۸	۲/۷۹	۳/۴۴	۲/۹۱	۲/۵۷	۳/۸۴	۱/۸۹
K ₂ O	۳/۰۸	۲/۹۹	۳/۲۹	۳/۶۵	۳/۳۸	۱/۹۸	۳/۵۱	۳/۳۱	۶/۲۵	۲/۲۹	۲/۵۴
P ₂ O ₅	-/۱۶	-/۱۶	-/۱۴	-/۱۶	-/۱۶	-/۱۶	-/۱	-/۱۳	-/۰۵	-/۱۴	-/۲۵
H ₂ O ^(*)	۱	۱/۰۱	-/۹۱	۱/۰۵	۱	۱/۰۲	-/۹۴	-/۹۹	-/۸۶	۱/۰۵	۱/۲۵
Total	۹۸/۲۶	۹۸/۶۱	۹۸/۰۷	۹۹/۱۲	۹۹/۰۶	۹۹/۴۸	۹۸/۳۱	۹۸/۹۴	۹۹/۹۷	۹۸/۳۵	۹۸/۷۹
<i>Trace (ppm)</i>											
Rb	۱۰/۱۰	۱۲/۱۴	۱۱۵/۱	۱۷۷	۱۴۶	۱۰۰/۲	۱۲۱	۱۵۱	۱۴۵/۴	۹۸/۷	۲۸/۸
Sr	۲۰۳/۸	۱۵۶/۹	۲۳۵	۲۰۲	۱۸۴	۲۴۳/۸	۳۵۱	۱۸۱	۶۶/۳	۲۶۲/۵	۲۴۸/۴
Ba	۴۸۴	۲۶۲	۳۲۵	۳	۲	۴۹۱	۹۵۳	۱۸۴	۲۰۷	۲۵۹	۱۱۵
Nb	۹/۵	۱۰/۱	۱۰/۴	۱۲	۱۱	۱۱/۱	۴/۵	۱۱/۳	۲/۴	۹/۶	۹
Zr	۱۳۶/۹	۱۳۳/۱	۱۴۰/۸	۱۲۴	۱۶۵	۱۵۳/۶	۸۹/۷	۱۴۵	۴۸/۶	۱۵۱/۸	۲۰۷/۹
Co	۱۵/۷	۱۵	۱۲/۵	۱۷/۳	۱۴/۳	۱۰/۸	۴/۷	۱۴/۷	-/۸	۱۱/۸	۱۰/۴
Hf	۳/۹	۳/۴	۴	۳/۶	۴/۶	۴/۳	۲/۹	۴/۱	۲/۳	۴/۶	۵/۴
Ta	-/۷	-/۶	-/۸	۱	-/۹	-/۷	-/۴	-/۸	-/۷	-/۸	-/۵
Cs	۸/۴	۸/۹	۷/۴	۱۸/۹	۱۲	۵/۶	۶/۲	۱۳	۲/۴	۷/۱	۱/۶
Rb/Sr	-/۴۹	-/۷۷	-/۴۸	-/۷۸	-/۷۹	-/۴۱	-/۳۴	-/۸۳	۲/۱۹	-/۳۷	-/۱۱
Rb/Ba	-/۲	-/۴۶	-/۳۵	-/۵۹	-/۷۳	-/۲	-/۱۲	-/۵۳	-/۷	-/۳۸	-/۲۵
<i>Norm (CIPW)</i>											
Q	۲۲/۳۶	۲۵/۶۸	۲۳/۹۷	۱۶/۲۶	۱۹/۴۲	۲۲/۱۹	۲۱/۴۴	۲۰/۸۸	۳۰/۲۳	۱۷/۵۴	۱۹/۷۲
C	-/۲۸	-/۰۰	۲/۴۴	-/۰۰	-/۰۷	-/۷۵	-/۲۵	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰
Or	۱۸/۲۰	۱۷/۶۷	۱۹/۴۴	۲۱/۵۷	۱۹/۹۸	۱۱/۷۰	۲۰/۷۴	۱۹/۵۶	۳۶/۹۴	۱۳/۵۳	۲/۷۸
Ab	۱۷/۰۱	۱۷/۳۵	۲۰/۹۰	۲۴/۷۱	۲۴/۳۷	۲۳/۶۱	۲۹/۱۱	۲۴/۶۲	۲۴/۲۹	۳۲/۴۹	۴/۹۹
An	۲۰/۱۹	۱۹/۶۵	۱۳/۷۲	۱۲/۵۴	۱۵/۲۳	۱۷/۴۶	۹/۷۷	۱۲/۷۴	۲/۷۴	۱۶/۴۱	۱۸/۲۰
Di	-/۰۰	۵/۲۱	-/۰۰	۲/۵۶	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	۳/۲۲	۱/۸۳	۵/۸۴	۱۷/۰۱
Wo	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	۱/۸۲	-/۰۰	۲۷/۳۸
Hy	۱۴/۷۰	۷/۵۶	۱۲/۳۲	۱۵/۸۴	۱۴/۴۴	۱۹/۵۸	۱۲/۵۸	۱۲/۵۰	-/۰۰	۷/۰۴	-/۰۰
Mt	۳/۰۳	۳/۰۲	۲/۹۹	۳/۰۶	۳/۰۵	۱/۶۲	۲/۶۴	۳/۰۲	-/۸۹	۳/۰۲	۲/۷۶
Il	۱/۱۲	۱/۱۰	۱/۰۶	۱/۱۶	۱/۱۴	۱/۱۸	-/۶۱	۱/۱۰	-/۱۳	۱/۱۰	-/۷۶
Hm	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۰۰	-/۹۵	-/۰۰	-/۰۰
Ap	-/۳۸	-/۳۸	-/۳۳	-/۳۸	-/۳۸	-/۳۸	-/۲۴	-/۳۱	-/۱۲	-/۳۳	-/۵۹
Sum	۹۷/۲۷	۹۷/۶۱	۹۷/۱۷	۹۸/۰۸	۹۸/۰۷	۹۸/۴۷	۹۷/۳۸	۹۷/۹۶	۹۹/۹۳	۹۷/۳۱	۹۴/۱۹



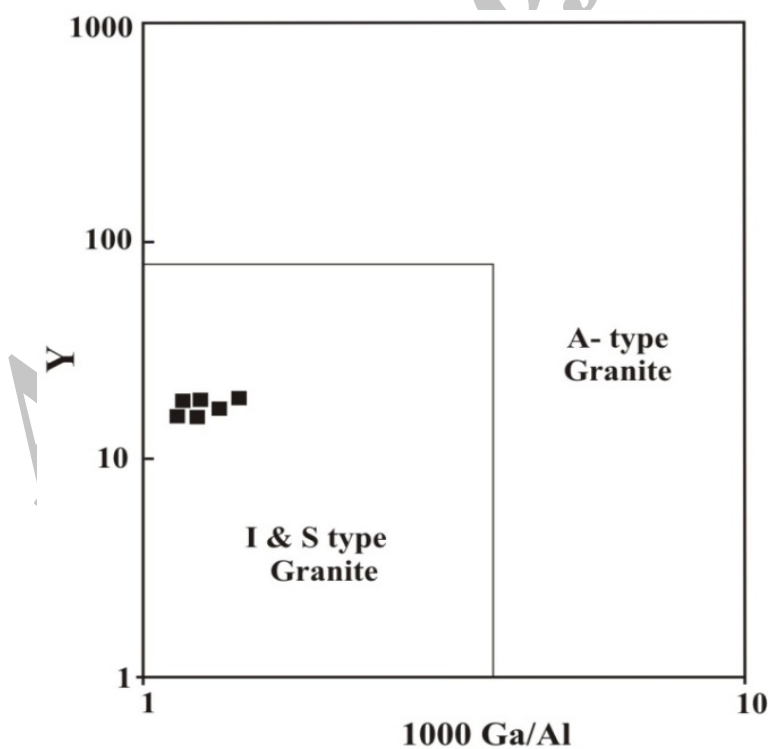
شکل ۴. رده‌بندی میدلموست [۱۴] برای توده‌های نفوذی منطقه.



شکل ۵. نمودار شاند به منظور تعیین اندیس آلومینیوم [۱۵].



شکل ۶. نسبت SiO_2 به K_2O برای توده‌های نفوذی منطقه [۱۶].



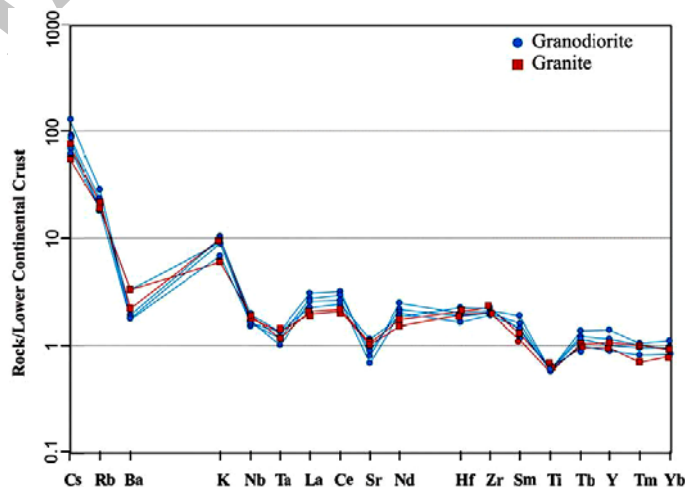
شکل ۷. قرار گرفتن توده‌های نفوذی مورد مطالعه در محدوده گرانیت‌های نوع I و S.

جدول ۲. نتایج تجزیه عناصر فرعی و نادرخاکی سبک و سنگین و نسبت برخی از عناصر کمیاب.

REEs (ppm)	KAP (6)	KAP (1)	KAP (29)	KC (118)	KC (119)	KC (127)	KC (114)	KC (126)	KAP (2)	KAP (9)	KAP (27)
LREEs											
La	۲۹/۵	۲۷/۹	۲۱/۱	۲۹	۲۹/۷	۲۲/۶	۷/۴	۳۳/۳	۵/۴	۲۴/۴	۲۲/۱
Y	۲۱/۹	۱۹	۲۰/۲	۲۷	۲۵/۲	۱۷/۸	۴/۶	۲۶/۲	۲۰/۲	۱۶/۸	۱۶/۹
Ce	۶۶/۵	۵۹/۶	۴۷/۲	۶۲/۴	۶۴/۹	۴۹/۱	۱۴/۳	۷۲	۱۲/۱	۵۴/۵	۴۹/۴
Pr	۷/۲۳	۶/۷۹	۴/۹۹	۷/۰۷	۷/۳	۵/۵۲	۱/۵۲	۸/۰۲	۱/۳۹	۶/۰۹	۵/۳۷
Nd	۲۶/۸	۲۵	۱۹/۱	۲۶/۶	۲۷/۳	۲۱/۹	۶/۴	۳۱/۱	۴/۶	۲۳/۲	۲۰/۲
Sm	۴/۹۹	۴/۵۷	۳/۵۲	۵/۱۳	۵/۳۹	۴/۰۷	۱/۳۳	۵/۸۳	۱/۴۳	۴/۴۲	۳/۶۷
Eu	۱/۰۶	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۲۷	۰/۹۸	۰/۳۱	۰/۹۱	۰/۹۳
HREEs											
Gd	۴/۵۴	۳/۹۹	۳/۳۹	۴/۶۵	۴/۸۱	۳/۴۳	۱/۱۷	۴/۹۳	۱/۸۵	۳/۷۵	۳/۰۱
Tb	۰/۷۱	۰/۶۷	۰/۶۰	۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۵۶	۰/۱۸	۰/۸	۰/۴۱	۰/۵۸	۰/۵۱
Dy	۳/۸۱	۳/۳۷	۳/۲۶	۴/۵۶	۴/۵۱	۳/۳۳	۰/۹۴	۴/۵۸	۲/۸۲	۳/۰۹	۲/۸۷
Ho	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۶۲	۰/۱۷	۰/۸۷	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۵۸
Er	۲/۱۵	۲/۰۳	۲	۲/۶۶	۲/۵۲	۱/۸۳	۰/۴۹	۲/۵۶	۲/۰۴	۱/۷۳	۱/۶۸
Tm	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۰۷	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۲۶
Yb	۲/۰۲	۲/۰۶	۱/۹۸	۲/۶۱	۲/۴۴	۱/۷۳	۰/۴۲	۲/۴۴	۲/۴۷	۱/۷۹	۱/۷۳
Lu	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۰۷	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۲۶	۰/۲۶
Ratio											
Eu/Eu*	۰/۶۸۵	۰/۶۶۲	۰/۸۲۸	۰/۶۱۷	۰/۵۸	۰/۷۵۷	۰/۶۶۵	۰/۵۶۲	۰/۵۸۶	۰/۶۸۷	۰/۸۶
(La/Yb)N	۹/۷۳۶	۹/۰۳۹	۷/۱۰۴	۷/۴۰۷	۸/۱۱۵	۸/۷۰۹	۱۱/۷۴۶	۹/۰۹۸	۱/۴۵۷	۹/۰۸۸	۸/۵۱۶
(La/Sm)N	۳/۶۳۷	۳/۷۵۶	۳/۶۸۷	۳/۴۷۷	۳/۳۹	۳/۴۱۶	۳/۴۲۳	۳/۵۱۴	۲/۳۲۳	۳/۳۹۶	۳/۷۰۴
(Eu/Yb)N	۱/۴۹۹	۱/۳۷۶	۱/۳۴۲	۱/۰۷۳	۱/۱۲۴	۱/۵۱۹	۱/۸۳۷	۱/۱۴۸	۰/۳۵۹	۱/۴۵۳	۱/۵۳۶

نمودار عنکبوتی برخی عناصر اصلی، فرعی و خاکی کمیاب (Ce و La) (LREE) سبک (K, Cs, Rb) و عناصر خاکی کمیاب سبک (Ba, Nb, Ta, Sr, Ti) مشاهده می‌شود (شکل ۸). کاهیدگی عناصر (Ba, Nb, Ta, Sr, Ti) به خوبی دیده می‌شود (شکل ۸).

نمودار عنکبوتی برخی عناصر اصلی، فرعی و خاکی کمیاب نرمالیزه شده نسبت به بخش تحتانی پوسته قاره‌ای (Lower Continental Crust) در شکل (۸) ترسیم شده است. غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بزرگ (LILE) مانند



شکل ۸. نمودار عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی کمیاب توده‌های نفوذی گرانیتی و گرانودیوریتی که نسبت به پوسته قاره‌ای تحتانی نرمالیزه شده است (مقادیر گوشته اولیه از سان و مک‌دوناف) [۱۷].

$10^{-5} \times 100$ و سری ایلمینیت کمتر از 5.0×10^{-5} است. میزان پذیرفتاری مغناطیسی گرانودیوریت و گرانیت‌ها در جدول (۳) گزارش شده است. بر اساس ترکیب کانی‌شناختی و پذیرفتاری مغناطیسی کم $[SI \times 10^{-5} (5 \text{ to } 11)]$ ، بیوتیت گرانودیوریت و گرانیت مربوط به سری ایلمینیت (نوع احیایی) و از گرانیت‌های نوع S است (شکل ۱۰).

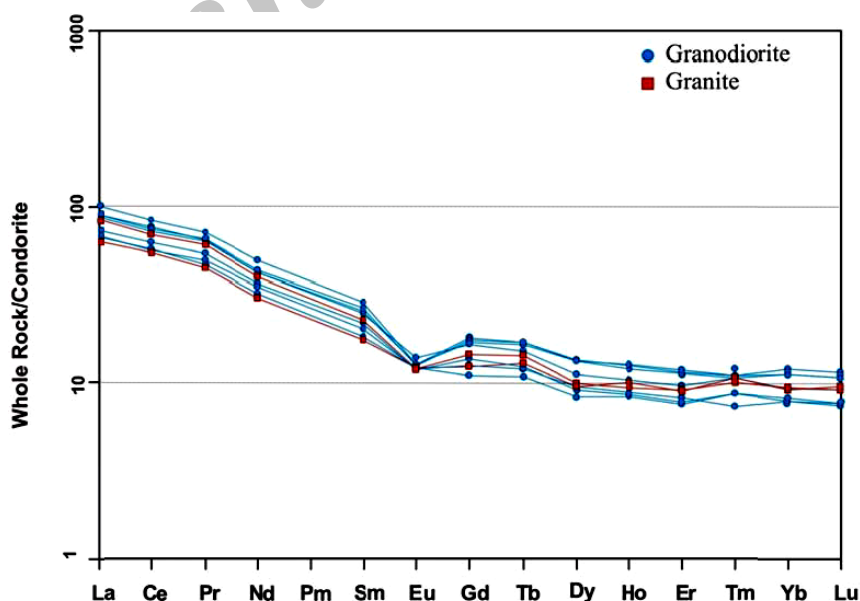
سن‌سنجی زیرکن (U-Th-Pb Zircon age dating)

از نمونه‌های برداشت شده از باتولیت گرانودیوریتی نجم‌آباد، بعد از مطالعات دقیق پتروگرافی و پترولوژیکی یک نمونه برای سن‌سنجی انتخاب شد. ۷۰ دانه زیرکن در اندازه مناسب با روش خاص از پودر گرانودیوریت در دانشگاه فردوسی مشهد جدا شدند. این تعداد زیرکن برای سن‌سنجی به روش U-Pb و مطالعات ایزوتوپی به دانشگاه آریزونای (امریکا) فرستاده شدند. نتایج آنالیز U-Th-Pb برای زیرکن در جدول (۴) آمده است. نتایج محاسبه و تعیین سن ایزوتوپی در نمودار شکل (۱۱) نشان داده شده است. بر پایه ۲۴ نقطه آنالیز روی دانه‌های زیرکن سن توده نفوذی گرانیتی برابر با $161/85 \pm 1/5$ میلیون سال می‌باشد. باتولیت نجم‌آباد در ژوراسیک میانی (کالوین) در مجموعه اسلیت و کوارتزیت ژوراسیک نفوذ نموده است.

نمودار عنکبوتی مقدار عناصر خاکی کمیاب نرمالیزه شده با مقادیر REE کندریت را نشان می‌دهد (شکل ۹). همان‌طور که مشخص است غنی‌شدگی در عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) نسبت به الگوی عناصر خاکی کمیاب متوسط (MREE) و سنگین (HREE) در کلیه نمونه‌ها دیده می‌شود. عنصر Eu نیز نسبتاً ناهنجاری منفی کمی ($Eu/Eu^* = 0.56 \text{ to } 0.86$) در توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی نشان می‌دهد. تیلور و مک‌لنن [۱۶] بیان داشتند که هر گاه مقدار نسبت Eu/Eu^* بیش از ۱ باشد، ناهنجاری مثبت و هرگاه کمتر از ۱ باشد، ناهنجاری منفی است. ناهنجاری منفی Eu به علت حضور کانی پلاژیوکلاز به عنوان کانی باقیمانده در منشأ ماگماست. میزان Sr پایین نمونه‌هایی که Eu پایین‌تری نیز دارند این موضوع را اثبات می‌کند. نسبت عناصر کمیاب نرمالیزه شده در توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی منطقه در جدول (۲) نشان داده شده است.

پذیرفتاری مغناطیسی

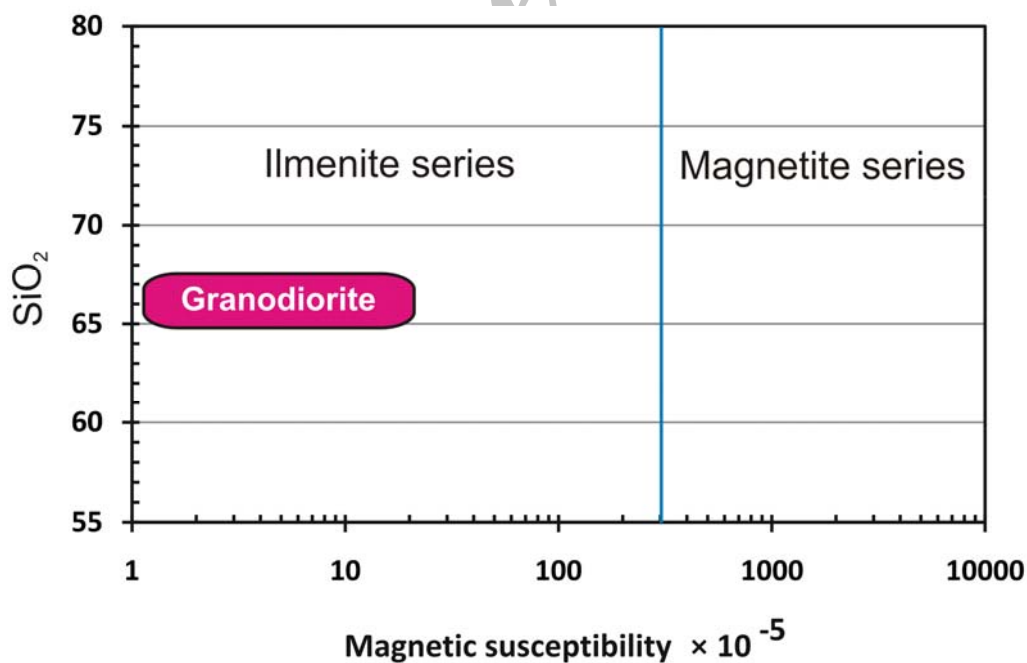
ایشی‌هارا [۱۹] گرانیت‌ها را به دو سری مگنتیت و ایلمینیت تقسیم کرد. سری مگنتیت با گرانیت‌های تیپ I و سری ایلمینیت غالباً با گرانیت‌های تیپ S هم‌پوشانی دارد. عدد پذیرفتاری مغناطیسی گرانیت‌های سری مگنتیت بیشتر از



شکل ۹. نمودار عنکبوتی عناصر REE توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی منطقه مورد مطالعه. به کندریت نرمالیزه شده است (مقادیر REE کندریت از بوینتن [۱۸]).

جدول ۳. پذیرفتاری گرانودیوریت و گرانیت‌های باتولیت نجم‌آباد.

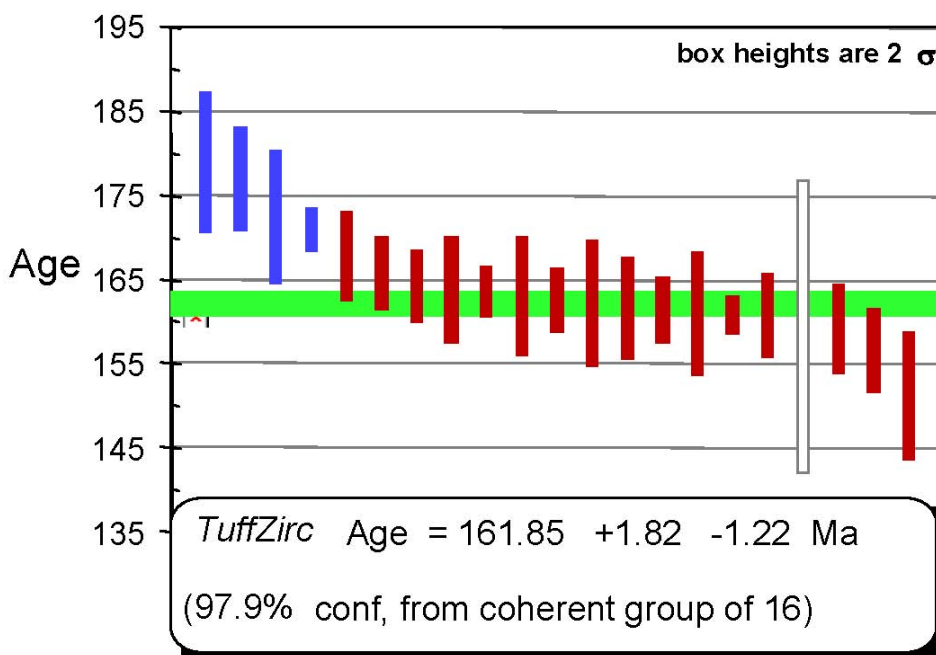
Sample No	X	Y	Susceptibility ($\times 10^{-5}$ SI)	Lithology
KAP-6	۶۷۴۲۱۶	۳۷۸۶۸۴۱	۱۰	Granodiorite
KAP-1	۶۷۳۷۵۱	۳۷۸۷۰۰۷	۵	Granite
KAP-29	۶۷۲۰۵۰	۳۷۸۶۶۶۶	۱	Granite
KC-118	۶۸۲۸۹۳	۳۷۸۲۶۵۹	۱	Granodiorite
KC-119	۶۸۱۵۴۶	۳۷۸۴۲۴۷	۱۱	Granodiorite
KC-127	۶۷۳۹۲۱	۳۷۸۷۰۹۳	۱	Granodiorite
KC-114	۶۸۰۱۲۷	۳۷۸۷۱۸۷	۱	Granodiorite
KC-126	۶۸۱۵۲۷	۳۷۸۴۴۲۵۳	۴	Granodiorite
KAP-2	۶۷۳۷۸۵	۳۷۸۷۰۵۹	۱	Granodiorite
KAP-9	۶۷۴۲۳۶	۳۷۸۶۵۷۳	۸	Granodiorite
KAP-27	۶۷۱۶۹۵	۳۷۸۶۹۱۳	۵	Granodiorite



شکل ۱۰. نمودار تفکیک گرانیت‌های سری مگنتیت از ایلمینیت.

جدول ۴. نتایج حاصل از سن‌سنجی زیرکن به وسیله دستگاه (Laser-Ablation Multicollector) برای توده گرانودیوریتی.

Sample	U (ppm)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	U/Th	$^{206}\text{Pb}^*/^{207}\text{Pb}^*$	± (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}^*$	± (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	± (%)	Best Age (Ma)	± (Ma)
KI-7-1C	۳۴۸	۸۸۰۴	۲/۱	۲۱/۴۴۶۲	۹	۰/۱۶۵۵	۹/۱	۰/۰۲۵۷	۱/۵	۱۶۳/۹	۲/۴
KI-7-3C	۵۶۶	۱۹۷۱۴	۳/۲	۱۹/۸۸۲۷	۲/۵	۰/۲۳۳۶	۳/۵	۰/۰۳۳۷	۲/۴	۲۱۳/۶	۵/۱
KI-7-4T	۶۸۸	۱۵۱۳۴	۷/۸	۲۰/۳۸۸۶	۳/۳	۰/۱۷۶۱	۳/۶	۰/۰۲۶۰	۱/۳	۱۶۵/۷	۲/۱
KI-7-5T	۱۰۶۰	۱۱۴۲۸	۳/۴	۲۰/۹۷۸۴	۱/۹	۰/۱۵۵۸	۳/۲	۰/۰۲۳۷	۲/۵	۱۵۱	۳/۸
KI-7-6T	۳۹۴	۸۱۶۱	۴/۸	۲۱/۴۱۳۴	۶/۳	۰/۱۶۲۵	۶/۵	۰/۰۲۵۲	۱/۶	۱۶۰/۶	۲/۵
KI-7-7T	۳۲۱	۸۷۰۶	۴/۶	۲۰/۵۷۱۴	۷/۱	۰/۱۸۱۶	۷/۵	۰/۰۲۷۱	۲/۳	۱۷۲/۴	۳/۹
KI-7-8T	۳۷۸	۸۳۶۱	۴/۸	۲۰/۳۵۸۷	۹/۳	۰/۱۷۳۹	۹/۳	۰/۰۲۵۷	۰/۹	۱۶۳/۵	۱/۵
KI-7-9T	۴۲۰	۸۸۹۰	۴/۶	۲۱/۲۳۳۵	۷	۰/۱۶۲۵	۸/۹	۰/۰۲۵۰	۵/۵	۱۵۹/۳	۸/۷
KI-7-10T	۵۹۳	۱۴۵۶۹	۸/۸	۱۹/۵۲۰۸	۳/۱	۰/۱۹۶۶	۳/۶	۰/۰۲۷۸	۱/۷	۱۷۷	۳
KI-7-11T	۳۵۹	۸۳۳۱	۴/۴	۲۰/۵۸۶۸	۱۱/۱	۰/۱۷۹۹	۱۱/۱	۰/۰۲۶۹	۰/۷	۱۷۰/۹	۱/۲
KI-7-12C	۴۶۵	۱۴۶۱۵	۳/۶	۲۰/۹۷۱۳	۴/۸	۰/۱۶۶۸	۵/۲	۰/۰۲۵۴	۱/۹	۱۶۱/۵	۳
KI-7-13T	۴۱۰	۱۰۹۶۹	۶	۱۹/۸۵۹۰	۵/۳	۰/۱۷۷۷	۵/۷	۰/۰۲۵۶	۲/۲	۱۶۳	۳/۵
KI-7-14T	۴۹۲	۶۴۹۱	۵/۸	۲۰/۴۳۱۰	۴	۰/۱۶۸۵	۴/۳	۰/۰۲۵۰	۱/۷	۱۵۹	۲/۶
KI-7-15T	۵۰۳	۹۸۰۵	۴/۶	۲۱/۶۶۴۱	۵/۵	۰/۱۶۲۵	۵/۶	۰/۰۲۵۵	۱/۲	۱۶۲/۵	۱/۹
KI-7-16T	۵۹۰	۱۹۶۶۳	۷	۱۹/۹۴۷۱	۴/۲	۰/۱۷۵۱	۴/۳	۰/۰۲۵۳	۱/۲	۱۶۱/۳	۱/۹
KI-7-17T	۴۷۳	۱۰۸۴۱	۷/۵	۲۰/۳۷۰۱	۵/۳	۰/۱۷۲۴	۵/۸	۰/۰۲۵۵	۲/۳	۱۶۲/۲	۳/۷
KI-7-18T	۴۳۲	۱۰۰۱۷	۴/۸	۲۱/۸۰۳۴	۷/۹	۰/۱۵۹۸	۸/۲	۰/۰۲۵۳	۲/۳	۱۶۰/۹	۳/۷
KI-7-19T	۳۹۰	۵۱۹۶	۶/۱	۱۹/۰۱۰۴	۸/۹	۰/۱۸۳۱	۹	۰/۰۲۵۲	۰/۷	۱۶۰/۷	۱/۱
KI-7-20T	۴۴۲	۱۳۲۱۵	۱/۹	۲۱/۷۷۸۲	۸/۵	۰/۱۶۳۲	۸/۶	۰/۰۲۵۸	۱/۳	۱۶۴/۱	۲/۱
KI-7-21T	۳۴۶	۱۴۶۵	۴/۹	۱۷/۳۹۲۶	۲۱/۱	۰/۲۰۸۹	۲۱/۲	۰/۰۲۶۳	۱/۶	۱۶۷/۷	۲/۶
KI-7-22C	۷۰۳	۷۹۲۷	۲/۵	۲۰/۱۶۳۱	۲/۵	۰/۱۶۸۰	۲/۹	۰/۰۲۴۶	۱/۶	۱۵۶/۵	۲/۵
KI-7-23T	۴۶۶	۱۴۴۵۹	۳/۷	۲۱/۱۹۳۵	۳/۸	۰/۱۸۳۰	۴/۵	۰/۰۲۸۱	۲/۳	۱۷۸/۸	۴/۱
KI-7-24T	۳۶۲	۹۲۲۵	۳/۳	۲۱/۹۶۹۵	۶/۷	۰/۱۶۱۴	۷	۰/۰۲۵۷	۱/۹	۱۶۳/۷	۳/۱



شکل ۱۱. پلات میانگین سن تعیین شده از اطلاعات ایزوتوپی.

ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd

۱۶۲ میلیون سال زیرکن) به ترتیب برابر با ۰/۷۰۹۱۳۱ و ۰/۵۱۲۰۹۵ می‌باشد (جدول ۴ و ۵). میزان ایزوتوپ اولیه εNd I در نمونه مورد نظر برابر با ۶/۵۱ است (جدول ۵).

اطلاعات ایزوتوپ‌های Sr و Nd به ترتیب در جداول شماره (۵) و (۶) آمده است. نسبت ایزوتوپ اولیه ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr و ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd برای توده گرانودیوریتی نجم‌آباد (با توجه به سن

جدول ۵. داده‌های ایزوتوپی مربوط به ایزوتوپ‌های Rb-Sr.

SAMPLE	AGE (ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) m (2σ)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) initial
KI-7	۱۶۱/۸۵	۱۱۷	۱۵۴	۲/۱۹۵۶	(۱) ۰/۷۱۴۲۰	۰/۷۰۹۱۳

m= measured. Errors are reported as 1σ (95% confidence limit).

The initial ratio of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr calculated using ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr and (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)m and an age 161.85 (age based on zircon).

جدول ۶. داده‌های ایزوتوپی مربوط به ایزوتوپ‌های Sm-Nd.

SAMPLE	Sm (ppm)	Nd (ppm)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) m (2σ)	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) initial	εNd I
KI-7	۳/۸	۱۴/۲	۰/۱۶۱۴	(۱) ۰/۵۱۲۲۶۷	۰/۵۱۲۰۹۵	-۶/۵۱

m= measured. Errors are reported as 1σ (95% confidence limit).

The initial ratio of ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd calculated using ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd and (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)m and an age of 161.85 (age based on zircon). εNdI, initial εNd value.

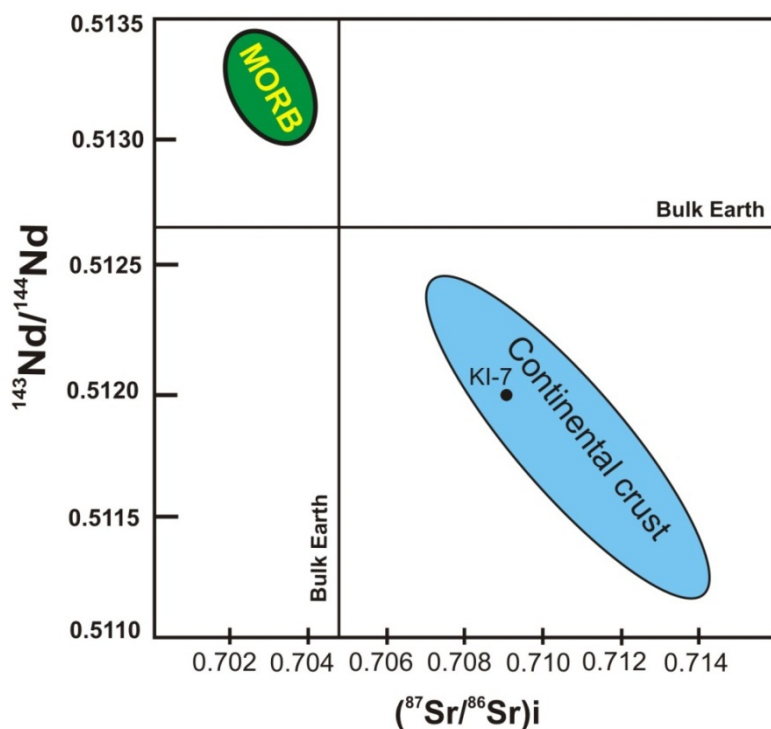
منشأ ماگما

پلات شده‌اند. مقادیر ایزوتوپ اولیه εNd برای گرانیت ۱۳ -۶/۵۱ و برای MORB بین ۷+ تا ۱۳+ می‌باشد. مقدار نسبت ایزوتوپی ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr اولیه برای گرانیت ۰/۷۰۹۱۳۱ و برای MORB کمتر از ۰/۷۰۴ است. میزان نسبت ایزوتوپ

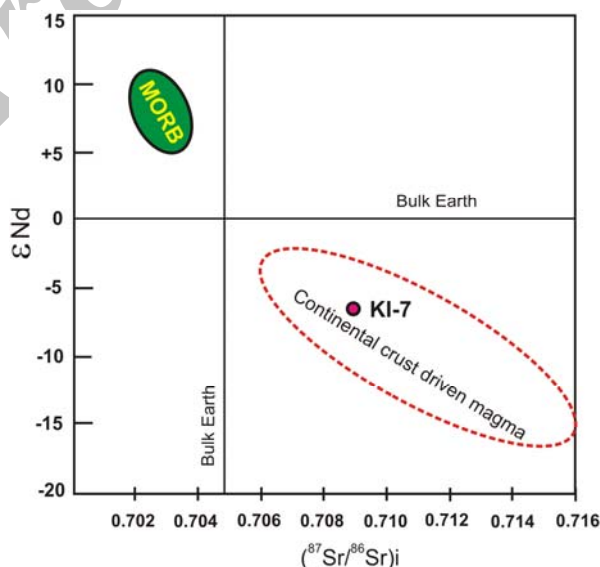
نسبت ایزوتوپ ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr اولیه، εNd و نسبت ایزوتوپ ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd مربوط به بازالت پشته میان اقیانوسی (MORB) و گرانیت‌های منطقه نجم‌آباد در شکل‌های (۱۲) و

اولیه را محاسبه نمود. سن سنگ منشأ که ماگمای باتولیت نجم‌آباد از ذوب آن حاصل شده است براساس داده‌های ایزوتوپ‌های Sm-Nd محاسبه شد و سن ۲/۲۷ میلیارد (Ga۲/۲۷) به دست آمد، لذا پی سنگ بلوک لوت در این منطقه ۲/۲۷ میلیارد سال قدمت دارد.

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه برای گرانیت منطقه برابر با ۰/۵۱۲۰۹۵ و برای MORB بین ۰/۵۱۳۰ و ۰/۵۱۳۵ می‌باشد. مقادیر ایزوتوپی اندازه‌گیری شده از توده گرانیتی نجم‌آباد نشان می‌دهد که ماگمای تشکیل دهنده این گرانیت و گرانودیوریت از پوسته قاره‌ای منشأ گرفته است [۲۰ - ۲۱]. براساس داده‌های ایزوتوپ‌های $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ و ϵNd ، می‌توان سن سنگ منشأ



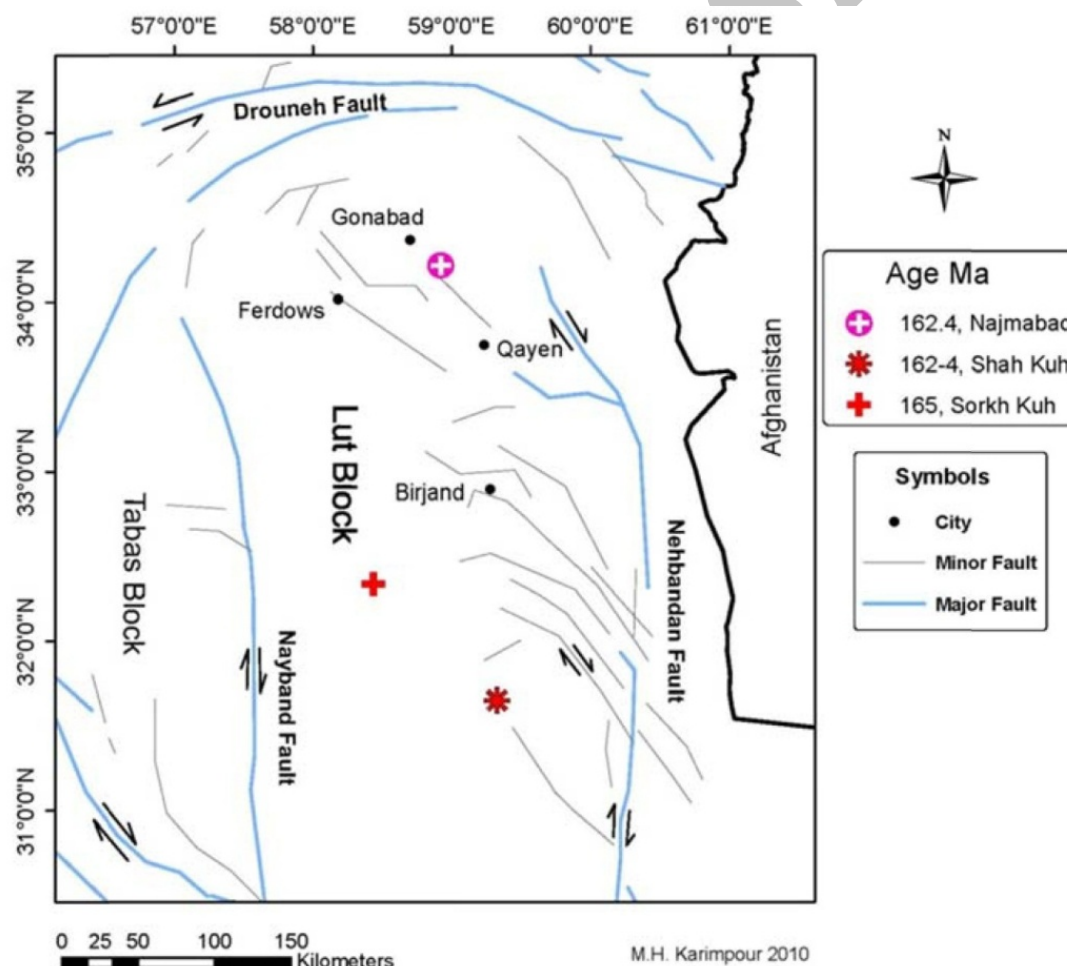
شکل ۱۲. موقعیت قرارگیری توده گرانیتی بر مبنای نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ به $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$.



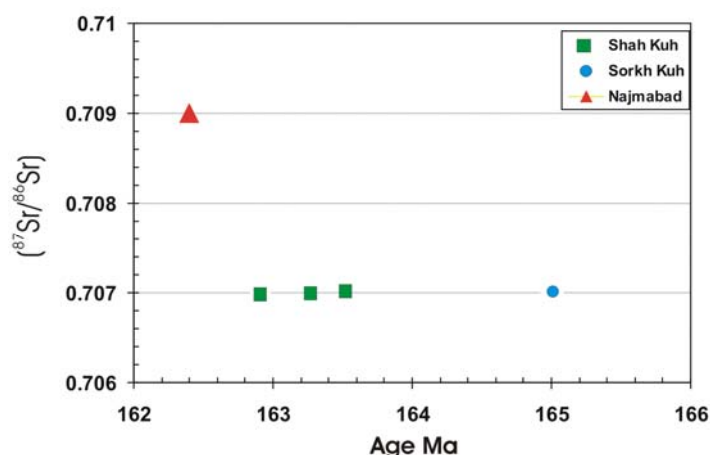
شکل ۱۳. موقعیت قرارگیری توده گرانیتی بر مبنای نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ به ϵNd .

نموده است [۲۳]. باتولیت نجم‌آباد با سن ۱۶۱/۸۵ میلیون سال (ژوراسیک میانی، کالوین) در شیل ماسه‌سنگهای تریاس فوقانی-کرتاسه تحتانی، که خود تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای واقع شده‌اند، نفوذ نموده است. آنچه از این مجموعه می‌توان نتیجه گرفت در محدوده زمانی ژوراسیک میانی به دلیل تصادم و در نتیجه کوه‌زایی موجب دگرگونی ناحیه‌ای در سنگهای تریاس فوقانی-کرتاسه تحتانی در این مناطق گردیده است. در ضمن تصادم از ذوب پوسته قاره‌ای در ژوراسیک میانی توده‌های نجم‌آباد، شاه‌کوه و سرخ‌کوه تشکیل و نفوذ نموده‌اند. در شکل (۱۶) رخدادهای تصادم قاره‌ای، کوه‌زایی و تشکیل گرانودیوریت باتولیت نجم‌آباد ترسیم شده است.

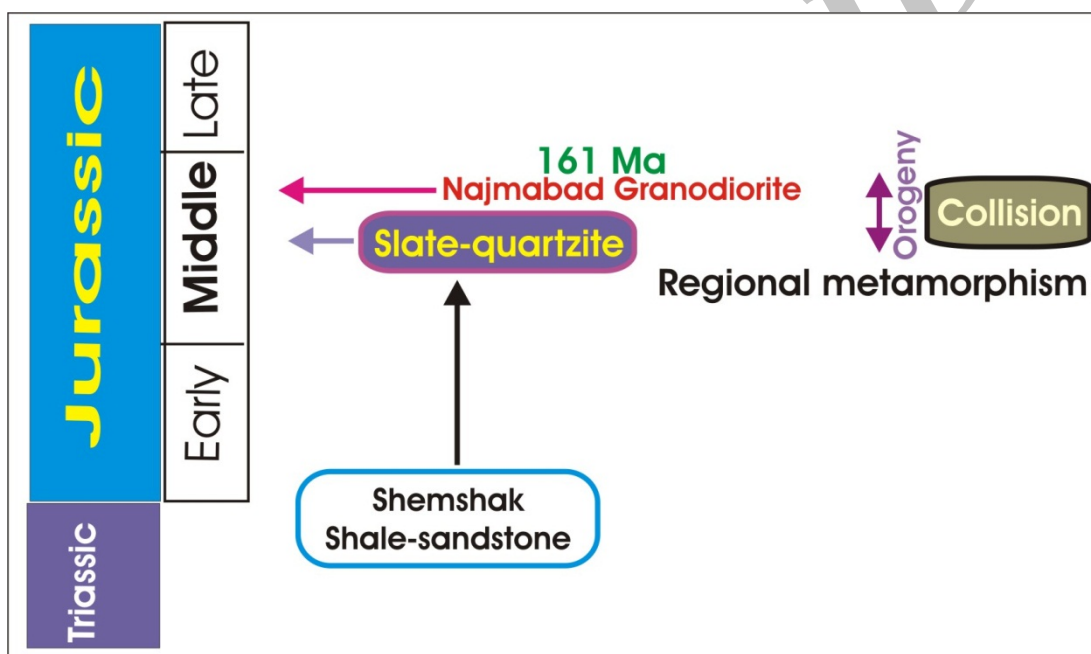
در بلوک لوت در سه منطقه شامل نجم‌آباد، شاه‌کوه و سرخ‌کوه تاکنون توده‌های نفوذی با سن ژوراسیک میانی (۱۶۱ تا ۱۶۵ میلیون سال) شناسایی شده‌اند (شکل ۱۴). باتولیت شاه‌کوه واقع در خراسان جنوبی بزرگترین توده نفوذی در بلوک لوت است. این باتولیت (گرانیت-گرانودیوریت) در سنگ‌های با سن تریاس فوقانی-ژوراسیک تحتانی که خود در معرض دگرگونی ناحیه‌ای قرار گرفته‌اند نفوذ نموده است. سن این باتولیت ۱۶۲ تا ۱۶۵ میلیون سال گزارش شده است [۲۲، ۱]. نسبت ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برابر با ۰/۷۰۷ است (شکل ۱۵). توده‌های گرانیتی سرخ‌کوه واقع در خراسان جنوبی با سن ۱۶۵ میلیون سال و با نسبت ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برابر با ۰/۷۰۷ در سنگهای با رخساره دگرگونی ناحیه‌ای نفوذ



شکل ۱۴. موقعیت توده‌های نفوذی با سن ژوراسیک میانی در بلوک لوت.



شکل ۱۵. نمایش سن و ایزوتوپ‌های Rb-Sr در توده‌های ژوراسیک میانی در بلوک لوت.



شکل ۱۶. نمایش رخداد تصادم قاره‌ای، کوه‌زایی و تشکیل گرانیت نجم آباد در ژوراسیک.

برداشت

باتولیت گرانیت-گرانودیوریت نجم‌آباد به لحاظ شاخص آلومینیوم، از نوع مت‌آلومینوس است. نمودار عنکبوتی نرمالیزه شده نسبت به بخش تحتانی پوسته قاره‌ای غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بزرگ (LILE) مانند Rb، Cs، K و عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) (Ce و La) و کاهیدگی عناصر Ba، Nb، Ta، Sr، Ti به خوبی دیده می‌شود. بر پایه پذیرفتاری مغناطیسی پایین ($5 \text{ to } 11 \times 10^{-5}$ SI units)، از سری ایلمنیت محسوب می‌شود. آلتراسیون پروپلیتیک و آرژلیک در توده باتولیتی مورد نظر شناسایی شد. سن باتولیت

براساس روش U-Pb در کانی زیرکن ۱۶۱/۸۵ میلیون سال (ژوراسیک میانی کالوین) تعیین شد. براساس مقادیر ایزوتوپ اولیه $\epsilon_{\text{Nd}} = -6/51$ ، نسبت ایزوتوپ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه ۰/۷۰۹۱۳۱ و نسبت ایزوتوپ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه به میزان ۰/۵۱۲۰۹۵ ماگمای گرانیت - گرانودیوریت نجم‌آباد از پوسته قاره‌ای منشأ گرفته است. در محدوده زمانی ژوراسیک میانی (قبل از کالوین) به دلیل تصادم و در نتیجه کوه‌زایی سنگ‌های تریاس فوقانی-کرتاسه تحتانی در مناطق نجم‌آباد، شاه‌کوه و سرخ‌کوه تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای واقع شده‌اند (ژوراسیک میانی). در ضمن تصادم از ذوب پوسته قاره‌ای در

studies" Proceedings of the Eleventh thematic conference on geologic remote sensing; practical solutions for real world problems 11 (1996) 1.77-1.86.

[12] Rowan L. C., Mars J. C., "Lithologic mapping in the Mountain Pass, California, area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data" Remote Sensing of Environment, v. 84, no. (3), p. 350-366, 2003. DOI: 10.1016/S0034-4257 (02) 00127-X.

[13] Hubbard B. E., Rowan L. C., Dusel-Bacon C., Eppinger R. G., "Geologic Mapping and Mineral Resource Assessment of the Healy and Talkeetna Mountains Quadrangles, Alaska Using Minimal Cloud- and Snow-Cover ASTER Data. USGS Open-File Report", 2007-1046.

[14] Middlemost E. A. K., "Magmas and Magmatic Rocks" London: Longman, Naming materials in the magma/igneous rock system, Earth-Sciences Reviews 37 (1985)215-224.

[15] Shand S. J., "Eruptive Rocks; Their Genesis, Composition, Classification, and their Relation to Ore Deposits", with a chapter on Meteorites (revised second edition): Hafner Publishing Co., New York (1943) 444 p.

[16] Taylor S. R., McLennan S. M., "The Continental Crust; Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks", Blackwell, Oxford (1985) 312.

[17] Sun S., McDonough W. F., "Chemical and Isotopic Systematics of oceanic basalts: implications for Mantle Composition and Processes", Spec. Publ. Vol. Geol. Soc. Lond. No 42 (1989) 313-345.

[18] Burnham C. W., Ohmoto H., "Late-stage processes of felsic magmatism, in Ishihara", S. and Takenouchi, S. Ceds., Granitic magmatism and related mineralization: Mining Geology, Spec. Issue No 8 (1980) 1-11.

[19] Ishihara S., "The magnetite-series and ilmenite-series granitic Rocks", Mining Geology 27 (1977) 293-305.

[20] Garrido C. J., Bodinier J. L., Burg J. P., Zeilinger G., Hussain S., Dawood H., Chaudhry M. N., Gervilla F., "Petrogenesis of mafic garnetgranulite in the lower crust of the KohistanPaleoarcComplex (Northern Pakistan): Implications for intra-crustal differentiation of island arcs and generation of continental crust", Journal of Petrology 47 (2009) 1873-1914.

ژوراسیک میانی (۱۶۲-۱۶۴ میلیون سال قبل) ماگمای باتولیت‌های نجم‌آباد، شاه‌کوه و سرخ‌کوه تشکیل و نفوذ نموده‌اند.

منابع

[1] Esmaeily D., "Petrology and geochronology of Shah- Kuh granite with special references to tin mineralization", unpublished Ph.D thesis, TarbiatModares University (2001) 296 p.

[2] Camp V., Griffis R., "Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran", Lithous, Issn 0024-4937 v 15 (1982) 221-239.

[3] Tirrul R., Bell I. R., Griffis R. J., Camp V. E., "The Sistan suture zone of eastern iran", Geolc. Soc. Am. Bull 94 (1983) 134-156.

[4] 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 No 51 (1983) 285-336.

[5] 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 No 51 (1983) 357-383.

[۶] آقانباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۳) ۶۰۶ص.

[۷] قائمی ف.، " نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گناباد"، سازمان زمین‌شناسی کشور، (۱۳۸۴).

[۸] داوود زاده اشمیت.، "گزارش زمین‌شناسی شرق ایران، بلوک لوت"، (۱۹۸۳).

[9] Berberian M., Jackson J. A., Qorashi M., Khatib M. M., Priestley K., Talebian M., Ghafuri-Ashtiani M., "The 1997 may 10 Zirkuh (Qaenat) earthquake (Mw 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran", Geophys. J. Int (1999) 671-694.

[10] Rowan L. C., Hook S. J., Abrams M. J., Mars J. C., "Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), A new satellite imaging system", Economic Geology 98 no 5 p 1019-1027 (2003) DOI: 10.2113/98.5.1019.

[11] Yamaguchi Y., Rowan L. C., Tsu H., Kahle A. B., "Application of ASTER data to geological

Shah-Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization", Journal of Asian Earth Sciences 25 (2005) 961-980.

[23] Jung D., Keller J., Khorasani R., Marcks Chr., 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 No 51 (1983) 285-336.

[21] Campbell I. H., Ballard J. R., "*U-Pb Zircon Geochronology of Granitic Rocks from the Chuquicamata-El Abra Porphyry Copper Belt of Northern Chile: Excimer Laser Ablation ICP-MS Analysis*", Economic Geology, Bulletin of the society of economic geologists 101 NO 7 (2006) 1327-1344.

[22] Esmaily D., Nedelec A., Valizadeh M. V., Moore F., Cotton J., "*Petrology of the Jurassic*

Archive of SID