

پتروژنز گرانیتوئیدها، سن‌سنجی زیرکن به روش U-Pb، ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Sr-Nd و رخدادهای مهم کانی‌سازی ترشیری در بلوک لوت، شرق ایران

محمدحسن کریم‌پور^{۱*}، آزاده ملک‌زاده شفارودی^۱، لنگ فارمر^۲ و چاک استرن^۲

۱- گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی: ۹۱۷۷۵-۱۴۳۶، مشهد، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه کلرادو آمریکا

دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۲، پذیرش: ۱۳۹۱/۱/۲۰

چکیده

توده‌های نفوذی ترشیری (گرانیتوئیدها) در مناطق مختلفی از بلوک لوت در استان‌های خراسان رضوی و جنوبی مورد مطالعه قرار گرفت. عمده توده‌ها از نوع نیمه‌عمیق با بافت پورفیری بوده و ترکیب آنها از دیوریت تا گرانیت متغیر است، ولی غالباً مونزونیتی هستند. این توده‌ها (به استثنای هیرد) متعلق به سری مگنتیت (نوع I) بوده و به‌طور عمده از نوع متاآلمینوس هستند. اغلب توده‌های نفوذی که کم و بیش نیز همراه با کانی‌سازی هستند از نوع غنی از پتاسیم هستند، در حالی که توده‌های نفوذی بدون کانی‌سازی نجم‌آباد از نوع سدیک است. ماگمای نجم‌آباد با توجه به مقدار $Nb < 5 \text{ ppm}$ ، نسبت بالای $Zr/Nb > 30$ ، نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه کمتر از 0.7053 و مقدار ϵ_{Nd} در حدود $+5/16$ در زون فرورانش و از اعماق بیشتر منشأ گرفته و کمترین آلودگی با پوسته قاره‌ای را داشته است، در حالی که توده‌های منطقه کبیرکوه با بالاترین مقدار $Nb > 17 \text{ ppm}$ ، نسبت کم $Zr/Nb < 2$ ، نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه بیش از 0.707 و مقدار ϵ_{Nd} کمتر از -3 - بیشترین اختلاط با پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهد. تهی‌شدگی شدید عناصر HREE در توده‌های نفوذی نجم‌آباد و نسبت $(La/Yb)_N$ بیش از 17 تا 23 نشان‌دهنده تشکیل ماگما در عمق پایداری گارنت است. برپایه الگوی REE و مقدار Eu/Eu^* بین 0.8 تا 1 ، توده‌های مناطق ماهرآباد، خوپیک، چاه‌شلجمی، ده‌سلم و کوه شاه، کالک‌آلکان هستند و ماگمای آنها در شرایط اکسیدان تشکیل شده است، ولی کبیرکوه با مقدار Eu/Eu^* کمتر از 0.8 با پوسته قاره‌ای احیایی آلوده شده است. توده‌های نفوذی همه مناطق غیر از نجم‌آباد در محدوده مشترک ماگمای کالک‌آلکان نرمال با آداکیتی قرار دارد، ولی توده‌های نجم‌آباد به ترکیب ماگمای آداکیتی شباهت دارند. سن گرانیتوئیدها بین ائوسن میانی تا الیگوسن تختانی بوده و از $43/3$ میلیون سال در کبیرکوه در شمال تا $33/3$ میلیون سال در چاه‌شلجمی در جنوب کاهش می‌یابد. مقدار نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه نیز از شمال به جنوب همراه با کاهش سن توده‌های نفوذی از کبیرکوه به طرف چاه‌شلجمی، از 0.7077 به 0.7047 کاسته می‌شود. توده‌های نفوذی ماهرآباد، خوپیک، ده‌سلم و چاه‌شلجمی مقدار ϵ_{Nd} بین $+0/5$ تا $+2/49$ و مقدار نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه کمتر از 0.7055 دارند که نشان‌دهنده ماگمای مشتق شده از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی است. سن سنگ منشأ گرانیتوئیدها (TDM) که براساس ایزوتوپ‌های Sm-Nd محاسبه شده است، نشان می‌دهد که توده‌های نفوذی از پوسته‌های اقیانوسی با سن‌های متفاوتی منشأ گرفته‌اند، به طوری که ماگمای منطقه کبیرکوه از قدیمی‌ترین پوسته اقیانوسی در حال فرورانش (840 میلیون سال)، نشأت گرفته و بیشترین آرایش پوسته‌ای را در طی صعود متحمل شده است. ولی توده‌های نجم‌آباد از یک پوسته اقیانوسی جوان‌تر (سن 360 میلیون سال) منشأ گرفته و کمترین آلودگی را با پوسته دارند. ماگمای مناطق ده‌سلم و چاه‌شلجمی نیز که در برخی موارد ژئوشیمی متفاوتی با ماگمای مناطق ماهرآباد و خوپیک نشان می‌دهند، از پوسته‌های اقیانوسی جداگانه‌ای منشأ گرفته‌اند که حدود 200 میلیون سال با یکدیگر اختلاف سنی داشته‌اند. فاصله زمانی بین 42 تا 33 میلیون سال قبل (ائوسن میانی تا اوایل الیگوسن)، مهمترین پنجره زمانی کانی‌سازی در شرق ایران و محدوده استان خراسان جنوبی است. انواع کانی‌سازی مس-طلا پورفیری، طلا مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی، طلا اپی‌ترمال سولفید بالا، اسکارن آهن، رگه‌های Pb-Zn-Sb و IOCG شناسایی شده‌اند. لذا گرانیتوئیدهای تشکیل شده در محدوده زمانی 42 تا 33 میلیون سال که در بلوک لوت و شمال آن قرار دارند، برای این مجموعه کانی‌سازی پتانسیل دارند.

واژه‌های کلیدی: بلوک لوت، ترشیری، کانی‌سازی، سن‌سنجی، ایزوتوپ ناپایدار، پتروژنز.

مقدمه

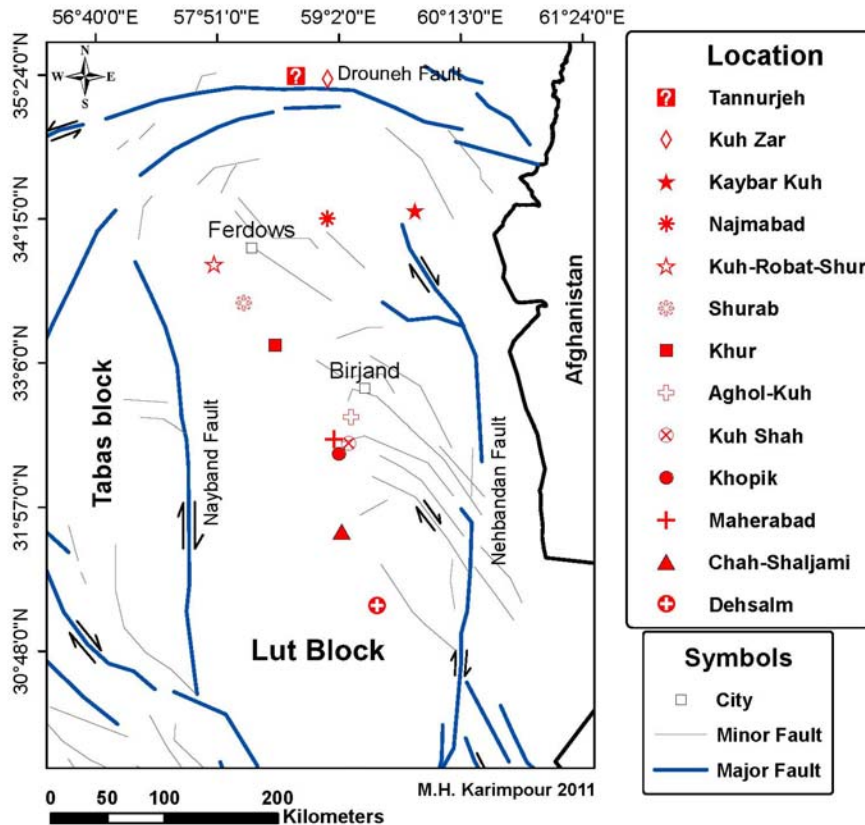
بلوک لوت را اولین بار اشتوکلین [۱] به عنوان یکی از ۹ زون ساختاری ایران در شرق آن معرفی نمود. وی این زون را همراه با فلات توران و پلاتفرم عربی به عنوان نواحی پایدار مشخص کرد. اشتوکلین و نبوی [۲] بلوک لوت را با درازایی حدود ۹۰۰ کیلومتر شرقی‌ترین بخش خرد قاره ایران مرکزی دانسته‌اند. آنها مرز شرقی آن را گسل نهبندان و حوضه فیلیش شرق ایران و مرز غربی آن را گسل نایبند و بلوک طبس مشخص کردند. مرز شمالی این بلوک به فرو افتادگی جنوب کاشمر و مرز جنوبی آن به فرونشست جازموریان بسته می‌شود. یکی از ویژگیهای منحصر به فرد بلوک لوت، فعالیت‌های ماگماتیسمی آن بوده که از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیری به اوج خود رسیده است، به طوری که سنگهای آتشفشانی- نفوذی ترشیری، به ویژه ائوسن، با ضخامت حدود ۲۰۰۰ متر، بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشانند [۳].

شرق ایران و به ویژه بلوک لوت به واسطه داشتن موقعیتهای تکتونیکی مختلف در زمانهای گذشته و به دنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسم با ویژگیهای ژئوشیمیایی متفاوت، دارای پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل کانی‌سازیهایی مختلف است. درک بهتر از ژئوشیمی، سن و منشأ ماگما در توده‌های نفوذی مرتبط و یا بدون کانی‌سازی، گام مثبتی در جهت اکتشاف کانسارهای مختلف در شرق ایران است. مناطق مورد مطالعه در این تحقیق شامل توده‌های نفوذی نواحی ماهرآباد و خوییک در حدود ۷۰ کیلومتری جنوب غربی بیرجند، کوه‌شاه در ۸۰ کیلومتری جنوب‌غربی بیرجند، آغل‌کوه در ۵۰ کیلومتری جنوب‌غربی بیرجند، خور (قله گنبد) در حدود ۳۰ کیلومتری شمال‌غربی خور، چاه‌شلجمی در حدود ۱۰۰ کیلومتری شمال‌غرب و ده‌سلم در حدود ۸۵ کیلومتری جنوب‌غربی نهبندان، شوراب در حدود ۷۰ کیلومتری شمال‌غرب خور، کوه رباط شور در حدود ۳۵ کیلومتری جنوب غربی فردوس، نجم‌آباد در ۲۵ کیلومتری جنوب گناباد، کوه‌زر در ۴۰ کیلومتری غرب تربت حیدریه، تنورچه در ۸۰ کیلومتری غرب تربت حیدریه و کبیرکوه در ۷۰ کیلومتری جنوب‌غربی خواف است که کانی‌سازی ذخیره همراه با آنها متنوع بوده و یا بعضاً فاقد کانی‌سازی می‌باشند (شکل ۱). این مناطق (غیر از آغل‌کوه، خور و کوه رباط شور)

توسط [۴-۱۳] از جنبه‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی، ژئوشیمی و پترولوژیکی مطالعه شده است. مطالعه ایزوتوپی و سن‌سنجی در آغل‌کوه و کوه رباط شور توسط جونگ و همکاران [۱۴] و در منطقه خور توسط [۱۵] انجام شده است. هدف از انجام این پژوهش، مقایسه پتروژنز توده‌های نفوذی مهم ترشیری در بلوک لوت، سن آنها و منشأ ماگما و سرانجام ارتباط آنها با کانی‌سازیهایی مختلف در شرق ایران است. این مطالعه پنجره زمانی مهم کانی‌سازی در بلوک لوت، موقعیت آن و ژئوشیمی ماگمای آن را مشخص می‌کند. در آینده می‌توان با مطالعه تفصیلی در مناطق بیشتری از شرق ایران، این بررسی را تکمیل‌تر و دقیق‌تر کرد که بدون شک به اکتشاف کانسارهای مختلف کمک می‌کند.

زمین‌شناسی

مناطق مورد مطالعه به طور عمده در شرق و شمال بلوک لوت واقع شده‌اند. زمین‌شناسی این نواحی شامل توده‌های نفوذی اسیدی - حدواسط نیمه‌عمیق ترشیری با بافت پورفیری است که در سنگهای آتشفشانی و یا رسوبی نفوذ نموده‌اند و در اکثر موارد موجب تشکیل آلتراسیون و کانی‌سازی شده‌اند. ایشی‌هارا [۱۶] مقدار پذیرفتاری مغناطیسی گرانیتوئیدهای سری مگنتیت (اکسیدان) را به علت حضور کانی فرعی مگنتیت بیش از $SI \times 10^{-5}$ و گرانیتوئیدهای سری ایلمنیت (احیایی) را کمتر از این مقدار می‌داند. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی همه توده‌های نفوذی مناطقی که در این مقاله بحث شده‌اند، بیشتر از $SI \times 10^{-5}$ است و همگی از نوع گرانیتوئیدهای اکسیدان و متعلق به سری مگنتیت هستند. منطقه کبیرکوه در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ زوزن واقع شده است [۱۷]. زمین‌شناسی این ناحیه شامل توده‌های نفوذی درونی و نیمه‌عمیق ائوسن تحتانی است که از دیوریت تا مونزوگرانیت متغیرند و به درون سنگهای رسوبی نفوذ نموده‌اند. این توده‌ها به دو دسته سری مگنتیت و سری ایلمنیت تقسیم می‌شوند. نفوذ این توده‌ها به درون واحدهای کربناته به تشکیل اپیدوت اسکارن منجر شده است. توده‌های نفوذی سری مگنتیت این منطقه واجد آلتراسیون پروپلیتیک ضعیف تا متوسط هستند و کانی‌سازی بسیار محدودی همراه با آنها دیده می‌شود. نوع کانی‌سازی به درستی مشخص نیست [۹].



شکل ۱. موقعیت توده‌های نفوذی مورد مطالعه به سن ترشیاری در بلوک لوت.

بیرجند واقع شده است [۱۹]. زمین‌شناسی منطقه شامل توده مونزونیت پورفیری است که در سنگهای آتشفشانی ترشیاری و سنگهای رسوبی نفوذ نموده است. آثاری از کانی‌سازی مس به صورت پراکنده در این منطقه دیده شده است. منطقه کوه رباط شور در شمال نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ بشرویه واقع شده است [۲۰]. این منطقه یک توده سینیت پورفیری است. آثاری از کانی‌سازی مس در برخی نقاط دیده شده است. مجموعه سنگهای پلوتونیک-آتشفشانی شمال خور در جنوب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سارغنج قرار گرفته است [۲۱] که کوه قله گنبد یکی از نواحی همین محدوده است. براساس مطالعات صحرایی توده نفوذی نیمه عمیق با ترکیب مونزودیوریت به سن ائوسن میانی در این منطقه رخنمون دارد. کانی‌سازی مس رگه‌ای در اطراف این محدوده در چند منطقه از قبیل مناطق شکسته سبز، حوض داغ، میرخاش و غیره دیده می‌شود. بخشهای زیادی از این محدوده متحمل آلتراسیون آرژیلیک شده است. مناطق ماهرآباد و خوپیک در شمال شرقی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه شور واقع شده‌اند [۲۲]. زمین‌شناسی منطقه ماهرآباد

منطقه نجم‌آباد در جنوب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ گناباد واقع شده است [۱۸]. توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق ائوسن تحتانی تا میانی که از مونزونیت تا گرانودیوریت متغیرند و به دو دسته سری مگنتیت و سری ایلمنیت قابل تفکیک هستند در سنگهای رسوبی دگرگون شده مانند اسلیت و ماسه سنگ دگرگون شده نفوذ کرده‌اند. توده‌های نفوذی سری مگنتیت فاقد آلتراسیون و کانی‌سازی هستند [۱۰ و ۱۱]. منطقه شوراب در جنوب غربی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ آیسک واقع شده است. سنگهای رسوبی سازند شمشک به سن ژوراسیک قدیمترین واحدهای سنگی منطقه هستند. بخش اعظم منطقه از سنگهای آتشفشانی آندزیتی ترشیاری پوشیده شده است. دایک‌ها و استوک‌های نیمه‌عمیقی به سن ائوسن فوقانی تا الیگوسن تحتانی با ترکیب گرانودیوریت در سنگهای آتشفشانی نفوذ نموده‌اند و عامل کانی‌سازی رگه‌ای مس، سرب و روی و آنتیموان منطقه هستند. واحدهای آتشفشانی و نیمه‌عمیق منطقه در پیرامون رگه‌های کانهدار متحمل آلتراسیون سرسیتیک و آرژیلیک شده‌اند [۴]. منطقه آغل کوه در جنوب غربی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰

گرانیتی به سن الیگوسن تحتانی در سنگهای آتشفشانی منطقه نفوذ نموده و موجب تشکیل کانی‌سازی مس پورفیری شده است [۱۲]. منطقه چاه‌شلجمی به طور عمده پوشیده از سنگهای آتشفشانی شامل توف کریستالین ائوسن، توف سبز، بازالت، بازالت آندزیتی و آندزیت‌های به شدت آلتراه است. دایک‌هایی از مونزودیوریت و کوارتزیدیوریت آلتراه شده در واحدهای آتشفشانی منطقه نفوذ نموده است. استوک‌های کوچکی از کوارتزمونزونیت نیز سنگهای آتشفشانی ائوسن را قطع کرده است که بافت آنها پورفیری است. همچنین سنگهای گرانیتوئیدی نیمه‌عمیق با بافت پورفیری تقریباً تازه‌ای که مربوط به بعد از کانی‌سازی هستند، در ناحیه رخنمون دارند. این منطقه شواهد کانی‌سازی طلای اپی‌ترمال سولفید بالا را نشان می‌دهد که می‌تواند بخش فوقانی یک کانسار مس پورفیری باشد [۱۳].

روش انجام پژوهش

برای رسیدن به اهداف پژوهش عملیات زیر انجام گرفت:

(۱) تجزیه شیمیایی ۵۰ نمونه از توده‌های نفوذی مختلف با کمترین آلتراسیون یا کاملاً سالم از مناطق مورد مطالعه (به غیر از منطقه شوراب) به روش XRF برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی در دانشگاه فردوسی مشهد (نوع دستگاه فیلیپس مدل X'Unique II است). اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی در ۵ نمونه از منطقه شوراب و ۴ نمونه از مناطق آغل کوه و کوه رباط شور به روش XRF به ترتیب توسط [۴] در دانشگاه هامبورگ و [۱۴] آنالیز شده است.

(۲) تجزیه شیمیایی ۴۴ نمونه از توده‌های نفوذی مختلف با حداقل آلتراسیون یا کاملاً سالم از مناطق مورد مطالعه به روش ICP-MS برای عناصر فرعی و نادرخاکی در آزمایشگاه ACME کانادا (روش آماده‌سازی نمونه ذوب قلیایی بوده است).

(۳) سن‌سنجی ۶ نمونه از توده‌های نفوذی مناطق ماهرآباد، خوپیگ، نجم‌آباد و کبیرکوه به روش اندازه‌گیری ایزوتوپ U-Pb بر روی کانی زیرکن. آماده‌سازی نمونه‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد و اندازه‌گیری در آزمایشگاه آریزونا آمریکا به روش Laser-Ablation ICP-MS انجام شده است. سن‌سنجی ۲ نمونه از توده‌های نفوذی مناطق چاه‌شلجمی و

را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد: (۱) سنگهای آتشفشانی پیش از ائوسن میانی که توده‌های نیمه‌عمیق ائوسن میانی وابسته به کانی‌سازی در آنها نفوذ کرده‌اند، (۲) توده‌های نیمه‌عمیق بیشتر حدواسط ائوسن میانی وابسته به کانی‌سازی در حد مونزونیت تا دیوریت پورفیری که با شدتهای مختلف دگرسان شده و دارای کانی‌سازی با مقادیر متفاوتند. این توده‌ها به صورت استوک‌های کوچک تا متوسط درهم تلسکوپ شده‌اند، (۳) توده‌های نیمه‌عمیق پس از ائوسن که در توده‌های وابسته به کانی‌سازی نفوذ کرده‌اند. این توده‌ها نیز از دیوریت تا مونزونیت متغیر بوده و کاملاً تازه‌اند، و اثری از کانی‌سازی و دگرسانی در آنها دیده نمی‌شود، و (۴) رسوبات کواترنری. کانی‌سازی این منطقه از نوع مس-طلا پورفیری است [۷]. زمین‌شناسی منطقه خوپیگ را نیز می‌توان به سه بخش تقسیم نمود: ۱- سنگهای آتشفشانی داسیتی تا آندزیتی همراه با ماسه‌سنگ بشدت سیلیسی شده که بخش بزرگی از محدوده را به خود اختصاص داده‌اند، ۲- توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق مرتبط با کانی‌سازی متعلق به ائوسن میانی که از مونزونیت تا دیوریت متغیرند. توده‌ها به شدت آلتراه‌اند و کانی‌سازی به صورت رگ‌چهای و پراکنده کم و بیش در آنها دیده می‌شود و ۳- رسوبات کواترنری. کانی‌سازی این منطقه از نوع مس-طلا پورفیری است [۷]. منطقه کوه شاه در شمال‌غربی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مختاران واقع شده است [۲۳]. قدیمی‌ترین واحدهای این منطقه سنگهای آتشفشانی داسیتی تا لاتیتی همراه با کنگلومرا است. توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق در این واحدها نفوذ کرده‌اند که ترکیب آنها از دیوریت تا مونزوگرانیت متغیر است. این توده‌ها در اغلب موارد آلتراه‌اند و آثار سولفیدهای اکسید شده در آنها دیده می‌شود. کانی‌سازی این منطقه مس-طلا می‌باشد که نوع دقیق آن در دست بررسی است [۸]. منطقه ده‌سلم در جنوب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ده‌سلم واقع شده است [۲۴]. قدیمی‌ترین واحد سنگی این منطقه آهکهای اوربیتولین‌دار زرد تا خاکستری است که در مرز توده گرانیتی ده‌سلم به اسکارن تبدیل شده است و آثاری از کانی‌سازی مس نیز در آن مشاهده می‌شود. واحدهای آتشفشانی ائوسن بخش اعظم منطقه را پوشانده است که متشکل از بازالت و آندزیت-بازالت سبز تیره، ریولیت و ریوداسیت سفید تا زرد و توف آندزیتی و آندزیت قرمز تا سبز تیره می‌باشد. توده نفوذی ده‌سلم با ترکیب دیوریتی تا

Thermal Ionization Mass Spectrometer صورت پذیرفت. نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd به دلیل تفریق جرمی، نسبت به $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$ و $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ اصلاح شدند. استاندارد SRM-987 دارای مقدار میانگین $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710256$ (16) (N=12; conf. lim = 95%) و استاندارد JNdi-1 دارای مقدار میانگین $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5121057$ (61) (N=13; conf. lim=95%) بوده است.

ژئوشیمی توده‌های نفوذی ترشباری

• اکسیدهای اصلی

مقدار SiO_2 توده‌ها از ۵۵ تا ۷۵ درصد متغیر است. برای نام گذاری سنگها براساس اکسیدهای اصلی از نمودار سنگهای پلوتونیک $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 [۲۵] استفاده شد. بر طبق این رده‌بندی توده‌های نفوذی در محدوده گابروی دیوریتی، دیوریت، مونزودیوریت، مونزونیت، کوارتز مونزونیت، سینیت، گرانودیوریت و گرانیت قرار می‌گیرند (شکل ۲). مقدار $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} > 1$ و $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} < 1$ نشان می‌دهد که همگی این توده‌ها به غیر از دو نمونه از توده‌های منطقه شوراب، از نوع متآلومینوس هستند. دو نمونه از توده‌های گرانودیوریتی شوراب در محدوده پرالومینوس قرار می‌گیرد (شکل ۳). میزان K_2O از ۱ تا بیش از ۶ درصد متغیر است. نمودار K_2O در مقابل $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ نشان می‌دهد که توده‌های نفوذی کوه شاه دارای بیشترین مقادیر K_2O (بیش از ۴ درصد) هستند و پس از آن به ترتیب توده‌های کبیرکوه، کوه رباط شور، ده‌سلم، چاه‌شلجمی، خویبک، ماهرآباد، شوراب و آغل‌کوه قرار می‌گیرند. این در حالی است که توده‌های نفوذی منطقه نجم‌آباد که فاقد کانی‌سازی هستند، کمتر از ۲ درصد K_2O دارند. این توده‌ها برخلاف توده‌های نفوذی دیگر مناطق غنی از سدیم هستند و نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ در آنها بیشتر از ۲/۵ است. این نسبت در بقیه مناطق کمتر از ۲ می‌باشد (شکل ۴). مقدار MgO در توده‌های نفوذی کوه شاه بسیار متغیر و مقدار CaO بیش از ۵ درصد است. توده‌های نفوذی منطقه ده‌سلم نیز دارای مقدار منیزیم زیاد (MgO) عمدتاً بیش از ۳/۵ درصد و کلسیم (CaO) بین ۴/۵ تا ۱۰ درصد) بالا هستند. مقدار MgO و CaO در توده‌های نفوذی ماهرآباد، خویبک، چاه‌شلجمی، آغل‌کوه و شوراب به ترتیب بین ۱/۵ تا ۳ درصد و ۲/۵ تا ۸ درصد متغیر است. این در

ده‌سلم به روش Rb-Sr بر روی کانیهای پلاژیوکلاز و بیوتیت جدا شده از توده‌ها و سنگ کل. آماده‌سازی نمونه‌ها و تجزیه در دانشگاه آویرو پرتغال انجام شده است [۱۳]. سن‌سنجی توده‌های گرانودیوریتی منطقه شوراب بر روی ۲ نمونه به روش Rb-Sr بر روی سنگ کل و بیوتیت و سنگ کل، بیوتیت و پلاژیوکلاز توسط [۴] در دانشگاه مانستر آلمان انجام شده است. همچنین توده شمال خور به روش Rb-Sr بر روی سنگ کل و بیوتیت توسط [۱۵] سن‌سنجی شده است. سن‌سنجی توده نفوذی کوه رباط شور به روش K-Ar توسط [۱۴] صورت پذیرفته است.

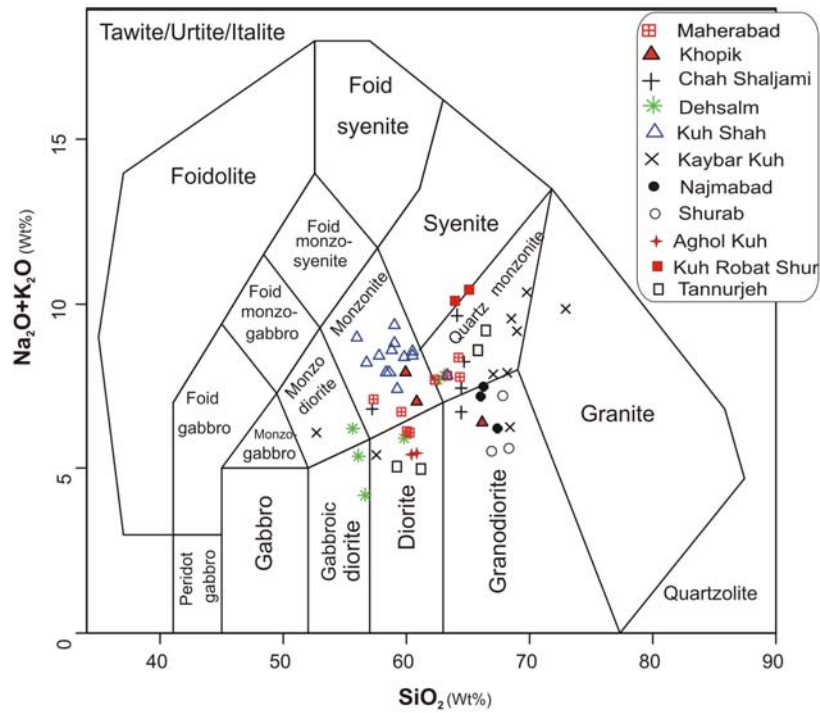
تجزیه ۵ نمونه از توده‌های نفوذی کمتر آلتیره مناطق ماهرآباد، خویبک، نجم‌آباد و کبیرکوه برای ایزوتوپ‌های Rb/Sr و Sm/Nd در دانشگاه کلرادوی امریکا و نیز ۱۴ نمونه از مناطق چاه‌شلجمی و ده‌سلم توسط [۱۳] در دانشگاه آویرو پرتغال. تجزیه ۶ نمونه از توده‌های گرانودیوریتی شوراب توسط [۴] برای ایزوتوپ Rb-Sr در دانشگاه مانستر آلمان انجام شده است. ۲ نمونه از مناطق آغل‌کوه و کوه رباط شور توسط [۱۴] برای ایزوتوپ Rb-Sr نیز تجزیه شده است. ایزوتوپ Rb-Sr نیز در یک نمونه از شمال خور (قله گنبد) [۱۵] تجزیه شده است. تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک Rb-Sr و Sm-Nd در دانشگاه کلرادوی امریکا بر روی نمونه سنگ کل توسط دستگاه 8-collector Finnigan MAT 261 Thermal Ionization Mass Spectrometer صورت پذیرفت. نمونه‌ها پس از خردایش و نرمایش برای آن دانشگاه ارسال شد. مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ با استفاده از four-collector static mode measurements اندازه‌گیری شد و نتیجه با نمونه استاندارد SRM-987 با مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71028$ (خطای ۲ سیگما از میانگین) که در حین اندازه‌گیری نمونه‌های مجهول تجزیه شده بود و مقدار 2 ± 0.71032 را نشان داده بود، تصحیح شد. همچنین مقدار $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ با مقادیر $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ نمونه استاندارد نرمالیز شد. تجزیه با dynamic mode-three-collector measurements انجام گرفت و در طول انجام تجزیه نمونه استاندارد LaJolla Nd نیز بارها تکرار شد که مقدار $(2\delta \text{ mean}) + 0.511838$ را مشخص کرد. تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک Rb-Sr و Sm-Nd در دانشگاه آویرو پرتغال بر روی کانیهای پلاژیوکلاز، بیوتیت و سنگ کل توسط دستگاه VG Sector 54

حالی است که کمترین کلسیم (کمتر از ۳ درصد) و منیزیم (کمتر از ۲ درصد) در نمونه‌های منطقه کبیرکوه و کوه رباط شور دیده می‌شود (شکل ۴). بیشترین مقدار $K_2O+CaO+MgO$ در توده‌های نفوذی کوه شاه (بیش از ۱۴ درصد) و کمترین آن در کبیرکوه، شوراب و نجم‌آباد (کمتر از ۸ درصد) مشاهده می‌گردد (شکل ۴).

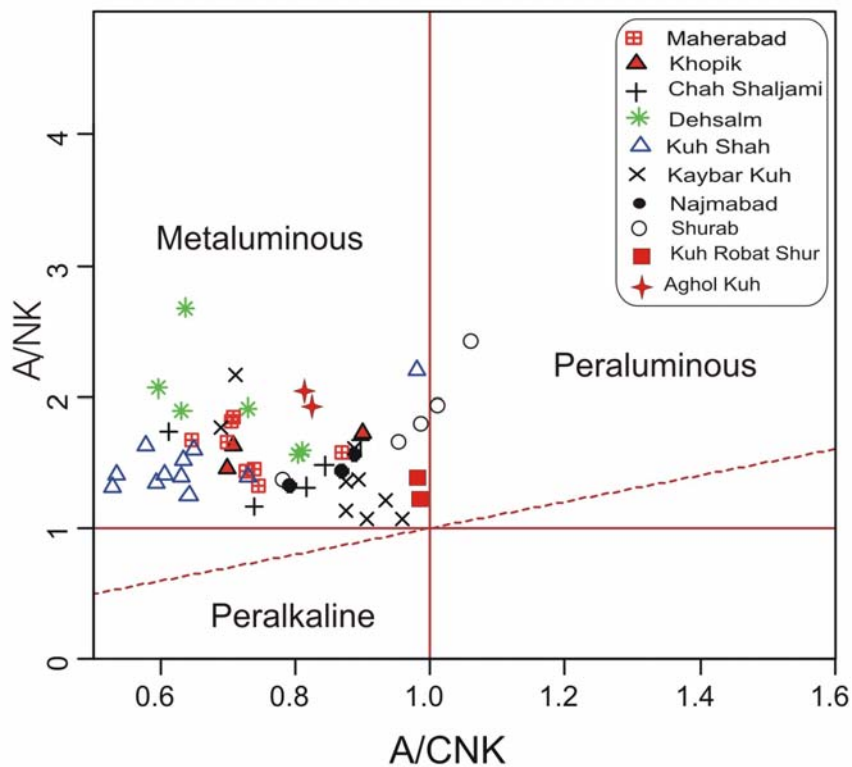
عناصر فرعی و خاکی کمیاب

بر پایه مقدار عناصر Rb، Yb و Nb در نمودار [۲۷] موقعیت تکتونیکی توده‌های نفوذی مناطق مورد مطالعه، محیط کمرندهای آتشفشانی زون فرورانش (VAG) است. البته نمونه‌های منطقه کبیرکوه به سمت مرز محدوده گرانیوتوئیدهای درون صفحه‌ای (WPG) نیز کشیده شده‌اند (شکل ۵). در نمودار مقدار Nb در مقابل $(Ce + Rb + Nb + (Ta \times 100)) / (Sr + Zr)$ (بیش از ۱۷ گرم در تن) در نمونه‌های کبیرکوه دیده می‌شود و پس از آن توده‌های نفوذی چاه شلجمی و ده سلم از Nb بالایی برخوردارند (۱۱ تا ۲۰ گرم در تن در چاه شلجمی و ۸ تا ۲۰ گرم در تن در ده سلم). همچنین نسبت $(Ce + Rb + Nb + (Ta \times 100)) / (Sr + Zr)$ در توده‌های نفوذی این مناطق بالاست (۱۵۰ تا ۴۰۰). بالا بودن این نسبت نشان دهنده بیشتر بودن عناصر Ce، Rb، Nb و Ta نسبت به Sr و Zr است. این در حالی است که توده‌های نفوذی مناطق ماهرآباد، خویپک، کوه شاه و نجم‌آباد از Nb کمتر از ۶ گرم در تن و نسبت $(Ce + Rb + Nb + (Ta \times 100)) / (Sr + Zr)$ کمتر از ۲۰۰ برخوردارند (شکل ۶). عناصر Rb، Nb و Ta از عناصر فراوان در پوسته قاره‌ای هستند [۲۸]. کاهیدگی Nb، از ویژگیهای تیبیک ماگماهای مشتق شده از پوسته اقیانوسی در زون فرورانش است و افزایش آن اختلاط هرچه بیشتر پوسته قاره‌ای را در ماگما آشکار می‌کند [۲۹]. مقادیر بالای Sr و مقادیر پایین Ta، Ti و Nb ممکن است مربوط به حضور هورنبلند و اکسیدهای آهن-تیتان مانند روتیل و ایلمنیت و عدم حضور پلاژیوکلاز در منشأ باشد [۳۰]. مقادیر پایین Nb و Ta را همچنین به فرآیندهای ته‌نشینی قبلی در سنگهای گوشته نسبت می‌دهند [۳۱ و ۳۲]. بنابراین ماگمای منطقه کبیرکوه بیشترین آرایش را با پوسته قاره‌ای نشان می‌دهد و پس از آن ماگمای مناطق چاه‌شلجمی و ده سلم با ماگمای مشتق شده از پوسته قاره‌ای آلودگی پیدا کرده است.

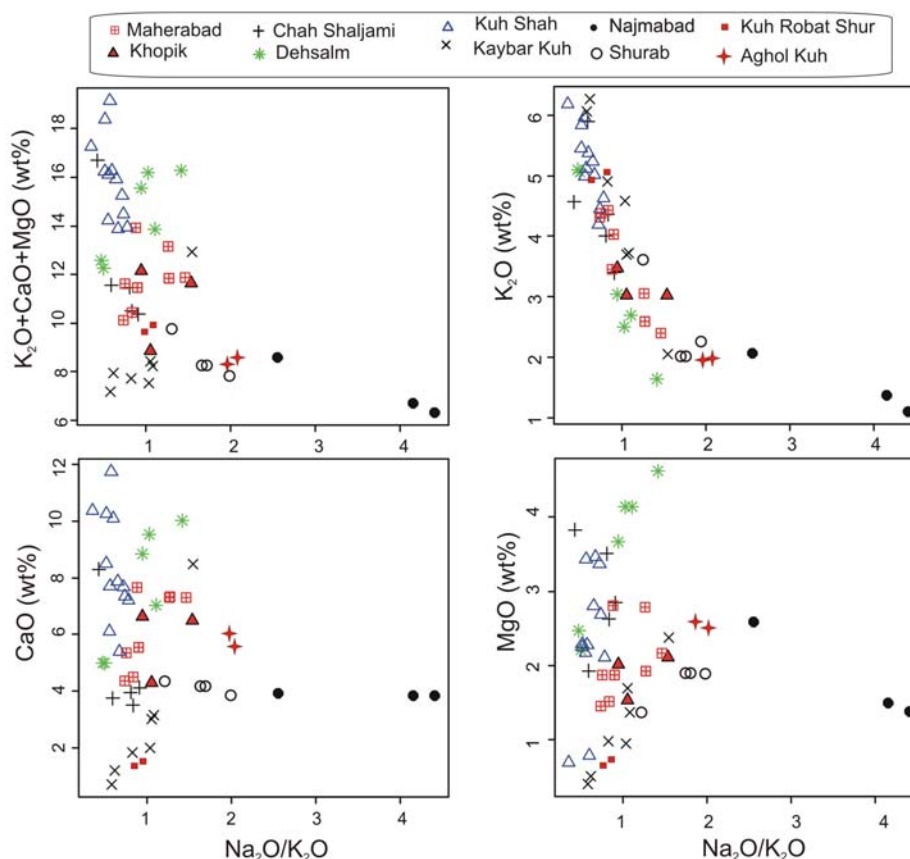
آلودگی نیز مربوط به ماگمای توده‌های نفوذی نجم‌آباد است. شکل (۷) نمودار عنکبوتی مقدار عناصر خاکی کمیاب را که نسبت به مقادیر REE کندریت نرمالیز شده‌اند نشان می‌دهد. در نمودارهای عنکبوتی می‌توان مواردی مانند عمق نسبی تشکیل ماگما، تعیین نوع و درصد کانیهای سنگ منشأ، شرایط ذوب، درصد ذوب، نوع ذوب و نظایر آن را مشخص نمود. ضریب توزیع عناصر بین کانی و ماگما مهمترین عامل تغییرات در ترکیب ماگمای تولید شده (ذوب) و همچنین تفریق در زمان تبلور است. توزیع عناصر در کانی توسط شعاع یونی، بار یونی، عدد کئوردیناسیون و الکترون‌گاتیویته کنترل می‌شود. ضریب توزیع عناصر بین کانی و ماگما به عوامل متعددی از قبیل نوع کانی، تغییرات در ترکیب کانی، شرایط ذوب (فشار، میزان آب، فوگاسیته اکسیژن - CO_2) بستگی دارد. عناصری که ضریب توزیع کمتر از یک هستند (نظیر Lu، Y، Yb در کانی گارنت) با ذوب بخشی کم، بخش اعظم این عناصر وارد ماگما می‌شوند. بر عکس عناصری که دارای ضریب توزیع بیش از یک هستند (نظیر La، Ce در کانی گارنت) با ذوب بخشی کم، مقدار جزئی این عناصر وارد ماگما می‌شوند. بنابراین از نسبت $(La/Yb)_N$ می‌توان حضور گارنت و در نتیجه عمق ذوب را برآورد نمود. همچنین درجه پایین ذوب بخشی گوشته اولیه را می‌توان توسط غنی‌شدگی عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) نسبت به ته‌نشینی عناصر خاکی سنگین (HREE) تشخیص داد [۳۳]. همانطور که مشخص است غنی‌شدگی در عناصر LREE نسبت به الگوی عناصر HREE در کلیه توده‌های نفوذی مناطق مختلف دیده می‌شود که مخصوص ماگماهای تشکیل شده در زون فرورانش است. همچنین ته‌نشینی بزرگی در عناصر خاکی کمیاب سنگین (HREE) در توده‌های نفوذی نجم‌آباد دیده می‌شود که با بقیه مناطق تفاوت دارد. نسبت $(La/Yb)_N$ در این توده‌ها بیش از ۱۷ بوده و تا ۲۳ نیز رسیده است. این موضوع می‌تواند مربوط به تشکیل ماگما در عمق پایداری گارنت باشد که در دیگر نمودارها نیز در ادامه قابل تأیید است (شکل ۷). همچنین نمونه‌های کبیرکوه دارای ناهنجاری منفی بزرگی در عنصر Eu است. این موضوع با شدت کمتر در توده‌های نفوذی دیگر مناطق دیده می‌شود و در توده‌های نجم‌آباد ناهنجاری منفی وجود ندارد (شکل ۷).



شکل ۲. نام گذاری توده‌های نفوذی مناطق مورد مطالعه در نمودار [۲۵].



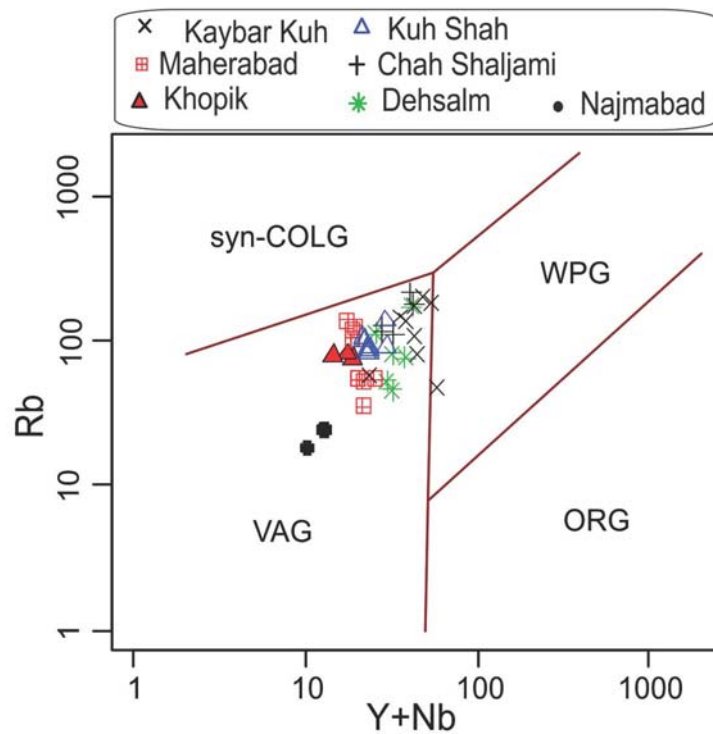
شکل ۳. موقعیت قرارگیری توده‌های نفوذی مناطق مورد مطالعه در نمودار [۲۶]. همه توده‌ها به غیر از دو نمونه از منطقه شوراب، در محدوده متآلومینوس قرار می‌گیرند



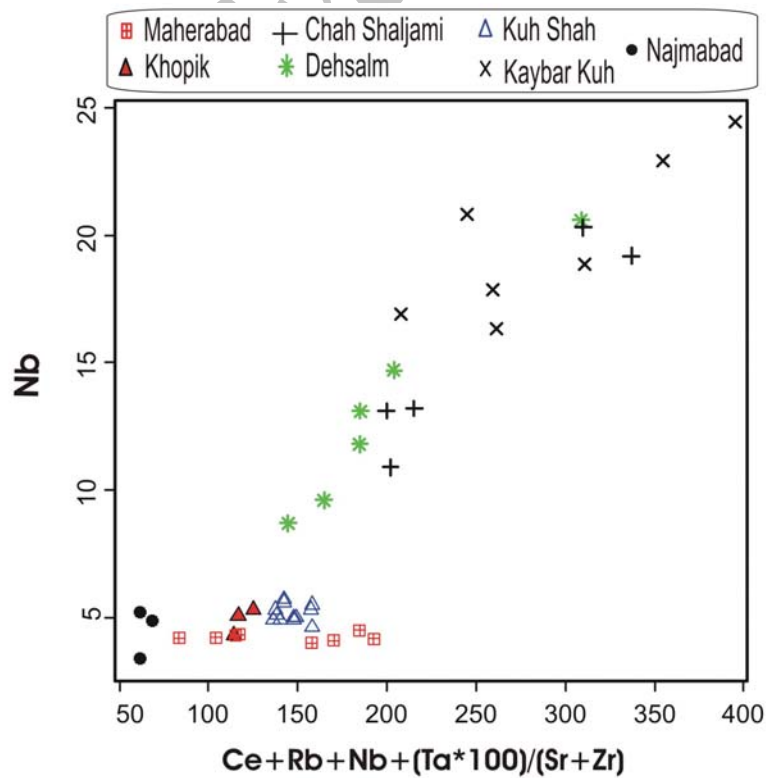
شکل ۴. موقعیت قرارگیری توده‌های نفوذی مناطق مورد مطالعه در نمودار K_2O ، $K_2O+CaO+MgO$ ، CaO و MgO در مقابل Na_2O/K_2O .

آلودگی پوسته‌ای شده‌اند، به بیش از ۳۰ می‌رسد. مقدار Eu/Eu^* توده‌های مناطق ماهرآباد، خویبک، چاه‌شلجمی، ده‌سلم و کوه شاه نیز بین ۰/۸ تا ۱ است که نشان دهنده حضور مقدار کمتر و یا نبود پلاژیوکلاز در منشأ ماگما و شرایط اکسیدان‌تر محلول (آلودگی کمتر با پوسته قاره‌ای) است. این نسبت در توده‌های نجم‌آباد به بیش از ۱ رسیده که بیانگر عمق بیشتر تشکیل ماگما (عمق پایداری گارنت) و عدم حضور پلاژیوکلاز می‌باشد. الگوی نرمالیز شده عناصر نادر خاکی توده‌های نجم‌آباد نسبت به کندریت نیز این موضوع را تأیید می‌کند (شکل ۸). همچنین بالا بودن Sr (از ۴۰۰ تا بیش از ۱۳۰۰ گرم در تن) در توده‌های نفوذی نجم‌آباد، ماهرآباد، خویبک، چاه‌شلجمی، ده‌سلم و کوه شاه نسبت به مقدار کم این عنصر در نمونه‌های کبیرکوه (از ۶۶ تا حداکثر ۵۰۰ گرم در تن)، حضور پلاژیوکلاز به عنوان کانی باقی مانده در منشأ ماگمای منطقه کبیرکوه و کم بودن یا نبودن این کانی در منشأ ماگمای دیگر مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

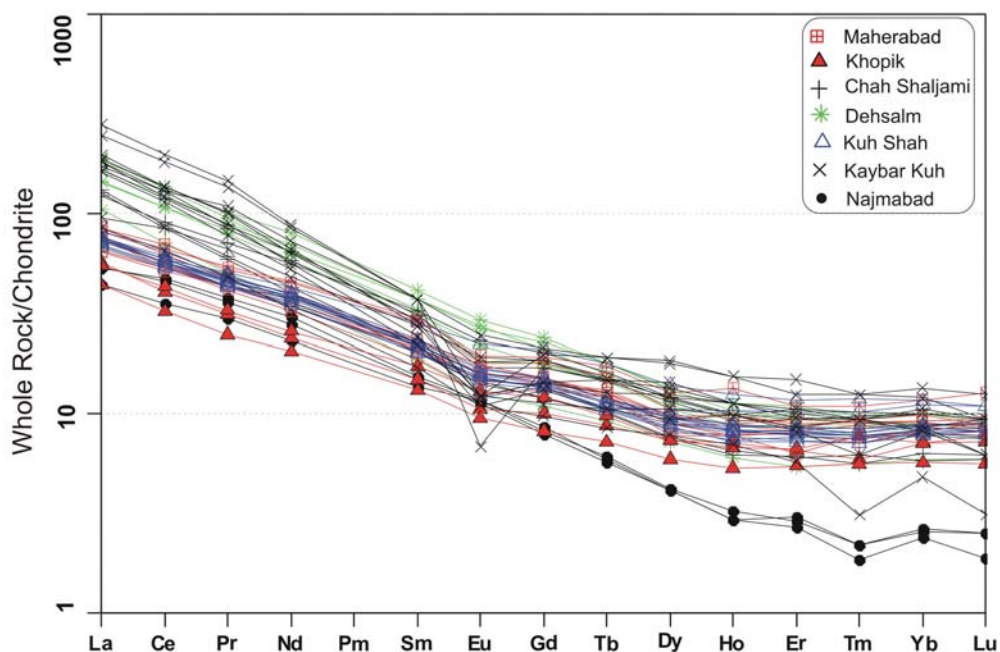
[۳۴] ادعان داشتند که هر گاه مقدار نسبت Eu/Eu^* بیش از ۱ باشد، ناهنجاری مثبت و هرگاه کمتر از ۱ باشد، ناهنجاری منفی است. ناهنجاری منفی Eu می‌تواند به حضور پلاژیوکلاز به عنوان کانی باقی مانده در منشأ یا به شرایط احیایی منطقه ذوب ماگما برای منطقه کبیرکوه مربوط باشد. برای مناطق ماهرآباد، خویبک، کوه شاه و نجم‌آباد، غنی‌شدگی Sr و فقدان ناهنجاری Eu نشان می‌دهد که کانی پلاژیوکلاز در سنگ منشأ به عنوان کانی باقی مانده حضور نداشته و ضمناً شرایط ذوب در حالت اکسیدان بوده است [۳۰ و ۳۵]. همچنین در شکل (۸) مقدار نسبت Zr/Nb در مقابل Eu/Eu^* توده‌های نفوذی مناطق مورد مطالعه مقایسه شده است. توده‌های نفوذی کبیرکوه به دلیل پایین بودن نسبت Zr/Nb (کمتر از ۲) بیشترین آلودگی ماگمایی با پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهند. مقدار Eu/Eu^* کمتر از ۰/۸ نیز می‌تواند بیانگر حضور پلاژیوکلاز در سنگ منشأ و آلودگی ماگما با پوسته قاره‌ای احیایی باشد. نسبت Zr/Nb در دیگر توده‌های نفوذی بیش از ۱۰ بوده و در نمونه‌های نجم‌آباد که دچار کمترین



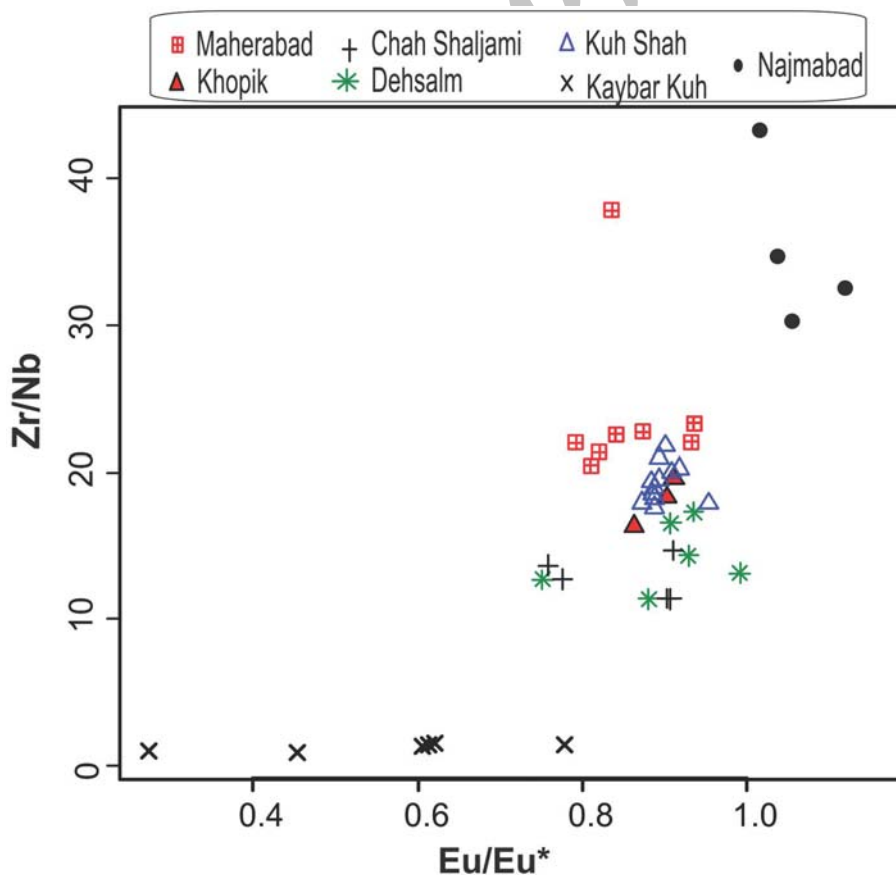
شکل ۵. گرانیتوئیدهای مناطق مورد مطالعه که به طور عمده در محدوده گرانیتوئیدهای قوس آتشفشانی قرار گرفته‌اند [۲۷]. $=VAG$ = گرانیتوئیدهای قوس آتشفشانی، $=WPG$ = گرانیتوئیدهای درون صفحه‌ای، $=ORG$ = گرانیتوئیدهای پشته میان اقیانوسی، $=syn-COLG$ = گرانیتوئیدهای همزمان با تصادم قاره‌ها.



شکل ۶. گرانیتوئیدهای مناطق مورد مطالعه در نمودار Nb در مقابل $(Ce + Rb + Nb + (Ta \times 100)) / (Sr + Zr)$



شکل ۷. نمودار عنکبوتی عناصر REE توده‌های نفوذی مختلف ترشیاری بلوک لوت که نسبت به کندریت نرمالیز شده است (مقادیر REE کندریت از [۳۶]).



شکل ۸. گرانیتوئیدهای مناطق مورد مطالعه در نمودار Zr/Nb در مقابل Eu/Eu^* .

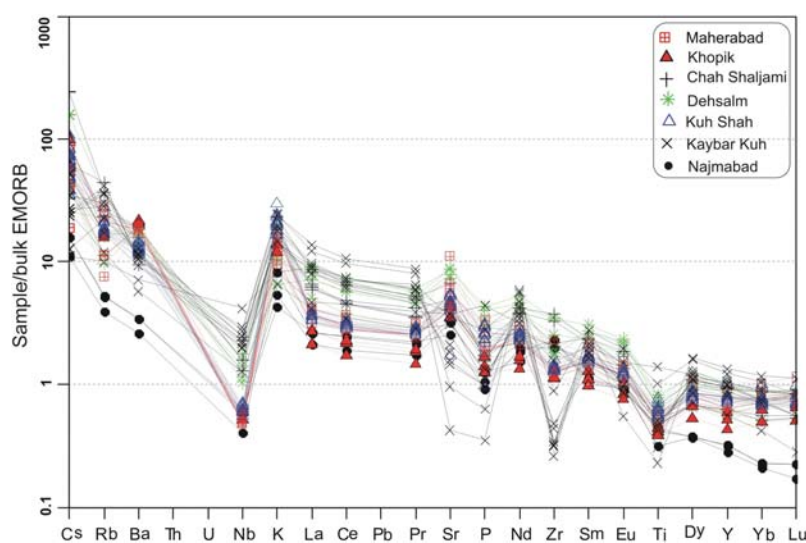
مقدار $(La/Yb)_N$ در توده‌های مناطق ماهرآباد، خوپیگ و کوه شاه کمتر از ۱۰ است و این ماگماها از نوع کالک آلکالن نرمال هستند. این نسبت در دهسلم، چاهشلجمی و کیبرکوه بیش از ۱۵ می‌باشد (شکل ۱۰). اما ماگمای کیبرکوه به دلیل پایین بودن مقدار Sr (عمدتاً کمتر از ۴۰۰ گرم در تن)، بالا بودن نسبت K_2O/Na_2O و ناهنجاری منفی Eu با ماگمای آداکیتی متفاوت بوده و از نوع کالک آلکالن نرمال است. همچنین ماگمای توده‌های نفوذی مناطق دهسلم و چاهشلجمی به دلیل نسبت بالای K_2O/Na_2O (بین ۰/۵ تا ۲/۳) و نیز تفاوتی در مقدار ایزوتوپ Sr-Nd، با ماگمای آداکیتی نرمال اختلاف دارد، اما از اکثر جهات شبیه بوده و ممکن است که آداکیتی باشد. توده‌های نجم‌آباد نیز ماهیتی متفاوت با بقیه در شکل (۱۰) دارند که به علت کمتر بودن Yb_N (کمتر از ۴) است. ماگمای این منطقه از نظر مقدار $(La/Yb)_N$ و Yb_N کاملاً در محیط آداکیتی قرار گرفته است که الگوی عناصر خاکی کمیاب (تهی‌شدگی شدید عناصر HREE و نبود ناهنجاری منفی Eu)، بالا بودن مقدار Sr (بیش از ۴۰۰ گرم در تن) و سدیک بودن توده‌های نفوذی آن را تأیید می‌کند.

سن‌سنجی

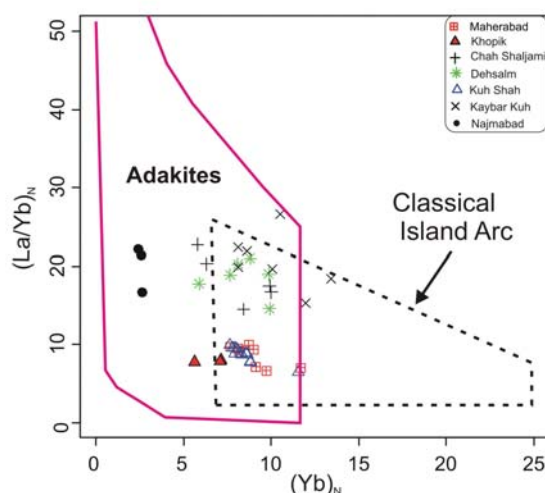
سن‌سنجی در مناطق ماهرآباد، خوپیگ، دهسلم، چاهشلجمی و شواب بر روی توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی انجام شده است، لذا سن به دست آمده نشان دهنده سن کانی‌سازی مربوطه نیز هست. توده‌های نفوذی کیبرکوه دارای آلتراسیون بوده اما کانی‌سازی محدودی به همراه دارد و در منطقه نجم‌آباد نیز توده‌های ترشیری فاقد هرگونه کانی‌سازی و آلتراسیون هستند. در مناطق ماهرآباد، خوپیگ، کیبرکوه و نجم‌آباد، سن‌سنجی بر روی کانی زیرکن و با اندازه‌گیری ایزوتوپ U-Pb انجام شده است [۷، ۹ و ۱۱]. کانی زیرکن به روش‌های مختلف تعیین سن می‌شود. تعیین سن زیرکن به روش U-Pb-Th (دمای پایداری ایزوتوپی زیرکن تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد) بهترین روش سن‌سنجی سنگهای گرانیتوئیدی است. تعیین سن زیرکن به روش fission track برای سن‌سنجی پدیده‌های حرارتی کمتر از ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد کاربرد دارد. برای تعیین سن رسوبات عهد حاضر از کانی زیرکن به روش U-He استفاده می‌شود.

شکل (۹) نمودار مقدار عناصر فرعی و خاکی کمیاب نرمالیز شده با مقادیر EMORB را نشان می‌دهد. مناطق ماهرآباد، خوپیگ و کوه شاه الگوی تقریباً مشابهی دارند، به طوری که غنی‌شدگی در عناصر LILE مانند Rb، Cs، K و Ba و تهی‌شدگی در عناصر HFSE مانند Nb و Ti دیده می‌شود. کاهیدگی Nb و Ti منعکس‌کننده حضور کانیه‌های Ti [۳۷] و یا Ti-Nb دار در منشأ است [۳۸]. غنی‌شدگی عناصر LILE و کاهیدگی عناصر HFSE از ویژگیهای تیپیک ماگماهای تولید شده در زون فرورانش است [۲۹]. غنی‌شدگی عنصر Sr همراه با نبود ناهنجاری منفی Eu در این توده‌ها، منعکس‌کننده نبود پلاژیوکلاز در منشأ ماگماست. توده‌های نفوذی مناطق دهسلم، چاهشلجمی و کیبرکوه نیز غنی‌شدگی در عناصر LILE نسبت به عناصر HFSE نشان می‌دهد، اما الگوی آن کمی متفاوت با ماهرآباد، خوپیگ و کوه شاه است. به طوری که مقدار عناصر Rb، Cs، K و Ba کمتر و برعکس عناصر Nb و Ti بیشتر است؛ که این امر می‌تواند نشان دهنده آرایش بیشتر با پوسته قاره‌ای در ترکیب این ماگماها باشد. کاهیدگی زیاد Sr در توده‌های کیبرکوه همراه با ناهنجاری منفی بالای Eu، تاییدی بر منشأ گرفتن ماگما در شرایط احيایی است. توده‌های نفوذی نجم‌آباد که فاقد کانی‌سازی هستند، همانند دیگر نمودارها الگوی متفاوتی نشان می‌دهند، به طوری که کاهیدگی شدیدی در عناصر LILE مانند Rb، Cs، K و Ba و نیز عناصر HREE در آن دیده می‌شود. مقدار Nb نیز در ماگمای این منطقه کمترین است (شکل ۸). این مساله مؤید کمترین آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای است. شکل (۱۰) نمودار $(La/Yb)_N$ را در مقابل Yb_N نشان می‌دهد که اکثر توده‌های نفوذی (غیر از منطقه نجم‌آباد) در محیط مشترک ماگمای کالک آلکالن تیپیک با ماگمای آداکیتی واقع شده‌اند. [۳۹] ترکیب سنگهای آداکیتی را از هورنبلند آندزیت تا داسیت و ریولیت معرفی می‌کنند. ویژگی ژئوشیمیایی آداکیت‌ها با موارد زیر مشخص می‌شود [۴۰]:

$SiO_2 \geq 56\%$ ، $Al_2O_3 \geq 15\%$ ، $MgO < 3\%$ (به ندرت بیش از ۶ درصد)، $3.5\% \leq Na_2O \leq 7.5\%$ ، نسبت K_2O/Na_2O کم (حدود ۰/۴۲)، نسبت مولی منیزیم بالا (حدود ۰/۵۱)، مقدار Cr (۳۶ گرم در تن) و Ni (۲۴۰ گرم در تن) و Sr (بیش از ۴۰۰ گرم در تن) بالا، مقدار HREE بسیار کم، نسبت $(La/Yb)_N$ بیش از ۱۰، $Yb \leq 1.8$ ppm و $Y \leq 18$ ppm.



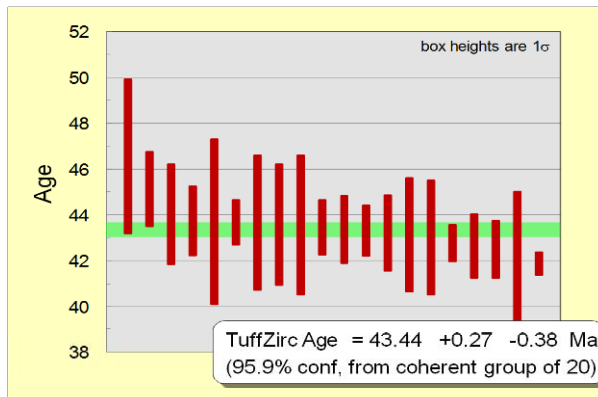
شکل ۹. نمودار عناصر فرعی و REE توده‌های نفوذی مختلف ترشیاری بلوک لوت که نسبت به EMORB نرمالیز شده است (مقادیر EMORB از [۳۷]).



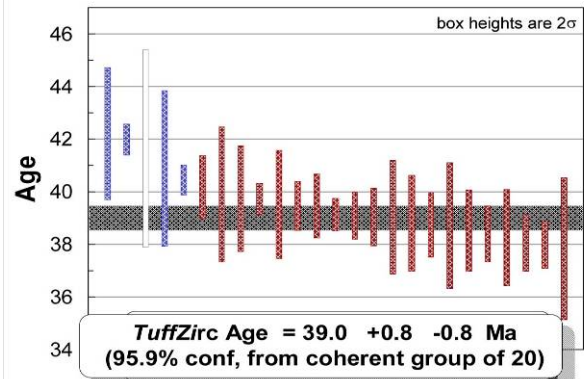
شکل ۱۰. توده‌های نفوذی ترشیاری مناطق مورد مطالعه در نمودار $(La/Yb)_N$ و $(Yb)_N$ [۴۱] که اغلب در محیط مشترک کالک‌آلکان تیپیک با آداکیت قرار گرفته‌اند.

[۴، ۱۳ و ۱۴]. (شکل‌های ۱۱ ت و ث). شکل (۱۲) سن توده‌های نفوذی ترشیاری شرق بلوک لوت را همراه با موقعیت مکانی آنها نشان می‌دهد. سن همه گرانیتوئیدها ائوسن تا الیگوسن تحتانی بوده و از ۴۳/۳ میلیون سال در کبیرکوه تا ۳۳/۳ میلیون سال در چاه‌شلجمی کاهش می‌یابد. این کاهش سنی با روند منظمی از شمال به جنوب اتفاق افتاده است. مقایسه سن بازالت‌های ترشیاری بلوک لوت مانند فردوس، قله گنبد و مود نیز همین روند کاهشی را از شمال (۴۲ میلیون سال) به جنوب (۳۱/۴ میلیون سال) (Tarkian et al. 1983) نشان می‌دهد (شکل ۱۲).

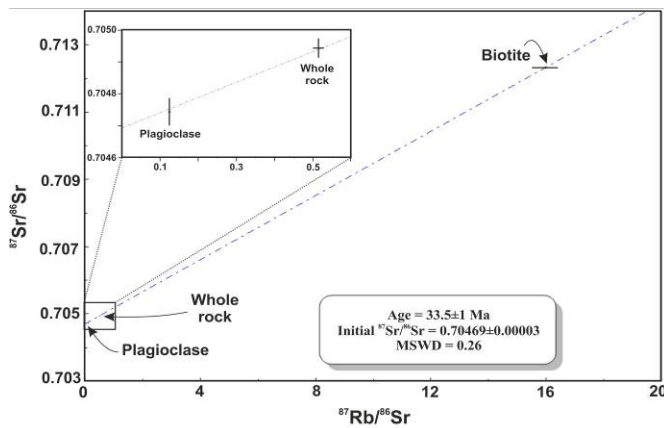
میانگین سن به دست آمده برای توده‌های مونزونیتی ماهرآباد و خویبک ۳۹، کبیرکوه ۴۳/۳ و نجم‌آباد ۳۹/۹ میلیون سال است (شکل‌های ۱۱ الف تا پ). در مناطق دهسلم، چاه‌شلجمی، خور و شوراب نیز سن‌سنجی به روش Rb-Sr بر روی کانیهایی جدا شده (پلاژیوکلاز و بیوتیت) و سنگ کل و رسم ایزوکرون به دست آمده است. در کوه رباط شور نیز سن‌سنجی به روش K-Ar انجام شده است. توده‌های مونزونیتی مناطق دهسلم و چاه‌شلجمی به ترتیب ۳۳/۶ و ۳۳/۳ میلیون سال، توده مونزودیوریتی خور ۳۹/۶ میلیون سال و توده‌های گرانودیوریتی منطقه شوراب و سینیتی کوه رباط شور به ترتیب میانگین ۴۲/۲ و ۴۲ میلیون سال سن داشته‌اند



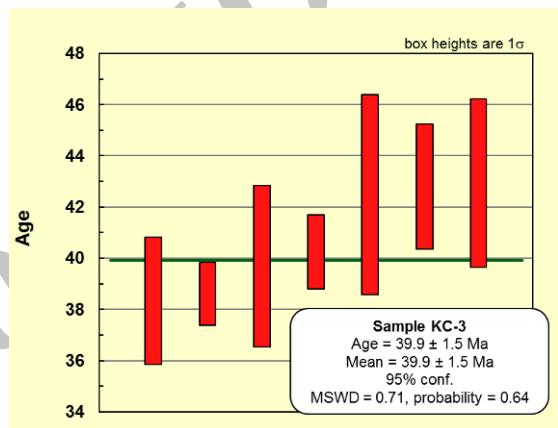
شکل ۱۱ ب. میانگین سن توده‌های نفوذی کبیرکوه.



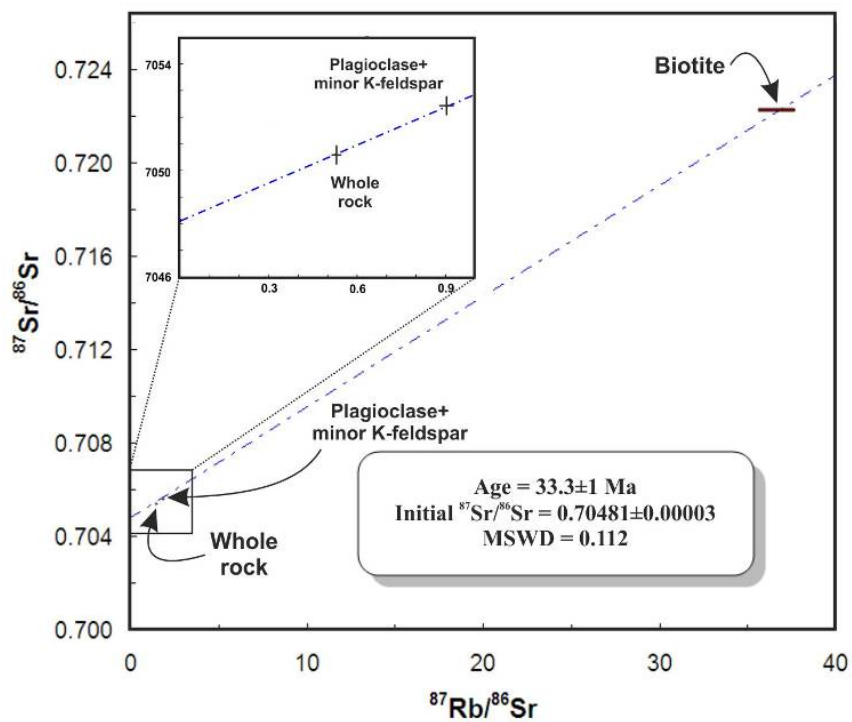
شکل ۱۱ الف. میانگین سن توده‌های نفوذی ماهرآباد و خوپیک.



شکل ۱۱ ت. نمودار ایزوکرون توده نفوذی ده سلم.



شکل ۱۱ پ. میانگین سن توده‌های نفوذی نجم آباد.

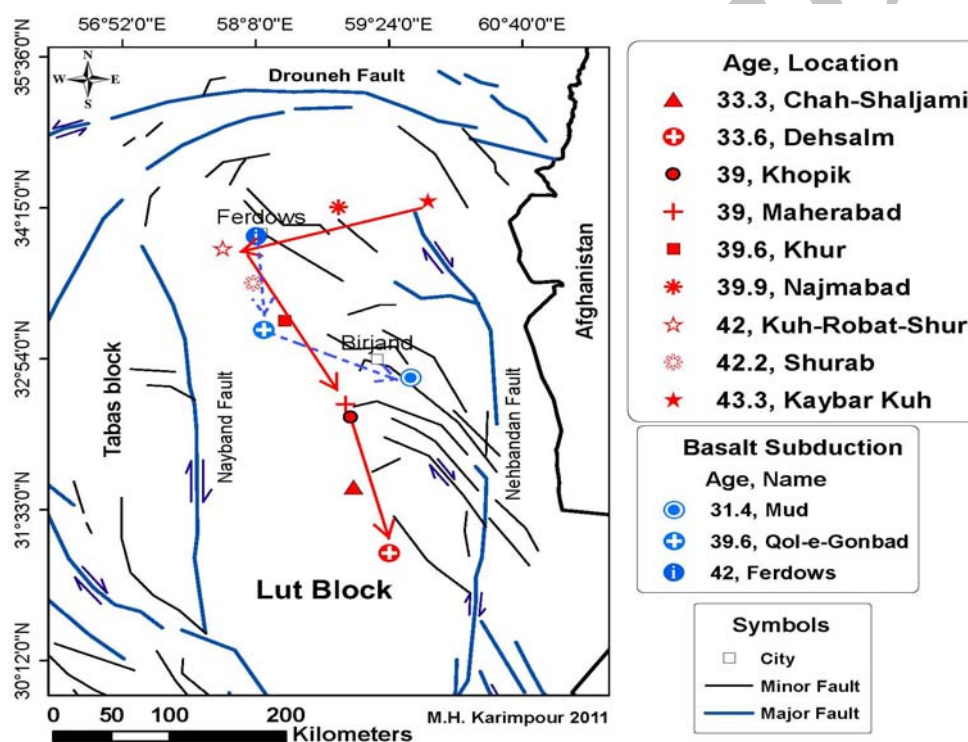


شکل ۱۱ ث. نمودار ایزوکرون توده نفوذی چاه شلجمی.

ایزوتوپ Sm/Nd و Rb/Sr

مقدار $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه در مناطق ماهرآباد، خویپک، نجم‌آباد و کبیرکوه با تجزیه نمونه سنگ کل و با توجه به سن به دست آمده از زیرکن (به ترتیب ۳۹، ۳۹، ۳۹/۹ و ۴۳/۳ میلیون سال) محاسبه شده است [۷، ۹ و ۱۱]. این نسبتها در توده‌های نفوذی ده‌سلم و چاه‌شلجمی نیز با تجزیه سنگ کل و با توجه به سن حاصل از نمودارهای ایزوکرون (۳۳ میلیون سال) به دست آمده است [۱۳]. مقدار $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه در توده‌های نفوذی شوراب نیز در دو نمونه سن‌سنجی شده از رسم ایزوکرون و در ۴ نمونه دیگر با تجزیه

سنگ کل و سن به دست آمده از نمودارهای ایزوکرون محاسبه شده است [۴]. مقدار $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه در توده‌های نفوذی آغل کوه و خور نیز از تجزیه کانپها و سنگ کل و رسم نمودار ایزوکرون و کوه رباط شور از تجزیه کل سنگ و سن به دست آمده از ایزوتوپ K-Ar محاسبه شده است [۱۴] (جدول ۱ و ۲). شکل (۱۳) مقدار ϵNd در مقابل $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه در توده‌های نفوذی ماهرآباد، خویپک، ده‌سلم، چاه‌شلجمی، شوراب، نجم‌آباد و کبیرکوه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. سن توده‌های نفوذی ترشیری مناطق مورد مطالعه همراه با موقعیت مکانی آنها در مقایسه با سن بازالت‌های ترشیری بلوک لوت. کاهش سن از شمال به جنوب در گرانیتوئیدها و بازالت‌ها دیده می‌شود.

بیش از ۰/۷۰۶ و مقدار ϵNd کمتر از ۳- دارند و در محدوده ماگماهای حاصل از ذوب بخشی پوسته قاره‌ای قرار گرفته‌اند (شکل ۱۳). ژئوشیمی توده‌های کبیرکوه نشان داد که آنها در کمربند زون فرورانش تشکیل شده‌اند و پذیرفتاری مغناطیسی آنها نیز نشان دهنده ماهیت اکسیدان (سری مگنتیت) گرانیتوئیدهاست. بنابراین، مقدار نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه و ϵNd مربوط به آرایش شدید ماگمای مشتق شده از پوسته اقیانوسی با پوسته قاره‌ای است. ژئوشیمی توده‌های نفوذی

توده‌های نفوذی ماهرآباد، خویپک، ده‌سلم و چاه‌شلجمی مقدار ϵNd بین ۰/۵+ تا ۲/۴۹+ و مقدار نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه کمتر از ۰/۷۰۵۵+ دارند که نشان دهنده ماگمای مشتق شده از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی است. توده نفوذی نجم‌آباد دارای نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه کمتر از ۰/۷۰۵۳+ و مقدار ϵNd برابر ۵/۱۶+ است که منعکس کننده کمترین آلودگی بین ماگمای مشتق شده از پوسته اقیانوسی با پوسته قاره‌ای است (شکل ۱۳). توده‌های نفوذی کبیرکوه مقدار نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه

ایزوتوپ‌های $\epsilon\text{Nd M}$ ، $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})$ ، $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m$ و $\epsilon\text{Nd I}$ به دو روش محاسباتی و ترسیمی به دست آورد [۴۲ و ۴۳].

کیبرکوه از جمله افزایش Nb در این توده‌ها نیز مؤید این موضوع است. مقدار نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه از شمال به جنوب همراه با کاهش سن توده‌های نفوذی از کیبرکوه به طرف چاه‌شلجمی، از ۰/۷۰۷ به ۰/۷۰۴۷ کاسته می‌شود (شکل ۱۴). سن سنگ منشأ ماگما (TDM) را می‌توان با استفاده از نتایج

جدول ۱. مقدار ایزوتوپ Rb-Sr توده‌های نفوذی ترشیاری مورد مطالعه.

Sample	AGE (ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Uncertainty initial ratio	Ref.
Khopik	۳۹	۶۶/۱	۴۹۳	۰/۳۸۷۳	۰/۷۰۴۹۷۰	۰/۷۰۴۷۵۵	۰/۰۰۰۰۰۹	ملکزاده (۱۳۸۸)
Maherabad	۳۹	۴۹/۱	۹۰۶	۰/۱۵۶۵	۰/۷۰۴۹۵۰	۰/۷۰۴۸۶۳	۰/۰۰۰۰۱۰	ملکزاده (۱۳۸۸)
Najmabad	۳۹/۹	۱۷/۵	۳۶۵	۰/۱۳۸۵	۰/۷۰۵۲۰۰	۰/۷۰۵۱۲۲	۰/۰۰۰۰۰۹	مرادی و همکاران (در حال چاپ)
Kayber Kuh	۴۲	۷۱/۶۹۱	۵۲/۱۲	۰/۳۹۸۳	۰/۷۰۶۳۹۱	۰/۷۰۶۱۵۳	۰/۰۰۰۰۰۷	کریم‌پور و سلاطی (۱۳۸۹)
Kayber Kuh	۴۲	۱۶۰/۲۱	۲۱۲/۱۵	۲/۱۸۲۵	۰/۷۰۸۱۱۸	۰/۷۰۶۸۱۶	۰/۰۰۰۰۱۰	کریم‌پور و سلاطی (۱۳۸۹)
Dehsalm	۳۳	۴۹	۱۲۱۰	۰/۱۱۷	۰/۷۰۴۷۵۲	۰/۷۰۴۷۵۲	۰/۰۰۰۰۱۵	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Dehsalm	۳۳	۸۵/۷	۱۱۳۹	۰/۲۱۸	۰/۷۰۵۱۷۹	۰/۷۰۵۱۷۹	۰/۰۰۰۰۱۲	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Dehsalm	۳۳	۸۰/۲	۱۳۳۹	۰/۱۷۳	۰/۷۰۴۸۹۳	۰/۷۰۴۸۹۳	۰/۰۰۰۰۱۱	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Dehsalm	۳۳	۱۱۵/۵	۶۸۳/۵	۰/۴۸۹	۰/۷۰۵۰۹۴	۰/۷۰۵۰۹۴	۰/۰۰۰۰۱۲	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Dehsalm	۳۳	۱۸۰/۳	۶۷۴/۸	۰/۷۷۳	۰/۷۰۵۲۱۴	۰/۷۰۵۲۱۴	۰/۰۰۰۰۱۹	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Dehsalm	۳۳	۶۳/۸	۱۳۷۳	۰/۱۳۴	۰/۷۰۵۰۱۶	۰/۷۰۵۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۸	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Dehsalm	۳۳	۱۹۹	۶۳۷	۰/۹۰۴	۰/۷۰۵۲۴۴	۰/۷۰۵۲۴۴	۰/۰۰۰۰۱۶	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Chah Shaljami	۳۳	۱۰۱/۸	۷۱۷/۶	۰/۴۱	۰/۷۰۵۲۱	۰/۷۰۵۲۵۱	۰/۰۰۰۰۱۳	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Chah Shaljami	۳۳	۶۵/۳	۵۱۸/۶	۰/۳۶۴	۰/۷۰۵۰۹۷	۰/۷۰۵۰۹۷	۰/۰۰۰۰۱۳	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Chah Shaljami	۳۳	۱۰۹	۳۶۱	۰/۸۷	۰/۷۰۵۲۲۶	۰/۷۰۵۲۲۶	۰/۰۰۰۰۱۳	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Chah Shaljami	۳۳	۱۰۹	۸۱۱	۰/۳۹	۰/۷۰۵۶۲۷	۰/۷۰۵۶۲۷	۰/۰۰۰۰۱۸	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Chah Shaljami	۳۳	۲۲۲/۵	۵۹۸/۲	۱/۰۷۶	۰/۷۰۶۰۰۷	۰/۷۰۶۰۰۷	۰/۰۰۰۰۱۴	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Chah Shaljami	۳۳	۱۳۱/۷	۷۰۰/۵	۰/۵۴۴	۰/۷۰۵۱۲۹	۰/۷۰۵۱۲۹	۰/۰۰۰۰۱۱	ارجمندزاده (۱۳۹۰)
Shurab	۴۳/۷	۸۱/۷	۶۰۲/۵	۰/۳۹۲۷	۰/۷۰۵۸۳	۰/۷۰۵۴۲	۰/۰۰۰۰۱۹	لطفی (۱۹۸۲)
Shurab	۴۱/۳	۴۰/۲	۵۹۷/۳	۰/۱۹۵۱	۰/۷۰۴۹۱	۰/۷۰۴۸۰	۰/۰۰۰۰۵۱	لطفی (۱۹۸۲)
Shurab	۴۲/۲	۸۹/۲	۸۵۴/۳	۰/۳۰۲۳	۰/۷۰۵۵۷	۷۰۵۳۹		لطفی (۱۹۸۲)
Shurab	۴۲/۲	۱۰۹/۷	۱۰۴۱/۲	۰/۳۰۵۲	۰/۷۰۵۳۶	۰/۷۰۵۱۸		لطفی (۱۹۸۲)
Shurab	۴۲/۲	۸۹/۸	۴۳۳۲	۰/۶۰۰۶	۰/۷۰۵۸۵	۰/۷۰۵۴۹		لطفی (۱۹۸۲)
Shurab	۴۲/۲	۵۶/۸	۸۱۶	۰/۲۰۱۵	۰/۷۰۵۴۰	۰/۷۰۵۲۸		لطفی (۱۹۸۲)
Aghol-Kuh		۵۲	۶۵۷/۷	۰/۰۹۷	۰/۷۰۴۹۴	۰/۷۰۴۸	۰/۰۰۰۰۱۶	Jung et al. 1983
Kuh-Rubat-Shur	۴۲	۱۷۰/۷	۱۵۹/۴	۳/۱۰۲۷	۰/۷۰۶۹۰	۰/۷۰۵۱	۰/۰۰۰۰۰۷	Jung et al. 1983
Khur	۳۹/۶	۱۵۱/۹	۷۸۴/۵	۰/۵۶۰۶	۰/۷۰۵۰۶	۰/۷۰۴۷	۰/۰۰۰۰۰۳	Tarkian et al. 1983

m= measured. Errors are reported as 2σ (95% confidence limit).

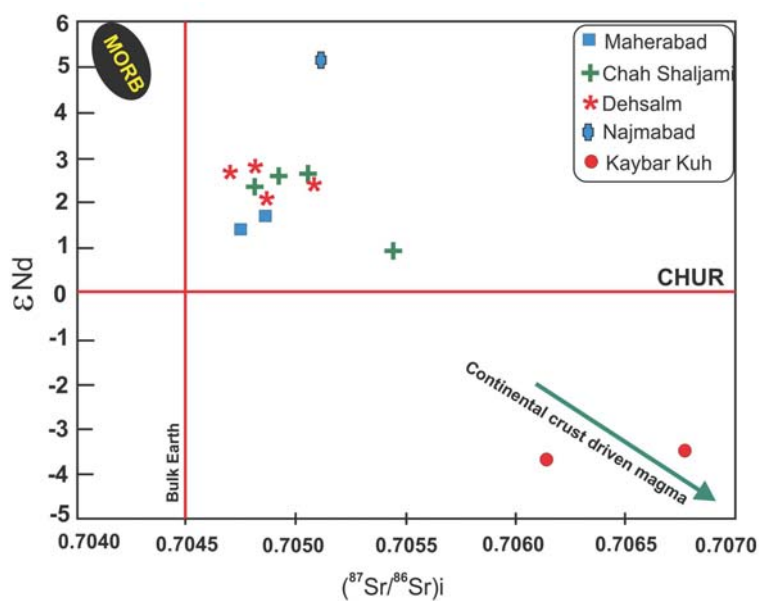
اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و خاکی کمیاب و ایزوتوپ‌های Rb/Sr و Sm/Nd در ماگمای منطقه کبیرکوه قابل تأیید است. همچنین توده‌های نفوذی بدون کانی‌سازی نجم‌آباد از جوانترین پوسته اقیانوسی به سن ۳۶۰ میلیون سال منشأ گرفته و کمترین آلودگی با پوسته را دارد. ژئوشیمی کاملاً متفاوت ماگمای این منطقه مانند سدیک بودن، الگوی متفاوت عناصر REE، آداکیتی بودن ماهیت ماگما، تفاوت در مقدار εNd و غیره این موضوع را اثبات می‌کند. ماگمای مناطق ده‌سلم و چاه‌شلجی نیز که در برخی موارد ژئوشیمی متفاوتی با ماگمای مناطق ماهرآباد و خوپیک نشان می‌دادند نیز از پوسته‌های اقیانوسی جداگانه‌ای منشأ گرفته‌اند که حدود ۲۰۰ میلیون سال با یکدیگر اختلاف سنی داشته‌اند.

براساس روش محاسباتی، ماگمای گرانیتوئیدی مناطق نجم‌آباد، چاه‌شلجی، ده‌سلم، ماهرآباد و خوپیک به ترتیب از پوسته قدیمی با سن حداقل ۳۶۰، ۴۴۰، ۴۶۰، ۶۲۰ و ۶۲۰ میلیون سال قبل منشأ گرفته است (شکل‌های ۱۵ الف و ب). همچنین ماگمای گرانیتوئیدی منطقه کبیرکوه از پوسته قدیمی با سن حداقل ۸۴۰ میلیون سال حاصل شده است (شکل‌های ۱۵ ب و پ). این مسأله نشان می‌دهد که هرچند همه این توده‌های نفوذی سن ائوسن تا الیگوسن تحتانی را با اختلاف سنی حدود ۱۰ میلیون سال دارند؛ ولی از پوسته‌های اقیانوسی متفاوتی منشأ گرفته‌اند. به طوری که ماگمای منطقه کبیرکوه از قدیمی‌ترین پوسته اقیانوسی در حال فرورانش، نشأت گرفته و بیشترین آرایش پوسته‌ای را در طی صعود متحمل شده است. این موضوع توسط ژئوشیمی متفاوت

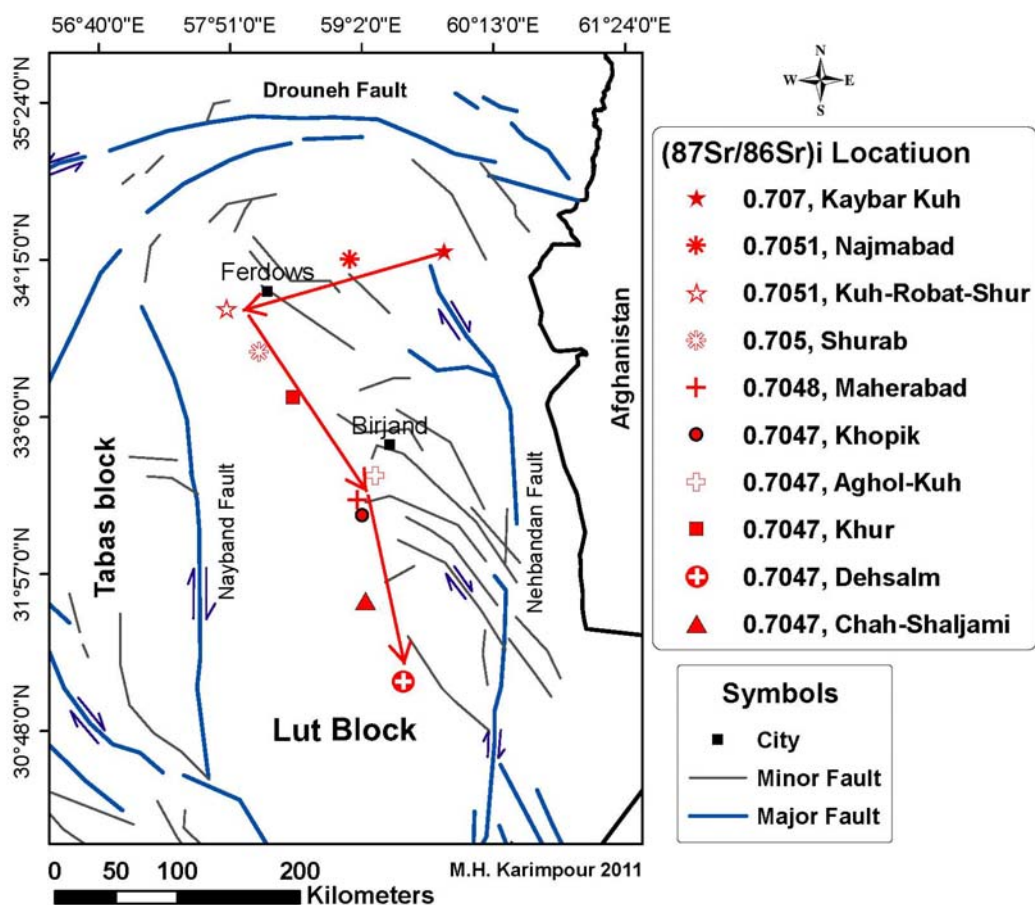
جدول ۲. مقدار ایزوتوپ Sm-Nd توده‌های نفوذی ترشیاری مورد مطالعه (سرها و مرجع هر منطقه مانند جدول (۱) است).

Sample	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_M$	$^{143}\text{Nd UNC}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	ϵNd_M	ϵNd_I
Khopik	۲/۴۰	۱۱/۶۳	۰/۱۲۵۱	۰/۵۱۲۶۹۴	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۵۱۲۶۶۲	۱/۰۹	۱/۴۵
Maherabad	۴/۲۹	۲۰/۴۵	۰/۱۲۶۹	۰/۵۱۲۷۱۳	۰/۰۰۰۰۱۲۰	۰/۵۱۲۶۸۱	۱/۴۶	۱/۸۱
Najmabad	۲/۶۹	۱۱/۶	۰/۱۴۰۷	۰/۵۱۲۸۸۸	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۵۱۲۸۵۱	۴/۸۸	۵/۱۶
Kayber Kuh	۶/۵۳۶	۳۸/۳۹	۰/۱۰۳۰	۰/۵۱۲۴۲۴	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۵۱۲۳۹۶	-۴/۱۷	-۳/۶۷
Kayber Kuh	۵/۱۴۴	۳۱/۳۸۲	۰/۰۹۹۲	۰/۵۱۲۴۳۲	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۵۱۲۴۰۵	-۴/۰۲	-۳/۵۰
Dehsalm	۷/۲	۳۸/۶	۰/۱۱۳		۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۵۱۲۷۷۲		۲/۰۸
Dehsalm	۶/۱۴	۳۴/۷	۰/۱۰۷		۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۵۱۲۷۱۴		۱/۸۴
Dehsalm	۸/۰۳	۴۷/۹	۰/۱۰۱		۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۵۱۲۷۳۳		۲/۲۵
Dehsalm	۳/۶۲	۲۱/۶	۰/۱۰۱		۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۵۱۲۶۹۶		۱/۵۲
Dehsalm	۶/۳۵	۳۸/۶	۰/۱		۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۵۱۲۷۱		۱/۸
Dehsalm	۷/۲۷	۳۸/۶	۰/۱۱۴		۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۵۱۲۷۴۸		۲/۴۹
Dehsalm	۶/۷۳	۴۰/۱	۰/۱۰۲		۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۵۱۲۷۴۵		۲/۴۷
Chah Shaljami	۴/۳۱	۲۶/۲	۰/۱		۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۵۱۲۷۳		۲/۲
Chah Shaljami	۴/۵۳	۲۶/۱	۰/۱۰۵		۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۵۱۲۷۲۹		۲/۱۶
Chah Shaljami	۵/۲۲	۲۷/۶	۰/۱۱۵		۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۵۱۲۷۱۸		۱/۸۸
Chah Shaljami	۴/۰۸	۲۴/۴	۰/۱۰۱		۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۵۱۲۶۴۴		۰/۵
Chah Shaljami	۵/۷۴	۳۴/۷	۰/۱		۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۵۱۲۷۲۴		۲/۰۸
Chah Shaljami	۴/۱۷	۲۵/۵	۰/۰۹۹		۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۵۱۲۷۵۶		۲/۷

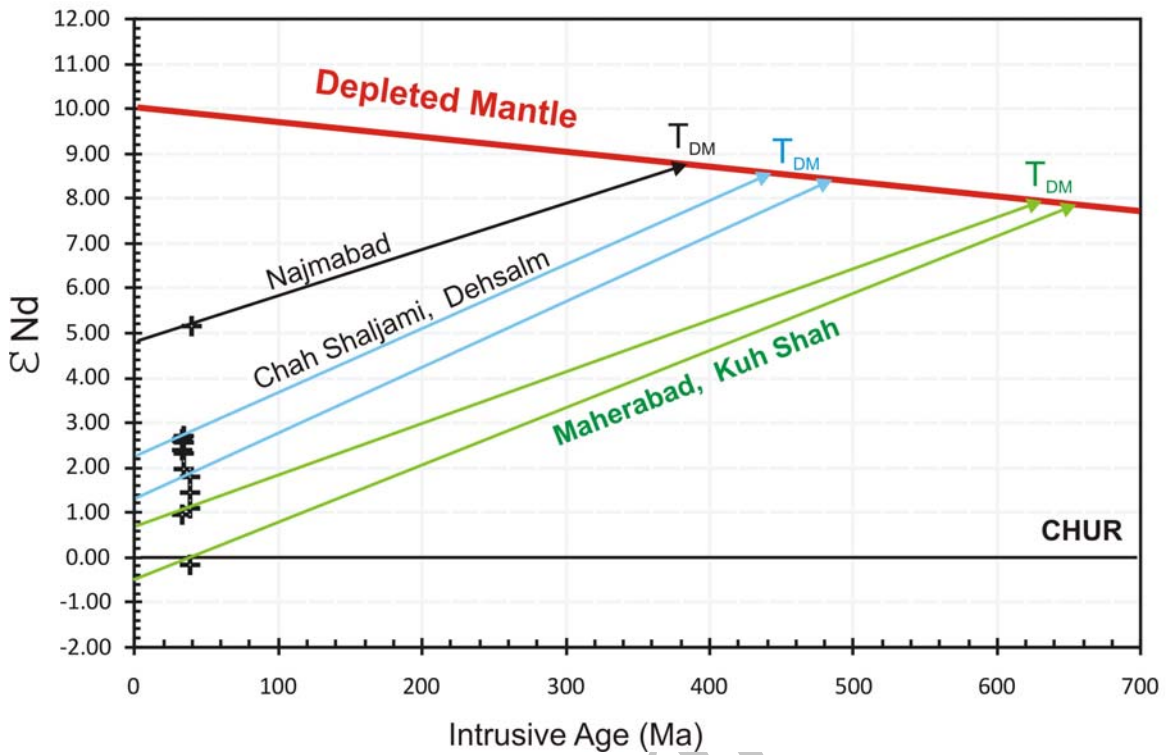
m= measured. Errors are reported as 2σ (95% confidence limit).



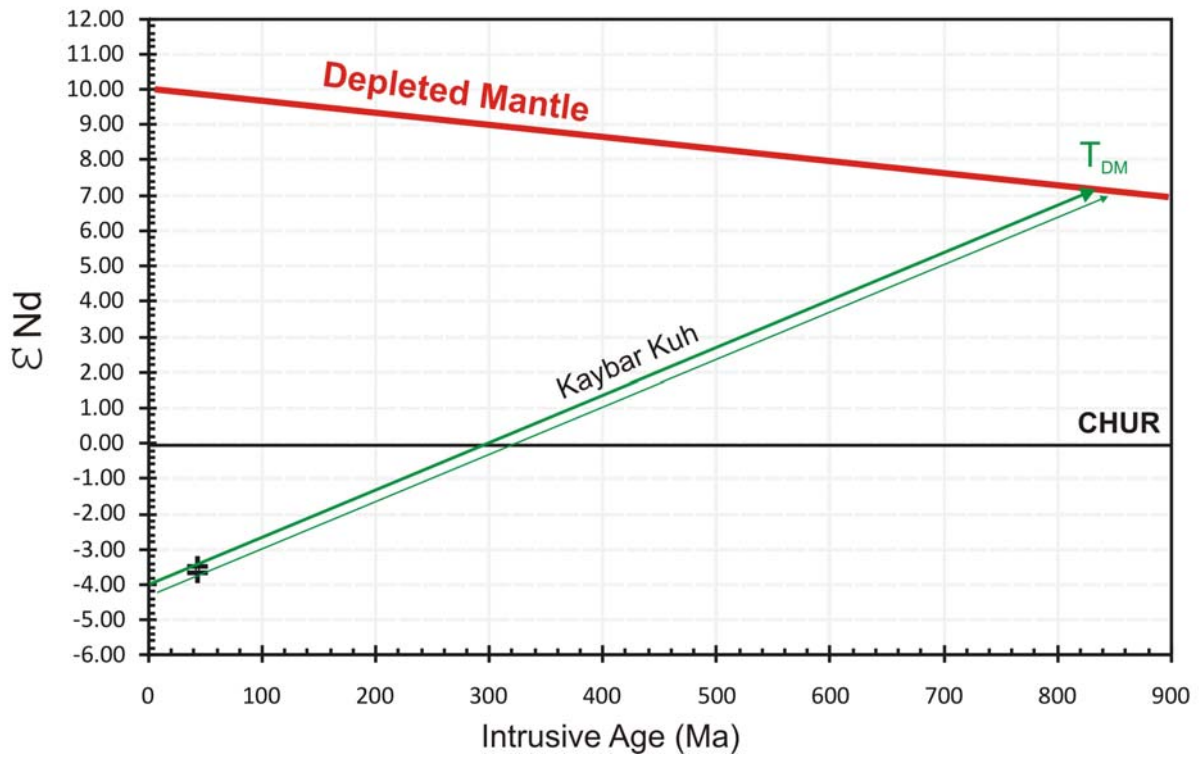
شکل ۱۳. موقعیت قرارگیری توده‌های نفوذی ترشیری مورد مطالعه در نمودار εNd در برابر $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (نمودار اولیه از [۴۴]).



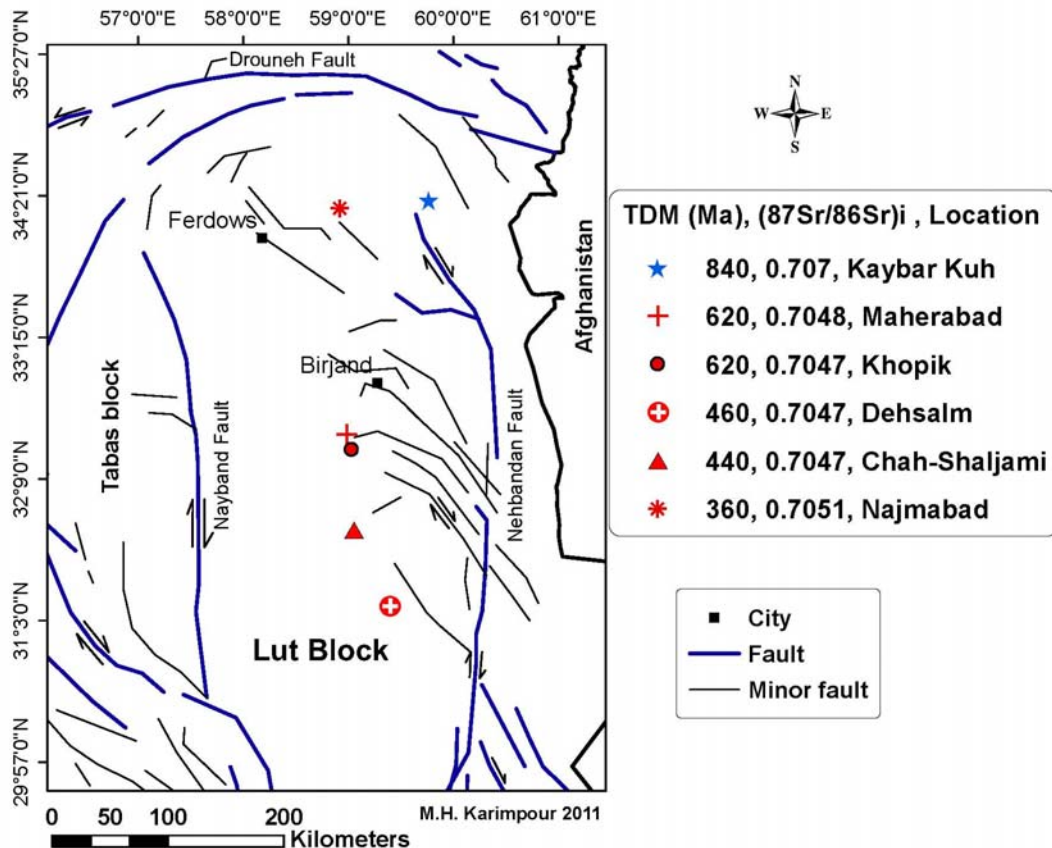
شکل ۱۴. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ توده‌های نفوذی ترشیری مناطق مورد مطالعه همراه با موقعیت مکانی آنها. کاهش $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ از شمال به جنوب در گرانیتوئیدها دیده می‌شود.



شکل ۱۵ الف. نمودار تعیین سن سنگ منشأ توده‌های نفوذی ترشیاری در مناطق نجم‌آباد، چاه‌شلجمی، ماهرآباد و خویبک.



شکل ۱۵ ب. نمودار تعیین سن سنگ منشأ توده‌های نفوذی ترشیاری در منطقه کبیرکوه.



شکل ۱۵. سن سنگ منشأ توده‌های نفوذی (TDM)، مقدار $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ و موقعیت مکانی توده‌های نفوذی ترشیاری مناطق مورد مطالعه.

کانی‌سازی ترشیاری

بلوک لوت به واسطه داشتن موقعیتهای تکتونیکی مختلف در زمانهای گذشته و به دنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسم با ویژگیهای ژئوشیمیایی متفاوت، دارای پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل کانی‌سازیهایی مختلف است. اکتشاف کانسارهای مختلف در شرق ایران و ارائه راهکارهای مناسب برای این کار، در یک برنامه چند ساله در دانشگاه فردوسی مشهد مدنظر قرار گرفته است. تصویر موقعیت مکانی، سن و نوع کانسارهای شناخته شده در شرق بلوک لوت (تاکنون) در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

مس - طلا پورفیری

منطقه ماهرآباد و خوپیک: مناطق اکتشافی ماهرآباد و خوپیک اولین کانسارهای مس-طلا پورفیری در شرق ایران هستند که توسط [۷] مورد مطالعات تفصیلی قرار گرفت. در این مناطق توده‌های نفوذی مونزونیتی نیمه عمیق (سری مگنتیت) به سن ۳۹ میلیون سال (ائوسن میانی) منشأ اصلی

کانی‌سازی هستند. آلتراسیون گسترده‌ای شامل پتاسیک، کوارتز-سرسیت-پیریت و پروپلیتیک در مطالعات سطحی و زیرسطحی شناسایی شد. کانی‌سازی به شکل استوک‌ورک، افشان و کمتر برش هیدروترمالی دیده می‌شود. کانیهای سولفیدی و اکسیدی اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، مگنتیت، اسفالریت و گالن است. توده‌های مونزونیتی منشأ همراه با آلتراسیون پتاسیک بوده و بیشترین ناهنجاری مس و طلا (به ترتیب تا ۲ درصد مس و تا ۲ گرم در تن طلا) همراه با تراکم بالای رگه‌چه‌های کوارتز-سولفیدی (بیش از ۲۰ رگه‌چه در مترمربع) در آنها دیده می‌شود. تراکم رگه‌چه‌ها در زون کوارتز-سرسیت-پیریت در برخی نقاط به بیش از ۶۰ رگه‌چه در مترمربع می‌رسد و بخشی از کانی‌سازی مس-طلا، همراه با این زون تشکیل شده است. آلتراسیون پروپلیتیک نیز در حاشیه دیده می‌شود و مقدار رگه‌چه‌ها تا ۲ عدد در مترمربع در آن کاهش یافته است. وجود توده‌های نفوذی نیمه عمیق با بافت پورفیری، گسترش و نوع آلتراسیون، شکل، نوع و گسترش کانی‌سازی، ناهنجاری بالای مس و طلا، مطالعات

کالکوپیریت مهمترین سولفیدهای اولیه هستند. کانی‌سازی عمدتاً به صورت پراکنده در متن سنگ و مقدار کمتر در فضای درزه‌ها تشکیل شده است. سولفید اولیه (که کمتر اکسیده شده) در دو منطقه بخش شمالی و آبراهه اصلی تا ۴ درصد به صورت پراکنده در سنگ و پراکنده درزه‌ها مشاهده می‌شود. در اکثر مناطق سولفیدهای اولیه اکسیده شده است. میزان اکسیدهای آهن ثانویه بین ۰/۳ تا ۸ درصد متغیر است. شدت اکسیداسیون منطقه نسبتاً زیاد بوده است. آثار کانی‌سازی مس به ندرت در منطقه مشاهده می‌شود [۵].

آغل کوه و کوه رباط شور: مناطق آغل کوه و کوه رباط شور نیز همراه با آثاری از کانی‌سازی مس است که تاکنون مورد مطالعه دقیق قرار نگرفته است. اما به نظر می‌رسد این مناطق برای کانی‌سازی مس پورفیری پتانسیل داشته باشند که تأیید آن نیاز به بررسی تفصیلی دارد.

• **طلای اپی ترمال سولفید بالا مرتبط با مس پورفیری**

منطقه چاه شلجمی: در منطقه چاه شلجمی، توده‌های نفوذی مونزونیتی به شکل دایک به سن ۳۳/۳ میلیون سال (الیگوسن تحتانی) در سنگهای آتشفشانی نفوذ نموده‌اند که بخشی از رخنمون سنگ منشأ کانی‌سازی وسیع منطقه هستند. آلتراسیون گسترده کوارتز حفره دار، آلونیتی، سرسیتیک، کلریتی-سرسیتی و آرژیلیک پیشرفته که از اطراف با زون پروپلیتیک احاطه شده است، در منطقه دیده می‌شود. کانی‌سازی سولفیدی عمدتاً به صورت افشان و کمتر رگ‌چه شامل پیریت، مگنتیت، مولیبدنیت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، انارژیت و آرسنوپیریت در برخی نقاط وجود دارد. ناهنجاریهایی از عناصر طلا، مس، سرب، روی، بیسموت، آرسنیک و آنتیموان در ناحیه مشاهده می‌گردد. شواهد زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی، سیالات درگیر و ژئوشیمی نشان دهنده وجود یک کانی‌سازی طلای اپی ترمال سولفید بالا می‌باشد که احتمالاً در عمق با کانی‌سازی مس پورفیری در ارتباط است [۱۳].

منطقه کوه شاه: در منطقه کوه شاه، توده‌های عمدتاً مونزونیتی که سن دقیق آنها در دست بررسی است، در واحدهای آتشفشانی ترشیاری نفوذ نموده و موجب آلتراسیون گسترده و کانی‌سازی شده‌اند. بنابراین سن این کانی‌سازی نیز در پنجره ترشیاری است. آلتراسیون آرژیلیک پیشرفته،

سیالات درگیر و ژئوشیمی توده‌های نفوذی و مطالعات ایزوتوپی آنها (ژئوشیمی و ایزوتوپ در این مقاله بحث شد) نشان می‌دهد که مناطق ماهرآباد و خوپیک، یک کانی‌سازی مس-طلا پورفیری هستند [۷].

منطقه ده سلم: توده‌های نفوذی دیوریتی تا گرانیتی سری مگنتیت ده سلم به سن ۳۳/۶ میلیون سال (الیگوسن تحتانی) در مجموعه سنگهای آتشفشانی منطقه نفوذ کرده و موجب آلتراسیون گسترده پتاسیک، سرسیت-رسی، اپیدوتی، سرسیت-کلسیت-کوارتز، سیلیسی و پروپلیتیک شده‌اند. کانی‌سازی به شکل استوک‌ورک و افشان دیده می‌شود و شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، مگنتیت، مولیبدنیت، طلا، سولفوسالت، آرسنوپیریت، دیژنیت، اسفالریت و گالن است. عناصر طلا، مولیبدن و مس عمدتاً در زون‌های پتاسیک و سرسیت-کلسیت-کوارتز و عناصر سرب، روی، آرسنیک، آنتیموان و بیسموت بیشتر در زون‌های حاشیه‌ای غنی شده‌اند. وجود توده‌های نفوذی نیمه عمیق با بافت پورفیری، آلتراسیون گسترده و نوع آن، ناهنجاری عنصر مس و دیگر عناصر، مطالعات سیالات درگیر و ژئوشیمی توده‌های نفوذی و مطالعات ایزوتوپی آنها (ژئوشیمی و ایزوتوپ در این مقاله بحث شد)، نشان دهنده کانی‌سازی مس پورفیری در منطقه ده سلم و اسکارن مس پورفیری است [۱۳].

منطقه تنورچه: زمین‌شناسی منطقه تنورچه شامل انواع توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب دیوریت تا مونزونیت است که در سنگهای آتشفشانی ترشیاری نفوذ نموده‌اند. برپایه مطالعات صحرایی-آزمایشگاهی، انواع زون‌های آلتراسیون پروپلیتیک، سرسیتیک، آرژیلیک و سیلیسی در منطقه تنورچه مشاهده می‌شوند. مجموعه زون‌های آلتراسیون در منطقه‌ای به وسعت تا ۲ کیلومتر رخنمون دارند. توزیع و گسترش زون‌های آلتراسیون با توده‌های نفوذی همخوانی بسیار نزدیکی دارند. آلتراسیون منطقه تنورچه دارای ساختار خطی نبوده و از تأثیر مستقیم محلولهای مرتبط با توده‌های نفوذی تشکیل شده‌اند. آلتراسیون سیلیسی مناطق وسیعی را تحت تأثیر قرار داده است. زون سیلیسی به چند حالت یافت می‌شود که مهمترین آنها عبارتند از: سیلیس دانه ریز به رنگ خاکستری با حفرات بسیار کوچک که بخشهای وسیعی را شامل می‌شود، سیلیس به صورت رگ‌چه‌ای که فضای درزه‌ای را پر کرده است و سیلیس اضافه شده به متن سنگ. پیریت و مقدار جزئی

قلع بین ۳۰ - ۵۸۰ گرم در تن متغیر است. وجود سنگ منشأ گرانیتی احیایی، کانی‌سازی استوک‌ورک با ماهیت احیایی (آرسنوپیریت و پیروتیت)، آلتراسیون تورمالین و ناهنجاری طلا و قلع، نشان دهنده کانی‌سازی قلع - طلا در منطقه هیرد است که بیشترین شباهت را با سیستم‌های طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی دارد [۴۵].

• کانی‌سازی رگه‌ای پلی‌متال

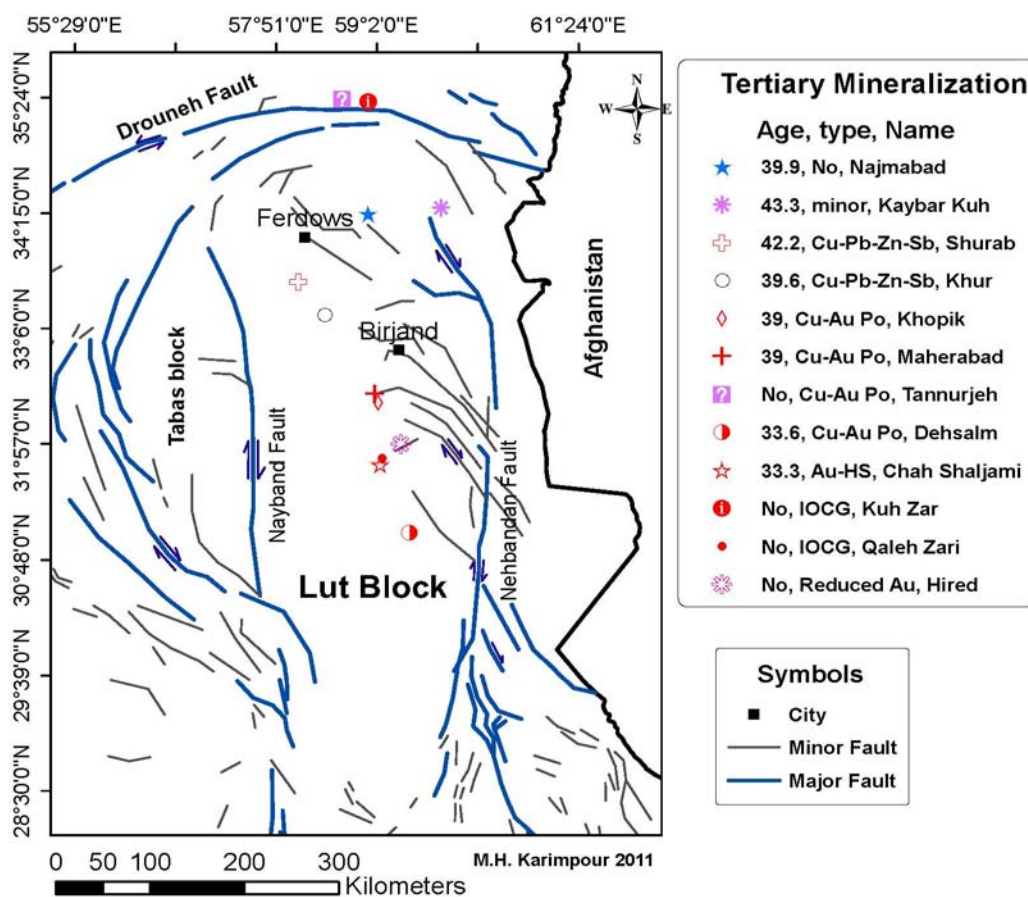
منطقه شوراب: در منطقه شوراب، توده‌های نیمه عمیق به سن ۴۲/۲ میلیون سال با ترکیب گرانودیوریت در سنگهای آتشفشانی نفوذ کرده و موجب آلتراسیون سرسیتیک و آرژیلیک و کانی‌سازی رگه‌ای مس، سرب و روی و آنتیموان شده‌اند. کانی‌سازی این منطقه در امتداد گسلهایی با روند عمدتاً شمال‌غربی- جنوب‌شرقی شکل گرفته و شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، اسفالریت، گالن، تتراهدریت، بورنوتیت- بولانژریت و استینیت است. شکل و نوع کانی‌سازی، آلتراسیون خطی در حریم گسلها و مطالعات سیالات درگیر (دما و شوری پایین) نشان دهنده کانی‌سازی اپی‌ترمال است [۴].

منطقه خور: پنج منطقه دارای آثار کانی‌سازی مس، سرب و روی رگه‌ای شامل اثر معدنی شکسته سبز، حوض داغ، میرخاش، غارکفتی، و شورک در سنگهای نفوذی- آتشفشانی شمال خور دیده می‌شود. گسلهایی با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی کانه‌زایی را کنترل کرده است. سنگ میزبان کانی‌سازیه‌ها سنگهای آتشفشانی هستند که توده‌های نفوذی در آنها نفوذ کرده و احتمالاً عامل تشکیل کانی‌سازی هستند. بافت پرکننده فضای خالی مهمترین بافت کانی‌سازی است. کانی‌سازی به جز در منطقه شورک شامل کانیهای پیریت، مالاکیت، کالکوزیت، کولیت، کوپریت، مس طبیعی و اکسیدهای آهن ثانویه است. در اندیس شورک علاوه بر کانی‌سازی مس در قالب کانیهای بورنیت و کالکوپیریت، کانی‌سازی اسفالریت و گالن هم دیده می‌شود. مهمترین کانیهای باطله کلسیت و کوارتز هستند. آلتراسیون‌های سیلیسی، پروپلیتیک، کربناتی، سرسیتیک و آرژیلیک همراه با کانی‌سازیه‌های رگه‌ای مشاهده می‌شوند [۱۹].

آلونیتی، سیلیسی، کوارتز- سرسیت- پیریت و پروپلیتیک در منطقه دیده می‌شود که وسیعترین آن زون آرژیلیک است. کانی‌سازی سولفیدی عمدتاً به شکل پراکنده و کمتر رگه‌چهای و برش هیدروترمالی وجود دارد که بیش از ۹۰ درصد آن به اکسید آهن ثانویه تبدیل شده و زون گوسان وسیعی را در منطقه به وجود آورده است. ناهنجاریهایی از عناصر مس و طلا در ناحیه دیده شده که در حال مطالعات تفصیلی است. شواهد زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی نشان دهنده حضور یک سیستم طلای اپی‌ترمال سولفید بالا مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری در عمق است که تأیید آن در دست بررسی است [۸].

• طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی

منطقه هیرد: منطقه اکتشافی هیرد در ۱۶۰ کیلومتری جنوب بیرجند واقع شده است. زمین‌شناسی منطقه شامل سنگهای آندزیتی- داسیتی ائوسن تا میوسن است که مورد نفوذ توده‌های دیوریتی تا میکروگرانودیوریتی قرار گرفته‌اند. این توده‌ها را می‌توان به دو بخش گرانیتوئیدهای تیپ اکسیدان و احیایی تقسیم بندی کرد. توده‌های نفوذی احیایی نقش اساسی در کانی‌سازی ایفا نموده‌اند. سن دقیق توده‌های نفوذی کانه‌ساز مشخص نیست، اما براساس شواهد صحرایی و نفوذ این واحدها در سنگهای آتشفشانی ائوسن تا میوسن، می‌بایست پس از میوسن باشد. کانی‌سازی منطقه به شکل‌های استوک‌ورک، رگه‌ای و جانیشینی دیده می‌شود. کانی‌سازی استوک‌ورک در توده‌های احیایی همراه با آلتراسیون غنی از تورمالین مشاهده می‌گردد. کانی‌شناسی رگه‌چها شامل آرسنوپیریت، پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، تورمالین، کوارتز، کلریت، کلسیت و سرسیت است. طلا در رگه‌چهای سیلیسی- سولفیدی - تورمالینی وجود دارد. آلتراسیون‌های پروپلیتیک، سیلیسی، سرسیتیک و تورمالینی در منطقه وجود دارد که در این میان زون‌های تورمالین‌دار از همه مهمترند. مقدار طلا در منطقه بین ۴۰۰ - ۵۲۰۰ میلی‌گرم در تن، آرسنیک بین ۱۰۰ - ۱۰۰۰۰ گرم در تن، نقره تا حداکثر ۱۲۵ گرم در تن، مس بین ۶۰ - ۸۰۰ گرم در تن، سرب بین ۷۰ - ۲۰۶۰۰ گرم در تن، روی تا حداکثر ۲۴۰۰۰ گرم در تن، آنتیموان بین ۳۰ - ۲۰۰ گرم در تن و



شکل ۱۶. سن توده‌های نفوذی مناطق مورد مطالعه، نوع کانی‌سازی و موقعیت مکانی آنها در شرق بلوک لوت.

یک کانسار IOCG غنی از اسپیکولاریت معرفی کرده است. این معدن ویژگی‌های بارزی همانند عیار بالای مس-نقره و طلا، محلول کانه‌دار اکسیدان به واسطه حضور اسپیکولاریت فراوان، نبود مگنتیت و آپاتیت، مقدار کم پیریت و سیال کانه‌دار با حرارت بالا تا متوسط و شوری کم دارد. البته اختلافاتی نیز بین این کانی‌سازی و کانسارهای IOCG دیده می‌شود که عبارتند از: شوری کم سیال کانه‌دار، نبود مگنتیت و آپاتیت و کم بودن عناصر REE و P. این اختلافات به موقعیت تکتونیکی، عمق ماگماتیسم، منشأ ماگما، درجه ذوب بخشی، شرایط فیزیکوشیمیایی ذوب، میزان بالآمَدگی، هضم پوسته، درجه تفریق و عمق جایگزینی بستگی دارد [۴۸].

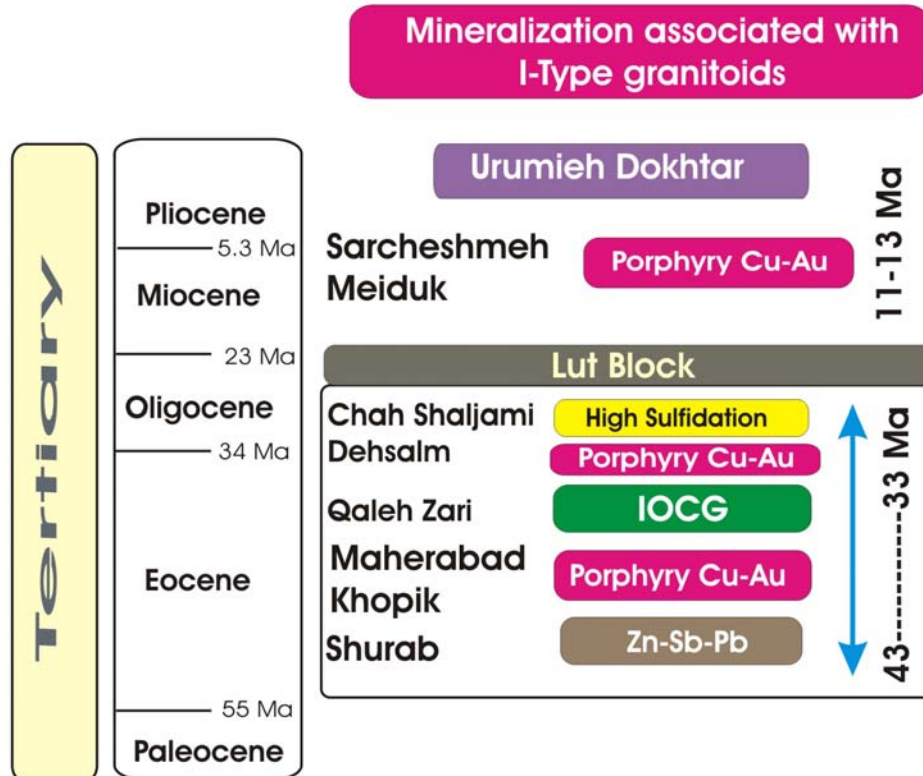
کانسار کوه‌زر: منطقه کوه‌زر در غرب تربت حیدریه واقع شده است. بخش بزرگی از ناحیه توسط سنگهای آتشفشانی اسیدی تا حدواسط ترشیری زیرین پوشیده شده است. توده‌های نفوذی شامل مونزونیتی تا گرانیتی در سنگهای آتشفشانی نفوذ کرده که سن دقیق آنها مشخص نیست. کانی‌سازی از نوع

• کانسارهای مس-طلا همراه با اکسید آهن (IOCG)

معدن قلعه‌زری: کانسار Cu-Au-Ag غنی از اسپیکولاریت قلعه‌زری در ۱۸۰ کیلومتری جنوب بیرجند واقع شده است. سن دقیق این کانی‌سازی مشخص نیست، اما براساس شواهد صحرایی و سن سنگ میزبان آتشفشانی که ائوسن میانی (۴۷ میلیون سال پیش) تعیین شده [۴۶]، سن این کانی‌سازی نیز پس از ائوسن میانی است، لذا یکی از کانی‌سازیهای ترشیری در بلوک لوت است. محمدی و همکاران [۴۷] توده‌های نیمه‌عمیق منطقه را در حد مونزوگابرو تا مونزونیت پورفیری شناسایی کردند. بخش اعظم کانی‌سازی با گسل‌های با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی دیده می‌شود. بافت پرکننده فضای خالی مهمترین بافت کانی‌سازی در منطقه است. مجموعه کانیایی شامل اسپیکولاریت، کوارتز، کلریت، کالکوپیریت، سولفوسالت، پیریت و گالن است. عیار مس در منطقه بین ۲ تا ۹ درصد، نقره ۱۰۰ تا ۶۵۰ گرم در تن و طلا بین ۰/۵ تا ۳۵ گرم در تن می‌باشد [۴۸]. کریم‌پور [۴۸] معدن قلعه‌زری را

می‌شوند، لکن به لحاظ پاره‌ای ویژگیها از جمله عیار طلا، عناصر فرعی همراه، زون‌های دگرسانی و توده‌های نفوذی همراه با آنها اختلاف دارد. این منطقه به نام ذخایر طلای نوع غنی از اکسید آهن (IOCG) یا نوع غنی از اسپکیولاریت معرفی شده است [۶]. شکل (۱۷) دامنه زمانی مهم کانی‌سازیهایی مرتبط با گرانیتوئیدهای سری مگنتیت (نوع I) را همراه با نوع کانی‌سازی در بلوک لوت نشان می‌دهد. براساس سن‌سنجیهای انجام شده به نظر می‌رسد فاصله زمانی بین ۴۲ تا ۳۳ میلیون سال قبل (اوسن میانی تا اوایل الیگوسن) که به احتمال زیاد فرورانشی در شرق ایران به وقوع پیوسته و ماگماتیسم گسترده از نوع اکسیدان با ویژگیهای ژئوشیمیایی خاص که در بالا بحث شد، به وجود آمده است، مهمترین بازه زمانی برای تشکیل انواع کانسارها در بلوک لوت بوده است. انواع کانی‌سازی مس-طلا پورفیری، طلای اپی‌ترمال سولفید بالا و IOCG در این دامنه سنی تشکیل شده است.

رگه‌ای بوده و در زونهای گسلی تشکیل شده است. کانی‌سازی به چند حالت از جمله برش‌های گرمایی، داربستی، پرکننده زون‌های گسلی و رگه‌چله‌های کششی یافت می‌شود. آلتراسیون‌های پروپلیتیک، سیلیسی، آلبیتی و مقدار جزئی آرژیلیک و کربناتی دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی با کانی‌سازی همراه بوده و بر زون‌های گسلی منطبق است. غالباً همراه با سیلیس، اسپکیولاریت و طلا یافت می‌شود. دگرسانی پروپلیتیک در ناحیه گسترش زیادی دارد. دگرسانی سرسیتیک فقط در حریم توده‌های نفوذی مشاهده می‌شود. کانی‌سازی شامل طلا، اسپکیولاریت، باریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیریت، آلانیت و مقادیر جزئی بورنیت، پیروتیت و آرسنوپیریت است. در زون‌های کانی‌سازی عیار مس تا ۱/۲٪ و طلا بین ۰/۲ تا ۱ ppm تغییر می‌کند. براساس خصوصیات کانی‌شناسی، پاراژنز، کانی‌سازی و شرایط ژئوشیمیایی سیستم کانی‌سازی طلا در منطقه کوه‌زمر مشابه بخشهای بسیار کم‌عمق سیستم‌های مس-طلا نوع اکسید آهن (IOCG) است که با فاصله نسبت به توده نفوذی تشکیل



شکل ۱۷. نمایش زمان مهم کانی‌سازیهایی مختلف در بلوک لوت که مرتبط با گرانیتوئیدهای نوع I (سری مگنتیت) و زون فرورانش بوده‌اند.

نتیجه‌گیری

توده‌های نفوذی ترشیری مطالعه شده از نوع گرانیتوئیدهای اکسیدان و متعلق به سری مگنتیت هستند. ترکیب توده‌ها در مناطق کبیرکوه، نجم‌آباد، ماهرآباد، خوپیک، کوه شاه، شوراب، آغل کوه، ده‌سلم و چاه‌شلجمی از دیوریت تا گرانیت متغیر است ولی اغلب مونزونیتی می‌باشند. این توده‌ها عمدتاً از نوع متاآلومینوس بوده و در کمر بند زون فرورانش تشکیل شده‌اند. توده‌های نفوذی کوه شاه دارای بیشترین مقادیر K_2O (بیش از ۴ درصد) هستند و بقیه توده‌ها که کم و بیش همراه با کانی‌سازی هستند، نیز عمدتاً غنی از پتاسیم می‌باشند. در حالی که توده‌های نفوذی بدون کانی‌سازی منطقه نجم‌آباد با داشتن نسبت Na_2O/K_2O بیشتر از ۲/۵، از نوع سدیک هستند. بیشترین مقدار CaO و MgO در منطقه ده‌سلم و کوه شاه و کمترین آن در نمونه‌های کبیرکوه و کوه رباط شور دیده می‌شود. مقدار Nb بالا (بیش از ۱۷ گرم در تن)، Rb و Ta بیشتر نسبت به Sr و پایین بودن نسبت Zr/Nb (کمتر از ۲) در توده‌های نفوذی کبیرکوه نسبت به دیگر مناطق نشان دهنده آلودگی ماگما با پوسته قاره‌ای است. پس از این منطقه بیشترین آرایش پوسته‌ای در توده‌های ده‌سلم و چاه‌شلجمی دیده می‌شود. کمترین Nb در نمونه‌های نجم‌آباد است که کمترین اختلاط ماگما با پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهد. نسبت Zr/Nb در نجم‌آباد که دچار کمترین آلودگی پوسته‌ای شده‌اند، به بیش از ۳۰ می‌رسد. نتایج ایزوتوپ ناپایدار و مقدار ϵNd نیز این موضوع را تأیید می‌کند. غنی‌شدگی در عناصر $LREE$ نسبت به الگوی عناصر $HREE$ در کلیه توده‌های نفوذی مناطق مختلف دیده می‌شود که مخصوص ماگماهای تشکیل شده در زون فرورانش است. تهی‌شدگی بزرگ عناصر $HREE$ در توده‌های نفوذی نجم‌آباد و نسبت $(La/Yb)_N$ بیش از ۱۷ تا ۲۳ نشان دهنده تشکیل ماگما در عمق پایداری گارنت است. نمونه‌های کبیرکوه دارای ناهنجاری منفی بزرگی در عنصر Eu است. مقدار Eu/Eu^* کمتر از ۰/۸ نیز می‌تواند بیانگر حضور پلاژیوکلاز در منشأ و آلودگی با پوسته قاره‌ای احیایی باشد. مقدار Eu/Eu^* توده‌های مناطق ماهرآباد، خوپیک، چاه‌شلجمی، ده‌سلم و کوه شاه نیز بین ۰/۸ تا ۱ است که نشان دهنده ذوب در شرایط اکسیدان و آلودگی کمتر با پوسته قاره‌ای است. این نسبت در توده‌های نجم‌آباد به بیش از یک رسیده که مؤید عمق بیشتر تشکیل ماگما (عمق پایداری

گارنت) و عدم حضور پلاژیوکلاز است. توده‌های نفوذی مناطق ماهرآباد، خوپیک و کوه شاه در الگوی نرمالایز شده نسبت به EMORB، غنی‌شدگی در عناصر $LILE$ مانند Rb ، Cs ، K و Ba و تهی‌شدگی در عناصر $HFSE$ مانند Nb و Ti نشان می‌دهند. در توده‌های نفوذی مناطق ده‌سلم، چاه‌شلجمی و کبیرکوه، مقدار عناصر Rb ، Cs ، K و Ba کمتر و برعکس عناصر Nb و Ti بیشتر است؛ که این امر می‌تواند بیانگر آرایش بیشتر با پوسته قاره‌ای در ترکیب این ماگماها باشد. توده‌های نفوذی نجم‌آباد کاهیدگی شدیدی در عناصر $LILE$ مانند Rb ، Cs ، K و Ba و نیز عناصر $HREE$ نشان می‌دهند. این مساله مؤید کمترین آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای است. همه این توده‌ها غیر از نجم‌آباد در محدوده مشترک ماگمای کالک‌آکالن نرمال با آداکیتی قرار دارند و توده‌های نجم‌آباد نیز به علت کمتر بودن Yb_N (کمتر از ۴) در محدوده آداکیت است. مقدار $(La/Yb)_N$ ، الگوی عناصر خاکی کمیاب (تهی‌شدگی شدید عناصر $HREE$ و نبود ناهنجاری منفی Eu)، بالا بودن مقدار Sr (بیش از ۴۰۰ گرم در تن) و سدیک بودن توده‌های نفوذی نجم‌آباد این موضوع را تأیید می‌کند. سن گرانیتوئیدها ائوسن تا الیگوسن تحتانی بوده و از ۴۳/۳ میلیون سال در کبیرکوه تا ۳۳/۳ میلیون سال در چاه‌شلجمی کاهش می‌یابد. این کاهش سنی با روند منظمی از شمال به جنوب اتفاق افتاده است. مقدار نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه نیز از شمال به جنوب همراه با کاهش سن توده‌های نفوذی از کبیرکوه به طرف چاه‌شلجمی، از ۰/۷۰۷ به ۰/۷۰۴۷ کاسته می‌شود. توده‌های نفوذی ماهرآباد، خوپیک، ده‌سلم و چاه‌شلجمی مقدار ϵN بین ۰/۵ تا ۲/۴۹+ و مقدار نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه کمتر از ۰/۷۰۵۵ دارند که نشان دهنده ماگمای مشتق شده از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی است. توده نفوذی نجم‌آباد نیز ضمن نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه کمتر از ۰/۷۰۵۳، مقدار ϵN در حدود ۵/۱۶+ دارد که منعکس کننده کمترین آلودگی بین ماگمای مشتق شده از پوسته اقیانوسی با پوسته قاره‌ای است. مقدار نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ اولیه بیش ۰/۷۰۶ و مقدار ϵNd کمتر از ۳- در توده‌های نفوذی کبیرکوه آلودگی ماگما با پوسته قاره‌ای را تأیید می‌کند. سن سنگ منشأ ماگمای گرانیتوئیدی مناطق نجم‌آباد، چاه‌شلجمی، ده‌سلم، ماهرآباد و خوپیک به ترتیب از پوسته قدیمی با سن حداقل ۳۶۰، ۴۴۰، ۴۶۰، ۶۲۰ و ۶۲۰ میلیون سال قبل منشأ گرفته است. همچنین ماگمای

تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۲ به شماره ۱۸۴۴۵/۲ مورخ ۹۰/۴/۲۸ از طرح پژوهش انجام شده است. از جورج گرلز و ویکتور ولنسیا از گروه علوم زمین دانشگاه آریزونا برای انجام آنالیز سن‌سنجی سپاس‌گزاری می‌شود.

منابع

[1] Stocklin J., "Structural history and tectonics of Iran", A review-Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull. 52 (7): (1968) 1229-1258.

[2] Stocklin J., Nabavi M. H., "Tectonic map of Iran", Geological Survey of Iran (1973).

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

[4] Lotfi M., "Geological and geochemical investigations on the volcanogenic Cu, Pb, Zn, Sb ore- mineralizations in the Shurab-GaleChah and northwest of Khur (Lut, east of Iran)", unpublished Ph.D thesis, der Naturwissenschaften der Universitat Hamburg (1982) 151.

[۵] کریم‌پور م. ح.، سعادت س.، ملک‌زاده شفاوردی آ.، "ژئوشیمی، پترولوژی و کانی‌سازی طلای - مس پورفیری تنورجه"، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۲ شماره ۳ (۱۳۸۵) ۱۷۵-۱۸۹.

[۶] مظلومی ع.، کریم‌پور م. ح.، رسا الف.، رحیمی ب.، وثوقی عابدینی م.، "کانسار طلای کوه‌زرتربت‌حیدریه مدل جدیدی از کانی‌سازی طلا"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۳ (۱۳۸۷) ۳۶۴-۳۷۶.

[۷] ملک‌زاده شفاوردی آ.، "زمین‌شناسی، کانی‌سازی، آلتراسیون، ژئوشیمی، میکروترمومتری، مطالعات ایزوتوپی و تعیین منشأ کانی‌سازی مناطق اکتشافی ماهرآباد و خویبک، استان خراسان جنوبی"، رساله دکتری (Ph.D) زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۸) ۶۰۰ ص.

[۸] عبدی م.، کریم‌پور م. ح.، زرین‌کوب م. ح.، "تفسیر نتایج آنالیز فاکتوری داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای با کمک داده‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون و کانی‌زائی در منطقه کوه شاه، بیرجند، خراسان جنوبی"، فصلنامه علوم زمین (در حال چاپ).

گرانیتوئیدی منطقه کبیرکوه از پوسته قدیمی با سن حداقل ۸۴۰ میلیون سال حاصل شده است. این امر نشان می‌دهد که هرچند همه این توده‌های نفوذی سن ائوسن تا الیگوسن تحتانی را با اختلاف سنی حدود ۱۰ میلیون سال دارند؛ ولی از پوسته‌های اقیانوسی متفاوتی منشأ گرفته‌اند. به طوری که ماگمای منطقه کبیرکوه از قدیمی ترین پوسته اقیانوسی در حال فرورانش، نشأت گرفته و بیشترین آرایش پوسته‌ای را در طی صعود متحمل شده است. این موضوع را ژئوشیمی متفاوت اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و خاکی کمیاب و ایزوتوپ‌های Sm/Nd و Rb/Sr در ماگمای منطقه کبیرکوه تأیید می‌کند. همچنین توده‌های نفوذی بدون کانی‌سازی نجم‌آباد از جوانترین پوسته اقیانوسی به سن ۳۶۰ میلیون سال منشأ گرفته و کمترین آلودگی با پوسته را دارد. ژئوشیمی کاملاً متفاوت ماگمای این منطقه مانند سدیک بودن، الگوی متفاوت عناصر REE، آداکیتی بودن ماهیت ماگما، تفاوت در مقدار εNd و غیره این موضوع را اثبات می‌کند. ماگمای مناطق دهسلم و چاه‌شلجمی نیز که در برخی موارد ژئوشیمی متفاوتی با ماگمای مناطق ماهرآباد و خویبک نشان می‌دهند نیز از پوسته‌های اقیانوسی جداگانه‌ای منشأ گرفته‌اند که حدود ۲۰۰ میلیون سال با یکدیگر اختلاف سنی داشته‌اند. با عنایت به کانی‌سازیهایی مختلف مرتبط با توده‌های نفوذی بحث شده و براساس سن‌سنجیهای انجام شده، در فاصله زمانی بین ۴۲ تا ۳۳ میلیون سال قبل (ائوسن میانی تا اوایل الیگوسن)، ماگماتیسیم‌های ویژه‌ای با ژئوشیمی خاص (مانند مناطق ماهرآباد، خویبک، دهسلم، چاه‌شلجمی، آغل‌کوه، خور، شوراب و غیره) در شرق ایران و عمدتاً در محدوده استان خراسان جنوبی شکل گرفته که عامل تشکیل انواع کانی‌سازی مس- طلا پورفیری، طلای اپی‌ترمال سولفید بالا و IOCG در این بخش از ایران شده است. این ماگماتیسیم‌ها با فرورانش پوسته‌های اقیانوسی با سنهای متفاوت (از ۴۴۰ تا ۶۲۰ میلیون سال) همراه بوده است. لذا با توجه به آگاهی از ژئوشیمی توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازیهایی مختلف، سن توده‌ها و موقعیت مکانی خاص (عمدتاً در محدوده استان خراسان جنوبی)، می‌توان گام بلندتری در جهت اکتشاف این گونه ذخایر در شرق ایران برداشت. لازم به ذکر است که تکمیل اطلاعات از دیگر توده‌های ترشیاری لوت و کانی‌سازی مربوط به آنها در آینده، این بررسی را دقیق‌تر می‌کند.

- [۱۹] اوهانیان ت.، طاوسیان ش.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند"، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۶۶).
- [20] Stocklin J., Nabavi M. H., "Geological map of Boshrouyeh", Geological Survey of Iran (1969).
- [۲۱] لطفی م.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سارغنج (برگه ۷۷۵۶)"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۴).
- [۲۲] وثیق ح.، سهیلی م.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه‌شور (برگه ۷۷۵۴)"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۵۴).
- [۲۳] موحد اول ح.، امامی م. ح.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مختاران (برگه ۷۸۵۴)"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۵۷).
- [۲۴] اکرمی الف.، نادری میقان ن.، "نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ده سلم"، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۸۴).
- [25] Middlemost Eric A. K., "Magmas and magmatic rocks", Longman Pub. Company (1985) 221-226.
- [26] Shand S. J., "Eruptive rocks, Their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits", 1969 (facs. of 3rd ed. 1947). Hafner, New York (1947) 488.
- [27] Pearce J. A., Harris N. W., Tindle A. G., "Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks", Journal of Petrology 25 (1984) 956-983.
- [28] Bonin B., Grelou-Orsini C., Vialette Y., "Age, origin and evolution of the anorogenic complex of Evisa (Corsica): A K-Li-Rb-Sr study", Contributions to Mineralogy and Petrology 65 (1978) 425-435.
- [29] Wilson M., "Igneous petrogenesis", Uniwin Hyman, London (1989).
- [30] Martin H., "Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids", Lithos 46 (1999) 411-429. PII:S0024-4937(98)00076-0.
- [31] Gust D. A., Arculus R. A., Kersting A. B., "Aspects of magma sources and processes in the Honshu arc", The Canadian Mineralogist 35 (1977) 347-365.
- [32] Woodhead J., Eggins S., Gamble J., "High field strength and transition element systematic in island arc and back-arc basin basalts: evidence for multi-phase melt extraction and a deoiled mantle wedge", Earth and Planetary Science Letters 114 (1993) 491-504.
- [۹] کریم‌پور م. ح.، سلاطی الف.، "تهیه نقشه زمین‌شناسی، اکتشافات ژئوشیمیایی و مگنتومتری در محدوده غربی کبیرکوه"، شرکت تهیه و تولید مواد اولیه فولاد خراسان (۱۳۸۹) ۱۹۷ ص.
- [۱۰] کریم‌پور م. ح.، مرادی م.، "پروژه اکتشاف نیمه تفصیلی طلا و تنگستن کلاته آهنی، گناباد"، سازمان صنایع و معادن استان خراسان رضوی (۱۳۸۹) ۲۷۱ ص.
- [۱۱] مرادی م.، کریم‌پور م. ح.، فارمر ل.، استرن چ.، "ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Rb-Sr & Sm-Nd سن‌سنجی زیرکون U-Pb و پتروژنز باتولیت گرانودیوریتی نجم‌آباد، گناباد"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی (۱) ۴: ۱۲۷-۱۴۵.
- [۱۲] ارجمندزاده ر.، کریم‌پور م. ح.، مظاهری س. الف.، سانتوز ژ. ف.، مدینا ج.، همام س. م.، "ژئوشیمی ایزوتوپی و پتروژنز آداکیت‌های شوشونیتی در بلوک لوت، شرق ایران"، اولین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۹).
- [۱۳] ارجمندزاده ر.، "مطالعات کانی‌سازی، ژئوشیمی، سن‌سنجی و تعیین جایگاه نکتونوماگمایی توده‌های نفوذی در اندیس معدنی ده سلم و چاه شلجمی، بلوک لوت، شرق ایران"، رساله دکتری (Ph.D) زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۰) ۳۶۹ ص.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Ishihara S., "The magnetite- series and ilmenite- series granitic rocks", Mining geology, Japan 27 (1977) 43- 300.
- [۱۷] بلوریان غ.، صفری م.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ زوزن"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۴).
- [۱۸] قائمی ف.، شهرپور ه.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گناباد"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۵).

- subducted lithosphere*", Nature 347 (1990) 662–665.
- [41] Martin H., "The Archaean grey gneisses and the genesis of the continental crust", In: Condie, K.C. Ed., The Archaean Crustal Evolution. Elsevier (1995) 205–259.
- [42] Depaolo D. J., "Neodymium isotopes in the Colorado front range and crust-mantle evolution in the Proterozoic", Nature 291 (1981) 193-196.
- [43] Depaolo D. J., "Neodymium Isotope Geochemistry: An Introduction", Springer, New York, (1988).
- [44] Zindler A., Hart S. R., "Chemical geodynamics", Ann Rev Earth Planet Sci 14 (1986) 493- 571.
- [۴۵] کریم‌پور م. ح.، ملک‌زاده شفاوردی آ.، حیدریان شهری م. ر.، عسکری ع.، "کانی‌سازی، دگرسانی و ژئوشیمی منطقه اکتشافی طلا- قلع هیرد، استان خراسان جنوبی"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران (۱) (۱۳۸۶) ۵۳-۶۶.
- [46] Lensch G., Schmidt K., "Plate tectonic, orogeny, and mineralization in the Iranian fold belts results and conclusions", N. Jb. Geol. Palaont. Abh. 168, 2/3 (1984) 558-568.
- [۴۷] محمدی ف.، کریم‌پور م. ح.، زرین کوب م. ح.، "پتروبولژی توده‌های آذرین و ژئوشیمی زون‌های آلتراسیون معدن Cu-Ag-Au قلعه زری (خراسان جنوبی)"، سیزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۸۴) ۳۳-۳۹.
- [48] Karimpour M. H., "Comparison of Qaleh Zari Cu-Au-Ag deposit with other Iron Oxides Cu-Au (IOCG-Type) deposits & new classification", Iranian Journal of Crystallography and mineralogy 13 (2005) 165-184.
- [33] Wass S. Y., Rogers N. W., "Mantle metasomatism- precursor to alkaline continental volcanism", Geochimica et Cosmochimica Acta 44 (1980) 1811- 1823.
- [34] 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.
- [35] Hou Z. Q., Gao Y. F., Qu X. M., Rui Z. Y., Mo X. X., "Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet", Earth and Planetary Science Letters 220 (2004) 139-155.
- [36] Boynton W. V., "Cosmochemistry of the rare earth elements", Meteorite studies, In Rare Earth Element Geochemistry (P. Henderson, ed.), (Developments in Geochemistry 2) (1985) 115-1522, Elsevier, Amsterdam.
- [37] Pearce J. A., Parkinson I. J., "Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis", In: Prichard, H. M., Albaster, T., Harris, N. B. W., Neary, C. R. (Eds.), Magmatic Processes in Plate Tectonics, vol. 76, Geological Society of London Special Publication (1993) 373-403.
- [38] Reagan M. K., Gill J. B., "Coexisting calc-alkaline and high niobium basalts from Turrialba volcano, Costa Rica: implication for residual titanates in arc magma source", Journal of Geophysical Research 94 (1989) 4619-4633.
- [39] Martin H., Smithies R. H., Rapp R., Moyer J. F., Champion D., "An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution", Lithos 79 (2005) 1-24.
- [40] Defant M. J., Drummond M. S., "Derivation of some modern arc magmas by melting of young