

کانسار طلای مزوزونال کوهزایی

(پیروتیت - پیریت - آرسنوپیریت) طبقه درپهنه‌های زون برشی

واقع در تونالیت-گرانودیوریت‌های سری ایلمنیت

نوشته: دکتر محمد حسن کریم پور*، احسان ترابیان* و علیرضا باباخانی**

Torghabeh Mesozonal Orogenic

(pyrrhotite, pyrite, arsenopyrite) Gold Deposit, Formed in Shear Zones Within Ilmenite-type Granitoid Rocks

By: Dr. M. H. Karimpour*, A. Torabian,* & A. R. Babakhani**

چکیده

کانی سازی طلای طبقه در زون برخورد قاره‌ای، که در اواخر پالئوزویک و اوایل مزوزویک بین صفحه‌های توران و ایران رخ داده است، قرار دارد. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی شامل سنگهای متافولیت (بقایای پوسته اقیانوسی دیرینه تتیس)، اسلیت، فیلیت و کوارتزیت (سنگهای فلیش دگرگون شده) هستند. کوهزایی هرسینین (اواخر پالئوزویک) موجب دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین شده است. تونالیت تا گرانودیوریت مناطق وکیل آباد، دهنو و طبقه در اوایل تریاس در مجموعه فوق نفوذ و موجب دگرگونی همبری و در مناطق خاص باعث ایجاد زونهای محدود اسکارن تشکیل شده‌اند. پذیرفتاری مغناطیسی تونالیت-گرانودیوریت در حدود 4.5×10^{-5} [SI] و لذا از نوع سری ایلمنیت یا گرانیت‌های احیایی است.

محلول کانه‌دار غنی از سیلیس در فضای زونهای برشی موجب کانی سازی طلا شده است. زونهای برشی سنگهای تونالیت - گرانودیوریت و اسلیت را قطع کرده است. سن کانی سازی جوان تر از واحدهای سنگی میزبان است. پاراژنز کانیایی از عمق به سطح (۱) پیروتیت + آرسنوپیریت ± طلا (۲) پیریت + آرسنوپیریت ± طلا و (۳) پیریت ± طلا + گالن است. طلا بیشتر با پیریت و آرسنوپیریت همراه است. طلا و آرسنیک همبستگی خوبی دارند. میزان فراوانی عناصر Cu, Pb, Hg, Sb, Ag, Bi, W در این سیستم نسبتاً کم است. عیار طلا بین ۰/۵ ppm تا ۵ ppm تغییر می کند و میانگین آن کمتر از ۵ ppm است. عرض زون کانی سازی بین ۰/۴ تا ۲/۵ متر است.

کانسار طلای طبقه از نوع مزوزونال کوهزایی است. محلول کانه‌ساز در مجموع حالت احیایی داشته و میزان غلظت گوگرد نیز کم بوده است.

$T = 420^\circ \text{C}$, $\text{pH} = 7$, $\text{Log } f\text{O}_2 < -40$, $\text{Log } f\text{S}_2 < -14$

کلید واژه‌ها: طلا، کوهزایی، مزوزونال، احیایی، طبقه، ایران

Abstract

The Torghabeh gold mineralized area is part of collision zone formed during Late Paleozoic-Early Triassic time due to collision of Iran and Turan Plates. Oldest exposed rocks are meta-ophiolite and meta-flysch (Paleo-Tethys remnants). Dehnow- Vakilabad - Torghabeh tonalite- granodiorite (Early Mesozoic age) intruded low grade regional metamorphosed rocks of Late Paleozoic. Different types of schists were formed around the contact. Tonalite-granodiorite has low values of magnetic susceptibility $[(1.5 \text{ to } 2.5) \times 10^{-5} \text{ SI}]$, therefore, it belongs to ilmenite series or reduced-type granite.

Mineralization is found within shear zones. The shear zones cut all of the exposed rocks, then, mineralization is younger than these rocks. Gold mineralization was associated with silica rich fluid. Parageneses from depth to the surface are: 1) arsenopyrite - pyrrhotite - gold, (2) pyrite - arsenopyrite - gold, and (3) pyrite - gold- galena. Gold is mainly associated with pyrite and arsenopyrite. The elemental content of Ag, Bi, Cu, Sb, Sn, Pb, Zn and W is low. Gold grade varies between 0.5 to 56 ppm and is less than 5 ppm on average. The width of mineralization is between 0.4 to 2.5 meters.

Torghabeh deposit is mesozonal orogenic type gold deposit. The ore bearing solution was in reducing stage, low in S and $T = 420^\circ \text{C}$, $\text{pH} = 7$, $\text{Log } f\text{O}_2 < -40$, $\text{Log } f\text{S}_2 < -14$

Keywords: Gold, Orogeny, Mesozonal, Reduced, Torghabeh, Iran

مقدمه

قرار دارد. استخراج طلا از کانسار طلای طبقه از دیرباز مورد توجه بوده و معدنکاری قدیمی در این کانسار به دوره قاجاریه نسبت داده می شود. در

کانسار طلای طبقه، در ۸ کیلومتری باخترشهر مشهد واقع است. این کانسار در مختصات ۲۵' و ۵۹° طول خاوری و ۲۰' و ۳۶° عرض شمالی

پوشیده و معرف دومین فاز دگرگونی ناحیه‌ای هستند (در قاعده این واحد کنگلومرایی قرار دارد که در آن قطعاتی از اسلیت و توده‌های نفوذی نامبرده یافت می‌شوند).

در محدوده خلیج و خواجه مراد توده‌های مسکوویت بیوتیت گرانیت و سنگهای پگماتیت رخنمون دارند. از آنجا که این توده‌ها در سنگهای دومین فاز دگرگونی نفوذ کرده و موجب دگرگونی همبری شده‌اند از ژوراسیک میانی جوان‌تر و از سنگهای آهنی کرتاسه منطقه کوه هوهوئی قدیم‌ترند.

کانی سازی

نتیجه عملکرد حرکات زمین‌ساختی در منطقه طر قبه، ایجاد چند زون برشی با شیب زیاد، با جابه جایی کم است. زونهای برشی در چهار پهنه تقریباً موازی و با امتداد NW-SE، توده تونالیت و سنگهای دگرگونی را قطع کرده‌اند (شکل ۱). توده‌های نفوذی در برابر این نیروها بیشتر دچار خرد شدگی و شکستگی شده‌اند. در اعماق و در مناطق محدود به زونهای برشی، توده‌های نفوذی حالت گنیسی به خود گرفته‌اند. اسلیت و فیلیت در زونهای برشی بیشتر تغییر شکل داده و به شیست تبدیل شده‌اند و کمتر حالت برشی دارند.

پهنه برشی مکان مناسبی در شکل‌گیری کانسار طلای طر قبه به شمار می‌رود. زونهای برشی پرشیب دارای دو بخش اصلی و دو بخش با رخنمون محدود، و با روند کلی SE-NW می‌باشند. دو زون اصلی که حفاریها در آنها انجام شده است هر یک در حدود ۸۰۰-۷۵۰ متر طول دارند. زونهای برشی، سنگهای دگرگونی و توده‌های تونالیتی - گرانودیوریتی را قطع کرده‌اند و بنابراین کانی‌سازی از این مجموعه از نظر سنی جوان‌تر است. کانی‌سازی که بعداً در این زونهای برشی، صورت گرفته نیز جوان‌تر از توده‌های نفوذی میزبان هستند.

کانی‌سازی در سنگ میزبان برشی شده بیشتر به صورت پراکنده فضای خالی جا گرفته است. از آنجا که نیروهای زمین‌ساختی باعث ایجاد درز و شکافهایی در زمینه سنگ میزبان شده، کانی‌سازی در بعضی قسمتها به صورت استوک و رک و رگچه‌هایی با قطر کمتر از ۱/۵ میلی‌متر صورت گرفته است. محلولهای گرمایی موجب دگرسانی سنگهای دگرگونی و آذرین موجود در مسیر حرکت شده است. بنابراین با دور شدن از زونهای برشی، طبیعتاً تأثیر محلول بر سنگهای اطراف کم شده، و نمی‌توان زون‌بندی خاصی برای دگرسانی در مناطق دور از زونهای کانی‌سازی قائل شد. به طور کلی، با توجه به مطالعات ماکروسکوپی و میکروسکوپی نمونه‌های عمقی و سطحی کانسار، چهار نوع دگرسانی در ارتباط با ذخیره می‌توان معرفی کرد که به ترتیب فراوانی عبارتند از: دگرسانی سیلیسی، دگرسانی پروپیلیتی، دگرسانی آرژیلی و دگرسانی سریستی.

گذشته علاوه بر استخراج سطحی، به صورت زیرزمینی نیز از این کانسار بهره برداری می‌شده است. اولین مطالعه علمی در این منطقه توسط شیندلر در سال ۱۸۶۸ میلادی انجام شده است. سه پایان‌نامه کارشناسی ارشد عابدی (۱۳۷۱)، خالسی (۱۳۸۰) و ترابیان (۱۳۸۳) در منطقه انجام شده است. در چند سال گذشته اکتشاف طلای این منطقه در برنامه کار سازمان زمین‌شناسی کشور قرار گرفته و طرح اکتشاف نیمه تفصیلی و تفصیلی کانسار به اجرا در آمده است. بررسیها و نتایج ارائه شده این پژوهش، برپایه مطالعه ۲۰گمانه اکتشافی حفر شده در مرحله اکتشاف تفصیلی است. ویژگیهای زونهای کانه‌دار و ارتباط آن با زمین‌شناسی ساختاری منطقه، کانی‌شناسی، کانه‌نگاری و ویژگیهای ژئوشیمی عمقی از اهداف این کار علمی- پژوهشی است.

روش مطالعه

تهیه نقشه زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، مطالعه دقیق ۱۵۰۰ متر مغزه حفاری و با هدف شناخت ویژگیهای سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و زمین‌شناسی ساختاری، مطالعه ۶۸ مقطع صیقلی، برداشت ۴۰۰ نمونه ژئوشیمیایی سنگی از ترانسه‌های سطحی و مغزه‌ها توسط سازمان زمین‌شناسی کشور و تجزیه به روش AAS و ICP توسط شرکت توسعه علوم زمین، تجزیه توده‌های نفوذی برای عناصر اصلی و جزئی با دستگاه XRF در دانشگاه فردوسی مشهد و دماسنجی در دانشگاه تربیت مدرس تهران و با دستگاه دماسنجی مدل Linkam-THMSG600 انجام شد.

زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه بخشی از زون برخورد دو صفحه توران و ایران است. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی در شمال بینالود در مناطق طر قبه و شان‌دیز رخنمون دارند. این واحدها شامل مجموعه دگرگون شده افیولیت، اسلیت، فیلیت و کوارتزیت (فلیشهای دگرگون شده) است. افیولیتها که بقایای پوسته اقیانوسی دیرینه تئیس هستند، بر روی سنگهای فلیش رانده شده و همزمان با فاز کوهزایی هر سینین (اواخر پالئوزویک) تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین قرار گرفته‌اند. توده‌های تونالیت تا گرانودیوریت مناطق وکیل آباد، دهنو و طر قبه در اوایل تریاس (کریم‌پور، ۱۳۷۴) در مجموعه فوق نفوذ کرده و موجب دگرگونی همبری شده و در مناطق خاص، زونهای محدود اسکارن تشکیل شده‌اند.

دومین دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین تحت تأثیر فاز کوهزایی کیمیرین میانی (ژوراسیک میانی) رخ داده است. سنگهای دگرگونی درجه پایین (اسلیت) از محدوده طر قبه به سمت جنوب، تمامی ارتفاعات بینالود را

آرسنوپیریت که عمده کانی سازی را تا این عمق نشان می دهد، بیشتر به گوتیت تبدیل شده اند.

ژئوشیمی

۴۳ نمونه از ۱۶ ترانشه سطحی به روش شیلیاری و تعداد ۳۷۷ نمونه از مغزه های ۲۰ گمانه اکتشافی (روش نصف مغزه) برای تجزیه شیمیایی برداشت شده است. این نمونه ها با روشهای AAS و ICP برای طلا و مجموعه ای از عناصر تجزیه شدند.

تغییرات عیار طلا در سطح زمین در طول زونهای برشی A و C در شکل ۲ نمایش داده شده است. عیار طلا در زون خاوری (C) نسبت به زون باختری (A) بیشتر است (شکل ۲). عیار طلا و تغییرات عرض زونهای کانی سازی در دو نیمرخ (شکلهای ۳ و ۴) نمایش داده شده است. عیار طلا بین ۵ ppm تا ۵۶ ppm تغییر می کند و میانگین آن کمتر از ۵ ppm است. عرض زون کانی سازی بین ۰/۴ تا ۲/۵ متر است (شکلهای ۴ و ۵). مقدار فراوانی عناصر Sn, Zn, Pb, Cu و بسیار پایین و در حد چند گرم بر تن (ppm) می باشد.

مقدار فراوانی Ag در نقاط مختلف کانی سازی بسیار کم و کمتر از ۲ ppm است. عنصر Sb با فراوانی حدود ۲-۴ ppm و حداکثر مقدار ۶/۳۳ ppm وجود دارد. همبستگی طلا با As و Sb در شکلهای ۵ و ۶ مقایسه شده است. در مجموع، طلا همبستگی خوبی با As و Sb دارد. مقدار Bi کمتر از ۰/۵ ppm است. فراوانی As در بخشهای برشی و رگه های کوارتز نسبت به سنگهای آذرین و دگرگونی منطقه افزایش چشمگیری پیدا می کند. این عنصر با بیشینه مقدار ۲٪ و تغییرات نسبی ۳۰۰-۴۰۰ ppm نسبت به دیگر عناصر، تغییرات چشمگیری دارد. تغییرات مقدار As در طول زون برشی و محل ترانشه ها از نظم خاصی پیروی نمی کند و این تفاوت بستگی به شرایط خاص محلول گرمایی و یا تأثیرات ساختاری منطقه در نهشت As دارد.

محدوده تغییرات عیاری طلا غالباً بین ۳-۰/۲ ppm است و به علت به هم نزدیک شدن زونهای برشی در قسمت جنوب خاوری کانسار، مقدار کانی سازی و عیار طلا با نزدیک شدن به این بخشها به طور نسبی و نامنظم افزایش می یابد.

دماسنجی سیال کانه دار

تعداد ۱۸ رگچه کوارتز دارای کانی سازی فلزی مورد مطالعه اولیه قرار گرفتند و در نهایت ۷ مورد برای مطالعه دماسنجی انتخاب شدند. ابعاد حبابهای میانبراهای سیال نسبتاً کوچک بوده و حاوی دو فاز مایع و گاز و از نوع غنی از مایع هستند. نتایج دماسنجی و میزان NaCl در جدول ۲ آمده

منطقه کانسار به طور عمده توسط محلول غنی از سیلیس، تحت تأثیر دگرسانی سیلیسی قرار گرفته است. دگرسانیهای دیگر شدت و گسترش زیادی ندارند و با توجه به تغییرات سنگ شناختی در عمق، بر بعضی قسمتها تأثیر گذاشته اند.

در مطالعه مقاطع صیقلی از اعماق ۵۰ تا ۷۵ متری گمانه های ۱، ۵، ۸ و ۲۱، کانیهای پروتیت و آرسنوپیریت (± طلا) شناسایی شدند (جدول ۱). پروتیت در این نمونه ها با فراوانی حدود ۱٪ به صورت پراکنده و به شکل نیمه وجه دار تا بی وجه دیده می شود. اندازه بلورهای پروتیت ۱۰۰ تا ۳۵۰ میکرون است. آرسنوپیریت با حالت شکل دار و با فراوانی در حد ۱ تا ۲٪ و در اندازه ۵۰ تا ۲۰۰ میکرون دیده می شود.

بر اساس مطالعه ۲۷ نمونه مقطع صیقلی مربوط به اعماق حدود ۳۵ تا ۷۰ متری از گمانه های مختلف، کانی سازی غالب، شامل آرسنوپیریت است. با کاهش عمق، کانی پیریت نیز به مقدار کمتر، آرسنوپیریت را همراهی می کند (جدول ۱). اندازه بلورهای لوزی شکل آرسنوپیریت ۵۰ تا ۳۰۰ میکرون و فراوانی آنها ۲ تا ۴٪ است. بلورهای وجه دار و نیمه وجه دار پیریت با فراوانی ۱ تا ۱/۵٪ در قسمتهای کم عمق تر تشکیل شده و اندازه آنها ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون است. با کاهش عمق، پیریت جایگزین پروتیت شده است. با مطالعه مقاطع صیقلی و نمونه های دستی حاصل از حفاری می توان گفت که در حدود ۴۵ تا ۵۰٪ ذخیره با توجه به حریم عمقی قابل دسترسی دارای این ویژگیها است.

بیست و چهار مقطع صیقلی از اعماق ۱۵ تا ۴۰ متری گمانه های مختلف کانسار، بیانگر شرایطی است که در آن حضور آرسنوپیریت به عنوان کانی اصلی فلزی کم رنگ تر شده و به ازای آن، کانی سازی پیریت افزایش بیشتری یافته است (جدول ۱). آرسنوپیریت با فراوانی حدود ۱٪ و پیریت با فراوانی میانگین ۱/۵ تا ۲٪ است در حدود ۲۵ تا ۳۰٪ ذخیره را تشکیل می دهد. در عمق کمتر از ۲۰ متر، در گمانه های ۱۰، ۱۱، ۱، ۱۳، پیریت مهم ترین کانی فلزی بوده و آرسنوپیریت حذف شده است. کانی گالن و به مقدار خیلی کمتر، کلکوپیریت به همراه پیریت یافت می شود (جدول ۱). پیریت با اندازه ۵۰ تا ۳۵۰ میکرون به صورت پراکنده و پرکننده فضای خالی دیده می شود. گالن به صورت چند بلور ریز در حد ۵۰ میکرون در عمق ۱۵/۲۵ متری گمانه ۱۳ مشاهده شد. کلکوپیریت به صورت خیلی محدود در عمق ۱۳/۷ متری گمانه ۱ قابل مشاهده است و اندازه بلورهای ریز آن ۲۰ تا ۳۰ میکرون است.

با توجه به تمرکز کانی سازی در مسیر زونهای برشی، این زونها به راحتی توسط شرایط اکسایش سطحی تحت تأثیر قرار گرفته اند، به گونه ای که تأثیرات زون اکسیدان تا عمق متوسط ۳۵ متر قابل مشاهده است. پیریت و

با استفاده از نمودار نسبت $1000\text{Ga}/\text{Al}$ به Y (والن و دیگران، ۱۹۸۷) توده های نفوذی منطقه مورد مطالعه در محدوده گرانیتهای نوع S-I رسم شده‌اند (شکل ۱۱).

ایشی‌هارا (۱۹۷۷) گرانیتهای را به دو سری مگنتیت و سری ایلمنیت تقسیم کرد. سری مگنتیت بیشتر با گرانیتهای نوع I و سری ایلمنیت غالباً با گرانیتهای نوع S همپوشانی دارند. سری مگنتیت حاوی مگنتیت، اسفن و پیریت است و به گرانیتهای اکسیدی نیز معروف است. نسبت $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ و Mg/Fe کانی بیوتیت بالاست. گرانیتهای سری ایلمنیت به نوع احیایی نیز معروف است. این نوع گرانیتهای حاوی ایلمنیت و گارنت است و نسبت $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ و Mg/Fe در کانی بیوتیت پایین است. پذیرفتاری مغناطیسی گرانیتهای سری ایلمنیت در محدوده $[\text{SI}]$ 10^{-5} تا 10^{-4} و برای گرانیتهای سری مگنتیت در محدوده $[\text{SI}]$ 10^{-2} تا 10^{-1} است. پذیرفتاری مغناطیسی گرانیتهای مناطق طبقه - دهنو - وکیل آباد با استفاده از دستگاه Magnetic Susceptibility Meter Model : GMS -2 ساخت FUGRO Instruments اندازه گیری شده است. براساس شکل ۱۲، تمامی توده‌های تونالیت و گرانودیوریت متعلق به سری ایلمنیت و یا به عبارت دیگر از نوع احیایی هستند.

شرایط فیزیکوشیمیایی محلول کانه‌ساز

با استفاده از پاراژنرکانیایی و نوع دگرسانی و با استفاده از نمودارهای پایداری، شرایط فیزیکوشیمیایی محلول کانه‌ساز را می‌توان مشخص نمود. پاراژنرکانیایی از عمق به طرف سطح زمین به شرح زیر است:

۱- پیرویت + آرسنوپیریت ± طلا

۲- پیریت + آرسنوپیریت ± طلا

۳- پیریت ± طلا + گالن

در نمودار Log fO_2 و Log fS_2 پاراژنرکانیایی از عمق به سطح رسم شده است (I به II) (شکل ۱۳). محلول کانه‌ساز در مجموع حالت احیایی داشته و میزان غلظت گوگرد نیز کم بوده است (شکل ۱۳). ضمن حرکت محلول به طرف سطح زمین همزمان با کاهش دما، میزان Log fO_2 و Log fS_2 نیز افزایش یافته است (شکل ۱۳). با توجه به نوع دگرسانی pH محلول کانه‌ساز خنثی بوده است. بنابراین محلول کانه‌ساز دارای شرایط زیر بوده است:

$T = 420^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 7$, $\text{Log fO}_2 < -40$, $\text{Log fS}_2 < -14$

مقایسه با دیگر انواع کانسارهای طلای جهان

کانی‌سازی طلا در محیطهای زمین‌ساختی مختلف رخ می‌دهد. (۱) در زونهای فرورانش به صورت سامانه‌های پورفیری (Cu-Mo-Au, Au-Cu) (Cu-Au)، اپی‌ترمال کم سولفید و پر سولفید، چشمه‌های آبگرم، اپی‌ترمال

است. به‌طور کلی با توجه به نتایج به‌دست آمده سه گروه میانبار سیال از نظر دمای تشکیل وجود دارد (شکل ۷).

گروه ۱ میانبارهای این دسته، دمای بیشتری در حدود 420°C دارند که غیرعادی بوده و تعداد آنها کم است. دمای ذوب اولین یخ این گروه بین $23-$ تا $25-$ درجه است. این دما مربوط به پاراژنر کوارتز، پیرویت و آرسنوپیریت است.

گروه ۲ فراوان‌تر و دارای محدوده دمایی $330-340^\circ\text{C}$ هستند. دمای ذوب اولین یخ این گروه بین $16-$ تا $21-$ درجه است (شکل ۸). این دما مربوط به پاراژنر کوارتز، پیریت و آرسنوپیریت است.

گروه ۳ میانبارهای گروه دمای کمتری در حدود 120°C دارند که غیرعادی بوده و تعداد آنها کم می‌باشد و میزان NaCl آنها بین ۷ و ۱۴ درصد است (شکل ۸). این دما مربوط به پاراژنر کوارتز، پیریت ± آرسنوپیریت ± گالن است.

سنگ‌شناسی توده‌های نفوذی

توده‌های تونالیت تا گرانودیوریت مناطق وکیل آباد، دهنو و طبقه در منطقه‌ای به وسعت ۴۵ کیلومتر مربع رخنمون دارند (شکل ۱۰). این توده‌ها موجب دگرگونی همبری در اسلیت و نوارهای مرمر شده و در نتیجه انواع شیستها از جمله گارنت شیست، مسکوویت شیست، آندالوزیت شیست تشکیل شده‌اند. زونهای اسکارن خیلی محدود فاقد کانی‌سازی نیز تشکیل شده است (شکل ۹). ماگمای تشکیل دهنده این توده‌ها در اوایل تریاس، همزمان با بسته شدن اقیانوس دیرینه تیسس و برخورد دو صفحه ایران و توران تشکیل شده است. همان‌گونه که در بخش کانی‌سازی طلا توضیح داده شد، پهنه برشی که در این توده‌ها تشکیل شده، مکان مناسبی در شکل‌گیری کانسار طلای طبقه به شمار می‌رود.

توده‌های دهنو از نوع هورنبلند - بیوتیت تونالیت بوده و حاوی ۳۵ تا ۵۰ درصد پلاژیوکلاز، ۱۰ تا ۱۴ درصد پتاسیم فلدسپار، ۹ تا ۱۴ درصد کوارتز، ۱۱ تا ۱۵ بیوتیت و ۰ تا ۲ درصد آمفیبول است. کانیهای جزئی شامل زیرکن، ایلمنیت و آپاتیت هستند. توده‌های وکیل آباد از نوع بیوتیت گرانودیوریت بوده و دارای ۳۰ تا ۴۰ درصد پلاژیوکلاز، ۱۳ تا ۱۸ درصد پتاسیم فلدسپار، ۱۵ تا ۲۷ درصد کوارتز و ۷ تا ۱۰ درصد بیوتیت هستند. کانیهای جزئی شامل زیرکن، ایلمنیت و آپاتیت هستند.

تعداد ۷ نمونه معرف توده‌های مناطق طبقه، دهنو و وکیل آباد برای عناصر اصلی و جزئی با دستگاه XRF تجزیه شدند (جدول ۳). با استفاده از نمودار بارکر (۱۹۷۹) توده‌های نفوذی نامگذاری شدند (شکل ۱۰). توده‌های منطقه دهنو در محدوده تونالیت و توده‌های وکیل آباد - طبقه در محدوده گرانودیوریت رسم شده‌اند (شکل ۱۰).

کانسار طلای طبقه با کانسارهای طلای نوع کوهزایی مقایسه شده است (جدول ۴).

نتیجه گیری

کانسار طلای طبقه از نوع مزوزون - کوهزایی است.

- براساس پاراژنز کانیایی از عمق به سطح، (۱) پیرویت + آرسنوپیریت ± طلا (۲) پیریت + آرسنوپیریت ± طلا و (۳) پیریت ± طلا + گالن. محلول کانه ساز در مجموع حالت احیایی داشته و میزان غلظت گوگرد نیز کم بوده است. محلول کانه ساز دارای شرایط زیر بوده است:
 $T = 420^{\circ}C$, $pH = 7$, $\log fO_2 < -40$, $\log fS_2 < -14$
- توده‌های توانلایت و گرانودیوریت (سنگ میزبان کانی سازی) متعلق به گرانیتوئید سری ایلمینیت و یا نوع احیایی هستند.
- با توجه به قطع کلیه واحدهای سنگی توسط گسلها با پهنه‌های زون برشی، گسلها از مجموعه سنگهایی که در سطح رخنمون دارند، جوان تر بوده و کانی سازی نیز از این نوع گسلها جوان تر است.
- مطالعه مغزه‌ها و رسم نیمرخ زیر سطحی مشخص کرد که زونهای چهار گانه برشی، هر چه به سمت عمق می‌روند، محدوده عمل وسیع تر از آنچه در سطح رخنمون دارند پیدا می‌کنند و سنگهای آذرین و دگرگونی منطقه را تحت نیروهای برشی و شکل پذیر قرار می‌دهد. بیشترین شدت و تأثیر زونهای برشی برسنگهای منطقه، بروز شکستگی در سنگها و نیز میل سنگهای دگرگونی به رخساره شیست سبزااست. در مناطق محدودی که فشار و تنش بیشتر بوده، شیست به پروتومیلونیت تبدیل شده است. به سمت سطح، از رفتارهای شکل پذیر سنگها کاسته می‌شود.
- طلا در کانسار به طور خیلی محدود، به صورت آزاد و اغلب در کانیهای آرسنوپیریت، پیریت یافت می‌شود و میزان فراوانی طلا، بویژه با کانی آرسنوپیریت در بخشهای مختلف کانسار به اثبات رسید.
- کانی سازی به طرز چیره، ارتباط مستقیم با بخشهای سنگهای شیست و پروتومیلونیت دارد.
- دامنه تغییرات عیار طلا ۷-۰/۰۲ گرم در تن متغیر می‌باشد.

نوع کارلین، سولفید توده‌ای نوع کروکو و نوع اسکارنی. در این خصوص مقاله‌های فراوانی نوشته شده است از جمله:

Hedenquist Sillitoe (1993, 1995, 1997, 1999 & 2002), Sillitoe & (2003) & Muntean, (2001)

نوشته شده‌اند. (۲) زون برخورد قاره‌ای محصول جانبی بعضی از کانسارهای Sn-W پورفیری و نوع رگه‌ای در کمر بندهای کوهزایی با سنگهای دگرگونی ناحیه‌ای و نفوذی مرتبط (Bierlein & Maher (2001), Goldfarb & others (2001)).
(۳) زون گسترش اقیانوسی همراه با سولفید توده‌ای نوع قبرس. کانسارهای طلای فوق هر کدام از نظر پتروشیمی سنگهای همراه، نوع، شکل و گسترش زونهای دگرسانی، پاراژنز کانیایی، ژئوشیمی عناصر همراه و عیار- میزان ذخیره و ویژگیهای منحصر به خود را دارند.

هاجسون (۱۹۹۳) براساس فراوانی Au و Ag توانست انواع کانی‌سازهای طلا را از یکدیگر تفکیک نماید (شکل ۱۴). کانسارهای تشکیل شده در کمر بندهای کوهزایی کمترین مقدار Ag را دارند (شکل ۱۴). کانسارهای نیکل سولفیدی و بعضی از کانسارهای اپی‌ترمال دارای بیشترین مقدار Ag هستند (شکل ۱۴). کانسار طلای طبقه با مقدار نقره کمتر از ۲ ppm در محدوده نوع کمر بندهای کوهزایی پیاده شده‌اند. علاوه بر این، با در نظر گرفتن شواهد زمین‌شناسی از جمله سنگهای دگرگونی ناحیه‌ای، متافولیتها و توده‌های نفوذی سری ایلمینیت همگی مدارک مهمی برتایید تشکیل کانسار طلای طبقه در کمر بند زون کوهزایی دارند. گروز و دیگران (۱۹۹۸) و گولد فارب و دیگران (۲۰۰۱) کانسارهای طلای نوع کوهزایی را براساس عمق تشکیل به سه نوع اپی زون در عمق کمتر از ۶ کیلومتر، مزوزون در اعماق ۶ تا ۱۲ کیلومتر و هیپوزون در اعماق بیش از ۱۲ کیلومتر تشکیل می‌شوند. از آنجا که بعضی پژوهشگران براساس دما این نوع کانی‌سازها را به نوع مزوترمال معرفی می‌کنند و تقسیم بندی نوع مزوترمال محدودیت عمق تشکیل دارد، بنابراین توصیه می‌شود به جای مزوترمال از واژه کانسارهای نوع کوهزایی استفاده شود. با استفاده از مطالعات دماسنجی (در شرایط خاص) و نوع عناصر همراه می‌توان عمق تشکیل این ذخایر را مشخص کرد. کانسارهای طلای کوهزایی نوع اپی‌زون دارای بی‌هنجاری عناصر $\pm Au-Hg-Sb$ نوع مزوزون دارای بی‌هنجاری عناصر Au-As-Te و نوع هیپوزون دارای بی‌هنجاری Au-As هستند.

جدول ۱- نمایش تغییرات پاراژنز کانی سازی در منطقه مورد مطالعه در طبقه (ترابیان، ۱۳۸۳).

Depth				Minerals
0-15m	15-35m	35-70 m	> 70 m	
			-----	Pyrrhotite
	-----	-----	-----	Arsenopyrite
-----	-----	-----	-----	Pyrite
-----				Chalcopyrite
-----				Galena
-----	-----	-----	-----	Quartz
-----				Goethite

جدول ۲- نتایج دماسنجی و میزان NaCl میانبارهای سیال زون کانی سازی طلای طبقه (ترابیان، ۱۳۸۳).

شماره گمانه	عمق نمونه	دمای همگن شدن (سانتی گراد)	درصد NaCl
BH 20 - 5	۶۴/۱۰	۴۲۲	۲۶
BH 20 - 5	۶۴/۱۰	۴۳۲	۲۶
BH 20 - 5	۶۴/۱۰	۳۵۴	۲۵
BH 20 - 9	۵۱/۹۵	۴۳۰	۲۶
BH 20 - 9	۵۱/۹۵	۴۲۰	۲۳
BH 20 - 9	۵۱/۹۵	۳۴۵	۱۹
BH 20 - 9	۵۱/۹۵	۳۰۰	۲۰
BH 21 - 4	۳۸/۱۵	۳۶۰	۲۲
BH 21 - 4	۳۸/۱۵	۳۵۵	۲۳
BH 21 - 4	۳۸/۱۵	۳۴۵	۲۱
BH 21 - 4	۳۸/۱۵	۱۶۵	۱۳
BH 21 - 0	۳۹/۱	۳۲۰	۲۰
BH 21 - 0	۳۹/۱	۱۴۵	۷
BH 13 - 17	۱۶/۴۰	۳۲۰	-

جدول ۳- ترکیب شیمیایی توده‌های طبقه - وکیل‌آباد - دهنو و کانیهای نورماتیو (کریم‌پور و دیگران، ۱۳۸۴).

Oxides %	Dehnow ۵	Dehnow ۱	Dehnow ۶	Dehnow ۲	Vakilabad T-1	Vakilabad T-2	Vakilabad T-3
SiO ₂	55.1	59.32	55.12	58.16	65.24	64.74	64.41
TiO ₂	0.96	0.62	0.92	0.76	0.57	0.48	0.47
Al ₂ O ₃	18.65	17.59	19.02	18.14	15.39	16.42	16.51
Fe ₂ O ₃	1.95	1.59	1.44	1.86	1.85	1.16	1.40
FeO	6.70	4.77	7.15	5.58	4.41	3.95	3.86
MnO	0.16	0.14	0.2	0.16	0.11	0.13	0.13
MgO	3.01	2.60	2.7	2.32	1.89	1.79	1.68
CaO	6.99	5.69	7.25	6.13	3.84	4.28	4.25
Na ₂ O	2.46	2.48	1.9	2.71	2.41	3.0	2.74
K ₂ O	2.02	2.62	2.07	2.76	3.05	2.69	2.80
P ₂ O ₅	0.32	0.20	0.23	0.22	0.19	0.18	0.16
H ₂ O (+)	1.7	1.34	1.9	1.4	1.26	1.2	1.2
H ₂ O (-)	0.16	0.16	0.15	0.15	0.12	0.12	0.13
Total	99.84	99.12	99.8	100.3	100.21	100.14	99.93

CIPW norms

Q	10.29	16.66	17.55	12.41	26.61	23.27	24.48
C	0.40	0.78	1.33	0.02	1.57	1.19	1.62
Or	12.14	15.86	12.12	16.51	18.22	16.09	16.81
Ab	21.17	21.50	15.19	23.21	20.61	25.69	23.56
An	33.36	27.71	33.62	29.47	18.12	20.42	20.47
Hy	17.20	13.48	6.62	13.7	10.65	10.32	9.74
Mt	2.88	2.36	2.85	2.73	2.71	1.70	2.06
Il	1.85	1.21	1.71	1.46	1.09	0.92	0.91
Ap	0.77	0.49	0.65	0.53	0.45	0.43	0.39
D.I.	43.6	54.02	45.56	52.13	65.05	65.05	64.85
C.I.	3.19	4.39	3.8	4.0	5.89	6.29	6.25

Trace element (ppm)

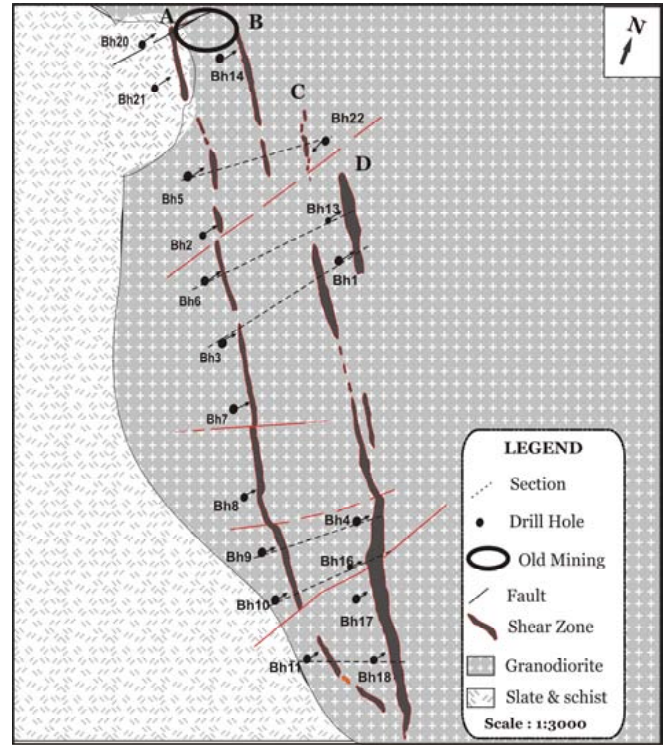
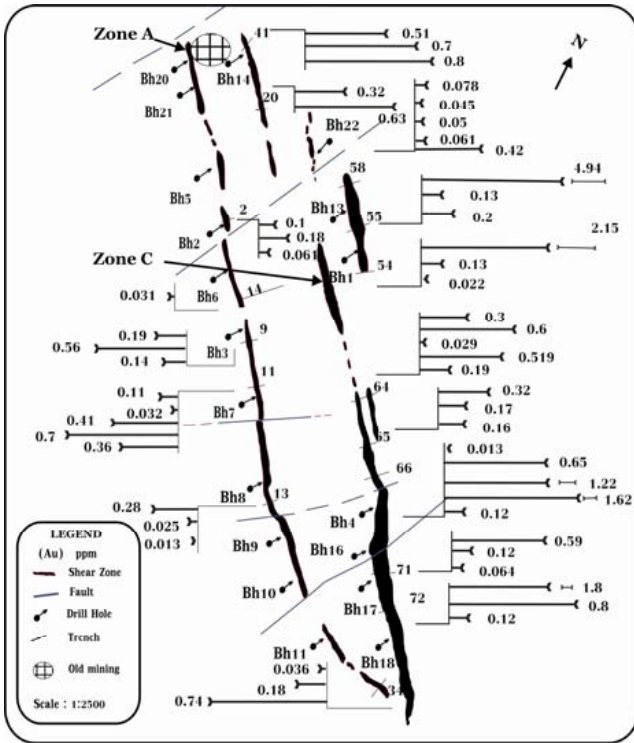
Sn	5	-	-	-	-	-	2
Rb	75	96	76	102	110.4	100	100
Sr	533	514	537	540	396	460	433
Ba	466	576	470	594	561	551	557
Nb	31.9	21.5	30.5	28.8	25.9	23.1	21.5
Zr	178	154	177	205	155	156	145
Ga	24	23	23.6	19	22	21	18
Y	24.2	18.7	22.4	--	15.4	15.2	21.2
Sc	--	13.97	-	--	--	--	9.19

Elemental Ratios

Rb/Sr	0.14	0.18	0.14	0.18	0.27	0.21	0.23
Rb/Ba	0.16	0.16	0.16	0.17	0.19	0.18	0.18
K/Rb	111.77	114.45	112.6	112.29	115.06	110.85	116.2
Sr/Ba	1.14	0.892	0.92	0.865	0.263	0.835	0.777
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	19.4	28.37	20.65	23.8	27	34	35
CaO/Na ₂ O	2.84	2.3	3.81	2.26	1.59	1.42	1.55
Ca/Sr	93.50	78.92	96.3	80.93	69.69	66.34	69.88
K/Na+K	0.55	0.54	0.52	0.53	0.58	0.50	0.53
C/ACF	0.28	0.29	0.29	0.29	0.26	0.28	0.27
A/CNK	1.037	1.01	1.01	0.974	1.077	1.049	1.049
Mt. Susceptibility (SI)	0.45*10 ⁻⁴	0.31*10 ⁻⁴	0.26*10 ⁻⁴	0.40*10 ⁻⁴	0.39*10 ⁻⁴	0.48*10 ⁻⁴	0.45*10 ⁻⁴

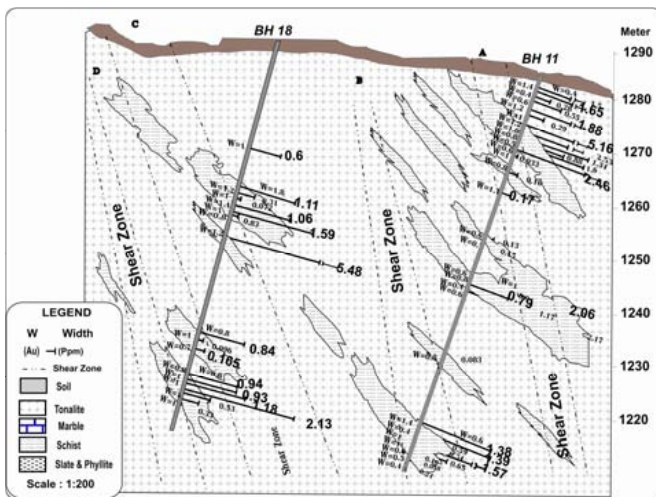
جدول ۴- مقایسه کانسار طلای طبقه با کانسارهای طلای نوع کوهزایی.

کانسار طلای طبقه	ذخایر نوع کوهزایی (گروز و دیگران، ۱۹۹۸)	
در زون برخوردی حاشیه قاره‌ای و در درون زون برشی با جابه جایی کم	- در حاشیه صفحات همگرا - درون گسلها یا زونهای برشی با جابه جایی کم	رژیم زمین ساختی
سنگهای دگرگونی در حد رخساره شیست سبز و توده‌های گرانیتوئید سری ایلمنیت	- سنگهای مافیک و اولترامافیک آتشفشانی - سنگهای نفوذی، گری و کیها - سنگهای دگرگونی بوژه رخساره شیست سبز	سنگ میزبان
- مزوزویک	- مزوآرکنن - نئوآرکنن - پالئوپروتوزویک - پالئوزویک - مزوزویک - ترشیری	سن تشکیل
- دمای تشکیل ۳۶۰-۲۴۰ درجه سانتی گراد	- در اعماق ۱۵-۴ کیلو متر (۴-۰/۵ kb) - دمای تشکیل ۵۰۰-۲۵۰ درجه سانتی گراد	عمق و دمای تشکیل
پیروتیت، پیریت، آرسنوپیریت، گالن، اسفالریت	پیروتیت، پیریت، آرسنوپیریت، گالن، اسفالریت، کلکوپیریت	کانی سازی
Au - As (±W, ±Sb) Au/Ag ≈ 7-10	Au ± Ag ± As ± Sb ± W, Bi Au/Ag ≈ 5	فلزات همراه
سیالها دارای شوری متوسط = ۲۰٪ هستند سیالات دوفازی V + L هستند ?(H ₂ O)	سیالها دارای شوری کم تا متوسط هستند. اغلب ۲ فازی CH ₄ , CO ₂ , H ₂ O هستند.	ماهیت میانبارهای سیال
- نیاز به بررسی بیشتر دارند ولی طلای قابل توجهی انتظار نمی رود.	بیشتر ذخایر مزوترومال کمتر از ۱۰ میلیون تن ذخیره دارند.	مقدار ذخیره
عملکرد گسل در توده شکننده و در سنگهای میزبان دگرگونی به هر دو صورت دیده می شود.	عملکرد زون برسنگ میزبان به دو صورت شکننده و شکل پذیر است	نحوه عملکرد زون برشی بر سنگ میزبان

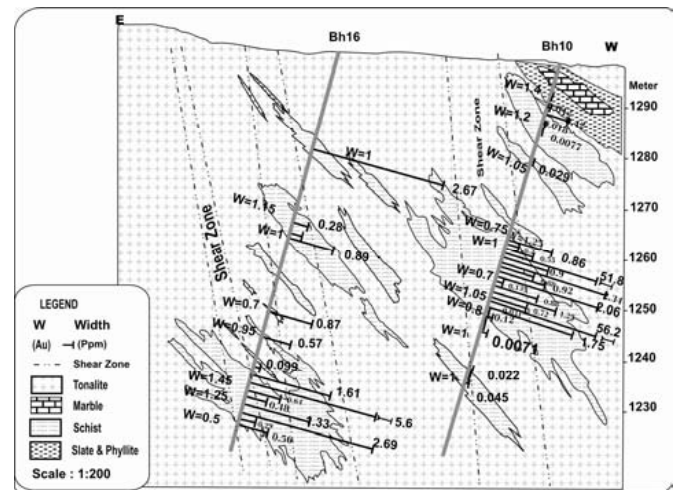


شکل ۲- نمایش تغییرات میزان طلا در دو زون خاوری (C) و باختری (A) (ترابیان، ۱۳۸۳).

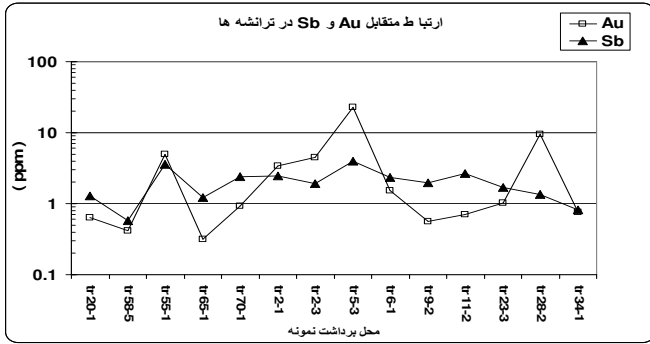
شکل ۱- نقشه زمین شناسی کانسار طلای طبقه (ترابیان، ۱۳۸۳).



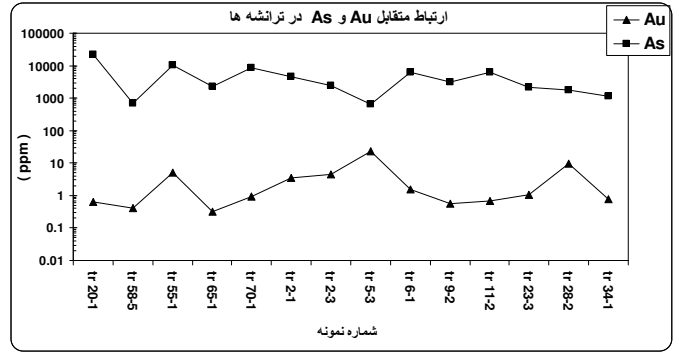
شکل ۴- نمایش تغییرات میزان طلا در نیمخ چاههای Bh18-Bh-11 (ترابیان، ۱۳۸۳).



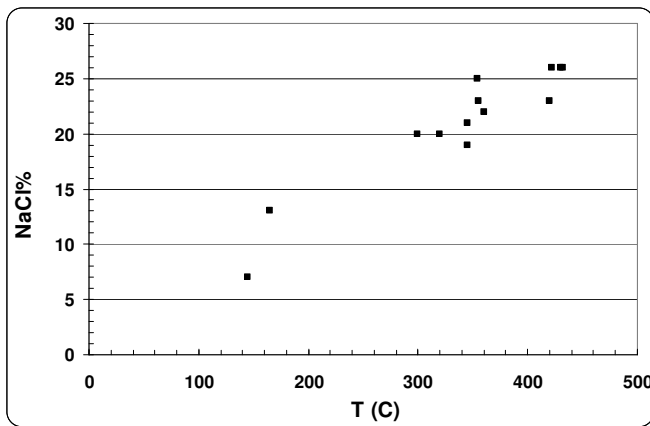
شکل ۳- نمایش تغییرات مقدار طلا در نیمخ چاههای Bh16-Bh-10 (ترابیان، ۱۳۸۳).



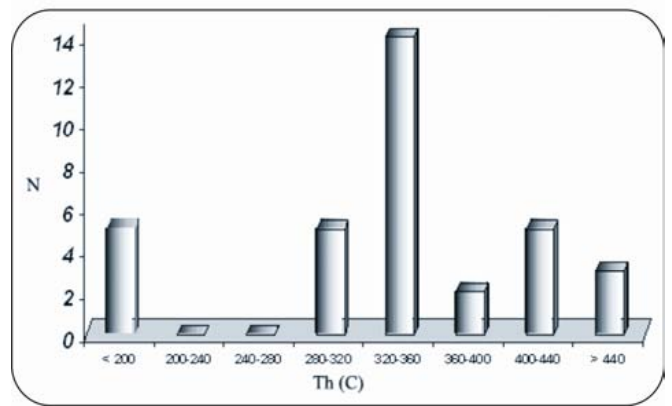
شکل ۶- ارتباط متقابل عناصر Au و Sb در ۱۴ ترانشه سطحی (ترابیان، ۱۳۸۳).



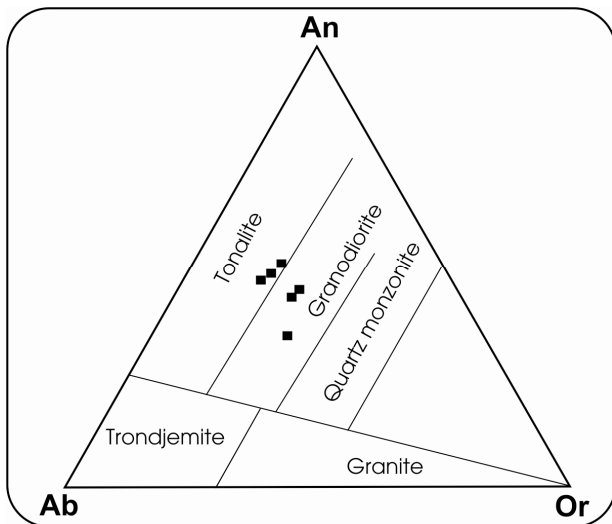
شکل ۵- رابطه متقابل Au و As و همبستگی نسبی و مثبت بین این دو عنصر (ترابیان، ۱۳۸۳).



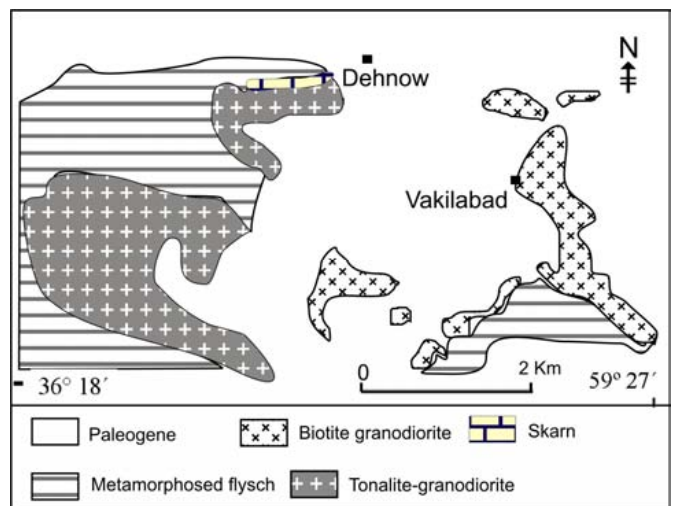
شکل ۸- نمودار دمای همگن شدن و میزان املاح میانبارهای سیال طر قبه کانی سازی طلای طر قبه (ترابیان، ۱۳۸۳).



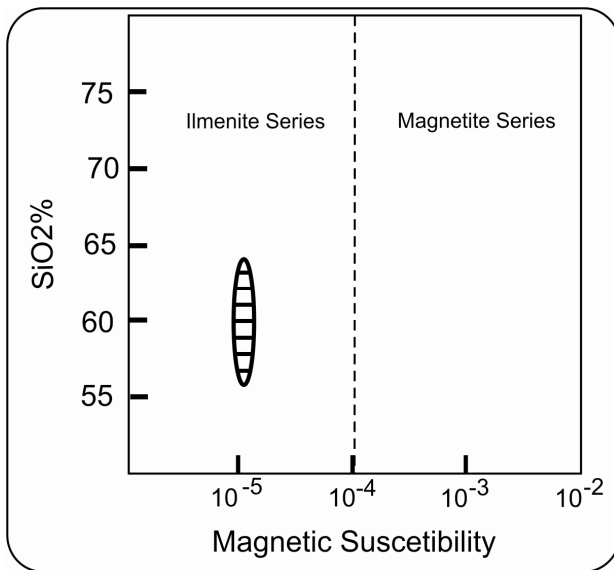
شکل ۷- نمودار دمای همگن شدن میانبارهای سیال کانی سازی طلای (ترابیان، ۱۳۸۳).



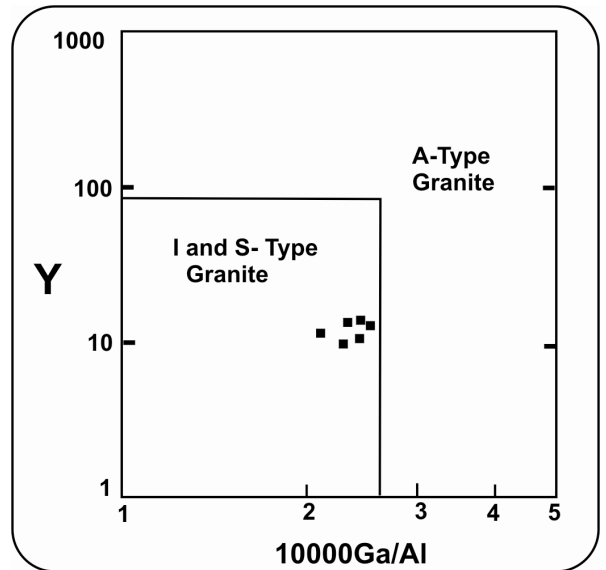
شکل ۱۰- نمودار نامگذاری توده های نفوذی (کریم پور و دیگران، ۱۳۸۴).



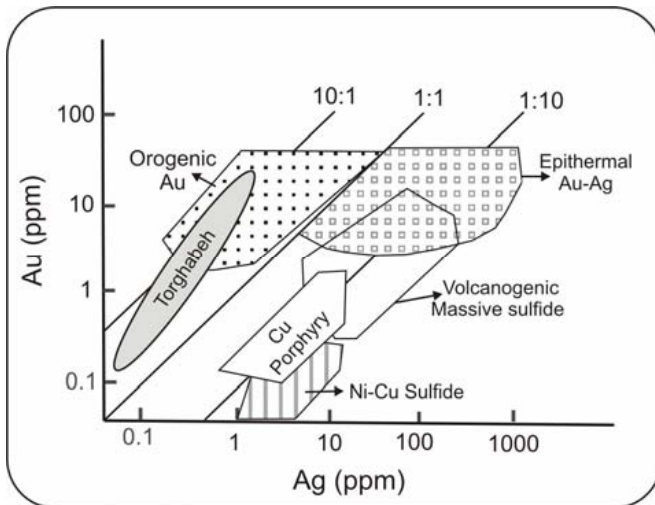
شکل ۹- نقشه رخنمون توده های نفوذی در محدوده وکیل آباد - طر قبه - دهنو.



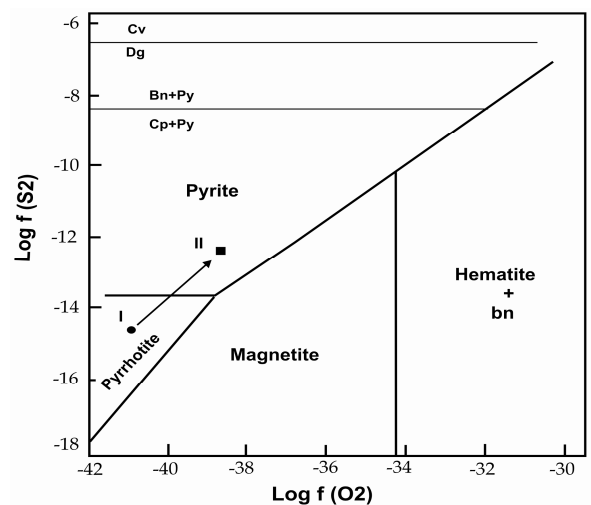
شکل ۱۲- نمودار تعیین نوع سری گرانیتوئیدها براساس پذیرفتاری مغناطیسی (کریم پور و دیگران، ۱۳۸۴).



شکل ۱۱- نمودار نسبت 10000Ga/Al در برابر Y (کریم پور و دیگران، ۱۳۸۴).



شکل ۱۴- نمودار تعیین نوع کانی سازی طلا براساس میزان Au, Ag (Hodgson, 1993)



شکل ۱۳- نمودار LogfO2 و LogfS2 در شرایط (Barton and Skinner, 1979) T 250° C, ΣS=2 × 10⁻² m

کتابنگاری

- تراپیان، ا.، ۱۳۸۳- مطالعات پتروگرافی، مینرالوگرافی، ژئوشیمی و داماسنجی کانسار طلای طبقه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی مشهد. ص ۱۰۳. خالصی، م.، ۱۳۸۰- فرآوری کانسنگ طلای طبقه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران دانشکده فنی.
- عابدی، م.، ۱۳۷۱- زمین‌شناسی و ژئوشیمی منطقه طلای طبقه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- کریم‌پور، م.، و ولی‌زاده، م.، ۱۳۷۴- منشأ و موقعیت تکتونیکی گرانیت‌های جنوب مشهد، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۲، شماره ۱، ص ۷۱-۸۲.
- کریم‌پور، م.، عاشوری، ع.، ملک‌زاده، آ.، و سعادت، س.، ۱۳۸۴- طرح پژوهشی ژئوشیمی عناصر کمیاب و ایزوتوپ‌های Sm-Nd-Rb-Sr در گرانیتوئیدهای وکیل‌آباد- خواجه مراد- و سنگ بست به منظور بررسی منشأ و جایگاه تکتونیکی آنها. (در مرحله اجرا).

References

- Barker, F., 1979- Trondjemite: definition, environment and hypotheses or origin. In Barker, F. (ed) Trondhjemites, dacites, and related rocks, 1-12 New York : Elsevier.
- Barton, H. L and Skinner, B. J., 1979- Sulfide mineral stabilities: in Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Barnes, H. L. 2nd edition., New York: Holt, Rinehart, and Winston, p. 278-403.
- Bierlein, F.P. Maher, S., 2001- Orogenic disseminated gold in Phanerozoic fold belts—examples from Victoria, Australia and elsewhere. Ore Geology Reviews 18 2001 113–148.
- Goldfarb R.J., Groves, D.I., Gardoll, S., 2001- Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. Ore Geology Reviews 18 2001 1–75
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, H., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998- Orogenic gold deposits—a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit type. Ore Geol. Rev. 13, 7–27.
- Hodgson, C.J., 1993- Mesothermal lode-gold deposits. In: Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., Duke, J.M. 1987- Mineral Deposit Modelling. Geol. Assoc. Can. Spec. Pap. 40, 635-678. Hoefs, J., 1987- Stable Isotope
- Ishihara, S., 1977- The magnetite- series and ilmenite- series granitic rocks: Mining geology, Japan, 27, p. 43- 300.
- Sillitoe, R.H., 1993- Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications. Geological Association of Canada Special Paper 40, 465-478.
- Sillitoe, R.H., 1995- Exploration of porphyry copper lithocaps. Proceedings of Pacific Rim Congress 1995. Carlton, Victoria: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 527-532.
- Sillitoe, R.H., 1997- Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. Australian Journal of Earth Sciences 44, 373-388.
- Sillitoe, R.H., 1999- Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralization in the porphyry and epithermal environments, in Weber, G., ed., Pacrim '99 Congress, Bali, Indonesia, 1999, Proceedings: Parkville, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 29-44.
- Sillitoe, R.H., 2002- Rifting, bimodal volcanism, and bonanza gold veins: Society of Economic Geologists Newsletter, no. 48, p. 24-26.
- Sillitoe, R.H., and Hedenquist, J.W., 2003- Linkages between volcano-tectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits, in Simmons, S.F, and Groham, I., eds., Volcanic, Geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes deep within the earth, Giggenbach memorial volume: Society of Economic Geologists and Geochemical Society, Special Publication, n. 10, p. 315-343.
- Whalen, J.B., Currie, K.L. & Chappell, B.W., 1987- A-type granites. geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology 95, 407-419.

*گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

**سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (تهران)

*Geology department, Ferdowsi University of Mashhad

** Geological Survey and Mining Exploration of Iran (Tehran)