

# کانی سازی و مغناطیس سنجی زمینی به منظور اکتشاف ذخایر معدنی و تعیین گسترش عمقی کانی سازی

## در محدوده معدن فیروزه نیشابور، استان خراسان رضوی

علیرضا غیاثوند

گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

محمد حسن کریم پور

گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

محمد رضا حیدریان شهری

گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

آزاده ملکزاده شفارودی

گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۴

karimpur@um.ac.ir

### چکیده

منطقه مورد مطالعه معدن فیروزه نیشابور، در کمر بند آتشفشانی-نفوذی شمال غرب نیشابور در زون ساختاری بینالود واقع شده است. مهمترین واحدهای سنگی شامل گدازه و پیروکلاستیک های با ترکیب تراکیت، لاتیت، آندزیت و بازالت با سن ائوسن هستند که توده های نفوذی نیمه عمیق در آنها نفوذ کرده اند. آلتراسیون های سیلیسی، آرژیلیک و کربناتی واحدهای آتشفشانی و نفوذی منطقه را تحت تأثیر قرار داده اند. کانی سازی شامل مگنتیت، اسپیکولاریت، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، همتایت، آلونیت، کوولیت، فیروزه و لیمونیت و به شکل های افشان، استوکورک، رگه-رگچه ای و برش گرمایی می باشد. به منظور دستیابی به اطلاعات عمقی، گسترش احتمالی کانی سازی مگنتیت همراه کانیه های سولفیدی و گسترش ذخایر و توده های نفوذی مولد کانی سازی، عملیات مغناطیس سنجی زمینی انجام شد. پس از انجام پردازش داده های مغناطیس سنجی زمینی، محل واقعی آنومالی در شرق و جنوب شرقی منطقه و منطبق بر آلتراسیون و کانی سازی دیده شد که اثر این آنومالی در سطح تا عمق حضور دارد و مؤید یک کانی سازی بزرگ از نوع IOCG در منطقه است.

**کلمات کلیدی:** کانی سازی، مغناطیس سنجی زمینی، نقشه های مغناطیسی، اکسید آهن مس-طلا، معدن فیروزه نیشابور.

### مقدمه

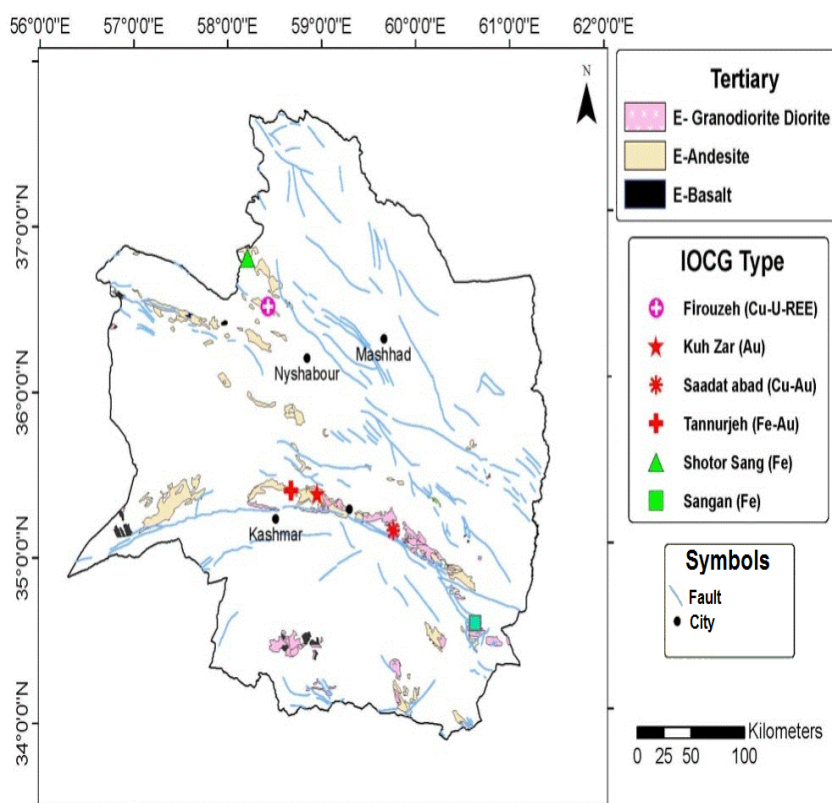
منطقه و خارج از تونل های معدن را در سطح مطالعه کرده اند و کریم پور و همکاران (۱۳۹۰)، کانی سازی رخ داده در منطقه را از نوع IOCG معرفی کرده اند. این مقاله در ادامه تحقیق در منطقه در قالب رساله دکتری است که در منطقه ای وسیع تر نقشه های زمین شناسی، آلتراسیون، کانه زایی و بررسی های زمین شیمیایی سطحی و زیر سطحی را به منظور شناسایی واحدهای آذرین و توده های نفوذی، تعیین انواع کانی سازی و شکل و حالت آن و نیز بررسی زون های آلتراسیون، تهیه شده است. به منظور دستیابی به اطلاعات عمقی و گسترش احتمالی کانی سازی مگنتیت همراه کانیه های سولفیدی و گسترش ذخایر و توده های نفوذی مولد کانی سازی، عملیات مغناطیس سنجی زمینی انجام شد.

روش های زمین فیزیکی به ویژه مغناطیس سنجی زمینی در اکتشاف ذخایر تیپ IOCG از جمله کانسار المپیک دم، بسیار کاربرد داشته است (Esdale et al., 2003, Funk, 2013). کشف کانسار المپیک دم در منطقه Gawler استرالیا در سال ۱۹۷۵ منجر به شناسایی و معرفی دسته جدیدی از کانسارها موسوم به IOCG شد که حاوی نسبت بالای اکسید آهن (مگنتیت و یا همتایت)، مس، طلا +/- اورانیم است. کشف کانسار Prominent Hill در سال ۲۰۰۲ و Carrapateena در سال ۲۰۰۵،

معدن فیروزه نیشابور در ۵۳ کیلومتری شمال غرب نیشابور در استان خراسان رضوی قرار دارد (شکل ۱). این معدن در بخشی از نوار آتشفشانی نفوذی شمال گسل درونه قرار گرفته که قبلاً توسط کریم پور (۱۳۸۲) به عنوان منطقه با پتانسیل بالا برای کانسارهای نوع اکسید آهن و IOCG معرفی شده است. معدن فیروزه نیشابور با قدمت حدود ۵۰۰۰ سال، معروفترین و قدیمی ترین معدن فیروزه جهان است. کارهای بسیار متعددی در محدوده معدن دیده شده و هم اکنون توسط تعاونی روستایی معدن فیروزه نیشابور به صورت زیرزمینی و با روش اتاق و پایه بهره برداری می شود. در گذشته به دلیل اهمیت کانی فیروزه همه توجهات به سوی این کانی معطوف بوده و نقشه های زمین شناسی، آلتراسیون، کانی سازی و زمین شیمی با مقیاس مناسب، برای شناسایی سایر کانی زایی های احتمالی منطقه انجام نشده است. تدین اسلامی (۱۳۵۳) و کیمیاقلم و ایرانمنش (۱۳۵۳)، به طور همزمان گزارش اکتشاف زمین شیمی و زمین فیزیک در معدن فیروزه نیشابور را تهیه کرده اند که در نتیجه آن حضور آنومالی های زمین شیمیایی و زمین فیزیکی را اعلام کردند. اسفندیارپور (۱۳۹۰) و محمدنژاد (۱۳۹۰)، در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد بخش های شرقی

منطقه Gawler استرالیا جایی که بسیاری از انواع دیگر کشف شده‌اند (Funk, 2013). در ذخایر تیپ IOCG، پاسخ زمین فیزیکی اکسید بر پاسخ سولفید غلبه دارد (Funk, 2013).

منجر به تشخیص پتانسیل کانسار IOCG با تناژ و عیار بالا در شرق ذخایر IOCG با حفاری کشف شده، گردید (Funk, 2013). اکثر ذخایر IOCG در سطح دنیا در ابتدا توسط هدف‌های اکتشافی حاصل از برداشت‌های منطقه‌ای مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و مطالعات ساختاری



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی معدن فیروزه نیشابور (منطقه مورد مطالعه) و محل آن در کمربند آتشفشانی ائوسن در شمال غربی استان خراسان رضوی

در جهت شمالی- جنوبی ۱۰ کیلومتر وسعت دارد. ناهنجاری مغناطیسی هوایی، حضور مگنتیت به عنوان کانی‌های اصلی معدن فیروزه نیشابور و احتمال حضور کانی‌سازی تیپ IOCG در منطقه و اهمیت مغناطیس‌سنجی زمینی در اکتشاف این نوع کانسارها از جمله دلایل برداشت تفصیلی داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی در مقیاس معدنی در این تحقیق است. هدف از این مقاله، انجام عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی به منظور دستیابی به اطلاعات عمقی، گسترش احتمالی کانی‌سازی مگنتیت همراه کانیهای سولفیدی و گسترش ذخایر و توده‌های نفوذی احتمالی مولد کانی‌سازی، در محدوده معدن فیروزه نیشابور است.

#### روش مطالعه

- \_ پردازش داده‌های ماهواره‌های ASTER به منظور شناسایی زون-های آلتراسیون و کانی‌سازی.
- \_ برداشت و مطالعه تعداد ۲۵۰ مقطع میکروسکوپی شامل تعداد ۱۹۶ مقطع نازک و صیقلی از بخش‌های سطحی منطقه و تعداد ۵۴ مقطع نازک و صیقلی از تونل‌های معدن شامل تونل اصلی، غاردم و زاک.
- \_ تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون و کانی‌سازی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ از سطح و مقیاس ۱:۲۰۰ از تونل‌ها

پاسخ زمین فیزیکی ذخایر منفرد IOCG در المپیک دم (Esdale et al., 2003)، پرومیننت هیل (Hart and Freeman, 2003)، کاراپاتینا (Vella and Cawood, 2012) و ویرداول (Vella, 1997) بررسی شده است. (Smith, 2012). پاسخ زمین فیزیکی انواع کانی‌سازی‌های وسیع مرتبط با IOCG را بحث کرده، Austin and Foss (2012) پاسخ زمین فیزیکی تعداد زیادی از IOCG‌های مناطق گاولر و مونت‌آیزا (مناطق با پتانسیل IOCG در استرالیا) از نظر پنج مشخصه بزرگی، درصد آهن، عمق از سطح، محتوای مگنتیت نسبت به هماتیت و نسبت کونیکزبرگر (باقیمانده/ القا) مدلسازی کرده و (Gaw, et al. 1993) تفسیر زمین‌شناسی و آلتراسیون در رسوبات منطقه استوآرت شلف را با استفاده از داده‌های مغناطیس و گرانی ارایه کرده است. پاسخ زمین فیزیکی ناحیه المپیک دم و مونت‌وودز با ناهنجاری مغناطیسی و گرانی بالا که مناسب برای اکتشاف است، مشخص می‌شود (Smith, 2002).

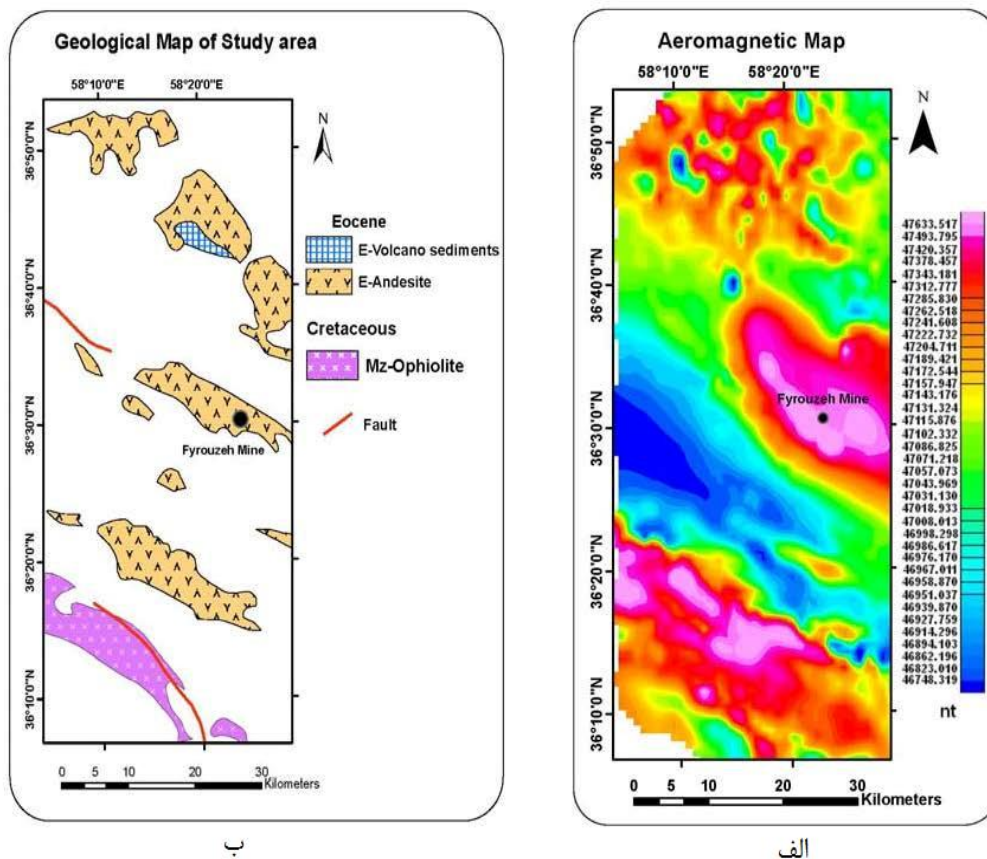
بر اساس نظر کریم پور و همکاران (۱۳۹۰)، ناهنجاری مغناطیسی ناحیه‌ای منطبق بر کمربند آتشفشانی شمال غرب نیشابور وجود دارد که قسمتی از آن بر روی معدن فیروزه واقع می‌شود (شکل ۲). ناهنجاری مغناطیسی هوایی در ناحیه یاد شده در جهت شرقی- غربی ۱۵ کیلومتر و

اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی ۱۲۸ نمونه بر روی رخنمون‌های سنگی مختلف منطقه با استفاده از دستگاه پذیرفتاری سنج مدل GMS2 با دقت  $10^{-5} \times 1$ ، ساخت شرکت سینترکس کانادا.

ترسیم نمودارهای پذیرفتاری مغناطیسی و تعبیر و تفسیر آنها.

انجام اصلاحات، پردازش داده‌های مغناطیسی سنجی و تهیه نقشه‌های شدت کل میدان مغناطیسی، انتقال به قطب، مشتق قائم اول و فراسو و تعبیر و تفسیر آنها.

تعداد ۲۷۹۸ نقطه برداشت مغناطیس‌سنجی زمینی، در قالب پروفیل‌هایی با فواصل ۵۰ متر، با امتداد شرقی- غربی و با فواصل ایستگاهی ۱۰ متر با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج نوع پروتون چرخشی مدل Geometrics G856 با دقت ۰/۱ گاما ساخت شرکت زمین متریکس آمریکا، انجام شد.

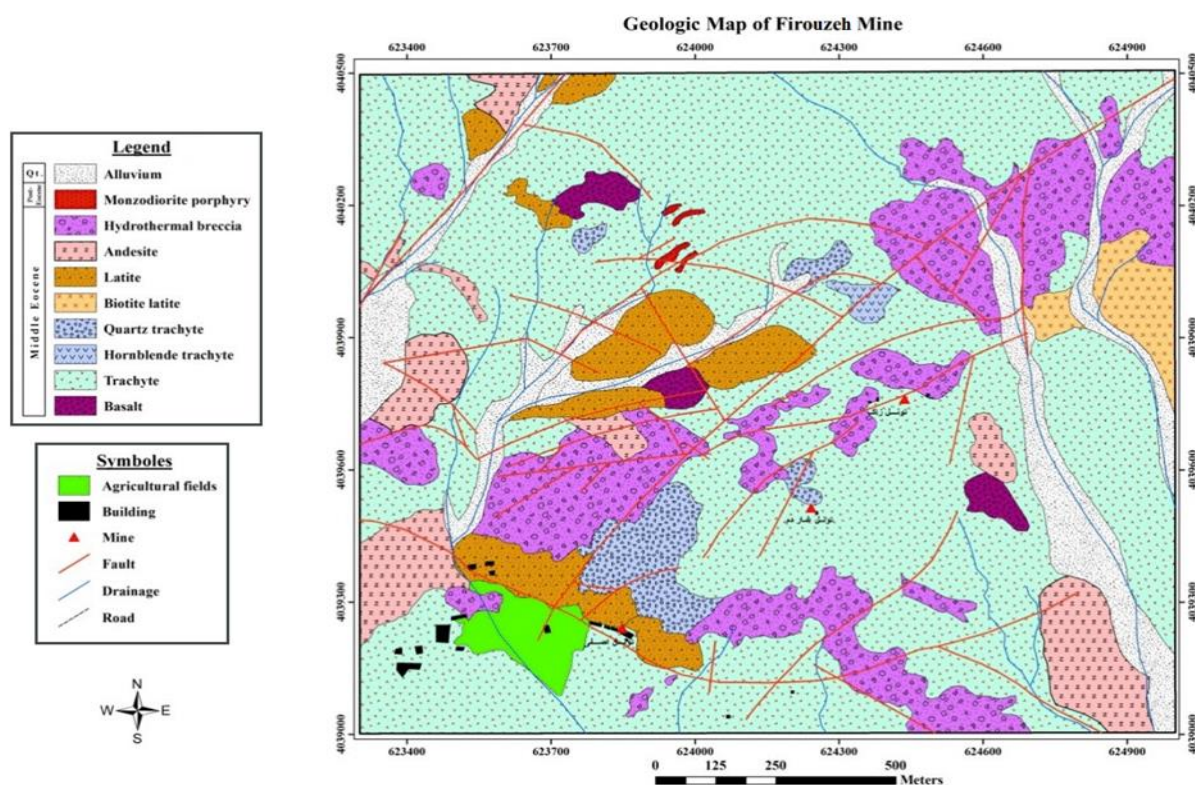


شکل ۲. الف) نقشه مغناطیس‌سنجی هوایی در منطقه شمال غرب نیشابور در مقایسه با نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای، ب) واحدهای آذرین منطقه شمال غرب نیشابور (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۰)

نیشابور را می‌توان به سه بخش واحدهای آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق و برش تقسیم کرد (شکل ۳). سنگ‌های آتشفشانی، بخش زیادی از منطقه را به خود اختصاص داده‌اند و سن نسبی آنها بر اساس نقشه زمین‌شناسی سلطان‌آباد (اکرمی و عسگری، ۱۳۷۹) به ائوسن نسبت داده شده است. این واحدها شامل تراکیت، کوآرتز تراکیت، هورنبلند تراکیت، آندزیت، لاتیت، بیوتیت لاتیت، بازالت و برش است که از این میان، تراکیت بیشترین گسترش را در منطقه دارد (شکل ۳). بافت این سنگ‌ها پورفیری و زمینه آنها عمدتاً دانه‌ریز و با بافت تراکیتی است. واحدهای آتشفشانی تحت تأثیر آلتراسیون‌های مختلفی قرار گرفته‌اند.

**زمین‌شناسی منطقه**

ناحیه مورد مطالعه در گوشه شمال شرقی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان‌آباد (اکرمی و عسگری، ۱۳۷۹) و از نظر ساختاری در بخش غربی زون بینالود قرار دارد. حجم عمده سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه، ولکانیک‌های دوران سوم هستند که عمدتاً به صورت گدازه و آذرآواری و به مقدار بسیار کم به صورت توده‌های نیمه‌عمیق در سطح دیده می‌شود. از نظر سنی، سنگ‌های ولکانیکی مذکور از جنوب به شمال جوانتر می‌شوند (Baumann et al., 1983). بر اساس مطالعات و بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی واحدهای سنگی عمده منطقه معدن فیروزه

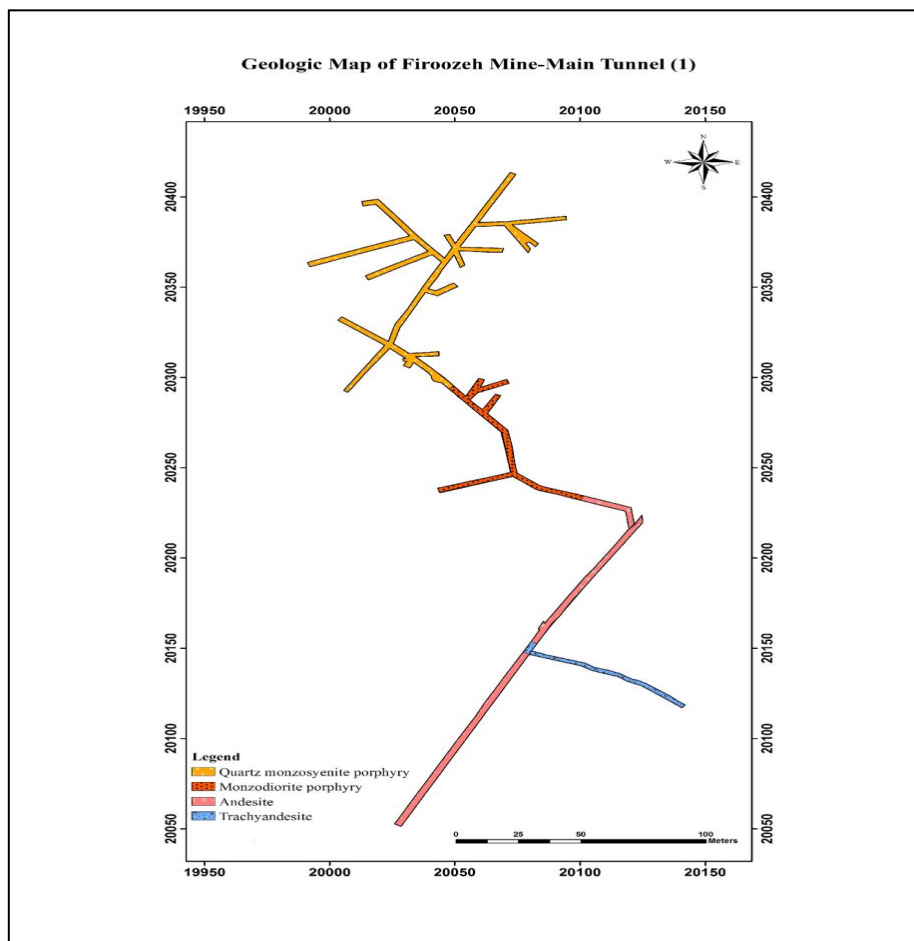


شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی محدوده معدن فیروزه نیشابور

حضور دارند. توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق با ترکیب کوارتز مونزونوسینیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری در تونل غارسبز که بخشی از تونل اصلی است و در بخش غربی آن قرار دارد، رخنمون دارند (شکل ۴) و این واحدها در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده که بر این اساس، سن نسبی آنها بعد از ائوسن می‌باشد. بافت این سنگ‌ها، پورفیری با زمینه دانه متوسط بعضاً تراکیتی است. کانی‌های درشت بلور شامل آلکالی‌فلدسپات و پلاژیوکلاز و زمینه سنگ را کانی‌های فلدسپات، کوارتز، اپک و کانی‌های ثانویه تشکیل می‌دهند. کانی‌های ثانویه عمدتاً شامل کانی‌های رسی، کوارتز و اکسیدهای آهن است. لازم به ذکر است که در فاصله بیش از دو کیلومتری واقع در غرب این توده، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق با ترکیب مونزونیت پورفیری و هورنبلند مونزونیت پورفیری رخنمون دارند. واحدهای سنگی رخنمون یافته در تونل زاک معدن فیروزه عمدتاً شامل سنگ‌های آتشفشانی است. این سنگ‌ها عمدتاً شامل آندزیت، تراکی‌آندزیت و تراکی‌لاتیت است که از این میان، واحد تراکی‌آندزیت بیشترین گسترش را در این تونل دارد. بافت این سنگ‌ها پورفیری و زمینه آنها عمدتاً دانه‌ریز و با بافت تراکیتی است. کانی‌های درشت بلور شامل آلکالی‌فلدسپات و پلاژیوکلاز و زمینه سنگ را کانی‌های فلدسپات، کوارتز، اپک و کانی‌های ثانویه تشکیل می‌دهند. کانی‌های ثانویه شامل کانی‌های رسی، کربناتی، کوارتز و اکسیدهای آهن است.

توده نفوذی نیمه‌عمیق با ترکیب مونزودیوریت پورفیری در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه رخنمون کمی دارد که در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده که بر این اساس، سن نسبی آن بعد از ائوسن است (شکل ۳). بافت این سنگ، پورفیری با زمینه دانه متوسط بعضاً تراکیتی است. کانی‌های سنگ شامل فلدسپار (با فراوانی ۵۰ تا ۵۵ درصد و ابعاد ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر)، پلاژیوکلاز (با فراوانی ۳۵ تا ۴۰ درصد و ابعاد ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر) و کوارتز (با فراوانی ۱ درصد و ابعاد ۰/۲ میلی‌متر) است. این واحد تحت تأثیر آلتراسیون سیلیسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در فاصله چهار کیلومتری واقع در شرق این توده، توده نفوذی نیمه‌عمیق با همین ترکیب (مونزودیوریت پورفیری) رخنمون دارد.

در حال حاضر استخراج از معدن فیروزه نیشابور به صورت زیرزمینی و در سه تونل به نام‌های تونل اصلی، تونل غاردم و تونل زاک انجام می‌شود. واحدهای سنگی رخنمون یافته در تونل اصلی معدن فیروزه را می‌توان به واحدهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق تقسیم کرد. سنگ‌های آتشفشانی، بخش زیادی از تونل اصلی معدن فیروزه را به خود اختصاص داده‌اند. این واحدها شامل تراکی‌آندزیت و آندزیت هستند که از این میان، آندزیت بیشترین گسترش را دارد (شکل ۴). بافت این سنگ‌ها پورفیری و زمینه آنها عمدتاً دانه‌ریز و با بافت تراکیتی است. عمدتاً کانی‌های درشت بلور شامل پلاژیوکلاز با فراوانی بیشتر و آلکالی‌فلدسپات با فراوانی کمتر



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی بخشی از تونل اصلی معدن فیروزه نیشابور

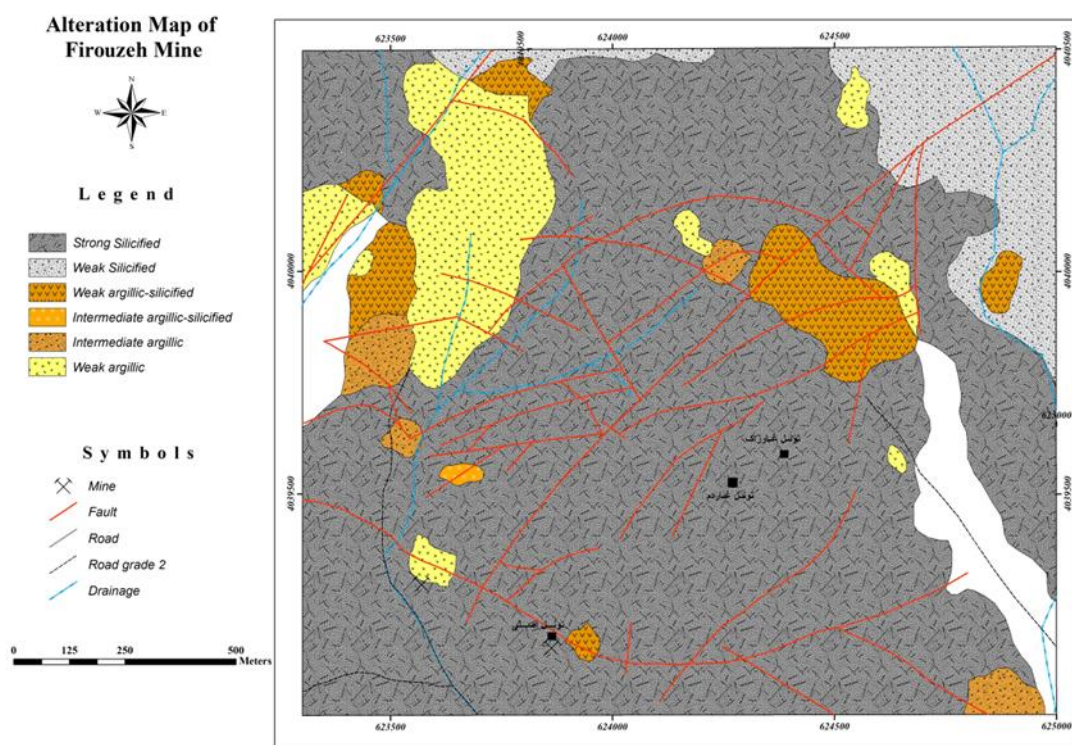
## آلتراسیون

در محدوده معدن فیروزه، سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق و مجموعه برش به شدت تحت تأثیر آلتراسیون‌های سیلیسی شدید، سیلیسی ضعیف، آرژیلیک با شدت متوسط، آرژیلیک با شدت ضعیف، آرژیلیک با شدت متوسط-سیلیسی، آرژیلیک با شدت ضعیف-سیلیسی قرار گرفته‌اند. بیشترین گسترش آلتراسیون مربوط به آلتراسیون سیلیسی است که تقریباً کل منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد و در واقع منطبق بر زون گوسان است و کمترین گسترش آلتراسیون مربوط به آلتراسیون آرژیلیک با شدت متوسط-سیلیسی است که تنها در بخش جنوب غربی منطقه مورد مطالعه رویت می‌شود (شکل ۵).

- **آلتراسیون سیلیسی شدید:** این زون در بخش زیادی از محدوده معدن فیروزه گسترش دارد (شکل ۵). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این آلتراسیون تیره‌رنگ، خشن و صخره‌ساز شده‌اند. واحدهای تراکیت، لاتیت، هورنبلندتراکیت، کوارتزتراکیت، بازالت، برش گرمایی و مونوزودیوریت پورفیری تحت تأثیر این آلتراسیون قرار گرفته‌اند. کانی‌های اصلی این

آلتراسیون شامل کوارتز ثانویه است و کانی‌های رسی و کربناتی به عنوان کانی‌های فرعی هستند. کوارتز ثانویه به صورت پراکنده و رگچه‌ای در نمونه‌های سنگی دیده می‌شود. شدت این آلتراسیون در این سنگ‌ها بیش از ۵۰ درصد است. این آلتراسیون با کانی‌سازی اکسیدی (مگنتیت، اسپیکیولاریت و هماتیت) و سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت و بورنیت) همراه است.

- **آلتراسیون سیلیسی ضعیف:** این آلتراسیون در شمال شرق و شمال محدوده معدن فیروزه نیشابور گسترش دارد (شکل ۵). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این آلتراسیون تیره‌رنگ، خشن و صخره‌ساز شده‌اند. واحدهای لاتیت، بیوتیت‌لاتیت، تراکیت و برش گرمایی تحت تأثیر این آلتراسیون قرار گرفته‌اند. کانی‌های اصلی این آلتراسیون شامل کوارتز ثانویه است و کانی‌های رسی و کربنات به عنوان کانی‌های فرعی هستند. کوارتز ثانویه به صورت پراکنده و رگچه‌ای در نمونه‌های سنگی قابل مشاهده است. شدت این آلتراسیون در این سنگ‌ها کمتر از ۳۰ درصد است. این آلتراسیون با کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت همراه است.



شکل ۵. نقشه آلتراسیون منطقه معدن فیروزه نیشابور

قرار گرفته‌اند. کانی‌های اصلی این آلتراسیون شامل کانی‌های رسی و کوارتز ثانویه است. شدت این آلتراسیون در این سنگ‌ها بین ۳۰ تا ۵۰ درصد است. در این آلتراسیون آلکالی فلدسپات‌ها و پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند.

**-آلتراسیون آرژیلیک با شدت ضعیف- سیلیسی:** این آلتراسیون در بخش کوچکی از شرق و غرب محدوده معدن فیروزه نیشابور گسترش دارد (شکل ۵). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این آلتراسیون رنگ خاکستری روشن و ظاهری تپه ماهوری دارند. واحدهای تراکیت، لاتیت، اندزیت، هورنبلندتراکیت و برش هیدروترمال تحت تأثیر این آلتراسیون قرار گرفته‌اند. کانی‌های اصلی این آلتراسیون شامل کانی‌های رسی و کوارتز ثانویه است. در این آلتراسیون آلکالی فلدسپات‌ها و پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. شدت این آلتراسیون در این سنگ‌ها کمتر از ۳۰ درصد است. با کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت همراه است.

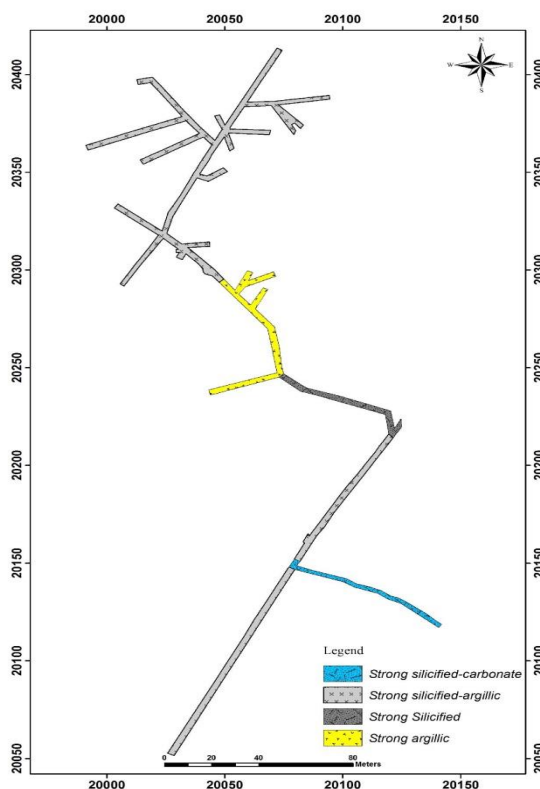
سنگ‌های آتشفشانی در تونل اصلی به شدت تحت تأثیر آلتراسیون سیلیسی شدید، سیلیسی شدید-آرژیلیک و سیلیسی شدید-کربناتی بوده‌اند (شکل ۶). در تونل اصلی توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق نیز تحت تأثیر آلتراسیون‌های سیلیسی شدید-آرژیلیک و آرژیلیک شدید قرار گرفته‌اند. واحد آندزیتی درون تونل غاردم به شدت تحت تأثیر آلتراسیون سیلیسی بوده و سنگ‌های آتشفشانی در تونل غارزاک تحت تأثیر آلتراسیون‌های سیلیسی شدید-آرژیلیک، سیلیسی شدید و آرژیلیک قرار گرفته‌اند.

**-آلتراسیون آرژیلیکی با شدت متوسط:** این آلتراسیون در بخش‌های غرب و جنوب شرق محدوده معدن فیروزه نیشابور گسترش دارد (شکل ۵). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این آلتراسیون رنگ روشن و ظاهری تپه ماهوری دارند. واحدهای سنگی لاتیت، اندزیت و تراکیت تحت تأثیر این آلتراسیون قرار گرفته‌اند. کانی‌های اصلی این آلتراسیون شامل کانی‌های رسی و ژاروسیت و کوارتز ثانویه نیز به عنوان کانی فرعی است. در این آلتراسیون آلکالی فلدسپات‌ها و پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. شدت این آلتراسیون در این سنگ‌ها بین ۳۰ تا ۵۰ درصد است. این آلتراسیون با کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت همراه است.

**-آلتراسیون آرژیلیک با شدت ضعیف:** این آلتراسیون در شمال غرب و بخش کوچکی از شرق محدوده معدن فیروزه نیشابور گسترش دارد (شکل ۵). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این آلتراسیون رنگ خاکستری روشن و ظاهری تپه ماهوری دارند. واحدهای تراکیت، بازالت، لاتیت و اندزیت تحت تأثیر این آلتراسیون قرار گرفته‌اند. کانی‌های اصلی این آلتراسیون، کانی‌های رسی‌اند و کوارتز ثانویه به عنوان کانی فرعی است. در این آلتراسیون آلکالی فلدسپات‌ها و پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. شدت این آلتراسیون در این سنگ‌ها کمتر از ۳۰ درصد است. این آلتراسیون با کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت همراه است.

**-آلتراسیون آرژیلیک با شدت متوسط- سیلیسی:** این آلتراسیون در بخش کوچکی از شمال غرب تونل اصلی واقع در غرب محدوده معدن فیروزه نیشابور گسترش دارد (شکل ۵). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این آلتراسیون رنگ خاکستری روشن و ظاهری تپه ماهوری دارند. واحدهای تراکیت و برش گرمایی تحت تأثیر این آلتراسیون

Alteration Map of Firoozeh Mine - Main Tunnel (I)



شکل ۶. نقشه آلتراسیون بخشی از تونل اصلی معدن فیروزه نیشابور

### کانه‌زایی محدوده معدن فیروزه نیشابور

کانه‌زایی در محدوده معدن فیروزه نیشابور را می‌توان به دو زون هیپوزن و سوپرژن تقسیم کرد. این کان‌زایی به اشکال استوک‌ورک، رگه-رگچه‌ای، افشان و برش گرمایی به صورت اولیه و ثانویه در سطح منطقه و تونل‌های معدن فیروزه رخ داده است.

#### - کان‌زایی اولیه:

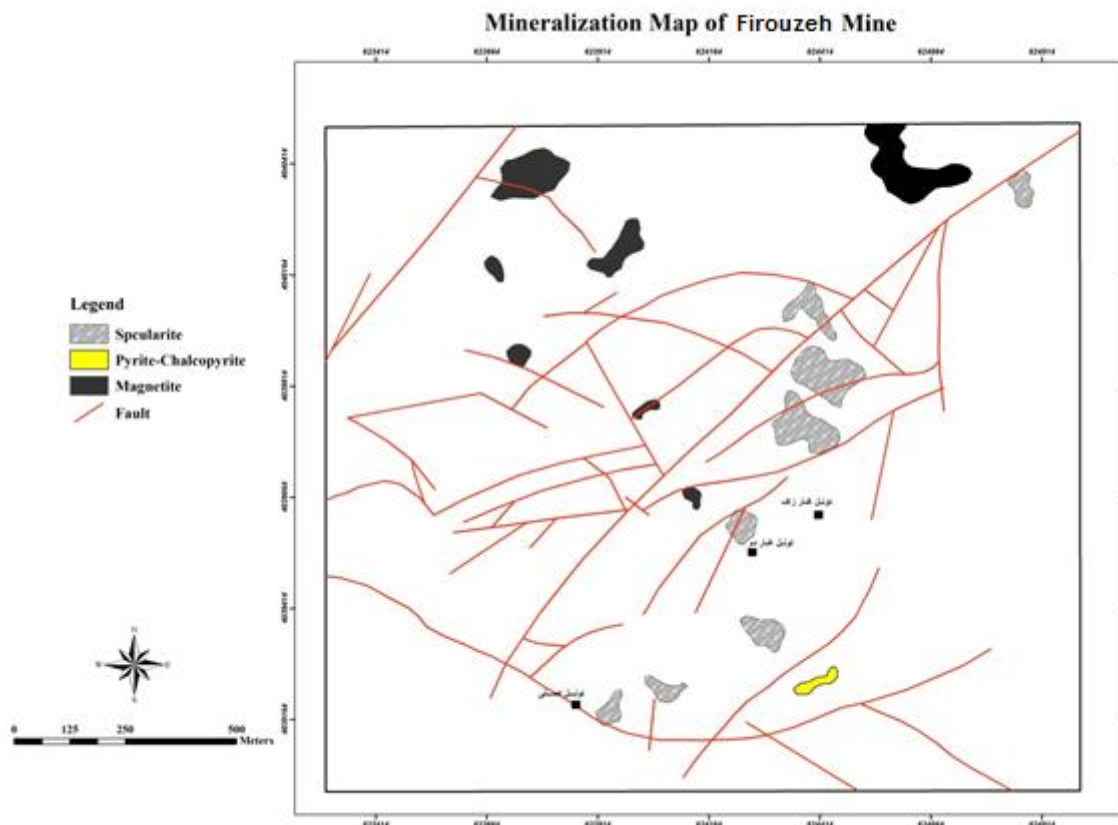
کان‌سازی اولیه به صورت استوک‌ورک، افشان و برش گرمایی است و شامل اسپکیولاریت، مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت است که در بخش‌های جنوبی، مرکزی و شمالی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود (شکل ۷). کان‌سازی استوک‌ورک در سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های نیمه‌عمیق و برش‌ها و با آلتراسیون‌های سیلیسی، آرژیلیک و کربناتی دیده می‌شود. ضخامت رگچه‌ها بعضاً تا ۶ میلی‌متر رویت شد. در محل‌هایی که گسلس بیشتر است، تراکم رگچه‌ها زیاد و تا ۵۰ رگچه در مترمربع می‌رسد. کان‌سازی افشان در محدوده معدن فیروزه به وفور حضور دارد و در واحدهای آتشفشانی، توده‌های نیمه‌عمیق و برش‌ها قابل رویت است. برش گرمایی در بخش‌های جنوبی، مرکز، جنوب‌غربی تا شمال‌شرقی منطقه مشاهده می‌شود که بخش زیادی را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳). این برش که نوعی کان‌سازی است شامل قطعاتی از سنگ‌های تراکیتی در سیمانی از سیلیس همراه با کان‌های سولفیدی-اکسیدی است که به دلیل حضور اکسیدهای آهن عمدتاً قرمز تا قرمز قهوه‌ای هستند.

وجود رگچه‌های اسپکیولاریت شرایط اکسیداسیونی بالای محلول کان‌دار را اثبات می‌کند. عمده کان‌سازی در سطح منطقه با دگرسانی سیلیسی و آرژیلیک همراه است که درون واحدهای تراکیت، برش هیدروترمالی و مونزودیوریت پورفیری دیده می‌شوند. گسلس و درزه و شکستگی‌ها از عوامل مهم کنترل‌کننده کان‌زایی در منطقه است. به دلیل وجود کان‌سازی در توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق، این توده‌ها می‌توانند یکی از منشاءهای احتمالی کان‌سازی در منطقه باشند.

کان‌سازی سولفیدی و اکسیدی در بخش‌های مختلف تونل اصلی دیده می‌شود. کان‌سازی اولیه شامل مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت و بورنیت است. عمده کان‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید و آرژیلیک شدید و کربناتی همراه است که درون واحدهای آندزیت، کوارتز مونزوسینیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری دیده می‌شوند. کان‌سازی عمده اولیه قابل رویت در تونل غاردم شامل مگنتیت و آلونیت است. کان‌سازی مگنتیت اغلب به صورت غیرقابل تفکیک از هماتیت در تمامی تونل دیده می‌شود. عمده کان‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید همراه است که درون واحد آندزیت دیده می‌شود. کان‌سازی آلونیت به صورت رگه-رگچه‌ای بعضاً تا ۳ سانتی‌متر ضخامت در این تونل دیده می‌شود. کارگران شاغل در تونل‌ها از این لایه به عنوان پی و نشانگر حضور فیروزه نام می‌برند، در واقع، رگه-رگچه‌های آلونیت کلید اکتشافی برای فیروزه در تونل‌های معدن هستند. آلونیت که در بیشتر قسمت‌ها در

مگنتیت، اسپیکولاریت، پیریت، کالکوپیریت و بورنیت است. عمده کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید و آرژیلیک همراه است که درون واحدهای تراکی آندزیت، آندزیت و تراکی لاتیت دیده می‌شوند.

حاشیه پائینی فیروزه به صورت رگه‌ای است، در اثر عمل آلونیتیزاسیون یعنی تشکیل آلونیت از سیلیکات‌های آلومین دار سنگ‌های آتشفشانی با تأثیر اسید سولفوریک ایجاد شده است. پاراژنز فیروزه و آلونیت، تشکیل فیروزه را به خرج آلونیت تأیید می‌کند. کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی در بخش‌های مختلف تونل غارزاک نیز دیده می‌شود. کانی‌سازی اولیه شامل



شکل ۷. نقشه کانی‌سازی محدوده معدن فیروزه

در زون اکسیدان می‌تواند نشانگر مقدار زیاد کانی‌های سولفیدی در منطقه، البته در اعماق باشد.

تونل‌ها عمدتاً به صورت دنبال رگه، فیروزه را دنبال کرده‌اند و روند اصلی تونل منطبق بر گسل اصلی محدوده با روند شمال شرق- جنوب غرب است. عمده کانی‌سازی قابل رویت فعلی از فیروزه صرفاً در انتهای چاه آبدار واقع در بخش شرقی تونل اصلی و نیز در تونل غارسبز واقع در بخش غربی تونل اصلی رخنمون دارند. از عوامل کنترل کننده مهم کانه‌زایی فیروزه، گسلش و درزه و شکستگی‌ها است. کانی‌سازی عمده ثانویه قابل رویت در تونل غاردم شامل هماتیت و فیروزه است. کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید همراه است که درون واحد آندزیت دیده می‌شود.

کانی‌سازی ثانویه در تونل غارزاک عمدتاً شامل فیروزه و اکسیدهای آهن مانند هماتیت است. عمده کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید و آرژیلیک همراه است که درون واحدهای تراکی آندزیت، آندزیت و تراکی لاتیت دیده می‌شوند.

#### – کانه‌زایی ثانویه

کانی‌سازی ثانویه در محدوده معدن فیروزه نیشابور شامل فیروزه، آلونیت، کولیت و اکسیدهای آهن از جمله هماتیت و لیمونیت است. عمده این کانی‌سازی با دگرسانی سیلیسی و آرژیلیک همراه است که درون واحدهای تراکیت و برش هیدروترمالی دیده می‌شود. فیروزه هر جا در سطح دیده می‌شده، استخراج شده، ولی اکسیدهای آهن با فراوانی بیشتری در سطح منطقه مورد مطالعه قابل رویت است.

کانی‌سازی ثانویه در تونل اصلی عمدتاً شامل فیروزه، کولیت و اکسیدهای آهن مانند هماتیت است. عمده کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید، آرژیلیک شدید و کربناتی همراه است که درون واحدهای آندزیت، تراکی آندزیت، کوارتزموزنوسینیت پورفیری و مونوزودیوریت پورفیری دیده می‌شوند. کانی‌سازی اکسید آهن در تمامی تونل اصلی رخ داده ولی کانی‌سازی سولفیدی صرفاً در بخش‌های ۴۰۰ و ۵۰۰ متری از تونل اصلی به خوبی قابل رویت است. مقدار زیاد اکسید آهن



مگنتیت در نتیجه آلتراسیون شدید منطقه است. اما، هر چه از منطقه آلتراسیون شدید دورتر می‌شویم، پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های سطحی منطقه بیشتر است.

همان‌طور که ذکر شد، بر اساس IGRF، شدت میدان مغناطیسی اصلی در منطقه مورد مطالعه در طول مدت برداشت‌ها، ۴۹۳۵۰ گاما بوده است. بنابراین، مقادیر بالاتر از این مقدار ناهنجاری محسوب می‌شوند. بر پایه گزارش پایگاه مغناطیس‌سنجی مؤسسه ژئو فیزیک دانشگاه تهران و مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی و اتمسفری آمریکا، تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از فعالیت‌های خورشیدی در طول مدت زمان برداشت آرام و ناچیز بوده است.

پس از انجام تصحیحات روزانه بر روی داده‌های حاصل از مغناطیس‌سنجی زمینی، نیمرخ شدت کل میدان مغناطیسی مربوط به پروفیل‌های برداشت، بدون کسر میدان اصلی ترسیم و مورد مقایسه قرار گرفت. با مقایسه نمودارهای شدت کل میدان مغناطیسی، به طور نسبی عمیق یا کم عمق بودن منبع آنومالی را می‌توان دریافت. بدین شرح که در محل‌هایی که میزان پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های سطحی و شدت کل میدان مغناطیسی بالا است، منبع آنومالی به سطح نزدیک و در جاهایی که پذیرفتاری پایین و شدت کل میدان مغناطیسی بالا است، عمق منبع آنومالی بیشتر می‌باشد (حیدریان شهری، ۱۳۸۴). در پروفیل‌های انتخاب شده در هر نمودار پیک‌هایی مشاهده می‌شوند که مربوط به مقادیر بالای شدت کل میدان مغناطیسی در روی این پروفیل‌ها می‌باشد. با توجه به میزان شدت کل میدان مغناطیسی و فواصل مشخص شده بر روی این پروفیل‌ها می‌توان محل و گسترش آنومالی‌های مورد نظر را مشخص نمود. شرح پروفیل‌های P8 و P9 برای نمونه در زیر آمده است.

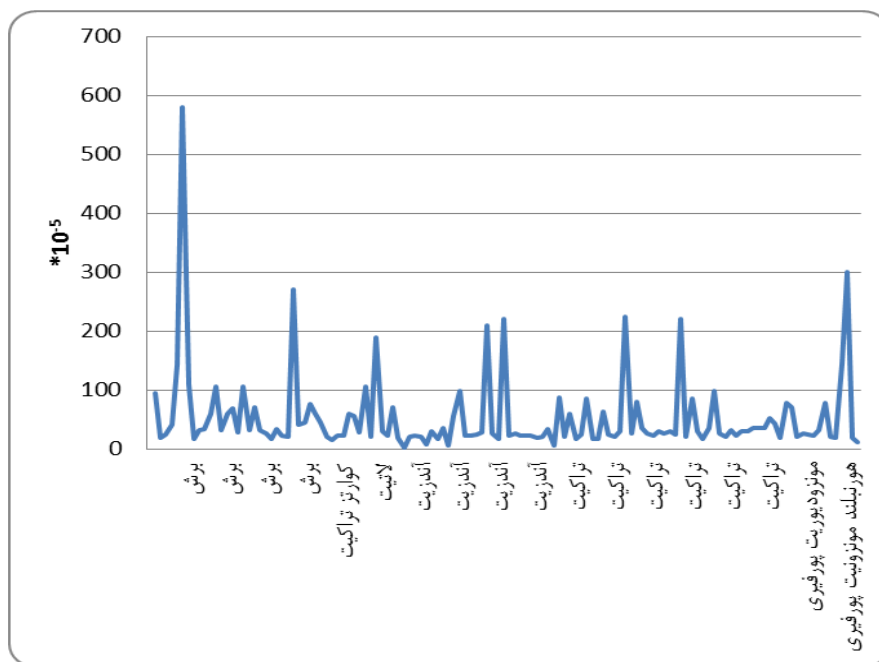
پروفیل P8 با راستای شرقی-غربی (E-W)، به طول ۱۰۰۰ متر در ۱۰۱ نقطه و از شرق به غرب برداشت شده است (شکل ۱۰). شدت کل میدان مغناطیسی در این پروفیل بین ۴۹۳۹۵ تا ۵۰۷۸۴ گاما متغیر است. شدت کل میدان مغناطیسی از نقطه P8P343 تا P8P303 به سمت شرق، دامنه‌ای از ۵۰۰۰۰ تا ۵۰۷۸۰ گاما را نشان می‌دهد. با مقایسه نیمرخ شدت میدان مغناطیسی با پذیرفتاری‌های اندازه‌گیری شده در این بخش‌ها (شکل ۹)، در قسمت شرقی، شدت میدان و پذیرفتاری تقریباً با یکدیگر هماهنگی دارند، به این معنی که هم شدت میدان و هم پذیرفتاری مغناطیسی بالا است، بنابراین، منبع آنومالی نزدیک به سطح تا عمق بالا واقع شده است. اما، در بخش غربی و میانی پروفیل، پذیرفتاری مغناطیسی و شدت میدان مقدار کمی را نشان می‌دهند، که نشان‌دهنده نبود آنومالی و یا آنومالی‌های ضعیف‌تر است. علاوه بر این، بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی در قسمت شرقی پروفیل، کانی‌سازی در سطح (شکل ۷) دیده می‌شود که خود تأییدی بر سطحی تا عمیق بودن منبع آنومالی است (شکل ۱۰).

کانی‌سازی هماتیت بعضاً همراه با مگنتیت در تمامی تونل غارزاک رخ داده ولی کانی‌سازی سولفیدی صرفاً در بخش‌های انتهایی تونل به خوبی قابل رویت است. تونل‌ها عمدتاً به صورت دنبال رگه، فیروزه را دنبال کرده‌اند و عمده کانی‌سازی قابل رویت فعلی از فیروزه نزدیک کانی‌سازی سولفیدی در بخش‌های انتهایی تونل دیده می‌شود. مهمترین کانی‌سازی اقتصادی شناخته شده در منطقه فیروزه است که همان فسفات مس و آلومینیوم آبدار است. در دنیا فیروزه نیشابور به Persian Turquoise مشهور است. این کانی در نمونه‌های دستی، در طیف رنگی از آبی روشن تا سبز آبی تا سبز، قهوه‌ای و سفید دیده می‌شود. به دلیل این که رگه‌ها و دانه‌های پراکنده فیروزه تمام کانه‌زایی‌های پیشین را قطع کرده‌اند، تشکیل فیروزه به عنوان آخرین فاز کانه‌زایی در منطقه تشخیص داده شد.

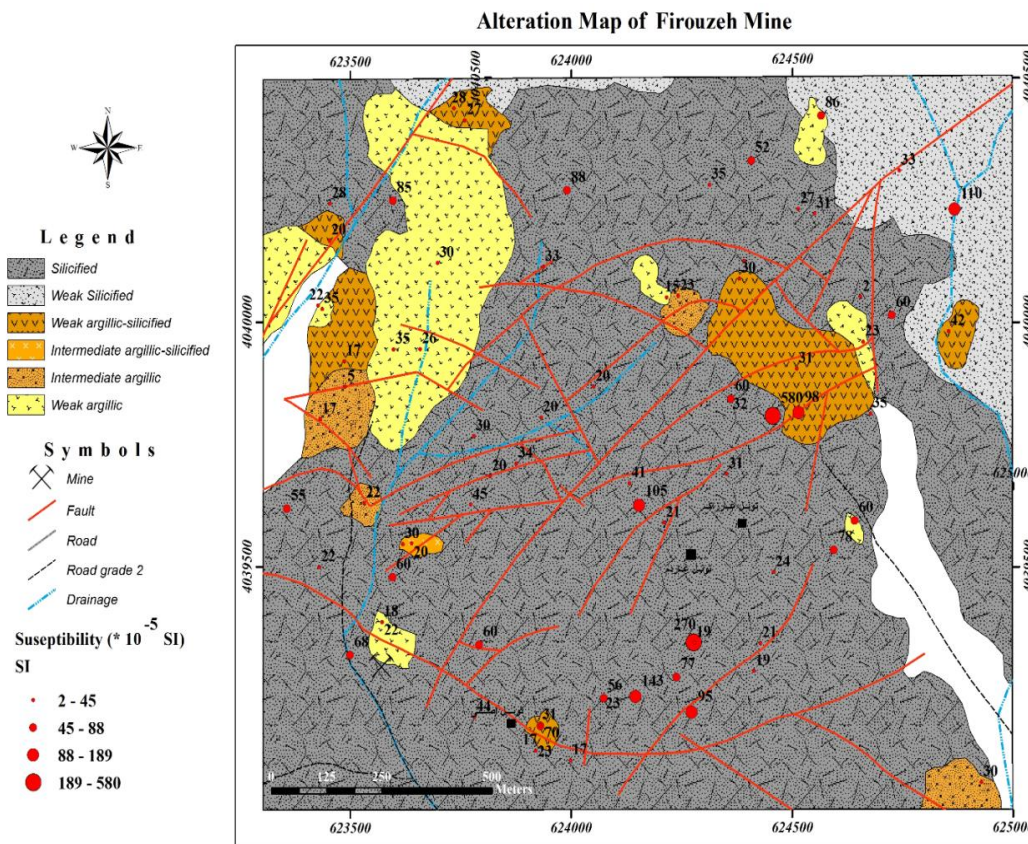
### مغناطیس‌سنجی

بررسی‌های مغناطیس‌سنجی زمینی در منطقه معدن فیروزه نیشابور در دو مرحله برداشت‌های صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفت. برداشت مغناطیس‌سنجی با پروفیل‌هایی عمود بر واحدهای زمین‌شناسی منطقه طراحی گردید. تعداد ۲۷۹۸ نقطه برداشت مغناطیس‌سنجی زمینی در قالب پروفیل‌هایی با فواصل ۵۰ متر، با امتداد شرقی-غربی و با فواصل ایستگاهی ۱۰ متر انجام شد. بر اساس IGRF، شدت میدان مغناطیسی اصلی در منطقه مورد مطالعه در طول مدت برداشت‌ها، ۴۹۳۵۰ گاما در نظر گرفته شده است. جهت انجام تصحیحات روزانه میدان مغناطیسی، برداشت به صورت Loop با تکرار قرائت در ایستگاه مبنا در هر دو ساعت انجام گردید. مغناطیس‌سنج‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع پروتون چرخشی مدل Geometrics G856 با دقت ۰/۱ گاما ساخت شرکت زمین متریکس آمریکا بوده است. بدیهی است انتخاب روش ژئو فیزیکی مناسب و تعبیر و تفسیر صحیح نتایج آن مستلزم آگاهی دقیق از زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه است.

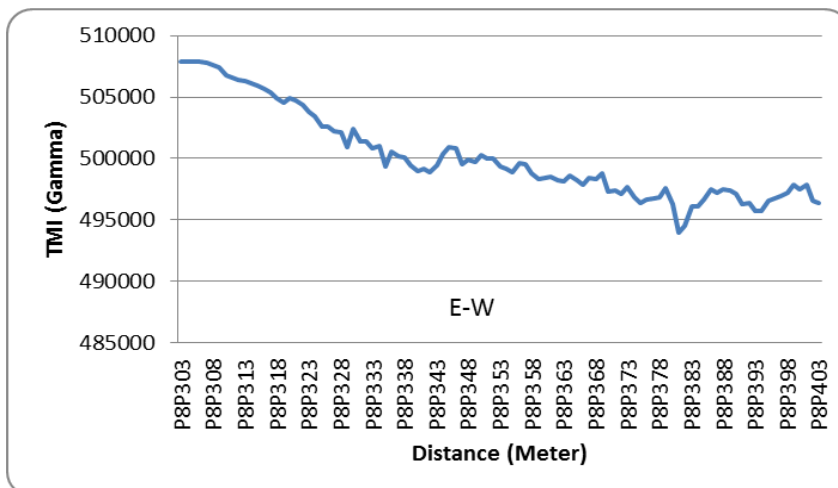
بر اساس یافته‌های Ishihara (1981) خصوصیت مغناطیسی القایی سنگ با اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی تعیین می‌شود که این مقدار در گرانیوتئیدهای سری مگنتیت (I) به دلیل وجود مگنتیت در این سنگ‌ها، بیش از  $SI \times 10^{-5}$  است. پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های منطقه اندازه‌گیری شد. دستگاه پذیرفتاری سنج مورد استفاده در این تحقیق مدل GMS2 با دقت  $SI \times 10^{-5}$ ، ساخت شرکت سینترکس کانادا و متعلق به بخش زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد است. در مجموع در ۱۴۹ نقطه پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی واحدهای غیرآلتیره، برخی از نمونه‌ها از مناطق دورتر در مقیاس ناحیه‌ای انتخاب و اندازه‌گیری شد (شکل ۸) و برخی از اندازه‌گیری‌ها نیز از رخنمون‌های سنگی درون تونل‌های معدن انجام شد. اما، آنچه در (شکل ۹) ارائه شده صرفاً نمونه‌های سطحی منطقه معدن فیروزه است. دامنه تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه‌های سطحی منطقه معدن فیروزه، از  $SI \times 10^{-5}$  تا  $SI \times 10^{-8}$  است. به دلیل آلتراسیون شدید سنگ‌های منطقه، تعداد زیادی از نمونه‌ها مقادیر کمتر از  $SI \times 10^{-5}$  را نشان می‌دهند که این موضوع به دلیل تخریب کانی‌های



شکل ۸. اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی رخنمون های سنگی ناحیه معدن فیروزه نیشابور



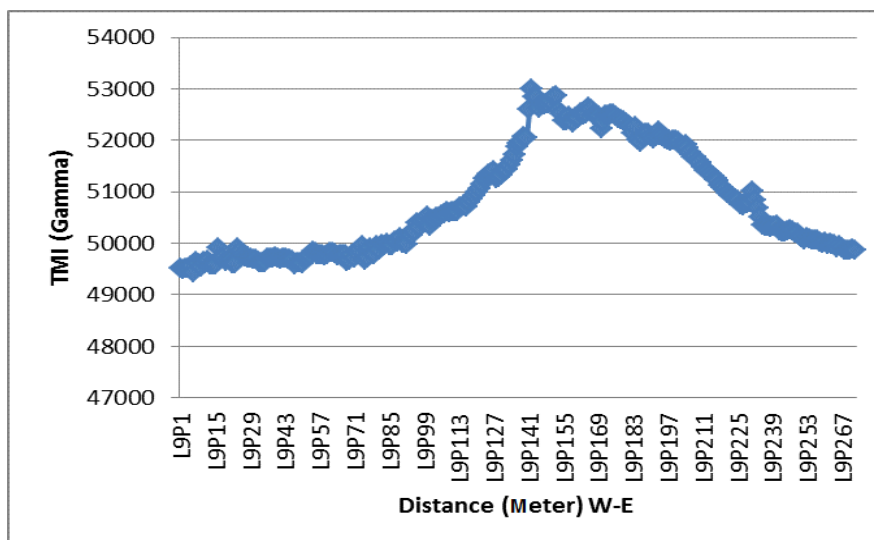
شکل ۹. اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی رخنمون های سنگی منطقه معدن فیروزه نیشابور



شکل ۱۰. نیمرخ شدت کل میدان مغناطیسی پروفیل P8

دارند، به این معنی که هم شدت میدان و هم پذیرفتاری مغناطیسی بالا است، بنابراین، منبع آنومالی نزدیک به سطح تا عمق بالا واقع شده است. اما، در بخش میانی و غربی پروفیل و بالطبع منطقه، پذیرفتاری مغناطیسی و شدت میدان مقدار کمی را نشان می‌دهند، که نشان‌دهنده نبود آنومالی و یا آنومالی‌های ضعیف‌تر است.

پروفیل P9 با راستای W-E، به طول ۲۷۱۰ متر در ۲۷۲ نقطه و از غرب به شرق برداشت شده است (شکل ۱۱). شدت کل میدان مغناطیسی در این پروفیل بین ۴۹۴۲۳ تا ۵۳۰۰۰ گاما متغیر است. شدت کل میدان مغناطیسی از نقطه P9P901 تا P9P171 به سمت شرق، دامنه‌ای از ۵۰۰۰۰ تا ۵۳۰۰۰ گاما را نشان می‌دهد. با مقایسه نیمرخ شدت میدان مغناطیسی با پذیرفتاری‌های اندازه‌گیری شده در این بخش‌ها (شکل ۹)، در قسمت شرقی، شدت میدان و پذیرفتاری تقریباً با یکدیگر هماهنگی



شکل ۱۱. نیمرخ شدت کل میدان مغناطیسی P9

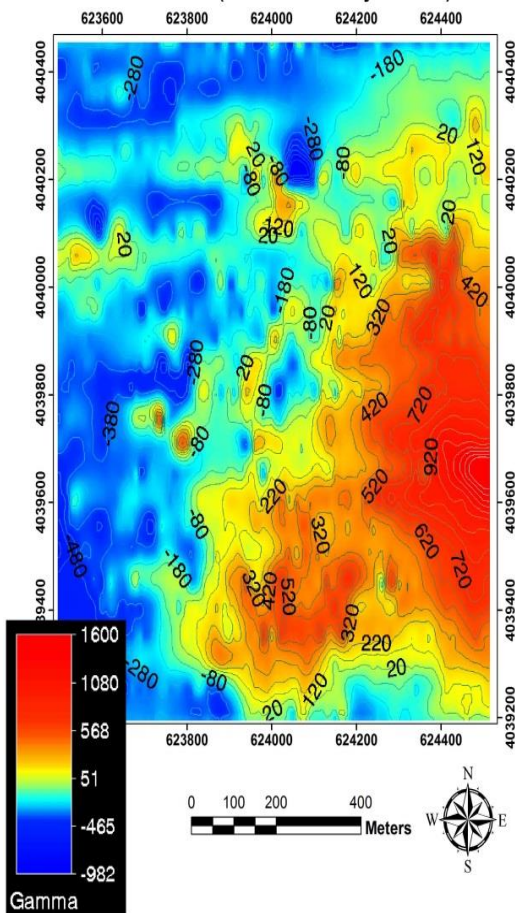
گسل اصلی منطقه است، دارای روند شمال شرقی- جنوب غربی است (شکل ۱۲). آنومالی‌های پراکنده و ضعیف دیگری که در بخش‌های دیگر محدوده مشاهده می‌شود به صورت محدود با ابعاد کوچک و شدت میدان پایین‌تر نسبت به آنومالی اصلی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۲). البته مکان واقعی این آنومالی‌ها بعد از اعمال فیلتر برگردان به قطب مشخص می‌شود، که در (شکل ۱۳) نمایش داده شده است. (شکل ۱۴)، مکان واقعی این آنومالی‌ها بعد از اعمال فیلتر برگردان به قطب در نقشه زمین شناسی منطقه معدن فیروزه نیشابور را نشان می‌دهد.

تهیه نقشه‌های مغناطیسی و به کارگیری فیلترهای مختلف برای انجام مطالعات تفصیلی‌تر توسط نرم‌افزار ER Mapper انجام گرفت. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (TMI) در منطقه معدن فیروزه به همراه روند پروفیل‌های برداشت و محل آنومالی‌ها در (شکل ۱۲) نشان داده شد. در این نقشه آنومالی‌ها به رنگ قرمز و با ابعاد مختلف بارزسازی و مشخص شده‌اند. آنومالی اصلی در بخش جنوب شرقی منطقه به شکل یک مثلث قائم الزاویه مختلف الاضلاع که ارتفاع آن تقریباً ۸۰۰ متر و قاعده آن (بخش جنوبی) ۷۰۰ متر است، دیده می‌شود. وتر این مثلث که منطبق بر

مطالعه به ترتیب ۵۵/۵۵ و ۴/۲۷ درجه به دست آمد. با بررسی نقشه انتقال یافته به قطب و مقایسه آنها با نقشه TMI میزان جابجایی آنومالی‌ها در نقشه تهیه شده، مشاهده می‌شود (شکل ۱۲). آنومالی اصلی واقع در جنوب شرقی منطقه، نسبت به نقشه TMI به سمت شمال جابجایی نشان می‌دهد و ابعاد آن تغییر زیادی ندارد. همچنین، قاعده آنومالی مثلث شکل یک انحنای به سمت شمال پیدا کرده و آنومالی‌های دیگر در بخش شمالی حذف و در بخش‌های دیگر به سمت شمال جابجا شده‌اند (شکل ۱۳).

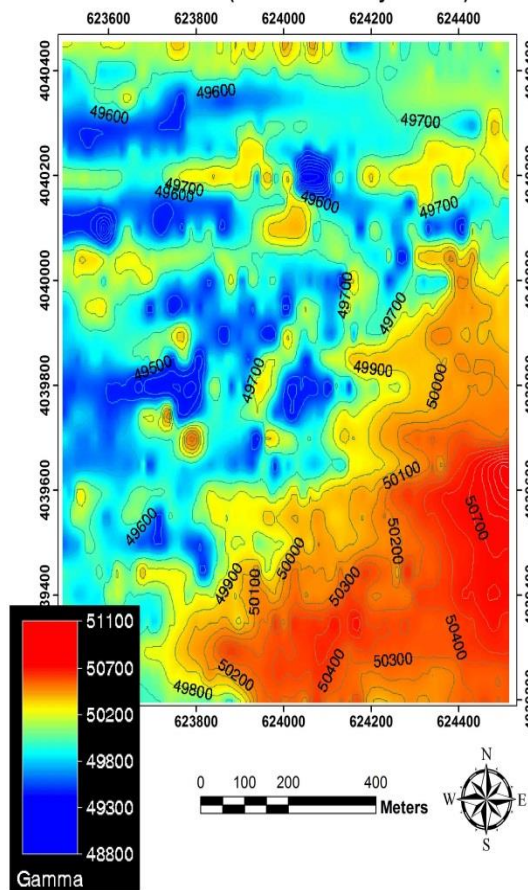
برای تهیه نقشه انتقال به قطب (Rotation to the pole) RTP، استفاده از فیلتر انتقال به قطب جهت دستیابی به محل واقعی آنومالی‌ها با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه مورد مطالعه، بایستی انجام شود (Clark, 1997). از آنجا که میل و انحراف مغناطیسی باعث می‌شود ناهنجاری‌های مغناطیسی نسبت به منبع ایجاد کننده خود انحراف داشته باشند، فیلتر RTP بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال می‌شود (شکل ۱۳). تفسیر اصلی از مجموعه داده‌های مغناطیسی بر روی داده‌های انتقال داده شده به قطب انجام می‌گیرد (Nabighian et al, 2005, Nakatsuka and Okuma, 2006). مقادیر زاویه میل و انحراف برای منطقه مورد

RTP Image with Contour and Profiles of Magnetometry  
Firouzeh Mine (Northwest of Neyshabour)



شکل ۱۳. نقشه انتقال یافته به قطب مربوط به منطقه معدن فیروزه نیشابور به همراه آنومالی‌های مشخص شده روی آن

TMI Image with Contour and Profiles of Magnetometry  
Firouzeh Mine (Northwest of Neyshabour)

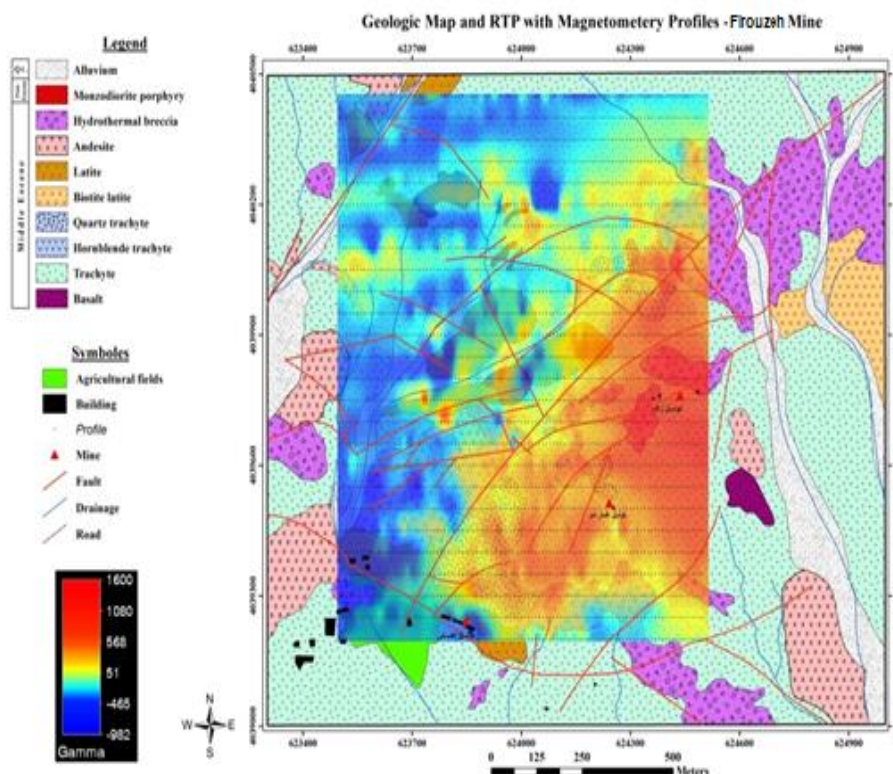


شکل ۱۲. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی و آنومالی‌های مشخص شده در منطقه معدن فیروزه نیشابور

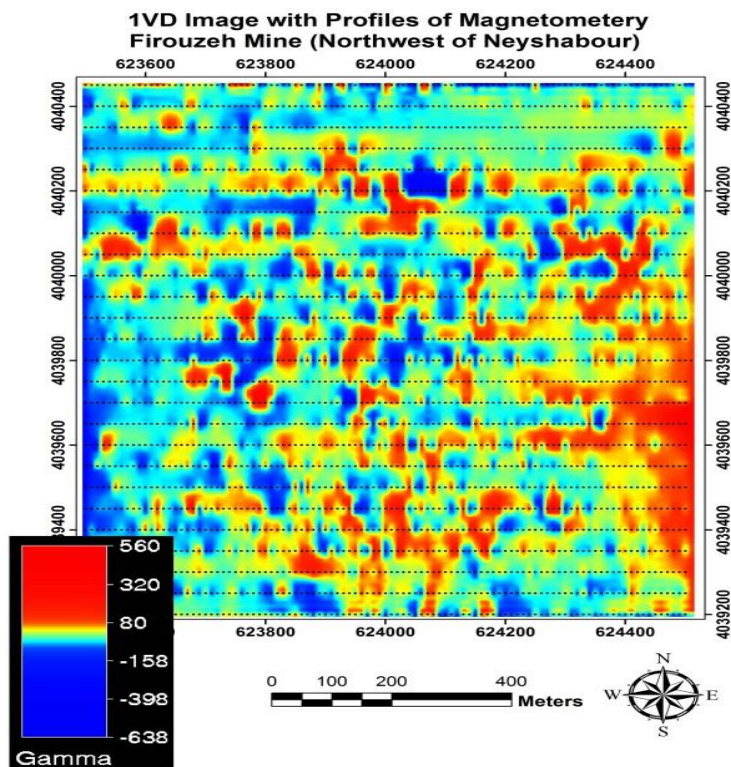
نقشه با نقشه‌های زمین‌شناسی و آلتراسیون، سطحی بودن آنومالی‌ها و حضور توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق اکسیدان و آلتراسیون ایجاد شده در این بخش‌ها، تطابق نشان می‌دهند.

برای تهیه نقشه فراسوی یا ادامه به سمت بالا (Upward continuation Map)، فیلتر ادامه به سمت بالا، مورد استفاده قرار گرفت. این فیلتر اثر آنومالی‌های سطحی با فرکانس بالا را تضعیف و به این طریق اثر ناهنجاری‌های عمیق‌تر را بهتر آشکار می‌سازد (Gunn, 1996). این نقشه‌ها برای ارتفاع‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ متر تهیه شدند که نقشه‌های ۱۰ و ۲۰۰ متر به ترتیب در (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) نمایش داده شده‌اند. در جنوب شرقی منطقه، آنومالی اصلی در ارتفاع‌های مختلف به سمت شمال شرقی نسبت به نقشه انتقال به قطب، گسترش عمقی نشان می‌دهد و با توجه به این نقشه‌ها، عمقی بودن منبع آنومالی در این آنومالی مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). گسترش عمقی آنومالی‌های پراکنده در منطقه تا اعماق ۲۰ متر ضعیف و تا عمق ۵۰ متر حذف می‌شوند (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).

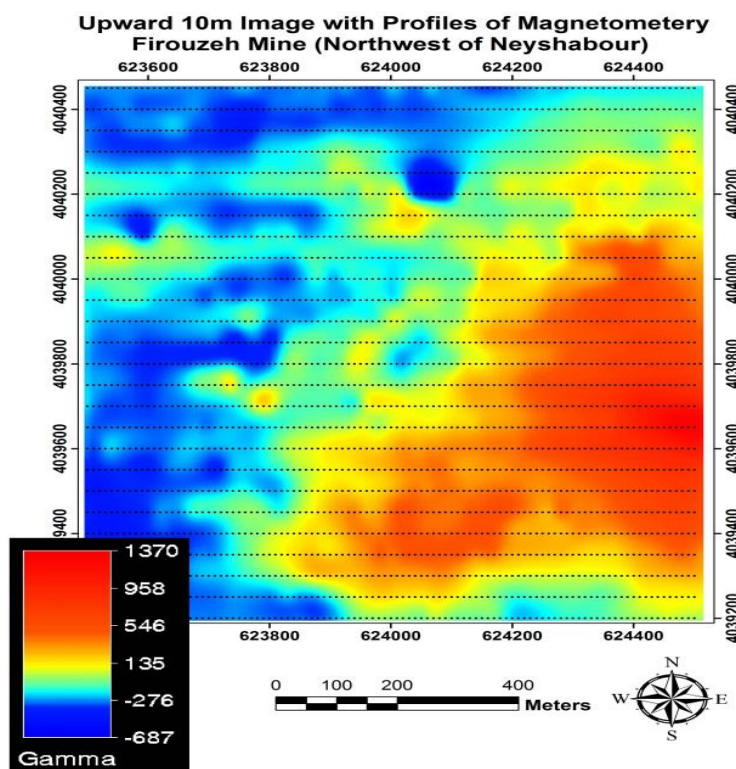
برای تهیه نقشه مشتق اول قائم (First vertical IVD derivative Map)، فیلتر مشتق اول قائم (گرادیان عمودی) اعمال می‌شود، این فیلتر اثر آنومالی‌های عمیق با فرکانس پایین را حذف کرده و تأثیر منابع کم عمق با فرکانس بالا را به نمایش در می‌آورد (Gunn, 1996). با بررسی نقشه گرادیان عمودی تهیه شده (شکل ۱۵) اثرات مغناطیسی نزدیک به سطح در محل آنومالی‌های منطقه معدن فیروزه مشاهده می‌شود. با توجه به این نقشه می‌توان گفت که عمق بالای منبع آنومالی‌ها نزدیک به سطح قرار دارد یا خیر؟ در جنوب شرقی منطقه، آنومالی اصلی به سمت شرق گسترش سطحی نشان می‌دهد و با توجه به این نقشه، سطحی بودن عمق بالای منبع آنومالی مشاهده می‌شود (شکل ۱۵). این فیلتر به طور طبیعی با نوفه (نویز) همراه است که در مسیر پروفیل‌های برداشت قابل تعقیب است، لیکن، آنجا که منابع آنومالی در سطح رخنمون دارد مانند برش‌ها و توده نفوذی، پاسخ سطحی به خوبی هم مکان با آنها قابل رویت است. همچنین، آنومالی اصلی نیز به خوبی پاسخ سطحی دارد که حاکی از آن است که منبع آنومالی اصلی از نزدیک سطح تا عمق زیاد بر اساس نقشه فراسوی تا ۲۰۰ متر ادامه دارد. آنومالی‌های دیگر به صورت پراکنده در بخش‌های دیگر به صورت ضعیف‌تر مشاهده می‌شوند و با توجه به این نقشه مشاهده می‌شود که عمق بالای منبع این آنومالی‌ها نیز نزدیک سطح است (شکل ۱۴). با مقایسه این



شکل ۱۴. نقشه انتقال یافته به قطب مربوط به منطقه معدن فیروزه به همراه آنومالی‌های مشخص شده بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه معدن فیروزه نیشابور



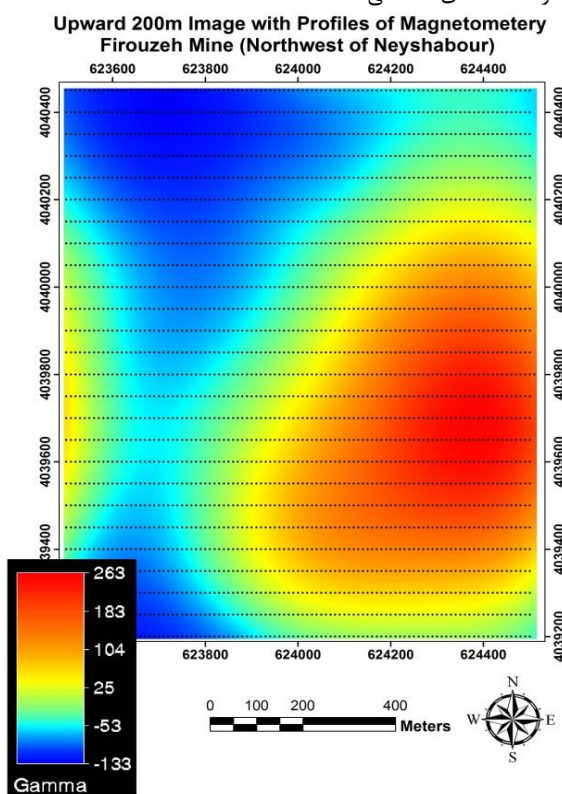
شکل ۱۵. نقشه مشتق اول قائم مربوط به منطقه معدن فیروزه نیشابور به همراه آنومالی‌های مشخص شده روی آن



شکل ۱۶. نقشه فراسو (ادامه به سمت بالا)، برای ارتفاع ۱۰ متر مربوط به منطقه معدن فیروزه نیشابور

به خوبی مشاهده می‌شود. در عمق نیز در تونل‌های حفر شده وجود کانی‌های مغناطیسی از جمله مگنتیت ادامه اثر شدت میدان در عمق را اثبات می‌کند. همچنین، با استفاده از فیلتر فراسو تا عمق بیش از ۲۰۰ متر این اثر دیده می‌شود که احتمالاً مربوط به توده نفوذی ایجاد کننده این آلتراسیون در منطقه باشد. البته، بر اساس برداشت‌های انجام شده پروفیل شماره ۹ آنومالی به سمت شرق ادامه دارد و وسعت آنومالی از آنومالی مشاهده شده، بیشتر بوده و البته، بلافاصله کاهش یافته و به حد زمینه می‌رسد (شکل ۱). با توجه به اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی بر روی سنگ‌های منطقه، مقادیر دارای پذیرفتاری بالا منطبق بر مناطقی با شدت کل میدان مغناطیسی بالا است. این موضوع حاکی از وجود اثر آنومالی از سطح تا عمق در منطقه دارای آنومالی است.

با توجه به تغییرات دامنه شدت میدان نزدیک به ۲۰۰۰ گاما در نقشه TMI، وجود کانی‌سازی مگنتیت را در بخش دارای آنومالی (قسمت جنوب شرقی) محتمل می‌سازد. این آنومالی به طور بسیار واضح و مشخص توسط یک گسل با امتداد شمال-شرق - جنوب غرب از سایر بخش‌ها تفکیک شده و مرز تدریجی با سایر قسمت‌ها دیده نمی‌شود. آنومالی اصلی واقع در جنوب شرقی منطبق بر واحدهای آتشفشانی از جمله تراکیت است، بنابراین، می‌توان تراکیت را به عنوان سنگ میزبان آتیره شده توسط توده نفوذی احتمالی عمقی در نظر گرفت. گواه این امر یعنی حضور توده نفوذی، وجود برش‌های هیدروترمالی (شکل ۳) است که کانی‌سازی‌های اکسید آهن مانند مگنتیت در این سنگها دیده می‌شود و نیز حضور توده نفوذی در تونل غار سبز است (شکل ۴). اثر شدت میدان در سطح با حضور مگنتیت در سنگ‌های سطحی



شکل ۱۷. نقشه فراسو (ادامه به سمت بالا)، برای ارتفاع ۲۰۰ متر مربوط به منطقه معدن فیروزه نیشابور

گدازه‌های آندزیتی-بازالتی است. وجود انشعابات از سنگ‌های نفوذی نیمه‌عمیق در بخش سطحی و تونل اصلی معدن فیروزه که خود واجد کانی‌سازی نیز هستند، می‌تواند منشاء احتمالی کانی‌سازی باشد. مهمترین آلتراسیون‌هایی که واحدهای آتشفشانی و نفوذی منطقه را تحت تأثیر قرار داده شامل سیلیسی، آرژیلیک، سیلیسی-آرژیلیک و سیلیسی-کربناتی است که آلتراسیون سیلیسی بیشترین گسترش را دارد. ذخایر تیپ IOCG به لحاظ منشائی با حجم‌های خیلی زیادی از سنگ‌هایی که توسط فرآیندهای گرمایی آتیره شده‌اند، همراه هستند (۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر مربع، Hitzman, 2000).

## بحث و نتیجه‌گیری

مهمترین واحدهای سنگی معدن فیروزه نیشابور شامل گدازه و پیروکلاستیک‌های با ترکیب تراکیت، لاتیت، آندزیت و بازالت با سن ائوسن هستند که توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب کوارتزموزنوسینیت پورفیری تا موزودیوریت پورفیری در آنها نفوذ کرده‌اند. سنگ میزبان معدن فیروزه نیشابور مشابه کانسارهای بزرگ IOCG دنیا، برای نمونه کانسارهای مانته‌ورده شیلی (Vidla et al., 1996, Zamora and Castillo, 2001) و کاندلاریا شیلی (Marschik et. al., 2000) و کاندلاریا شیلی (Marschik and Leveille, 1998) است که سنگ میزبان آنها،

مس، طلا، روی، آرسنیک، مولیبدن، کبالت، اورانیم، عناصر نادر خاکی سبک، نیوبیم و توریم را نشان می‌دهد.

با اعمال فیلتر برگردان به قطب محل واقعی آنومالی‌های بدست آمده (در نقشه TMI) در محدوده معدن فیروزه نیشابور بصورت نقشه RTP بدست آمد، که آنومالی اصلی در شرق و جنوب شرقی محدوده و به شکل یک مثلث قائم الزاویه قرار گرفته است. نقشه مشتق قائم اول نشان‌دهنده وجود اثر آنومالی‌ها در سطح می‌باشد. اثر آنومالی اصلی واقع در شرق و جنوب‌شرقی محدوده، در سطح تا عمق مشاهده می‌شود. اثر آنومالی‌های پراکنده نیز در سطح دیده شد که نمایانگر سطحی بودن منبع این آنومالی‌ها است. با توجه به نقشه‌های ادامه به سمت بالا، آنومالی اصلی در شرق و جنوب‌شرقی گسترش عمقی نشان می‌دهد. اما آنومالی‌های پراکنده تا ۲۰ متر ضعیف و تا ۵۰ متر حذف می‌شوند. همچنین، مقایسه نمودارهای شدت میدان مغناطیسی و حساسیت مغناطیسی عمق نسبی منابع آنومالی را مشخص می‌نماید.

آنومالی اصلی در محلی واقع شده است که توده‌های نفوذی باعث ایجاد آلتراسیون شدید به همراه کانی‌سازی مس و اکسیدهای آهن از جمله مگنتیت و هماتیت شده‌اند. با توجه به نقشه‌های تهیه شده و مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی در منطقه، در بخش شرق و جنوب‌شرقی محدوده، احتمال حضور یک سیستم کانی‌سازی مرتبط با کانسارهای IOCG دور از انتظار نیست، که با بررسی‌های دقیقتر و انجام حفاری در منطقه این موضوع مشخص‌تر خواهد شد. با توجه به حضور کانی مگنتیت در زون‌های آلتراسیون، پاسخ مغناطیسی آنومالی‌ها در قسمت شرق و جنوب شرقی منطقه که منجر به ایجاد آنومالی گردیده، مربوط به مگنتیت است. البته، با توجه به زون‌بندی آلتراسیون مشاهده شده، افق اکسیدان کانسار در سطح و تونل‌ها مشاهده می‌شود و احتمالاً افق سولفیدی در عمق بیش از ۱۰۰ متر قرار گرفته است. بنابراین، در راستای اثبات این مطالب پیشنهاداتی به شرح زیر ارائه می‌شود: ۱- انجام شبکه‌بندی و برداشت مغناطیس‌سنجی با فواصل کم در مناطق دارای آنومالی، باعث تشخیص هرچه دقیق‌تر مسایل و موارد مبهم در اکتشاف ذخایر معدنی در منطقه می‌شود. از طرفی مقادیر بالای کانی‌های مغناطیسی مانند مگنتیت انجام مغناطیس‌سنجی را توجیه می‌سازد. ۳- انجام حفاری اکتشافی با توجه به نقشه‌های ژئو فیزیکی دقیق‌تر بعدی و تطابق با مطالعات زمین‌شناسی و ساختمانی موجود در محدوده به پیشبرد اهداف اکتشافی در منطقه کمک می‌نماید.

ویژگی‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و زمین شیمی همراه با آنومالی مغناطیسی منطبق بر ساختار و برش، مؤید یک کانی‌سازی بزرگ از نوع اکسید آهن مس- طلا (IOCG) در معدن فیروزه نیشابور است.

این ذخایر از نظر ویژگی انواع آلتراسیون مشترک هستند (Hitzman et al., 1992, Haynes, 2000). آلتراسیون سدیک -کلسیک حاوی مگنتیت، آلتراسیون غالب در بیشتر سیستم‌های IOCG است.

هماتیت ممکن است جانشین شود یا به جای مگنتیت در سیستم‌های به لحاظ ساختاری سطوح بالا تشکیل شود (Hitzman and Valenta, 2005). آلتراسیون در گروه IOCG بیشتر به صورت سدیک در اعماق، پتاسیک در عمق متوسط و بالاخره سیلیسی در بخش‌های بسیار کم‌عمق است (Hitzman and Valenta, 2005). با توجه به اینکه آلتراسیون غالب از نوع سیلیسی و پس از آن آرژیلیک است، ممکن است آلتراسیون‌های سدیک و پتاسیک در قسمت‌های پایین‌تر از تونل‌ها و زون اکسیدان وجود داشته باشد. گسترش زیاد آلتراسیون و کانی‌سازی در محدوده معدن فیروزه نیشابور می‌تواند مؤید حضور یک ذخیره بزرگ معدنی است. نوع زون‌های آلتراسیون و زون‌بندی آنها در محدوده متفاوت است، به نحوی که آلتراسیون سیلیسی به عنوان زون آلتراسیون غالب است و پس از آن آلتراسیون آرژیلیکی حضور چشم‌گیری دارد.

کانه‌زایی در محدوده معدن فیروزه نیشابور را می‌توان به دو زون هیپوزن و سوپرژن تقسیم کرد. این کانه‌زایی به اشکال استوکورک، افشان و برش گرمایی به صورت اولیه و ثانویه در سطح منطقه و تونل‌های معدن فیروزه رخ داده است. کانی‌سازی مرتبط با فرآیندهای ساختاری حاکم بر منطقه است. بافت کانی‌سازی عمدتاً به شکل‌های افشان، استوکورک، رگه- رگچه و برش گرمایی دیده می‌شود. بافت برش به عنوان بافت غالب در معدن فیروزه نیشابور تشابه زیادی با کانسار ارنست هنری استرالیا (Crask, 1995) دارد. کانه‌زایی معدن فیروزه نیشابور در مقایسه با کانسارهای IOCG دنیا، حاکی از تشابه آن با کانسار کاندلاریا شیلی (Marschik et al., 2000, Marschik and Leveille, 1998)، المپیک دم (Reeve et al., 1990) و ارنست هنری استرالیا (Crask, 1995) است. کانی‌سازی اولیه در محدوده معدن فیروزه نیشابور شامل پیریت، مگنتیت، اسپیکولاریت، کالکوپیریت و بورنیت است. وجود رگچه‌های اسپیکولاریت شرایط اکسیداسیونی بالای محلول کانهدار را نشان می‌دهد. کانی‌سازی ثانویه شامل فیروزه، آلونیت، کولیت و اکسیدهای آهن از جمله هماتیت است. مقدار زیاد اکسیدهای آهن در زون اکسیدان نشان‌دهنده مقدار زیاد کانی‌های سولفیدی در منطقه است در واقع، زون گوسان وسیعی در منطقه دیده می‌شود که نشان‌دهنده اکسیداسیون شدید کانی‌های سولفیدی است. فیروزه آخرین فاز کانه‌زایی است. بر اساس (کریم پور و همکاران، ۱۳۹۰)، بررسی‌های زمین شیمیایی، ناهنجاری‌های عناصر

## منابع:

- اکرمی، م.ع.، عسگری، ع.، ۱۳۷۹، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان‌آباد، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- اسفندیاریپور، ا.، ۱۳۹۰، زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی محدوده معدن فیروزه نیشابور (منطقه اکتشافی گاردوم)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- تدین اسلامی، ۱۳۵۳، گزارش اکتشاف ژئوشیمیایی در حوزه معدن فیروزه نیشابور، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- رابینسون، ای. اس.، کیت، کورو، ترجمه حیدریان شهری، مهر، ۱۳۸۴، مبانی اکتشافات ژئوفیزیکی، دانشگاه فردوسی مشهد ۷۵۰ ص.
- سلطانی‌دهنوی، ا.، ۱۳۸۸، پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی تشریحی شمال‌غرب نیشابور، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی - پترولوژی، دانشگاه تربیت مدرس، ۶۶ ص.



- کریمپور، م.ح.، ۱۳۸۲، کانی‌شناسی، آلتراسیون، سنگ منشأ و محیط نکتونیک کانسارهای Iron oxides Cu-Au و مثالهایی از ایران، یازدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ص. ۱۸۴-۱۹۰.
- کریمپور، م.ح.، ملکزاده شفاوردی، آ.، اسفندیارپور، ا.، محمدنژاد، ح.، ۱۳۹۰، معدن فیروزه نیشابور: نخستین کانی‌سازی مس-طلا- اورانیوم- عناصر نادر خاکی سبک نوع IOCG، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۲، (جلد ۳)، صفحه ۱۹۳ تا ۲۱۶.
- کریمپور، م.ح.، ملکزاده، آ.، حیدریان، م.ر.، ۱۳۸۴، اکتشافات ذخایر معدنی، مدل‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ماهواره‌ای و ژئوفیزیکی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۶۳۶ ص.
- کیمیاقلم و ایرانمنش، ۱۳۵۳، گزارش اکتشاف ژئوفیزیک در معدن فیروزه نیشابور، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- محمدنژاد، ا.، ۱۳۹۰، زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی محدوده معدن فیروزه نیشابور (منطقه اکتشافی تونل زاگ)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- Austin, J., Foss, C., 2012, Rich, attractive and extremely dense, A geophysical review of Australian IOCGs, ASEG Extended Abstracts 2012, p: 1-4.
- Baumann, A., Spies, O., Lensch, G., 1983, Stransium isotopic composition of post ophiolite triary volcanics between Kashmar, Sabzevar, and Quchan/NE Iran.
- Clark, D.A., 1997, Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17(2), p: 83-103.
- Crask T.E., 1995, Geological aspects of discovery of the Ernest Henry Cu-Au deposit, northwest Quinsland: Australian Institute of Geoscientists Bull, 16 و 95-109.
- Esdale, D., Pridmore, D. F., Fritz, F., Muir, P., Williams, P., Coggon, J., 2003, The Olympic Dam copper-uranium-goldsilver-rare earth element deposit, South Australia, Ageophysical case history. ASEG Extended Abstracts 2003, p: 147-168.
- Funk, C.W., 2013, Geophysical vectors to IOCG mineralization in the Gawler Craton, The Eureka Moment, 11-14 August, Melborn, Australia.
- Gow, P. A., Wall, V. J., Valenta, R. K., 1993, The regional geophysical response of the Stuart Shelf, South Australia: Exploration Geophysics, v. 24, p: 513-520.
- Gunn, P. J., 1996, Workshop Interpretation of aeromagnetic data. AGSO Journal of Australain Geology & geophysics.
- Haynes, D.W., 2000, Iron oxide copper (-gold) deposits: Their position in the ore deposit spectrum and modes of origin, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide-copper-gold and related deposits: A global perspective: Linden Park, Australia, Porter GeoConsultancy Publishing, v. 2, p. 71-90.
- Hart, J., Freeman, H., 2003, Geophysics of the Prominent Hill prospect, South Australia; in Dentith, M.C., (ed.), Geophysical Signatures of South Australian Mineral Deposits, Australian Society of Exploration Geophysicists, Special Publication 12, p: 93-100.
- Hitzman, M.W., 2000, Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when, and why, in Porter, T.M. ed., Hydrothermal iron oxide-copper-gold and related deposits: A global perspective: Adelaide, Australia, Australian Mineral Foundation, p. 9-25.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T., 1992, Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits: Precambrian Research, v. 58, p. 241-287.
- Hitzman, M.W. and Valenta, R.K., 2005, Uranium in iron oxide-copper-gold (IOCG) systems, Economic Geology, v. 100, pp. 1657-1661.
- Ishihara, S., 1981, The granitoid series and mineralization. Economic Geology, 75th Anniversary Volume, p: 458- 484.
- Marschik R., Leveille R.A., Martin W., 2000, "La Candelaria and the Punta del Cobre district, Chile, Early Cretaceous iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) mineralization", In: Porter TM (ed) Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits, A global perspective, Australian Mineral Foundation, Adelaide 1, 163-175.
- Marschik R. and Leveille R.A., 1998, "The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide copper-gold deposits, Chile", Geological Society of America, Abstracts with Programs, A-371.
- Nabighian, M.N., Grauch, V.J.S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Peirce, J.W., Phillips, J.D., Ruder, M.E., 2005, The historical development of the magnetic method in exploration. Geophysics, vol. 70, no. 6 (November-December 2005), 33ND-61ND.
- Nakatsuka, T., Okuma, S., 2006, Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. Exploration Geophysics 37, p: 121-128.
- Reeve, J.S., Cross, K.C., Smith, R. N. and Oreskes N., 1990, Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit, In: Hughes FE (ed) Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea, 2. AustInst Min Metall Monogr 14, 1009-1035.
- Smith, R.S., 2002, Geophysics of Iron-Oxide Copper-Gold Systems, in - Porter, T.M. (Ed), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective, PGC Publishing, Adelaide, v.2, p: 357-367.
- Vella, L., 1997, Interpretation and modelling, based on petrophysical measurements, of the Wirrda Well potential field anomaly, South Australia; Exploration Geophysics, v. 28, p: 299-306.

- Vella, L., Cawood, M., 2012, Geophysical Characteristics of the Carrapateena Iron-Oxide Copper-Gold Deposit, ASEG Extended Abstracts, Vol. 2012 No. 1, p: 1-4.
- Vidla, T., Lindsay, N. and Zamora R., 1996, "Geology of the Mantoverde copper deposit, northern Chile: A specularite-rich, hydrothermal- tectonic breccia related to the Atacama Fault Zone", In: Camus F, Sillitoe RH, Petersen R (eds) Andean copper deposits: New discoveries, mineralization styles and metallogeny, Soc Econ Geol, Spec Publ, 5, 157-169.
- Zamora R. and Castillo B., 2001, "Mineralizacio´ n de Fe-Cu-Au en el distritoMantoverde, Cordillera de la Costa, III Regio´ n de Atacama, Chile", In: Proc 2ndCongrInt de Prospectores y Exploradores, Lima, Conferencias, Inst de Ingenieros de Minas del Peru´, Lima, 13.