

تلفیق داده‌های مقاومت ویژه و مغناطیس جهت تعیین شرایط کانه‌زایی و گسترش کانسار آهن موئیل مشکین شهر

امیر امیرپور اصل^۱، قهرمان سهرابی^{۲*}، نوید شاد منامن^۳، و هاشم طباطبایی رئیسی^۴

^۱دانشجوی دکتری، دانشکده اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

^۲استادیار، دانشکده علوم دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۳استادیار، دانشکده معدن دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

^۴دانشیار، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۲)

چکیده

کانسار آهن گوتیتی مرتبط با سیستم چشمه‌های آب‌گرم منطقه موئیل در یک کیلومتری جنوب روستای موئیل، واقع در ۱۷ کیلومتری جنوب خاوری مشکین‌شهر از توابع استان اردبیل، و در دامنه غربی کالدرای سیلان در شمال باختری ایران قرار دارد. در این تحقیق با استفاده از مطالعات ژئوفیزیکی انجام گرفته در منطقه مذکور شامل روش مغناطیس‌سنجی در مرحله نخست، به حجم ۷۵۰ نقطه به‌عنوان روش اکتشافی غیر مستقیم و روش مقاومت ویژه الکتریکی در مرحله بعد، به‌عنوان روش مستقیم (هم‌زمان با استفاده از سه آرایش گرادیان، شلومبرگر و ونر) به حجم هفت پروفیل به طول‌های ۱۵۰ تا ۳۵۰ متر و نیز حفاری اکتشافی به روش گمانه‌زنی پودری به تعداد ۱۶ گمانه به عمق متوسط ۱۵ متر، نحوه گسترش قائم و افقی و شرایط کانه‌زایی آهن مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس اطلاعات روش مغناطیس‌سنجی، اولاً احتمال وجود کانه‌زایی مگنتیتی در زیر رخنمون گوتیتی بررسی و منتفی شد. همچنین با مقایسه اطلاعات مذکور با شواهد زمین‌شناسی موجود، مشخص شد نواحی با آنومالی مثبت بالا مرتبط با توده‌های گرانیتی، آنومالی حد واسط مرتبط با کانه‌زایی آهن و نواحی با آنومالی منفی مرتبط با چشمه‌های مولد کانه‌زایی می‌باشند. وجود یک گسل اصلی با امتداد شمال غرب - جنوب شرقی و یک گسل متقاطع فرعی عمود بر گسل اصلی در نقشه مغناطیسی قابل تشخیص است. همچنین شواهد گسل اصلی و نیز یک لایه آبدار در نیمرخ‌های مقاومت ویژه الکتریکی آشکار است. لایه آهن‌دار با مقاومت الکتریکی متوسط بین لایه آبدار و لایه آذرآوری با مقاومت بالا قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های مغناطیسی و مقاومت ویژه الکتریکی تطابق خوبی با اطلاعات زمین‌شناسی و حفاری‌های اکتشافی انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه دارد.

واژه‌های کلیدی: ژئوفیزیک، مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه، گوتیت، معدن موئیل

۱ مقدمه

کانسارهای آهن به طرق مختلف (ماگمایی، رسوبی و گرمابی) تشکیل می‌شوند. از کانسارهای آهن مرتبط با فعالیت‌های گرمابی می‌توان به چشمه‌های آهن‌ساز در مناطق ژئوترمال اشاره نمود. سیالات ژئوترمال در اثر فرو رفتن آب‌های سطحی به عمق زمین به وجود می‌آیند. در حین نفوذ به خاطر گرمای حاصل از توده‌های نفوذی عمیق گرم شده و بسیاری از مواد سنگ‌های اطراف را در خود حل کرده و سپس از طریق شکاف‌ها و سیستم شکستگی گسلی به سطح زمین راه پیدا می‌کنند. در خیلی از چشمه‌های آب گرم علاوه بر آب‌های سطحی بخشی از سیالات دارای منشأ عمقی بوده و حاصل بخارهای ماگمایی می‌باشند. این چشمه‌ها هنگام خروج رسوباتی از خود به جای می‌گذارند. برخی از کانسارهای فلزی از جمله آهن، منگنز، طلا و نقره مرتبط با چشمه‌های آب گرم هستند که به صورت رگه‌ای و یا لایه‌ای تشکیل می‌شوند. آب گرم قینرجه در جنوب مشکین شهر در ارتفاع ۱۲۴۰ متری دامنه شمالی سبلان قرار دارد. دمای این چشمه ۸۶ درجه سانتی-گراد بوده و جزو داغ‌ترین چشمه‌های کلریدی جهان محسوب می‌شود. آب گرم موئیل در نزدیکی و بالادست قینرجه قرار داشته و دمای آن ۴۵ درجه سانتی‌گراد است. از ویژگی‌های بارز آن رسوب‌گذاری اکسید آهن (گوتیت و لیمونیت) می‌باشد. در واقع کانسار آهن موئیل از بارزترین کانسارهای آهن مرتبط با چشمه‌های آب گرم در ایران محسوب می‌شود. چشمه‌های آب گرم قینرجه و موئیل حدود ۲ کیلومتر از هم فاصله دارند. علاوه بر اختلاف دمایی، تفاوت آنها در نوع رسوبات بر جای گذاشته شده نیز بارز است. آب گرم قینرجه دارای گوگرد زیاد و آهن کم و برعکس موئیل دارای میزان زیادی آهن است که سبب رسوب‌گذاری آهن در دهانه و مسیر چشمه شده است. به مرور زمان به خاطر انباشته شدن لایه‌های آهن بر روی هم گاهی ضخامت آن به بیش از ۱۵ متر نیز

رسیده است. در این تحقیق نحوه گسترش عمقی و جانی زون آهن‌دار با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی تعیین شده است.

۲ زمین‌شناسی

بر اساس تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ایران توسط اشوکلین (۱۹۶۸) منطقه مورد مطالعه در محدوده زون ایران مرکزی قرار می‌گیرد. نبوی (۱۳۵۵) نیز این منطقه را در زون البرز - آذربایجان قرار می‌دهد. منطقه مشکین شهر متشکل از سنگ‌های آتشفشانی سنوزوئیک و کواترنری بوده به طوری که فرآورده‌های آتشفشانی سبلان سنگ‌های متعلق به ائوسن را به طور ناهمساز می‌پوشاند. آتشفشان سبلان شامل گدازه‌های آندزیتی، تراکیتی تا داسیتی همراه با واحدهای ایگنمبریتی و جریان‌های پیروکلاستیکی میوسن بالایی و پلیو-کواترنری می‌باشد (آلبرتی و همکاران، ۱۹۸۱). آتشفشان سبلان، طی دو مرحله اصلی در پلیوسن-پلیوستوسن فوران کرده است. اولین فعالیت آتشفشان سبلان در پلیوسن - پلیوستوسن با فوران گدازه‌های تراکی آندزیتی تا آندزیتی آغاز شد. بعد از یک توقف زمانی طولانی، فعالیت فورانی آن دوباره در حدود ۵۵۰ هزار سال قبل با شدت بیشتری همراه با یک سری فوران‌های انفجاری ادامه یافت که ایگنمبریت‌های گسترده‌ای را تولید کرد (قلمقاش و همکاران، ۲۰۱۶). آندزیت‌ها و تراکی-آندزیت‌های پورفیریتیک اغلب در بخش‌های جنوبی و غربی کالدرای سبلان همراه با آندزیت‌های پامیسی تشکیل شده‌اند. تراکیت‌ها حاوی بلورهای کشیده آمفیبول و بیوتیت در زمینه ریزدانه هستند. تراکی-آندزیت‌های پورفیری کواترنری اغلب در بخش‌های مرکزی کالدرای سبلان گسترش دارند. داسیت‌ها به مقدار کم و به صورت گدازه‌های آفیریک همراه با ترکی-آندزیت‌ها رخ داده‌اند. ایگنمبریت‌ها بخش کوچکی از فوران‌های پیروکلاستیک متراکم در میان

به یون Fe^{+3} نامحلول در شرایط سطحی زمین است. منشأ آهن در این چشمه‌ها را می‌توان به شستشوی سنگ‌های مسیر عبور سیالات هیدروترمالی نسبت داد. لیتولوژی عمده آتشفشان سبلان شامل ترکیبی از سنگ‌های آتشفشانی بازیک تا اسیدی (بازالت، آندزیت، بازالت، آندزیت و داسیت) می‌باشد. آب‌های فرورو ضمن داغ شدن و واکنش با کانی‌های سولفیدی در اعماق زیاد اسیدی می‌شوند. از آنجایی که دما در سطح زمین در منطقه قینرجه ۸۶ درجه بوده، به نظر می‌رسد در اعماق پایین دما بیش از ۱۰۰ درجه (شرایط سیالات فوق بحرانی) باشد. برخورد و واکنش بخار سیالات فوق بحرانی و اسیدی حاوی کلر با کانی‌های فرومنیزین (بیوتیت، آمفیبول و پروکسن) سنگ‌های آتشفشانی سبب خروج آهن از شبکه بلوری و ورود یون Fe^{+2} به داخل سیالات گرمایی شده است. آب‌های آهن‌دار ضمن بالا آمدن در امتداد زون خرد شده گسلی، با زون هوادار و اکسیدان برخورد می‌نمایند. در طی این فرآیند، Fe^{2+} موجود اکسید شده و به شکل $Fe(OH)_3$ نامحلول، بخشی در فضاهای خالی داخل برش‌های گسلی و مواد آذرآواری رسوب نموده و بخشی نیز به سطح زمین رسیده و در اطراف چشمه‌ها به صورت لایه‌ای نهشته شده‌اند (شکل ۱). همچنین بخشی از کانی‌سازی آهن لایه‌ای توسط میکروارگانیزم‌ها، و جلبک‌ها و خزها موجود در اطراف چشمه‌های آب گرم رخ داده است. فاز اولیه رسوب آهن به شکل کلونیدهای $Fe(OH)_3$ بوده و به راحتی در آب‌های جاری ته‌نشست نمی‌شوند، بلکه توسط جلبک‌های موجود در اطراف چشمه به دام افتاده و ته‌نشست شده‌اند. در حال حاضر نیز این فرآیند در یک پروسه زمانی ۶ تا ۱۲ (۲ تا ۳ سانتی‌متر) انجام می‌پذیرد. این رسوبات با گذشت زمان و طی فرآیند دی‌هیدراسیون به لیمونیت تبدیل شده و لیمونیت به گوتیت و سپس به لپیدوکروسیت و در نهایت به هماتیت تبدیل شده‌اند.

سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. رسوبات لاهار، مرتبط با آخرین مرحله از فعالیت آتشفشانی در منطقه سبلان فراوان است (شهبازی و شفاپی، ۲۰۱۴).

کهن‌ترین نهشته‌های محدوده معدن آهن موئیل متشکل از توف، توف برشی، گدازه‌های اسیدی تا حد واسط می‌باشند که توسط واحدهای آذرآواری جوان‌تر پوشیده شده است. واحدهای آتشفشانی میزبان کانه‌زایی آهن گدازه‌های آندزیت، داسیت و تراکی آندزیتی پورفیری بوده که متعلق به مرحله اول فعالیت‌های کواترنری سبلان می‌باشد. از ویژگی این گدازه‌ها می‌توان به خرد و برشی شدن در امتداد زون‌های گسلی و دگرسانی نوع کائولینیتی اشاره نمود. این واحد اغلب مظهر چشمه‌های آب گرم با کانه‌زایی اکسیدی و هیدروکسیدی آهن می‌باشد. این سنگ‌ها دارای بافت‌های پورفیری و هیالوپورفیری هستند و کانی‌هایی از قبیل پلاژیوکلاز (آندزین - لابرادور) هورنبلند، بیوتیت با حاشیه‌های اکسید شده، اوژیت، آلکالی فلدسپار و مقدار کمی کوارتز در متن نیمه‌شیشه‌ای آن مشاهده می‌شود.

۳ کانی‌سازی

کانی‌سازی آهن در امتداد زون خرد و برشی شده و در محل خروج چشمه‌ها به دو صورت فضاپرکن و لایه‌ای رخ داده است (شکل ۱). کانسنگ‌های فضاپرکن در فضای بین شکستگی‌های حاصل از گسلش و بین مواد آذرآواری جوان‌تر رخ داده‌اند. با توجه به ویژگی‌های فیزیکی، لایه‌های آهن‌دار، از سطح به عمق به سه گروه کانسنگ‌های لیمونیتی، کانسنگ‌های گوتیتی و کانسنگ‌های هماتیتی تقسیم شده‌اند. رسوبات اکسید آهن جوان بافت اسفنجی و متخلخل داشته و ترکیب آنها اغلب گوتیتی و لیمونیتی می‌باشد؛ اما آهن‌های قدیمی متراکم بوده و ترکیب گوتیتی و هماتیتی دارند. عامل اصلی رسوب‌گذاری آهن فرآیند اکسیداسیون یون Fe^{+2} محلول

۴-۱ روش مغناطیس‌سنجی

عملیات مغناطیس‌سنجی در معدن آهن موئیل به تعداد حدود ۷۵۰ نقطه بر روی پروفیل‌های شمالی- جنوبی با فاصله ۲۰ متر و فاصله ایستگاهی ۵ متر انجام گرفت. هدف اولیه این مطالعات بررسی احتمال وجود کانه‌زایی مگنتیتی در زیر رخنمون گوتیتی بوده است. قرائت‌ها بین ۴۸۴۰۰ تا ۴۸۰۰۰ نانوتسلا قرار دارند. با توجه به بازه کم‌ویش کوچک قرائت‌ها، تمامی تصحیحات متداول از جمله کاهش به قطب و تصحیح تغییرات روزانه به‌دقت بر روی داده‌های اولیه اعمال شد. نقشه آنومالی مغناطیسی بعد از اعمال این تصحیحات در شکل ۲ نشان داده شده است. نتیجه قابل استنباط از این نقشه به شرح زیر است:

الف- با توجه به شدت سیگنال مغناطیسی ثبت شده در منطقه، کانه‌زایی از نوع مگنتیت قابل انتظار نیست.

ب- لایه‌های آهن تباین مغناطیسی قابل توجهی با سنگ‌های زمینه (توف‌ها) ندارند.

ج- در برخی نقاط سنگ‌های آتشفشانی غیر آهنی (گرانیتی) مغناطیس بالاتری نسبت به نواحی کانه‌دار از خود نشان می‌دهند. شدت‌های بالاتر از ۴۸۸۰۰ نانوتسلا (مناطق با رنگ صورتی در نقشه مغناطیسی) مربوط به این توده‌های گرانیتی هستند.

د- مناطق با شدت بین مقدار زمینه (۴۸۵۵۰ نانوتسلا) و ۴۸۸۰۰ نانوتسلا مربوط به زون کانه‌دار آهن می‌باشد.

ه- آنومالی‌های منفی منفرد (رنگ آبی در نقشه مغناطیسی) مربوط به چشمه‌های رسوب‌گذار هستند که در مسیر آبراهه‌های موجود در معدن رسوب می‌گذارند.

۴-۲ روش مقاومت ویژه

با توجه به رسوبی بودن کانه‌زایی و احتمال لایه‌بندی نزدیک به افق لایه‌ها و نیز با توجه به وجود لایه‌های آبدار در منطقه مورد مطالعه به نظر می‌رسد تباین مقاومت



(الف)

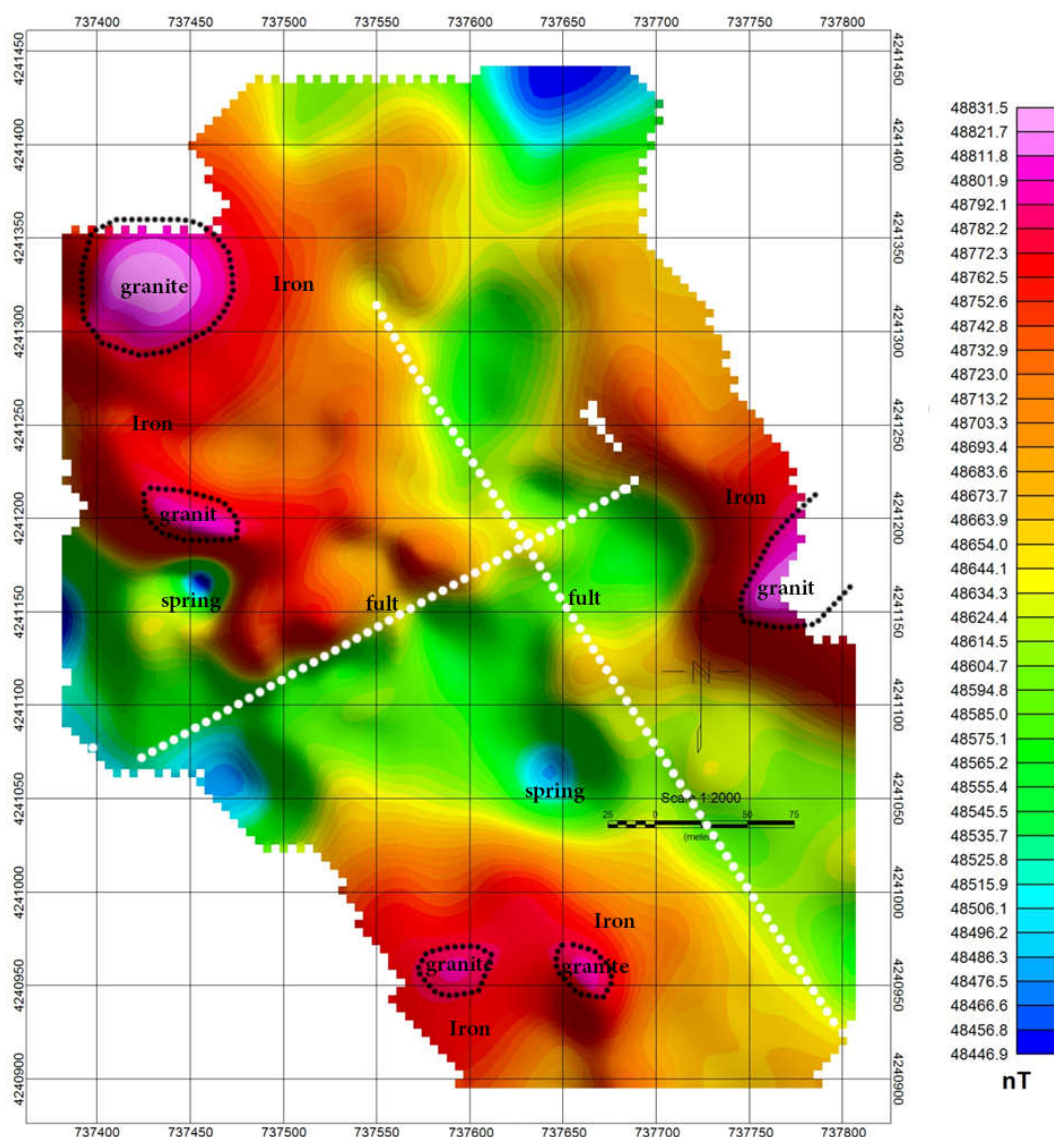


(ب)

شکل ۱. (الف) عکس هوایی از آهن رسوب‌گذاری شده در مجاورت چشمه‌های آب‌گرم در جنوب روستای موئیل؛ (ب) رسوب‌گذاری آهن در مجاورت چشمه‌های آب‌گرم از نمای نزدیک.

۴ روش تحقیق

در منطقه موئیل مطالعات اکتشافی ژئوفیزیکی به دو روش مغناطیس‌سنجی و مقاومت ویژه انجام شده است. روش مغناطیس‌سنجی با هدف بررسی و ردیابی آنومالی‌های مغناطیسی برای آشکارسازی تباین مغناطیسی سنگ‌ها، تشخیص عوارضی مانند گسل‌ها و بررسی امکان وجود کانه‌زایی مگنتیت در عمق و مطالعات مقاومت ویژه با هدف تعیین عمق و مرز لایه‌های آهن با زون آبدار و نیز ضخامت باطله رویی می‌باشد.



شکل ۲. نقشه آنومالی مغناطیسی معدن آهن موئیل. نقاط آبی رنگ مربوط به چشمه‌های کانه‌ساز، نواحی قهوه‌ای تا قرمز مربوط به کانه‌زایی آهن و نقاط با رنگ صورتی نشان‌دهنده توده‌های گرانیتی می‌باشند. وجود دو گسل متقاطع با روند NW-SE و NE-SW در نقشه مغناطیسی به خوبی قابل تشخیص است.

گرفت. حداقل فاصله تعریف شده الکترودها بر روی کابل‌های این دستگاه ۱۰ متر است. دستگاه به طور خودکار با استفاده از پروتکل‌های مربوط به آرایه‌های تعیین شده چهار الکترودهای فوق را انتخاب کرده و اندازه‌گیری را انجام می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد، هدف از این برداشت به دست آوردن اطلاعات عمقی از زون کانه‌دار و در

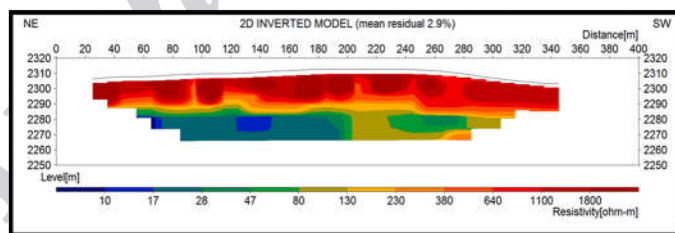
ظاهری خوبی بین زون کانه‌دار و زمینه وجود داشته و لذا استفاده از روش مقاومت ویژه دارای توجیه فنی باشد. برای به دست آوردن اطلاعات عمقی از شرایط کانه‌زایی، داده‌برداری به روش ژئوالکتریک به منظور تهیه پروفیل-های مقاومت ویژه در هفت پروفیل انجام شد. برداشت‌ها با استفاده از دستگاه ژئوالکتریک تمام اتوماتیک Tetrameter LS ساخت شرکت ABEM سوئد انجام

مطالعه است. علاوه بر این، در تمامی مقاطع به جز مقطع مربوط به پروفیل E شواهد وجود گسل به وضوح قابل تشخیص است که در زیر لایه آهن دار زون آبدار با مقاومت بسیار پایین (کمتر از ۵۰ اهم متر) را از زون مجاور جدا کرده است (شکل های ۴ و ۵). در محل دو پروفیل A و B مواد باطله به ضخامت متوسط ۱۵ متر بر روی لایه آهن دار قرار گرفته است. در محل پروفیل های C تا G لایه آهن دار ضخامتی حدود ۱۵ متر داشته و باطله ناچیزی دارد.

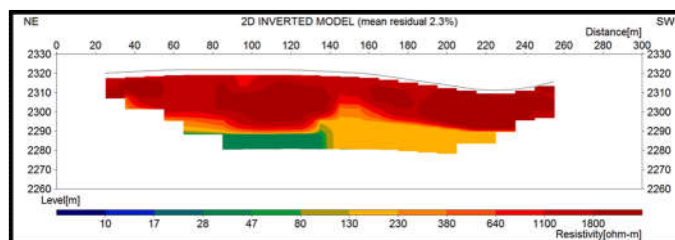


شکل ۳. پروفیل های هفت گانه مقاومت ویژه.

صورت امکان تعیین مرز زون مذکور با لایه آبدار تحتانی می باشد. بدین ترتیب هفت پروفیل مقاومت ویژه (چهار پروفیل با راستای تقریبی شمال شرقی - جنوب غربی و سه پروفیل با راستای تقریبی شمال غربی - جنوب شرقی) در مناطقی که در نقشه داده های مغناطیسی به عنوان مناطق کانه دار تشخیص داده شده بود، به طور هم زمان با استفاده از سه آرایش گرادبان، شلومبرگر و ونر طراحی و اجرا شد که با در نظر گرفتن معلومات سطحی بهترین نتایج با استفاده از آرایش شلومبرگر حاصل گردید که این نتایج در مقاله حاضر ارائه شده است. شکل ۳ محل پروفیل های مقاومت ویژه و شکل های ۴ و ۵ مقاطع مقاومت ویژه مربوط به این هفت پروفیل را نشان می دهند. با توجه به بازماند میانگین (mean residual) ناچیز داده ها، کیفیت داده های برداشت شده قابل قبول است. با توجه به اینکه در محل پروفیل C ماده معدنی به صورت کامل رخنمون دارد و نیز با توجه به نتایج مقاومت ویژه مقطع مذکور لایه با مقاومت ویژه بین ۱۵۰ تا ۷۰۰ اهم متر مربوط به لایه آهن می باشد. لایه با مقاومت بالاتر یعنی بازه ۷۰۰ تا ۱۸۰۰ اهم متر مربوط به مواد آذر آواری موجود در منطقه مورد

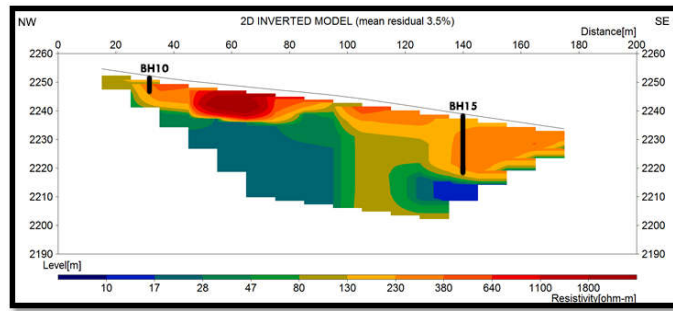


(الف)

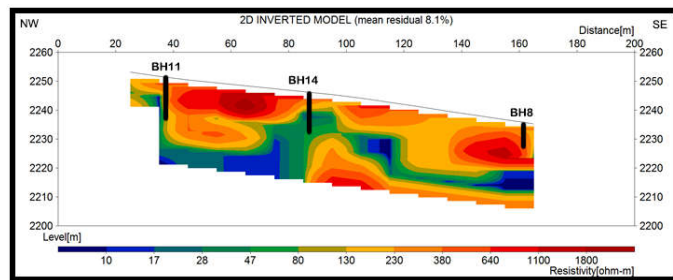


(ب)

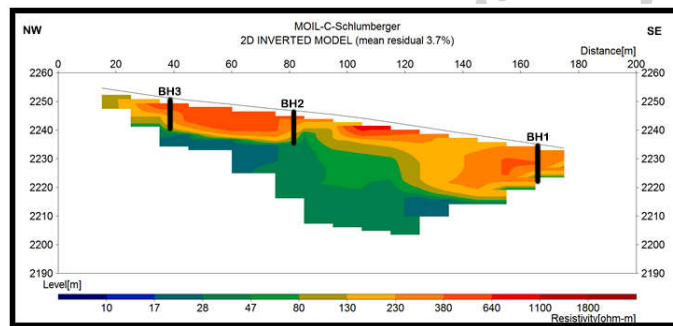
شکل ۴. مقطع مقاومت ویژه (الف) پروفیل A؛ و (ب) پروفیل B. نواحی با مقاومت الکتریکی ۱۳۰ تا ۷۰۰ اهم متر (زرد و قهوه ای) مربوط به کانه زایی آهن می باشد.



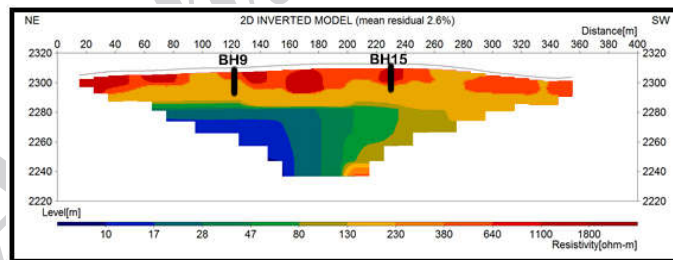
(الف)



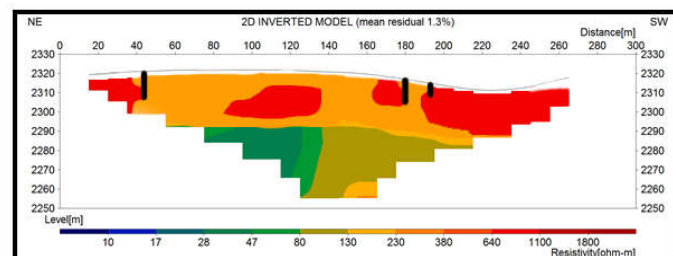
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۵. مدل مقاومت ویژه دو بعدی برای (الف) پروفیل C، (ب) پروفیل D، (ج) پروفیل E، (د) پروفیل F، و (ه) پروفیل G.

۵ بررسی صحت نتایج بر اساس حفاری اکتشافی

جدول ۱. گمانه‌های اکتشافی حفاری شده در معدن موئیل.

شماره گمانه	متر از کل حفاری (متر)	متر از حفاری شده در سنگ آهن (متر)	مقدار باطله (متر)
۱	۱۵	۱۲	۳
۲	۱۵	۱۰	۵
۳	۱۵	۱۲	۳
۴	۱۵	۱۱	۴
۵	۱۵	۱۲	۳
۶	۸	۴	۴
۷	۱۴	۸	۶
۸	۹	۷	۲
۹	۱۵	۱۰	۵
۱۰	۵	۵	۰
۱۱	۱۵	۹	۶
۱۲	۱۵	۸	۹
۱۳	۱۵	۱۲	۳
۱۴	۱۵	۲	۱۳
۱۵	۱۵	۲	۱۳
۱۶	۱۵	۳	۱۲

به منظور بررسی عمق و ضخامت لایه سنگ آهن و تخمین ذخیره، تعداد ۱۶ حلقه چاه به عمق ۸ تا ۱۵ متر در معدن سنگ آهن موئیل به روش پودری حفر گردید (جدول ۱). محل گمانه‌ها بر روی مقاطع مقاومت ویژه در پروفیل‌های C تا G نشان داده شده است (شکل ۶). دو گمانه ۱۰ و ۱۵ بر روی پروفیل C، گمانه‌های ۸، ۱۱ و ۱۴ بر روی پروفیل D، گمانه‌های ۱، ۲ و ۳ بر روی پروفیل E، گمانه‌های ۹ و ۱۵ بر روی پروفیل F، و گمانه‌های ۲، ۷ و ۱۰ بر روی پروفیل G قرار گرفته‌اند (شکل ۵). شواهد حاصل از بررسی عمق و ضخامت لایه آهن‌دار نشان می‌دهد که نتایج حفاری گمانه‌ها با مطالعات ژئوالکتریک (مقاطع مقاومت ویژه) انطباق بالایی دارد. مطابق مطالعات ژئوالکتریک (مقاطع مقاومت ویژه) لایه‌های با مقاومت ۱۵۰ تا ۷۰۰ اهم‌متر مربوط به افق آهن و لایه با مقاومت ۷۰۰ تا ۱۸۰۰ اهم‌متر مربوط به مواد آذرآواری است.



شکل ۶. پروفیل‌های ژئوالکتریک با خطوط آبی و راستای گسل ژئوفیزیکی در عمق ۲۰ تا ۳۰ متر با خط سفید مشخص شده است. محل ۱۶ گمانه حفاری شده با نقاط قرمز رنگ مشخص شده است. در محل پروفیل‌های A و B به دلیل ضخامت کم زون آهن‌دار حفاری انجام نگرفت.

۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش مغناطیس‌سنجی به‌عنوان روش غیر مستقیم و مقاومت ویژه به‌عنوان روش اصلی برای بررسی کانه‌زایی آهن در معدن موئیل استفاده شد. نتایج روش مغناطیس‌سنجی احتمال وجود کانه‌زایی مگنتیت در عمق را رد کرد. با توجه به نقشه میدان مغناطیسی محل گسل‌ها و چشمه‌های رسوب‌گذار مولد کانه‌زایی به‌خوبی قابل تشخیص است. نتایج گمانه‌های حفاری شده و مشاهدات سطحی نشان داد که نقشه مغناطیسی و پروفیل‌های مقاومت ویژه با واقعیت زمین‌شناسی منطقه در سطح و عمق انطباق خوبی دارد. ضخامت لایه آهن‌دار با روش ژئوالکتریک به‌طور متوسط ۱۵ متر تعیین شد که صحت آن توسط حفر گمانه مورد تأیید قرار گرفت. وجود یک گسل با راستای شمال غرب - جنوب شرقی و یک گسل فرعی با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی منطبق بر زون کانه‌زایی آهن و محل خروج چشمه آهن‌ساز، در نتایج روش مغناطیسی به‌وضوح قابل تشخیص است. در پروفیل‌های مقاومت ویژه نیز وجود گسل اصلی (شمال غربی - جنوب شرقی)، ضخامت لایه آهن و لایه روباره و نیز وجود لایه آبدار تحتانی قابل مشاهده است.

در نهایت به نظر می‌رسد حتی در محدوده‌های فاقد کانه‌زایی مگنتیتی، استفاده هم‌زمان از چند روش ژئوفیزیکی مانند مقاومت ویژه و مغناطیس‌سنجی می‌تواند

درک بهتری از وضعیت کانه‌زایی و ویژگی‌های زمین‌شناسی در منطقه ارائه دهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌بینند از زحمات آقایان مهندس رشید حلاجیان و مهندس یاشار انصاری تشکر نمایند.

منابع

- نبوی، م.ح.، دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، ۱۳۵۵.
- Alberti, A., Comin-Chiaromonti, P., Dibattistini, G., Fioriti, R. and Sinigoi, S., 1981, Crystal fractionation in the eastern Azerbaijan (Iran) lower tertiary shoshonitic suite: Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Monatshaft, **1**, 35-48.
- Ghalamghash, J., Mousavi, S. Z., Hassanzadeh, J., and Schmitt, A. K., 2016, Geology, zircon geochronology, and petrogenesis of Sabalan volcano (northwestern Iran): Journal of Volcanology and Geothermal Research, **327**, 192-207.
- Shahbazi, S. H., and Shafaii, M. H., 2014, Geochemistry and petrogenesis of the Sabalan plio-quadernary volcanic rocks: Implication for post-collisional magmatism: Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, **22**(2), 57-68.
- Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran: a review: The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **52**(7), 1229-1258.

Combination of Magnetic and Resistivity methods for determination of the mineralization extension in Moeil Iron ore, Meshkin-Shahr

Amir Amirpour Asl¹, Qahraman Sohrabi^{2*}, Navid Shad Manaman³, and Hashem Tabatabaei Raesei⁴

¹ Ph. D. Student, Sahand Industrial University, Tabriz, Iran

² Assistant Professor, Mohaghegh Ardebili University, Ardebil, Iran

³ Assistant Professor, Sahand industrial University, Tabriz, Iran

⁴ Assistant Professor, Damavand Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 11 September 2016, Accepted: 13 September 2017)

Summary

Moeil Goethite iron mineralization zone related to Moeil hot streams system is located in 1 Km south of the Moeil village, at 17 km southeast of Meshkin Shahr town in Ardebil province. This zone is at the western slopes of Sabalan caldera in the northwest part of Iran. The studied area is located in Central Iran zone according to Geological Structures' classification by Stoklin (1988) and in Alborz-Azerbaijan zone according to Nabavi (1355). General lithology of this area consists of Cenozoic and Quaternary volcanic rocks and pyroclastic material related to the Sabalan volcanism. The reason for the high thermal gradient of the region is because of hot intrusive bodies in depth. In this area, geothermal liquids move upward via fractures and fault systems when the atmospheric water is penetrated and contacted with deep intrusive bodies then hot water springs (e.g., Geinarja and Moeil) have been generated consequently. Chlorinated hot water leaches iron of Ferro-magnesium minerals, through moving beside the mafic and intermediate rocks, and deposits iron hydroxides (Goethite and Limonite) on the surface. Moeil iron ore in the south of Meshkin Shahr is considered as a prominent iron ore related to the hot water springs in Iran. In this ore, the average amount of iron oxide (Fe₂O₃) is 70 percent. In this paper, extension of Iron ore body, and mineralization situation was studied in depth and horizon by implementation of two geophysical approaches, including magnetic method as an indirect way for exploration of Hematite and as a method for checking possibility of magnetite mineralization in depth (about 750 data points) and electrical resistivity method as a direct measurement (seven data profiles all with lengths between 150 to 350 meters) by utilizing three different arrays at the same time (Gradient, Schlumberger and Wenner arrays) and exploration boreholes (16 boreholes with depth of 15 meters). As a result of the magnetic survey, firstly, the possibility of magnetite mineralization has been rejected. Secondly, high positive magnetic anomalies are related to granitic rocks, intermediate positive anomalies are related to Iron ore body, and low anomalies are related to springs that the minerals become precipitated. Besides, the existence of two conjugate faults with NW-SE and NE-SW directions is clear in magnetic anomaly map. In electrical resistivity pseudo sections, the presence of a nearly vertical fault is obvious. In addition, the existence of an aquifer with a very low resistivity at the bottom is detectable. Iron mineralization as a nearly horizontal layer is located between this aquifer in deep and high resistivity volcanic sediments at the top. Finally, as an outcome of this study, it can be mentioned that results of both magnetic and electrical resistivity activities, geology evidences and exploration drilling results confirm each other. In general, the below results have been achieved through Magnetic and resistivity approaches:

- Magnetite mineralization is not expected in this ore due to the relatively low intensity of recorded magnetic signals.
- From the magnetism viewpoint, iron layers do not have a sharp difference with base rocks (tuff).
- In some points, non-ferrous volcanic rocks (granitic) show high magnetism in comparison with mineralized zones. High intensity (more than 48550 nT) is related to these granitic bodies.
- The intensity between 48550 nT and 48800 nT is related to the iron mineralized zone.
- Results from geoelectric studies show that the specific resistivity between 150 and 700 ohm-meter is related to the iron layers, and the figures between 700 and 800 ohm-meter is associated with pyroclastic materials and volcanic rocks.

Keywords: geophysics, magnetic method, resistivity method, Goethite, Moeil mine

*Corresponding author: