

ارتباط کانی‌سازی مس با داده‌های مغناطیس در منطقه سوناجیل و تشخیص مناطق

کانی‌سازی به کمک مدل‌سازی و تفسیر این داده‌ها

زهرا سلطانی چم‌حیدری^۱، ابوالقاسم کامکار روحانی^{۲*}، علیرضا عرب امیری^۳ و سیامند فتحی بایزیدآباد^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. دانشیار، گروه ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: ۹۸/۴/۱۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده

منطقه سوناجیل در ۱۷ کیلومتری شهر هریس در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. واحدهای سنگ‌شناختی اصلی این منطقه از قدیم به جدید عبارت‌اند از: توده‌های آتشفشانی- آذرآواری، استوک سوناجیل پورفیری، توده گرانیتوئیدی اینچه، توده آتشفشانی پلیوکواترنری اکوزداغی. استوک سوناجیل پورفیری میزبان کانی‌سازی مس پورفیری می‌باشد. با توجه به زمین‌شناسی اندیس سوناجیل و همراهی کانی‌سازی سولفیدی با فلزهایی مانند مگنتیت می‌توان از روش مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف احتمالی کانسار مزبور استفاده کرد؛ در این مطالعه روش مغناطیس‌سنجی به‌عنوان یک روش غیرمستقیم برای شناسایی کانسار مس استفاده می‌شود. مثال‌های متعددی برای استفاده از این روش (به‌خصوص روش مغناطیس‌سنجی هوابرد) برای اکتشاف کانسار مس وجود دارد که می‌توان به پروژه مس در منطقه کادیا در استرالیا و همچنین استفاده از روش مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف کانی‌زایی مس و طلا در منطقه اکتشافی پلی‌متال باشماق هشترود؛ اشاره کرد. پس از اعمال تصحیحات روزانه و IGRF، پردازش داده‌ها با اعمال فیلترهایی نظیر برگردان به قطب، ادامه فراسو، مشتق قائم و سیگنال تحلیلی بر روی داده‌ها انجام شد. مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌ها توسط نرم‌افزار Mag3d انجام شد. با توجه به نتایج مدل‌سازی و تفسیر برداشت‌های IP و مقاومت‌ویژه و نیز اطلاعات حفاری و زمین‌شناسی، ارتباط مستقیم کانی‌سازی مس و مغناطیس به اثبات می‌رسد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی کانی‌سازی مس در منطقه افزایش می‌یابد. با مقایسه و تفسیر نتایج مغناطیسی به‌دست آمده و ارزیابی آنها با اطلاعات زمین‌شناسی به احتمال وجود کانی مگنتیت و به‌تبع آن مس در منطقه تا حد زیادی پی‌برده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مغناطیس‌سنجی، مدل‌سازی، بی‌هنجاری، مس، سوناجیل.

۱. مقدمه

اکتشاف دیگر کانی‌های مغناطیسی و تعیین عمق، اندازه و یا شکل زون‌های کانی‌سازی که از آنها هیچ‌گونه آثار سطحی ندارد، استفاده می‌شود (کلاگری، ۱۳۷۱). روش مغناطیس‌سنجی از جمله روش‌های پرکاربرد در اکتشافات است که منشأ آن تأثیر میدان مغناطیسی زمین بر روی سنگ‌ها می‌باشد. اساس این روش اندازه‌گیری تغییرات شدت میدان مغناطیسی زمین می‌باشد. این روش از ابتدایی‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که در شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی، مکان‌های با پتانسیل معدنی و همچنین ارتباط میان سنگ‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰). در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه ساخت تجهیزات و

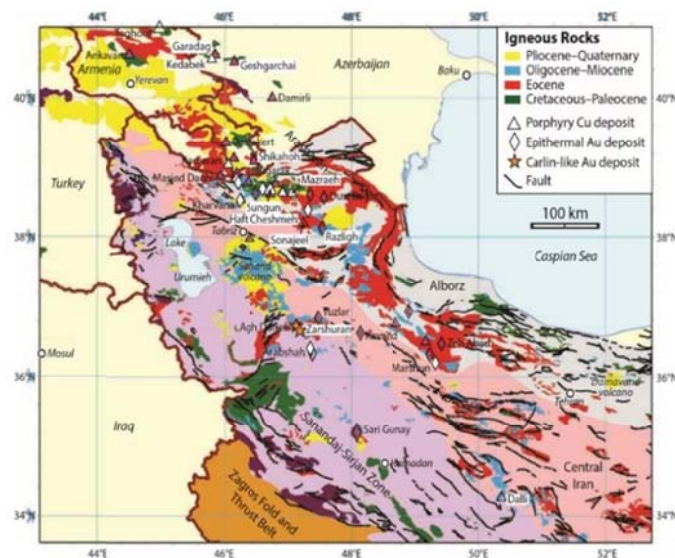
با توجه به نیاز روزافزون بشر به مواد معدنی در صنایع مختلف و کاهش منابع سطحی، به‌کارگیری روش‌های جدید برای رسیدن به منابع عمیق‌تر زیرزمین ضروری شده است. امروزه با به‌کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی سطحی، نمی‌توان به منابع مدفون دست یافت. در این مطالعه هدف بررسی احتمال وجود کانی‌سازی مس می‌باشد؛ از این رو با توجه به همراه بودن کانی‌سازی مس با کانی مگنتیت می‌توان از روش مغناطیس‌سنجی به‌عنوان روشی غیرمستقیم برای پی‌جویی و اکتشاف مس استفاده کرد. اکتشاف مغناطیسی برای کانی‌های اقتصادی کلاً برای یکی از سه هدف: جستجوی مستقیم برای کشف کانی مگنتیت، کشف مگنتیت به‌عنوان کانی ردیاب، برای

استفاده از نقشه‌های حاصل از اعمال فیلترها بر روی داده‌ها در نرم‌افزار Geosoft و بررسی‌های انجام شده، احتمال وجود کانی مگنتیت و کانی‌سازی مس در منطقه بررسی می‌شود؛ و در نهایت نتایج به‌دست آمده با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

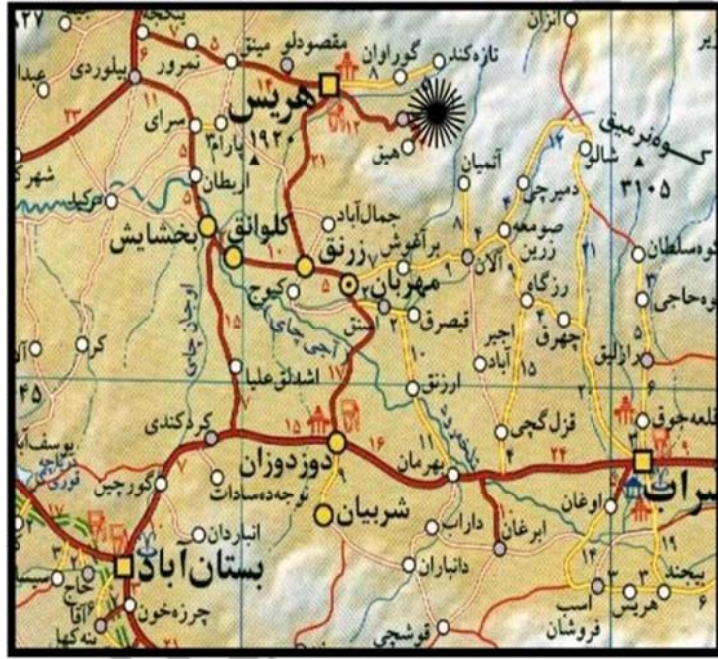
۲. زمین‌شناسی

بیشتر ذخایر مس ایران به‌خصوص ذخایر پورفیری در زون ولکانو-پلوتونیک ارومیه-دختر قرار دارند (شکل ۱)؛ که با توجه به وجود گسل‌های امتداد لغز در این منطقه (مکان‌های مناسبی جهت نفوذ توده‌های پورفیری که محل تشکیل کانسارهای مس پورفیری می‌باشند) کارانزا و همکاران، (۲۰۱۵) قابل‌توجه است. با توجه به شکل ۲، محدوده اکتشافی سوناجیل در شمال‌غرب کشور، استان آذربایجان شرقی و شهرستان هریس واقع شده است. فاصله آن از شهر هریس ۱۷ کیلومتر می‌باشد. لازم به‌ذکر است در نقشه‌های تهیه شده از محدوده مورد مطالعه توسط سازمان زمین‌شناسی کشور (نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ اهر ۱:۱۰۰۰۰۰) توده پورفیری سوناجیل مورد شناسایی قرار نگرفته است و این توده در این نقشه‌ها به‌عنوان بخش دگرسان‌شده شکل‌های ولکانیک ائوسن معرفی شده است.

مدل‌سازی و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی به‌منظور تعیین محل‌کانه‌های پنهان و شناسایی ساختارهای مربوط به نهشته‌های هیدروکربنی رخ داده است. به‌عنوان نمونه جونیور و همکاران (۲۰۱۳) در سائو خوزه در ماتو گروسو برزیل با استفاده از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی، با موفقیت مدل مربوط به بی‌هنجاری را به‌دست آوردند. امیرپور اصل میان‌دواب و سهرابی (۱۳۹۴) با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی، اقدام به اکتشاف کانی‌زایی مس و طلا در منطقه اکتشافی پلی‌متال باشماق هشتروند؛ کردند. رضایی و معظم (۲۰۱۷)، یک روش جدید وارون‌سازی سه‌بعدی جدید داده‌های مغناطیسی با قید فیزیکی را بر روی داده‌های مصنوعی و همچنین بر روی داده‌های واقعی کانسار پورفیری مس-طلا مونت‌میلیگان به‌کار بردند که به‌خوبی قادر بود مدل‌های خودپذیری مغناطیسی مطابق با ساختارهای واقعی را تولید کند. زو و همکاران (۲۰۱۹)، وارون‌سازی دامنه مغناطیسی سه‌بعدی در حضور خود و امغناطیدگی و مغناطش (مغناطیس‌شدگی) باقی‌مانده را بر روی کانسار آهن-آپاتیت-عناصر کمیاب در جنوب شرق ایالت میسوری آمریکا انجام دادند؛ همچنین، وانگ و همکاران (۲۰۲۰)، وارون‌سازی سه‌بعدی بی‌هنجاری مغناطیسی حوضه رسوبی سیسوان در جنوب چین را انجام دادند. در این تحقیق با



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی شمال‌غرب ایران، نشان‌دهنده مکان‌های سنگ آذرین مزوزوئیک و سنوزوئیک و رسوبات مربوط به پورفیری، نهشته‌های اپیتومال و کارلین است. کمربند پورفیری ارسباران مرز بین ارمنستان و آذربایجان و ایران را در برمی‌گیرد (ریچاردز و همکاران، ۲۰۱۲).

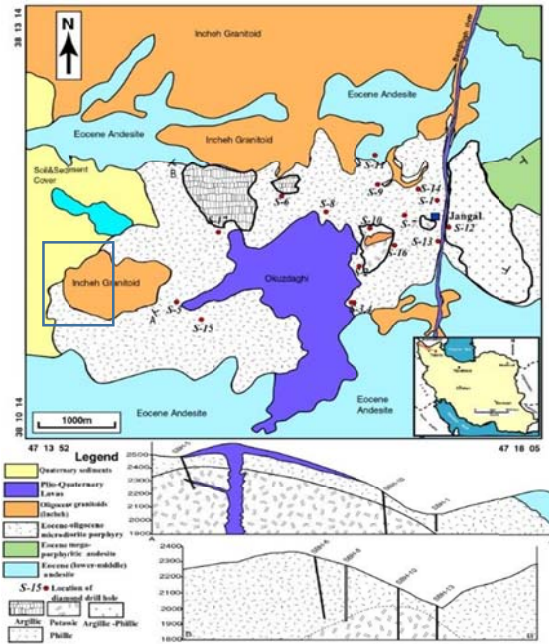


شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (اطلس راه‌های ایران، ۱۳۹۶).

۲-۱. زمین‌شناسی محدوده معدنی سوناجیل

تفکیک سطحی آنها، نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی مقیاس ۱:۵۰۰۰ از منطقه به‌وسعت تقریبی ۴۲ کیلومتر مربع تهیه شده است (شکل ۳).

به‌منظور مشخص‌شدن وضعیت زمین‌شناسی محدوده اکتشافی و روابط صحرایی و چین‌های واحدهای متنوع لیتولوژیک منطقه و نیز تعیین محدوده‌های دگرسانی و



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی و محل برداشت داده‌های مغناطیسی (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷ الف).

۲-۱-۱. واحدهای سنگی

بر اساس بررسی‌های صحرایی در محدوده کانسار سوناجیل واحدهای سنگی موجود در این منطقه از قدیم به جدید عبارت‌اند از:

(الف) نهشته‌های ولکانیک و ولکانو-کلاستیک به سن ائوسن زیرین-میانی

(ب) توده سوناجیل پورفیری به سن ائوسن بالایی-الیگوسن زیرین

(ج) توده گرانیتوئیدی اینچه به سن الیگوسن میانی-بالایی

(د) توده آتشفشانی اکوزداغی به سن پلیو-کواترنری

۲-۱-۱-۲. توده سوناجیل پورفیری با سن ائوسن

بالایی-الیگوسن زیرین

توده سوناجیل پورفیری قدیمی‌ترین پالس نفوذ در طی ماگماتیسیم ترشیری در منطقه مورد مطالعه است و به دلیل دگرسانی شدید، ترکیب سنگ‌شناسی خاص و پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه، در مطالعات قبلی شناسایی نشده است. این توده مرز مشخصی را با نهشته‌های ولکانیک و ولکانو-کلاستیک ائوسن در ضلع شمال شرقی-شمال غربی و جنوبی منطقه دارد و تزریق آن به درون این نهشته‌ها در توسعه دگرسانی و تغییر مشخصات تکتونیکی لایه‌ها مؤثر بوده است.

توده پورفیری سوناجیل دگرسانی‌های متنوعی از جمله پتاسیک، فلیک، پروپلیتیک و آرژیلیک را در سطح به نمایش گذاشته است. توده مذکور به واسطه تحمل دگرسانی‌های مختلف و رخنمون آنها در سطح، دارای رنگ‌های متنوعی است. زون فلیک بیشترین گسترش سطحی این توده را به خود اختصاص داده است. در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن تا تیره است. به دلیل سرشت دیوریتی توده پورفیری سوناجیل، دگرسانی فلیک در آن به خوبی توسعه نیافته است. ماده معدنی در این توده به فرم افشان و رگه-رگچه‌ای در سنگ حضور دارد.

۲-۱-۱-۳. توده گرانیتوئیدی اینچه به سن الیگوسن

میانی-بالایی

دومین پالس نفوذ در منطقه شامل تزریق توده گرانیتوئیدی اینچه به درون نهشته‌های ائوسن و توده پورفیری سوناجیل است. توده مذکور که ترکیبی در حد کوارتزموزنونیت، سینودیوریت، گرانودیوریت، تا گابرویدیوریت دارد؛ در شمال توده پورفیری سوناجیل کنتاکت مشخصی با آن داشته و در محل تماس، دایک‌های زیادی از این توده منشعب شده و در جهات مختلفی به درون توده پورفیری

۲-۱-۱-۲. نهشته‌های ولکانیک و ولکانو-کلاستیک به

سن ائوسن زیرین-میانی

شامل تناوبی از نهشته‌ها است که از قدیم به جدید عبارت‌اند از: آندزیت پورفیری، تراکی آندزیت و سنگ‌های آذرآواری که به وسیله دایک‌های دیاباز قطع شده‌اند (PEV) (پالتوسن، ائوسن زیرین)، تراکی آندزیت و پیروکسن آندزیت، توف برشی و ایگنمبریت (EP)، گدازه‌های داسیتی و آندزیتی و سنگ‌های آذرآواری (E^{V1}) آندزیت تا لائیت‌های مگاپورفیری (E^a)، گدازه‌های آندزیتی تا داسیتی با میان لایه‌های آهکی و سنگ‌های آذرآواری (E^{V2}). لازم به ذکر است که از مغزه‌های حاصل از حفاری در منطقه به نمونه‌های بازالتی، بازالت آندزیتی، آندزیت بازالتی نیز برخورد شده است. گدازه‌های بازیک با ترکیب الیوین بازالت تا آندزیت و بازالت آندزیتی بخش وسیعی از محدوده مورد مطالعه را پوشش داده‌اند (E^b). سنگ‌های ولکانیک و ولکانو کلاستیک ائوسن در محدوده کانسار پورفیری سوناجیل در بخش شمال شرق، شمال غرب و جنوب توده سوناجیل پورفیری گسترش دارند. دگرسانی‌های مشاهده شده در این سنگ‌ها در حدود پروپلیتیک ضعیف تا متوسط می‌باشند.

کربنات-سولفید نیز در این زون مشاهده می‌شود. از جمله کانی‌های مهم موجود در منطقه می‌توان به پیریت (۴٪)، مگنتیت (۵-۰٪) و کالکوپیریت (۷-۰٪) اشاره کرد. طبق نتایج آنالیزهای شیمیایی، مقدار متوسط مس در این زون حدود ۱۲۰۰ ppm و بیشترین مقدار آن حدود ۳۷۰۰ ppm می‌باشد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷ ب). تجزیه میکروپروب از بیوتیت‌های ثانویه زون پتاسیم و مقایسه آنها با بیوتیت اولیه نشان می‌دهد که مقادیر SiO_2 و MgO در انواع ثانویه افزایش و مقادیر FeO ، TiO_2 و MnO کاهش یافته است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷ ب). علت کاهش Fe و Ti ، مشارکت این عناصر در ساختمان پیریت و کالکوپیریت و روتیل است.

۲-۲-۲. دگرسانی فلیک

در اثر هجوم سیال‌ها، تخریب کامل بافت سنگ‌ها و بیرون راندن Na ، Ca و Mg و از سنگ‌ها و تشکیل کوارتز، کلریت، تورمالین و سولفیدهایی مانند پیریت، کالکوپیریت و مولیدنیت به وجود می‌آیند. این دگرسانی در سطح توده پورفیری فراگیر می‌باشد. در این زون در حدود ۶۰٪-۵۰٪ نمونه به سرسیت تبدیل شده است. در رخنمون‌های سطحی زون پتاسیم همپوشانی شدیدی بین دگرسانی پتاسیم و فلیک وجود دارد. از جمله کانی‌های دیگر می‌توان به (۴۰٪-۲۰٪) کوارتز و پیریت (۵-۰٪) و کالکوپیریت (۳-۰٪)، اشاره کرد. با توجه به ماهیت مخرب این دگرسانی آثار اندکی از کانی‌های اولیه مشاهده است. با توجه به وجود ایلیت در منطقه، دما دگرسانی در حدود ۳۰۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷ ب).

۲-۲-۳. دگرسانی پروپلیک

در این زون پلاژیوکلازها در اثر دگرسانی به اپیدوت و کلسیت و کانی‌های فرومنیزین (هورنبلند و بیوتیت) به اپیدوت، کلسیت و کلریت تبدیل شده‌اند. به علت ماهیت آندزیتی و دیوریتی توده پورفیری و سنگ‌های درون‌گیر،

سوناجیل و سنگ‌های ولکانیک و ولکانو کلاستیک ائوسن تزریق شده است. وجود دایک‌هایی با ترکیب مشابه این توده در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی توده پورفیری سوناجیل این ایده را در ذهن تقویت می‌کند که در بخش‌های عمقی توده پورفیری سوناجیل، استوک‌های کوچکی از توده اینچه تزریق شده است.

۲-۱-۱-۲. توده آتشفشانی اکوزداغی با سن پلیو-

کواترنری

آخرین فعالیت ماگمایی در محدوده مورد مطالعه مربوط به ولکانیزم تراکی آندزیت بازالتی تا تراکی آندزیتی اکوز داغی است. این فعالیت در این منطقه از نوع نقطه‌ای بوده و به نظر می‌رسد کانال این فعالیت آتشفشانی بر مرکز سیستم پورفیری منطبق باشد.

۲-۲. دگرسانی‌ها

سیال گرمایی در توده پورفیری باعث به وجود آمدن دگرسانی‌های متنوعی در این منطقه شده است، دگرسانی هیوژن گرمایی موجود در منطقه شامل ۴ تیپ پتاسیکی، فلیک، آرژیلیک و پروپلیک می‌باشد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷ ب). با توجه به نوع دگرسانی‌ها، انواع مختلف کانی‌های ثانویه مانند کانی‌های سولفیدی و اکسید (به صورت افشان و رگه و رگچه‌ای) شکل گرفته‌اند. کانی‌های اصلی هیوژن تشکیل شده نیز شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، تتراندريت، مگنتیت و هماتیت است.

۲-۱-۲. دگرسانی پتاسیک

دگرسانی پتاسیک، دگرسانی شاخص در کانسارهای پورفیری مس بوده و با تشکیل بیوتیت غنی از منیزیم و پتاسیم فلدسپار ثانویه مشخص می‌شود.

بخش عمده کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی در زون پتاسیم انجام شده است، همچنین بیشترین تراکم رگچه‌های کوارتز-سولفید، کوارتز-مگنتیت و کوارتز-

ژئومتریکس آمریکا انجام شده است.

۳-۱. تصحیح روزانه داده‌های مغناطیس‌سنجی

با توجه به تغییرات میدان مغناطیسی در طول روز برای تصحیح این تغییرات، از دو دستگاه مغناطیس‌سنج استفاده می‌شود؛ یکی از دستگاه‌ها در ایستگاه مبنا ثابت و جهت ثبت تغییرات میدان مغناطیسی می‌باشد. مکان ایستگاه نزدیک محدوده برداشت می‌باشد. دستگاه دیگر متحرک و برای ثبت داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۲. تفسیر داده‌ها

تصحیح و اعمال فیلترها پیش از تعبیر و تفسیر داده‌های برداشت شده باید بر روی داده‌ها اعمال شود. لازم به ذکر است که همه فیلترها به‌طور کامل سیگنال‌ها را از نوفه جدا نمی‌کنند. مهم‌ترین کاربرد فیلترها در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل شامل موارد زیر است (علمدار، ۱۳۸۸):

جانمایی دقیق محل بی‌هنجاری‌ها بر روی منابع مولد بی‌هنجاری، جداسازی بی‌هنجاری ناحیه‌ای و باقی‌مانده، تخمین مرز منابع مولد بی‌هنجاری بر روی نقشه‌های هم‌مقدار مغناطیسی، کاهش نوفه‌های موجود در نقشه‌ها و تصاویر میدان پتانسیل، با اعمال فیلترهایی انجام می‌شود.

عمده تبدیل‌ها به‌خاطر ویژگی‌های خاص بردار مغناطیس زمین و به‌منظور ساده‌سازی تفسیر بی‌هنجاری‌های ناشی از آن به کار می‌روند. به‌عنوان مثال برگردان به قطب و برگردان به استوا برای حذف اثرات کجی زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس زمین با اعمال فیلترها نقشه‌های مختلفی به‌دست می‌آید از منطقه مورد مطالعه حاصل می‌شود که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

۳-۲-۱. نقشه شدت میدان مغناطیسی کل

با توجه به نقشه شدت میدان مغناطیسی کل در شکل ۴، می‌توان به تجسم کلی از وضعیت داده‌های مغناطیسی دست یافت. اختلاف میدان در این محدوده چندان بالا نیست، که این موضوع با توجه به ماهیت

میزان سرسبیت در این زون بسیار اندک می‌باشد؛ هر چند مقادیر نسبت زیادی مگنتیت ($5\% - 8\%$) به‌صورت افشان در این سنگ‌ها حضور دارد. در سطح برونزدها، کانی‌های سولفیدی در این زون به چشم نمی‌خورد، اما فضا‌های خالی مکعبی می‌تواند حاکی از شستشوی پیریت پیشین در این زون باشد. فضا‌های حاصل از دگرسانی کانی‌های فرومنیزین توسط مجموعه کلریت-کلسیت-اپیدوت-ژئولیت پر شده‌اند. طبق شواهد میکروسکوپی، آهن آزاد شده از کانی‌های فرومنیزین و پیریت صرف تشکیل مگنتیت در این زون شده است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷ ب).

۲-۲-۴. دگرسانی آرژیلیک

با توجه به نمونه‌های سطحی و عمقی توده پورفیری، حضور کانی‌های رسی از جمله کائولینیت، مونت‌موریونیت، ایلیت و پیروفیلیت مشخص شده است.

الف) دگرسانی آرژیلیک پیشرفته: این دگرسانی در منطقه سوناجیل با حضور پیروفیلیت و کائولینیت به‌عنوان کانی‌های شاخص در بخش‌های مختلف توده مشخص می‌شود (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷ ب).

ب) دگرسانی آرژیلیک حد واسط: این دگرسانی با حضور کانی‌های رسی از قبیل کائولینیت، سرسیت، ایلیت، مونت‌موریونیت، کلریت، کلسیت و اسمکتیت مشخص می‌شود (سیدرف و همکاران، ۲۰۰۵).

۳. برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی در منطقه مورد مطالعه

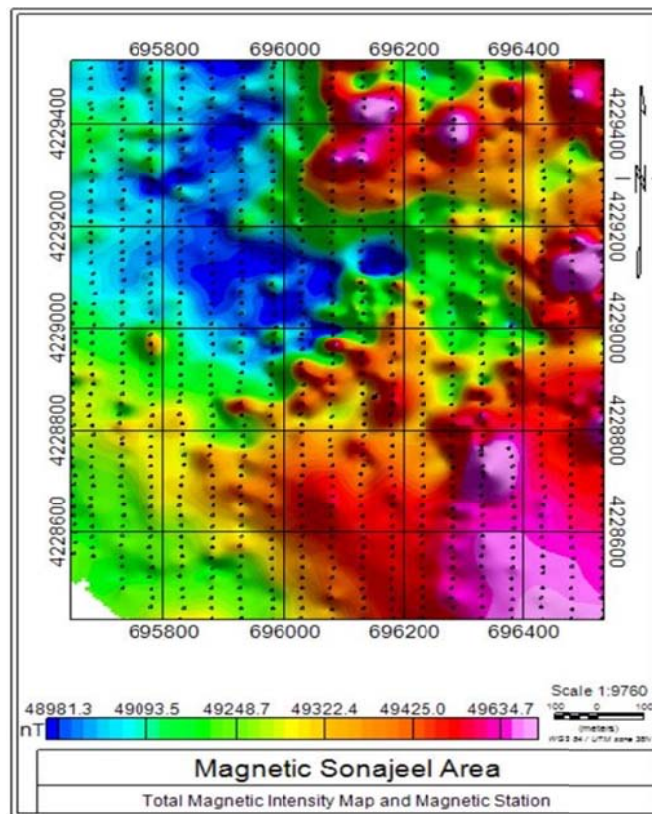
داده‌های مغناطیس در طول ۱۹ پروفیل با طول متوسط ۱۰۰۰ متر و فاصله نقاط برداشت به‌رویی هر پروفیل ۲۰ متر و فاصله پروفیل‌ها از هم ۵۰ متر (به‌جز پروفیل ۱۹ که در فاصله ۳۰ متری از پروفیل ۱۸ قرار دارد) است؛ از این‌رو منطقه برداشت در حدود یک کیلومتر مربع می‌باشد. عملیات برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از دستگاه‌های مغناطیس‌سنج پروتون ساخت شرکت

در راستای عرض جغرافیایی از مقدار ۲۵۰۰۰ تا ۶۹۰۰۰ نانوتسلا متغیر می‌باشد، از این‌رو برای تصحیح این تغییرات نیاز به حذف میدان مغناطیسی اصلی زمین است. میدان مغناطیسی اصلی زمین از طریق نرم‌افزار Geosoft به دست می‌آید. از این‌رو با تفریق میدان اصلی زمین از داده‌های برداشت‌شده این تصحیح انجام می‌شود و نقشه شدت میدان باقی‌مانده به دست می‌آید (شکل ۵). حداقل شدت میدان در نقشه شدت میدان باقی‌مانده ۳۰۱/۷ نانو تسلا و حداکثر شدت میدان در این نقشه ۹۵۵/۸ نانو تسلا می‌باشد با توجه به خطی بودن روند تغییرات ناحیه‌ای نقشه‌های بی‌هنجاری کل و باقی‌مانده مشابه هم هستند.

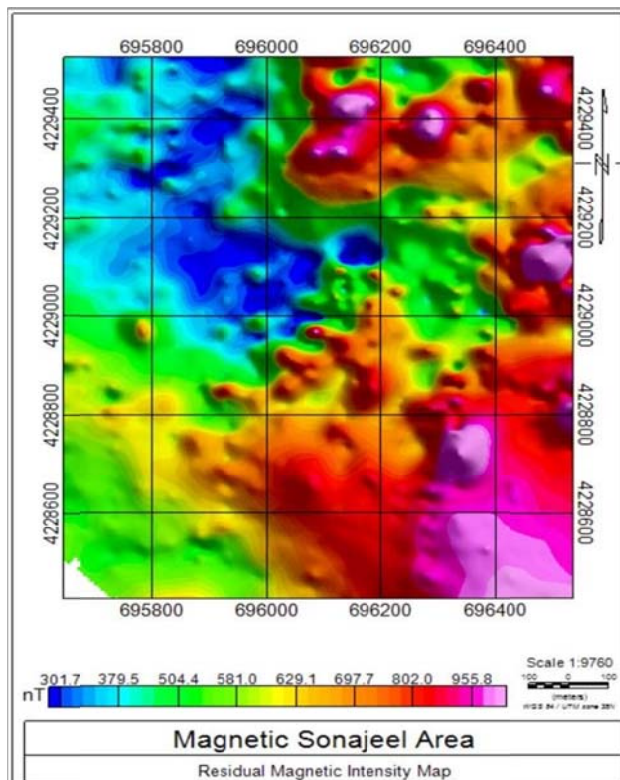
افشان مگنتیت در محدوده مورد مطالعه قابل توجه است. مقادیر میدان از حداقل ۴۸۸۵۹/۶۹ نانوتسلا تا حداکثر ۵۱۲۵۴/۸۰ نانوتسلا در نوسان است. در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل، روند کانی‌سازی از شمال و شمال‌شرقی تا جنوب‌شرقی و با شدت کمتری در مرکز محدوده ادامه دارد.

۳-۲-۲. نقشه شدت میدان منطقه‌ای و محاسبه مقدار باقی‌مانده

میدان مغناطیسی اصلی زمین در راستای طول و عرض جغرافیایی زمین در حال تغییر است. البته میزان تغییرات در راستای طول اندک و قابل چشم‌پوشی است؛ اما



شکل ۴. نقشه شدت میدان مغناطیسی کل و نقاط برداشت.



شکل ۵. نقشه شدت میدان مغناطیسی باقی مانده در منطقه مورد مطالعه.

آشکار نیست. همانطور که گفته شد، در عرض‌های مغناطیسی کمتر از ۱۵ درجه، پردازش می‌تواند دچار مشکلاتی شود. به این دلیل که در این حالت پردازش تبدیل فوریه به علت نیاز به تقسیم طیف به یک جمله خیلی کوچک، ناپایدار می‌شود. خیلی از افراد از این مشکل، یا محدود کردن این پردازش به عرض‌های مغناطیسی بزرگ‌تر از ۱۵ درجه، دوری می‌کنند. برخی نیز این پردازش را برای عرض‌های مغناطیسی کوچک‌تر از ۱۵ درجه به صورت تقریبی با اعمال دو تبدیل، که مجموع زوایا در آن دو تبدیل، برابر با اختلاف بین عرض مغناطیسی و قطب باشد، میسر کردند (لوینیک، ۱۹۹۷).

$$A^0(x, y) = \frac{A(u, v)}{[\sin(I) + i \cos(I) \cdot \sin(D + \alpha)]^2} \quad (1)$$

در این رابطه $A(u, v)$ شدت بی‌هنجاری در فرکانس‌های (u, v) ، I به ترتیب زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس زمین و $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{v}{u}\right)$ می‌باشد. انجام برگردان به قطب در حوزه فرکانس و با استفاده از رابطه ۱ سبب بروز مشکلاتی در نتایج خواهد شد.

۳-۲-۳. برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی

شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تنها به شکل و ضریب خودپذیری توده وابسته نیست؛ بلکه به راستای مغناطیس‌شدگی و جهت میدان ناحیه‌ای و زاویه میل و انحراف نیز بستگی دارد. برای برگردان به قطب الگوریتم حوزه مکان یا الگوریتم حوزه فوریه به کار برده می‌شود (دبرین و ساویت، ۱۹۹۸).

در حالت دوبعدی، برگردان به قطب بدون در نظر گرفتن عرض مغناطیسی پایدار است. در حالت سه‌بعدی پردازش برگردان به قطب فقط در عرض‌های مغناطیسی بالا پایدار است. در مورد عرض‌های مغناطیسی کمتر از ۱۵ درجه پردازش ممکن است دچار مشکلاتی شود (سیلوا، ۱۹۸۶). پردازش‌های مشابهی می‌تواند برای برگردان میدان مغناطیسی بین هر دو عرض مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرد. برگردان به قطب تفسیر داده‌های مغناطیسی را خیلی راحت می‌کند. چرا که در عرض‌های مغناطیسی کمتر از ۵۰ درجه ارتباط شکل بی‌هنجاری با هندسه منبع غالباً

به‌صورت القایی ایجاد شده است، متقارن خواهد شد (شکل ۶).

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده، بعد از اعمال فیلتر برگردان به قطب داده‌ها چندان تغییر نمی‌کند، که این موضوع حاکی از خطی بودن تغییرات ناحیه می‌باشد. با توجه به شکل نواحی که شدت بالایی از میدان را نشان می‌دهد در شمال و شمال‌شرق تا جنوب‌شرق و مرکز ناحیه می‌باشد (همانند نقشه شدت کل میدان مغناطیسی).

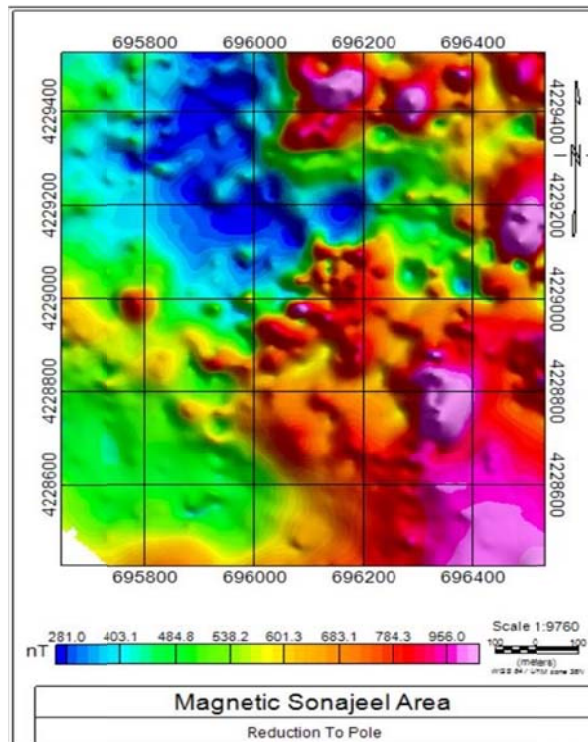
۳-۲-۴. مشتق قائم میدان مغناطیسی

اگر $\varphi(x, y)$ بیانگر داده‌های میدان پتانسیل باشد، آنگاه با استفاده از خواص تابع لاپلاس می‌توان مشتق قائم داده‌های میدان پتانسیل را محاسبه کرد. بر طبق این تئوری، اگر $\varphi(x, y)$ یک میدان پتانسیل باشد، آنگاه $\nabla^2(\varphi) = 0$ (لاپلاس φ برابر صفر خواهد بود)؛ بنابراین:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

به‌عنوان مثال در مواردی که توده در عرض‌های جغرافیایی پایین مغناطیس شده و یا برای توده‌هایی که مغناطیس باقی‌مانده ناشناخته دارند، نتایج این روش قابل استناد نیست (سیلوا، ۱۹۸۶). به‌علاوه چون این روش در حوزه فرکانس عمل می‌کند، زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس زمین باید در چهارگوش مورد مطالعه ثابت باشد. تغییرات زاویه انحراف بردار میدان مغناطیس در ایران در حد ۴-۵ درجه است؛ لذا تغییرات اندک آن تأثیر چندانی بر روی نتایج برگردان به قطب ندارد، البته تغییرات زاویه میل را نمی‌توان نادیده گرفت. در صورتی که تغییرات زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس زمین ناچیز باشد، برای برگردان به قطب می‌توان از میانگین مقادیر زاویه میل و انحراف استفاده کرد. برای از بین بردن اثر جهت میدان (زاویه میل) که باعث دوقطبی شدن داده‌های مغناطیسی می‌شود. از این فیلتر استفاده می‌شود. بعد از اعمال این فیلتر بی‌هنجاری‌ها بر روی عامل ایجادکننده خود قرار می‌گیرد و موقعیت افقی آن تصحیح می‌شود؛ همچنین شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی که



شکل ۶. نقشه برگردان به قطب میدان شدت مغناطیسی منطقه مورد مطالعه.

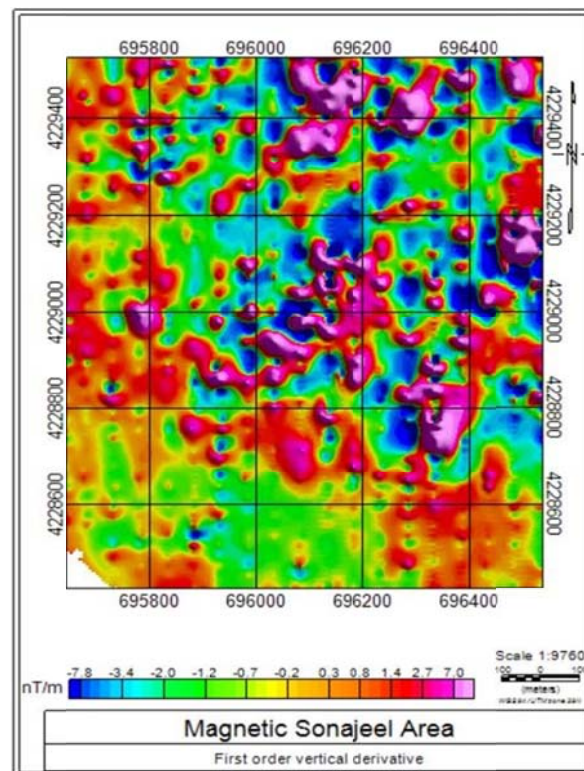
فقط به مرتبه‌های اول و دوم محدود می‌شود. البته استفاده از فیلتر مشتق قائم با مرتبه غیرصحیح و یا مشتق قائم وزن دار نیز می‌تواند مشکل برجستگی نوفه را برطرف کند. در این مطالعه فیلتر مشتق قائم مرتبه اول بر روی داده‌ها اعمال می‌شود (با توجه به مشابه بودن نقشه شدت میدان مغناطیسی کل و نقشه شدت باقی‌مانده روند تغییرات ناحیه‌ای به صورت خطی می‌باشد از این رو تنها از مشتق مرتبه اول استفاده شده است)؛ همان‌طور که در نقشه مشتق قائم مشخص است، بیشینه مشتق قائم بی‌هنجاری و مقدار صفر آن مرز بی‌هنجاری‌ها را نشان می‌دهد. از این رو مقدار نواحی که در این نقشه مقدار بالایی را نشان می‌دهد در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل هم مقدار بالایی از میدان را نشان می‌دهد؛ ولی میزان مشتق قائم در جهت جنوب شرقی به نسبت کمتر از شمال و شمال شرقی محدوده می‌باشد که این موضوع به دلیل کم بودن مگنتیت در ناحیه جنوب شرقی و زیاد بودن مگنتیت در شمال و شمال شرق منطقه می‌باشد.

به‌علاوه هنگامی که داده‌ها در یک سطح افقی برداشت شده باشند، می‌توان تابع لاپلاس را به حوزه فوریه منتقل و سپس مشتق قائم مرتبه n داده‌های میدان پتانسیل را نیز محاسبه کرد؛ که n می‌تواند هر مقدار حقیقی را اختیار کند (بلیکلی، ۱۹۹۶).

$$F \left[\left(\frac{\partial^n \varphi}{\partial x^n} \right) \right] = |k|^n F[\varphi] \quad (3)$$

در این رابطه $K = 2\pi/\lambda$ که λ طول موج و نماد F بیانگر تبدیل فوریه می‌باشد.

فیلتر مشتق قائم عرض بی‌هنجاری‌ها را باریک‌تر و در نتیجه موقعیت توده‌ها را با دقت بیشتری مشخص می‌کند (بلیکلی، ۱۹۹۶). با افزایش مرتبه مشتق قائم، بی‌هنجاری‌ها برجسته‌تر می‌شوند؛ اما از آنجایی که این فیلتر از نوع فیلتر بالا گذر (High-pass filter) است، لذا به‌طور ناخواسته هم‌زمان با سیگنال‌های موجود در تصویر، نوفه‌ها نیز برجسته می‌شوند. این امر به‌ویژه در مشتقات قائم مرتبه بالاتر ظاهر خواهد شد. به‌طور معمول استفاده از این فیلتر



شکل ۷. نقشه مشتق قائم مرتبه اول شدت میدان مغناطیسی منطقه مورد مطالعه.

۳-۲-۵. سیگنال تحلیلی

که سیگنال تحلیلی از خود مقدار بالایی نشان می‌دهد در نقشه مشتق قائم هم مقادیر بالایی مشاهده می‌شود (شمال، شرق و مرکز).

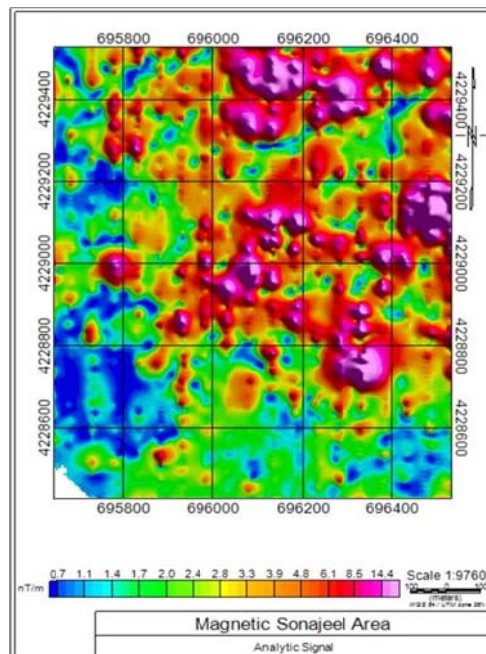
۳-۲-۶. ادامه فراسو (گسترش به بالای میدان مغناطیسی) محاسبه میدان مغناطیسی در سطحی بالاتر از سطح برداشت را گسترش به بالای میدان می‌نامند (برگران و همکاران، ۱۹۹۰). به چند دلیل از فیلتر ادامه فراسو استفاده می‌شود: (۱) حذف نوفه‌های سطحی (۲) تعیین گسترش عمقی توده به صورت کیفی (۳) بررسی امتداد گسترش بی‌هنجاری در عمق. با استفاده از این فیلتر تأثیرات سطحی میدان حذف و وضوح تأثیرات عمیق بیشتر می‌شود. این فیلتر در ارتفاع‌های ۲۰، ۴۰ و ۸۰ بر روی داده‌ها اعمال می‌شود و نقشه‌های حاصل در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ آمده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص می‌باشد با اعمال این فیلتر در ارتفاع ۲۰ متر بخش‌هایی از بی‌هنجاری که در شمال، شمال شرقی و مرکز محدود قرار دارند؛ ضعیف شده، ولی بی‌هنجاری‌های واقع در شرق و جنوب شرق محدود به نسبت کمتر دچار کاهش شدت میدان شده‌اند. حداکثر میزان شدت میدان در این نقشه ۹۲۳/۵ نانوتسلا می‌باشد.

بر اساس مشتقات، استفاده از رابطه فیلتر سیگنال تحلیلی که در رابطه ۴ آمده است، باعث کاهش اثرات تداخل بی‌هنجاری‌ها نزدیک به هم (مجاور هم) می‌شود (سالم و روات، ۲۰۰۳)، همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، با اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌ها مرز بین بی‌هنجاری‌ها از یکدیگر و محیط زمینه مشخص می‌شود. مقدار بیشینه سیگنال تحلیلی بیانگر وجود بی‌هنجاری می‌باشد.

$$A_0(x, y) = \frac{\partial G}{\partial x} x + \frac{\partial G}{\partial y} y + \frac{\partial G}{\partial z} z \quad (4)$$

که در این رابطه AS_0 سیگنال تحلیلی مرتبه صفر و G میدان پتانسیل می‌باشد. با توجه به نقشه سیگنال تحلیلی مقادیر سیگنال در شمال و شمال شرق و شرق و مرکز محدوده مورد مطالعه زیاد می‌باشد که کاملاً با نقشه حاصل از فیلتر مشتق قائم مطابقت دارد؛ هر دو وجود بی‌هنجاری در این مناطق را نشان می‌دهند.

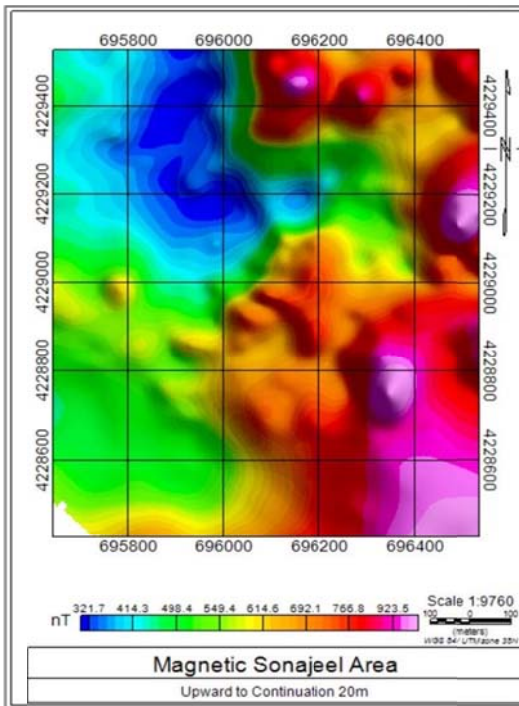
همان‌طور که از نقشه سیگنال تحلیلی مشخص می‌باشد؛ سیگنال تحلیلی در نواحی جنوب شرقی مقادیر کمی را نشان می‌دهد که می‌توان علت آن را احتمال پراکندگی کانی مگنتیت در این ناحیه در نظر گرفت. در سایر نواحی



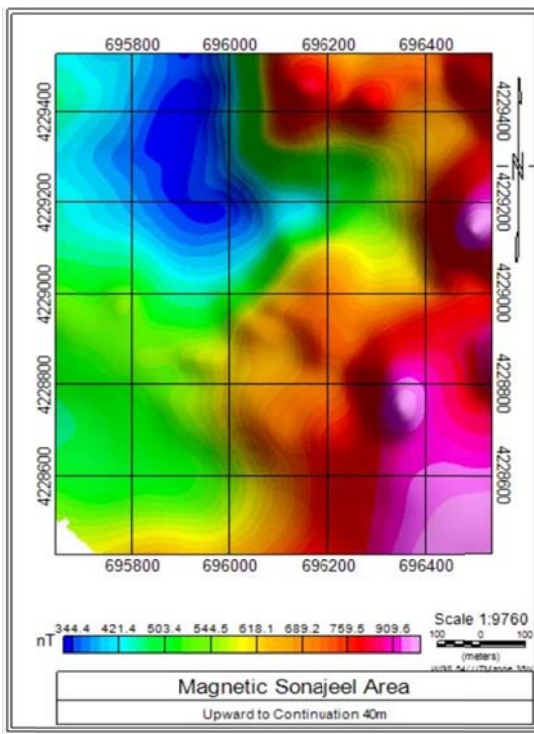
شکل ۸. نقشه سیگنال تحلیلی شدت میدان مغناطیسی منطقه مورد بررسی.

محدوده به نسبت شرق و جنوب شرقی محدوده بیشتر ضعیف شده است. ولی همچنان اثرات بی‌هنجاری وجود دارد.

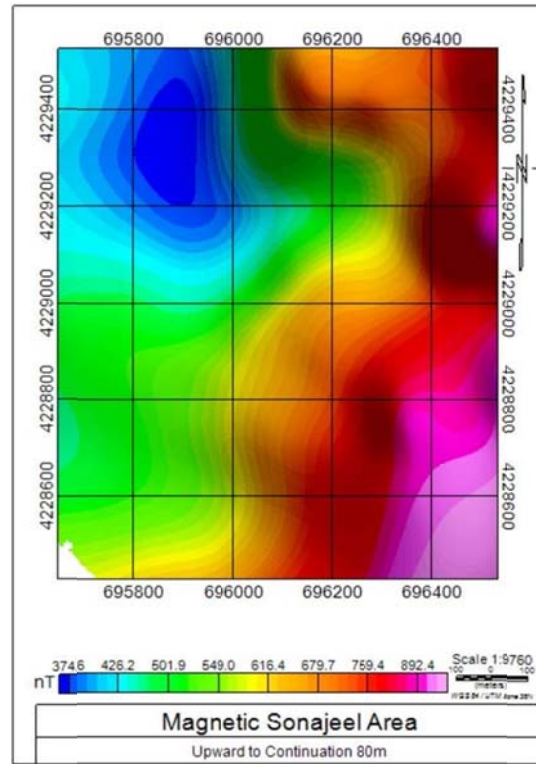
با توجه به نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو در ارتفاع‌های ۴۰ و ۸۰ متر، می‌توان درمی‌یافت که بی‌هنجاری در شمال، شمال شرق و مرکز



شکل ۹. نقشه ادامه فراسو در ارتفاع ۲۰ متری شدت میدان مغناطیسی.



شکل ۱۰. نقشه ادامه فراسو در ارتفاع ۴۰ متری شدت میدان مغناطیسی.



شکل ۱۱. نقشه ادامه فراسو در ارتفاع ۸۰ متری شدت میدان مغناطیسی منطقه مورد مطالعه.

از آنجایی که میدان بی‌هنجاری به‌طور مستقیم متناسب با خودپذیری مغناطیسی می‌باشد، \vec{k} در حکم مدل در نظر گرفته می‌شود. مسئله برگردان به‌عنوان مسئله بهینه‌سازی به‌نحوی فرمول‌بندی می‌شود که یک تابع هدف از مدل، با توجه به محدودیت‌های تعریف شده کمینه می‌شود. ماتریس \vec{G} دارای مؤلفه‌های g_{ij} که میزان نفوذ یک واحد خودپذیری مغناطیسی در سلول i ام را در j امین سطح مبنا تعیین می‌کند. پس از تعیین یک مدل، یک تابع هدف تعریف می‌شود که در هنگام کمینه‌شدن، مدلی قابل‌تفسیر تولید کند. جزئیات تابع هدف وابسته به مسئله می‌باشد ولی عموماً انعطاف‌پذیری آن به‌نحوی می‌باشد که به مدل مرجع m_0 نزدیک شود. از جمله ویژگی‌های لازمه دیگر مدل هموار بودن آن در سه جهت فضایی می‌باشد. در اینجا یک دستگاه مختصات دکارتی راست دست تعریف می‌شود، با جهت x شمال مثبت (لی و اولدنبرگ، ۱۹۹۶). تابع هدف بر اساس رابطه زیر تعریف می‌شود:

۴. مدل‌سازی وارون

مدل‌سازی وارون داده‌ها روشی مناسب برای شبیه‌سازی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی برای پی‌بردن به‌نحوه کانی‌سازی در عمق می‌باشد. در این مطالعه مدل‌سازی داده‌ها به‌وسیله نرم‌افزار Mag3d انجام شده است. روش استفاده شده در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی روش وارون‌سازی لی-اولدنبرگ (۱۹۹۶) می‌باشد. در این نظریه در ابتدا درباره متغیری که تفسیر بر اساس آن انجام می‌شود، تصمیم‌گیری می‌شود، که می‌تواند خودپذیری مغناطیسی یا لگاریتم خودپذیری مغناطیسی و یا تابعی از خودپذیری مغناطیسی مورد جستجو باشد. سپس تابع هدف چند مؤلفه‌ای که دارای انعطاف لازم برای مدل‌سازی می‌باشد. ساخته می‌شود؛ در صورتی‌که داده‌های مشاهده‌ای $\vec{d} = (d_1, \dots, d_N)^T$ و خودپذیری مغناطیسی سلول‌ها در مدل به‌صورت $\vec{k} = (K_1, \dots, K_M)$ باشد، این دو با ماتریس حساسیت \mathbf{G} به یکدیگر مرتبط می‌شوند (لی و اولدنبرگ، ۱۹۹۶).

$$\vec{d} = \mathbf{G}\vec{k} \quad (5)$$

تابع هدف اضافه شده است. پارامتر μ نیز در طول بهینه سازی ثابت و به عنوان پارامتر تنظیم کننده می باشد. جمله سد لگاریتمی یک تابع غیرخطی از پارامترهای مدل می باشد، از این رو تابع هدف غیرخطی می شود و به صورت تکرار، با روش گاوس-نیوتن حل می شود. بهینه سازی با مقدار بیشینه λ و مدلی با عناصر مثبت آغاز شده، در طی تکرار روند بهینه سازی مقدار λ کاهش می یابد. روش مطرح شده به عنوان یک چهارچوب برای مدل سازی سه بعدی داده ها می باشد؛ که در آن یک مدل سازی پیشرو انجام می شود، سپس یک تابع هدف که یک وزن دهی عمقی را پیوسته می کند، تعریف می شود؛ یک تابع عدم تطابق بین داده ها، یک تابع تحلیل گر که میزان تطابق داده ها تعیین می کند. و سپس یک سد لگاریتمی برای به دست آوردن جواب ها مثبت ایجاد می کند. لازم به ذکر است که با توجه به افشان بودن مگنتیت در محدوده بیشترین مقدار خودپذیری ۰/۵ (در سیستم SI) پیش بینی شد. با توجه به شدت میدان مغناطیسی ناحیه ای که برابر با ۴۶۷۹/۲۲ و زاویه میل و انحراف که به ترتیب ۵/۳۳ و ۵۶/۹۹ درجه می باشد، به مدل سازی می پردازیم. تعداد داده های ورودی نرم افزار ۱۰۳۵ عدد می باشد. خروجی به دست آمده را به صورت تصادفی در سه راستای عرض جغرافیایی برش می زنیم. در ادامه سه تصویر از برش های مدل در طول های جغرافیایی $x=696572$ ، $x=696477$ و $x=696322$ به ترتیب در شکل های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. هرچه طول جغرافیایی کم شود، میزان مگنتیت کاهش می یابد، همان طور که دیده می شود، روند بی هنجاری در راستای شمال و شمال شرق و جنوب شرق می باشد و به مقدار خیلی کم در مرکز محدوده، بی هنجاری های مشاهده شده در مرکز محدوده به سطح نزدیک تر می باشد. که این مسئله با نتایج به دست آمده مطابقت دارد. با توجه به وابسته بودن مقادیر خودپذیری به وجود کانی مگنتیت می توان به این نتیجه رسید که در قسمت شمال تا شمال شرق محدوده تراکم مگنتیت بیشتر از سایر نقاط می باشد

$$\begin{aligned} \varphi_m(m) = & \alpha_s \int_v w_s \{w(\vec{r})[m(\vec{r}) - m_0]\}^2 dv \\ & + \alpha_x \int w_x \left\{ \frac{\partial w(\vec{r})[m(\vec{r}) - m_0]}{\partial x} \right\}^2 dx \\ & + \alpha_y \int w_y \left\{ \frac{\partial w(\vec{r})[m(\vec{r}) - m_0]}{\partial y} \right\}^2 dy \\ & + \alpha_z \int w_z \left\{ \frac{\partial w(\vec{r})[m(\vec{r}) - m_0]}{\partial z} \right\}^2 dz \end{aligned} \quad (6)$$

که در این رابطه، تابع، w_x, w_y, w_z, w_s به ترتیب وزن هرسلول در مدل مرجع و وزن هموارشدگی بین دو سلول مجاور در راستاهای x, y, z می باشند. $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, \alpha_s$ نسبت همواری ۱ به نزدیکی (Smallness) در مدل هستند. می توان رابطه ۶ را به صورت $\varphi_m(m) = \varphi_{ms} + \varphi_{mv}$ نوشت که در آن φ_{ms} مربوط به بخش اول رابطه ۶ و φ_{mv} مربوط به سه بخش دیگر باقی مانده (نشان دهنده تغییرات در سه جهت مکانی) هستند. φ_{ms} نزدیکی مدل بازیابی شده به مدل اولیه و φ_{mv} همواری مدل در جهت های گوناگون را کنترل می کنند (لی و اولدبرگ، ۱۹۹۶). با توجه به وجود نوفه در داده های برداشتی، داده های محاسبه ای نباید به طور کامل بر آنها برازش شوند، در غیر این صورت مدل بازیابی شده دارای اشتباه می باشد. برازش نشدن داده ها به صورت زیر تعریف می شود (لی و اولدبرگ، ۱۹۹۶).

$$\varphi_d = \left\| w_d(d - d^{obs}) \right\|_2^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{obs} - d_i^{pre}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (7)$$

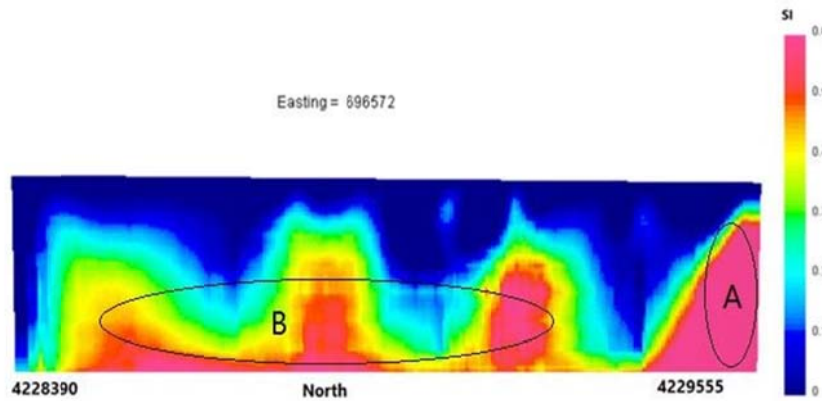
فرض می شود که توزیع نوفه در داده ها به صورت نرمال می باشد و انحراف استاندارد σ و میانگین صفر دارد. w_d ماتریس قطری می باشد که نامین عنصر آن $1/\sigma_i$ و انحراف استاندارد داده ها مشاهده ای d است (لی و اولدبرگ، ۱۹۹۶).

با توجه به محدودیت مثبت بودن مدل، حالت گسسته تابع هدف به صورت زیر می باشد:

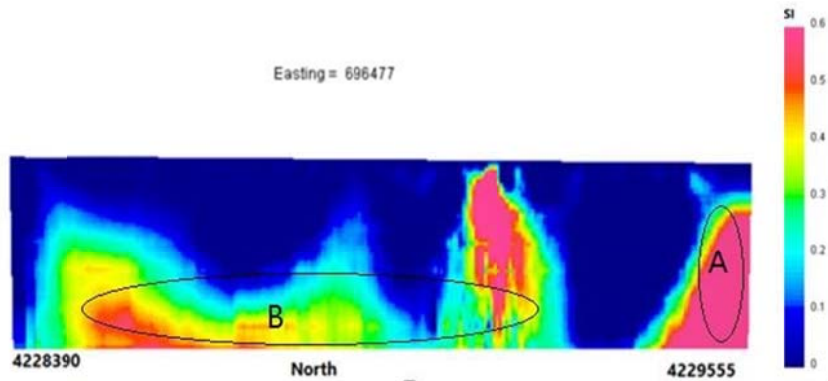
$$\varphi = \left\| w_d(Gm - d^{abs}) \right\|^2 + \mu \left\| w_m(m - m_0) \right\|^2 - 2\lambda \sum_{j=1}^M \ln(m_j) \quad (8)$$

که $-2\lambda \sum_{j=1}^M \ln(m_j)$ تابع سد (Barrier) و λ پارامتر سد می باشد و برای مثبت ماندن مدل بازیابی شده بهینه، به

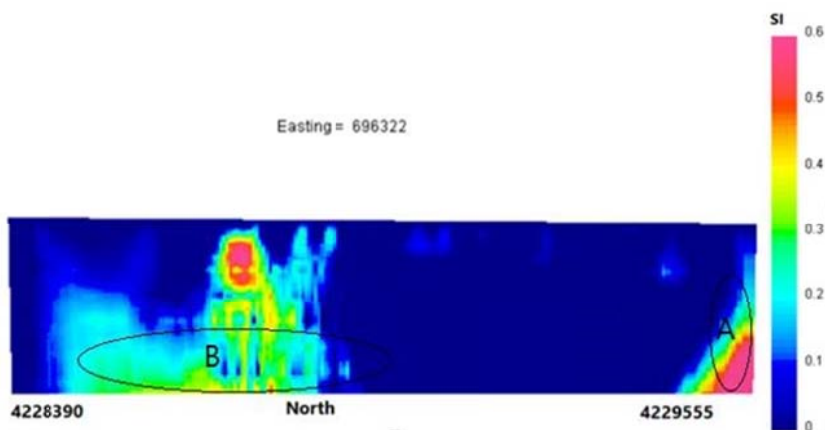
(قسمت A). در قسمت B پراکندگی مگنتیت زیاد می‌باشد؛ از این رو میزان تباین خودپذیری نشان داده شده نسبت به قسمت A کمتر ولی محدوده پوشش داده شده وسیع‌تر می‌باشد.



شکل ۱۲. برش مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی در راستای عرض جغرافیایی ۶۹۶۵۷۲ متر.



شکل ۱۳. برش مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی در راستای عرض جغرافیایی ۶۹۶۴۷۷ متر.



شکل ۱۴. برش مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی در راستای عرض جغرافیایی ۶۹۶۳۲۲ متر.

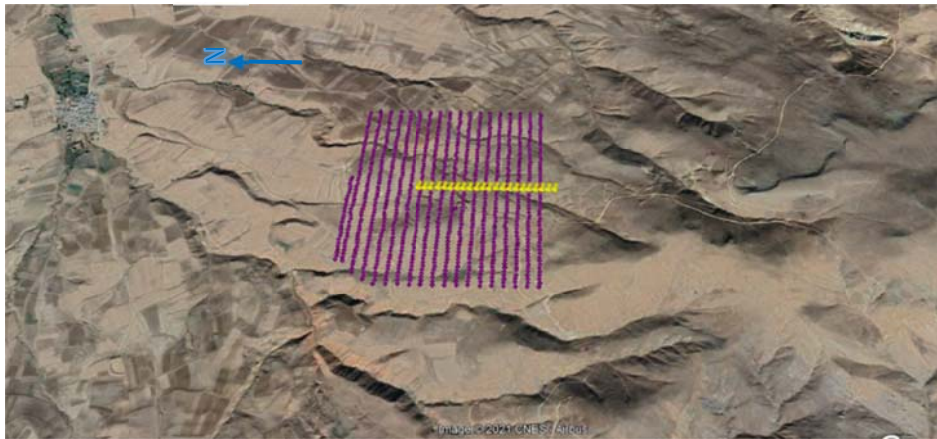
۵. بررسی نتایج IP و مقاومت ویژه

مدل‌سازی وارون داده‌های قطبش القایی (IP) و مقاومت ویژه برداشت شده، موقعیت دقیق بی‌هنجاری‌ها را مشخص می‌کند. در این مطالعه مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌ها توسط نرم‌افزار Res2dinv انجام شده است. مدل به دست آمده یک نمایش دوبعدی در راستای طول پروفیل (x) و عمق (z) می‌باشد. آرایه الکترودی به کار برده شده در این برداشت، آرایه قطبی-دوقطبی بوده است. فاصله نقاط برداشت از یکدیگر در طول پروفیل‌های IP و مقاومت ویژه برداشت شده ۳۰ متر بوده است. موقعیت پروفیل‌های IP و مقاومت ویژه برداشت شده با راستای شرقی-غربی در منطقه مورد مطالعه، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این مقاله، فقط مدل وارون دوبعدی داده‌های IP و مقاومت ویژه برداشت شده در طول یکی از این پروفیل‌ها نشان داده شده است (شکل ۱۶). طول این پروفیل، ۶۶۰ متر و ۲۲ ایستگاه یا نقطه برداشت در روی این پروفیل با راستای شرقی-غربی در نظر گرفته شد. شروع این پروفیل با قرار دادن الکتروود (از نوع الکتروود جریان) بر روی ایستگاه یا نقطه با مختصات $x=695962$ و $y=4228969$ (در سیستم مختصات UTM) آغاز و در جهت شرق ادامه یافته به طوری که آخرین الکتروود (از نوع الکتروود پتانسیل) در ایستگاه با مختصات UTM $x=696589$ و $y=4228971$ قرار داده شد. اندازه‌گیری داده‌های IP و مقاومت ویژه با استفاده از آرایه قطبی-دوقطبی تا گام حداکثر ۱۰ ادامه یافت. از این رو در ۱۵۳ نقطه، بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. بیشترین مقاومت ویژه در حدود ۲۹۵/۵ اهم‌متر و کمترین مقدار ۴۴/۱۰ اهم‌متر بوده است. همچنین مقادیر بیشینه و کمینه بارپذیری به ترتیب ۲۵ و ۳ میلی‌ثانیه به دست آمد. همان‌طور که مدل وارون دوبعدی IP و مقاومت ویژه (شکل ۱۶) نشان می‌دهد در ابتدا و انتهای پروفیل و از عمق ۲۰ متر بی‌هنجاری‌هایی با مقدار بارپذیری بالا و مقاومت ویژه نسبتاً بالا دیده می‌شود. بی‌هنجاری که در ابتدای پروفیل قرار دارد تا تقریباً اواسط پروفیل گسترش

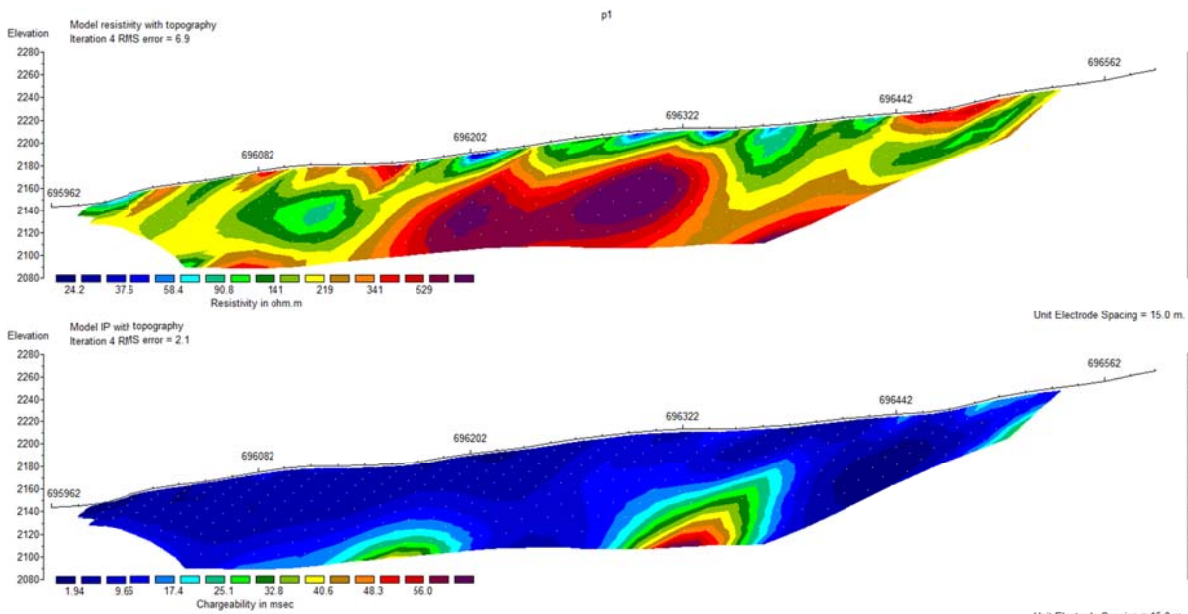
یافته است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که ضخامت توده اینچه در این ناحیه در حدود ۲۰ متر می‌باشد، زیرا دگرسانی پتاسیک محل مناسبی برای کانی‌سازی مس پورفیری می‌باشد. همان‌طور که در بالا گفته شد، در محل بی‌هنجاری‌های IP که مقادیر بارپذیری بالایی دیده می‌شود، مقطع مقاومت ویژه هم مقادیر مقاومت ویژه نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد؛ که این موضوع می‌تواند دلیلی بر پورفیری بودن مس در این محل‌ها باشد. در بخش‌های سطحی و میانی پروفیل مقادیر پایینی از مقاومت ویژه به چشم می‌خورد، که به دلیل دگرسانی رس (در اثر تجزیه پلاژیوکلازها) یا دگرسانی سنگ‌های دیوریتی در این بخش‌ها بوده است. در ابتدا و انتهای پروفیل در قسمت‌های سطحی مقادیر بالایی از مقاومت ویژه دیده می‌شود که احتمالاً به دلیل وجود کلسیت و بیوتیت در این قسمت‌ها بوده است. مقایسه بین نتایج حاصل از روش IP که در این بخش گفته شد با نتایج حاصل از روش مغناطیس‌سنجی که در بخش‌های قبلی ذکر شد، حاکی از این است که به‌طور کلی مناطق با مغناطیس بالا عمدتاً بر روی مناطق با بارپذیری بالا منطبق می‌باشند. از دیدگاه تفسیری، این مسئله همراهی مگنتیت و کانی‌سازی مس را نشان می‌دهد به طوری که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، میزان کانی‌سازی مس هم عمدتاً افزایش می‌یابد. برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر این موضوع، یک مقایسه نسبتاً جامع بین نقشه‌های مغناطیسی حاصل از نتایج برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی در منطقه مورد مطالعه با مقاطع IP حاصل از وارون‌سازی داده‌های IP برداشت شده در این منطقه انجام شده است. نقشه‌های شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده و مشتق قائم مرتبه اول میدان مغناطیسی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به مقطع IP و مقاومت ویژه در طول پروفیل نشان داده شده در شکل ۱۶ و توضیحات آن که در بالا بیان شد، در طول این پروفیل در محدوده با مختصات UTM از حدود ۶۹۶۱۲۰ تا ۶۹۶۱۸۰ شرقی و ۴۲۲۸۹۷۰ شمالی و همچنین از حدود ۶۹۶۲۶۰ تا ۶۹۶۳۸۰ شرقی و ۴۲۲۸۹۷۰ شمالی، مقادیر

مغناطیسی از روی شکل ۱۷ مشاهده می‌شود (بر طبق این شکل، کمترین شدت میدان مغناطیسی باقیمانده مشاهده شده در این محدوده‌ها بالای ۵۰۰ نانوتسلا می‌باشد، ضمن این‌که مقادیر بالای از مشتق قائم مرتبه‌اول میدان مغناطیسی در این محدوده‌ها قابل مشاهده است). مقادیر بالای شدت میدان مغناطیسی می‌تواند نشان‌دهنده وجود مگنتیت قابل ملاحظه در این محدوده‌ها باشد.

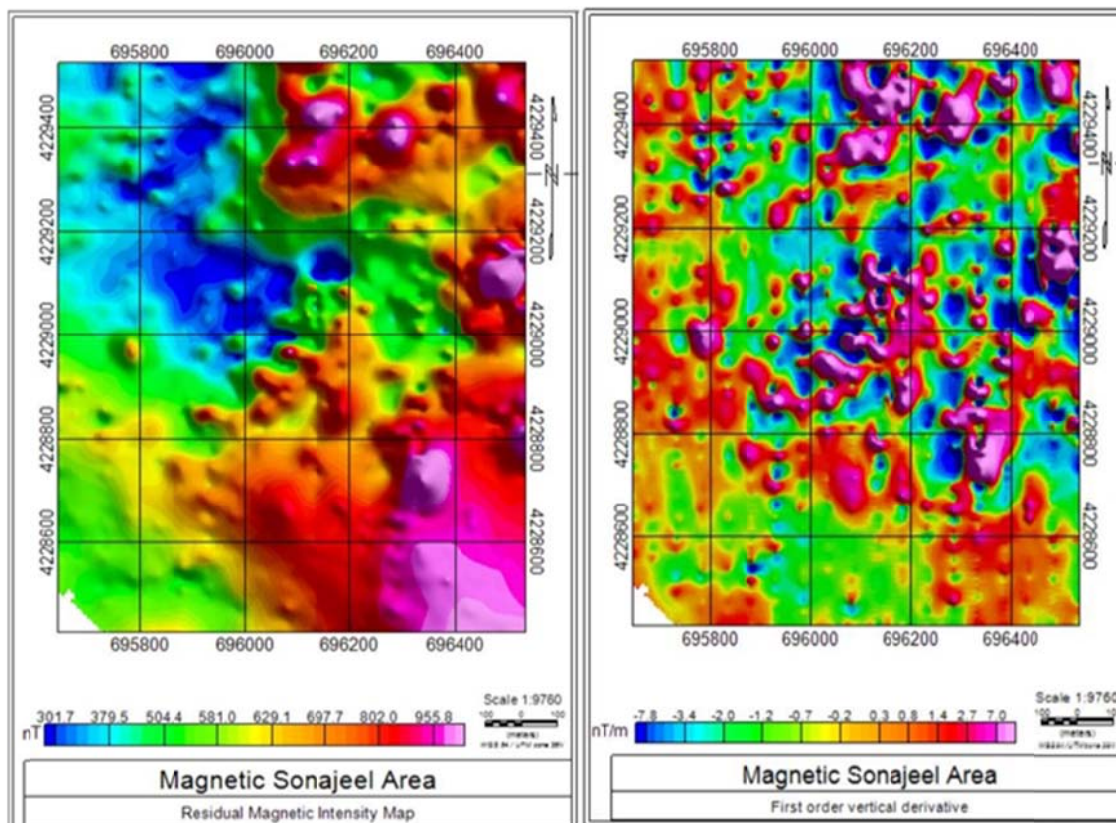
بالایی از بارپذیری (بارپذیری بیش از ۱۷/۴ میلی‌ثانیه) و مقاومت‌ویژه بر روی این پروفیل در عمق مشاهده می‌شود که در اعماق بیشتر، مقادیر بارپذیری و مقاومت‌ویژه افزایش بیشتری می‌یابد. در محدوده‌های ذکر شده که مقادیر بالای از بارپذیری و مقاومت‌ویژه دیده می‌شود و می‌تواند حاکی از کانی‌سازی مس پورفیری در این محدوده‌ها باشد، مقادیر بالا یا نسبتاً بالای شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده و مشتق قائم مرتبه‌اول میدان



شکل ۱۵. موقعیت پروفیل‌های IP و مقاومت‌ویژه برداشت شده با راستای شرقی-غربی در منطقه مورد مطالعه.



شکل ۱۶. مدل وارون دوبعدی مقاومت‌ویژه (بالا) و IP (پایین) همراه با توپوگرافی.



شکل ۱۷. نقشه شدت میدان مغناطیسی باقی مانده (سمت چپ) و نقشه مشتق قائم مرتبه اول میدان مغناطیسی (سمت راست).

۶. بحث

با توجه به وجود گدازه‌های بازیک و آندزیت که از جمله سنگ‌های آتشفشانی (سنگ‌های آتشفشانی نسبت به سنگ‌های رسوبی دارای خاصیت مغناطیسی بیشتری هستند) می‌باشند و وجود دگرسانی پروپلیک در نهشته‌های ولکانیک (افزایش کانی مگنتیت در این دگرسانی) نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که کانی‌سازی مگنتیت به خارج از توده مس سوناجیل می‌باشد؛ چرا که دگرسانی موجود در توده مس سوناجیل پتاسیک می‌باشد، که محل مناسبی برای کانی‌سازی مس پورفیری می‌باشد، در حالی که میزان مگنتیت در این دگرسانی به‌طور متوسط در حدود ۵٪، ولی در دگرسانی پروپلیک میزان کانی مگنتیت در حدود ۸٪ الی ۱۰٪ می‌باشد. در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل روند کانی‌سازی شمالی-جنوبی می‌باشد (شدت کانی‌سازی در مرکز محدوده ضعیف‌تر است، به دلیل نزدیک شدن به رسوبات کواترنری که شدت مگنتیت در آنها کم می‌باشد)، با توجه به

شکل ۶، این نواحی بر روی توده مس سوناجیل و گرانیتوئیدی اینچه قرار دارد؛ با توجه به نقشه‌های فیلتر ادامه فراسو ریشه‌دار بودن بی‌هنجاری در قسمت جنوب شرقی محدوده نشان داده می‌شود، همچنین در نقشه‌های سیگنال تحلیلی و مشتق قائم مرتبه اول این ناحیه بی‌هنجاری خاصی دیده نمی‌شود و با توجه به این نکته که در نقشه‌های شدت میدان علاوه بر میزان مگنتیت، ساختار زمین‌شناسی نیز تأثیرگذار است؛ می‌توان وجود گسل در قسمت جنوب شرقی منطقه را دلیل این موضوع دانست؛ چرا که وجود گسل، شکستگی و خردشدگی باعث می‌شود که شدت میدان اندازه‌گیری شده افزایش یابد. از طرفی همان‌طور که از پروفیل AA مشخص می‌باشد سطح دگرسانی پتاسیک در قسمت جنوب شرقی منطقه پایین آمده و به همین دلیل بی‌هنجاری در این منطقه ریشه‌دار می‌باشد و عمق زیادی را نشان می‌دهد. مدل‌سازی وارون داده‌ها تنها تابع خودپذیری مغناطیسی می‌باشد. با توجه به مقاطع حاصل از مدل‌سازی در

حفاری‌های مختلف در منطقه و استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه و IP (روش‌های مستقیم جهت تشخیص کانی‌سازی مس) و اطلاعات زمین‌شناسی، وجود مگنتیت و کانی‌سازی مس در محدوده مورد مطالعه ثابت می‌شود. همچنین با بررسی نتایج به‌دست آمده، همان‌طور که نتایج مقایسه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان می‌دهند، ارتباط مستقیم بین کانی‌سازی مس و مگنتیت ثابت می‌شود به‌نحوی که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، میزان کانی‌سازی مس نیز عمدتاً در منطقه افزایش می‌یابد.

مراجع

اطلس راه‌های ایران، ۱۳۹۶، مؤسسه گیئاشناسی. واحد پژوهش، گیئاشناسی.

امیرپور اصل میان‌دواب، ا. و سهرابی، ق.، ۱۳۹۴، پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد برای تعیین مرز ساختارهای مغناطیسی و محل گسل‌های مدفون ایران، فصلنامه علوم زمین، ۲۵(۹۷)، ۱۱۵-۱۲۲.

حسین‌زاده، ق.، کلاگری، ع.ا.، مؤید، م.، حاج‌علیلو، ب. و مؤذن، م.، ۱۳۸۷ الف، بررسی‌های سنگ‌شناسی و سنگ‌زائی توده نفوذی اینچه (خاور هریس، آذربایجان شرقی). بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲(۲)، ۱۸۹-۲۰۶.

حسین‌زاده، ق.، کلاگری، ع.ا.، مؤید، م.، حاج‌علیلو، ب. و مؤذن، م.، ۱۳۸۷ ب، بررسی دگرسانی و کانی‌سازی مس پورفیری در منطقه سوناجیل (خاور هریس-استان آذربایجان شرقی)، علوم زمین، ۷۴، ۳-۱۲.

علمدار، ک.، ۱۳۸۸، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تجزیه و تحلیل داده‌های میدان پتانسیل در بعد فرکانس در تعیین ویژگی‌های توده‌های معدنی، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد.

کلاگری، ع.ا.، ۱۳۷۱، اصول اکتشاف ژئوفیزیکی، چاپ اول، انتشارات تابش، تهران.

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، در نواحی شمال، شمال‌شرق و شرق محدوده تباین بالایی از خودپذیری را نشان می‌دهد؛ ولی در قسمت جنوب‌شرقی و مرکز محدوده به نسبت تباین کمتری دارد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص می‌باشد در شمال محدوده بخشی از نهشته‌های ولکانیک-ولکانو وجود دارد؛ با توجه به زیاد بودن مگنتیت در این نهشته‌ها می‌توان زیاد بودن تباین در شمال تا شمال‌شرق محدوده را قابل توجیه دانست. همچنین نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی و تفسیر روش‌های ژئوفیزیکی دیگر از جمله روش مقاومت ویژه و IP و نتایج حاصل از حفاری‌های انجام شده، همراهی مگنتیت و کانی‌سازی مس را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص می‌باشد، ارتباط بین کانی‌سازی مس و مگنتیت به‌نحوی می‌باشد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی میزان کانی‌سازی مس هم افزایش می‌یابد. در نهایت با بررسی‌های اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه می‌توان به احتمال کانی‌سازی مگنتیت و مس در این منطقه پی برد.

۷. نتیجه‌گیری

شرایط زمین‌شناسی و بازدیدهای زمینی صورت گرفته از منطقه وجود کانی‌هایی همچون هماتیت و مگنتیت، کالکوپیریت را نشان می‌دهند. با توجه به همراهی کانی مگنتیت و کانی‌های سولفیدی مس، از روش مغناطیس‌سنجی برای شناسایی کانی‌سازی مس استفاده شده است. با بررسی نقشه‌های میدان مغناطیسی و برگردان به قطب، نقشه مشتق قائم اول، سیگنال تحلیلی، نتایج مدل‌سازی وارون و زمین‌شناسی منطقه می‌توان به وجود مگنتیت در منطقه پی‌برد، همچنین نقشه‌های ادامه فراسو نشان‌دهنده ریشه‌دار بودن کانی‌سازی می‌باشد. در نهایت با بررسی‌های انجام شده احتمال کانی‌سازی مگنتیت و مس پورفیری در عمق چندان دور از ذهن نیست. با انجام

- Blakely, J. R., 1996, Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press, 441 p.
- Bergon, C., Morris, T. and Ioup, J., 1990, "Upward and Downward continuation of Airborne Electromagnetic data", SEG 60th Annual International meeting, 696 -699
- Carranza, E.J.M. 2002. Geologically-Constrained Mineral Potential Mapping. PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 480 p.
- Carranza, E.J.M., Sadeghi, M. and Billay, A. 2015, Predictive mapping of prospectivity for orogenic gold, Giyani greenstone belt (South Africa, *Ore Geology Reviews*, 71, 703-718.
- Junior, D. C., Ribeiro, V. B., Mantovani, M. S. M. and Louro, V. H. A., 2013, "3D inversion of a subsurface magnetic anomaly: study case of Lucialva anomaly (SW of Mato Grosso, Brazil)", 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26-29 August 2013.
- Li, Y. and Oldenburg, D. W. 1996, "3-D inversion of magnetic data". *Geophysics*, 61(2), 394-804.
- Luyenyk, A. P. J., 1997, "Processing of airborne magnetic data: AGSO", *J. Aust. Geol. Geophys.*, 17, 31-38.
- Rezaie, M. and Moazam, S., 2017, A new method for 3-D magnetic data inversion with physical bound, *Journal of Mining & Environment*, 8(3), 501-510.
- Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. and Fletcher, T., 2012, High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan, *Economic Geology*, Vol. 107, 295–.233.
- Salem, A. and Ravat, D., 2003, Reduction to the pole as an inverse problem and its application to low latitude anomalies. *Geophysics*, 51, (2), 369 -382.
- Seedorff, E. Dilles, J., Proffett, J., Einaudi, M., Zurcher, L., Stavast, W., Johnson, D. and Barton, M., 2005, Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features, *Economic Geology 100th Anniversary*, 251-298.
- Silva, J. C. B. 1986, Reduction to the pole as an inverse problem and its application to low latitude anomalies, 51(2), 369-382.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., 1990, *Applied geophysics*, 2nd Edition, Cambridge Press, 800 p.
- Wang, J., Yao, C., Li, Z., Yuanman, Z., Shen, X., Zeren, Z. and Liu, W., 2020, 3D inversion of the Sichuan basin magnetic anomaly in South China and its geological significance, *Earth, Planets and Space*, 72, No. 20.
- Zuo, B., Hu, X., Cai, Y. and Liu, S., 2019, 3D magnetic amplitude inversion in the presence of self-demagnetization and remanent magnetization, *Geophysics*, Vol. 84, Issue 5, 1SO-Z28.

The association of copper mineralization with magnetic data in the Saunajil area and identification of the copper mineralization areas by means of modeling and interpretation of the data

Soltani Chamheidari, Z.¹, Kamkar Rouhani, A.^{2*}, Arab Amiri, A. R.² and Fathi Bayazidabad, S.³

1. M.Sc. Student, Department of Geophysics, School of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University Technology, Shahrood, Iran

2. Associate Professor, Department of Geophysics, School of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University Technology, Shahrood, Iran

3. M.Sc. Graduated, Department of Geophysics, School of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University Technology, Shahrood, Iran

(Received: 7 July 2019, Accepted: 25 May 2021)

Summary

Increasing demands of raw materials and energy resources has led to a fast growth in the geophysical studies. Due to the properties of minerals and geological conditions, there are various geophysical methods. Among these methods, magnetic method is capable of exploring the magnetic mineralization of rocks with relatively high or low magnetic properties. In this method, the magnetic field variations of the ground are measured. Sonajeel is located 17 kilometers from Harris, East Azarbaijan Province. The main stone units in this area are from the old to the new: volcanic and volcanoclastic rocks, Sonajeel porphyry stock, Incheh granitoid stock, and Okuzdaghi volcanic rocks. In this study, the magnetic method is used as an indirect method for identification of copper ore deposits. Based on the magnetic method, information can be obtained about the gradient, depth, shape, and extension of the source of anomalies. There are several examples for using this method (especially the airborne magnetic method) to explore the copper deposits. Including the copper project in the Cadia region of Australia, as well as the use of magnetism to explore the mineralization of copper and gold in the polymetal exploration area of Bashmaq Hashrood. For the aim of identification of copper mineralization in the study area, the magnetic data along 19 survey lines were carried out. The length of each line was considered to be 1000 meters and magnetic measurements were made at magnetic stations having distance intervals of 20 meters. The distance between the successive survey lines was 50 meters, except the distance between survey lines 19 and 18 that were located 30 meters from each other. The total survey area was about 1 km². After applying diurnal correction on the magnetic data, the processing of the data was made by applying various filters such as reduction to the pole (RTP) to remove the effect of the inclination angle and to locate the subsurface position of the anomaly that is assumed to be symmetrically placed on the creator mass, upward continuation filter to study the process of mineralization in depth, and also, vertical derivatives and analytical signal processing methods were used to estimate the anomalous boundaries. Three-dimensional (3D) modeling of the magnetic data was also carried out using the Mag3d software. The results indicated that the mineralization process was extended in the north and north-east to the south-east of the study area. Upward continuation filtering was applied to the data at altitudes of 20, 40, 80 meters. The maps resulting from this filtering represented the root of the subsurface anomaly in the southeastern of the region. As a result of comparison of the various magnetic images with the 3D model, obtained from modeling the magnetic data using the Mag3d software, we found out that the copper mineralization in the study area is scattered but covers a large range of the area. Moreover, according to the results of 3D modeling of the data, the magnetite susceptibility in north and northeast of the study area is more than that in south and southeast of the area. The contrast of the magnetic susceptibility in north of the study area from the depth of 100 m to 270 was high, however, in the east and southeastern parts of the study area, from the depth of more than 100 meters, there was a high magnitude of magnetic susceptibility. Hence, it can be concluded that in the northern parts of the study area, potassic alteration was closer to the ground surface. It should be mentioned that the potassic alteration is a good place for copper and magnetite mineralization as the copper and magnetite mineralization is located in the center or middle of the potassic alteration. By comparing and interpreting the magnetic results and assessing these results with the geological data or information from the study area, the probability of occurrence of the magnetite mineral and, consequently, the copper mineralization or deposits in the Sonajeel area is highly indicated.

Keywords: Magnetism, Modeling, Anomaly, Copper, Sonajeel.

* Corresponding author:

kamkarr@yahoo.com