

وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی و IP/Res برای بررسی ارتباط فضایی بین مدل‌های ژئوفیزیکی و کانی‌سازی در کانسار مس-طلاء پورفیری دالی جنوبی

محمد حاج حیدری^۱، سید محمد ابطحی فروزانی^{۲*}، هوشنگ اسدی هارونی^۲، کی تاش مشتاقیان^۱ و غزل جانقربان^۱

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۶/۱۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰)

چکیده

با توجه به نیاز اکتشاف منابع کم‌عیار نظیر پورفیری‌ها بدليل کاهش ذخایر کانه‌های معدنی پر عیار سطحی، امروزه پی‌جوبی‌های ژئوفیزیکی مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. وجود کانی‌هایی با خودپذیری مغناطیسی و رسانایی الکتریکی بالا در محدوده زون پتانسیک کانسارهای مزبور، استفاده از روش‌های مغناطیسی‌سنجدی، مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی را به منظور تخمین عمق و شکل کانسارهای مزبور امکان‌پذیر می‌سازد. در تحقیق حاضر داده‌های یادشده در محدوده کانسار پورفیری مس و طلاء دالی جنوبی مورد مطالعه مجدد قرار گرفته‌اند تا با انجام پردازش‌ها و مدل‌سازی‌های جدید، نتایج مطالعات قبلی را بهبود بخشدیده و ارتباط کانی‌زایی با مدل‌های ژئوفیزیکی جدید مشخص شود. در این بررسی برای اولین بار با انجام مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های پردازش شده مغناطیسی‌سنجدی در این منطقه و تحلیل خطای آن، مقاطعی از خودپذیری مغناطیسی در جهت آزمیوت گمانه‌های موجود در منطقه به همراه نتایج عیار طلاء و مس به دست آمده از آنالیز ژئوشیمیایی گمانه‌ها ارائه شد. همچنین نتایج مدل‌سازی وارون دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی در راستای سه پروفیل با خطای مناسب نیز ضمن سازگاری با نتایج مطالعات قبلی، با خودپذیری مغناطیسی تخمین‌زده شده در راستای یک پروفیل IP/Res مقایسه شد. مقایسه مقاطع و صحت‌سنجدی آنها با عیار مس و طلاء موجود در طول گمانه‌ها نشان می‌دهد که مناطق مشکوک به کانی‌سازی، در ارتباط با خودپذیری مغناطیسی و شارژپذیری بالا و مقاومت‌ویژه کم بوده و با توجه به مدل مغناطیسی، حداقل کانی‌سازی در حاشیه توده با خودپذیری مغناطیسی بالا مشاهده می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: خودپذیری مغناطیسی، مقاومت‌ویژه، شارژپذیری، مدل‌سازی وارون، کانسار مس پورفیری.

۱. مقدمه

مناسبی در روش‌های مغناطیسی‌سنجدی، مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی تبدیل کرده است (ژدانوف و پورتیناگوین، ۲۰۰۲؛ کلارک، ۲۰۱۴). پژوهشگران در سال‌های اخیر توانسته‌اند با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، نواحی اصلی کانی‌سازی پورفیری را مشخص کرده و ویژگی‌های اصلی ذخیره هم‌چون مرز، شکل و عمق آن را با دقت مناسب مشخص کنند (مصطفائی و رمضانی، ۲۰۱۸؛ بمانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ احمدی و رضایپور، ۲۰۲۰).

به طور کلی داشتن اطلاعات مناسب با ذخیره موردنظر و حدس اولیه پارامترهای مدل برای انجام مدل‌سازی وارون، یک اصل مهم به حساب می‌آید (الیس و اولدنبرگ، ۱۹۹۴). با توجه به ساختار افسانه‌ای و ریشه به نسبت زیاد

کانسارهای پورفیری، کانسارهایی با کانی‌سازی پراکنده، عیار کم و تناظر بالا می‌باشند که عمدتاً به دو گروه مس و مولیبدن پورفیری و مس و طلاء پورفیری تقسیم می‌شوند. این کانسارها در چند سال اخیر با توجه به پیشرفت علم فرآوری مواد معدنی اهمیت خاصی پیدا کرده‌اند به نحوی که امروزه حدود ۷۵ درصد مس، ۵۰ درصد مولیبدن و حدود ۲۰ درصد طلاء استخراجی در دنیا از این ذخایر استخراج می‌شود (سیلیتو، ۲۰۱۰). کانسارهای پورفیری، دارای نشانگرهای اکشافی شاخصی بوده که بر اساس آنها، ابزارهای اکتشافی همچون روش‌های ژئوفیزیکی ارتقا یافته‌اند. وجود کانی مگنتیت، عنصر فلزی و کانی‌های سولفیدی در نواحی اصلی ذخایر مس و طلاء پورفیری، این ذخایر را به هدف اکتشافی

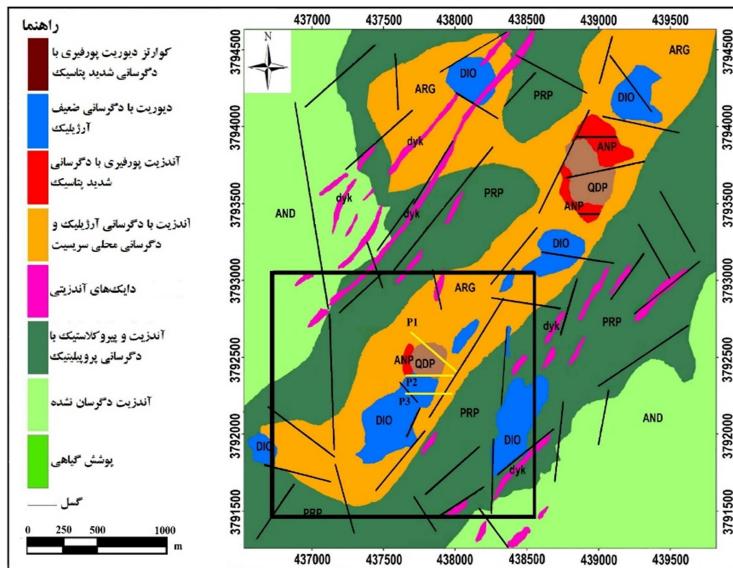
مطالعه مجدد داده‌های ژئوفیزیکی و انجام پردازش و مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنگی و مدل‌سازی وارون دو‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی بهمراه تحلیل خط، مطالعه قبلی فاتحی و اسدی هارونی (۱۳۹۷) را بهبود بخشیده و ارتباط فضایی بین مدل‌های یادشده با نواحی پر عیار مس و طلا را در منطقه مطالعاتی کانسار مس و طلا پورفیری دالی جنوبی بررسی کنیم.

۲. مطالعه موردنی
۲-۱. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
منطقه دالی در ۱۷۰ کیلومتری جنوب غرب تهران،^{۶۰} ۶ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان اراک و ۶ کیلومتری شمال غرب روستای راوه از توابع شهرستان دلیجان استان مرکزی بر روی کمر بند آتش‌فشانی ارومیه-دختر واقع شده است و راه اصلی دسترسی به محدوده اکتشافی نیز جاده دلیجان-سلفچگان می‌باشد (اسدی هارونی و سن سلیمانی، ۱۳۹۰). این محدوده، مطابق شکل ۱، عمدهاً توسط سنگ‌های آندزیت مربوط به دوران ائوسن و الیگوسن پوشیده شده که تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال به دگرسانی‌های پتاسیک، سیلیسی، فیلیک، کوارتز-آرژیلیک و پروپلیتیک تبدیل شده‌اند. کانی‌سازی مس و طلا پورفیری در این منطقه به ترتیب اهمیت، در ارتباط با دگرسانی‌های پتاسیک، سیلیسی و به‌طور محلی فیلیک است (اسدی و همکاران، ۲۰۱۴). این منطقه دارای دو انديس شمالی و جنوبی می‌باشد که بخش مورد مطالعه ما، منطقه جنوبی است. انديس جنوبی دالی، دارای دو ذخیره مس و طلا می‌باشد که کانی‌سازی اصلی دارای وسعت ۱۸۰ در ۱۶۰ متر بوده و عمدهاً در رابطه با توده نفوذی کوارتز دیوریتی مربوط به دوران الیگومیوسن، آلتراسیون پتاسیک و گسل‌های اطراف می‌باشد. داده‌های ژئوفیزیکی برداشت‌شده در منطقه شامل مغناطیس‌سنگی، مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی است.

ذخایر پورفیری، تخمین عمق مناسب این ذخایر برای انجام مدل‌سازی ژئوفیزیکی به خصوص برای داده‌های مغناطیس‌سنگی ضرورت دارد (فیترگرالد و همکاران، ۲۰۰۴؛ اسا و همکاران، ۲۰۲۱). جهت تخمین عمق می‌توان از روش‌هایی همچون روش واهمامیخت اویلر و طیف توان استفاده کرد (قاسمیان‌نیا و اسکویی، ۱۳۹۶؛ اکوسیلی و همکاران، ۲۰۱۹؛ کومار و همکاران، ۲۰۲۰).

ارتباط فضایی مدل ژئوفیزیکی ساخته شده با خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی نظیر جنس سنگ‌ها، دگرسانی‌ها و عیارهای کانی‌سازی، همواره از موضوعات چالش برانگیز برای محققان بوده است تا جایی که اولدنبرگ و همکاران (۱۹۹۷) ارتباط بین عیار طلا با مدل خودپذیری مغناطیسی در ذخیره پورفیری مس و طلا پورفیری را یک معما می‌دانستند. همچنین ملو و همکاران (۲۰۱۷) با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیس‌سنگی و مقاومت‌ویژه برداشت‌شده در محدوده یک ذخیره مس در کشور بزرگیل، وجود ارتباط بین مدل‌های به‌دست‌آمده با واحدها و ساختارهای زمین‌شناسی محدوده را تأیید کردند. بیرن و همکاران (۲۰۱۹) و والی و همکاران (۲۰۲۰) با انجام مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنگی یک ذخیره پورفیری واقع در کشور کانادا، یک راهنمای اکتشافی مهم از طریق ارتباط بین این مدل با زمین‌شناسی منطقه و میزان دگرسانی پیشنهاد کردند.

مطالعاتی که تاکنون در خصوص بررسی ارتباط فضایی کانی‌سازی با مدل‌های مربوط به پارامترهای ژئوفیزیکی مطرح شده‌اند، عموماً به مدل‌های خودپذیری مغناطیسی پرداخته‌اند و در خصوص ارتباط مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی با میزان عیار کانی‌سازی در ذخایر پورفیری مطالعات محدودی انجام شده است (واندیمو و همکاران، ۲۰۱۸؛ بابایی و همکاران، ۲۰۲۰؛ عابدی و همکاران، ۲۰۲۱). در این راستا ما تلاش کرده‌ایم ضمن

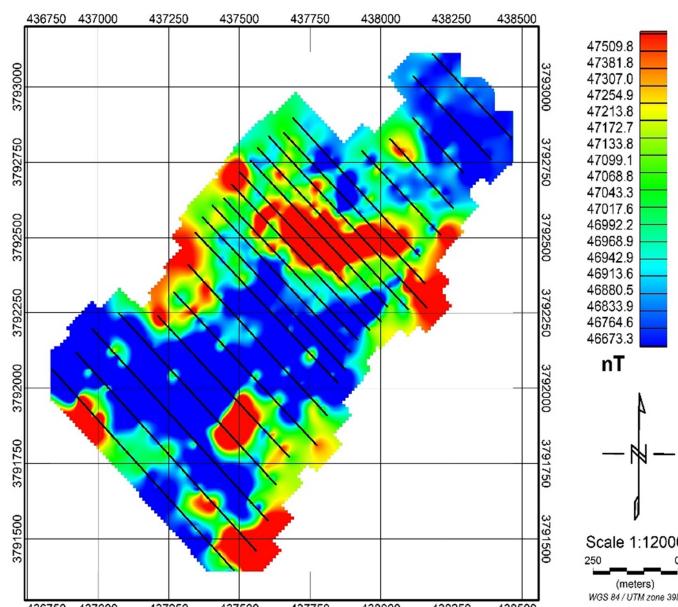


شکل ۱. نمایش انواع های شمالي و جنوبي دالی در نقشه زمین‌شناسي ۱:۱۰۰۰۰ (اسدي و همكاران، ۲۰۱۴). مستطيل با حاشيه سياه رنگ محدوده مورد نظر در مطالعه حاضر را نشان مي‌دهد. P1، P2 و P3 پروفيل‌های مربوط به محل برداشت داده‌های مقاومت ویژه و پالاريزاسيون القابی هستند.

در مناطق دارای احتمال کانی‌سازی مس و طلا، این فاصله حدود ۵۰ متر و برای سایر مناطق حدود ۱۰۰ متر می‌باشد. همچنین مقدار شدت میدان ژئومغناطیسی مرجع زمین در منطقه 470.88 nT و میزان زاویه میل و انحراف مغناطیسی به ترتیب $52/14$ درجه و $3/76$ درجه است. مقادیر یادشده برای پاره‌ای از پردازش‌ها نظیر تبدیل به قطب داده‌های مغناطیس‌سنگی استفاده شده‌اند. در این پژوهش به‌منظور تصحیحات و پردازش داده‌های مغناطیس‌سنگی منطقه از نرم افزار ۸.۴ Oasis Montaj استفاده شده است.

۲-۲. پردازش داده‌های مغناطیس‌سنگی منطقه

در منطقه دالی جنوبي، برداشت مغناطیس‌سنگی برای حدود ۱۵۰۰ نقطه، در ۲۴ پروفيل عمود بر ساختار زمین‌شناسي منطقه با استفاده از دستگاه مگنتومتر پروتونی G856 صورت گرفته است. در شکل ۲، مقدار شدت میدان مغناطیسی اندازه‌گيری شده در محدوده مورد مطالعه ديده می‌شود. همچنین پروفيل‌های خطوط برداشت داده‌ها نيز در محدوده مذبور با خطوط سياه رنگ نمایش داده شده است. فشردگی فواصل بين پروفيل‌ها ثابت نیست و



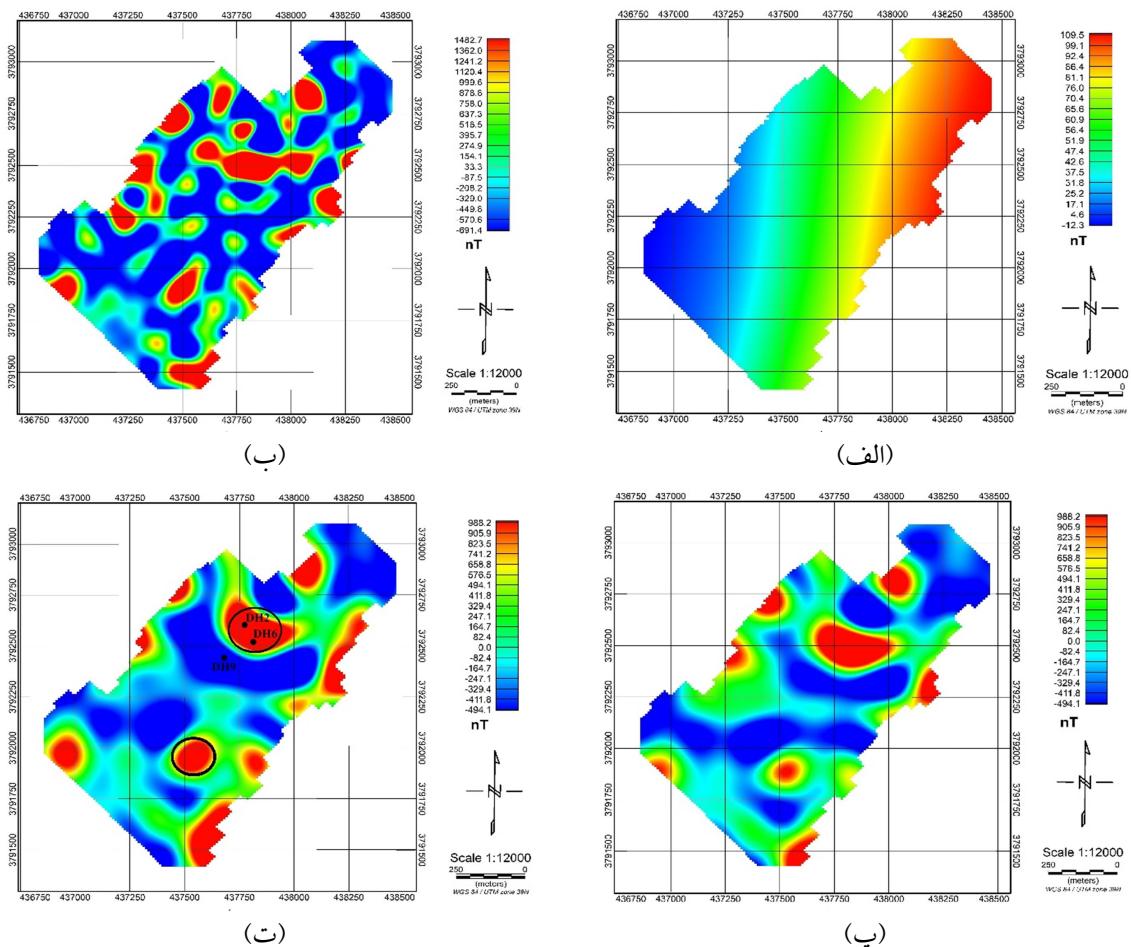
شکل ۲. نمایش نقشه شدت میدان مغناطیس کل منطقه قبل از اعمال تصحیحات به همراه پروفيل‌های برداشت به صورت خطوط سیاه رنگ.

حاشیه این ناحیه قرار دارد. در داده‌های بی‌هنجری برگردان به قطب شده در شکل ۳-ت، دو توده با بی‌هنجری مثبت که از اطراف با حلقه‌های از بی‌هنجری منفی محدود شده‌اند، با بیضی‌های سیاه‌رنگ مشخص شده‌اند؛ بنابراین به نظر می‌رسد که بی‌هنجری‌های مثبت یادشده مربوط به حضور زون پتاسیک هستند. همچنین حلقه‌های مربوط به کاهش شدت میدان مغناطیسی در اطراف آنها مرتبط با نواحی دگرسانی سیستم پوروفیری فاقد مگنتیت نظیر دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک می‌باشند که ناحیه اصلی کانی‌سازی را در برگرفته‌اند. در این مطالعه بی‌هنجری بزرگتر شمالی مورد بررسی قرار گرفت اما با توجه به فواصل زیاد پروفیل‌ها در این محدوده بی‌هنجری جنوبی و عدم وجود اطلاعات حفاری، ادامه پردازش‌ها و تحلیل‌ها بر روی بی‌هنجری شمالی صورت گرفت و از بررسی بیشتر بی‌هنجری جنوبی صرف نظر شد.

در مطالعه قبلی فاتحی و اسدی هارونی (۱۳۹۷)، به وجود دو بی‌هنجری در محدوده اندیس جنوبی دالی اشاره شده است اما به دلیل حذف نشدن اثر آلیازینگ و اثر ناحیه‌ای، مرزهای بی‌هنجری‌های به‌ویژه در مورد بی‌هنجری شمالی شکل ۳-ت به طور دقیق مشخص نشده است. همچنین در خصوص تخمین عمق منابع مغناطیسی و مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی نیز بخشی صورت نگرفته است. در پژوهش حاضر، افزون بر جداسازی بهتر بی‌هنجری شمالی، با تخمین عمق با دو روش طیف توان و واهمامیخت اویلر، عمق تقریبی توده‌های مغناطیسی تخمین‌زده شده و شکل و گسترش عمقی آنها نیز با انجام مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی مربوط به آن بی‌هنجری مشخص شده است.

بعد از اعمال تصحیح اثر تغییرات روزانه و حذف مقدار میدان ژئومغناطیسی مرجع، با توجه به مطالعات پیشین (فدى و کورتا، ۱۹۹۸، هاریمی، ۲۰۱۹؛ آزاد، ۱۳۹۴) با استفاده از فیلتر ادامه فراسو (Upward continuation) تا ارتفاع ۶۰۰ متری، روند تغییرات میدان مغناطیسی مطابق شکل ۳-الف، به صورت خطی درآمد که به عنوان اثر ناحیه‌ای در نظر گرفته شد. شکل ۳-ب، مقدار بی‌هنجری باقیمانده را پس از حذف اثر ناحیه‌ای نشان می‌دهد. سپس به منظور حذف اثر دگرگانی (Aliasing) و تقویت بی‌هنجری مربوط به توده‌های عمیق، از فیلتر پایین‌گذر (Lowpass filter) ۲۵۰ متری استفاده شد. در نهایت با فرض ناجیز بودن مغناطش پسماند (Remanent magnetization) و به منظور انتباط محل بی‌هنجری موردنظر با توده‌های منشأ آن، روش برگردان به قطب (Reduction to pole) با توجه به زاویه میل و انحراف مغناطیسی اعمال شد. لازم به ذکر است که با توجه مقدار عیار کانه مگنتیت در کانساری مس پوروفیری، از وجود مغناطش پسماند در تمامی مراحل این پژوهش صرف نظر شده است. شکل ۳ مراحل پردازش داده‌های تصحیح شده مغناطیسی‌سنگی منطقه را نشان می‌دهد که در آن، دو ناحیه مدور با بی‌هنجری بالا مغناطیسی در شمال و جنوب منطقه مشاهده می‌شوند که توسط حلقه مغناطیسی باشد کم احاطه شده‌اند. این ویژگی از خصوصیات ژئوفیزیکی ذخایر پوروفیری است (هولدن و همکاران، ۲۰۱۱).

بر اساس نظر کلارک (۲۰۱۴) در سیستم‌های مس و طلای پوروفیری، بیشترین تمرکز کانه مگنتیت در ناحیه دگرسانی پتاسیک واقع در مرکز سیستم است و مرکز اصلی کانی‌سازی نیز طبق نظریه لوول و گلبرت (۱۹۷۰) در



شکل ۳. پردازش داده‌های تصحیح شده مغناطیسی سنجی. (الف) نقشه بی‌هنگاری باقی‌مانده پس از حذف اثر ناحیه‌ای (پ) نقشه فیلتر پایین گذرن ۲۵۰ متری (ت) نقشه برگردان به قطب منطقه به همراه نمایش گمانه‌های ۶، ۷ و ۸ بی‌هنگاری‌های اصلی منطقه به صورت دایره سیاه رنگ.

تخمین می‌زنند. به عنوان مثال نقطه‌ای با مختصات (x_0, y_0, z_0) نشان‌گر مختصات منبع میدان پتانسیل واقع در پنجره متحرک یادشده است و مقدار میدان T , بی‌هنگاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده در هریک از نقاط با مختصات (x, y, z) واقع در پنجره مذکور است. همچنین B مقدار میدان ناحیه‌ای موجود در پنجره و N شاخص ساختاری توده است که مقدار آن برای توده‌های کروی، استوانه‌ای، گسل قائم شبیه‌لغز و گسل امتداد لغز به ترتیب برابر $1, 2, 3$ و 0 می‌باشد (رید و همکاران، ۱۹۹۰؛ هانسن و سوچو، ۲۰۰۲).

برای تخمین عمق منبع ایجاد کننده بی‌هنگاری اصلی منطقه با استفاده از روش واهمامیخت اویلر مطابق با معادله (۱)، چهار مدل با چهار ضریب ساختاری $1/5, 1, 2$ و 3 با

۲-۳. تخمین عمق تقریبی منابع مغناطیسی

از اطلاعات لازم برای تفسیر زمین‌شناسی و طراحی شبکه حفاری اکتشافی، تخمین عمق تقریبی توده مدفون است. همچنین در صورت تخمین عمق می‌توان از آن برای ضریب وزدن دهی به عمق (Depth weighting) در انجام مدل‌سازی وارون استفاده کرد (چلا و فدی، ۲۰۱۲). روش واهمامیخت اویلر (Euler deconvolution) یک روش تخمین عمق می‌باشد که با تعریف یک پنجره متحرک با اندازه مشخص بر روی نقشه‌ی داده بی‌هنگاری مغناطیسی محدوده مورد مطالعه، عمق توده منبع را برای داده‌های واقع در پنجره و در نقطه مرکزی آن با فرض مشخص بودن شکل هندسی توده به صورت

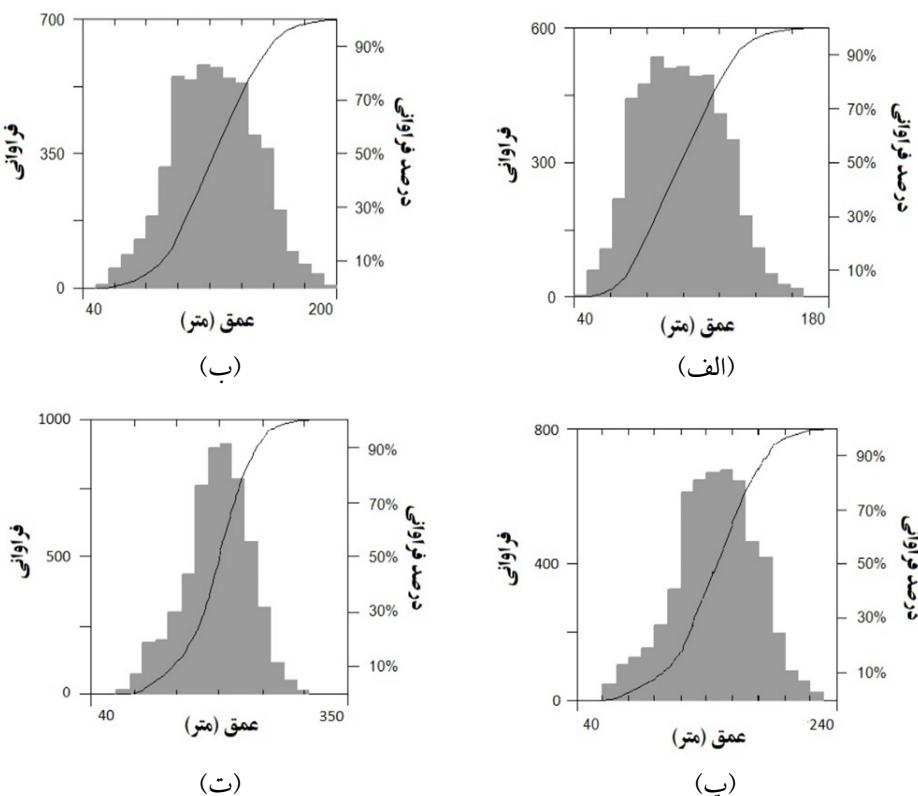
$$(x-x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B-T) \quad (1)$$

موج افقی رسم کرد و با برآش خط به نقاط موجود در نمودار یادشده و محاسبه نصف شیب آن، عمق توده مذکور را تخمین زد. شکل ۵ نمودار طیف توان محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد که با استفاده از رگرسیون خطی در سه محدوده از نمودار مذکور، سه شیب منفی ۲۶۱، ۸۵ و ۴۸ برای توده‌های مغناطیسی مدفون به دست آمد. از آنجاکه شیب خط روش طیف توان دو برابر عمق توده است، پس بیشینه عمق منابع مغناطیسی منطقه در این روش در حدود ۱۳۰ متر می‌باشد.

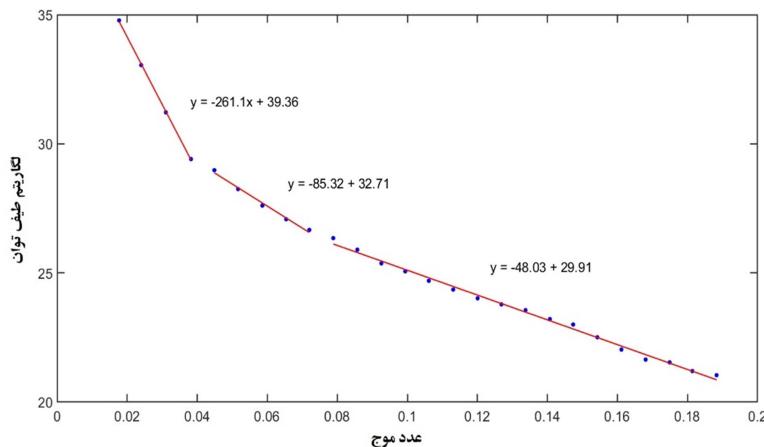
با مقایسه نتایج تخمین می‌توان دید که نتیجه تخمین عمق روش طیف توان تقریباً با نتیجه تخمین عمق روش واهمامیخت اویلر با ضریب $1/5$ مشابه بوده و بر این اساس با توجه به تخمین شکل واهمامیخت اویلر برای ضرایب ۱ و ۲، می‌توان گفت که احتمالاً شکل منابع مغناطیسی مذکور با ضریب تخمین عمق $1/5$ در واهمامیخت اویلر، مخلوطی از استوانه‌های نفوذی و یا دایک و یا دایک‌هایی با امتداد یافتنگی محدود می‌باشند.

پنجره ۲۰ متری بررسی شدند. شکل ۴ میزان تخمین عمق هر کدام از این چهار ضریب را نشان می‌دهد بهنحوی که میانگین تخمین عمق روش اویلر با ضریب ساختاری ۱ عمق حدود ۱۰۰ متر، ضریب ساختاری $1/5$ عمق حدود ۱۳۰ متر، ضریب ساختاری ۲ عمق حدود ۱۴۵ متر و ضریب ساختاری ۳ عمق حدود ۱۹۰ متر می‌باشد.

علاوه بر روش واهمامیخت اویلر، از روش طیف توان (Power spectrum) نیز برای تخمین عمق کلی منابع مغناطیسی محدوده مورد مطالعه استفاده شد. در این روش با استفاده از ویژگی تفاوت طول موج و دامنه سیگنال‌های ناشی از توده‌های کم عمق و عمیق، داده مغناطیسی با استفاده از تبدیل فوریه از حوزه فضایی به حوزه عدد موج نگاشته می‌شود. سپس با استفاده از سطح انرژی متفاوت سیگنال‌های مذکور، عمق توده‌های اصلی سازنده بی‌هنگاری تخمین زده می‌شود. اسپکتور و گرنت (۱۹۷۰) با فرض استوانه‌ای شکل بودن منابع مغناطیسی نشان دادند که می‌توان مقادیر لگاریتم طیف توان را در مقابل اعداد



شکل ۴. هیستوگرام عمق‌های تخمین‌زدشده برای منابع مغناطیسی داده‌ها از طریق روش اویلر با استفاده از ضریب ساختاری، (الف) $1/5$ (ب) 1 (پ) 2 (ت) 3 .



شکل ۵. نتیجه تخمین عمق با روش طیف توان. پاره خط‌های قرمز بر اساس رگرسیون خطی بین نقاط نمودار، در سه بخش با شیب‌های متفاوت به دست آمدند. بخش‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که اختلاف شیب خطوط پادشاه قابل توجه باشد.

اندازه‌گیری شده و \mathbf{d}^{pre} داده پیش‌بینی شده از پاسخ مدل تخمین زده شده است. همچنین \mathbf{W}_d ماتریس قطری وزن خطای مدل است که مؤلفه روی قطر آن، انحراف معیار خطای داده‌ها است (لی و اولدنبورگ، ۱۹۹۶).

در وارونسازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی سنجی، ارتباط بین مدل و داده خطی بوده و از کارآمدترین روش‌های وارونسازی این نوع داده‌ها به منظور تعیین توزیع خودپذیری مغناطیسی، روش لی و اولدنبورگ (۱۹۹۶) می‌باشد. در این روش طول مدل ϕ_m به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که تغییرات خودپذیری مغناطیسی در جهات مختلف تا حد امکان هموار باشد و از طریق تابع بهینه $\phi(m)$ مطابق معادله

$$\phi(m) = \phi_d + \beta \phi_m \quad (3)$$

تعادل بین طول خط و طول مدل با کمک β یا همان ضریب لاگرانژ (Lagrange multiplier) به منظور ساخت مدل با خطای مناسب و تطابق کافی با زمین‌شناسی صورت می‌گیرد. همچنین برای جلوگیری از تمرکزیافنگی منابع مغناطیسی در سطح زمین و توزیع آن در عمق، از ضریب وزن‌دهی به عمق به صورت

$$w(z) = \frac{1}{(z + z_0)^{3/2}} \quad (4)$$

در تعریف ϕ_m استفاده می‌شود که در آن مقدار z_0 عمق منبع مغناطیسی است. با وجود خطی بودن ذاتی تابع ϕ_d

۳. مدل‌سازی داده‌ها

۱-۱. مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی سنجی روش‌های تخمین عمق با دقت مناسبی می‌توانند عمق توده‌های رایج را مشخص کنند اما هم‌چنان قادر به تخمین گسترش عمقی توده و مخصوصاً تعیین شکل توده‌های پیچیده و نامنظم نیستند. بهمین دلیل انجام مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی ضرورت دارد. در مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی به دلیل پیچیدگی زمین، لازم است با فرض مدل‌های مختلف و محاسبه پاسخ ژئوفیزیکی آن‌ها، مدلی نزدیک به واقعیت‌های زمین‌شناسی را که پاسخش به اندازه کافی به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک باشد انتخاب کرد (وگل و همکاران، ۱۹۸۸). مشکل اصلی مدل‌سازی وارون، تخمین پارامترهای مدل و یکتا نبودن جواب است که می‌توان با اعمال محدودیت‌ها و فرض‌های ساده‌ساز و استفاده از اطلاعات مختلف همچون زمین‌شناسی و سایر روش‌های ژئوفیزیکی، کارآبی این روش را بهبود بخشید (اولدنبورگ و پرت، ۲۰۰۷).

در فرایند مدل‌سازی برای مقایسه بین اختلاف داده‌های اندازه‌گیری شده و پاسخ مدل تخمین‌زده شده، پارامتری به نام طول خط به صورت

$$\phi_d = \left\| \mathbf{W}_d (\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{d}^{\text{pre}}) \right\|_2^2 \quad (2)$$

تعریف می‌شود. در معادله (۳) \mathbf{d}^{obs} بردار داده واقعی

مرکز مش اندازه سلول‌ها ۱۰ متری بوده و به تدریج با فاصله گرفتن از مرکز، در کناره‌ها به ۱۰۶ متر رسید. در جهت عمق نیز ابعاد سلول‌ها از ۷ متر در بلوک‌های واقع در سطح زمین شروع شده و با افزایش عمق، این میزان به طور تدریجی افزایش پیدا کرده و به ۳۶ متر رسیده است. با توجه به پدیده‌های ایجاد کننده نوافه نظری رگه‌های پراکنده و سطحی دارای مغناطیدگی و مطالعات قبلی (کولمن و لی، ۲۰۱۸؛ لی و همکاران، ۲۰۱۷)، برای انحراف معیار داده‌های برداشت شده مقدار تجربی 5 nT فرض شد. همچنین مدل مرجع و مدل اولیه مدل، زمین همگن به ترتیب با خودپذیری مغناطیسی 0.01 و 0.001 در سیستم یکاهای SI در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت مدل‌سازی‌های متعدد با ضرایب لاغرانژ‌های مختلف به منظور تعیین مدل بهینه با خطا قابل قبول انجام شد. شکل ۶ تغییرات RMS نسبت به تغییرات طول مدل را نشان می‌دهد.

در شکل ۶، نقطه قرمزنگ، مدلی را نشان می‌دهد که بهترین انطباق را با واقعیت‌های زمین‌شناسی داشته است. میزان خطای مناسب مدل‌سازی در نقطه مزبور دو برابر تعداد داده‌ها و مطابق با معادله (۶)، معادل RMS برابر $1/4$ می‌باشد و همچنین پارامتر مانع از 0.06 تا 0.002 تغییر کرده است. این مدل با استفاده از یک سیستم رایانه دو هسته‌ای با فرکانس 2.7 گیگاهرتز و رم 8 گیگابایت طی حدود 35 دقیقه ساخته شده است.

تابع بهینه این روش رفتار غیرخطی دارد. دلیل این مسئله استفاده از یک مانع لگاریتمی به منظور حذف مقادیر منفی و غیرواقعی خودپذیری مغناطیسی مطابق با معادله

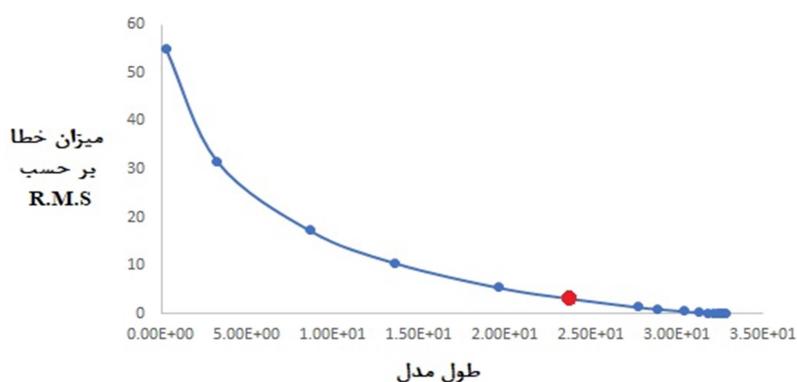
$$\phi(\mathbf{m}) = \phi_d + \beta \phi_m - 2\lambda \sum_{j=1}^M \ln(\mathbf{m}_j) \quad (5)$$

است. در معادله (۵) عبارت $\sum_{j=1}^M \ln(\mathbf{m}_j)$ -تابع مانع Barrier function و λ پارامتر مانع (parameter) می‌باشد. (لی و اولدنبرگ، ۲۰۰۳). در نهایت می‌توان خطای نهایی مدل‌سازی را بر اساس روش جذر میانگین مربعات خطأ (Root mean square) یا به اختصار RMS به صورت

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\Phi_d}{N}} \quad (6)$$

مطرح کرد. در این روش طول خطأ مطابق با معادله (۲) نسبت به N یا همان تعداد داده‌ها نرمال شده و توزیع خطأ به صورت نرمال و غیراریب (Unbiased) در نظر گرفته می‌شود (چای و دراکسلر، ۲۰۱۴).

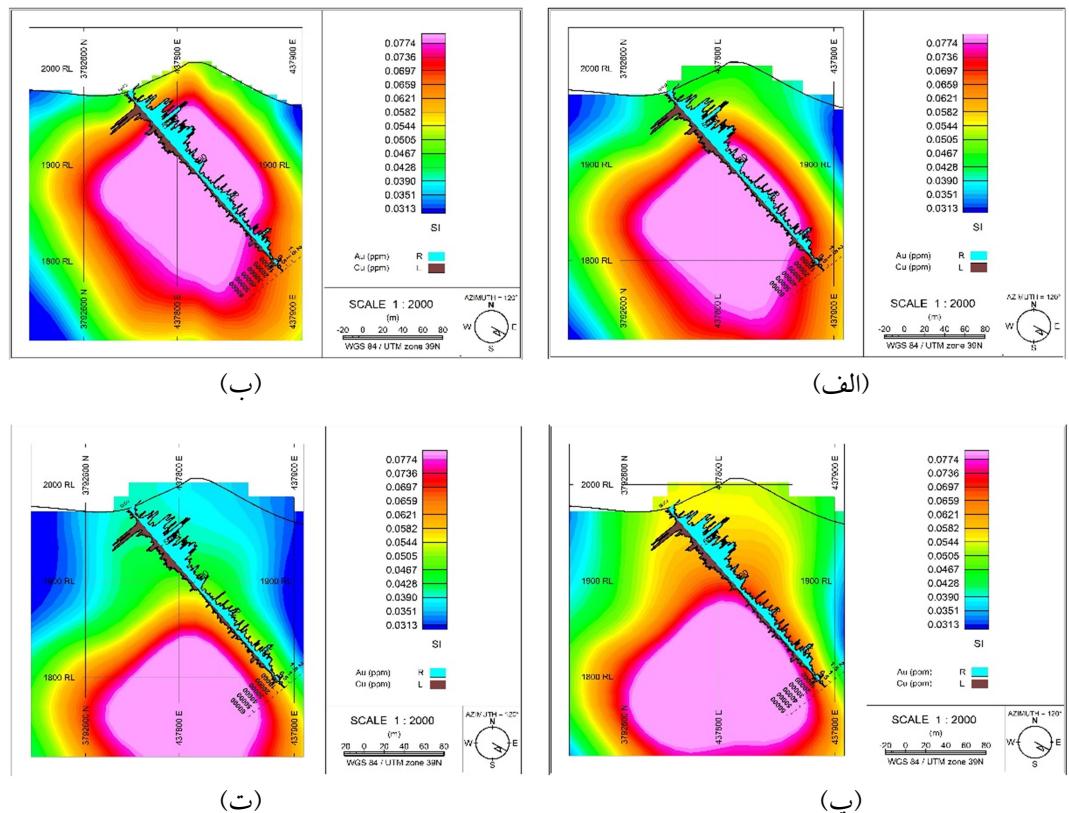
در منطقه دالی جنوبی برای تعیین شکل و گسترش عمق توده‌های مغناطیده، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی‌سنگی اندیس اصلی یا استفاده از الگوریتم لی و اولدنبرگ (۲۰۰۳) و از طریق نرم‌افزار Mag 3D 4.0 صورت گرفت. برای مدل‌سازی از یک مش با تعداد سلول $110 \times 57 \times 105$ استفاده شد که به منظور افزایش دقت در مدل‌سازی بی‌亨جاری مورد نظر، در جهت افق و در



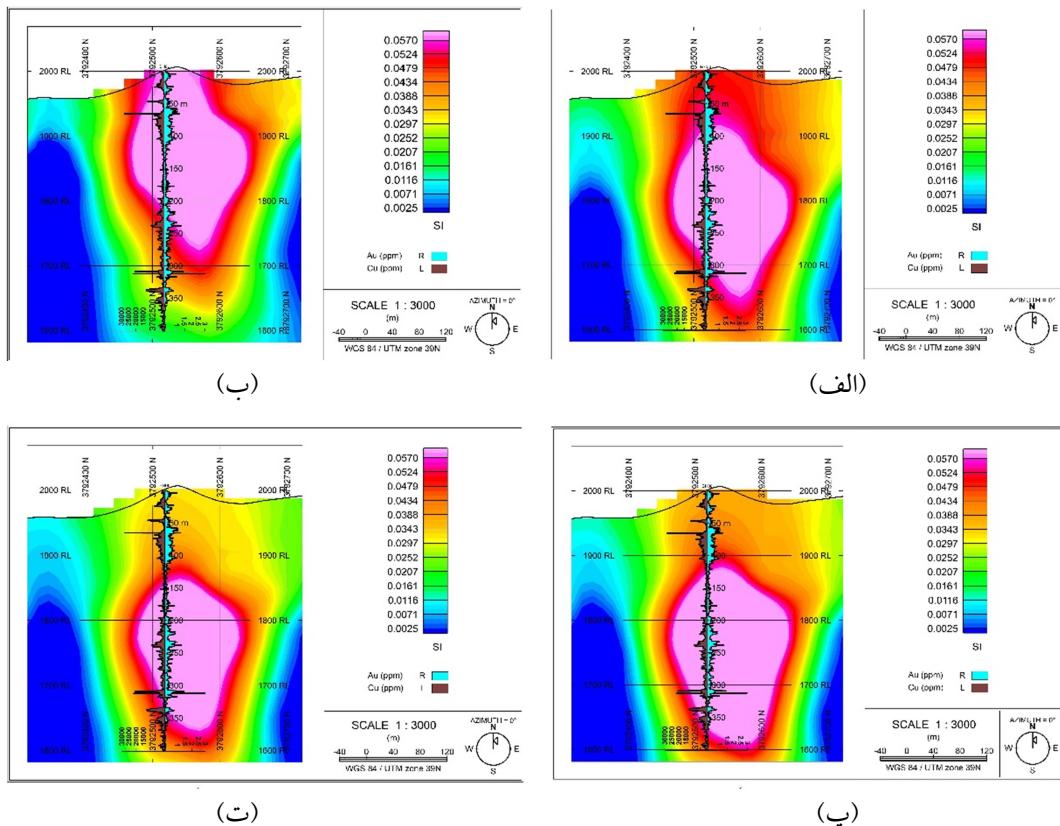
شکل ۶. ترسیم منحنی با توجه به خطأ و طول مدل در مدل‌سازی‌های مختلف. نقطه قرمزنگ خطای مدل انتخاب شده را نشان می‌دهد.

مس و طلا را ثبت کردند که به ترتیب دارای آزمیوت 120° , 0° و 45° درجه بوده و به اندازه 240 , 400 و 550 متر حفر شده‌اند. محل حفر این گمانه‌ها در شکل ۳-پ، بر روی نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی سنجی مشاهده می‌شود. شکل‌های 7 , 8 , 9 و 9 به ترتیب مقاطع عمودی مدل مغناطیسی در جهت آزمیوت سه گمانه 2 , 6 , 2 و 9 بوده که هر یک از شکل‌های مذبور دارای چهار بخش الف، ب، پ و ت به ترتیب برای نشان دادن مدل خودپذیری مغناطیسی تخمین‌زده شده بر اساس طیف توان و واهمامیخت اویلر با ضرایب 1 , 2 و 3 می‌باشد. در این مقاطع توپوگرافی منطقه لحاظ شده و باشند. در این مقاطع توپوگرافی منطقه لحاظ شده و عیارهای طلا و مس بر حسب ppm به ترتیب با رنگ آبی و قهوه‌ای در اطراف گمانه‌ها مشخص شده‌اند و زمینه رنگی شکل‌ها مقادیر مربوط به خودپذیری مغناطیسی را نشان می‌دهد.

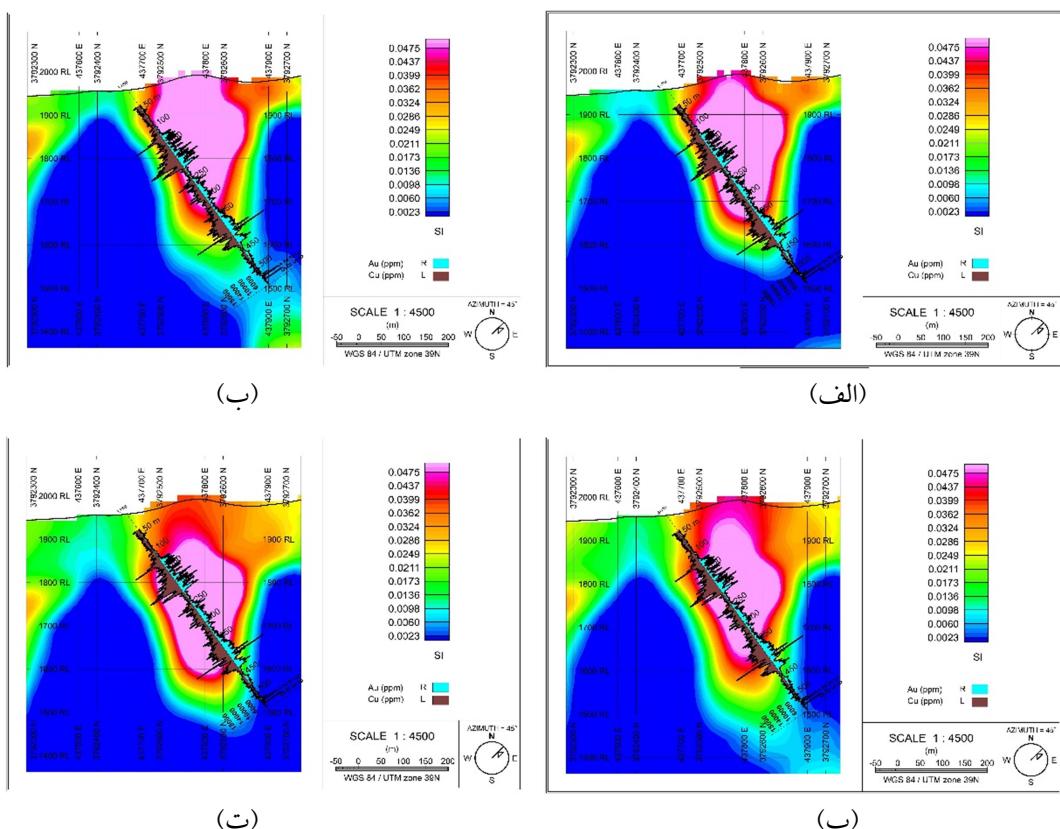
برای ضریب وزن‌دهی به عمق در معادله (۴) مقدار z_0 براساس نتایج تخمین عمق از روش طیف توان و واهمامیخت اویلر حدس‌زده می‌شود. برای بررسی این که کدام مقدار تخمین‌زده شده برای z_0 صحیح‌ترین مدل را با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی به دست می‌دهد. بر اساس هر یک از عمق‌های طیف توان و واهمامیخت اویلر با ضرایب ساختاری 1 , 2 و 3 یک مدل‌سازی وارون با وزن‌دهی به عمق جداگانه انجام شد و مدل‌های مذبور با اطلاعات گمانه‌های موجود در محدوده مقایسه شدند. ضمناً به دلیل آن که عمق تخمین‌زده شده از روش واهمامیخت اویلر با ضریب ساختاری $1/5$ با عمق تخمین‌زده شده از روش طیف توان تقریباً برابر است، مدل‌سازی جداگانه‌ای برای آن صورت نگرفت. در منطقه دالی جنوبی 7 گمانه حفر شده که از این گمانه‌ها، گمانه شماره 2 , 6 و 9 بر حسب اطلاعات حفاری بیشترین عیار



شکل ۷. مقاطع مدل مغناطیسی در جهت آزمیوت گمانه 2 با ضریب وزن‌دهی به عمق روش طیف توان (الف) اویلر با ضریب ساختاری 1 (ب) 2 (ت) 3



شکل ۸ مقطع مدل مغناطیسی در جهت آزموت گمانه ۶ با ضرب وزندهی به عمق روش الف) طیف توان ب) اویلر با ضرب ساختاری ۱ (ب) ۲ (ت) ۳.



شکل ۹. مقطع مدل مغناطیسی در جهت آزموت گمانه ۹ با ضرب وزندهی به عمق روش الف) طیف توان ب) اویلر با ضرب ساختاری ۱ (ب) ۲ (ت) ۳.

DCIP2D 1.0.0 با الگوریتم غیرخطی اولدنبُرگ و لی (۱۹۹۴) استفاده شده است. در این الگوریتم نیز از تابع بهینه معادله (۳) استفاده شده است با این تفاوت که با توجه به ارتباط غیر خطی بین مدل و داده برای داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی، برای رسیدن به یک مدل نزدیک به واقعیت زمین‌شناسی و با خطای مناسب لازم است تابع مزبور با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مسائل غیرخطی، ابتدا به معادله‌ای خطی در هر مرحله از تکرارهای مکرر (Iterations) برای حل مسئله تبدیل شود تا با استفاده از روش حداقل مربعات گاووس-نیوتون (Gauss-Newton least-squares)، مدل تخیینی بهنحوی محاسبه شود که خطای مدل‌سازی به مقدار قابل قبولی همگرا شود (اولدنبُرگ و لی، ۲۰۰۵).

برای مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی در محدوده مورد نظر، مش مورد استفاده 32×60 بوده که اندازه سلول مش در جهت افقی از 20 متر در مرکز مش تا 100 متر در حاشیه‌ها و در جهت قائم از 5 متر در سطح زمین تا 10 متر در عمیق‌ترین بلوک‌های مش می‌باشد. برای مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه، مدل مرجع و مدل اولیه به صورت زمین همگن به ترتیب با مقاومت‌ویژه 3000 و 1000 اهم‌متر فرض شدند. در مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های پلاریزاسیون القایی با توجه به حضور گستره کانی پیریت در کانسارهای مس پورفیری، مدل مرجع و مدل اولیه نیز زمین همگن به ترتیب با شارژپذیری 30 و 10 میلی ثانیه فرض شدند. سپس برای هر دو مدل‌سازی، انحراف معیار مرتبط با داده‌های برداشت مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی با توجه به محدوده مورد نظر و مطالعات قبلی (تریپ و همکاران، ۱۹۸۴؛ یوال و اولدنبُرگ، ۱۹۹۷) برابر 5 درصد فرض شد. در نهایت مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های هر پروفیل طی حدود 10 دقیقه و با خطای RMS برابر 1 مطابق با معادله (۶) انجام شد. نتایج مدل‌سازی وارون برای سه پروفیل یادشده به صورت مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و شارژپذیری

با توجه به مدل کلارک (۲۰۱۴) انتظار می‌رود که بیشترین مقدار مگنتیت در زون پتاسیک و کف آن متمرکز باشد و همچنین مطابق با مدل لوول و گلبرت (۱۹۷۰)، بیشترین تمرکز کانی‌سازی مس و طلا نیز در حاشیه زون پتاسیک است. بنابراین انتظار می‌رود که بیشترین کانی‌سازی در حاشیه محدوده‌های با خودپذیری مغناطیسی بالا مشاهده شود. شکل‌های 7 ، 8 و 9 نشان می‌دهند که عموماً حداکثر کانی‌سازی مس و طلا پورفیری در ناحیه هیپوژن، در حاشیه توده با خودپذیری مغناطیسی بالا که نشان از وجود کانی مگنتیت است، قرار دارد. در میان مدل‌های مربوط به تخمین عمق‌های مختلف به نظر می‌رسد مدلی که عمق وزنی آن بر اساس روش طیف توان و اویلر با ضریب ساختاری $1/5$ ساخته شده بیشتر به مدل لوول و گلبرت شباهت دارد. این مسئله به‌ویژه خود را در مدل شکل 7 -الف بهتر نشان می‌دهد که در آن به‌وضوح مرزهای تغییرات شدید خودپذیری مغناطیسی منطبق بر حضور کانی‌سازی‌های مس و طلا هستند. حال آن‌که تطابق مذکور در سایر مدل‌ها با ضریب وزن‌دهی به عمق متفاوت چندان واضح نیست. پس می‌توان گفت که روش طیف توان و اویلر با ضریب ساختاری $1/5$ با دقت مناسبی توانستند عمق اصلی بی‌亨جاری مغناطیسی را تخمین بزنند. این حقیقت بیانگر آن است که توده‌های مگنتیتی در این ذخیره رفتاری بین دایک و استوانه قائم دارند.

۲-۳. مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی

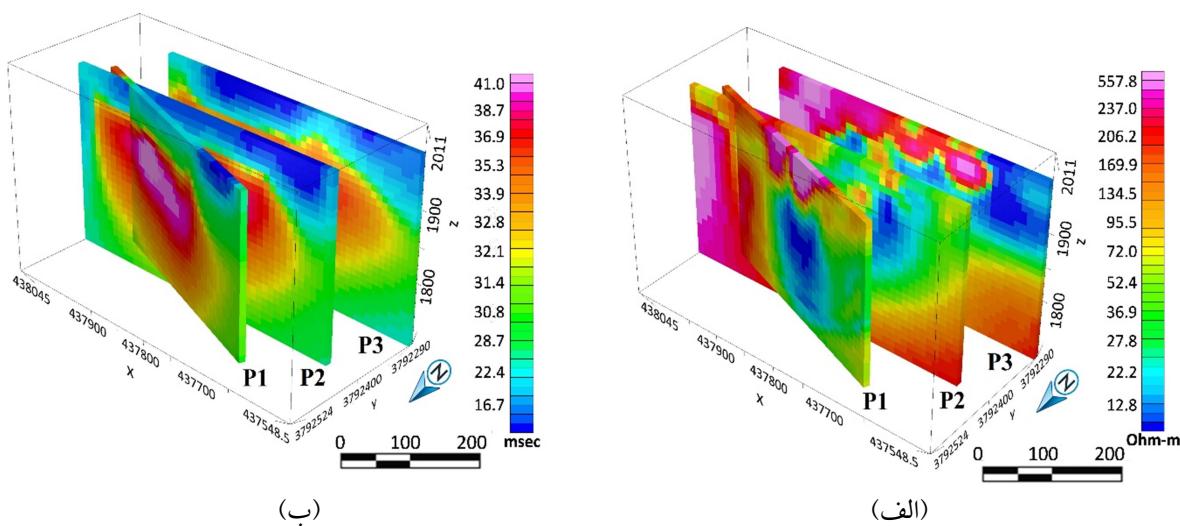
در منطقه دالی جنوی برای برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی از آرایه قطبی-دوقطبی و دستگاه Scintrex IPR9 استفاده شده است. مطابق شکل 1 در این منطقه سه پروفیل با طول 400 متر و با فاصله الکترودی 20 متر برداشت شده که پروفیل 1 آزیموت 120 درجه و پروفیل‌های 2 و 3 آزیموت 90 درجه دارند. برای مدل‌سازی وارون دوبعدی این داده‌ها از نرم‌افزار

شدید خودپذیری مغناطیسی در شکل ۸-الف نیز انطباق دارد. همچنین در شکل‌های ۱۱-ب و ۱۱-ت مشاهده می‌شود که حداکثر میزان پیریت و کالکوپیریت، منطبق بر نواحی با حداقل مقاومت‌ویژه و حداکثر شارژپذیری هستند. عیارهای طلا و مس بر حسب ppm و میزان کانی‌های پیریت و کالکوپیریت بر حسب درصد و تنها در منطقه هیپوزن گزارش شده‌اند که بازه تغییرات کانی پیریت در گمانه از $0/5$ تا 4 درصد و بازه تغییرات درصد کالکوپیریت از $1/5$ تا $1/3$ می‌باشد.

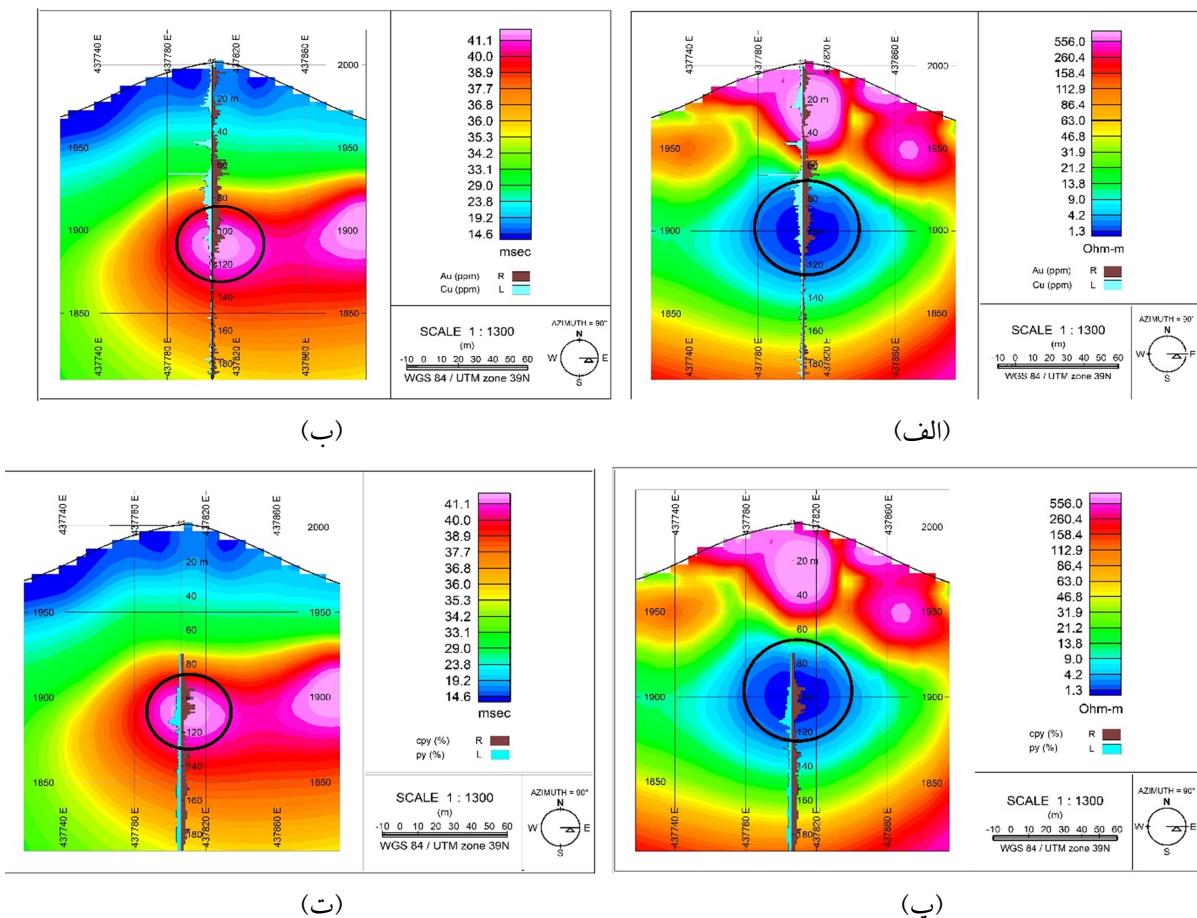
مدل‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی در این مطالعه، ارتباط فضایی بین مقاومت‌ویژه و شارژپذیری را با کانی‌سازی مس و طلا و همچنین درصد پیریت و کالکوپیریت نشان دهنده بین معنی که نواحی دارای حداکثر عیارهای مس و طلا و حداکثر مقادیر کانی‌های پیریت و کالکوپیریت، دارای حداقل مقاومت‌ویژه و حداکثر شارژپذیری می‌باشند. همچنین مقاومت‌ویژه بالای نزدیک سطح زمین زمین مربوط به زون سیلیسی شده است که وجود آن را فاتحی و اسدی هارونی (۱۳۹۷) در سطح زمین تأیید کرده‌اند.

الکتریکی در اشکال (۱۰-الف) و (۱۰-ب) به ترتیب مشاهده می‌شوند. با توجه به حضور کانه‌های فلزی و بهویژه کانی پیریت در عمق و مرکز کانی‌سازی، کاهش مقاومت‌ویژه و افزایش شارژپذیری در شکل‌های یادشده قابل توجیه است.

دو پروفیل ۲ و ۳ مقاومت‌ویژه به نسبت بالایی را از خود نشان می‌دهند و مطابق نقشه زمین‌شناسی ارائه شده در شکل ۲، دور از محدوده اصلی ذخیره می‌باشند در حالی که پروفیل ۱، عمود بر ساختار اندیس اصلی مس و طلا دالی جنوبی می‌باشد و بر روی بی‌亨جارتی مثبت مغناطیسی قرار دارد. در راستای این پروفیل، گمانه ۶ حفر شده که یکی از بهترین گمانه‌های منطقه از لحاظ بالا بودن عیار مس و طلا می‌باشد. اشکال (۱۱-الف) و (۱۱-ب) نشان می‌دهند که عیارهای بالای طلا و مس به دست آمده از گمانه ۶، با حداقل مقاومت‌ویژه و حداکثر شارژپذیری که با دایره سیاه رنگ مشخص شده‌اند، ارتباط فضایی معناداری دارند و در اعمق کمتر از عمق مربوط به حداقل مقاومت‌ویژه و حداکثر شارژپذیری حضور دارند. این نتیجه با قرارگیری عیارهای بالاتر در مرز فوقانی تغییرات



شکل ۱۰. نتیجه مدل‌سازی وارون مدل‌های دوبعدی (الف) مقاومت‌ویژه و (ب) شارژپذیری الکتریکی در امتداد مقاطع قائم منطبق بر پروفیل‌های P1، P2 و P3. محل پروفیل‌های یاد شده در شکل ۲ مشخص شده است.



شکل ۱۱. مقایسه بین عیارهای گمانه ۶ بر حسب ppm با مدل (الف) مقاومت‌ویژه (ب) پلاریزاسیون القابی و مقایسه بین درصد پیریت و کالکوپیریت گمانه ۶ با مدل (پ) مقاومت‌ویژه (ت) پلاریزاسیون القابی. دوازه سیاه رنگ خداکثر شارژ‌پذیری و حداقل مقاومت‌ویژه را نشان می‌دهند.

تخمین‌زده شده توسط طیف توان و واهمامیخت اویلر با ضریب ساختاری ۱/۵ مشخص شد که توده‌های مغناطیسی موجود در کانسار مس و طلای پورفیری محدوده دالی جنوبی رفتاری بین دایک و استوانه قائم از خود نشان می‌دهند. ضمناً وجود ارتباط فضایی معنی‌دار بین کانی‌سازی مس و طلای پورفیری با تغییرات شدید خودپذیری مغناطیسی، مقاومت‌ویژه کم و شارژ‌پذیری، به نسبت زیاد می‌باشد و بیشترین مقدار غنی‌سازی مس و طلا در حاشیه توده با خودپذیری مغناطیسی قوی رخ داده است.

تشکر و قدردانی

با تشکر از شرکت معدنی درسا پردازه بابت در اختیار گذاشتن انواع اطلاعات کانسار مس و طلای

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با هدف بهبود مطالعات قبلی و بررسی ارتباط فضایی بین بی‌亨جاری‌ها و مدل‌های ژئوفیزیکی با کانی‌سازی مس و طلای پورفیری، مدل‌های خودپذیری مغناطیسی، مقاومت‌ویژه و شارژ‌پذیری الکتریکی حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی کانسار مس و طلای پورفیری دالی جنوبی با اطلاعات ژئوشیمیایی به دست آمده از آنالیز گمانه‌های اکتشافی مقایسه شدند. مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجدی با چهار روش وزن‌دهی به عمق متفاوت انجام شد. مقایسه مدل‌های یادشده با اطلاعات گمانه‌ها نشان داد که استفاده از روش طیف توان برای تخمین عمق توده‌ها، بهترین انطباق را با مدل لول و گلیبرت (۱۹۷۰) برای کانسارهای مس پورفیری نشان می‌دهد. همچنین از نتیجه مشابه عمق

پورفیری دالی جنوبی و همکاری که در انجام این پژوهش داشتند.

مراجع

- اسدی هارونی، م. و سن سلیمانی، ع.، ۱۳۹۰، مطالعات مرحله پی جویی کانسار مس-طلای پورفیری دالی در استان مرکزی، *فصلنامه زمین‌شناسی اقتصادی*، ۱۰(۲)، ۶۷۵-۶۳۹.
- فاسیانی، ر. و اسکویی، ب.، ۱۳۹۶، تخمین عمق، مکان و هندسه بی‌هنگاری‌های مغناطیسی به روش عدد موج محلی بهبودیافته، *مجله فیزیک زمین و فضاء*، ۱(۴۳)، ۱۲۱-۱۱۵.
- Asadi, H., Porwal, A., Fatehi, M., Kianpouryan, S. and Lu, Y., 2014, Exploration feature selection applied to hybrid data integration modeling: Targeting copper-gold potential in central Iran Exploration feature selection applied to hybrid data integration modelin: Targeting copper-gold potential in central Iran, *Ore Geology Reviews*, 71, 819–838.
- Ahmadi, R. and Rezapour, M. R., 2020, Proposing the optimum locations for drilling in Saveh North-Narbaghi porphyry copper deposit on the basis of geophysical data modeling, *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 12(4), 95-121.
- Abedi, M., Babaei, M., Norouzih, G. and Kazem Alilou, S., 2021, 3D inverse modeling of electrical resistivity and induced polarization data versus geostatistical-based modeling. *Geopersia*.
- Byrne, K., Lesage, G., Morris, W.A., Enkin, R.J., Gleeson, S.A. and Lee, R.G., 2019, Variability of outcrop magnetic susceptibility and its relationship to the porphyry Cu centers in the Highland Valley Copper district, *Ore geology reviews*, 107, 201-217.
- Bemani, M., Mojtabahedzade, S. H. and Ansari. A., 2019, Investigation And Adaptation Of Geophysical Data With Alteration Zones Of Aliabad Damak Copper Deposit, *Journal of Mineral Resources Engineering*, 4(1), 21-43.
- Babaei, M., Abedi, M., Norouzi, G. H. and Kazem Alilou, S., 2020, Geostatistical modeling of electrical resistivity tomography for imaging porphyry Cu mineralization in Takht-e-Gonbad deposit, Iran, *Journal of Mining and Environment*, 11(1), 143-159.
- Cella, F. and Fedi, M., 2012, Inversion of potential field data using the structural index as weighting function rate decay, *Geophysical Prospecting*, 60(2), 313-336.
- آزاد، م.، ۱۳۹۴، کاربرد فیلتر گسترش رو به بالا در تفسیر داده‌های میدان مغناطیسی به همراه تعیین ارتفاع بهینه در منطقه منصورآباد بزد، ایران، *مجله فیزیک زمین و فضاء*.
- Clark, D. A., 2014, Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review, *Tectonophysics*, 624, 46-65.
- Chai, T. and Draxler, R. R., 2014, Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geoscientific model development*, 7(3), 1247-1250.
- Coleman, C. and Li, Y., 2018, Quantifying the error level in computed magnetic amplitude data for 3D magnetization inversion, *Geophysics*, 83(5), J75-J84.
- Ellis, R. G. and Oldenburg, D. W., 1994, Applied geophysical inversion, *Geophysical Journal International*, 116(1), 5-11.
- Essa, K. S., Mehane, S. and Elhussein, M., 2021, Magnetic Data Profiles Interpretation for Mineralized Buried Structures Identification Applying the Variance Analysis Method, *Pure and Applied Geophysics*, 178(3), 973-993.
- Fedi, M. and Quarta, T., 1998, Wavelet analysis for the regional-residual and local separation of potential field anomalies [Link]. *Geophysical prospecting*, 46(5), 507-525.
- FitzGerald, D., Reid, A. and McInerney, P., 2004, New discrimination techniques for Euler deconvolution, *Computer and Geoscience*, 30(5), 461-469.
- Hansen, R. O. and Suciu, L., 2002, Multiple-source Euler deconvolution, *Geophysics*, 67(2), 525-535.
- Holden, E. J., Fu, S. C., Kovacs, P., Dentith, M., Bourne, B. and Hope, M., 2011, Automatic identification of responses from porphyry intrusive systems within magnetic data using image analysis, *Journal of Applied Geophysics*, 74(4), 255-262.
- Harimei, B., 2019, Analysis of Regional Anomaly on Magnetic Data Using the Upward Continuation Method, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 531(1).

- Earth and Environmental Science, 279(1), 012037.
- Kumar, R., Bansal, A. R. and Ghods, A., 2020, Estimation of depth to bottom of magnetic sources using spectral methods: Application on Iran's aeromagnetic data, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(3), e2019JB018119.
- Lowell, J. D. and Guilbert, J. M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits, Economic Geology, 65(4), 373–408.
- Li, Y. and Oldenburg, D. W., 1996, 3-D inversion of magnetic data, Geophysics, 61(2), 394–408.
- Li, Y. and Oldenburg, D. W., 2003, Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method, Geophysical Journal International, 152(2), 251 – 265.
- Li, W., Lu, W., Qian, J. and Li, Y., 2017, A multiple level-set method for 3D inversion of magnetic data, Geophysics, 82(5), J61-J81.
- Melo, A. T., Sun, J. and Li, Y., 2017, Geophysical inversions applied to 3D geology characterization of an iron oxide copper-gold deposit in Brazil, Geophysics, 82(5), K1-K13.
- Mostafaei, K. and Ramazi, H. R., 2018, 3D model construction of induced polarization and resistivity data with quantifying uncertainties using geostatistical methods and drilling (Case study: Madan Bozorg, Iran), Journal of Mining and Environment, 9(4), 857–872.
- Oldenburg, D. W. and Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data, Geophysics, 59(9), 1327-1341.
- Oldenburg, D. W., Li, Y. and Ellis, R. G., 1997, Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history for Mt. Milligan, Geophysics, 62(5), 1419-1431.
- Oldenburg, D. W. and Li, Y., 2005, Inversion for applied geophysics: A tutorial, Near-surface geophysics, 89-150.
- Oldenburg, D. W. and Pratt, D. A., 2007, Geophysical Inversion for Mineral Exploration: a Decade of Progress in Theory and Practice, Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 61–95.
- Okwesili, N. A., Chiebonam, E. K. and Awucha, I. E., 2019, Euler Deconvolution and Source Parameter Imaging of aeromagnetic data of Guzabure and Gudumbali regions, Chad Basin, North Eastern Nigeria, IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP), 11(3), 01-10.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J. and Somerton, I. W., 1990, Magnetic interpretation in 3-D using euler deconvolution, Geophysics, 55(1), 80-91.
- Spector, A. and Grant, F. S., 1970, Statistical models for interpreting aeromagnetic data, Geophysics, 35(2), 293-302.
- Sillitoe, R., 2010, Porphyry Copper Systems, Economic Geology, 105(1), 3-41.
- Tripp, A. C., Hohmann, G.W. and Swift Jr, C.M., 1984, Two-dimensional resistivity inversion, Geophysics, 49(10), 1708-1717.
- Vogel, A., Gorenflo, R., Kummer, B., Ofoegbu, C. O., Ursin, B., Inversion, G. D., Sarwar, A. K. and Kounchev, O. I., 1988, Theory and Practice of Applied Geophysics, F. Vieweg.
- Vallée, M. A., Byrne, K., King, J. J., Lee, R. G., Lesage, G., Farquharson, C. G., Chouteau, M. and Enkin, R. J., 2020, Imaging porphyry copper alteration using aeromagnetic data at Highland Valley Copper, British Columbia, Canada, Exploration Geophysics, 51(3), 388-400.
- Wondimu, H. D., Mammo, T. and Webster, B., 2018, 3D joint inversion of Gradient and Mise-à-la-Masse borehole IP/Resistivity data and its application to magmatic sulfide mineral deposit exploration, Acta Geophysica, 66(5), 1031-1045.
- Yuval and Oldenburg, D. W., 1997, Computation of Cole-Cole parameters from IP data, Geophysics, 62(2), 436-448.
- Zhdanov, M. and Portniaguine, O., 2002, 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing, Geophysics, 67(5), 1532–1541.

Magnetic and IP/Res data inversion for investigation of the spatial relation between the geophysical models and mineralization in the southern Dalli Cu-Au porphyry deposit

Hajheidari, M.¹, Abtahi Forooshani, S. M.^{2*}, Asadi Haroni, H.², Moshtaghian, K.¹ and Janghorban, G.¹

1. M.Sc. Student, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received: 5 Sep 2021, Accepted: 10 Jan 2022)

Summary

Because of declining high-grade ore deposits and increasing demands for metal resources, exploration of low-grade metal deposits, such as porphyries, have become feasible. Besides, humankind has spent most of the shallow metal ore deposits, and new prospecting projects focus on deeper deposits. Therefore, geophysical methods have gained more attention due to their ability to determine buried ore bodies' physical properties. Hence, most countries, including Iran, make significant investments in the geophysical exploration of deep porphyry deposits. According to widely accepted Lowell and Guilbert's model for porphyry copper deposits, the ore-bearing zones mainly concentrate at the edge of the potassic alteration zone. Pyrite, a highly conductive and chargeable metallic mineral, is a significant attribute in the potassic alteration. The model also states that the high susceptible magnetite-bearing rocks mainly occur at the bottom of the pyrite shell and the ore body. Due to the occurrence and presence of susceptible and conductive metallic minerals such as magnetite and pyrite in the potassic zone near to the ore body in the copper and gold porphyry deposits, the use of magnetometry, resistivity, and inducing polarization methods give reliable information about the location, depth, and shape of the deposits. For instance, in this research, we focus on the magnetic and IP/Res data in the southern Dalli porphyry deposit, with promising Cu-Au indices, which is located at Euromieh-Dokhtar ore-bearing zone Markazi Province. First, we applied standard processing techniques to remove the aliasing and regional effect in the magnetic data. Then, using the analytic signal technique, we showed the concentration of the magnetic sources over the study area. We also applied the power spectrum and Euler deconvolution techniques to the magnetic data and estimated the magnetic sources' depths. The estimated depth from the power spectrum is between the estimated depth from Euler deconvolution for possible sources with step and pillar shapes. Next, we used the average estimated depth from each of the depth estimation techniques in a three-dimensional magnetic data inversion as the depth of the sources in depth weighting. Also, we studied the inversion results via combining the cross-section of the magnetic susceptibility model along the boreholes and the lithology and geochemical information from core samples analysis. The results indicate that the higher grades for gold and copper occur at the edge of the magnetic sources and possible magnetite mineralization zones. The inversion results using the depth weighting with the depth extracted from the power spectrum show the best correlation and spatial relation with the geochemical data. Besides the magnetic data inversion, applying Oldenburg and Li algorithms for two-dimensional inverse modeling, we extracted the underground bodies' resistivity and chargeability model along with a IP/Res profile in the study area. The resulting chargeability models show a significant relationship with the presence of gold and copper mineralization. We also compared the resulting two-dimensional resistivity and chargeability models with their corresponding magnetic susceptibility at the cross-sections along with the IP/Res. The comparison shows that the possible mineralization zones coincide with larger magnetic susceptibility values, high chargeability and low resistivity. The results show good accordance with Lowell and Guilbert's model. Also, highly susceptible rock in the shallower depth indicates that the erosion process has destroyed most possible orebody.

Keywords: Magnetic susceptibility, Resistivity, Chargeability, Inverse modeling, Porphyry copper deposits.

* Corresponding author:

smabtahi@iut.ac.ir