

مدل سازی وارون داده های مغناطیسی و IP/RS با هدف اکتشاف کانسار شمالی مس – طلای پورفیری دالی

کی تاش مشتاقیان^۱، سید محمد ابطی فروشانی^۱، هوشنگ اسدی هارونی^۱، و محمد حاج حیدری^۱ و غزل جانقریان^۱

^۱ گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

کانسار مس – طلای پورفیری دالی با دو نهشته شمالی و جنوبی بر روی کمربند آتشفشانی ارومیه – دختر در استان مرکزی قرار دارد. با توجه به حضور مگنتیت در کف دگرسانی پتاسیک که در مرکز کانی سازی قرار دارد، برداشت مغناطیس سنجی در محدوده یاد شده انجام گرفته است. در مطالعه حاضر در محدوده اندیس شمالی، نخست بی هنجاری محلی با حذف اثر ناحیه ای و اثر آلیازینگ از داده های مغناطیسی استخراج گردید. سپس استفاده از مدل سازی وارون سه بعدی داده های کاهش یافته مغناطیسی، وجود یک توده با خودپذیری مغناطیسی بالا را در محدوده عمقی ۴۰ تا ۶۴۰ متری محدوده مورد مطالعه نشان داد. مقایسه آنالیز ژئوشیمیایی دو گمانه اکتشافی حفر شده با مدل تغییرات عمقی خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده در محدوده مورد مطالعه نشان داد که افزایش عیار فلزات مس و طلا، همبستگی فضایی با تغییرات شدید خودپذیری مغناطیسی دارد. همچنین مقایسه مدل خودپذیری مغناطیسی با نتایج مدل سازی داده های برداشت IP/RS در سه پروفیل موازی یکدیگر، ارتباط نواحی سولفیدی و دگرسانی مرتبط با کانی سازی را با تغییرات خودپذیری مغناطیسی نشان داد. به این ترتیب مطالعه حاضر نشان داد که محدوده دالی شمالی دارای پتانسیل معدنی مس و طلای قابل توجهی می باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱

کلیدواژه ها:

مدل سازی وارون

مغناطیس سنجی

مقاومت ویژه الکتریکی

پلاریزاسیون القایی

کانسار دالی

۱- پیش نوشتار

امروزه انواع مس پورفیری حدود ۷۵٪ ذخایر مس جهان را تشکیل می دهند (Sillitoe, 2010). معمولاً ذخایر یاد شده مقادیر قابل توجهی طلا و مولیدن را نیز به همراه دارند. دگرسانی های اصلی تپ مس پورفیری شامل دگرسانی های پتاسیک، فلیک، آرژلیک و پروپیلیتیک می باشد (Cooke et al., 2020). حضور گسترده کانی مگنتیت در تپ های کانسار مس پورفیری مخصوصاً تپ های غنی از طلا، کانسارهای یاد شده را به اهداف مناسبی برای مطالعات ژئوفیزیکی مغناطیس سنجی تبدیل کرده است (Clark et al., 1992; Huang et al., 2019). همچنین، برداشت مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی با توجه به حضور نواحی سولفیدی در کانسارهای یاد شده مفید است (Mostafaei and Ramazi, 2017).

مطالعات گسترده ای در زمینه استفاده از روش های ژئوفیزیکی در اکتشاف کانسارهای مس از گذشته تاکنون صورت گرفته است. ارتباط بین مدل خودپذیری مغناطیسی توده های مدفون با نواحی کانی سازی برای اکتشاف نهشته مس و طلای پورفیری در کوه میلیگان کانادا با استفاده از مدل سازی وارون داده های ژئوفیزیکی نظیر مغناطیسی و IP/RS مشخص شد (Oldenburg et al., 1997). نتایج برداشت هوایی مغناطیسی انجام شده در شمال شیلی نشان داد که همه نهشته های مس پورفیری

شناخته شده در منطقه مورد نظر شدت میدان باقیمانده بیش از ۱۰۰ نانوتسلا دارند (Behn et al., 2001). مطالعات ژئوفیزیکی مغناطیس سنجی و IP/RS در منطقه وادی الرجیتا در صحرای سینای مصر با هدف اکتشاف کانسار مس مؤثر واقع بود (Salem et al., 2013). برداشت مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در منطقه ماهور، واقع در بلوک لوت، منجر به تعیین موقعیت و گسترش کانی های سولفیدی و اکسیدی شد (گورابجیری پور و مباشری، ۱۳۹۴). برداشت سه پروفیل مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی به صورت عمود بر امتداد کانسار در محدوده یحیی آباد استان زنجان، نواحی مستعد کانی سازی مس سولفیدی به صورت مقاومت ویژه پایین و بارپذیری به نسبت بالا را مشخص کرد (افشار و همکاران، ۱۳۹۷). مدل سازی وارون داده های مغناطیس سنجی هوابرد در بریتیش کلمبیا واقع در کانادا، با هدف اکتشاف مس پورفیری و به نقشه در آوردن دگرسانی های مرتبط با کانی سازی صورت گرفت (Vallée et al., 2020).

در مطالعه حاضر، به بررسی داده های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده اکتشافی مس و طلای دالی پرداخته می شود. هدف از این مطالعه، شناسایی مناطقی دارای پتانسیل معدنی به کمک نتایج حاصل از داده های ژئوفیزیکی و تعیین نقاط مرتبط با

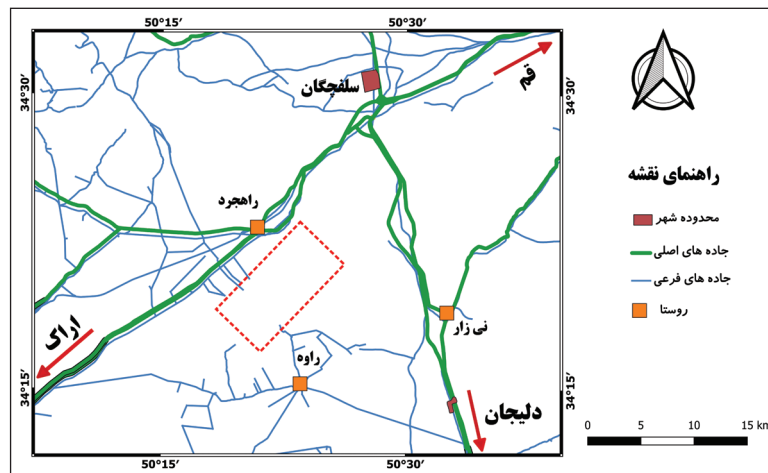
اکتشافی از طریق جاده دلیجان - سلفچگان و مسیر کارخانه سیمان دلیجان و روستای راه دلیجان می‌باشد. شکل ۱ مسیر دسترسی به محدوده اکتشافی دالی را نشان می‌دهد.

منطقه دالی بر روی لبه باختری کمرند آتشفشانی ارومیه-دختر و در نزدیکی کمرند سنج - سیرجان واقع شده است. گستره محدوده معدنی دالی برپایه توده‌های نفوذی دوران سوم زمین‌شناسی می‌باشد و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلفچگان - خوره واقع شده است. شکل ۲ زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد که عمدتاً توسط سنگ‌های آذرین درونی متوسط بازیک شامل دیوریت و کوآرتز دیوریت و همچنین به طور محلی سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و آندزیت پورفیری پوشیده شده است.

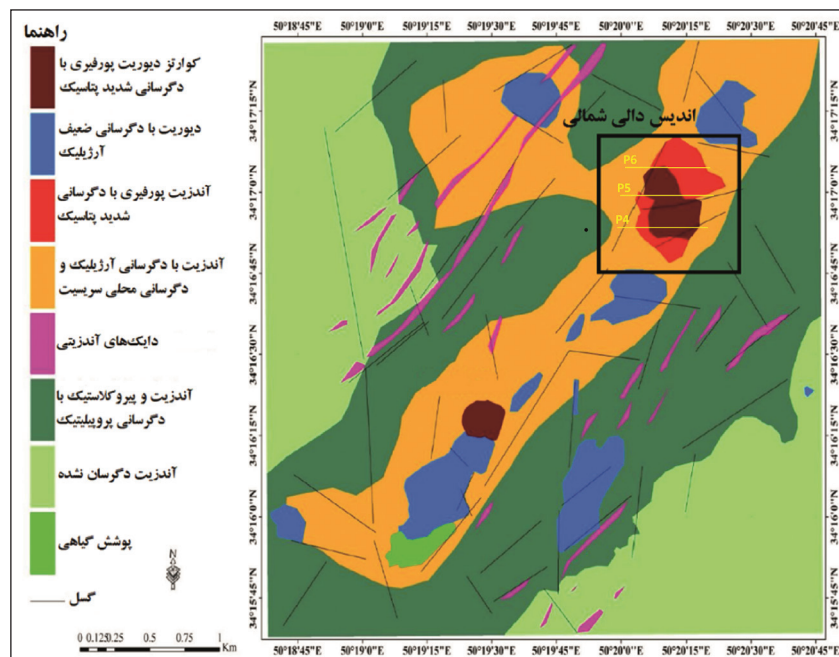
کانی‌سازی با استفاده از مدل‌سازی وارون دوبعدی و سه‌بعدی داده‌های ژئوفیزیکی می‌باشد. در این راستا، پس از انجام وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی، مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، ارتباط فضایی بین کانی‌سازی طلا و مس با تغییرات خودپذیری مغناطیسی، مقاومت ویژه و شارژپذیری الکتریکی بررسی می‌شود.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه دالی در ۱۷۰ کیلومتری جنوب باختر تهران، ۶۰ کیلومتری جنوب خاور شهرستان اراک (مسیر جاده اراک - سلفچگان) و ۶ کیلومتری شمال باختر روستای راه از توابع شهرستان دلیجان استان مرکزی واقع شده است. روستای راه و کهک نزدیک‌ترین روستاها به محدوده اکتشافی هستند. راه دسترسی به محدوده



شکل ۱- مسیرهای دسترسی به محدوده اندیس مس و طلای دالی. مستطیل با خط چین قرمز محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نقشه ۱:۱۰۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه دالی؛ مربع مشخص شده با مرزهای سیاه رنگ محدوده مورد مطالعه در پژوهش حاضر است (فاتحی و اسدی هارونی، ۱۳۹۷). پاره‌خط‌های زرد رنگ که با P4، P5، و P6 مشخص شده‌اند محل پروفیل‌های IP/RS برداشت شده در محدوده اندیس شمالی دالی می‌باشند.

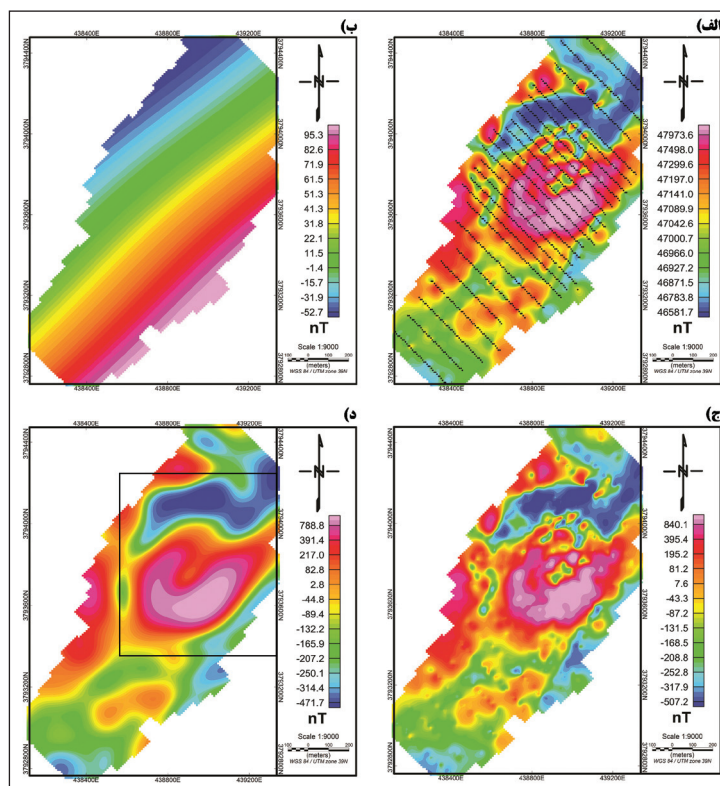
گرفتن زاویه میل $52/2$ و زاویه انحراف $3/8$ درجه برابر 47090 نانوتسلا بود، حذف گردید. پردازش‌های انجام شده بر روی داده‌های مغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار Oasis montaj 8.3.3 صورت گرفت. شکل ۳- الف نقشه میدان مغناطیسی باقی‌مانده پس از اعمال پیش‌پردازش‌های یاد شده و نیز نقاط و پروفیل‌های برداشت را نشان می‌دهد که یک بی‌هنجاری با شدت بالا در قسمت شمالی منطقه را مشخص نموده است. پس از انجام پردازش‌های تصحیحات روزانه بر روی داده‌های برداشت شده، اثر شدت میدان مغناطیسی مرجع زمین (IGRF) از داده‌ها حذف گردید. در قدم بعدی برای برجسته‌سازی اثر بی‌هنجاری‌های محلی، لازم است اثر میدان مغناطیسی ناحیه‌ای نیز حذف گردد. به همین منظور از فیلتر ادامه فراسو برای دست‌یابی به مقدار ناحیه‌ای استفاده می‌شود. اساس این روش این است که داده‌ها در ارتفاعی بالاتر از ارتفاع اصلی خود برداشت شده‌اند که هدف آن حذف بی‌هنجاری‌هایی با طول موج کوتاه و کاهش دامنه آنها است. همچنین اثر عوامل ایجاد خطا در داده‌های برداشتی را کاهش می‌دهد (Reynolds, 2011). شکل‌های ۳-ب و ۳-ج، به ترتیب ادامه فراسوی 1000 متری به عنوان اثر میدان ناحیه‌ای و نقشه میدان مغناطیسی پس از حذف اثر میدان ناحیه‌ای را نشان می‌دهند.

برای حذف اثر آلیازینگ و بی‌هنجاری‌های با طول موج اندک و عدد موج‌های بزرگ که عموماً مربوط به پدیده‌های کوچک و سطحی هستند، از فیلتر پایین‌گذر استفاده شد. با توجه به اینکه بیشینه فاصله پروفیل‌های موجود در منطقه 100 متر است، با انجام فیلتر پایین‌گذر 200 متری، اثر آلیازینگ در داده‌ها تا حد قابل قبولی کاهش یافته و اثر بی‌هنجاری‌های کوچک (کوچک‌تر از 200 متر) را به‌طور کامل حذف کرد و منطقه دارای پتانسیل بالا در شکل ۳-د شناسایی شد که محل آن توسط مستطیل سیاه‌رنگ نمایش داده شده در آن شکل مشخص شده است.

واحدهای سنگی منطقه تحت تأثیر محلول‌های گرمابی (هیدروترمال) به دگرسانی‌های پتاسیک، سیلیسی، فلیک، آرژلیک و پروپیلیتیک تبدیل شده‌اند. این منطقه دارای کانی‌سازی مس و طلا در ارتباط با دو استوک کوارتز دیوریتی به عنوان سنگ میزبان اصلی حاوی استوک‌ورک و رگچه‌های بسیار ریز سیلیسی می‌باشد که در تماس با واحد آندزیت پورفیری به عنوان سنگ دیواره است (اسدی و آصف، ۱۳۹۶). همچنین کانی‌سازی مگنتیت در دگرسانی پتاسیک کانسارهای مس و طلا پورفیری که ارتباط نزدیکی با کانی کالکوپریت و استوک‌ورک‌های سیلیسی طلا دار دارد، سبب ایجاد یک بی‌هنجاری قابل توجه مغناطیسی در تیپ کانسارهای مس پورفیری می‌شود (Barak et al., 2020). بنابراین با هدف تعیین محل و ژرفای کانسار یاد شده برداشت مغناطیس‌سنجی در محدوده دالی انجام شد. افزون بر این، برای شناسایی نواحی سولفیدی که مرتبط با کانی‌سازی کانه‌های فلزی مانند پیریت و کالکوپریت است، برداشت IP/RS صورت گرفت (فاتحی و اسدی‌هارونی، ۱۳۹۷). مطالعه حاضر، به مدلسازی و تفسیر داده‌های مربوط به محدوده کانسار واقع در استوک شمالی دالی می‌پردازد.

۳- پردازش داده‌های مغناطیسی

در منطقه دالی، برداشت مغناطیسی در 3224 نقطه در 56 پروفیل که امتداد شمال باختری - جنوب خاوری دارند به وسعت 2500×600 متر مربع صورت گرفت که 1517 نقطه آن مربوط به منطقه شمالی می‌باشد. فواصل نقاط برداشتی 10 متر بوده و فواصل بین پروفیل‌ها در بخش کانی‌سازی 50 متر می‌باشد و در اطراف آن به 100 متر افزایش می‌یابد. برداشت توسط یک دستگاه پروتون مگنتومتر G856 صورت گرفته و دستگاه مشابهی نیز در ایستگاه مبنا استفاده شده است. پس از تصحیح روزانه به کمک اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه مبنا، اثر IGRF منطقه که مقدار آن با در نظر



شکل ۳- داده‌های مغناطیسی برداشت شده در محدوده دالی شمالی و مراحل پردازش اولیه آنها. الف) نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده پس از حذف اثر روزانه و میدان مرجع زمین؛ نقاط سیاه رنگ موقعیت نقاط و پروفیل‌های برداشت را نشان می‌دهند. ب) نقشه ادامه فراسوی 1000 متری به عنوان اثر میدان ناحیه‌ای. ج) نقشه میدان مغناطیسی پس از حذف اثر میدان ناحیه‌ای. د) نقشه داده‌های مغناطیسی شکل ج پس از انجام فیلتر پایین‌گذر 200 متری. مستطیل با مرز سیاه‌رنگ محل محدوده مورد مطالعه در پژوهش حاضر است که در شکل ۲ نیز مشخص شده است.

هر چند با استفاده از برگردان به قطب و سیگنال تحلیلی مختصات افقی توده های دارای خودپذیری مغناطیسی بالا به طور تقریبی تعیین می شود، اما اطلاعاتی در مورد ژرفای آن توده به دست نمی آید. روش واهمایخت اولیه داده های مغناطیسی یکی از روش های کارآمد در زمینه تخمین ژرفای منابع مغناطیسی به شمار می رود که بدون نیاز به در دست بودن اطلاعات مغناطیدگی، می تواند ژرفا و محل هر ساختار احتمالی در منطقه را به طور تقریبی مشخص نماید. از دیگر مزیت های روش یاد شده آن است که حضور مغناطیس پسماند، تأثیری بر نتایج به دست آمده ندارد (امیرپور اصل میندوآب و همکاران، ۱۳۹۵). معادله اوایلر به صورت زیر بیان می شود.

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N (B - T) \quad (2)$$

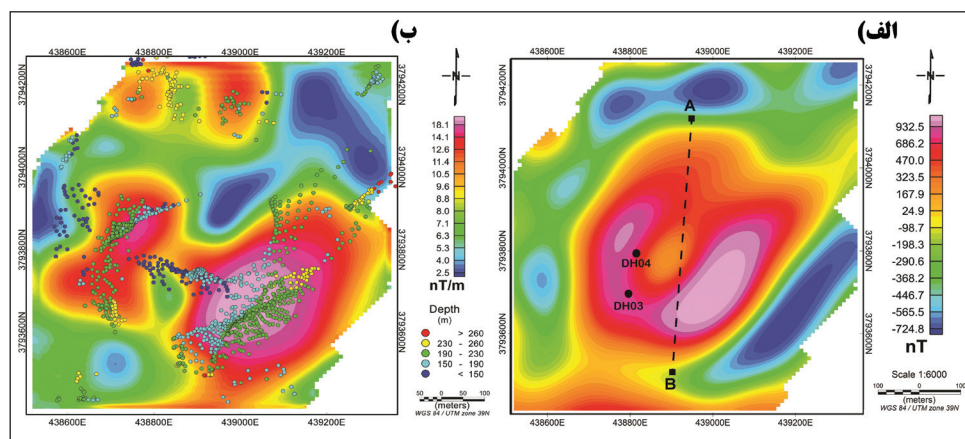
در معادله ۲، x, y, z مختصات نقاط برداشتی، x_0, y_0, z_0 مختصات منبع، T اندازه میدان مغناطیسی، B میدان منطقه ای و N اندیس ساختاری می باشد. مقادیر اندیس ساختاری مربوط به شکل ها و ساختارهای مختلف زمین شناختی متفاوت است به گونه ای که از مقدار صفر برای همبری افقی مانند مرز ساختارها و گسل های امتداد لغز تا ۳ برای ساختارهای کروی تغییر می کند (سیف و همکاران، ۱۳۹۷). در مطالعه حاضر، با فرض اینکه منابع مغناطیسی به صورت کروی باشد، ژرفای امکان پذیر برای توده های مغناطیسی تخمین زده شد. برای انجام تخمین یاد شده، پس از درون یابی مقادیر داده در فواصل منظم ۲ متر در ۲ متر، پنجره مربعی به ضلع ۵ نقطه ای بر روی داده های درون یابی شده در محدوده مستطیل سیاه رنگ شکل ۳-د با در نظر گرفتن اندیس ساختاری ۳ صورت اعمال شده است. پنجره متحرک یاد شده در جهات شمالی و خاوری داده های مغناطیسی حرکت می کند و ژرفای منبع مغناطیسی کروی را برای داده های موجود در پنجره یاد شده تخمین می زند. به این ترتیب، محل افقی منابع مغناطیسی را با نقاطی روی نقشه داده های مغناطیسی می توان نشان داد که رنگ نقاط یاد شده نمایشگر عمق تخمین زده شده برای هر منبع است. نقاط رنگی شکل ۴-ب پراکندگی و ژرفای امکان پذیر برای منابع مغناطیسی کروی ممکن در محدوده یاد شده را نشان می دهد. مراکز تجمع نقاط یاد شده تطابق قابل توجهی با محل های پیشینه سیگنال تحلیلی نشان می دهد.

هیستوگرام فراوانی ژرفای منابع مغناطیسی یاد شده در شکل ۵ بیانگر قرارگیری منابع مغناطیسی در ژرفاهای محدوده ۱۱۲ تا ۲۸۸ متری از سطح زمین است. همچنین میانگین هیستوگرام مورد نظر نشان می دهد که بیشترین تمرکز منابع مغناطیسی در حدود ژرفای ۲۰۰ متری از سطح زمین واقع شده است.

به دلیل تغییرات اندازه، زاویه میل و زاویه انحراف میدان مغناطیسی زمین در طول و عرض های جغرافیایی مختلف، شکل بی هنجاری های حاصل از توده مغناطیسی با توجه به طول و عرض جغرافیایی محل قرارگیری توده، متغیر است که سبب پیچیدگی تفسیر این بی هنجاری ها می گردد. یکی از راه های ساده سازی این بی هنجاری ها، حذف اثر تابعیت طول و عرض جغرافیایی بر زاویه های انحراف و میل مغناطیسی می باشد. در این روش، منبع مغناطیسی به طور فرضی به قطب مغناطیسی منتقل می شود. به این ترتیب، محل بی هنجاری های مغناطیسی درست بر محل مرکز توده منطبق خواهد شد. این روش به اصطلاح برگردان به قطب نام دارد (Reynolds, 2011; El Alaoui et al., 2020). یکی از مشکلات تفسیر داده های مغناطیسی، ماهیت دو قطبی این داده ها است که سبب می شود مقادیر میدان های مغناطیسی بالا دارای علامت های مثبت یا منفی باشند. یکی از روش های حل این مشکل استفاده از تبدیل سیگنال تحلیلی است که پاسخ آن مناطق با بی هنجاری قوی را صرفاً با علامت مثبت نشان می دهد. سیگنال تحلیلی از تبدیل هیلبرت سه بعدی داده های مغناطیسی و ترکیب گرادیان های افقی در جهت X و Y و گرادیان قائم در جهت Z حاصل می شود. یکی از کاربردهای اصلی سیگنال تحلیلی این است که برای یک جسم تقریباً دوبعدی مانند دایک، که منحنی متقارن زنگوله ای شکل دارد، دامنه آن مستقل از جهت بردار میدان مغناطیسی القایی بوده و دقیقاً در بالای منشأ بی هنجاری مغناطیسی قرار می گیرد (Nabighian, 1972). از این روش برای شناسایی ژرفا و نوع مدل مغناطیسی استفاده می شود. به منظور برجسته کردن بی هنجاری های سطحی در مقابل بی هنجاری های مربوط به ژرفا و مشاهده تغییرات سطحی از این روش استفاده می شود. در صورتی که اندازه میدان مغناطیسی برابر T باشد، مقدار سیگنال تحلیلی مطابق معادله ۱ محاسبه می شود.

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

در این معادله، $\frac{\partial T}{\partial x}$ ، $\frac{\partial T}{\partial y}$ و $\frac{\partial T}{\partial z}$ به ترتیب تغییرات اندازه میدان مغناطیسی در جهات x, y و z می باشد (Salem and Ravat, 2003). شکل های ۴-الف و ۴-ب به ترتیب، برگردان به قطب داده های مغناطیسی و بی هنجاری سیگنال تحلیلی مرتبط با داده های محدوده مستطیل سیاه رنگ نمایش داده شده در شکل ۳-د را نشان می دهند. از شکل سیگنال تحلیلی آشکارا می توان به حضور دو توده با شدت مغناطیسی بالا در محدوده یاد شده پی برد که توده خاوری شدت بی هنجاری مغناطیسی قوی تری را از خود نشان می دهد.



شکل ۴-الف) برگردان به قطب داده های مغناطیسی و ب) سیگنال تحلیلی داده های نمایش داده شده در محدوده مستطیل سیاه رنگ شکل ۳-د. دایره های سیاه رنگ شکل الف نشانگر محل دو گمانه اکتشافی حفر شده در محدوده مورد مطالعه هستند. خط چین بین دو نقطه A و B امتداد پروفیل نمایش داده شده در شکل ۹ را نشان می دهد. نقاط رنگی شکل ب محل و ژرفای منابع مغناطیسی تخمین زده شده با استفاده از واهمایخت اولیه با ضریب ساختاری ۳ را نشان می دهند.

به داده‌های یکسان بیانجامد، امکان دارد کمینه‌سازی ϕ_d به ایجاد مدلی پیچیده و غیرواقعی منجر شود. از این رو می‌توان با تعریف ϕ_m ، تابع منظم‌سازی طول مدل به صورت معادله ۶ بیان می‌شود و محدودسازی آن، مانع از تشکیل مدل‌های بیش از حد پیچیده و غیرواقعی می‌گردد.

$$\phi_m(m) = \|W_m(m - m^{ref})\|^2 \quad (6)$$

در معادله ۶، بردار W_m ماتریس کوواریانس مدل و یا ماتریس ارتباط فضایی المان‌های بردار مدل است. همچنین m^{ref} بردار مدل مرجع است که بر اساس واقعیت‌های زمین‌شناسی موجود در محل مورد مطالعه تعریف می‌شود. به این ترتیب تابع هدف وارون‌سازی به صورت معادله ۷ می‌باشد که باید کمینه شود.

$$\phi(m) = \phi_m(m) + \beta\phi_d(m) \quad (7)$$

با تغییر مقدار β ضریب لاگرانژ، می‌توان تناسبی بین خطای داده‌ها و طول مدل برقرار نمود. اگر β بزرگ و به تبع آن مدل به دست آمده ساده باشد، میزان خطای مدل‌سازی افزایش می‌یابد، اما اگر β کوچک و خطای مدل‌سازی کم باشد، مدل پیچیده‌ای ساخته می‌شود که تفسیر زمین‌شناسی آن مشکل خواهد بود. بنابراین با تعیین یک خطای مناسب و بهینه توسط ضریب لاگرانژ (β)، می‌توان به خطای مناسبی دست یافت که در عین حال مدل خودپذیری مغناطیسی و یا مقاومت ویژه تخمین زده شده چندان پیچیده نباشد (Oldenburg and Pratt, 2007).

با وجود این که تعریف تابع هدف در معادله ۷ برای وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی، مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی یکسان است، اما به دلیل ارتباط غیرخطی بین داده و مدل مطابق معادله ۳ در مسائل وارون‌سازی داده‌های IP/RS، لازم است این مسائل خطی‌سازی شوند. از این رو، با استفاده از تعریف ماتریس ژاکوبین به صورت معادله ۸ مسئله خطی شده و قابل حل می‌باشد (Oldenburg et al., 1993).

$$J(m) = \frac{\partial G}{\partial m} \quad (8)$$

در نهایت، برای تعیین تغییرات پارامترهای مدل (δm) در مدل‌سازی داده‌های IP/RS، رابطه ۹ بیان می‌گردد (Oldenburg and Li, 2005).

$$(J^T W_d^T W_d J + \beta W_m^T W_m) \delta m_i = J^T W_d^T W_d (G(m) - d^{obs}) + \beta W_m^T W_m (m - m^{ref}) \quad (9)$$

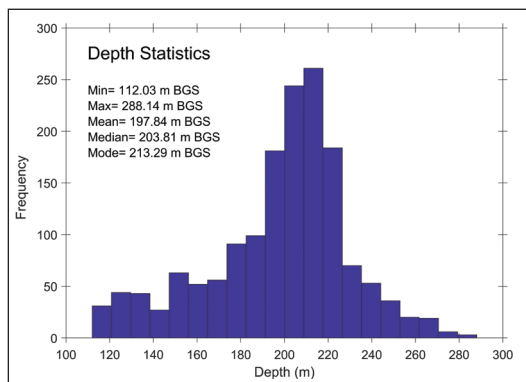
خطای مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی، مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی بر اساس روش ریشه میانگین مربعات (Root mean square) یا به اختصار RMS صورت رابطه ۱۰ بیان می‌شود.

$$RMS = \sqrt{\frac{\phi_d}{N}} \quad (10)$$

در این معادله N برابر تعداد داده‌های مدل‌سازی است (Chai and Draxler, 2014). در مطالعه حاضر، وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی منطقه دالی شمالی با الگوریتم لی و اولدنبورگ (Li and Oldenburg, 1996) توسط نرم‌افزار UBC MAG3D 4.0 انجام شد. مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی نیز با استفاده از الگوریتم اولدنبورگ و لی (Oldenburg and Li, 1994) (نرم‌افزار UBCDCIP3.2) در امتداد سه پروفیل در محدوده مورد اشاره در نقشه شکل ۲ انجام شد.

۵- مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی

در مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی، با توجه به این که طول و عرض محدوده مورد مطالعه برابر ۸۳۰ متر می‌باشد، در جهات افقی ۸۳ بلوک با طول و عرض ۱۰ متر در نظر گرفته شد. همچنین ۴ بلوک با ستبرای بین ۲۰ تا ۱۶۰ متری به اطراف بلوک برای در نظر گرفتن اثر ناهمگنی‌های اطراف محدوده مورد مطالعه بر داده‌ها به مش اضافه گردید. در جهت قائم ستبرای اولین بلوک در جهت قائم ترجیحاً نیمی از ابعاد بلوک‌ها در جهت افق انتخاب می‌شود (MAG3D, 2002). به این ترتیب در جهت قائم ۹۱ لایه مش انتخاب شد که ستبرای نخستین به تدریج از ۵ متر در سطح زمین تا ۵۰ متر در کف مش افزایش می‌یابد. داده‌های مغناطیسی پس از انجام تصحیحات و فیلتر پایین گذر ۲۰۰ متری نشان داده شده در محدوده مستطیل سیاه‌رنگ نشان داده شده در شکل ۳-د به عنوان بردار داده‌ها در معادله ۴ در نظر



شکل ۵- هیستوگرام فراوانی اعماق توده‌های مغناطیسی به دست آمده از واهمایخت اوپلر با ضریب ساختاری ۳. مختصات منابع یاد شده در شکل ۴-ب نمایش داده شده است.

۴- مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی

هر چند روش واهمایخت اوپلر به طور تقریبی ژرفای منابع مغناطیسی را تخمین می‌زند اما قادر به تعیین شکل توده‌های مورد نظر نیست. وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی راهی است که به کمک آن می‌توان بر اساس تغییرات پارامترهای فیزیکی، شکل و گسترش عمقی توده‌های مدفون را تخمین زد. در مسائل وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، ارتباط بین d به عنوان بردار پارامترهای مدل و d به عنوان بردار داده‌ها به صورت کلی معادله (۳) تعریف می‌شود.

$$d = G(m) \quad (3)$$

که در آن G که با نام هسته معادله (کرنل) شناخته می‌شود، بین داده و مدل رابطه‌ای برقرار می‌کند که با توجه به نوع و هدف وارون‌سازی، نوع تابعیت G متفاوت می‌باشد (Menke, 2018). در حالتی که تابعیت G مستقل از پارامترهای مدل باشد، رابطه کلی ۳ به صورت ساده و خطی (معادله ۴) درمی‌آید.

$$d = Gm \quad (4)$$

به این ترتیب کرنل G ماتریسی خواهد بود که مؤلفه‌های آن به صورت g_{ij} بیان می‌شود که محدوده تغییرات i به تعداد داده‌ها و دامنه تغییرات j به تعداد پارامترهای مدل می‌باشد (Li and Oldenburg, 1996). برای حل هر یک از معادلات ۳ یا ۴ لازم است فضای زمین در برگیرنده مدل به بلوک‌های مکعب مستطیلی شکل تقسیم شود. فرایند یاد شده را مش‌بندی فضای مسئله می‌نامند. هر یک از بلوک‌های واقع در مش دارای ابعاد و ژرفای مشخصی هستند و تنها مقادیر پارامتر فیزیکی مسئله نظیر خودپذیری مغناطیسی و یا مقاومت ویژه درون هر بلوک نامعلوم است که با انجام وارون‌سازی مقدار آن تخمین زده می‌شود. به این ترتیب تعداد بلوک‌های موجود در مش با تعداد المان‌های بردار مدل m برابر خواهد بود. هدف از حل مسائل وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی این است که مقادیر پارامتر فیزیکی بلوک‌های مش به گونه‌ای تغییر کند که اختلاف داده‌های به دست آمده از معادلات ۳ یا ۴، با داده واقعی کمینه شود. بدین منظور لازم است ϕ_d تابع اندازه خطای پیش‌بینی داده‌ها را به صورت معادله (۵) محاسبه نمود.

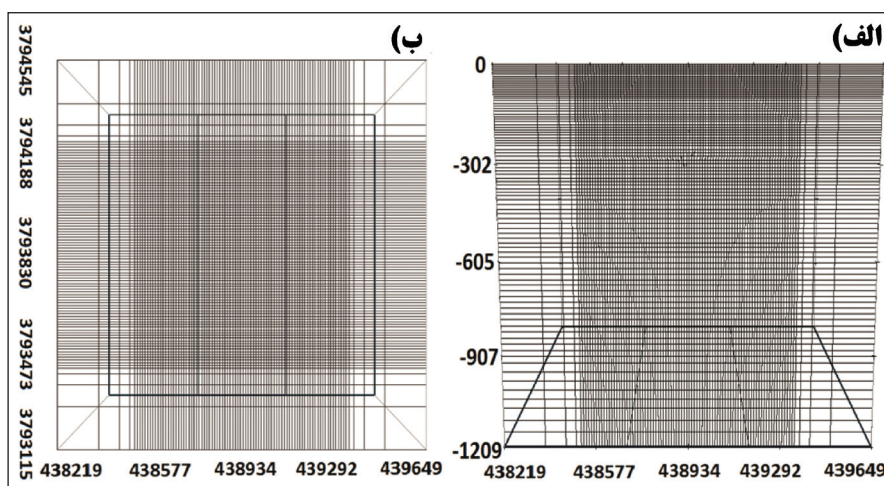
$$\phi_d(m) = \|W_d(d - d^{obs})\|^2 \quad (5)$$

در معادله ۵ بردار W_d تابع کوواریانس خطای داده بوده و معمولاً به صورت یک ماتریس قطری است که اعضای روی قطر آن برابر انحراف معیار خطای اندازه‌گیری داده‌ها تعریف می‌شود. همچنین d^{obs} بردار داده‌های حقیقی اندازه‌گیری شده است (Oldenburg and Li, 1994; Li and Oldenburg, 1996).

با توجه به آن که داده‌های ژئوفیزیکی عموماً به دلیل داشتن خطا و یا ماهیت روش‌های ژئوفیزیکی، مدل غیریکتا دارند و مقادیر مدل‌های مختلف برای m می‌تواند

دو هسته ای با فرکانس پردازنده ۲/۵ گیگاهرتز و رم ۴ گیگابایتی به طول انجامید. شکل ۶ در قسمت الف، دید از سمت دیواره مش و قسمت ب، دید از بالای مش را نشان می دهد.

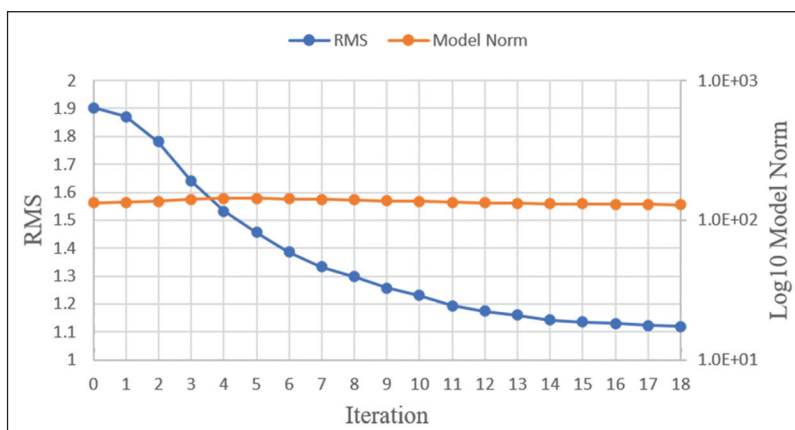
گرفته شدند. ابعاد بلوک های مش از مکعب هایی با ضلع ۱۰ متر در مرکز لایه سطحی شروع شده و به تدریج با رسیدن به کف و دیواره های مش به صورت لگاریتمی افزایش می یابد. مدت زمان ساخت این مدل ۱۵ ساعت و ۳۶ دقیقه و ۳۱ ثانیه با سیستم



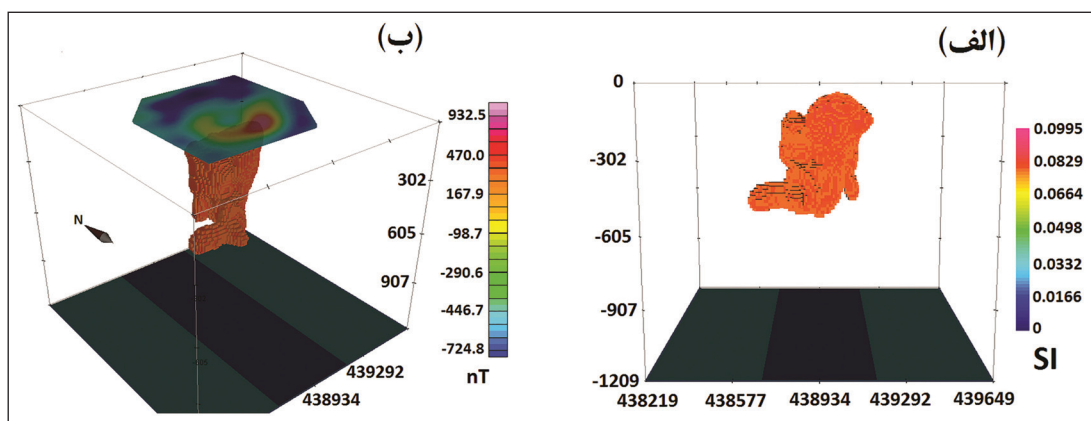
شکل ۶- الف) دید از جلو و ب) دید از بالای مش استفاده شده در وارون سازی داده های مغناطیسی.

شده شماره ۱۸ با خطای مناسب ۱/۱۲ به عنوان مدل نهایی در نظر گرفته شد. مدل سه بعدی نشان داده شده در شکل های ۸-الف و ۸-ب مدل تخمین زده شده توسط الگوریتم وارون سازی را به صورت توده های دارای خودپذیری بین ۰ و ۰/۹۹۵ به همراه موقعیت قرارگیری داده های اندازه گیری شده نشان می دهد که از ژرفای ۴۰ تا ۶۴۰ متری گسترش یافته است. همین مسأله احتمال فرسایش نیافتن بدنه اصلی کانسار را تقویت می نماید. همچنین بیشینه خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده در ژرفای ۲۰۰ متری قرار دارد که با میانگین هیستوگرام فراوانی ژرفای منابع مغناطیسی به دست آمده از واهمامیخت اوپلر در شکل ۵ به خوبی تطابق دارد.

در وارون سازی سه بعدی داده های مغناطیسی، پس از چند انتخاب و بررسی نتایج مدل حاصله با واقعیت های زمین شناسی موجود، مقدار β در معادله ۷، برابر ۱/۵ در نظر گرفته شد. افزون بر این، خودپذیری مغناطیسی مدل اولیه، برابر ۰/۰۰۱ قرار گرفت. این مقدار به گونه ای است که فرض می شود کل منطقه همگن و برابر این مقدار است. با توجه به حضور بیشینه توده های آندزیتی در محدوده مورد مطالعه، مقدار m^{ref} خودپذیری مغناطیسی مدل مرجع در معادله ۷ نیز برابر ۰/۰۱ فرض گردید. همچنین، خودپذیری مغناطیسی مثبت فرض شده و بین مقادیر ۰ تا ۰/۱ محدود می شود. در نهایت، مطابق شکل ۷، مدل سازی داده های مغناطیسی پس از ۱۸ روند تکرار (Iteration) و ثابت شدن تغییرات طول مدل، مدل ساخته



شکل ۷- نمودار تغییرات خطا (RMS) و طول مدل (Model Norm) در مدل سازی داده های مغناطیسی به ازای هر روند تکرار (iteration).



شکل ۸- الف) دید از جنوب مدل خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده با استفاده از وارون سازی داده های مغناطیسی؛ توده نارنجی رنگ، توده های با خودپذیری مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۸ در دستگاه بین المللی یکاها (SI) را نشان می دهد. ب) دید از جنوب باختر مدل مغناطیسی؛ نقشه بالایی نمایشگر داده های مغناطیسی استفاده شده در انجام وارون سازی است؛ رنگ های راهنمای نقشه در سمت راست شکل، تغییرات شدت میدان مغناطیسی داده های یاد شده را نشان می دهد.

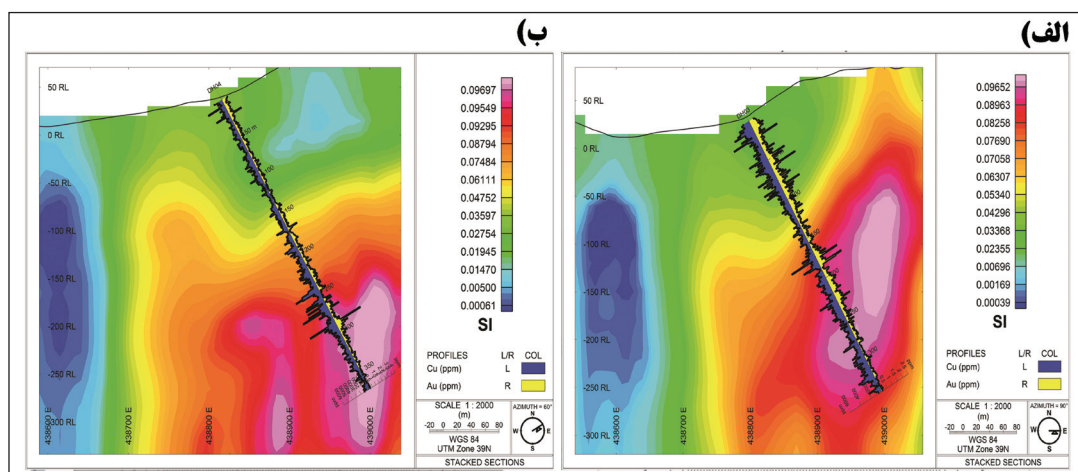
۶- مقایسه اطلاعات ژئوشیمیایی گمانه های حفاری و مقطع زمین شناسی با مدل مغناطیسی

در شکل ۹- الف در نزدیکی سطح زمین، عیار این دو فلز به طور نسبی افزایش یافته است که می تواند نشانه ای بر حضور ناحیه سوپرژن که تقریباً فاقد کانه مگنیت است (Sillitoe, 1973)، در حالی که چنین افزایشی در عیار فلزات یاد شده در نزدیک سطح زمین در شکل ۹- ب دیده نمی شود که می تواند نشانه ضعیف بودن ناحیه سوپرژن در محدوده یاد شده باشد.

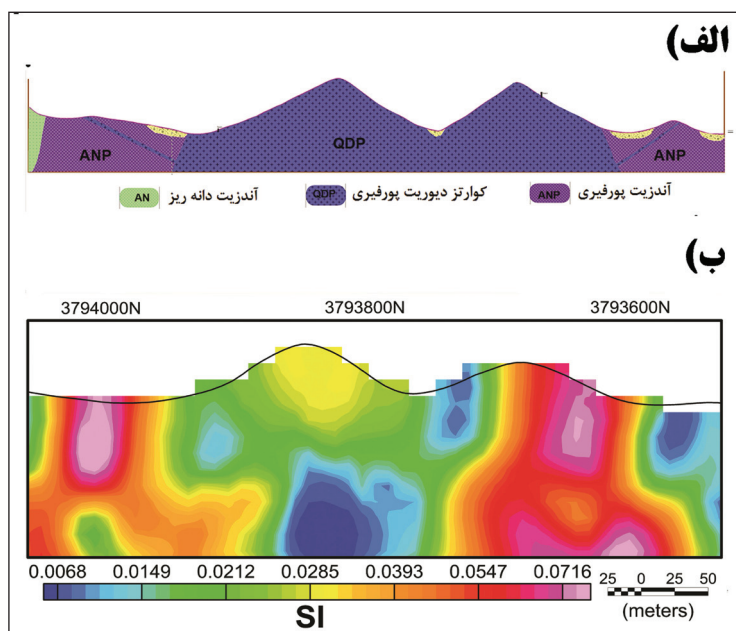
شکل ۱۰- الف مقطع زمین شناسی دالی شمالی را در امتداد خط چین AB نمایش داده شده در شکل ۴- الف نشان می دهد. با توجه به خودپذیری مغناطیسی بالاتر سنگ های آندزیتی نسبت به کوارتز دیوریت، انتظار داریم که مدل خودپذیری مغناطیسی ساخته شده نیز گویای این مطلب باشد. شکل ۱۰- ب نیز مقطع قائم مدل مغناطیسی تخمین زده شده را در امتداد AB نشان می دهد. مقایسه شکل های ۱۰- الف و ۱۰- ب نشان می دهد که خودپذیری مغناطیسی بالا مرتبط با واحد آندزیت پورفیری و خودپذیری مغناطیسی حد واسط مرتبط با واحد کوارتز دیوریت پورفیری می باشد. هر چند، در خاور مقطع مورد نظر، بیشترین خودپذیری مغناطیسی در مرز آندزیت و کوارتز دیوریت پورفیری دیده می شود که می تواند مربوط به حضور کانی سازی مگنیت و یا صحت ناکافی مقطع زمین شناسی باشد.

در منطقه دالی، در مجموع ۹ گمانه حفر شده است که گمانه های ۳ و ۴ مربوط به بخش شمالی منطقه می باشند. موقعیت گمانه های اکتشافی مورد نظر در شکل ۴- الف بر روی زمینه ای از نقشه داده های برگردان به قطب مغناطیسی مشخص شده است. آنالیز ژئوشیمیایی روی ستون سنگی گمانه صورت گرفته و تغییرات عیار طلا و مس در طول گمانه ها به دست آمده است (Darabi-Golestan et al., 2013). شکل ۹- الف و ۹- ب، دو مقطع قائم از مدل خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده را که به ترتیب شامل گمانه های ۳ و ۴ می باشند، نشان می دهد. نمودارهای سمت راست و چپ گمانه حفر شده به ترتیب تغییرات عیار طلا و مس را بر حسب ppm نشان می دهد.

وجود بیشینه مقدار کانی سازی در بالای توده های با خودپذیری مغناطیسی بالا تأییدی بر حضور کانسار در دگرسانی پتاسیک کانسارهای پورفیری است. همچنین مشاهده می شود که در مرز توده های اصلی با خودپذیری مغناطیسی بالا که به طور کلی شیب تغییرات خودپذیری مغناطیسی شدیدی را نشان می دهند، عیار طلا و مس افزایش می یابد. این تغییرات می تواند نشانه تغییرات سنگ شناسی از سنگ های آذرین با خودپذیری مغناطیسی بالا به محدوده حضور کانسار پورفیری باشد. همچنین



شکل ۹- مقطع قائم مدل تخمین زده شده برای خودپذیری مغناطیسی در دالی شمالی در محل قرارگیری الف) گمانه ۳ و ب) گمانه ۴.

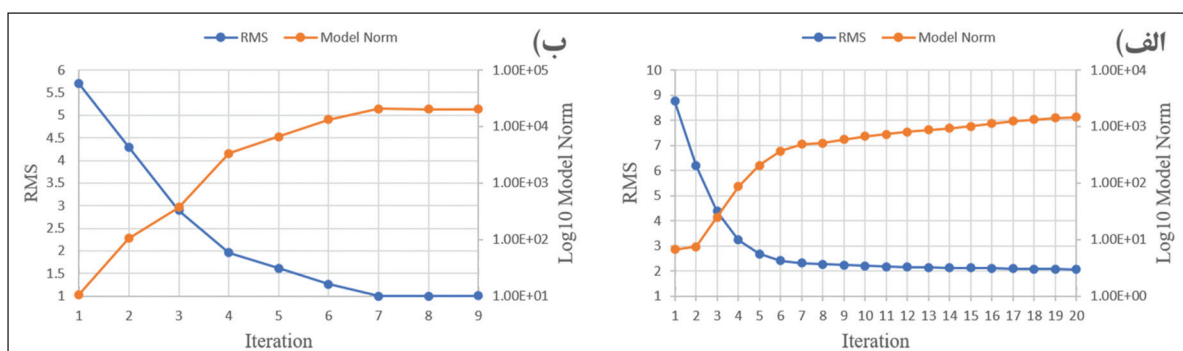


شکل ۱۰- الف) مقطع زمین شناسی منطقه بر اساس مطالعه اسدی و آصف (۱۳۹۶). ب) مقطع قائم مدل مغناطیسی تخمین زده شده در امتداد مقطع زمین شناسی نشان داده شده در امتداد AB که در شکل ۴-الف نشان داده شده است.

۷- مدل سازی وارون دوبعدی داده های IP/RS و مقایسه با نتایج وارون سازی مغناطیسی

نرم افزار DCIP 3.2 صورت گرفته است. به دلیل بالا بودن مقاومت ویژه در سطح زمین (به دلیل حضور سیلیس)، ستبرای سلول های مدل به نصف فاصله الکترودی کاهش یافت و برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شد. ستبرای بلوک ها با ژرفا به صورت لگاریتمی افزایش می یابد. در پروفیل P4، ژرفای مدل سازی در مقاطع مورد نظر تقریباً ۱۶۰ متر می باشد. در نهایت، مطابق شکل ۱۱، به ترتیب پس از ۲۰ و ۹ روند تکرار در مدل سازی داده های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی و ثابت شدن طول مدل و خطای تخمین، مدل ساخته شده شماره ۲۰ برای داده های مقاومت ویژه با خطای ۲/۰۶ و مدل ساخته شده شماره ۹ برای داده های پلاریزاسیون القایی با خطای ۱ به عنوان مدل های نهایی در نظر گرفته شدند.

افزون بر برداشت داده های مغناطیسی در منطقه دالی شمالی، با استفاده از دستگاه فرستنده IPC9 و گیرنده dPR10A، برداشت مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی با آرایه قطبی - دوقطبی در ۳ پروفیل، به منظور شناسایی نواحی سولفیدی انجام شد. در برداشت انجام شده فاصله الکترودی برابر ۲۰ متر بود. موقعیت قرارگیری این ۳ پروفیل با شماره های P4، P5 و P6 بر روی نقشه زمین شناسی شکل ۲ نشان داده شده است. فاصله بین پروفیل های P4 و P5 برابر ۱۵۰ متر و فاصله بین پروفیل های P5 و P6 برابر ۱۰۰ متر می باشد. مدل سازی وارون دوبعدی داده های پروفیل های برداشت شده با استفاده از



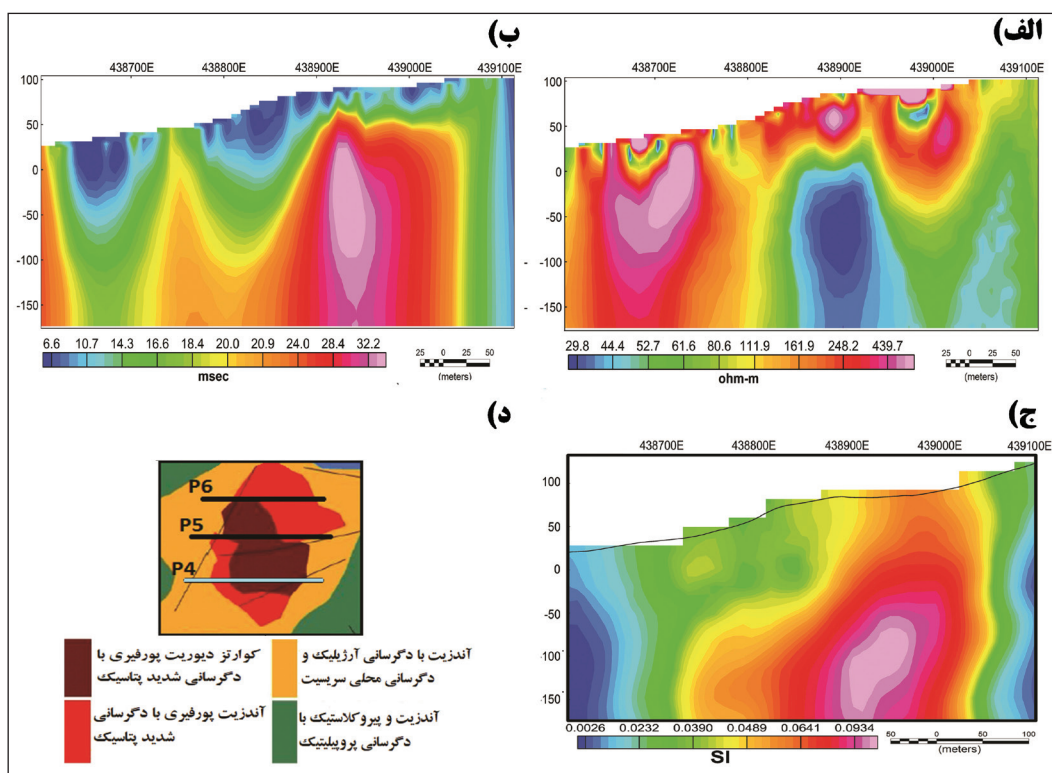
شکل ۱۱- نمودار تغییرات تغییرات خطا (RMS) و طول مدل (Model Norm) در مدل سازی داده های الف) مقاومت ویژه و ب) پلاریزاسیون القایی به ازای هر روند تکرار (iteration) برای پروفیل P4.

شکل ۱۲- الف، مقاومت ویژه بالا در ژرفاهای کم احتمالاً نشان دهنده سیلیسی شدن سطح زمین است. افزون بر این، مقاومت ویژه بالا در بخش باختری مقطع احتمالاً مرتبط با واحد آذرین غیردگرسان یافته است. مقایسه مقطع مقاومت ویژه با مقاطع

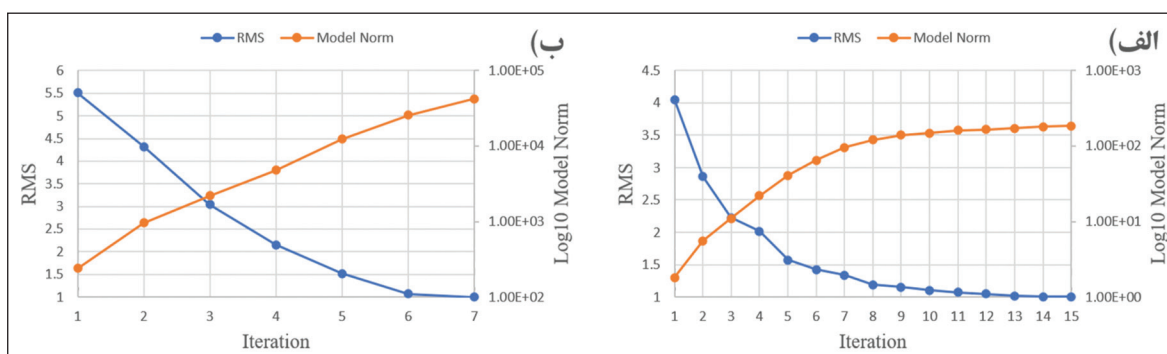
شکل ۱۲ نتایج وارون سازی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی را در امتداد پروفیل P4 به همراه مقطع حاصل از وارون سازی داده های مغناطیسی در امتداد یاد شده و موقعیت قرارگیری پروفیل در نقشه زمین شناسی منطقه نشان می دهد. در

حضور محدوده سیلیسی شده در سطح زمین قابل توجه است. البته این نکته که بیشینه بارپذیری الکتریکی و کمینه مقاومت ویژه الکتریکی تقریباً در یک ژرفا و بالای ناحیه بیشینه خودپذیری مغناطیسی قرار گرفته‌اند نیز تأیید می‌کند که افزایش خودپذیری مغناطیسی به دلیل کانی‌سازی مگنتیت در بخش زیرین دگرسانی پتاسیک می‌باشد. در پروفیل P5، ژرفای مدلسازی در مقاطع مورد نظر، تقریباً ۱۷۰ متر می‌باشد. در نهایت، مطابق شکل ۱۳، به ترتیب پس از ۱۵ و ۷ روند تکرار در مدلسازی داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، مدل ساخته شده شماره ۱۵ برای داده‌های مقاومت ویژه و مدل ساخته شده شماره ۷ برای داده‌های پلاریزاسیون القایی با خطاهای ۱ به عنوان مدل‌های نهایی در نظر گرفته شدند.

قسمت ب و ج نشان می‌دهد که مقاومت ویژه پایین در مرکز مقطع که در مرز بیشینه خودپذیری مغناطیسی و بارپذیری رخ داده است، مرتبط با احتمال حضور کانی‌سازی در ناحیه یاد شده است. با توجه به اینکه بیشینه خودپذیری مغناطیسی و بارپذیری در مقاطع یاد شده در یک ناحیه رخ داده است، می‌توان استنباط کرد که مرکز دگرسانی پتاسیک در این ناحیه است که نقشه زمین‌شناسی در بخش د نیز همین موضوع را تأیید می‌کند. با توجه به احتمال حضور کانی‌های رسی ناشی از دگرسانی آرژلیک و یا کانی‌سازی از نوع پیریت در دگرسانی پتاسیک در نزدیکی کانسار انتظار کاهش مقاومت ویژه در ژرفا به همراه افزایش بارپذیری الکتریکی دور از ذهن نمی‌باشد. همچنین، افزایش مقاومت ویژه و کاهش بارپذیری الکتریکی در ژرفاهای کم با



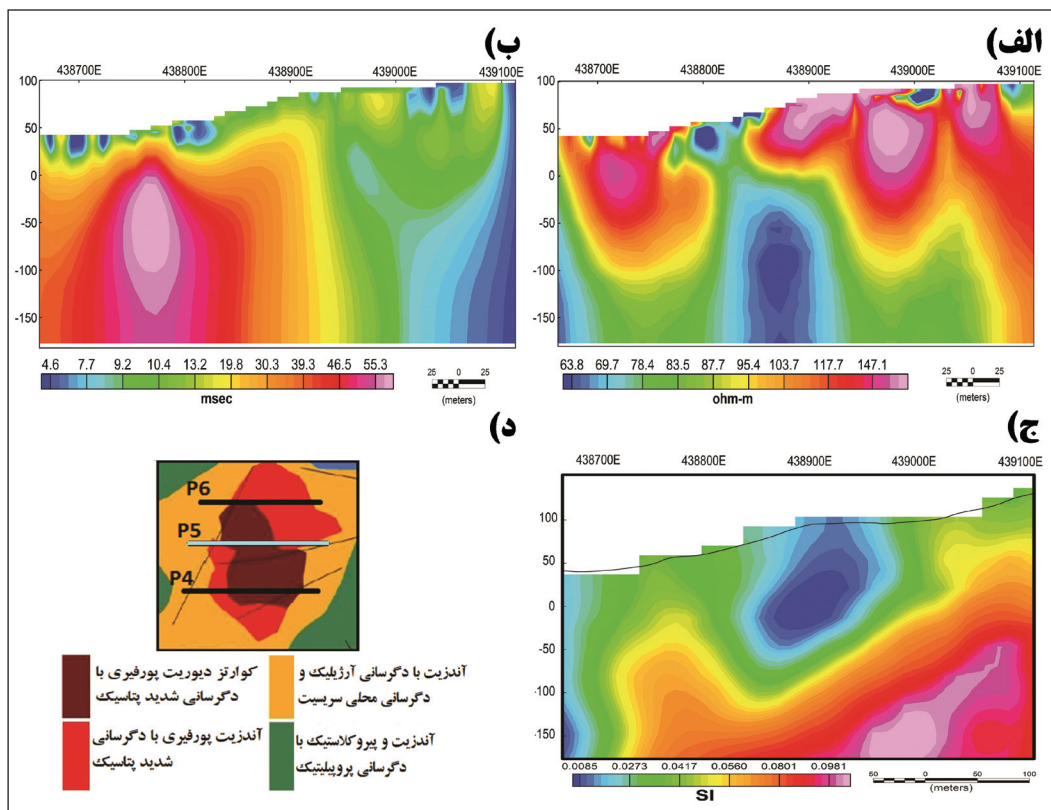
شکل ۱۲- الف) مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل P4، ب) مقطع قائم بارپذیری الکتریکی پروفیل P4، ج) مقطع قائم خودپذیری مغناطیسی در امتداد پروفیل P4، د) موقعیت قرارگیری پروفیل P4، بر روی نقشه زمین‌شناسی اندیس شمالی دالی که با رنگ آبی مشخص شده است.



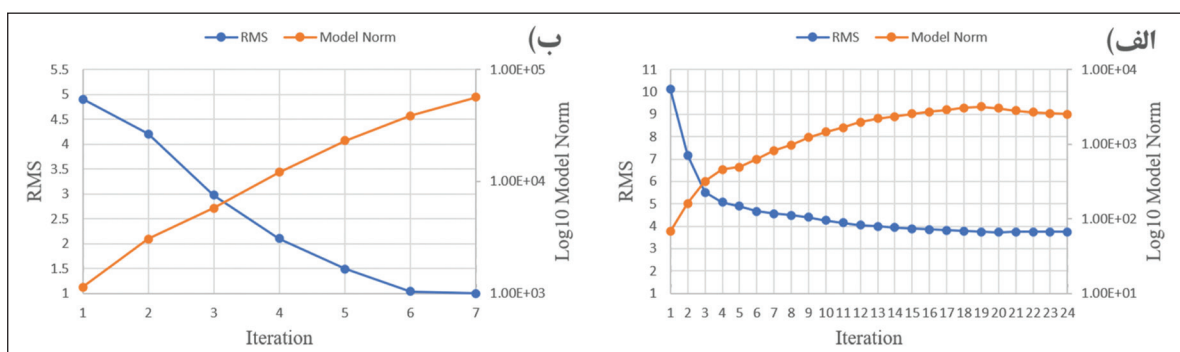
شکل ۱۳- نمودار تغییرات خطا (RMS) و طول مدل (Model Norm) در مدلسازی داده‌های الف) مقاومت ویژه و ب) پلاریزاسیون القایی به ازای هر روند تکرار (iteration) برای پروفیل P5.

عامل کاهش مقاومت ویژه و خودپذیری مغناطیسی و افزایش بارپذیری الکتریکی شده است. مجدداً همانند شکل ۱۲، بیشینه بارپذیری الکتریکی و کمینه مقاومت ویژه الکتریکی در ژرفایی کمتر از ژرفای بیشینه خودپذیری مغناطیسی قرار دارند که مطابق انتظار، کانی سازی مگنتیت در کف دگرسانی پتاسیک قرار دارد. در پروفیل P6، ژرفای مدل سازی در مقاطع مورد نظر تقریباً ۱۵۰ متر می باشد. در نهایت، مطابق شکل ۱۵، به ترتیب پس از ۲۴ و ۷ روند تکرار در مدل سازی داده های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، مدل ساخته شده شماره ۲۴ برای داده های مقاومت ویژه با خطای ۳/۷۴ و مدل ساخته شده شماره ۷ برای داده های پلاریزاسیون القایی با خطای ۱ به عنوان مدل های نهایی در نظر گرفته شدند.

شکل ۱۴ نتایج وارون سازی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی را در امتداد پروفیل P5 به همراه مقطع حاصل از وارون سازی داده های مغناطیسی در امتداد یاد شده و موقعیت قرارگیری پروفیل در نقشه زمین شناسی منطقه را نشان می دهد. همانند شکل ۱۲-الف، مقاومت ویژه بالا در سطح مدل نمایش داده شده در شکل ۱۴-الف، نشان دهنده حضور سیلیس می باشد. همچنین در ژرفاهای بیشتر شاهد حضور یک ناحیه با مقاومت ویژه کم در تماس با یک ناحیه با مقاومت ویژه متوسط تا بالا می باشیم که در مرز با تغییرات بارپذیری و خودپذیری مغناطیسی در امتداد این پروفیل در قسمت ب و ج می باشد. همچنین، با توجه به مقدار خودپذیری مغناطیسی پایین در ژرفاهای زیاد به نظر می رسد حضور کانی های رسی در دگرسانی آرژیلیک



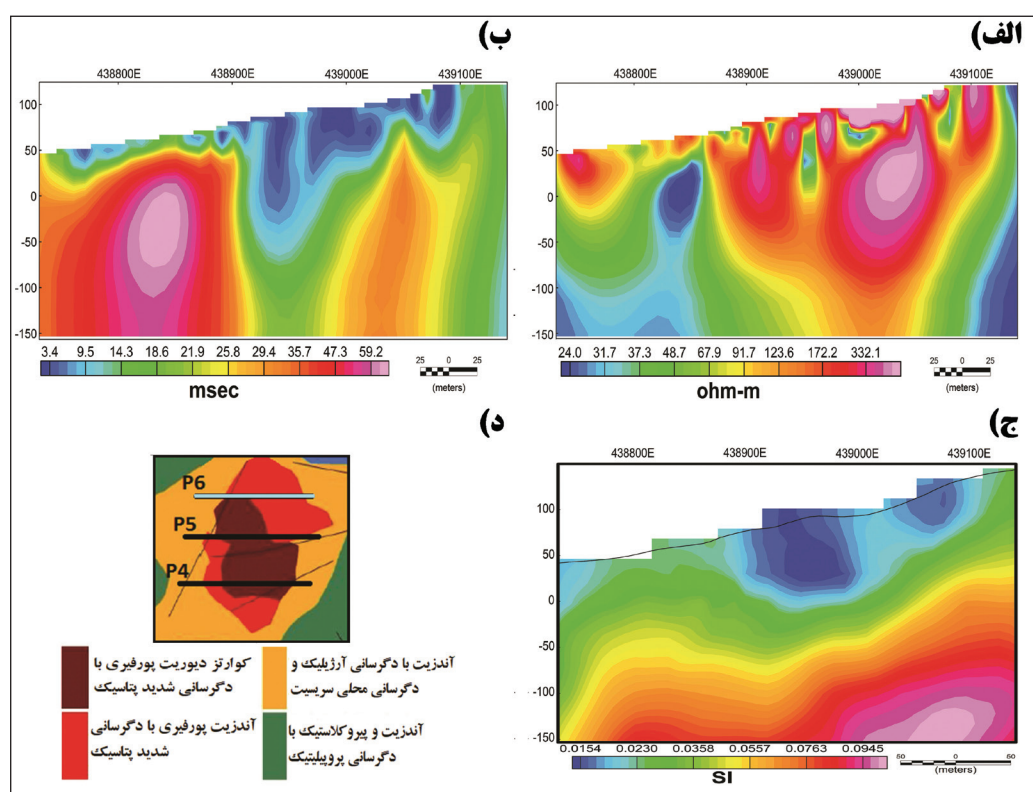
شکل ۱۴- الف) مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل P5، ب) مقطع قائم بارپذیری الکتریکی پروفیل P5، ج) مقطع قائم خودپذیری مغناطیسی در امتداد پروفیل P5، د) موقعیت قرارگیری پروفیل P5 بر روی نقشه زمین شناسی اندیس شمالی دالی که با رنگ آبی مشخص شده است.



شکل ۱۵- نمودار تغییرات خطا (RMS) و طول مدل (Model Norm) در مدل سازی داده های الف) مقاومت ویژه و ب) پلاریزاسیون القایی به ازای هر روند تکرار (iteration) برای پروفیل P6.

را در این ناحیه تأیید می‌کند. مقاومت ویژه پایین و بارپذیری بالا در ژرفا در تماس با ناحیه با مقاومت ویژه بالا و بارپذیری کم است که مقایسه آن با نقشه زمین‌شناسی در بخش د، حضور رس که مرتبط با دگرسانی آرژلیک می‌باشد را در این ناحیه تأیید می‌کند. اثر حضور کانی‌سازی مگنتیت و خودپذیری مغناطیسی بالا در ژرفای زیاد بیانگر این نکته است که بخش عمده کانسار دست نخورده و در امان از فرسایش باقی‌مانده است.

شکل ۱۶ نتایج وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی را در امتداد پروفیل P6 به همراه مقطع حاصل از وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی در امتداد یاد شده و موقعیت قرارگیری پروفیل در نقشه زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد. مجدداً مشابه نتایج مربوط به پروفیل‌های P4 و P5 در شکل‌های ۱۲ و ۱۴، در شکل ۱۶- الف نیز یک ناحیه با مقاومت ویژه بالا در نزدیکی سطح زمین وجود دارد که بارپذیری الکتریکی و خودپذیری مغناطیسی پایین در بخش ب و ج، حضور سیلیس



شکل ۱۶- الف) مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل P6، ب) مقطع قائم بارپذیری الکتریکی پروفیل P6، ج) مقطع قائم خودپذیری مغناطیسی در امتداد پروفیل P6، د) موقعیت قرارگیری پروفیل P6، بر روی نقشه زمین‌شناسی اندیس شمالی دالی که با رنگ آبی مشخص شده است.

۸- نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی و مقایسه با نتایج وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی، حضور سیلیس با مقاومت ویژه بالا در نزدیکی سطح زمین و وجود احتمالی با دگرسانی آرژلیکی و یا پتاسیک در ژرفا را تأیید نمود. به این ترتیب، احتمال وجود پتانسیل معدنی کانسار پورفیری مس و طلا در منطقه دور از ذهن نیست؛ اما تعداد گمانه‌ها و پروفیل‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی موجود در منطقه کافی به نظر نمی‌رسد. پیشنهاد می‌شود با انجام برداشت‌های منظم دوقطبی- دوقطبی سه‌بعدی و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در تعداد پروفیل‌های بیشتر و در جهت شمالی- جنوبی و عمود بر پروفیل‌های فعلی، مدل‌سازی دقیق مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی به صورت سه‌بعدی انجام گیرد.

مطابق مطالعات زمین‌شناسی انتظار می‌رود که در کانسارهای پورفیری، مگنتیت‌زایی در کف دگرسانی پتاسیک و زیر محدوده کانی‌سازی انجام گرفته باشد که مقایسه نتایج مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی با اطلاعات ژئوشیمیایی گمانه‌های حفر شده این مسأله را تأیید نمود. مشخص گردید که تغییرات شدید خودپذیری مغناطیسی در مرز توده‌های دارای بیشینه خودپذیری مغناطیسی، تمرکز بالای عیار مس و طلا را نشان می‌دهند. افزون بر این، مقایسه مقطع زمین‌شناسی با مقطع مدل مغناطیسی نشان داد که تغییرات خودپذیری مغناطیسی در سطح زمین با تغییرات سنگ‌شناسی از آندزیت پورفیری به کوارتز دیوریت پورفیری انطباق دارد. هر چند عدم تطابق کامل این دو می‌تواند به دلیل حضور کانی‌سازی در سطح تماس آندزیت و کوارتز دیوریت پورفیری و یا عدم صحت و دقت کافی نقشه مقطع زمین‌شناسی باشد.

کتابنگاری

- اسدی، ه. و آصف، م. ر.، ۱۳۹۶، خلاصه گزارش فنی- مدیریتی و بررسی فنی- اقتصادی طرح معدن و کارخانه فرآوری مس- طلای دالی (استان مرکزی).
افشار، ا.، عابدی، م. و نوروزی، غ. م.، ۱۳۹۷، مدل سازی ژئوفیزیکی جهت تصویرسازی ژئوالکتریکی کانه زایی مس؛ مطالعه موردی محدوده یحیی آباد زنجان، کنفرانس ملی مدل سازی در مهندسی معدن، صص. ۳۷ تا ۴۵.
امیرپور اصل میاندوآب، ا.، سهرابی، ق. و نصیری گنجینه کتاب. م.، ۱۳۹۵، کاربرد روش مغناطیس سنجی برای اکتشاف کانه زایی مس و طلا در محدوده اکتشافی پلی متال باشماق هشترو، مجله ژئوفیزیک ایران، دوره ۱۰، شماره ۲، صص. ۳۹ تا ۴۸.
سیف، م. ر.، محمدزاده مقدم، م. و میرزایی، س.، ۱۳۹۷، شناسایی و مکان یابی اهداف و تأسیسات زیرزمینی بر پایه داده های مغناطیس سنجی با استفاده از روش های سیگنال تحلیلی، اوپلر و وارون سازی سه بعدی، علوم و فناوری های پدافند نوین، دوره ۹، شماره ۳، صص. ۳۵۹ تا ۳۶۸.
فاتحی، م. و اسدی هارونی، ه.، ۱۳۹۷، ویژگی های ژئوفیزیکی کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا: مطالعه موردی در کانسار مس - طلای پورفیری دالی، استان مرکزی، زمین شناسی اقتصادی، دوره ۱۰، شماره ۲، صص. ۶۳۹ تا ۶۷۵.
گورابجیری پور، آ.، و مابشری، م.، ۱۳۹۴، تلفیق داده های زمین شناسی، کانی سازی و مطالعات ژئوفیزیکی IP/RS کانسار ماهور-شمال غرب دهسلم، بلوک لوت، زمین شناسی اقتصادی، دوره ۷، شماره ۲.

References

- Barak, S., Abedi, M., and Bahroudi, A. 2020. A knowledge-guided fuzzy inference approach for integrating geophysics, geochemistry, and geology data in a deposit-scale porphyry copper targeting, Saveh, Iran., *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 61(2).
- Behn, G., Camus, F., Carrasco, P., and Ware, H., 2001. Aeromagnetic signature of porphyry copper systems in northern Chile and its geologic implications, *Economic Geology*, 96(2), pp.239-248.
- 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), pp.1247-1250.
- Clark, D.A., French, D.H., Lackie, M.A., and Schmidt, P.W., 1992. Magnetic petrology: application of integrated rock magnetic and petrological techniques to geological interpretation of magnetic surveys, *Exploration Geophysics*, 23(2), pp.65-68.doi: 10.1071/EG992065.
- Cooke, D.R., Agnew, P., Hollings, P., Baker, M., Chang, Z., Wilkinson, J.J., Ahmed, A., White, N.C., Zhang, L., Thompson, J., and Gemmell, J.B., 2020. Recent advances in the application of mineral chemistry to exploration for porphyry copper-gold-molybdenum deposits: detecting the geochemical fingerprints and footprints of hypogene mineralization and alteration, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(2), pp. 176-188.
- Darabi-Golestan, F., Ghavami-Riabi, R., Khalokakaie, R., Asadi-Haroni, H., and Seyedrahimi-Nyaragh, M., 2013. Interpretation of lithogeochemical and geophysical data to identify the buried mineralized area in Cu-Au porphyry of Dalli-Northern Hill, Arabian Journal of Geosciences, 6(11), pp.4499-4509.
- El Alaoui, M.E.A., Ouadif, L., Bahi, L., and Manar, A., 2020. Contribution of applied geophysics in mining prospecting, in *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, p. 3016.
- Huang, X.W., Sappin, A.A., Boutroy, É., Beaudoin, G., and Makvandi, S., 2019. Trace element composition of igneous and hydrothermal magnetite from porphyry deposits: Relationship to deposit subtypes and magmatic affinity, *Economic Geology*, 114(5), pp. 917-952.
- Li, Y., and Oldenburg, D.W., 1996. 3-D inversion of magnetic data, *Geophysics*, 61(2), pp.394-408.
- Menke, W., 2018- *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*, Academic press. doi: 10.1007/978-90-481-3167-9_8.
- Mostafaei, K., and Ramazi, H., 2017. Correlation between IP and Rs and grade data in modeling and evaluation of a copper deposit, case study: the Sarbisheh copper deposit, Iran, *Journal of Tethys*: Vol. 5(2), pp. 128-137.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, 37(3), pp.507-517.
- Oldenburg, D.W., McGillivray, P.R., and Ellis, R.G., 1993. Generalized subspace methods for large-scale inverse problems, *Geophysical Journal International*, 114(1), pp. 12-20.
- Oldenburg, D.W., and Li, Y., 1994. Inversion of induced polarization data, *Geophysics*, 59(9), pp. 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), pp.1419-1431.
- Oldenburg, D.W., and Li, Y., 2005. Inversion for applied geophysics: A tutorial, *Near-surface geophysics*, pp. 89-150.
- Oldenburg, D.W., and Pratt, D.A., 2007. Geophysical inversion for mineral exploration: a decade of progress in theory and practice, *Proceedings of exploration*, 7(5), pp.61-95.
- Reynolds, J.M., 2011. An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons. doi: 10.1071/pvv2011n155other.
- Salem, A. and Ravat, D., 2003- A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data, *Geophysics*, 68(6), pp.1952-1961. doi: 10.1190/1.1635049.

- Salem, S.M., Arafa, S.A., Ramadan, T.M., and El Sayed, A., 2013. Exploration of copper deposits in Wadi El Regeita area, Southern Sinai, Egypt, with contribution of remote sensing and geophysical data, *Arabian Journal of Geosciences*, 6(2), pp.321-335.
- Sillitoe, R.H., 1973. Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile, *Economic Geology*, 68(1), pp.1-10.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems, *Economic geology*, 105(1), pp.3-41.
- 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), pp. 388–400.

Original Research Paper

Inverse modeling of Magnetic and IP/RS data for exploration of Northern Dalli Copper-Gold porphyry deposit

Keytash Moshtaghian¹, Seyed Mohammad Abtahi Forooshani^{1*}, Hooshang Asadi Harooni¹, Mohammad Hajheidari¹ and Ghazal Janghorban¹

¹ Department of Exploration, Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2021 February 08

Accepted: 2021 October 13

Available online: 2022 September 23

Keywords:

Inverse modeling

Magnetometry

Electrical resistivity

Induced polarization

Dalli deposit

ABSTRACT

The Dalli porphyry Copper-Gold deposit consists of two northern and southern indexes located on the Urmia-Dokhtar Volcanic Belt in Markazi province. Due to the presence of magnetite beneath the potassic alteration zone in the center of porphyry mineralization, a magnetometric survey was performed in the region. In the current study in the northern index, first, we extracted the local anomaly via removing the regional and aliasing effects from the magnetic data. Then, using three-dimensional inverse modeling of the reduced data illustrates the presence of a body with high magnetic susceptibility, in the depth range of 40 to 640 meters of the study area. A comparison between geochemical analysis of two exploratory core drilling with the depth variational model of the estimated magnetic susceptibility in the study area indicates a spatial correlation between increases in the grades of copper and gold and large variations of the magnetic susceptibility. Also, comparison between the magnetic susceptibility model and resistivity and chargeability models estimated from IP/RS data of three parallel profiles indicates a relation between sulfidic and altered mineralized zones and magnetic susceptibility variations. Therefore, the current study shows a high potential for the copper-gold mineralization in the northern Dalli index.

* Corresponding author: Seyed Mohammad Abtahi Forooshani

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/GSJ.2021.272272.1886

dor: 20.1001.1.10237429.1401.32.3.10.4

