

پیشنهاد موقعیت بهینه حفاری در کانسار مس پورفیری نارباغی شمالی ساوه براساس مدل سازی داده های ژئوفیزیکی

رضا احمدی*^۱، محمدرضا رضاپور^۲

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۹/۱۷

دریافت مقاله: ۹۸/۰۳/۱۹

چکیده

در پژوهش حاضر مدل سازی داده های ژئوفیزیکی مغناطیس سنجی، قطبش القایی و مقاومت ویژه در کانسار مس پورفیری نارباغی شمالی ساوه انجام شد. اطلاعات لیتولوژی و عیارسنجی مس مغزه های حاصل از حفاری ۲۳ حلقه گمانه اکتشافی عمیق با متر اژ کلی ۲۴۲۵ متر بطور پراکنده در سطح محدوده نیز در دسترس می باشد. در گام نخست بر روی داده های مغناطیسی، پردازش های مورد نیاز به منظور برجسته سازی بی هنجاری های عمقی، با استفاده از نرم افزار Oasis montaj اعمال شد. سپس مدل سازی وارون داده های هفت پروفیل ژئوالکتریکی با استفاده از نرم افزار Res2dinv صورت گرفت و براساس تفسیر کیفی مقاطع ژئوفیزیکی بارپذیری، مقاومت ویژه و فاکتور فلزی پروفیل ها، موقعیت بهینه حفاری بر روی هر پروفیل پیشنهاد گردید. در ادامه نقشه تغییرات عمقی ویژگی های ژئوالکتریکی منطقه برای داده های وارون سازی شده چهار عمق ۱۰، ۲۵، ۴۳ و ۷۸ متری ترسیم و تفسیر شد. سپس برای تجسم تغییرات فضایی ویژگی های الکتریکی منطقه و پیشنهاد مناسب ترین موقعیت عملیات حفاری، مدل شبه سه بعدی تغییرات مقاومت ویژه، بارپذیری و فاکتور فلزی محدوده کانسار بعد از مدل سازی وارون، با استفاده از نرم افزار Rockworks ترسیم شد. ترسیم مقطع ماده معدنی منطبق بر پروفیل های ژئوفیزیکی با استفاده از داده های عیارسنجی گمانه ها نشان داد که حفاری برخی از گمانه های منطبق بر پروفیل ها و غیرمبتنی بر نتایج عملیات ژئوفیزیکی، بدون هیچ گونه منطق، هدف و طراحی درستی صورت گرفته و فاقد ماده معدنی نیز می باشند. همچنین بررسی میزان تطابق کیفی نتایج عملیات برداشت ژئوالکتریک با داده های عیارسنجی گمانه های حاوی ماده معدنی منطبق بر پروفیل های ژئوفیزیک، به طور کلی تطابق کیفی متوسطی را بین این داده ها نشان داد.

کلید واژه ها: کانسار مس نارباغی شمالی ساوه، مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه (Rs)، قطبش القایی (IP)، مدل سازی ژئوفیزیکی

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک Rezahmadi@gmail.com

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

امروزه جایگاه، نقش و اهمیت مواد معدنی بر هیچ کس پوشیده نیست و نیاز روزافزون بشر سبب شده که روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی فلزی ارزشمند همانند مس به کار گرفته شود. بدون شک مواد معدنی فلزی نسبت به سایر مواد معدنی، از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و روش‌های اکتشاف آنها نیز از پیچیدگی‌های بیشتری برخوردار است. کانسارهای فلزی به ویژه کانسارهای مس از نظر زمین شناسی، ساختاری و ژنز دارای پیچیدگی‌های زیادی هستند. اغلب کانسارهای مس از نوع پراکنده یا افشان (Disseminated) و پرکننده درزه و شکاف‌ها و فضاهای خالی (رگه و رگچه ای) بوده و در نتیجه دارای گسترش زیاد و عیار پایین هستند. بنابراین اکتشاف این نوع کانسارها علاوه بر آنکه قدری مشکل است، زمان‌بر و پرهزینه نیز می‌باشد. برای اکتشاف کانسارهای فلزی همانند مس پورفیری، باید از چند روش اکتشافی مختلف استفاده کرده و در نهایت از تلفیق آنها، پتانسیل‌های انباشتگی ماده معدنی، استخراج شود. بکارگیری روش‌های ژئوفیزیکی مناسب، گام نخست و تصمیم بهینه در راستای اکتشاف این نوع کانسارها است. روش‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی (Magnetic survey)، مقاومت‌ویژه (Resistivity (Rs)) و قطبش القایی (Induced Polarization (IP)) مفیدترین روش‌ها برای اکتشاف بخش‌های پنهان کانی‌سازی، در این نوع کانسارها هستند (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴؛ کلاگری، ۱۳۸۹؛ Keary, 2002؛ Milsom, 2003؛ Reynolds, 2011). در سایه بکارگیری این روش‌ها و تلفیق نتایج آنها با یکدیگر می‌توان محدوده و گسترش سطحی و عمقی کانسار و در نتیجه نحوه گسترش فضایی آن را تعیین نمود. این گام اساسی منجر به پیشنهاد موقعیت بهینه حفاری و شناخت کامل کانسار جهت دست‌یابی به ذخیره کانه می‌باشد. در پژوهش حاضر مطالعات ژئوفیزیک اکتشافی کانسار مس پورفیری نارباغی شمالی واقع در نزدیکی شهر ساوه با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی اشاره شده، صورت گرفته و براساس نتایج آنها موقعیت‌های بهینه

عملیات حفاری پیشنهاد شده است. همچنین عملیات ژئوفیزیکی انجام شده با استفاده از داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی منطبق بر پروفیل‌های ژئوفیزیکی، بصورت کیفی اعتبارسنجی شده است.

در ارتباط با مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی کانسارها و اعتبارسنجی نتایج عملیات اکتشاف ژئوفیزیکی طی سال‌های اخیر، تحقیقات چندی صورت گرفته که به چند مورد از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. هالیدی و کوک (Holliday and Cooke, 2007) در مورد پیشرفت مدل‌های زمین‌شناسی و روش‌های اکتشاف کانسارهای مس - طلای پورفیری، با توجه به سابقه کشف و شیوه‌های اکتشافی طی پانزده سال اخیر پرداخته‌اند که در نتیجه، برداشت نقاط حفاری با استفاده از حفاریات زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و روش‌های ژئوفیزیکی در دستیابی به موفقیت‌های اکتشافی، اهمیت زیادی دارد. روش مغناطیس‌سنجی در محیط پورفیری، هم در مقیاس محلی و هم در مقیاس ناحیه‌ای، به دلیل احتمال وجود مقادیر مختلف مگنتیت در کانی‌سازی، دگرسانی، نفوذ و تجمع روی سنگ دیواره، کاربرد زیادی دارد. بنابراین استفاده از داده‌های مغناطیسی دقیق و روش قطبش القایی در اکتشافات مهم اخیر، نقش حیاتی داشته است. احمدی و همکاران (۱۳۸۶) میزان انطباق شبه‌مقاطع ژئوفیزیکی (و فاکتور فلزی) با مقاطع ماده معدنی (عیار مس) را برای کانسار مس علی‌آباد واقع در فاصله ۵۵ کیلومتری جنوب غرب شهرستان یزد، ابتدا به‌طور کیفی مورد بررسی قرار دادند. سپس میزان همبستگی داده‌های ژئوفیزیکی، قبل و بعد از مدل‌سازی وارون هموار با نتایج عیارسنجی عملیات حفاری، به‌طور کمی برآورد شده است. براساس نتایج به‌دست آمده میزان همبستگی داده‌های ژئوفیزیکی با داده‌های عیارسنجی مس، بسیار کم تا کم می‌باشد که دلیل اصلی آن، پیچیدگی ذاتی خود کانسار و بالا بودن سطح نوفه در منطقه است. بری و همکاران (Bery et al., 2012) از روش‌های قطبش القایی در حوزه زمان و مقاومت ویژه الکتریکی جریان مستقیم برای اکتشاف و تعیین نحوه توزیع و گسترش زیرسطحی آهن در

پایین ماده معدنی و بالا بودن سطح نوفه در داده‌های ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه، تشخیص داده شد. عادل‌پور و همکاران (۱۳۹۵) برای تعیین مناطق کانی‌سازی در کانسار مس گرماب واقع در خراسان جنوبی، از پردازش داده‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی استفاده کردند. بدین منظور با تلفیق نتایج به دست آمده از بررسی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمیایی سطحی و زمین‌فیزیک، ضمن تکمیل بررسی‌های یادشده، با استفاده از روش‌های زمین‌فیزیک اکتشافی، موقعیت مکانی زون کانی‌سازی کانسار تعیین گردید و از شبه مقاطع قطبش القایی و مدل‌سازی وارون هموار برای تعیین محل احتمالی، گسترش جانبی و قائم کانی‌سازی‌های زیرسطحی استفاده شد.

۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده اکتشافی نارباغی شمالی در شمال شرق استان مرکزی، ۲۶ کیلومتری شمال شرق شهرستان ساوه و در ورقه ۱:۱۰۰.۰۰۰ زاویه واقع شده است. راه ارتباطی منطقه از طریق آزادراه تهران-ساوه میسر است و پس از گذر از عوارضی ساوه (۱۰ کیلومتری شهرستان ساوه) و عبور از زیرگذر شهرک صنعتی، راه خاکی به طول ۱۵ کیلومتر به سمت روستای عباس‌آباد نارباغی وجود دارد که امکان دسترسی به بخش‌های مختلف محدوده را ممکن می‌سازد. محدوده مورد مطالعه از نظر ساختاری در پهنه ایران مرکزی و کمان ماگمایی ارومیه-دختر و بلوک قم-ساوه این کمان قرار دارد و برحسب شناخت، این نوار یکی از پرتکاپوترین و غنی‌ترین پهنه‌های ساختاری از دید زمین‌شناسی اقتصادی به‌ویژه از نظر وجود کانسارهای فلزی مانند مس می‌باشد. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ محدوده اکتشافی با مساحت هشتصد هزار متر مربع نشان داده شده است که بر پایه نقشه توپوگرافی ۱:۱۰۰۰ محدوده، تهیه شده و موقعیت ترانشه‌ها و گمانه‌های اکتشافی منطقه نیز بر روی آن نمایش داده شده‌اند. براساس برداشت‌های صحرایی صورت گرفته در محدوده اکتشافی، قدیمی‌ترین واحد سنگی، واحد آندزیتی است که در

پاگه (Pagoh) مالزی استفاده کردند. تصویربرداری (مدل) و روش تجزیه و تحلیل آماری مورد استفاده در این مطالعه، اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج ژئوفیزیک را در زمینه تصویربرداری زیرسطحی افزایش داد. سعد و همکاران (Saad et al., 2012) از روش‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه دویعدی برای اکتشاف و ارزیابی پتانسیل زیرسطحی سنگ آهن در شمال شبه‌جزیره مالزی استفاده کردند. بررسی نتایج نشان داده که در زیر سطح منطقه، کوهرفت‌های (Colluvium) ضخیمی با مقاومت ویژه ۳۰۰-۱۰ اهم‌متر و بارپذیری ۳-۰/۱ میلی‌ثانیه وجود دارد و همچنین کوهرفت‌ها تا عمق ۱۵۰ متر نیز قابل انتظار هستند. یعقوبی‌تبار و همکاران (۱۳۹۲) بر روی داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده با روش‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه در منطقه ابراهیم‌آباد میامی، مدل‌سازی وارون دویعدی هموار انجام دادند که نتایج حاصل از آنها به کمک اطلاعات زمین‌شناسی، منجر به شناسایی زون‌های کانی‌سازی مس و همچنین ساختارهای گسله در منطقه شد. علی‌لو و همکاران (Alilou et al., 2014) از ترکیب روش‌های ژئوفیزیکی مختلف شامل قطبش القایی، مقاومت ویژه و مغناطیس‌سنجی برای بررسی گسترش انواع مختلف مواد معدنی در رسوبات چندفلزی (پلی‌متال) منطقه حلب (زنجان) حاوی عناصر مختلفی مانند سرب، روی، آهن، مس و نقره استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داده که اگرچه بین داده‌های ژئوالکتریک و مغناطیس‌سنجی در این مورد انطباق زیادی وجود دارد ولی در مجموع روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده برای اکتشاف کانسار چندفلزی مورد مطالعه، از درجه اطمینان اندکی برخوردارند. احمدی و همکاران (۱۳۹۴) در کانسار مس دره زرشک واقع در جنوب غرب شهرستان یزد، میزان انطباق شبه مقاطع ژئوفیزیکی (فاکتورفلزی) بر مقاطع اکتشافی (عیارسنجی مس) را ابتدا به طور کیفی مورد بررسی قرار دادند. سپس میزان همبستگی داده‌های ژئوفیزیکی، قبل و بعد از مدل‌سازی وارون هموار، با نتایج عیارسنجی عملیات حفاری بطور کمی برآورد شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، پیچیدگی ذاتی زمین‌شناسی خود کانسار، عیار نسبتاً

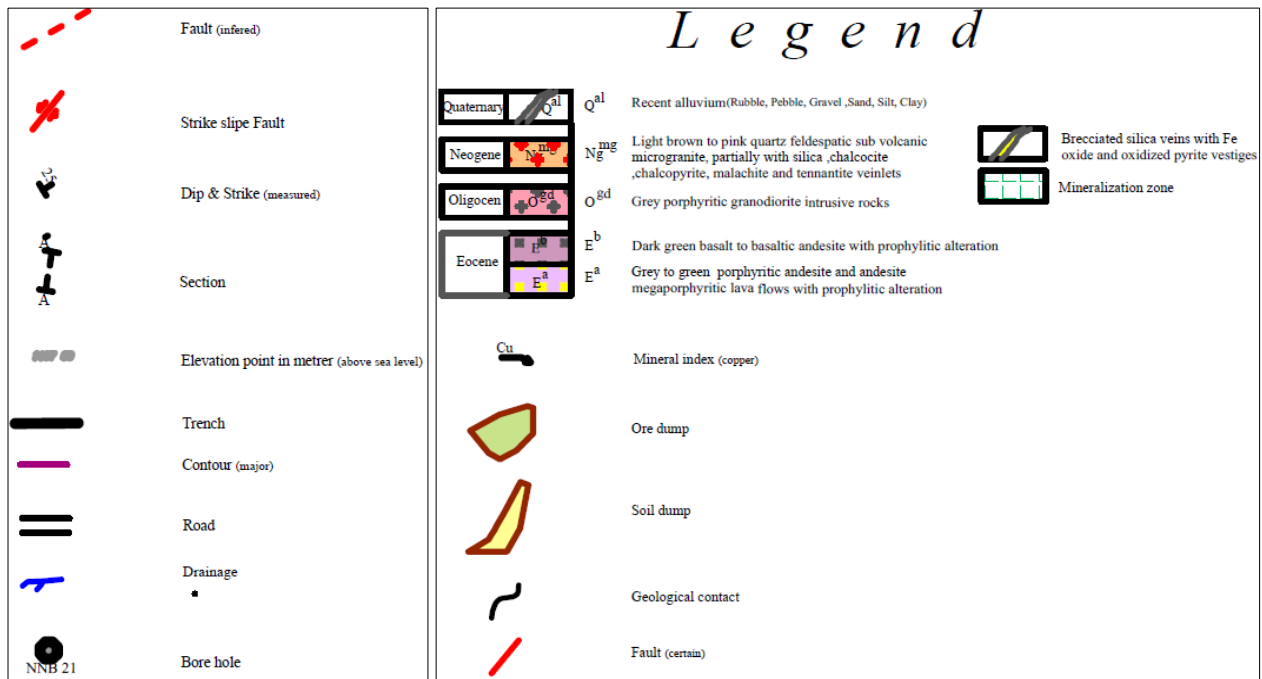
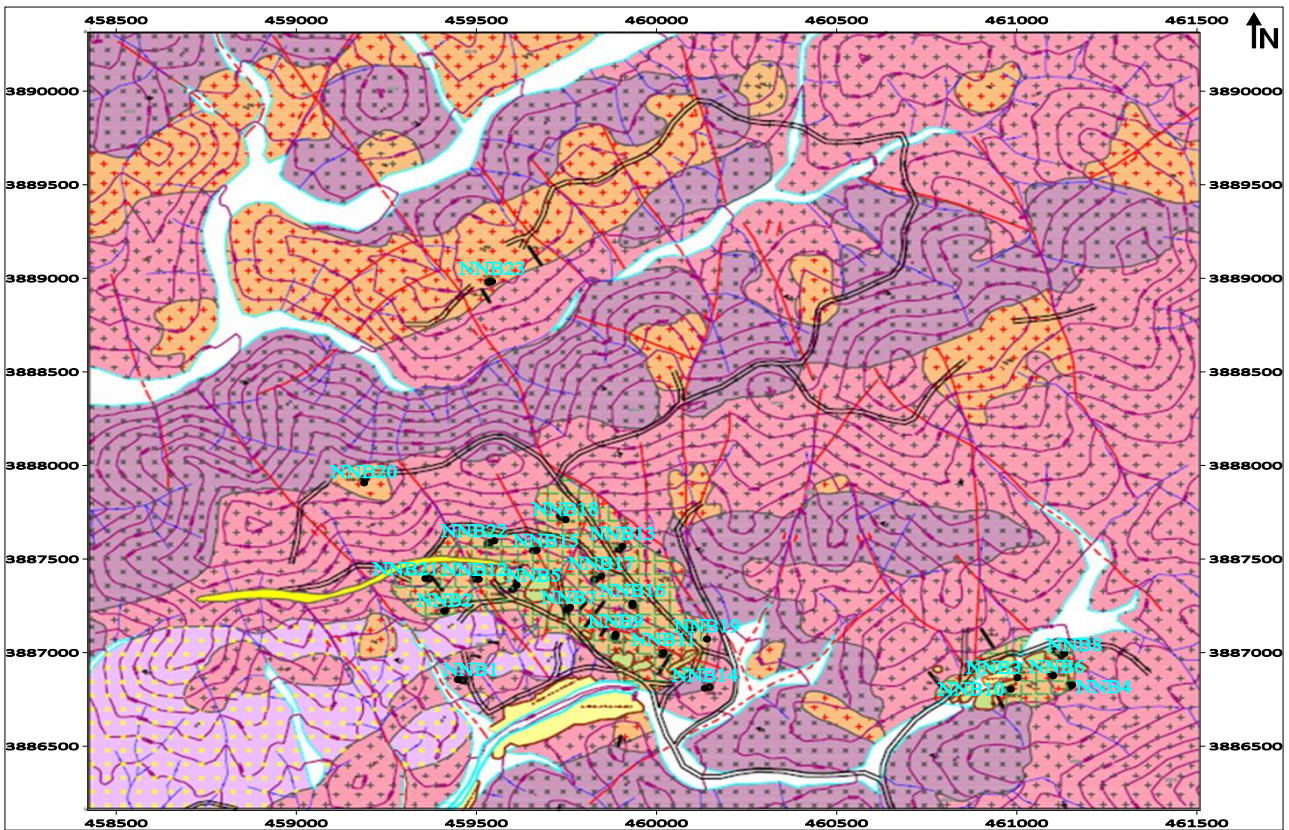
(سوپرژن) تقسیم کرد. دگرسانی فیلیک در بخش‌های شامل کانی‌زایی در داخل توده نفوذی دیده می‌شود که به وسیله جایگزینی سریسیت و کوارتز به جای بیشتر کانی‌های سیلیکاتی سنگ‌ساز مشخص می‌شود. دگرسانی سوپرژن باعث تبدیل بخشی از کانی‌های سولفیدی به کانی‌های کربناتی و نیز اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به همراه جاروسیت شده و دگرسانی آرژیلیک ناشی از فرآیندهای سوپرژن قدری بر روی دگرسانی فیلیک تاثیر گذاشته است. بخش مهمی از دگرسانی آرژیلیک در سطح را می‌توان حاصل دگرسانی سوپرژن دانست که به وسیله وجود اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و نیز جاروسیت تایید می‌شود. گسترده‌ترین دگرسانی موجود در محدوده اکتشافی دگرسانی پروپیلیتیک است که به صورت جانبی دگرسانی‌های دیگر را دربر می‌گیرد و به وسیله کانی‌های کلریت و اپیدوت مشخص می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک آخرین فاز دگرسانی در محدوده اکتشافی است که بیشترین تاثیر را بر روی آندزیت گذاشته است، به گونه‌ای که رنگ سبز شاخص آن از دور کاملاً مشخص است. بخشی از این دگرسانی را می‌توان ناشی از فرایندهای سوپرژن دانست. بطور کلی کانی‌سازی بیشتر به صورت مالاکیت، آزوریت، پیریت و کمتر کالکوپیریت و کالکوسیت است که به دو صورت پراکنده یا افشان و پراکنده شکستگی‌ها (رگه و رگچه‌ای) در سنگ میزبان مشاهده می‌شود و تا حدودی تحت دگرسانی آرژیلیک و سریسیتیک قرار گرفته است (پیچاب کانسار، ۱۳۹۴).

۳. فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در منطقه

مهم ترین فعالیت‌های اکتشافی در محدوده کانسار مس نارباغی شمالی شامل تهیه نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، عملیات برداشت ژئوفیزیکی

جنوب و جنوب غربی محدوده گسترش دارد و عموماً با توپوگرافی تپه‌ماهوری دیده می‌شود (پیچاب کانسار، ۱۳۹۴). این واحد شامل آندزیت پورفیری تا مگاپورفیری با رنگ خاکستری تیره تا متمایل به سبز دارای بافت نهان بلورین (Aphanitic) بوده که تحت تاثیر دگرسانی کلریتی و پروپیلیتیک قرار گرفته و کانه‌زایی خاصی در آن تشکیل نشده است. واحد بازالت - آندزیت بازالتی (E^b) در منطقه گسترش زیادی داشته و در مرکز، جنوب و شمال محدوده با رنگ خاکستری تیره و سبز تیره رخنمون متمایزی را نسبت به سنگ‌های اطراف نشان می‌دهد. این سنگ‌ها بیشتر به وسیله توده نفوذی گرانودیوریتی و میکروگرانیته در برگرفته شده و دارای دگرسانی پروپیلیتیک هستند. مهم‌ترین و بزرگ‌ترین توده نفوذی در محدوده اکتشافی شمال نارباغی دارای ترکیبی در حد گرانیته - گرانودیوریت پورفیری است که با رنگ خاکستری خود به خوبی از واحدهای دربرگیرنده به ویژه آندزیت متمایز است و در نقشه زمین شناسی با واحد (O^{gd}-Ng^{ms}) شناخته می‌شود. در بخش شمالی و مرکزی محدوده، توده‌های نفوذی میکروگرانیته کوارتز - فلدسپاتی زرد تا قهوه‌ای روشن و صورتی رنگ دیده می‌شود. این توده‌های نفوذی در بخش‌هایی حاوی رگچه‌های سیلیسی، کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت، مالاکیت و تنانیت می‌باشند. بیشتر فعالیت‌های اکتشافی از جمله حفاری‌های عمیق در این توده‌های نفوذی انجام گرفته است.

توده نفوذی مونزوگرانیته - کوارتز مونزوودیوریتی میزبان اصلی کانی‌زایی در محدوده اکتشافی شمال نارباغی است. این توده در طی نفوذ باعث چرخش سیال‌های گرمابی و نیز گرم شدن بخش‌هایی از سیال‌های جوی در منطقه شده است. چرخش سیال‌های گرمابی علاوه بر تامین عناصر کانه‌ساز، باعث دگرسانی نیز شده است. بطور کلی دگرسانی در محدوده شمال نارباغی را می‌توان به دو گروه اولیه (هیپوژن) و ثانویه



شکل ۱. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده کانسار نارباغی شمالی همراه با نمایش موقعیت گمانه‌ها و ترانسه‌های اکتشافی (برگرفته از پیچاپ کانسار، ۱۳۹۴).

بنابراین هدف از انجام برداشت‌های مغناطیسی در اکتشاف کانسارهای مس پورفیری و بویژه کانسار مس پورفیری نارباغی شمالی ساوه در پژوهش حاضر، آشکارسازی و تعیین محدوده زون دگرسانی پتاسیک و دیگر زون‌های دگرسان شده است که در ارتباط با زون کانه زایی می‌باشند. زون کوارتز-سرسیت-پیریت (زون فیلک یا سرسیتیک) را به دلیل تمرکز پیریت و گسترش نسبتاً زیاد آن، با استفاده از روش IP می‌توان شناسایی کرد. از روش مقاومت ویژه به واسطه مقاومت ویژه پایین زون‌های دگرسانی می‌توان استفاده نمود (کریم پور و سعادت، ۱۳۹۶).

چون داده‌های ژئوفیزیکی، حجیم و معمولاً همراه با نوفه بوده و نیز طیف تغییرات خصوصیات فیزیکی توده‌های زیرسطحی، بسیار گسترده می‌باشد، بنابراین همواره این داده‌ها نیازمند انجام یکسری عملیات پردازشی و مدل‌سازی هستند و اعمال آنها برای تشخیص و جداسازی بی‌هنجاری‌های واقعی از انواع کاذب، لازم و ضروری است (افضلی، ۱۳۹۵). در این پژوهش برای پردازش و مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی از نرم افزار Oasis montaj و برای وارون‌سازی داده‌های بارپذیری و مقاومت ویژه از نرم‌افزار Res2dinv (Loke and Lane, 2002; Res2dinv) و Loke and Barker, 1996; Loke, 1999, 2000 استفاده شده که پایه و اساس این نرم‌افزار را مدل‌سازی وارون هموار تشکیل می‌دهد. ترسیم انواع نقشه‌ها و مقاطع مختلف و مدل‌سازی‌های زمین‌شناسی کانسار نیز با استفاده از نرم افزارهای Surfer و Rockworks (http://www.rockware.com/Rockworks16) انجام شده است.

۴-۱. مطالعات مغناطیسی سنجی در محدوده مورد مطالعه

برداشت مغناطیسی با فواصل پروفیلی ۴۰ متر و فواصل ایستگاهی ۲۰ متر در ۱۰۷۷ ایستگاه انجام شده و نقشه‌ها همگی توسط نرم افزار Oasis montaj ترسیم و تحلیل شده اند. مقادیر زاویه میل و انحراف مغناطیسی منطقه توسط مدل IGRF به ترتیب برابر با ۵۳/۵ و ۴/۳ درجه و میزان شدت میدان ناحیه‌ای (زمینه) نیز ۴۷۶۸۰ گاما بدست آمده است. در

به روش‌های مغناطیسی سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی و حفر ترانشه‌ها و گمانه‌های اکتشافی است. عملیات ژئوفیزیکی در دو مرحله برداشت شده است؛ در مرحله اول ۱۰۷۷ ایستگاه مغناطیسی سنجی برای ثبت داده‌های مغناطیسی به منظور بررسی و شناسایی زون پتاسیک برداشت شد. در مرحله بعدی ابتدا برداشت‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه در شش پروفیل با روند تقریبی شمالی-جنوبی برداشت شده و در ادامه با توجه به نتایج به دست آمده، یک پروفیل عمود بر شش پروفیل قبلی با روند تقریبی شرقی-غربی برداشت شد. در این مرحله در کل ۸۰۰ ایستگاه اندازه‌گیری با آرایه دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکترودی ۴۰ متر و پرش ۲۰ متر برداشت شد. همچنین در این محدوده تعداد ۱۱ عدد ترانشه اکتشافی با طول حدود ۲۳۴ متر در واحدهای کوارتز مونزودیوریتی-مونزوگرنایت حفر شده است.

پس از انجام عملیات اکتشاف مرحله پی‌جویی و مطالعات زمین‌شناسی در منطقه، تعداد ۲۳ حلقه گمانه اکتشافی قائم در واحدهای نفوذی با ترکیب دیوریتی، مونزونیتی و گرانیتی حفاری شد. عمق حفاری‌ها از ۵۲ متر (گمانه NNB9) تا ۲۲۴ متر (گمانه NNB1) متغیر بوده و در مجموع حدود ۲۴۲۵ متر حفاری انجام شده است. تمامی گمانه‌ها مورد برداشت زمین‌شناسی و نمونه‌گیری جهت مطالعات پتروگرافی، کانه-نگاری و آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. از این گمانه‌ها تعداد ۵۳۰ نمونه جهت عنصر مس تجزیه شیمیایی شده که براساس نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت شده نیز عیار مس را بین ۲ (ppm) تا ۱۲/۲٪ متغیر نشان می‌دهد.

۴. روش شناسی پژوهش

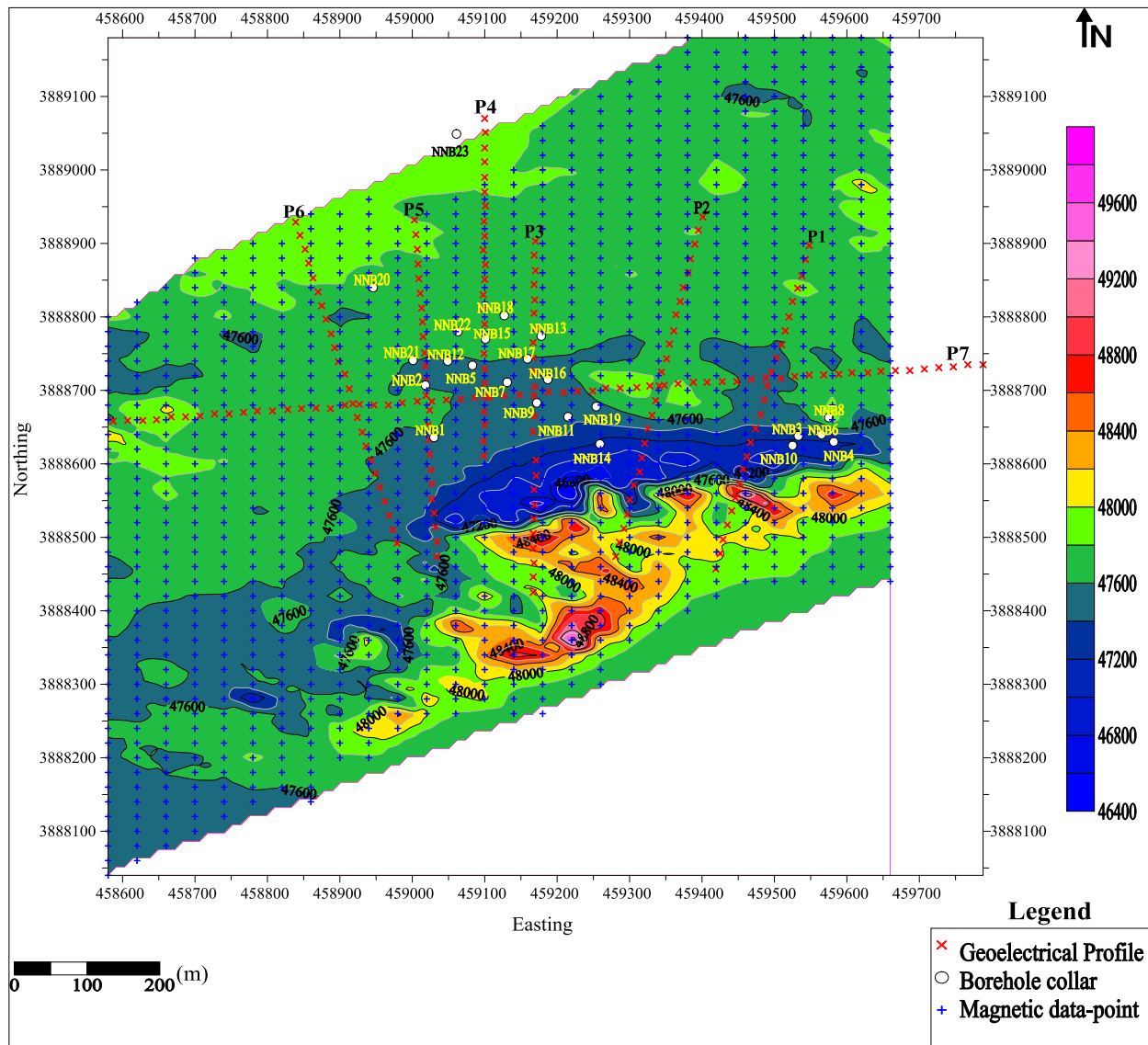
همان‌گونه که قبلاً نیز آورده شد انجام عملیات ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیسی سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی از مهم‌ترین فعالیت‌های اکتشافی غیرمستقیم انجام شده در منطقه است. معمولاً در بخش‌های عمقی زون دگرسانی پتاسیک، رگه و رگچه‌هایی از کانی مگنتیت همراه با دیگر کانی‌های سولفیدی آهن همانند پیریت و کالکوپیریت وجود دارند.

می‌کند. بدین ترتیب اثر ساختارهای عمیق را برجسته می‌نماید (Kellogg, 2010; Gupta and Ramani, 1980). نقشه‌های گسترش به سمت بالا تا ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متر بعد از اعمال فیلتر برگردان به قطب ترسیم و تفسیر شد (شکل ۳). ارتفاع ادامه فراسو براساس سعی و خطا و براساس مقایسه بی‌هنجاری‌های متعدد در ارتفاع‌های مختلف، انتخاب شده است. معمولاً انتخاب ارتفاع فیلترهای گسترش رو به بالا کیفی است و با مقایسه نتایج در ارتفاعات مختلف می‌توان به ارتفاع بهینه تقریبی دست یافت (Zeng et al., 2007). بهترین انتخاب از بین نقشه‌های ادامه فراسوی تهیه شده برای نقشه بی‌هنجاری ناحیه‌ای، مربوط به ارتفاع ۶۰ متر است زیرا بعد از این ارتفاع تمامی نقشه‌ها تقریباً روندی مشابه را دنبال می‌کنند و می‌توان گفت که از این ارتفاع به بعد اثر ساختارهای عمیق برجسته‌تر و تمامی نقشه‌ها یکسان می‌شوند.

مطابق نقشه‌های مغناطیسی، مقدار خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها در بخش جنوبی محدوده مورد مطالعه (با رنگ تیره) کمی بالاست. بی‌هنجاری‌های اصلی نیز بطور عمده در بخش‌های شمالی و جنوبی با روند شرقی-غربی مشاهده می‌شوند. بی‌هنجاری‌های بخش شمالی بخصوص شمال شرق و شمال غرب از گسترش و پراکندگی بیشتری برخوردارند ولی شدت میدان مغناطیسی آنها نسبت به بی‌هنجاری‌های بخش جنوبی کمتر است؛ این بی‌هنجاری‌ها منطبق بر سنگ‌های آذرین آندزیت و آندزیت بازالتی هستند. محدوده‌هایی که شدت میدان آنها از مقادیر متوسط برخوردار است، بخصوص از بخش مرکزی به سمت غرب، بطور عمده با زون دگرسانی سریسیتی (فیلیک)، آرژیلیک و پروپیلیتیک منطبق است.

شکل ۲ نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی کل منطقه برای داده‌های خام همراه با نمایش موقعیت نقاط برداشت مغناطیس‌سنجی، پروفیل‌های برداشت ژئوالکتریکی و گمانه‌های اکتشافی نشان داده شده است. در این محدوده کمترین مقدار شدت میدان مغناطیسی ۴۶۲۰۵ گاما و بیشترین مقدار ۴۹۹۰۵ گاما اندازه‌گیری شده و در نتیجه دامنه تغییرات ۳۷۰۰ گاما می‌باشد. نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه، تغییرات نسبتاً شدیدی را نشان می‌دهد که ممکن است ناشی از تغییرات در توپوگرافی یا لیتولوژی منطقه باشد. بطور کلی در منطقه سه زون قابل مشاهده است: زون با کمترین شدت میدان مغناطیسی که نشان از فقدان توده کانساری در منطقه یا عمق بسیار زیاد آن یا سنگ بستر رسوبی دارد. زون دارای شدت میدان مغناطیسی متوسط که می‌تواند در ارتباط با کانی‌سازی در منطقه و یا حضور سنگ‌های آذرین اسیدی باشد. زون با بیشترین شدت میدان مغناطیسی که احتمالاً در ارتباط با حضور سنگ‌های آذرین بازیک و اولترابازیک (که در بخش‌هایی از سطح محدوده نیز رخنمون داشته و قابل مشاهده اند)، وجود توده‌های با شدت مغناطیس‌پذیری بالا و یا عمق کم سنگ بستر باشد.

برای پردازش و تفسیر نقشه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی می‌توان از روش‌های گوناگونی استفاده نمود که تقریباً بیشتر آنها براساس سعی و خطا هستند. معمولاً اولین فیلتر اعمالی فیلتر برگردان به قطب است که این فیلتر برای تطبیق بی‌هنجاری‌ها اعمال می‌شود. فیلتر برگردان به قطب بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را به محل خود منتقل کرده و می‌توان آن را با نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه شده بهتر تطبیق داد. در تغییرپذیری‌های مغناطیسی به منظور تشخیص بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای از روش گسترش به سمت بالا یا ادامه فراسو (Upward continuation) به کرات استفاده می‌شود (Claerbout, 1985). این روش نوفه مربوط به ویژگی‌های سطحی را کاهش می‌دهد (Reynolds, 2011) که بی‌هنجاری‌های فرکانس بالا (طول موج کوتاه) را حذف کرده و در مقابل، بی‌هنجاری‌های با فرکانس پایین (طول موج بلند) را تقویت



شکل ۲. نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی کل منطقه مورد مطالعه با نمایش موقعیت نقاط برداشت مغناطیس سنجی، پروفیل های برداشت ژئوالکتریکی و گمانه های اکتشافی.

۴-۲. برداشت‌های ژئوالکتریکی در محدوده مورد مطالعه

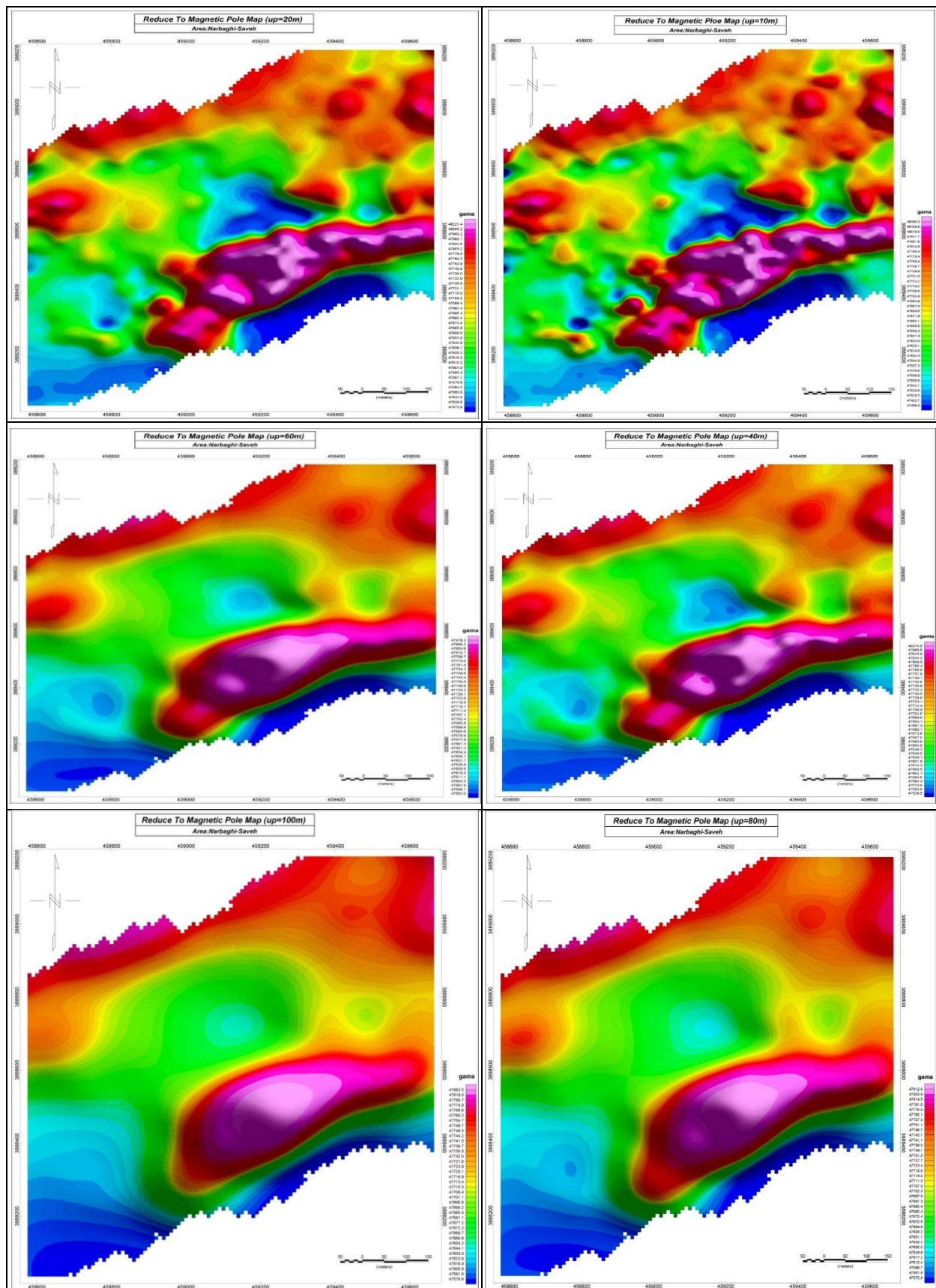
به منظور تکمیل عملیات اکتشاف ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی و شناسایی و اکتشاف ماده معدنی در عمق، برداشت‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه نیز در منطقه انجام شده است. برای این منظور مطابق شکل ۲ تعداد ۶ پروفیل با روند تقریبی شمالی-جنوبی برداشت شده و در ادامه با توجه به نتایج به دست آمده، یک پروفیل نیز با روند تقریبی شرقی-غربی عمود بر ۶ پروفیل قبلی برداشت گردیده که این پروفیل‌ها با نام‌های P1 تا P7 نامگذاری شده‌اند. همه برداشت‌های ژئوالکتریک با آرایه دوقطبی-دوقطبی با پرش ۲۰ متر و تا عمق تقریبی ۸۵ متر انجام شده و در مجموع ۸۰۰ ایستگاه، اندازه‌گیری شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که برداشت‌های ژئوالکتریکی و بیشتر گمانه‌های اکتشافی عمیق، در محدوده با مقدار شدت میدان مغناطیسی متوسط (که احتمالاً در ارتباط با زون‌های دگرسانی و در نتیجه کانی‌سازی می‌باشند)، متمرکز شده است. همچنین فقط تعدادی از گمانه‌ها بر روی پروفیل‌های ژئوالکتریک، منطبق بوده یا در نزدیکی آنها قرار دارند. بنابراین با وجود اطلاعات زمین‌شناسی و عیارسنجی مس در گمانه‌ها و نیز اطلاعات ژئوفیزیکی عمقی (بویژه ژئوالکتریک) در موقعیت این گمانه‌ها می‌توان به بررسی و انطباق نتایج مطالعات ژئوفیزیکی با واقعیت زمین (داده‌های عیارسنجی) پرداخت و میزان اعتبار آنها را ارزیابی نمود. در ادامه به عنوان نمونه مدل‌سازی و تفسیر شبه مقاطع منطبق بر پروفیل‌های P1 و P3 آورده شده است.

۴-۲-۱. مدل‌سازی داده‌های پروفیل P1

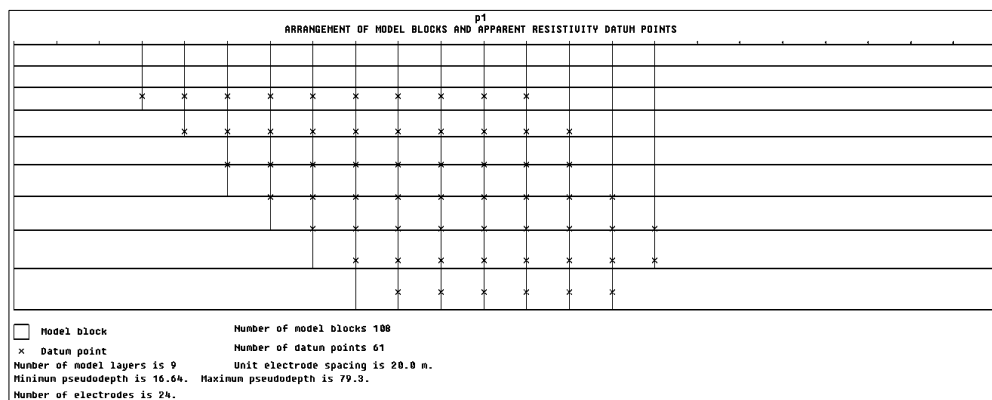
بر روی این پروفیل برداشت‌ها با فاصله الکترودی ۴۰ متر، پرش ۲۰ متر و تا ۷ پرش (n=7) ۴۰ متری برای الکترودهای پتانسیل انجام شده است. با ۱۰ پرش برای الکتروود جریان، جمعاً ۶۱ نقطه بر روی این پروفیل برای دو پارامتر مقاومت ویژه و قطبش القایی (در حوزه زمان) اندازه‌گیری شده است. مدل اولیه بلوک‌بندی داده‌های پروفیل P1 در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۵ مقاطع وارون‌سازی شده (الف)

مقاومت ویژه و (ب) بارپذیری را برای پروفیل P1 با تاثیر توپوگرافی نشان می‌دهد. بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل که انتهای جنوبی آن، جاده دسترسی به محدوده را قطع می‌کند و از سنگ دیوریتی با رنگ تیره نیز عبور کرده می‌توان به چند گسستگی یا کتکت (مشخص شده با علامت خط‌چین بر روی شکل) در ایستگاه‌های ۴۰، ۱۰۰ و ۲۱۰ اشاره کرد. مقدار مقاومت ویژه از ایستگاه ۲۴۰ به سمت شمال بالا رفته و همچنین بین ایستگاه ۱۰۰ تا ۲۰۰ بجز بخش کوچکی بین ایستگاه ۱۲۰ تا ۱۴۰، بطور کلی کم شده و با رنگ آبی تا عمق ۴۰ متری به خوبی مشخص است. زیر این بخش و در سمت جنوب نیز مقاومت، کمی افزایش می‌یابد. با نگاهی به مدل بارپذیری می‌توان توده‌ای با شدت پلاریته بالا بین ایستگاه ۱۶۰ تا ۲۰۰ جدا نمود که در عمق، تا حدود ۶۰ متر و به سمت شمال تا حدود ایستگاه ۲۴۰ کشیده شده است. در جنوب پروفیل بین ایستگاه ۴۰ تا ۶۰ در حاشیه شمالی توده دیوریتی، کمی پلاریته بالا رفته است. با مقایسه دو مقطع مقاومت ویژه و بارپذیری مشاهده می‌شود که در حاشیه بخش با مقاومت کم، توده با پلاریته بالا وجود دارد که این نشان دهنده حضور توده‌های سولفیدی در حاشیه دگرسانی است. کانی‌سازی بطور پراکنده از حاشیه شمال توده دیوریتی با رنگ تیره در جنوب شروع شده و تا ارتفاعات شمالی ادامه داشته است. بدین ترتیب بایستی بر روی این پروفیل، بررسی سطحی از ایستگاه ۱۰۰ تا ۱۲۰ بطور دقیق صورت گیرد.

در شکل ۶ مقطع حساسیت (Sensitivity) عمقی نسبی بلوک‌های مدل مقاومت ویژه پروفیل P1 همراه با مقطع مقاومت ویژه بعد از مدل‌سازی وارون هموار توسط نرم افزار Res2dinv نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که مطابق انتظار، بیشترین حساسیت را بلوک‌های نزدیک سطحی (لایه اول) دارا هستند.



شکل ۳. نقشه گسترش به سمت بالا تا ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متر.



شکل ۴. مدل اولیه بلوک‌بندی شده پروفیل P1 توسط نرم‌افزار Res2dinv.

عبارت دیگر منشأ کانی‌سازی فلزی را از غیرفلزی جدا می‌سازد، مثلاً کانی‌سازی سولفوری را از گرافیت و شیل مجزا می‌کند. فاکتور فلزی که با علامت اختصاری MF نشان داده می‌شود، برای قطبش القایی در حوزه زمان با استفاده از رابطه (۱) و در حوزه فرکانس از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Metal_factor_MF):

$$MF = \frac{M \times 2000}{\rho} \quad (1)$$

$$MF = \frac{PFE \times 2000}{\rho} \quad (2)$$

که در این روابط M مقدار بارپذیری در حوزه زمان، ρ مقدار مقاومت ویژه ظاهری و PFE درصد اثر فرکانس (مقدار بارپذیری ظاهری در حوزه فرکانس) می‌باشد. شکل ۹ مقطع فاکتور فلزی منطبق بر پروفیل P1 را پس از مدل‌سازی وارون هموار داده‌ها نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار فاکتور فلزی در دو محدوده مجزا نسبتاً بالاست: یکی در ایستگاه ۱۱۰ در نزدیکی سطح زمین و در عمق تقریبی ۸ متر و دیگری در بین ایستگاه ۱۵۰ تا ۱۹۰ در عمق تقریبی ۲۳ متر. بنابراین حفر یک چال قائم تا عمق بیشینه ۱۰ متر در موقعیت ایستگاه ۱۱۰ و حفر یک گمانه قائم تا عمق ۵۰ متر در ایستگاه ۱۷۰ مناسب‌ترین موقعیت پیشنهادی حفاری می‌باشند.

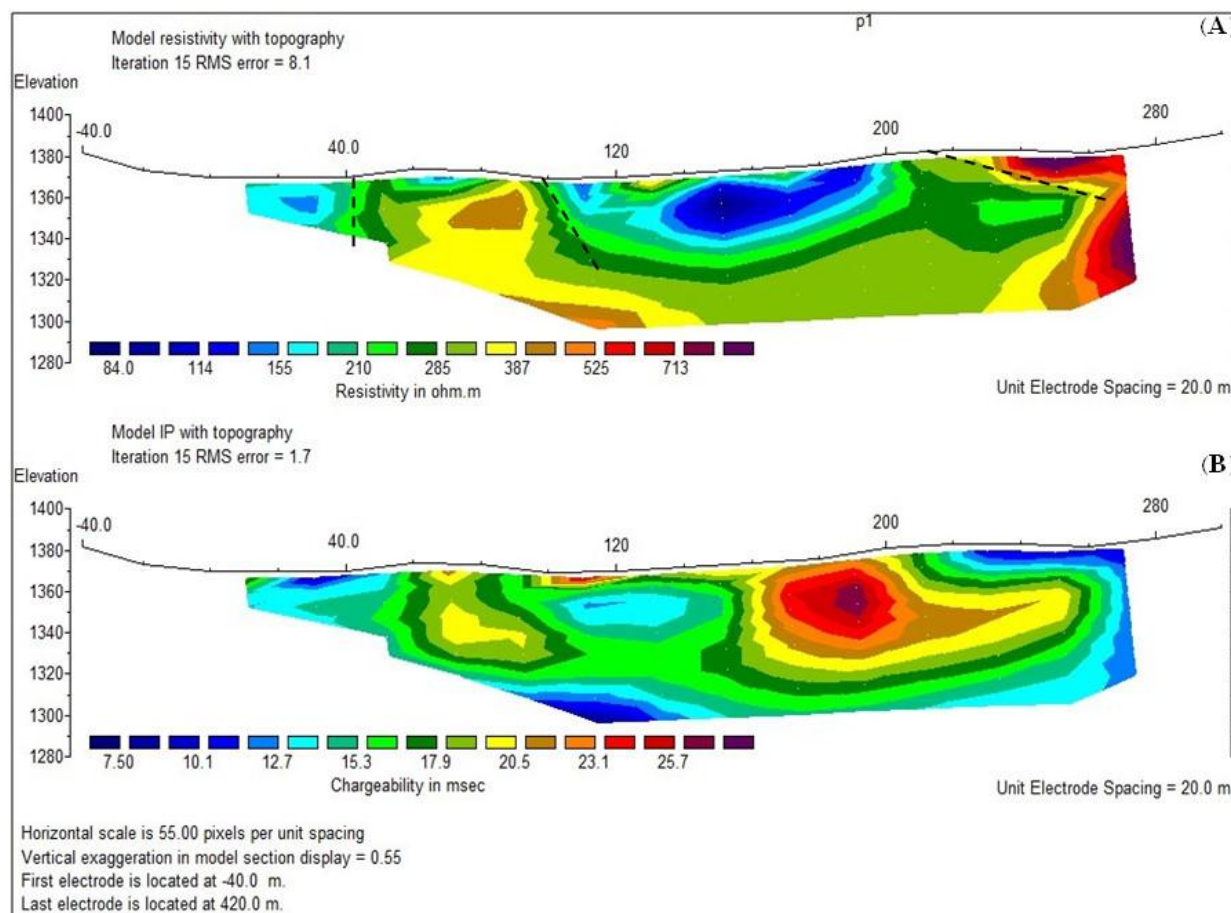
شکل ۷ نمودار درصد عدم قطعیت (Uncertainty) مدل بلوکی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل P1 را همراه با مقطع مقاومت ویژه بعد از مدل‌سازی وارون هموار توسط نرم‌افزار Res2dinv نشان می‌دهد. با توجه به این شکل بیشترین عدم قطعیت به بلوک‌های لایه آخر (لایه پنجم و ششم) تعلق دارد. در شکل ۸ نمودار فراوانی آماری میزان خطای RMS مربوط به محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری بلوک‌های مختلف، برای پروفیل P1 نشان داده شده است. مطابق این شکل بیشترین تکرار (فراوانی) خطا با تعداد ۱۸ نقطه مربوط به عدد صفر است. با توجه به این نکته و نگاه کلی به سایر مقادیر خطا و فراوانی آنها می‌توان عملکرد مدل‌سازی وارون برای داده‌های این شبه مقطع را قابل قبول ارزیابی نمود.

در اکتشاف کانسارهای فلزی، قطبش فلزی از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً به هنگام اندازه‌گیری نمی‌توان اثر قطبش غشایی را از فلزی تشخیص داد؛ در نتیجه قطبش غشایی در اندازه‌گیری‌های قطبش القایی برای اکتشاف کانسارهای فلزی هادی، نوفه محسوب می‌شود. برای رفع این مشکل در شناسایی محدوده‌های مرتبط با ماده معدنی در شبه مقاطع، از فاکتور فلزی (Metal Factor) استفاده می‌شود که در واقع ترکیبی از شبه مقاطع بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری است. فاکتور فلزی یک پارامتر کیفی است که تا حدودی قطبش فلزی را از قطبش غیرفلزی جدا می‌کند و به

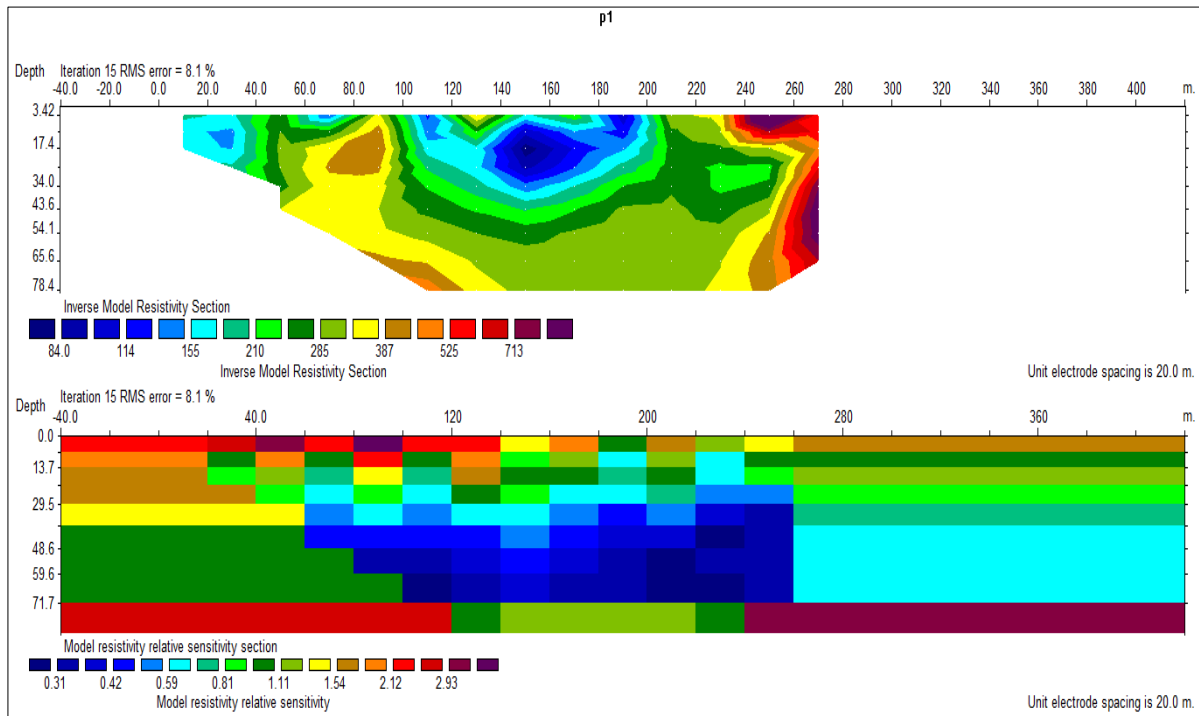
۴-۲-۲. مدل‌سازی داده‌های پروفیل P3

بر روی این پروفیل برداشت‌ها با فاصله الکترودی ۴۰ متر، پرش ۲۰ متر و تا ۷ پرش ۴۰ متری برای الکترودهای پتانسیل انجام شده است. با ۱۰ پرش برای الکتروود جریان، جمعاً ۴۸ نقطه بر روی این پروفیل برای دو پارامتر مقاومت ویژه و قطبش القایی اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۰ مقاطع مدلسازی وارون شده (الف) مقاومت ویژه و (ب) بارپذیری منطق بر پروفیل P3 را با تاثیر توپوگرافی نشان می‌دهد. مدل مقاومت ویژه این پروفیل از ایستگاه صفر به سمت جنوب به

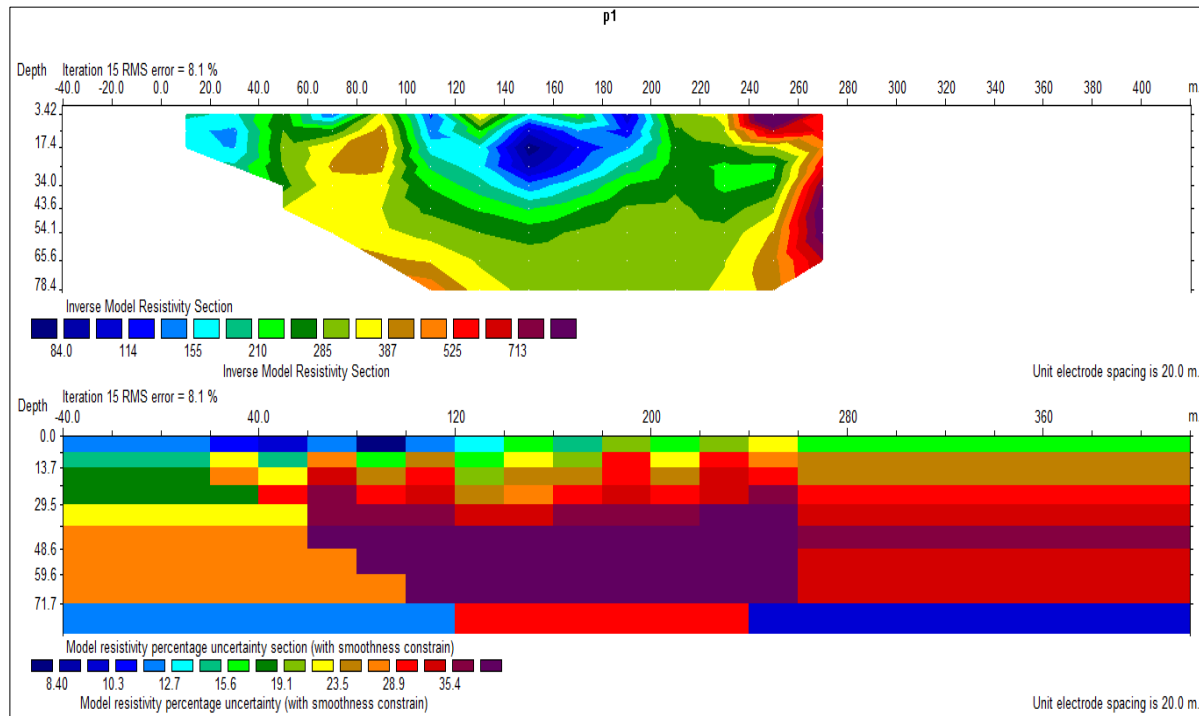
بخش سنگی از جنس کوارتز مونوزودیوریت منتهی می‌شود که به نظر به سمت شمال تا عمق کشیده شده است. در سمت شمال از حدود ایستگاه ۱۶۰ به سمت شمال، مقاومت ویژه بالا رفته و پلاریته کم شده است. بر روی مدل قطبش القایی در زیر ایستگاه ۱۴۰ بین ۱۲۰ تا ۱۶۰ یک بخش با پلاریته بالا دیده می‌شود. در زیر ایستگاه ۲۰ تا ۶۰ در عمق ۲۰ متری نیز یک توده با پلاریته بالا ثبت شده است. موقعیت چند ناپیوستگی احتمالی نیز با علامت خط چین بر روی شکل نشان داده شده‌اند.



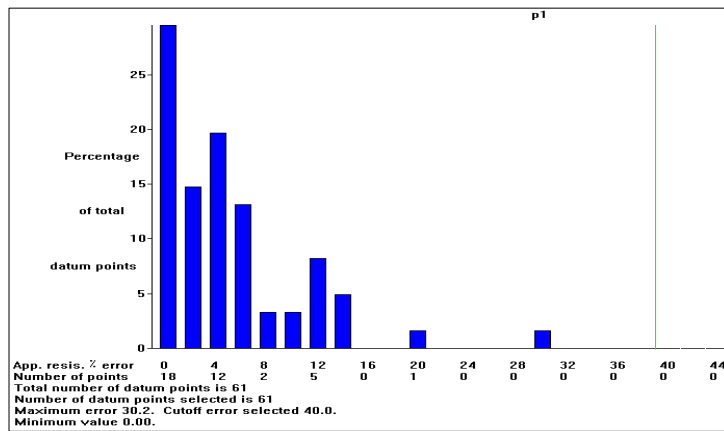
شکل ۵. مقاطع (الف) مقاومت ویژه و (ب) بارپذیری داده‌های پروفیل P1 بعد از مدلسازی وارون هموار.



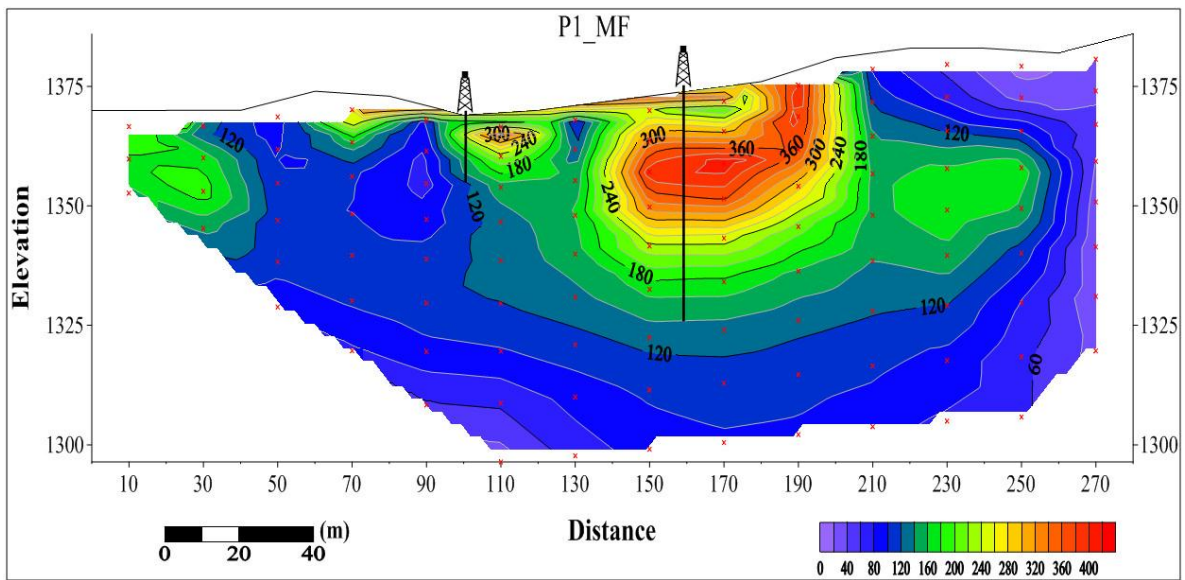
شکل ۶. حساسیت نسبی بلوک های مدل مقاومت ویژه پروفیل P1 (قسمت پایین).



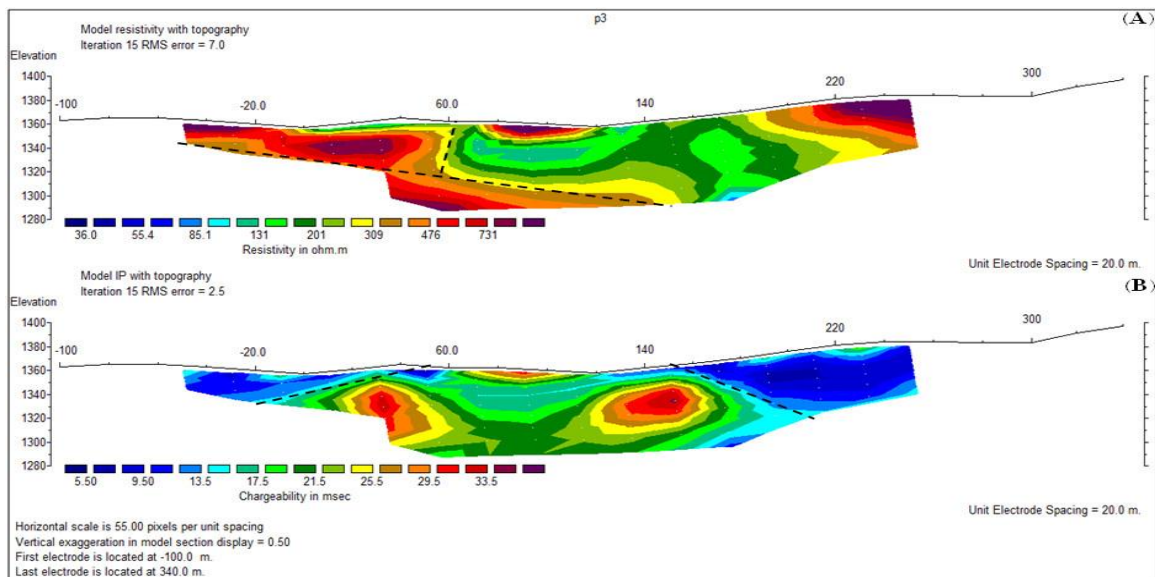
شکل ۷. مقطع درصد عدم قطعیت بلوک های مدل مقاومت ویژه پروفیل P1 (قسمت پایین).



شکل ۸. خطای مجذور میانگین مربعات (RMS) در محاسبه مقاومت ویژه ظاهری بلوک‌های مختلف پروفیل P1.



شکل ۹. مقطع فاکتور فلزی داده‌های پروفیل P1 بعد از مدل‌سازی وارون هموار.



شکل ۱۰. مقاطع (A) مقاومت ویژه و (B) بارپذیری داده‌های پروفیل P3 بعد از مدل‌سازی وارون هموار.

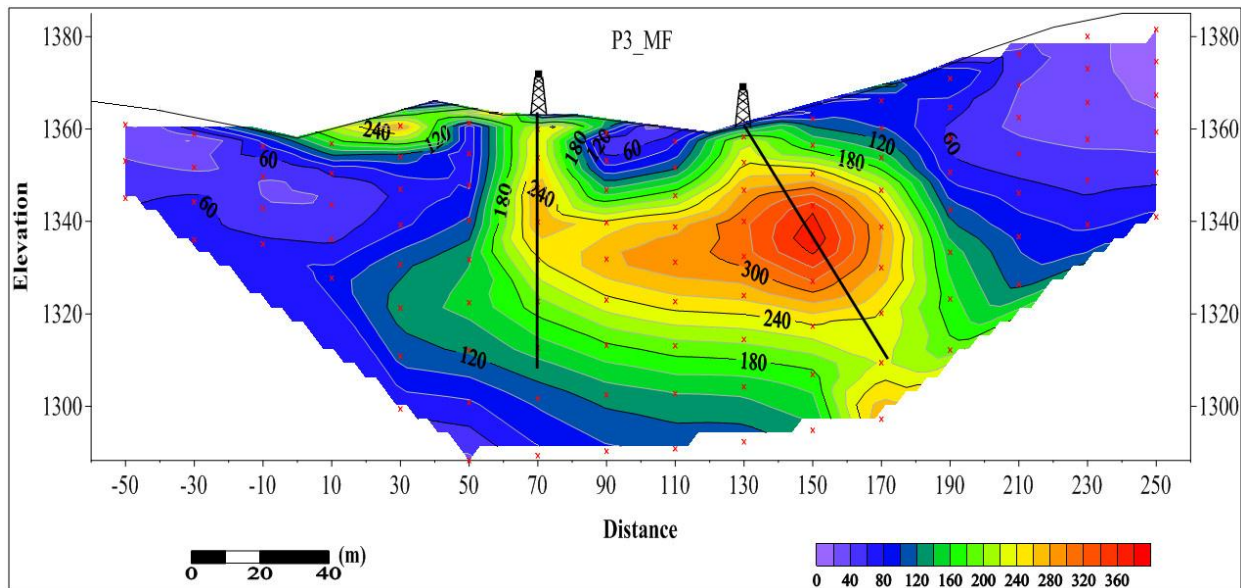
۱۰، ۲۵، ۴۳ و ۷۸ متری، نقشه جداگانه هر کدام از ویژگی‌ها در یک شکل به صورت یکجا ترسیم شده تا بررسی تغییرات هر ویژگی در عمق‌های مختلف بهتر و راحت‌تر انجام گیرد. برای دید بهتر، تمامی نقشه‌ها بصورت سه بعدی با زاویه چرخش (Rotation) ۴۵ درجه و زاویه تیلت (Tilt) ۳۰ درجه ترسیم شده‌اند. در شکل ۱۲ نقشه تغییرات مقاومت ویژه کل منطقه مورد مطالعه در عمق‌های مختلف ترسیم شده است. مطابق این شکل در محدوده با مختصات تقریبی ۴۵۹۲۰۰ شرقی و ۳۸۸۸۱۰۰ شمالی در عمق ۱۰ متری، مقاومت ویژه بالاست ولی با افزایش عمق، مقدار آن کمتر و کمتر می‌شود تا به زیر ۲۵۰ اهم‌متر می‌رسد. محدوده با مختصات تقریبی ۴۵۸۹۰۰ شرقی و ۳۸۸۸۷۰۰ شمالی که مقاومت ویژه پایینی در عمق ۱۰ متر دارد، با افزایش عمق شدت آن بیشتر می‌شود. بگونه‌ای که در عمق ۷۸ متر به بالای ۸۵۰ اهم‌متر می‌رسد. همچنین در محدوده با مختصات تقریبی ۴۵۹۴۵۰ شرقی و ۳۸۸۸۷۰۰ شمالی که در عمق ۱۰ متر مقاومت ویژه پایین است، با افزایش عمق مقدار آن کمی بیشتر می‌شود تا در عمق ۷۸ متری به حدود ۴۵۰ اهم‌متر می‌رسد. در شکل ۱۳ نقشه تغییرات بارپذیری کل منطقه مورد مطالعه در عمق‌های مختلف ترسیم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود محدوده با مختصات تقریبی بین ۴۵۹۱۵۰ تا ۴۵۹۳۵۰ شرقی و ۳۸۸۸۶۰۰ شمالی در عمق ۱۰ متری بارپذیری بالایی دارد اما با افزایش عمق از شدت آن کاسته شده بطوری‌که مقدار آن به زیر ۱۶ میلی‌ولت ثانیه بر ولت می‌رسد و یا محدوده با مختصات تقریبی ۴۵۹۱۰۰ شرقی و ۳۸۸۸۱۰۰ شمالی که بارپذیری پایینی در عمق ۱۰ متر دارد، با افزایش عمق، مقدار آن بیشتر می‌شود چنانکه در عمق ۷۸ متری بالاتر از ۲۸ میلی‌ولت ثانیه بر ولت می‌شود.

شکل ۱۴ نقشه تغییرات فاکتور فلزی منطقه مورد مطالعه را در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. قابل ملاحظه است که محدوده با مختصات تقریبی ۴۵۹۴۵۰ شرقی و ۳۸۸۸۷۰۰ شمالی در عمق ۱۰ متری بیشترین مقدار فاکتور فلزی را دارد.

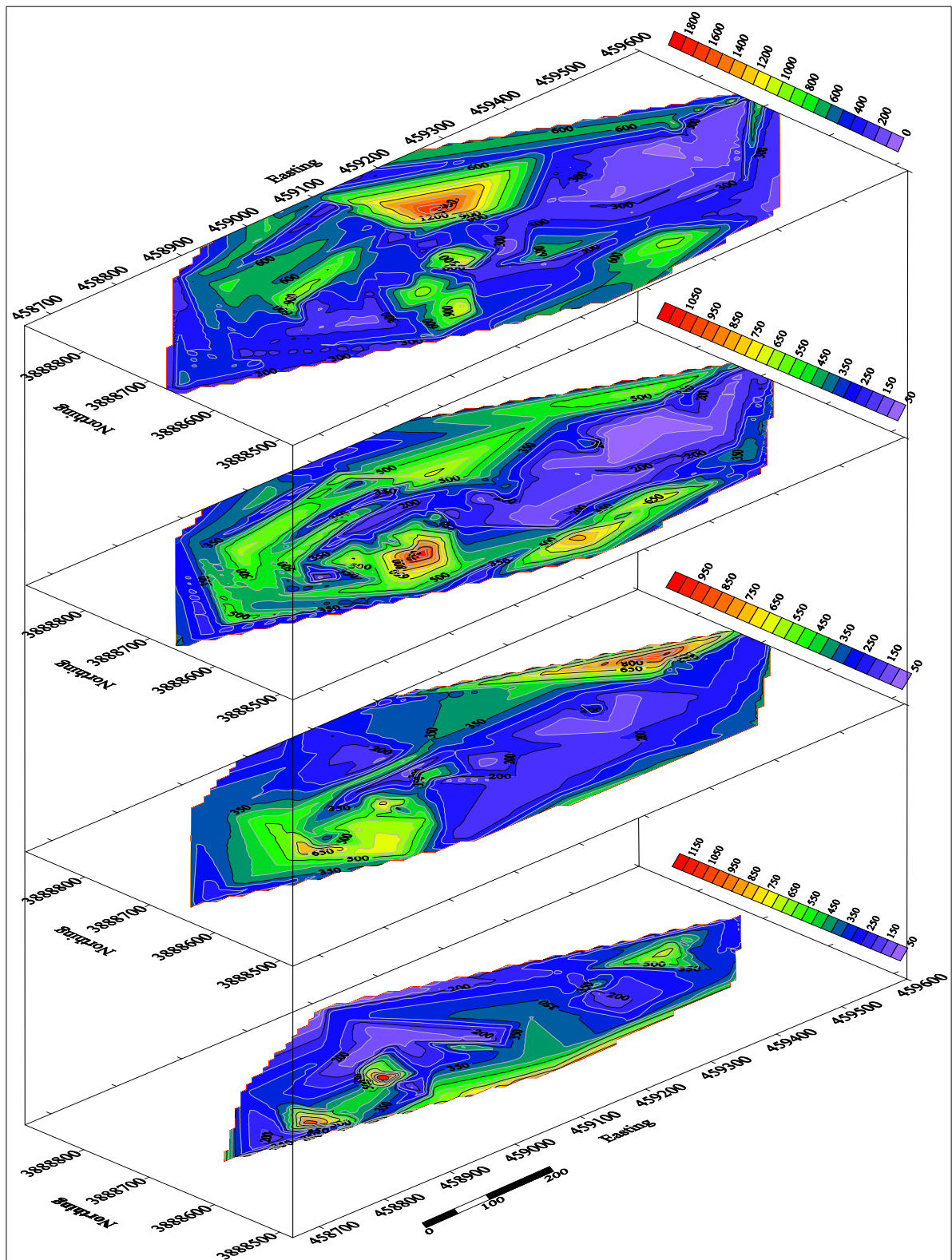
در موقعیت هر دوی این بی‌هنجاری‌ها، بی‌هنجاری مغناطیسی نیز وجود دارد اما اولی در حاشیه شمالی توده کوارتز مونزونیت و دومی در حاشیه یک بخش کم مقاومت احتمالاً دگرسان شده، واقع شده است. مشابه این حالت در پروفیل P1 نیز دیده می‌شود. اختلاف دیگر این دو توده در تفاوت بین مقاومت آنهاست که توده جنوبی مقاومت بالاتری نسبت به توده مرکزی دارد؛ به عبارتی ممکن است توده جنوبی سیلیسی بوده در حالی که توده واقع در حاشیه دگرسانی، مقاومت کمی داشته و احتمالاً در زون گسله قرار دارد. مقطع فاکتور فلزی منطبق بر پروفیل P3 در شکل ۱۱ ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار فاکتور فلزی در ایستگاه ۳۰ نزدیک به سطح و در ایستگاه ۷۰ با عمق تقریبی ۲۵ متر نسبتاً بالاست و در بین ایستگاه ۱۲۰ تا ۱۷۰ در عمق تقریبی ۴۰ متر، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بنابراین مناسب‌ترین موقعیت‌های پیشنهادی حفاری، حفر یک گمانه قائم تا عمق ۵۰ متر در موقعیت ایستگاه ۷۰ و حفر یک گمانه مایل با شیب ۵۰ درجه در راستای پروفیل، در موقعیت ایستگاه ۱۳۰ تا عمق ۶۵ متری می‌باشد. ۴-۲-۴. بررسی‌های ژئوالکتریکی عمقی منطقه وضعیت تغییرات عمقی مقاومت ویژه و بارپذیری در کل منطقه مورد مطالعه نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از داده‌های خروجی نرم‌افزار Res2dinv بعد از انجام مدل‌سازی وارون هموار شبه مقاطع ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و بارپذیری هفت پروفیل، استفاده شد. بگونه‌ای که داده‌های وارون سازی شده تمام مقاطع در عمق‌های یکسان، تفکیک شده و بصورت نقشه‌های پربندی عمقی مربوط به اعماق مختلف درآمدند. این کار برای بررسی‌های بهتر بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه، بارپذیری و فاکتور فلزی است. با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان ویژگی‌های فیزیکی ژئوالکتریکی منطقه در اعماق مختلف را بصورت یکجا مشاهده و تجزیه و تحلیل نمود. بررسی‌ها برای داده‌های چهار عمق ۱۰، ۲۵، ۴۳ و ۷۸ متری انجام شد. با استفاده از داده‌های کل منطقه مورد مطالعه برای عمق‌های

با مختصات ۴۵۹۱۰۰ شرقی و ۳۸۸۸۸۰۰ شمالی در عمق‌های کم، فاکتور فلزی ضعیفی را نشان می‌دهد اما در اعماق، شدت آن بیشتر می‌شود و احتمال وجود کانی فلزی در این محدوده افزایش می‌یابد.

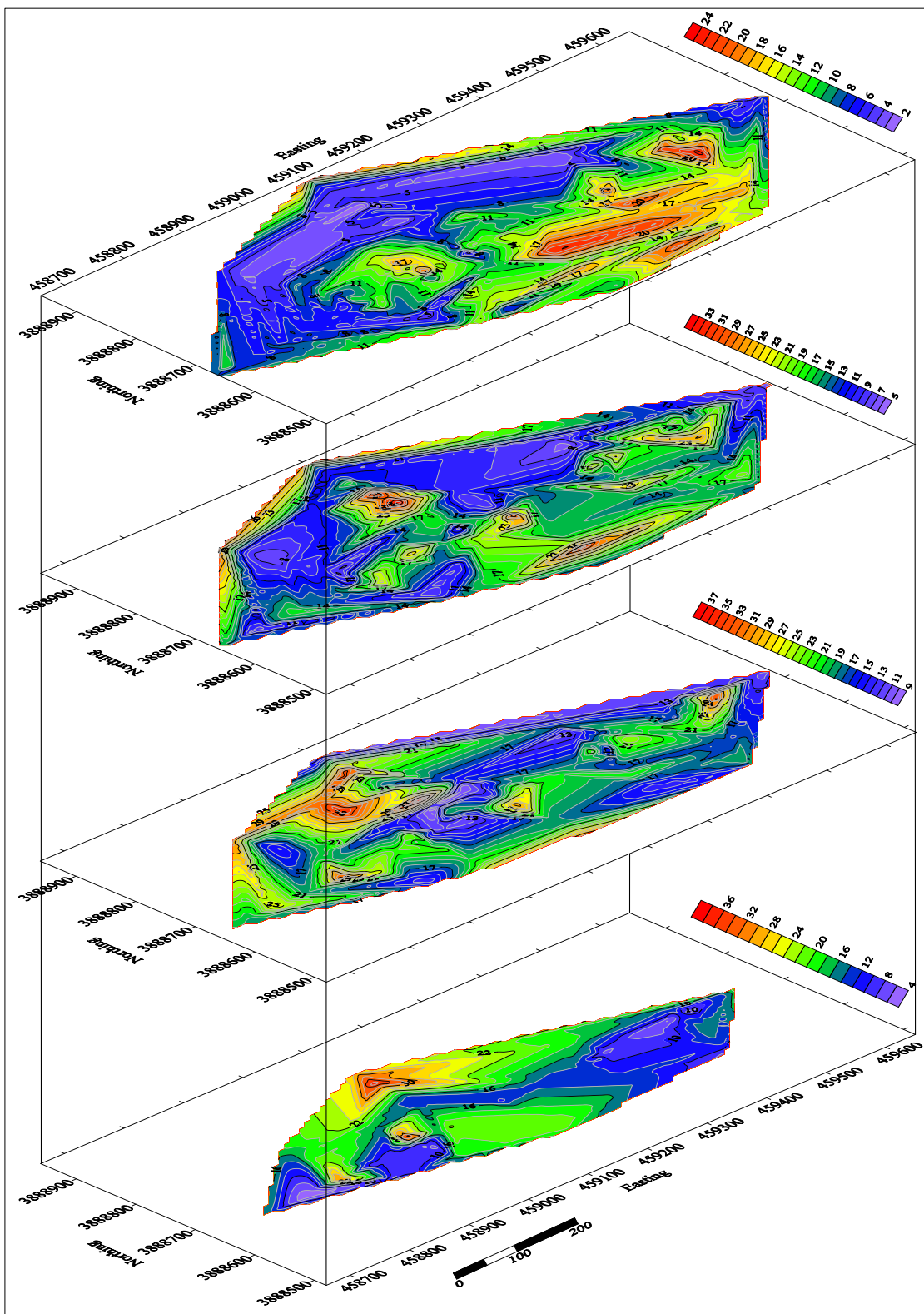
در عمق‌های ۲۵ و ۴۳ متری نیز این حداکثری وجود دارد اما در عمق ۷۸ متری اثر آن محو می‌شود. در عمق ۴۳ متری چندین محدوده با فاکتور فلزی بالا وجود دارد که در عمق‌های قبل و بعد، چندان اثری از آنها دیده نمی‌شود. محدوده



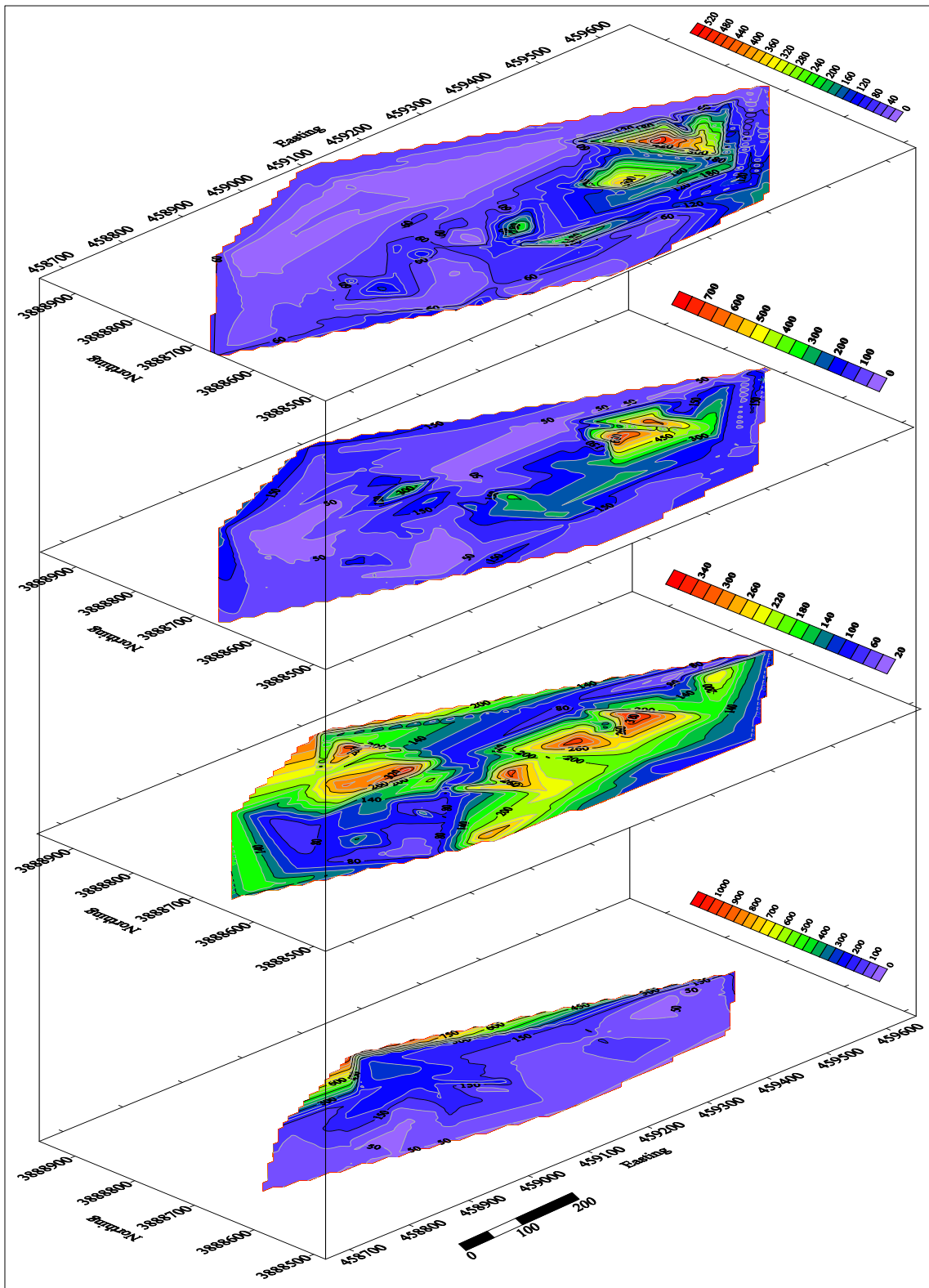
شکل ۱۱. مقطع فاکتور فلزی داده‌های پروفیل P3 بعد از مدل‌سازی وارون هموار.



شکل ۱۲. نقشه تغییرات مقاومت ویژه (برحسب اهم‌متر) عمق‌های ۱۰، ۲۵، ۴۳ و ۷۸ متری (به ترتیب از بالا به پایین) در منطقه مورد مطالعه.



شکل ۱۳. نقشه تغییرات بارپذیری (برحسب میلی ثانیه) عمق های ۱۰، ۲۵، ۴۳ و ۷۸ متری (به ترتیب از بالا به پایین) در منطقه مورد مطالعه.



شکل ۱۴. نقشه تغییرات فاکتور فلزی (برحسب عکس اهم‌متر) عمق‌های ۱۰، ۲۵، ۴۳ و ۷۸ متری (به ترتیب از بالا به پایین) در منطقه مورد مطالعه.

۴-۲-۵. مدل شبه سه بعدی ویژگی های ژئوالکتریک منطقه

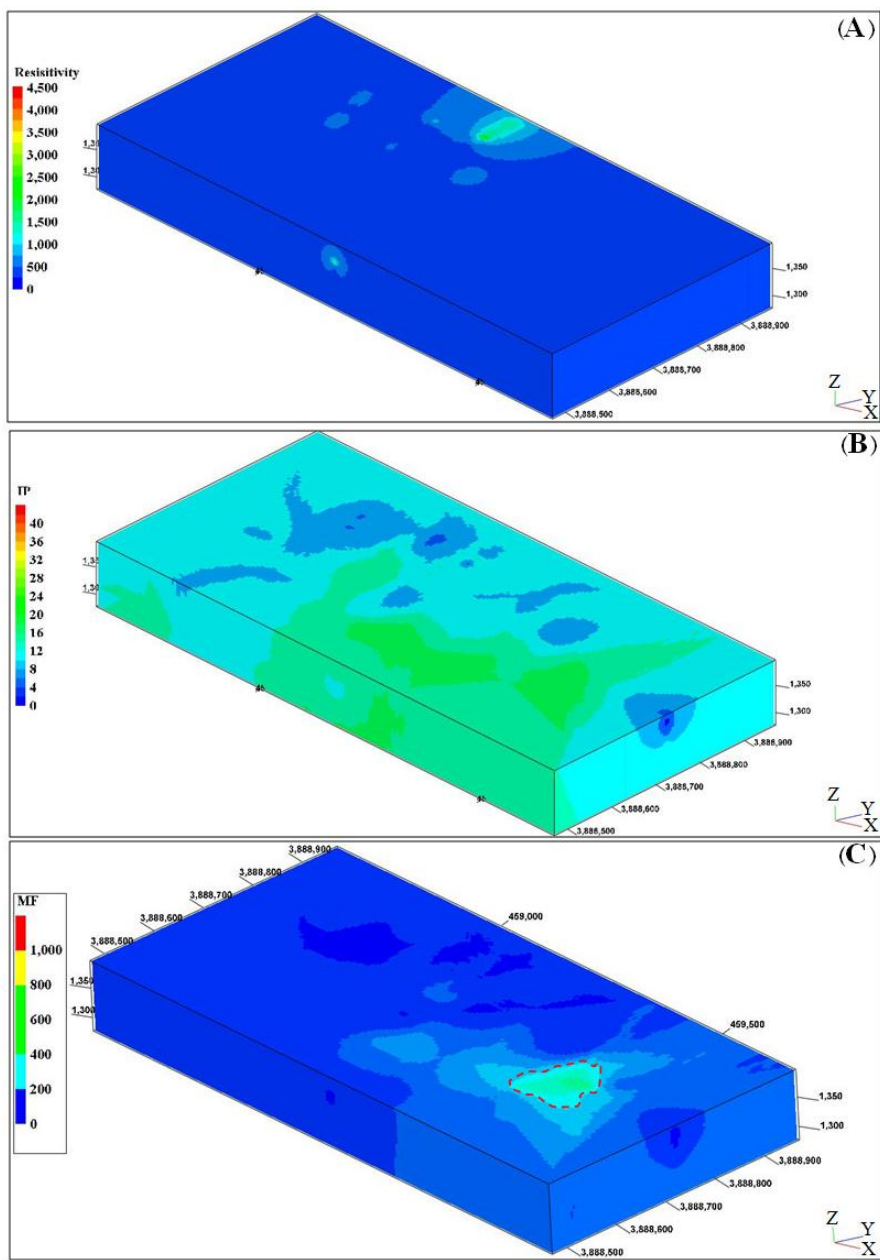
در شکل ۱۵ مدل شبه سه بعدی (Solid model) تغییرات (الف) مقاومت ویژه، (ب) بارپذیری و (ج) فاکتور فلزی محدوده کانسار مس نارباغی شمالی بعد از مدل سازی وارون هموار، با استفاده از الگوریتم عکس مجذور فاصله وزن دار پیشرفته ((Advanced inverse distance weighted (IDW)) در نرم افزار Rockworks ترسیم شده است. در این الگوریتم امکان وزندهی فاصله با توان متفاوت در جهات مختلف وجود دارد. مطابق شکل (الف) میزان مقاومت ویژه در اغلب نقاط محدوده مورد مطالعه کمتر از ۵۰۰ اهم متر است. در شمالی ترین بخش مرکزی نیمه شمالی محدوده و در محدوده کوچکی در جنوبی ترین بخش مرکزی نیمه جنوبی منطقه، مقاومت ویژه، بسیار بالا و بیش از ۱۲۵۰ اهم متر است. زیاد بودن مقاومت ویژه در ارتباط با حضور کانی ها و سنگ های غیر هادی همانند سیلیس و محیط های عایق است که در آنها هیچ گونه ماده معدنی فلزی هادی وجود نخواهد داشت. بطور کلی کاهش زیاد مقاومت ویژه ناشی از حضور محدوده های دگرسانی، لایه ها، عدسی ها و پاکت های رسی دانه ریز مرطوب، سفره های آب زیرزمینی و نیز توده های کانساری سولفیدی فلزی هادی (همانند پیریت، کالکوپیریت، سولفیدهای مس و غیره) می باشد. با توجه به شکل (ب) مشاهده می شود که مقدار بارپذیری تقریباً در یک سوم کل سطح محدوده مورد مطالعه، بیش از ۱۸ میلی ولت ثانیه بر ولت است. عمده محدوده های دارای بارپذیری زیاد منطقه، در بخش جنوبی نیمه شرقی محدوده و در یک محدوده کوچک در بخش جنوب غربی محدوده واقعند که تا اعماق نیز گسترش دارند. افزایش بارپذیری می تواند ناشی از حضور توده های فلزی هادی و یا لایه ها و توده های رسی مرطوب باشد. بنابراین با توجه به این شکل احتمال حضور توده های کانساری فلزی هادی از نوع مس در بخش جنوبی نیمه شرقی محدوده زیاد است.

با توجه به شکل (ج) مشاهده می شود که مقدار فاکتور فلزی تنها در بخش مرکزی نیمه شرقی محدوده مورد مطالعه، نسبتاً

بالا بوده و بیش از ۲۰۰ موهو بر متر است که ظاهراً تا اعماق زیادی گسترش ندارد. بنابراین براساس مدل شکل (ج) به منظور شناسایی وضعیت ماده معدنی و نحوه کانه زایی در منطقه، بررسی وضعیت سطحی دقیق در بخش مرکزی نیمه شرقی محدوده و نیز انجام عملیات حفاری قائم در موقعیت با طول جغرافیایی ۴۵۹۴۰۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۷۵۰ شمالی (مرکز محدوده مشخص شده با خط چین قرمز رنگ در شکل ۱۵ ج) تا عمق ۸۰ متر، پیشنهاد می شود. گفتنی است که در این شکل ها جهت شمال، در راستای محور عرض ها (Y) می باشد.

۴-۲-۶. اعتبارسنجی عملیات ژئوالکتریک با داده های عیارسنجی

شکل ۱۶ مقطع ماده معدنی منطبق بر پروفیل ژئوفیزیکی P3، ترسیم شده با استفاده از داده های عیارسنجی چهار گمانه حفاری شده NNB9، NNB16، NNB17 و NNB13 را نشان می دهد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که ماده معدنی در موقعیت با عرض جغرافیایی ۳۸۸۷۴۴ شمالی (منطبق بر ایستگاه ۲۲۰ ژئوفیزیک) در فاصله عمقی حدود ۵۰ تا ۶۵ متری و در موقعیت با عرض جغرافیایی ۳۸۸۷۷۴ شمالی (منطبق بر ایستگاه ۲۵۰ ژئوفیزیک) در اعماق حدودی ۲۰ و ۶۰ متری، از عیار بالاتری برخوردار است. حال آنکه براساس مطالعات ژئوفیزیکی و تفسیر مقاطع مدل سازی شده، مناسب ترین موقعیت های پیشنهادی حفاری، حفر یک گمانه قائم تا عمق ۵۰ متر در موقعیت ایستگاه ۷۰ (عرض جغرافیایی ۳۸۸۵۹۴ شمالی) و حفر یک گمانه مایل با شیب ۵۰ درجه در راستای پروفیل، در موقعیت ایستگاه ۱۳۰ (عرض جغرافیایی ۳۸۸۶۵۴ شمالی) تا عمق ۶۵ متری می باشد. به عبارت دیگر هیچ یک از حفاری های انجام شده در راستای این پروفیل، براساس نتایج عملیات ژئوفیزیکی نیستند. همچنین با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می شود که حفر گمانه های عمیق NNB9 و NNB16 بدون هیچ گونه منطبق، هدف و طراحی درستی صورت گرفته و فاقد ماده معدنی می باشند.

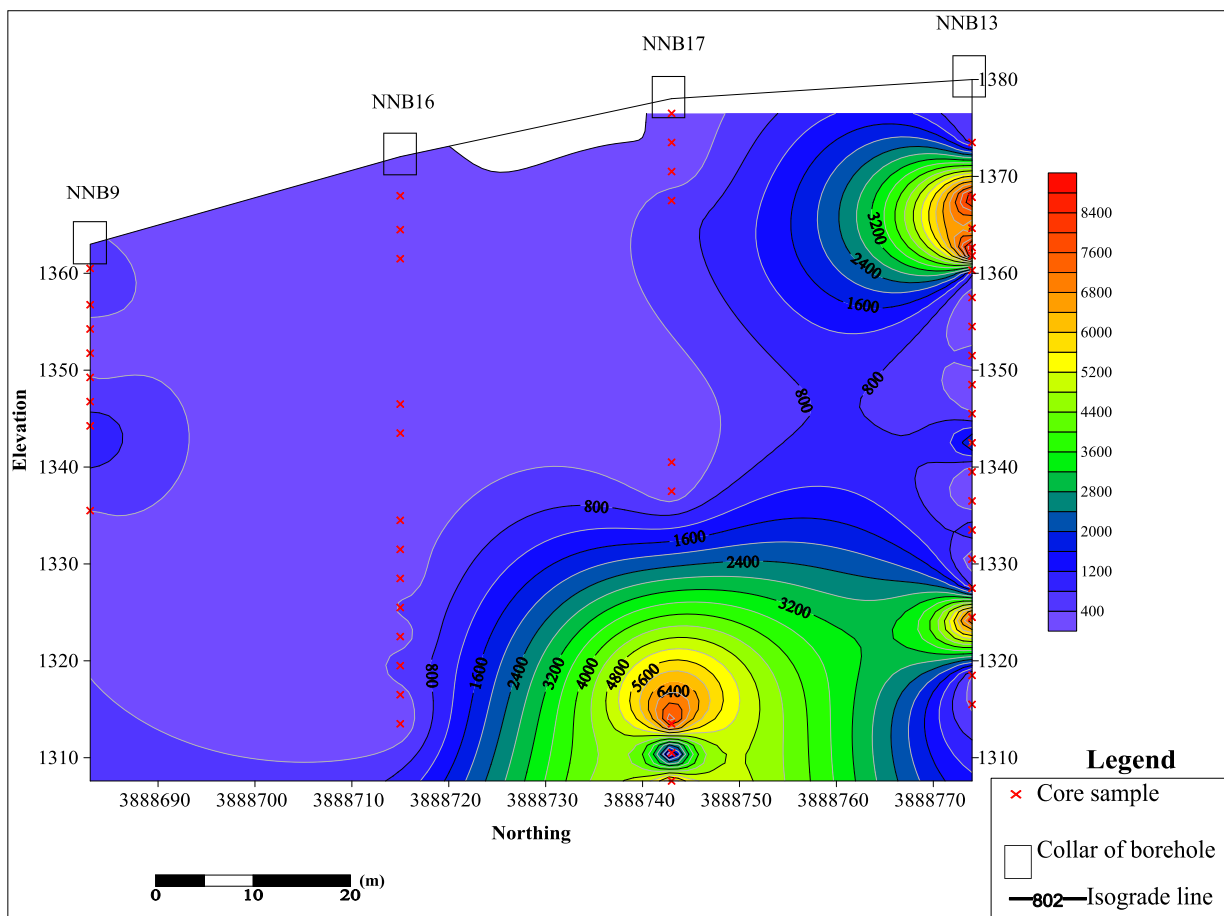


شکل ۱۵. مدل شبه سه‌بعدی (جامد) تغییرات (A) مقاومت ویژه، (B) بارپذیری و (C) فاکتور فلزی بعد از مدل‌سازی وارون هموار در محدوده کانسار مس نارباغی شمالی (جهت شمال در راستای محور Y).

روی هر پروفیل دست کم یک موقعیت مناسب حفاری، پیشنهاد شده است.

به منظور ارزیابی نتایج عملیات برداشت ژئوفیزیکی از طریق میزان تطابق کیفی آنها با داده های عیارسنجی عملیات حفاری، چاه نگار (Strip Log) تعدادی از مهم ترین گمانه های حفاری شده منطبق بر پروفیل های ژئوالکتریک، بطور مجزا نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

بر روی پروفیل ژئوفیزیکی P7 نیز پنج گمانه NNB2، NNB7، NNB9، NNB16 و NNB19 حفاری شده است ولی حفر هیچ یک از گمانه های عمیق مذکور، براساس نتایج عملیات ژئوفیزیک و بصورت هدف مند صورت نگرفته و اغلب گمانه های مذکور حتی با یک متر ماده معدنی نیز برخورد ندارند. گفتنی است که بر روی بعضی از پروفیل های ژئوفیزیکی دیگر، هیچ گمانه ای حفاری نشده است؛ حال آنکه براساس تفسیر مقاطع ژئوفیزیکی مدل سازی شده آنها، بر

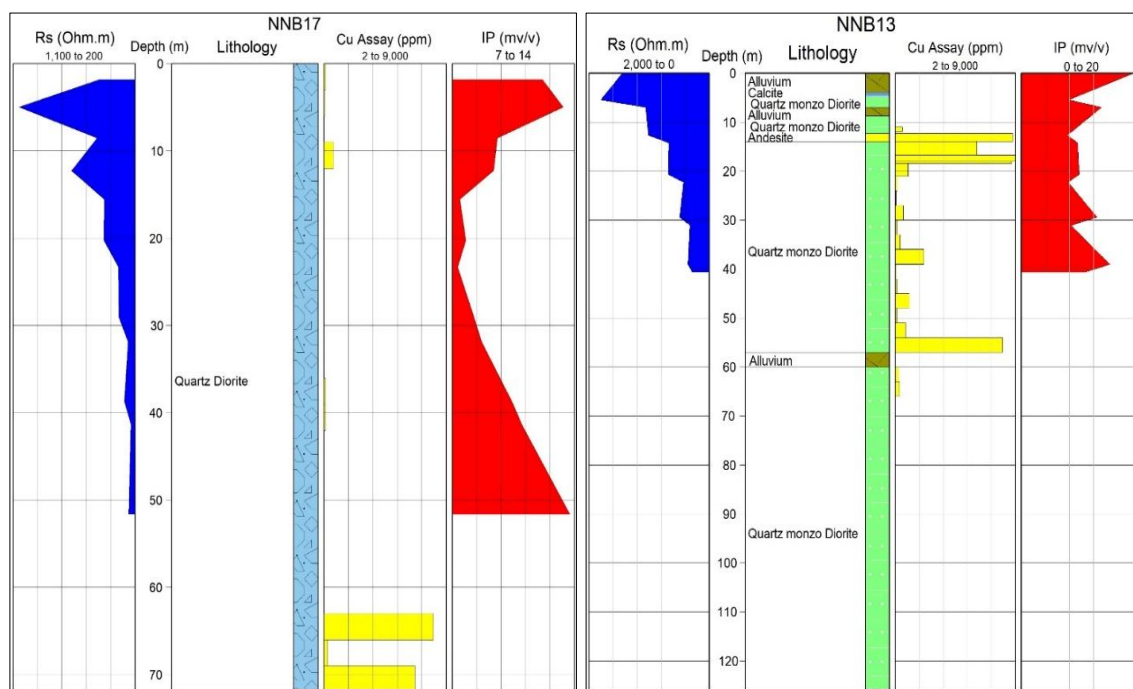


شکل ۱۶. نقشه هم عیار گمانه های حفر شده منطبق بر پروفیل ژئوفیزیکی P3 در منطقه نارباغی شمالی.

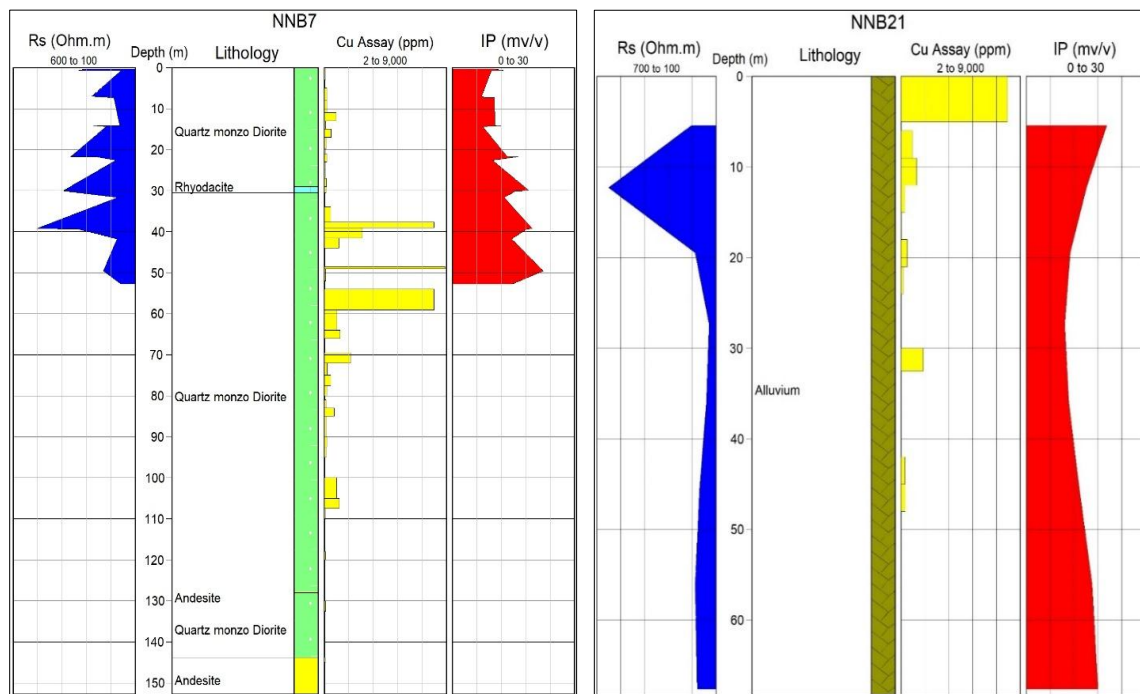
نتیجه انطباق خوبی بین داده‌های عیارسنجی و ژئوالکتریک وجود ندارد. در بخش‌های عمقی این گمانه، عیار ماده معدنی بالاست ولی در این اعماق اطلاعاتی از مقادیر IP و Rs موجود نیست.

در گمانه NNB21 ضخامت آبرفت بسیار زیاد است. در این گمانه از عمق ۵ تا ۷۰ متری (انتهای گمانه) مقدار Rs نسبتاً پایین و مقدار IP بالاست حال آنکه در این بازه عمقی، عیار ماده معدنی چندان مطلوب نیست که احتمالاً این امر در ارتباط با جنس سنگ (لیتولوژی) این گمانه می‌باشد؛ به عبارت دیگر در این مورد تطابق کیفی چندان بین داده‌های عیارسنجی و ژئوالکتریک وجود ندارد. در گمانه NNB7 تا عمق ۵۲ متری که اطلاعات IP و Rs در دست می‌باشد، تطابق کیفی پایینی بین داده‌های عیارسنجی و ژئوالکتریک وجود دارد. در اعماق بیشتر (بازه عمقی ۵۴ تا ۱۰۸ متری) عیار ماده معدنی قدری افزایش می‌یابد ولی داده‌های ژئوالکتریک در دسترس نمی‌باشند. در این گمانه ماده معدنی عمدتاً در سنگ از جنس کوارتزموزنودپوریتی تشکیل شده است.

برای این منظور چهار گمانه NNB13، NNB17، NNB21 و NNB7 که بطور مشخص با ماده معدنی برخورد نموده‌اند، برای بررسی دقیق‌تر انتخاب شده و در شکل ۱۷ (الف و ب) نگار آنها با استفاده از نرم‌افزار Rockworks ترسیم شده است. در این شکل نگار گمانه‌ها از چپ به راست شامل منحنی تغییرات عمقی مقاومت ویژه (با رنگ آبی و افزایش از راست به چپ)، ستون لیتولوژی (سنگ‌شناسی)، هیستوگرام تغییرات عمقی عیارسنجی مس (با رنگ زرد) و منحنی تغییرات عمقی بارپذیری (با رنگ قرمز و افزایش از چپ به راست) ترسیم شده است. مطابق این شکل بخش عمده گمانه NNB13 از جنس کوارتزموزنودپوریت تشکیل شده و از عمق ۱۰ تا ۶۵ متری عیار ماده معدنی نسبتاً بالاست. در این گمانه تا عمق ۴۰ متری که اطلاعات IP و Rs در دست می‌باشد، مقدار IP بالا، Rs نسبتاً کم و عیارسنجی مطلوب است؛ به عبارت دیگر تا این عمق تطابق کیفی خوبی بین داده‌های عیارسنجی و ژئوالکتریک وجود دارد. گمانه NNB17 تماماً از جنس کوارتزموزنودپوریت است و از دهانه این گمانه تا عمق ۵۲ متری که اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریک در دسترس می‌باشد، بجز در یک فاصله عمقی ۳ متری، ماده معدنی وجود نداشته و در



شکل ۱۷. الف - نمایش نگار مقاومت ویژه، لیتولوژی، هیستوگرام عیارسنجی مس و بارپذیری گمانه‌های NNB13، NNB17.



شکل ۱۷. ب- نمایش نگار مقاومت ویژه، لیتولوژی، هیستوگرام عیارسنجی مس و بارپذیری گمانه‌های NNB7 و NNB21.

کاملی از کانسار مورد مطالعه صورت گیرد و در نتیجه گامی رو به جلو در راستای اکتشاف بیشتر این کانسار برداشته شود. نتایج حاصل از فعالیت‌های انجام شده در این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود. بررسی وضعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی حفر شده در منطقه نشان می‌دهد که بیشتر گمانه‌ها در محدوده با شدت میدان مغناطیسی متوسط، حفاری شده‌اند و فقط تعداد اندکی از آنها بر روی پروفیل‌های ژئوالکتریکی P3، P4، P5 و P7، منطبق بوده یا در نزدیکی آنها قرار دارند؛ حال آنکه بر اساس تفسیر مقاطع ژئوفیزیکی مدل‌سازی شده، بر روی هر پروفیل حداقل یک موقعیت مناسب حفاری، پیشنهاد شده است. همچنین با وجود اطلاعات زمین شناسی و عیارسنجی مس در گمانه‌ها و نیز اطلاعات ژئوفیزیکی عمقی (بویژه ژئوالکتریک) در موقعیت این گمانه‌ها، نتایج مطالعات ژئوفیزیکی با واقعیت زمین (داده‌های عیارسنجی) بررسی شد و میزان اعتبار آنها ارزیابی گردید. بر اساس ترسیم مقطع ماده معدنی منطبق بر پروفیل‌های ژئوفیزیکی P3، P4، P5 و P7 با استفاده از داده‌های عیارسنجی مشخص شد که حفاری برخی از گمانه‌های منطبق

مقایسه اطلاعات اکتشافی موجود در این چهار گمانه یعنی نتایج عملیات حفاری (داده‌های عیارسنجی مس) و نتایج برداشت‌های ژئوالکتریک (داده‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی) نشان می‌دهد که به طور کلی بین این داده‌ها تطابق کیفی متوسطی وجود دارد. همچنین در بخش‌های سطحی (اعماق کم تا زیر ۱۰ متر) انطباق چندانی بین داده‌های مذکور وجود ندارد که این امر ناشی از تاثیر نوفه‌های سطحی (خاک‌های رسی مرطوب و لایه‌های هوازده سطحی) بر روی برداشت‌های ژئوالکتریک است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر پردازش، مدل‌سازی، تجزیه و تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج برداشت‌های ژئوفیزیکی کانسار مس پورفیری نارباغی شمالی ساوه صورت گرفت و سعی شد تا از تمام اطلاعات زمین شناسی و داده‌های اکتشافی موجود، نهایت استفاده را به عمل آورده، ضمن ارزیابی عملکرد روش‌های اکتشاف غیرمستقیم (اکتشافات ژئوفیزیکی) و تعیین میزان ارتباط آنها با نتایج عملیات اکتشاف مستقیم (عملیات حفاری)، شناخت

گمانه مایل با زاویه شیب ۷۰ درجه به سمت شمال در راستای پروفیل تا عمق ۷۰ متری در موقعیت با طول جغرافیایی ۴۵۹۰۰۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۷۸۳ شمالی بر روی پروفیل P5، یک گمانه مایل در موقعیت با زاویه شیب ۸۰ درجه به سمت شرق تا عمق حداقل ۵۰ متری با طول جغرافیایی ۴۵۹۳۷۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۷۱۰ شمالی و یک گمانه قائم در موقعیت تا عمق حداقل ۴۰ متری با طول جغرافیایی ۴۵۹۴۳۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۷۲۰ شمالی بر روی پروفیل P7 به منظور دستیابی به اطلاعات اکتشافی تکمیلی، حفاری گردند و از داده‌های عیارسنجی مغزه‌های حفاری جدید در مراحل مختلف تجزیه و تحلیل و پردازش، استفاده شود. البته بر روی هر پروفیل ژئوفیزیکی دیگر نیز براساس تفسیر شبه مقاطع ژئوفیزیکی مدل‌سازی شده آنها، دست کم یک موقعیت مناسب حفاری، پیشنهاد شده که مشخصات آنها در اینجا آورده نشده اند. همچنین برای دست یابی به اهداف و نتایج درست در مورد کانسارهای فلزی مشابه که از پیچیدگی‌های زمین‌شناسی زیاد برخوردار بوده و به انواع نوفه‌ها آلوده می‌باشند، کاهش تا حد ممکن نوفه از داده‌های ژئوفیزیکی با استفاده از روش‌های درست (نظیر انتخاب مناسب آرایه الکترودی مثلاً در پاره‌ای موارد آرایه قطبی - دوقطبی بجای آرایه دوقطبی - دوقطبی، اندازه‌گیری قطبش القایی در دامنه فرکانس، برداشت سه بعدی داده‌های ژئوالکتریک، استفاده از روش‌های دقیق‌تر وارون‌سازی داده‌های بارپذیری و مقاومت ویژه)، قبل از هرگونه تصمیم صورت گیرد.

بر این پروفیل‌ها براساس نتایج عملیات ژئوفیزیکی نبوده و بدون هیچ‌گونه منطق، هدف و طراحی درستی صورت گرفته و فاقد ماده معدنی می‌باشند. در ادامه، ارزیابی نتایج عملیات برداشت ژئوفیزیکی از طریق میزان تطابق کیفی آنها با داده‌های عیارسنجی عملیات حفاری، با استفاده از بررسی دقیق نگار تعدادی از مهم‌ترین گمانه‌های حفاری شده منطبق بر پروفیل‌های ژئوالکتریک، که بطور مشخص با ماده معدنی نیز برخورد نموده‌اند، نشان داد که به طور کلی بین این داده‌ها، تطابق کیفی متوسطی وجود دارد. همچنین در بخش‌های سطحی (اعماق کم تا زیر ۱۰ متر) انطباق چندانی بین داده‌های مذکور وجود ندارد که این امر ناشی از تاثیر نوفه‌های سطحی بر روی برداشت‌های ژئوالکتریک است. بنابراین به منظور اکتشاف اصولی این کانسار پیشنهاد می‌شود که گمانه‌های اکتشافی جدید پیشنهادی بر اساس نتایج مقاطع وارون‌سازی شده ژئوالکتریک همانند یک چال قائم تا عمق حداکثر ۱۰ متر در موقعیت با طول جغرافیایی ۴۵۹۴۶۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۶۰۲ شمالی و یک گمانه قائم تا عمق ۵۰ متر در موقعیت با طول جغرافیایی ۴۵۹۴۷۸ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۶۵۸ شمالی بر روی پروفیل P1، یک گمانه قائم تا عمق ۵۰ متر در موقعیت با طول جغرافیایی ۴۵۹۱۶۵ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۵۹۴ شمالی و یک گمانه مایل با شیب ۵۰ درجه به سمت شمال در راستای پروفیل تا عمق ۶۵ متری در موقعیت با طول جغرافیایی ۴۵۹۱۶۵ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۶۵۴ شمالی بر روی پروفیل P3، یک گمانه قائم تا عمق ۵۰ متری در موقعیت با طول جغرافیایی ۴۵۹۱۰۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۸۷۸۰ شمالی بر روی پروفیل P4، یک

منابع

- احمدی، ر.، اسدی، ا.، جلالی، م.، ۱۳۸۶. ارزیابی و تجزیه و تحلیل کارآیی اکتشافات ژئوفیزیکی انجام شده در کانسار مس علی‌آباد یزد، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- احمدی، ر.، کریمی، ا.، افضلی، ن.، ۱۳۹۴. اعتبارسنجی اکتشافات ژئوفیزیکی انجام شده در کانسار مس دره زرشک یزد با استفاده از داده‌های عیارسنجی عملیات حفاری، نوزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و نهمین همایش ملی زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور، تهران.
- افضلی، ن.، ۱۳۹۵. مدل‌سازی کانسارهای سرب و روی رباط و حسین‌آباد خمین با استفاده از تلفیق داده‌های اکتشافی ژئوفیزیکی، لیتولوژی و عیارسنجی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اراک.
- پیچاب کانسار، مهندسی مشاور، ۱۳۹۴. گزارش پایانی عملیات اکتشافی در محدوده کانسار مس ناریاغی شمالی، ۳۵۶ ص.
- عادل‌پور، م.، رساء، ا.، مسعودی، ف.، حسینی، م.، ۱۳۹۵. تعیین مناطق کانی‌سازی با استفاده از پردازش داده‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی در کانسار مس گرماب (خراسان جنوبی)، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۸، شماره ۱، ۱۴۶-۱۲۹.
- کریم‌پور، م.ح.، سعادت، س.، ۱۳۹۶. زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی، دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات ارسلان، ۵۳۶ ص.
- کلاگری، ع.ا.، ۱۳۸۹. اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، ناشر: مولف، تبریز، ۴۸۵ ص.
- نوروزی، غ.ج.، غلامی، س.، ۱۳۸۴. تحلیل و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (IP, Rs, M) در محل اندیس معدنی مس سوناجیل، نشریه دانشکده فنی، شماره ۲، جلد ۳۹، ۲۶۵-۲۵۳.
- یعقوبی‌تبار، ب.، عرب‌امیری، ع.ر.، کامکارروحانی، ا.، ابراهیمی، س.، ۱۳۹۲. اکتشاف کانسار مس در منطقه ابراهیم‌آباد میامی با استفاده از روش‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی، دانشگاه شاهرود.
- Alilou, S.K., Norouzi, G.H., Doulati, F., Abedi, M., 2014. Application of magnetometry, electrical resistivity and induced polarization for exploration of polymetal deposits, a case study: Halab Dandi, Zanjan, Iran, 2nd international Conference on Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (ICAEAM), May 4-5, Istanbul (Turkey).
- Bery, A.A., Saad, R., Mohamad, E.T., Jinmin, M., Azwin, I.N., Tan, N.M., Nordiana, M.M., 2012. Electrical resistivity and induced polarization data correlation with conductivity for iron ore exploration, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17: 3323-3337.
- Claerbout, J.F., 1985. *Fundamentals of geophysical data processing with applications to petroleum prospecting*, Blackwell Scientific Publications, 284 p.
- Gupta, V.K., Ramani, N., 1980. Some aspects of regional-residual separation of gravity anomalies in a Precambrian, *Geophysics*, 45: 1412-1426.
- Holliday, J.R., Cooke, D.R., 2007. Advances in geological models and exploration methods for copper ± gold porphyry deposits, ore deposits and exploration technology, paper 53, Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, edited by B. Milkereit, 791-809.
- [Http://www.rockware.com/Rockworks16](http://www.rockware.com/Rockworks16)
- [Https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Metal_factor_\(MF\)](https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Metal_factor_(MF))
- Keary, Ph., Brooks, M., Hill, I., 2002. *An introduction to geophysical exploration*, Third edition, Blackwell Science, 281 p.
- Kellogg, O.D., 2010. *Foundations of potential theory*, Dover Publications, 400 p.
- Loke, M.H., 1999. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys*, 66 p.
- Loke, M.H., 2000. Topographic modelling in resistivity imaging inversion, 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a Quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152.
- Loke, M.H., Lane, J., 2002. The use of constraints in 2D and 3D resistivity modeling, The 8th EEGS-ES Meeting, Portugal.
- Milsom, J., 2003. *Field Geophysics*, Third edition, John Wiley & Sons Ltd, 249 p.
- Reynolds, J.M., 2011. *An introduction to applied and environmental geophysics*, Second edition, Reynolds

Geo-Sciences, 710 p.

- Saad, R., Mohamad, S., Adli, I., 2012, 2-D resistivity and induced polarization (IP) methods for iron ore exploration, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17: 2973-2979.
- Zeng, H., Xu, D., Tan, T., 2007. A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China, *Journal of Geophysics*, 72: 145-150.