



دوره ۹، شماره ۲، ۱۴۰۲، صفحات ۹۵-۱۰۷
DOI: 10.22044/JIRAG.2018.6494.1172 شناسه دیجیتال

استفاده از وارون سازی های لی - اولدنبِرگ و هموار برای شناسایی کانسار پلی متال منطقه عشوند نهاوند به کمک داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی

زینب علایی کاخکی^۱، علی نجاتی کلاته^{۲*}، علیرضا عرب امیری^۲ و فیروز جعفری^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود
۳- کارشناس، سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۹

* نویسنده مسئول مکاتبات: nejati@shahroodut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

از روش های مرسوم در اکتشاف کانسارهای فلزی به خصوص اسکارن های آهن و مس، بکارگیری هم زمان روش های تلفیقی قطبش القایی (IP) و مقاومت ویژه (Res) الکتریکی می باشد. پرکاربردترین آرایه ژئوالکتریکی در برداشت های دوبعدی آرایه دوقطبی-دوقطبی است. این امر به علت حساسیت بالای این آرایه به تغییرات جانبی و کاهش میزان نوفه به حداقل مقدار خود است. کانسار اسکارن پلی متال طلا، مس، روی، آهن عشوند نهاوند در پانزده کیلومتری شمال شرق شهر نهاوند و در دو کیلومتری شمال شرق روستای عشوند قرار دارد. به منظور بررسی کانسار پلی متال عشوند، داده های مقاومت ویژه و قطبش-القایی در شبکه مستطیلی در قالب ۷ پروفیل به فاصله ۵۰ متر از هم با آرایش دوقطبی-دوقطبی برداشت شد. امروزه مدل سازی داده های ژئوفیزیکی مانند دیگر زمینه های مهندسی جایگاه ویژه ای پیدا کرده است. هدف از این مطالعه، وارون سازی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی با استفاده از الگوریتم های لی-اولدنبِرگ و هموار می باشد. به منظور ارزیابی الگوریتم های مذکور مدلی مصنوعی با نرم افزار Res2Dmod طراحی شد، داده های مصنوعی بدست آمده از این مدل با الگوریتم های مذکور وارون سازی شده و نتایج با مدل اولیه تطبیق داده شدند. بر اساس میزان تطابق مدل های حاصل از وارون سازی با مدل مصنوعی اولیه، صحت سنجی صورت گرفت و می توان گفت نتایج وارون سازی داده های واقعی تا حد امکان به واقعیت نزدیک خواهد بود. با مدل سازی وارون دوبعدی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی، اطلاعات ارزشمندی از هندسه فضایی، عمق و ابعاد کانی سازی بدست آمد. بر اساس اطلاعات زمین شناسی موجود و نتایج مدل سازی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی در محدوده مورد مطالعه مناطق امیدبخش برای حفر گمانه های اکتشافی شناسایی و معرفی گردید.

پلی متال
الگوریتم لی-اولدنبِرگ
الگوریتم هموار
عشوند

۱- مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی با بررسی ساختارهای زیرسطحی، اطلاعات مفیدی را در مورد خواص فیزیکی ساختارهای زیرسطحی و توزیع این خواص در زیر سطح ارائه می‌دهند. این روش‌ها برای اکتشاف ذخایری مناسبند که با استفاده از این روش‌ها می‌توان عمق لایه‌ها را بدون حفاری تا حدودی تقریب زد. همچنین روش‌های ژئوفیزیکی قادر به پوشش دادن مناطق وسیع با صرف زمان و هزینه‌های به نسبت کمتر از سایر روش‌ها هستند. از این‌رو امروزه استفاده از این روش‌ها در بررسی‌های معدنی امری رایج و متداول است (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴). این روش‌ها اگر به درستی انتخاب شوند، می‌توانند اطلاعات مناسبی از کانی‌سازی در سطح و عمق بدهند (Alilou et al., 2014). از جمله روش‌های ژئوفیزیکی، روش مقاومت-ویژه الکتریکی است که یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش‌های اکتشافی است (Reynolds, 2011) و به طور گسترده‌ای در بررسی‌های مهندسی، محیط‌زیست (Chambers et al., 2006; Dalhin, 2001; Rucker et al., 2010)، هیدرولوژی (Page, 1968; Wilson et al., 2006)، باستان‌شناسی (Griffiths and Baeker, 1994; Tsokas et al., 2008) و اکتشاف مواد معدنی (Bauman, 2005; Legault et al., 2001; Linderholm et al., 2008; White et al., 2000; Storz et al., 2008) استفاده می‌شود. علاوه بر بررسی‌های که روی سطح زمین انجام می‌شود، برای گمانه‌ها (Chambers et al., 2003; Daily and Owen, 1991) و مناطق آبی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Loke and Lane, 2004; Rucker et al., 2011). از روش‌های مرسوم در اکتشاف کانسارهای فلزی به خصوص اسکارن‌های آهن و مس، بکارگیری هم‌زمان روش‌های تلفیقی قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌باشد (Alilou et al., 2014)؛ که امکان دستیابی به مناطق امیدبخش را نیز افزایش می‌دهد (زارع و همکاران، ۱۳۹۳). از آنجا که داده‌های خام در اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی نمی‌توانند اطلاعاتی کمی درباره عمق حقیقی، ابعاد و یا توزیع مقاومت‌ویژه حقیقی الکتریکی در زیر زمین بیان کنند؛ لذا مدل‌سازی داده‌ها، امری اجتناب‌ناپذیر است (مرادزاده و عرب-امیری، ۱۳۸۳). روش‌های زیادی برای این منظور وجود دارد، یکی از مهم‌ترین آن‌ها که به منظور کاهش ریسک عملیات اکتشافی و هزینه‌های حفاری بکار می‌رود، مدل‌سازی‌های پر قدرت و پرسرعت وارون می‌باشد (Fedi and Rapolla, 1999). از این میان، وارون‌سازی الکتریکی گسترش بیشتری یافته است (Dey and Morrison, 1979). تفسیر بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی شامل مشخص کردن موقعیت مکانی، شکل و خصوصیات منبع زیرسطحی است. بعضی از دست‌یافته‌ها و روش‌های موجود برای تفسیر کمی، شامل روندهای وارون‌سازی‌اند؛ که توزیع پارامترهای توده بی‌هنجار در زیر زمین را با یک تحلیل خودکار یا نیمه‌خودکار به بهترین وجهی نمایش می‌دهد (Stocco et al., 2009). مشخص شده است که تفسیرهای یک بعدی دارای خطا و عدم یکتایی بالاتری نسبت به تفسیرهای دوبعدی و متعاقباً سه‌بعدی هستند؛ یعنی با

استفاده از روش داده‌برداری و تفسیر سه‌بعدی می‌توان جواب‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را بدست آورد (میرزائاد و همکاران، ۱۳۸۹). با این وجود هنوز مدل‌سازی سه‌بعدی مانند مدل‌سازی دوبعدی گسترش نیافته و مورد استفاده عموم قرار نگرفته است. علت این امر هزینه بالا و زمان زیاد صرف شده برای برداشت صحرایی داده‌ها و مدل‌سازی سه‌بعدی می‌باشد (علیزاده و فتحیان پور، ۱۳۸۹). ازجمله الگوریتم‌های مدل‌سازی دوبعدی، الگوریتم دوبعدی لی و اولدنبورگ می‌باشد. در سال ۱۹۹۴ اولدنبورگ و لی، سه روش برای وارون‌سازی داده‌های قطبش‌القایی توسعه دادند و بیان کردند که ارتباط نزدیک داده‌های قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه بدان معنی است که وارون‌سازی داده‌های قطبش‌القایی یک فرایند دو مرحله‌ای است. ابتدا داده‌های مقاومت‌ویژه وارون می‌شود؛ تا یک مدل اولیه مناسب برای رسانندگی بدست آید. سپس از این مدل اولیه می‌توان به منظور مدل‌سازی داده‌های قطبش‌القایی استفاده کرد [Oldenburg and Li, 1994]. در سال ۱۳۹۱ اسکویی و دریجانی در منطقه شه‌میرزاد سمنان با استفاده از الگوریتم دوبعدی لی و اولدنبورگ وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مغناطیسی را به منظور تعیین عمق و شکل کانسارهای آهن انجام دادند و بر اساس نتایج مدل‌سازی و با توجه به مطالعات زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه به ماهیت هماتیتی کانسار آهن پی بردند [اسکویی و دریجانی، ۱۳۹۱]. در سال ۲۰۱۶ ساموئل و همکاران روش مقاومت ویژه و مدل‌سازی پیشرو و وارون نرم‌افزار DCIP2D را برای شناسایی آلتراسیون در ذخیره اورانیوم غرب میانه ساسکاچوان شمالی کانادا انجام دادند و موفق به شناسایی دگرسانی رسنا در غرب میانه شدند (Samuel et al., 2016). از جمله امکانات این نرم‌افزار امکان تغییر شبکه مش بندی به صورت دستی است. از مزایای تغییر دستی فایل مش این است که شبکه جستجو را می‌توان طوری طراحی کرد که هسته مش‌بندی در منطقه مورد علاقه کاربر و منطقه زون قرار داشته باشد؛ که این تضمینی است برای این‌که شرایط مرزی در روش تفاضل محدود به درستی انجام شود. همچنین در این نرم‌افزار امکان وزن دهی به داده‌ها بر اساس نویزی بودن یا نبودن آن‌ها وجود دارد (Oldenburg and Li, 1994). یکی دیگر از روش‌های وارون‌سازی دوبعدی، الگوریتم وارون دوبعدی هموار می‌باشد. در سال ۱۳۹۲ محمدی ویژه و همکاران مدل‌سازی و تفسیر داده‌های قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه را با استفاده نرم‌افزار Res2Dinv که مبتنی بر الگوریتم هموار دوبعدی می‌باشد را به منظور اکتشاف ذخایر پلی متال در منطقه کبودان انجام دادند. پس از تفسیر، نواحی کانه‌زا در اکثر مناطق با بارپذیری بالا و همچنین مقاومت‌ویژه پایین تا متوسط شناسایی کردند و بیان کردند که این امر را می‌توان به کانی‌سازی فلزی و حضور کانی‌های سولفیدی در مناطق کانی‌سازی نسبت داد. سپس با استفاده از نتایج مدل‌سازی و شواهد زمین‌شناسی نقاط مناسب برای حفاری پیشنهاد دادند [محمدی ویژه و همکاران، ۱۳۹۲]. یکی از کاربردی‌ترین آرایه‌های ژئوالکتریکی در برداشت‌های دوبعدی آرایه دوقطبی-دوقطبی است. این امر ناشی از حساسیت بالای این آرایه به تغییرات جانبی است (Milsom, 2003).

تمام توابع مشتق و وزن دهی‌های توابع هدف مدل، درون آن جای می‌گیرند (philips, 2002). به منظور اندازه‌گیری میزان انطباق داده‌های محاسبه‌شده با داده‌های مشاهده‌ای تابع data misfit (Φ_d) به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$\Phi_d = \|W_d(Gm - d^{obs})\|^2 \quad (3)$$

که در این رابطه $d^{obs} = (d_1^{obs}, d_2^{obs}, \dots, d_N^{obs})$ پیش‌بینی پاسخ مدل بهبودیافته و W_d ماتریس وزنی داده‌ها است؛ که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$W_d = \text{diag}\left(\frac{1}{\sigma_i}\right) \quad (4)$$

که σ_i انحراف معیار نوفه می‌باشد (Williams, 2008). مدل مطلوب با حل مشکل بهینه‌سازی یافت می‌شود:

$$\Phi = \Phi_d + \mu \Phi_m \quad (5)$$

در رابطه (۵) Φ تابع هدف و μ ضریب منظم‌ساز می‌باشد (philips, 2002).

وارون‌سازی هموار با استفاده از روش کمترین مربعات و به کمک پارامتر هموارساز انجام می‌شود [Loke et al., 2014]. اساس وارون‌سازی هموار در نرم‌افزار Res2Dinv با رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g - \lambda F q \quad (6)$$

که در رابطه (۶) Δq بردار تغییرات پارامترهای مدل، J^T ترانپوز ماتریس ژاکوبین، J ماتریس ژاکوبین (ماتریس مشتقات جزئی)، λ فاکتور تعدیل، g بردار اختلاف و F به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (7)$$

در رابطه (۷)، f_x و f_z فیلترهای هموارساز در جهت‌های X و Z می‌باشند (Loke, 2004).

۳- زمین‌شناسی منطقه

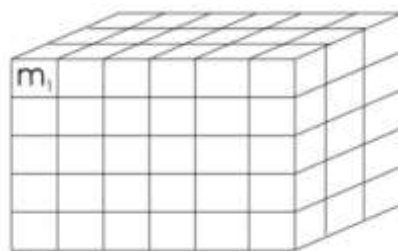
کانسار اسکارن پلی‌متال طلا، مس، روی، آهن عشوند نهاوند در پانزده کیلومتری شمال‌شرق شهر نهاوند و در دو کیلومتری شمال‌شرق روستای عشوند قرار دارد. این کانسار در حد واسط دو زون سنندج-سیرجان و زاگرس مرتفع قرار گرفته؛ به طوری که هم حضور دگرگونی‌های ناحیه‌ای موجود در زون سنندج سیرجان و هم وجود توده نفوذی کرتاسه و دگرگونی همبری حاصل از نفوذ این توده در سنگ‌ها قدیمی‌تر در آن قابل مشاهده می‌باشد (جعفری، ۱۳۹۰). به غیر از یک واحد آفیولیتی نازک، عمده واحدهای سنگی منطقه نهاوند به دو گروه سنگ‌های دگرگونی و غیر دگرگونی تقسیم می‌شود؛ که با توجه به نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ به شرح زیر می‌باشند (شکل ۲):

واحد CP1 که قدیمی‌ترین واحد سنگ چینه‌ای این ناحیه است (Alavi and Mahdavi, 1994)؛ شامل ردیف‌هایی از سنگ نازک لایه همراه درون لایه‌های ماسه‌سنگی به رنگ قهوه‌ای می‌باشد. همچنین بخش دیگری از این واحد، به صورت سنگ ماسه درشت دانه و

از این رو، برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی به وسیله آرایه دوقطبی-دوقطبی در منطقه مورد مطالعه انجام و سپس با استفاده از نرم‌افزارهای DCIP2D (Oldenburg and Li, 1994) و Rss2Dinv (Griffiths and Barker 1993) مدل‌سازی وارون داده‌ها صورت گرفت. بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی موجود و نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در محدوده مورد مطالعه مناطق امیدبخش برای حفر گمانه‌های اکتشافی شناسایی و معرفی گردید.

۲- اساس روش

در نرم‌افزار DCIP2D که بر اساس الگوریتم لی و اولدنبرگ مقید شده، پارامتر سازی مدل به گونه‌ای است که زمین به تعداد زیادی بلوک‌های مستطیلی تقسیم شده و فرض بر آن است که هدایت ویژه یا مقاومت ویژه و بارپذیری در هر سلول مستطیلی ثابت است (شکل ۱) (Oldenburg and Li, 1994). بردار ستونی $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T$ طول M (تعداد سلول‌ها) معرفی می‌شود. هر درایه این بردار، مربوط به مقدار ویژگی فیزیکی است که برای هر سلول از مدل مقدار منحصر به فردی می‌باشد. مدل‌سازی پیشرو شامل حل یک سیستم معادلات است که بر اساس توزیع ویژگی فیزیکی در زمین برای محاسبه پاسخ در هر نقطه مشاهده‌ای انجام می‌شود.



شکل ۱: تقسیم‌بندی زمین از طریق مش بندی سه‌بعدی عمود برهم

(philips, 2002)

برای یک سیستم معادلات خطی، داده‌ها از ضرب برداری ماتریسی حاصل می‌شوند. شکل ماتریسی مساله پیشرو به صورت زیر می‌باشد:

$$d = G(m) \quad (1)$$

که در آن G ماتریس عملگر پیشرو (ابعاد $N \times M$)، m بردار ستونی پارامترهای مدل شامل M آرایه و d بردار ستونی به طول N شامل داده‌های مشاهده می‌باشند. در مسائل وارون هدف پیدا کردن مقدار m است (مقادیر G و d معلوم است). تعداد سلول‌ها یا بلوک‌های مدل (M) معمولاً بسیار بیشتر از تعداد داده‌ها (N) می‌باشد و لذا مساله تحت عنوان کم تعیین‌شده شناخته می‌شود (philips, 2002). بنابراین در تابع هدف نهایی علاوه بر کمینه کردن تابع Misfit، یک تابع وزن‌دار از پارامترهای مدل نیز باید کمینه شود (Oldenburg and Li, 1994). برای این منظور تابع هدف مدل به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$\Phi_m = \|W_m(m - m_{ref})\|^2 \quad (2)$$

که در رابطه (۲) W_m یک ماتریس وزنی با ابعاد $M \times M$ است؛ که

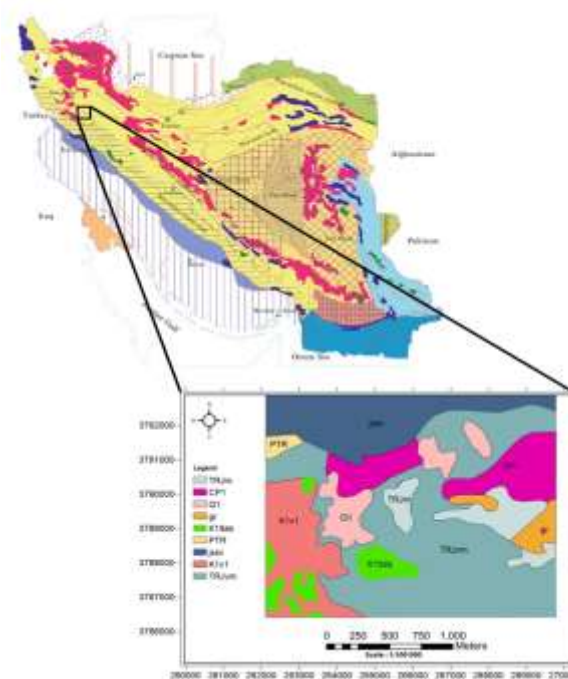
علایی کاخکی و همکاران، استفاده از وارون‌سازی‌های لی-اولدنبِرک و هموار برای شناسایی کانسار پلی متال منطقه عشوند...، صفحات ۹۵-۱۰۷.

هشتمین واحد سنگی منطقه Q1 می‌باشد؛ که مخروط افکنه‌های درشت دانه مرتفعی هستند؛ که به صورت دشت‌هایی مسطح و دارای توپوگرافی آرام و ملایم می‌باشند (موحدی، ۱۳۸۹). بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی به نظر می‌رسد که آخرین مرحله دگرگونی ناشی از تبلور کامل گرانیات باتولیت الوند می‌باشد. مطالعات همچنین نشانگر آن است که قدیمی‌ترین سنگ‌های دگرگونی ورقه نه‌اوند متعلق به دوره تریاس پیشین است؛ که در آن‌ها سنگ‌های کربناته به صورت مرمر ظاهر شده‌اند. از سویی دیگر، جوانترین سنگ‌های دگرگونی منطقه نیز سنگ‌های کرتاسه پائین است؛ که بخش گسترده‌ای از سنگ‌های دگرگونی این ناحیه را تشکیل داده‌اند و به صورت اسلیت، فیلیت و شیست همراه با سنگ‌های آذرین دگرگون‌شده در منطقه برونزد دارند. با توجه به موارد یاد شده می‌توان گفت که تقریباً تمامی سنگ‌های دگرگونی این منطقه، خاستگاه رسوبی داشته و دامنه سنی آن‌ها زمان پرمین-تریاس تا کرتاسه پائین است.

بر اساس مطالعات اکتشافی صورت گرفته (به وسیله سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور) در این محدوده دو زون کانه‌سازی اصلی شناسایی شده؛ که در زیر شرح هر کدام بیان می‌شود: (۱): کانه‌سازی در مرز توده نفوذی و سنگ همبر و داخل توده نفوذی که تشکیل آندو اسکارن را داده است. میزان کانه‌سازی به طرف داخل توده، کاهش می‌یابد و در نهایت به توده نفوذی می‌رسد. (۲): کانه‌سازی در مرز توده نفوذی و سنگ همبر و داخل سنگ همبر که تشکیل اگزواسکارن را داده است. میزان کانه‌سازی به طرف داخل سنگ همبر، کاهش می‌یابد و در نهایت به سنگ مرمریتی فاقد کانه‌زائی ختم می‌گردد. ابعاد کانه‌سازی در این منطقه به صورت طول کانه‌سازی حدود ۳۰۰ متر، عرض یک تا ۳۵ متر و افراز حدود ۴۰ متر می‌باشد. در محدوده اسکارن عشوند تعداد ۸ ترانشه اکتشافی با حجم تقریبی ۶۰۰ مترمکعب حفر گردید.

همه ترانشه‌های حفر شده در این محدوده به شکلی طراحی شدند که هر چهار بخش سنگ همبر مرمریتی، اگزواسکارن، آندواسکارن و توده گرانیتی را قطع کنند؛ تا بتوان دید مناسبی نسبت به تغییر عناصر در این چهار بخش بدست آورد. از مطالعه نمودارهای مربوط به این ترانشه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که تغییرات عناصر از توده گرانیتی به طرف آندواسکارن و اگزواسکارن و در نهایت سنگ همبر مرمریتی به صورت تدریجی است؛ به طوری که به طرف آندواسکارن و اگزواسکارن به صورت افزایشی است و در نهایت به داخل سنگ همبر به صورت کاهشی است؛ تا در نهایت به ترکیب کلارک زمینه مرمریت نزدیک می‌شود. نکته جالبی که از مطالعه این روند افزایش و کاهشی عناصر در قسمت‌های مختلف اسکارن بدست می‌آید، تغلیظ عناصری خاص دریکی از واحدهای آندواسکارن یا اگزواسکارن می‌باشد؛ به طوری که مقادیر عناصری مانند روی، طلا و مس در اگزواسکارن ماده معدنی افزایش می‌یابد و عنصری مانند آهن در آندواسکارن ماده معدنی تجمع پیدا می‌کند. در شکل ۳ مقطع عرضی زمین‌شناسی محدوده اسکارن عشوند و موقعیت سنگ همبر مرمریتی، اگزواسکارن، آندواسکارن و توده گرانیتی و همچنین موقعیت ترانشه‌های حفر شده در آن آمده است.

سنگ‌آهک آواری همراه با مرجان، کرینوئید و خرده‌هایی از صدف گاستروپود دیده می‌شود (کربونیفر پرمین). واحدهای سنگی به سن پرمین تا تریاس منطقه شامل PRT, TRJm و TRJm می‌باشند؛ که PTR شامل رخنمون‌های کوچک و پراکنده‌ای مرمری شده به رنگ خاکستری روش، سنگ‌آهک ضخیم و آهک‌های مرمری شده به رنگ خاکستری تیره می‌باشد. این آهک‌ها سنگ آذرآواری و متاولکانیک‌های مربوط به دوره کرتاسه را که به صورت کلیپ‌های تکتونیکی مشاهده می‌شوند؛ می‌پوشانند. واحد TRJm قسمت زیادی از سطح زمین را پوشانده و شامل لاوا (که به طور ضعیف دگرگونی شده)، توف و میان لایه‌هایی از مرمر می‌باشد (عمیدی و مجیدی، ۱۳۵۵). TRJm شامل سنگ‌های مرمریتی نازک لایه خاکستری تیره‌رنگ می‌باشند. واحدهای سنگی gr, K1v1 و K1ltb مربوط به دوران کرتاسه بوده که واحد gr شامل سنگ‌های آذرین نفوذی در منطقه موردنظر، با ترکیب بیشتر گرانیات و گرانودیوریت می‌باشند (ولی زاده، ۱۳۵۳؛ حسینی دوست و همکاران، ۱۳۷۰).



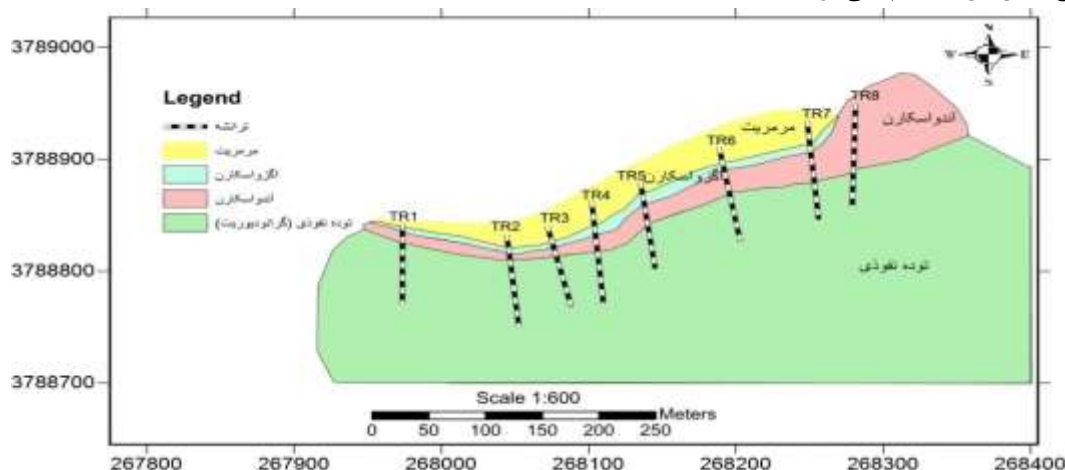
شکل ۲. موقعیت زون سنندج-سیرجان و واحدهای زمین‌شناسی منطقه
نهادن برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰

K1v1 آمیزه‌ای آذرآواری است؛ که در آن سنگ‌های آهکی بلورین شده کرتاسه پایین (Pyroclastic) و قطعات سنگ‌های آتشفشانی به صورت مخلوطی دیده می‌شود. این آمیزه بیشتر از قطعات سنگ‌هایی که پورفیری و دارای ترکیب داسیتی و آندزیتی هستند، تشکیل شده است. K1ltb این واحد شامل ورقه‌های سنگ آهکی وابسته به کرتاسه پایین است؛ که به صورت قطعه‌های رورانده روی واحدهای مجاور (که عمدتاً سنگ‌های آهکی به صورت توده‌ای تا سبتر لایه‌اند و بخشی از آن به صورت اولولیتی و دارای خرده صدف‌های فسیلی است) قرار گرفته‌اند.

Tezkan, 2008). برای این منظور یک مدل مصنوعی متشکل از سه بلوک با مقاومت‌ویژه مشخص در زمینه با مقاومت $100\Omega m$ ، فاصله الکترودی ۲۰ متر در ۸ سطح ($n=1,2,...,8$) در نرم‌افزار Res2Dmod طراحی گردید، در شکل ۴-الف قابل‌مشاهده است و اطلاعات آن‌ها در جدول ۱ بیان شده است.

۴- وارون‌سازی داده‌های مصنوعی

معمولی‌ترین راه برای آزمودن روش‌های ژئوفیزیک اعمال مدل‌سازی عددی مستقیم روی داده‌های مصنوعی است. به این ترتیب که پیش از استفاده از روش وارون، نتیجه درست شناسایی می‌شود. در این تحقیق ابتدا به منظور صحت سنجی الگوریتم‌های وارون‌سازی با استفاده از داده‌های مصنوعی مدل‌سازی انجام می‌شود (Candansayar and

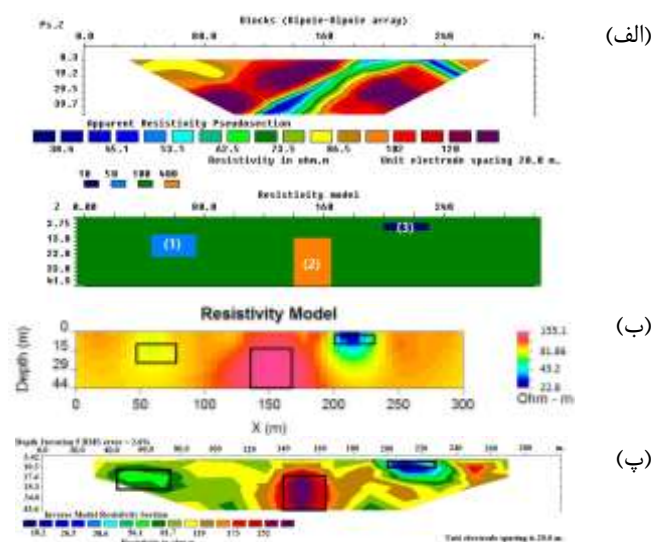


شکل ۳. مقطع عرضی زمین‌شناسی محدوده اسکارن عشوند و موقعیت ترانسه‌های حفرشده در آن (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۱)

شکل ۴-الف مدل مقاومت‌ویژه را نشان می‌دهد. در مرحله بعد با استفاده از مدل‌سازی مستقیم داده‌های مصنوعی حاصل از مدل شکل ۴-الف بدست آمد. به این ترتیب که برای رسیدن به داده‌ها از پارامترهای مدل استفاده شد. سپس از این داده‌ها برای رسیدن به پارامترهای مدل (وارون‌سازی) در نرم‌افزارهای DCIP2D و Res2Dinv استفاده شد. نخست فایل‌های ورودی مربوط به هر نرم‌افزار به طور جداگانه تهیه شد و وارون‌سازی با نرم‌افزارهای مذکور صورت گرفت. مقایسه نتایج نرم‌افزارها با مدل اولیه نشان می‌دهد که توزیع مقاومت زیرسطحی حاصل از فرایند وارون‌سازی به درستی پیرامون آنومالی‌های مدل مصنوعی متمرکز شده‌اند. به عبارت دیگر، مدل اولیه با نتایج حاصل از وارون‌سازی مطابقت دارد. یعنی مراحل به درستی انجام شده و از الگوریتم‌های صحیحی در طی مدل‌سازی استفاده شده است.

جدول ۱. موقعیت بلوک‌ها در مدل مصنوعی دوبعدی

بلوک	X_{min}	X_{max}	Z_{min}	Z_{max}	مقاومت ویژه (Ωm)
۱	۴۵	۷۵	۱۱	۲۶	۵۰
۲	۱۴۰	۱۶۵	۱۳	۴۳	۴۰۰
۳	۲۰۰	۲۳۰	۳	۸	۱۰



شکل ۴. (الف) مدل مصنوعی دوبعدی حاصل از نرم‌افزار Res2Dmod.

مدل حاصل از وارون‌سازی نرم‌افزار DCIP2D (ب) و Res2Dinv (پ)

میزان تباین مقاومت‌ویژه بین بلوک‌ها ۱، ۲ و ۳ با زمینه به صورت ۵۰، ۴۰۰، ۱۰ می‌باشد. به داده‌های مصنوعی ۳ درصد نوفه اضافه شد.

۵- وارون‌سازی داده‌های واقعی

با توجه به مطالعات زمین‌شناسی مشخص شد که عمده واحدهای سنگی موجود در محدوده مورد مطالعه را سنگ‌های آهکی مرمریتی شده به سن پالئوزوئیک تشکیل می‌دهند؛ که قسمتی از کانسار (اگزواسکارن) را در بر دارد و این سنگ‌ها معمولاً مقاومت ویژه بالایی از خود نشان می‌دهند. همچنین بخش گسترده‌ای از سنگ‌های دگرگونی این ناحیه را به صورت اسلیت، فیلیت و شپست تشکیل می‌دهند؛ که همراه با سنگ‌های آذرین دگرگون شده در منطقه برونزد دارند. به دلیل وجود توده پلی‌متال و وجود یون‌های فلزی که به صورت رگه در ذخیره پلی‌متال حضور دارند (به دلیل وجود پیریت، کالکوپیریت و سایر عناصر فلزی در ذخیره پلی

قطبش‌القایی این پروفیل، شکل ۸-ب اگر با توجه به شواهد زمین‌شناسی بخش‌های سبز تا زرد و قرمز رنگ بی‌هنجاری در نظر گرفته شوند، تقریباً از ایستگاه ۸۰ تا ۱۰۰ بی‌هنجاری وجود دارد؛ که بیشترین شدت بی‌هنجاری از ایستگاه ۳۰ تا ۹۰ در شمال به طول ۶۰ متر کشیده شده است.

با توجه به شکل ۱۰-الف، بر روی مدل مقاومت ویژه پروفیل ۶، بخش مقاوم بارنگ قرمز از ایستگاه ۱۲۰ تا ۶۰ ادامه داشته و مشابه پروفیل ۵ احتمالاً در ایستگاه ۱۲۰ تا ۴۰- برنزد دارد. روی این بخش آهکی مقدار کمی خاک و به احتمال زیاد در زیر و طرفین آن، بخشی با مقاومت ویژه کم با رنگ آبی و احتمالاً از جنس شیست قرار گرفته است. بر روی مدل قطبش‌القایی این پروفیل سه بخش به رنگ‌های زرد تا قرمز با بارپذیری بالا به لحاظ شدت بی‌هنجاری در فاصله ایستگاه‌های ۱۲۰- تا ۱۱۰ قابل مشاهده است و احتمالاً در ایستگاه‌های ۴۰- تا ۱۰- و در فاصله ایستگاه‌های ۲۰ تا ۷۰ در سطح زمین برنزد دارد.

۵-۲-تفسیر مقاطع مدل‌سازی شده با نرم‌افزار Res2Dinv

نتیجه وارون‌سازی هموار در راستای پروفیل ۵ در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، مشابه با نتایج بدست آمده از نرم‌افزار DCIP2D، با توجه به مدل‌های حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی شکل ۹ الف و ب، از ایستگاه ۸۰- در جنوب تا ایستگاه ۸۰ در شمال بخشی با مقاومت‌ویژه بالا بارنگ قرمز دیده می‌شود؛ که منطبق بر سنگ‌های آهکی منطقه مورد مطالعه می‌باشند و احتمالاً این بخش مقاوم در فاصله ایستگاه‌های ۸۰- تا ۴۰- و همچنین در فاصله ایستگاه‌های ۴۰ تا ۸۰ در شمال در سطح زمین برنزد دارد. همچنین یک بخش مقاوم دیگر نیز از ایستگاه ۸۰ به طول تقریبی ۴۰ متر در عمق ۵۰ متر قابل مشاهده است. بخش‌های سبز تا زرد و قرمز بر روی مدل الکتریکی قطبش‌القایی که بیانگر بارپذیری بالا می‌باشند، از ایستگاه ۸۰- در جنوب آغاز و تا ایستگاه ۱۰۰ امتداد یافته است؛ که با توجه به شواهد زمین‌شناسی این بخش را می‌توان بی‌هنجاری در نظر گرفت؛ به طوری که بیشترین شدت بی‌هنجاری در حد فاصل ایستگاه‌های ۱۰ تا ۱۰۰ شمالی می‌باشد و یک بی‌هنجاری ضعیف‌تر با رنگ سبز بین ایستگاه‌های ۸۰- تا ۱۰- در عمق ۱۰ تا ۴۰ متری نیز قابل مشاهده است. شکل ۱۱ نتیجه وارون‌سازی روش هموار در امتداد پروفیل ۶ را نشان می‌دهد. مشابه با نتایج بدست آمده از نرم‌افزار DCIP2D، بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل بخش مقاوم در فاصله ایستگاه‌های ۱۲۰- تا ۴۰- برنزد داشته و سپس به سمت شمال دوباره از ایستگاه صفر تا ۶۰ به احتمال زیاد قابل مشاهده است و تا ایستگاه ۶۰ در شمال نیز ادامه می‌یابد. بر روی مدل قطبش‌القایی این پروفیل، شکل ۱۱-ب، اگر بخش‌های زرد تا قرمز را بخش‌های مورد نظر به لحاظ شدت بی‌هنجاری در نظر گرفته شوند؛ یک بخش بین ایستگاه ۱۰۰- تا ۲۰- قابل جداسازی است. بخش دیگری که از گستردگی و شدت بیشتری هم برخوردار است،

متال که به صورت رگه‌ای هم می‌تواند وجود داشته باشند)، این سنگ‌ها عموماً مقاومت ویژه کمی از خود نشان می‌دهند. در نتیجه برای تعیین وضعیت قرارگیری توده‌ها، با تلفیق نتایج حاصل از روش مقاومت‌ویژه با روش قطبش‌القایی می‌توان به نتیجه رسید. در منطقه مورد مطالعه با توجه به شکل ۵، برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در قالب ۷ پروفیل موازی با یکدیگر و عمود بر امتداد کانی‌سازی احتمالی و در جهت شمالی-جنوبی به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر با حداقل فاصله الکترودی ۲۰ متر و حداکثر تا ۸ پرش با آرایه دوقطبی-دوقطبی در شبکه مستطیلی شکل با ابعاد ۳۵۰ در ۴۰۰ متر در ۱۲۹ ایستگاه برداشت شد. به منظور وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و قطبش‌القایی در راستای ۴ پروفیل با استفاده از نرم‌افزار DCIP2D (روش لی-اولدنبِرگ) ابتدا فایل‌های ورودی نرم‌افزار آماده و تصحیحات لازم نیز صورت گرفت. همچنین نتیجه وارون‌سازی در راستای پروفیل‌های ۵ و ۶ با استفاده از نرم‌افزار Res2Dinv (روش هموار) انجام شد.

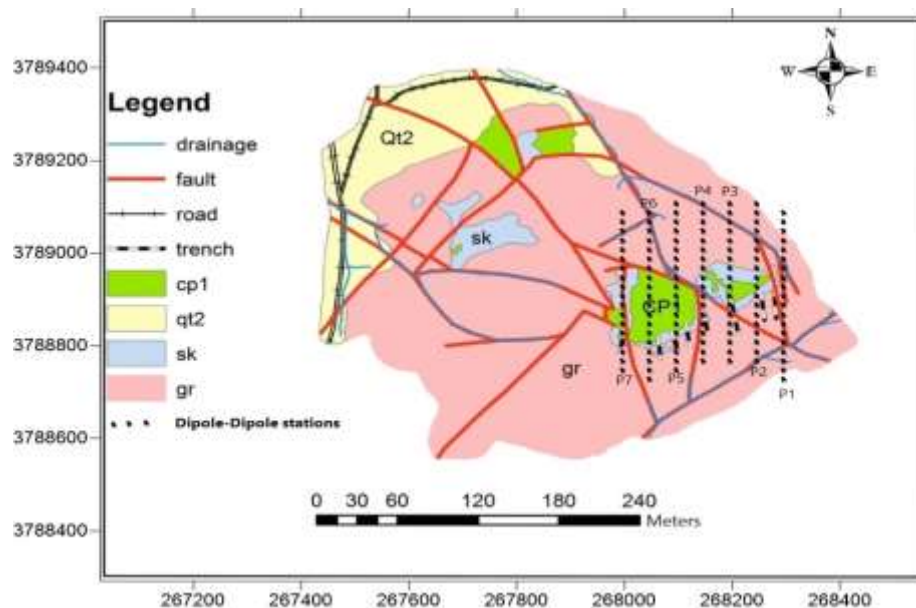
۵-۱-تفسیر مقاطع مدل‌سازی شده با نرم‌افزار DCIP2D

بر اساس مقطع حاصل از وارون‌سازی با استفاده از روش لی-اولدنبِرگ با توجه به شکل ۶، در امتداد پروفیل ۲، بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل شکل ۶-الف از ایستگاه ۱۰ تا ۹۰ سه بخش مقاوم بارنگ قرمز تا زرد با انفصال کوچکی از هم دیده می‌شوند که می‌توان آن‌ها را منطبق بر سنگ‌های آهکی دانست. بخش‌های آبی‌رنگ با مقاومت‌ویژه کم که می‌توان آن‌ها را منطبق بر شیست در نظر گرفت از ابتدا تا انتهای پروفیل قابل مشاهده هستند. بین ایستگاه‌های ۲۰- تا صفر نیز در عمق مقدار مقاومت‌ویژه افزایش یافته است. بر روی مدل قطبش‌القایی این پروفیل، شکل ۶-ب بخش با بارپذیری بالا بارنگ قرمز از ایستگاه ۱۰ تا ۷۰ به طول ۶۰ متر دیده می‌شود.

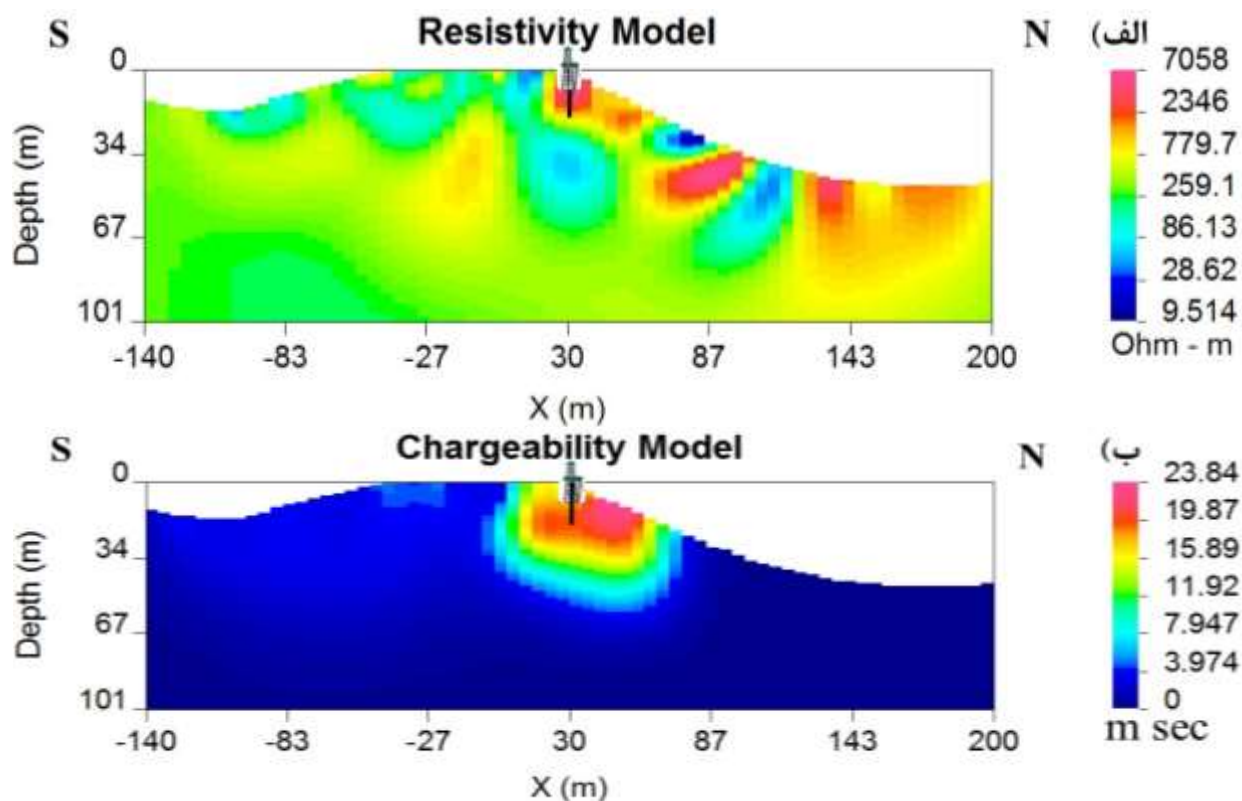
با توجه به شکل ۷-الف بر روی مدل مقاومت ویژه پروفیل ۴، بخش مقاوم بارنگ زرد تا قرمز از حدود ایستگاه ۸۰- شروع شده و تا ایستگاه ۱۰۰ ادامه داشته است. این بخش در عمق کم شروع شده و تا عمق زیاد (حدود ۸۰ متر) ادامه می‌یابد. در این پروفیل بخش‌های مقاوم با بخش‌های با بارپذیری بالا انطباق دارد؛ که این ممکن است ناشی از تغییر نوع کانی‌سازی یا سنگ میزبان کانی‌سازی بر روی این پروفیل باشد. بر روی مدل قطبش‌القایی این پروفیل، شکل ۷-ب مقدار بارپذیری بین ایستگاه ۲۰- و ۹۰ بالا بوده است.

با توجه به شکل ۸-الف بر روی مدل مقاومت ویژه پروفیل ۵، بخش قرمز رنگ با مقاومت‌ویژه بالا که منطبق بر سنگ آهکی در محدوده است؛ نشان داده شده است. احتمالاً بخش مقاوم بین ایستگاه‌های ۸۰- تا ۴۰- در سطح زمین برنزد داشته و سپس به سمت شمال به عمق کشیده شده و دوباره بین ایستگاه ۴۰ تا ۸۰ شمالی احتمالاً برنزد داشته است. بی‌هنجاری مقاوم با رنگ سبز در انتهای این پروفیل بعد از یک انفصال از ایستگاه ۸۰ به سمت ۱۵۰ در عمق زیاد دیده می‌شود؛ اما بر روی مدل

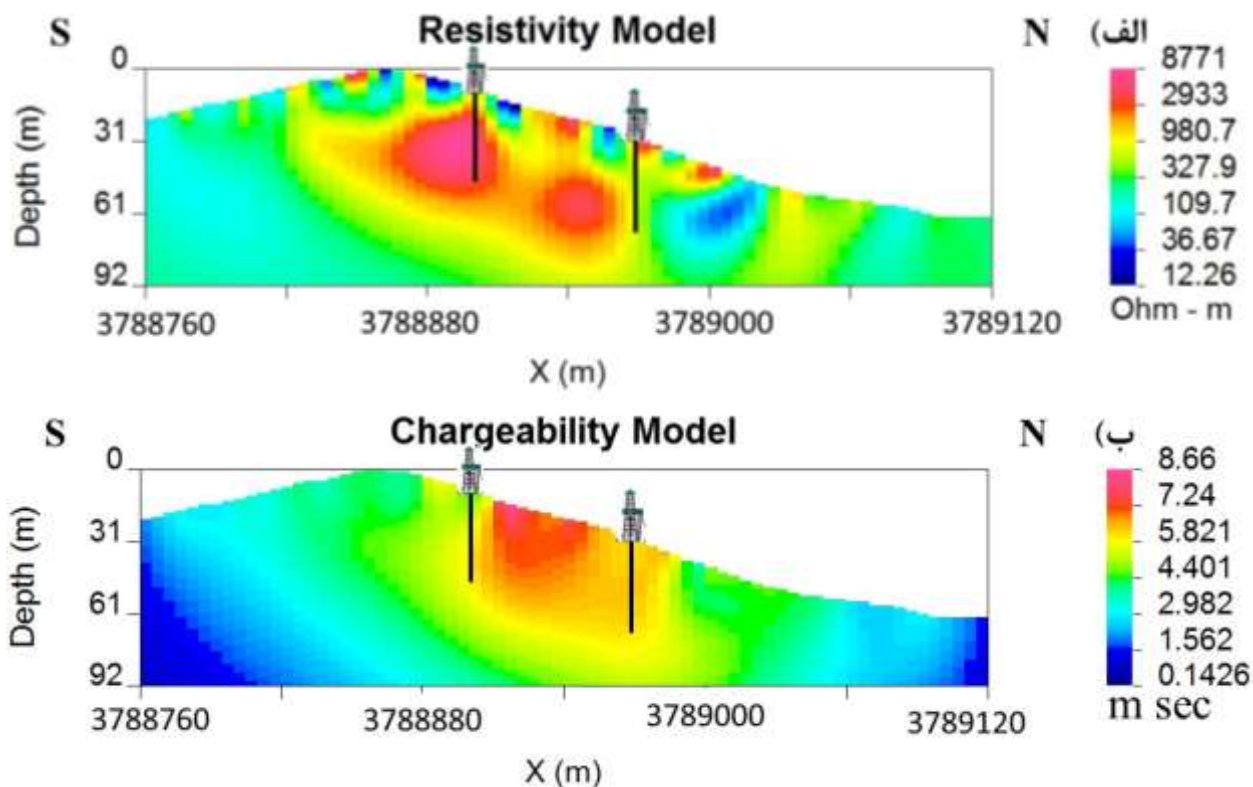
از زیر ایستگاه ۲۰- در عمق شروع و سپس با شدت بیشتر بین ایستگاه ۲۰ تا ۷۰ ادامه و برونزد پیدا کرده و تا انتهای پروفیل نیز قابل ردیابی است.



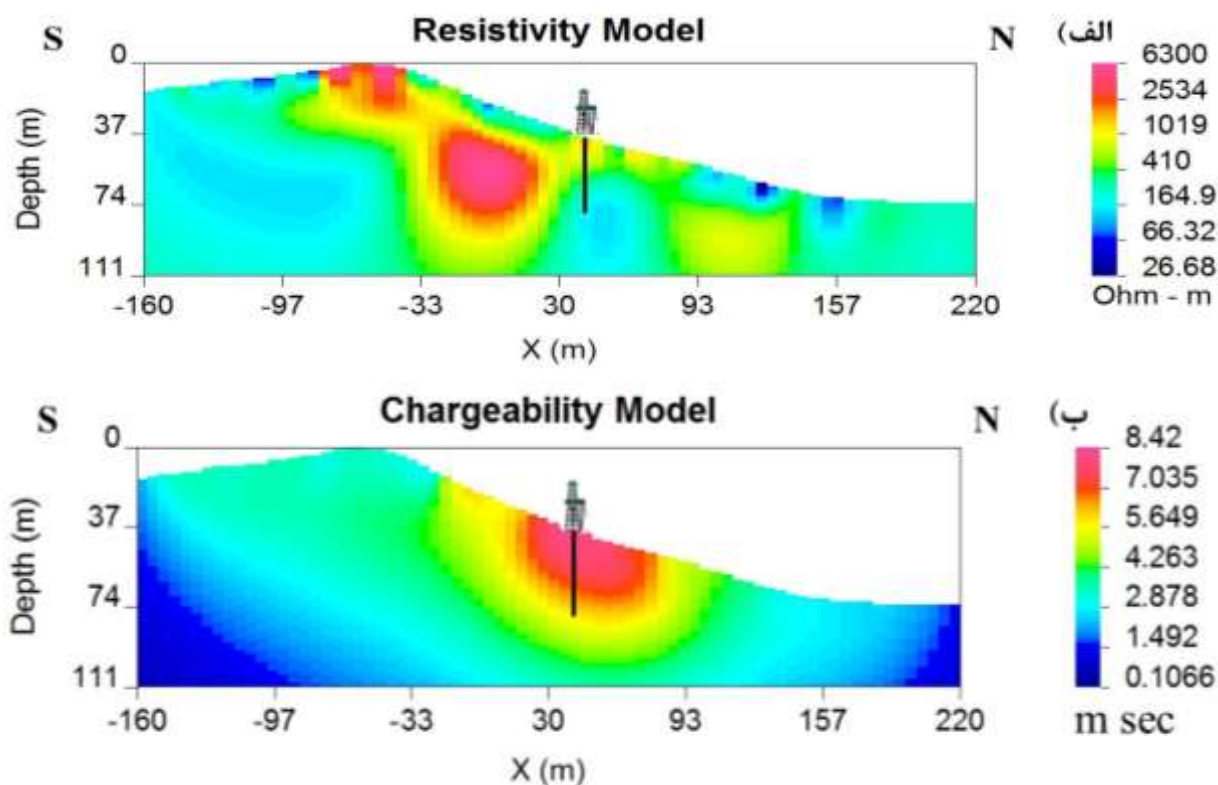
شکل ۵. موقعیت قرارگیری ترانسه‌ها نسبت به نقاط برداشت IP-RES و ساختارهای گسله



شکل ۶. مدل الکتریکی بدست آمده از نرم افزار DCIP2D در راستای پروفیل ۲ به همراه توپوگرافی، (الف) مقاومت ویژه و (ب) قطبش القایی

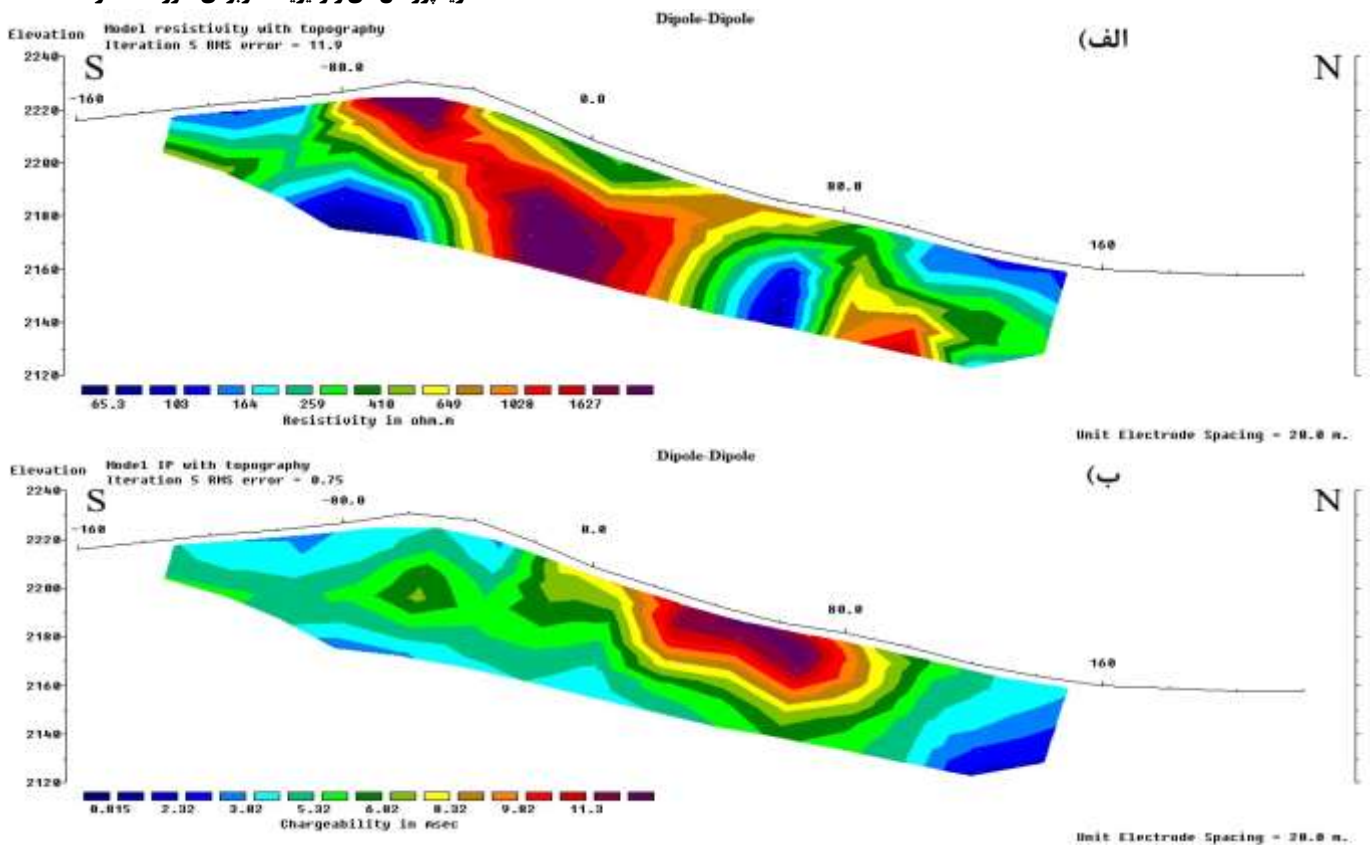


شکل ۷. مدل الکتریکی بدست‌آمده از نرم‌افزار DCIP2D در راستای پروفیل ۴ به همراه توپوگرافی، (الف) مقاومت ویژه و (ب) قطبش القایی

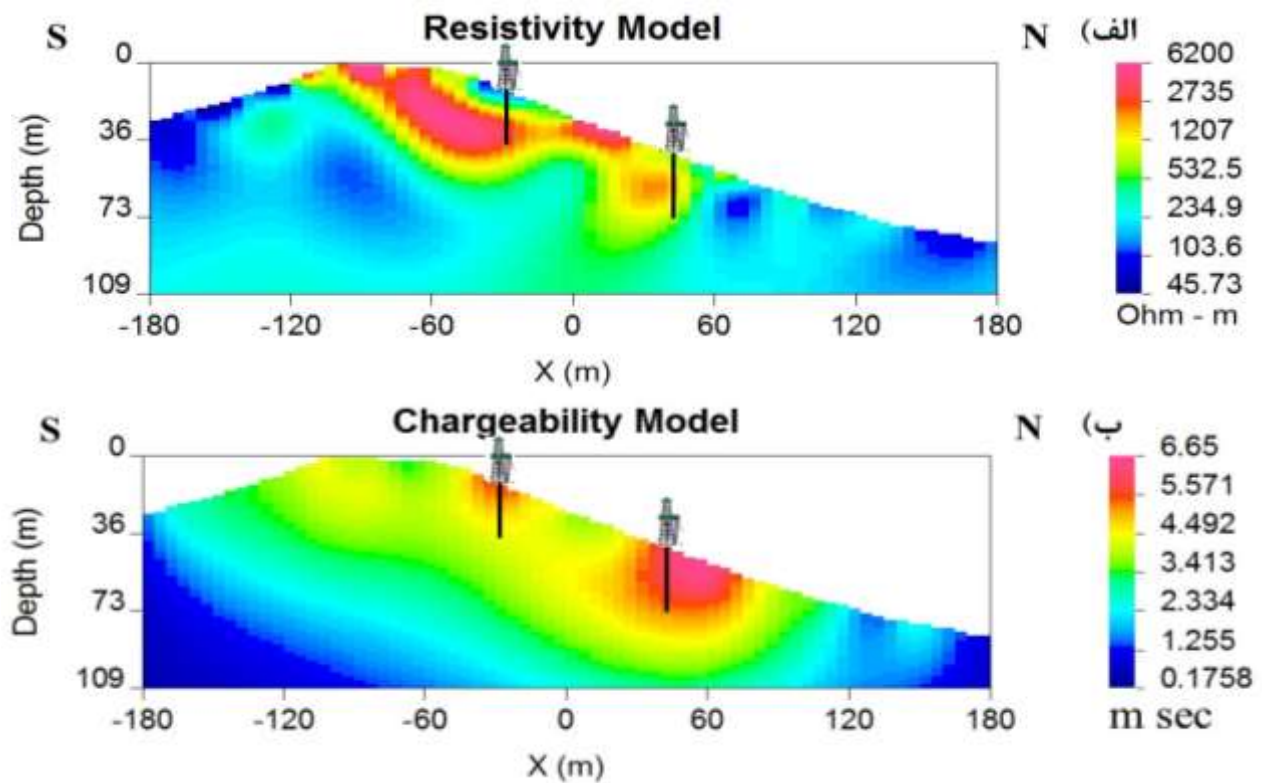


شکل ۸. مدل الکتریکی بدست‌آمده از نرم‌افزار DCIP2D در راستای پروفیل ۵ به همراه توپوگرافی، (الف) مقاومت ویژه و (ب) قطبش القایی

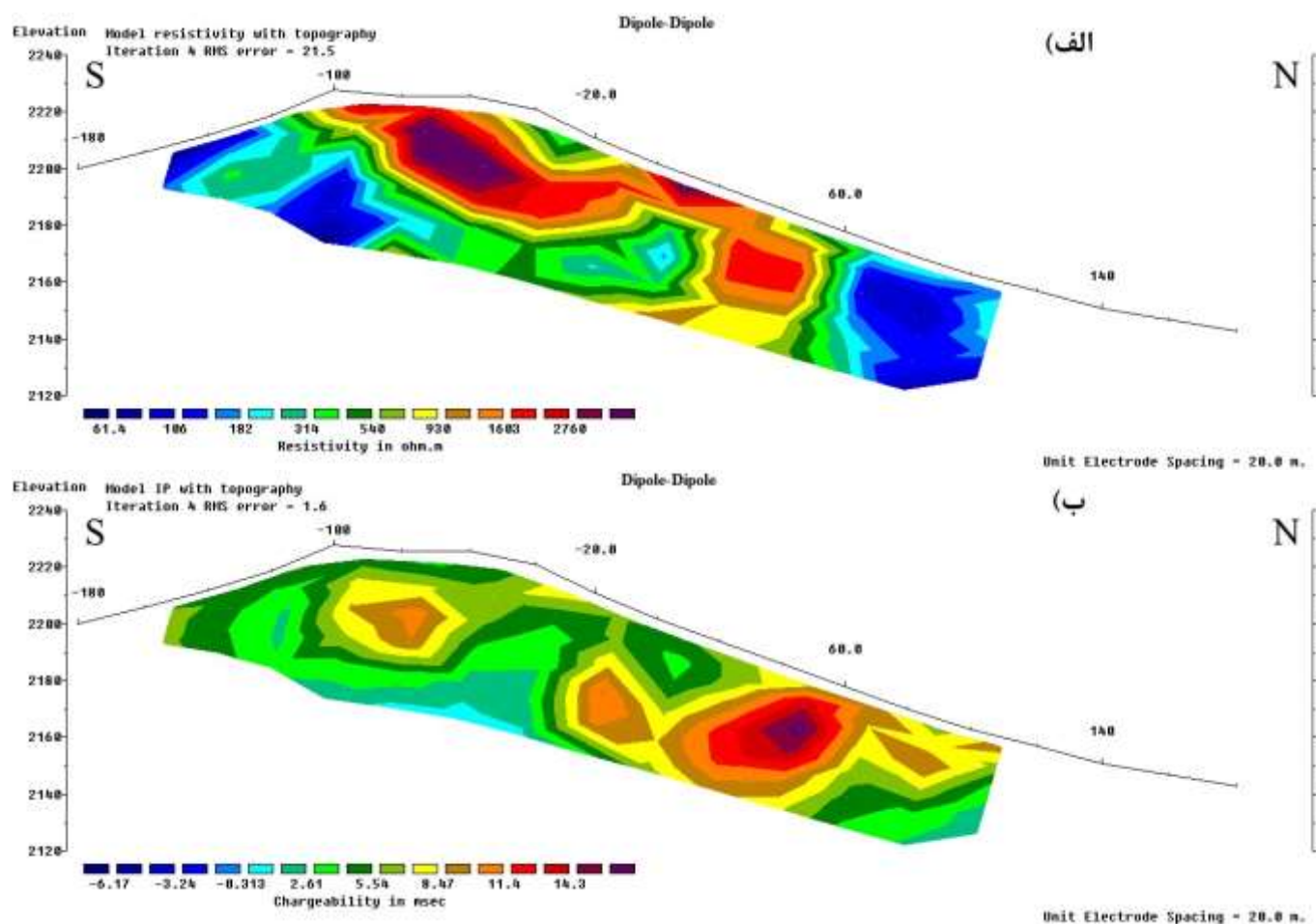
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۹، شماره ۲، ۱۴۰۲.



شکل ۹. مدل الکتریکی بدست آمده از نرم افزار Res2Dinv در راستای پروفیل ۵ به همراه توپوگرافی، (الف) مقاومت ویژه و (ب) قطبش القایی



شکل ۱۰. مدل الکتریکی بدست آمده از نرم افزار DCIP2D در راستای پروفیل ۶ به همراه توپوگرافی، (الف) مقاومت ویژه و (ب) قطبش القایی



شکل ۱۱. مدل الکتریکی بدست آمده از نرم افزار Res2Dinv در راستای پروفیل ۶ به همراه توپوگرافی، (الف) مقاومت ویژه و (ب) قطبش القایی

شامل رگه های مس از جنس مالاکیت و کالکوپیریت است؛ برداشت های قطبش-القایی و مقاومت ویژه عمود بر امتداد ساختارها در راستای شمال-جنوب انجام شد؛ تا وضعیت قرارگیری توده ها در عمق مشخص شود. با توجه به شکل های ۶ تا ۱۲، یک توده کانی سازی از سطح زمین شروع شده و در بعضی موارد تقریباً تا اعماق ۳۰ تا ۶۰ متر نیز ادامه داشته است. همچنین توده هایی مجزا از هم با شیب و عمق متفاوت که ممکن است در اثر گسل از هم جدا شده باشند؛ به خوبی تفکیک شده اند. تاکنون وارون-سازی داده های قطبش-القایی و مقاومت ویژه با استفاده از روش لی و اولدنبِرگ کمتر انجام شده است. در این تحقیق ابتدا با استفاده از مدل سازی پیشرو صحت سنجی الگوریتم های لی-اولدنبِرگ و هموار انجام شد. نتایج حاصل از وارون سازی ها نیز تطابق خوبی با مدل اولیه حاصل از مدل سازی پیشرو داشت. در نهایت وارون سازی داده های منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم های مذکور انجام شد. با مقایسه مدل های بدست آمده از وارون سازی دوبعدی با روش های هموار و لی و اولدنبِرگ، می توان تطابق خوبی را در این مدل ها مشاهده کرد. هر چند روش هموار در مدل سازی با ساختارهای نزدیک به لبه ها و مرزها ضعیف عمل کرده است. همچنین حد و حدود مناطق کانی سازی شده بدست آمده با روش

با استفاده از نتایج حاصل از وارون سازی داده های مقاومت ویژه و قطبش-القایی منطقه مورد مطالعه، نقاط احتمالی مناسب حفاری بر روی شکل های ۶، ۷، ۸ و ۱۰ نشان داده شده و موقعیت آنها در جدول ۲ نیز آمده است.

جدول ۲. موقعیت نقاط حفاری پیشنهاد شده در منطقه مورد مطالعه

پروفیل	شیب (درجه)	موقعیت ایستگاه برداشت صحرائی	عمق حفاری (m)
P2	۹۰	۳۰	۲۵
P4	۹۰	.	۴۰
P4	۹۰	۷۰	۴۰
P5	۹۰	۴۵	۳۰
P6	۹۰	-۳۰	۳۰
P6	۹۰	۴۰	۴۰

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در منطقه مورد مطالعه، با توجه به این مطلب که توده های کانی سازی

نوروزی، غ.، غلامی، س.، ۱۳۸۴، تحلیل و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (RS, IP, M) در محل اندیس معدنی مس سوناجیل، نشریه دانشگاه تهران ۲ (۳۹).

ولیزاده، م.و.، ۱۳۵۳، تعیین سن مجموعه نفوذی همدان با روش پتاسیم-آرگون، پردیس علوم، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، ایران.

Alavi, M., and Mahdavi, M.A., 1994, Stratigraphy and structures of the Nahavand region in western Iran, and their implications for the Zagros tectonics. Geological Magazine, 131, 43-47.

Alilou, s., Norouzi, Gh.H, Doulati, F., and Abedi, M., 2014, Application of magnetometry, electrical resistivity and induced polarization for exploration of polymetal deposits, a case study: Halab Dandi, Zanjan, Iran.

Bauman, P., 2005, 2-D resistivity surveying for hydrocarbons- a primer. CSEG Recorder April 2005, pp. 25-33.

Chambers, J.e., Loke, M.H., Ogilvy, R.D., Meldrum, P.I., 2003, Non- invasive monitoring of DnaPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography. Journal of contaminant Hydrology 68 (1-2), 1-22.

Chambers, J.C., Kuras, O., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D., Hollands, J., 2006, Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. Geophysics 71 (6), B231-B239.

Dey, A., Morrison, H.F., 1979, Resistivity modeling for arbitrarily shaped three dimensional structure. Geophysics, 44 (4), pp. 753-780.

Daily, W., Owen, E., 1991, Cross- borehole resistivity tomography. Geophysics 56 (8), 1228-1235.

Dahlin, T., 2001, The development of DC resistivity imaging techniques. Computers and Geosciences 27 (9), 1019-1029.

Fedi, Maurizio, and Antonio Rapolla. 1999, 3-D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution, Geophysics, 64, 452-60.

Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1994, Electrical imaging in archaeology. Journal of Archaeological science 21 (2), 153-158.

مدل‌سازی لی و اولدنبرگ نسبت به روش هموار دقیق‌تر بوده و از این نظر برای پیشنهادهای حفاری مناسب‌تر می‌باشند.

۷- منابع

اسکویی، ب.، دریجانی، م.، (۱۳۹۱)، مدل‌سازی و برگردان دوبعدی داده‌های مغناطیسی منطقه شه‌میرزاد استان سمنان به‌منظور تعیین عمق و شکل کانسارهای آهن. مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۶، شماره ۳ صفحه ۷۲-۸۲.

زارع، م.، بیرانوند، ا.، علوی، ح.، ۱۳۹۳، مدل‌سازی به روش هموار جهت پردازش داده‌های IP/Res، کنفرانس ملی علوم زمین.

جعفری، ف.، ۱۳۹۰، طرح اکتشاف کانسار پلی متال در منطقه عشوند نهاوند استان همدان، گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

حسینی دوست، ج.، مهدوی، م.، علوی، م.، ۱۳۷۰، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نهاوند، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

علیزاده، م.، فتحیانپور، ن.، ۱۳۸۹، ارائه الگوریتم اصلاح‌شده مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی به روش شبه نیوتنی جهت داده‌های مقاومت سنجی، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران (۱۳۸۹)، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

مجیدی، ب.، عمیدی، س.م.، ۱۳۵۵، شرح نقشه زمین‌شناسی چهارگوش همدان گزارش داخلی سازمان زمین‌شناسی کشور.

مرادزاده، ع.، عرب امیری، ع.، ۱۳۸۳، مدل‌سازی وارون پارامتری داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه اندیس معدنی پاینده، مجموعه مقالات هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

موحدی، م.، ۱۳۸۹، گزارش زمین‌شناسی منطقه نهاوند در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

میرزائزاد، ی.، حفیظی، م.، ک.، یوسفی، پ.، ۱۳۸۹، اکتشاف مس به روش IP و مقاومت ویژه در منطقه قلعه ریگی، استان کرمان، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران (۱۳۸۹)، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

محمدی ویژه، م.، جمالی، ف.، عرب امیری، ع.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۹۲)، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه الکتریکی به‌منظور اکتشاف ذخایر پلی متال در منطقه کبودان. مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع

- Environmental Geophysics, 2nd edition. John Wiley & Sons, England.
- Storz, H., Storz, W., Jacobs, F., 2000, Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the Earth's upper crust. *Geophysical Prospecting* 48 (3), 455-471.
- Stocco, S., Godio, A., and Sambuelli, L., 2009, Modelling and compact inversion of magnetic data: A Matlab code, *computers & Geosciences*, 35, 2111-2118.
- Samuel, R.M., Richard, S., Robert, B., 2016, Ground resistivity method and DCIP2D forward and inversion modelling to identify alteration at the Midwest uranium deposit, northern Saskatchewan, Canada. *Exploration Geophysics*.
- Telford, W., Geldart, L., & sheriff, R. 1990, *Applied Geophysics*, New York: Cambridge University Press, 744.
- Tsokas, G.N., Tsourlos, P.I., Vargemezis, G., Novack, M., 2008, Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea church in Athens. *Archaeological Propection* 15 (1), 47-61.
- White, R.M.S., Collins, S., Denna, R., Hee, R., Brown, P., 2001, A new survey design for 3D IP modelling at Copper hill. *Exploration Geophysics* 32 (4), 152-155.
- Wilson, S.R., Ingham, M., McConchie, J.A., 2006. The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. *Journal of Hydrology* 316 (1-4), 301-312.
- Williams, N.C., 2008, Geologically-constrained UBC-GIF gravity and magnetic inversions with examples from the Agnew-Wiluna greenstone belt, Western Australia (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Loke, M.H., Lane Jr., J.W., 2004, Inversion of data from electrical resistivity imaging survey in water-covered areas. *Exploration Geophysics* 35 (4), 266-271.
- Linderholm, P., Marescot, L., Loke, M.H., Renaud, P., 2008, Cell culture imaging using micro impedance tomography. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 55 (1), 138-146.
- Legault, J.M., Carriere, D., Petrie, L., 2008, Synthetic model testing and distributed acquisition dc resistivity results over an unconformity uranium target from the Athabasca Basin, northern Saskatchewan. *The Leading Edge* 27 (1), 46-51.
- Milsom, J., 2003, *Field Geophysics*, Vol3, John Wiley& Sons Ltd, UK, pp 232.
- Oldenburg, D.W., and Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data, *Geophysics*, 59, 1327-1341.
- Page, L.M., 1968. Use of the electrical resistivity method for investigating geologic and hydrogeologic conditions in Santa Clara County, CA. *Ground Water* 6 (5), 31-40.
- Phillips, N.D., 2002, Geophysical inversion in an integrated exploration program: Examples from the San Nicolas deposit.
- Rucker, D., loke, M.H., Levitt, M.T., Noonan, G.E., 2010, Electrical resistivity characterization of an industrial site using long electrodes. *Geophysics* 75 (4), WA95-WA104.
- Rucker, D.F., Noonan, G., Greenwood, W.J., 2011, Electrical resistivity in support of geological mapping along the Panama Canal. *Engineering Geology* 117 (1-2), 121-133.
- Reynolds, J.M., 2011, *An Introduction to Applied and*