

مدل سازی ژئوفیزیکی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت اکتشاف سنگ های ساختمانی، مطالعه موردی: تراورتن آتشکوه

محمدعلی طالبی^۱، میثم عابدی^{۲*}، علی مرادزاده^۳ و احمد افشار^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران
۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

* نویسنده مسئول مکاتبات: maysamabedi@ut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

محدوده اکتشافی مورد مطالعه در شهر نیمور استان مرکزی و در ۱۵ کیلومتری شرق محلات واقع شده است. این محدوده از نظر تقسیم بندی زمین شناسی در مرز بین زون ساختاری سنج-سیرجان و ارومیه دختر قرار گرفته است. واحدهای رخنمون یافته در محدوده اغلب شامل توالی های شیل، مارن، ماسه سنگ، کنگلومرا و آهک است که لایه بندی ها با امتداد (شمال) غربی- (جنوب) شرقی با شیب به سمت شمال شرق است. واحد تراورتن با سن پلیوکواترن با شیب کم به صورت دگرشیب روی این واحدهای زمین شناسی قرار گرفته است. ابتدا به منظور بررسی کارایی روش ژئوالکتریک، اندازه گیری های آزمایشگاهی پارامتر مقاومت ویژه الکتریکی روی نمونه هایی از ماده معدنی و باطله های همراه انجام شد و با توجه به قابل قبول بودن نتایج آزمایشگاهی، از مطالعات ژئوفیزیکی به روش های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی با آرایش ترکیبی دو قطبی- دو قطبی و قطبی- دو قطبی استفاده شد. برداشت ها در امتداد سه پروفیل و با فواصل الکترودی ۱۵ و ۱۰ متری و تعداد ۸۵۰ نقطه (قرائت) توسط دستگاه ژئوالکتریک GDD با توان ۳۶۰۰ وات انجام شده است. هدف از این مطالعات، اکتشاف ذخایر احتمالی تراورتن می باشد که در زیر روباره و یا در برخی مناطق توسط خاک و لاشه حاصل از فعالیت های قدیمی معدنکاری مدفون شده است. داده های خام صحرایی بعد از پردازش، در امتداد هر پروفیل به صورت دوبعدی معکوس شدند تا زون های محتمل از رخداد عدسی های تراورتن بارز شوند. نتایج مدل سازی معکوس دوبعدی به صورت سه بعدی نیز نمایش داده شد. با در نظر گرفتن نتایج آنالیز آزمایشگاهی خاصیت مقاومت ویژه الکتریکی واحدهای متنوع زمین شناسی موجود در محدوده آتشکوه، بعد از ساخت مدل بلوکی برای هر پروفیل و تخمین مقادیر مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، یک مدل زمین شناسی به هریک از سه پروفیل برداشت نسبت داده شد. با توجه به مقادیر بسیار بالای مقاومت ویژه بر روی رخنمون تراورتن در امتداد پروفیل ۳، تنها یک مورد آنومالی در مقطع پروفیل ۱ و در تراز عمقی ۱۵ تا ۲۰ متر تشخیص داده شد که متعاقباً برای بررسی بیشتر نیاز به حفاری و مطالعات زمین شناسی دقیق تر در نقطه مورد نظر می باشد. همچنین کیفیت مدل های زمین شناسی پیشنهاد شده از روی خواص ژئوالکتریک با حفر دو گمانه اکتشافی در محدوده مورد تأیید قرار گرفت. نتایج حاکی از این است که برداشت های ژئوالکتریک اطلاعات بارزشی جهت اکتشاف سنگ های ساختمانی تراورتن تهیه خواهد کرد.

ژئوالکتریک

تراورتن

مقاومت ویژه الکتریکی

بارپذیری الکتریکی

آتشکوه

۱- مقدمه

هدف از ژئوالکتریک تعیین خواص الکتریکی زیرسطحی با اندازه گیری بر روی سطح زمین یا درون گمانه است. از این اندازه گیری ها می توان مقاومت ویژه (Res) و بارپذیری الکتریکی (IP) واقعی سطح زیرین را تخمین زد. این خواص به پارامترهای مختلف زمین شناسی مانند محتوای مواد معدنی و مایعات، تخلخل و درجه اشباع آب در سنگ مربوط می شود. بررسی های ژئوالکتریکی برای چندین دهه در تحقیقات هیدروژئولوژی، معدن و ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته است. اخیراً، برای بررسی های زیست محیطی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Aristodemoe and Thomas-Betts, 2000; Binley and Daily, 2003; De Carlo et al., 2013). نقشه برداری الکتریکی از روش های رایج ژئوفیزیکی است که برای اندازه گیری خصوصیات الکتریکی اجسام یا سنگ ها به ویژه برای تعیین تفاوت های قابل اندازه گیری بین سنگ های غنی شده و تهی شده توسط فرایند کانی سازی، از طریق اندازه گیری مقاومت الکتریکی و شارژ پذیری، استفاده می شود (Gadallah and Fisher, 2009). سلیمانی و همکاران (۱۳۹۷). مبنای هر روش ژئوفیزیکی، شناسایی صحیح تباین های ناشی از خصوصیات مختلف ژئوفیزیکی اهداف مورد نظر می باشد (Telford et al., 1990; Dentith and Mudge, 2014). در بسیاری از موارد اکتشاف مواد معدنی، برای کاهش عدم قطعیت تفسیر و مدل سازی داده های متنوع ژئوفیزیکی، ادغام و تلفیق چندین روش ژئوفیزیکی مفید واقع خواهد شد (Ramazi and Mostafaie, 2013). همکاران (۱۳۹۹). به دلیل بهینه سازی در هزینه و زمان برنامه های اکتشاف مواد معدنی، اخیراً استفاده از بررسی های ژئوفیزیکی در تحقیقات اکتشافی کم عمق و عمیق در حال افزایش است. همان طور که گفته شد، معمولاً از روش های ژئوفیزیکی تلفیقی برای به دست آوردن نتایج قابل قبول استفاده می شود (Mostafaie and Ramazi, 2015). هدف اصلی روش های بارپذیری الکتریکی (IP) و مقاومت ویژه الکتریکی (Res)، مکان یابی کردن بهترین نقاط حفاری برای اهداف اکتشافی می باشد (Ferdows and Ramazi, 2015; Mostafaie and Ramazi, 2018).

ترکیبی از بررسی های الکتریکی به طور گسترده و متمرکز برای اهداف مختلف مانند اکتشاف مواد معدنی، مطالعات آب و آلودگی، تحقیقات مهندسی و زمین شناسی و غیره انجام شده است. از جمله کاربردهای متعدد می توان به توصیف نهشته های پلی متال (Yang et al., 2008)، مدیریت پسماند در مطالعات هیدروکربن (Cardarelli and Di Fillipo, 2009)، کانی سازی مس پورفیری (Flores and Peralta-Ortega, 2009; Daneshvar Saein et al., 2012)، اکتشاف منگنز (Ramazi and Mostafaie, 2013)، مطالعات آب نهشته های (Kozhevnikov et al., 2014; Madun et al., 2018)، قیر معدنی (Gurin et al., 2015) Au-Ag Mashhadi et al., 2017).

(2017)، مطالعه آلاینده های حاصل از زغال شویی (Doulati Ardejani et al., 2008)، باطله های معدن Au-Cu (Gomez et al., 2010)، مطالعات آلودگی (Jodeiri Shokri et al., 2016; Lopez-Gonzalez et al., 2019)، شناسایی دگرسانی مواد معدنی (Mashhadi and Ramazi, 2018)، مطالعات باستان شناسی (Allaia et al., 2007) و بررسی سیستم های گسله در سنگ های ساختمانی (Qarqori et al., 2012; Ogretman and Seren, 2014) اشاره کرد.

ژئوالکتریک یک روش مؤثر است که می تواند سطح زیرزمین تا عمق کم را با وضوح بالا تصویرسازی کند. این روش در مطالعات اخیر برای معادن سنگ های ساختمانی مرمر، تراورتن و گرانیت استفاده شده است. مقالات منتشر شده موفقیت آمیز زیادی در این موارد وجود دارد (Medeiros, 1987; Medeiros and Lima, 1990; Barker et al., 1992; Carruthers and Smith, 1992; Grandjean and Goury, 1996; Grasmueck, 1996; Silva et al., 2004; Porsani et al., 2006; Kadioglu, 2008; Yalciner, 2013; Aydin et al., 2005; Billi et al., 2016). همچنین روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی نیز برای تصویربرداری از سطح زیرین در بسیاری از مطالعات زمین شناسی به کار رفته است (Zhou et al., 2000; Chambers et al., 2006; Rucker et al., 2011; Omosanya et al., 2012).

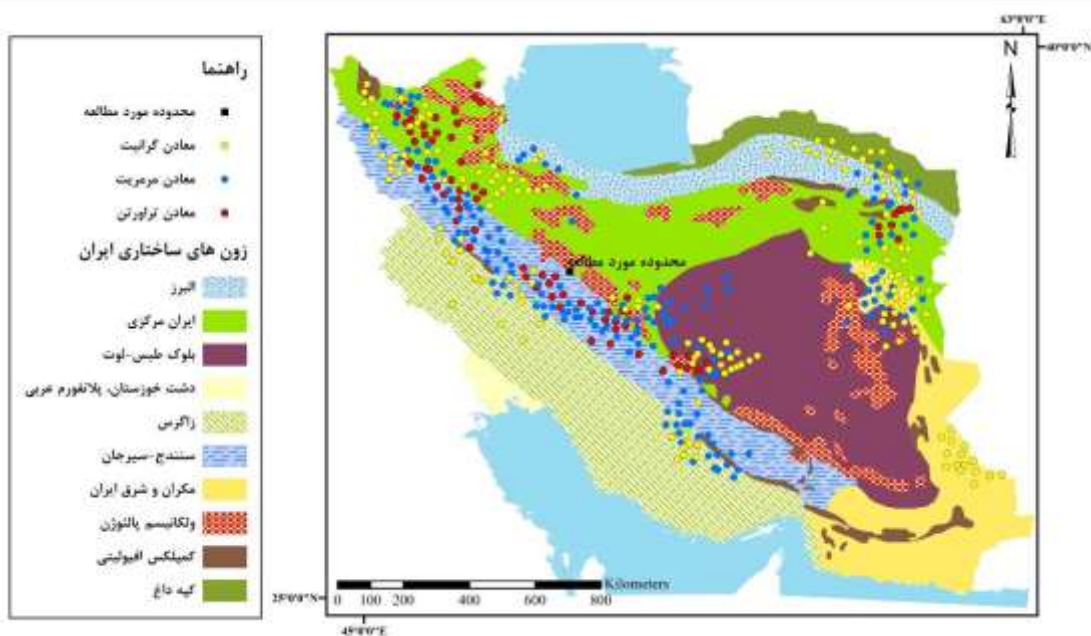
روش های ژئوالکتریک با موفقیت برای شناسایی و نقشه برداری از شکستگی ها در معادن سنگ مرمر توسط Grandjean and Goury (1996) اجرا شده است. هدف از مطالعات آن ها تشخیص سریع مناطق سالم مرمر قابل فروش از مناطق شکسته شده به منظور بهبود مدیریت معدن بود. Kadioglu (2008) با موفقیت از روش ژئوالکتریک برای شناسایی و به نقشه درآوردن شکستگی ها و حفرات در یک لایه مرمر استفاده کرد. Porsani et al. (2006) از روش ژئوالکتریک برای شناسایی شکستگی ها، درزه های پر شده، بلوک های بزرگ و سطح بالایی گرانیت در جنوب برزیل استفاده کردند. Yalciner (2013) با استفاده از ژئوالکتریک، مطالعاتی در مورد هندسه زیرسطحی و ساختارهای داخلی تراورتن در پاموکاله، غرب ترکیه انجام داد. Silva et al. (2004)، از روش های الکترومغناطیسی و ژئوالکتریکی شامل ژئورادار و مقاومت ویژه الکتریکی به منظور توصیف سفره شکسته شده سنگ بستر در شمال برزیل با تلفیق نتایج استفاده کردند. معدن متروک دولریت و محل دفن باطله های معدن با استفاده از روش مقاومت ویژه الکتریکی دو و سه بعدی توسط Chambers et al. (2006) باهدف تعیین هندسه معدن مدفون، نقشه برداری از آلودگی سنگ بستر ناشی از دفن باطله ها و مشخص کردن زمین شناسی ناحیه مورد بررسی قرار گرفت.

کشور ایران از رشته کوه های مرتفع و مناطق کوهستانی منفرد تشکیل یافته که اکثر آن ها از دوران سوم زمین شناسی تکامل خود را باز یافته و از منابع عظیم سنگ های ساختمانی برخوردار شده است. نقشه های زمین شناسی از مناطق مختلف ایران نشان می دهد که این کشور به

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

پراکندگی معادن سنگ ساختمانی ایران را نشان می‌دهد که به‌خوبی با یکدیگر همخوانی داشته و بیانگر ارتباط نزدیک این ساختارها و معادن شناسایی شده می‌باشد. همچنین محدوده مورد مطالعه در شکل مشخص است که در مرز بین زون‌های سهند-سیرجان و ارومیه-دختر واقع شده است.

لحاظ برخورداری از رگه‌های غنی از منابع معدنی به‌ویژه سنگ‌های ساختمانی ارزش اقتصادی نسبتاً بالایی دارد. لذا با توجه به سیاست نظام جمهوری اسلامی ایران در ارتباط با توسعه صادرات غیرنفتی به نظر می‌رسد که توجه بیشتر به ارزش‌های اقتصادی و بهره‌وری بهینه از آن‌ها در رابطه با برنامه‌ریزی صحیح، منابع عظیمی از درآمدهای ارزی نصیب کشور خواهد کرد. شکل ۱ نقشه زون‌های ساختاری ایران به همراه



شکل ۱: نقشه زون‌های ساختاری و پراکندگی معادن سنگ ساختمانی ایران (باز ترسیم از Richards, 2006; Stocklin, 1968, 1977; www.sangyab.com).

تعیین ساختار هندسی زیرسطحی با روش‌های الکتریکی به تفاوت مقاومت‌ویژه الکتریکی سنگ‌های زیرسطحی بستگی دارد. مقاومت الکتریکی سنگ‌ها با توجه به پارامترهای مختلف مانند تخلخل، حفره‌ها و میزان رطوبت متفاوت است.



هدف از مطالعات ژئوفیزیکی در محدوده آتشفشان، اکتشاف ذخایر جدید تراورتن است که در زیر روباره یا در برخی مناطق توسط خاک و لاشه حاصل از فعالیت‌های قدیمی معدنکاری مدفون می‌باشد. برداشت‌های ژئوالکتریکی شامل داده‌های *IP* و *Res* در امتداد سه پروفیل می‌باشد که یکی از پروفیل‌های الکتریکی بر روی یک رخنمون از عدسی تراورتن پیاده شده است تا قابلیت این روش ژئوفیزیکی در شناسایی چنین ساختارهایی ارزیابی شود. در ادامه با توجه به قابلیت بالای این روش در اکتشاف سنگ‌های ساختمانی تراورتن، لایه‌های زمین‌شناسی و متعاقباً تعیین موقعیت و عمق احتمالی ماده معدنی پیشنهاد شد. شایان‌ذکر است مدل زمین‌شناسی پیشنهادی انطباق خوبی با نتایج حفاری در منطقه داشت.

۲- روش تحقیق

روش‌های اکتشافی الکتریکی منحصراً با ناپیوستگی‌های ژئوالکتریکی، گسل‌ها و آب‌های زیرزمینی سازگاری خوبی دارند (Loke and Barker, 1995). در میان این روش‌ها، توموگرافی مقاومت الکتریکی امکان دستیابی سریع به داده‌های صحرایی و به دست آوردن تصاویر دو و یا سه‌بعدی زیرسطحی با وضوح بالا و مناسب برای شناسایی شکستگی‌ها، تغییر مورفولوژی و رطوبت را فراهم می‌کند (Nguyen et al., 2005).

تراورتن و	۸۵
تراونیکس	
باطله	۷۶

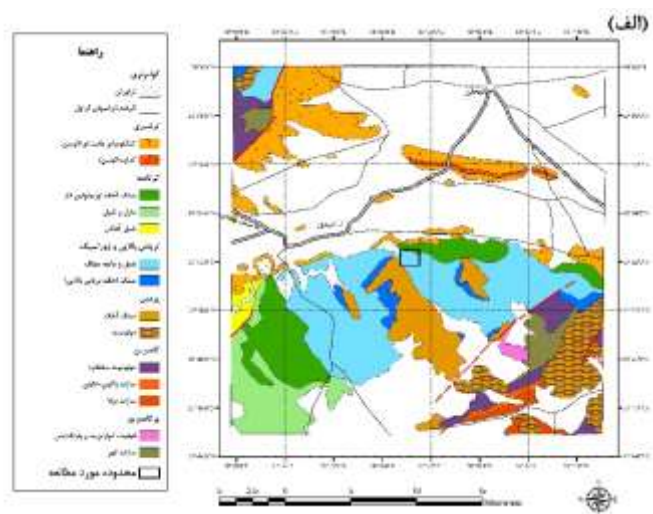


شکل ۲: نمایی از معدن تراورتن آتشکوه (الف) و یکی از سینه کارهای استخراج تراورتن در معدن آتشکوه (ب)

با توجه به اطلاعات صحرایی کسب شده اعم از اطلاعات ژئوفیزیک و نیز اطلاعات زمین شناسی سطحی، ابتدا نقشه های شبه مقطع در امتداد هر مقطع تهیه می شود. این نقشه ها شامل شبه مقاطع بارپذیری و مقاومت ویژه الکتریکی می باشند. همچنین با استفاده از نرم افزار تخصصی *Res2DInv* (Loke, 2004) شبه مقاطع اصطلاحاً مدل سازی دوبعدی شده و به مقاطع زمین شناسی تبدیل می شوند. هنگام مدل سازی از ارتفاع ایستگاه های الکترودی مقاطع برای انجام تصحیحات توپوگرافی استفاده می شود. همچنین در بازدید از معدن آتشکوه، از جاهای مختلف معدن نمونه هایی از تراورتن، سنگ بستر، خاک و لاشه و... برداشت شد و سپس به منظور تعیین خواص فیزیکی (مقاومت ویژه الکتریکی) نمونه ها، اندازه گیری های آزمایشگاهی روی نمونه ها انجام شد که نتایج این اندازه گیری ها در جدول ۱ آورده شده است. آنالیز نمونه ها با استفاده از دستگاه اندازه گیری رسانی مدل *Terraplus KT-10* انجام شد (شکل ۳). به دلیل لایه بستر شیلی و رسی، حدس زده می شود که خاصیت بارپذیری به خوبی می تواند چنین واحدی را از رولایه تفکیک نماید.



شکل ۳: دستگاه اندازه گیری رسانی مدل TerraPlus KT-10.



همان طور که گفته شد، هدف از این پژوهش بررسی کارایی روش ژئوالکتریک در محدوده تراورتن آتشکوه می باشد (شکل ۲). با توجه به توپوگرافی سطح زمین و ماهیت عدسی های تراورتن، سه پروفیل الکتریکی در محدوده طراحی و سپس طی دو مرحله برداشت های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی انجام شد. آرایش الکترودی به کاررفته شامل ترکیب آرایه های دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی با فواصل الکترودی ۱۵ متر در فاز اول برداشت بود که مجموعاً در محدوده مورد مطالعه در طول دو پروفیل تعداد ۵۵۰ قرائت انجام شد. بر اساس این روش ترکیبی، با فواصل الکترودی ۱۵ متری تا عمق حدود ۱۰۰ متر در مسیر مقطع ها مورد مطالعه قرار گرفته است. پروفیل سوم که در فاز دوم برداشت صحرایی صورت گرفت دارای فواصل الکترودی ۱۰ متری می باشد که در مجموع ۳۰۰ قرائت انجام شد. برداشت صحرایی در امتداد پروفیل ۳ بر روی رخنمون یک عدسی تراورتن جهت بررسی قابلیت روش های الکتریکی در شناسایی محدوده های احتمالی تراورتن بوده است. شکل ۴-ب قسمتی از نقشه زمین شناسی منطقه را نشان می دهد که محل قرارگیری پروفیل ها در آن قابل مشاهده است. پروفیل های ۱ و ۲ در راستای حدودی شمالی-جنوبی و پروفیل ۳ تقریباً در ادامه پروفیل ۲ و در راستای شمال شرق-جنوب غرب طراحی شده اند. برداشت صحرایی در امتداد پروفیل ۳ بر روی رخنمون یک عدسی تراورتن جهت بررسی قابلیت روش های الکتریکی در شناسایی محدوده های احتمالی تراورتن بوده است.

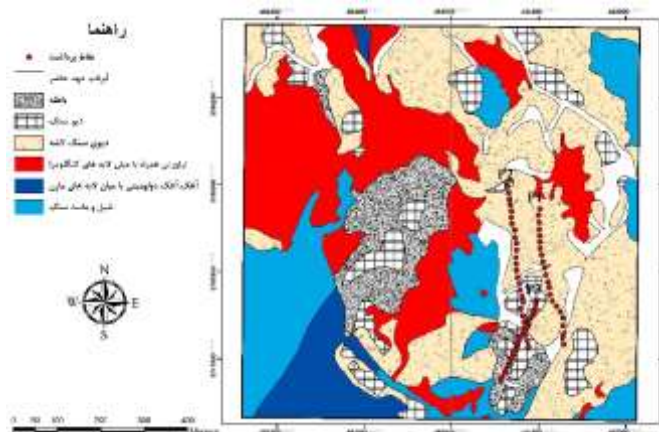
جدول ۱: ویژگی های ژئوالکتریکی مواد رسوبی در محدوده آتشکوه با

توجه به آنالیز آزمایشگاهی.

مواد	مقاومت ویژه اندازه گیری شده (اهم متر)
تراورتن	۷۴
میان لایه گلی	۲۶-۱۶
سنگ بستر	۶۱۹
شیلی	
خاک و لاشه	۹۵

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

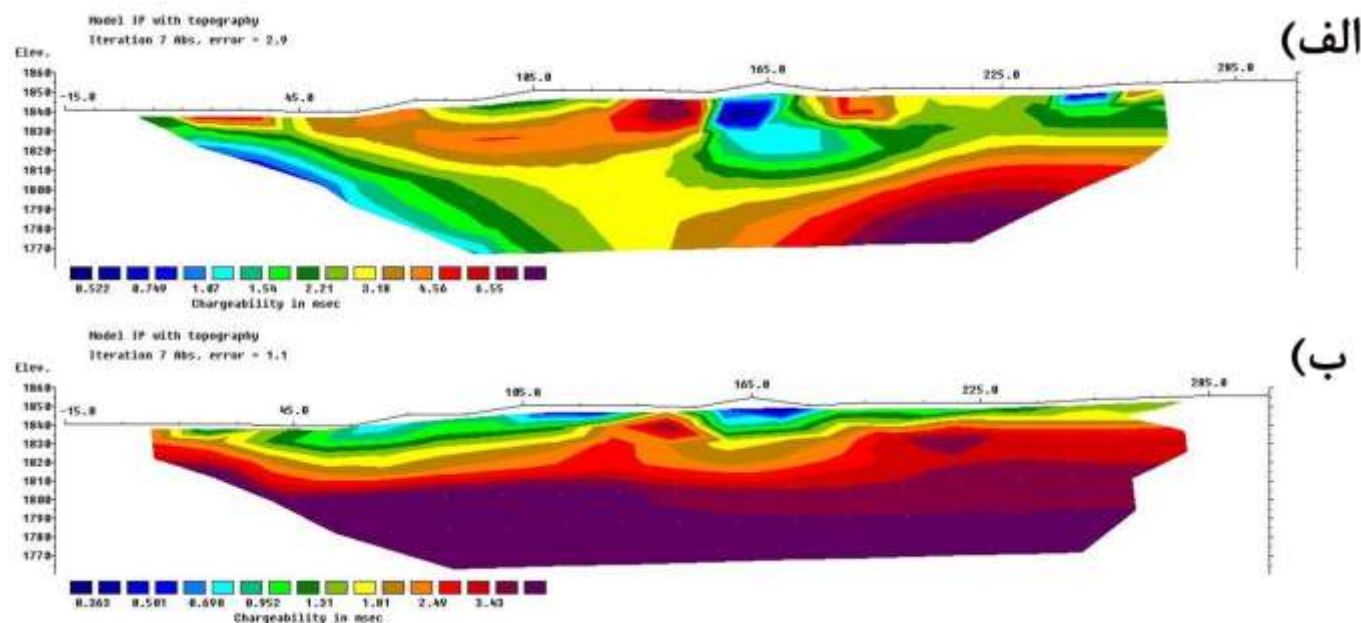
پلیوکواترین به صورت وسیع با شیب کم به صورت دگرشیب بر روی واحد شیل و ماسه سنگ ژوراسیک در قسمت جنوبی و میانی و بر روی واحدهای آهک و مارن کرتاسه در قسمت میانه شمالی و بر روی واحد کنگلومرای پالئوسن در بخش شمال قرار گرفته است. ضخامت لایه‌های تراورتن که با کنگلومرا همراه است در هر نقطه از محدوده متفاوت می‌باشد. ضخامت آن در حاشیه واحد تراورتن کم و به سمت داخل ضخامت آن افزایش پیدا می‌کند. تغییرات ضخامت از ۰/۵ متر در لبه غرب تا ۲۵ متر در میانه شمالی تغییر می‌کند. ضخامت تراورتن تابع مورفولوژی سنگ‌بستر نیز می‌باشد به گونه‌ای که لایه تراورتن همراه با کنگلومرا، گودی‌های سطح مورفولوژی اولیه را پر کرده است و جائیکه قبلاً دره بوده، ضخامت لایه تراورتن بیشتر است. بالطبع توپوگرافی اولیه‌ی لایه‌های تراورتن نیز شیب‌دار بوده و شیب لایه‌های زیرین برابر و در جهت شیب توپوگرافی است ولی لایه‌های رویی دارای شیب کمتری می‌باشند (گزارش مهندسین مشاور پارس اولنگ، ۱۳۹۵). در شکل ۲ می‌توان نمایی از معدن تراورتن آتشکوه و تجهیزات مورد استفاده برای استخراج سنگ تراورتن و همچنین یکی از سینه کارهای استخراج سنگ تراورتن را مشاهده کرد.



شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی محدوده شهرستان نیمور بازترسیم از نقشه ۱:۲۵۰۰۰ گلیپایگان (الف)، و محدوده مورد مطالعه با نمایش پروفیل‌های برداشت (ب) (بازترسیم از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ تراورتن آتشکوه).

۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده تراورتن آتشکوه در بخش شمال غرب ورقه یکصد هزار دلیجان و یکدویست و پنجاه هزار گلیپایگان واقع شده است (شکل ۴-الف). در محدوده اکتشافی توالی‌های شیل، مارن، ماسه سنگ و کنگلومرا همراه با آهک راستای غربی-شرقی و شمال غربی-جنوب شرقی رخنمون داشته و شیب آن‌ها به سمت شمال شرق است (شکل ۴-ب). واحد تراورتن با سن



شکل ۵: مدل بارپذیری الکتریکی قبل (الف) و بعد (ب) از تصحیح داده‌های برداشت شده.

تشکیل شده است.

۴- مدل سازی وارون داده‌های ژئوالکتریکی

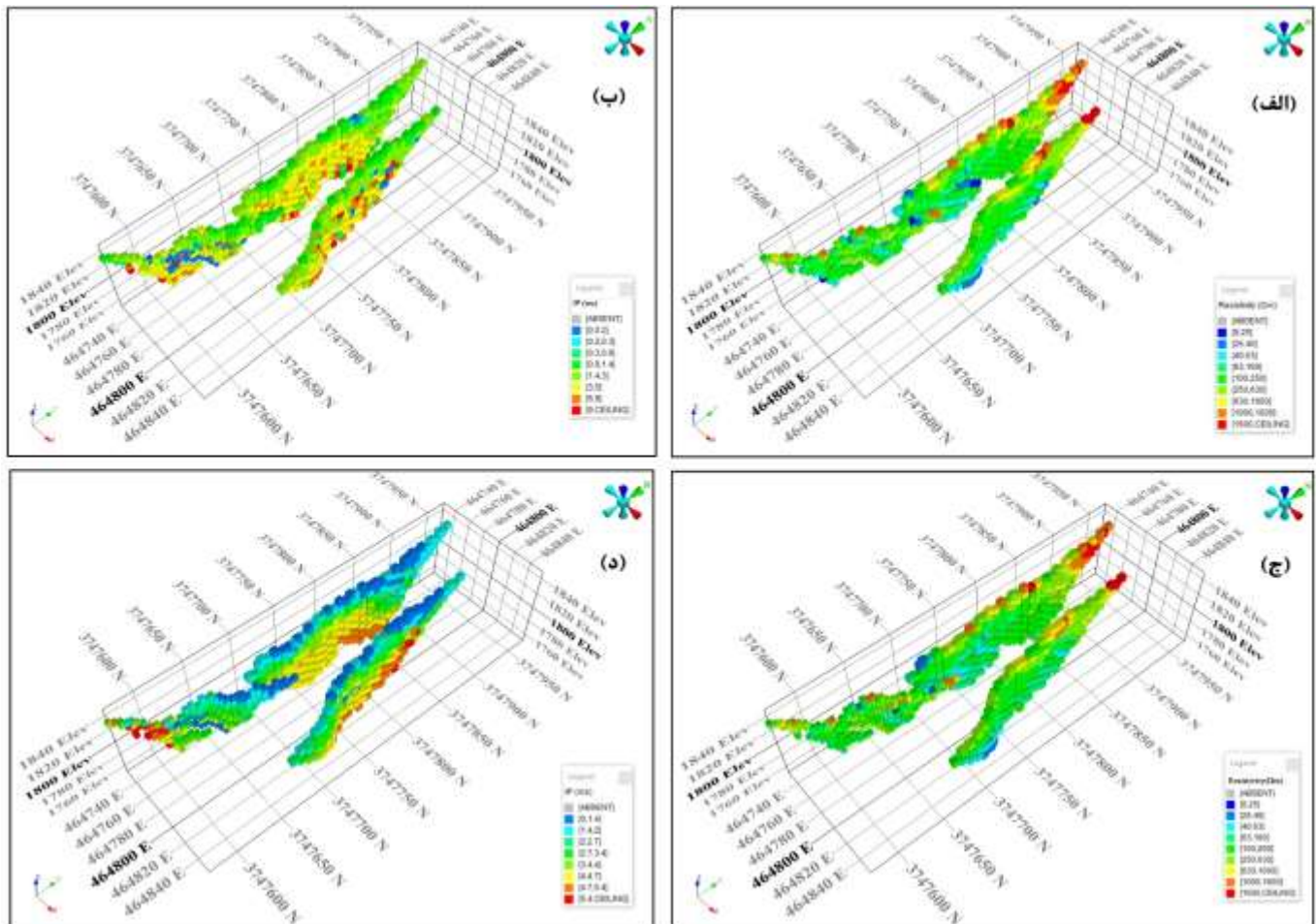
وارون سازی دوبعدی و تصحیح توپوگرافی شبه مقاطع با استفاده از نرم افزار *Res2DInv* انجام شد (Loke, 2000). به منظور اینکه بتوان نتایج حاصل از مدل سازی سه پروفیل را در کنار یکدیگر و به صورت سه-

شکل ۴-الف برشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ گلیپایگان را نشان می‌دهد که در آن شهرهای نیمور و دلیجان و همچنین محدوده مورد مطالعه با چهارضلعی سیاه قابل مشاهده است. جاده‌های اصلی و مسیر دسترسی به معدن نیز در نقشه مشخص است. همان‌طور که در شکل مشخص است، محدوده تراورتن آتشکوه بر روی شیل و ماسه سنگ‌های دوره تریاس بالایی و ژوراسیک و در مرز ساختار سنگ‌آهک کرتاسه،

طالبی و همکاران، مدل سازی ژئوفیزیکی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت اکتشاف سنگ های ساختمانی، صفحات ۱۲۱-۱۳۵.

نشان نمی دهد. نوفه تصادفی شامل تأثیراتی از قبیل جریان های زمینی (مانند تلوریک) است که بر روی تمام قرائت ها تأثیر می گذارد و می تواند باعث شود که قرائت ها کمتر یا بیشتر از قرائت های بدون نوفه معادل آن باشد. در فرایند حذف داده های خارج از ردیف، هدف از بین بردن نوفه نظام دار از داده ها می باشد. در این مطالعه تصحیح نوفه نظام دار بر روی داده ها به این صورت انجام شد: ابتدا داده های تکراری حذف شدند؛ سپس مقادیر با خطای ۹۹.۹ بارپذیری ($ErrM=99.9$) و مقادیر با اختلاف پتانسیل خیلی کم ($V_p < 0.3$) حذف شدند. همچنین مقادیر منفی بارپذیری به کمترین مقدار مثبت موجود تبدیل شدند. نتایج مدل سازی IP مربوط به پروفیل ۱، قبل و بعد از تصحیح داده ها در شکل ۵ آورده شده است که به خوبی اثرات این تصحیح با مقایسه دو تصویر قابل مشاهده است. همچنین مقدار خطای RMS با انجام تصحیح کاهش یافته است.

بعدی مشاهده کرد، از نرم افزار دیگری (Datamine Studio RM) جهت نمایش نتایج به دست آمده از نرم افزار Res2DInv استفاده شد. مقادیر خطای RMS برای پروفیل های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۹/۹، ۱۱/۸ و ۲۰/۴ درصد برای شبه مقاطع مقاومت ویژه و ۱/۱، ۰/۶۱ و ۱/۷۴ درصد برای شبه مقاطع بارپذیری می باشد. پس از برداشت های صحرائی، مقادیر مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی ظاهری ثبت خواهند شد. در این بخش، مراحل مربوط به تبدیل مقادیر مقاومت ویژه ظاهری به یک مقطع از مدل واقعی مقاومت بررسی خواهد شد تا تفسیر زمین شناسی بر مبنای آن صورت گیرد. برای یک مدل سازی دقیق، داده ها نیز باید کیفیت خوبی داشته باشند. داده های نامناسب در اثر دو دلیل عمده ایجاد می شوند؛ نوفه نظام دار و نوفه تصادفی. نوفه نظام دار معمولاً در اثر عواملی نظیر خرابی دستگاه، خطای انسانی، قطع بودن اتصالات در حین برداشت صحرائی ایجاد می شود؛ به گونه ای که قرائت اندازه گیری شده مقاومت ویژه واقعی را



شکل ۶: نمایش سه بعدی مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری مشاهده شده (الف)، بارپذیری الکتریکی ظاهری مشاهده شده (ب)، مقاومت ویژه الکتریکی پیش بینی شده (ج) و بارپذیری الکتریکی پیش بینی شده (د) حاصل از وارون سازی دوبعدی. سه پروفیل الکتریکی در محدوده برداشت شده است.

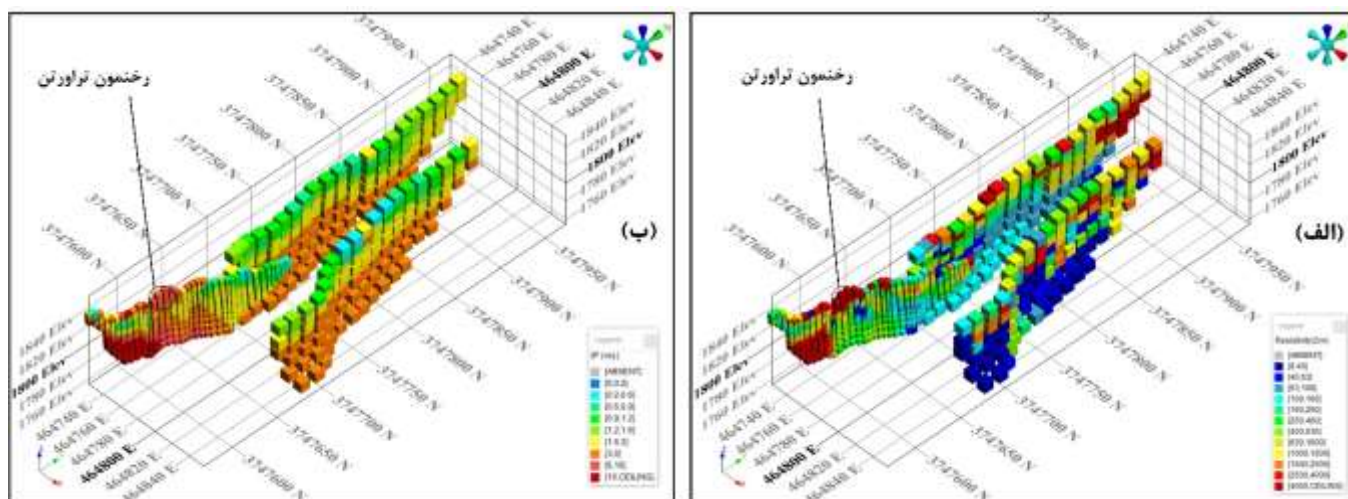
پیش بینی شده (۶-د) بعد از اعمال الگوریتم معکوس سازی دوبعدی می باشد که برای سه پروفیل برداشت به صورت هم زمان به نمایش گذاشته شده است.

شکل ۶ شامل چهار تصویر می شود که به ترتیب نمایش سه بعدی مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری مشاهده شده (۶-الف)، بارپذیری ظاهری مشاهده شده (۶-ب)، مقاومت الکتریکی پیش بینی شده (۶-ج) و بارپذیری

با ساختار کلی تشکیل شده باشد. به همین دلیل در وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه، تنظیمات نرم‌افزار به گونه‌ای طراحی می‌شود که حداکثر نرم‌شدگی در راستای افق اتفاق بیفتد.

در یکی دیگر از تنظیمات کاربردی یعنی نوع روش بهینه‌سازی، نرم‌افزار *Res2DInv* دو روش عددی برای حل معادله حداقل مربعات فراهم می‌کند. روش پیش‌فرض، به‌ویژه هنگامی که تعداد پارامترهای مدل کم باشد، روش استاندارد گاوس-نیوتن است که در آن از یک روش مستقیم (*Golub and Van Loan, 1989*) برای حل معادلات استفاده می‌شود. همچنین برای مدل‌هایی که دارای تباین الکتریکی بالا هستند، نتایج به‌دست‌آمده با روش گاوس-نیوتن دقیق‌تر از نتایج به‌دست‌آمده به روش شبه نیوتن می‌باشد (*Loke and Dahlin, 2002*). با توجه به تباین بالای خواص الکتریکی در شبه مقاطع حاصل از برداشت ژئوالکتریک در محدوده آتشکوه، در مدل‌سازی داده‌ها از روش گاوس-نیوتن استفاده شد.

مشکل غیر منحصربه‌فرد بودن پاسخ در وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و سایر داده‌های ژئوفیزیکی به اصطلاح "غیر یکتایی جواب" به‌خوبی شناخته شده است. برای یک مجموعه داده اندازه‌گیری شده، طیف گسترده‌ای از مدل‌ها وجود دارد که می‌تواند مقادیر ژئوالکتریکی ظاهری محاسبه شده مشابهی را ایجاد کند. برای محدود کردن دامنه مدل‌های ممکن، به‌طور معمول برخی فرضیه‌ها در مورد ماهیت سطح زیرین را می‌توان در نظر گرفت که به‌عنوان یک قید جهت محدود کردن نتایج وارون‌سازی گنجانده می‌شوند. تقریباً در همه برداشت‌ها، اطلاعاتی در مورد زمین‌شناسی زیرسطحی ممکن است وجود داشته باشد؛ به‌عنوان مثال آیا انتظار می‌رود توده‌های زیرسطحی دارای مرزهای تدریجی و نرم باشند یا تیز. در مورد محدوده مورد مطالعه، با توجه به ساختار زمین‌شناسی منطقه و اینکه معدن تراورتن آتشکوه از سال‌ها قبل مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفته است، انتظار می‌رود که ساختار کلی زیرسطحی به‌صورت لایه‌لایه بوده و عدسی‌های تراورتن به‌صورت هم‌شیب

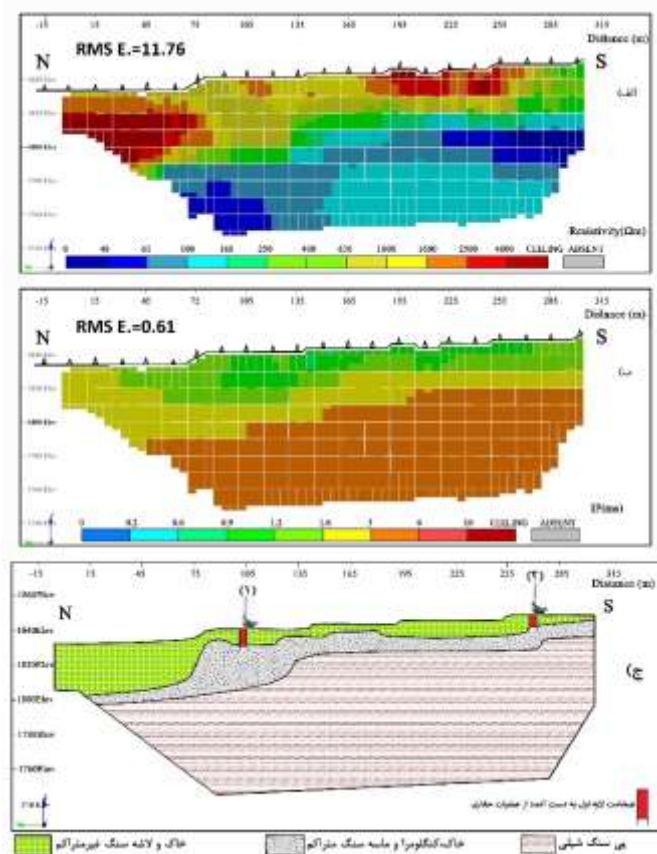


شکل ۷: نمایش سه‌بعدی مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های ژئوالکتریک، (الف) مقاومت‌ویژه الکتریکی، (ب) بارپذیری الکتریکی. سه پروفیل الکتریکی در محدوده برداشت شده است.

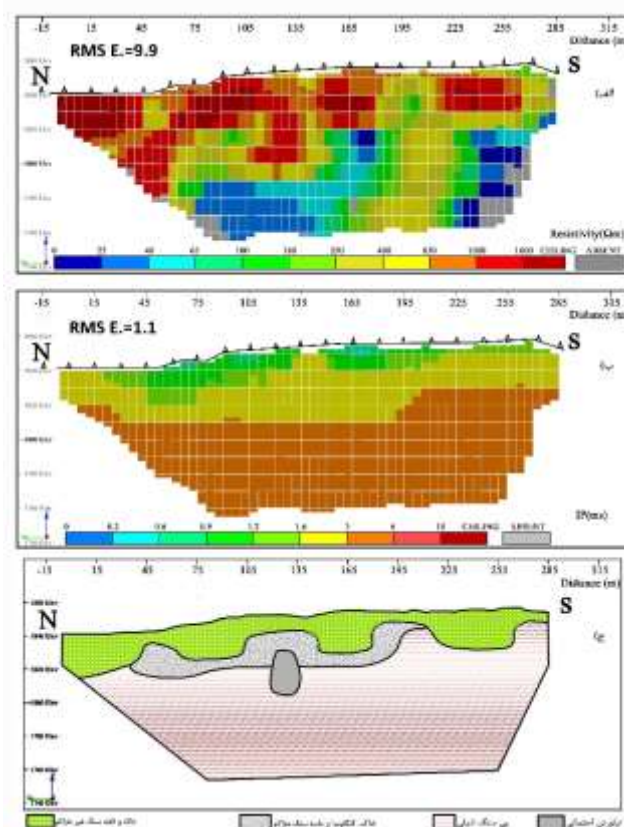
مطالعه تصحیح اثر توپوگرافی توسط هر سه روش موجود در نرم‌افزار انجام و منطقی‌ترین مدل، با توجه به اینکه ساختارهای موجود عمده‌تاً افقی هستند، به‌عنوان مدل نهایی انتخاب شد.

در قسمت گسسته‌سازی مدل نیز، نحوه تقسیم سطح زیرین به سلول‌های مستطیلی کنترل می‌شود. به‌طور پیش‌فرض، نرم‌افزار با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری تا حدی مبتنی بر موقعیت نقاط داده، اندازه و موقعیت بلوک‌های مدل را طراحی می‌کند. در این مطالعه سطح زیرزمین با توجه به فاصله الکترودی ۱۵ متری پروفیل‌های ۱ و ۲ و ۱۰ متری پروفیل ۳، با بلوک‌های به ترتیب ۷/۵ و ۵ متری مش بندی شدند.

در برداشت‌ها از مناطق با تغییرات قابل توجه در ارتفاع سطح زمین، هنگام انجام وارون‌سازی مجموعه داده‌ها، باید اثر توپوگرافی در نظر گرفته شود. نرم‌افزار *Res2DInv* دارای سه روش مختلف است که می‌تواند برای ترکیب توپوگرافی در مدل وارون استفاده شود (*Loke, 2000*). در همه این روش‌ها، گره‌های سطح مش به سمت بالا یا پایین منتقل می‌شوند تا با توپوگرافی واقعی مطابقت داشته باشند. در این حالت، توپوگرافی بخشی از مش می‌شود و به‌طور خودکار در مدل وارون گنجانده می‌شود. در این



شکل ۹: مدل های مقاومت ویژه الکتریکی (الف)، بارپذیری الکتریکی (ب) و زمین شناسی احتمالی (ج) در امتداد پروفیل ۲.



شکل ۸: مدل های مقاومت ویژه الکتریکی (الف)، بارپذیری الکتریکی (ب) و زمین شناسی احتمالی (ج) در امتداد پروفیل ۱.

۵- تفسیر زمین شناسی

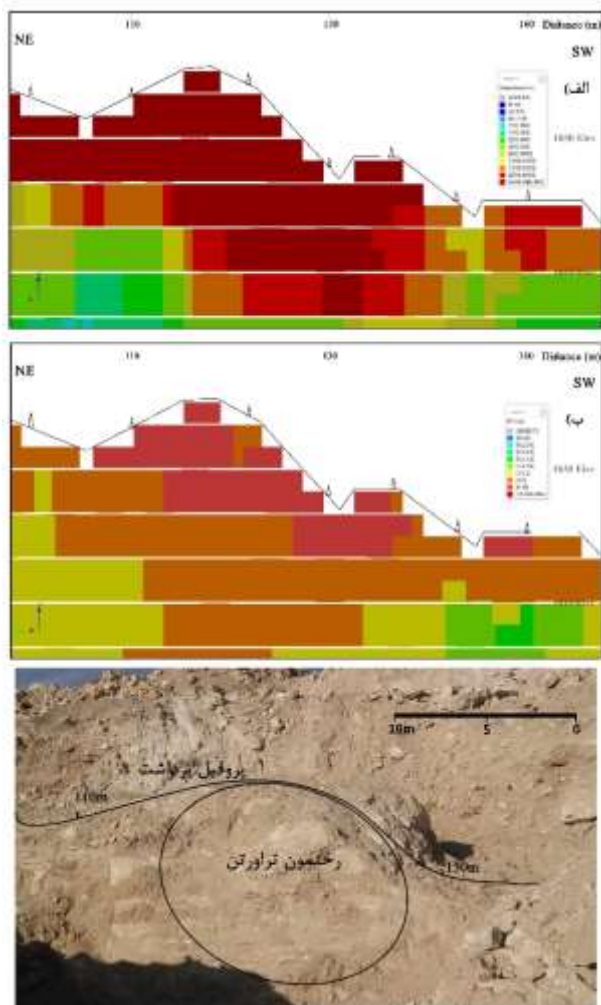
گستره تغییرات مقاومت ویژه مواد موجود در زمین بسیار زیاد است. به طور معمول سنگ های آذرین بیشترین مقاومت ویژه را دارند و سنگ های رسوبی بسته به درجه تخلخل و نوع و مقدار الکترولیت موجود در خلل و فرج آن ها می توانند مقاومت ویژه کمتری داشته باشند. در محدوده مورد مطالعه لایه سطحی خاک و لاشه سنگ غیر متراکم به دلیل اینکه ناهمگونی بوده، در میان خود ایجاد شکاف ها و حفراتی می نماید که منجر به محبوس شدن هوا می شود، لذا چنین ساختاری باعث افزایش خیلی زیاد مقاومت ویژه رولایه و افت شدید بارپذیری الکتریکی خواهد شد. این لایه به خوبی خود را از لایه گل سنگ مازنی با ادخال هایی از ماسه سنگ، کنگلومرا و لاشه متراکم جدا کرده است. ضخامت رولایه به طور میانگین بین ۱۰ تا ۳۰ متر در امتداد این پروفیل ها متغیر است. لایه پی سنگ شیلی نیز به دلیل متراکم بودن و رطوبت آن با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰۰ اهم متر و بارپذیری بالای ۳ میلی ثانیه خود را متمایز کرده است. عمق این لایه نیز بین ۲۰ تا ۴۰ متر تغییر می کند.

وارون سازی داده های شبه مقاطع با استفاده از نرم افزار *Res2DInv* برای سه پروفیل برداشت انجام شد. مقاطع حاصل، دامنه مقاومت ویژه کمتر از ۴۰ اهم متر تا بیش از ۴۰۰۰ اهم متر را نشان می دهد. با مشاهده نتایج وارون سازی، مقادیر مقاومت ویژه در سه دامنه تفسیر شده است:

در شکل ۷ نمایش سه بعدی مدل وارون مربوط به سه پروفیل نشان داده شده است که شامل مدل مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی می باشد. با توجه به اینکه برداشت در امتداد پروفیل ۳ بر روی رخنمون عدسی تراورتن انجام شده است، به خوبی محل قرارگیری عدسی تراورتن روی پروفیل ۳ در شکل ۷-الف قابل تشخیص است. عدسی تراورتن با مقاومت الکتریکی بالاتر نسبت به سایر سکناس رسوبی منطقه بارز شده است. همچنین در شکل ۷-ب، مقادیر بالاتر از بارپذیری الکتریکی وجود یک بستر شیلی را به خوبی نسبت به رولایه تفکیک کرده است.

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

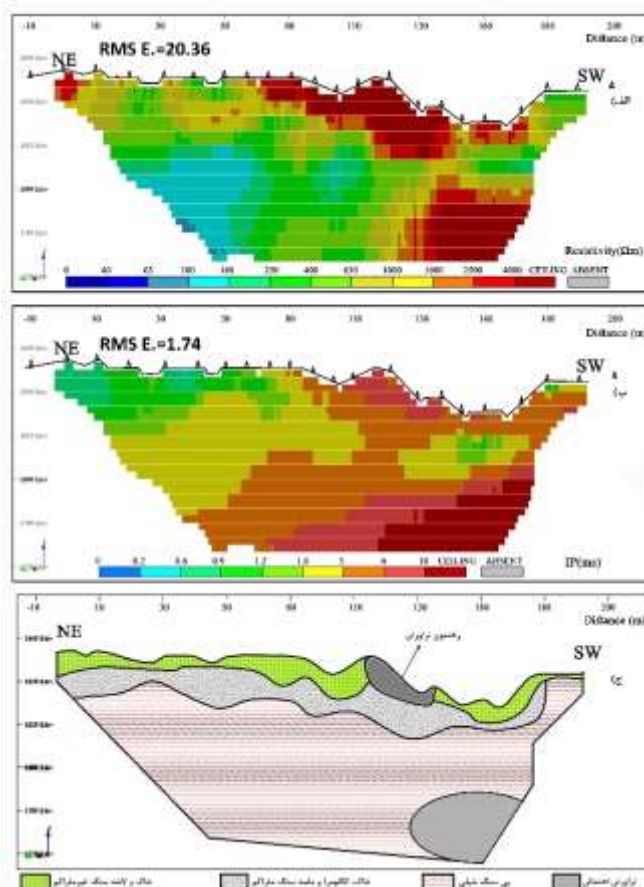
بارپذیری در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب مشخص است که از جنس شیل می‌باشد. در فاصله ۱۲۰ تا ۱۳۰ متری پروفیل ۱، یک بی‌هنجاری با مقادیر مقاومت‌ویژه بالا در عمق ۱۵ تا ۴۰ متری سطح زمین مشاهده شد که می‌تواند نتیجه وجود یک عدسی تراورتن در این عمق باشد. مدل زمین‌شناسی احتمالی پروفیل ۱ مطابق با مدل‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری تهیه شد که در شکل ۸-ج قابل مشاهده است.



شکل ۱۱: مدل الکتریکی مقاومت‌ویژه (الف)، بارپذیری الکتریکی (ب) و مدل زمین‌شناسی واقعی (ج) در امتداد قسمتی از پروفیل ۳ روی خود رخنمون تراورتن.

شکل ۹ شامل سه تصویر از مقطع در امتداد پروفیل ۲ می‌شود که به ترتیب مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی (۹-الف)، بارپذیری الکتریکی (۹-ب) و زمین‌شناسی احتمالی (۹-ج) را نشان می‌دهد. در شکل ۹-الف مقادیر بالای مقاومت‌ویژه الکتریکی نزدیک سطح زمین که با مقادیر پایین بارپذیری الکتریکی در شکل ۹-ب همخوانی دارند، مربوط به لایه سطحی خاک و لاشه‌سنگ غیرمتراکم می‌باشند. لایه دوم با مقادیر میانه از مقاومت‌ویژه و بارپذیری نشان‌دهنده ساختار لایه میانی خاک، لاشه و

کمر از ۱۰۰ اهم‌متر به‌عنوان پی‌سنگ شیلی، ۱۰۰ تا ۶۳۰ اهم‌متر به‌عنوان گل‌سنگ مارنی با اذخالی‌هایی از ماسه‌سنگ، کنگلومرا و لاشه متراکم و بیشتر از ۶۳۰ اهم‌متر به‌عنوان لایه سطحی خاک و لاشه‌سنگ غیر متراکم. همچنین با توجه به برداشت بر روی رخنمون عدسی تراورتن در امتداد پروفیل ۳، مقادیر مقاومت‌ویژه بالاتر از ۴۰۰۰ اهم‌متر که با بارپذیری بالاتر از ۳ میلی‌ثانیه همراه است می‌تواند نشان‌دهنده عدسی تراورتن در عمق باشد. شبه مقاطع الکتریکی به‌صورت مشخص ساختارهای افقی را نشان می‌دهند که سه دامنه مقاومت‌ویژه در آن‌ها دیده می‌شود (شکل‌های ۸ تا ۱۰).



شکل ۱۰: مدل‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی (الف)، بارپذیری الکتریکی (ب) و زمین‌شناسی احتمالی (ج) در امتداد پروفیل ۳.

شکل ۸ مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی، بارپذیری الکتریکی و زمین‌شناسی احتمالی در امتداد پروفیل ۱ را نشان می‌دهد. در شکل ۸-الف مقادیر بالای مقاومت‌ویژه الکتریکی نزدیک سطح زمین مربوط به لایه سطحی خاک و لاشه‌سنگ غیر متراکم می‌باشد که در شکل ۸-ب مقادیر بارپذیری پایینی را نشان می‌دهد. لایه دوم حاوی گل‌سنگ مارنی با اذخالی‌هایی از ماسه‌سنگ، کنگلومرا و لاشه متراکم می‌باشد که در شکل ۸-الف مقادیر میانه مقاومت‌ویژه و در شکل ۸-ب مقادیر میانه بارپذیری را نشان می‌دهد. لایه سوم با مقادیر پایین مقاومت‌ویژه و مقادیر بالای

طالبی و همکاران، مدل سازی ژئوفیزیکی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت اکتشاف سنگ های ساختمانی، صفحات ۱۲۱-۱۳۵.

حاکی از این است در صورتی که عدسی تراورتنی در محدوده وجود داشته باشد با تباین بارز خواص ژئوالکتریکی که بین هدف و محیط رسوبی دربرگیرنده وجود دارد، اکتشاف چنین سنگ ساختمانی قابل اعتماد می باشد.

به منظور بررسی توانایی روش ژئوالکتریک به کار برده شده در محدوده مورد مطالعه و ارزیابی مدل های زمین شناسی پیشنهادی در این مطالعه، دونقطه حفاری در امتداد پروفیل ۲ طراحی و انجام شد (شکل ۹-ج). محل نقاط حفاری در فاصله ۱۰۵ و ۲۶۵ متری مبدأ پروفیل ۲ قرار دارند. در ستون چینه شناسی دو حفاری مشخص شد که در نقطه اول در عمق ۱۰ متری زمین به لایه میانی یعنی خاک، لاشه و ماسه سنگ متراکم برخورد شد و در نقطه دوم در عمق ۷ متری زمین این اتفاق افتاد. شکل ۱۲ نتایج حفاری در امتداد پروفیل ۲ را نشان می دهد. نتایج به دست آمده نشان داد که روش ژئوالکتریک به کار رفته در این مطالعه با دقت نسبتاً خوبی توانسته مرز بین ساختارهای زمین شناسی را به نقشه درآورد. این امر نشان دهنده توانایی و موفقیت روش ژئوالکتریک در شناسایی ساختارهای کم عمق سنگ های ساختمانی می باشد.

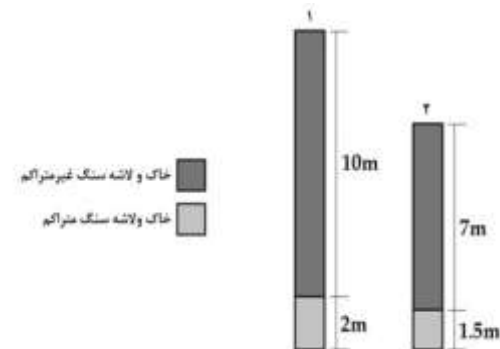
۶- نتیجه گیری

این مطالعه به منظور بررسی توانایی روش ژئوالکتریک در شناسایی ساختارهای زمین شناسی و سنگ ساختمانی تراورتن در محدوده معدنی آتشکوه انجام شد. روش توموگرافی مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی در راستای سه پروفیل با آرایه ترکیبی دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی در محدوده مورد مطالعه انجام شد. نتایج حاصل نشان دهنده موفقیت و کارایی بالای این روش در تشخیص اهداف اکتشافی مدنظر بوده است.

برداشت های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی در سه پروفیل حدود ۶ هکتار از محدوده تراورتن آتشکوه را پوشش داد. برای وارون سازی داده های ژئوفیزیک از نرم افزار *Res2DInv* استفاده شد. به دلیل وجود ساختارهای افقی در محدوده مورد مطالعه، الگوریتم وارون سازی و پارامترهای مربوط به آن، به گونه ای تعیین شد که حداکثر نرم شدگی در راستای افق در مدل های مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی صورت گیرد. سپس، با نمایش سه بعدی نتایج مدل سازی، امکان ارائه تفسیر زمین شناسی از منطقه، از جمله ویژگی های ساختاری و مناطق رسانا و مقاوم را فراهم می کند.

سه زون ساختاری در منطقه شناسایی شد که به صورت سه دامنه از مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی در مدل های وارون شناسایی شدند. لایه ی سطحی خاک و لاشه سنگ به دلیل نابرجا بودن و حبس هوا در شکاف ها و حفرات خود، باعث افزایش خیلی زیاد مقاومت ویژه رولایه و افت شدید بارپذیری الکتریکی شده است. لذا این لایه می تواند به خوبی با توجه به خواص الکتریکی متمایز نسبت به سایر لایه ها شناسایی شود. ضخامت رولایه ی خاک و لاشه سنگ غیر متراکم به طور میانگین بین ۱۰ تا حداکثر ۳۰ متر در امتداد پروفیل های الکتریکی متغیر است. لایه

ماسه متراکم می باشد. لایه سوم یعنی پی سنگ شیلی نیز با مقادیر پایین مقاومت ویژه و مقادیر بالای بارپذیری در شکل های ۹-الف و ۹-ب نمایان است. بی هنجاری خاصی که بتوان به عدسی تراورتن نسبت داد در این مقطع دیده نشد. مدل زمین شناسی احتمالی پروفیل ۲ مطابق با مدل های مقاومت ویژه و بارپذیری ترسیم شد که در شکل ۹-ج آورده شده است.



شکل ۱۲: نتایج حفاری روی دونقطه در امتداد پروفیل ۲. محل حفاری ها روی شکل ۷-ج نمایش داده شده است.

شکل ۱۰ مدل مقاومت ویژه الکتریکی، بارپذیری الکتریکی و زمین شناسی احتمالی در امتداد پروفیل ۳ را نشان می دهد. مهم ترین نکته در مورد شبه مقطع پروفیل ۳، قرارگیری این پروفیل بر روی رخنمون عدسی تراورتن در سطح زمین می باشد. توجه به مدل مقاومت ویژه پروفیل ۳ که در شکل ۱۰-الف آورده شده این نکته را نشان می دهد که مقدار مقاومت ویژه الکتریکی عدسی تراورتن که در فاصله ۱۲۵ متری از مبدأ پروفیل قرار دارد، به صورت قابل توجهی بالاتر از سکانس رسوبی مقطع می باشد و همچنین مقدار بارپذیری الکتریکی عدسی تراورتن نیز بالاتر از ۱۰ میلی ثانیه مدل سازی شده است. سایر ویژگی های ساختاری مقطع مانند دو پروفیل قبل یعنی لایه سطحی خاک و لاشه سنگ غیر متراکم با مقاومت ویژه بالا و بارپذیری پایین، لایه میانی خاک، لاشه و ماسه سنگ متراکم با مقاومت ویژه و بارپذیری حد واسط و لایه زیرین پی سنگ شیلی با مقادیر مقاومت ویژه پایین و بارپذیری بالا مشخص شد. همچنین در فاصله ۱۵۰ تا ۱۸۰ متری مبدأ پروفیل و در تراز عمقی کمتر از ۱۸۰۰ متر، یک بی هنجاری با مقاومت ویژه و بارپذیری بالا دیده شد که می تواند نشان از وجود عدسی تراورتن باشد که در بررسی های صحرائی باید مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت مدل زمین شناسی احتمالی پروفیل ۳ با توجه به مدل های مقاومت ویژه و بارپذیری تهیه شد که در شکل ۱۰-ج آورده شده است.

مدل مقاومت ویژه الکتریکی، بارپذیری الکتریکی و زمین شناسی واقعی در امتداد قسمتی از پروفیل ۳ بر روی رخنمون عدسی تراورتن به منظور بررسی بیشتر خصوصیات ژئوالکتریکی سنگ تراورتن تهیه شد که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. مقادیر بالای مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی بر روی رخنمون تراورتن به وضوح قابل مشاهده است. نتایج

- Aristodemou, E., Thomas-Betts, A., 2000, DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments. *Journal of Applied Geophysics* 44, 275–302.
- Aydın, A., Yağız, S., Özpinar, Y., Semiz, B., 2005, Investigation of travertine properties using geophysical methods. *Proceedings of 1st International Symposium on Travertine*, September 21-25, 2005, Denizli-Turkey.
- Babaei, M., Abedi, M., Norouzi, Gh.H., Kazem Alilou, S., 2020, Geostatistical Modeling of Electrical Resistivity Tomography for Imaging Porphyry Cu Mineralization in Takht-e-Gonbad Deposit, Iran, *Journal of Mining & Environment*, Vol. 11, No. 1.
- Barker, R.D., White, C.C. and Houston, J.F.T., 1992, Borehole siting in an African accelerated drought relief project, *Hydrogeology of Crystalline Basement Aquifers in Africa (Geological Society Special Publication vol 66)*, ed. E. P. Wright and W. G. Burgess (London: The Geological Society) pp., 183–201.
- Billi, A., Filippis, L.D., Poncia, P.P., Sella, P., Faccenna, C., 2016, Hidden sinkholes and karst cavities in the travertine plateau of a highly-populated geothermal seismic territory (Tivoli, central Italy). *Geomorphology* 255, 63-80.
- Binley, A., Daily, W., 2003. The performance of electrical methods for assessing the integrity of geomembrane liners in landfill caps and waste storage ponds. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 8, 227.
- Cardarelli, E., Di Filippo, G., 2009. Electrical resistivity and induced polarization tomography in identifying the plume of chlorinated hydrocarbons in sedimentary formation: a case study in Rho (Milan - Italy). *Waste Management & Research*. 27: 595-602.
- Carruthers, R.M. and Smith, I.F., 1992, The use of ground electrical survey methods for siting water-supply boreholes in shallow crystalline basement terrains, *Hydrogeology of Crystalline Basement Aquifers in Africa (Geological Society Special Publication vol 66)*, ed. E. P. Wright and W. G. Burgess (London: The Geological Society), pp 203–20.
- Chambers, J.E., Kuras, O., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D. and Hollands, J., 2006, Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic and engineering investigations at a former waste-disposal site, *Geophysics*, 71 B231–9.
- Daneshvar Saein, L., Rasa, I., Rashidnejad Omran, N., Moarefvand, P. and Afzal, P. 2012, Application of concentration-volume fractal method in induced polarization and resistivity data interpretation for Cu-Mo porphyry deposits exploration, case study: Nowchun Cu-Mo deposit, SE Iran. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 19: 431-438.
- De Carlo, L., Perri, M.P., Caputo, M.C., Deiana, R., Vurro, M., Cassiani, G., 2013, Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method, *Journal of Applied Geophysics*, 98:1-10.

پی‌سنگ شیلی نیز به دلیل متراکم بودن آن با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر و بارپذیری بالای ۳ میلی‌ثانیه خود را متمایز کرده است. عمق این لایه در امتداد دو پروفیل بین ۲۰ تا ۴۰ متر تغییر می‌کند. لایه میانی گل‌سنگ متراکم حاوی ماسه، کنگلومرا و لاشه‌سنگ نیز با ویژگی‌های حد واسط الکتریکی نسبت به دولایه بالا و پایین خود در این محدوده قابل جدایش می‌باشد.

با توجه به خواص الکتریکی متفاوت لایه‌ها در محدوده تراورتن آتشفشان، ترسیم مقاطع زمین‌شناسی انجام شد. در فاصله ۱۲۰ تا ۱۳۰ متری از مبدأ پروفیل ۱ و در عمق ۱۵ تا ۴۰ متری و همچنین در فاصله ۱۳۰ تا ۱۸۰ متری از مبدأ پروفیل ۳ و در عمق ۳۰ تا ۵۰ متری سطح زمین؛ یک زون با مقاومت‌ویژه و بارپذیری بالا شناسایی شد که با توجه به برداشت بر روی رخنمون تراورتن در امتداد پروفیل ۳ و مقاومت‌ویژه و بارپذیری بالا بر روی این رخنمون، می‌توان این بی‌هنجاری را مربوط به عدسی تراورتن احتمالی در نظر گرفت. به‌منظور بررسی توانایی روش ژئوالکتریک استفاده‌شده در این مطالعه، دو نقطه حفاری در امتداد پروفیل ۲ انجام شد که نتایج به‌دست‌آمده نشان از دقت نسبتاً خوب این روش در شناسایی مرزهای ساختاری در منطقه دارد؛ اما برای بررسی دقت این روش در شناسایی عدسی تراورتن نیاز به حفاری‌های عمیق‌تر می‌باشد که متأسفانه هنوز انجام‌نشده است.

۷- سپاس‌گزاری

نویسندگان از شرکت معدن فراور امداد برای حمایت مالی و لجستیکی و همچنین از داوران و سردبیر مجله پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی برای کمک در بهبود کیفیت این مقاله قدردانی می‌نمایند.

۸- منابع

- سلیمانی، ک.، عرب امیری، ع.ر.، کامکار روحانی، ا.، شمس‌الدینی نژاد، م.، مومنی، ف.، ۱۳۹۷. بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از برداشتهای ژئوالکتریک در تعیین عمق و ضخامت لایه بوکسیتی در یکی از ذخایر بوکسیت جاجر. *نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی*، دوره ۴، شماره ۲، ص. ۲۲۵–۲۳۵.
- قنبری، ه.، عرب‌امیری، ع.، ابراهیمی، س.، مهری، م.، ۱۳۹۹. مدل‌سازی و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در محدوده اکتشافی شریف آباد، شمال غرب بردسکن، *نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی*، دوره ۶، شماره ۱، صفحات ۱۳–۲۳.
- گزارش بازدید و تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ معدن تراورتن آتش‌کوه. مهندسین مشاور پارس اولنگ. تیرماه ۹۵.
- نوروزی، غ.ح.، ۱۳۹۲. روشهای الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم، ۳۷۵ ص.
- Allaia, R., Patella, D., Mauriello, P., 2007, Application of geoelectrical 3D probability in a test-site of the archaeological park of Pompei(Naples, Italy), *Journal of geophysics and engineering*, 5:67-76.

- Loke, M.H., 2000, Topographic modelling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.
- Loke, M.H. and Dahlin, T., 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, **49**, 149-162.
- Loke, M., 2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, <http://www.geotomosoft.com/>.
- López-González, A.E., Tejero-Andrade, A., Hernández-Martínez, J.L., Prado, B., Chávez, R.E., 2019, Induced Polarization and Resistivity of Second Potential Differences (spd) with Focused Sources Applied to Environmental Problems. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 24 (1): 49–61.
- Madun, A., Tajudin, S.A.A., Sahdan, M.Z., Dan, M.F.M., Talib, M.K.A., 2018, Electrical resistivity and induced polarization techniques for groundwater exploration. *International Journal of Integrated Engineering*. 10(8): 56-60.
- Mashhadi, S.R., Mostafaei, K. and Ramazi, H.R., 2017, Improving bitumen detection in resistivity surveys by using induced polarization data. *Exploration Geophysics*. Published online: <https://doi.org/10.1071/EG17032>.
- Mashhadi, S.R. Ramazi, H., 2018, The Application of Resistivity and Induced Polarization Methods in Identification of Skarn Alteration Haloes: a Case Study in the Qale-alimoradkhan Area. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 23 (3): 363-368.
- Medeiros, W.E., 1987, Eletro-resistividade aplicada à hidrogeologia do cristalino: um problema de modelamento bidimensional, *Diss. de Mestrado UFBA*.
- Medeiros, W. E. and Lima O. A. L., 1990, A geoelectrical investigation for ground water in crystalline terrains of central Bahia, Brazil, *Ground Water*, **28**, 518–23.
- Mostafaie, K. and Ramazi, H., 2015, Application of electrical resistivity method in sodium sulfate deposits exploration, case study: Garmab, Iran. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. 6 (2): 2220-6663.
- Mostafaei, K., Ramazi, H., 2018, 3D model construction of induced polarization and resistivity data with quantifying uncertainties using geostatistical methods and drilling (Case study: Madan Bozorg, Iran). *Journal of Mining and Environment*. 9(4): 857-872. doi: 10.22044/jme.2018.6852.1516.
- Nguyen, F., S. Garambois, D. Jongmans, E. Pirard, and M. H. Loke, 2005, Image processing of 2D resistivity data for imaging faults, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 57, no. 4, pp. 260–277.
- Öğretmen, Z., Şeren, A., 2014, Investigating fracture-cracked systems with geophysical methods in Bayburt Kirath travertine. *J. Geophys. Eng.* 11, 1-13.
- Omosanya, K. O., Mosuro, G. O. and Azeez, L., 2012, Combination of geological mapping and geophysical surveys for surface-subsurface structures imaging in Dentith, M., Mudge, S.T., 2014, *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, p. 516.
- Doulati Ardejani, F., Jodeiri Shokri, B., Moradzadeh, A., Soleimani, E. and Jafari, M.A., 2008, A combined mathematical geophysical model for prediction of pyrite oxidation and pollutant leaching associated with a coal washing waste dump. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 5 (4): 517-526.
- Ferdows, S.M. and Ramazi, H., 2015, Application of the fractal method to determine the membership function parameter for geoelectrical data (case study: Hamyj copper deposit, Iran). *Journal of Geophysics and Engineering*. 12 (1): 909-921.
- Flores, C. and Peralta-Ortega, S.A., 2009, Induced polarization with in-loop transient electromagnetic soundings: A case study of mineral discrimination at El Arco porphyry copper, Mexico. *Journal of Applied Geophysics*. 68 (3): 423-436.
- Gadallah, M.R. and Fisher, R., 2009, *Exploration Geophysics*. Berlin. Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-85160-8>.
- Geotomo software Malaysia, “Res2DInv (ver. 3.4), Copyright_c”, 1995–2018, <http://www.geoelectrical.com>.
- Golub, G.H. and van Loan, C.F., 1989, *Matrix computations*. The John Hopkins Un. Press.
- Gomez, E.P., Parviainen, A., Hokkanen, T. and Ruskeenieni, K.L., 2010, Integrated geophysical and geochemical study on AMD generation at the Haveri Au-Cu mine tailings, SW Finland. *Environmental Earth Science*. 1: 1435-1447.
- Grandjean, G. and Gourry, J.C., 1996, GPR data processing for 3D fracture mapping in a marble quarry (Thassos, Greece), *J. Appl. Geophys.* **36** 19–30.
- Grasmueck, M., 1996, 3D Ground penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss, *Geophysics* **61**, 1050–64.
- Gurin, G., Tarasov, A., Ilyin, Y. and Titov, K., 2015, Application of the Debye decomposition approach to analysis of induced-polarization profiling data (Julietta gold-silver deposit, Magadan Region), *Russian Geology and Geophysics*. 56: 1757-1771.
- Jodeiri Shokri, B., Doulati Ardejani, F. and Moradzadeh, A. (2016). Mapping the flow pathways and contaminants transportation around a coal washing plant using the VLF-EM, Geo-electrical and IP techniques-A case study, NE Iran. *Environmental Earth Sciences*. 75 (1): 1-13.
- Kadioğlu, S., 2008, Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization, *J. Appl. Geophys.* **64**, 109–14.
- Kozhevnikov, N.O., Antonov, E.Y., Zakharkin, K. and Korsakov, M. (2014). TEM surveys for search of taliks in areas of strong fast-decaying IP effects. *Russian Geology and Geophysics*. 55 (12): 1452-1460.
- Loke, M.H. and R. D. Barker, 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections, *Geophysics*, vol. 60, no. 6, pp. 1682–1690.

- fractures in a crystalline aquifer: a case study in Caicara farm—NE Brazil, *J. Appl. Geophys.*, **56**, 295–307.
- Stocklin, J., 1977, Structural Correlation of the Alpine Ranges between Iran and Central Asia. *Mémoires de la Société Géologique de France*, **8**, 333-353.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG bulletin*, **52 (7)**, 1229-1258.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics. Cambridge. Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1180/minmag.1982.046.341.32>.
- Yalçiner, C., 2013, Investigation of subsurface geometry of fissure–ridge travertine with GPR, Pamukkale, western Turkey, *J. Geophys. Eng.*, **10**.
- Yang, J., Liu, Z.H. and Wang, L., 2008, Effectiveness of Natural Field Induced Polarization for Detecting Polymetallic Deposits. *Earth Science Frontiers*. **15 (4)**: 217-221.
- Zhou, W., B. F., Beck and J. B., Stephenson, 2000, Reliability of dipole– dipole electrical resistivity tomography for defining Depth to bedrock in covered karst terranes, *Environ. Geol.*, **39**, 760–6.
- mini-campus and methodist Ago-Iwoye NE areas, southwestern Nigeria, *J. Geol. Min. Res.*, **4**, 105–17.
- Porsani, L. J., Sauck, W. A. and Junior, A. O. S., 2006, GPR for Mapping fractures and as a guide for extraction of ornamental granite from a quarry: a case study from southern Brazil, *J. Appl. Geophys.*, **58**, 177–87.
- Qarqori, Kh., Rouai, M., Moreau, F., Saracco, G., Dauteuil, O., Hermitte, D., Boualoul, M., Veslud, C.L.C.D., 2012, Geoelectrical Tomography Investigating and Modeling of Fractures Network around Bittit Spring (Middle Atlas, Morocco). *International Journal of Geophysics Volume 2012*, 1-13.
- Ramazi, H. and Mostafaie, K., 2013, Application of integrated geoelectrical methods in Marand (Iran) manganese deposit exploration. *Arabian Journal of Geosciences*. **6 (8)**: 2961-2970.
- Richards, J., Wilkinson, D., Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, Northwest Iran. *Econ. Geol.* **101**, 1455-1496.
- Rucker, D.F., Noonan, G.E. and Greenwood, W.J., 2011, Electrical resistivity in support of geological mapping along the Panama Canal, *Eng. Geol.*, **117**, 121–33.
- Silva, C. C. N., Medeiros, W. E. and Neto, P. X., 2004, Resistivity and ground-penetrating radar images of