



مدل‌سازی ژئوفیزیکی داده‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت اکتشاف سنگ‌های ساختمانی، مطالعه موردی: تراورتن آتشکوه

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

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

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

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

چکیده

محدوده اکتشافی مورد مطالعه در شهر نیمور استان مرکزی و در ۱۵ کیلومتری شرق محلات واقع شده است. این محدوده از نظر تقسیم‌بندی زمین‌شناسی در مرز بین زون ساختاری سنندج-سیرجان و ارومیه دختر قرار گرفته است. واحدهای رخنمون یافته در محدوده اغلب شامل توالی‌های شیل، مارن، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و آهک است که لایه‌بندی‌ها 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 زمین‌شناسی قرار گرفته است. ابتدا به منظور بررسی کارایی روش ژئوالکتریک، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پارامتر مقاومت‌ویژه الکتریکی روی نمونه‌هایی از ماده معدنی و باطله‌های همراه انجام شد و با توجه به قابل قبول بودن نتایج آزمایشگاهی، از مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی با آرایش ترکیبی دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی استفاده شد. برداشت‌ها 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 می‌باشد که در زیر روبراه و یا در برخی مناطق توسط خاک و لاشه حاصل از فعالیت‌های قدیمی معدنکاری مدفون شده است. داده‌های خام صحرائی بعد از پردازش، در امتداد هر پروفیل به صورت دوبعدی معکوس شدند تا زون‌های محتمل از رخداد عدسی‌های تراورتن بارز شوند. نتایج مدل‌سازی معکوس دوبعدی به صورت سه‌بعدی نیز نمایش داده شد. با نظر گرفتن نتایج آنالیز آزمایشگاهی خاصیت مقاومت‌ویژه الکتریکی واحدهای متنوع زمین‌شناسی موجود در محدوده آتشکوه، بعد از ساخت مدل بلوکی برای هر پروفیل و تخمین مقادیر مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی، یک مدل زمین‌شناسی به هریک از سه پروفیل برداشت نسبت داده شد. با توجه به مقادیر بسیار بالای مقاومت‌ویژه 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 زمین‌شناسی دقیق‌تر در نقطه مورد نظر می‌باشد. همچنین کیفیت مدل‌های زمین‌شناسی پیشنهاد شده از روی خواص ژئوالکتریک با حفر دو گمانه اکتشافی در محدوده مورد تأیید قرار گرفت. نتایج حاکی از این است که برداشت‌های ژئوالکتریک اطلاعات بالارزشی جهت اکتشاف سنگ‌های ساختمانی تراورتن تهیه خواهد کرد.

واژگان کلیدی

ژئوالکتریک
تراورتن
مقاومت ویژه الکتریکی
بارپذیری الکتریکی
آتشکوه

هدف از ژئوالکترونیک تعیین خواص الکتریکی زیرسطحی با اندازه‌گیری بر روی سطح زمین یا درون گمانه است. از این اندازه‌گیری‌ها می‌توان مقاومت‌ویژه (*Res*) و بارپذیری الکتریکی (*IP*) واقعی سطح زیرین را تخمین زد. این خواص به پارامترهای مختلف زمین‌شناسی مانند محتوای مواد معدنی و مایعات، تخلخل و درجه اشباع آب در سنگ مربوط می‌شود. بررسی‌های ژئوالکترونیک برای چندین دهه در تحقیقات هیدروژئولوژی، معدن و ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته است. اخیراً، برای بررسی‌های زیست‌محیطی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (*Aristodemoe and Thomas-Betts, 2000; Binley and Daily, 2003; De Carlo et al., 2013*). نقشه‌برداری الکتریکی از روش‌های رایج ژئوفیزیکی است که برای اندازه‌گیری خصوصیات الکتریکی اجسام یا سنگ‌ها به‌ویژه برای تعیین تفاوت‌های قابل‌اندازه‌گیری بین سنگ‌های غنی‌شده و تهی‌شده توسط فرایند کانی‌سازی، از طریق اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و شارژ پذیری، استفاده می‌شود (*Gadallah and Fisher, 2009*)؛ سلیمانی و همکاران (۱۳۹۷). مبنای هر روش ژئوفیزیکی، شناسایی صحیح تباین‌های ناشی از خصوصیات مختلف ژئوفیزیکی اهداف موردنظر می‌باشد (*Telford et al., 1990; Dentith and Mudge, 2014*). در بسیاری از موارد اکتشاف مواد معدنی، برای کاهش عدم قطعیت تفسیر و مدل‌سازی داده‌های متنوع ژئوفیزیکی، ادغام و تلفیق چندین روش ژئوفیزیکی مفید واقع خواهد شد (*Ramazi and Mostafaie, 2013*)؛ قنبری و همکاران (۱۳۹۹). به دلیل بهینه‌سازی در هزینه و زمان برنامه‌های اکتشاف مواد معدنی، اخیراً استفاده از بررسی‌های ژئوفیزیکی در تحقیقات اکتشافی کم‌عمق و عمیق در حال افزایش است. همان‌طور که گفته شد، معمولاً از روش‌های ژئوفیزیکی تلفیقی برای به دست آوردن نتایج قابل‌قبول استفاده می‌شود (*Mostafaie and Ramazi, 2015*). هدف اصلی روش‌های بارپذیری الکتریکی (*IP*) و مقاومت‌ویژه الکتریکی (*Res*)، مکان‌یابی کردن بهترین نقاط حفاری برای اهداف اکتشافی می‌باشد (*Ferdows and Ramazi, 2015; Mostafaie and Ramazi, 2018*).

ترکیبی از بررسی‌های الکتریکی به‌طور گسترده و متمرثر برای اهداف مختلف مانند اکتشاف مواد معدنی، مطالعات آب و آلودگی، تحقیقات مهندسی و زمین‌شناسی و غیره انجام شده است. از جمله کاربردهای متعدد می‌توان به توصیف نهشته‌های پلی‌متال (*Yang et al., 2008*)، مدیریت پسماند در مطالعات هیدروکربن (*Cardarelli and Di Filippo, 2009*)، کانی‌سازی مس پورفیری (*Flores and Peralta-Ortega, 2009*)؛ اکتشاف منگنز (*Daneshvar Saein et al., 2012; Kozhevnikov et al., 2014*)؛ مطالعات آب (*Mostafaie, 2013*)؛ نهشته‌های *Au-Ag* (*Gurin et al., 2015*)؛ قیر معدنی (*Mashhadi et al., 2017*)؛ مطالعه آلاینده‌های حاصل از زغال شویی (*Doulati Ardejani et al., 2008*)؛ باطله‌های معدن *Au-Cu* (*Jodeiri Shokri et al., 2010*)؛ مطالعات آلودگی (*Gomez et al., 2010*)؛ شناسایی دگرسانی مواد معدنی (*Mashhadi and Ramazi, 2018*)؛ مطالعات باستان‌شناسی

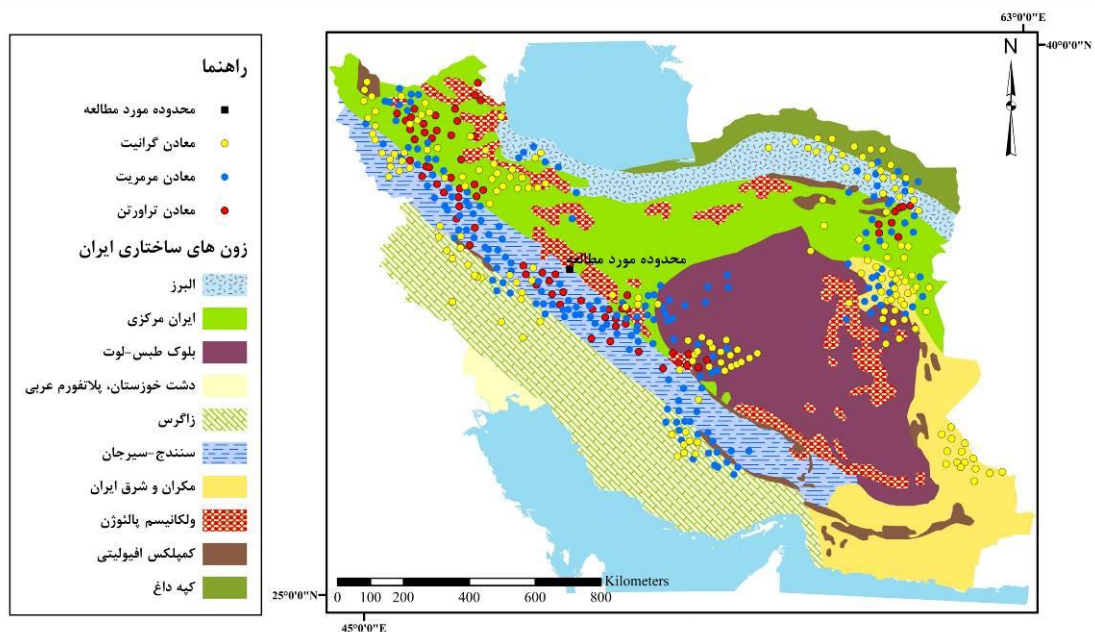
(*Allaia et al., 2007*) و بررسی سیستم‌های گسله در سنگ‌های ساختمانی (*Qarqori et al., 2012; Ogretman and Seren, 2014*) اشاره کرد.

ژئوالکترونیک یک روش مؤثر است که می‌تواند سطح زیرزمین تا عمق کم را با وضوح بالا تصویرسازی کند. این روش در مطالعات اخیر برای معادن سنگ‌های ساختمانی مرمر، تراورتن و گرانیت استفاده شده است. مقالات منتشرشده موفقیت‌آمیز 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 مقاومت‌ویژه الکتریکی نیز برای تصویربرداری از سطح زیرین در بسیاری از مطالعات زمین‌شناسی به‌کاررفته است (*Zhou et al., 2000; Chambers et al., 2006; Rucker et al., 2011; Omosanya et al., 2012*).

روش‌های ژئوالکترونیک با موفقیت برای شناسایی و نقشه‌برداری از شکستگی‌ها در معادن سنگ مرمر توسط *Grandjean and Goury (1996)* اجرا شده است. هدف از مطالعات آن‌ها تشخیص سریع مناطق سالم مرمر قابل‌فروش از مناطق شکسته شده به‌منظور بهبود مدیریت معدن بود. (*Kadioglu (2008)*) با موفقیت از روش ژئوالکترونیک برای شناسایی و به نقشه درآوردن شکستگی‌ها و حفرات در یک‌لایه مرمر استفاده کرد. (*Porsani et al. (2006)*) از روش ژئوالکترونیک برای شناسایی شکستگی‌ها، درزه‌های پرشده، بلوک‌های بزرگ و سطح بالایی گرانیت در جنوب برزیل استفاده کردند. (*Yalciner (2013)*) با استفاده از ژئوالکترونیک، مطالعاتی در مورد هندسه زیرسطحی و ساختارهای داخلی تراورتن در پاموکاله، غرب ترکیه انجام داد. (*Silva et al. (2004)*)، از روش‌های الکترومغناطیسی و ژئوالکترونیک شامل ژئورادار و مقاومت‌ویژه الکتریکی به‌منظور توصیف سفره شکسته شده سنگ‌بستر در شمال برزیل با تلفیق نتایج استفاده کردند. معدن متروک دولریت و محل دفن باطله‌های معدن با استفاده از روش مقاومت‌ویژه الکتریکی دو و سه‌بعدی توسط *Chambers et al. (2006)* باهدف تعیین هندسه معدن مدفون، نقشه‌برداری از آلودگی سنگ‌بستر ناشی از دفن باطله‌ها و مشخص کردن زمین‌شناسی ناحیه موردبررسی قرار گرفت.

کشور ایران از رشته‌کوه‌های مرتفع و مناطق کوهستانی منفرد تشکیل یافته که اکثر آن‌ها از دوران سوم زمین‌شناسی تکامل خود را باز یافته و از منابع عظیم سنگ‌های ساختمانی برخوردار شده است. نقشه‌های زمین‌شناسی از مناطق مختلف ایران نشان می‌دهد که این کشور به 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 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 سنندج-سیرجان و ارومیه-دختر واقع شده است.



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

هدف از مطالعات ژئوفیزیکی در محدوده آتشکوه، 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.



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

همان‌طور که گفته شد، هدف از این پژوهش بررسی کارایی روش ژئوالکتریک در محدوده تراورتن آتشکوه می‌باشد (شکل ۲). با توجه به توپوگرافی سطح زمین و ماهیت عدسی‌های تراورتن، سه پروفیل الکتریکی در محدوده طراحی و سپس طی دو مرحله برداشت‌های مقاومت‌ویژه و

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 صحرائی 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). 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.

طالبی و همکاران، مدل سازی ژئوفیزیکی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت اکتشاف سنگ های ساختمانی، صفحات ۲۷-۴۰.

آورده شده است. آنالیز نمونه ها با استفاده از دستگاه اندازه گیری رسانایی 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 رسانایی مدل TerraPlus KT-10.

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 صحرائی صورت گرفت دارای فواصل الکترودی ۱۰ متری می باشد که در مجموع ۳۰۰ قرائت انجام شد. برداشت صحرائی 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 صحرائی در امتداد پروفیل ۳ بر روی رخنمون یک عدسی تراورتن جهت بررسی قابلیت روش های الکتریکی در شناسایی محدوده های احتمالی تراورتن بوده است.

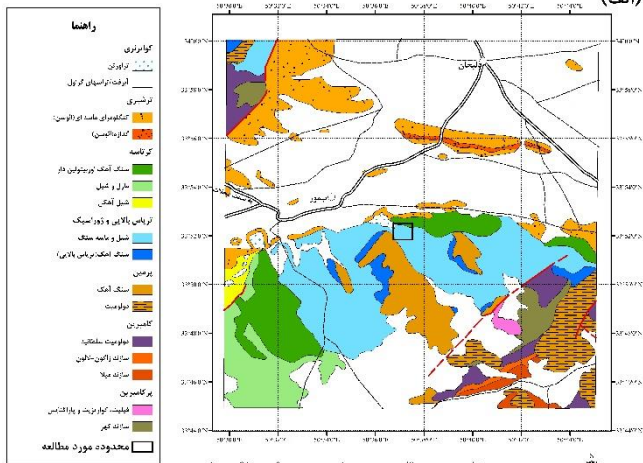
جدول ۱: ویژگی های ژئوالکتریکی مواد رسوبی در محدوده آتشفشان با

توجه به آنالیز آزمایشگاهی.

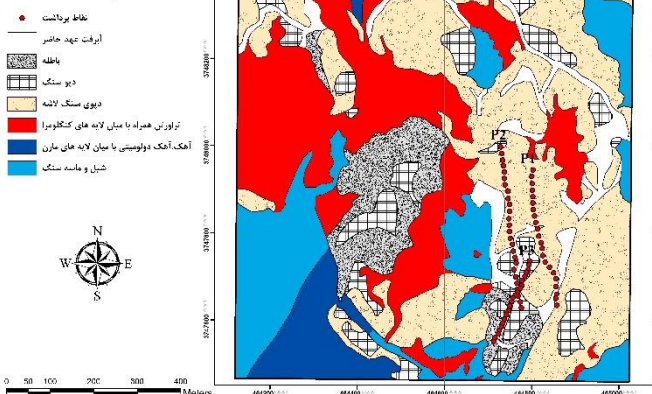
مواد	مقاومت ویژه اندازه گیری شده (اهم متر)
تراورتن	۷۴
میان لایه گلی	۱۶-۲۶
سنگ بستر	۶۱۹
شیلی	۹۵
خاک و لاشه	۸۵
تراورتن و تراونیکس	۷۶
باطله	

با توجه به اطلاعات صحرائی 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 آتشفشان، 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

(الف)



راهنما

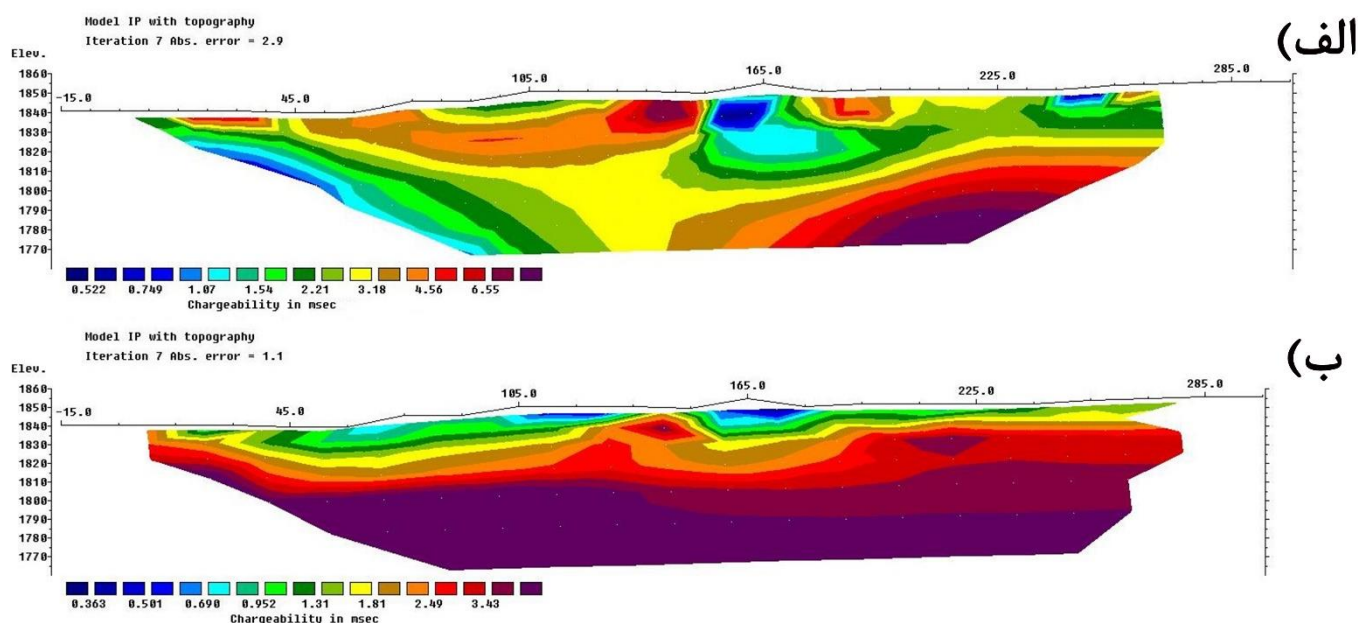


شکل ۴: نقشه زمین شناسی محدوده شهرستان نیمور باز ترسیم از نقشه ۱:۲۵۰۰۰: کلیان (الف)، و محدوده مورد مطالعه با نمایش پروفیل های برداشت (ب) باز ترسیم از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰ تراورتن آتشفشان.

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 آتشفکوه و تجهیزات مورد استفاده برای استخراج سنگ تراورتن و همچنین یکی از سینه‌کارهای استخراج سنگ تراورتن را مشاهده کرد.

۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده تراورتن آتشفکوه در بخش شمال غرب ورقه یک‌صد هزار دلیجان و یک‌دویست و پنجاه هزار گلپایگان واقع شده است (شکل ۴-الف). در محدوده اکتشافی توالی‌های شیل، مارن، ماسه‌سنگ 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 پلیوکواترن به صورت وسیع با شیب کم به صورت دگرشیب بر روی واحد شیل و ماسه‌سنگ 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



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

پروفیل‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۹/۹، ۱۱/۸ و ۲۰/۴ درصد برای شبه-مقاطع مقاومت‌ویژه و ۱/۱، ۱/۶۱ و ۱/۷۴ درصد برای شبه-مقاطع بارپذیری می‌باشد. پس از برداشت‌های صحرائی، مقادیر مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی ظاهری ثبت خواهند شد. در این بخش، مراحل مربوط به تبدیل مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری به یک مقطع از مدل واقعی مقاومت بررسی خواهد شد تا تفسیر زمین‌شناسی بر مبنای آن صورت گیرد. برای یک مدل‌سازی دقیق، داده‌ها نیز باید کیفیت خوبی داشته باشند. داده‌های نامناسب در اثر دو دلیل عمده ایجاد می‌شوند؛ نوفه نظام‌دار و نوفه تصادفی. نوفه نظام‌دار معمولاً در اثر عواملی نظیر خرابی دستگاه، خطای انسانی، قطع بودن اتصالات در حین برداشت صحرائی ایجاد می‌شود؛ به گونه‌ای که قرائت اندازه‌گیری شده مقاومت‌ویژه واقعی را نشان نمی‌دهد. نوفه تصادفی شامل تأثیراتی از قبیل جریان‌های زمینی (مانند تلوریک) است که بر روی تمام قرائت‌ها تأثیر می‌گذارد و می‌تواند باعث شود که قرائت‌ها کمتر یا بیشتر از قرائت‌های بدون نوفه معادل آن باشد. در فرایند حذف داده‌های خارج از

شکل ۴-الف برشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ گلپایگان 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 آتشفکوه بر روی شیل و ماسه‌سنگ‌های دوره تریاس بالایی و ژوراسیک و در مرز ساختار سنگ‌آهک کرتاسه، تشکیل شده است.

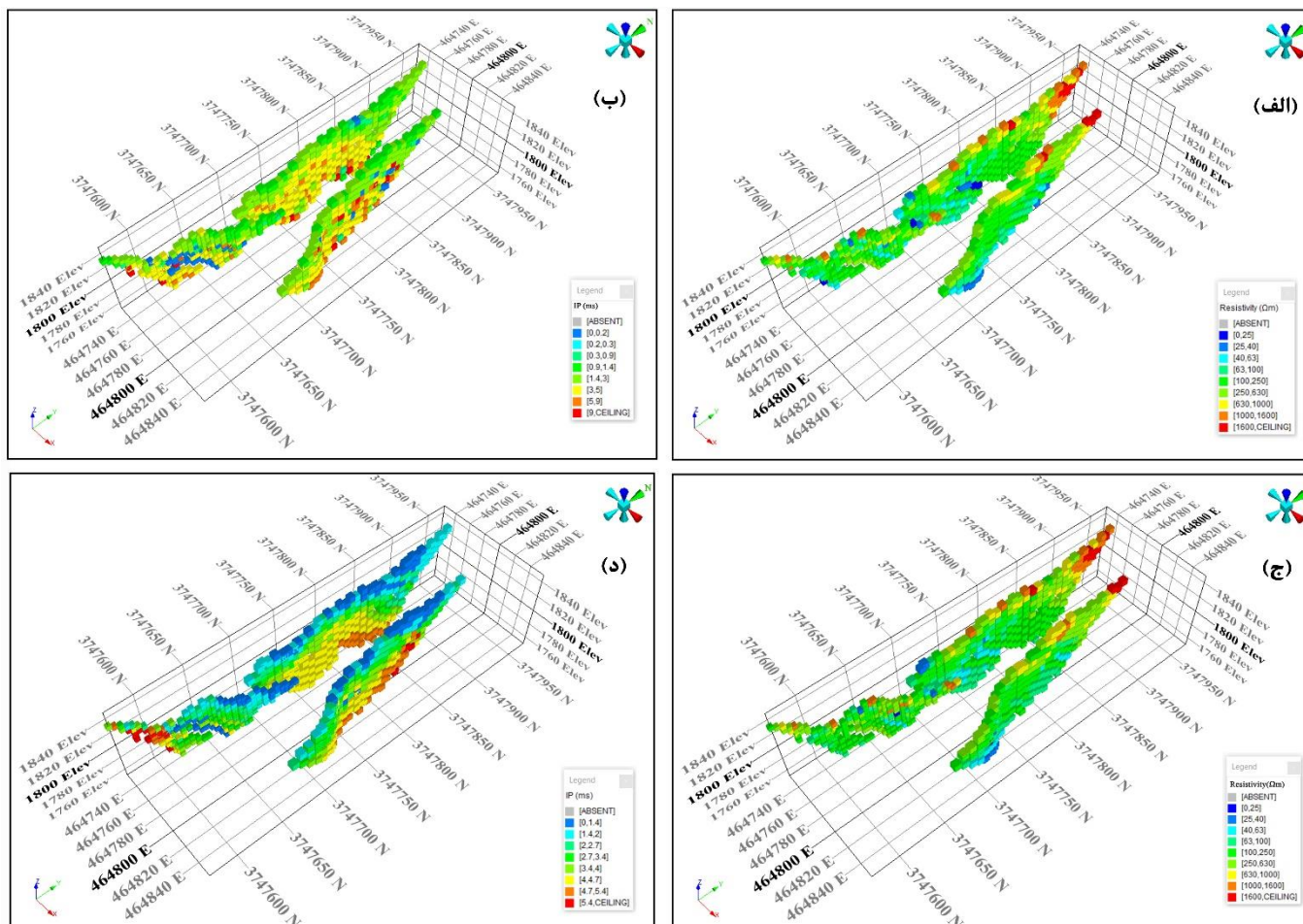
۴- مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوالکتریکی

وارون‌سازی دوبعدی و تصحیح توپوگرافی شبه مقاطع با استفاده از نرم‌افزار *Res2DInv* انجام شد (Loke, 2000). به منظور اینکه بتوان نتایج حاصل از مدل‌سازی سه پروفیل را در کنار یکدیگر و به صورت سه‌بعدی مشاهده کرد، از نرم‌افزار دیگری (*Datamine Studio RM*) جهت نمایش نتایج به دست آمده از نرم‌افزار *Res2DInv* استفاده شد. مقادیر خطای *RMS* برای

طالبی و همکاران، مدل سازی ژئوفیزیکی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت اکتشاف سنگ های ساختمانی، صفحات ۲۷-۴۰.

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.

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 ($VP < 0.3$) حذف شدند. همچنین مقادیر منفی بارپذیری به کمترین مقدار مثبت موجود



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.

می توان در نظر گرفت که به عنوان یک قید جهت محدود کردن نتایج وارون سازی گنجانده می شوند. تقریباً در همه برداشت ها، اطلاعاتی در مورد زمین شناسی زیرسطحی ممکن است وجود داشته باشد؛ به عنوان مثال آیا انتظار می رود توده های زیرسطحی دارای مرزهای تدریجی و نرم باشند یا تیز. در مورد محدوده مورد مطالعه، با توجه به ساختار زمین شناسی منطقه و اینکه معدن تراورتن آتشفشان از سال ها قبل مورد بهره برداری قرار می گرفته است، انتظار می رود که ساختار کلی زیرسطحی به صورت لایه لایه بوده و عدسی های تراورتن به صورت هم شیب با ساختار کلی تشکیل شده باشد. به همین دلیل در وارون سازی داده های مقاومت ویژه، تنظیمات نرم افزار به گونه ای طراحی می شود که حداکثر نرم شدگی در راستای افق اتفاق بیفتد.

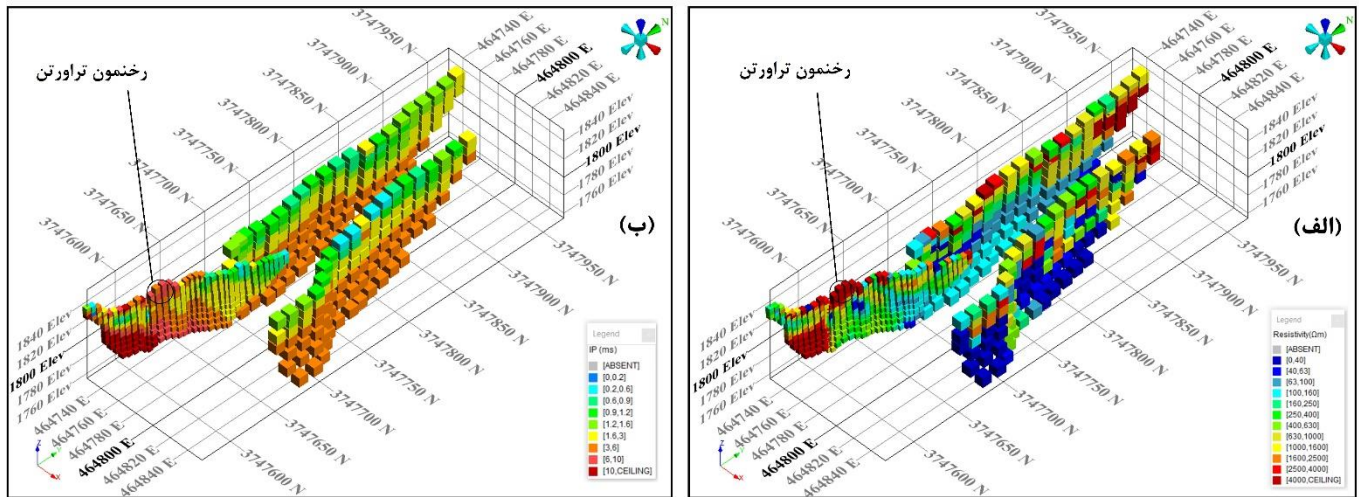
شکل ۶ شامل چهار تصویر می شود که به ترتیب نمایش سه بعدی مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری مشاهده شده (۶-الف)، بارپذیری ظاهری مشاهده شده (۶-ب)، مقاومت الکتریکی پیش بینی شده (۶-ج) و بارپذیری پیش بینی شده (۶-د) بعد از اعمال الگوریتم معکوس سازی دوبعدی می باشد که برای سه پروفیل برداشت به صورت هم زمان به نمایش گذاشته شده است.

مشکل غیر منحصربه فرد بودن پاسخ در وارون سازی داده های مقاومت ویژه و سایر داده های ژئوفیزیکی به اصطلاح "غیر یکتایی جواب" به خوبی شناخته شده است. برای یک مجموعه داده اندازه گیری شده، طیف گسترده ای از مدل ها وجود دارد که می تواند مقادیر ژئوالکتریکی ظاهری محاسبه شده مشابهی را ایجاد کند. برای محدود کردن دامنه مدل های ممکن، به طور معمول برخی فرضیه ها در مورد ماهیت سطح زیرین را

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۱، ۱۴۰۱.

همچنین برای مدل‌هایی که دارای تباين الكتريكي بالا هستند، نتايج به‌دست‌آمده با روش گاوس-نيوتن دقيق‌تر از نتايج به‌دست‌آمده به روش شبه نيوتن مي‌باشد (Loke and Dahlin, 2002). با توجه به تباين بالاي خواص الكتريكي در شبه مقاطع حاصل از برداشت ژئوالكتريك در محدوده آتسكوه، در مدل‌سازي داده‌ها از روش گاوس-نيوتن استفاده شد.

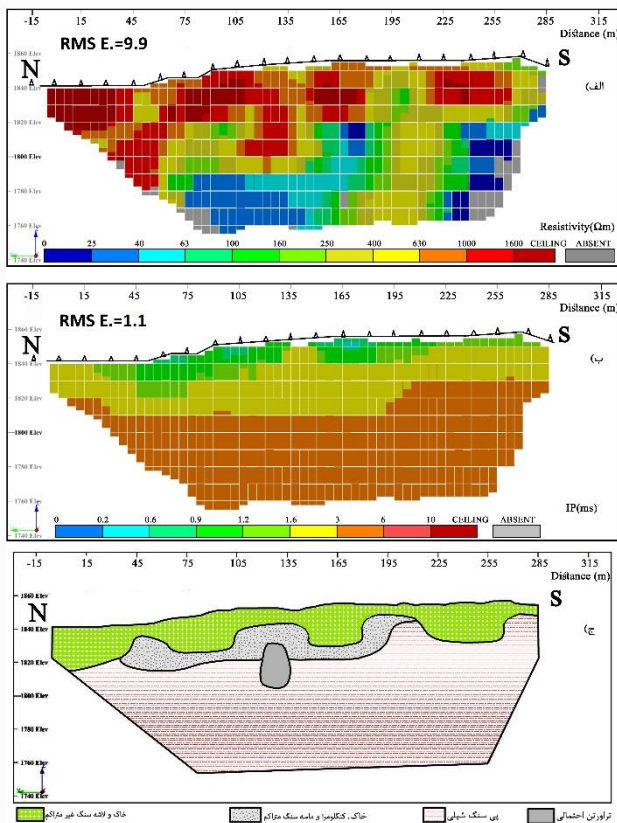
دريكي ديگر از تنظيمات کاربردي يعني نوع روش بهينه‌سازي، نرم-افزار *Res2DInv* دو روش عددي براي حل معادله حداقل مربعات فراهم مي‌كند. روش پيش‌فرض، به‌ويژه هنگامي‌كه تعداد پارامترهاي مدل كم باشد، روش استاندارد گاوس-نيوتن است كه در آن از يك روش مستقيم (Golub and Van Loan, 1989) براي حل معادلات استفاده مي‌شود.



شكل ۷: نمايش سه‌بعدي مدل‌سازي وارون دوبعدي داده‌هاي ژئوالكتريك، (الف) مقاومت‌ويژه الكتريكي، (ب) بارپذيري الكتريكي. سه پروفيل الكتريكي در محدوده برداشت شده است.

در قسمت گسسته‌سازي مدل نيز، نحوه تقسيم سطح زيرين به سلول‌هاي مستطيلي كنترل مي‌شود. به‌طور پيش‌فرض، نرم‌افزار با استفاده از يك الگوريتم ابتكاري تا حدي مبتني بر موقعيت نقاط داده، اندازه و موقعيت بلوك‌هاي مدل را طراحي مي‌كند. در اين مطالعه سطح زيرزمين با توجه به فاصله الكترودي ۱۵ متری پروفيل‌هاي ۱ و ۲ و ۱۰ متری پروفيل ۳، با بلوك‌هاي به ترتيب ۷/۵ و ۵ متری مش بندي شدند.

در برداشت‌ها از مناطق با تغييرات قابل توجه در ارتفاع سطح زمين، هنگام انجام وارون‌سازي مجموعه داده‌ها، بايد اثر توپوگرافي در نظر گرفته شود. نرم‌افزار *Res2DInv* داراي سه روش مختلف است كه مي‌تواند براي تركيب توپوگرافي در مدل وارون استفاده شود (Loke, 2000). در همه اين روش‌ها، گره‌هاي سطح مش به سمت بالا يا پايين منتقل مي‌شوند تا با توپوگرافي واقعي مطابقت داشته باشند. در اين حالت، توپوگرافي بخشي از مش مي‌شود و به‌طور خودكار در مدل وارون گنجانده مي‌شود. در اين مطالعه تصحيح اثر توپوگرافي توسط هر سه روش موجود در نرم‌افزار انجام و منطقي‌ترين مدل، با توجه به اينكه ساختارهاي موجود عمدتاً افقي هستند، به‌عنوان مدل نهايي انتخاب شد.



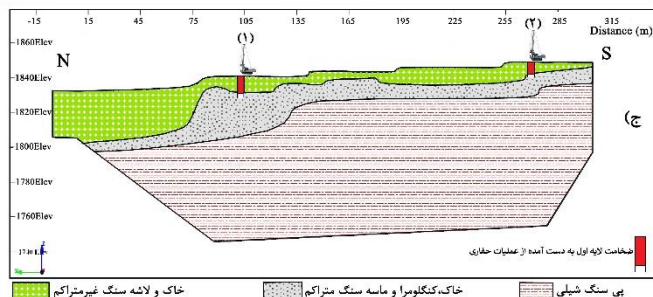
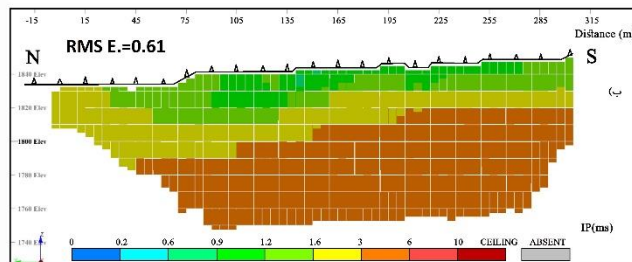
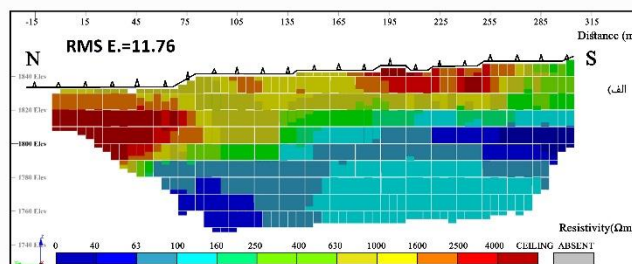
شكل ۸: مدل‌هاي مقاومت‌ويژه الكتريكي (الف)، بارپذيري الكتريكي (ب) و زمين‌شناسي احتمالي (ج) در امتداد پروفيل ۱.

طالبی و همکاران، مدل سازی ژئوفیزیکی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت اکتشاف سنگ های ساختمانی، صفحات ۲۷-۴۰.

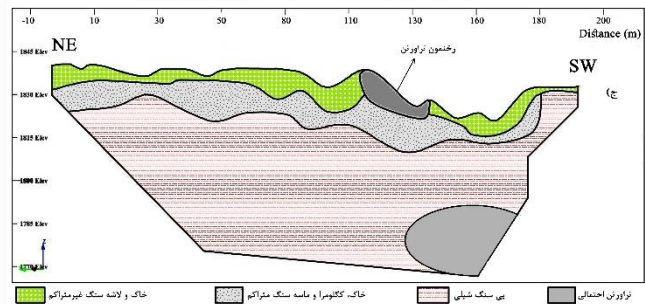
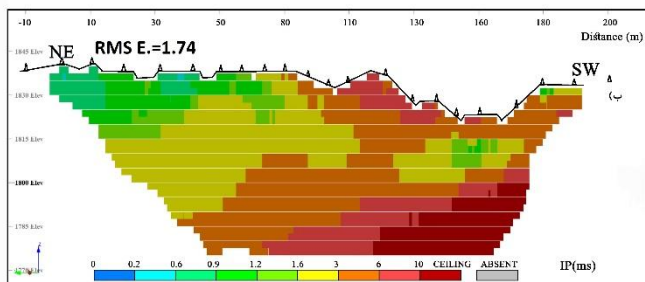
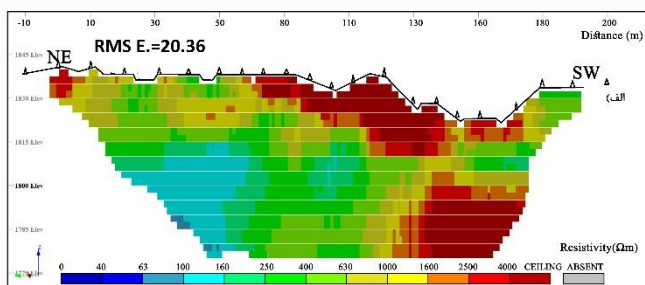
کنگومرا و لاشه متراکم جدا کرده است. ضخامت رولایه به طور میانگین بین ۱۰ تا ۳۰ متر در امتداد این پروفیل ها متغیر است. لایه پی سنگ شیلی نیز به دلیل متراکم بودن و رطوبت آن با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰۰ اهم متر و بارپذیری بالای ۳ میلی ثانیه خود را متمایز کرده است. عمق این لایه نیز بین ۲۰ تا ۴۰ متر تغییر 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: کمتر از ۱۰۰ اهم متر به عنوان پی سنگ شیلی، ۱۰۰ تا ۶۳۰ اهم متر به عنوان گل-سنگ ماری با ادخال هایی از ماسه سنگ، کنگومرا و لاشه متراکم و بیشتر از ۶۳۰ اهم متر به عنوان لایه سطحی خاک و لاشه سنگ غیر متراکم. همچنین با توجه به برداشت بر روی رخنمون عدسی تراورتن در امتداد پروفیل ۳، مقادیر مقاومت ویژه بالاتر از ۴۰۰۰ اهم متر که با بارپذیری بالاتر از ۳ میلی ثانیه همراه است می تواند نشان دهنده عدسی تراورتن در عمق باشد. شبه مقاطع الکتریکی به صورت مشخص ساختارهای افقی را نشان می دهند که سه دامنه مقاومت ویژه در آن ها دیده می شود (شکل های ۸ تا ۱۰).

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 سکانس 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.



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

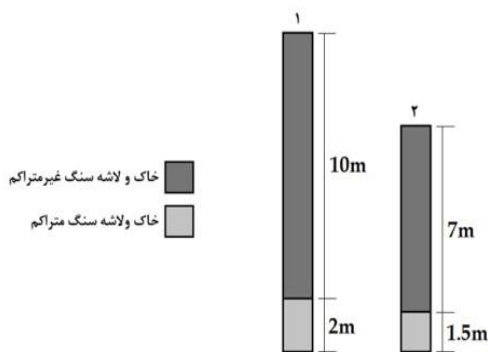


شکل ۱۰: مدل های مقاومت ویژه الکتریکی (الف)، بارپذیری الکتریکی (ب) و زمین شناسی احتمالی (ج) در امتداد پروفیل ۳.

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 کترولیت 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 ناپرجا 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 ماری با ادخال هایی از ماسه سنگ،

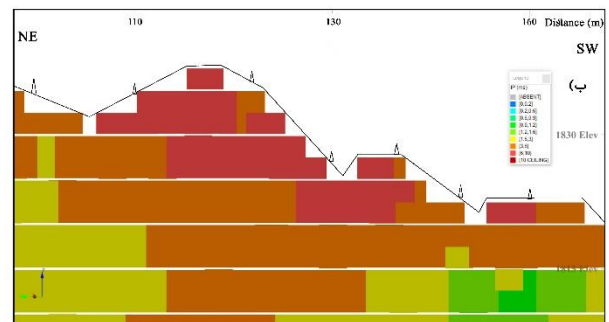
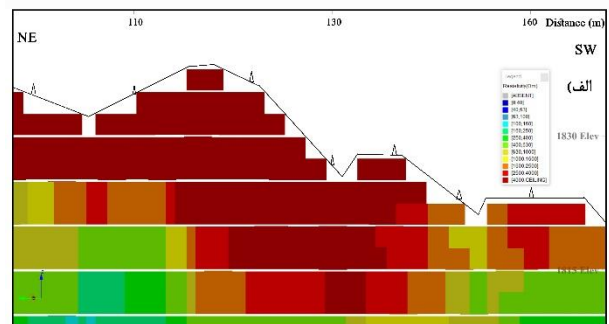
شکل ۹ شامل سه تصویر از مقطع در امتداد پروفیل ۲ می‌شود که به ترتیب مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی (۹-الف)، بارپذیری الکتریکی (۹-ب) و زمین‌شناسی احتمالی (۹-ج) را نشان می‌دهد. در شکل ۹-الف مقادیر بالای مقاومت‌ویژه الکتریکی نزدیک سطح زمین که با مقادیر پایین بارپذیری الکتریکی در شکل ۹-ب همخوانی دارند، مربوط به لایه سطحی خاک و لاشه‌سنگ غیرمتراکم می‌باشند. لایه دوم با مقادیر میانه از مقاومت‌ویژه و بارپذیری نشان‌دهنده ساختار لایه میانی خاک، لاشه و ماسه متراکم می‌باشد. لایه سوم یعنی پی‌سنگ شیلی نیز با مقادیر پایین مقاومت‌ویژه و مقادیر بالای بارپذیری در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب نمایان است. بی‌هنجاری خاصی که بتوان به عدسی تراورتن نسبت داد در این مقطع دیده نشد. مدل زمین‌شناسی احتمالی پروفیل ۲ مطابق با مدل‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری ترسیم شد که در شکل ۹-ج آورده شده است.



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

شکل ۱۰ مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی، بارپذیری الکتریکی و زمین‌شناسی احتمالی در امتداد پروفیل ۳ را نشان می‌دهد. مهم‌ترین نکته در مورد شبه مقطع پروفیل ۳، قرارگیری این پروفیل بر روی رخنمون عدسی تراورتن در سطح زمین می‌باشد. توجه به مدل مقاومت‌ویژه پروفیل ۳ که در شکل ۱۰-الف آورده شده این نکته را نشان می‌دهد که مقدار مقاومت‌ویژه الکتریکی عدسی تراورتن که در فاصله ۱۲۵ متری از مبدأ پروفیل قرار دارد، به صورت قابل توجهی بالاتر از سکانس رسوبی مقطع می‌باشد و همچنین مقدار بارپذیری الکتریکی عدسی تراورتن نیز بالاتر از ۱۰ میلی‌ثانیه مدل‌سازی شده است. سایر ویژگی‌های ساختاری مقطع مانند دو پروفیل قبل یعنی لایه سطحی خاک و لاشه‌سنگ غیرمتراکم با مقاومت‌ویژه بالا و بارپذیری پایین، لایه میانی خاک، لاشه و ماسه‌سنگ متراکم با مقاومت‌ویژه و بارپذیری حد واسط و لایه زیرین پی‌سنگ شیلی با مقادیر مقاومت‌ویژه پایین و بارپذیری بالا مشخص شد. همچنین در فاصله ۱۵۰ تا ۱۸۰ متری مبدأ پروفیل و در تراز عمقی کمتر از ۱۸۰۰ متر، یک بی‌هنجاری با مقاومت‌ویژه و بارپذیری بالا دیده شد که می‌تواند نشان از وجود عدسی تراورتن باشد که در بررسی‌های صحرایی باید مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت مدل زمین‌شناسی احتمالی پروفیل ۳ با توجه به مدل‌های

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 ادخال‌هایی از ماسه‌سنگ، کنگلومرا و لاشه متراکم می‌باشد که در شکل ۶-الف مقادیر میانه مقاومت‌ویژه و در شکل ۸-ب مقادیر میانه بارپذیری را نشان می‌دهد. لایه سوم با مقادیر پایین مقاومت‌ویژه و مقادیر بالای 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.

شدید بارپذیری الکتریکی شده است. لذا این لایه می‌تواند به‌خوبی با توجه به خواص الکتریکی متمایز نسبت به سایر لایه‌ها شناسایی شود. ضخامت رولایه‌ی خاک و لاشه‌سنگ غیرمتراکم به‌طور میانگین بین ۱۰ تا حداکثر ۳۰ متر در امتداد پروفیل‌های الکتریکی متغیر است. لایه 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 انجام نشده است.

۷- سپاس‌گزاری

نویسندگان از شرکت معدن فرآور 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 جاجرم. 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.ج.، ۱۳۹۲. روشهای الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی، انتشارات

مقاومت‌ویژه و بارپذیری تهیه شد که در شکل ۱۰-ج آورده شده است. مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی، بارپذیری الکتریکی و زمین‌شناسی واقعی در امتداد قسمتی از پروفیل ۳ بر روی رخنمون عدسی تراورتن به‌منظور بررسی بیشتر خصوصیات ژئوالکتریک سنگ تراورتن تهیه شد که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. مقادیر بالای مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی بر روی رخنمون تراورتن به‌وضوح قابل مشاهده است. نتایج حاکی از این است در صورتی که عدسی تراورتنی در محدوده وجود داشته باشد با تباین بارز خواص ژئوالکتریک که بین هدف و محیط رسوبی دربرگیرنده وجود دارد، اکتشاف چنین سنگ ساختمانی قابل اعتماد می‌باشد. به‌منظور بررسی توانایی روش ژئوالکتریک به‌کاربرده شده در محدوده مورد مطالعه و ارزیابی مدل‌های زمین‌شناسی 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 چینه‌شناسی دو حفاری مشخص شد که در نقطه اول در عمق ۱۰ متری زمین به لایه میانی یعنی خاک، لاشه و ماسه‌سنگ 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 می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که روش ژئوالکتریک به‌کاررفته در این مطالعه با دقت نسبتاً خوبی توانسته مرز بین ساختارهای زمین‌شناسی را به نقشه درآورد. این امر نشان‌دهنده توانایی و موفقیت روش ژئوالکتریک در شناسایی ساختارهای کم‌عمق سنگ‌های ساختمانی می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

این مطالعه به‌منظور بررسی توانایی روش ژئوالکتریک در شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و سنگ ساختمانی تراورتن در محدوده معدنی آتشفشان انجام شد. روش توموگرافی مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی در راستای سه پروفیل با آرایه ترکیبی دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی در محدوده مورد مطالعه انجام شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده موفقیت و کارایی بالای این روش در تشخیص اهداف اکتشافی مدنظر بوده است.

برداشت‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی در سه پروفیل حدود ۶ هکتار از محدوده تراورتن آتشفشان را پوشش داد. برای وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیک از نرم‌افزار *Res2DInv* استفاده شد. به دلیل وجود ساختارهای افقی در محدوده مورد مطالعه، الگوریتم وارون‌سازی و پارامترهای مربوط به آن، به‌گونه‌ای تعیین شد که حداکثر نرم‌شدگی در راستای افق در مدل‌های مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی صورت گیرد. سپس، با نمایش سه‌بعدی نتایج مدل‌سازی، امکان ارائه تفسیر زمین‌شناسی از منطقه، از جمله ویژگی‌های ساختاری و مناطق رسانا و مقاوم را فراهم می‌کند.

سه زون ساختاری در منطقه شناسایی شد که به‌صورت سه دامنه از مقاومت‌ویژه و بارپذیری الکتریکی در مدل‌های وارون شناسایی شدند. لایه‌ی سطحی خاک و لاشه‌سنگ به دلیل نابرجا بودن و حبس هوا در شکاف‌ها و حفرات خود، باعث افزایش خیلی زیاد مقاومت‌ویژه رولایه و افت

- à-la-masse method, *Journal of Applied Geophysics*, 98:1-10.
- 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 Ruskeeniemi, 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.
- Kadioglu, 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.
- 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.
- 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., Özpınar, 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-

- Öğretmen, Z., Şeren, A., 2014, Investigating fracture–cracked systems with geophysical methods in Bayburt Kiratlı 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 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 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>.
- Yalçın, 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.
- 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., Mostafaie, 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.
- Mostafaie, 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.



Geophysical modeling of electrical resistivity and induced polarization data for exploration of building stones: A case study - Atashkooch travertine

Mohammad Ali Talebi¹, Maysam Abedi^{*2}, Ali Moradzadeh³ and Ahmad Afshar¹

1- School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

2- Assistant professor School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

3- Professor School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

Received: 16 January 2021; Accepted: 11 April 2021

Corresponding author: maysamabedi@ut.ac.ir

Keywords

Geoelectric
Travertine
Electrical resistivity
Induced polarization
Atashkooch

Extended Abstract

Summary

The study area is situated near to the city of Nimvar, 15 km east of Mahallat, in Markazi Province. This area is located at the border of two structural zones of Sanandaj-Sirjan and Urmia-Dokhtar in terms of the geological division. The exposed geological units in the study area often include shale, marl, sandstone, conglomerate, and limestone sequences with strata extending (north)west-(south)east and a slope to the northeast. The low-slope Plio-Quaternary travertine stone has sporadically occurred within these geological units as an unconformity unit. In first step of geophysical investigations, to evaluate the

efficiency of the geoelectric method, laboratory measurements of the electrical resistivity property were performed on the samples taken from the travertine stone and associated tailings. As the laboratory results in differentiating geological units on the basis of electrical properties were acceptable, then electrical resistivity and induced polarization surveys using a combination of dipole-dipole and pole-dipole electrode arrays were carried out in Atashkooch travertine area. These surveys were conducted along three survey lines using electrode spacings of 10 and 15 meters, and as a result, 850 electrical measurements were collected by using Canadian GDD geoelectric measuring equipment with a power of 3600 watts. The ultimate goal of this study is to explore possible travertine deposits that are buried under an overburden layer or soil and tailings from old mining activities. After processing observations, the raw electrical data, obtained along each survey line, were inverted to image possible two-dimensional (2D) zones of travertine lens occurrence. The results of the 2D inverse modeling were also visualized in three-dimensional (3D) form to better capture the geological trend of the sedimentary units. Considering the electrical resistivity values of various geological units in the Atashkooch area and constructing a blocky model across each survey line, and also, estimating the values of resistivity and chargeability, a geological model was attributed individually to each survey line. Due to high electrical resistivity values of the travertine outcrops, we could only detect one target along the first survey line at a depth of 15 to 20 m that subsequently needed to be excavated for more details. In addition, the quality of the proposed geological models, based on the geophysical investigations, was confirmed by digging two exploratory boreholes in the area. The results indicate that the geoelectric surveys yield valuable information for the exploration of travertine building stones.

Introduction

Atashkooch travertine area is located in the northwest portion of the Delijan 1: 100,000 and Golpayegan 1: 250,000 geological maps. In the region of interest, a sequence of shale, marl, sandstone and conglomerate rocks with west-east and northwest-southeast trends exist. The thickness of the travertine lens embedded within the conglomerate varies considerably in the region. Its thickness decreases at the periphery of the travertine unit and increases inward. This study focuses on the electrical characteristics of the travertine lens and its distinct physical property contrast relative to its surrounding. This study also facilitates the exploratory plan of building stones through geoelectrical investigations. Thus, three electrical survey lines were designed to conduct 2D electrical profiling. Here, the modeling results and the geological interpretation have been presented in details. Note that the geophysical observations include geoelectric measurements at 850 points where a combination of dipole-dipole and pole-dipole electrode arrays with the electrode spacing of 15 and 10 meters was utilized.

Methodology and Approaches

The raw field geophysical data along along three survey lines have been modeled using a 2D smooth inversion algorithm with the help of RES2DINV software package. The 2D model sections are displayed in 3D form as well. According to the retrieved electrical resistivity and chargeability data, a geological model was proposed to each survey line.

Results and Conclusions

This study was conducted to investigate the ability of geoelectric method to identify geological structures and travertine building stones in the Atashkooch area. The results showed that high values of electrical resistivity were in association with the travertine rocks. Moreover, three main geological layers were identified in the area, presenting three ranges of geoelectrical values in the retrieved models. In order to evaluate the capability of the geoelectric method, used in this study, two boreholes were drilled along the second survey line indicating that this method has good accuracy in imaging the boundaries of the geological layers in the area.
