

ارزیابی تعیین مقاومت الکتریکی خاک در گستره وسیع جهت سنجش میزان خوردگی خاک ها - مطالعه موردی: قطارشهری کرمانشاه

یزدان شمس ملکی

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، y.shamsmaleki@kut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش نتایج مطالعات میدانی کاوش های ژئوالکتریکی زیرزمینی در مقیاس وسیع ارائه می شود. محدوده مورد مطالعه مسیر ۱۴ کیلومتری اجرای خط نخست پروژه قطار شهری کرمانشاه است. مطالعه مقاومت الکتریکی خاک ها در عمق گمانه ها می تواند اطلاعات مفیدی در خصوص میزان استعداد خوردگی آنها در اختیار طراحان ابنیه بتن مسلح و فولادی قرار دهد. روش چهار الکترودی و نر مبنای اندازه گیری های صحرائی این مطالعه و ارائه یافته های آن است. جهت انجام آزمایش های مقاومت ویژه الکتریکی در اعماق مختلف گمانه های مسیر قطار شهری، از یافته های دقیق دستگاه Megger DET5/4D استفاده شده است. آزمایش های مقاومت الکتریکی در تعداد ۱۵ گمانه در ۱۲ ایستگاه مختلف پروژه در حداقل سه ژرفای ۳، ۵ و ۷ متری انجام شده است. با توجه به مقایسه نتایج حاصله از این آزمایش ها و جدول رواداری ها، مقدار خوردگی خاک بر اساس معیار کمی خوردگی خاک رومانوف، در ایستگاه های ۴، ۶ و ۹ در زمان انجام آزمایش ها، در حد متوسط تا شدید و در مابقی ایستگاه ها در حد متوسط است. نتایج میدانی این مطالعه در کنار یافته های مطالعات پژوهشی دیگر نشان می دهد که وجود رودخانه های قره سو و آبشوران درون شهر کرمانشاه و نشت فاضلاب به داخل این رودخانه ها و نیز وجود بسترهای خاکی رسی و آهکی گسترده، عامل اصلی شناسایی پتانسیل خوردگی متوسط تا شدید در اغلب نقاط شهر، به ویژه در نواحی مجاور این رودخانه ها هستند.

کلمات کلیدی

مطالعه ژئوفیزیکی، مقاومت الکتریکی خاک، خوردگی خاک، روش ۴ الکترودی، قطارشهری کرمانشاه.

۱- مقدمه

پیش از احداث سازه های مهندسی، انجام مطالعات مرتبط با میزان خوردگی خاک ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. سازه های فولادی و بتن مسلح، هر کدام به نحوی تحت تاثیر زیان های ناشی از محیط خاک خورنده قرار می گیرند. آسیب به فولاد و بتن، عواقب جبران ناپذیری بر سرویس دهی و طول عمر سازه ها دارد. بر اساس مباحث نهم و دهم مقررات ملی ساختمان ایران، شرایط محیطی نقش تعیین کننده و اساسی در تحلیل، طراحی، اجرا، کنترل و بهره برداری از سازه های بتنی و فولادی دارند. بر این اساس، شناخت شرایط زیرسطحی و تعیین محدوده خاک های خورنده به عنوان بستر اجرای سازه ها، تاثیرات بسیار زیادی بر دوام و طول عمر آنها دارد. از این رو، جهت تعیین میزان خوردگی خاک ها، روش ژئوالکتریکی توموگرافی مقاومت الکتریکی^۱ یا ERT یکی از پرکاربردترین و مهم ترین روش های ژئوفیزیکی تعیین غیرمستقیم و غیرمخرب شرایط زیرسطحی بسترهای خاکی و سنگی محل احداث سازه ها است. علاوه بر شناسایی های کلی زیرسطحی، وجود هرگونه عوارض، حفرات، نامنظمی های زیرسطحی، وضعیت سفره های آب زیرزمینی و مسائل دیگر را به کمک این روش، می توان به خوبی تشخیص داد. در این زمینه تحقیقاتی، مطالعات ارزنده ای در دهه اخیر در شرایط آب و هوایی مختلف، به منظور بهره برداری از نتایج روش های مختلف اندازه گیری مقاومت الکتریکی ویژه زیرسطحی ارائه شده است. برای مثال، در مطالعه مندوزا و همکاران^۲

¹ The electrical resistivity tomography (ERT)

² Mendoza et al.

[۱]، یک وارونگی مشترک دوبعدی از داده‌ها را با پیکربندی‌های دوقطبی-دوقطبی، شلمبرگر^۳ و ونر^۴ بر روی داده‌های واقعی و مصنوعی اعمال کرده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که کاربرد وارونگی مشترک بهتر از استفاده از وارونگی‌های جداگانه است، زیرا وارونگی مشترک از چگالی بالاتر داده و توزیع جریان الکتریکی متفاوت در زیر خاک استفاده می‌کند. در این مورد، ناهمگونی زیاد محیط‌های کارستی را بهتر می‌توان تشخیص داد [۱]. در تحقیق کنستانتین و همکاران^۵ [۲] اندازه‌گیری‌های ۲/۵ بعدی ERT انجام شده با آرایه معکوس ونر-شلمبرگر، نتایج ریزگرانشی^۶ و لرزه‌ای برنامه تحقیقاتی قبلی انجام شده توسط ایشان را تکمیل و به شناسایی فضای خالی کارست در یک محیط کارستی بسیار ناهمگن، در کشور آلمان کمک شایانی کرده است. در کار مطالعاتی آیزبوخای و اویمی^۷ [۳]، پتانسیل استفاده از آرایه گرادیان-چندگانه، یک پیکربندی الکتروغیر متعارف، برای اندازه‌گیری مقاومت مقرون به صرفه و سریع زیرسطحی و نقشه‌برداری پلاریزاسیون القایی^۸ مورد ارزیابی قرار گرفته است. این آرایه برای سنجش مقاومت الکتریکی دو بعدی و تصویربرداری قطبش القایی حوزه-زمان در یک سایت مطالعاتی در اوتا^۹، جنوب غربی نیجریه استفاده شده است. به کمک این روش، وضعیت زیرسطحی مشخص شده و آبخوان اصلی با استفاده از مقاومت الکتریکی معکوس و تصاویر شارژپذیری^{۱۰} به دست آمده است. در تحقیق آنها مشخص شده که آرایه گرادیان-چندگانه دارای مزیت اندازه‌گیری و وضوح تصویر بهبود یافته تری نسبت به آرایه ونر است. در مقاله الحمیدای و همکاران^{۱۱} [۴] سه نوع ناهمگنی زمین و تأثیر آنها بر مقاومت الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده و مدل‌های معکوس توموگرافی مقاومت الکتریکی بررسی شده است. در مطالعه آنها، انواع ناهمگنی زیرسطحی شامل ناهمگنی نزدیک به سطح (NSI)، لایه بالایی با مقاومت بسیار کم (VLR) و لایه بالایی با مقاومت به ترتیب زیاد-کم-زیاد (HLH) تولید شده است. مطابق نتایج کسب شده توسط آنها، آرایه دوقطبی-دوقطبی وضوح بهتری را بدست می‌دهد و می‌تواند لایه‌های زیرسطحی را با دقت بیشتری مشخص سازد. همچنین مطالعه بلمونت و مارسلو^{۱۲} [۵] با داده‌های ERT سر و کار دارد و از ترکیبات خطی داده‌ها، برای بدست آوردن مجموعه داده‌های شناسایی زیرسطحی دیگری که به طور مستقیم اندازه‌گیری نشده‌اند، استفاده می‌کند. مطابق روش ارائه شده در تحقیق آنها، مجموعه داده‌های شبه قطبی-دوقطبی را می‌توان با تجهیزات رایج، با استفاده از توالی‌های استاندارد ثبت قطبی-دوقطبی به دست آورد. برای ارزیابی روش، پاسخ‌های مدل آلوده به نویز و همچنین داده‌های میدانی در نظر گرفته شده است. یافته‌های آنها برای ساخت مجموعه داده‌های دوقطبی-دوقطبی و ونر-شلمبرگر استفاده شده است. نتایج نشان دهنده مناسب بودن هر دوی روش پیشنهادی و کنترل کیفیت آن است [۵]. در پژوهش دالین و لوک^{۱۳} [۶] مدل‌سازی تصویربرداری مقاومت الکتریکی دوبعدی به منظور شناخت میزان وضوح اصلی این روش، در موقعیت‌های مختلف زمین‌شناسی و برای ارزیابی رفتار روش‌های تفسیر نتایج آن، تحت شرایط کنترل شده انجام شده است. از آرایه ونر در سراسر مطالعه آنها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تقریب یک بعدی (1D) نتایج معقولی را صرفاً در محیط‌هایی با تغییرات مقاومت الکتریکی جانبی بسیار تدریجی ارائه می‌کند، در غیر این صورت نتیجه حاصله ممکن است به شدت گمراه‌کننده باشد [۶]. در مقاله دلاوگا و همکاران^{۱۴} [۷] هدف مطالعه یک خاک آلوده به دلیل نشت بنزین ناشی از شکاف در یک محفظه تصفیه بتنی واقع در امتداد یک خط انتقال گاز بوده است. توموگرافی الکتریکی به دست آمده از وارونگی دو بعدی 2D داده‌های پژوهش آنها

³ Schlumberger

⁴ Wenner

⁵ Constantin et al.

⁶ Microgravimetric

⁷ Aizebeokhai and Oyeyemi

⁸ Induced polarization mapping

⁹ Ota

¹⁰ Chargeability images

¹¹ AL-Hameedawi et al.

¹² Bellmunt and Marcuello

¹³ Dahlin and Loke

¹⁴ de la Vega et al.

نشان داد که منطقه مورد بررسی با یک ستون آلاینده مقاوم در عمق بین ۱ تا ۲ متری و با گسترش جانبی حدود ۶-۸ متر آلوده شده است. افزون بر آن برای تکمیل مطالعه لایه عمیق تر، ژرفاسنجی به روش ورنر انجام شده است [۷]. در پژوهش چیتانی و چان^{۱۵} [۸] کاربرد روش ورنر به عنوان یک روش غیر-مخرب و پذیرفته شده برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن، تشریح شده است. بر اساس نتایج آنها، هنگامی که آزمایش برای بتن در شرایط محیطی انجام می شود، مقاومت در برابر تماس الکتروود عامل اصلی ای است که می تواند منجر به خطای اندازه گیری شود و دقت و تکرارپذیری اندازه گیری های مقاومت الکتریکی بتن را به شدت تحت تاثیر قرار دهد [۸].

در تحقیق سامپسون و همکاران^{۱۶} [۹] داده های مقاومت الکتریکی حاصل از آرایه های کلاسیک ورنر چهار-پروبی بر روی سطوح یخ های شناور دریایی برای بازسازی غیرمستقیم پروفیل های رسانایی با عمق، شامل مولفه های افقی و عمودی بکار برده شده است. یک مشکل رایج در این بازسازی ها، عدم منحصر به فرد بودن وارونگی ها است، که با افزایش تعداد لایه ها در مدل بگرنج تر هم می شود. نتایج آنها به ارائه مبنایی دقیق برای روش های الکترومغناطیسی جهت به دست آوردن داده های ضخامت یخ دریا، به عنوان معیاری کلیدی از تاثیر تغییرات آب و هوایی در مناطق قطبی کمک می کند [۹]. مطالعه تانگ و همکاران^{۱۷} [۱۰] روش جدیدی را برای واسنجی مدل نظری مقاومت الکتریکی در برابر محتوای آب یخ زده، در خاک های یخ زده پیشنهاد می کند. این روش با بررسی رابطه بین مقاومت الکتریکی توده خاک و محتوای آب یخ زده در حالت یخ زده، همبستگی بین مقاومت الکتریکی توده خاک و محتوای آب یخ زده را در حالت خشک شدن، مشخص می کند [۱۰]. همبستگی مناسبی بین مقاومت الکتریکی و محتوای آب یخ زده در نمونه های خاک با اندازه ذرات مختلف (رس، سیلت و خاک ماسه ای) در طول انجماد و خشک شدن ایجاد شده است. این روش جدید برای کالیبراسیون مدل توموگرافی مقاومت الکتریکی برای کاربردهای مهندسی در مناطق سردسیر مناسب است [۱۰]. در مطالعات جدید [۱۱-۱۵] نیز به ویژه به کمک روش آرایه ورنر، ارزیابی مقاومت الکتریکی خاک ها جهت تعیین میزان خوردگی آنها در دستورکار قرار گرفته است. مطابق آنچه که از مرور منابع فنی موجود به ویژه در سالیان اخیر برمی آید [۱۱-۱۵]، روش ژئوفیزیکی سنجش مقاومت الکتریکی با موفقیت برای بررسی مسائل مهندسی مختلف از قبیل شناسایی وضعیت لایه های زیرسطحی زمین، تعیین موقعیت حفرات و عارضه های زمین شناسی، بررسی شرایط بتن های سازه ای، تعیین عمق و ضخامت یخ و مسائل متنوع دیگری بکاربرده شده است. از طرفی، این روش در شرایط آب و هوایی مختلفی از سرد و یخبندان گرفته تا مناطق خشک و کویری مورد استفاده قرار گرفته است. به هر حال مطابق مطالعات مفصل انجام شده، به عنوان یک نوآوری مهم، تا به حال کمتر به بررسی نتایج و جزئیات دقیق روش ژئوالکتریکی اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی در مقیاس وسیع (به ویژه در تحقیقات داخلی) جهت بررسی پتانسیل خوردگی خاک ها پرداخته شده است. تعیین محدوده های خوردگی خاک در گستره وسیع شهری، می تواند از بروز آسیب های ناشی از آن و تحمیل هزینه های ناخواسته زیادی در ساخت سازه های فولادی-بتنی جلوگیری کند. از این رو در این مطالعه، این موضوع مهم در قالبی فنی و با تکیه بر یافته های واقعی صحرایی در یک پروژه مطالعه موردی بزرگ، مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گرفته است.

۲- روش شناسی پژوهش: معرفی روش های الکتریکی شناسایی زیرسطحی زمین (روش های ژئوالکتریک)

مبنای اغلب روش های الکتریکی بر اساس اندازه گیری مقاومت زمین در برابر عبور جریان الکتریکی یا میزان قابلیت هدایت الکتریکی آن است. با توجه به آنکه خواص الکتریکی هر یک از خاک ها و سنگ های روی پوسته زمین تا حدودی شناخته شده است، اطلاع از میزان مقاومت یا هدایت الکتریکی مواد می تواند برای شناسایی جنس آنها به کار برود [۱۶-۱۷]. روش های الکتریکی به دو گروه، روش های الکتریکی با (۱) چشمه طبیعی و (۲) با چشمه مصنوعی، بنا به نوع چشمه یا منبع انرژی (طبیعی یا مصنوعی)، تقسیم بندی می شوند. یکی از روش های الکتریکی مبتنی بر چشمه مصنوعی و اندازه گیری مقاومت

¹⁵ Cheytani and Chan

¹⁶ Sampson et al.

¹⁷ Tang et al.

الکتریکی زمین که به نسبت سایر روش های الکتریکی از کاربرد بیشتری در مطالعات ژئوتکنیک برخوردار است، روش مقاومت سنجی است [۱۶-۱۷].

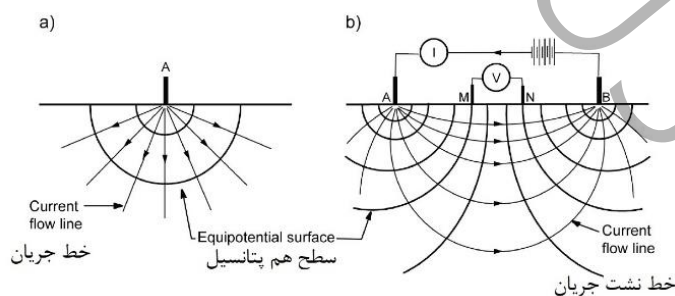
در شکل ۱ جانمایی صحرائی شماتیک ابزارهای مورد استفاده در برداشت مقاومت الکتریکی نشان داده شده است [۱۳ و ۱۸]. در صورتی که بررسی تغییرات مقاومت ویژه خاک در یک سطح افقی مورد نظر باشد، می توان فاصله الکترودها را ثابت نگه داشت و موقعیت مرکز آن را تغییر داد. این نحوه بررسی، به پروفیل زنی موسوم است [۱۶]. همچنین در حالتی که بررسی تغییرات عمقی مقاومت ویژه خاک مدنظر باشد، می توان مرکز الکترودها را ثابت و فاصله بین آن ها را تغییر داد. با افزایش فاصله بین الکترودها عمق مورد بررسی نیز افزایش می یابد. این نحوه بررسی به سونداژ الکتریکی موسوم است [۱۶]. در این مقاله، از روش استاندارد چهار الکترودی و نر جهت تعیین میزان مقاومت الکتریکی و خوردگی خاک استفاده شده است. دو الکتروود برای شارش جریان و دو الکتروود برای اندازه گیری میزان پتانسیل (ولتاژ) بکار گرفته شده است. بسته به عمق مورد مطالعه، فاصله الکترودها از هم تغییر خواهد کرد [۱۶-۱۷].

۲-۱- مبانی روش های ژئوالکتریکی

روش های ژئوالکتریک به طور گسترده در نقشه برداری آب های زیرزمینی برای بررسی آسیب پذیری سفره های زیرزمینی کم عمق استفاده می شود [۱۸]. آسیب پذیری سفره های زیرزمینی ارتباط نزدیکی با ناهمگونی^{۱۸} کلاهی رسی دارد. محتوای رس از خود مقاومت الکتریکی اندکی نشان می دهد [۱۸]، در حالی که سازندهای نفوذپذیر ماسه ای، مقاومت بالایی دارند. روش ژئوالکتریکی قادر به نقشه برداری هر دوی سازندهای با مقاومت کم و زیاد است و بنابراین ابزاری ارزشمند برای مطالعات آسیب پذیری آبخوان ها است [۱۸-۲۰]. سونداژهای^{۱۹} سنتی تکی در پیکربندی شلمبرگر^{۲۰} یا پروفیل سازی در پیکربندی وئر^{۲۱} اغلب با روش های رایانه ای جدید جایگزین می شوند، که در آن پروفیل بندی و سونداژ در یک فرآیند کاری انجام می شود. جمع آوری داده ها یا با سیستم های چند الکترودی^{۲۲} (CVES) یا مجموعه ای از آرایه های الکتروود ثابت انجام می شود [۱۸]. در این بخش توضیح مختصری از مبانی فیزیکی داده شده است. علاوه بر این، سیستم های ابزار مختلف و تکنیک های میدانی، که در مناطق آزمایشی استفاده شده اند، شرح داده شده اند [۱۸]. شرح مفصلی از روش ژئوالکتریکی را می توان در مراجع [۲۱-۲۳] یافت.

۲-۱-۱- مبانی فیزیکی^{۲۳}

اندازه گیری ژئوالکتریکی با ثبت پتانسیل الکتریکی ناشی از جریان ورودی به درون زمین، با هدف دستیابی به اطلاعاتی در مورد ساختار مقاومت الکتریکی در زمین انجام می شود [۱۸]. در یک زمین همگن (نیم فضا) جریان به صورت شعاعی از منبع جریان خارج می شود و سطوح هم پتانسیل برآمده عمود بر خطوط جریان جاری می شوند و نیم کره ها را تشکیل می دهند (شکل ۱) [۱۸].



خطوط جریان و هم پتانسیل (ولتاژ) در حوالی ۴ الکتروود [۱۸].

¹⁸ Heterogeneity

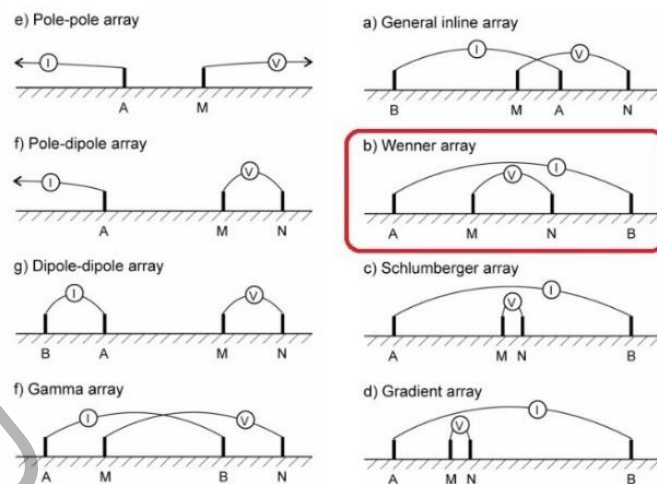
¹⁹ Soundings

²⁰ Schlumberger configuration

²¹ Wenner configuration

²² Multi electrode systems (CVES)

²³ Physical base



انواع آرایش های (آرایه های) چهارالکترودی مرسوم [۱۸].

شکل ۱: چیدمان های مختلف الکترودهای جریان ورودی (I) و ولتاژ (اختلاف پتانسیل) خروجی اندازه گیری شده (V) [۱۸] شامل آرایه های: (آ) در خط عمومی، (ب) ونر، (ث) شلمبرگر، (د) گرادیان، (ای) قطبی-قطبی، (ف) قطبی-دوقطبی، (ج) دوقطبی-دوقطبی و (ه) گاما.

Figure 1. Different electrode arrangements for input current (I) and measured output voltage (potential difference) (V) [18] including arrays: (a) in-line, (b) Wenner, (c) Schlumberger, (d) gradient, (e) polar-polar, (f) polar-dipole, (g) dipole-dipole and (h) gamma.

در شرایط متداول با هر دو منبع (چشمه) جریان و سینک (چاه) جریان، خطوط شارش جریان و سطوح هم پتانسیل پیچیده تر می شوند (شکل ۱)، زیرا خطوط روند جریان در مرزها خم می شوند، جایی که مقاومت های الکتریکی زمین تغییر می کند. داده های ژئوالکتریک معمولاً به صورت مقاومت های ظاهری ρ_a بیان می شوند [۱۸]:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (1)$$

که در رابطه فوق، ΔV اختلاف پتانسیل (ولتاژ) اندازه گیری شده (به ولت)، I جریان ارسالی (به آمپر) و K ضریب هندسی (وابسته به آرایش و فواصل الکترودها در زمین) است. ضریب K به شکل رابطه زیر بیان شده است [۱۸]:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{|r_A - r_M|} - \frac{1}{|r_A - r_N|} - \frac{1}{|r_B - r_M|} + \frac{1}{|r_B - r_N|} \right] \quad (2)$$

مقاومت الکتریکی ظاهری به گونه ای تعریف می شود که برابر با مقاومت واقعی در یک نیمه فضای همگن^{۲۵} باشد. در رابطه تعیین K فواصل r_A و r_B موقعیت الکترودهای جریان و r_M و r_N موقعیت الکترودهای پتانسیل هستند [۱۸]. برخی از متداول ترین آرایه های الکترودی عبارتند از: ونر، شلمبرگر، قطبی-قطبی، قطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی (شکل ۱). اخیراً، آرایه گرادیان^{۲۶} (شکل ۱) مورد توجه مجدد قرار گرفته است، زیرا برای سیستم های چند کاناله مناسب است. دالین و ژو^{۲۷} [۲۴] ظرفیت تفکیک پذیری-وضوح و کارایی ۱۰ آرایه الکترودهای مختلف را در یک مطالعه مدلسازی عددی بررسی کرده اند. آنها دریافتند که آرایه های دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی و گرادیان، بهترین وضوح^{۲۸} را دارند. با این حال، این آرایه ها نسبت به نویز حساس تر هستند، در حالی که آرایه های ونر و آرایه گاما، که اغلب استفاده می شوند، کمتر به نویز (نویز) حساس اند [۱۸ و ۲۴]. علیرغم حساسیت به نویز، آنها برای بررسی و جمع آوری مقاومت الکتریکی زمین دو بعدی با چگالی داده بالا، آرایه های گرادیان، قطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی و همچنین آرایه شلمبرگر، به دلیل ظرفیت تفکیک پذیری مناسب را، توصیه می کنند [۱۸].

²⁴ Apparent resistivities

²⁵ Homogeneous half-space

²⁶ Gradient arrays

²⁷ Dahlin & Zhou (2004)

²⁸ Resolution

۲-۱-۲- تکنیک های میدانی (صحرائی)

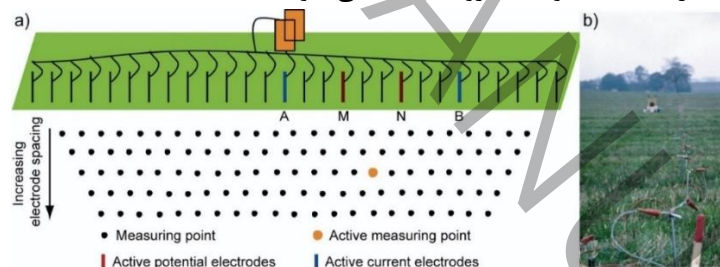
در ادامه به صورت اجمالی، سه روش میدانی اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی در عمق، توضیح داده شده است [۱۸]: روش های (۱) عمق سنجی (یا سونداژ) الکتریکی عمودی^{۲۹}، (۲) عمق سنجی الکتریکی عمودی پیوسته^{۳۰} و (۳) روش های عمق سنجی الکتریکی پیوسته آرایه کشیده^{۳۱}.

۲-۱-۲-۱- سونداژ الکتریکی عمودی [۱۸]

عمق سنجی الکتریکی عمودی، VES، برای تعیین تغییر مقاومت الکتریکی زمین با عمق استفاده می شود. روش Single VES فقط باید در مناطقی اعمال شود که زمین به صورت لایه لایه افقی با تغییرات جانبی بسیار کم فرض می شود، زیرا منحنی های سونداژ را فقط می توان با استفاده از یک مدل زمین لایه-لایه افقی یک بعدی (1D) تفسیر کرد [۲۲]. یک VES معمولاً در آرایه شلمبرگر انجام می شود، به طوری که الکترودهای پتانسیل در یک موقعیت ثابت با فاصله کوتاه قرار می گیرند و الکترودهای جریان به طور متقارن، در طرفین بیرونی الکترودهای پتانسیل جای می گیرند (شکل ۱). پس از هر اندازه گیری مقاومت، الکترودهای جریان از مرکز آرایه دورتر می شوند. به این ترتیب جریان الکتریکی به صورت پلکانی^{۳۲} در قسمت های عمیق و عمیق تر زمین جریان می یابد [۱۸].

۲-۱-۲-۲- سونداژ الکتریکی عمودی پیوسته

سونداژ الکتریکی عمودی پیوسته، CVES، پروفیل زنی و عمق سنجی را ترکیب می کند، به طوری که یک پوشش داده دو بعدی 2D در امتداد یک پروفایل به دست می آید [۱۸]. این رویه منجر به تهیه تصویری از ساختار مقاومت الکتریکی زمین در امتداد یک پروفیل می شود [۱۸]. توسعه روش CVES از دهه ۱۹۸۰ میلادی صورت گرفته است، به عنوان مثال در مراجع [۲۵ و ۲۶]. تعداد زیادی الکترودهای روی یک خط در فاصله مساوی قرار می گیرند و توسط کابل های چند هسته ای به یک واحد سوئیچینگ و ابزار سنجش مقاومت متصل می شوند (شکل ۲) [۱۸ و ۲]. یک کابل چند هسته ای حدود ۲۰ خروجی الکترودها دارد و حداکثر سه تا چهار کابل، برای راه اندازی یک مجموعه الکترودها استفاده می شود [۳۰].



شکل ۲: روش CVES: (الف) طرحی از تنظیم میدان برای CVES و چگالی داده برای یک پروفیل به دست آمده در پیکربندی ونر با ۵ فاصله الکترودها. (ب) عکس سیستم CVES در میدان [۱۸].

Figure 2. CVES method: (a) A sketch of the field setup for CVES and data density for a profile obtained in the Wenner configuration with five electrode spacing, (b) Photograph of the CVES system in the field [18].

رایانه ای که معمولاً در ابزار مدرن تعیین مقاومت الکتریکی ساخته می شود، کنترل می کند که کدام الکترودها به عنوان الکترودهای جریان و کدامیک به عنوان الکترودهای پتانسیل استفاده شود. ابزارهای مقاومت چند کاناله بیشتر و بیشتر به جای مقاومت سنج های تک کانالی استفاده می شوند [۱۸]. دالین و ژو^{۳۳} [۲۴] آرایه گرادیان متحرک را برای ابزارهای چند کاناله توصیه می کنند.

²⁹ Vertical electrical sounding

³⁰ Continuous vertical electrical sounding

³¹ Pulled array continuous electrical sounding

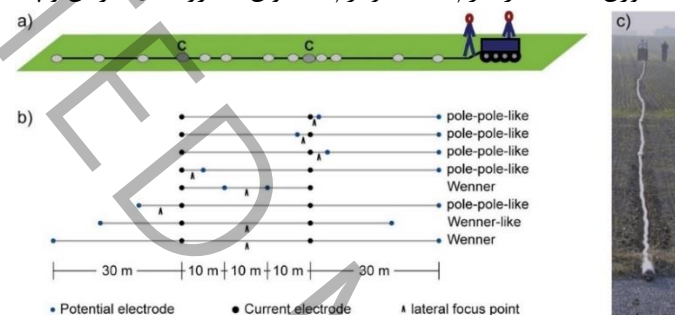
³² Stepwise

³³ Dahlin & Zhou (2004)

در این شرایط بهره وری^{۳۴} در سنجش های میدانی به چگالی نقاط داده در پروفایل ها و تعداد کانال ها در ابزار سنجش مقاومت الکتریکی بستگی دارد. در نقشه برداری آب های زیرزمینی، فاصله الکتروود اولیه ۵ متر بسیار رایج است [۱۸]. هنگامی که داده ها در آرایه های و نر جمع آوری می شوند، حداکثر فاصله الکتروود معمولاً حدود ۱۰۰-۱۲۰ متر با طول کل آرایه ۳۰۰-۳۶۰ متر است. این منجر به عمق نفوذ در حدود ۶۰-۸۰ متر می شود [۱۸].

۳-۱-۲-۳- سونداژ الکتریکی پیوسته آرایه کشیده [۱۸]

سیستم سونداژ الکتریکی پیوسته یا PACES برای پاسخگویی به نیازهای بهره وری-قابلیت اطمینان بالا و نمونه برداری دقیق و مترامم توسعه یافته است [۱۹ و ۲۷]. شکل ۳ شماتیک و تصویر واقعی این نوع سیستم را نشان می دهد [۱۸]. یک کاترپیلار کوچک دنباله ای از الکتروودها را به همراه مدار الکترونیک پردازشگر می کشد. کاترپیلار با ارتفاع ۸۰ سانتی متر و عرض ۷۰ سانتی متر، می تواند از زیر نرده ها و از بین درختان عبور کند [۱۸]. هشت آرایه الکتروود به طور همزمان اندازه گیری می شوند، که اجازه می دهد تا داده های سونداژ به طور مداوم در طول پروفیل عمقی به دست آیند (شکل ۳-ب) [۱۸]. در این روش، کاربرد الکتروودهای فولادی سبک وزن با حداکثر جرم ۱۰ کیلوگرم به عنوان الکتروودهای جریان و پتانسیل ضروری هستند [۱۸].



شکل ۳: روش PACES (الف) طرحی از سیستم PACES، دنباله ای از الکتروودها توسط یک کاترپیلار کوچک کشیده می شود. (ب) نمودار پیکربندی ۸ الکتروودی که همگی از دو الکتروود جریان مشابه استفاده می کنند. (ث) سیستم PACES در عملیات میدانی [۱۸].
Figure 3. PACES method: (a) Schematic of the PACES system, a series of electrodes pulled by a small caterpillar, (b) Diagram of an 8-electrode configuration, all using two electrodes of the same current, (c) PACES system in field operation [18].

معمولاً وجود نویز الکتروشیمیایی در اندازه گیری های این روش، توسط بکارگیری تکنیک های تشخیص همزمان^{۳۵} با فرکانس ۲۰ هرتز و به دنبال آن فیلترسازی تطبیقی سرکوب می شود [۲۸]. جمع آوری داده های رقمی^{۳۶} به صورت برخط، توسط تجهیزات روی کاترپیلار انجام می شود [۱۸]. داده ها با فرکانس ۸۰ هرتز نمونه برداری می شوند و سرعت حرکت دنباله تقریباً ۱ متر بر ثانیه است [۱۸]. پهنای میانگین مکانی^{۳۷} در مرحله پس از -پردازش، به فاصله الکتروودها مربوط می شود و معمولاً ۰/۱۰ تا ۰/۲۵ برابر فاصله ای است که وضوح مکانی دقیق و مجموعه داده های هموار شده را ارائه می دهد [۱۸]. علاوه بر این، بزرگی جریان ساطع شده به طور خودکار با تماس با زمین تطبیق داده می شود، تا نسبت سیگنال-به-نویز بهینه شود. بزرگنمایی در هر کانال به طور خودکار با سطح سیگنال های دریافتی (ورودی) تنظیم می شود [۲۷].

۲-۲- پردازش داده ها و وارونگی^{۳۸}

۲-۲-۱- پردازش داده ها

داده های ژئوالکتریک معمولاً با حذف داده های تحت تأثیر نویز پردازش می شوند. شکل ۴-آ نمونه ای از پروفایل داده جمع آوری شده با استفاده از آرایه های گرادیان را نشان می دهد [۲۹]. پردازش بسیار ساده ای روی داده ها انجام شده و فقط

³⁴ The productivity

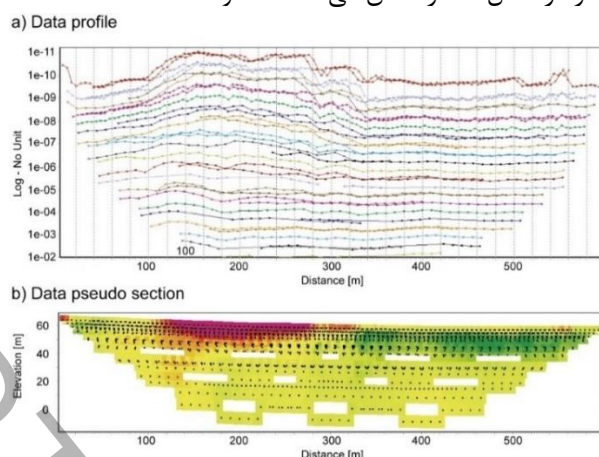
³⁵ Synchronous detection techniques

³⁶ Digital

³⁷ The spatial averaging width

³⁸ Data processing and inversion

داده‌هایی با ظاهر «جیگرشده»^{۳۹} حذف می‌شوند. حذف به صورت دستی انجام می‌شود. برش کاذب (شبه-مقطع^{۴۰}) در شکل ۴-ب، کانتور رنگی داده‌های متناظر در شکل ۴-آ را نشان می‌دهد [۱۸و۱۳].



شکل ۴: نمونه داده‌های CVES جمع‌آوری شده در آرایه گرادیان: (الف) منحنی‌ها برای هر آرایه مجزا و (ب) به عنوان یک شبه-مقطع داده، نشان داده شده است. رنگ‌های گرم نشان‌دهنده مقاومت الکتریکی بالا و رنگ‌های سرد سبز و آبی موید مقاومت کم هستند [۱۸].

Figure 4. Sample CVES data collected in a gradient array: (a) curves for each individual array and (b) as a pseudo-cross-section of the data are shown. Warm colors indicate high electrical resistance and cool green and blue colors indicate low resistance [18].

۲-۲-۲- وارونگی^{۴۱}

در ادامه مختصری درباره روش‌های وارونگی برای داده‌های CVES و PACES با تمرکز بر وارونگی مقید یک بعدی 1D و دو بعدی 2D محدود شده جانبی^{۴۲} (LCI) که از مرزهای لایه تیز^{۴۳} (تیز گوشه) استفاده می‌کند، بحث شده است [۱۸]. روش یک بعدی 1D-LCI در اصل برای معکوس کردن داده‌های PACES توسعه داده شده است [۲۷و۱۸]. از آنجا که سیستم PACES در محیط‌های رسوبی با تغییرات مقاومت الکتریکی جانبی نسبتاً هموار استفاده می‌شود، کاربرد یک مدل وارونگی لایه‌ای^{۴۴} مطلوب است. روش 1D-LCI تعدادی از مسائل یک بعدی 1D را به طور همزمان با قیود بین مدل‌های همسایه^{۴۵} حل می‌کند [۲۹]. رویکرد یک بعدی 1D-LCI در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۸]. مجموعه داده CVES در شکل ۵-آ به سونداژها و مدل‌ها تقسیم می‌شود. همه مدل‌ها و مجموعه داده‌های متناظر، به طور همزمان وارونه می‌شوند و یک تابع شی متداول^{۴۶} را کمینه می‌سازند [۱۸و۳۰].

³⁹ Jiggered

⁴⁰ Pseudo-section

⁴¹ Inversion

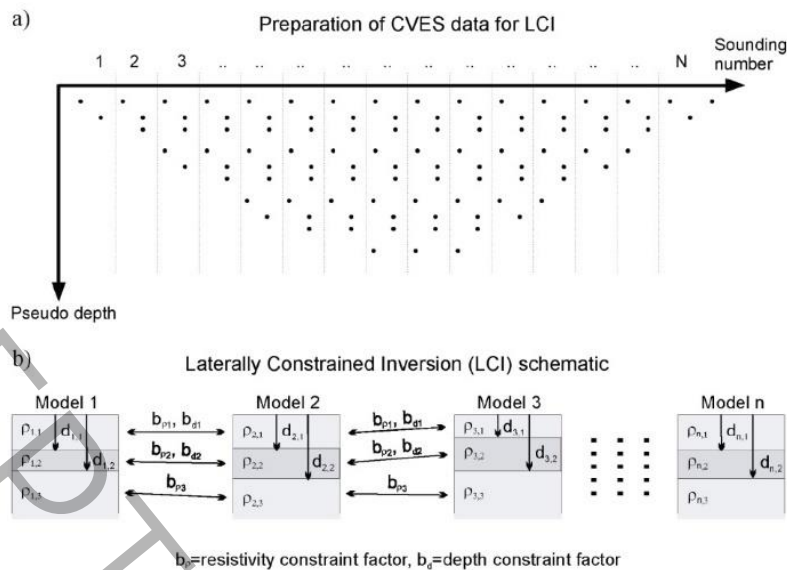
⁴² Laterally constrained inversion (LCI)

⁴³ Sharp layer boundaries

⁴⁴ A layered inversion model

⁴⁵ Neighbour models

⁴⁶ A common object function



شکل ۵: الف) نمایه CVES به n مجموعه داده تقسیم می شود [۱۸]. ب) مجموعه داده ها به طور همزمان با یک مدل ۱ بعدی وارونه می شوند که منجر به یک تصویر شبه-دو بعدی می شود. مدل ها به صورت جانبی مقید می شوند و هر مدل اعمال قیدهایی را روی مقاومت ها و عمق ها مجاز می کند [۱۸ و ۳۱].

Figure 5. (a) The CVES profile is divided into n datasets [18], (b) The datasets are simultaneously inverted with a 1D model, resulting in a pseudo-2D image. The models are laterally constrained, and each model allows constraints on the strengths and depths [18, 31].

۳- معرفی جزئیات محل انجام مطالعه موردی: موقعیت و شرایط زمین شناسی

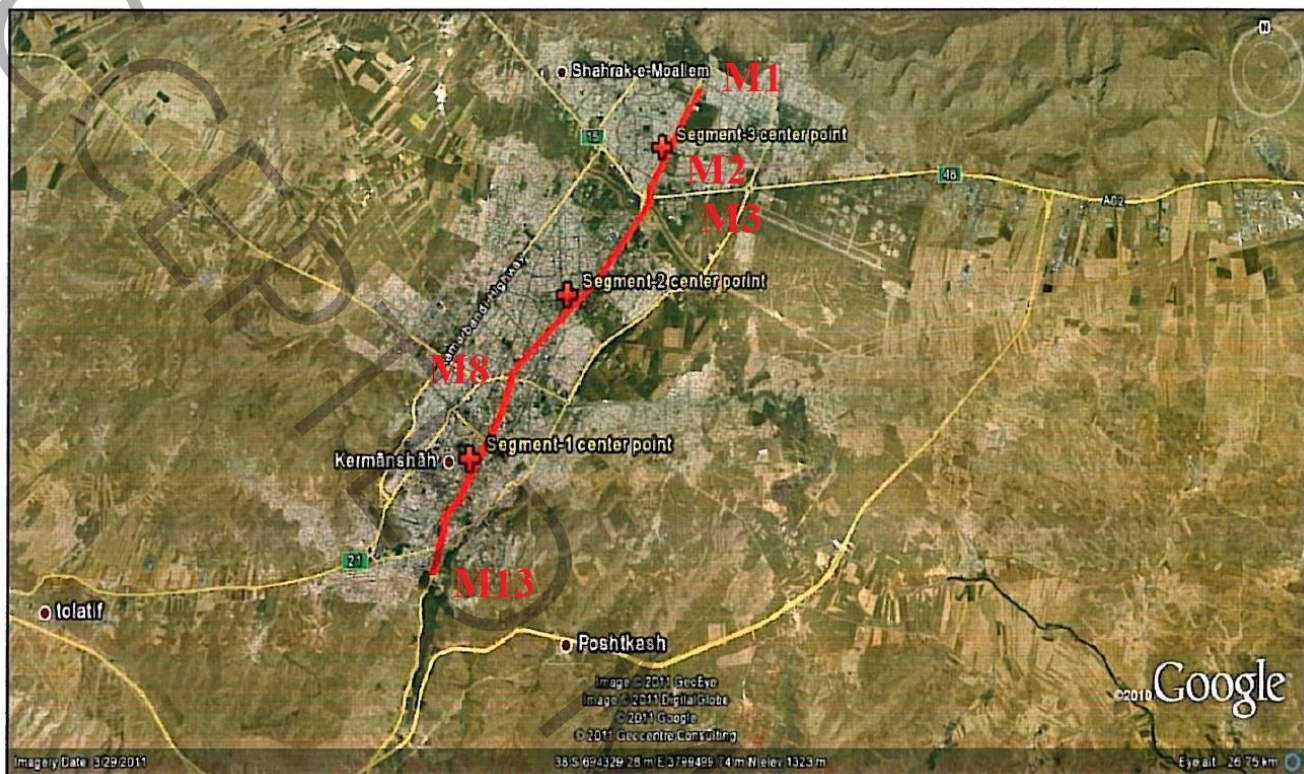
شهر کرمانشاه از شمال به کوه فرخشاد، از شمال غربی به کوه طاق بستان و از جنوب به سفید کوه منتهی می شود و در بخش مرکزی استان کرمانشاه و در ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریای آزاد واقع شده است. طول و عرض جغرافیایی شهر کرمانشاه به ترتیب شامل $34/3277$ درجه شمالی و $47/0778$ درجه شرقی است. همچنین از دیدگاه لرزه شناسی، در محدوده استان کرمانشاه و به ویژه شهر کرمانشاه، گسل های لرزه خیز متعددی عبور می کنند. گسل های کرمانشاه شامل گسل های زاگرس مرتفع، پیشانی کوهستان، دینور، صحنه، دربندیخان، ذهاب و گسل قره سو (عبور از محل رودخانه قره سو و جز قطعات گسل زاگرس مرتفع) در محدوده شهر کرمانشاه که با قطعه ۳ پروژه قطارشهری نیز در محل شمال شهر کرمانشاه تلاقی دارد، می باشند. بر اساس کاوش های ژئوتکنیکی جامع صورت گرفته در حین انجام مطالعات پروژه قطارشهری کرمانشاه، بر اساس نتایج آزمون نفوذ استاندارد SPT_{47} و نیز تعیین سرعت موج برشی V_s به روش دانهول^{۴۸}، غالب زمین های مسیر پروژه از نوع زمین نوع II مطرح در آیین نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) می باشند.

تعداد اندکی از زمین ها نیز از نوع III هستند، که غالباً در دو سوی محدوده مئاندر رودخانه قره سو واقع شده اند. از نظر وضعیت رخنمون های سنگی و سنگ شناسی، در شمال و جنوب جغرافیایی شهر کرمانشاه، لایه های سنگ رسوبی رادیولاریت برونزد شاخصی دارند. همچنین بستر زمین در بخش های مرکزی شهر، از لایه های آبرفتی با ضخامت مابین ۱۰ تا ۶۰ متر بر روی لایه سنگ های رسوبی تشکیل شده است. سطح آب زیرزمینی در اغلب نقاط شهر کرمانشاه بالاست و در برخی محدوده ها همانند مرکز شهر تا حد ۲ تا ۳ متر از سطح زمین نیز، پس از فصول پربارش اندازه گیری شده است. مطالعات اولیه خط یک قطار شهری کرمانشاه که به خط یک مونوریل کرمانشاه معروف شده است، از سال ۱۳۸۶ هجری شمسی شروع شده و هم اکنون نیز در دست تکمیل، ساخت و اجرا است. این کریدور از طاق بستان (ایستگاه M1) تا میدان فردوسی (ایستگاه M13) در مسیر طاق بستان-شهید شیرودی- پل ولایت-میدان آزادی-مدرس-میدان فردوسی به تصویب رسیده است. در شکل شماره ۶ تصویر ماهواره ای مسیر خط یک قطارشهری کرمانشاه، شامل محل شروع و خاتمه ایستگاه های ۱۳ گانه (ایستگاه های M1 در شمال

⁴⁷ Standard penetration test: SPT

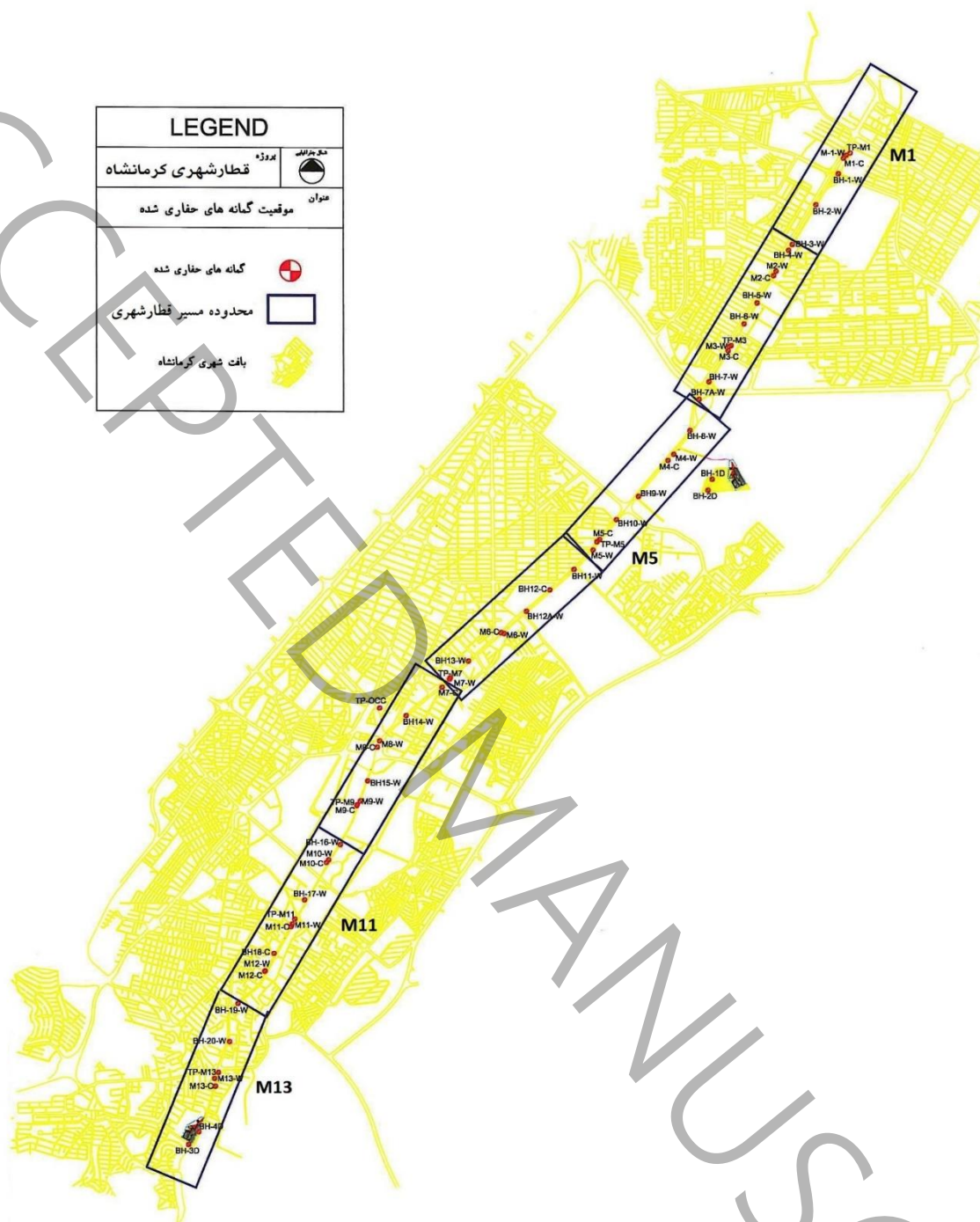
⁴⁸ Down-hole method

شهر تا M13 در جنوب شهر-میدان فردوسی) و قطعات ۳ گانه پروژه (سگمنت های ۱ تا ۳) دیده می شود [۳۲]. همچنین شکل ۷ نقشه گستردگی جزئیات محل دقیق گمانه ها و چاه های شناسایی حفر شده در ایستگاه های ۱۳ گانه M1 تا M13 قطار شهری کرمانشاه را با قطعه بندی های فرض شده نشان می دهد [۳۲].



شکل ۶: تصویر ماهواره ای مسیر خط یک قطار شهری کرمانشاه و محل ایستگاه های ۱۳ گانه و قطعات ۳ گانه مسیر [۳۲].

Figure 6. Satellite image of the Kermanshah urban train line one route and the location of the 13 stations and the 3 sections of the route [32].



شکل ۷: نقشه گسترده محل گمانه ها در ایستگاه های ۱۳ گانه M1 تا M13 قطار شهری [۳۲].
Figure 7. Map of the extent of boreholes in the 13 M1 to M13 suburban train stations [32].

۳-۱- معرفی اجمالی ابزار اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین در مطالعه حاضر

در این مطالعه پژوهشی در تهیه اطلاعات میدانی و انجام آزمایش های مقاومت ویژه الکتریکی در اعماق مختلف گمانه های مسیر قطار شهری، از یافته های دقیق دستگاه Megger DET5/4D استفاده شده است [۳۳]. دستگاه های Megger DET5/4D و DET5/4R کاملاً خودکار هستند، چهار ابزار پایانه ای (ترمینالی)، که در یک قاب مستحکم و مقاوم در برابر آب تعبیه شده اند، که از دستگاه برای استفاده در فضای باز محافظت می کنند. این ابزار برای آزمایش الکترودهای زمین و اندازه گیری مقاومت الکتریکی زمین مناسب است. عملیات کار با دستگاه، با فشار دادن یکی از دو دکمه روی پانل جلویی شروع می شود. یکی برای

اندازه گیری سه ترمینالی و یکی برای آزمون چهار ترمینال (شکل ۸). سایر عملکردهای دستگاه کاملاً خودکار است. این ابزار شرایطی را بررسی می کند که ممکن است باعث قرائت نامعتبر در طول یک آزمایش شود [۳۳]. خطای کم سرویس و محدوده دمای عملیاتی وسیع باعث می شود که نتایج دقیق در شرایط واقعی در محل به دست آید. ابزار حاضر قدرت اندازه گیری مقاومت الکتریکی از ۰/۰۱ اهم تا ۱۹/۹۹ کیلوهم با دقت ۰/۰۱ را دارد. اندازه گیری ها به دو روش اجرایی کلی شامل آزمون سقوط پتانسیل^{۴۹} و روش شیب^{۵۰} با این دستگاه قابل انجام است. اندازه گیری مقاومت خاک به واسطه اندازه گیری سه یا چهار ترمینال و قابلیت تحمل بالا در برابر مقاومت اسپایک، به انجام آزمایش با آن در مناطق شهری کمک می کند. همچنین توانایی حذف نویز تا ۴۰ ولت را دارد. علاوه بر آن مدل DET/4D از سلول های خشک و نیز مدل DET5/4R از باتری های قابل شارژ استفاده می کند. این دستگاه مطابق با استانداردهای بین المللی IEC364، VDE 0413، BS7671 است [۳۳]. در ادامه نمایش تصویر دستگاه و معرفی بخش های مختلف روی آن در شکل ۸ ارائه شده است.

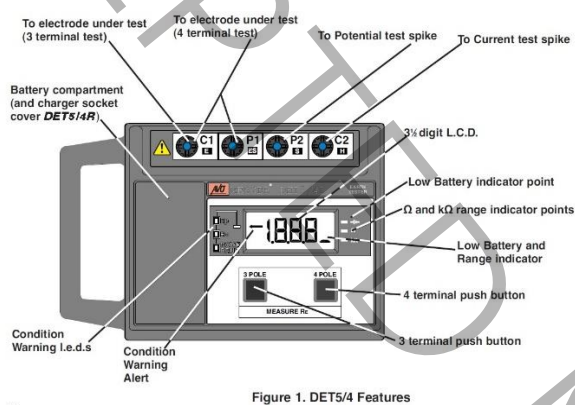


Figure 1. DET5/4 Features

(الف) نما و ظاهر سه بعدی دستگاه

شکل ۸: دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری لایه های زمین چهار الکترودی بکارگرفته شده [۲۸] شامل: (الف) نما و ظاهر سه بعدی دستگاه، (ب) معرفی اجزا و بخش های مختلف دستگاه.

Figure 8. The four-electrode device used to measure apparent electrical resistivity of earth layers [28], including: (a) 3D view and appearance of the device, (b) introduction of the various components and parts of the device.

۳-۱-۲- ارائه جزئیات انجام آزمایش های ژئوالکتریک در مقیاس صحرایی مطالعه حاضر

۳-۱-۲-۱- مقادیر حفاری و نمونه برداری ها

در این مطالعه، مطابق اطلاعات مشاور محترم پروژه، جهت شناسایی جنس لایه ها و سایر مشخصات فنی خاک در محل ایستگاه ها، اقدام به حفر ۱۵ حلقه گمانه به روش مغزه گیری ممتد^{۵۱}، ۳۷ حلقه گمانه به روش شستشویی^{۵۲} با مغزه گیری مقطعی و همچنین ۸ حلقه گمانه دستی^{۵۳} گردیده است. در ضمن حفاری گمانه ها، علاوه بر اخذ نمونه های دست خورده به مقدار کافی، اقدام به انجام آزمایش نفوذ استاندارد SPT نیز شده است [۳۲].

۳-۲- آزمایش صحرایی اندازه گیری مقاومت الکتریکی خاک (ژئوالکتریک)

۳-۲-۱- کاربرد ژئوالکتریک در مورد تعیین شدت خوردگی و میزان هدایت الکتریکی خاک

از اهداف انجام آزمایش ژئوالکتریک، تعیین مقاومت ویژه ظاهری برای استفاده آن در سیستم ارت و تعیین میزان خوردگی خاک است. خوردگی خاک که اثر مستقیم روی لوله های فولادی دارد. در واقع خوردگی خاک به علت وجود مواد رسی و آهکی

⁴⁹ Fall-of-Potential

⁵⁰ Slope-Method Testing

⁵¹ Continuous Coring

⁵² Wash Boring

⁵³ Test Pit

در خاک است [۳۲]. برای بررسی این عامل و مسائل دیگر در دانش ژئوتکنیک و زمین شناسی مهندسی، که مربوط به بررسی جنس زمین در اعماق کم تا حدود ۵۰ متر است، از روش های مختلف ژئوفیزیک و از جمله از روش اندازه گیری مقاومت ویژه ظاهری (روش ژئوالکتریک) می توان استفاده نمود. لذا بطور مفصل مبانی این روش قبلا توضیح داده شده است [۳۲].

۳-۲-۲- نحوه کاربرد روش مقاومت سنجی الکتریکی خاک با جریان مستقیم

مطابق مطالب بخش های قبلی، برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی خاک آرایش های الکترودی متفاوتی وجود دارد، که یکی از آنها آرایش ورنر است، که در پروژه حاضر از آن استفاده شده است [۳۲]. در مورد مسائل خوردگی خاک که مربوط به تعیین مقاومت ویژه ظاهری زمین در عمق های کم است، معمولا از آرایش ورنر استفاده می شود. به عبارت دیگر وابسته به مقدار املاح موجود در آب، با توجه به عوامل مذکور، مقاومت ویژه یک سنگ عدد مطلق نمی تواند باشد، و برحسب تغییر عوامل فوق، مقدار آن نیز تغییر خواهد کرد، بدین جهت است که در جداول مختلف طیف تغییرات مقاومت مخصوص سنگ های مختلف را درج می کنند (پاراسینز^۴، ۱۹۸۶ [۱۷]). جدول زیر حدود تغییرات مقاومت ویژه ظاهری انواع سنگ و خاک و همچنین آب های مختلف را نشان می دهد.

جدول ۱: تغییرات مقاومت ویژه ظاهری انواع سنگ ها، مواد، رسوبات و خاک (پاراسینز، ۱۹۸۶ [۱۷]).

Table 1. Changes in apparent resistivity of various rocks, materials, sediments and soils (Parasins, 1986 [17]).

ردیف	مصالح	مقاومت (بر حسب اهم سانتی متر)	ردیف	مصالح	مقاومت (بر حسب اهم سانتی متر)
۱	آب دریا	۲	۱۰	ماسه کوارتزی	۱۰۰۰۰۰-۳۰۰۰۰
۲	آب سفره های آب رفتی	۱۰۰۰-۳۰۰۰	۱۱	توفهای ولکانیکی	۱۰۰۰-۲۰۰۰
۳	آب چشمه	۱۰۰۰-۵۰۰۰	۱۲	ماده مذاب (لاوا)	۱۰۰۰۰۰-۳۰۰۰۰
۴	ماسه و شن خشک	۱۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰۰	۱۳	شیست های گرانیتی	۵۰-۵۰۰
۵	ماسه و شن آغشته به آب شیرین	۵۰۰۰-۵۰۰۰۰	۱۴	شیست های رسی و آلتزه	۱۰۰۰۰-۳۰۰۰۰
۶	ماسه و شن آغشته به آب شور	۵۰-۵۰۰	۱۵	شیست های سالم	۳۰۰۰۰-۳۰۰۰۰۰
۷	رس	۲۰۰-۳۰۰۰	۱۶	گنیس و گرانیت آلتزه	۱۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰
۸	مارن	۲۰۰۰-۱۰۰۰۰	۱۷	گنیس و گرانیت سالم	۱۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰۰
۹	آهک	۳۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰۰	۱۸	ماسه رسی	۵۰۰۰-۳۰۰۰۰

۳-۲-۳- تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در مصالح مختلف

به طور مبنایی میزان تخلخل و یا نسبت تخلخل (نسبت حجم حفرات و منافذ در محیط سه فازی خاک نسبت به حجم بخش جامد دانه های خاک)، عامل مهمی در تعیین میزان کمی مقاومت ویژه الکتریکی مصالح است. به طوری که ازدیاد تخلخل در توده های خاک و سنگ اشباع، باعث افت مقاومت ویژه الکتریکی می گردد. آب به سبب اینکه جریان الکتریکی را عبور می دهد، مقاومت الکتریکی قابل توجهی ندارد و منجر به کاهش مقاومت الکتریکی توده های خاکی و سنگی اشباع می گردد [۱۶]. نوع و جنس سنگدانه ها و مقدار سیال منفذی مابین ذرات خاک در مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی تاثیرگذار است [۱۶]. افزون بر آن، وجود اکسیدهای فلزی، رس های مرطوب، کانی های مگنتیک، گرافیت، عناصر فلزی از قبیل سولفیدهای فلزی (به استثنای گالن و آسفالریت)، کربن و دیگر کانی های رسی که مقاومت ویژه الکتریکی اندکی دارند، اثر چشمگیری در کاهش میزان مقاومت الکتریکی دارند [۱۶]. در طرف مقابل، بعضی مصالح بدون کانی های فرعی نام برده شده، از قبیل کوارتزیت، مقاومت ویژه بالایی دارند. علاوه بر این، وجود نمک و بالا رفتن درجه حرارت هم، سبب افت مقاومت الکتریکی می گردد. حدود واقعی مقاومت ویژه الکتریکی برای مواد زمینی حدود 10^{-2} تا 10^5 اهم-متر است.

مقاومت مکانیکی مصالح ژئوتکنیکی به عوامل زیادی، از جمله تخلخل وابسته است. تخلخل زیاد در یک توده خاکی باعث کاهش مقاومت مکانیکی آن می شود. از سویی مقاومت الکتریکی محیط خاکی به مقدار آب موجود در منافذ آن وابسته است، پس می توان استدلال کرد که مقاومت مکانیکی و مقاومت ویژه الکتریکی مصالح ژئوتکنیکی از طریق تخلخل به یکدیگر مرتبط اند [۱۶]. با توجه به ارتباط بین تخلخل و درجه اشباع، همبستگی بین مقاومت مکانیکی و مقاومت ویژه الکتریکی را می توان به دست آورد. در مطالعه مراجع [۳۴ و ۱۶] برای یک محیط اشباع شده با آب شیرین، رابطه بین مقاومت مکانیکی و مقاومت ویژه الکتریکی و مدول یانگ ارائه شده است. بر اساس نتایج آنها، افزایش مقاومت ویژه الکتریکی به صورت غیرخطی و صعودی، باعث افزایش مقاومت مکانیکی و مدول یانگ مصالح خاکی می شود [۳۴].

۴-۲-۳- کارایی و محدودیت های روش سنجش مقاومت الکتریکی در مطالعات بستر ابنیه

روش شناسایی ژئوالکتریک در پروژه های خطی وسیع همانند پروژه قطارشهری کرمانشاه یا برای نمونه در مطالعه مسیرهای طولانی بزرگراه ها، راه آهن و پروژه های نظیر، که در آنها آگاهی زیرسطحی از ساختار کلی مسیر لازم است، کاربرد دارد [۱۶]. این روش در برخی مواقع با محدودیت، موانع و ضعف های اجرایی مواجه می شود، از جمله: در ساختگاه های پیچیده (از نظر لایه بندی و تغییرات ناگهانی و شدید لایه ها)، در شرایط عدم وجود اختلاف مقاومت الکتریکی قابل توجه و شاخص در نتایج لایه های مختلف مورد بررسی، در نقاط شهری با تراکم کابل های برق و سایر منابع الکتریکی (منابع تحمیل نوفه و تداخل نامطلوب بر نتایج آزمون ها) و نیز در فضاهای بسیار محدود (مثلا در مراکز شهرها یا دره های تنگ احداث سدهای خاکی یا بتنی) که امکان کارگذاشتن الکترودها در طول زیاد برای بررسی اعماق بیشتر وجود ندارد [۱۶]. در ادامه شکل ۹ نمونه تصاویر انجام آزمایش های ژئوالکتریک در ایستگاه های M4، M5 و M7 در ژرفاهای ۳، ۵ و ۷ متری، در امتداد مسیر قطارشهری کرمانشاه را نشان می دهد [۳۲].



شکل ۹: نمونه تصاویر انجام آزمایش های ژئوالکتریک در ایستگاه های M4، M5 و M7 در ژرفاهای ۳، ۵ و ۷ متری [۳۲].
Figure 9. Sample images of geoelectric tests conducted at stations M4, M5, and M7 at depths of 3, 5, and 7 m [32].

۳-۳- بررسی مختصات میدانی گمانه ها و ارزیابی نتایج آزمایش های ژئوالکتریک

عملیات صحرایی جهت تعیین مقاومت الکتریکی خاک در این مطالعه، در تمام ایستگاه های مسیر قطارشهری کرمانشاه، به جز ایستگاه ۱۱ (به دلیل تراکم شهری و نبود فضای کافی برای اجرای آزمایش ژئوالکتریک) در اعماق مختلف انجام شده است (جدول ۲) [۳۲]. به منظور نتیجه گیری از اندازه گیری مقاومت مخصوص ظاهری و انطباق آن با مقدار خوردگی خاک، نیاز است مقیاسی که مقدار خوردگی را بر حسب مقاومت الکتریکی ظاهری مشخص می کند، در نظر گرفته شود [۳۲] و در اینجا با تطابق نتایج اندازه گیری ها با مقیاس رومانوف [۳۵]، مقدار خوردگی در عمق های مختلف به صورت بسیار شدید (Ex.H)، خیلی شدید (V.H) شدید (H)، متوسط (N) و کم (L) به شرح جدول ۳ مشخص می شود [۳۲]. همچنین به دلیل اینکه که وقوع خوردگی در خاک ها عارضه ای طولانی مدت و اغلب زمان بر است، به کار بردن انجام آزمایش های مستقیم برای تعیین میزان استعداد خوردگی خاک ها، عموماً انتخابی اقتصادی و مقرون به صرفه نیست [۱۶] و به طور کلی از روش های غیر مستقیم بر حسب میزان توانایی هدایت الکتریکی یا اندازه گیری املاح موجود در خاک، برای تعیین آن استفاده می شود [۱۶]. در استانداردهای مختلف و برای اهداف گوناگون، محدوده های متفاوتی برای ویژگی های خاک های خورنده در نظر گرفته شده و معیارهای گوناگون برای ارزیابی درجه خوردگی خاک تعیین شده، که متداول ترین آن ها بر مبنای مقاومت ویژه الکتریکی است. در جدول ۳ طبقه بندی پتانسیل خوردگی خاک رومانوف^{۵۵} (۱۹۷۲) [۳۵] بر مبنای مقاومت ویژه الکتریکی آمده است.

جدول ۲: مختصات UTM ایستگاه های اندازه گیری مقاومت الکتریکی در اعماق ۳، ۵ و ۷ متری زمین [۳۲].

Table 2. UTM coordinates of electrical resistivity measurement stations at depths of 3, 5, and 7m [32].

مختصات		محل آزمایش (ایستگاه)	مختصات		محل آزمایش (ایستگاه)
X	Y		X	Y	
6911585	3800825	M7	695718	3806275	M1
690780	3799988	M8	694980	3805045	M2
690236	3799377	M9	694517	3804259	M3
690239	3798890	M10	693919	3803189	M4
689610	3797746	M12	693138	3802256	M5
689129	3796661	M13	692125	3801301	M6

جدول ۳: مقدار خوردگی خاک رومانوف [۳۵] بر اساس نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی خاک ها [۳۲ و ۳۵].

Table 3. Corrosion value of Romanoff soil [35] based on the results of soil electrical resistivity tests [32,35].

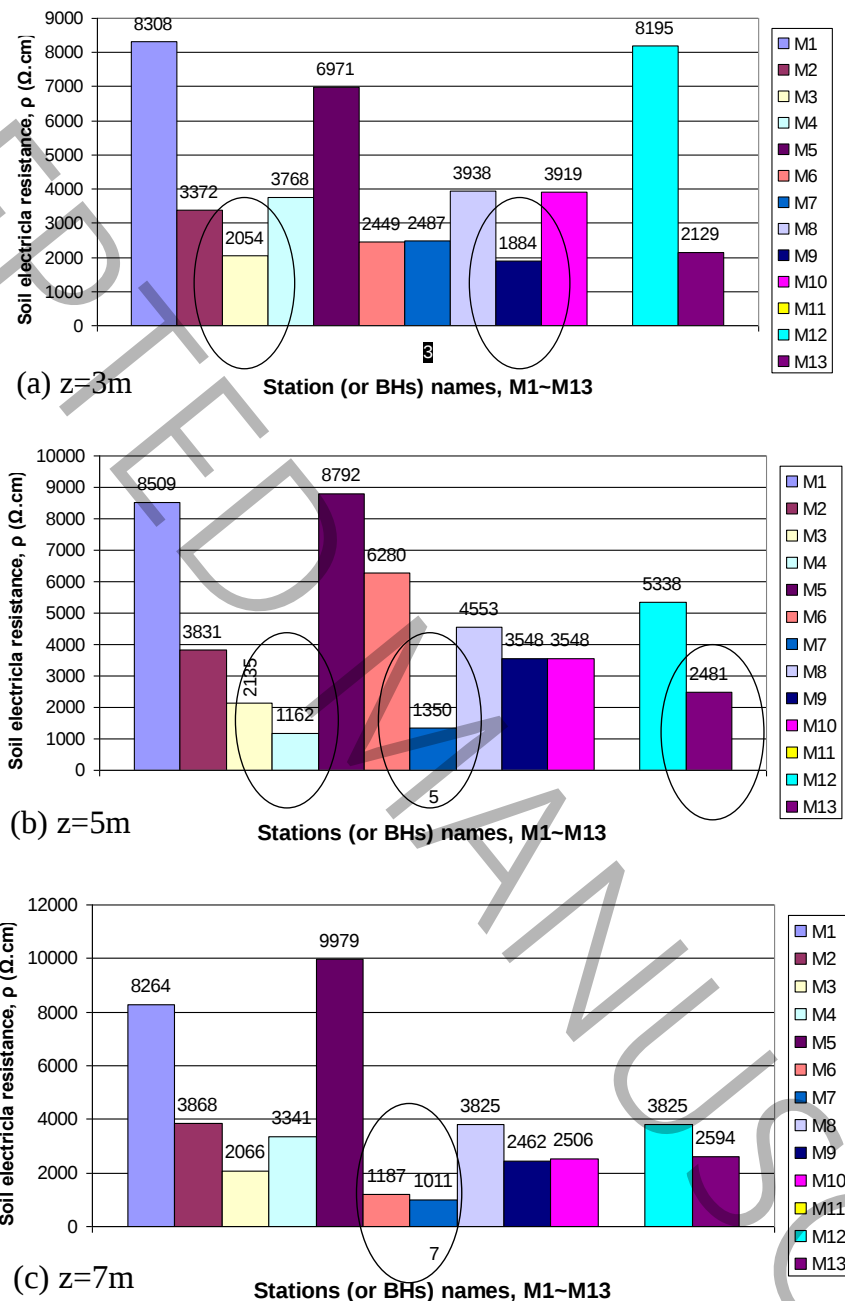
میزان خوردگی خاک (c)	ρ (اهم - سانتی متر)
بسیار شدید (Extremely High (E.H)	100-500
خیلی شدید (Very High (V.H)	500-1000
شدید (High (H)	1000-2000
متوسط (Normal (N)	2000-10000
کم (Low (L)	$\rho > 10000$

۴- بررسی جزئیات یافته های آزمون های میدانی

در این قسمت نتایج و یافته های مطالعات مفصل میدانی انجام شده در این پژوهش کاربردی ارائه می شود. بر این مبنا، میزان مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری خاک اندازه گیری شده بر حسب یکای سنجش شده اهم-سانتی متر در سه عمق مختلف ۳، ۵ و ۷ متری در گمانه های ۱۲ ایستگاه در طول مسیر پروژه قطارشهری کرمانشاه (که تمامی ۸ منطقه شهری کرمانشاه را به

⁵⁵ Romanoff

طور کامل پوشش می دهد) ارائه شده است. با توجه به مقایسه نتایج حاصله از این آزمایش و جدول رواداری ها مقدار خوردگی خاک در ایستگاه های ۴، ۶ و ۹ در زمان انجام آزمایش ها، بر اساس معیار رومانوف مطرح در جدول ۳ در قبل، در حد متوسط تا شدید و در مابقی ایستگاه ها در حد متوسط است [۳۲]. بر اساس نمودارهای موجود در شکل ۱۰ هر چه قدر مقادیر مقاومت الکتریکی ویژه محیط خاک کمتر باشد، میزان پتانسیل خوردگی آن به همان نسبت افزایش خواهد یافت.

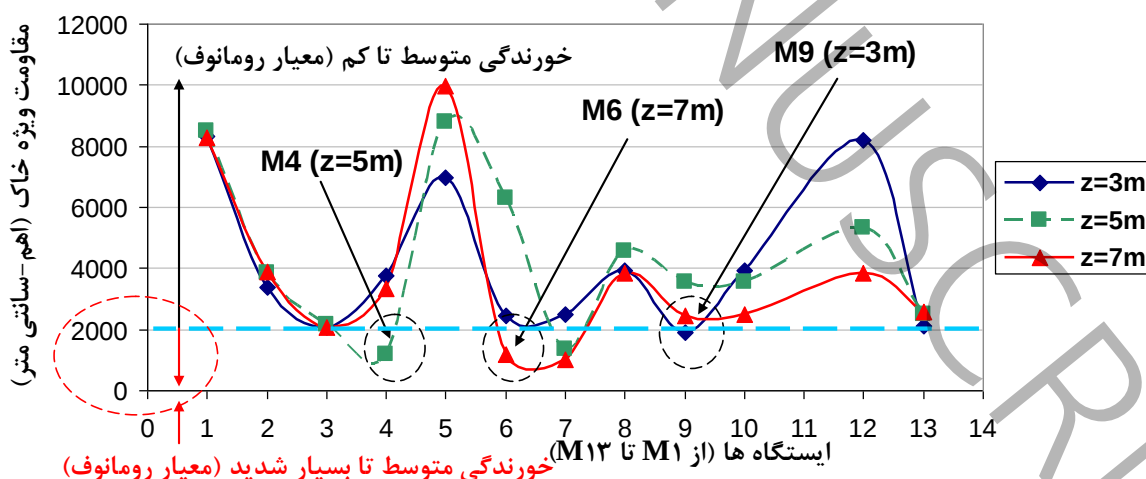


شکل ۱۰: نتایج اندازه گیری های مقاومت ویژه الکتریکی در سه عمق مختلف در گمانه های ایستگاه های ۱۳ گانه قطار شهری شامل: (الف) عمق ۳ متری، (ب) عمق ۵ متری و (ث) عمق ۷ متری.

Figure 10. Results of electrical resistivity measurements at three different depths in the boreholes of the 13 urban train stations, including depths: (a) 3m, (b) 5m, and (c) 7m.

در شکل ۱۱ مقایسه عمقی میزان پتانسیل خوردگی خاک اندازه گیری شده در جریان انجام این تحقیق، برای سه عمق مورد بررسی ۳، ۵ و ۷ متری نمایش داده شده است. در این شکل مرز مقاومت ویژه برابر ۲۰۰۰ اهم-سانتی متر بر اساس معیار

رومانوف [۳۵] به عنوان مرز بین خوردگی (۱) متوسط تا کم و (۲) متوسط تا بسیار شدید با رسم خط چین به رنگ آبی روشن مشخص شده است. بر اساس شکل ۱۱ در سه ایستگاه معین M4، M6 و M9 به دلیل کاهش مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی خاک تا زیر ۲۰۰۰ اهم-سانتی متر، خوردگی خاک متوسط تا شدید است. ایستگاه M4 در محدوده پارک شاهد و نزدیک رودخانه قره سو-پالایشگاه نفت کرمانشاه، ایستگاه M6 در مجاورت سه راه ۲۲ بهمن و بین محل تلاقی زیرسطحی امتداد رودخانه های قره سو و آبشوران و ایستگاه M9 در محدوده بازار مرکزی شهر-بافت قدیمی فرسوده و دقیقاً مجاور رودخانه آبشوران است. بر حسب شکل قبلی ۶ و شکل ۱۱ تا ایستگاه M3 در محدوده پارک فدک شهرک فرهنگیان فاز ۲ در شمال شهر کرمانشاه، اختلاف عمقی میزان پتانسیل خوردگی خاک ناچیز است، اما بعد از ایستگاه M3 و پس از عبور از محل رودخانه های قره سو و پس از آن آبشوران به سمت جنوب شهر، اختلاف مقادیر خوردگی خاک برای ۳ عمق مورد بررسی، کاملاً مشخص و چشمگیر می شود. الگوی ریاضی مشخصی با تغییر عمق اندازه گیری نمی توان برای کاهش یا افزایش پتانسیل خوردگی خاک در ایستگاه های M4 تا M13 پیشنهاد داد. اما یک روند نوسانی بدیهی در تغییرات عمقی نتایج قابل مشاهده است. نکته مهم و کلیدی دیگری که بسادگی از شکل ۱۱ برداشت و استنتاج می شود آنست که در ایستگاه M13 در محل محدوده میدان فردوسی-خیابان دلگشا-محل پل آبشوران و در مجاورت نقاط آغازین رودخانه آبشوران، بازمهم مطابق پیشنهاد و پیش بینی دقیق این مطالعه، پتانسیل خوردگی خاک بالاست (متناظر مقاومت الکتریکی ویژه پایین خاک). موضوع ایستگاه M13 به خوبی اثرات منفی نشت فاضلاب ناشی از رودخانه آبشوران به خاک و وجود خاک رس، در افزایش پتانسیل خوردگی خاک در این محل را اثبات می کند. الگوی عمقی تقریبی مشخصی نیز در ایستگاه های M10 (چهار راه شهید مدرس-مرکز بازار قدیمی شهر-پل آبشوران) تا مجاورت M13 قابل مشاهده است، به طوری که به ترتیب با افزایش عمق، میزان خوردگی خاک افزایش می یابد. نوسانات کاهشی متمایز نمودار شکل ۱۱ در نقاط مرجع ایستگاه های M4، M6 و M9 اثرات منفی رودخانه های آلوده به فاضلاب داخل شهر، در افزایش پتانسیل خوردگی خاک را اثبات می کنند. مطابق شکل ۱۱ در ایستگاه M5 در مجاورت محله سی متری دوم در مرکز بافت مسکونی شهر کرمانشاه (با بیشترین مقادیر ضخامت لایه آبرفت)، کمترین پتانسیل خوردگی خاک مشاهده شده است. نکته مهم دیگر عبور خطی به اصطلاح پل طولیل آبشوران است، که نامگذاری مرسوم برای مسیر کانال سرپوشیده رودخانه آبشوران در بافت قدیمی شهر، مابین ایستگاه های M13 تا M8 در میدان آزادی (مرکز شهر) تا محل الحاق به رودخانه قره سو و در کانال روباز آن در چهارراه سیلو (مابین ایستگاه های M7 و M8) است. در تمام طول این مسیر، انشعابات غیرمجاز فاضلاب به درون این کانال ریخته می شود. مطالعات معتبر حال حاضر، وجود آلاینده های مختلف در این رودخانه ها را در شهر کرمانشاه به اثبات رسانده اند [۳۶-۳۷].



شکل ۱۱: مقایسه میزان پتانسیل خوردگی خاک در سه عمق مختلف ۳، ۵ و ۷ متری در ایستگاه های اندازه گیری.

Figure 11. Comparison of soil corrosion potential at three different depths of 3, 5, and 7m at measurement stations.

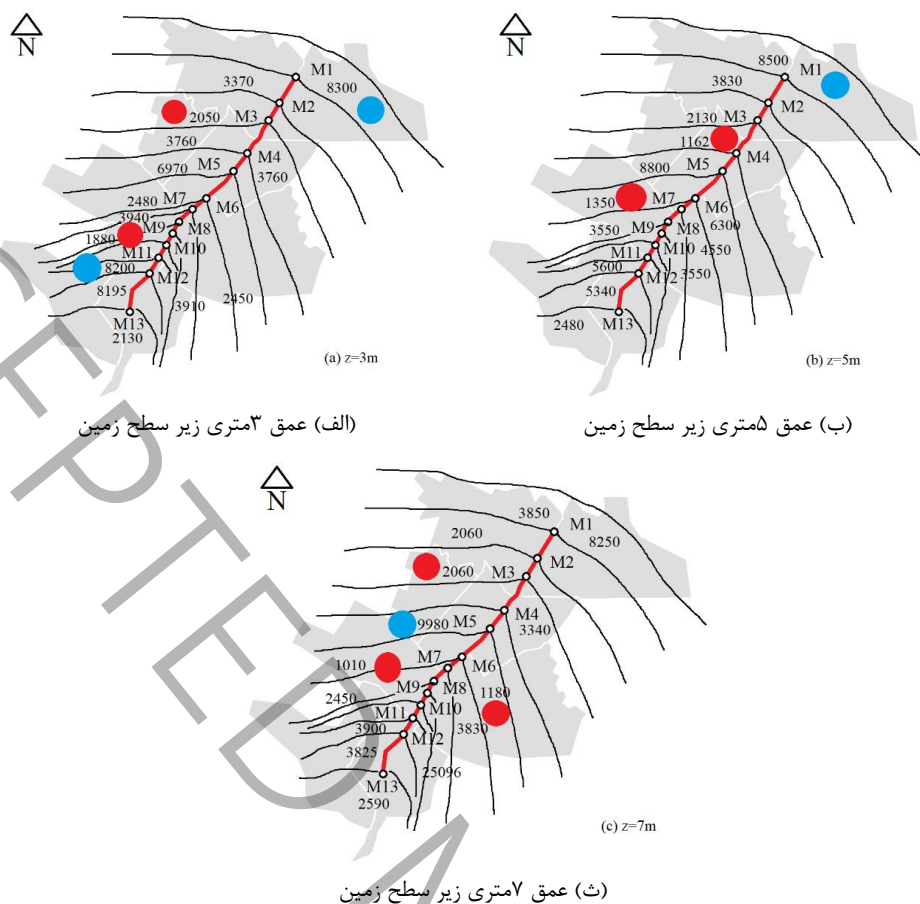
در ادامه جدول ۴ محاسبات آماری مربوط به اندازه گیری مقادیر پتانسیل خوردگی خاک در سه عمق ۳، ۵ و ۷ متری را بر حسب تفکیک اعماق، ارائه می کند. در این جدول، سنجه های آماری مهم مرتبط با مقادیر بیشینه، کمینه، متوسط، انحراف معیار، ضریب همبستگی بین مقادیر عمق های دوگانه، واریانس مقادیر، نامتقارنی توزیع داده ها نسبت به متوسط و انحراف مطلق از میانگین داده ها، محاسبه و ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول ۴ اندازه گیری های مقاومت الکتریکی ویژه در عمق ۷ متری، شرایط ویژه ای را نسبت به عمق های ۳ و ۵ متری از خود نشان می دهد. به گونه ای که بیشترین، کمترین و میانگین کمتر مقادیر داده های اندازه گیری شده در این عمق قابل مشاهده است. همچنین انحراف معیار داده های این عمق در مقایسه با دو عمق دیگر، مقدار بزرگ تری را از خود نشان می دهد. افزون بر این واریانس و میزان انحراف توزیع داده ها در عمق ۷ متری، به مراتب بیشتر است. مطابق جدول ۴ مقادیر همبستگی بین داده های هر دو عمق در مقایسه با هم، اعداد نزدیکی هستند، اما برای دو عمق متوالی ۵ و ۷ متری، همبستگی بزرگ تری بین دو دسته نتایج کمی حاصل از اندازه گیری ها بدست آمده است.

جدول ۴: بررسی پارامترهای آماری برای اندازه گیری های پتانسیل خوردگی خاک (مقادیر مقاومت ویژه) در سه عمق مختلف.

Table 4. Examination of statistical parameters for soil corrosion potential measurements (specific resistance values) at three different depths.

ردیف	پارامتر آماری	نماد پارامتر	عمق ۳ متری	عمق ۵ متری	عمق ۷ متری	توضیحات
۱	مقدار بیشینه	Max	۸۳۰۸	۸۷۹۲	۹۹۷۹	خوردگی کمتر
۲	مقدار کمینه	Min	۱۸۸۴	۱۱۶۲	۱۰۱۱	خوردگی بیشتر
۳	مقدار متوسط	Mean	۴۱۲۲/۸	۴۲۹۳/۹	۳۷۴۴/۰	خوردگی بیشتر
۴	انحراف معیار	STDEV	۲۳۶۸/۸	۲۵۳۷/۹	۲۷۱۰/۶	خوردگی بیشتر
۵	ضریب همبستگی بین مقادیر عمق ها	CORREL	۰/۷۱۸ (بین ۳ و ۵ متری)	۰/۷۷۹ (بین ۵ و ۷ متری)	۰/۷۷۴ (بین ۳ و ۷ متری)	بیشترین همبستگی بین عمق ۵ و ۷ متری
۶	واریانس مقادیر	Var.	۵۶۱۱۰۰۶	۶۴۴۱۰۵۹	۷۳۴۷۱۲۹	اختلاف بیشتر با میانگین مقادیر
۷	انحراف توزیع داده ها نسبت به متوسط	Skew	۱/۰۳۷	۰/۶۷۹	۱/۵۷۳	عدم تقارن توزیع داده ها نسبت به میانگین
۹	انحراف مطلق از میانگین داده ها	AVEDEV	۱۸۵۰/۹	۲۰۰۰/۴	۱۸۴۰/۲	انحراف مطلق داده ها نسبت به میانگین آنها

در شکل ۱۲ محدوده های مکانی توزیع تقریبی مقادیر افزایش پتانسیل خوردگی خاک (کاهش مقاومت ویژه الکتریکی) در مناطق ۸ گانه شهر کرمانشاه، در سه ژرفای مختلف ترسیم شده است. بر اساس این شکل، نقاط دایره ای شکل قرمز رنگ، نواحی با پتانسیل خوردگی متوسط تا شدید و نقاط آبی رنگ، مناطق با پتانسیل خوردگی متوسط تا کم هستند. توجه شود که اعداد مندرج در مابین محدوده های مشخص شده در نقشه ها مقادیر مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری اندازه گیری شده بر حسب یکای اهم-سانتی متر هستند. بنابر شکل ۱۲، به طور قابل توجهی تمرکز نقاط قرمز رنگ، نزدیک به مجاری آب و فاضلاب و نیز محل رودخانه های درون شهر هستند. نقاط دایره ای شکل آبی رنگ، استعداد کم خوردگی خاک را در نواحی به دور از محل عبور رودخانه های درون شهر نمایش می دهند.



شکل ۱۲: توزیع مقادیر پتانسیل خوردگی خاک (کاهش مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب اهم-سانتی متر) در مناطق ۸ گانه شهر کرمانشاه در سه ژرفای مختلف شامل: (الف) عمق ۳ متری، (ب) عمق ۵ متری و (ث) عمق ۷ متری.

Figure 12. Distribution of soil corrosion potential values (reduction in electrical resistivity in ohm-centimeters) in 8 regions of Kermanshah city at three different depths including: (a) 3m, (b) 5m, and (c) 7m.

۴-۱- تفسیر علت وقوع نتایج مطالعات میدانی (پتانسیل خوردگی خاک در ایستگاه ها)

همانگونه که در نتایج گستره وسیع این مطالعه مشخص شد، در کمتر نقطه ای از شهر کرمانشاه، پتانسیل خوردگی خاک در حد کم ارزیابی شده و در غالب نقاط شهر، متوسط تا حد شدید و یا حتی در برخی نقاط در حد شدید تا خیلی شدید است. علل عمده رخداد این موضوع علاوه بر وجود خاک رس و سازندهای آهکی در پهنه عمده ای از سطح شهر کرمانشاه، وجود دو رودخانه طویل قره سو (راستای غربی- شرقی) و آبشوران (راستای جنوبی- شمال شرقی) و آلوده به فاضلاب شهری و صنعتی است (شکل ۱۳). بر اساس مطالعات میدانی معتبر موجود، وجود نشت و ضعف در برخی نقاط اتصال مجاری فاضلاب به این دو رودخانه، موجب انتشار آلاینده های مختلفی در لایه های خاک پیرامونی آنها و نیز در درون خود آنها شده است [۳۶-۳۷]. قره سو رودخانه ای است که در دشت کرمانشاه جریان دارد و از درون شهر می گذرد. این رود از سرآب روانسر در ۶۰ کیلومتری شمال غرب کرمانشاه سرچشمه گرفته و پس از عبور از بخش شمالی این شهر، در منطقه دورودفرمان به رود بزرگ گاماسیاب ملحق می شود.

رودخانه قره سو به دلیل ورود فاضلاب شهر و همچنین اثرات زباله (شیرابه) و نخاله در اطراف آن، به رودخانه ای آلوده تبدیل شده است [۳۶]. بخشی از فاضلاب شهر کرمانشاه از چند نقطه به رودخانه قره سو وارد می شود و با راه اندازی شهرک صنعتی، برخی انواع آلودگی های صنعتی هم به آن وارد می شود. از این رو بخار آب این رودخانه نیز باعث آلودگی محیط اطراف شده است [۳۶ و ۳۷]. این در حالی است که آب این رودخانه برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد و باعث نفوذ آلاینده

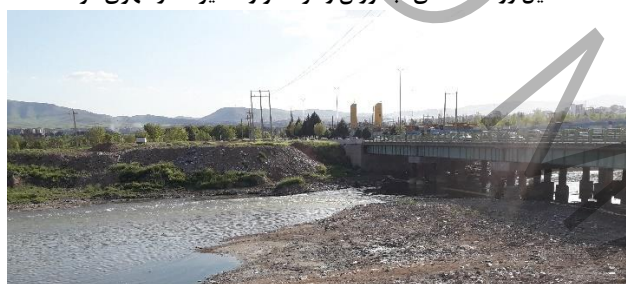
ها به خاک می شود. بنابر اعلام محیط زیست استان کرمانشاه به دلیل تکمیل نبودن سیستم فاضلاب شهری، بخشی از پساب تولیدی بخش خانگی کرمانشاه تصفیه می شود و مابقی آن وارد رودخانه های آبشوران و قره سو می شود. افزون بر آن، آبشوران رودخانه ای است که از درون شهر کرمانشاه می گذرد. شاخه اصلی این رود از سراب قنبر در جنوب غرب شهر کرمانشاه سرچشمه گرفته و پس از یکی شدن با شاخه ای دیگر، از درون بافت قدیمی شهر کرمانشاه و محله آبشوران گذشته و به سوی شمال شرقی جریان می یابد، تا در نهایت به رود قره سو بریزد. رودخانه آبشوران با جهت جنوب غربی به شمال شرقی، کاملاً درون بافت قدیمی اصلی شهر کرمانشاه جریان دارد. بر اساس شواهد و اندازه گیری های فنی [۳۶]، وجود این دو رودخانه دائمی درون شهر و نشت و نفوذ آلاینده های شیمیایی (و نمک های صنعتی) در بخش های مختلف آن به خاک های مجاور و بسترهای زیرزمینی [۳۶]، باعث افزایش پتانسیل خوردگی خاک های داخل شهر، به ویژه در نواحی مختلف مجاور شده است.



نقشه مسیل رودخانه های آبشوران و قره سو و مسیر قطار شهری کرمانشاه



بخشی از مقطع رودخانه آبشوران (نزدیک به مرکز شهر)



رودخانه قره سو آغشته به فاضلاب (پل کمربندی شرقی شهر)



نمایی از رودخانه آبشوران (جنوب غرب شهر نزدیک سرچشمه)

شکل ۱۳: رودخانه های دائمی درون شهر کرمانشاه و مجاورت آنها با خط سیر قطار شهری و گمانه های شناسایی ژئوالکتریکی.
Figure 13. Permanent rivers within the city of Kermanshah and their proximity to the urban train route and geoelectric reconnaissance boreholes.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، به روش میدانی وضعیت مقاومت الکتریکی ویژه (مخصوص) زیر سطحی لایه های خاک در گستره شهری کرمانشاه در امتداد گمانه های مسیر قطار شهری کرمانشاه، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش، مروری جامع و مفصل بر مبانی و اصول روش های اندازه گیری مقاومت الکتریکی خاک و مبانی فنی آنها، ارائه گردیده است. در جریان انجام این مطالعه، روش اندازه گیری غیرمستقیم-غیرمخرب ژئوالکتریکی چهار الکترودی و نر، برای سنجش میزان مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری لایه های خاک زیرسطحی در سه عمق مختلف ۳، ۵ و ۷ متری در گمانه های حفر شده در محل ۱۲ ایستگاه قطار شهری کرمانشاه به کار گرفته شده است. طی این اندازه گیری ها، شناسایی نقاط با کاهش مشخص مقاومت الکتریکی ویژه خاک، به معنای افزایش پتانسیل خوردگی لایه های خاک است، که می تواند به سازه های بتنی و فولادی در کوتاه مدت و نیز بلندمدت آسیب برساند. به طور کلی در این مطالعه، نتایج پژوهشی و کاربردی مفیدی بدست آمده است، که به شرح موارد زیر قابل بیان هستند:

۱- علاوه بر اینکه به طور طبیعی بین نتایج گمانه های مختلف اختلاف وجود دارد، در یک گمانه مشخص در اعماق مختلف نیز، تغییرات مقاومت الکتریکی ظاهری وجود دارد، که نشان دهنده تغییر ترکیبات شیمیایی خاک در لایه بندی در ژرفای زمین است، که منجر به تغییرات هدایت الکتریکی خاک و به دنبال آن پتانسیل خوردگی آن می شود.

۲- بر اساس مستندات علمی و اندازه گیری های پژوهشی موجود، وجود رودخانه های دائمی در داخل شهر و نشت و نفوذ فاضلاب و شیرابه به آنها در مقاطع و محل های مختلف، می تواند منجر به نشت مواد شیمیایی مختلف به داخل خاک و بروز تغییرات در رسانایی و مقاومت الکتریکی ویژه آن در عمق های مختلف شود.

۳- روش های چهارالکترودی سنجش میزان مقاومت الکتریکی خاک به فضای وسیعی برای انجام بهینه آزمون ها نیاز دارند. بر این مبنا روش چهار الکترودی و نر به خوبی برای مناطق محدود شهری با وجود نوفه ها و نوسانات الکتریکی محیطی ناخواسته، قابل کاربرد است.

۴- وجود بسترهای وسیع رسی-آهکی زیرسطحی و نیز نفوذ شیرابه و فاضلاب در مقاطع نشتی رودخانه های داخل شهر و شبکه فاضلاب آن در برخی نقاط شهر به داخل خاک، سبب شده که در اغلب گمانه های حفار شده در مسیر قطار شهری کرمانشاه، آستانه پتانسیل خوردگی خاک از حد متوسط به بالا باشد. در این شرایط برای ایجاد سازه های بتن مسلح و فولادی مقاوم در برابر خوردگی و مقابله با اثر یون های زیان آور درون خاک، توجه به شرایط محیطی، استفاده از سیمان و پوشش بتن مناسب در اجرای سازه ها به ویژه در بخش پی آنها، ضروری به نظر می رسد.

۵- از یافته های این مطالعه مشخص گردید که در اعماق گمانه های ایستگاه هایی که در نزدیکی رودخانه های قره سو و آبشوران هستند، با کاهش مقاومت ویژه الکتریکی مواجه هستند، که به طور معکوس به معنای افزایش پتانسیل خوردگی خاک در آنهاست. همچنین بر اساس محاسبه پارامترهای آماری اندازه گیری های مقاومت ویژه الکتریکی، عمق ۷ متری نسبت به دو عمق ۳ و ۵ متری، شرایط ویژه ای برای خوردگی خاک ارائه می کند.

۶- مراجع

- [1] A.V.Y. Mendoza, M.A. Perez-Flores, L.E. Ochoa-Tinajero, E. Vargas-Huitzil, Applying resistivity (dipole-dipole, Schlumberger, and Wenner) joint inversion to detect endokarst features in Quintana Roo, México, *Journal of South American Earth Sciences*, (2020) 103041.
- [2] P. Constantin, T. Kurosch, K. Michael, S. Reinhard, Testing the effectiveness of an inverse Wenner-Schlumberger array for geoelectrical karst void reconnaissance, on the Swabian Alb high plain, new line Wendlingen-Ulm, southwestern Germany. *Engeo*, (2018).
- [3] A.P. Aizebeokhai, K. D. Oyeyemi, The use of the multiple-gradient array for geoelectrical resistivity and induced polarization imaging, *Journal of Applied Geophysics*, 111 (2014) 364-376.
- [4] M.M. AL-Hameedawi, J.M. Thabit, F.H. AL-Menshed, Some notes about three types of inhomogeneity and their effect on the electrical resistivity tomography data, *Journal of Applied Geophysics*, 191 (2021) 104360.
- [5] F. Bellmund, A. Marcuello, Method to obtain standard pseudosections from pseudo pole-dipole array, *Journal of Applied Geophysics*, 75 (2011) 419-430.
- [6] T. Dahlin, M.H. Loke, Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling, *Journal of Applied Geophysics*, 38(1998) 237-249.
- [7] M.d.l Vega, A. Osella, E. Lascano, Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil, *Journal of Applied Geophysics*, 54 (2003) 97-109.
- [8] M. Cheytani, S.L.I. Chan, The applicability of the Wenner method for resistivity measurement of concrete in atmospheric conditions, *Case Studies in Construction Materials*, 15 (2021) e00663.
- [9] C. Sampson, K.M. Golden, A. Gully, A.P. Worby, Surface impedance tomography for Antarctic sea ice, *Deep-Sea Research II*, 58(2011)1149-1157.
- [10] L. Tang, X. Wang, F. Lan, P. Qiu, L. Jin, Measuring the Content of Unfrozen Water in Frozen Soil Based on Resistivity, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 15 (2020) 9459-9472.
- [11] K.D. Oyeyemi, A.P. Aizebeokhai, Mo. Metwaly, O. Omobulejo, O.A. Sanuade, E.E. Okon, Assessing the suitable electrical resistivity arrays for characterization of basement aquifers using numerical modeling, *Heylon*, 8(5) (2022) e09427.
- [12] D.A. Yoxtheimer, D.O.S. Oakley, A.A. Nyblade, G. Mount, Geo-electrical anisotropy corrections derived from square array data to improve Earth resistivity models of the Shale Hills' critical zone, *Journal of Applied Geophysics*, 215 (2023) 105113.

- [13] W.A. Chisholm, E. Petrache, C.L. Mauff, Field tests of square and double exponential pulses for transient resistivity measurements using Wenner arrays and hemispheres, *Electric Power Systems Research*, 233 (2024) 110499.
- [14] A.H. Amadi, J.A. Ajienka, O. Akaranta, P.R. Moses, N.U. Achara, V.D. Ola, R.D. Udo, A review of soil resistivity testing for enhanced corrosion Control: Overcoming limitations through integrated geophysical approaches and alternative methodologies, *Measurement*, 242, Part D, (2025) 116214.
- [15] T. Takele, M. Husein, D. Diriba, G. Assefa, Application of electrical resistivity tomography for groundwater evaluation in Yirgacheffe Town and its environs, Main Ethiopian Rift, *HydroResearch*, (8) (2025) 202-208.
- [16] A. Ghanbari, Site investigations in geotechnical engineering, Chapter 8, Noavaran Sharif research publication, Tehran, Iran (2009). (In Persian)
- [17] D.S. Parasins, Principles of applied geophysics, Chapman and Hall, London (1986).
- [18] I. Møller, K.I. Sørensen, & E. Auken, 4.5 Geoelectrical methods, in R Kirsch, H-M Rumpel, W Scheer & H Wiederhold (eds), *Groundwater resources in buried valleys: A challenge for geosciences*, Leibniz Institute for Applied Geosciences, Hannover, (2006) 77-87.
- [19] K.I. Sørensen, E. Auken, N.B. Christensen, L. Pellerin, An Integrated Approach for Hydrogeophysical Investigations: New Technologies and a Case History, In Butler D K (ed.) *Near-Surface Geophysics 2, Investigations in Geophysics*, Society of Exploration Geophysics, 13 (2005) 585-603.
- [20] N.B. Christensen, K.I. Sørensen, Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeological investigations, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 3 (1998) 75-90.
- [21] A. Binley, A. Kemna, DC resistivity and induced polarization methods, In Yuram R, Hubbard SS (eds.): *Hydrogeophysics*, Water and Science Technology Library, 50 (2005) 129-156. Springer, New York.
- [22] K. Ernstson, R. Kirsch, Geoelectrical methods, basic principles, In Kirsch R (ed): *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrology*, (2006) 85-108. Springer.
- [23] S.H. Ward, Resistivity and induced polarization methods, In Ward SH (ed.): *Geotechnical and Environmental Geophysics 1, Investigations in Geophysics*, Society of Exploration Geophysics, 5(1990) 147-189.
- [24] T. Dahlin, B. Zhou, A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays, *Geophysical Prospecting*, 52 (2004) 379-398.
- [25] R.A.V. Overmeeren, I.L. Ritsema, Continuous vertical electrical sounding, *First Break*, 6 (1988) 313-324.
- [26] T. Dahlin, 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications, *First Break*, 14 (1996) 275-283.
- [27] K.I. Sørensen, Pulled Array Continuous Electrical Profiling, *First Break*, 14 (1996) 85-90.
- [28] M.S. Munkholm, K.I. Sørensen, B.H. Jacobsen, Characterization and in-field suppression of noise in Hydrogeophysics, In: *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)*, Orlando, Florida, (1995) 339-348.
- [29] E. Auken, A.V. Christiansen, B.H. Jacobsen, N. Foged, and K.I. Sørensen, Piecewise 1D Laterally Constrained Inversion of resistivity data, *Geophysical Prospecting*, 53 (2005) 497-506.
- [30] E. Auken, A.V. Christiansen, Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data, *Geophysics*, 69 (2004) 752-761.
- [31] R. Wisén, E. Auken, T. Dahlin, Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes, *Near Surface Geophysics*, 3 (2005) 71-79.
- [32] Kermanshah urban railway organization (KURO), *Geotechnical testing results report handbook*, Iran Khak consulting engineers, Tehran, Iran (2024).
- [33] Megger, DET5/4R & DET5/4D, Digital Earth Testers, User guide, UK, England, (2024). www.Megger.com
- [34] G.V. Keller, & F.C. Firschnecht, *Electrical Methods in Geophysics Prospecting* pergamon, Oxford (1966).
- [35] M. Romanoff, *Corrosion of Steel Pilings in Soil*, part of National Bureau of Standards Monograph, 127, NBS Papers on Underground Corrosion of Steel Piling, (1972) 1962-1971.
- [36] A. Fatemi, A survey of water quality of Gharasou River, Kermanshah, Iran, *Environ Earth Sci* 80(629) (2021).
- [37] M. Rastegari Mehr, A. Deshaee and A. Shakeri, Investigating contamination and sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment of Qarasoo River, Kermanshah, *Advanced applied geology*, 9(2) (2019) 156-167 (In Persian).