

## بررسی موردی اثر پارامترهای فیزیکی بر تغییرات مقاومت الکتریکی خاکهای ریزدانه

عبداله سهرابی بیدار<sup>۱\*</sup>، ابراهیم اصغری کلجاهی<sup>۲</sup>، بهزاد امینی<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۷/۰۴

دریافت مقاله: ۹۸/۰۲/۰۲

### چکیده

مقاومت الکتریکی شاخصی ساده برای ارزیابی پتانسیل خوردگی خاکها می باشد. جهت بررسی خوردگی خاک در منطقه صنعتی شهرک خیرآباد در حاشیه دریاچه میقان در استان اراک، مقاومت ویژه الکتریکی به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از جعبه میلر و در شرایط مختلف از نظر رطوبت اندازه گیری شده است. خاکهای منطقه از نوع ریزدانه بوده و نوعاً رسی هستند. در رطوبت کمینه و متناظر با وضعیت فصل خشک، خاکهای منطقه دارای پتانسیل خوردگی متوسط تا شدید هستند که به سمت دریاچه میقان افزایش می یابد. الگوی وضعیت خوردگی در خاکهای سطحی (۰ تا ۵ متر) از آبراهه های شمال شرقی به جنوب غربی پیروی می کند و در اعماق بیشتر (۵ تا ۱۰ متر) همگنی نسبی بیشتری دیده می شود. با افزایش مقدار رطوبت، مقاومت الکتریکی به شدت کاهش یافته و به تبع آن در رطوبت ۲۵ درصد، پتانسیل خوردگی خاکهای منطقه به رده شدید و بسیار شدید تغییر می یابد. تحلیل کوواریانس و ضریب همبستگی نسبت کاهش مقاومت الکتریکی در اثر افزایش رطوبت با مشخصات فیزیکی پایه خاک، حاکی از اثرگذاری عمده مواد ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰ بوده و اثر شاخص خمیری، حد روانی و دانسیته خشک در مقایسه با آن کمتر است.

**کلید واژه ها:** مقاومت الکتریکی خاک، خوردگی خاک، مشخصات فیزیکی خاک، جعبه میلر.

۱. دانشیار دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران asohrabi@ut.ac.ir

۲. دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، تبریز

۳. دانش آموخته دوره کارشناسی ارشد، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

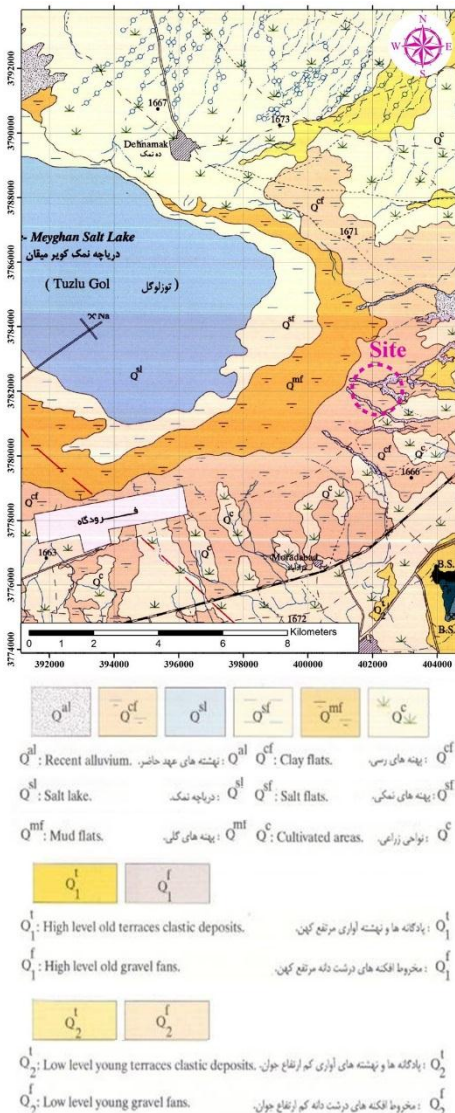
مقاومت الکتریکی خاک (Soil electrical resistivity) یکی از شاخص‌های ژئوفیزیکی است که کاربردهای گسترده‌ای در زمینه خاک‌شناسی و زمین شناسی مهندسی دارد. در مطالعات زمین شناسی مهندسی از این شاخص در شناسایی ضخامت لایه‌های آبرفتی، تفکیک جنس لایه‌های آبرفتی، مطالعه آبخوانها، شناسایی مناطق سنگی خرد شده، زونهای آبدار، عمق زمین لغزش‌ها و بسیاری موارد دیگر استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای مستقیم این شاخص در مطالعات شناسایی ساختگاه‌های مهندسی تعیین پتانسیل خوردندگی (Corrosivity) خاک‌ها می‌باشد. مطالعات موردی مختلفی از بررسی پتانسیل خوردندگی خاک با استفاده از روش مقاومت سنجی وجود دارد.

عوامل مختلفی نظیر ماهیت تشکیل دهنده مواد جامد، توزیع اندازه ذره، کانی شناسی، تخلخل، آرایش حفرات و ارتباط آنها، درجه اشباع آب، الکترولیت و نوع مواد محلول، میزان مواد محلول و غلظت نمکها، دما، اسیدیته و ... بر خوردندگی خاک موثر هستند (Chaker and Palmer, 1989). اگرچه در مطالعات متعددی رابطه بین خوردندگی خاک با پارامترهای ذکر شده بررسی شده، اما همچنان جمع بندی کاملی در این خصوص وجود ندارد. تقی پور و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از روشهای آماری اثرات مقدار رطوبت، مقاومت الکتریکی، میزان نمک‌های محلول و درجه اسیدی خاک بر خوردندگی را در قالب درصد کاهش جرم لوله‌های مدفون بررسی کردند. از بین پارامترهای ذکر شده تنها اسیدیته خاک ارتباط معنی داری با خوردندگی نشان داد؛ عدم وجود رابطه معنی دار بین خوردندگی و سایر پارامترها به غیریکنواختی عمق دفن لوله‌ها و میزان بارش‌های جوی نسبت داده شد. این مسئله ضرورت توجه مضاعف به میزان رطوبت خاک بر پتانسیل خوردندگی را نشان داد. یحایا و همکاران (Yahaya et al., 2011) اثرات درصد رطوبت و میزان کانیهای رسی بر خوردندگی خاک را بررسی نموده و نشان دادند که رطوبت در مقایسه با میزان کانیهای رسی، اثر بیشتری بر خوردندگی خاک دارد. تاهیر و

همکاران (Tahir et al., 2015) پارامترهای مختلف موثر بر خوردندگی خاک را با تحلیل رگرسیون نمایی، بررسی و مقاومت الکتریکی و میزان یون کلرید خاک را پارامترهای اصلی موثر بر خوردندگی معرفی نمودند. رده بندی‌های مختلفی برای خوردندگی خاک بر اساس پارامترهای مختلف موثر و یا ترکیب آنها ارائه شده است. تقی پور و همکاران (Taghipour et al., 2016) با بررسی ۲۰ نمونه خاک از عمق یک متری رسوبات نزدیک سواحل استان بوشهر و بررسی مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها، الگوریتمی را برای رده بندی درجه خوردندگی خاک ارائه کردند. بدیهی است که خوردندگی در خاکها متأثر از مقدار رطوبت خاک بوده و در بررسی مقاومت الکتریکی خاک با هدف شناسایی پتانسیل خوردندگی، می‌بایست اثرات تغییر رطوبت خاک مد نظر قرار گیرد.

خواص الکتریکی خاکها و سنگها از جمله عوامل موثر بر مقاومت ویژه الکتریکی آنها توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. روشن است که عموماً با افزایش رطوبت، مقاومت الکتریکی خاک کاهش می‌یابد. شوین و همکاران (Shevvin et al., 2007) ضمن بررسی رابطه بین درصد کانیهای رسی خاک و درجه شوری سیال منفذی با مقاومت الکتریکی خاک، نموداری برای تخمین درصد کانیهای رسی ارائه کردند. لیو و همکاران (Liu et al., 2008) با بررسی ویژگیهای الکتریکی خاکهای آلوده به بررسی اثرات میزان رطوبت، تخلخل، نوع خاک و غلظت مواد آلاینده بر مقاومت الکتریکی خاک پرداختند. آنها نشان دادند که افزایش رطوبت، تخلخل و غلظت مواد آلاینده از نوع مس سبب کاهش مقاومت الکتریکی خاک می‌گردد. وربان و همکاران (Werban et al., 2009) با بررسی اثرات پارامترهای مختلف در مقاومت الکتریکی خاک، به تاثیر همزمان آنها اشاره نمودند. مراد (Murad, 2012) اثرات ویژگیهای شیمیایی خاک بر مقاومت ویژه الکتریکی را بررسی کرده و نشان داد که ویژگیهای فیزیکی نظیر اندازه ذرات و مقدار رطوبت نقش تعیین کننده‌ای بر مقاومت الکتریکی خاک دارند. هازرک و

پتانسیل خوردگی بوده و بررسی وضعیت مقاومت الکتریکی آنها در شرایط مختلف دارای اهمیت می‌باشد. سایت این پروژه با وسعتی در حدود ۲۰ هکتار در شهرک صنعتی خیرآباد در فاصله ۲۰ کیلومتری از شهر اراک و در حاشیه شرقی دریاچه میقان قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت کلی گستره مورد مطالعه و نمونه برداری خاک را در شمال شرقی شهر اراک و بر روی نقشه زمین شناسی منطقه نشان داده است. با توجه به فاصله ۲ کیلومتری محل مورد مطالعه از دریاچه شور میقان، خوردگی قابل توجه خاک در این منطقه محتمل است.



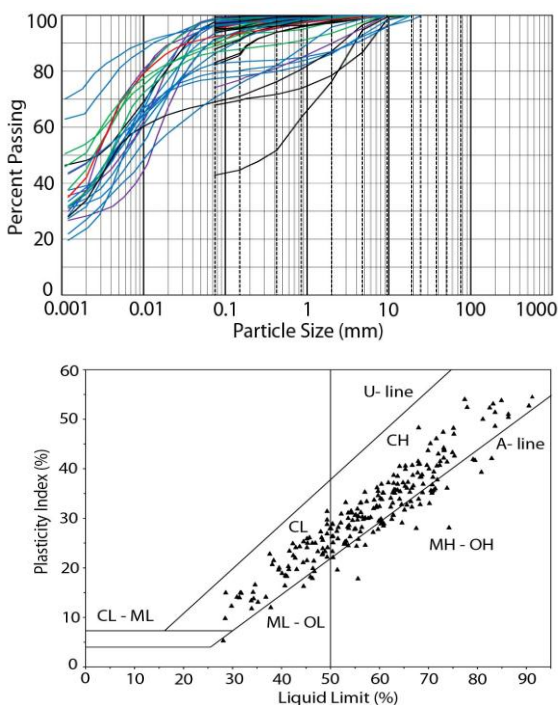
شکل ۱. موقعیت بر روی نقشه زمین شناسی منطقه در حاشیه دریاچه میقان (اقتباس از رادفر و همکاران، ۱۳۸۳)

همکاران (Hazreek et al., 2015) اثرات ویژگیهای نظیر درصد رطوبت و دانسیته بر مقاومت الکتریکی خاکهای سیلت رسی و ماسه سیلتی را بررسی کرده و نشان دادند که جنس خاک اثر قابل ملاحظه‌ای بر نحوه تغییرات مقاومت الکتریکی دارد. پندی و همکاران (Pandey et al., 2015) با بررسیهای آزمایشگاهی به بررسی اثرات رطوبت خاک، دانسیته نسبی و نوع سیال منفذی بر مقاومت ویژه خاک پرداخته و روابطی را برای تخمین مقدار مقاومت الکتریکی براساس دانسیته نسبی و درصد رطوبت ارائه کردند. مارتینی و همکاران (Martini et al., 2017) از بررسی مقاومت الکتریکی صحرائی جهت سنجش رطوبت خاک سطحی استفاده نموده و مقادیر حاصله را با رطوبت اندازه گیری شده مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تغییرات مقاومت الکتریکی خاک را نمی‌توان صرفاً تابعی از رطوبت خاک در نظر گرفت و عوامل دیگری نیز در تغییر مقاومت الکتریکی تاثیر دارند.

تحقیقات موجود وابستگی مقاومت الکتریکی خاک به مقدار رطوبت را نشان داده است. اگرچه در برخی از تحقیقات به اثرات دانسیته، نوع خاک و شوری آب به عنوان سایر عوامل مهم اشاره شده و بعضاً در تخمین مقدار مقاومت الکتریکی خاک به کار گرفته شده‌اند؛ اما اثرات پارامترهای فیزیکی شناخته شده‌ای نظیر مقدار ذرات ریزدانه و حدود آتربرگ و نیز اولویت اثرگذاری آنها بر تغییرات مقاومت الکتریکی بررسی نشده‌اند. هدف این پژوهش بررسی پتانسیل خوردگی خاکها در یک منطقه صنعتی و نیز مقایسه تاثیر نسبی پارامترهای فیزیکی خاک، شامل دانسیته خشک، حد روانی، شاخص خمیری و درصد ذرات ریزدانه و تعیین اولویت آنها بر میزان کاهش مقاومت الکتریکی ناشی از افزایش رطوبت خاک می‌باشد.

## ۲. موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین شناسی منطقه

نمونه خاک مورد استفاده مربوط به سایت پروژه آندسازی اراک در غرب شهرک صنعتی خیرآباد است که بر اساس بررسی‌های اولیه زمین‌شناسی، خاکهای سطحی آن دارای



شکل ۲. منحنی دانه بندی خاکهای محل و وضعیت خمیری خاکها در چارت خمیری کاساگرانده

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل ۴۱ مورد می باشد که همگی آنها از خاکهای ریزدانه تشکیل شده‌اند. با توجه به آن که هدف اصلی بررسی ارزیابی خوردگی خاک بوده است، عمق نمونه‌ها به کمتر از ۱۰ متر که متناظر با پی سازه‌های مدفون می‌باشد، محدود شده است. کلیه نمونه‌ها به جز ۲ مورد که سیلتی بود، رسی می‌باشند. با توجه به آن که هدف تحقیق بررسی اثر ویژگیها و پارامترهای ژئوتکنیکی بر تغییرات خصوصیات الکتریکی خاک می باشد، چهار پارامتر از مشخصات فیزیکی خاک جهت بررسی انتخاب شده است. پارامترهای منتخب از جمله پارامترهای ساده و پایه شناسایی خاک هستند که در اکثر مطالعات شناسایی ساختگاهها در دسترس می باشند. چهار پارامتر شامل دانسیته، مقدار عبوری از الک ۲۰۰، حد روانی و شاخص خمیری می باشد. اگرچه نمونه‌ها به صورت تصادفی از گمانه‌ها و چاهکها انتخاب شده است، اما پراکندگی آنها در کل محدوده، مد نظر بوده و سعی شده است تا حد امکان از کل منطقه مورد مطالعه نمونه گیری گردد. علاوه بر این سعی گردیده که مشخصات فیزیکی پایه

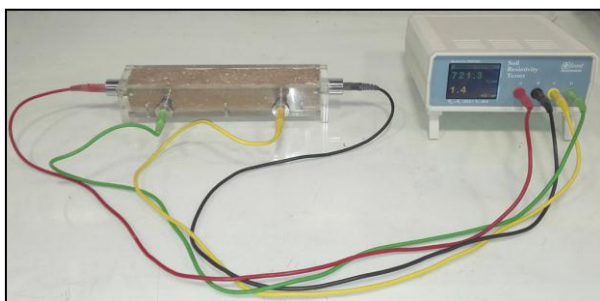
بر اساس تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ساختاری، منطقه مورد مطالعه در زون ایران مرکزی واقع شده است و بر مبنای زمین‌شناسی عمومی محدوده طرح، همه واحدهای زمین شناسی سطحی متعلق به کواترنری و نتیجه رسوب و ته‌نشست مواد توسط سیلابهای وارده به دریاچه میقان می‌باشند. مواد رسوبی عمدتاً ریزدانه بوده و در مناطق نزدیک به حاشیه دریاچه شامل پهنه‌های نمکی هستند. سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه در فصول مختلف متغیر بوده و در فصل خشک به حداکثر ۱۰ متر از سطح زمین می‌رسد (پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۴). تغییرات مورد انتظار در وضعیت تراز آب زیرزمینی و نیز تغییرات رطوبت خاک سطحی در اثر نزولات جوی طی فصول مختلف از جمله ضرورت‌ها و مبین اهمیت بررسی اثر تغییرات رطوبت خاک بر مقاومت الکتریکی و به تبع آن خوردگی مورد انتظار خاک می‌باشد.

### ۳. نمونه برداری و آزمایشات

برای بررسی وضعیت زیرسطحی محدوده مورد مطالعه، آزمایشهای صحرائی و برداشت نمونه جهت انجام آزمایشات آزمایشگاهی در محدوده مورد مطالعه، حدود ۱۰۰ گمانه با اعماق ۱۵ تا ۴۵ متر و ۱۲ چاهک دستی ۱۰ متری به وسیله شرکت پژوهش عمران راهوار (۱۳۹۴) حفاری شده است. بر اساس نتایج حفاریها و مقاطع زمین‌شناسی حاصل آزمایشهای فیزیکی خاک، در محدوده مورد مطالعه لایه‌های خاکی سطحی عموماً از خاکهای ریزدانه چسبنده رسی و در اعماق از لایه‌های سنگی ضعیف سنگ مارن، رس سنگ و به صورت محدود سیلتستون تشکیل شده است. خاکهای ریزدانه چسبنده شامل خاکهای نباتی در اعماق سطحی، رس همراه با سیلت، مارن و سیلت همراه با رس می‌باشند. شکل ۲ منحنی دانه‌بندی نمونه‌های خاک محدوده مورد مطالعه و وضعیت خمیری خاکها در نمودار خمیری کاساگرانده را نشان می‌دهد.

#### ۴. آزمایشات مقاومت الکتریکی و تجهیزات مورد استفاده

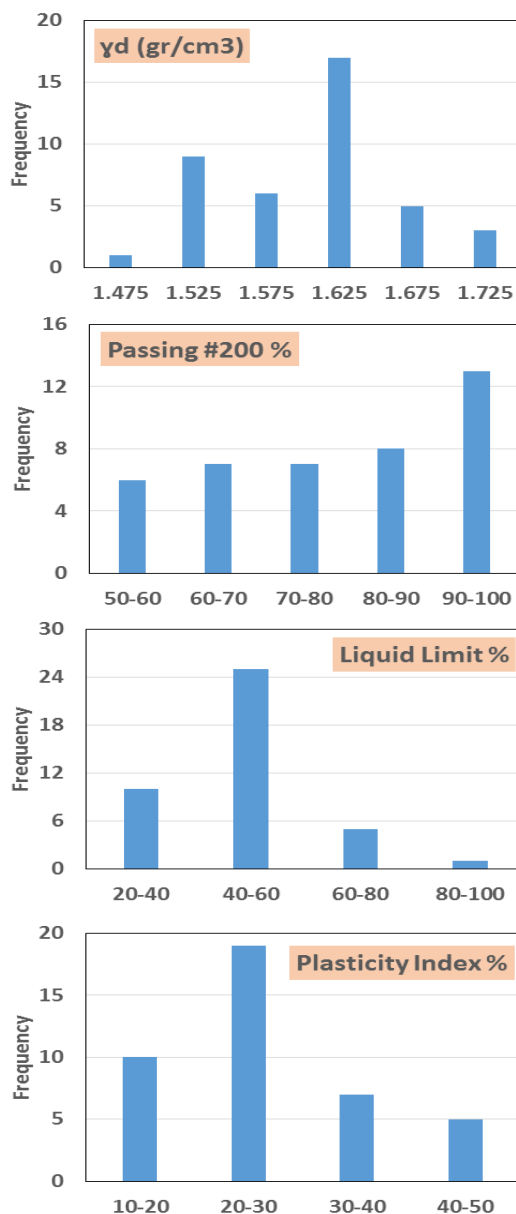
به منظور سنجش آزمایشگاهی مقاومت الکتریکی خاک از روش استاندارد (ASTM G57-95a (2001) و جعبه خاک میلر (Miller box) استفاده شده است. شکل ۴ جعبه خاک مورد استفاده و تجهیزات تامین جریان الکتریکی و نیز سنجش پتانسیل الکتریکی را نشان می‌دهد. به طور کلی این وسیله یک جعبه مستطیل شکل با سقف باز است که از مواد غیر رسانا و مستحکم، نظیر پلاستیک فشرده ساخته شده و در دو انتهای آن الکترودهای صفحه‌ای جریان برای ایجاد یک جریان همگن الکتریکی همراه با سوکتهای اتصال مربوطه قرار دارند. برای سنجش پتانسیل الکتریکی نیز دو میخ (Pin) میانی در فواصل معینی تعبیه شده است. جهت اندازه گیری مقاومت ابتدا خاک با شرایط مورد نظر در داخل جعبه خاک در لایه‌های نازک متراکم گردیده و سپس الکترودهای سنجش پتانسیل الکتریکی در محل میخهای تعبیه شده در داخل خاک فرو رانده می‌شود. پس از برقراری جریان الکتریکی به وسیله الکترودهای جریان در دو انتهای جعبه، سنجش اختلاف پتانسیل بین محل دو میخ میانی صورت می‌گیرد. نسبت پتانسیل الکتریکی به شدت جریان تزریق شده با مقاومت الکتریکی ویژه خاک متناسب است.



شکل ۴. تصویری از جعبه خاک میلر به همراه دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی مورد استفاده

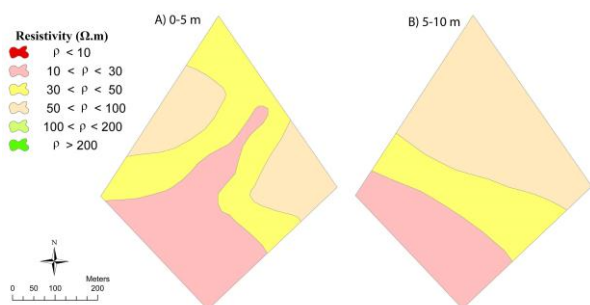
جهت بررسی اثر تغییرات رطوبت بر مقاومت الکتریکی خاک و نحوه تاثیر نسبی پارامترهای فیزیکی خاک بر میزان تغییر مقاومت الکتریکی، سنجش مقاومت در چهار مقدار رطوبت

مورد بررسی شامل دانسیته خشک، درصد عبوری از الک ۲۰۰، حد روانی و شاخص خمیری فاقد سوگیری خاص بوده و پراکندگی قابل قبولی داشته باشد. شکل ۳ فراوانی نمونه‌ها به ازاء مشخصات فیزیکی پایه مختلف را نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود، نمونه‌ها دارای پراکندگی قابل قبولی از نظر مشخصات فیزیکی پایه برای بررسی آماری مد نظر پژوهش هستند.



شکل ۳. فراوانی نمونه‌ها بر اساس مشخصات فیزیکی پایه خاکها

خاکها از نظر خوردگی به ۴ رده تقسیم می‌شوند. همچنین پیبودی و بیتانچی (Peabody and Bianchetti, 2001) مطابق آنچه در جدول ۲ ارائه شده است، خاکها را به صورت جزئی‌تر به ۶ رده تقسیم نموده‌اند. با توجه به قرارگیری مقاومت الکتریکی خاکها در بین ۱۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر و بر اساس استاندارد BS 7361 (1991)، خاکهای محدوده مورد بررسی در رده خاکهای خورنده تا خاکهای دارای خوردگی متوسط قرار دارند. بر اساس رده‌بندی پیبودی و بیتانچی (Peabody and Bianchetti, 2001) نیز خاکهای محدوده مورد مطالعه به طور عمومی در رده خاکهای با خوردگی شدید تا متوسط و در بخشهای جنوبی و غربی در رده خاکهای با خوردگی شدید قرار دارند.



شکل ۵. مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های با رطوبت ۱۰ درصد در (A) عمق ۰ تا ۵ متر و (B) عمق ۵ تا ۱۰ متر

جدول ۱. رده بندی خوردگی خاک بر اساس استاندارد BS 7361 (1991)

Resistivity ( $\Omega.m$ )	Soil Corrosivity Classification
up to 10	Severely Corrosive
10 - 50	Corrosive
50 - 100	Moderately Corrosive
100 and above	Slightly Corrosive

جدول ۲. رده بندی خوردگی خاک توسط پیبودی و بیتانچی (نقل از Roberge, 2007)

Resistivity ( $\Omega.m$ )	Soil Corrosivity Classification
up to 10	Extremely Corrosive
10 - 30	Highly Corrosive
30 - 50	Corrosive
50 - 100	Moderately Corrosive
100 - 200	Mildly Corrosive
above 200	Essentially Non-Corrosive

مختلف برای کلیه نمونه‌های خاک انجام شده است. حد پایین رطوبت در نظر گرفته شده ۱۰ درصد می‌باشد که با رطوبت طبیعی خاک‌های سطحی تا عمق ۱۰ متر در فصول خشک سال متناظر است. علاوه بر آن مقاومت الکتریکی خاک در مقادیر رطوبت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد نیز برای کلیه نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شده است. بدین منظور نمونه‌ها در مرحله اول خشک گردیده و سپس با استفاده از خرد کن و یا هاون دستی کلوخه‌های رسی خرد شده‌اند. پس از رطوبت دهی به میزان مناسب و طی زمان عمل آوری برای همگنی کامل و جذب رطوبت، نمونه خاک با استفاده از دانسیته خشک نظیر نمونه در داخل جعبه بازسازی شده‌اند. سپس مطابق استاندارد مذکور، اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی صورت گرفته است.

## ۵. تحلیل نتایج آزمایشات و بحث

برای بررسی وضعیت مقاومت ویژه در حالت طبیعی فصول خشک، نمونه‌ها از نظر عمق به دو گروه، عمق کمتر از ۵ متر و عمق بیش از ۵ متر تقسیم شده‌اند. در گروه اول ۲۰ نمونه و در گروه دوم ۲۱ نمونه قرار دارد. شکل ۵ پهنه‌بندی مقادیر مقاومت الکتریکی در اعماق ۰ تا ۵ متر و ۵ تا ۱۰ متر را برای درصد رطوبت ۱۰ درصد خاک نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود، در هر دو نقشه مقاومت الکتریکی از شمال شرقی به جنوب غربی کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این کاهش، قرار گیری دریاچه شور میقان در حاشیه غربی محدوده مورد بررسی و وجود آبراهه‌های با راستای شمال شرقی به جنوب غربی است. علاوه بر این مقایسه دو نقشه نشان می‌دهد که مقدار مقاومت ویژه با افزایش عمق دارای همگنی بیشتری بوده و نیز اندکی افزایش یافته است. دلیل این همگنی حذف اثرات سطحی و مقادیر بالای نمک و شوری خاک در لایه‌های فوقانی می‌باشد. در اعماق کمتر مقادیر مقاومت متاثر از آبراهه‌های موجود در محدوده مورد بررسی می‌باشد.

جدول ۱ رده بندی خوردگی خاک بر اساس استاندارد BS 7361 (1991) را نشان داده است. بر اساس این استاندارد،

افزایش رطوبت، پارامتر نسبت کاهش مقاومت (Resistivity Decreasing Ratio) در رطوبت  $\omega$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RDR = \frac{R_{\omega} - R_i}{R_i} \quad (1)$$

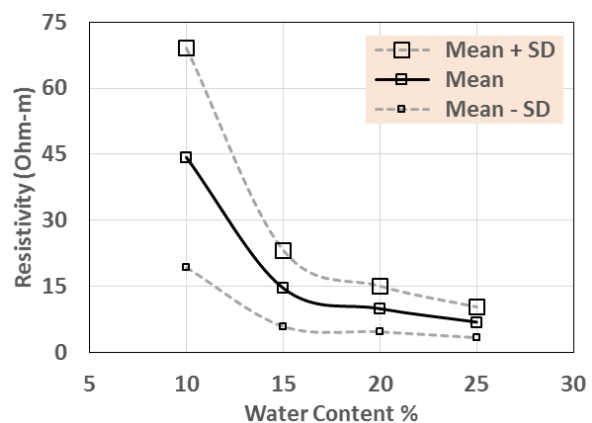
که در آن  $R_i$  مقاومت ویژه اولیه نمونه خاک و  $R_{\omega}$  مقاومت ویژه الکتریکی ثانویه خاک با رطوبت  $\omega$  می‌باشد. در این بررسی مقدار مقاومت ویژه اولیه برابر با مقاومت نمونه خاک در رطوبت ۱۰ درصد (مقاومت الکتریکی متناظر با وضعیت طبیعی خاک در فصول خشک) و مقاومت ویژه الکتریکی ثانویه برابر با مقاومت ویژه الکتریکی خاک در رطوبت های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. جهت بررسی رابطه نسبت کاهش مقاومت با مشخصات فیزیکی پایه خاک از تحلیل کوواریانس و ضریب همبستگی استفاده شده است. کوواریانس و ضریب همبستگی دو متغیر  $x$  و  $y$  به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$COV_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2)$$

$$R_{xy} = \frac{COV_{xy}}{S_x S_y} \quad (3)$$

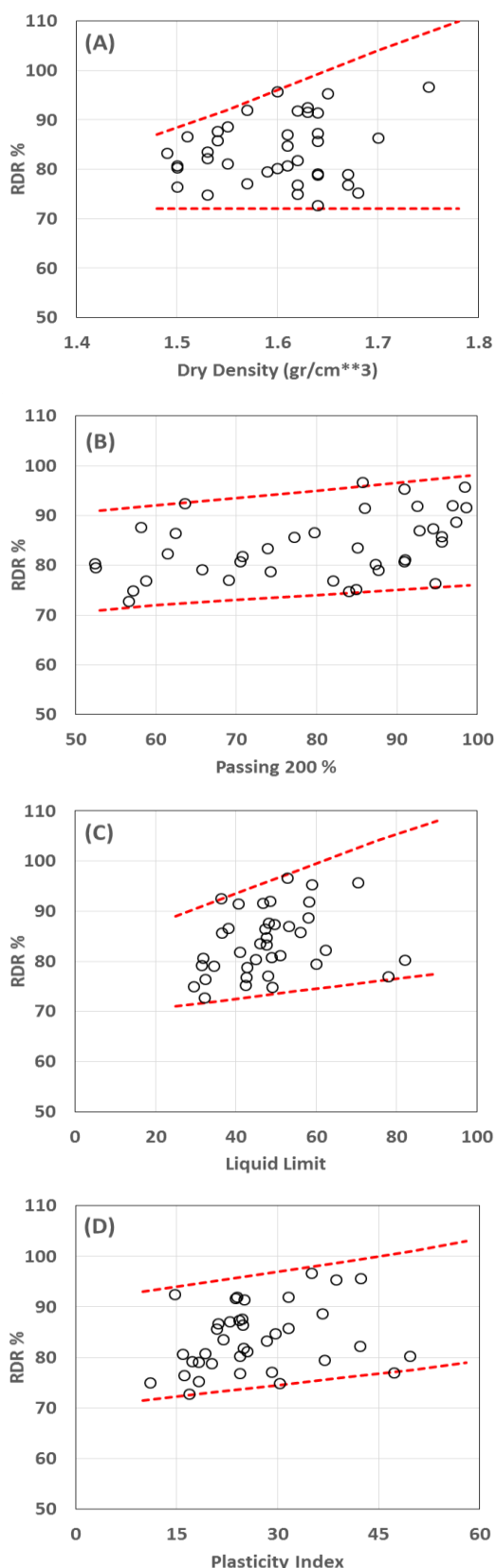
که در آنها  $COV_{xy}$  کوواریانس بین دو متغیر و  $R_{xy}$  ضریب همبستگی دو متغیر هستند.  $n$  تعداد نمونه ها،  $\bar{x}$  میانگین متغیر  $x$  و  $\bar{y}$  میانگین متغیر  $y$  می‌باشد.  $S_x$  و  $S_y$  نیز انحراف معیار دو متغیر  $x$  و  $y$  هستند. جدول ۳ مقادیر کوواریانس و ضریب همبستگی بین نسبت کاهش مقاومت با مشخصات فیزیکی پایه خاک شامل دانسیته خشک، درصد عبوری از الک ۲۰۰، حد روانی و شاخص خمیری خاک را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی همه پارامترها مثبت می‌باشد که به معنی افزایش نسبت کاهش مقاومت با افزایش هر چهار پارامتر است. با توجه به ضرایب همبستگی می‌توان نتیجه گرفت که هر ۴ پارامتر بر نسبت کاهش مقاومت موثر هستند. در بین چهار مشخصه فیزیکی بررسی شده، مقدار مواد عبوری از الک ۲۰۰ به خصوص در مقادیر رطوبت بالا بیشترین همبستگی را با نسبت کاهش مقاومت داشته و شاخص خمیری و حد روانی در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. ضریب همبستگی نسبت کاهش مقاومت با دانسیته خشک، نیز کمترین مقدار را دارد.

توجه به این نکته لازم است که مقادیر رطوبت کمتر در نظر گرفته شده برای آزمایشها متناظر با مقدار رطوبت خاک در فصول خشک بوده و در صورت افزایش رطوبت مقادیر مقاومت دستخوش تغییر خواهند شد. شکل ۶ نمودار میانگین مقادیر مقاومت الکتریکی ویژه خاک بر حسب مقادیر مختلف رطوبت خاک را نشان داده است. در این شکل بازه محدوده انحراف معیار حول میانگین نیز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار رطوبت خاک از ۱۰ به ۱۵ درصد، مقدار مقاومت الکتریکی به شدت کاهش می‌یابد. این کاهش قریب به ۷۰٪ مقاومت الکتریکی ویژه در رطوبت اولیه می‌باشد. با افزایش رطوبت به ۲۰ و ۲۵ درصد نیز مقاومت الکتریکی ب دیگر کاهش می‌یابد با این حال، مقدار کاهش در مراحل بعد در مقایسه با کاهش مرتبه اول کمتر می‌باشد.



شکل ۶. روند تغییر مقاومت الکتریکی نمونه‌های خاک با درصد رطوبت

با توجه به مقادیر مقاومت الکتریکی در نمونه‌های خاک با رطوبت ۲۵ درصد، تقریباً همه محدوده مورد مطالعه از نظر رده خوردگی خاک بر اساس رده بندی استاندارد (BS 7361 (1991)، در رده خاکهای خورنده یا بسیار خورنده و بر اساس رده بندی پیبودی و بیتانچی (Peabody and Bianchetti, 2001) در رده فوق العاده خورنده قرار می‌گیرند. به منظور بررسی تاثیر نسبی مشخصات فیزیکی پایه خاکهای ریزدانه بر میزان کاهش مقاومت ناشی از



شکل ۷. نسبت کاهش مقاومت الکتریکی خاک به ازای رطوبت

۲۵ درصد در مقابل مشخصات فیزیکی خاک

این مسئله نشان می‌دهد که در بین مشخصات فیزیکی بررسی شده، مقدار مواد عبوری از الک ۲۰۰ بیشترین تاثیر و دانسیته خشک کمترین تاثیر را بر کاهش مقاومت الکتریکی خاک در اثر افزایش رطوبت دارد. شاخص خمیری و حد روانی نیز اگرچه از عوامل موثر بر نسبت کاهش مقاومت الکتریکی هستند، اما در مقایسه با درصد عبوری از الک ۲۰۰ اثر اندکی بر کاهش مقاومت داشته‌اند. همچنین میزان تاثیر این دو پارامتر بر کاهش مقاومت حاصل از افزایش رطوبت، تقریباً یکسان می‌باشد.

### جدول ۳. پارامترهای تحلیل کواریانس و ضریب همبستگی

نسبت کاهش مقاومت با مشخصات فیزیکی پایه خاک

Statistical Parameter	$\rho_d$	Passing #200%	Liquid Limit	Plasticity Index
S	0.06	14.81	12.16	9.19
COV ( $\omega = 15$ )	0.19	59.66	43.98	39.82
COV ( $\omega = 20$ )	0.14	54.10	28.75	24.78
COV ( $\omega = 25$ )	0.07	41.54	20.65	15.43
$R_{xy}$ ( $\omega = 15$ )	0.19	0.25	0.23	0.27
$R_{xy}$ ( $\omega = 20$ )	0.25	0.41	0.26	0.30
$R_{xy}$ ( $\omega = 25$ )	0.18	0.43	0.26	0.26

شکل ۷ پراکندگی نسبت کاهش مقاومت الکتریکی به ازای رطوبت ۲۵ درصد در برابر مشخصات فیزیکی پایه خاک را نشان می‌دهد. در این نمودارها حدود بالا و پایین بین دو پارامتر نیز ارائه شده است. اگرچه پراکندگی داده‌ها زیاد بوده و امکان ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی نسبت کاهش مقاومت بر اساس هر یک از پارامترها وجود ندارد، اما می‌توان روندی مشابه با نتایج حاصل از تحلیل ضریب همبستگی را مشاهده نمود. به تعبیر دیگر اگرچه هر چهار پارامتر به صورت مستقیم با نسبت کاهش مقاومت رابطه دارند، اما همبستگی پارامتر درصد عبوری از الک ۲۰۰ در مقایسه با پارامترهای دیگر بیشتر است.



## ۶. نتیجه گیری

وضعیت آبراهه‌های منطقه بوده و با افزایش عمق بر همگنی مقاومت الکتریکی خاک افزوده می‌گردد. با افزایش میزان رطوبت خاک، مقدار مقاومت به شدت کاهش یافته و انتظار می‌رود که در رطوبت ۲۵ درصد، پتانسیل خوردگی خاکها به رده شدید و بسیار شدید افزایش یابد. رابطه بین نسبت کاهش مقاومت الکتریکی در اثر افزایش رطوبت با مشخصات فیزیکی پایه خاک با تحلیل کوواریانس و ضریب همبستگی حاکی از اثرگذاری عمده مقدار مواد عبوری از الک ۲۰۰ بر میزان کاهش مقاومت است. نسبت کاهش مقاومت الکتریکی خاک در مراتب بعدی متاثر از شاخص خمیری، حد روانی و دانسیته خشک می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در بهسازی خاکها جهت کاهش خوردگی خاک استفاده شود.

مقاومت الکتریکی خاک با استفاده از اندازه‌گیری آزمایشگاهی نمونه‌های مربوط به اعماق مختلف محدوده پروژه آندسازی امیر کبیر واقع در غرب شهرک صنعتی خیرآباد اراک تعیین شده است. خاکهای این محدوده عموماً ریزدانه بوده و دارای طبقه بندی CL می‌باشند. تعداد ۴۱ نمونه از محدوده مذکور برداشته شده و در آزمایشگاه با استفاده از جعبه میلر با مقادیر مختلف دانسیته و رطوبت آماده سازی شده و مقاومت الکتریکی خاک تعیین شده است. بر اساس معیارهای موجود ارزیابی خوردگی خاک، نتایج آزمایشات موید پتانسیل خوردگی متوسط تا شدید در رطوبتهای کمینه طبیعی در خاکهای منطقه است که به سمت دریاچه میقان افزایش می‌یابد. پتانسیل خوردگی در خاکهای سطحی متاثر از

## منابع

- پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۴، گزارش مطالعات ژئوتکنیک و مهندسی پی پروژه آندسازی امیرکبیر، مجتمع آلومینیم اراک.
- تقی پور م، لشکری پور غ.ر، غفوری م، حافظی مقدس ن، ۱۳۹۴، بررسی تاثیر عوامل مختلف موثر بر خوردگی فلزات در خاک با استفاده از تحلیل های آماری، زمین شناسی مهندسی، دوره ۸، صفحه ۹۵-۱۰۴.
- رادفرج، کهنسال ر، مدحج ل، ذوالفقاری ص، ۱۳۸۳، نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی اراک، ورقه ۵۹۵۸، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ASTM G57-95a, 2001, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method, ASTM, West Conshohocken, PA, United States.
- BS 7361, 1991, Cathodic Protection Part 1: Code of Practice for Land and Marine Applications, British Standard.
- Chaker, V., Palmer, J. D., 1989, Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM International, 172 p.
- Hazreek Z., Aziman M., Azhar A., Chitral W.D., Fauziah A. and Rosli S., 2015, The Behaviour of Laboratory Soil Electrical Resistivity Value under Basic Soil Properties Influences, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 23, Paper No. 012002.
- Liu S., Chen L, Han L., 2008, Study on Electrical Resistivity Related Parameters of Contaminated Soils, in Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Liu, Deng and Chu (eds), Science Press Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg.
- Martini E., Wollschläger U., Musolff A., Werban U., and Zacharias S., 2017, Principal Component Analysis of the Spatiotemporal Pattern of Soil Moisture and Apparent Electrical Conductivity, Vadose Zone Journal, 16(10), pp1-12.
- Murad O. F., 2012, Obtaining Chemical Properties through Soil Electrical Resistivity, Journal of Civil Engineering Research 2012, 2(6): 120-128.
- Pandey L.M.S., Shukla S.K. and Habibi A., 2015, Electrical resistivity of sandy soil, Géotechnique Letters 5, 178-185.
- Peabody, A.W., and Bianchetti R.L., 2001, Peabody's Control of Pipeline Corrosion. 2nd ed., Houston, TX, National Association of Corrosion Engineers International.

- 
- Roberge, P. R., 2007, Corrosion Inspection and Monitoring, WILEY SERIES IN CORROSION, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Shevnin V., Mousatov A., Ryjov A., Delgado-Rodriquez O., 2007, Estimation of clay content in soil based on resistivity modelling and laboratory measurements, *Geophysical Prospecting*, 55, 265–275.
- Tahir S. N., N. Yahaya, N. M. Noor, L. K. Sing and A. A. Rahman, 2015, Underground Corrosion Model of Steel Pipelines Using In Situ Parameters of Soil, *Journal of Pressure Vessel Technology*, American Society of Mechanical Engineers, 137(5), Paper No. 051701.
- Taghipour M., G. R. Lashkaripour, M. Ghafoori, N. Hafezimoghaddas, 2016, Evaluating the soil corrosion of Bushehr, Iran, based on a new classification system for corrosive soils, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 63 (5), 347 – 354.
- Werban U., Kuka K., and Merbach I., 2009, Correlation of electrical resistivity, electrical conductivity and soil parameters at a long-term fertilization experiment, *Near Surface Geophysics*, 5-14.
- Yahaya N., K.S. Lim, N.M. Noor, S.R. Othman, A. Abdullah, 2011, Effects of Clay and Moisture Content on Soil-Corrosion Dynamic, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 23(1), 24-32.