



معرفی روش مقاومت سنجی الکتریکی جهت آزمایش غیرمخرب اندازه گیری درجه اشباع نمونه‌های خاک

• محمد هادی داودی و ابراهیم گوهری، اعضای هیأت علمی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ دریافت: اردیبهشت ماه ۱۳۸۲ تاریخ پذیرش: اردیبهشت ماه ۱۳۸۳

چکیده

استفاده از روش مقاومت سنجی الکتریکی در ژئوفیزیک مبتنی بر تئوری کاهش مقاومت خاک در مقابل جریان الکتریسیته تحت تأثیر آب است. مطالعاتی با هدف بررسی امکان استفاده از رابطه کمی بین مقاومت الکتریکی و درجه اشباع خاک برای اندازه‌گیری سریع و دقیق درجه اشباع خاک به عمل آمد. اهمیت و کاربرد این تحقیق در این است که، به‌عنوان یک تست غیر مخرب، امکان اندازه‌گیری درجه اشباع و همچنین دنبال نمودن تغییرات آن را در نمونه‌های خاکی که تحت آزمایشات مختلف مکانیک خاک قرار دارند فراهم می‌سازد. دو سری آزمایشات بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی با تراکم تقریباً یکسان و درصد رطوبت متفاوت انجام شد. سری اول آزمایشات عبارت است از بررسی تأثیر مقدار ولتاژ اعمال شده بر نحوه توزیع آن در نمونه و نیز افت ولتاژ در محدوده تماس قطبها با خاک. در سری دوم آزمایشات، رابطه بین افت پتانسیل و درصد رطوبت و نیز درجه اشباع خاک مورد کنکاش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که این تکنیک به‌عنوان یک روش غیر مخرب و سریع می‌تواند با دقت نسبتاً خوبی درجه اشباع و درصد رطوبت خاک را اندازه‌گیری نماید.

کلمات کلیدی: درجه اشباع، مقاومت الکتریکی، درصد رطوبت، آزمایش غیر مخرب، خاک غیر چسبنده، نفوذ پذیری

Pajouhesh & Sazandegi No:65 pp: 25-33

Application of resistivity method as nondestructive test for measurement of degree of saturation of soil specimens

By: M.H.Davoudi, and, A. Gohari, Members of Scientific Board of Soil Conservation & Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Iran

Application of electrical resistivity method in civil engineering is based on the relationship between the electrical resistance, the water content and the inherent characteristics of the soil. This method is usually used to investigate the soil stratification and the ground water table. This research is aimed to verify the capability of resistivity method for measuring the degree of saturation of soil samples. The importance of this research is that this method may be used as

a nondestructive test for subsecutive measurement of saturation degree of specimens being under other tests such as triaxial test, consolidation test, long term permeability test etc. In other wards this method will permit one to follow the variation of degree of saturation of any sample during any other tests. The material used was a nonplastic glacial till from northern Quebec, Canada. Two series of tests were conducted on specimens compacted with different water contents to an identical void ratio. In the first series, the influence of magnitude of voltage on the distribution of voltage throughout the specimen as well as the voltage loss at the pole contact area was investigated. In the second series of tests, the relation of saturation degree -voltage loss across the specimen was studied and developed. The results show that this method can be used as a rapid and nondestructive test with relatively good precision.

Key words: Saturation degree, Electrical resistivity, Water content, Nondestructive test, Cohesive soils, Coefficient of

مقدمه

از جمله ویژگی‌های خاک، رطوبت و به عبارت دیگر درصد اشباع آن می‌باشد. در برخی از آزمایشات آزمایشگاهی، به طور مثال آزمایشات سه محوری، الکترو اسمز، نفوذپذیری و ...، آگاهی از تغییرات درصد اشباع نمونه در طی مراحل مختلف آزمایش بسیار ارزشمند بوده و می‌تواند در تجزیه تحلیل رفتار آن کمک مؤثری نماید.

آب در شرایط عادی و تحت فشار اتمسفریک، قادر نیست به تمامی حفرات خاک وارد شده و جایگزین هوا گردد. به همین دلیل، اغلب نمونه‌های خاک حتی پس از آبیگری در آزمایشگاه، اشباع کامل نیستند (۱۳، ۱۰، ۹، ۴). بنابر گزارش Davoudi (۵) یک جریان مستمر آب تحت فشار اتمسفر می‌تواند، از طریق انحلال هوای محبوس در حفرات، درصد رطوبت و درجه اشباع خاک را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد. در همین راستا، وی یک سری آزمایشات تحت عنوان تست نفوذپذیری دراز مدت انجام داد، که در آنها آب تحت فشار اتمسفر به‌طور مستمر برای مدت سه ماه به داخل خاک جریان داشت، و در فواصل زمانی مناسب نفوذپذیری خاک اندازه‌گیری می‌شد. همچنین می‌بایست، همزمان با نفوذپذیری، درجه اشباع و یا درصد رطوبت نمونه در حین آزمایش و به طور متوالی اندازه‌گیری می‌شد. وی سعی کرد که از آزمایشهای غیر مخرب (Nondestructive tests) موجود از قبیل استفاده از امواج الکترومغناطیس و ... استفاده نماید، اما این روشها فاقد دقت مورد نیاز بودند. به این ترتیب، استفاده از مقاومت‌سنجی به عنوان یک روش جدید برای اندازه‌گیری تغییرات رطوبت مطرح شد. در این مقاله سعی بر این است که، به کمک مجموعه‌ای از آزمایشات آزمایشگاهی، امکان استفاده از تکنیک مقاومت‌سنجی الکتریکی در اندازه‌گیری تغییرات درجه اشباع خاک، به عنوان یک روش غیر مخرب، بررسی گردد.

مقاومت‌سنجی الکتریکی (Resistivity method) از جمله روشهایی است که از سالها قبل توسط محققین ژئوالکتریک و خاک‌شناسان جهت شناسایی منابع آب زیرزمینی و همچنین نفوذ جریان آب در خاک مورد بهره برداری واقع شده است. در این روش یک جریان مستقیم، و یا جریان متناوب با فرکانس بسیار پایین، توسط دو یا چند قطب به زمین اعمال شده و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه (الکترو)، که موقعیت مناسبی با قطبها داشته باشند، اندازه‌گیری می‌شود. اختلاف پتانسیل متناظر با جریان

الکتریکی واحد، نمودی است از مقاومت الکتریکی زمین بین دو الکترو. مقاومت الکتریکی تابعی است از موقعیت و وضعیت قطبها و الکتروها و همچنین ویژگی‌های الکتریکی زمین. جامعترین تعریف مقاومت الکتریکی (rp) عبارت است از مقاومت بین دو وجه یک مکعب از خاک با ابعاد واحد به ازاء جریان الکتریکی واحد، و از رابطه (۱) قابل محاسبه است:

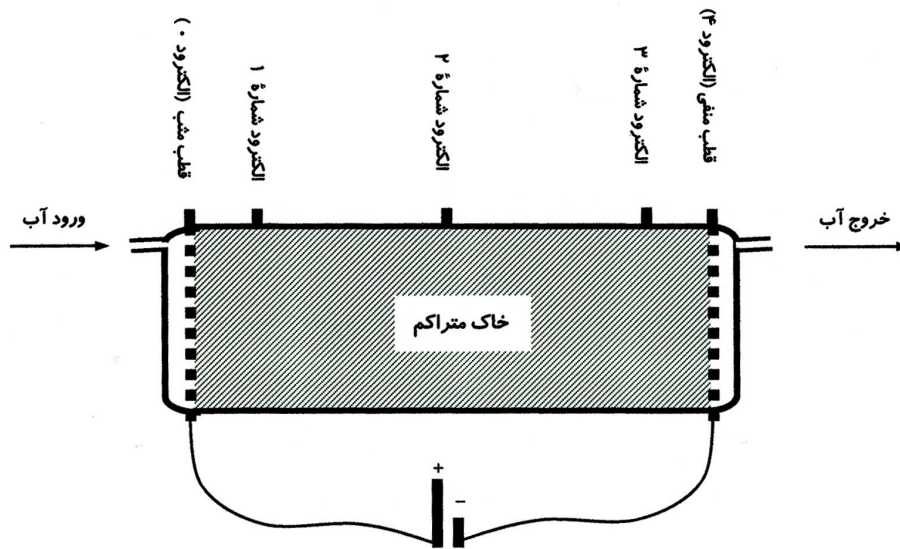
$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{A}{L} \quad (1)$$

که در آن ΔV اختلاف پتانسیل بین دو الکترو، A سطح مقطع جریان الکتریسیته در خاک بین دو الکترو، I شدت جریان اعمال شده و L فاصله بین دو الکترو می‌باشد (۱۴، ۱۲). معمولاً مقاومت الکتریکی بر حسب $\Omega\text{-m}$ یا $\Omega\text{-cm}$ ارائه می‌شود.

مقاومت الکتریکی خاک تابعی از بافت و ساختمان آن و به‌ویژه درصد رطوبت آن (۱۹۹۵) Hendrickx و Sheets است. خاکها محیط‌های متخلخلی هستند. متشکل از ذرات جامد، عایق و مایع الکترولیتی که می‌تواند از طریق جابجایی یونهای آزاد و یا جذب شده بر روی این ذرات، جریان الکتریکی را منتقل نماید. Benderitter و Schott (۳) و Aaltonen (۱) از این تکنیک استفاده کرده و با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، تغییرات رطوبتی ناشی از بارندگی در خاک را ردیابی نمودند. در زمینه آبهای زیرزمینی، White (۱۵) توانست به کمک همین تکنیک و با استفاده از ردیاب نمکی، جهت و سرعت جریان را تعیین نماید. این روش مبنای تکنیک Electrical Resistivity Tomography (ERT) می‌باشد که هیدروژئولوژیست‌ها و کارشناسان محیط زیست را قادر می‌سازد جریانهای آلوده کننده زیرزمینی را شناسایی نمایند (۶). برای سنگها، Keller و Frischknecht (۸) رابطه‌ای عمومی بین درجه اشباع و مقاومت الکتریکی به زیر ارائه کردند:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = aS^{-n} \quad (2)$$

که در آن ρ_s مقاومت الکتریکی در حالت اشباع، S درجه اشباع و n و a ضرایبی هستند که تابع درجه اشباع و نوع سنگ می‌باشند. مقدار a برای



شکل ۱ - دستگاه مقاومت سنجی الکتریکی

رفته، و ولتاژ نسبتاً کمتری به سایر قسمت‌های نمونه منتقل می‌گردد. شکل ۲- درصد افت ولتاژ در ناحیه تماس قطب مثبت در نمونه Res ۱-۸ را برای پتانسیلهای ۲ الی ۱۲ ولت (V) نشان می‌دهد. در این نمونه، بیشترین افت ولتاژ، به ازای پتانسیل ۲۷ و به میزان ۳۴٪ بود. با افزایش پتانسیل تا ۶۷، میزان افت به شدت کاهش یافته، و برای ولتاژهای بالاتر، سیر نزولی خود را با شدت کمتر ادامه می‌دهد.

در شکل ۳- تأثیر ولتاژ اعمال شده در افت پتانسیل ناحیه تماس و همچنین در نحوه توزیع پتانسیل سایر نواحی نمونه Res ۶-۷ نشان داده شده است. در این نمونه همانند نمونه قبل، افت پتانسیل در ناحیه تماس قطب مثبت (r_{p1})، با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. افت پتانسیل در ناحیه تماس قطب منفی (r_{p2}) کمتر از ناحیه قطب مثبت است، در عین حال رفتار مشابهی را در مقابل تغییرات ولتاژ نشان می‌دهد. با وجود این، مقاومت الکتریکی بین الکتروودهای ۱ و ۲ (r_{p1-2}) و همچنین بین الکتروودهای ۲ و ۳ (r_{p2-3}) و نیز بین الکتروودهای ۱ و ۳ (r_{p1-3}) تقریباً یکسان بوده و مستقل از ولتاژ اعمال شده می‌باشد. در این شکل، نشان r_p دهنده مقاومت الکتریکی کل خاک است و با افزایش ولتاژ به میزان کمی کاهش می‌یابد. در عین حال برای ولتاژهای بیش از ۱۲۷، عملاً ثابت بوده و تغییرات محسوسی نشان نمی‌دهد. از دیدگاه کاربردی، می‌توان گفت که تأثیر ولتاژهای فراتر از ۷۱۲، در افت نواحی تماس قابل اغماض می‌باشد. در واقع در این ولتاژها فضای حفرات مجاور الکتروودها قطبی شده و سطح مؤثر انتقال انرژی از الکتروود به توده خاک به تمام سطح جانبی الکتروود گسترش یافته و لذا افت انرژی به حداقل مشاهده شده کاهش می‌یابد. از آنجایی که در سایر نمونه‌ها هم رفتار مشابهی مشاهده گردید، الکتروودهای ۱ و ۲ به عنوان الکتروودهای شاخص، و مقاومت الکتریکی بین آنها به عنوان مقاومت الکتریکی شاخص خاک، برای آزمایش‌های سری دوم و سوم توصیه

مقدماتی بدست آمده، به نمونه‌های با رطوبت‌های مختلف اعمال شده و میزان افت پتانسیل بین الکتروودهای شاخص، اندازه‌گیری گردید. آنگاه، با استفاده از رابطه (۱) مقدار مقاومت الکتریکی خاک در حد فاصل بین دو الکتروود محاسبه شد.

سری سوم آزمایشات، که قسمت عمده این تحقیق را تشکیل می‌دهد، با هدف ارزیابی کارایی روش مقاومت سنجی الکتریکی در اندازه‌گیری تغییرات درصد رطوبت به هنگامی که آب در داخل خاک جریان داشت، انجام شد. این آزمایشات با هدف ارزیابی کارایی متد مقاومت سنجی الکتریکی در آزمایشات نفوذپذیری دراز مدت صورت پذیرفت. بدین منظور در تعدادی از نمونه‌ها، آب از طریق مخزن انتهایی به نمونه تزریق شده، و پس از مشاهده آب در مخزن انتهایی دیگر و اطمینان از مستغرق شدن کامل نمونه، اختلاف پتانسیل بین الکتروودهای شاخص اندازه‌گیری گردید. همچنین با توزین مجموعه نمونه و دستگاه و مقایسه آن با جرم آن قبل از آبیگری، درصد رطوبت و درجه اشباع نمونه پس از آبیگری محاسبه شد. در مرحله بعدی، جریان آب با دبی ثابت $0.01 \text{ cm}^3/\text{sec}$ از طرف چپ به راست برقرار گردید، و اختلاف پتانسیل بین الکتروودهای شاخص در فواصل زمانی مناسب اندازه‌گیری و مقاومت الکتریکی بین آن دو محاسبه گردید. این جریان برای مدت سه روز ادامه یافت، و در طی آن تغییرات وزنی نمونه‌ها نیز جهت تعیین افزایش درصد رطوبت آنها دنبال می‌شد.

نتایج

نتایج آزمایشات سری اول، با هدف تعیین ولتاژ بهینه برای مقاومت سنجی، نشان داد که مقدار افت پتانسیل در ناحیه تماس بین قطب و خاک، تابع معکوسی است از مقدار ولتاژی که به قطب اعمال می‌شود. در واقع، در ولتاژهای پایین، درصد قابل توجهی از ولتاژ اعمال شده به قطب هدر

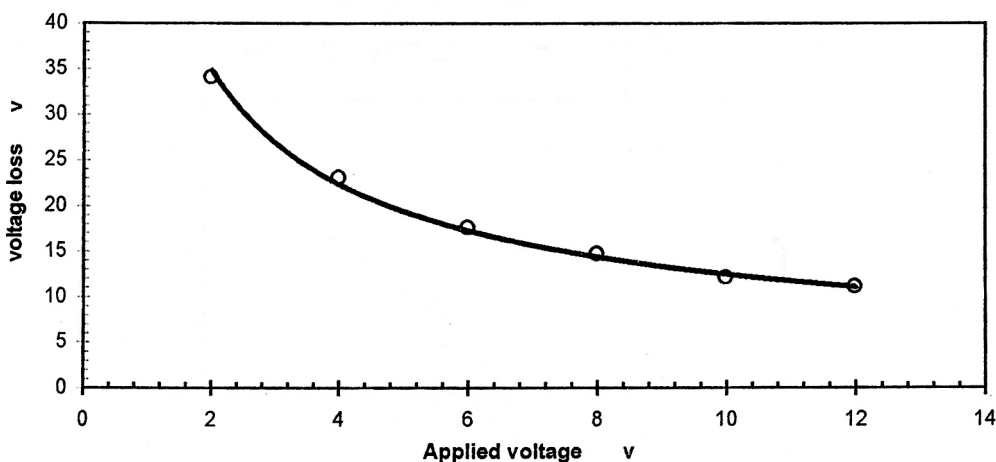
استغراق، شدت کاهش مقاومت الکتریکی کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، حساسیت مقاومت الکتریکی به درصد رطوبت، در درجات اشباع بالا کمتر از درجات اشباع پایین می‌باشد. این پدیده می‌تواند به دلیل کاهش غلظت یونی آب حفرهای باشد.

نتایج آزمایشات به صورت رابطه درجه اشباع-مقاومت الکتریکی در شکل ۶- نشان داده شده است. از آنجا که تراکم نمونه‌های مورد استفاده کاملاً یکسان نبوده‌اند، تبدیل درصد رطوبت به درجه اشباع موجب پراکندگی نسبی نتایج گردیده است. در عین حال، در هنگام استفاده از این تکنیک برای دنبال کردن تغییرات درجه اشباع یک نمونه در حین یک آزمایش، لازم است در ابتدا رابطه درجه اشباع- مقاومت الکتریکی را برای آن خاک و یا نمونه خاص برقرار نمود.

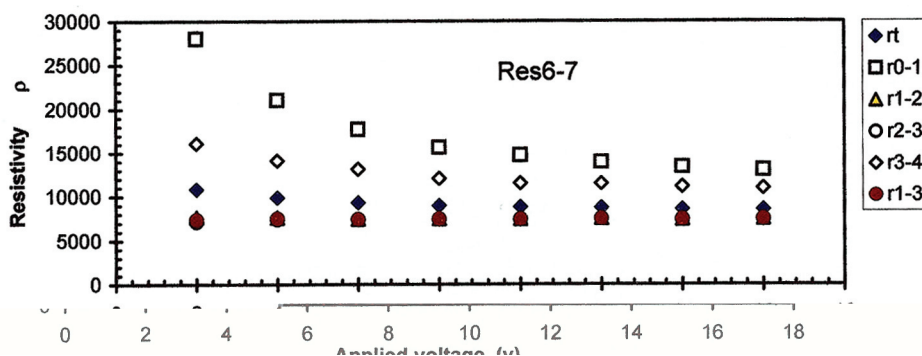
از طرف دیگر، همانطور که جدول (۲) نشان می‌دهد، نمونه‌های مستغرق به حالت اشباع کامل نبودند، و درجه اشباع آنها فاصله قابل توجهی با ۱۰۰٪ داشت. این نتایج با مشاهدات گزارش شده توسط Davoudi (۵) نیز تطابق دارد. به منظور بررسی کارایی تکنیک مقاومت سنجی در اندازه‌گیری

می‌گردند. همچنین، برای خاک مورد نظر، بهترین ولتاژ برای تعیین رابطه رطوبت-مقاومت، ۱۲۷ می‌باشد.

در سری دوم آزمایشات، ولتاژ ۱۲۷ به کلیه نمونه‌ها اعمال گردید و اختلاف پتانسیل بین الکترودهای شاخص، اندازه‌گیری و مقاومت الکتریکی آنها محاسبه شد. شکل ۴- نتایج را به صورت رابطه رطوبت- مقاومت الکتریکی برای خاک ماسه‌ای سیلتی مورد آزمایش نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت، مقاومت الکتریکی با افزایش رطوبت کاهش یافت. در محدوده آزمایشات به عمل آمده رابطه بدست آمده، از نوع خطی بوده و ضریب همبستگی آن $R^2 = 0.99$ می‌باشد. در سومین سری، به محض ورود آب به نمونه، مقاومت الکتریکی به شدت تا حدود $4000 \Omega\text{-cm}$ کاهش یافت. نتایج اندازه‌گیری‌ها و محاسبات در جدول ۲- ارائه شده است. کمترین مقاومت الکتریکی متناظر با $11/2$ درصد رطوبت در نمونه Res_{6-7} ، و بیشترین مقاومت در نمونه Res_{1-8} با $7/9$ درصد رطوبت مشاهده شد. نتایج به همراه نتایج سری قبل، در شکل ۵- ارائه شده است. همان طور که در شکل نشان داده شده، با افزایش رطوبت و نزدیک شدن خاک به حالت



شکل ۲- تأثیر ولتاژ اعمال شده در افت پتانسیل در ناحیه تماس قطب و خاک



شکل ۳- تأثیر ولتاژ اعمال شده در توزیع پتانسیل در داخل توده

جدول (۲) - نتایج سومین سری آزمایشات

شماره نمونه	بلافاصله پس از استغراق نمونه			سه روز پس از استغراق	دو روز پس از استغراق	یک روز پس از استغراق نمونه نمونه نمونه
	ρ (Ω -cm)	(%) S	(%) W			
Res1-8	۶۱۰۸	۶۷,۲	۷,۹	۶۲۷۰	۶۲۵۸	۶۲۴۷
Res2-7	۴۱۵۵	۷۵,۲	۱۰,۵	۴۲۱۹	۴۲۰۳	۴۱۸۹
Res3-6	۴۳۱۶	۷۵,۵	۹,۷	۴۳۷۵	۴۳۶۰	۴۳۴۲
Res4-5	۴۰۱۷	۷۶,۲	۱۱,۲	۴۰۷۱	۴۰۵۶	۴۰۳۱

جدول (۳) - مقایسه با نتایج محققین قبلی

نوع خاک	درصد رس (%)	تخلخل: (%) n	درصد رطوبت در حالت مستغرق: WS	رابطه بین رطوبت و مقاومت الکتریکی	ضریب همبستگی R _۲
LAcI	۳۲	۵۲	۴۱	$P=22237e^{-0.000833W}$	۰/۷۴۱۵
Sci	۳۲/۳	۴۵	۳۱	$P=33739e^{-0.000423W}$	۰/۹۱۸۸
Ck	۱۳/۴	۴۳	۲۸	$P=204822e^{-0.000523W}$	۰/۶۲۱۵
Till-LG۴	۲	۲۵	۱۳	$P=21377e^{-0.000543W}$	۰/۹۸۴۱

حاصل از این تحقیق در شکل ۷- ارائه شده است. منحنی خاکهای Ck و Till-LG۴ در مقایسه با دو خاک Sci و LAcI در رده بالاتری قرار دارند. به عبارت بهتر مقاومت الکتریکی این دو خاک، صرف نظر از رطوبتشان، در محدوده بالاتری قرار دارد. این امر قطعاً ناشی از درصد رس کم و در نتیجه غلظت کم کاتیونهای موجود در عصاره این دو خاک می باشد همچنین شیب منحنی خاکهای Sci و LAcI، که دارای حدود ۳۰٪ رس می باشند، به مراتب کمتر از خاک Ck و Till-LG۴ که درصد رس آنها صفر و یا ناچیز است، می باشد. به عبارت بهتر وجود رس در دو خاک اول باعث می شود که مقدار کاهش مقاومت الکتریکی آنها، به ازای افت رطوبت، کمتر باشد. برای مقایسه بهتر، تغییرات مقاومت الکتریکی نسبی (ρ/ρ_s)، که عبارت است از نسبت مقاومت الکتریکی به مقاومت الکتریکی در حالت مستغرق (ρ_s)، در مقابل تغییرات رطوبت در شکل (۸) رسم شده است.

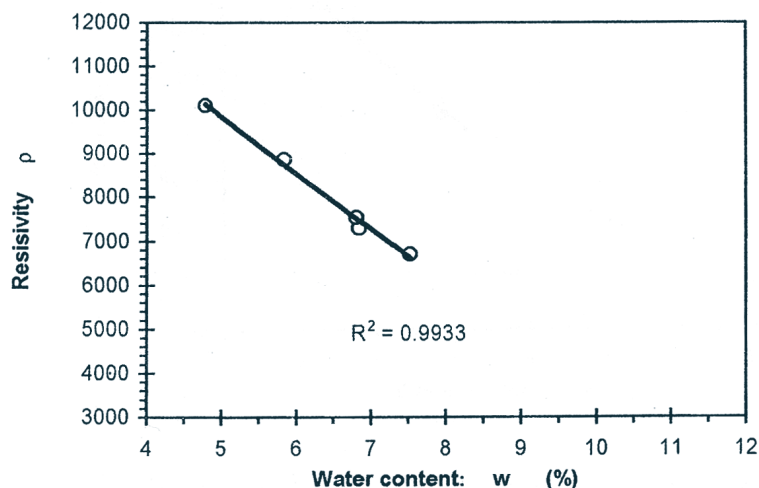
در این شکل شیب منحنی خاکهای مختلف به طور قابل ملاحظه‌ای، در مقایسه با شکل قبلی، به هم نزدیک شده‌اند. در عین حال منحنی خاک Till-LG۴ به طور فاحشی از سه منحنی دیگر جدا شده و ضمناً پراکندگی نقاط آن بسیار کمتر از پراکندگی سه منحنی دیگر می باشد. این اختلاف از دو عامل ناشی می شود. نخستین عامل تفاوت زیاد تخلخل مصالح است، همانطور که در جدول ۳- نشان داده شده است، تخلخل خاک Till-LG۴ ۲۵٪ است در حالیکه تخلخل سه خاک دیگر ۴۳٪ تا ۵۲٪ گزارش شده است. این اختلاف باعث تفاوت مشابهی در رطوبت آنها پس از استغراق

تغییرات درصد رطوبت در تست نفوذپذیری دراز مدت، جریان آبی با دبی ثابت $0.01 \text{ cm}^3/\text{sec}$ به مدت سه روز از نمونه‌ها عبور داده شد. نتایج مقاومت سنجی در حین جریان آب در جدول ۲- ارائه شده است. نتایج نشان میدهد که برخلاف انتظار، مقاومت الکتریکی هر چهار نمونه به تدریج افزایش یافته است. در حالیکه درصد رطوبت و درجه اشباع نمونه‌ها تغییر محسوسی نداشتند است. برای بررسی این پدیده، از آب ورودی و خروجی دستگاه چهار بار نمونه‌برداری به عمل آمده و هدایت الکتریکی (EC) آنها اندازه گیری شد. متوسط هدایت الکتریکی برای نمونه‌های ورودی و خروجی به ترتیب 0.23 ds/m و 0.28 بود. مقایسه نتایج اندازه‌گیریها نشان داد که عامل این رفتار، حل شدن تدریجی املاح خاک در آب و خروج آن از نمونه بوده است.

بحث

نتایج به دست آمده در این تحقیق همخوانی بسیار خوبی با نتایج محققین پیشین دارد. خصوصیات خاک‌های مورد استفاده توسط Michot و همکاران و خاک استفاده شده در این تحقیق در جدول (۳) ارائه شده است.

نتایج آزمایش‌های صحرائی Michot و همکاران که به صورت رابطه بین در صد حجمی رطوبت و مقاومت الکتریکی ($\rho-\theta$) بوده، به صورت رابطه درصد وزنی رطوبت و مقاومت الکتریکی ($\rho-w$) تهیه و جهت مقایسه با نتایج

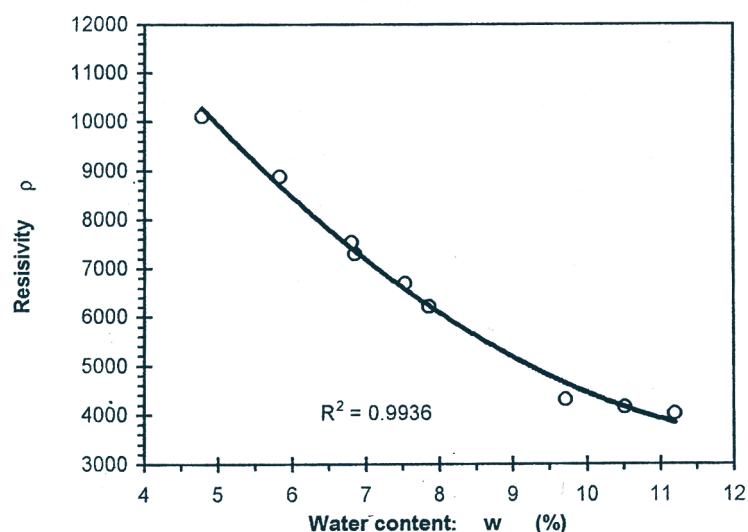


شکل ۴- رابطه درصد رطوبت- مقاومت الکتریکی برای نمونه‌ها قبل از آبیگری

است. ضمناً در رابطه اخیر درجه اشباع (S) برحسب درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

تکنیک مقاومت سنجی الکتریکی، به عنوان یک آزمایش غیر مخرب، جهت تعیین تغییرات درجه اشباع و درصد رطوبت نمونه‌های خاکی که تحت آزمایشات دیگری از قبیل آزمایشات سه محوری، الکترواسمز، نفوذپذیری و ... قرار دارند قابل توصیه می‌باشد. برای استفاده از این تکنیک در نمونه‌های تحت آزمایش نفوذپذیری دراز مدت، از آنجایی که غلظت نمک عصاره خاک در اثر جریان آب کم می‌شود، لازم است که کیفیت آب ورودی با غلظت اولیه اصلاح خاک به



شکل ۵- رابطه عمومی درصد رطوبت- مقاومت الکتریکی برای خاک ماسه‌ای سیلنتی (Till-LG۴)

می‌شود که در حادثترین حالت به بیش از سه برابر می‌رسد. دومین عامل، تفاوت در روش انجام آزمایشها است. آزمایشات Michot و همکاران در صحرا انجام شده که طی آن، قطب‌های میله‌ای شکل به صورت موازی به داخل خاک محصور نشده وارد شده‌اند، همچنین خاک دست نخورده بوده و لذا احتمال وجود غیر یکنواختی نیز وجود دارد. در صورتی که در تحقیق حاضر، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده، آزمایشات از نوع آزمایشگاهی بوده و بر روی خاک محصور شده یکنواخت انجام شده و طی آن قطبهای دیسک شکل در دو انتهای یک استوانه عایق احاطه کننده خاک نصب شده‌اند. این وضعیت باعث می‌شود که میدان و خطوط الکتریکی ایجاد شده در مقایسه با آزمایشهای Michot و همکاران منظم‌تر بوده و نتایج و محاسبات حاصل دقیقتر باشد. ضرایب همبستگی جدول ۳- نیز نشان می‌دهد که آزمایشات آزمایشگاهی، در مقایسه با آزمایشات صحرائی، نتایج بهتر و قابل اعتمادتری ارائه می‌دهند و لذا کاربرد بهتری خواهند داشت. به نحوی که ضریب همبستگی نتایج تحقیق حاضر ۰/۹۸ و نتایج صحرائی محققین قبلی بین ۰/۶۲ تا ۰/۹۱ متغیر است.

رابطه لگاریتمی بین مقاومت الکتریکی نسبی و درجه اشباع خاک مورد آزمایش که در شکل ۹- ارائه شده به شرح زیر می‌باشد.

$$\frac{\rho}{\rho_s} = 8.8206 - 1.7636 \ln(S) \quad (5)$$

این رابطه از ضریب همبستگی نسبتاً بالایی برخوردار است و برای اندازه‌گیری تغییرات درجه اشباع نمونه‌های خاک تحت آزمایشات مختلف مکانیک خاک قابل استفاده می‌باشد. روابط مشابه رابطه فوق برای خاک‌های رسی می‌تواند در زمان اجرای طرح‌های اجرایی و آزمایشگاهی تحکیم الکترواسمزی خاک نیز کاربرد مؤثری داشته باشد. در عین حال، به منظور مقایسه با رابطه (۲)، فرم نمایی آن با ضریب همبستگی ۰/۸۱۱۲ به شرح زیر می‌باشد:

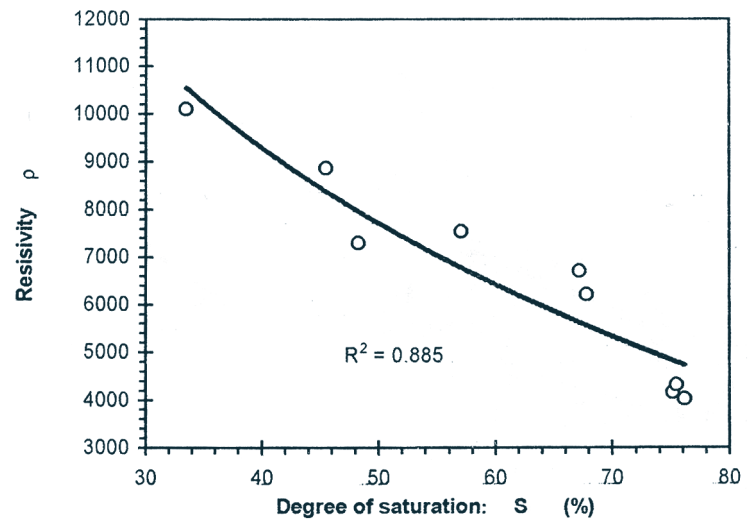
$$\frac{\rho}{\rho_s} = 121.6S^{-1.0698} \quad (6)$$

در یک مقایسه کلی بین رابطه ۲ و ۶ می‌توان گفت که در رابطه اخیر $n = -1/0.698$ و تقریباً نصف مقدار توصیه شده برای رابطه ۲- است. به عبارت بهتر شیب تغییرات منحنی Till-LG۴ بسیار کمتر از منحنی ماسه سنگها و سنگهای آذرین است. این تفاوت به دلیل آن است که معمولاً الکترولیت خلل و فرج این سنگها ضعیف‌تر از خاکها

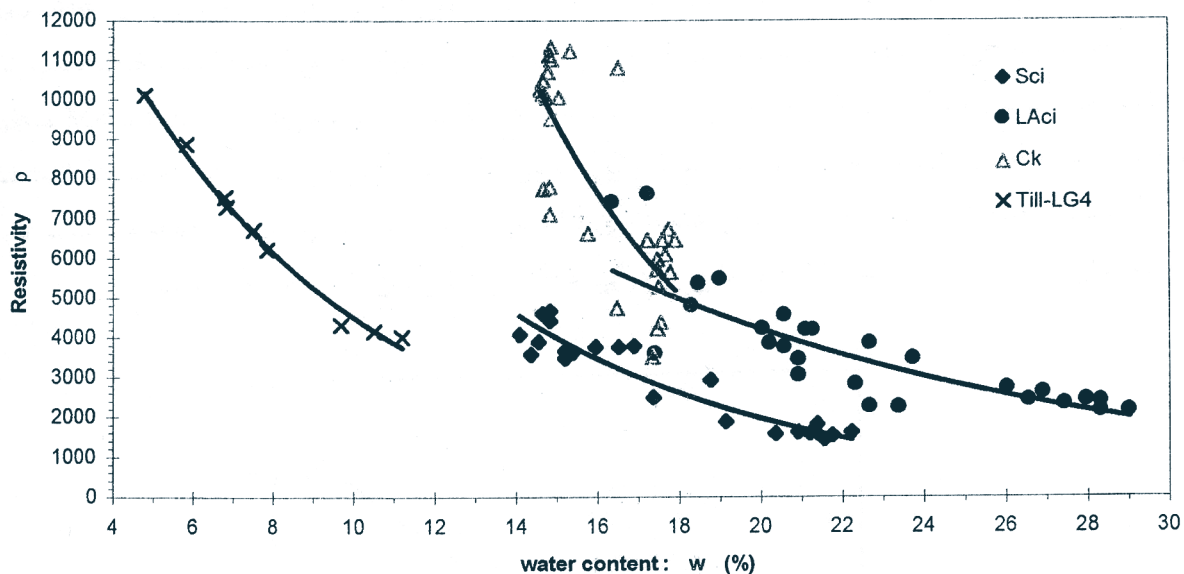
نحوی همسان گردد. همچنین، برای استفاده از این تکنیک لازم است که در ابتدا رابطه‌ی درجه اشباع-مقاومت الکتریکی و یا درصد رطوبت-مقاومت الکتریکی برای خاک مورد نظر کالیبره گردد.

منابع مورد استفاده

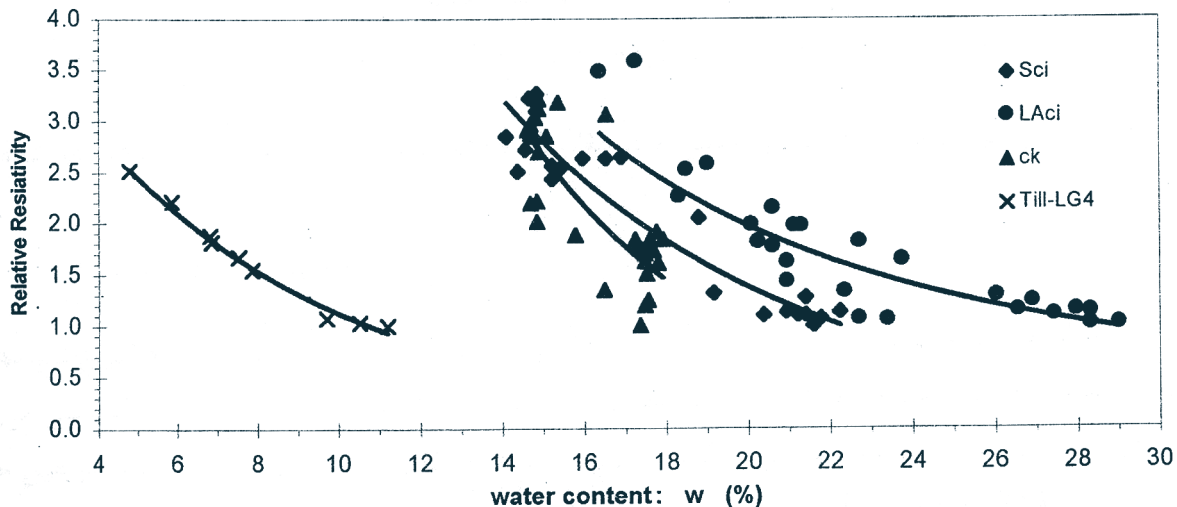
- 1-Aaltonen J., 1997., Seasonal changes of DC resistivity measurements, Paper presented at 3rd EEGS- ES conference, Environ. and Eng. Geophys. Soc., Aarhus, Denmark
- 2-Archie G. H., 1942., The electrical resistivity log as an aid In determining some reservoir characteristics, Trans. Am. inst. Min. eng., 146:54-62
- 3-Benderitter Y., and J. J. Schott, 1999., Short time variation of the resistivity in an unsaturated soil: The relationship with rainfall, Eur. J. Environ. Eng. Geophys., 4, 37-49
- 4-Bjerrum L and Hunder J. 1957., Measurement of The Permeability of Compacted Clays , Proc. Of 4th Inter. Conf. of SMFE, London, pp. 6-8.
- 5-Davoudi M.H. 1999., Evolution of permeability In earth dam cores made of compacted till, University of Sherbrooke, Ph.D. Thesis, pp.289.



شکل ۶- رابطه عمومی درجه اشباع - مقاومت الکتریکی برای خاک ماسه‌ای سیلتی (Till-LG4)



شکل ۷- رابطه رطوبت و مقاومت الکتریکی برای چند نوع خاک و سنگ آهک



شکل ۸- مقایسه تغییرات مقاومت الکتریکی نسبی در مقابل تغییرات رطوبت برای چند نوع خاک و سنگ آهک

14-Singh A.& Chowdhary G.R.1992.,Soil engineering in theory and practice, CBS, pp.777.

15-White P. A.,1994.,Electrode arrays for measuring groundwater flow direction and velocity, Geophysics, 59, 192-201.

6-Griffiths D. H., and R. D. Barker,1993.,Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology, J. Appl. Geophys., 29, 211-226

7-Hymer D.C., M.S. moran, and T.O. Keefer,2000.,Soil water evaluation using a hydrologic model and calibrated sensor network, Soil Sci. Soc. Am. J. 64:319-326

8-Keller G. V. and Frischknecht F.C., 1977.,Electrical methods in geophysical prospecting, pergamon press, 520 p.

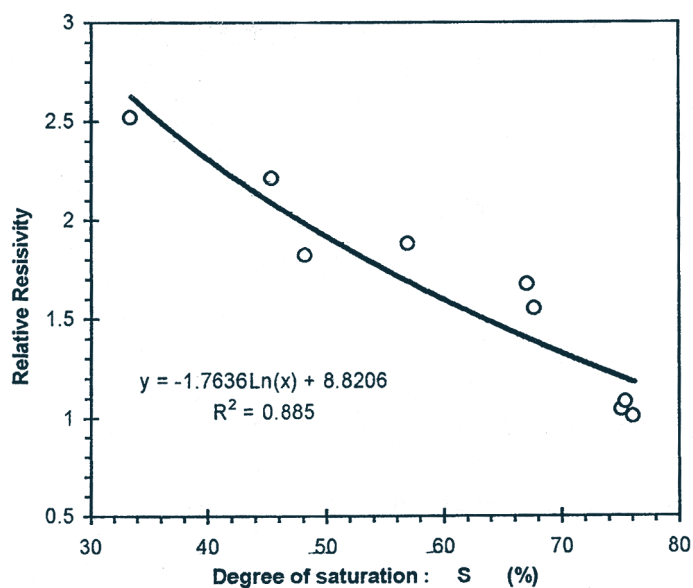
9-Lefebvre G. & Davoudi M.H.1996.,Infiltration aux site d'Ouvrages en remblai, tome 2,Technical report to HydroQuebec.

10-Lefebvre G. & Davoudi M.H.1998.,Étude de la dissipation des potentiels hydrauliques à travers les noyaux de till compacté, Technical report to HydroQuebec.

11-Michot, D. Y. Benderitter, A. Dorigny, B. Nicoulaud, D.King, and A. Tabbagh,2003.,Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography, Water Resour. Res., 39(5), 1138, PP.14,1-14,20

12-Parta H. P. and Nath S. K.1999.,Schlumberger geoelectric sounding in ground water, A.A. Balkema, pp. 153.

13-Sherard J.L. 1981.,Piezometers in earth dam impervious sections, Proc. of Recent Development In Geotechnical Engineering For Hydro Projects, ASCE, pp 125-165.



شکل ۹- تغییرات مقاومت الکتریکی نسبی با درجه اشباع برای خاک ماسه‌ای سیلتی (Till-LG۴)