

## بررسی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی خاک‌ها در حین آزمایش تحکیم

یاسمن بدرزاده<sup>۱</sup>، احمد قربانی<sup>۲</sup>، عبدالحمید انصاری<sup>۳\*</sup> و محمد فاتحی مرجی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

<sup>۲</sup> استادیار ژئوفیزیک اکتشافی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار ژئوفیزیک اکتشافی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

<sup>۴</sup> استادیار مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۴/۷، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۱)

### چکیده

ساختار خاک مشخص کننده خواص فیزیکی آن، به ویژه خواص مکانیکی و هیدرودینامیکی، است. روش‌های کلاسیک تعیین خواص ساختاری خاک معمولاً نقطه‌ای هستند و کمتر برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی ساختار خاک سازگار شده‌اند. تحقیق حاضر روی استفاده از روش غیر تخریبی مقاومت ویژه الکتریکی برای تعیین خواص ساختاری خاک‌ها صورت گرفته است. نشست ناشی از تحکیم لایه‌های رُسی، به علت ماهیت تدریجی و طولانی آن، می‌تواند خطر بزرگی برای سازه‌های بنا شده روی این خاک‌ها محسوب شود. علت این نشست تغییر شکل فشاری و جابه‌جایی ذرات خاک، رانده شدن هوا و آب از حفره‌های خاک و عوامل دیگر است. از طرفی جابه‌جایی ذرات خاک و آب‌وهوا می‌تواند روی مقاومت ویژه الکتریکی خاک نیز تاثیر گذار باشد. در این تحقیق چهار نمونه خاک دست خورده در درون دستگاه ائودومتر استاندارد آزمایش تحکیم، سازگار شد و مورد اندازه گیری هم‌زمان مقاومت ویژه الکتریکی قرار گرفت. در حین ثبت نشست خاک، تغییرات مقاومت ویژه نیز ثبت شد. همه آزمایش‌های تحکیم و مقاومت ویژه الکتریکی، در حالت اشباع کامل خاک صورت پذیرفته است.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقاومت ویژه الکتریکی به حالت فیزیکی خاک وابسته است (ثبت مقادیر مقاومت ویژه کم به دلیل وجود نمک در خاک و تغییرات ۵۰ درصدی مقاومت ویژه الکتریکی در طول آزمایش‌ها است). به‌طور کلی در طول زمان تحکیم، مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می‌یابد. منحنی‌های لگاریتمی کامل تخلخل - مقاومت ویژه الکتریکی وجود دو خط با شیب‌های متفاوت را نشان می‌دهد. شیب خط مربوط به مرحله ابتدای فرایند تحکیم، کمتر است. به‌طور کلی شباهت رفتاری مقاومت ویژه و تحکیم خاک، توانایی روش مقاومت ویژه الکتریکی برای بررسی‌های طولانی مدت و بر جای تحکیم خاک را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ساختار خاک، تحکیم، نشست، مقاومت ویژه الکتریکی، ائودومتر

## Study of the electrical resistivity changes in soils during consolidation testing

Yasaman Badrzadeh<sup>1</sup>, Ahmad Ghorbani<sup>1</sup>, Abdolhamid Ansari<sup>1\*</sup> and Mohammad Fatehi Maraji<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mining and Metallurgy Engineering Department, Yazd University, Iran

(Received: 13 April 2010, accepted: 28 June 2011, available online: 20 February 2012)

\*Corresponding author:

h.ansari@yazduni.ac.ir

\*نگارنده رابط:

## Summary

Determination of the quality and amount of soil settlement due to compression of the underground soil strata are the most important stages in the establishment of stable structures. Soil compressive settlement is induced gradually as a function of time and can be considered as a source of substantial hazards. When a saturated soil stratum is affected by augmented stress, pore water pressure increases significantly. In sandy soil with high permeability, drainage due to pore water pressure is completed rapidly. Pore water drainage occurs as a consequence of a reduction in the soil volume, resulting a settlement termed consolidation settlement. Additionally, in sandy soil, because of rapid drainage of the pore water, instantaneous and consolidation settlements occur simultaneously.

In contrast, when a saturated clayey soil is affected by augmented stress, instantaneous settlement occurs in a preliminary process. Due to the low permeability coefficient of clayey soils with respect to sandy ones, the water drainage in clayey soil progresses gradually and over a relatively longer time period in which consolidation settlement follows instantaneous settlement. In order to investigate consolidation settlement and its degree and speed, knowledge of the existence of the clayey strata, their thicknesses, porosity and compressive indices are necessary. Such information is usually obtained from drilled boreholes and samples taken from them. In this regard, borehole drilling is time and cost-consuming, and the very processes involved in the preparation of the samples restricts the efficiency of such geotechnical methods.

Soil structure is determined mainly by its physical properties (especially hydrodynamic and mechanical properties). Conventional methods for determining soil structures are usually spatial and they rarely incorporate changes in location and time. This study uses the non-destructive method of the electrical resistivity measurement to examine the soil structure.

The main reasons for this settlement are compressive displacements, dislocations of the soil particles, and the gradual expulsion of air and water through the voids of the soil. On the other hand, the displacements of the soil particles and the expulsions of air and water affect the electrical resistivity of the soils. In this research, four soil samples (in disturbed and homogenized form) are tested in a standard ASTM Odometer which was specially designed and improved for simultaneous measurement of the soil electrical resistivity during the consolidation test. During the recording of soil settlement, the simultaneous changes in the electrical resistivity of the soil were also recorded. All tests were conducted on saturated soils. The measured results show that electrical resistivity is related to the physical state of the soil.

Low electrical resistivity of soil samples is due to salt traces in the soil which may cause variations of up to 50 percent in the value of the resistivity during the consolidation test. Generally, during the consolidation period the electrical resistivity increases. The full logarithmic curves of porosity-resistivity show two distinct lines with different slopes in which the slope of the line related to the beginning of the consolidation process is lower. The similarity between the consolidation behavior and electrical resistivity of soil shows the potential of the electrical resistivity method for the possible study of the *in situ* and long-term consolidation of soils.

**Key words:** Consolidation, resistivity method, soil structure, odometer

سازه‌های عمرانی، تعیین مقدار و چگونگی نشست پی سازه

در اثر فشردگی لایه‌های گوناگون خاک است (اوسلون،

۱ مقدمه

یکی از مسائل مهم و اجتناب‌ناپذیر در طراحی و احداث

کسب این اطلاعات گمانه‌هایی در منطقه مورد بررسی حفر و نمونه‌هایی از گمانه‌های حفر شده، اخذ می‌شود. پُرهزینه و وقت‌گیر بودن حفر گمانه و دست‌خوردگی نمونه‌ها در حین تهیه و انتقال به آزمایشگاه و از طرف دیگر پیشرفت‌های حاصل شده در روش‌های ژئوفیزیکی، باعث شده است تا روش‌های برجای ژئوفیزیکی در تحقیقات مرتبط با تحکیم، بیشتر مورد توجه قرار گیرد (احمد و همکاران، ۲۰۰۹؛ آندرسون و همکاران، ۲۰۰۸).

تاکنون تحقیقات توام مکانیک خاک و ژئوفیزیک بیشتر روی خاک‌های رُسی و محتوی الکترولیت با املاح کم صورت پذیرفته است (برای مثال: فام و سانتامارینا، ۱۹۹۷؛ مک کارتر، ۱۹۸۴؛ ابوبکر، ۲۰۰۴). در این شرایط رابطه آرچی قابل قبول نیست. از آنجاکه میزان نشست تحکیم و سرعت آن با میزان تغییرات تخلخل خاک و سرعت این تغییرات ارتباط بسیار نزدیکی دارد، روش‌های ژئوفیزیکی را که نسبت به تغییرات تخلخل خاک و یا پارامترهای مرتبط با آن حساس باشند، می‌توان برای بررسی و تحقیق بر جای نشست تحکیم به کار برد. فام و سانتامارینا، (۱۹۹۷) روشن ساختند که رفتار امواج کشسان در مقابل فشار برای نمونه خاک‌های گوناگون تقریباً با رفتار نشست نمونه خاک در مقابل فشار مشابهت دارد. به این دلیل که در اثر اعمال تنش، تخلخل و درجه اشباع آب تغییر می‌کند. این تغییرات باعث تغییر مدول بالک خاک می‌شود. تغییر مدول بالک نیز روی سرعت امواج در خاک تاثیر می‌گذارد.

با توجه به روابط آرچی و خود پدیده نشست انتظار می‌رود که نشست تحکیم خاک که با خارج شدن تدریجی آب منفذی و تغییرات تخلخل همراه است باعث تغییراتی در مقاومت ویژه خاک نیز گردد. از این‌رو در این تحقیق سعی شده است تا تغییرات مقاومت ویژه نمونه خاک‌های گوناگون که از عمق‌های متفاوت یک چاه برداشت شده است، در حین آزمایش نشست تحکیم ثبت

(۱۹۹۸). نشست ناشی از فشردگی خاک که به مرور زمان ایجاد می‌شود، می‌تواند باعث خسارت‌های قابل‌توجهی شود. فشردگی در اثر عوامل و به شکل‌های متفاوت نظیر تغییر آرایش دانه‌های جامد خاک، خارج شدن هوا و آب موجود در منافذ خاک و از این قبیل به وجود می‌آید (سریدهاران و گوتورگ، ۲۰۰۵؛ ساموئلیان و همکاران، ۲۰۰۵). در یک خاک به‌خصوص یک و یا تعدادی از عوامل فوق ممکن است مشارکت داشته باشند. وقتی یک لایه خاک اشباع تحت تاثیر افزایش تنش قرار گیرد، فشار آب منفذی به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. در خاک‌های ماسه‌ای که نفوذپذیری زیادی دارند، زهکشی ناشی از افزایش فشار آب منفذی سریع صورت می‌گیرد. زهکشی آب منفذی همراه با کاهش حجم توده خاک و نتیجه آن ایجاد نشست است. این نوع نشست که ناشی از رانده شدن آب منفذی است، نشست تحکیم نام دارد. به‌علت زهکشی سریع آب منفذی در خاک‌های ماسه‌ای، نشست تحکیم و نشست آبی در آنها به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهد (توتیا و همکاران، ۲۰۰۷).

وقتی یک لایه خاک رُسی اشباع، تحت‌تاثیر افزایش تنش قرار گیرد، ابتدا نشست آبی رخ می‌دهد. اما از آنجاکه ضریب نفوذپذیری رُسی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کوچک‌تر از ضریب نفوذپذیری ماسه است، زهکشی آب منفذی به صورت نمی‌گیرد و زایل شدن اضافه فشار آب منفذی ناشی از بارگذاری، به تدریج و در زمانی طولانی رخ می‌دهد. بنابراین کاهش حجم خاک، یا به‌عبارتی تحکیم، به مدت طولانی و بعد از بارگذاری و نشست آبی، ادامه خواهد داشت. در خاک‌های رُسی نرم، نشست تحکیم چندین برابر نشست آبی است (وی و همکاران، ۲۰۰۸).

برای بررسی نشست تحکیم و محاسبه میزان و سرعت آن، نیاز است تا از وجود لایه رُسی، ضخامت آن، تخلخل، اندیس فشردگی و نظیر آن اطلاع داشت. برای

آزمایش‌های دانه‌بندی با الک و هیدرومتری (شکل ۱)، تعیین وزن مخصوص خشک و حدود ات‌برگ صورت گرفت.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی رفتار مقاومت ویژه نمونه خاک در حین تحکیم یک‌بعدی (با ائودومتر) است. البته از آنجاکه در این تحقیق قصد بر این بود که تغییرات مقاومت ویژه نمونه در حین تحکیم نیز اندازه‌گیری شود، یک سلول دقیقاً مطابق ابعاد سلول تحکیم ASTM ولی از جنس عایق الکتریکی تهیه شد. دو صفحه متخلخل فلزی در حکم الکترودهای جریان و پتانسیل انتخاب شدند (شکل ۲). آزمایش تحکیم استاندارد در طول زمان ۵ روز با ۵ بارگذاری متفاوت (فشارهای اعمالی ۲۴،۴۳، ۴۸،۸۶، ۹۷،۷۰، ۱۹۵،۴۰ و ۳۹۰،۸۰ کیلو پاسکال) صورت گرفت.

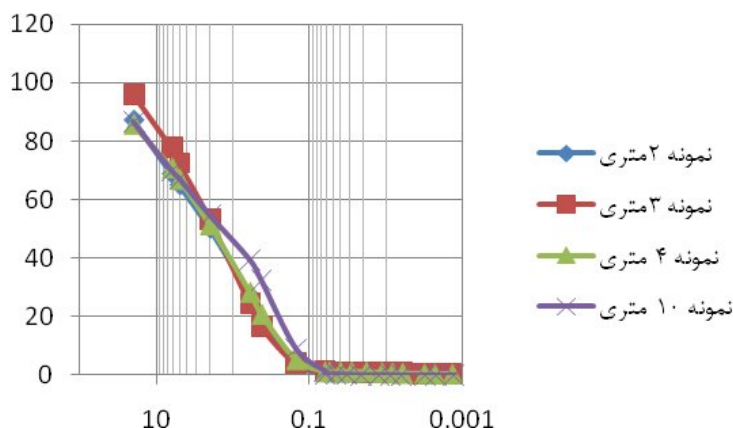
شود. سپس با رسم نمودارهای حاصل از تغییرات مقاومت ویژه و نشست تحکیم به بررسی شباهت‌های رفتاری بین آنها پرداخته شده است.

## ۲ نمونه‌های خاک و روش آزمایش

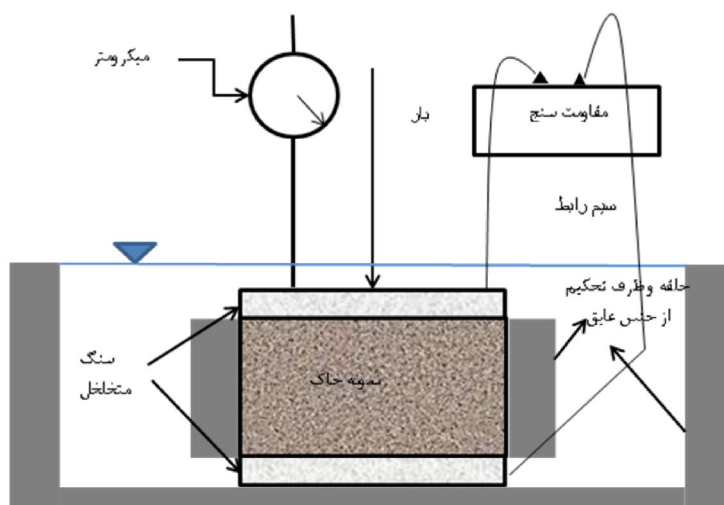
از اعماق ۲، ۳، ۴ و ۱۰ متری چاهی به عمق ۱۰ متر حفر شده در سایت ژئوفیزیک دانشگاه یزد چهار نمونه متفاوت دست‌خورده و همگن تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه نیز بررسی‌های مقاومت ویژه و تحکیم به‌طور هم‌زمان صورت گرفت. این چاه در آبرفت‌های عموماً مملو از نمک‌های گوناگون از جمله انیدرید، حفر شده است (جدول ۱). مقادیر بسیار کم مقاومت ویژه اشباع شده با آب شرب (حدود ۱ اهم متر) گواه این مسئله است. به‌منظور شناسایی مشخصات فیزیکی نمونه‌ها،

جدول ۱. نتایج آزمایش (XRD) درصد نمک‌های موجود در نمونه‌های مورد آزمایش.

نمونه	عمق - متر	کلسیت و دولومیت	کوارتز	دیگر سیلیکات‌ها	ژپس (CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O)	هالیت (NaCl)
۱	۲	26%	29%	41%	02%	02%
۲	۴	29%	33%	25%	11%	02%
۳	۱۰	26%	35%	37%	01%	01%



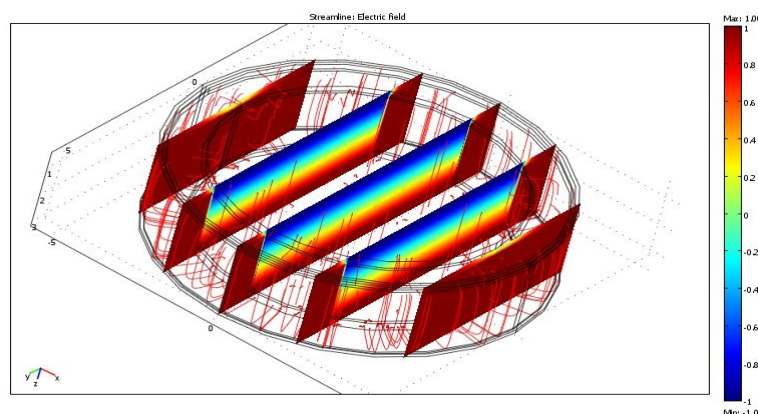
شکل ۱. منحنی دانه‌بندی هیدرومتری برای سه نمونه به‌دست آمده از عمق‌های ۲، ۳، ۴ و ۱۰ متری چاه حفر شده در پایگاه ژئوفیزیک دانشگاه یزد.



شکل ۲. سلول تثکیم استاندارد ASTM و سلول سازگار شده برای آزمایش تثکیم-مقاومت ویژه الکتریکی.

در شکل ۴ منحنی تغییرات مقاومت ویژه-زمان نمونه آب شرب در سلول تثکیم در بسامدهای ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ آورده شده است. با توجه به منحنی‌ها، مشاهده می‌شود که مقاومت ویژه آب شرب با گذشت زمان در بسامدهای متفاوت، کاهش می‌یابد. عوامل گوناگونی می‌توانند روی این کاهش دخیل باشند. ارتباط عناصر و ذرات موجود در جو با آب را می‌توان یکی از علل این کاهش دانست. حل شدن نمک‌های احتمالی موجود در سنگ متخلخل سلول تثکیم نیز می‌تواند روی کاهش مقاومت ویژه اثر بگذارد.

به منظور تعیین فاکتور ژئومتری نمونه گیر ( $k = \rho/R$ )، سه نمونه متفاوت آب انتخاب و رسانایی آنها با کندکتیویمتر اندازه‌گیری شد، سپس این نمونه‌های آب در نمونه گیر قرار داده و مقاومت الکتریکی شان اندازه‌گیری شد. در نهایت فاکتور ژئومتری نمونه گیر از متوسط‌گیری این سه مقدار به دست آمد ( $k = 0.25m$ ). همچنین فاکتور ژئومتری به دست آمده با نرم‌افزار COMSOL (شکل ۳) همین مقدار را نشان می‌دهد (این نرم‌افزار از روش المان‌های محدود برای مدل‌سازی یک تا سه بُعدی مقاومت ویژه الکتریکی استفاده می‌کند).



شکل ۳. مدل تهیه شده با نرم‌افزار COMSOL برای محاسبه فاکتور ژئومتری.

بدین ترتیب با افزایش تنش روی ذرات خاک، این ذرات دچار تغییر مکان و تغییر شکل و باعث نشست می‌شوند. این تغییر شکل و نشست را می‌توان به صورت تغییر تخلخل نشان داد. با افزایش فشار بارگذاری، تخلخل نیز کاهش می‌یابد. تغییرات تخلخل با افزایش بار برای هر ۴ نمونه را می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد.

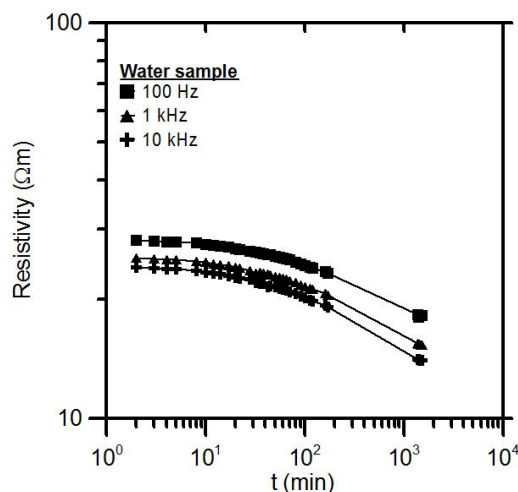
شکل ۶ نتایج آزمایش توام تحکیم و مقاومت ویژه الکتریکی (منحنی‌های نشست-زمان و مقاومت ویژه الکتریکی-زمان) را روی چهار نمونه خاک به دست آمده از عمق‌های ۲، ۴، ۳ و ۱۰ متری، مربوط به بارگذاری‌های متفاوت (فشارهای ۲۴، ۴۳، ۴۸، ۸۵، ۹۷، ۷۰، ۹۵، ۴ و ۱۹۵، ۸۰ کیلو پاسکال) نشان می‌دهد. همان‌طور که در منحنی‌ها دیده می‌شود، به‌طور کلی تشابه زیادی بین نتایج نشست-زمان و مقاومت ویژه-زمان دیده می‌شود.

نمونه‌ها در طول زمان آزمایش تحت اشباع کامل بوده‌اند. دلیل افزایش مقاومت ویژه در طول آزمایش تحکیم، کاهش تخلخل است (آرچی، ۱۹۴۲). زهکشی آب از منافذ روی منحنی‌های مقاومت ویژه-زمان به خوبی منحنی تحکیم قابل مشاهده است.

البته قابل ذکر است که قبل از آزمایش سنگ متخلخل، سلول تحکیم به مدت ۲۰ دقیقه در آب جوش جوشانیده شد تا حتی‌الامکان منافذ سنگ متخلخل از وجود نمک‌ها و املاح احتمالی موجود در آن خالی شود. واکنش بین فلز و آب را نیز می‌توان از علل تاثیرگذار دیگر روی مقاومت ویژه آب در نظر گرفت. در شکل ۴ همچنین اثر قطبیدگی الکتروودی را می‌توان به شکل محدودی در رنج بسامدها مشاهده کرد. با توجه به این موضوع می‌توان از اثر قطبیدگی الکتروودی صرف نظر کرد.

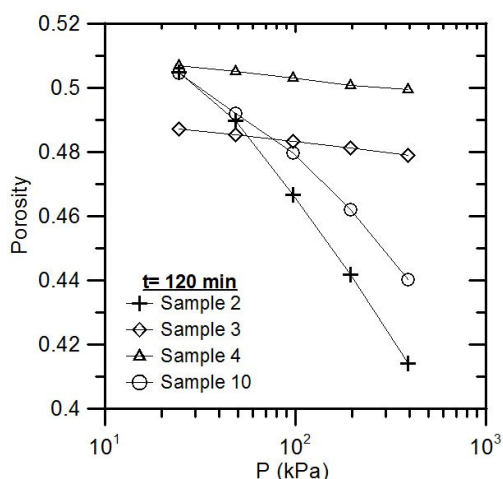
### ۳ نتایج آزمایش و بحث

اگر لایه رُس اشباعی تحت افزایش آنی تنش کل قرار گیرد، این افزایش تنش کل به آب حفره‌ای و ذرات خاک انتقال خواهد یافت. یعنی تنش کل به نسبتی بین تنش موثر و فشار آب حفره‌ای تقسیم می‌شود. در ابتدای اعمال تنش، همه تنش با آب منفذی تحمل می‌شود. با افزایش فشار منفذی به تدریج آب منفذی به بیرون از لایه زهکشی می‌شود. با خارج شدن تدریجی آب منفذی، ذرات خاک سهم بیشتری از تنش را تحمل خواهند کرد.



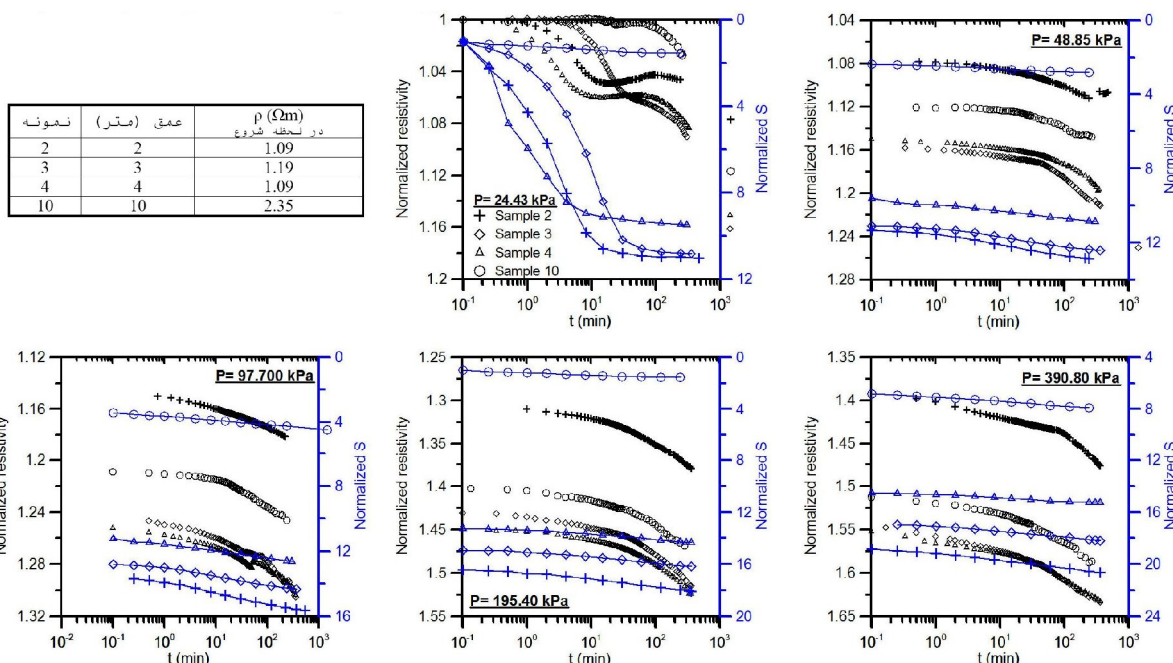
شکل ۴. منحنی‌های مقاومت ویژه-زمان اندازه‌گیری شده روی نمونه آب شرب در سلول تحکیم. مقادیر مقاومت ویژه در بسامدهای ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ هرتز به دست آمده‌اند.

صورت می‌پذیرد و پس از آن تغییر سریع تر فشار آب منفذی به وجود می‌آید تا در انتها به مقدار ثابت برسد (شکل ۷). این نتایج را می‌توان روی منحنی نشست-زمان مشاهده کرد.

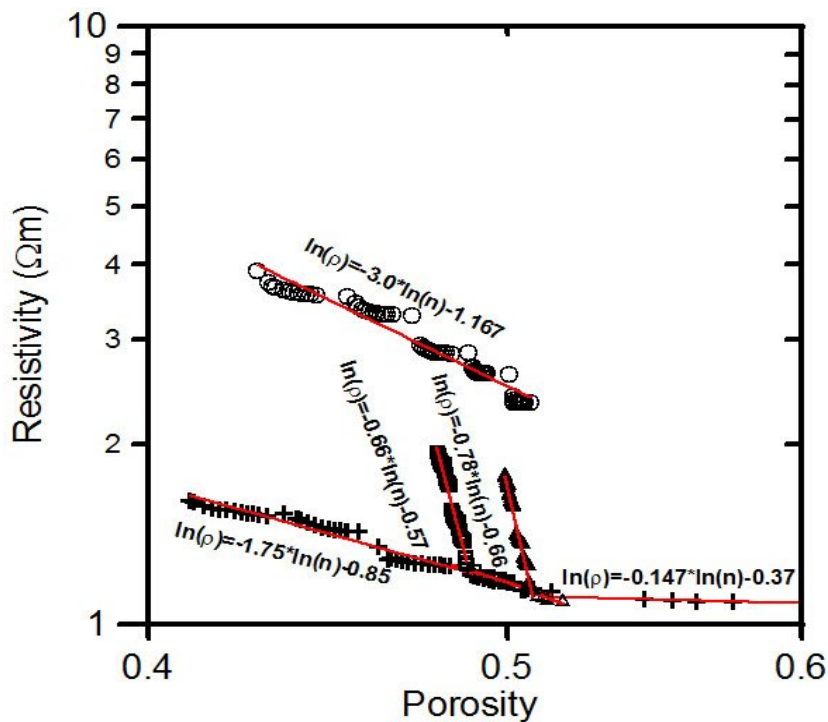


شکل ۵. منحنی تغییرات تخلخل در مقابل لگاریتم فشار تجمعی.

مشابه منحنی‌های تحکیم نشست-زمان، با افزایش بارگذاری، تغییرات مقاومت ویژه نیز کاهش می‌یابد. این بدین معنی است که تغییرات تخلخل کاهش یافته است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که رابطه آرچی (۱۹۴۲) به خوبی برای این نوع خاک صادق است (شکل ۷). لذا فاکتور سیمان‌شدگی (شیب خط لگاریتم مقاومت ویژه-لگاریتم تخلخل) خاک به راحتی قابل محاسبه است. به نظر می‌رسد که املاح زیاد خاک باعث شده است تا رسانایی سطحی ناشی از ذرات بسیار ریز مانند رُس‌های آن (شکل ۱) مخفی بماند (وینگار و واکسمن، ۱۹۸۴). منحنی‌های تمام لگاریتمی تخلخل-مقاومت ویژه الکتریکی وجود دو خط با شیب‌های متفاوت را نشان می‌دهد. شیب خط مربوط به مرحله ابتدای فرایند تحکیم، کمتر است. این بدین معنی است که تغییرات تخلخل در ابتدای هر مرحله بارگذاری بسیار کم است. به عبارت دیگر تغییر فشار آب منفذی (یا زهکشی آب) در ابتدا به کندی



شکل ۶. منحنی‌های نشست-زمان (آبی‌رنگ) و مقاومت ویژه الکتریکی-زمان (سیاه‌رنگ) روی چهار نمونه خاک به دست آمده از عمق‌های ۲، ۳، ۴ و ۱۰ متری مربوط به بارگذاری‌های متفاوت (فشارهای ۲۴،۴۳، ۴۸،۸۵، ۹۷،۷، ۱۹۵،۴ و ۳۹۰،۸۰ کیلو پاسکال).



شکل ۷. منحنی تمام‌لگاریتمی تخلخل - مقاومت ویژه الکتریکی برای سه نمونه خاک به‌دست آمده از عمق‌های ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ متری مربوط به بارگذاری‌های متفاوت (فشارهای ۲۴،۴۳ تا ۳۹۰،۸۰ کیلو پاسکال). خطوط توپُر انطباق خطوط مستقیم با منحنی‌ها را نشان می‌دهد.

#### ۴ نتیجه‌گیری

هم‌زمان مقاومت ویژه الکتریکی صورت گرفت و در حین ثبت نشست خاک، تغییرات مقاومت ویژه نیز ثبت شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها از رابطه آرچی تبعیت می‌کند. به‌طور کلی در طول زمان تحکیم، مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می‌یابد. منحنی‌های تمام‌لگاریتمی تخلخل - مقاومت ویژه الکتریکی، وجود دو خط با شیب‌های متفاوت را نشان می‌دهد. شیب خط مربوط به مرحله ابتدای فرایند تحکیم، کمتر است. به‌طور کلی شباهت رفتاری مقاومت ویژه و تحکیم خاک، قابلیت روش مقاومت ویژه الکتریکی برای بررسی‌های طولانی مدت و برجای تحکیم خاک را نشان می‌دهد. این تحقیق روشن ساخت که بررسی‌های کمی‌تر روی منحنی‌های تحکیم، قابل اجرا است و لذا ادامه این تحقیق در این ارتباط پیشنهاد می‌شود.

روش‌های متداول تعیین خواص ساختاری خاک کمتر برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی ساختار خاک سازگار شده‌اند. این پژوهش روی استفاده از روش غیر تخریبی مقاومت ویژه الکتریکی برای تعیین خواص ساختاری خاک‌ها صورت گرفته است. نشست ناشی از تحکیم خاک، به علت ماهیت تدریجی و طولانی مدت آن، می‌تواند برای سازه‌های بنا شده روی آنها مخاطره آمیز باشد. علت این نشست تغییر شکل فشاری و جابه‌جایی ذرات خاک، رانده شدن هوا و آب از حفره‌های خاک و عوامل دیگر است. از طرفی جابه‌جایی ذرات خاک، آب و هوا می‌تواند روی مقاومت ویژه الکتریکی خاک نیز تاثیرگذار باشد. در این راستا روی چهار نمونه خاک دست‌خورده آزمایش تحکیم یک‌بعدی و اندازه‌گیری



- Mc Carter, W. J., 1984, The electrical resistivity characteristics of compacted clays: *Géotechnique*, **36**(2), 263-267.
- Olson, R. E., 1998, Settlement of embankments on soft clays: *Geotech. Geo. Environ. Eng.*, 124-659.
- Sridharan, A., and Gurtug, Y., 2005, Compressibility characteristics of soils: *Geotechnical and Geological Engineering*, **23**, 615-634.
- Samouelian, A., Lian, S., and Cousin, I., 2005, Electrical resistivity survey in soil science: *Soil and Tillage Research*, **83**, 173-193.
- Tewatia, S. K., Bose, P. R., and Sridahan, A., 2007, Stress induced time dependent behavior of clayey soils: *Geotechnical and Geological Engineering*, **25**(2), 239-255.
- Vinegar, H. J., and Waxman, M. H., 1984, Induced polarization of shaly sands: *Geophysics*, **49**(8), 1267-1287.
- Wei, c. L., Chao, L. Y., and Chyan, D. J., 2008, Effect of soil texture and excitation frequency on the propagation and attenuation acoustic waves at saturated conditions: *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 270-281.
- Ahmed, K., Monterio, S., and Fernando, A., 2009, Influence of degree of saturation in the electric resistivity hydraulic conductivity relationship: *Surv. Geophys*, **30**, 601.
- Anderson, N., Croxton, N., Hoover, R., and Sirles, P., 2008, Geophysical methods commonly employed for geotechnical site characterization: Transportation research E-Circular, Transportation Research Board, ISSN: 0097-8515.
- Aboubacar, A., 2004, Utilization de la mesure de la résistivité électrique pour la caractérisation de la structure des sols cultivés: Mémoire de DESS Sciences de l'Environnement, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 60 p.
- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Petrol: Techno*, **5**, 54-61.
- Fam, M., and Santamarina, J. C., 1997, A study of consolidation using mechanical and electromagnetic waves, *Géotechnique*, **47**(2), 203-219.

منابع