

تراکم استاتیکی خاک لس و تأثیر آن بر تغییرات نفوذپذیری خاک

مسعود عنایت^۱، غلامرضا شعاعی^{۲*}، محمدرضا نیکودل^۳

پذیرش مقاله: ۹۷/۰۶/۳۱

دریافت مقاله: ۹۶/۰۷/۲۳

چکیده

یکی از عوامل کلیدی در درک چگونگی رفتار هیدرومکانیکی خاک، ارتباط مقدار تراکم و تغییرات نفوذپذیری خاک در اثر اعمال بار استاتیکی می‌باشد. در این پژوهش رابطه بین تغییرات این دو عامل (تراکم و نفوذپذیری) مورد مطالعه قرار گرفته است. این پژوهش بر روی سه نمونه خاک ریزدانه از نوع لس (نهشته های بادی) که در استان گلستان گسترش دارند انجام شده است. برای انجام آزمایشات مورد نظر باید دستگاهی طراحی می‌شد تا مقادیر تراکم و نفوذپذیری خاک را بطور همزمان ارائه دهد. بدین منظور دستگاهی طراحی و ساخته شده است که امکان استقرار نمونه سست با تخلخل زیاد در داخل سلول آزمایش را فراهم نموده و قادر است میزان فشار تراکم استاتیکی، مقدار تراکم و نفوذپذیری خاک را در مراحل مختلف تراکم خاک اندازه گیری نماید. در این دستگاه امکان مشاهده ساختار خاک همزمان با انجام آزمایش نیز فراهم شده و در تفسیر نتایج از مشاهدات صورت گرفته بر روی ساختار خاک کمک گرفته شده است. بدین ترتیب نتایج حاصل از آزمایشات که شامل رفتار تراکمی خاک و تغییرات نفوذپذیری آن می‌باشد در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد نوع خاک و ساختمان اولیه بر روی نحوه تراکم خاک تأثیر گذار می‌باشد. نتایج آزمایشات نفوذپذیری نمونه‌های خاک لس نشان می‌دهد نسبت پوکی با نفوذپذیری رابطه لگاریتمی داشته و رابطه عمومی آنها ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: خاک لس، تراکم استاتیکی، نفوذپذیری، تراکم، تحکیم، ساختمان خاک.

۱. دانشجوی دکتری رشته زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. استادیار گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران shoaei@modares.ac.ir

۳. دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

خاکی که تحت تأثیر نیروی ناشی از بارگذاری قرار می‌گیرد متراکم شده و حجم حفرات کاهش می‌یابد. این مسئله سبب می‌شود ویژگی‌های مهندسی خاک نظیر نشست پذیری و نفوذپذیری تغییر نماید و این تغییرات همیشه مورد توجه مهندسان و طراحان بوده است. چنین پدیده‌ای در زمین شناسی زمانی که رسوبات ته نشین شده و انباشته می‌شود رخ می‌دهد و به تدریج و در زمانی طولانی سبب تراکم رسوبات می‌گردد. به طور مصنوعی نیز زمانی که لازم است ویژگی‌های مهندسی خاک بهبود یابند، خاک را از طریق روشهایی نظیر پیش بارگذاری متراکم می‌نمایند.

بررسی نحوه تغییرات نفوذپذیری خاک به علت ایجاد تراکم و یا تحکیم، موضوعی است که تاکنون توسط محققین مختلفی به آن پرداخته شده است. نتایج محققین نشان می‌دهد نحوه کاهش نفوذپذیری در خاکهای ریزدانه مختلف متفاوت می‌باشد و از همین رو محققین مختلف نظیر Mesri and Olson (1971)، Taylor (1948)، Samarsinghe et al. (1982)، Das (2008)، Ren et al. (2016) و رشیدی (۱۳۷۷) روابط تجربی مختلفی جهت پیش‌بینی نفوذپذیری از روی مقدار نسبت پوکی این خاکها ارائه نموده‌اند.

برخی از محققین نیز در تحقیقات خود از دستگاه آزمایشی که بتواند به طور پیوسته ضریب نفوذپذیری خاک حین تراکم را اندازه‌گیری نماید استفاده نموده‌اند. Chen (1976) به وسیله دستگاه مخصوصی سعی نمود روابط تجربی بین فشار، تخلخل و نفوذپذیری رسوبات دریایی را بدست بیاورد. هدف وی این بود که بتواند به رفتار لایه‌های رسوبات تحت فشار دارای فشار آب منفذی بالا پی ببرد و بتواند مخاطرات احتمالی در زمان حفاری چاه‌های نفت را پیش‌بینی نماید. نتایج کار ایشان به صورت ارائه روابط بین نفوذپذیری و تخلخل رسوبات دریایی تحت گرادیان هیدرولیکی خیلی بالا می‌باشد. Olsen (1962) با دستگاه آزمایشی به مطالعه جریان آب از داخل نمونه‌های خاکهای رسی در تخلخل‌های مختلف پرداخت و تأثیر شیمی سیال را بر روی نفوذپذیری

بررسی نمود. (Laskar and Pal (2018) با ساخت دستگاهی به شکل مکعب، تأثیر نیروی سربار قائم بر روی تغییرات نفوذپذیری افقی و قائم را مورد بررسی قرار دادند. معروفترین این دستگاه‌ها اختراع Rowe and Barden (1966) به نام دستگاه تحکیم هیدرولیکی می‌باشد که توسط آن میتوان نفوذپذیری خاک را حین تحکیم اندازه‌گیری نمود. کاظمی و بلوری بزاز (۱۳۸۹) توسط این نوع دستگاه تحکیم هیدرولیکی، به مطالعه رفتار تحکیم و نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه پرداختند. از دیگر محققینی که کارهای مشابهی در زمینه اندازه‌گیری نفوذپذیری به طور پیوسته انجام داده‌اند می‌توان به Berilgen et al.، Mckiernan and Saffer (2006)، Zhang et al. (2006)، Tanaka (2003) و Azari (2015) اشاره نمود. دستگاههایی که توسط این محققین مورد استفاده قرار گرفته است دارای کاربرد ویژه بوده و از انعطاف پذیری کمی برخوردار می‌باشند. از مشکلات و کاستی‌های این دستگاه‌ها می‌توان به این موارد اشاره نمود: عدم امکان مشاهده و بررسی ساختار خاک در حین تراکم، محدودیت و مشکلات در استقرار نمونه در داخل دستگاه، محدودیت در استفاده از خاک با نسبت پوکی بالا و محدودیت در نحوه و میزان اعمال بار هیدرولیکی (بار ثابت و بار افتان) به نمونه. در این تحقیق با ساخت دستگاهی جدید، سعی شده است نواقص دستگاههای مشابه قبلی مرتفع گردد. با دستگاه ساخته شده در این تحقیق به بررسی رفتار تراکم، تحکیم و نفوذپذیری خاک ریزدانه از نوع لسه‌ای استان گلستان پرداخته شده است. روش انجام تحقیق نیز به این صورت می‌باشد که ابتدا ستونی از خاک سست دارای نسبت پوکی بالا از سه نوع خاک لس آماده شده است. سپس بار استاتیکی به صورت پله-ای و افزایشی به نمونه‌ها اعمال شده تا دچار تراکم گردند. بدین ترتیب در هر مرحله تراکم، میزان نشست، فشار تحکیم و نفوذپذیری خاک اندازه‌گیری شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

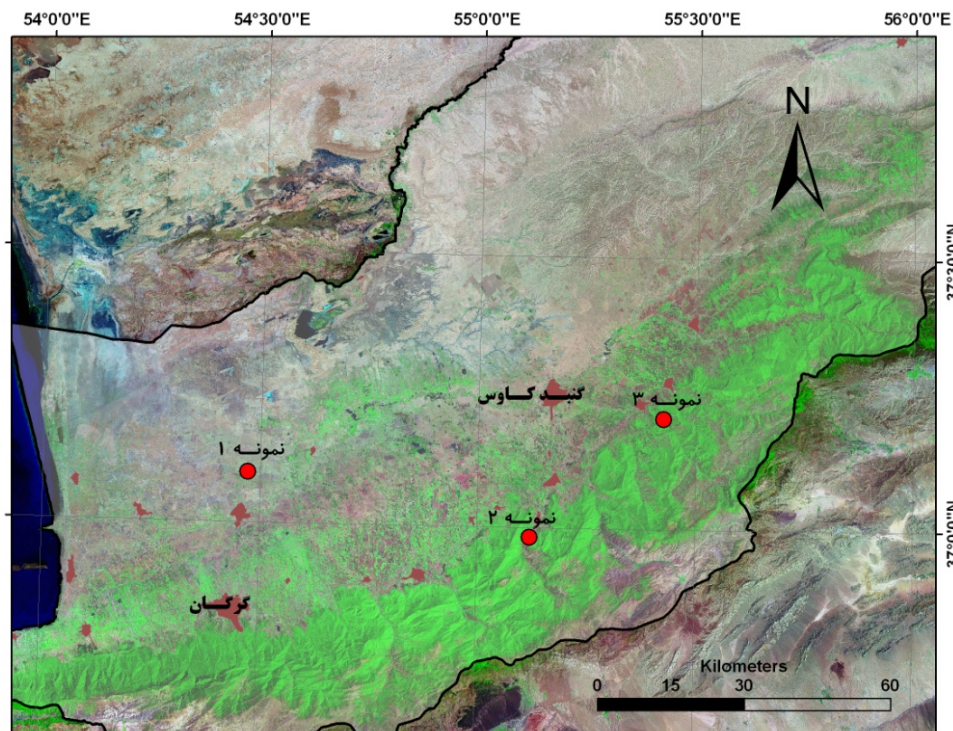
۲-۱. نمونه‌های خاک

ساحلی دریای خزر می‌باشد که توسط باد جابجا و به صورت تپه ماسه بادی از نوع برخان واقع در شمال شهر آق قلا نهشته شده‌اند. نمونه شماره ۲ خاک لسی رسی می‌باشد که از محل ساختگاه سد مطالعاتی رامیان واقع در جنوب شهر رامیان برداشت شده است. خاک لس رسی در محدوده سد مطالعاتی رامیان به ضخامت ۵-۸ متر گسترش دارد و نقش مهمی در آب بندی پی و ساختگاه سد خواهد داشت. نمونه شماره ۳ نیز مشابه نمونه شماره ۲ از نوع نهشته‌های لسی رسی می‌باشد که در مجاورت ساختگاه سد نرماب گسترش داشته و از آن به عنوان منبع قرضه جهت ساخت بدنه سد نرماب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سه نمونه خاک ریزدانه در این تحقیق انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات این سه نوع خاک در جدول ۱ ارائه شده است. این نمونه‌ها از مناطق مختلف در استان گلستان برداشت شده و از دیدگاه زمین شناسی در واقع نهشته‌های بادی از نوع لس می‌باشند (شکل ۱). نهشته‌های لس در استان گلستان از گسترش وسیعی برخوردار بوده و تحقیقات قنواتی و محمدی (۱۳۹۲) و رضایی و همکاران (۱۳۹۰) نشان می‌دهد دانه بندی این نهشته‌ها و سایر خواص مهندسی آنها از غرب به شرق استان و از شمال به جنوب استان تغییر می‌نماید. نمونه شماره ۱ عمدتاً از ماسه ریزدانه و سیلت تشکیل شده (لس ماسه ای). منشا این لس رسوبات

جدول ۱. مشخصات نمونه های خاک.

شماره نمونه	موقعیت	نوع خاک	نوع لس	درصد عبوری از الک ۲۰۰	Gs	LL	PL	PI	تغییرات وزن مخصوص خشک حین تراکم (۷d)
۱	آق قلا	SM	Sandy Loess	۲۷/۱	۲/۶۶	-	-	N. P.	۱۵/۵ - ۱۲/۴
۲	رامیان	CL	Silty Loess	۷۲/۴	۲/۶۸	۲۹/۹	۱۸/۸	۱۱/۲	۱۹/۱ - ۱۱/۹
۳	نرماب	CL	Clay Loess	۹۲/۵	۲/۷۲	۳۳/۹	۲۰/۲	۱۳/۷	۱۹/۱ - ۱۱/۶

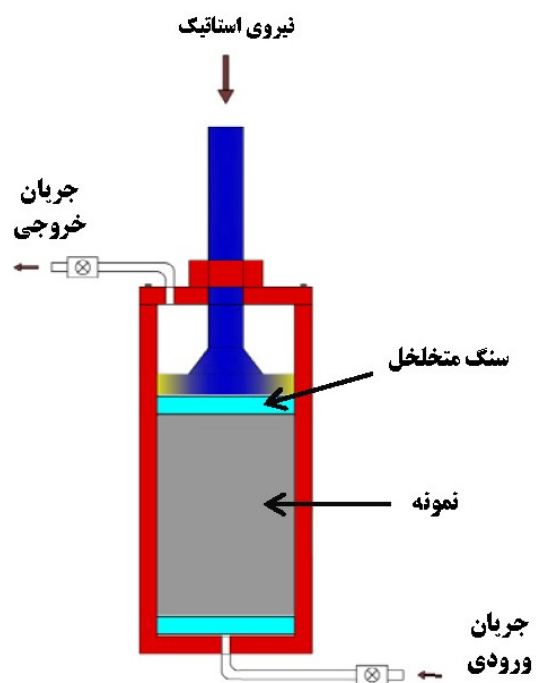
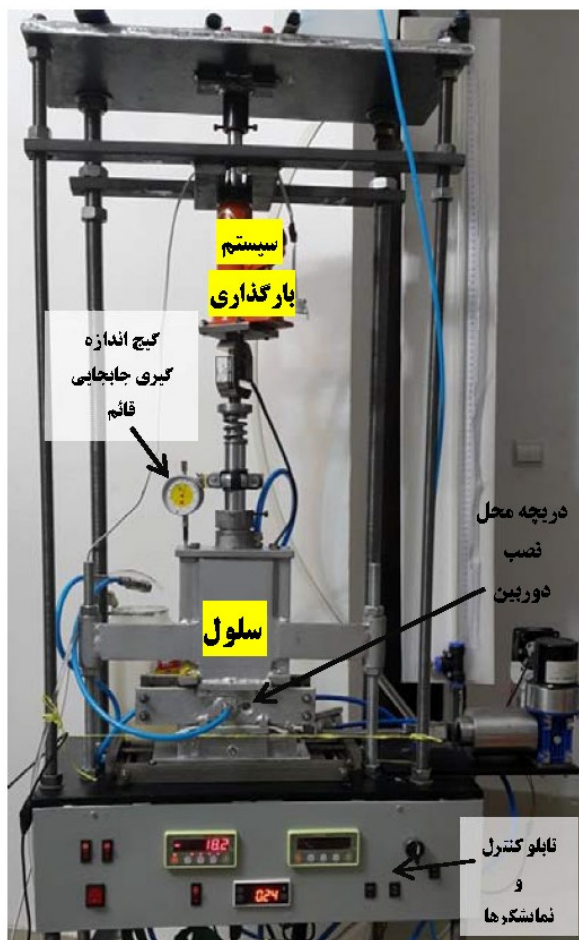


شکل ۱. موقعیت نمونه های خاک لس در استان گلستان که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲-۲. معرفی دستگاه آزمایش

به منظور اعمال بار استاتیکی به خاک و اندازه‌گیری مقدار تراکم و نفوذپذیری خاک در هر مرحله بارگذاری، باید دستگاهی ویژه طراحی و ساخته می‌شد. این دستگاه به گونه‌ای طراحی شد که به سهولت می‌توان نمونه کاملاً سست را در آن مستقر نمود و آزمایشات مختلف را بر روی آن انجام داد (شکل ۲). سطح مقطع سلول این دستگاه که نمونه خاک در آن استقرار می‌یابد ۸×۸ سانتی متر و ارتفاع آن ۲۰ سانتی متر می‌باشد و توسط آن می‌توان فشار تا حدود ۱۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع (حدود ۱/۸ مگاپاسکال) به نمونه اعمال کرد. به طور منطقی هر چه ابعاد سلول و در نتیجه نمونه مورد

آزمایش بزرگتر باشد، نتایج واقع بینانه تری بدست می‌دهد و اثرات شرایط مرزی کمتر می‌شود. اما در نمونه‌های دارای سطح مقطع بزرگ نیاز به نیروی فشاری خیلی زیاد جهت ایجاد نیروی سربار می‌باشد که این مسئله محدودیت‌های زیادی به لحاظ هزینه، اجرایی بودن و همچنین زمان آزمایش ایجاد می‌نماید. به همین دلیل سطح مقطع برای ساخت دستگاه ۸×۸ سانتی‌متر انتخاب گردید. این دستگاه قابلیت اعمال بار استاتیکی به خاک و تحکیم آن را داشته و می‌تواند نفوذپذیری خاک را هم به صورت بار ثابت و هم به صورت بار افتان بسته به نیاز آزمایشگر اندازه‌گیری نماید.



شکل ۲. در تصویر سمت راست، اجزای مختلف سلول دستگاه آزمایش و نحوه عملکرد آن نمایش داده شده است. این سلول کاملاً آب بند بوده و با اعمال نیرو، خاک درون آن متراکم می‌شود. پس از کامل شدن تراکم در هر مرحله، اندازه‌گیری نفوذپذیری امکان پذیر می‌شود. در تصویر سمت چپ نمای دستگاه در حین آزمایش ارائه شده است.

دانه‌بندی خاک تغییر ننماید. به همین دلیل پس از اتمام آزمایشات تراکم و نفوذپذیری، مجدداً آزمایش دانه‌بندی بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفته و دانه بندی آنها کنترل شده است. خوشبختانه در هیچ کدام تغییر دانه‌بندی مشاهده نشده است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. رفتار تراکم خاک تحت تأثیر بار استاتیکی

زمانی که خاک سست بر اثر اعمال نیروی استاتیکی شروع به تراکم می‌نماید، نحوه کاهش حجم خاک و تراکم آن بسته به نوع خاک (شکل و جنس ذرات و ابعاد آنها) و همچنین ساختار خاک متفاوت می‌باشد. در خاکهای غیر چسبنده و دانه‌ای در مراحل ابتدایی تراکم، تغییر آرایش ذرات از طریق غلبه نیروی اعمالی بر اصطکاک بین ذرات و یا سایش سطح دانه‌ها اتفاق می‌افتد اما با افزایش تراکم و در هم قفل شدن دانه‌ها، تغییر آرایش از طریق خرد شدن سطح تماس دانه‌ها و یا شکستن دانه‌ها اتفاق می‌افتد (Mesri and Vardhanabhuti, 2009). بنابراین در این نوع خاکها در مرحله اول افزایش تراکم سبب فروریزش حفرات بزرگ گردیده و دانه‌ها با لغزیدن و جابجا شدن سبب می‌شوند که بافت خاک به حالت متراکم تبدیل شود. آزمایشات انجام شده در این تحقیق نیز به همین مرحله محدود شده است تا تغییر شکل و تراکم خاک بدون ایجاد شکستگی در دانه‌ها و تغییر دانه‌بندی خاک انجام شود. در خاکهای چسبنده که دارای کانی‌های رسی می‌باشند، میزان نفوذپذیری پایین بوده و عمل تراکم و تحکیم به دلیل سرعت کم خروج آب، در زمان طولانی تری اتفاق می‌افتد. به دلیل توانایی حرکت و چرخش ذرات در زمان اعمال بار، پدیده اصطکاک و سایش بین ذرات و همچنین درهم قفل شدن دانه‌ها نظیر آنچه که در خاکهای دانه‌ای رخ می‌دهد در این نوع خاکها اتفاق نمی‌افتد. به همین دلیل در آنها پدیده‌هایی نظیر فروریزش که در خاکهای دانه‌ای متداول است دیده نمی‌شود.

از قابلیت‌های دیگر این دستگاه توانایی دیدن و رصد کردن ساختار خاک درون سلول در مراحل مختلف تراکم خاک می‌باشد که این مسئله از طریق دریچه تعبیه شده بر روی بدنه سلول و دوربین نصب شده بر روی آن امکان پذیر شده است. از مزایای استفاده از این دستگاه، آن است که جهت انجام آزمایشات نیاز به مقدار کمی نمونه می‌باشد؛ زیرا با یکبار آماده سازی و استقرار نمونه در دستگاه آزمایش می‌توان آزمایش تحکیم را انجام داد و همزمان چندین بار و در نسبت‌های پوکی مختلف نفوذپذیری را اندازه‌گیری نمود. این مسئله در افزایش سرعت کار و کاهش هزینه‌ها و عدم نیاز به تهیه چندین نمونه را ممکن می‌سازد.

۳-۲. روش آزمایش

روش انجام آزمایش در این تحقیق به این صورت می‌باشد که نمونه خاک ابتدا خشک شده و پس از خرد شدن از الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متر) عبور داده می‌شود. سپس خاک پودر شده توسط قیف مخصوص از ارتفاع ۲ سانتی متری به طور آهسته داخل سلول ریخته می‌شود تا نمونه خاک با حداکثر نسبت پوکی ایجاد شود. بدین ترتیب نمونه در داخل سلول استقرار می‌یابد و پس از آن با نصب سیستم بارگذاری و بستن درب آن، سلول کاملاً آب بندی می‌شود. سپس شیر قسمت تحتانی سلول کمی باز شده تا آب به آهستگی از قسمت پایین به داخل نمونه نشت نماید و با خروج هوا از قسمت فوقانی سلول، خاک اشباع گردد. با اشباع شدن خاک، نمونه آماده انجام آزمایش می‌باشد. در هر مرحله بار استاتیک به روی خاک اعمال شده و پس از اتمام تراکم و نشست، نفوذپذیری خاک اندازه‌گیری می‌شود. بار استاتیک در هر مرحله مشابه آزمایش تحکیم به صورت پله‌ای افزایش می‌یابد تا خاک به میزان قابل توجهی تحکیم یابد. بنابراین در هر مرحله تنش تراکمی، میزان نشست و همچنین نفوذپذیری خاک اندازه‌گیری می‌شود.

از نکات مهم در آزمایشات این است که با اعمال بارگذاری و تراکم، شکستگی در ذرات تشکیل دهنده خاک ایجاد نشود و

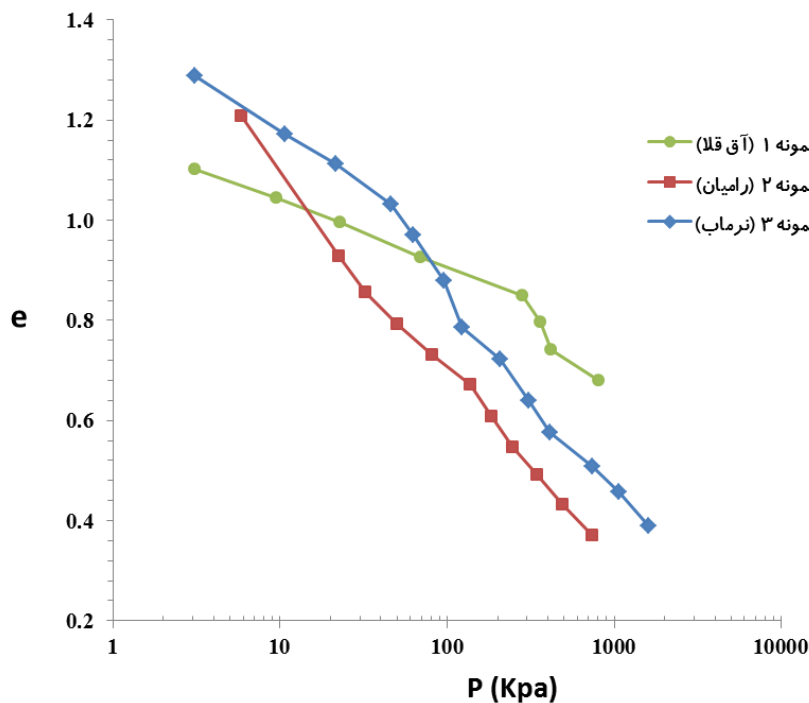
شوند و فضاهای خالی را پر نمایند. در این وضعیت متناسب با افزایش سربار و افزایش تراکم، اصطکاک بین ذرات افزایش می‌یابد. در شکل ۴-ب تصویری از همان نمونه خاک بعد از متراکم شدن و درهم قفل شدن دانه‌ها در نسبت پوکی برابر با ۰/۶۸ را نمایش می‌دهد. همانطور که در این عکس مشاهده می‌شود فواصل زیاد بین دانه‌ها و حفرات بزرگ بین آنها از بین رفته و ساختار خاک به وضعیت متراکم تر و پایدارتری تبدیل شده است. در این وضعیت چرخش و جابجایی ذرات نیاز به خراشیدن و یا شکستن سطح دانه‌ها در نقطه تماس و یا خود دانه‌ها دارد؛ همین دلیل مقاومت خاک در برابر تراکم افزایش یافته است.

در نمونه‌های شماره ۲ و ۳، به دلیل ماهیت ریزدانه بودن خاک یعنی وجود درصد بالای ذرات رسی و داشتن خاصیت خمیری، منحنی نسبت پوکی-لگاریتم فشار (e-LogP) در واقع همان نمودار تحکیم خاک می‌باشد. از روی نمودار تحکیم (شکل ۳)، نسبت پیش تحکیمی در نمونه شماره ۲ و ۳ به ترتیب حدود ۱۳۸ و ۴۶ کیلوپاسکال می‌باشد. بررسی ساختار خاک در حین تراکم و تحکیم نشان می‌دهد که تغییر شیب نمودار در نقطه قبل و بعد از نقطه پیش تحکیمی با ساختمان خاک در ارتباط است. با توجه به اینکه خاک خرد شده و از الک عبور داده شده و توسط قیف به صورت سست در سلول قرار گرفته است، خاک دارای ساختمان دانه‌ای (گرانول) می‌باشد که از کنار هم قرار گرفتن تعداد زیادی ساختارهای درشت خاک رسی موسوم به پد (ped) که با چشم قابل رویت هستند تشکیل یافته است (Das, 2008). این نوع ساختمان خاک حتی پس از اشباع شدن نیز تا حدودی ساختار خود را حفظ می‌نماید و در فشارهای استاتیکی کم، حفرات بزرگ بین این دانه‌های درشت را میتوان تشخیص داد. در چنین حالتی (Kuti 'lek (2004 بیان می‌دارد که حفرات بزرگ در بین دانه‌ها واقع شده و حفرات ریز در ابعاد میکرون در داخل دانه‌ها و یا در نقطه تماس بین دانه‌ها توزیع شده‌اند. با افزایش فشار سربار به خاکی که دارای چنین ساختاری می‌باشد، دانه‌های پد به تدریج تغییر شکل داده و فشرده می‌شوند

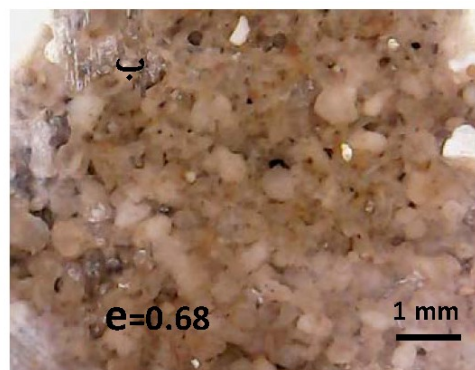
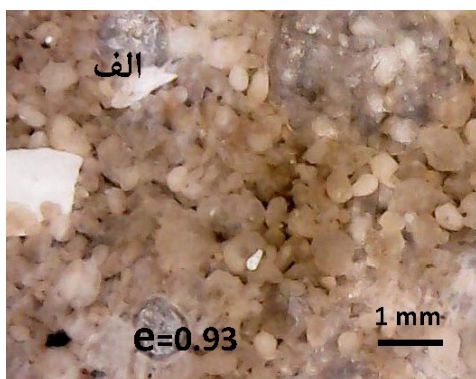
رفتار تراکمی نمونه‌های چسبنده و غیر چسبنده که مورد آزمایش قرار گرفته‌اند به صورت نمودار نسبت پوکی-لگاریتم فشار (e-LogP) در شکل ۳ ارائه شده است. نمونه شماره ۱ که از نوع ماسه سیلتی بوده و فاقد کانی رسی می‌باشد رفتار متفاوتی نسبت به دو نمونه دیگر دارد. در این نمونه متناسب با افزایش بار استاتیکی، نسبت پوکی کاهش می‌یابد اما در فشار ۲۸۰ کیلوپاسکال شیب نمودار کاهش به طور ناگهانی افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد شدت تغییر آرایش ذرات و در نتیجه تغییر ساختار خاک افزایش یافته است. پس از این اتفاق در فشار ۴۱۷ کیلوپاسکال مجدداً شیب نمودار کاهش یافته که نشان می‌دهد ساختار خاک به وضعیت پایدارتری تبدیل شده است. توجه این تغییر ایجاد شده در روند نمودار آنست که در تراکم استاتیکی خاکهای دانه‌ای، ابتدا افزایش فشار سربار صرف غلبه بر نیروی اصطکاک بین دانه‌ها می‌شود و پس از عبور از حد آستانه، حرکت و جابجایی ذرات تسهیل شده و شدت تراکم افزایش یافته و نهایتاً ذرات تشکیل دهنده خاک به آرایش جدید پایدارتر و متراکم تر می‌رسد (شکل ۴). از این مرحله به بعد به دلیل درگیر شدن دانه‌ها با یکدیگر و نبود فضای کافی جهت چرخش و جابجایی ذرات، متراکمتر نمودن خاک نیاز به نیروهای استاتیکی بسیار بیشتر و یا اعمال بار دینامیکی می‌باشد که از توان دستگاه ساخته شده خارج می‌باشد. اعمال نیروی استاتیکی زیاد نیز ممکن است سبب شکست دانه‌ها و تغییر دانه‌بندی خاک شود. تصاویر ساختار خاک مربوط به نمونه شماره ۱ در مرحله قبل و بعد از تغییرات گفته شده در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود در نسبت پوکی برابر با ۰/۹۳ و قبل از شدت یافتن تغییر ساختار خاک، در فواصل بین دانه‌ها حفرات زیاد با اندازه‌های متفاوت وجود دارد. تعداد کم تماس دانه‌ها با دانه‌های مجاور به همراه پراکندگی اتفاقی دانه‌ها که فاقد جهت‌گیری مشخص می‌باشند از مشخصات ساختار سست دارای نسبت پوکی بالا در این خاک دانه‌ای می‌باشد. به همین دلیل در این مرحله ذرات تشکیل دهنده خاک می‌توانند در کنار یکدیگر لغزیده و جابجا

گرانول و دارای تخلخل بالا به ساختار متراکم و یکنواختی تبدیل می‌شود (شکل ۵).

و همزمان فضاهای خالی بزرگ محو و بسته می‌شوند (Yong and Warkentin, 1975). بدین ترتیب ساختار خاک از حالت



شکل ۳. نمودار نسبت پوکی-لگاریتم فشار (e-LogP) نمونه های خاک.

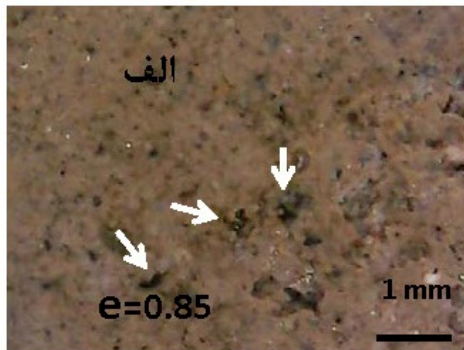


شکل ۴. الف: تصویری از نمونه شماره ۱ در نسبت پوکی برابر با ۰/۹۳ و قبل از شدت یافتن تغییر ساختار خاک. ب: تصویری از همان نمونه خاک بعد از متراکم شدن و درهم فغل شدن دانه ها در نسبت پوکی برابر با ۰/۶۸.

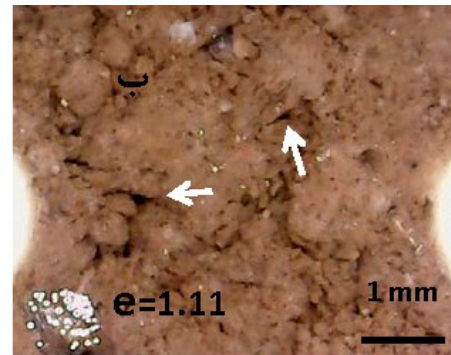
جاییست که تقریباً حفرات درشت خاک که قابل رویت می‌باشند بسته می‌شود. پس از این مرحله شیب نمودار تحکیم بیشتر شده و حفرات کوچکتر که عموماً ریز و غیر قابل رویت هستند آغاز به بسته شدن می‌کنند. بنابراین رفتار تراکم و تحکیم خاک تا قبل از نقطه فشار پیش تحکیمی توسط

مشاهدات انجام شده از ساختار خاک در نمونه های شماره ۲ و شماره ۳ و مقایسه با رفتار تراکم آنها در شکل ۳ نشان می‌دهد بخش ابتدایی منحنی تحکیم (تا قبل از نقطه فشار پیش تحکیم) متناسب است با بسته شدن فضای حفرات بزرگ درون نمونه خاک. به بیان دیگر نقطه فشار پیش تحکیم

بدین ترتیب رفتار تراکم خاک تغییر می‌نماید و تحکیم و تراکم خاک از طریق زهکش شدن آب از حفرات ریز ایجاد می‌شود.



رفتار مکانیکی دانه‌های پد تعیین می‌شود. پس از این نقطه به دلیل از بین رفتن دانه‌های پد و حفرات بین آنها، خاک دچار انسجام شده و بار اعمالی توسط اسکلت خاک تحمل می‌شود.



شکل ۵. الف: تصویری از نمونه شماره ۲ در e برابر با $0/85$ ؛ حفرات درشت بین دانه‌ای به رنگ تیره در قسمت وسط تصویر که در اثر افزایش اعمال فشار، در حال از بین رفتن می‌باشند قابل تشخیص می‌باشد. فلشهای سفید رنگ به این حفرات اشاره می‌نمایند. **ب:** تصویری از نمونه شماره ۳ در e برابر با $1/11$. ذره درشت موسوم به پد در قسمت وسط تصویر دیده می‌شود و حفرات بزرگ بین آنها با رنگ تیره تر قابل تشخیص می‌باشد. این حفرات با فلش سفید رنگ مشخص شده‌اند و با افزایش تراکم خاک بین می‌روند.

مقادیر نفوذپذیری اندازه‌گیری شده متناظر با نسبت پوکی برای هر نمونه در شکل ۶ نمایش داده شده است. با افزایش فشار و تراکم خاک، نفوذپذیری به سرعت کاهش می‌یابد به همین دلیل نتایج بر روی نمودار نیمه لگاریتمی نمایش داده شده است. با مقایسه نمونه‌های خاک بر روی نمودار نسبت پوکی-لگاریتم نفوذپذیری در شکل ۶ می‌توان دید که نمونه شماره ۱ تفاوت زیادی با دو نمونه دیگر داشته و نفوذپذیری بیشتری دارد و این مسئله به درشت دانه تر بودن و کمتر بودن درصد ذرات رس در این نمونه خاک مربوط می‌شود. نمونه‌های شماره ۲ و ۳ رفتاری مشابه و نزدیک به یکدیگر دارند. نکته قابل توجه در نمودار مربوط به این دو نمونه خاک در شکل ۶ آن است که شیب دو نمودار کمی متفاوت بوده و این مسئله سبب شده در تخلیخهای بالا میزان نفوذپذیری در نمونه شماره ۳ بیشتر از نمونه شماره ۲ باشد. این در حالیکه که نمونه شماره ۳ به دلیل دارا بودن درصد ریزدانه بیشتر و همچنین PI بالاتر به طور منطقی باید نفوذپذیری کمتری داشته باشد. با بررسی‌های انجام شده از ساختمان خاک در زمان تراکم، معلوم شده که این مسئله به ساختار خاک و رفتار

پس از توضیحات فوق می‌توان گفت در صورتی که روش ساخت نمونه تغییر یابد سبب می‌شود ابعاد قطعات درشت خاک (پد) تغییر نماید. بنابراین ساختار نمونه خاک در ابتدای آزمایش به گونه متفاوتی خواهد بود و احتمالاً موجب تغییر رفتار خاک در بخشهای ابتدایی تراکم و تحکیم خواهد شد. به عنوان مثال اگر خاک را کاملاً پودر کرده و از الک نمره ۱۰۰ (۰/۱۵ میلی‌متر) عبور دهیم در این صورت در نمونه تهیه شده دیگر دانه‌های پد وجود نخواهد داشت و واحدهای ریزتر خاک نظیر کلاسترها و دومین‌ها هستند که ساختار خاک را تشکیل داده و رفتار مکانیکی آن را کنترل می‌نمایند. در این حالت چون این واحدها ابعاد کوچکتری دارند بنابراین با اشباع شدن خاک و با اعمال اندکی تراکم، ساختار خاک یکنواخت می‌گردد. در این حالت انتظار می‌رود رفتار خاک در بخش ابتدایی منحنی تراکم (شکل ۳) محدودتر شده و بخش دوم منحنی که دارای رفتار خطی می‌باشد زودتر بروز نماید.

۲-۳. تاثیر کاهش نسبت پوکی بر روی نفوذپذیری

حفرات کوچکتر بر روی نفوذپذیری بیشتر می‌شود (Dexter et al., 2004 و Vilarrasa, 2015)، بنابراین تأثیر این دو دسته از حفرات به گونه ای است که در مراحل مختلف تراکم بر روی روند نسبتاً خطی نمودار شکل ۶ تأثیر مشخصی ایجاد نمی‌نماید. مشابه این روند تغییرات نفوذپذیری با نسبت پوکی را در نتایج محققین مختلفی نظیر شوش پاشا و فرهادی (۱۳۸۳)، (Chen (1976)، (Yeo et al. (2012) و Whalley et al. (2005) میتوان یافت. لازم به ذکر است در اینجا نفوذپذیری در جهت قائم یعنی در جهت اعمال نیرو به خاک اندازه گیری شده و تغییرات نفوذپذیری در جهت افقی مقوله دیگریست و نمی‌توان آن را با نتایج این تحقیق مقایسه نمود. با در نظر گرفتن رابطه لگاریتمی بین نفوذپذیری و نسبت پوکی (شکل ۶)، رابطه تجربی بدست آمده برای خاکهای مورد نظر در ذیل ارائه شده است:

$$e = 0.1101 \ln(k) + 1.655 \quad (۱) \quad \text{(نمونه شماره ۱، آق قلا)}$$

$$e = 0.079 \ln(k) + 1.8286 \quad (۲) \quad \text{(نمونه شماره ۲، رامیان)}$$

$$e = 0.065 \ln(k) + 1.6484 \quad (۳) \quad \text{(نمونه شماره ۳، نرماب)}$$

با توجه به روابط بدست آمده می‌توان دریافت رابطه عمومی تغییرات نفوذپذیری بر اثر کاهش نسبت پوکی در نمونه‌های خاک لس فارغ از اینکه دارای چه مقدار رس می‌باشند به صورت یکسان و به صورت رابطه ۴ می‌باشد:

$$e = A \ln(k) + B \quad (۴)$$

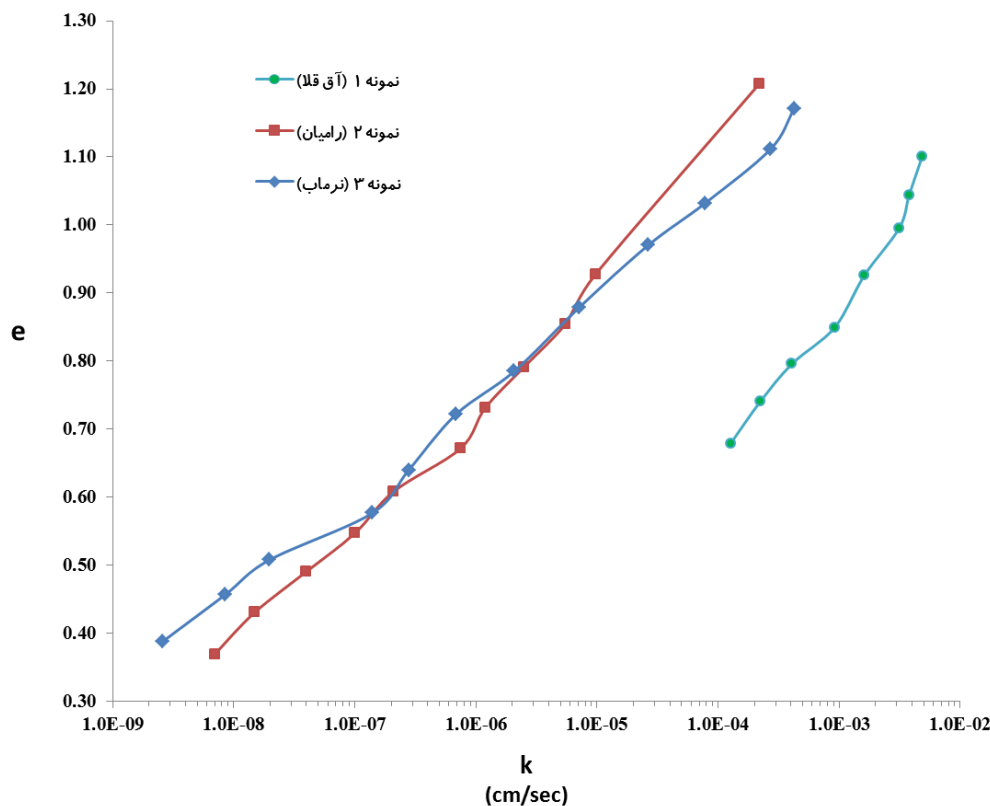
در رابطه فوق A و B ضرایب ثابتی می‌باشند که از طریق انجام آزمایش بدست می‌آید. مقایسه روابط نشان می‌دهد نمونه شماره ۱ که فاقد رس می‌باشد بیشترین مقدار ضریب A را داشته و در نمونه شماره ۳ که بیشترین درصد رس را دارد مقدار این ضریب کمترین می‌باشد؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت با افزایش میزان رس در خاک مقدار ضریب A کاهش می‌یابد. این نتیجه منطقی بوده و با دقت در نمودار شکل ۶ می‌توان دریافت خاکهای دارای میزان رس بیشتر، در زمان تراکم، نفوذپذیری آنها با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. کاربرد این رابطه ساده آنست که با توجه به متفاوت بودن خاکهای لسی در استان گلستان از لحاظ ویژگی‌های مهندسی نظیر دانه‌بندی

دانه‌های درشت خاک در تخلخلهای بالا مربوط می‌گردد. طبق مفهوم کلاستر (cluster concept) که توسط Olsen (1962) ارائه شد، در خاکهای رسی که دارای تخلخل بالا می‌باشند، ابتدا در تخلخلهای بالا کاهش حجم از طریق از بین رفتن حفرات بزرگ بین کلاسترها اتفاق می‌افتد و حفرات کوچک کلاسترها نقشی در کاهش حجم ندارند. ولی در مراحل بعد حفرات کوچک نیز در کاهش حجم تأثیر می‌گذارند. Olsen (1962) دریافت که کاهش حجم حفرات بزرگ بین کلاسترها نسبت به کاهش حجم در حفرات ریز درون کلاسترها باعث می‌شوند مقدار نفوذپذیری با سرعت بیشتری کاهش یابند. بنابراین آنچه که باعث بیشتر بودن نفوذپذیری نمونه شماره ۳ در تخلخلهای بالا نسبت به نمونه شماره ۲ می‌شود آن است که در این نمونه دانه‌های درشت خاک پس از اشباع شدن، انسجام خود را حفظ نموده و حفرات بزرگ در ساختار خاک باقی می‌مانند. بنابراین با افزایش فشار سربار، حفرات درشت دانه‌ها به تدریج از بین می‌روند اما در نمونه شماره ۲ با دارا بودن چسبندگی کمتر، بعد از اشباع و کمی اعمال نیرو، دانه‌های درشت متلاشی شده از هم پاشیده می‌شوند و حفرات به بزرگی نمونه شماره ۳ نمی‌باشد. به همین دلیل در تخلخلهای بالا اندکی میزان نفوذپذیری نمونه شماره ۲ کمتر از نمونه شماره ۳ می‌باشد. اما در تخلخلهای پایین زمانی که حفرات بزرگ از بین می‌روند، نقش حفرات ریز در عبور آب بیشتر می‌شود و بنابراین نمونه شماره ۳ که میزان ریزدانه بیشتری دارد در تخلخل پایین نسبت به نمونه شماره ۲ نفوذپذیری کمتری دارد.

مقایسه رفتار تراکمی نمونه‌ها در شکل ۳ با رفتار نفوذپذیری آنها در زمان تراکم (شکل ۶) نشان می‌دهد تغییرات نفوذپذیری مستقل از تغییرات رفتار تراکمی نمونه‌ها می‌باشد. در این شکل نفوذپذیری به صورت نسبتاً خطی با کاهش نسبت پوکی کاهش یافته و این مسئله نشان می‌دهد نفوذپذیری تنها به نسبت پوکی وابسته می‌باشد. از آنجایی که رفتار نفوذپذیری، تحت تأثیر همه حفرات ریز و درشت موجود در خاک می‌باشد و با محو شدن تدریجی حفرات بزرگ، تأثیر

و خصوصیات خمیری (رضایی، ۱۳۹۲)، با انجام آزمایشات بر روی انواع این خاکها می توان ضرایب ثابت را برای آنها

بدست آورد.

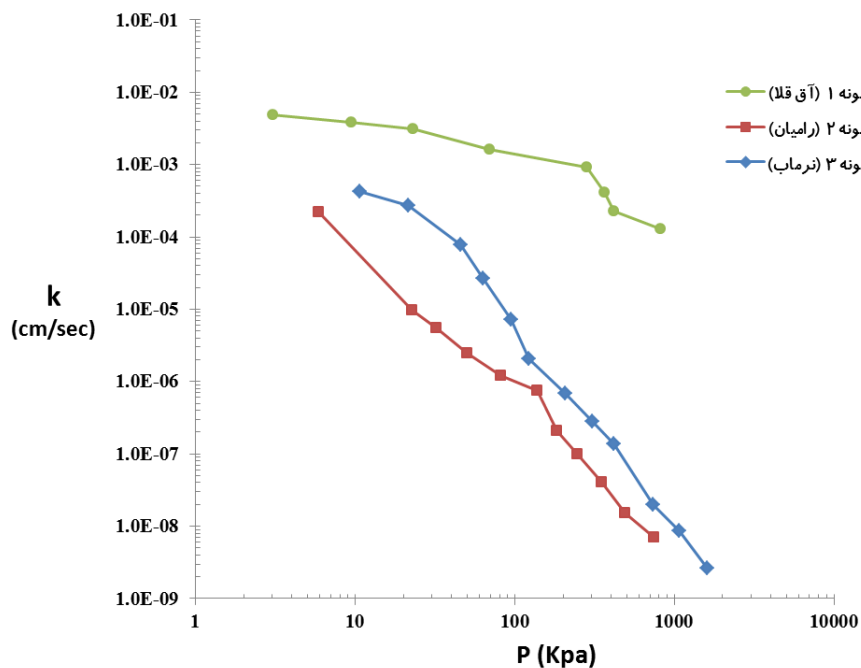


شکل ۶. نمودار نسبت پوکی در برابر لگاریتم نفوذپذیری در نمونه های خاک.

نمونه های خاک ارائه شده است. شکل نمودارها و تغییر شیب بخشهای مختلف آنها مربوط به خاکهای مختلف، شبیه به نمودار نسب پوکی-لگاریتم فشار (شکل ۳) می باشد. دلیل این مسئله آن است مقدار نفوذپذیری کاملاً متناسب با میزان تراکم و نسبت پوکی بوده و به یکدیگر وابسته هستند. از همین رو هرگونه تغییر در نسبت پوکی در نمودار e-LogP سبب می-شود تغییر مشابهی بر روی نفوذپذیری در نمودار Logk-LogP ایجاد نماید.

۳-۳. تغییرات نفوذپذیری با نیروی استاتیکی

در بعضی موارد نیاز است رابطه بین تنش اعمالی و مقدار نفوذپذیری مشخص گردد تا به کمک آن بتوان تغییرات نفوذپذیری خاک در زمان تراکم و نشست خاک ناشی از اعمال نیرو را پیش بینی نمود. چنین تحقیقی توسط Yeo et al.، Norris et al. (2001)، Matthews et al. (2010) و (2005) و Fan et al. (2014) انجام شده است. در شکل ۷ نمودار لگاریتم نفوذپذیری-لگاریتم فشار (Logk-LogP)



شکل ۷. نمودار لگاریتم نفوذپذیری-لگاریتم فشار (Logk-LogP) نمونه های خاک.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر تراکم استاتیکی بر روی نفوذپذیری خاک لس، دستگاه آزمایش ویژه ای ابداع گردید. نمونه های خاک توسط این دستگاه با اعمال بار استاتیکی از حالت سست به حالت متراکم تبدیل شده و در مراحل مختلف تراکم خاک، میزان نفوذپذیری به طور مستقیم اندازه گیری شده است. این دستگاه محدودیتی را که در دستگاه های معمول یا در دستگاه هایی که تا کنون مورد استفاده قرار گرفته اند رفع نموده و این موضوع باعث شده تا با استفاده از این دستگاه بتوان نحوه تغییرات میزان تراکم، فشار تراکم، میزان نفوذپذیری و ساختار خاک را همزمان با یکدیگر مورد مطالعه و تفسیر قرارداد. نتایج آزمایشات که توسط این دستگاه بر روی سه نمونه خاک از نوع لس انجام گرفت به صورت نمودارهای e-Logk، e-LogP و LogP-Logk ارائه شد و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات مشخص شد نوع خاک، نحوه آماده سازی نمونه و ساختمان اولیه خاک بر روی چگونگی تراکم و تحکیم خاک تأثیر گذار می باشد. نتایج

نشان می دهد اگر میزان درصد ذرات ریزدانه خاک اندک باشد و خاک ماهیت دانه ای داشته باشد نظیر نمونه شماره ۱، در این صورت رفتار تراکم تحت تأثیر نحوه لغزیدن و جابجایی ذرات از کنار یکدیگر و اصطکاک بین آنها قرار دارد. در این نوع خاکها زمانی که فشار تراکم از حد آستانه عبور نماید و بر اصطکاک بین دانه ها غلبه یابد، نرخ تراکم افزایش می یابد تا اینکه آرایش ذرات به وضعیت پایدار جدیدتر برسد. اما اگر خاک از نوع ریزدانه باشد نظیر نمونه های شماره ۲ و ۳ (لس رسی)، رفتار تراکم و تحکیم تحت تأثیر رفتار مکانیکی دانه های پد و همچنین حفرات بزرگ و ریز موجود در ساختار خاک می باشد. بررسی ساختار خاک در این دو نمونه نشان داد که در نمودار e-LogP نقطه پیش تحکیمی در جایی واقع شده است که حفرات بزرگ بسته شده و کاهش حجم خاک از طریق کاهش حجم حفرات کوچکتر و عمدتاً فضاها ی ریز غیر قابل رویت اتفاق می افتد. اندازه گیری نفوذپذیری نمونه ها در مراحل مختلف تراکم نشان داد بین لگاریتم طبیعی نفوذپذیری و نسبت پوکی رابطه نسبتاً خطی برقرار است و با تعیین رابطه بین آنها در نمونه

های خاک، رابطه عمومی برای خاکهای لس ارائه شد. خطی بودن این رابطه نشان می دهد تغییرات نفوذپذیری خاک مستقل از رفتار تراکم و تحکیم خاک می باشد. بررسی تغییرات ساختار خاک از نوع چسبنده و تأثیر آن بر روی نفوذپذیری نشان داد در تخلخلهای بالا عواملی نظیر ابعاد حفرات بزرگ در بین دانه های پد که متأثر از نحوه ساخت نمونه می باشد و همچنین رفتار چسبندگی و یا از هم پاشیدگی این دانه ها بر روی نفوذپذیری تأثیر گذار می باشد.

قدردانی

از راهنمایی های ارزنده جناب آقای دکتر حامد رضایی در خصوص لس های استان گلستان تشکر می گردد. همچنین از کارگاه صنعتی فغانی به دلیل همکاری به منظور ساخت دستگاه و ارائه راهکارهای فنی تشکر و قدردانی می گردد. از شرکت آب منطقه ای گلستان نیز به دلیل همکاری در جهت انجام نمونه برداری سپاسگزاری می گردد.

منابع

- رشیدی، ع.، ۱۳۷۷. مقایسه بین پارامترهای تحکیم در آزمایش تحکیم معمولی، تحکیم با زهکش جانبی و تحکیم بزرگ مقیاس، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- رضایی، ح.، لشکری پور، غ.، رهنماد، ج.، پیرانداخ، ر.، ۱۳۹۰. ارزیابی لس های استان گلستان بر اساس معیارهای زمین شناسی مهندسی، فصلنامه زمین شناسی کاربردی، سال ۷ شماره ۱، صص ۴۰-۲۹.
- رضایی، ح.، ۱۳۹۲. بررسی اثر تراکم دینامیکی و بارهای استاتیکی بر مقاومت برشی خاکهای لسی استان گلستان، پایان نامه دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد.
- شوش پاشا، ع.، فرهادی، ع.، ۱۳۸۳. بررسی اثرات دانسیته بر نفوذپذیری خاک رس سیلتی، نشریه دانشکده مهندسی دانشگاه مازندران، سال شانزدهم، شماره اول.
- قنوتی، ع.، محمدی، ز.، ۱۳۹۲. تحلیل توزیع فضایی نهشته های لسی در جنوب و جنوب شرقی دریای کاسپین، پژوهشهای جغرافیای طبیعی، سال ۴۵، شماره ۴، صص ۴۴-۲۹.
- کاظمی، ح.، بلوری بزاز، ج.، ۱۳۸۹. بررسی رفتار تحکیمی و ضریب نفوذپذیری افقی خاکهای ریزدانه با استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- Azari, B., 2015. Behaviour of Soft Soil Improved with Vertical Drain Accelerated Preloading Incorporating Visco-Plastic Deformation, Doctoral Philosophy thesis, School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology, Sydney.
- Berilgen, S.A., Berilgen, M.M., Ozaydin, I.K., 2006. Compression and permeability relationships in high water content clays, Applied Clay Science, 31: 249-261.
- Chen, R. 1976. Empirical relationships between consolidation pressure, porosity and permeability for marine sediments, master of science thesis, Texas A&M University.
- Das, B. M., 2008. Advanced Soil Mechanics, Third edition, published by Taylor & Francis.
- Dexter, A.R., Czyz, E.A., Gate, O.P., 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils, Journal of Soil & Tillage Research, 79: 185-189.
- Fan, R.-D., Du, Y.J., Reddy, K. R., Liu, S.Y., Yang, Y.L., 2014. Compressibility and hydraulic conductivity of clayey soil mixed with calcium bentonite for slurry wall backfill: Initial assessment, Applied Clay Science, 101:119-127.
- Kuti'lek, M., 2004. Soil hydraulic properties as related to soil structure, Soil & Tillage Research, 79:175-184.
- Laskar, A., Pal, S. K., 2018. Effect of Vertical Pressure on Horizontal and Vertical Permeability of Soil and Effect of Surcharge Pressure on 3D Consolidation of Soil, Journal of Advances in Civil Engineering, Article ID 9591374, pp. 1-11.

- Matthews, G.p., Laudone, G. M., Gregory, A. S., Bird, N. R. A., Matthews, G., Whalley, W. R., 2010. Measurement and simulation of the effect of compaction on the pore structure and saturated hydraulic conductivity of grassland and arable soil, *WATER RESOURCES RESEARCH*, 46 (5), CiteID W05501.
- McKiernan, A. W., Saffer, D. M., 2006. Permeability and Consolidation Properties of Subducting Sediments off Costa Rica, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 205*, Available from World Wide Web: (www-odp.tamu.edu/publications/205_SR/VOLUME/CHAPTERS/203.PDF).
- Mesri, Gh., Olson, R. E., 1971. Mechanisms controlling the permeability of clays, *Clays and Clay Minerals*, Pergamon Press, 19:151-158.
- Mesri, G., Vardhanabhuti, B., 2009. Compression of granular materials, *Canadian Geotechnical Journal*, 46:369-392.
- Norris, G., Elfass, S., Valceschini, R., 2001. Permeability Changes in Soil Due to Fill Loading and its Effect on the Groundwater Flow Regime, College of Engineering University of Nevada, Research Division in Nevada Department of Transportation, Technical Report, Report No: RDT 97-020.
- Olsen, H. W., 1962. Hydraulic flow through saturated clays, *Proc. 9th Natl. Conf. Clays Clay Minerals*, Lafayette, IN, USA, pp. 131-161.
- Ren, X., Zhao, Y., Deng, Q., Kang, K., Li, D., Wang, D., 2016. A relation of hydraulic conductivity-void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation, *Journal of Engineering Geology*, 213:89-97.
- Rowe, p. w., Barden, L., 1966. A New Consolidation Cell, *Geotechnique*, 16:162-170.
- Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H., Drnevich, V. P., 1982. Permeability and consolidation of normally consolidated soil, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, No. GT66, 108: 835-850.
- Tanaka, H., 2003. Pore Size Distribution and Hydraulic Conductivity Characteristic of Marine Clays, 2nd International Symposium on Contaminated Sediments.
- Taylor, D. W., 1948. *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley and sons, New York, 700p.
- Vilarrasa, V., Rutqvist, J., Martin, L.B., Birkholzer, J., 2015. Use of a dual-structure constitutive model for predicting the long-term behavior of an expansive clay buffer in a nuclear waste repository. *International Journal of Geomechanics*, 16, DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000603.
- Whalley, W.R., Matthews, G.P., Ferraris, S., 2012. The effect of compaction and shear deformation of saturated soil on hydraulic conductivity, *Journal of Soil & Tillage Research*, 125:23-29.
- Yeo, S., Shackelford, C., Evans, J., 2005. Consolidation and Hydraulic Conductivity of Nine Model Soil-Bentonite Backfills, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* © ASCE, 131 (10):1189-1198.
- Young, R.N., Warkentin, B.P., 1975. *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Zhang, S., Grip, H., Lovdahl, L., 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China, *Journal of Soil & Tillage Research*, 90:117-125.

