مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۸، شماره‌ی ۴، ص. ۱۵-۲۴

Original Article

مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی بر روی ضریب نفوذپذیری آب در یک خاک ماسه‌یی رس‌دار با استفاده از دستگاه جدید تعیین نفوذپذیری در خاک‌های غیراشباع

غلامعلی عادلیان بهنمیری (کارشناس ارشد)
سید شهاب‌الدین یثربی* (دانشیار)
علی میرزایی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

در این نوشتار تأثیر عوامل هیدرولیکی رفتار وابسته به تاریخچه‌ی منحنی مشخصه، هد جریان، عوامل مکانیکی تنش‌های همه‌جانبه و ارتفاع نمونه بر روی ضریب نفوذپذیری آب در یک خاک ماسه‌یی رس‌دار بررسی شده است. لذا آزمایش‌های مختلف تعیین نفوذپذیری با دستگاهی جدید در مقادیر مختلف مکش بافتی بر روی منحنی‌های ترشدگی و خشک‌شدگی در تنش‌های تحکیمی مختلف بر روی نمونه‌های خاک مفروض با ارتفاع ۱ یا ۳ سانتی‌متر انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از بیشتر بودن ضریب نفوذپذیری آب در مسیرهای خشک‌شدگی نسبت به مسیرهای ترشدگی بوده و کاهش مکش بافتی نیز باعث افزایش ضریب نفوذپذیری شده است. همچنین تغییرات هد جریان و ارتفاع نمونه تأثیری بر روی ضریب نفوذپذیری خاک نداشته و افزایش تنش‌های همه‌جانبه در یک مکش بافتی ثابت نیز باعث افزایش درجه‌ی اشباع و ضریب نفوذپذیری شده است.

واژگان کلیدی: خاک‌های غیراشباع، ضریب نفوذپذیری آب، هد جریان، رفتار وابسته به تاریخچه‌ی منحنی مشخصه، تراکم‌پذیری.

gh.adelian@gmail.com
yasrobis@modares.ac.ir
al.mirzaii@gmail.com

مقدمه

رفتار خاک‌های غیراشباع از جمله مباحث مطرح در حیطه‌ی مهندسی ژئوتکنیک در مقاصد علمی و کاربردی است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به گسیختگی‌های شیروانی‌ها بعد از رخداد بارش باران، بالاآمدن سطح ایستابی آب زیرزمینی و کاهش ظرفیت باربری خاک، پخش آلودگی در خاک، فروریزش خاک‌های فروریزشی، تورم در خاک‌های رسی متورم‌شونده و ایجاد خرابی در سازه‌ها اشاره کرد. در تمامی موارد مذکور ماهیت تراوش و جریان آب در خاک بسیار مهم است.[۱]

از جمله عوامل مؤثر تراوش در خاک‌ها، ضریب نفوذپذیری خاک نسبت به آب و هواست که به‌منزله‌ی یک پارامتر مهندسی خاک در بررسی مقاومت برشی، رفتار تغییر حجمی و طراحی‌سازه‌های ژئوتکنیکی مختلف همچون سدهای خاکی، دیوارهای حائل و سازه‌های زیست محیطی مطرح است.[۲-۴]

در خاک‌های اشباع ضریب نفوذپذیری آب به نسبت تخلخل وابسته است و تغییر وضعیت تنش‌های مؤثر بر خاک باعث تغییر نسبت تخلخل و به‌تبع آن تغییر ضریب نفوذپذیری آب می‌شود. در خاک‌های غیراشباع به واسطه‌ی وجود هوا در حفره‌های خاک، سطح مقطع مجراهای جریان آب در خاک کاهش می‌یابد و ضریب نفوذپذیری آب در خاک تابعی از نسبت تخلخل و درجه‌ی اشباع خاک است.

امروزه روش‌های مختلف آزمایشگاهی و صحرایی برای اندازه‌گیری مستقیم ضریب نفوذپذیری آب در خاک‌های غیراشباع توسعه یافته است. همچنین ضریب نفوذپذیری در خاک‌های غیراشباع را می‌توان به‌صورت غیرمستقیم و با استفاده از روش‌های تخمینی نیز محاسبه کرد. با وجود هزینه و زمان بالای استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مستقیم ضریب نفوذپذیری، دقت استفاده از این روش‌ها نسبت به روش‌های غیرمستقیم مطلوب‌تر است.[۵و۶]

دستگاه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مستقیم ضریب نفوذپذیری خاک‌های غیراشباع توسط پژوهشگران مختلف برای اندازه‌گیری نفوذپذیری فازهای آب و هوای حفره‌یی در خاک‌های مختلف توسعه یافته‌اند.[۲و۷-۱۳] در جدول ۱ به برخی از نتایج

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۴/۲۸، اصلاحیه ۱۳۸۹/۱۱/۱۸، پذیرش ۱۳۹۰/۳/۲۵.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. مروری بر کارهای گذشته.

تغییر حجم کل نمونه‌ی خاک	محدوده‌ی مکش بافتی (کیلوپاسکال)	محدوده‌ی ضریب نفوذپذیری هوا، K_a(متر بر ثانیه)	محدوده‌ی ضریب نفوذپذیری آب، K_w (متر بر ثانیه)	خاک مورد مطالعه
اندازه‌گیری نشده	۰-۹۰	ذکر نشده	ذکر نشده	ذکر نشده[۷]
اندازه‌گیری نشده	۰-۹۵	10^{-10}-10^{-3}	10^{-12}-10^{-10}	خاک‌های متراکم شده[۸]
اندازه‌گیری نشده	۰-۸۰	تاحدود 10^{-8}	تا حدود 10^{-8}	رس، لوم و ترکیب ماسه‌ـکائولن[۹]
اندازه‌گیری نشده	۰-۴	تاحدود 10^{-4}	اندازه‌گیری نشده	ماسه[۱۰]
توسط حس‌گر	۰-۹۰	اندازه گیری نشده	10^{-8}-10^{-11}	ماسه‌ی سیلت‌دار[۱۰]
اندازه‌گیری نشده	۰-۱۰۰	اندازه‌گیری نشده	10^{-5}-10^{-10}	خاک‌های رسوبی[۱۱]
اندازه‌گیری شده	۰-۳۰۰	10^{-7}-10^{-12}	10^{-6}-10^{-12}	خاک‌های رسوبی[۱۲]

به‌دست‌آمده در تحقیق‌های گذشته برای ضریب نفوذپذیری آب و هوای حفره‌یی در خاک های غیراشباع اشاره شده است.

به‌دلیل طبیعت پیچیده‌ی آرایش فاز مایع درون حفره‌های خاک، رابطه‌ی بین تغییرات فشار آب حفره‌یی و درصد رطوبت یک خاک در بازه‌های مختلف ترشدگی و خشک‌شدگی متفاوت بوده و رفتار منحنی مشخصه‌ی آب ـخاک وابسته به تاریخچه (رفتار هیسترسیس منحنی مشخصه‌ی آب ـخاک) است.[۱۴] عوامل مختلفی بر روی رخداد رفتار وابسته به تاریخچه‌ی منحنی مشخصه‌ی آب ـخاک مؤثر است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به غیریکنواختی هندسه‌ی منافذ و حفره‌های خاک، هوای محبوس‌شده‌ی درون حفره‌ها در بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی، و تغییر زاویه‌ی تماس بین دو فاز دانه‌های جامد خاک و آب اشاره کرد. رفتار وابسته به تاریخچه‌ی اعمال پارامترها در خاک‌های غیراشباع بر روی ضریب نفوذپذیری آب در خاک مؤثر است که برخی پژوهشگران نیز در مطالعات خود به آن اشاره کرده‌اند.[۱۲،۱۵و۱۶]

از جمله عوامل مؤثر دیگر بر روی ضریب نفوذپذیری آب در خاک‌های غیراشباع، هد جریان است که تاکنون مطالعات اندکی بر روی آن انجام شده است، از جمله می‌توان به مطالعه‌ی شیب‌های هیدرولیکی مختلف ۳۰ الی ۱۴۰ اشاره کرد.[۱۲] که نتایج به‌دست‌آمده از آن حاکی از عدم تغییر قابل‌توجه ضریب نفوذپذیری آب در محدوده‌ی شیب‌های هیدرولیکی مختلف و برقراری قانون دارسی است. اگرچه این امر به نوع خاک وابسته است و برای خاک‌های با ضریب نفوذپذیری پایین، قانون دارسی در بازه‌ی بیشتری از تغییرات هد جریان معتبر خواهد بود.[۱۷]

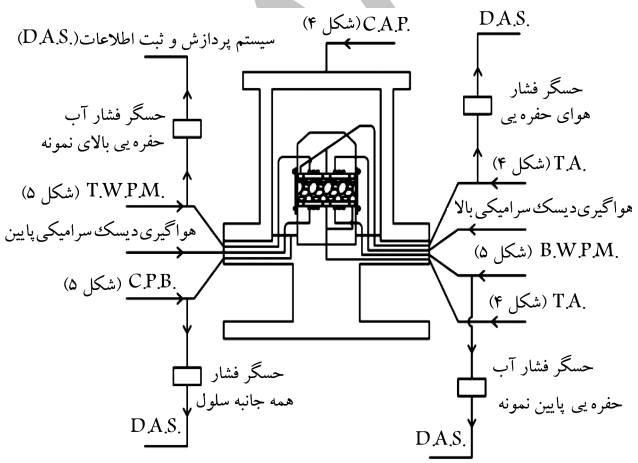
عوامل فیزیکی مختلف همچون نسبت تخلخل و ارتفاع نمونه‌ی خاک نیز بر روی ضریب نفوذپذیری مؤثرند. برخی پژوهشگران در مطالعه‌ی خود به بررسی تأثیر نسبت تخلخل بر روی ضریب نفوذپذیری در خاک‌های غیراشباع پرداختند که نتایج به‌دست‌آمده‌ی آن‌ها بیانگر وابستگی ضریب نفوذپذیری به نسبت تخلخل خاک بوده و این رفتار در خاک‌های مختلف متفاوت است.[۲و۱۵]

در این نوشتار به بررسی تأثیر عوامل هیدرولیکی وابسته به تاریخچه‌ی اعمال پارامترها، هد جریان، عوامل مکانیکی تنش‌های همه‌جانبه‌ی مؤثر، و ارتفاع نمونه‌ی خاک بر روی تغییرات ضریب نفوذپذیری یک نوع خاک ماسه‌یی رس‌دار پرداخته شده است. بر همین اساس مجموعه‌یی از آزمایش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری بر روی خاک مفروض در شرایط مختلف با استفاده از دستگاهی جدید برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری خاک‌های غیراشباع انجام شده که جزئیات این امر در ادامه اشاره شده است.

دستگاه تعیین نفوذپذیری و منحنی مشخصه

این دستگاه برای انجام آزمایش‌های مختلف بررسی جریان و نفوذپذیری در خاک‌های غیراشباع طراحی و ساخته شده و مطابق شکل‌های ۱ الی ۵ دارای بخش‌های مختلف سلول دستگاه، تابلوی کنترل، مخازن فشار و دستگاه‌های اتوماتیک و مکانیکی اندازه‌گیری تغییر حجم است. با استفاده از این دستگاه جدید امکان بررسی مستقل شرایط مختلف هیدرولیکی و مکانیکی بر روی جریان آب و یا هوای حفره‌یی در خاک‌های غیراشباع میسر است.

سلول از جمله بخش‌های اصلی این دستگاه است که شامل کلاهک بالا و پایین است و با استفاده از آن می‌توان ضریب نفوذپذیری آب (و در صورت نیاز هوا) را مستقلاً اندازه‌گیری کرد (شکل ۱). بر روی بدنه‌ی بالای سلول، مجاری اعمال فشار همه جانبه‌ی هوا برای اشباع دیسک‌های سرامیکی متخلخل و هواگیری سلول تعبیه شده است. بدنه‌ی پایین دستگاه نیز شامل پدستال‌های پایین و بالا و مجاری اعمال



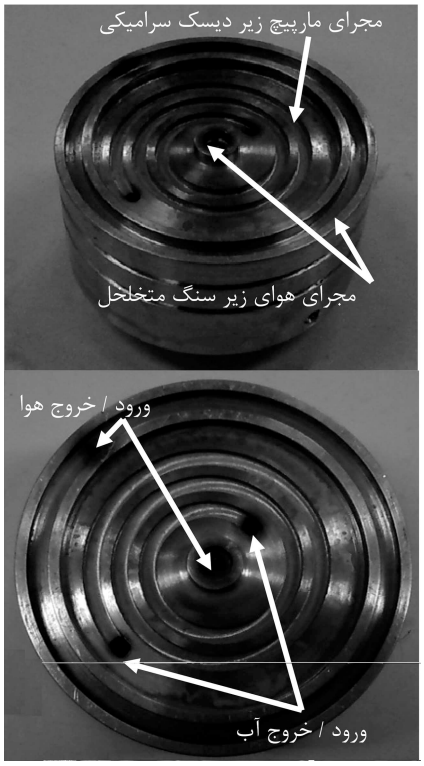
شکل ۱. شمای کلی سلول دستگاه.

Archive of SID
www.SID.ir

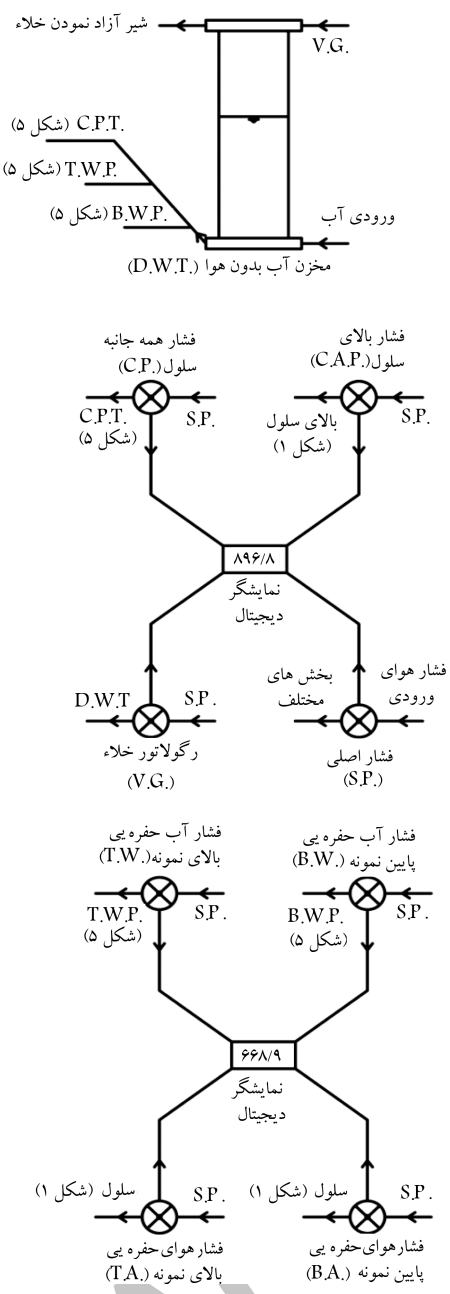
فشار همه‌جانبه و فشارهای آب و هوای حفره‌یی است که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲ برای اندازه‌گیری و یا کنترل مستقل فشار و یا جریان آب درون حفره‌های خاک، دو دیسک سرامیکی متخلخل دایره‌یی به قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر با عدد عبوری هوای ۵ اتمسفر ساخته و در پدستال‌های پایین و بالای نمونه‌ی خاک تعبیه شده است. همچنین سنگ‌های متخلخل نیز در مرکز و اطراف پدستال‌های پایین و بالا برای اندازه‌گیری و یا کنترل مستقل فشار و یا جریان هوای درون حفره‌های خاک ساخته و نصب شده است. با استفاده از سلول دستگاه امکان انجام آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های خاک به قطر ۷ سانتی‌متر در محدوده‌ی ارتفاع ۱ الی ۳ سانتی‌متر میسر است. برای توزیع یکنواخت آب در زیر دیسک‌های سرامیکی، یک مجرای مارپیچ در زیر دیسک‌ها تعبیه شده

شکل ۲. بدنه‌ی پایین سلول دستگاه.



شکل ۳. مجاری زیر دیسک‌های سرامیکی و سنگ‌های متخلخل.

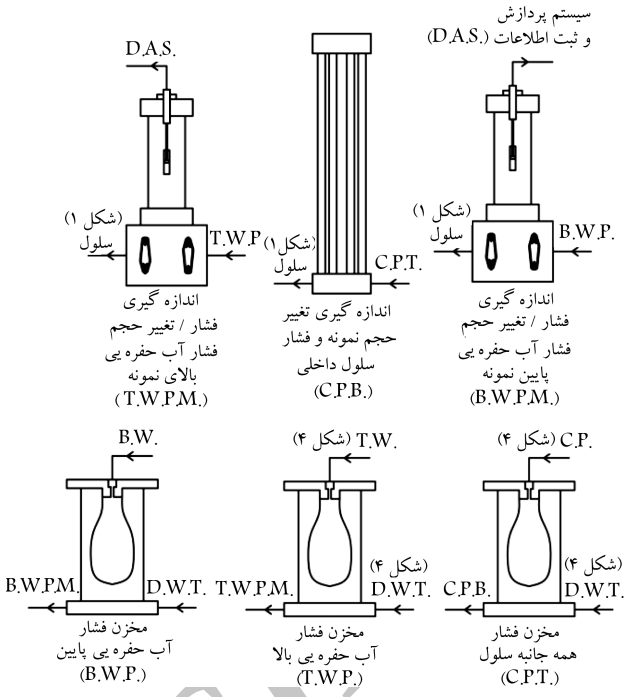


شکل ۴. شمای کلی تابلوی کنترل دستگاه.

است که امکان خارج‌کردن هوای درون آن نیز با استفاده از مجاری ابتدا و یا انتهای آن وجود دارد (شکل ۳).

مجاری ورود/خروج هوای پدستال‌های پایین و بالا نیز در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. از جمله بخش‌های دیگر این دستگاه تابلوی کنترل است (شکل ۴)، که با استفاده از آن فشار بخش‌های مختلف دستگاه مانند فشار همه‌جانبه‌ی درون سلول، فشار هوای بالای سلول برای اشباع‌کردن دیسک‌های سرامیکی، فشار هوای خلاء برای تهیه‌ی آب بدون هوا، و فشارهای آب و هوای حفره‌یی بالا و پایین نمونه‌ی خاک تأمین می‌شود که مقادیر آن‌ها بر روی دو نمایشگر دیجیتال نشان داده می‌شود. در بالای تابلوی کنترل دستگاه نیز مخزن آب بدون هوا تعبیه شده است (شکل ۴).

www.SID.ir



شکل ۵. سیستم اندازه‌گیری تغییر حجم و اعمال فشار.

مطابق شکل ۵ برای اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از درون حفره‌های خاک از دو دستگاه اتوماتیک اندازه‌گیری تغییر حجم با دقت ۰٫۰۱ سی‌سی استفاده شده است. برای اعمال فشارهای آب حفره‌یی بالا و پایین و فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر نمونه‌ی خاک نیز از سه مخزن استفاده شده است.

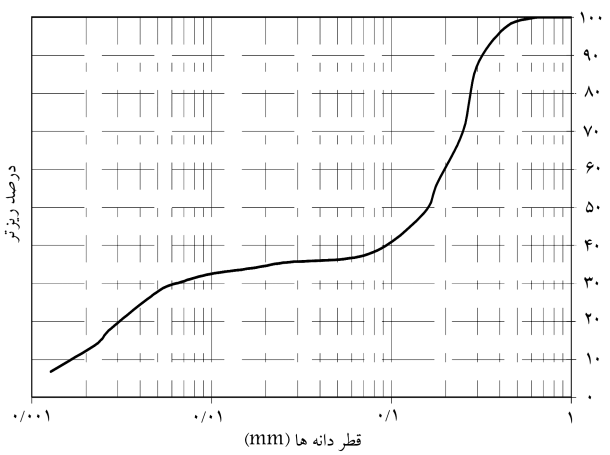
مشخصات مصالح مورد مطالعه

خاک مورد مطالعه در این تحقیق به‌صورت مصالح ترکیبی ماسه و رس شامل ۶۰٪ ماسه و ۴۰٪ کائولینیت است که به‌صورت درصد وزنی و در حالت کاملاً خشک با یکدیگر ترکیب شده‌اند.[۱۸]

برای تعیین مشخصات خاک آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، وزن مخصوص، طبقه‌بندی خاک و پراکتور استاندارد به‌ترتیب مطابق با ASTM D-۴۳۱۸، ASTM D-۸۵۴، ASTM D-۴۲۲ و ASTM D-۶۹۸ انجام شده است. در جدول ۲ مشخصات خاک مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است. برای

جدول ۲. مشخصات خاک مورد مطالعه.

SC	نوع خاک (طبقه بندی متحد)
۲۳٫۵	حد روانی (٪)
۱۴	حد خمیری (٪)
۹٫۵	نشانه خمیری (٪)
۲٫۶۶	چگالی دانه‌ها (G_s)
۴۰	درصد رس
۹٫۶	درصد رطوبت
۱٫۷۵	وزن مخصوص خشک (t/m^3)



شکل ۶. نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.

طبقه‌بندی خاک مورد استفاده در این تحقیق از سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) استفاده شده است. نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده در این تحقیق نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های شناسایی پایه و سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک ترکیبی از نوع ماسه‌ی رس‌دار (SC) است.

برنامه‌ی آزمایش‌ها

در این مطالعه مجموعه‌یی از آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های خاک به ارتفاع ۱ و ۳ سانتی‌متر انجام شده است که شامل ۶ آزمایش برای بررسی اثر هد جریان و رفتار وابسته به تاریخچه‌ی منحنی مشخصه بر روی نمونه‌های به ارتفاع ۱ سانتی‌متر در دو هد جریان ۴۰ و ۸۰ کیلو پاسکال در مسیرهای ترشدگی و خشک‌شدگی، ۳ آزمایش برای بررسی رفتار وابسته به تاریخچه‌ی منحنی مشخصه و ارتفاع نمونه بر روی نمونه‌های ۳ سانتی‌متری در هد جریان ۴۰ کیلوپاسکال در مسیرهای ترشدگی و خشک‌شدگی و ۲ آزمایش برای بررسی تأثیر فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه‌های ۱ سانتی‌متر در هد جریان ۴۰ کیلوپاسکال است که در ادامه به ذکر جزئیات آن‌ها پرداخته شده است.

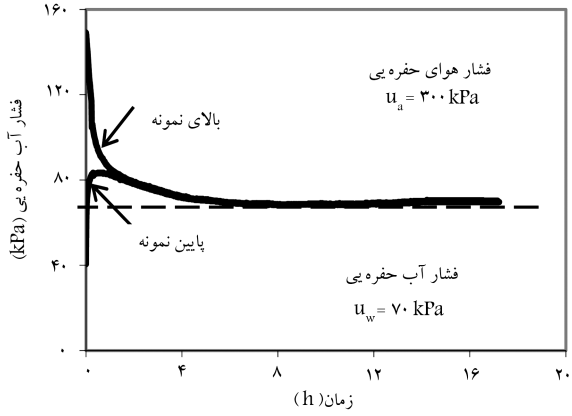
نمونه‌های خاک مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از روش تراکم استاتیکی و با توجه به مشخصات مندرج در جدول ۲ متراکم شده‌اند. بعد از اشباع‌کردن دیسک‌های سرامیکی، نمونه‌های خاک بر روی پدستال پایین سلول دستگاه قرار گرفته و پدستال بالا بر روی آن‌ها تعبیه شده است. سپس دو غشاء لاستیکی بر دور نمونه‌ها کشیده شده و برای ممانعت از نفوذ هوا از درون خاک به سلول فضای بین دو غشاء با لایه‌ی نازکی از گریس سیلیکون پر شده است. با بستن سلول دستگاه و پرکردن آن از آب بدون هوا، نمونه‌های خاک تحت یک فشار همه‌جانبه‌ی تحکیمی به میزان ۲۰ کیلو پاسکال واقع شده‌اند. در این مرحله با توجه به مقدار مکش بافتی اولیه‌ی نمونه‌ها، فشار آب حفره‌یی درون مجرای متصل به زیر دیسک‌های سرامیکی بالا و پایین نمونه به سمت مقادیر منفی نزدیک و برای جلوگیری از رخداد پدیده‌ی خلاءسازی و دفع حباب‌های هوای محبوس، یک جریان آب در زیر دیسک‌های سرامیکی برقرار شده است. سپس با استفاده از روش جابجایی محوری مکش بافتی اولیه، نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شده‌اند. برای این امر فشار هوای حفره‌یی درون خاک به مقدار ۳۰۰ کیلو پاسکال رسانیده شده و فشار آب حفره‌یی بالا و پایین نمونه‌ی خاک تا رسیدن به زمان تعادل اندازه‌گیری شده است (شکل ۷). مطابق این

Archive of SID
www.SID.ir

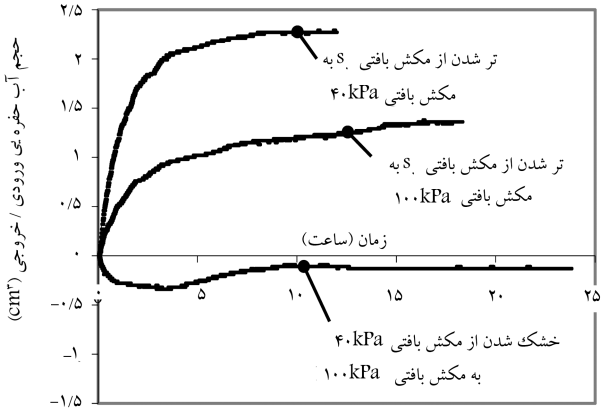
شکل، مقدار فشار آب حفره‌یی بالا و پایین نمونه‌های خاک در لحظه‌ی تعادل تقریباً یکسان و مقدار متوسط مکش بافتی اولیه نمونه‌ی خاک برابر ۲۳۰ کیلو پاسکال است.

بعد از اندازه‌گیری مکش بافتی اولیه، نمونه‌های خاک با استفاده از روش جابجایی محوری و ترکردن به مقدار مکش بافتی ۱۰۰ کیلو پاسکال رسانیده شده‌اند که زمان رسیدن به تعادل بسته به ارتفاع نمونه‌ی خاک بین ۱۵ الی ۲۰ ساعت به طول انجامید (شکل‌های ۸ و ۹). سپس جریان آبی با اختلاف هد ۴۰ کیلوپاسکال درون نمونه‌ی خاک برقرار شد. برای این امر مقدار فشار هوای حفره‌یی خاک ثابت و فشار آب حفره‌یی بالا و پایین نمونه‌ی خاک به‌ترتیب ۲۰ کیلو پاسکال کاهش و افزایش داده شد که باعث ثابت‌ماندن مقدار متوسط مکش بافتی نمونه‌های خاک شده است. این روش نیز در برخی تحقیقات انجام‌شده مورد استفاده قرار گرفته است.[۲و۱۲] مطابق شکل ۱۰، با گذشت زمان دبی لحظه‌یی جریان آب ورودی و خروجی نمونه‌های خاک به یک مقدار ثابت و نزدیک به هم تمایل پیدا می‌کند که این زمان به ارتفاع نمونه‌ی خاک وابسته است. بعد از رسیدن دبی جریان آب ورودی و خروجی به حالت تعادل، اختلاف هد جریان به مقدار ۸۰ کیلو پاسکال افزایش داده شد تا تأثیر هد جریان بر روی نفوذپذیری آب بررسی شود.

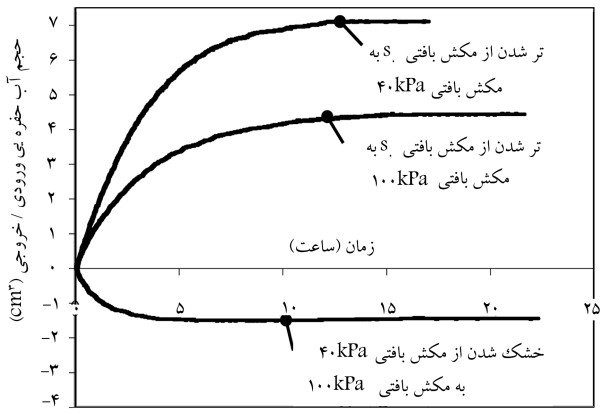
برای بررسی تأثیر رفتار وابسته به تاریخچه‌ی منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک، آزمایش‌های مذکور در مکش‌های بافتی ۴۰ کیلو پاسکال (بر روی منحنی ترشدگی)



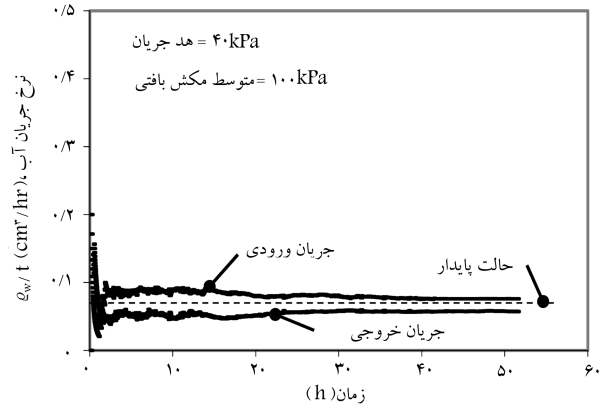
شکل ۷. تغییرات فشار آب حفره‌یی نمونه‌های خاک در اندازه‌گیری مکش بافتی اولیه.



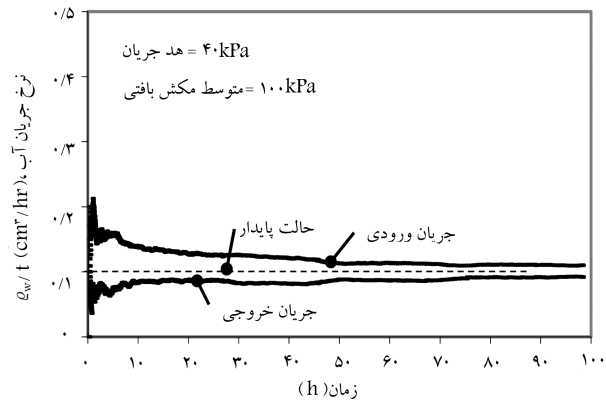
شکل ۸. تغییرات حجم آب ورودی/خروجی نمونه‌های خاک به ارتفاع ۱ سانتی‌متر در بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی.



شکل ۹. تغییرات حجم آب ورودی/خروجی نمونه‌های خاک به ارتفاع ۳ سانتی‌متر در بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی.



الف) ارتفاع ۱ سانتی متر ؛



ب) ارتفاع ۳ سانتی متر.

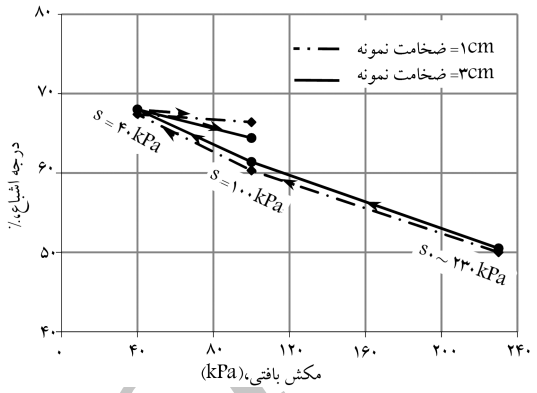
شکل ۱۰. تغییرات دبی لحظه‌یی آب ورودی/خروجی نمونه‌های خاک بر روی بازه‌ی ترشدگی.

و ۱۰۰ کیلو پاسکال (بر روی منحنی خشک‌شدگی) بر روی نمونه‌های ۱ و ۳ سانتی‌متری در دو هد جریان ۴۰ و ۸۰ کیلو پاسکال انجام شده‌اند. در آزمایش‌های با مکش بافتی ۴۰ کیلو پاسکال، در ابتدا نمونه‌های خاک به مکش بافتی ۱۰۰ کیلو پاسکال رسانده شده، سپس با ترکردن مکش بافتی آن‌ها به مقدار ۴۰ کیلو پاسکال کاهش یافته و مقدار نفوذپذیری خاک در دو هد جریان مختلف بررسی شده است. در نمونه‌های خاک با مکش بافتی ۱۰۰ کیلو پاسکال در مسیر خشک‌شدگی، با

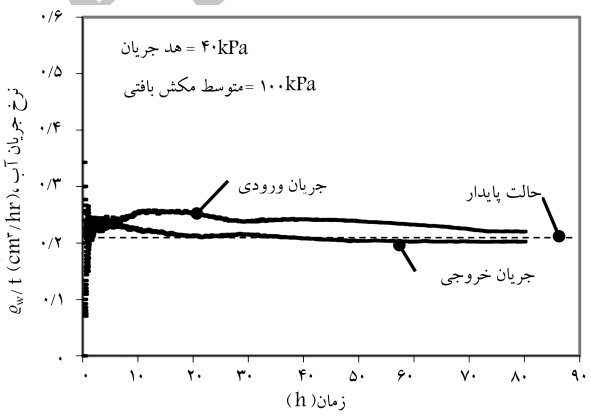
www.SID.ir

رسانیدن مکش بافتی اولیه‌ی خاک به مقدار ۴۰ کیلو پاسکال، با کاهش فشار آب حفره‌یی و خشک‌کردن مکش بافتی نمونه‌های خاک به مقدار ۱۰۰ کیلو پاسکال افزایش یافته و ضریب نفوذپذیری در مقادیر مختلف هد جریان اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱۱، تغییرات مکش بافتی و درجه‌ی اشباع در بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی، برای نمونه‌های با ارتفاع ۱ و ۳ سانتی‌متری ترسیم شده است.

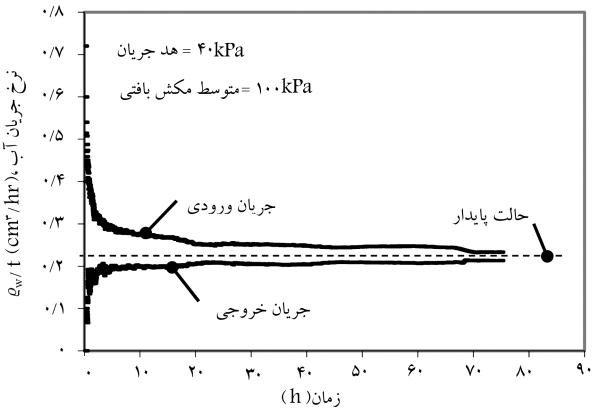
مقدار ضریب نفوذپذیری نمونه‌های خاک به ارتفاع ۱ سانتی‌متر با مکش بافتی



شکل ۱۱. تغییرات مکش بافتی و درجه‌ی اشباع نمونه‌های خاک در بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی.



الف) ۱۰۰ کیلوپاسکال؛



ب) ۲۰۰ کیلوپاسکال.

شکل ۱۲. تغییرات دبی لحظه‌یی آب ورودی/خروجی نمونه‌های خاک بر روی منحنی اصلی ترشدگی در تنش‌های تحکیمی.

اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال (بر روی منحنی ترشدگی) نیز در دو مقدار تنش‌های تحکیمی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال اندازه‌گیری شده است. این آزمایش‌ها در هد جریان ۴۰ کیلو پاسکال انجام شده‌اند. برای این امر با رسانیدن نمونه‌های خاک به مکش بافتی ۱۰۰ کیلو پاسکال، تنش‌های تحکیمی همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال بر نمونه‌های خاک وارد شده است. در طول این مرحله، به فازهای آب و هوای حفره‌یی اجازه‌ی زهکشی داده شده و تغییر حجم کل نمونه‌ی خاک نیز با اندازه‌گیری جریان آب ورودی/خروجی به درون سلول دستگاه اندازه‌گیری شده است. با اتمام مرحله‌ی تحکیم (معمولاً ۲۴ ساعت)، جریان آبی به اختلاف هد ۴۰ کیلو پاسکال درون نمونه‌های خاک ایجاد شده و تا رسیدن دبی جریان لحظه‌یی به حالت تعادل ادامه داده شده است. در شکل ۱۲، تغییرات دبی جریان لحظه‌یی برای تنش‌های تحکیمی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال ترسیم شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۰الف و ۱۲ مشاهده می‌شود که زمان برقراری تعادل جریان با افزایش تنش‌های تحکیمی و متراکم‌ترشدن خاک افزایش می‌یابد.

محاسبه‌ی ضریب نفوذپذیری آب

روش‌های اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع را می‌توان به روش‌های مستقیم (آزمایشگاهی) و غیرمستقیم (با استفاده از روش‌های تخمینی) تقسیم کرد. روش‌های اندازه‌گیری مستقیم ضریب نفوذپذیری آب درون خاک را نیز می‌توان به دو دسته‌ی پایدار (مستقل از زمان) و یا ناپایدار (وابسته به زمان) طبقه‌بندی کرد.[۵] در این مطالعه، از روش مستقیم پایدار برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری آب درون خاک استفاده شده است. در این حالت مقادیر هد جریان و مکش بافتی در حین اندازه‌گیری مکش بافتی ثابت‌اند و شرایط حالت پایدار با نزدیک‌شدن جریان ورودی به نمونه با جریان خروجی از نمونه برقرار می‌شود.

برخی پژوهشگران اظهار کرده‌اند که قانون دارسی برای جریان آب در خاک‌های غیراشباع نیز برقرار است (رابطه‌ی ۱):[۱۷،۱و۱۹]

$$v = ki \qquad (۱)$$

که در آن v سرعت جریان، k ضریب نفوذپذیری و i شیب هیدرولیکی جریان است.

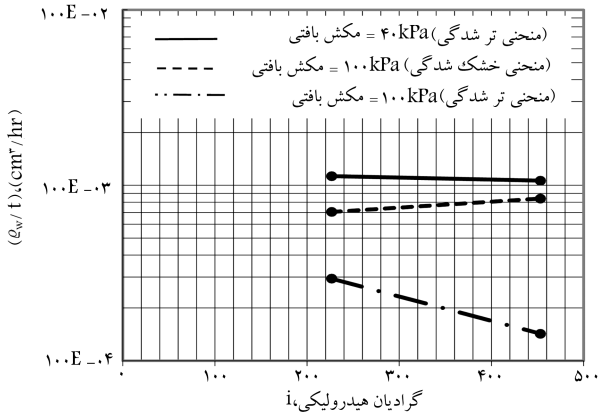
براساس تحقیقات انجام شده استفاده از شیب‌های هیدرولیکی کم برای اندازه‌گیری مقادیر پایین ضریب نفوذپذیری در خاک‌های غیراشباع امر صحیحی نخواهد بود که این امر به‌واسطه‌ی تغییرات غیرخطی نرخ جریان (نسبت دبی لحظه‌یی به شیب هیدرولیکی) در برابر شیب هیدرولیکی است.[۲۰]

در شکل ۱۳، صحت قانون دارسی برای آزمایش‌های انجام‌گرفته در این مطالعه در مقیاس نیمه لگاریتمی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات نسبت نرخ جریان در برابر شیب هیدرولیکی در خاک مورد مطالعه تقریباً خطی و صحت قانون دارسی معتبر است.

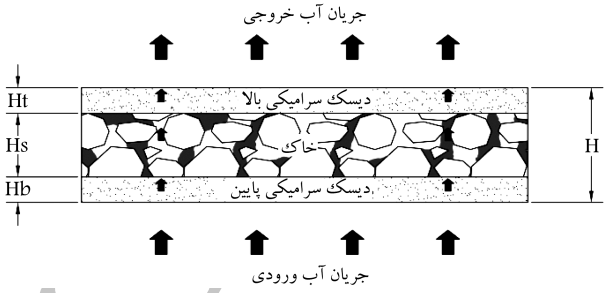
با توجه به مقادیر پایین ضریب نفوذپذیری دیسک‌های سرامیکی و احتمال تأثیر در تعیین ضریب نفوذپذیری آب درون خاک، در محاسبات انجام‌شده تأثیر ضریب نفوذپذیری دیسک‌های سرامیکی نیز در نظر گرفته شده و از یک سیستم ۳ لایه مطابق شکل ۱۴ در محاسبات استفاده شده است. این روش در مطالعات گذشته نیز استفاده شده است.[۱۲]

مطابق شکل ۱۴، سرعت جریان در راستای عمودی (v) برای همه‌ی لایه‌ها یکسان است و افت هد کل (h) به‌صورت مجموع افت کل در هر سیستم انفرادی

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۳. رابطه‌ی میان نرخ جریان و شیب هیدرولیکی.



شکل ۱۴. سیستم سه لایه‌ی دیسک سرامیکی ـ خاک ـ دیسک سرامیکی.

تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۲):

$$v = v_b = v_s = v_t, \qquad h = h_b + h_s + h_t \tag{۲}$$

که در آن v_b سرعت جریان عبوری از دیسک سرامیکی پایین، v_s سرعت جریان عبوری از نمونه‌ی خاک، v_t سرعت جریان عبوری از دیسک سرامیکی بالا، h_b افت هد جریان عبوری از دیسک سرامیکی پایین، h_s افت هد جریان عبوری از نمونه‌ی خاک و h_t افت هد جریان عبوری از دیسک سرامیکی بالایی است.

با توجه به صحت قانون دارسی (رابطه‌ی ۱) و وضعیت سرعت و هد جریان عبوری از سیستم دیسک سرامیکی ـ نمونه‌ی خاک ـ دیسک سرامیکی، ضریب نفوذپذیری آب درون خاک، K_w، را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه کرد:

$$K_w = -\frac{H_S}{\frac{H}{K} - (\frac{H_t}{K_t} + \frac{H_b}{K_b})} \tag{۳}$$

که در آن H_S ارتفاع نمونه‌ی خاک، H_t ضخامت دیسک سرامیکی بالایی، H_b ضخامت دیسک سرامیکی پایینی، H ارتفاع کل سیستم شامل ضخامت دیسک‌های سرامیکی و نمونه‌ی خاک، K_t ضریب نفوذپذیری دیسک بالایی، K_b ضریب نفوذپذیری دیسک پایینی است. K نیز ضریب نفوذپذیری سیستم سه لایه‌یی بوده که با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{Q_w}{Ait} \tag{۴}$$

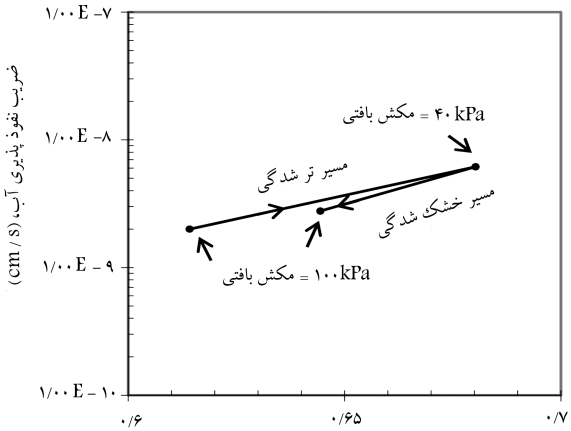
که در آن Q_W جریان حجمی آب در مدت زمان t، i شیب هیدرولیکی جریان، A سطح مقطع عرضی نمونه‌ی خاک است. مقادیر ضریب نفوذپذیری به‌دست‌آمده در رابطه‌ی ۴ با توجه به دمای محیط برای دمای استاندارد ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مطابق استاندارد ASTM D-۲۴۳۴ اصلاح شده‌اند.

برای تعیین ضریب نفوذپذیری دیسک‌های سرامیکی، جریانی با هد ۴۰ و ۸۰ کیلوپاسکال از درون آن‌ها عبور داده شده است که دبی لحظه‌یی جریان بعد از یک ساعت ثابت شده و مقدار ضریب نفوذپذیری اشباع دیسک‌ها به‌طور متغیر از $۱٫۲۶ \times ۱۰^{-۶}$ تا $۱٫۵۳ \times ۱۰^{-۶}$ سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. در محاسبات انجام‌شده در رابطه‌ی ۳ مقدار متوسط ضریب نفوذپذیری اشباع دیسک‌ها ($۱٫۴ \times ۱۰^{-۶}$) استفاده شده است.

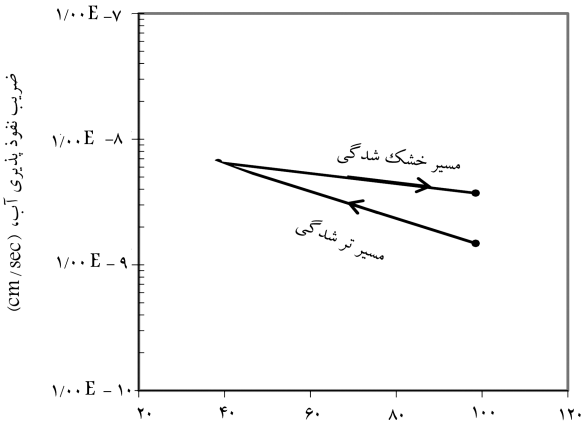
تأثیر رفتار تاریخچه‌یی منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک بر روی ضریب نفوذپذیری

از جمله عوامل مؤثر بر روی وضعیت جریان آب در خاک‌های غیراشباع، درجه‌ی اشباع است و مطالعات متعددی نیز بر روی این امر انجام شده است.[۲۱و۲۲] در محدوده‌ی تغییرشکل‌های کوچک و تراکم ثابت خاک، تغییرات مکش بافتی باعث تغییر درجه‌ی اشباع خاک می‌شود که این امر با استفاده از منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک بیان می‌شود.

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک موردمطالعه در مقادیر مختلف مکش بافتی و درجه‌ی اشباع برای بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی ترسیم



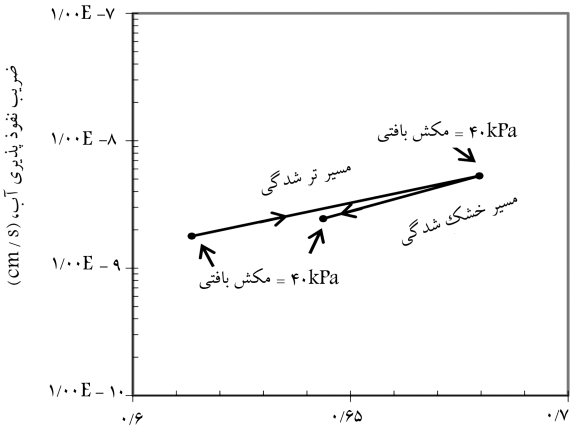
الف) درجه اشباع ؛



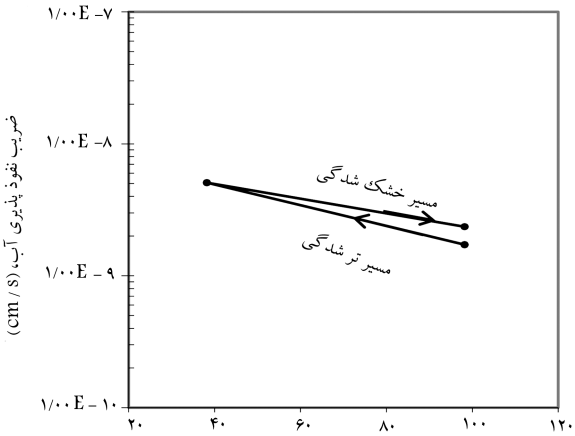
ب) مکش بافتی (kPa).

شکل ۱۵. تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌ی خاک ۳ سانتی‌متری.

www.SID.ir



الف) درجه اشباع ؛



ب) مکش بافتی (kPa).

شکل ۱۶. تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌ی خاک ۱ سانتی متری.

شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و شکل‌های ۱۵الف و ۱۶الف مشاهده می‌شود که با افزایش درجه‌ی اشباع خاک، ضریب نفوذپذیری خاک نیز متناوباً در بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی افزایش یافته است. همچنین با توجه به اشکال ۱۵ب و ۱۶ب مشاهده می‌شود که با افزایش مکش بافتی ضریب نفوذپذیری خاک در هر دو بازه‌ی ترشدگی و خشک‌شدگی متناوباً کاهش یافته است. با مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق و نتایج به‌دست‌آمده‌ی برخی پژوهشگران،[۲و۱۲] بیانگر روند مشابهی برای تأثیر تغییرات مکش بافتی و درجه‌ی اشباع بر روی ضریب نفوذپذیری آب در خاک‌های مختلف است.

مطابق شکل‌های ۱۵ب و ۱۶ب مشاهده می‌شود که ضریب نفوذپذیری خاک در مکش بافتی ثابت ۱۰۰ کیلوپاسکال بر روی منحنی‌های ترشدگی و خشک‌شدگی متفاوت‌اند که این امر به واسطه‌ی رفتار تاریخچه‌یی در منحنی مشخصه‌ی آب ـخاک (شکل ۱۱) است. با دقت بیشتر در نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که مقدار ضریب نفوذپذیری خاک در مکش بافتی ثابت در بازه‌های خشک‌شدگی از مقدار متناظر در بازه‌های ترشدگی بیشتر است.

مطابق شکل ۱۱ در مقادیر ثابت مکش بافتی، مقدار درجه‌ی اشباع خاک در بازه‌های خشک‌شدگی بیشتر از بازه‌های ترشدگی است و حجم آب درون حفره‌های خاک بر روی منحنی خشک‌شدگی بیشتر از مقدار متناظر بر روی منحنی ترشدگی است که این امر باعث پیوستگی بیشتر آب درون حفره‌های خاک و بیشترشدن نفوذپذیری خاک نسبت به آب خواهد شد. درنتیجه ضریب نفوذپذیری خاک در بازه‌های خشک‌شدگی بیشتر از بازه‌های ترشدگی خواهد بود. درگذشته نیز مطالعات معدودی بر روی تأثیر رفتار تاریخچه‌یی منحنی مشخصه‌ی آب ـخاک بر ضریب نفوذپذیری آب انجام شده است،[۱۲] که یکی از بارزترین نتایج آن‌ها حاکی از بیشتربودن ضریب نفوذپذیری آب بر روی بازه‌های خشک‌شدگی منحنی مشخصه‌ی آب ـخاک است.

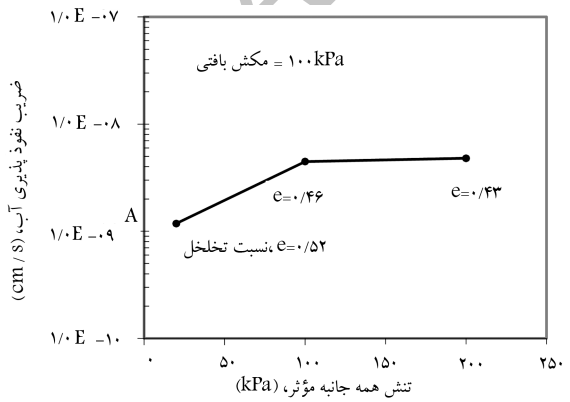
تأثیر فشار همه‌جانبه بر روی نفوذپذیری

برای بررسی تأثیر تنش‌های همه‌جانبه بر روی ضریب نفوذپذیری، آزمایش‌های مذکور بر روی نمونه‌های با ارتفاع ۱ سانتی‌متر در مکش بافتی ۱۰۰ کیلو پاسکال (بر روی منحنی ترشدگی) تحت هد جریان ۴۰ کیلو پاسکال در مقادیر فشار همه‌جانبه‌ی مؤثر ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال انجام شده‌اند.

در شکل ۱۲، تغییرات دبی لحظه‌یی در برابر زمان برای آزمایش‌های مذکور ترسیم و مقادیر ضریب نفوذپذیری خاک با توجه به رابطه‌های ۱ الی ۳ محاسبه و در شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار تنش‌های تحکیمی وارد بر خاک، ضریب نفوذپذیری افزایش یافته است.

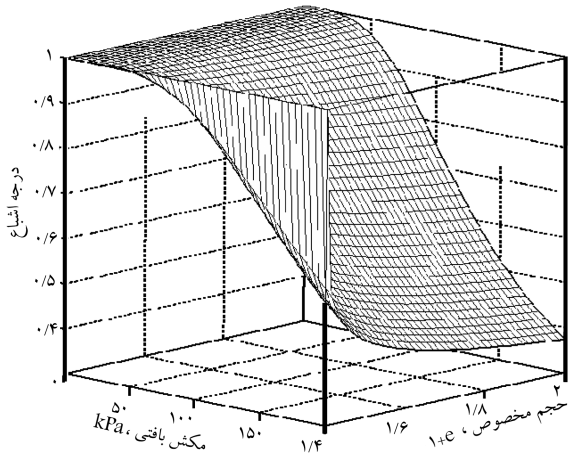
نتایج به‌دست‌آمده‌ی برخی پژوهشگران نیز حاکی از رابطه‌ی مستقیم بین تغییرات نسبت تخلخل و ضریب نفوذپذیری آب در خاک‌های اشباع است؛ و با افزایش تنش‌های تحکیمی مؤثر و متراکم‌ترشدن خاک، ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد.[۲۳و۲۴] اگرچه برای خاک موردمطالعه با متراکم‌ترشدن خاک در مکش بافتی ثابت ۱۰۰ کیلو پاسکال، ضریب نفوذپذیری خاک نیز افزایش یافته است که این امر به واسطه‌ی وابستگی منحنی مشخصه‌ی آب ـخاک به تراکم‌پذیری است که توسط برخی پژوهشگران نیز مشاهده شده است.[۲۵-۲۷] مطابق این امر در یک مکش بافتی ثابت، افزایش تراکم خاک باعث کاهش حجم هوای حفره‌یی و به‌تبع آن درجه‌ی اشباع خاک خواهد شد که این امر در مقادیر بالای مکش بافتی و متناظر با درجات اشباع پایین بارزتر است و باعث جابجاشدن منحنی مشخصه‌ی آب ـخاک به سمت بالا خواهد شد (شکل ۱۸). همان‌طورکه قبلاً اشاره شد، افزایش درجه‌ی اشباع باعث افزایش ضریب نفوذپذیری آب در خاک‌های غیراشباع خواهد شد که در شکل ۱۷ نیز مشاهده شده است.

در مطالعات گذشته تأثیر فشارهای همه‌جانبه بر روی پارامترهای هیدرولیکی



شکل ۱۷. تغییرات ضریب نفوذپذیری آب در برابر فشار همه‌جانبه.

Archive
www.SID.ir



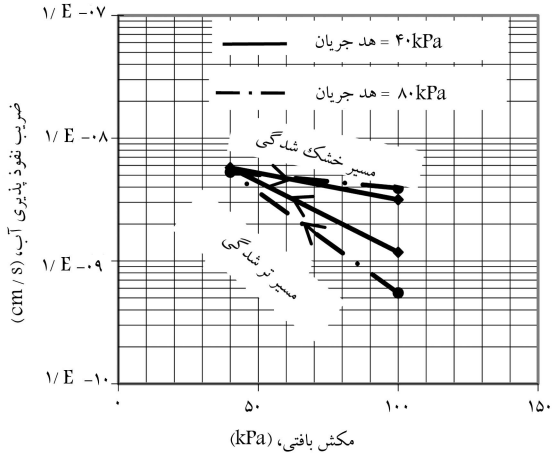
شکل ۱۸. تأثیر تراکم‌پذیری بر روی منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک برای خاک مورد مطالعه.[۱۸]

جریان آب در خاک فقط به‌طور محدود بر روی یک نوع خاک ماسه‌یی سیلت‌دار بررسی شده است و نتایج به‌دست‌آمده نیز حاکی از افزایش ضریب نفوذپذیری آب به واسطه‌ی افزایش تنش‌های تحکیمی برای برخی از مقادیر مکش بافتی است.[۲]

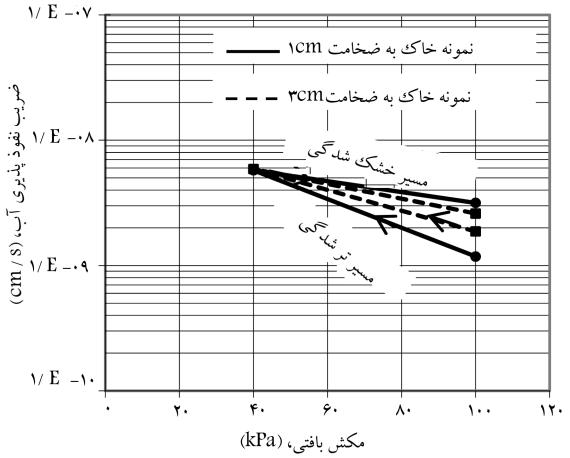
تأثیر هد جریان و ارتفاع نمونه بر روی نفوذپذیری

برای بررسی تأثیر هد جریان بر روی ضریب نفوذپذیری آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های به ارتفاع ۱ سانتی‌متر در دو هد جریان ۴۰ و ۸۰ کیلو پاسکال (معادل شیب هیدرولیکی به ترتیب ۲۲۶ و ۴۵۳) انجام شده‌اند که نتایج آن در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل تغییر هد جریان تأثیر چندانی بر روی ضریب نفوذپذیری خاک نداشته و قانون دارسی در محدوده‌ی شیب‌های هیدرولیکی موردمطالعه برقرار است. در پژوهشی نیز اثر تغییر هد جریان بر روی ضریب نفوذپذیری آب بررسی شده و در محدوده‌ی شیب‌های مورد مطالعه (بین ۳۰ الی ۱۴۰ برای خاک‌های مختلف) ضریب نفوذپذیری خاک مستقل از هد جریان و قانون دارسی برقرار بوده است.[۱۲]

از جمله عوامل مکانیکی مؤثر بر ضریب نفوذپذیری ارتفاع نمونه‌ی خاک است. در شکل ۲۰، تغییرات ضریب نفوذپذیری در برابر مکش بافتی برای نمونه‌های ۱ و



شکل ۱۹. تأثیر هد جریان بر روی ضریب نفوذپذیری.



شکل ۲۰. تأثیر ارتفاع نمونه‌ی خاک بر روی ضریب نفوذپذیری.

۳ سانتی‌متری ترسیم شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که تغییر ارتفاع نمونه‌ی خاک تأثیر چندانی بر روی ضریب نفوذپذیری خاک نداشته و فقط باعث افزایش زمان تعادل دبی لحظه‌یی جریان شده است.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار به بررسی تأثیر عوامل هیدرولیکی هد جریان و رفتار وابسته به تاریخچه‌ی منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک و عوامل مکانیکی تنش‌های همه‌جانبه و ارتفاع نمونه بر روی یک نوع خاک ماسه‌یی رس‌دار پرداخته شده است. برای این امر مجموعه‌یی از آزمایش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری با استفاده از یک دستگاه جدید انجام شد، که قابلیت بررسی مستقل شرایط مختلف هیدرولیکی و مکانیکی بر روی جریان آب و یا هوای حفره‌یی در خاک‌های غیراشباع را دارد. با استفاده از سلول دستگاه جدید می‌توان آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های خاک به قطر ۷ سانتی‌متر در محدوده‌ی ارتفاع ۱ الی ۳ سانتی متر انجام داد.

نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش درجه‌ی اشباع خاک ضریب نفوذپذیری خاک نیز متناوباً افزایش می‌یابد. همچنین مقدار ضریب نفوذپذیری خاک در یک مکش بافتی ثابت در بازه‌های خشک‌شدگی از مقدار متناظر آن در بازه‌های ترشدگی بیشتر است که این امر به‌دلیل رفتار تاریخچه‌یی در منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک است.

همچنین در یک مکش بافتی ثابت با افزایش تنش‌های تحکیمی وارد بر خاک، ضریب نفوذپذیری افزایش یافته است. افزایش تراکم خاک باعث کاهش حجم هوای حفره‌یی و به تبع آن درجه‌ی اشباع خاک خواهد شد که این امر در مقادیر بالای مکش بافتی و متناظر با درجات اشباع پایین بارزتر است و باعث جابجاشدن منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک به سمت بالا خواهد شد.

تغییر هد جریان و ارتفاع نمونه، تأثیر چندانی بر روی ضریب نفوذپذیری خاک نداشته و قانون دارسی در محدوده‌ی شیب‌های هیدرولیکی موردمطالعه برقرار است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در قالب یک پروژه‌ی پژوهشی با حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده که لازم است از همکاری معاونت محترم پژوهشی این دانشگاه تشکر و قدردانی شود.

Archive of SID
www.SID.ir

منابع (References)

1. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc, New York (1993).
2. Huang, S.; Fredlund, D.G. and Barbour, S.L. "Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxial permeameter", *Canadian Geotechnical Journal,* **35**, pp. 426-432 (1998).
3. Lobbezoo, J.P. and Vanapalli, S.K., *A Simple Technique for Estimating the Coefficient of Permeability of Unsaturated Soils*, Genie. Uottawa. Ca, Sai-JohnG (2002).
4. Gao, L.; Luan, M. and Yang, Q. "Experimental study on permeability of unsaturated remolded clay", *EJGE,* **13**, Bund. D., (2008).
5. Benson, C.H. and Gribb, M.M. "Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field", *Unsaturated Soil Engineering Practice, ASCE Geotech. Spec. Pub.*, **68**, ASCE New York, N.Y, pp. 113-168 (1997).
6. Ng, C.W.W. and Menzies, B., *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*, Taylor & Francis, London and New York (2007).
7. Klute, A. "Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils", *In Method of Soil Analysis,* Edited by C.A. Black, D.D. Evans, J.L. White, L.E. Esminger, and F.E. Clark. American Society of Agronomy, Monograph 9, Madison, Wis., **1**, pp. 253-261 (1965).
8. Barden, L. and Pavlakis, G. "Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soils", *Journal of Soil Science,* **22**(3), pp. 302-318 (1971).
9. Fleureau, J.M. and Taibi, S. "A new apparatus for the measurement of polyphasic permeabilities", *In Proceedings of the 1st International Conference on Environmental Geotechnics (ICEG),* Edmonton, Alta., 11–14 July, Edited by the Technical Program Committee of the 1st ICEG, BiTech Publishers, Richmond, B.C., **1**, pp. 227-232 (1994).
10. Dane, J.H.; Hofstee, C. and Corey, A.T. "Simultaneous measurement of capillary pressure, saturation and effective permeability of immiscible liquids in porous media", *Water Resources Research,* **34**(12), pp. 3687-3692 (1998).
11. Gan, J.K.M. and Fredlund, D.G. "A new laboratory method for the measurement of unsaturated coefficients of permeability of soils", *In Unsaturated soils for Asia,* Edited by H. Rahardjo, D. Toll, and E.C. Leong, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 381-386 (2000).
12. Samingan, A.S.; Leong, E.C. and Rahardjo, H. "A flexible wall permeameter for measurements of water and air coefficients of permeability of residual soils", *Canadian Geotechnical Journal,* **40**, pp. 559-574 (2003).
13. Siemens, G. and Baltz, J.A. "Development of a hydraulic conductivity apparatus for bentonite soils", *Can. Geotech. Journal,* **44**(8), pp. 997-1005 (2007).
14. Maqsoud, A.; Bussière, B.; Mbonimpa, M. and Aubertin, M. "Hysteresis effects on the water retention curve: A results and predictive models", *57th Canadian Geotechnical Conference,* Quebec, Session 3A, pp. 8-15 (2004).
15. Huat, Bujang B.K.; Ali, Faisal H.J. and Abdullah, A. "Field and laboratory suction- soil moisture relationship of unsaturated residual soils", *American Journal of Environmental Sciences,* **1**(1), pp. 34-40 (2005).
16. Lamara, M. and Derriche, Z. "Prediction of unsaturated hydraulic properties of dune sand on drying and wetting paths", *EJGE,* **13**, Bund. B., (2008).
17. Childs, E.C. and Collis-George, N. "The permeability of porous materials", *Proc. Royal Soc.,* **201A**, pp. 392-405 (1950).
18. Mirzaii. A. and Yasrobi, S.S. "Soil-water retention behaviour of an unsaturated kaolin-sand Mixture", *8th International Congress on Civil Engineering,* Shiraz University, Shiraz, Iran (2009).
19. Richards, L.A. "Capillary conduction of liquids through porous mediums", *Physics, NY,* **1**, pp. 318-333 (1931).
20. Hansbo, S. "Consolidation of clay, with special reference toinfluence of vertical drains", *Proceedings of the Swedish Geotechnical Institute,* **18**, Linkoping (1960).
21. Burdine, N.T., *Relative Permeability Calculations from Pore-size Distribution Data*, Trans. AIME (1952).
22. Brooks, R.H. and Corey, A.T. "Hydraulic properties of porous media", *Colorado State Univ. Hydrol. Paper,* **3**, pp. 27 (1964).
23. Kozeny, J. "Uber kapillare Leitung des Wassers im Boden", *Akademie der Wissesschaften,* Wien, **136**(2a), pp. 271 (1927).
24. Carmen, P.C., *Flow of Gases Through Porous Media*, Butterworths, London (1956).
25. Romero, E. and Vaunat, J. "Retention curves in deformable clays", *InExperimentalevidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils,* eds A. Tarantino and C. Mancuso, pp. 91- 106. Rotterdam: A.A. Balkema (2000).
26. Karube, D. and Kawai, K. "The role of pore water in the mechanical behaviour of unsaturated soils", *Geotech. Geolog. Engineering,* **19**(3-4), pp. 211-241 (2001).
27. Gallipoli, D.; Wheeler, S.J. and Karstunen, M. "Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil", *Ge'otechnique,* **53**(1), pp. 105-112 (2003).

Archive of SID

www.SID.ir