

طراحی و ساخت دستگاه آزمایشگاهی مطالعه‌ی فرسایش داخلی خاک در جریان دو بُعدی

وحید باجیده* (دکتری)

سیده‌جوادالدین میرمحمدحسینی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۵۱-۵۹

غالب مطالعات و معیارهایی که درخصوص ارزیابی وقوع فرسایش داخلی در خاک‌های مستعد ارائه شده است، در شرایط جریان‌های یک‌بُعدی (رو به بالا یا رو به پایین) که در جهت عمود بر لایه‌های خاک اعمال شده، بوده است. در حالی که در طبیعت و حتی خاکریزهای مهندسی لزوماً جهت جریان عمود بر جهت لایه‌ها نیست. از این رو در پژوهش حاضر، یک مدل فیزیکی ویژه با قابلیت مطالعه‌ی نمونه‌های تا اندازه‌ی شن و جهت‌های مختلف لایه‌ها و جریان، طراحی و ساخته شد. نتایج آزمایش‌هایی که بر روی خاک‌های با دانه‌بندی گسسته انجام شده است، نشان می‌دهد که مقادیر گزادان‌های بحرانی در خاک‌های با لایه‌های عمود بیشتر از خاک‌های با لایه‌های موازی است. همچنین با افزایش زاویه‌ی جریان نسبت به جهت ثقل، به‌طور کلی مقدار گزادان‌های بحرانی نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، جهت جریان و جهت لایه‌ها در گسترش زمانی و مکانی فرسایش داخلی، کاملاً مؤثر است.

واژگان کلیدی: فرسایش داخلی، دستگاه آزمایش، جهت جریان، جهت لایه‌ها، گزادان‌های بحرانی.

pachideh@aut.ac.ir
smmirhos@aut.ac.ir

۱. مقدمه

حالت‌های مختلف پدیده‌ی فرسایش داخلی، پیچیده و اندازه‌گیری و بررسی آن مشکل است. در نتیجه، این حالت‌ها را براساس شرایط حدی، نوع خاک و حالت جریان، مورد بحث، طبقه‌بندی و نام‌گذاری قرار می‌دهند. فرایند فرسایش داخلی را می‌توان به‌طور کلی به ۴ فاز تقسیم‌بندی کرد: (۱) شروع فرسایش، (۲) ادامه‌ی فرسایش (۳) گسترش فرسایش تا تشکیل مجرا (pipe) و (۴) شروع گسیختگی. از بین مراحل اخیر، آنچه که بیشتر به آن توجه و بررسی شده است، مرحله‌ی اول فرایند فرسایش داخلی، یعنی شروع فرسایش بوده است. در حقیقت تا شرایط لازم برای شروع فرسایش در خاکی فراهم نباشد، عملاً خاک پایدار خواهد ماند. بر این اساس، Fell and Fry and مکانیزم شروع فرسایش را به ۴ نوع تقسیم‌بندی کردند: (۱) فرسایش ناشی از تراوش متمرکز، (۲) فرسایش عقب‌رونده، (۳) فرسایش تماسی و (۴) ریزشویی.^[۱] عوامل مؤثر در فرسایش داخلی را می‌توان در ۳ گروه دسته‌بندی کرد: (۱) عوامل هندسی (مانند دانه‌بندی، اندازه‌ی دانه‌های خاک، اندازه و توزیع تخلخل خاک و...)،^[۲-۴] (۲) عوامل هیدرولیکی (مانند گزادان هیدرولیکی، سرعت جریان و جهت جریان) و (۳) عوامل مکانیکی (مانند تراکم، جهت لایه‌ها، چسبندگی، تنش و...). عوامل هندسی را می‌توان شرایط استعداد خاک، عوامل هیدرولیکی را شرایط وقوع (شروع) و عوامل مکانیکی را پارامترهای وقوع فرسایش داخلی دانست. در برخی مراجع،^[۱۱-۱۳] نیز عوامل هندسی و هیدرولیکی را با هم در نظر گرفته‌اند.

فرسایش داخلی، عبارت از انتقال بخشی از ذرات یک توده‌ی خاک در اثر جریان تراوش در داخل آن است. به خاک‌هایی که در آن‌ها استعداد وقوع فرسایش داخلی وجود دارد، ناپایدار داخلی گفته می‌شود. براساس آمارهای گردآوری شده توسط ICOLD، فرسایش داخلی یکی از عمده‌ترین عوامل تخریب سد‌های خاکی است. فاستر^۱ و همکاران (۲۰۰۰) با یک بررسی جامع به این نتیجه رسیدند که تخریب ۴۶٪ از سد‌ها مربوط به فرسایش داخلی بوده است.^[۱] علاوه بر این، امروزه با پیشرفت حفاری‌های زیرزمینی، مانند: تونل، گودبرداری و... به خصوص در محیط‌های شهری، یکی از خطرهای نگران‌کننده، وجود آب زیرزمینی و نشست در شبکه‌ی آب‌رسانی شهری است. گزارش‌های متعددی وجود دارد که نشان می‌دهد یکی از دلایل ریزش تونل‌های شهری و گودبرداری‌هایی که در زیر سطح آب قرار دارند، وقوع فرسایش داخلی است. در این گونه موارد، حفاری موجب ایجاد ناحیه‌ی زهکش و در نتیجه حرکت آب می‌شود که شرایط را برای انتقال ذرات ریز از درون توده‌ی خاک فراهم می‌کند. این مشکل در شهرهایی مثل تهران و در جریان حوادثی مانند تونل‌های «توحید» و «مشیریه» مشاهده شده است.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۲۸/۱۳۹۸، اصلاحیه ۱۱/۵/۱۳۹۹، پذیرش ۷/۵/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55119.2701

شرایط رخداد جریان‌های با جهت‌های مختلف و نیز در نمونه‌های ناهمسان خاک را داشته باشد، معرفی و نتایج برخی آزمایش‌های انجام شده با استفاده از دستگاه سه‌محوری کامل بررسی شده است.

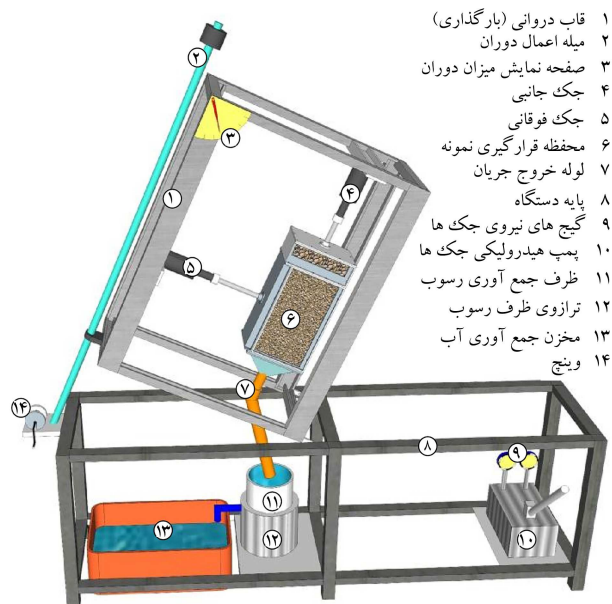
۲. جزئیات دستگاه مطالعه‌ی فرسایش داخلی در جریان

دو بُعدی

۱.۲. کلیات دستگاه

در شکل‌های ۲ و ۳، به ترتیب نمای شماتیک و حقیقی دستگاه مطالعه‌ی فرسایش داخلی نشان داده شده است. به‌طور کلی می‌توان اجزاء دستگاه را به ۳ بخش: مکانیکی، هیدرولیکی و کنترل و ابزار دقیق تقسیم کرد. مشخصات اصلی دستگاه عبارتند از:

- ابعاد نمونه‌ی قابل آزمایش: $400 \times 210 \times 140$ میلی‌متر،
- امکان نمونه‌سازی در دو جهت موازی و عمود بر جریان ورودی،



- ۱ قاب دروایی (بارگذاری)
- ۲ میله اعمال دوران
- ۳ صفحه نمایش میزان دوران
- ۴ چک جانی
- ۵ چک فوقانی
- ۶ محفظه قرارگیری نمونه
- ۷ لوله خروج جریان
- ۸ پایه دستگاه
- ۹ گنج‌های نیروی چک‌ها
- ۱۰ پمپ هیدرولیکی چک‌ها
- ۱۱ ظرف جمع‌آوری رسوب
- ۱۲ ترازوی ظرف رسوب
- ۱۳ مخزن جمع‌آوری آب
- ۱۴ وینچ

شکل ۲. نمای شماتیک و اجزاء مختلف دستگاه مطالعه‌ی فرسایش داخلی در جریان دو بُعدی.



شکل ۳. نمای حقیقی دستگاه مطالعه‌ی فرسایش داخلی در جریان دو بُعدی.

فرسایش داخلی انواع مختلفی دارد که هر کدام تابع پارامترهای گوناگونی هستند. از این رو بررسی آزمایشگاهی پدیده‌ی فرسایش داخلی، مستلزم محدود کردن گستردگی اشاره شده و تمرکز بر برخی پارامترها و مشخصات قابل بررسی است. از طرف دیگر، شرایط وقوع هر نوع فرسایش داخلی متفاوت است و به شرایط خاک، جریان و سازه یا توده‌ی مورد نظر بستگی دارد. در شکل ۱، برخی از نمونه‌های کاربرد آزمایش‌های مختلف با توجه به محل وقوع موضوع مورد بررسی آن‌ها مشاهده می‌شود.

دستگاه‌های آزمایشگاهی ساخته شده عمدتاً به سه دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند:

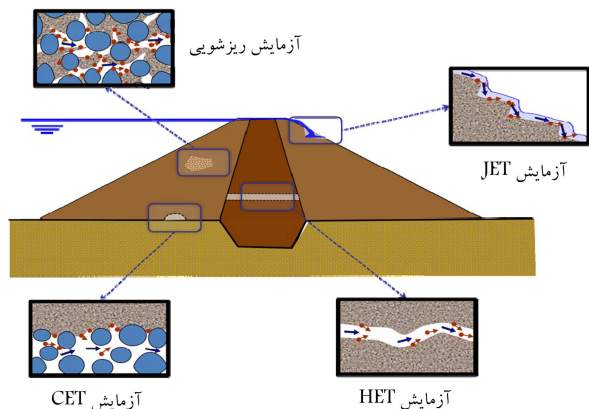
۱. دستگاه‌های مطالعه‌ی فرسایش ناشی از تراوش متمرکز (مانند آزمایش‌های: NEF^۲، HET^۳، SET^۴، CEF^۵ و پین‌هول)؛

۲. دستگاه‌های بررسی فرسایش داخلی المان خاک؛ [۱۹-۱۴]

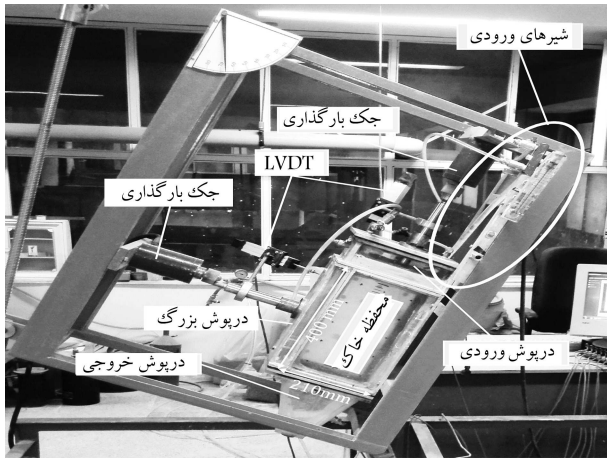
۳. دستگاه‌های سه‌محوری با قابلیت مطالعه‌ی فرسایش داخلی. [۲۷-۲۰]

مطالعات ساده‌ی فرسایش داخلی، عمدتاً براساس جریان‌های یک بُعدی قائم (رو به بالا یا رو به پایین) انجام شده است. در دستگاه‌های سه‌محوری به دلیل کوچک بودن ابعاد نمونه، امکان مطالعه‌ی خاک‌ها در محدوده‌ی ماسه‌ی متوسط تا شن وجود ندارد. ضمن آنکه همچنان جهت جریان در دستگاه‌های سه‌محوری در راستای قائم بوده است. ریچاردز و ردی^۶ (۲۰۱۰)، با اعتقاد به مؤثر بودن اثر زاویه‌ی جریان نسبت به امتداد قائم بر فرسایش داخلی خاک، دستگاه سه‌محوری کامل (TTPA)^۷ را ساختند. [۱۷] از قابلیت‌های دستگاه سه‌محوری کامل می‌توان به اعمال حالت‌های مختلف تنش به نمونه در سه جهت و ایجاد زاویه با افق اشاره کرد. کار آن‌ها را شاید بتوان نخستین اقدام برای انجام مطالعات دو بُعدی دانست.

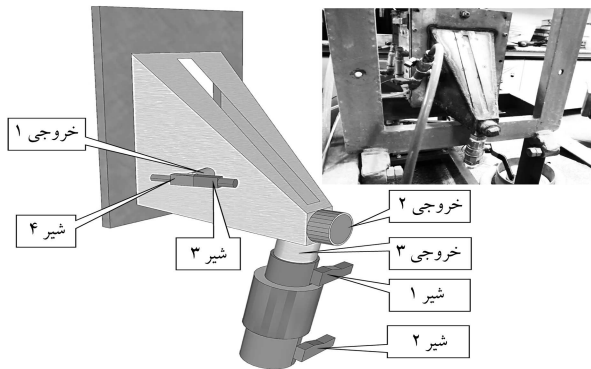
به‌طور کلی از جمله مهم‌ترین نواقص موجود در مطالعات پیشین، عدم توجه به نقش و تأثیر جهت جریان تراوش آب در خاک، اثر ناهمسانی (تفاوت خواص هیدرولیکی خاک در جهت‌های مختلف) و تا حدودی اثر شاخص خمیری در نحوه و میزان فرسایش داخلی در خاک بوده است. این در حالی است که در بسیاری از خاک‌ریزهای مهندسی، مانند: سدها و همچنین نهشته‌های طبیعی و سازندهای تکیه‌گاه سدها، لزوماً جهت جریان نسبت به لایه‌های خاک به صورت قائم (رو به بالا یا رو به پایین) نیست. از این رو به‌نظر می‌رسد در نظر گرفتن این عوامل می‌تواند اثر مشخصی در واقعی‌تر شدن معیارها و در پی آن کاهش ضرایب اطمینان‌های طراحی و در نتیجه هزینه‌های اجرایی پروژه‌ها داشته باشد. به همین علت در نوشتار حاضر، یک مدل فیزیکی که قابلیت انجام مطالعات فرسایش داخلی خاک‌ها در



شکل ۱. شرایط کاربرد انواع آزمایش‌های بررسی فرسایش داخلی در سدهای خاکی.



شکل ۴. اجزاء مختلف محفظه‌ی قرارگیری نمونه.



شکل ۵. درپوش قیفی شکل برای زوایای صفر تا ۹۰ درجه.



شکل ۶. درپوش خروجی برای زوایای ۹۰ تا ۱۸۰ درجه.

از یک مجرای مشترک خارج می‌شوند. در زوایای نزدیک به ۱۸۰ درجه، نمونه در تمام طول آزمایش به حالت اشباع باقی می‌ماند، لکن در زوایای کمتر از آن، بنابر اصول تراوش آب در خاک، ممکن است بخش‌هایی از نمونه از حالت اشباع خارج شوند. از این رو برای درپوش خروجی، یک کلاهک ساخته شده است، تا با حبس جریان، شرایط باقی‌ماندن نمونه در حالت اشباع را در همه‌ی زوایا برقرار کند. جنس درپوش و کلاهک از صفحات پلکسی‌گلس است.

۲.۲.۲. سیستم اعمال سربار

در سیستم اعمال سربار، امکان اعمال تنش در دو جهت به نمونه ایجاد شده است. برای این منظور از دو عدد جک هیدرولیکی با ظرفیت بیشینه‌ی ۵ تن و با دامنه‌ی

- امکان تغییر جهت جریان ورودی نسبت به راستای ثقل از صفر تا ۱۸۰ درجه،
- امکان اعمال گرادیان تا ۴۲ با دقت ۱ cm آب (۲/۵٪ گرادیان)،
- قابلیت اعمال روندهای مختلف گرادیان (بارگذاری هیدرولیکی).

۲.۲. بخش‌های مکانیکی دستگاه

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، دستگاه مطالعاتی فرسایش داخلی، شامل دو قاب فولادی صلب است:

۱. قابی که محفظه‌ی نمونه، جک‌های بارگذاری و شیرهای کنترلی ورودی در آن هستند و قابلیت دوران دارد (قاب بارگذاری)؛

۲. قابی که به عنوان پایه و نگه‌دارنده‌ی مجموعه‌ی دستگاه است (پایه).

۱.۲.۲. محفظه‌ی قرارگیری نمونه

نمونه‌ی خاک (با بیشینه‌ی ابعاد $۱۴۰ \times ۲۱۰ \times ۴۰۰$ میلی‌متر) در بخشی به نام «محفظه‌ی نمونه» ساخته شده است که از نظر جزئیات و نیاز به دقت در ساخت، مهم‌ترین بخش دستگاه محسوب می‌شود. بخش ذکر شده، به‌طور کلی از قسمت‌های سلول، درپوش فوقانی (بزرگ)، درپوش ورودی (کوچک) و درپوش خروجی تشکیل شده است (شکل ۴). نمونه‌ی خاک در فضای داخل قطعه‌ی سلول قرار گرفت که از یک طرف با ورق‌های شفاف پلکسی‌گلس (وجوه ۴۰۰×۲۱۰ میلی‌متری) و از دو طرف با صفحات بارگذاری پوشیده شده بود. درپوش ورودی (کوچک) محل ورود جریان به نمونه، آرام‌سازی جریان و اعمال یکی از جهت‌های سربار است.

درپوش خروجی بسته به میزان دوران نمونه و شرایط خروجی جریان، در حالت‌های مختلف ساخته شده است که در حقیقت خروج جریان به همراه ذرات فرسایش‌یافته از این وجه صورت پذیرفته است. در زوایای صفر تا ۹۰ درجه، مطابق شکل ۵، یک درپوش قیفی‌شکل از جنس استیل با سه خروجی (یک خروجی برای ورود و خروج آب (شماره‌ی ۱) و دو خروجی برای خروج و جمع‌آوری ذرات فرسایش‌یافته (شماره‌های ۲ و ۳)) طراحی و ساخته شد. در هر آزمایش، بسته به زاویه‌ی آن، فقط یکی از دو خروجی مربوط به ذرات فرسایش‌یافته باقی‌ماند. در انتهای دو خروجی مذکور، جهت کنترل فرایند برداشت و ثبت ذرات فرسایش‌یافته در حین آزمایش، یک مسیر لوله‌یی با دو شیر تعبیه شده است. نحوه‌ی استفاده از خروجی‌های اخیر به این صورت است که به‌عنوان مثال برای زاویه‌ی ۹۰ درجه، خروجی ۲ بسته و خروجی ۳ باز می‌شود. در حین فرایند اشباع، شیرهای ۱ و ۴ باز و شیرهای ۲ و ۳ بسته می‌شوند. پس از اشباع‌سازی، جهت تخلیه‌ی ذراتی که در حین اشباع‌سازی از نمونه خارج و در مخزن لوله‌یی کوچک بین شیرهای ۱ و ۲ انباشته شده‌اند، شیر ۱ بسته و شیر ۲ باز می‌شود. مجدداً با شروع آزمایش، شیر ۲ بسته و شیر ۱ به آرامی باز می‌شود، تا ضمن حفظ شرایط اشباع نمونه، امکان جمع‌آوری ذرات فرسایش‌یافته در حین آزمایش نیز وجود داشته باشد. در حین آزمایش، هر گاه مخزن از رسوبات پُر شد، مجدداً شیر ۱ بسته و شیر ۲ به آرامی باز و رسوب‌ها تخلیه و وارد ظرف جمع‌آوری رسوب‌ها می‌شوند. این فرایند تا انتهای آزمایش ادامه می‌یابد. باید توجه شود که در هر صورت، خروجی ۱ که مربوط به خروج جریان از نمونه است، در تمام طول آزمایش باز می‌ماند. برای زاویه‌ی ۴۵ درجه، یا زوایای کمتر نزدیک به آن، خروجی ۳ بسته و خروجی ۲ باز می‌شود. اما نحوه‌ی استفاده از شیرهای ۱ و ۲ تفاوتی با حالت قبل ندارد.

شکل و عملکرد درپوش خروجی برای آزمایش‌های با زاویه‌ی ۹۰ تا ۱۸۰ درجه با حالت قبل متفاوت است (شکل ۶). در این حالت جریان و ذرات فرسایش‌یافته

ورود و خروج جریان بستگی دارد. حس‌گرهای P_1 و P_2 نسبت به شرایط آزمایش می‌توانند درون نمونه، بیرون از آن، و در حالت فشار صفر قرار بگیرند. با استفاده از روش اخیر می‌توان تمامی حالت‌های تغییرات فشار در واقعیت را مدل‌سازی کرد. مزایای روش استفاده شده عبارت‌اند از:

- موجود بودن و قیمت مناسب کلیه قطعات سیستم در بازار ایران،
- امکان کنترل دقیق فشار آب (با دقت ۱ cm آب)،
- امکان فرمان‌دهی و اجرای برنامه‌ی اعمال فشار،
- ایمن بودن سیستم و ملحقات آن،
- قیمت کمتر نسبت به گزینه‌های دیگر،
- امکان انجام تعمیرات و جایگزینی آسان، ارزان و سریع قطعات.

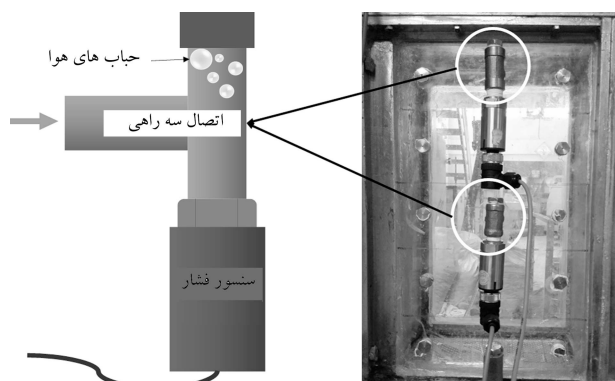
۴.۲. بخش‌های کنترلی و ابزار دقیق

بخشی از کنترل‌های هر آزمایش در دستگاه ذکر شده با استفاده از حسگرها و ابزار دقیق انجام می‌شود که مشخصات مهم‌ترین آن‌ها در ادامه معرفی شده است.

۱.۴.۲. اندازه‌گیری فشار آب در خاک

در دستگاه آزمایش ذکر شده، با استفاده از ۴ حسگر، فشار با ظرفیت 400 kPa و ولتاژ ۴-۲۰ میلی‌آمپر و دقت 1 kPa ، میزان فشار و در نتیجه گرادیان در هر نقطه قابل اندازه‌گیری خواهد بود. دو حسگر به منظور تنظیم فشار یا گرادیان میانگین ورودی (P_1 و P_2) و ۲ حسگر دیگر (P_3 و P_4) جهت اندازه‌گیری فشار در طول نمونه قرار دارند. از حس‌گرهای P_3 و P_4 نیز جهت کنترل اشباع شدن کامل نمونه (قبل از آزمایش) و همچنین پایش تغییرات فشار ناگهانی در نمونه در طول آزمایش استفاده می‌شود.

یکی از خطاهای مشکل‌ساز در اندازه‌گیری فشار آب در خاک، وجود حباب‌های هواست. از آنجا که حباب‌های هوا تراکم‌پذیر هستند، لذا تجمع آن‌ها در دهانه‌ی حسگر موجب ایجاد خطا در قرائت فشار می‌شود. از طرف دیگر، با باقی ماندن حباب هوا در دهانه‌ی حسگر، لازم است که محل اتصال حسگر به جریان آب باز، حباب‌ها خارج و مجدداً متصل شود که این کار موجب ایجاد خطا در قرائت فشار خواهد شد. روش پیشنهادی جهت حذف یا کاهش خطای ذکر شده، استفاده از اتصال به صورت شکل ۸ است، که در آن، حسگر فشار در زیر تراز خط مرکزی اتصال نصب می‌شود و با توجه به اینکه حباب‌های هوا در بالای خط مرکزی قرار می‌گیرد، لذا



شکل ۸. اتصال پیشنهادی حسگرهای فشار جهت کاهش اثر حباب‌های محلول در آب.

جابه‌جایی بیشینه‌ی ۷ سانتی‌متر استفاده شده است که نیروی لازم برای اعمال سربار با استفاده از یک پمپ هیدرولیکی با قابلیت سوئیچ جک‌ها تأمین می‌شود. دلیل استفاده از سیستم مذکور که نیاز به کنترل پیوسته و دستی مقدار فشار جک‌ها دارد^۷، در مقایسه با سیستم پاورپک هیدرولیکی که به صورت اتوماتیک، مقدار فشار در جک‌ها را کنترل و تأمین می‌کند، قیمت بسیار پایین‌تر است.

۳.۲. بخش‌های هیدرولیکی دستگاه

در دستگاه مطالعه‌ی فرسایش داخلی ذکر شده، بخش هیدرولیکی به دو قسمت سیستم شیرهای کنترلی ورودی به نمونه و سیستم تأمین و کنترل فشار آب تقسیم می‌شود. شیرهای کنترلی، شامل کنترل‌کننده‌ی دبی (فلوکنترلر)، شیرهای ساده‌ی ورودی و شیر هواگیری هستند.

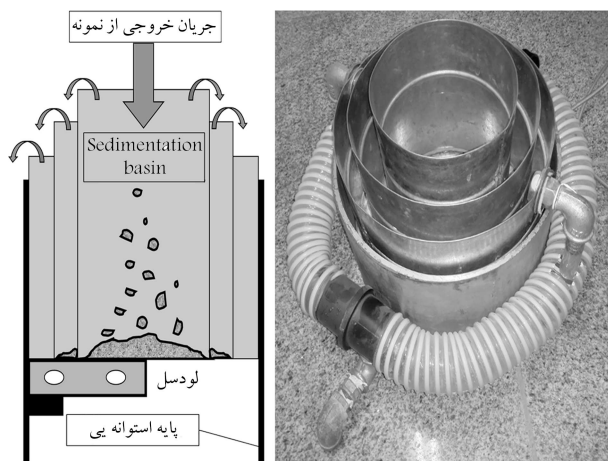
در پژوهش حاضر، پس از بررسی‌های متعدد جهت کنترل و اعمال فشار آب ورودی به نمونه، روش جدیدی استفاده شده است که تنظیم فشار به صورت کنترل ارتفاع آب در لوله‌ی بلند و بر مبنای گرادیان (فشار) متوسط در نمونه انجام می‌شود. در سیستم اشاره شده، لوله‌ی به قطر 110 mm و به ارتفاع 17 m متر (معادل 170 kPa فشار) بر روی دیوار ساختمان آزمایشگاه نصب شده است (شکل ۷). در پایین لوله، یک شیر برقی^۸ به عنوان پُرکننده و یک شیر برقی به عنوان تخلیه‌کننده با ظرفیت 1 lit/min نصب شده است. همچنین بین منبع تأمین جریان (مثلاً آب شهری) و شیر پُرکننده، یک پمپ هیدرولیکی با قدرت 400 kPa قرار داده شده است تا در صورت کاهش فشار آب شهری یا نیاز به فشارهای بالا در آزمایش، فشار موردنظر تأمین شود. به صورت پیش‌فرض در برنامه‌ی رایانه‌ی، حسگرهای P_1 و P_2 جهت کنترل فشار متوسط در نمونه تعریف شده‌اند. در روش اخیر، کاربر مشخصات گام‌های فشار در آزمایش، شامل: تعداد، مقدار فشار در هر گام و مدت هر گام را در برنامه مشخص می‌کند. برنامه مقدار حسگر فشار P_2 را می‌خواند و آن را به مقدار مشخص شده در آن گام اضافه می‌کند و مقدار حاصل را با مقدار موجود حسگر فشار P_1 مقایسه می‌کند؛ اگر فشار قرائت شده از مقدار لازم کمتر باشد، به بخش کنترل دستگاه، فرمان باز کردن شیر برقی پُرکننده را می‌دهد (تا فشار افزایش یابد) و اگر بیشتر باشد، شیر برقی تخلیه‌کننده روشن می‌شود (تا فشار کاهش یابد). به این ترتیب همواره مقدار گرادیان (فشار) متوسط در نمونه با مقدار تعیین شده برابر خواهد بود. محل نصب حسگرهای P_1 و P_2 به زاویه‌ی آزمایش نسبت به افق و شرایط



شکل ۷. جزئیات سیستم تأمین فشار آب (شامل: شیرهای برقی، پمپ و لوله‌ی بلند ۱۷ متری).

جدول ۱. مشخصات و نتایج آزمایش‌های فرسایش داخلی در جریان دو بُعدی.

شماره‌ی آزمایش	جهت لایه‌ها	زاویه‌ی جریان ورودی	گرادیان متوسط بیشینه	پارامترهای بحرانی			
				آستانه		وقوع	
				v_t (cm/s)	i_o	v_o (cm/s)	i_t
۱	عمود	صفر	۶٫۷	۰٫۳۷۷	۰٫۴۸	۰٫۴۰۴	۰٫۵۰
۲	موازی	صفر	۱۰٫۰	۰٫۰۹۵	۰٫۵۲	۰٫۹۵	۰٫۵۲
۳	عمود	۹۰	۱۰٫۲	۱٫۶۳۲	۰٫۱۸۵	۲٫۲۸۳	۰٫۲۰۹
۴	موازی	۹۰	۷٫۶	۱٫۹۲۳	۰٫۱۸۶	۲٫۵۰۰	۰٫۲۱۵
۵	عمود	۱۸۰	۱۶٫۳	۱٫۵۹۲	۰٫۴۱	۲٫۰۷۵	۰٫۴۹
۶	موازی	۱۸۰	۲۹٫۵	۰٫۷۷۴	۰٫۸۱	۱٫۳۳۸	۰٫۱۲۳



شکل ۹. ظرف اندازه‌گیری وزن ذرات فرسایش یافته.

۴.۴.۲. بخش کنترل و پایش

داده‌های مربوط به حسگرها و ابزار دقیق الکترونیکی توسط یک دیتالاگر جمع‌آوری و در برنامه‌ی رایانه‌یی مخصوص قابل مشاهده و ذخیره‌سازی است. دیتالاگر از نوع ۱۶ کاناله با قابلیت تنظیم نرخ ثبت داده‌های مختلف از یک داده در چند دقیقه تا چند صد داده در ثانیه است، که در مطالعات حاضر داده‌ها با نرخ ۵ داده در هر دقیقه ثبت شده است. همچنین با استفاده از برنامه‌ی مذکور می‌توان بارگذاری هیدرولیکی و میزان اعمال فشار (گرادیان) در هر آزمایش را کنترل و تعیین کرد.

۳. آزمایش‌های فرسایش داخلی

به منظور بررسی اثر جهت جریان و جهت لایه‌ها بر چگونگی وقوع فرسایش داخلی در خاک، تعداد ۶ آزمایش مطابق جدول ۱ در شرایط بدون اعمال سربار (و در نتیجه بدون اندازه‌گیری تغییرشکل خاک) انجام شد که در آن:

برخورد آن‌ها با دهانه‌ی حسگر به میزان کمینه خواهد رسید. هر از چند گاهی نیز می‌توان با باز کردن شیر (یا با استفاده از شیر یا پیچ تخلیه‌ی هوا)، حباب‌های محبوس را خارج کرد.

۲.۴.۲. اندازه‌گیری تغییرشکل‌های خاک

تغییرشکل (نشست) خاک در دو جهت با استفاده از دو LVDT با بیشینه‌ی دامنه‌ی جابه‌جایی ۱۰۰ mm و دقت ۰٫۱ mm اندازه‌گیری شده است. هر یک از حسگرهای مذکور با استفاده از پایه‌ی مخصوص به میله‌های بارگذاری قائم و جانبی متصل شده است. نتایج اندازه‌گیری حسگرهای اخیر هم به صورت تغییرمکان و هم به صورت کرنش در نرم‌افزار قابل مشاهده است.

۳.۴.۲. ظرف اندازه‌گیری وزن ذرات فرسایش یافته خروجی از نمونه

یکی از داده‌های قابل بررسی در آزمایش‌های فرسایش داخلی، میزان و نرخ خروج ذرات فرسایش یافته در طول آزمایش است. از جمله بهترین روش‌های اندازه‌گیری و ثبت داده‌های مربوط به ذرات فرسایش یافته، استفاده از کدورت‌سنج برخط است. لکن قیمت حسگرهای مذکور بسیار بالاست. از این رو در دستگاه آزمایش یک طرف مخصوص جهت ثبت وزن ذرات فرسایش یافته ساخته شد. مطابق شکل ۹، این ظرف از بخش‌های: حوضچه‌های ته‌نشینی، پایه‌ی استوانه‌یی و لودسل (با ظرفیت ۱۵kg) تشکیل شده است. در طراحی حوضچه‌های ته‌نشینی از اصول رسوب جامدات معلق در سیال‌ها استفاده شده است که شامل سه استوانه با قطر و ارتفاع مختلف که در درون هم قرار می‌گیرند، است. جریان خروجی از قیف دستگاه وارد استوانه‌ی مرکزی می‌شود و پس از آن به استوانه‌ی میانی و سپس وارد استوانه‌ی خارجی و از آنجا از طریق دو مجرای در نظر گرفته شده به سیستم اندازه‌گیری دبی متصل می‌شود. بدین ترتیب با اطمینان می‌توان گفت که بیشتر ذرات خاک معلق در جریان خروجی در طول یک آزمایش ته‌نشین و جمع‌آوری می‌شوند. نکته‌ی قابل توجه آن است که قبل از شروع آزمایش، کل ظرف ته‌نشینی از آب پر می‌شود، لذا پس از ته‌نشینی ذرات، تغییرات نیروی لودسل نشان‌دهنده‌ی تغییرات در وزن غوطه‌وری رسوب‌های ته‌نشینی خواهد بود.

جدول ۲. مشخصات بارگذاری هیدرولیکی آزمایش‌ها.

گام	فشار ورودی (cm)	گرادپایان	گام	فشار ورودی (cm)	گرادپایان
۱	۱۰	۰٫۲۵	۸	۱۵۰	۲٫۷۵
۲	۲۰	۰٫۵	۹	۲۲۵	۳٫۷۵
۳	۳۰	۰٫۷۵	۱۰	۳۵۰	۵٫۶۳
۴	۴۰	۱٫۰۰	۱۱	۵۰۰	۸٫۷۵
۵	۶۰	۱٫۲۵	۱۲	۷۰۰	۱۲٫۵۰
۶	۸۰	۱٫۵۰	۱۳	۹۲۵	۱۷٫۵
۷	۱۱۰	۲٫۰۰	۱۴	۱۲۰۰	۲۳٫۱۳

۱.۳. نتایج آزمایش‌ها

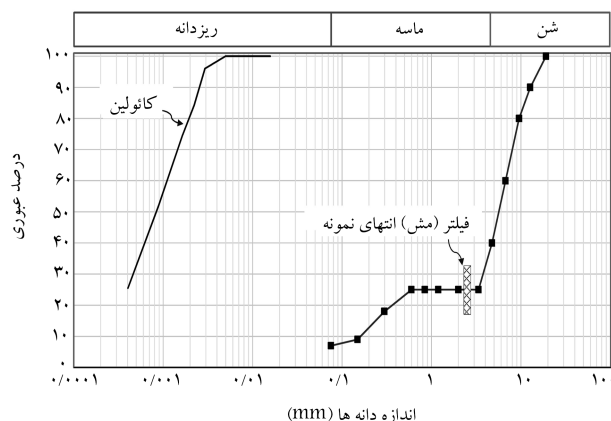
در جدول ۱، نتایج آزمایش‌ها و در شکل ۱۱، تحلیل نتایج مشاهده می‌شود. در جدول ۱، دو نوع پارامتر بحرانی فرسایش برای گرادپایان (i) و سرعت (v) با عناوین «آستانه» و «وقوع» به این صورت معرفی شده است:

- آستانه (i_c و v_c): حالتی است که در آن ذرات خاک در اثر تراوش در بین حفره‌های ذرات بزرگ‌تر، حرکت‌های عموماً چرخشی یا رقص‌مانند، دارند. در این حالت تقریباً بخشی از ذرات ریز از سطح ذرات درشت جدا می‌شوند یا در حالت معلق قرار می‌گیرند، به گونه‌ای که با افزایش نیروی تراوش، شروع به حرکت می‌کنند.

- وقوع (i_o و v_o): حالتی است که در آن تراوش موجب انتقال ذرات از بین ساختار درشت خاک و در نتیجه، ایجاد پایپ‌هایی در خاک می‌شود. این حالت در جریان‌های رو به بالا، معمولاً با جوشش ذرات ریز در سطح همراه است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ (الف و ب) می‌توان گفت که به‌طور کلی با افزایش زاویه‌ی جریان با جهت ثقل، مقدار گرادپایان بحرانی فرسایش افزایش می‌یابد، لکن در زاویه‌ی ۹۰ درجه که مقدار مؤلفه‌ی بردار گرادپایان در راستای ثقل به کمترین مقدار خود می‌رسد، مقدار گرادپایان بحرانی بیشینه می‌شود. این موضوع هم در خصوص گرادپایان بحرانی شروع فرسایش (i_c) و هم گرادپایان بحرانی وقوع فرسایش (i_o) برای هر دو حالت لایه‌های موازی و عمود بر جریان صادق است. این موضوع به وضوح اثر جهت جریان در ارزیابی پایداری داخلی خاک‌ها را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۱ ج، نسبت گرادپایان شروع به آستانه برای زوایای مختلف رسم شده است. این نسبت به نوعی سرعت تغییر شرایط خاک از حالت پایدار به ناپایدار را نشان می‌دهد. به این صورت که هر چه گرادپایان شروع فرسایش از گرادپایان آستانه بزرگ‌تر باشد، سرعت گسترش فرسایش در خاک کمتر است و فرصت مقابله با آن و در نظر گرفتن تمهیدات اصلاحی بیشتر خواهد بود. بر طبق شکل مذکور، به‌طور کلی با افزایش زاویه‌ی جریان ورودی نسبت به جهت ثقل، نسبت گرادپایان شروع به آستانه افزایش می‌یابد. از منظر واقعی، این موضوع را می‌توان این‌گونه بیان کرد: در شرایطی که آب به صورت نفوذی ثقلی در خاک تراوش دارد (زوایای جریان کمتر از ۹۰ درجه؛ مانند شرایطی که در بالادست سد یا در بدنه‌ی سد خاکی وجود دارد)، با رسیدن بخشی از خاک به شرایط آستانه‌ی فرسایش داخلی، وقوع فرسایش با اندک افزایش گرادپایان شروع خواهد شد و سرعت وقوع فرسایش بالاست. در حالی که در شرایطی که آب به صورت بالارونده در خاک تراوش دارد (زوایای جریان بیشتر از ۹۰ درجه، مانند شرایطی که در پایین‌دست سد خاکی یا در کف گود یا ترانشه وجود دارد)، به میزان کمینه‌ی ۳۰٪ افزایش گرادپایان نیاز است تا خاک از حالت آستانه‌ی



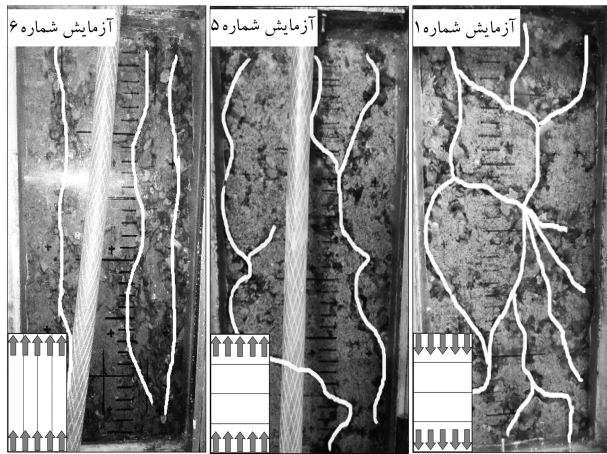
شکل ۱۰. منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد آزمایش.

- جهت لایه‌ها: همان جهت کوبش خاک است که جهت لایه‌ها نسبت به جریان ورودی نیز است.
- زاویه‌ی جریان ورودی: زاویه‌ی بردارهای جریان ورودی به المان خاک نسبت به جهت ثقل است.
- گرادپایان متوسط بیشینه: بیشینه‌ی گرادپایان متوسط اعمال شده به نمونه در طی آزمایش است.

ریزدانه‌ی خاک‌ها از جنس کاتولین با $PI = 18$ بوده و نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نمونه‌سازی به صورت تراکم مرطوب و براساس مفاهیم زیرتراکمی ۱° و در رطوبت ۱۱٪ انجام شده است. پس از نمونه‌سازی، خاک به مدت ۲۴ ساعت تحت شرایط اشباع قرار گرفت و سپس جریان تراوش به صورت افزایش مرحله‌ای گرادپایان مطابق جدول ۲ بر نمونه اعمال شد. زمان هر گام از بارگذاری هیدرولیکی براساس سعی و خطا و تجربه، ۸ دقیقه بوده است.

در آزمایش‌های با جریان رو به پایین (صفر درجه) و افقی (۹۰ درجه)، در خروجی جریان، فیلتر (مش) #۸ (به اندازه‌ی چشمه‌ی ۲٫۳۸mm) قرار داده شد. شماره‌ی فیلتر براساس رابطه‌ی ۱ به دست آمده است. براساس رابطه‌ی ۱، به‌منظور ایجاد شرایط ایده‌آل برای وقوع فرسایش داخلی و خروج ذرات، باید نسبت اندازه‌ی فیلتر به کوچک‌ترین اندازه در ناحیه‌ی گسستگی در خاک‌های با دانه‌بندی گسسته، بیشتر از ۲٫۴ یا ۳ (و محدود به ۵) شود. در دانه‌بندی حاضر، این نسبت مطابق رابطه‌ی ۱ برابر است با: [۲]

$$MSD = \frac{\text{mesh size}}{(d_{\min})_{gap}} = \frac{2,38}{0,595} = 4 \geq 3 \quad ok \quad (1)$$



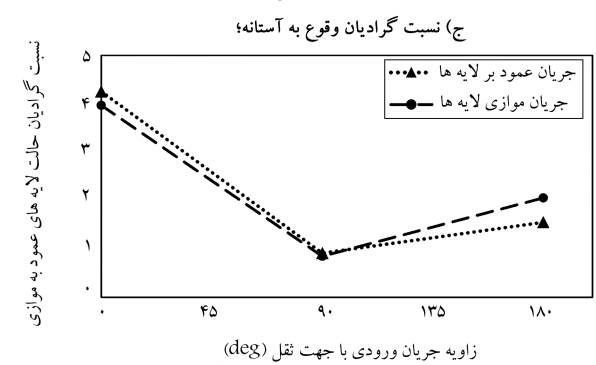
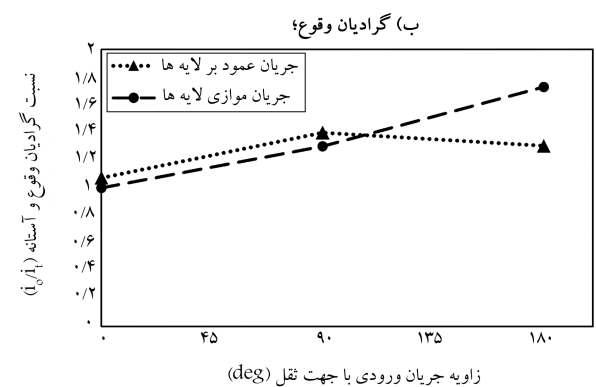
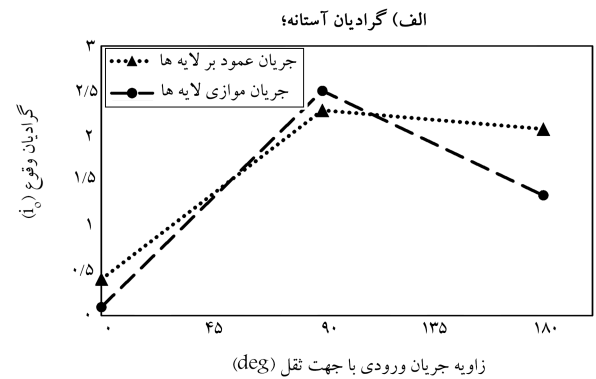
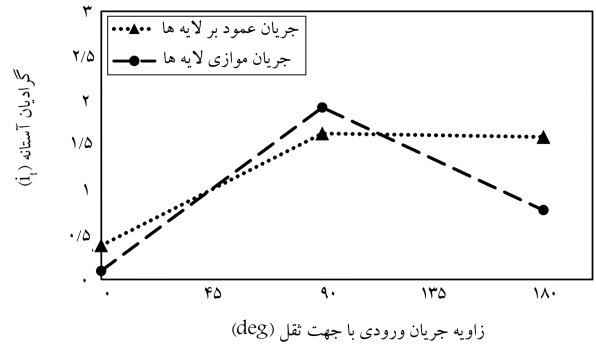
شکل ۱۲. نمونه‌یی از شکل پایپ‌ها در آزمایش‌ها: در آزمایش‌هایی که لایه‌ها عمود بر جریان هستند، پایپ‌ها معمولاً به صورت خطوط شکسته و در آزمایش‌هایی که لایه‌ها موازی با جریان هستند، به صورت خطوط مستقیم تشکیل می‌شوند.

لایه‌های موازی کمتر است؛ این موضوع خصوصاً در شکل ۱۱ ج بیشتر مشخص است. در شکل ۱۱، نسبت گرادبان‌های بحرانی در حالت لایه‌های عمود به موازی رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌طور کلی مقدار گرادبان‌های بحرانی در حالت لایه‌های عمود بر جریان بیشتر از حالت لایه‌های موازی است، که این موضوع به روشنی اثر جهت ناهمسانی نمونه و در نتیجه جهت نمونه‌سازی در مطالعات فرسایش داخلی را نشان می‌دهد. البته نکته‌ی جالب توجه این است که در جریان‌های با زاویه ۹۰ درجه، جهت لایه‌ها اثر چندانی در گرادبان‌های بحرانی ندارد.

براساس مشاهدات و عکس‌برداری‌های انجام شده در حین آزمایش مشخص شد که شکل پایپ‌های تشکیل شده ناشی از فرسایش بسیار به جهت لایه‌های خاک بستگی دارد. معمولاً در نمونه‌هایی که لایه‌ها به صورت موازی جریان ورودی هستند، پایپ‌ها در راستای لایه‌ها و مستقیماً تشکیل می‌شوند؛ در حالی که در نمونه‌هایی که لایه‌ها به صورت عمود بر جریان هستند، پایپ‌ها با شکستگی و تغییر جهت متعدد در مسیر تشکیل می‌شوند. به بیان دیگر، با توجه به این موضوع و آنچه از تحلیل آزمایش‌ها به دست آمده است، مشخص می‌شود که جهت کوبش و قرارگیری لایه‌های خاک بسیار در نتایج و رفتار فرسایش داخلی آن مؤثر است. در شکل ۱۲، نمونه‌یی از تصاویر مربوط به پایپ‌های مذکور نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج به وضوح اثر جهت لایه‌ها و جهت جریان ورودی به المان خاک را برگسترش زمانی و مکانی و همچنین نحوه‌ی وقوع فرسایش داخلی نشان می‌دهد. از این رو لازم است در استفاده از معیارهای متداول پایداری داخلی خاک‌ها، به مشخصات آزمایش‌هایی که در طی آنها هر یک از این معیارها حاصل شده است، نیز توجه شود.

۴. نتیجه‌گیری

غالب مطالعات فرسایش داخلی و معیارهای ناشی از آن‌ها در شرایط جریان‌های یک‌بعدی و لایه‌های عمود بر جریان آب انجام شده است. در حالی که در واقعیت، کمتر چنین شرایطی حاکم است. از این رو در نوشتار حاضر، جزئیات یک دستگاه



د) نسبت گرادبان‌های بحرانی حالت لایه‌های عمود به موازی.

شکل ۱۱. تحلیل نتایج آزمایش‌ها بر حسب زاویه‌ی جریان ورودی با جهت ثقل حالت لایه‌های عمود به موازی.

فرسایش به شرایط وقوع آن برسد که این موضوع وجود فرصت بیشتر برای مقابله با وقوع فرسایش را نشان می‌دهد.

نکته‌ی قابل توجه دیگر در شکل ۱۱ این است که عموماً حساسیت نمونه‌های با لایه‌های عمود بر جریان به تغییرات زاویه‌ی جریان ورودی، نسبت به نمونه‌های با

آزمایش‌ها این است که به‌طور کلی مقدار گرادبان‌های بحرانی فرسایش در خاک‌های با لایه‌های عمود بر جریان بیشتر از لایه‌های موازی جریان است که هر چه شرایط المان و جریان ورودی به آن به حالت افقی نزدیک‌تر می‌شود، این اختلاف کمتر می‌شود. همچنین شکل مجاری فرسایش در خاک نیز، کاملاً به جهت لایه‌های آن بستگی دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان تشکر خود را از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور و کمیته‌ی تحقیقات سازمان آب منطقه‌ی تهران، به جهت پشتیبانی مالی از پروژه‌ی حاضر اعلام می‌دارند.

آزمایشگاهی مطالعه‌ی فرسایش داخلی با امکان تغییر زاویه‌ی جریان ورودی به نمونه نسبت به راستای ثقل و همچنین تغییر جهت لایه‌بندی نسبت به جهت جریان ورودی معرفی شده است. به منظور نشان دادن اثر جهت جریان و جهت لایه در فرسایش داخلی، آزمایش‌هایی بر روی خاک با ریزدانه‌ی کائولین و دانه‌بندی گسسته انجام شد. نتایج حاکی از آن است که جهت جریان و جهت لایه‌ها کاملاً در مقدار گرادبان و سرعت بحرانی فرسایش مؤثر است که این اثر در خاک‌های با لایه‌های موازی جریان، بیشتر از خاک‌های با لایه‌های عمود بر جریان است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که به‌طور کلی با افزایش زاویه‌ی جریان اعمالی بر المان خاک نسبت به جهت ثقل، سرعت ناپایداری داخلی در خاک از حالت آستانه به وقوع فرسایش افزایش می‌یابد، که در این موضوع نیز خاک‌های با لایه‌های موازی جریان حساسیت بیشتری نسبت به خاک‌های با لایه‌های عمود بر جریان دارند. نتیجه‌ی مهم و قابل توجه دیگر از

پانوشته‌ها

1. Foster
2. No erosion filter
3. Hole erosion test
4. Slot erosion test
5. Continuing erosion filter
6. Richards & Reddy
7. true triaxial piping test apparatus
8. با تغییر شکل خاک در طول آزمایش، مقدار فشار روغن در جک‌ها افت پیدا می‌کند که باید مجدداً فشار آن با استفاده از پمپ دستی اعمال شود.
9. solenoid valve
10. undercompaction

منابع (References)

1. Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M. "The statistics of embankment dam failures and accidents", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5), pp. 1000-1024 (2000).
2. Pachideh, V., Fakher, A. and Naeini, S.T. "Large scale Experimental study of subsurface erosion in soils", MSD Thesis, Tehran University (In Persian) (2011).
3. Fell, R. and Fry, J.J. "The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations", *Internal Erosion of Dams and their Foundations*, Taylor and Francis, London. pp. 1-24 (2007).
4. Kezdi, A. "Soil physics-selected topics", Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (1979).
5. Kenney, T.C. and Lau, D. "Internal stability of granular filters", *Canadian Geotechnical Journal*, **22**(2), pp. 215-225 (1985).
6. Kenney, T.C. and Lau, D. "Internal stability of granular filters", *Canadian Geotechnical Journal*, **23**(3), pp. 420-423 (1986).
7. Burenkova, V.V. "Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils", *The First International Conference "Geo-Filters"*, *Filter in Geotechnical Engineering*, Balkema. pp. 357-360 (1993).
8. Terzaghi, K. "Erdbaumechanik. Deuticke, Vienna", US-ACE, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS (1925).
9. Adel, H., Bakker, K.J. and Klein B. M. "Internal stability of minestone", International Symposium on Modelling Soil-Water-Structure Interaction, International Association for Hydraulic Research (IAHR), Netherlands, Balkema, Rotterdam, pp. 225-231 (1988).
10. Skempton, A.W. and Brogan, J.M. "Experiments on piping in sandy gravels", *Geotechnique*, **44**(3), pp. 449-360 (1994).
11. Liu, J. "Seepage control of earth-rock dams: theoretical basis, engineering experiences and lessons (in Chinese)", China Waterpower Press, Beijing, 219 p. (2005).
12. Mao, C.X. "Study on piping and filters: Part I of piping (in Chinese)", *Rock and Soil Mechanics*, **26**(2), pp. 209-215 (2005).
13. Ahlinhan, M.F., Achmus, M., Hoog, S. and et al. "Stability of non-cohesive Soils with respect to Internal Erosion", *6th Int. Conference on Scour and Erosion (ICSE 6)*, Paris, pp. 329-336 (Aug. 27-31, 2012).
14. Tian, D., Xie, Q., Fu, X. and et al. "Experimental study on the effect of fine contents on internal erosion in natural soil deposits", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (2005).
15. Marot, D., Rochim, A., Nguyen, H.H. and et al. "Assessing the susceptibility of gap-graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology", *Natural Hazards*, **83**(1), pp. 365-388 (2016).
16. Zhong, C., Le, V.T., Bendahmane, F. and et al. "Investigation of spatial scale effects on suffusion susceptibility", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **144**(9), pp. 1-10 (2018).
17. Richards, K.S. and Reddy, K.R. "True triaxial piping test apparatus for evaluation of piping potential in earth structures", *Geotechnical Testing Journal*, **33**(1). pp. 83-95 (2010).
18. Benamar, A. "Suffusion evaluation of coarse-graded soils from Rhine dikes", *Acta Geotechnica*, **14**, pp. 815-823 (2019).
19. Marot, D., Bendahmane, F. and Le, V.T. "New apparatus for assessing soil suffusion susceptibility under two

- flow directions”, In: Bonelli S., Jommi C., Sterpi D. (eds) *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees, EWG-IE 2018, Lecture Notes in Civil Engineering*, 17, Springer, Cham (2019).
20. Ke, L. and Takahashi, A. “Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion”, *Geotechnical Testing Journal*, **37**(2), pp. 347-364 (2014).
 21. Sato, M. and Kuwano, R. “Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil”, *Soils and Foundations*, **55**(6), pp. 1427-1440 (2015).
 22. Nguyen, H., Marot, D. and Bendahmane, F. “Erodibility characterisation for suffusion process in cohesive soil by two types of hydraulic loading”, *La Houille Blanche, International Water Journal*, **6**, pp. 54-60 (2012).
 23. Rochim, A., Marot, D., Sibille, L. and et al. “Effects of hydraulic loading history on suffusion susceptibility of cohesionless soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **143**(7), 04017025 (2017).
 24. Chen, L., He, J., Yang, S. and et al. “Experimental study on the evolution of the drained mechanical properties of soil subjected to internal erosion”, *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, **103**, pp. 1-25 (2020).
 25. Wang, S., Chen, J., Luo, Y. and et al. “Experiments on internal erosion in sandy gravel foundations containing a suspended cutoff wall under complex stress states”, *Natural Hazards*, **74**(2), pp. 1163-1178 (2014).
 26. Mehdizadeh, A., Disfani, M.M., Evans, R. and et al. “Progressive internal erosion in a gap-graded internally unstable soil: Mechanical and geometrical effects”, *International Journal of Geomechanics*, **18**, pp.1-14 (2018).
 27. Luo, Y. and Luo, B. “Effect of deviator stress on the initiation of suffusion”, *Acta Geotechnica*, **15**(6), pp.1607-1617 (2020).
 28. Ke, L. and Takahashi, A. “Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow”, *Soils and Foundations*, **52**(4), pp. 698-711 (2012).