



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنجم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۶۵ تا ۷۲
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 65-72



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

بررسی آزمایشگاهی ناپایداری شیب‌های ماسه ای غیر متراکم در اثر بالا آمدن سطح آب

وحید معصومی فرد^۱، سیدمحمد رضا امام^{۲*}، روزبه رسولی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۸۸/۱۱/۱۷، پذیرش ۱۳۹۲/۱/۱۸)

چکیده

افزایش فشار آب حفره‌ای در خاکریزها باعث کاهش تنش‌های متوسط موثر می‌شود. این در حالی است که تنش‌های عمودی ناشی از وزن خاک لایه‌های بالایی ممکن است ثابت بماند و یا افزایش یابد. تحت اینگونه بارگذاری، ماسه‌های شل و خیلی شل معمولاً کاهش حجم زیادی دارند و در شرایط اشباع، این کاهش حجم منجر به افزایش فشار آب حفره‌ای و سپس گسیختگی توده خاک تحت شرایط زهکشی ضعیف می‌شود. در این مقاله، ناپایداری شیب‌های ماسه‌ای غیر متراکم در اثر بالا آمدن سطح آب و افزایش فشار حفره‌ای، با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج آزمایشها نشان داد که در حالیکه دانسیته اولیه، عامل اصلی کنترل کننده گسیختگی است، عوامل دیگری نیز مانند نحوه ورود آب به خاکریز و توزیع فشار آب حفره‌ای بر نحوه گسیختگی موثرند.

کلمات کلیدی

روانگرایی استاتیکی، ریزش شیب، فشار آب حفره‌ای، گسیختگی خاکریز، ناپایداری شیب

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: rezaimam@gmail.com

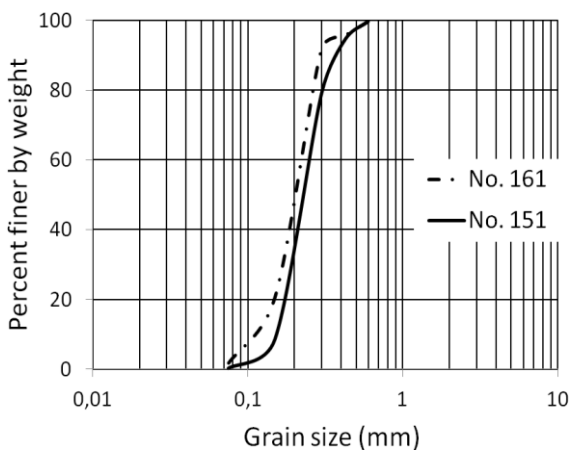
۱- مقدمه

۲- مصالح مورد استفاده

آزمایش ها بر روی ماسه محلی فیروزکوه به شماره های ۱۶۱ و ۱۵۱ انجام شده است. مشخصات این ماسه ها در جدول (۱) ذکر شده و منحنی دانه بندی آنها در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات ماسه فیروزکوه و خاکریزهای ساخته شده در آزمایش های اول و دوم

| مصالح مورد استفاده | e_{max} | e_{min} | G_s | D_{50} | (خاکریز) |
|--------------------|-----------|-----------|-------|----------|----------|
| کد ۱۵۱ فیروزکوه | ۰/۸۷ | ۰/۵۵ | ۲/۶۵ | ۰/۲۵ | ۰/۷۸ |
| کد ۱۶۱ فیروزکوه | - | - | ۲/۶۵ | ۰/۲ | ۰/۷۸ |



شکل (۱): منحنی دانه بندی ماسه فیروزکوه (شماره ۱۶۱ و ۱۵۱)

ماسه شکسته فیروزکوه، ماسه ای سیلیسی با دانه بندی یکنواخت می باشد [۱]. خاکریزهای آزمایش شده به روش تراکم مرطوب با ۲/۵ درصد رطوبت ساخته شدند. در این روش، پس از افزودن رطوبت مورد نظر، خاک در لایه های افقی با ضخامت ثابت ریخته شده و با یک تخته مسطح اندکی فشرده شدند تا تراکم (نسبت تخلخل) مورد نظر بدست آید.

۳- رفتار ماسه فیروزکوه در آزمایش بارگذاری با تنش تفاضلی ثابت

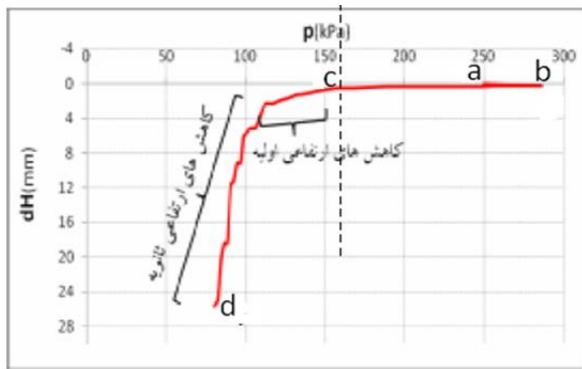
با توجه به آنکه بالا آمدن سطح آب باعث می شود که ماسه تحت مسیر تنشی شبیه به بارگذاری با تنش تفاضلی ثابت قرارگیرد، در اینجا رفتار ماسه فیروزکوه تحت این مسیر تنش با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مطالعه می شود.

نمونه ای از نتایج حاصل از یک آزمایش با تنش تفاضلی ثابت بر روی ماسه فیروزکوه (شماره ۱۵۱) در شکل (۲) نشان داده

روانگرایی یکی از پدیده های مهم در مهندسی ژئوتکنیک است که برای توصیف چند حالت مختلف ایجاد شده در خاکهای ماسه ای بکار برده شده است. افزایش فشار آب حفره ای عامل بسیاری از گسیختگی های ناشی از روانگرایی استاتیکی در شیب ها شناخته شده است. این افزایش باعث کاهش تنش های موثر همه جانبه در خاک می شود و این در حالیست که بارهای قائم ناشی از نیروهای گرانشی سربار ممکن است تقریباً ثابت باقی مانده و یا در اثر مرطوب شدن خاک لایه های بالایی افزایش یابد. نتیجه این امر اعمال مسیر تنشی بر خاک خواهد بود که در آن تنش برشی تقریباً ثابت مانده و یا افزایش می یابد، ولی تنش موثر متوسط بتدریج کم می شود [۴].

مطالعات گذشته نشان داده است که خاک های دانه ای با تراکم خیلی کم کاهش حجم قابل توجهی تحت این مسیر تنش از خود نشان می دهند و این رفتار در خاک های اشباع می تواند سبب ایجاد فشار آب منفذی اضافی قابل توجه و در نتیجه ناپایداری و ریزش آنها شود [۵]. نشانه های زیادی از اینگونه ناپایداری ها در عمل دیده شده ولی مطالعات انجام شده در این زمینه فقط در سال های اخیر و بطور متفرقه بوده و بررسی کافی این رفتار با استفاده از مدل های آزمایشگاهی بگونه ای که امکان پیش بینی اینگونه لغزش ها را بوجود آورد انجام نشده است.

در این تحقیق پدیده گفته شده با استفاده از مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. مصالح مورد استفاده در این تحقیق ماسه ریزدانه فیروزکوه است و آزمایش ها بر روی دو نمونه از این ماسه با دانه بندی متفاوت انجام شده است. مصالح به روش تراکم مرطوب در تانک آزمایش قرار داده شد بگونه ای که پس از قرارگیری در تانک به دانسیته پایین (نسبت تخلخل بالا) برسد. آزمایش های انجام شده نشان داد که بالا آمدن سطح آب باعث ناپایداری و گسیختگی شیب ساخته شده از ماسه غیر متراکم می شود بگونه ای که پس از گسیختگی، شیب نهایی بسیار ملایم تر از شیب اولیه است. آزمایش ها همچنین نشان داد که تراکم مصالح تشکیل دهنده شیب بر میزان پتانسیل ناپایداری آن در اثر بالا رفتن سطح آب اثر زیادی دارد.



(c)

شکل (۲): (a) مسیر تنش تفاضلی ثابت، (b) تغییرات نسبت تخلخل با تنش موثر متوسط، (c) تغییرات ارتفاع نمونه با تنش موثر متوسط [۵]

۴- آزمایش های انجام شده بر روی مدل خاکریز

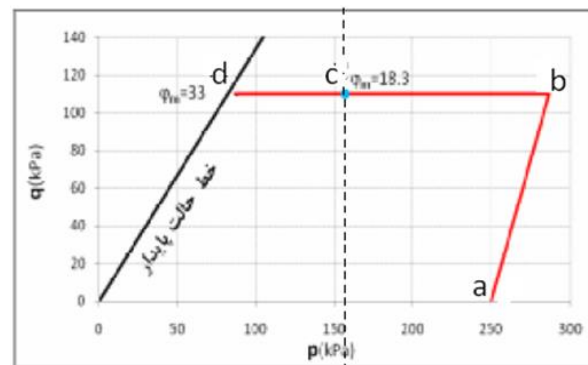
در این تحقیق تعداد ۴ آزمایش بر روی مدل‌های خاکریز ساخته شده در تانک آزمایش انجام شد. برای ساخت هر مدل، خاکریزی در شش لایه انجام شد به طوری که پس از اتمام ساخت خاکریز، شیب آن به ۴۴ درجه در پایین دست رسید. هم چنین درصد رطوبت اضافه شده به ماسه در این آزمایش‌ها ۲/۵٪ بوده است. پس از خاکریزی در هر لایه، در آزمایش های اول و دوم، با استفاده از یک قطعه مسطح چوب به ضخامت حدود ۴ سانتی متر و به شکل مستطیل به ابعاد ۲۵ در ۱۵ سانتی متر، لایه مورد نظر تحت فشار قرار گرفت. برای آنکه میزان تخلخل خاکریز در نقاط مختلف تقریباً یکسان باقی بماند، لایه های زیرین کمتر، و لایه های بالایی بتدریج بیش تر تراکم شدند تا اثر تجمعی تراکم لایه های بالاتر باعث تراکم بیشتر لایه های زیرین نشود.

بعد از هر مرحله خاکریزی، بر روی لایه ساخته شده شیارهایی ایجاد شد تا با لایه جدید به اندازه کافی اتصال داشته باشد.

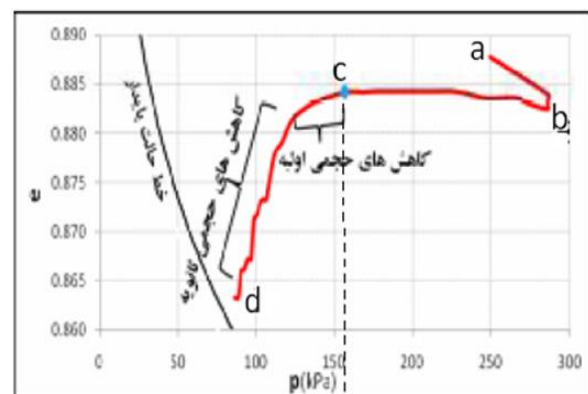
نمای نهایی و ابعاد خاکریز (برای آزمایش های اول و دوم) در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود عرض خاکریز در تاج آن برابر با ۵۵ سانتی متر است. آزمایش های اول و دوم در تانک آزمایشی با عرض ۵۰ سانتی متر و آزمایش‌های سوم و چهارم در تانک آزمایشی با عرض ۷۵ سانتی متر انجام شد. نمای خاکریز برای آزمایش های سوم و چهارم در شکل (۴) نشان داده شده و برای این آزمایش ها عرض تاج ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شد.

نسبت تخلخل خاکریزها از روش برگشتی محاسبه شده و

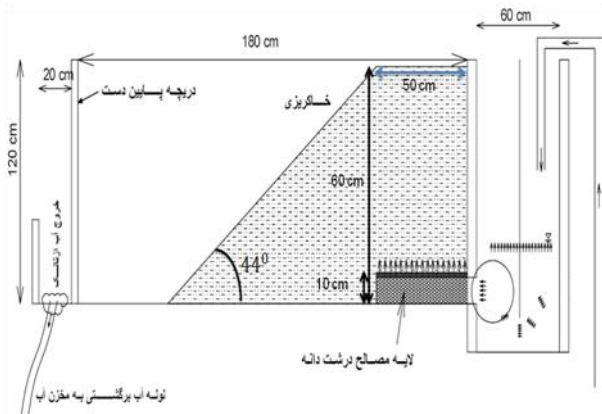
شده است [۶]. در این آزمایش که در آن نمونه به روش تراکم مرطوب تهیه شده و دارای دانسیته نسبی برابر ۰/۵- است، پس از تحکیم نمونه تا تنش ۲۵۰ کیلوپاسکال (نقطه a) تنش انحرافی اعمال شده است (a به b). سپس با کاهش فشار همه جانبه در حالی که تنش تفاضلی ثابت بود، بارگذاری در مسیر b تا c ادامه یافت. در طی این مسیر انبساط حجمی کمی در نمونه دیده شد (مسیر b تا c در شکل ۲- b). با رسیدن به سطح تنش معینی (نقطه c)، کاهش حجم نمونه به میزان قابل توجهی آغاز شد و این کاهش حجم تا نقطه d که نمونه به شرایط پایدار رسید ادامه یافت. همانطور که در شکل ۲- b) دیده می شود این مصالح دربارگذاری در آزمایش با تنش تفاضلی ثابت، کاهش حجم قابل توجهی از خود نشان داده و بنابراین پتانسیل زیادی برای وجود آوردن فشار آب منفذی اضافی، و بنابراین ناپایداری ناشی از آن از خود نشان داده است.



(a)



(b)



شکل (۴): نمای نهایی و ابعاد خاکریز با شیب ۴۴ درجه در آزمایشهای سوم و چهارم

۵- آزمایش اول بر روی ماسه شماره ۱۵۱ فیروزکوه

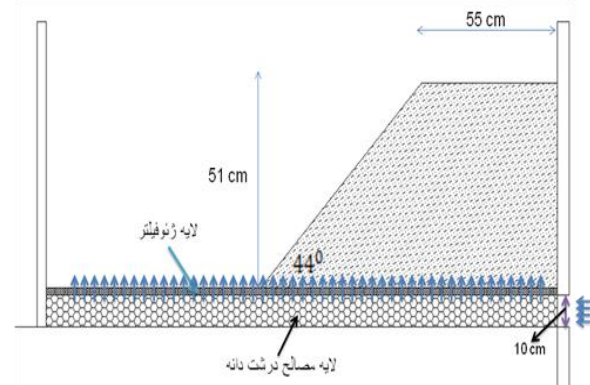
پس از آماده شدن خاکریز، پمپ آب روشن شده و با استفاده از شیر تنظیم آب ورودی، دبی لازم که با استفاده از آزمایش های قبل برای ایجاد سرعت مناسب بالارفتن آب در تانک مناسب تشخیص داده شده بود بدون تانک آزمایش هدایت شد. در ابتدا دیده شد که سطح آب بصورت آرام و یکنواخت از پایین به بالا حرکت می نماید. پس از آنکه سطح آب کمی در تانک بالا آمد (حدود ۱۰ سانتی متر) تغییر رنگ آب و کدر شدن آن در ناحیه جلو شیب دیده شد. هنگامی که تراز آب به حدود ۲۰ سانتی متر بالاتر از تراز پارچه گونه (لایه ژئوفیلتر، شکل ۲) رسید، نشست تاج خاکریز به مقدار حدود یک سانتی متر رسیده بود. این نشست از ابتدای بالا آمدن سطح آب آغاز شده بود.

همزمان با بالا رفتن سطح آب، ناحیه غرقاب شده به شیب کمتری رسیده و در این حال نشست تاج خاکریز بتدریج افزوده می شد. زمانیکه تراز آب به حدود ۴۵ سانتی متر بالای تراز پارچه گونه رسید، گسیختگی واژگونی در خاک ناحیه بالای سطح آب رخ داد و این گسیختگی که ابتدا از محل شیب آغاز شد، بتدریج بسمت عقب گسترش یافته و در نواحی دیگر خاک بالای سطح آب ادامه یافت تا اینکه همه بخش های خاک که بالای سطح آب بود بکلی گسیخته شد. گفتنی است که نشست تاج خاکریز زمانی که آب به تراز ۴۱ سانتی متر بالای تراز پارچه گونه رسیده بود در حدود ۳ سانتی متر اندازه گیری شد. در حالت کلی گسیختگی های دیده شده ترکیبی از گسیختگی صفحه ای و واژگونی بودند. در آزمایشی که پس از اتمام آزمایش گفته شده (مرحله اول) برای بررسی اثر سرعت بالا آمدن آب انجام شد (مرحله دوم آزمایش اول)، دیده شد که چنانچه سرعت بالا آمدن آب بیشتر باشد (۱۰۰ میلی متر در دقیقه که حدود

در ساخت مدل خاکریز از تجربیات اکرسلی که آزمایش های را بر روی نمونه های ذغال سنگ برای بررسی گسیختگی شیبها انجام داد استفاده شد [۷].

همانگونه که از مقایسه شکل های (۳) و (۴) می توان دید، در آزمایش های اول و دوم، تمام سطح کف تانک پوشیده از مصالح درشت دانه با نفوذپذیری زیاد بوده و با ورود آب از مخزن خارجی آب به درون مصالح درشت دانه، تراز آب در تمام نقاط کف تانک بطور هم زمان بالا آورده شد. بدین ترتیب در حالی که تراز آب در درون خاکریز بالا می رفت، در جلو شیب خاکریز نیز تراز آب بالا رفته و فشار هیدروستاتیکی بر جلو شیب اعمال می نمود. لیکن در آزمایش های سوم و چهارم، مصالح درشت دانه فقط در بخش محدودی از کف تانک بطول ۵۰ سانتی متر قرار داده شد (شکل ۴) به گونه ای که سطح آب فقط درون خاکریز بالا رفته و در جلو شیب فشار هیدروستاتیکی اعمال نمی شد.

در اینجا جزئیات آزمایش و مشاهدات انجام شده برای آزمایش های ۱، ۲ و ۴ آورده شده است. در آزمایش ۳ برای جلوگیری از بالا آمدن آب از بخشی از کف تانک، از پوشش پلاستیکی در اطراف مصالح درشت دانه استفاده شد و این امر باعث لغزش این مصالح و ایجاد خطا در آزمایش شد. بنابراین جزئیات این آزمایش در اینجا نیامده است.



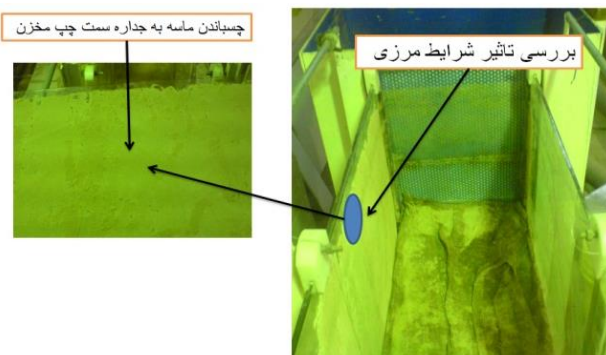
شکل (۳): نمای نهایی و ابعاد خاکریز با شیب ۴۴ درجه در آزمایش های اول و دوم

درجه کاهش یافت. شیب پایداری مصالح در حالت خشک برابر ۳۴ درجه است.

۶- آزمایش دوم بر روی ماسه شماره ۱۶۱ فیروزکوه

در ادامه تحقیقات، آزمایش دیگری انجام شد که هدف آن بررسی اثر دانه بندی و شرایط مرزی بر ناپایداری ماسه فیروزکوه در اثر بالا رفتن سطح آب بود. این آزمایش بر روی ماسه کد ۱۶۱ فیروزکوه که دارای دانه بندی ریزتری نسبت به ماسه با کد ۱۵۱ است انجام شد [۷]. در این آزمایش، دانه بندی مصالح و شرایط مرزی آزمایش اندکی نسبت به آزمایش اول تفاوت داشت ولی نحوه خاکریزی مشابه آزمایش اول بوده و در شش لایه انجام شد و ابعاد خاکریزی نیز مانند آزمایش اول بود (شکل ۳).

برای بررسی اثر شرایط مرزی، یک طرف تانک آزمایش به گونه‌ای که در شکل (۷) نشان داده شده است، با ماسه مشابه ماسه‌ای که آزمایش بر روی آن انجام می‌شود پوشانده شد. برای پوشاندن شیشه با ماسه ابتدا یک لایه نازک چسب بر روی شیشه پوشانده شد و ماسه بر روی این لایه ریخته شد به گونه‌ای که پوشش مناسبی از ماسه حاصل شد. برای جلوگیری از ایجاد زبری ماندگار در جداره اصلی مخزن، موارد گفته شده بر روی یک لایه جدید از شیشه انجام شد تا پس از پایان آزمایش امکان جداکردن آن از جداره اصلی وجود داشته باشد.

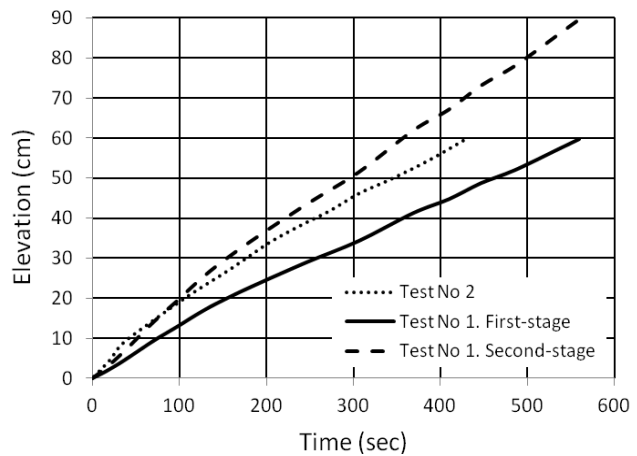


شکل (۷): تغییر شرایط مرزی

مشابه آزمایش قبل، برای ساخت نمونه، خاکریزی در شش لایه انجام شد به گونه‌ای که پس از اتمام خاکریزی شیب آن به ۴۴ درجه رسید. همچنین درصد رطوبت اضافه شده به ماسه در این آزمایش نیز ۲/۵٪ بوده است. پس از انجام خاکریزی با توجه به وزن مخصوص مصالح مورد استفاده و حجم خاکریز ساخته شده، نسبت تخلخل متوسط خاک برابر با $eav = 0.76$ برآورد شد.

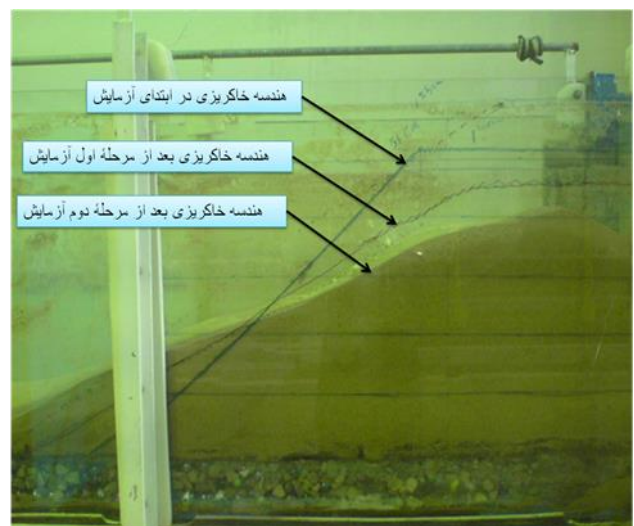
پس از آماده شدن خاکریز، پمپ آب روشن شده و با استفاده

۵۰٪ از مرحله اول بیشتر است) خاکریز پس از گسیختگی به شیب ملایمتری می‌رسد. تغییرات سطح آب داخل مخزن با زمان در مرحله اول و دوم آزمایش اول در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): تغییرات سطح آب داخل مخزن با زمان در مرحله اول و دوم آزمایش اول و آزمایش دوم

مدت زمان بالا آمدن آب در تانک پیش از ساختن نمونه برابر ۱۰ دقیقه بود. پس از ساخت نمونه زمان بالا آمدن آب به حدود ۹ دقیقه کاهش یافت که یکی از دلایل آن وجود حجم ماسه بود که بخشی از فضای تانک را پر می‌نمود. شکل (۶) هندسه خاکریزی را قبل از آزمایش و پس از اتمام آزمایش‌های مراحل اول و دوم نشان می‌دهند.



شکل (۶): شیب پایین دست در انتهای مراحل اول و دوم آزمایش اول

همان طور که دیده می‌شود، شیب خاکریز که در ابتدا ۴۴ درجه بود، پس از بالا آمدن سطح آب در مرحله اول و گسیختگی خاکریز، به حدود ۳۱ درجه رسید، که در مرحله دوم به ۲۳

جدول (۲): میزان نشست در طول آزمایش

| ارتفاع آب از کف مخزن (سانتی متر) | نشست تاج خاکریز (سانتی متر) | زمان از شروع آزمایش (ثانیه) |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ۲۰ | ۰/۱۶ | ۱۳۳ |
| ۳۰ | ۱/۲۵ | ۲۰۲ |
| ۴۰ | ۱/۷۵ | ۲۶۷ |
| ۵۰ | ۲/۲ | ۳۴۱ |
| ۶۰ | ۲/۵ | ۴۲۰ |

از شیر تنظیم آب ورودی، دبی لازم که با استفاده از آزمایش های قبل برای ایجاد سرعت مناسب بالارفتن آب در تانک مناسب تشخیص داده شده بود به درون تانک آزمایش هدایت شد. در ابتدا دیده شد که سطح آب بصورت آرام و یکنواخت از پایین به بالا حرکت می نماید، پس از آن تغییر رنگ آب و کدر شدن آن در ناحیه جلو شیب دیده شد. در مراحل اولیه بالا آمدن سطح آب، از بخش پایینی شیب پایین دست خاکریز (حدودا در پای شیب) خروج آب و پدیده جوشش دیده شد (شکل ۸).

۷- آزمایش چهارم بر روی ماسه ۱۵۱ فیروزکوه

در آزمایش چهارم که روی ماسه فیروزکوه با شماره کد ۱۵۱ انجام شد میزان تراکم خاکریز، مشخصات هندسی آن و نحوه ورود آب به داخل مصالح نسبت به آزمایش های اول و دوم متفاوت بود [۳]. در این آزمایش سطح آب فقط درون خاکریز بالا آورده شد و فشار هیدروستاتیکی در جلوی خاکریز که در آزمایش های اول و دوم وجود داشت، حذف شد. خاکریزی مشابه آزمایش های قبل در شش لایه انجام شد با این تفاوت که تراکم بر روی خاک انجام نشد و بنابراین خاکریز ساخته شده به نسبت تخلخل بیش تری رسید.

نمای نهایی و ابعاد خاکریز ساخته شده در این آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده و ویژگی های مهم آزمایش در جدول (۳) آورده شده است. نسبت تخلخل خاکریز از روش برگشتی محاسبه شد.

جدول (۳): مشخصات خاکریز ساخته شده در آزمایش های سوم و چهارم

| وزن مصالح مورد استفاده | نسبت تخلخل خاکریز | D_{50} | G_s | e_{min} | e_{max} | کد ۱۵۱ فیروزکوه |
|------------------------|-------------------|----------|-------|-----------|-----------|-----------------|
| بکار رفته (کیلوگرم) | | | | | | |
| ۴۴۱ | ۰/۹۸ | ۰/۲۵ | ۲/۶۵ | ۰/۵۵ | ۰/۸۷ | |

پس از آماده شدن خاکریز، پمپ آب روشن شده و دبی لازم که با استفاده از آزمایش های قبل برای ایجاد سرعت مناسب بالارفتن آب در تانک تعیین شده بود بدرون تانک آزمایش هدایت شد. در ۵ دقیقه اول، خاکریز نشست نموده و در قسمت اشباع شده کاهش حجم می داد، اما هیچ گونه گسیختگی در خاکریز دیده نشد. لیکن در دقیقه پنجم، خاکریز بصورت ناگهانی گسیخته شده و از شیب ۴۴ درجه به شیب ۲۵ درجه رسید



شکل (۸): جوشش در پایین دست خاکریز

مانند آزمایش اول، در این آزمایش نیز همزمان با بالا رفتن سطح آب، ناحیه غرقاب شده به شیب کمتری می رسید و در این حال حجم خاک کاهش می یافت به گونه ای که نشست تاج خاکریز بتدریج افزایش می یافت. میزان نشست کلی در فاصله های زمانی مختلف در جدول (۲) آورده شده است. برخلاف آزمایش اول، در این آزمایش گسیختگی های دیده شده فقط بصورت صفحه ای اتفاق افتاد. همان گونه که قبلا گفته شد، یکی از دو دیواره کناری تانک با ماسه پوشانده شده و سطح زبرتری در آن ایجاد شد. مقایسه جابجایی های عمودی ایجاد شده در کنار دو دیواره تانک نشان داد که تفاوت این جابجایی ها کمتر از یک سانتی متر بود و بنابراین اثر تفاوت زبری سطح دیواره های کناری برای عرض تانک مورد آزمایش ناچیز ارزیابی شد. تغییرات سطح آب با زمان در شکل (۵) نشان داده شده است. پس از بالا آمدن سطح آب و گسیختگی خاکریز، شیب پایداری به حدود ۳۰ درجه رسید.

(شکل ۹).

های دیده شده در اثر بالا آمدن سطح آب نقش داشته باشد که مهم ترین آنها عبارتند از:
 مکانیزم اول: گسیختگی ناشی از کاهش حجم و افزایش فشار آب ناشی از آن و در نتیجه کاهش تنش موثر و مقاومت برشی.
 مکانیزم دوم: گسیختگی ناشی از اشباع شدن ماسه و کاهش مکش در ماسه غیر اشباع و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آن.
 مکانیزم سوم: گسیختگی ناشی از اعمال نیروی زه در جهت ایجاد ناپایداری بیشتر در شیب.

با توجه به مشاهدات انجام شده در آزمایش های گفته شده در این تحقیق، می توان نتایج زیر را بطور خلاصه بیان نمود:
 - بطور کلی در خاکریزهای ساخته شده از ماسه های شل و غیر اشباع که تحت زاویه ای بیش از زاویه قرارگیری مصالح ساخته شده اند، در اثر بالا آمدن سطح آب ناپایداری بوجود می آید.

- در آزمایش های اول و دوم که خاک دارای تراکم بیش تری بوده و فشار هیدرواستاتیکی در جلو شیب وجود داشت، با توجه به آنکه ماسه فیروزکوه با تراکم نسبی حدود صفر درصد، در آزمایش های تنش تفاضلی ثابت، کاهش حجم چندانی از خود نشان نمیدهد [۱] امکان پدید آمدن مکانیزم اول وجود نداشته و به نظر می رسد که مکانیزم اصلی کنترل کننده گسیختگی، کاهش مقاومت خاک در اثر اشباع شدن و حذف مقاومت ناشی از مکش و کشش سطحی ذرات خاک غیر اشباع باشد (مکانیزم دوم). گفتنی است که شیب نهایی خاکریز پس از گسیختگی در این آزمایش ها نزدیک به زاویه قرارگیری مصالح بوده و این موضوع نیز می تواند نشانه ای از کاهش مقاومت برشی خاک و رسیدن زاویه آن به مقداری متناظر با زاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت اشباع یا خشک باشد. آزمایش های انجام شده بر روی ماسه فیروزکوه نشان داد که زاویه قرارگیری این خاک در حالت خشک و اشباع بهم نزدیک است.

گرچه در آزمایش های اول و دوم آب بطور یکنواخت بالا آمده و در نتیجه نیروی زه در جهت افقی بطرف پای شیب بوجود نمی آید ولی با افزایش سرعت بالا آمدن سطح آب، حرکت آب در جهت ایجاد نیروی برکنش بیشتر صورت گرفته و شیب نهایی خاکریز ملایم تر می شود. بنابراین در اینجا مکانیزم سوم نیز می تواند نقش ثانوی در ناپایداری داشته باشد و باعث تفاوت نتایج حاصل از حالت های اول و دوم در آزمایش اول باشد.

مقایسه نتایج آزمایش های اول و دوم نیز نشان داد که ماسه درشت تر ۱۵۱، حتی در دانسیته نسبی یکسان با ماسه ۱۶۱ کاهش حجم و نشست بیش تری داشته و گسیختگی آن نیز با تخریب بیشتر و از نوع واژگونی همراه است.

در انجام این آزمایش، برای کاهش اثر احتمالی نیروی زه بر ایجاد گسیختگی، سرعت بالا آوردن آب به حداقل مقدار ممکن با توجه به مشخصات پمپ مورد استفاده انتخاب شد و همانگونه که در شکل (۹) دیده می شود، در زمان گسیختگی خاکریز در دقیقه پنجم از شروع ورود آب، سطح آب هنوز در درون خاکریز بوده و از سطح خاک بالاتر نرفته بود (خاک غرقاب نشده بود).



شکل (۹): گسیختگی ناگهانی خاکریز

در ادامه بالا آمدن سطح آب، خاکریز دچار گسیختگی دیگری شده و به شیب ملایم تری رسید و در پایان پس از سرریز آب از روی خاکریز، شیب آن به ۱۳ درجه رسید. نمای نهایی خاکریز پس از گسیختگی و غرقاب شدن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): نمای نهایی خاکریز با شیب ۱۳ درجه

۸- بحث و نتیجه گیری

مکانیزم های مختلفی می تواند در ایجاد ناپایداری و گسیختگی

معصومی فرد، وحید، "طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی برای بررسی ناپایداری شیب در اثر بالا آمدن سطح آب"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۰.

Anderson, S. A. and Riemer, M. F. , "Collapse of Saturated Soil Due to Reduction in Confinement", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 121(2): 216-219, 1995.

Skopek, P. 1993. , "Collapse of dry sand", *Canadian Geotechnical Journal* 31, 1008-1014, 1994.

Azizi, A. and Imam, S. M. R. , "Behavior of sands in constant deviatoric stress loading in Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation", ed. Oka and Kimoto. Published by Taylor and Francis Group. ISBN 978-0-415-80482-0, 2008.

Eckersley, J. D. , "Instrumented laboratory flow slides", *Geotechnique* 40, No. 3, 489-502, 1990.

- [۳] در آزمایش چهارم که نسبت تخلخل بیشتر بوده و فشار هیدرواستاتیکی در جلو خاکریز وجود نداشت، کاهش حجم ماسه و افزایش فشار آب حفره ای ناشی از آن، آن گونه که در آزمایشهای سه محوری با تنش انحرافی ثابت دیده شد می تواند بعنوان عامل اصلی گسیختگی مد نظر باشد (مکانیزم اول). گفتنی است که با توجه به جهت ورود آب به تانک و حرکت آن در درون خاکریز، نیروی زه نیز می تواند نقشی در ناپایداری شیب داشته باشد. لیکن با توجه به نشست قابل توجه تاج خاکریز و کاهش حجم زیاد در خاک خیلی شل تشکیل دهنده آن (که دارای دانسیته نسبی حدود ۳۰٪- بوده است) عامل اصلی گسیختگی را می توان مکانیزم اول دانست. آزمایش های بعدی انجام شده که در آنها ابزارگذاری همراه با اندازه گیری فشار آب در ضمن گسیختگی انجام شد [۲] نشان داد که در زمان گسیختگی خاکریزهایی با این نسبت تخلخل، افزایش قابل توجهی در فشار آب منفذی ایجاد می شود که این امر نشانه ای از وقوع مکانیزم اول است.

- [۴] در هر حال برای تعیین دقیق تر مکانیزم اصلی کنترل کننده گسیختگی در هر یک از حالات، استفاده از ابزارگذاری مناسب و اندازه گیری فشار آب حفره ای در زمان حرکت ماسه و بررسی تغییرات فشار آب حفره ای در هنگام گسیختگی و هم چنین انجام تحلیل های مناسب می توانند کمک شایانی بنمایند و این موضوعات در تحقیقات بعدی مدنظر قرار گرفته است.

۹- تشکر و تقدیر

تحقیق حاضر در قالب طرح پژوهشی شماره ۸۶۱۰۴/۵۲ صندوق حمایت از پژوهشگران کشور انجام شده است. مولفین مراتب قدردانی خود را از حمایت صندوق مذکور اعلام میدارند.

۱۰- مراجع

[۱] عزیزی، آرش، "مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی رفتار خاک های دانه ای تحت بارگذاری با تنش تفاضلی ثابت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۸.

[۲] خجسته رحیمی، امیر، "ابزارگذاری و آزمایش ناپایداری شیب های ماسه ای غیر متراکم در اثر بالا آمدن سطح آب"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۰.