



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۴۳۹ تا ۴۴۸
Vol. 48, No. 4, Winter 2016, pp. 439-448



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science and Research
Civil and Environmental Engineering
(AJSR-CEE)

اثر افزایش مقاومت خاک در برابر پدیده رگاب با مسلح سازی تصادفی آن

خالد سلطان نژاد^۱، علی رئیسی استبرق^{۲*}، محمدحسین امید^۳، جمال عبدالمهی^۴

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۳- استاد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۴- مربی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۱۸)

چکیده

رگاب پدیده‌ای است که معمولاً در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مانند سدهای خاکی، کانال‌های آبیاری و شبکه زهکشی تحت تأثیر جریان نشت رو به بالا رخ می‌دهد و یکی از دلایل عمده تخریب سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌گردد. در این تحقیق، یک برنامه آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری سرعت نشت و نیروی مقاوم به رگاب برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح شده خاک ماسه سیلتی تنظیم شد. برای تهیه نمونه‌های مسلح شده، از دو نوع الیاف (پلی‌استر و پلی‌اتیلن ترفتالات) با قطرهای گوناگون (۰/۳ و ۰/۲ میلی‌متر) استفاده شد. مراحل آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف (۵/۰، ۱۰/۷۵ و ۱۱/۲۵) و طول‌های متفاوت الیاف (۵، ۲۵، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر) تحت تأثیر بارهای هیدرولیکی گوناگون در دستگاه ویژه طراحی شده، انجام گرفت. اندازه‌گیری دبی و سرعت نشت جریان عبوری از نمونه‌های غیرمسلح و مسلح انجام شد و سپس محاسبه و مقایسه نیز صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که افزودن الیاف سبب کاهش سرعت نشت، افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب شده و وقوع رگاب را نیز به تأخیر می‌اندازد. علاوه بر این، افزایش در شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب تابعی از درصد وزنی و طول الیاف بود.

کلمات کلیدی:

رگاب، شیب هیدرولیکی بحرانی، مسلح سازی تصادفی، سرعت نشت، نیروی نشت

Please cite this article using:

Soltannejad, K., Estabragh, A. R., Omid, M. H. and Abdolahi, J., 2016. "Effect of Randomly Reinforced Soil on Increasing Resistance against Piping Phenomenon". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(4), pp. 439-448.

DOI: 10.22060/ceej.2016.617

URL: http://ceej.aut.ac.ir/article_617.html

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



توسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: E-mail: raeesi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

سازه‌های هیدرولیکی مانند سدهای خاکی، بندهای انحرافی، سیل‌بندها، خاکریزها، کانال‌های آبیاری و سامانه‌های زهکشی، سازه‌هایی هستند که بر روی بسترهای خاکی احداث شده و همواره در تماس با آب هستند. از آنجایی که آب توانایی نشست و حرکت از پتانسیل بیشتر به پتانسیل کمتر در زیر این سازه‌ها را دارد، ممکن است در صورت این‌که جهت حرکت آب در توده خاک به سمت بالا باشد نیروی جریان آب نشست یافته از تنش مؤثر بین ذرات خاک بیشتر شده و در واقع تنش مؤثر بین ذرات خاک صفر شود؛ به گونه‌ای که نیروی نشست آب بتواند ذرات خاک را با خود جابجا کند. این پدیده، یعنی خروج ذرات خاک از بستر سازه به بیرون آن، به پدیده رگاب موسوم است. ادامه پدیده رگاب در سازه‌های هیدرولیکی موجب تخریب سازه شده و بیش از ۱/۵ درصد از خرابی سدهای خاکی در اثر وقوع این پدیده است [۱]. شرارد و همکارانش^۱ در سال ۱۹۸۴، پیدایش پدیده رگاب را شرح داده و به تعدادی از مسائلی که سبب به وجود آمدن این پدیده در سدهای خاکی و سازه‌های هیدرولیکی می‌شود، پرداختند [۲]. از مهمترین عواملی که ممکن است در پیدایش وقوع رگاب تأثیرگذار باشند، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- وجود درز و شکاف و همچنین لایه‌ها و عدسی‌هایی از شن و ماسه در پی سازه آبی

- عدم تراکم کافی خاک محیط اطراف سازه هیدرولیکی. به عبارتی دیگر، تراکم خاک نسبت به سایر نقاط کمتر و نفوذپذیری نسبی آن بیشتر است. بنابراین، نشست آب در آن بخش متمرکز شده و سبب افزایش شیب هیدرولیکی و جابجایی ذرات خاک می‌گردد. برای افزایش ایمنی سازه‌های در معرض پدیده رگاب، روش‌های معمول زیر وجود دارند:

الف) استفاده از سپر در پنجه سد

ب) استفاده از یک بستر غیرقابل نفوذ^۲ در بخش بالادست

ج) قرار دادن سربار در قسمت پایین‌دست؛ به طوری که نیروی وزن مصالح پایین‌دست افزایش یابد.

با وجود روش‌های فوق، اخیراً مسلح‌سازی تصادفی خاک پایین‌دست (که در معرض پدیده رگاب بوده) مورد توجه محققین قرار گرفته است. مسلح‌سازی تصادفی خاک عبارت است از مخلوط‌نمودن خاک با موادی مانند الیاف طبیعی و مصنوعی. به بیانی دیگر، مسلح‌سازی خاک را می‌توان اختلاط آسان خاک با مواد مسلح‌کننده، ایجاد مقاومت ایزوتروپیک^۳ در کل توده خاک به وسیله عناصر مسلح‌کننده و جلوگیری از پیدایش صفحه‌های ضعیف و غیرمقاوم در توده خاک دانست [۴]. این روش مسلح‌سازی از قدیم در بین جوامع مختلف مرسوم بوده است. اما بررسی علمی و تحقیقاتی آن از سال ۱۹۷۰ آغاز گردیده که می‌توان به مطالعات محققینی

مانند ماهر و گری^۴ در سال ۱۹۹۰، گری و اوهاشی^۵ در سال ۱۹۸۳، ماهر و وودز^۶ در سال ۱۹۹۰، یتیم‌اقلو و همکارانش^۷ در سال ۲۰۰۳ و یتیم‌اقلو و سالباس^۸ در سال ۲۰۰۵ اشاره نمود که آزمایش‌های گوناگونی را بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌ای مسلح‌شده به صورت تصادفی انجام داده و نتیجه گرفتند که افزایش الیاف موجب افزایش مقاومت خاک می‌گردد [۴-۸]. اولین بار فوروموتو و همکارانش^۹ در سال ۲۰۰۲ عمل مسلح‌سازی تصادفی خاک را برای مقابله با نیروی نشست و پیدایش پدیده رگاب مطرح کرده و آزمایش‌هایی را در این خصوص انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که عمل مسلح‌سازی را می‌توان به عنوان یک روش بهسازی خاک برای مقابله با پدیده رگاب مورد استفاده قرار داد [۹]. محققین دیگری مانند سیواکومار بابو و واسودوان^{۱۰} در سال ۲۰۰۸، داس و همکارانش^{۱۱} در سال ۲۰۰۹ و داس و ویسوانادام^{۱۲} در سال ۲۰۱۰ با انجام آزمایش‌هایی در این خصوص دریافتند که افزودن الیاف به خاک در افزایش مقاومت آن در برابر رگاب مؤثر است [۱۱، ۱۰، ۳]. آزمایش‌های محققین مذکور اغلب محدود به یک نوع الیاف بوده و از طرفی دیگر، الیاف مورد استفاده در تحقیقات آن‌ها دارای قطر بسیار کم و در حد چند میکرون است. همچنین درصد‌های وزنی مورد استفاده نیز به یک یا دو درصد خاص محدود هستند. بررسی منابع نشان می‌دهد که مطالعه در خصوص مسلح‌سازی خاک در برابر پدیده رگاب بسیار محدود و مطالعات اندک موجود محدود به استفاده از الیاف با قطر بسیار کم (در حد میکرون) بوده که کاربرد آن‌ها در عمل بسیار مشکل است. در تحقیق حاضر، دو نوع الیاف مصنوعی با قطرهای نسبتاً بزرگ و متفاوت با طول و درصد‌های وزنی مختلف برای مسلح‌سازی خاک برای مقابله و کنترل نیروی نشست و پدیده رگاب مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق، حاوی ۳۰ درصد سیلت^{۱۳} و ۷۰ درصد ماسه بوده که خواص فیزیکی و مکانیکی آن مطابق با استاندارد ASTM D882 تعیین شده و در جدول (۱) آورده شده است. خاک گفته‌شده مطابق با طبقه‌بندی یونیفاید^{۱۴} SM (ماسه سیلتی) شناخته شد.

^۴ M. H. Maher and D. H. Gary

^۵ D. H. Gary and H. Ohashi

^۶ M. H. Maher and R. D. Woods

^۷ T. Yetimoglu et al.

^۸ T. Yetimoglu and O. Salbas

^۹ K. Furumoto et al.

^{۱۰} Sivakumar-Babu and Vasudevan

^{۱۱} A. Das et al.

^{۱۲} A. Das and B. V. S. Viswandahm

^{۱۳} Silt

^{۱۴} Unified

^۱ J. L. Sherard et al.

^۲ Blanket of Impermeable Material

^۳ Isotropic Resistance

جدول (۱): مشخصات خاک استفاده شده

ویژگی	مقدار مشخصه
وزن مخصوص نسبی (Gs)	۲/۷
درصد سیلت	۳۰
درصد ماسه	۷۰
نوع خاک	SM
حد روانی (درصد)	-
حد خمیری	فاقد حد خمیری
رطوبت بهینه (درصد)	۱۳/۲
وزن واحد حجم بیشینه (کیلو نیوتون بر متر مکعب)	۱۸/۱

آزمایش‌هایی را بر روی نمونه‌های شنی و ماسه‌ای انجام داده و وقوع پدیده رگاب را مشاهده نمودند [۱۲].

اخیراً فوروموتو و همکارانش^۲ در سال ۲۰۰۲، سیواکوماریا و همکارانش^۳ در سال ۲۰۰۸، داس و همکارانش^۴ در سال ۲۰۰۹ و همچنین داس و ویسوانادام^۵ در سال ۲۰۱۰ دستگاهی مشابه با دستگاه استفاده شده توسط اسکمپتون و براگان در سال ۱۹۹۴ را برای بررسی پدیده رگاب در خاک طبیعی و مسلح شده با الیاف طراحی کرده و ساختند [۳،۹،۱۰،۱۲]. در تحقیق حاضر، برای بررسی پدیده رگاب و شبیه‌سازی آزمایشگاهی یک‌بعدی آن توسط جریان نشت رو به بالا، دستگاهی به این منظور طراحی و ساخته شد.

در این تحقیق، یک دستگاه تقریباً مشابه با دستگاه استفاده شده توسط اسکمپتون و براگان [۱۲] برای شبیه‌سازی آزمایش رگاب در حالت یک‌بعدی طراحی و ساخته شد. بخش مهم دستگاه ساخته شده، شبیه‌سازی جریان یک‌بعدی آب رو به بالا از نمونه خاک است. شکل (۱) نمایی از دستگاه را نشان می‌دهد. قسمت اصلی این دستگاه متشکل از دو ظرف استوانه‌ای به شماره (۱) و (۲) است که روی یک صفحه مسطح از جنس پلاکسی گلاس^۶ به ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده‌اند. برای نصب دقیق و مناسب این دو استوانه بر روی صفحه پلاکسی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر، مقدار ۱۰ میلی‌متر از ضخامت این صفحه توسط دستگاه لیزر برش داده شده و برای آب‌بندی کامل، محل اتصال استوانه‌ها به صفحه پلاکسی از چسب مخصوص و نوار تفلون استفاده شد. همچنین این دو استوانه از پایین توسط لوله پلاستیکی که مجهز به یک شیر برای قطع و وصل جریان آب است، به یکدیگر متصل شده‌اند. استوانه شماره (۱) مدرج بوده و بر روی دیواره آن منافذی با قطر ۸ میلی‌متر به فاصله ۲۰ میلی‌متر از یکدیگر ایجاد شده که به وسیله این منافذ، می‌توان ارتفاع آب در داخل آن را ثابت نگاه داشته و در گام بعدی آن را تغییر داد. برای تنظیم سطح آب در استوانه شماره (۱)، لوله تنظیم سطح آب بالادست با توجه به شیب هیدرولیکی مورد نظر در یکی از منافذ این استوانه قرار داده شده و محکم می‌گردد. سپس برای پر کردن استوانه شماره (۱) تا ارتفاع مورد نظر لوله تأمین آب با میزان آب ورودی دلخواه باز می‌شود. مقداری از آب ورودی از این لوله از میان نمونه نشت یافته و پس از خروج از نمونه برای محاسبه سرعت نشت جمع‌آوری می‌گردد. مقدار آب اضافی که توسط لوله تأمین آب وارد استوانه شماره (۱) می‌شود، توسط لوله تنظیم سطح آب بالادست به بیرون انتقال می‌یابد. بنابراین، سطح آب در استوانه شماره (۱) برای شیب هیدرولیکی مورد نظر ثابت می‌ماند. استوانه شماره (۲) دارای ارتفاع ۵ میلی‌متر بوده و به صورتی طراحی شده که به آسانی و ایمنی کافی می‌توان ظرف حاوی نمونه خاک را در بالای آن قرار داد.

۲-۲- الیاف

الیاف‌های استفاده شده در این تحقیق برای تسلیح خاک، از نوع پلی‌استر و پلی‌اتیلن بوده که مقاومت کششی آن‌ها مطابق با استاندارد ASTM و به وسیله آزمایش کشش تعیین گردید و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها نیز در جدول (۲) آورده شده‌اند. در این کار، طول‌های استفاده شده برای دو نوع الیاف شامل ۵، ۲۵، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر است.

۲-۳- دستگاه آزمایش

روش استاندارد برای انجام آزمایش رگاب در آزمایشگاه وجود ندارد [۴]. اسکمپتون و براگان^۱ در سال ۱۹۹۴ برای مطالعه پدیده رگاب، دستگاهی را طراحی و استفاده کردند. آن‌ها به وسیله این دستگاه،

جدول (۲): مشخصات الیاف استفاده شده

ویژگی	مقدار مشخصه	
	پلی‌اتیلن ترفتالات	پلی‌استر
نوع الیاف	منفرد	منفرد
وزن مخصوص (Gs)	۱/۲	۰/۸
قطر (میلی‌متر)	۰/۳	۰/۲
مقاومت کششی (مگا پاسکال)	۴۹۵	۶۲۴
ضریب کشسانی (مگا پاسکال)	۳۰۰۰	۲۰۰۰
نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	۱۶۷-۱۴۰	۲۵۵
حلالیت در آب	نامحلول	نامحلول
مقاومت در برابر اسید و باز	عالی	عالی
بو	بی‌بو	بی‌بو
جذب آب	صفر	صفر

^۱ A. W. Skempton and J. M. Brogan

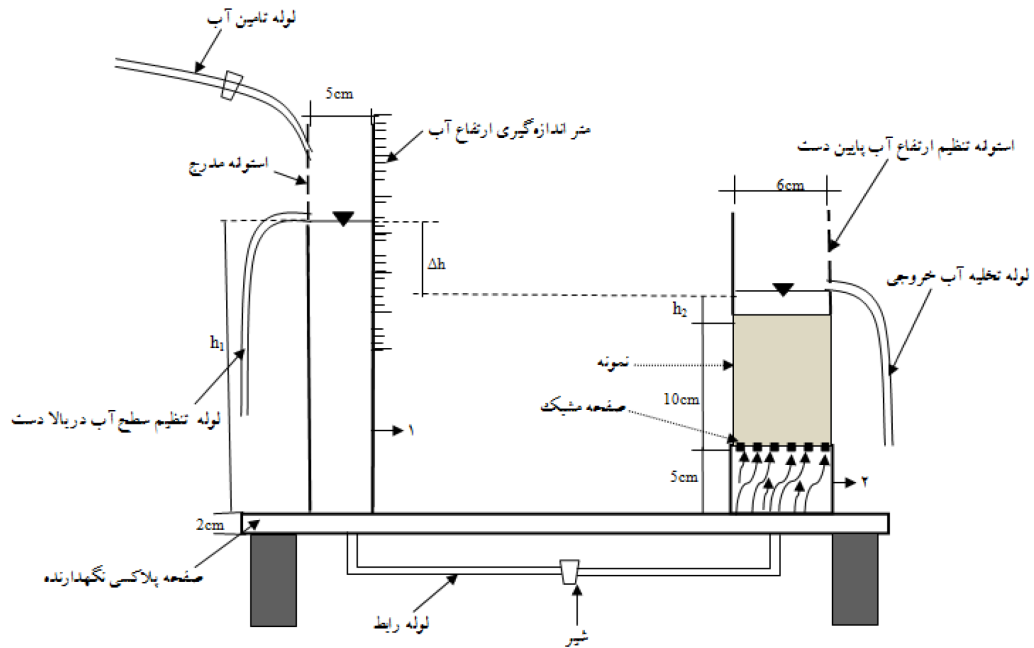
^۲ K. Furumoto et al.

^۳ G. L. Sivakumar Babu et al.

^۴ A. Das et al.

^۵ A. Das and B. V. S. Viswandahm

^۶ Plexi Glass



شکل (۱): طرحواره دستگاه طراحی شده برای بررسی پدیده رگاب

۲-۴- تهیه نمونه و روش آزمایش

آزمایش‌های یک‌بعدی رگاب بر روی نمونه‌های غیرمسلح و مسلح‌شده با درصد‌های وزنی و طول‌های مختلف الیاف انجام شد. درصد وزنی الیاف استفاده‌شده در این تحقیق، از رابطه (۲) بدست آمد:

$$\rho_f = \frac{W_f}{W} \quad (2)$$

که در آن، W_f و W به ترتیب وزن الیاف و خاک است و ρ_f نیز مقادیر ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. مقدار W_f را می‌توان برای یک درصد معین و وزن مشخص از خاک با استفاده از رابطه (۲) محاسبه نمود. طول الیاف‌های استفاده‌شده برابر با ۵، ۲۵، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر است و اختلاط الیاف و خاک و آب نیز به صورت دستی انجام شد [۱۳]. آزمایش‌های تراکم استاندارد بر روی خاک معمولی و خاک مسلح‌شده انجام گرفت و رطوبت بهینه و وزن واحد حجم بیشینه تعیین گردید.

نمونه‌های آزمایشگاهی به روش استاتیکی با رطوبت بهینه و وزن واحد حجم بیشینه حاصل از آزمایش تراکم استاندارد تهیه شده‌اند. به این منظور، به نمونه خاک معمولی و خاک حاوی الیاف، رطوبت کافی اضافه شد تا رطوبت بهینه در آن‌ها ایجاد گردد. سپس نمونه‌ها در یک قالب مخصوص که دارای قطر داخلی و ارتفاع به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است، در سه لایه به وسیله یک دستگاه بارگذاری مخصوص با سرعت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه متراکم گردید. میزان بار وارده به هر لایه به صورتی انتخاب شد که وزن واحد حجم خشک بیشینه در آن‌ها حاصل شود. پس از تهیه نمونه با شرایط بهینه رطوبت و وزن واحد حجم خشک بیشینه بخش‌های بالا و پایین نمونه از آن جدا شده و نمونه حاصل با قطر، طول و ارتفاع به ترتیب ۵۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بدست آمد. لبه‌های استوانه حاوی نمونه توسط چسب مخصوص و نوار تفلون آب‌بندی شد

ظرف حاوی نمونه نیز از جنس پلاستیکی گلاس با قطر داخلی، ضخامت و ارتفاع به ترتیب ۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است.

در هنگام قرار دادن ظرف حاوی نمونه روی استوانه شماره (۲)، از یک صفحه فلزی توری برای توزیع مناسب فشار و جریان آب عبوری از نمونه خاک و نیز جلوگیری از سقوط و جابه‌جایی نمونه به داخل استوانه شماره (۲) به هنگام نشت آب از میان آن استفاده شده است. اندازه منافذ این صفحه ۰/۱۵ میلی‌متر انتخاب گردید تا از اثر آن بر روی جریان آب و همچنین ایجاد افت در فشار ورودی به نمونه جلوگیری شود. در قسمت بالای ظرف حاوی نمونه، استوانه دیگری که در شکل (۱) نشان داده شده و دیواره آن دارای منافذی با قطر ۸ میلی‌متر است، قرار داده شده که از آن برای تغییر ارتفاع آب و نیز افزایش ارتفاع آب بالای نمونه استفاده می‌شود. آب خروجی از نمونه در صورتی که تحت تأثیر بار هیدرولیکی مشخصی قرار داشته باشد، از طریق لوله تخلیه آب خروجی جمع‌آوری شده و حجم آن اندازه‌گیری می‌گردد. شیب هیدرولیکی (i) در هر مرحله از آزمایش را می‌توان از رابطه (۱) بدست آورد:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

که در آن، Δh اختلاف ارتفاع آب بین استوانه شماره (۱) و روی نمونه خاک و L طول نمونه است.

همان‌طور که بیان شد، دستگاه طراحی و ساخته‌شده در تحقیق حاضر، از نوع پلاستیکی گلاس بوده و تأثیر تماس نمونه‌های مسلح و غیرمسلح تهیه‌شده از خاک مورد آزمایش با دیواره‌های استوانه حاوی نمونه به دلیل صاف بودن دیواره داخلی استوانه به حداقل رسیده است. همچنین استوانه حاوی نمونه کاملاً شفاف بوده و در طول مدت آزمایش، تغییرات در نمونه آزمایش قابل مشاهده است.

۳-۱- آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمایش تراکم استاندارد برای خاک طبیعی و مسلح شده در جدول (۳) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، افزایش الیاف به خاک سبب کاهش رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه نسبت به خاک طبیعی می گردد. برای نمونه رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه برای خاک طبیعی به ترتیب برابر با ۱۳/۲ درصد و ۱۸/۱ کیلوگرم بر متر مکعب است. درحالی که این مقادیر برای خاک مسلح شده با ۰/۵ درصد الیاف به طول ۵ میلی متر به ترتیب برابر با ۱۲/۸۷ درصد و ۱۷/۴۳ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که به ترتیب دارای کاهشی برابر با ۲/۵ و ۳/۷ درصد است. شکل (۲- a, b) تغییرات وزن واحد حجم برای دو نوع الیاف با درصدهای مختلف و طولهای متفاوت را نشان داده است. همان طور که مشاهده می گردد، با افزایش درصد وزنی الیاف در یک طول ثابت الیاف، وزن واحد حجم کاهش می یابد. با توجه به شکل (۲- a, b) می توان دریافت که کاهش وزن واحد حجم بیشینه برای الیاف پلی استر کمتر از پلی اتیلن ترفتالات است. افزودن الیاف در حجم مشخص موجب جابه جایی و جایگزینی ذرات جامد خاک با الیاف که دارای وزن مخصوص (G_s) کمتری نسبت به خاک است، می شود. به عبارتی دیگر، مواد سبک تر جایگزین مواد سنگین تر شده و موجب کاهش وزن واحد حجم می گردد. از طرفی دیگر، الیاف اضافه شده خاصیت جذب آب ندارد و موجب کاهش جذب آب و کاهش رطوبت نمونه مسلح شده نسبت به نمونه خاک معمولی می گردد. شکل (۲) تغییرات وزن واحد حجم خشک نمونه های مسلح شده برای دو نوع الیاف استفاده شده را نشان می دهد. در این شکل، مشاهده می شود که به هر درصد خاصی از الیاف وزن واحد حجم برای الیاف با طول ۲۵ میلی متر بیشتر از ۵ میلی متر است که این پدیده را می توان ناشی از عدم اختلاط مناسب الیاف و خاک دانست.

۳-۲- آزمایش رگاب

در این تحقیق، پس از تهیه نمونه هایی با درصدهای وزنی مختلف و طولهای متفاوت از هر کدام از دو نوع الیاف بکار رفته و قرار دادن آنها در دستگاه مخصوص آزمایش، مقدار سرعت نشت در هر گام با جمع آوری دبی آب خروجی از نمونه ها اندازه گیری شد. آزمایش و افزایش بار آبی تا وقوع پدیده رگاب در نمونه ها ادامه یافت و مقدار سرعت نشت و نیروی مقاوم به رگاب از رابطه های (۳)، (۴) و (۶) محاسبه گردید.

۳-۳- شیب هیدرولیکی بحرانی

از رسم نمودار سرعت در مقابل شیب هیدرولیکی می توان شیب هیدرولیکی بحرانی را بدست آورد. برای محاسبه شیب هیدرولیکی بحرانی از روش داس و همکارانش در سال ۲۰۰۹ استفاده شد [۳]. همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، از ترسیم خطوط مماس بر دوشاخه منحنی سرعت-شیب هیدرولیکی و تعیین نقطه برخورد آنها، یک شیب هیدرولیکی بدست می آید که همان شیب هیدرولیکی بحرانی است.

و نمونه به همراه استوانه حاوی آن در دستگاه مخصوص آزمایش قرار گرفت. پس از آن، نمونه تحت اثر اختلاف ارتفاع ۲ سانتی متر آب به مدت ۱۲ ساعت برای اشباع شدن قرار گرفته و پس از اشباع کامل نمونه، با افزایش ارتفاع در هر گام و با اندازه گیری دبی آب خروجی از نمونه، سرعت نشت محاسبه شد و روند افزایش ارتفاع به صورت گام به گام تا وقوع پدیده رگاب ادامه یافت. وقوع رگاب با تخریب کامل نمونه های مسلح و غیرمسلح همراه بوده و هنگام شروع پدیده مذکور، سطح آب موجود در بالای نمونه کدر شده که نشان دهنده شسته شدن ذرات ریز موجود در نمونه خاک است. همچنین دبی آب خروجی نیز افزایش یافت و مقدار سرعت نشت با استفاده از رابطه های (۳) و (۴) محاسبه گردید:

$$V = \frac{Q}{At} \quad (3)$$

$$V_s = \frac{V}{n} \quad (4)$$

که در آن، V سرعت جریان (متر بر ثانیه)، n تخلخل نمونه خاک، Q حجم آب خروجی از نمونه (متر مکعب)، A سطح مقطع نمونه (۰/۰۰۱۹۶۳ متر مربع)، V_s سرعت نشت (متر بر ثانیه) و t زمان (ثانیه) است. مقدار تخلخل و درصد پوکی نمونه ها نیز از رابطه (۵) محاسبه گردید [۱۴]:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_{Soil} + V_{Fiber}} \Rightarrow n = \frac{e}{1+e} \quad (5)$$

که در آن، e درصد پوکی نمونه، V_v حجم خلل و فرج نمونه، V_s حجم قسمت جامد خاک متشکل از حجم ذرات و حجم الیاف، V_{Fiber} حجم الیاف داخل نمونه خاک و V_{Soil} حجم ذرات نمونه خاک است.

جریان آب عبوری از نمونه خاک، مقداری از انرژی خود را به ذرات خاک منتقل کرده و یک نیرو توسط جریان به ذرات خاک اعمال می گردد. این نیرو به عنوان نیروی نشت تعریف شده است. نیروی نشت آب در جهت جریان عمل کرده و نیروی مقاوم به رگاب در خلاف جهت جریان آب است. بنابراین، در نقطه شروع رگاب (نقطه ای که ذرات خاک در آستانه بلند شدن قرار می گیرند)، نیروی مقاوم به رگاب در نمونه های مسلح شده و غیرمسلح برابر با نیروی نشت است. نیروی نشت در نقطه شروع رگاب و در شیب هیدرولیکی بحرانی را می توان از رابطه (۶) محاسبه نمود:

$$P = \gamma_w i_{cr} V \quad (6)$$

که در آن، P نیروی مقاوم به رگاب، γ_w وزن واحد حجم آب، i_{cr} شیب هیدرولیکی بحرانی و V حجم نمونه خاک مسلح یا غیرمسلح است.

۳- نتایج آزمایش ها و بحث

در مجموع تعداد ۱۷ آزمایش با سه تکرار بر روی نمونه های خاک معمولی و مسلح شده با دو نوع الیاف مختلف صورت پذیرفت که نتایج آنها به شرح زیر است:

جدول (۳): نتایج آزمایش‌های انجام‌شده برای درصدهای وزنی و طول‌های مختلف دو الیاف مورد استفاده قرار گرفته

شماره آزمایش	طول (میلی‌متر)	درصد فیبر	ω_{opt} (درصد)		$V_{d,max}$ (کیلو نیوتون بر متر مکعب)		i_{cr}		P : نیروی مقاوم به رگاب (نیوتون)
			الیاف ترفتالات	پلی‌استر	الیاف ترفتالات	پلی‌استر	الیاف ترفتالات	پلی‌استر	
۱	۰	۰	۱۳/۲	۱۳/۲	۱۸/۱	۱۸/۱	۱/۵۲	۲/۹۸	۲/۹۸
۲	۵	۰/۵	۱۲/۸۷	۱۲/۴۲	۱۷/۵	۱۷/۴۳	۲/۱۵	۴/۱۲	۴/۲۲
۳	۵	۰/۷۵	۱۲/۵۹	۱۱/۹۷	۱۷/۳	۱۷/۲	۲/۲۱	۵/۲۶	۴/۳۴
۴	۵	۱	۱۲/۱	۱۱/۵	۱۷/۲	۱۷/۱۳	۲/۳۷	۵/۳۷	۴/۶۵
۵	۵	۱/۲۵	۱۱/۸۸	۱۱	۱۷/۲	۱۷/۰۳	۲/۳۵	۵/۳۲	۴/۶۱
۶	۲۵	۰/۵	۱۲/۷۸	۱۲/۷	۱۷/۶	۱۷/۲۶	۲/۳۱	۴/۵۳	۴/۲۶
۷	۲۵	۰/۷۵	۱۲/۴۴	۱۱/۷	۱۷/۴	۱۷/۱۷	۲/۳۴	۴/۵۹	۵/۰۱
۸	۲۵	۱	۱۲/۰۴	۱۱/۳	۱۷/۳	۱۷/۱	۲/۷۲	۵/۳۴	۵/۱
۹	۲۵	۱/۲۵	۱۱/۶۲	۱۱	۱۷/۲	۱۶/۸۸	۲/۷۵	۵/۴	۴/۶۳
۱۰	۳۵	۰/۵	۱۲/۶۳	۱۲/۷	۱۷/۴	۱۷/۵۶	۲/۳۴	۴/۵۹	۴/۲۲
۱۱	۳۵	۰/۷۵	۱۲/۴۹	۱۲/۳	۱۷/۲	۱۷/۳۰	۲/۷۵	۵/۴	۵/۰۳
۱۲	۳۵	۱	۱۲/۱۶	۱۲	۱۷/۲	۱۶/۸۵	۲/۷۷	۵/۴۳	۵/۷۹
۱۳	۳۵	۱/۲۵	۱۱/۸۲	۱۱/۸	۱۷/۲	۱۶/۶۶	۲/۷۲	۵/۳۴	۶/۰۹
۱۴	۵۰	۰/۵	۱۲/۸۴	۱۲/۹	۱۷/۳	۱۶/۷۴	۲/۵۵	۵/۰۱	۵/۰۱
۱۵	۵۰	۰/۷۵	۱۲/۵۱	۱۲/۴	۱۷/۲	۱۶/۱	۲/۷۹	۵/۴۸	۵/۴۲
۱۶	۵۰	۱	۱۲/۳۶	۱۲/۱	۱۷/۲	۱۵/۳۴	۳/۱۵	۶/۱۸	۶/۱۸
۱۷	۵۰	۱/۲۵	۱۲/۲۵	۱۲/۲	۱۷/۱	۱۴/۸۴	۲/۷۷	۵/۴۳	۶/۱۴

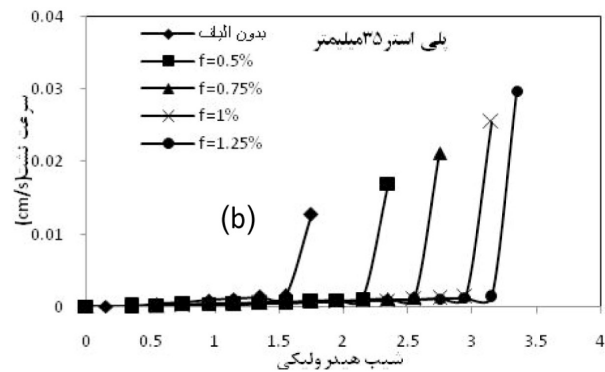
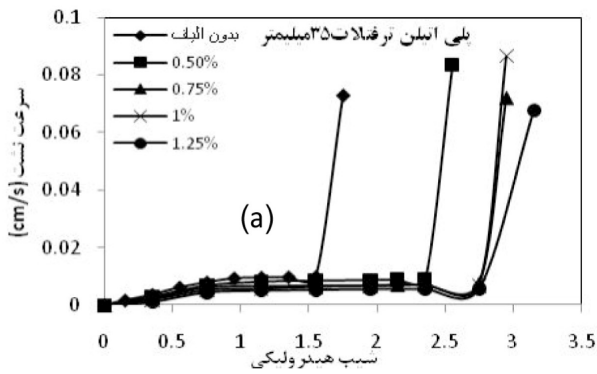
نمودار مربوط به ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر الیاف بر یکدیگر منطبق هستند. این‌گونه غیرهمسان‌بودن توسط محققین دیگری مانند داس و همکارانش در سال ۲۰۰۹ و داس و ویسووانادم در سال ۲۰۱۰ نیز گزارش شده است. علت آن را می‌توان به پدیده انباشتگی و تمرکز الیاف در نمونه خاک مسلح‌شده در نقاط خاص و نیز قرارگیری الیاف در جهت‌های نامناسب در حفرات و فضای بین دانه‌های خاک دانست [۳، ۱۱].

۳-۴- نیروی مقاوم به رگاب

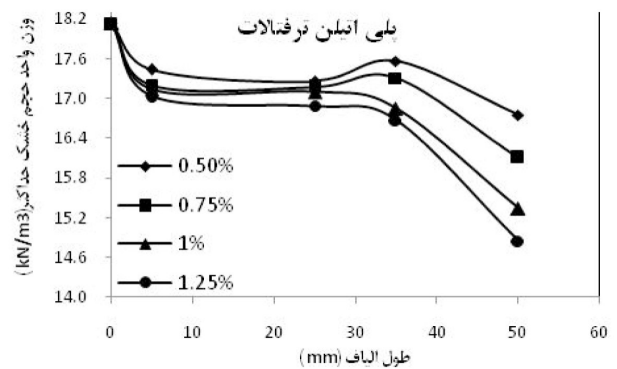
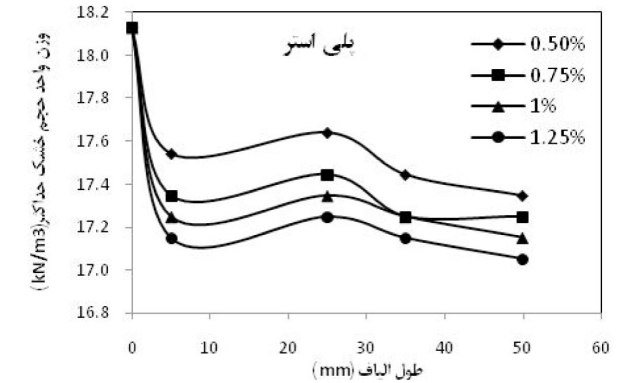
مقدار نیروی مقاوم به رگاب بر اساس رابطه (۶) محاسبه شده و نتایج نیز در جدول (۳) آورده شده‌اند. شکل‌های (۶) و (۷)، تغییرات نیروی مقاوم به رگاب برای دو نوع الیاف با طول و درصدهای وزنی مختلف را نشان می‌دهند. در شکل (۶-۴) ملاحظه می‌گردد که نیروی مقاوم به رگاب برای یک طول مشخص، با افزایش درصد الیاف افزایش می‌یابد؛ به صورتی که در طول‌های مختلف برای درصد وزنی ۱/۲۵ درصد بیشترین مقدار نیروی مقاوم به رگاب بدست می‌آید. در شکل (۶-۵) تغییرات برای

مطابق با این روش، شیب هیدرولیکی بحرانی برای کلیه آزمایش‌ها تعیین گردید. مقادیر شیب هیدرولیکی بحرانی بدست آمده برای آزمایش‌های مختلف در جدول (۳) آورده شده است. به عنوان نمونه، در شکل (۴) نمودار تغییرات سرعت نشت و شیب هیدرولیکی برای درصدهای مختلف (۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ درصد) در طول ثابت ۳۵ میلی‌متر برای دو نوع الیاف نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که شیب هیدرولیکی بحرانی با افزایش درصد الیاف افزایش می‌یابد و به عبارتی دیگر، وقوع پدیده رگاب نسبت به خاک طبیعی با تأخیر روی می‌دهد.

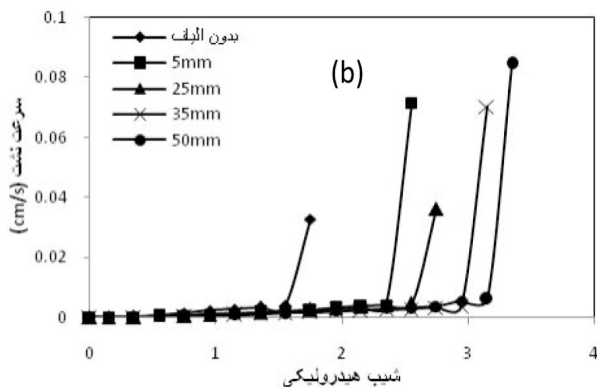
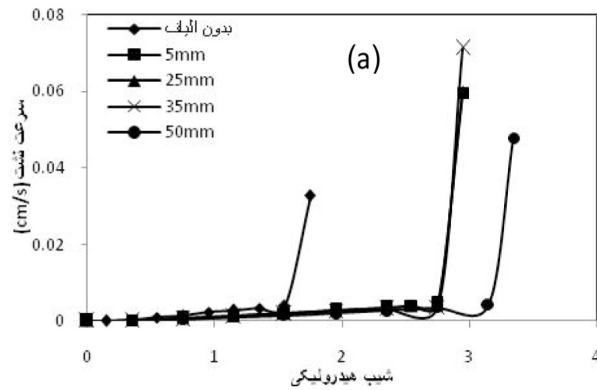
شکل (۵-۵) تغییرات سرعت با شیب هیدرولیکی را برای طول‌های مختلف (۵، ۲۵، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر) و در درصد ثابت (یک درصد) نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که افزایش طول الیاف نیز سبب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی می‌گردد. همچنین نتایج بدست آمده با یافته‌های دیگر محققین نیز مطابقت دارد [۴، ۹]. به عنوان مثال در شکل (۳-۵) نمودار مربوط به خاک با ۱ و ۰/۷۵ درصد الیاف و در شکل (۴-۵)



شکل (۴): تغییرات سرعت نشت در مقابل شیب هیدرولیکی برای الیاف پلی اتیلن ترفتالات و پلی استر با طول ۳۵ میلی‌متر و درصدهای مختلف

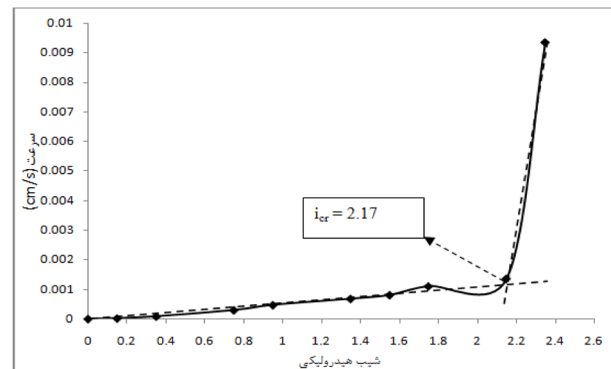


شکل (۲): تغییرات وزن واحد حجم خشک نمونه‌های مسلح‌شده برای دو نوع الیاف استفاده‌شده با درصدهای مختلف



شکل (۵): تغییرات سرعت نشت در مقابل شیب هیدرولیکی برای الیاف پلی اتیلن ترفتالات (a) و پلی استر (b) با درصد وزنی یک درصد و طول‌های مختلف

هر طول با درصدهای مختلف الیاف نشان داده شده است. به عنوان مثال، برای طول‌های ۵ و ۲۵ میلی‌متر با افزایش درصد وزنی، مقدار نیروی مقاوم به رگاب تقریباً ثابت است. به صورت مشابه، این پدیده برای الیاف پلی استر نیز مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج مندرج در جدول (۳)، دیده می‌شود که برای دو الیاف استفاده‌شده در برخی از درصدهای وزنی الیاف، مقدار شیب هیدرولیکی به مقدار ثابتی رسیده و پس از آن و در حالی که با افزایش درصد وزنی تغییری مشاهده نمی‌شود، در بعضی از موارد با کاهش شیب هیدرولیکی بحرانی همراه است که این تغییرات شیب هیدرولیکی، به نحوی در نیروی مقاوم به رگاب منعکس می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۶-۱) مشاهده می‌شود، مقدار نیروی مقاوم به رگاب در ۱/۲۵

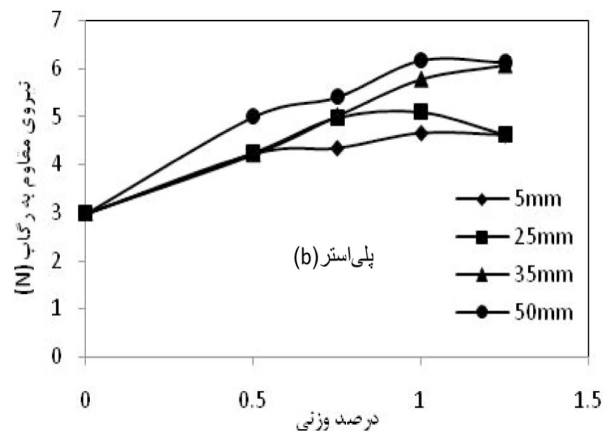
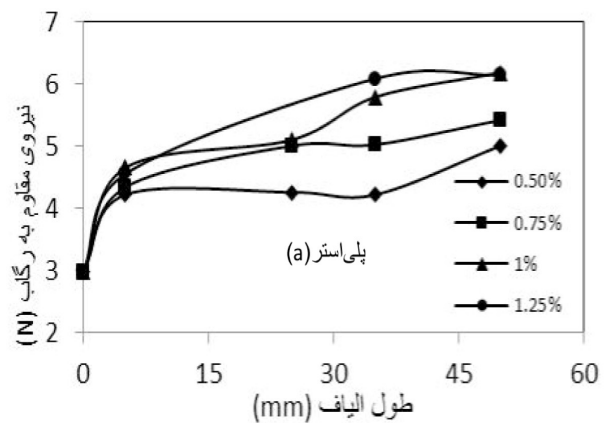


شکل (۳): ترسیم مماس و محاسبه شیب هیدرولیکی بحرانی

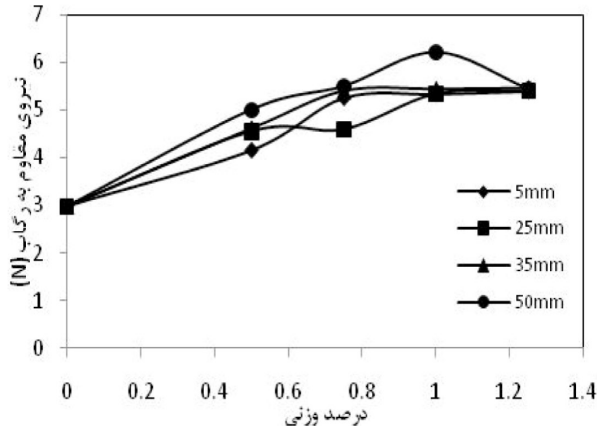
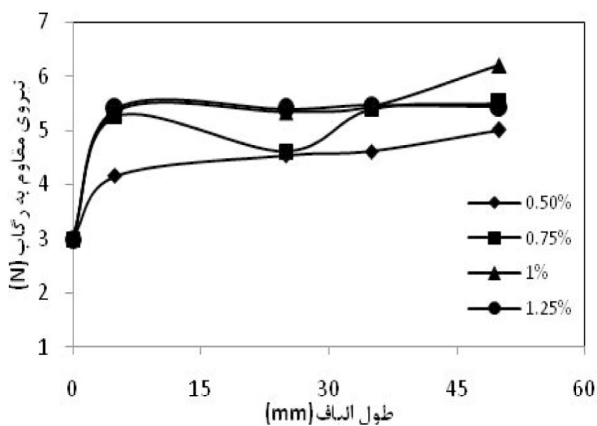
یابد (افزایش درصد وزنی) موجب افزایش بیشتر اصطکاک بین ذرات خاک و الیاف می‌گردد و بنابراین موجب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و در نتیجه مقاومت بیشتر در برابر نیروی نشت می‌شود. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که افزایش طول الیاف در یک درصد وزنی ثابت باعث افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی می‌شود. به بیانی دیگر، افزایش طول برای یک درصد وزنی ثابت و قطر مشخص سبب افزایش سطح تماس بیشتر الیاف و ذرات خاک شده و اصطکاک بین آن‌ها افزایش می‌یابد که خود موجب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به نشت می‌گردد. بنابراین، شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به نشت افزایش می‌یابند. از طرفی دیگر، جایگزین شدن ذرات با الیاف و مقاومت ایجاد شده در مقابل نیروی نشت به سطح تماس بین الیاف و ذرات خاک بستگی دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی بهسازی خاک ماسه‌ای سیلتی در برابر پدیده رگاب به وسیله مسلح‌سازی تصادفی خاک با الیاف مصنوعی پرداخته شد. آزمایش‌های متعدد یک‌بعدی رگاب در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های ماسه‌ای سیلتی طبیعی و مسلح‌شده با الیاف پلی‌استر و پلی‌اتیلن



شکل (۶): تغییرات نیروی مقاوم به رگاب برای الیاف پلی‌استر



شکل (۷): تغییرات نیروی مقاوم به رگاب برای الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات

درصد وزنی الیاف پلی‌استر به طول ۲۵ میلی‌متر برابر با $4/63$ نیوتون بوده که نسبت به نمونه‌های با یک درصد وزنی با همین طول ($5/1$ نیوتون) به مقدار ۱۰ درصد کاهش یافته است. همچنین نیروی مقاوم به رگاب در شکل (۷-ب) برای الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات به طول ۵ میلی‌متر در $1/25$ درصد وزنی برابر با $5/37$ نیوتون نسبت به یک درصد ($5/37$ نیوتون) برای همین طول، کاهشی معادل با یک درصد را دارد که دلیل آن، کاهش در شیب هیدرولیکی بحرانی است و این کاهش در ارتباط با درصد وزنی، در بخش قبلی شرح داده شد. همان‌طور که پیشتر بیان شد، این نوع تغییرات شیب هیدرولیکی و نیروی مقاوم به رگاب توسط محققین دیگری مانند داس و همکارانش در سال ۲۰۰۹ و داس و ویسووانادم در سال ۲۰۱۰ نیز گزارش شده است [۳، ۱۱]. محققینی از قبیله رانجان و همکارانش^۱ در سال ۱۹۹۶ و میشلوسکی و کرمک^۲ در سال ۲۰۰۳ که در مورد مقاومت خاک‌های مسلح‌شده تحقیقاتی را انجام داده‌اند، به این نتیجه رسیدند که افزایش الیاف تا یک آستانه مشخص موجب افزایش مقاومت می‌گردد و با افزایش بیشتر آن تأثیری در افزایش مقاومت مشاهده نمی‌شود [۱۳، ۱۵]. به عبارتی دیگر، هنگامی که تعداد الیاف در حجم خاصی از خاک افزایش

¹ G. Ranjan et al.

² R. L. Michalowski and J. Cermak

- 1677, 1990.
- [5] Gary, D. H. and Ohashi, H.; "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 335–353, 1983.
- [6] Maher, M. H. and Woods, R. D.; "Dynamic Response of Sands Reinforced with Randomly Distributed Fibers," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 7, pp. 1116–1131, 1990.
- [7] Yetimoglu, T.; Inanir, M. and Inanir, O. E.; "A Study on Bearing Capacity of Randomly Distributed Fiber Reinforced Sand Fills Overlying Soft Clay," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 23, No. 2, pp. 174–183, 2005.
- [8] Yetimoglu, T. and Salbas, O.; "A Study on Shear Strength of Sands Reinforced with Randomly Distributed Discrete Fibers," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 21, No. 2, pp. 103–110, 2003.
- [9] Furumoto, K.; Miki, H.; Tsuneoka, N. and Obata. T.; "Model Test on the Piping Resistance of Short Fibre Reinforced Soil and its Application to River Levee," *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Swets and Zeitlinger, Lisse, pp. 1241–1244, 2002.
- [10] Sivakumar-Babu, G. L.; Vasudevan, A. K. and Haldar, S.; "Numerical Simulation of Fiber Reinforced Sand Behavior," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 26, No. 2, pp. 181–188, 2008.
- [11] Das, A. and Viswandahm, B. V. S.; "Experiments on the Piping Behavior of Geofiber-reinforced Soil," *Geotechnics International*, Vol. 17, No. 4, pp. 171–182, 2010.
- [12] Skempton, A. W. and Brogan, J. M.; "Experiments on Piping in Sandy Gravel," *Journal of Geotechnique*, Vol. 44, No. 3, pp. 444–460, 1994.
- [13] Ranjan, G.; Vasan, R. M. and Charan, H. D.; "Behaviour of Plastic-fiber-reinforced Sand," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 13, No. 8, pp. 555–565, 1994.
- [14] Zornberg, J. G.; "Discrete Framework

ترفتالات به ترتیب با قطرهای ۰/۳ و ۰/۲ میلی متر و درصدهای وزنی ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ درصد و طول‌های ۵، ۲۵، ۳۵ و ۵۰ میلی متر انجام گرفت. از نتایج حاصل از این آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- افزایش طول الیاف در یک درصد وزنی ثابت موجب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب می‌گردد؛ به صورتی که برای الیاف با طول ۵ میلی متر در درصد وزنی ۰/۷۵ درصد، شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب ۷۶ درصد افزایش یافته است. با این حال، برای همین الیاف در طول ۵۰ میلی متر، مقادیر مذکور دارای افزایشی برابر با ۸۴ درصد هستند.

- در یک درصد وزنی ثابت از الیاف، آن دسته از الیاف با قطر کوچک‌تر سبب افزایش بیشتر در شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب نسبت به الیاف با قطر بزرگ‌تر می‌گردد؛ به صورتی که در درصد وزنی ۰/۷۵ درصد و طول ۵ میلی متر مقادیر شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب برای الیاف پلی اتیلن با طول ۰/۲ میلی متر به ترتیب برابر با ۲/۶۸ و ۵/۲۶ نیوتون است. با این حال، این مقادیر برای الیاف پلی استر برای همین درصد وزنی و طول الیاف ۰/۳ میلی متر معادل با ۲/۲۱ و ۴/۳۴ نیوتون است.

- مسلح‌سازی تصادفی خاک موجب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به نشت می‌گردد و وقوع پدیده رگاب را به تأخیر می‌اندازد. این پدیده برای دو نوع الیاف استفاده شده مشاهده گردید. بنابراین، می‌توان مسلح‌سازی تصادفی را به عنوان یک روش برای مقابله با نیروی نشت و پایداری یک سازه در نظر گرفت.

۵- مراجع

- [1] Foster, M. A.; Fell, R. and Spannagle, M.; "The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 1000–1024, 2000.
- [2] Sherard, J. L.; Dunnigan, L. P. and Talbot, J. R.; "Basic Properties of Sand and Gravel Filters," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 6, pp. 684–700, 1984.
- [3] Das, A.; Jayashrec, Ch. and Viswandahm, B. V. S.; "Effect of Randomly Distributed Geofibers on the Piping Behaviour of Embankments Constructed with Fly Ash as a Fill Material," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 27, No. 5, pp. 341–349, 2009.
- [4] Maher, M. H. and Gary, D. H.; "Static Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 11, pp. 1661–

“Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 2, pp. 125–136, 2003.

for Limit Equilibrium Analysis of Fibre-reinforced Soil,” *Geotechnique*, Vol. 52, No. 8, pp. 593–604, 2002.

[15] Michalowski, R. L. and Cermak, J.;