

بهسازی خاک در برابر رگاب با استفاده از الیاف مصنوعی

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

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳. مربی گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۴. استاد گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۰/۸)

چکیده

رگاب، که گاهی بر اثر نشت جریان آب در زیر سازه‌های آبی به وجود می‌آید، در اثر تداوم می‌تواند منجر به آسیب‌پذیری سازه‌ها و گاه تخریب کامل آن‌ها شود. در این تحقیق اثر مسلح‌سازی تصادفی یک خاک در تغییر شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب بررسی شد. آزمایش‌های یک‌بعدی رگاب بر نمونه‌های متراکم‌شده یک خاک ماسه سیلنتی به روش استاتیکی در دستگاه ویژه طراحی شده صورت پذیرفت. نتایج نشان داد مسلح‌سازی خاک موجب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و افزایش نیروی مقاوم به رگاب می‌شود؛ طوری که مسلح‌سازی نمونه با ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، و ۱/۲۵ و طول‌های ۵، ۲۵، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر در بهترین حالت به ترتیب سبب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب به مقدار ۳۵/۸، ۴۱/۵، ۵۱ و ۵۱/۷ درصد می‌شود. مقایسه نتایج نمونه‌های خاک طبیعی و مسلح‌شده نشان داد مسلح‌کردن خاک موجب افزایش شیب هیدرولیکی و نیروی مقاوم در مقابل رگاب می‌شود. این افزایش تابعی از درصد وزنی و طول الیاف است. بنابراین افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب تابعی از درصدهای وزنی و طول الیاف است.

کلیدواژگان: رگاب، سرعت نشت، شیب هیدرولیکی بحرانی، مسلح‌سازی خاک.

مقدمه

رگاب، فرایندی فرسایشی و پیش‌رونده و شروع آن از نقطه‌ای است که آب نشت‌یافته در آن نقطه متمرکز و شیب هیدرولیکی برای جابه‌جایی ذرات خاک مناسب می‌شود. در نقطه مذکور نیروی نشت آب از نیروی مقاوم خاک بیشتر است. در نتیجه ذرات از هم جدا و همراه آب جابه‌جا می‌شوند. در ادامه مجاری یا حفره‌هایی به وجود می‌آید که به تدریج در امتداد جریان و در جهت شیب هیدرولیکی بزرگ‌تر گسترش می‌یابد و در نهایت به تخریب سازه هیدرولیکی منجر می‌شود (Foster et al., 2000).

عوامل متعددی در پیدایش رگاب مؤثر است؛ از جمله وجود درز و شکاف، وجود عدسی‌های شن و ماسه در پی سازه، و عدم تراکم کافی خاک محیط اطراف سازه هیدرولیکی. Sherard et al. (1984) وقوع رگاب را یکی از علت‌های مهم تخریب سدهای خاکی معرفی کردند. Foster et al. (2000) گزارش کردند که ۱/۵ درصد تخریب سدها در اثر پیدایش رگاب است. Ubilla et al. (2008) دلیل اصلی تخریب دیواره‌های سیل‌بند در

ایالت لویزیانای امریکا را وقوع پدیده رگاب اعلام کردند. بنابراین جهت حفاظت و ایمنی سازه‌های مختلف هیدرولیکی باید روشی مناسب به کار رود. محققان روش‌هایی مانند احداث سپر بتنی، لایه نفوذناپذیر^۱ در بالادست، و نیز تراکم خاک پایین دست سازه‌های هیدرولیکی را برای ایمنی آن‌ها در مقابله با پدیده رگاب پیشنهاد کردند. روش مسلح‌سازی تصادفی خاک نیز روشی برای جلوگیری و مقابله با پدیده رگاب است. گرچه روش مسلح‌سازی تصادفی خاک از زمان‌های گذشته معمول بود، تحقیقات علمی در خصوص خواص مکانیکی خاک‌های مسلح‌شده از سال ۱۹۷۰ صورت پذیرفت. محققانی مانند Gary Maher and (1990) Maher and Gary (1983) and Ohashi (1990) Woods et al. (2005) Yetimoglu، و and salbas (2003) آزمایش‌های گوناگونی بر نمونه‌های خاک ماسه‌ای مسلح‌شده به صورت تصادفی انجام دادند و نتیجه گرفتند که افزایش الیاف موجب افزایش مقاومت خاک می‌شود. نخستین بار Furumoto et al. (2002) مسلح‌سازی تصادفی

1. Imprevious blanket

* نویسنده مسئول: Khaled_soltan@ut.ac.ir

الیاف

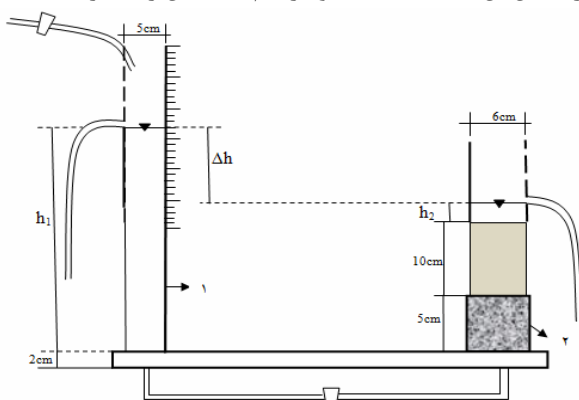
الیاف استفاده شده برای تسلیح خاک در این تحقیق از نوع پلی استر بود. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این الیاف مطابق اطلاعات ارائه شده از سوی تولیدکنندگان در جدول ۲ می آید.

جدول ۲. مشخصات الیاف استفاده شده

مشخصه	مقدار مشخصه
وزن مخصوص (Gf)	۰٫۹
قطر (mm)	۰٫۳
طول (mm)	۵۰، ۳۵، ۲۵، ۵
مقاومت در برابر اسید و باز	عالی
جذب آب	صفر
محدوده ذوب (C°)	۱۴۰-۱۳۵
مقاومت کششی نهایی (Mpa)	۴۹۵
مدول الاستیسیته (Mpa)	۳۰۰۰

دستگاه آزمایش

به دلیل نبود استاندارد مشخص برای انجام دادن آزمایش های رگاب، دستگاه طراحی و ساخته شده برای این تحقیق مشابه دستگاهی است که Skepton and Brogan (1994) استفاده کردند (شکل ۱). قسمت اصلی این دستگاه متشکل از دو ظرف استوانه ای به شماره های ۱ و ۲ است که روی صفحه ای مسطح از جنس پلاکسی گلاس به ضخامت ۲۰ میلی متر قرار داده شد. استوانه شماره ۱ مدرج است. روی دیواره آن منافذی با فاصله ۲۰ میلی متر ایجاد شد که به وسیله این منافذ می توان ارتفاع آب را داخل آن ثابت نگه داشت و در گام بعدی آن را تغییر داد.



شکل ۱. دستگاه طراحی شده برای آزمایش رگاب و اجزای آن

ارتفاع استوانه شماره ۲ حدود ۵۰ میلی متر بود و طوری طراحی گردید که به آسانی و با ایمنی کافی بتوان ظرف حاوی نمونه خاک را بالای آن قرار داد. ظرف حاوی نمونه نیز از جنس پلاکسی گلاس بود با قطر داخلی ۵۰ میلی متر، ضخامت ۵ میلی متر، و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر. هنگام قراردادن ظرف حاوی

خاک را جهت مقابله با پدیده رگاب مطرح کردند. آن ها آزمایش های مختلفی بر نمونه های خاک دانه ای مسلح شده انجام دادند و نتیجه گرفتند که مسلح سازی سبب افزایش مقاومت خاک در برابر رگاب می شود. محققان دیگری، مانند Das *et al.* (2009)، با مسلح سازی خاک به وسیله الیاف مصنوعی به صورت تصادفی دریافتند که درصد بالای الیاف مصنوعی با طول زیاد در کنترل نشت اثر منفی دارد. Das *et al.* (2010) با مسلح سازی خاک به وسیله دو نوع الیاف مصنوعی (پلی پروپیلن و پلی استر) دریافتند که افزودن الیاف به خاک در افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و مقاومت در مقابل رگاب و نیز کاهش سرعت نشت مؤثر است. بررسی منابع نشان داد آزمایش ها بر نمونه های خاک مسلح شده با الیاف به قطر بسیار کم (در حد میکرون) و درصد های وزنی و طولی محدود انجام شده است. هدف تحقیق حاضر بررسی اثر الیاف با قطرهای بزرگ تر و طول و درصد وزنی مختلف جهت شناخت هر چه بیشتر تأثیر مسلح سازی خاک در مقابله با پدیده رگاب است. آزمایش نمونه های متراکم شده از خاک طبیعی و خاک مسلح شده با درصد های وزنی و طول های مختلف الیاف در دستگاهی طراحی و ساخته شده انجام گرفت و سپس نتایج مقایسه و ارزیابی شد.

مواد و روش ها

خاک

خاک استفاده شده در این تحقیق حاوی ۳۰ درصد سیلت و ۷۰ درصد ماسه بود. خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مطابق استاندارد ASTM تعیین شد که در جدول ۱ می آید. خاک مذکور مطابق طبقه بندی یونیفاید SM (ماسه سیلتی) شناخته شد.

جدول ۱. مشخصات خاک استفاده شده

مشخصه	مقدار مشخصه
وزن مخصوص (Gs)	۲٫۷
سیلت	٪۳۰
ماسه	٪۷۰
نوع خاک	SM
حد روانی (I _p)	۱۹٫۴
حد خمیری	فاقد حد خمیری
رطوبت بهینه (I _p)	۱۳٫۲
وزن واحد حجم خشک حداکثر (kN/m ³)	۱۷٫۹

$$V_s = \frac{V}{n} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{رابطه ۳})$$

V سرعت ظاهری (m/s)، n تخلخل نمونه خاک، Q حجم آب خروجی از نمونه (m^3)، A سطح مقطع نمونه (m^2)، 0.01963 ، V_s سرعت نشت (m/s)، Δh اختلاف ارتفاع آب در مخزن و نمونه خاک (m)، L طول نمونه خاک، و t زمان اندازه حجم آب خروجی Q بر حسب ثانیه است.

رابطه ۲ به تعیین n نیاز دارد که در نمونه‌های مسلح شده برای محاسبه آن ابتدا Vv (حجم حفره‌های بین ذرات خاک) و Vs (حجم ذرات جامد خاک) وزن جامد خاک مسلح از خشک کردن نمونه اولیه تعیین می‌گردد. درصد وزنی الیاف در نمونه با در نظر گرفتن وزن مخصوص الیاف (جدول ۲) و حجم الیاف موجود در نمونه و همچنین حجم ذرات جامد خاک تعیین می‌گردد که با استفاده از این اطلاعات و حجم اولیه نمونه تعیین n امکان پذیر است. در این تحقیق ۱۷ نمونه آزمایش شد؛ که هر یک در سه تکرار شاخه شد (۵۱ نمونه).

یافته‌ها و بحث

شکل‌های ۲ الف و ۲ ب نتایج حاصل از آزمایش تراکم استاندارد را برای خاک طبیعی و خاک مسلح شده با الیاف با درصد‌های وزنی و طول‌های مختلف نشان می‌دهند. شکل ۲ الف نشان می‌دهد که افزایش درصد وزنی الیاف برای یک طول مشخص موجب کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر می‌شود. از طرفی در یک درصد وزنی از الیاف افزایش طول نیز موجب کاهش وزن واحد حجم حداکثر می‌شود. علت این پدیده را می‌توان چنین بیان کرد که الیاف وزن مخصوص کمتری نسبت به خاک دارند. بنابراین افزودن آن به خاک موجب جایگزین شدن مواد سبک‌تر به جای مواد سنگین‌تر می‌شود که این امر باعث کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر می‌گردد. شکل ۲ ب تغییرات رطوبت بهینه را برای طول‌های مشخص با درصد‌های مختلف نشان می‌دهد. برای طول مشخص الیاف، افزایش درصد وزنی آن موجب کاهش رطوبت بهینه می‌شود. دلیل آن را می‌توان چنین بیان کرد که الیاف خاصیت جذب آب ندارند. بنابراین افزودن آن به خاک سبب جایگزینی آن‌ها با ذراتی می‌گردد که خاصیت جذب آب دارند. این موضوع موجب کاهش رطوبت بهینه می‌شود. نتایج این آزمایش با یافته‌های Estabragh *et al.* (2012) مطابقت دارد.

نمونه روی استوانه شماره ۲ از یک صفحه فلزی توری، که اندازه منافذ آن ۰/۱۵ میلی‌متر بود، استفاده شد تا از لغزش و جابه‌جایی نمونه به داخل استوانه شماره ۲ جلوگیری کند. در قسمت بالای ظرف حاوی نمونه استوانه دیگری قرار داده شد که دیواره آن منافذی داشت. از آن برای تغییر ارتفاع آب و نیز افزایش ارتفاع آب روی نمونه استفاده شد. آب خروجی از نمونه در صورتی که تحت تأثیر هد هیدرولیکی باشد، از طریق منافذ جمع‌آوری و حجم آن اندازه‌گیری می‌شود.

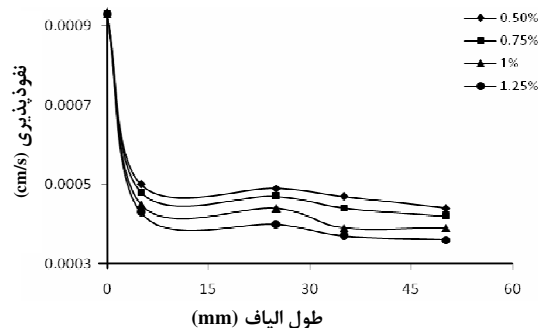
تهیه نمونه و روش آزمایش

آزمایش‌های لازم بر نمونه‌های متراکم شده خاک طبیعی و مسلح شده به صورت تصادفی با درصد‌های وزنی و طول‌های مختلف الیاف انجام شد. برای تهیه نمونه‌ها ابتدا آزمایش تراکم مطابق استاندارد ASTM D698-2007 روی نمونه‌های خاک طبیعی و مسلح شده با الیاف صورت پذیرفت و منحنی تراکم برای آن‌ها به دست آمد. سپس با توجه به رطوبت بهینه و وزن واحد حجم حداکثر به دست آمده از منحنی‌های تراکمی، برای تهیه نمونه مورد نیاز (دارای رطوبت بهینه و وزن واحد حجم حداکثر) به روش استاتیکی اقدام شد. روش تراکم استاتیکی بر این اساس انتخاب شد که نمونه‌های تهیه شده در این روش نسبت به سایر روش‌ها یکنواختی و تکرارپذیری بیشتری دارند (Estabragh and Javadi, 2008). در این روش رطوبت اولیه خاک طبیعی یا مخلوط خاک و الیاف با اضافه کردن آب به رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم رسانده شد. سپس نمونه مذکور در قالبی مخصوص، که ۵۰ میلی‌متر قطر و ۱۰۰ میلی‌متر ارتفاع داشت، در سه لایه قرار داده شد. خاک موجود در قالب به وسیله دستگاه بارگذاری ویژه با سرعت ۱/۵ میلی‌متر در ثانیه متراکم گردید. میزان بار وارد به هر یک از لایه‌ها به روش سعی و خطا طوری تعیین شد که وزن واحد حجم حداکثر در آن ایجاد گردد. برای هر آزمایش نیز سه نمونه تهیه شد؛ طوری که آزمایش اصلی با سه تکرار صورت پذیرفت. نمونه‌های تهیه شده به دستگاه اصلی (شکل ۱) منتقل و بالای استوانه شماره ۲ قرار داده شد. سایر اتصالات نیز به آن متصل گردید. سپس نمونه تحت تأثیر اختلاف ارتفاع آب ۲ سانتی‌متری به مدت ۱۲ ساعت اشباع گردید. آزمایش‌های اصلی پس از اطمینان از اشباع نمونه با تغییر ارتفاع آب در استوانه شماره ۱ و جمع‌آوری آب خروجی از نمونه در فواصل زمانی مختلف تا وقوع پدیده رگاب صورت پذیرفت. مقدار سرعت نشت با استفاده از روابط ۱ و ۲ و ۳ محاسبه گردید (Das *et al.*, 2009).

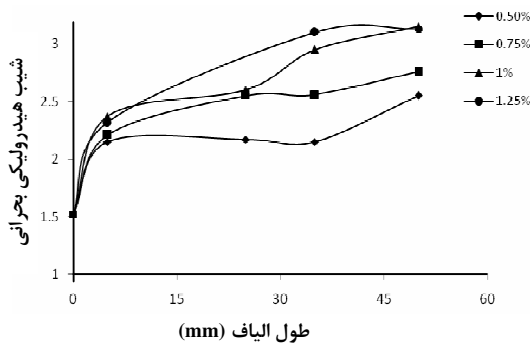
$$V = \frac{Q}{At} \quad (\text{رابطه ۱})$$

سرعت نشت و شیب هیدرولیکی تحت عنوان شیب هیدرولیکی بحرانی برآورد می‌شود. محققانی مانند Das *et al.* (2009) و Das and Viswanadham (2010) نیز جهت تعیین شیب هیدرولیکی بحرانی از روش مذکور استفاده کردند.

به کمک نتایج آزمایش‌های انجام شده مقادیر نفوذپذیری خاک طبیعی و خاک مسلح شده با الیاف تعیین شد که در جدول ۳ می‌آید. شکل ۴ نیز تغییرات نفوذپذیری را در درصد‌های مختلف و طول‌های گوناگون نشان می‌دهد. مقدار نفوذپذیری خاک طبیعی برابر 0.00093 cm/s است که افزودن الیاف موجب کاهش آن می‌شود. کاهش نفوذپذیری با افزایش درصد وزنی و طول الیاف بیشتر می‌شود (شکل ۴)؛ طوری که برای یک درصد وزنی مشخص از الیاف افزایش طول و برای یک طول مشخص افزایش درصد وزنی سبب کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود، اما دامنه تغییرات آن زیاد نیست. این پدیده را محققان دیگری نیز گزارش کردند؛ مانند Das and Viswandahm (2010) و Furumoto *et al.* (2002). علت آن انباشته شدن الیاف در منافذ بین ذرات و مسدود شدن آن‌هاست.

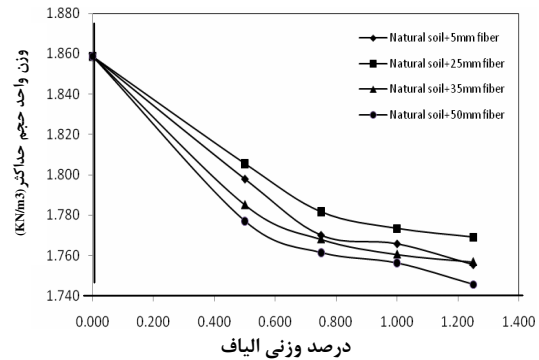


شکل ۴. تغییرات نفوذپذیری خاک با درصد‌های مختلف الیاف مصنوعی

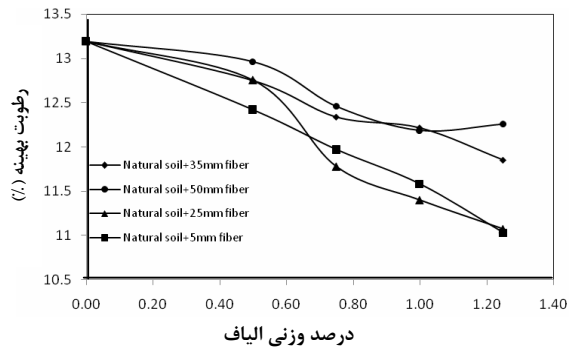


شکل ۵. تغییرات شیب هیدرولیکی بحرانی با درصد‌های مختلف الیاف مصنوعی

مقدار نیروی مقاوم خاک در مقابل رگاب نیز با استفاده از آزمایش‌های انجام شده بر نمونه‌های خاک معمولی و مسلح شده بر اساس رابطه ۵ محاسبه شد. مقادیر این محاسبه در جدول ۳ می‌آید (Das *et al.*, 2009).



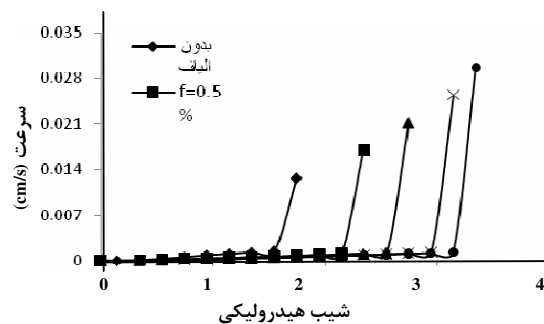
(الف)



(ب)

شکل ۲. تغییرات وزن واحد حجم حداکثر (الف)، رطوبت بهینه (ب)

نتیجه آزمایش‌های انجام شده برای بررسی پدیده رگاب بر نمونه خاک معمولی و مسلح شده در جدول ۳ می‌آید. شکل ۳ نیز نمونه تغییرات سرعت نشت آب و شیب هیدرولیکی را برای نمونه خاک معمولی و مسلح شده با درصد‌های مختلف الیاف به طول ۳۵ میلی‌متر نشان می‌دهد.



شکل ۳. سرعت نشت در مقابل تغییرات شیب هیدرولیکی برای طول ۳۵ میلی‌متر

نتایج نشان می‌دهد منحنی‌های سرعت نشت و شیب هیدرولیکی از دو قسمت خطی تشکیل شده‌اند. قسمت اول تقریباً خطی است و سرعت نشت با افزایش شیب هیدرولیکی افزایش می‌یابد که نشان دهنده ورقه‌ای بودن جریان در این بخش است. در قسمت دوم منحنی سرعت نشت به‌طور سریع تا وقوع پدیده رگاب افزایش می‌یابد. آغاز تغییر سریع در شیب منحنی

جدول ۳. نتایج آزمایش رگاب

NO.	(mm) طول	(%) درصد	n	K (cm/s)	i_{cr}	(N) نیرومقاوم
۱	۰	۰	۰٫۳۹	۰٫۰۰۰۹۳	۱٫۵۲	۲٫۹۸
۲	۵	۰٫۵	۰٫۳۶۳	۰٫۰۰۰۵	۲٫۱۵	۴٫۲۲
۳	۵	۰٫۷۵	۰٫۳۶۲	۰٫۰۰۰۴۸	۲٫۲۱	۴٫۳۴
۴	۵	۱	۰٫۳۵۷	۰٫۰۰۰۴۵	۲٫۳۷	۴٫۶۵
۵	۵	۱٫۲۵	۰٫۳۵۲	۰٫۰۰۰۴۳	۲٫۳۵	۴٫۶۱
۶	۲۵	۰٫۵	۰٫۳۶	۰٫۰۰۰۴۹	۲٫۱۷	۴٫۲۶
۷	۲۵	۰٫۷۵	۰٫۳۵۳	۰٫۰۰۰۴۷	۲٫۵۵	۵٫۰۱
۸	۲۵	۱	۰٫۳۵۲	۰٫۰۰۰۴۴	۲٫۶	۵٫۱
۹	۲۵	۱٫۲۵	۰٫۳۵۲	۰٫۰۰۰۴	۲٫۳۶	۴٫۶۳
۱۰	۳۵	۰٫۵	۰٫۳۷	۰٫۰۰۰۴۷	۲٫۱۵	۴٫۲۲
۱۱	۳۵	۰٫۷۵	۰٫۳۶۵	۰٫۰۰۰۴۴	۲٫۵۶	۵٫۰۳
۱۲	۳۵	۱	۰٫۳۶۳	۰٫۰۰۰۴	۲٫۹۵	۵٫۷۹
۱۳	۳۵	۱٫۲۵	۰٫۳۵۵	۰٫۰۰۰۳۷	۳٫۱	۶٫۰۹
۱۴	۵۰	۰٫۵	۰٫۳۶۶	۰٫۰۰۰۴۴	۲٫۵۵	۵٫۰۱
۱۵	۵۰	۰٫۷۵	۰٫۳۵۷	۰٫۰۰۰۴۲	۲٫۷۶	۵٫۴۲
۱۶	۵۰	۱	۰٫۳۵۲	۰٫۰۰۰۳۹	۳٫۱۵	۶٫۱۸
۱۷	۵۰	۱٫۲۵	۰٫۳۶۱	۰٫۰۰۰۳۶	۳٫۱۳	۶٫۱۴

$$S_R = S + \Delta S$$

(رابطه ۶)

$$S = C + \sigma \tan \phi$$

(رابطه ۷)

S مقاومت خاک غیر مسلح و برای خاک دانه‌ای $C = 0$ است. ΔS مقاومت ناشی از وجود الیاف است و به درصد الیاف، مقدار الیاف، ابعاد الیاف، و سطح تماس آن با خاک بستگی دارد. برای یک درصد مشخص الیاف افزایش نسبت طول به قطر به افزایش مقاومت منجر می‌شود. اگر تغییرات نسبت ابعاد در نتیجه افزایش طول باشد، افزایش مقاومت به سطح الیاف و اصطکاک بین خاک و الیاف بستگی دارد (Maher and Gary, 1990). اگر تغییرات نسبت ابعاد در نتیجه تغییرات قطر باشد، افزایش مقاومت به تعداد الیاف در واحد حجم وابسته خواهد بود (Michalowski and Cermak, 2003). در این تحقیق هم نسبت طول به قطر تغییر یافت و هم برای طولی معین درصد الیاف یا تعداد الیاف در واحد حجم مختلف استفاده شد. بنابراین، افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت می‌شود.

احداث سپر بتنی یا استفاده از لایه نفوذناپذیر در بالادست سازه‌های هیدرولیکی جهت مقابله با پدیده رگاب مطرح شده است؛ که معمولاً هزینه اجرایی آن بسیار بالاست. روش اصلاح دانه‌بندی نیز می‌تواند روش مناسبی تلقی گردد؛ ولی گاهی موجب کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش فشار حفره‌ای در زیر

$$P = \gamma_w i_{cr} V$$

(رابطه ۵)

P نیروی مقاوم در برابر رگاب (N)، γ_w وزن مخصوص آب i_{cr} شیب هیدرولیکی بحرانی (m/m)، و V حجم نمونه خاک (m^3) است.

شکل ۵ نمونه منحنی تغییرات نیروی P را با درصد الیاف نشان می‌دهد. افزایش درصد وزنی و طول الیاف موجب افزایش نیروی P می‌شود؛ طوری که در ۰٫۵ درصد وزنی از الیاف برای طول‌های مختلف مقدار نیروی P به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از سایر درصدهای وزنی است. مثلاً برای خاک طبیعی مقدار نیروی P برابر ۲٫۹۸ نیوتن و با افزایش ۱٫۲۵ درصد وزنی الیاف با طول ۳۵ میلی‌متر مقدار آن ۶٫۰۹ نیوتن می‌شود که افزایشی معادل ۱۰۴ درصد را داراست. بنابراین می‌توان گفت تغییرات نیروی نشت تابعی از درصد وزنی و طول الیاف است. با افزایش الیاف مقدار نیروی P نیز افزایش می‌یابد؛ طوری که برای خاک معمولی مقدار آن ۲٫۹۸N و با افزودن الیاف به طول ۳۵ میلی‌متر و درصد ۱٫۲۵ این مقدار به ۶٫۰۹N افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش الیاف به خاک باعث افزایش مقاومت آن در برابر پدیده رگاب می‌شود. در صورتی که مقاومت خاک مسلح‌شده با الیاف با S_R نشان داده شود، این مقاومت برابر است با (Waldron, 1977):

- مسلح‌سازی تصادفی خاک را می‌توان روشی مناسب جهت بهسازی خواص مکانیکی خاک در مقابل پدیده رگاب دانست که راهکاری مؤثر برای پایداری سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شود. همچنین تأثیر آن در محل، به نحوه اختلاط یکنواخت خاک و الیاف بستگی دارد.

- افزودن الیاف سبب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب می‌شود؛ طوری که در خاک طبیعی این مقادیر برابر ۱/۵۲ و ۲/۹۸ (نیوتن) و در خاک مسلح‌شده با ۱ درصد وزنی الیاف و طول ۵۰ میلی‌متر به مقدار ۳/۱۵ و ۶/۱۸ (نیوتن) می‌رسد.

- افزایش در شیب هیدرولیکی، نیروی مقاوم به رگاب، و نفوذپذیری تابعی از درصد وزنی و طول الیاف است.

سپاسگزاری

بدین وسیله از قطب علمی ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، که در تأمین هزینه مالی این تحقیق مساعدت کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

سازه می‌شود که پایداری سازه را به دنبال دارد. بنابراین، مسلح‌سازی تصادفی خاک پایین‌دست را می‌توان گزینه‌ای مناسب دانست؛ که اجرای آن آسان و در مقایسه با سایر روش‌ها هزینه اجرایی آن کمتر است. علاوه بر این، مطابق تحقیقات انجام‌شده عملکرد نسبتاً مطلوبی در مقابله با پدیده رگاب دارد. محققانی مانند Fowmes *et al.* (2006) روش‌های صحرائی مناسبی جهت اختلاط خاک و الیاف ارائه کردند که هنگام انجام‌دادن این عملیات در محل می‌توان از آن استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌های رگاب روی نمونه‌های خاک ماسه سیلتی طبیعی و خاک مسلح‌شده به صورت تصادفی با الیاف مصنوعی (طول و درصد‌های وزنی مختلف) انجام شد. بر اساس تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها، نتایج زیر به‌دست آمد:

- افزودن الیاف موجب کاهش وزن واحد حجم حداکثر و رطوبت بهینه می‌شود؛ طوری که بیشترین مقدار کاهش این پارامترها در نمونه‌های با درصد وزنی ۱/۲۵ و طول ۲۵ میلی‌متر به میزان ۵/۵ درصد برای وزن واحد حجم حداکثر و ۱۶/۷ درصد برای رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی است.

فهرست علائم

G_s	وزن مخصوص	L	طول نمونه
G_f	وزن مخصوص الیاف	T	زمان
V	سرعت دارسی	V_v	حجم حفرات بین ذرات خاک
V_s	سرعت نشت	V_{soil}	حجم ذرات جامد خاک
Q	حجم آب خروجی	V_{fiber}	حجم الیاف
I	شیب هیدرولیکی	ω_{opt}	رطوبت بهینه
i_{cr}	شیب هیدرولیکی بحرانی	S_R	مقاومت خاک مسلح شده
N	درصد پوکی	S	مقاومت خاک معمولی
E	نسبت تخلخل	C	چسبندگی خاک
K	نفوذپذیری	Φ	زاویه اصطکاک داخلی
Δh	اختلاف ارتفاع آب	σ	تنش خاک
A	سطح مقطع نمونه	SM	خاک ماسه سیلتی

REFERENCES

- Das *et al.* (2009). Effect of randomly distributed geofibers on the piping behaviour of embankments constructed with fly ash as a fill material, *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (5), 341-349.
- Das, A. and Viswandahm, B. V. S. (2010). Experiments on the piping behavior of geofiber-reinforced soil, *Geosynthetic*, 17 (4), 171-182.
- Estabragh, A. R. and Javadi, A. A. (2008). Critical state for over consolidated unsaturated silty soil, *Canadian Geotechnical Journal*, 45 (No) 3, 408-420.
- Estabragh, A. R., Namdar, P., and Javadi, A. A. (2012). Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber, *Geosynthetic International*, 19 (1), 85-92.
- Foster and *et al.* (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents, *Canadian Geotechnical Journal*, 37 (5), 1000-1024.
- Fowmes, G. J., Dixon, N., and Jones, D. R. V. (2006). Use of randomly reinforced soils in barrier systems, Proceedings of the 5th International Conference on Environmental Geotechnics, Thomas Telford, London, 709-716.

- Furumoto, K., Miki, H., Tsuneoka, N., and Obata, T. (2002). 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*, P. Delmas, J. P. Gourc, H. Girard, Editors, Swets and Zeitlinger, Lisse, 1241-1244.
- Gary, D. H. and Ohashi, H. (1983), Mechanics of fiber reinforcement in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109 (3), 335-353.
- Maher, M. H., Woods, R. D. (1990). Dynamic response of sands reinforced with randomly distributed fibers, *Journal of Geotech. Eng*, 116 (7), 1116-1131.
- Maher, M. H. and Gary, D. H. (1990). Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers, *Journal of Geotechnical Engineering*, 116 (11), 1661-1677.
- Michalowski, R. L. and Čermák, J. (2003). Triaxial compression of sand reinforced with fibers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (2), 125-136.
- Skempton, A. W. and Brogan, J. M. (1994). Experiments on piping in sandy Gravel, *Journal of Geotechnique*, 44 (3), 444-460.
- Waldron, L. J. (1977). The shear resistance of root-permeated homogeneous sand stratified soil, *Journal of the Soil Science Society of America*, 41 (5), 843-849.
- Yetimoglu, T. and Salbas, O. (2003). A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers, *Goetextiles and Geomemberan*, 21 (2), 103-110.
- Yetimoglu, T., Inanir, M., and Inanir, O. E. (2005). A study on bearing capacity of randomly distributed fiber reinforced sand fills overlying soft clay, *Goetextiles and Geomemberan*, 23 (2), 174-183.