

## بهسازی خاک در برابر پدیده رگاب با استفاده از صفحات ژئوگرید

سپیده اکرمی<sup>۱\*</sup>، علی رئیسی استبرق<sup>۲</sup> و جمال عبدالهی بیک<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۳. مربی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۶/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۶/۱۰)

### چکیده

پدیده رگاب یک فرآیند فرسایشی است که تحت تأثیر جریان نشت رو به بالا در زیر سازه‌های آبی رخ می‌دهد و در صورت عدم توجه کافی برای مقابله با آن ممکن است پایداری و ایمنی سازه هیدرولیکی را تحت تأثیر جدی قرار دهد. در این تحقیق، اثر مسلح سازی یک خاک در تغییر شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب بررسی شد. مسلح سازی توسط دو نوع ژئوگرید با ابعاد منفذی ۶ میلی‌متر (ژئوگرید ۱) و ۲ میلی‌متر (ژئوگرید ۲) صورت پذیرفت. آزمایش‌های یک‌بعدی رگاب روی نمونه‌های یک خاک ماسه‌ای، خاک مسلح شده با صفحات دو نوع ژئوگرید ۱ و ۲ که به روش استاتیکی متراکم و تهیه شده‌اند، در دستگاه ویژه طراحی شده صورت پذیرفت. نتایج نشان داد مسلح سازی به وسیله صفحات ژئوگرید موجب بهسازی خاک در مقابل پدیده رگاب می‌گردد، به طوری که شیب هیدرولیکی بحرانی و نیروی مقاوم به رگاب افزایش می‌یابد و افزایش درجه بهسازی وابسته به تعداد صفحات ژئوگرید و موقعیت آن‌ها نسبت به یکدیگر در نمونه می‌باشد. از طرفی نتایج نشان داد، در شرایط و موقعیت یکسان عملکرد دو نوع ژئوگرید تقریباً مشابه است.

واژه‌های کلیدی: رگاب، سرعت نشت، شیب هیدرولیکی بحرانی، مسلح سازی خاک، ژئوگرید

### مقدمه

رگاب (Piping) پدیده‌ای است که در اثر نشت آب به سمت بالا در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مانند سدهای خاکی، بندهای انحرافی، کانال‌های آبیاری و شبکه‌های زهکشی که بر روی بسترهای خاکی احداث شده، رخ می‌دهد. در صورتی که آب نشت یافته در نقطه‌ای متمرکز شده و شیب هیدرولیکی بحرانی برای جابه‌جایی ذرات خاک در آن نقطه صورت پذیرد ممکن است باعث حرکت ذرات بشود، این عمل به تدریج به ایجاد گذرگاه در محل مذکور و به پیدایش مسیرهای آزاد گذر آب منجر می‌شود. در نقطه مذکور تنش مؤثر بین ذرات خاک کاهش یافته و نیروی مقاوم خاک از نیروی نشت آب کمتر می‌گردد. ادامه این پدیده موجب کاهش تنش مؤثر بین ذرات خاک می‌شود و در نتیجه پایداری خاک تقلیل می‌یابد. در این شرایط نیروی نشت آب قادر به جابه‌جایی ذرات خاک خواهد بود که این عمل موجب پیدایش مجاری و حفراتی در داخل توده خاک می‌شود. با گذشت زمان ابعاد این مجاری و حفرات افزایش می‌یابد که تخریب سازه هیدرولیکی را در پی خواهد

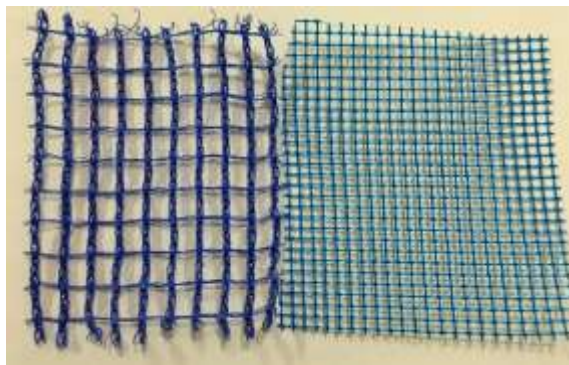
داشت . Sherard *et al.* (1984) گزارش نمود که پدیده رگاب یکی از مسائل مخاطره‌آمیز در سدهای خاکی محسوب می‌گردد. Foster *et al.* (2000) با انجام مطالعات گسترده در مورد علل تخریب سدها، اعلام نمودند که تخریب حدود ۱/۵ درصد از سدهای خاکی و سنگریزه‌ای بر اثر وقوع پدیده رگاب و فرسایش داخلی بوده است. محققین دیگری مانند Ojha *et al.* (2003) Foster *et al.* (2000) از بررسی‌های خود نتیجه‌گیری کردند که پدیده رگاب بیشتر در سازه‌های احداث شده بر روی خاک‌های دانه‌ای غیرمتراکم صورت می‌پذیرد. بنابراین مقابله با این پدیده به منظور حفاظت از سازه و تأسیسات جانبی آن و نیز حفاظت از محیط‌زیست و مسائل اقتصادی، امری ضروری به نظر می‌رسد. محققین روش‌های مختلفی را در این خصوص پیشنهاد نموده‌اند که می‌توان به احداث پتوی رسی (Blanket) در بالادست سازه، احداث شمع و یا ستون‌های بتنی در بالادست سازه و همچنین پوشش سطوح و افزایش وزن پایین دست سازه به وسیله قلوه‌سنگ و غیره اشاره نمود. از روش‌های دیگری که اخیراً به وسیله Foster *et al.* (2000) پیشنهاد شده است مسلح سازی تصادفی خاک پایین دست سازه هیدرولیکی می‌باشد.

Vidal (1978) اولین بار روش مسلح سازی خاک با

\* نویسنده مسئول: Sepideh.akrami@ut.ac.ir

منفذ ۶ میلی‌متر، ژئوگرید نوع ۱ و با منفذ ۲ میلی‌متر ژئوگرید نوع ۲ اطلاق می‌گردد.

مقدار	مشخصه
۲/۷	وزن مخصوص ( $G_s$ )
۱۰۰	عبوری از الک ۴ (%)
۱۰	عبوری از الک ۲۰۰ (%)
۴	ضریب یکنواختی (Cu)
۱/۴۴	ضریب انحنای (Cc)
-	حد روانی (LL) (%)
NP	حد خمیری (PL) (%)
SP-SM	طبقه‌بندی یونیفاید
۱۷	رطوبت بهینه ( $W_{opt}$ ) (%)
۱۶/۶	وزن واحد حجم خشک بیشینه ( $\gamma_{dmax}$ ) ( $KN/m^3$ )



شکل ۱. صفحات ژئوگرید مورد استفاده جهت مسلح سازی خاک (a) نوع ۱، (b) نوع ۲

مشخصه	استاندارد	ژئوگرید نوع ۱	ژئوگرید نوع ۲
وزن مخصوص ( $G_f$ )	ASTM D854	۰/۹	۰/۸
قطر منفذ (mm)	-	۶	۲
مقاومت در برابر اسید و باز	-	عالی	عالی
جذب آب	-	صفر	صفر
محدوده ذوب ( $^{\circ}C$ )	-	-۱۴۰	-۱۲۰
مقاومت کششی نهایی (MPa)	ASTM D2256-97	۴۹۵	۳۵۰
ضریب کشسانی (MPa)	ASTM D2101-94	۳۰۰۰	۲۵۰۰

استفاده از نوارهای فولادی برای بهسازی خاک‌های دانه‌ای را مطرح نمود، لیکن به علت خوردگی فلزات و سختی نسبتاً بالای آن‌ها مسلح‌سازی با استفاده از ژئوتکستایل‌ها که دارای مزایای زیادی نسبت به نوارهای فلزی بودند، مورد توجه قرار گرفت. امروزه مسلح‌سازی با استفاده از ژئوتکستایل‌ها در پروژه‌هایی مانند راه‌سازی، پایداری شیب و بهسازی خاک‌های رسی نرم به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (Patra et al., 2005; Iizuka et al., 2004; Park and Tan, 2005; Varuso et al., 2005).

ژئوگریدها از گروه ژئوسنتتیک‌ها می‌باشند که از الیاف پلی‌استر با مقاومت کششی بالا با ساختار توری شکل تولید می‌شوند. این مواد به دو صورت یک جهتی (uniaxial) یا دو جهتی (biaxial) با مقاومت‌های مختلف ساخته می‌شوند و در مسلح‌سازی خاک کاربرد وسیعی دارا می‌باشند. بررسی منابع نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه ژئوتکستایل‌ها به صورت گسترده در پروژه‌های عمرانی مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند لیکن تاکنون اثر آن‌ها در بهسازی خاک در برابر پدیده رگاب مورد تحقیق و مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در این تحقیق اثر دو نوع ژئوگرید در مسلح‌سازی یک خاک غیرچسبنده برای مقابله با اثر رگاب، مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده بحث گردید.

## مواد و روش‌ها

### خاک

خاک مورد استفاده حاوی ۹۰ درصد ماسه و ۱۰ درصد سیلت بود. خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مطابق استاندارد ASTM تعیین شد که در جدول (۱) نشان‌داده شده است. براساس آزمایش تراکم استاندارد، وزن واحد حجم خشک بیشینه ( $KN/m^3$ ) ۱۶/۶ و رطوبت بهینه ۱۷ درصد تعیین گردید. خاک مذکور مطابق طبقه‌بندی یونیفاید SP-SM (ماسه سیلت دار با دانه‌بندی بد) طبقه‌بندی می‌گردد.

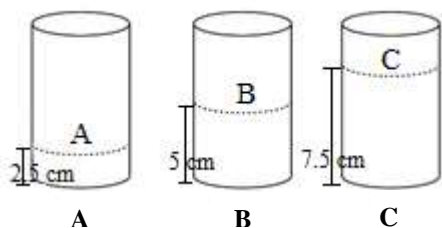
### ژئوگرید

در این کار تحقیقاتی از دو نوع ژئوگرید توری مانند و از جنس پلی‌استر که ابعاد منفذ آن‌ها ۶ و ۲ میلی‌متر بود و در این تحقیق تحت عنوان ژئوگرید شماره ۱ و ۲ نامیده می‌شوند، استفاده گردید. شکل (۱) دو نوع ژئوگرید را نشان می‌دهد که خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها براساس اطلاعات ارائه‌شده توسط تولیدکننده، در جدول (۲) آورده شده است. الیاف تشکیل‌دهنده ژئوگرید شماره ۱ دارای شکل‌پذیری بیشتری نسبت به الیاف شماره ۲ می‌باشد. در این کار به ژئوگرید دارای

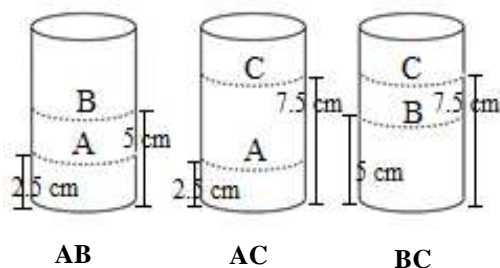
## روش تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش

برای تهیه نمونه‌ها ابتدا آزمایش تراکم مطابق استاندارد ASTM D698-07 روی نمونه‌های خاک طبیعی و مسلح شده با صفحه یا صفحات ژئوگرید صورت پذیرفت و منحنی تراکم برای آن‌ها بدست آمد. هدف تعیین میزان درصد رطوبت بهینه و میزان وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک طبیعی و مسلح شده بود. سپس با توجه به وزن واحد حجم  $(KN/m^3)$   $14/9$  و رطوبت  $10/4$  درصد که از شاخه خشک منحنی‌های تراکمی بدست آمد، به روش استاتیکی اقدام به تهیه نمونه‌هایی با این مشخصات گردید. آزمایش تراکم استاندارد برای نمونه مسلح شده در حالت یک صفحه، دو صفحه و سه صفحه انجام شد، بطوریکه در قالب تراکم صفحه یا صفحات دایره‌ای شکل به قطر قالب تراکم قرار داده شده و آزمایش تراکم صورت پذیرفت.

در ساخت نمونه‌های مسلح شده ابتدا تعدادی صفحه ژئوگرید از نوع ۱ و ۲ به قطر حدود ۵ سانتیمتر از صفحات اصلی آن‌ها تهیه گردید. سپس در حالت یک صفحه‌ای با قرار دادن آن در سه حالت نشان داده شده در شکل (۴) و در حالت دو صفحه‌ای و سه صفحه‌ای مطابق با وضعیت قرارگیری در حالات نشان داده شده در شکل‌های (۵) و (۶)، اقدام به ساخت نمونه آزمایشگاهی گردید. بطوریکه در حالت اول، با سه نوع موقعیت با یک صفحه ژئوگرید (A, B, C)، در حالت دوم نیز با سه موقعیت با دو صفحه ژئوگرید در وضعیت‌های نشان داده شده (AB, AC, BC)، برای آزمایش رگاب نمونه تهیه گردید. در حالت سه صفحه (ABC) نیز فقط یک آزمایش انجام گردید.



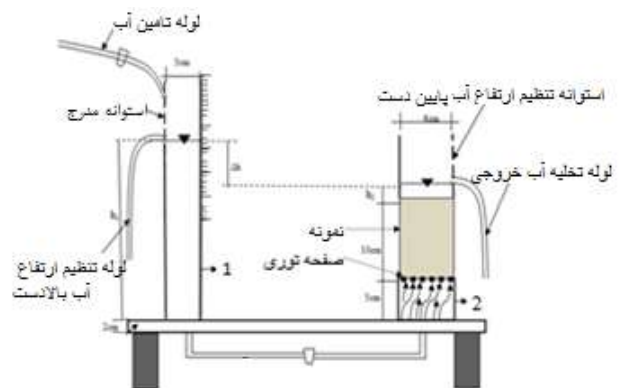
شکل ۴. نحوه قرارگیری ژئوگرید در نمونه‌های یک صفحه‌ای



شکل ۵. نحوه قرارگیری ژئوگرید در نمونه‌های دو صفحه‌ای

## دستگاه مورد استفاده

به‌منظور انجام آزمایش رگاب از دستگاه مشابه Skempton and Brogan (1994) استفاده شد (شکل ۲ و ۳). مطابق شکل (۲)، قسمت اصلی این دستگاه از دو استوانه تشکیل شده است، استوانه شماره ۱ مدرج بوده و بر روی دیواره آن منافذی با فاصله ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده است که به‌وسیله آن‌ها می‌توان ارتفاع آب را تنظیم و کنترل کرد.

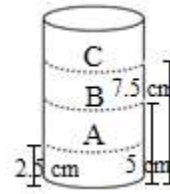


شکل ۲. دستگاه طراحی شده برای آزمایش رگاب به صورت نمادین



شکل ۳. دستگاه ساخته شده برای آزمایش رگاب، شکل واقعی

ارتفاع استوانه شماره ۲ حدود ۵۰ میلی‌متر است و به گونه‌ای طراحی شده که بتوان استوانه نمونه را به راحتی روی آن قرار داد. همچنین داخل این استوانه از یک صفحه فلزی توری که اندازه منافذ آن  $0/15$  میلی‌متر بود، استفاده شد که مانع برگشت خاک به داخل استوانه شماره ۲ می‌گردد. ظرف حاوی نمونه دارای قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و از جنس پلاکسی‌گلاس می‌باشد که بر روی استوانه شماره ۲ قرار داده می‌شود. در بالای ظرف حاوی نمونه، استوانه دیگری قرار دارد که دارای منافذی بوده که از طریق آن منافذ ارتفاع آب روی نمونه تنظیم و حجم آب خروجی از نمونه در صورتی که تحت تأثیر ارتفاع هیدرولیکی موردنظر باشد، قابل اندازه‌گیری است.



ABC

شکل ۶. نحوه قرارگیری ژئوگرید در نمونه‌های سه صفحه‌ای

$$e = \frac{V_v}{V_s + V_f} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$V_v$  حجم فضاهای خالی،  $V_s$  حجم ذرات جامد و  $V_f$  حجم فیاف می‌باشد که حجم فیاف از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد. بطوریکه  $W_f$  وزن فیاف،  $G_f$  وزن مخصوص آن و  $\gamma_w$  وزن واحد حجم آب است.

$$V_f = \frac{W_f}{G_f \cdot \gamma_w} \quad (\text{رابطه ۶})$$

به منظور محاسبه  $V_s$  ابتدا نمونه‌ای از خاک در قالبی با حجم مشخص مطابق روش تهیه نمونه، تهیه می‌شود (بنابراین حجم نمونه برابر  $V_t$  معادل حجم قالب است). سپس نمونه را به مدت ۲۴ ساعت داخل آن قرار می‌دهیم تا خشک شود. نمونه خشک شده وزن می‌گردد تا مقدار  $W_s$  (وزن خشک نمونه) بدست آید. با در اختیار داشتن مقدار  $W_s$  براساس رابطه (۷) می‌توان مقدار  $V_s$  را بدست آورد. (مقدار  $G_s$  در جدول (۱) ارائه شده است)

$$W_s = V_s \cdot G_s \cdot \gamma_w \quad (\text{رابطه ۷})$$

سپس با داشتن مقادیر  $V_s$  و  $V_t$  مطابق رابطه زیر مقدار  $V_v$  نیز بدست می‌آید.

$$V_t = V_s + V_v \quad (\text{رابطه ۸})$$

#### نتایج و بحث

در شکل‌های (۷ و ۸) نتایج آزمایش‌های تراکم برای خاک طبیعی و خاک مسلح شده با دو نوع ژئوگرید در شرایط استفاده از یک، دو یا سه صفحه نشان داده شده است. همان طوریکه ملاحظه می‌گردد، قرار دادن صفحه ژئوگرید موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی می‌گردد. این روند کاهش با افزایش تعداد صفحات ژئوگرید همراه است بطوریکه وزن واحد حجم بیشینه خاک در حالت طبیعی  $(16/6 \text{ KN/m}^3)$  و رطوبت بهینه آن ۱۷ درصد است. در حالت مسلح شدن با سه صفحه ژئوگرید نوع ۱، این مقادیر به  $(16/38 \text{ KN/m}^3)$  و  $16/2$  درصد تغییر می‌کنند. در حالت استفاده از سه صفحه ژئوگرید نوع ۲، مقادیر مذکور به  $(16/28 \text{ KN/m}^3)$  و  $16/2$  درصد تغییر می‌یابند.

مقایسه نتایج آزمایش تراکم برای دو ژئوگرید در اشکال (۷) و (۸) نشان می‌دهد که ژئوگرید نوع ۲ اثر کاهشی بیشتری در بیشینه وزن واحد حجم نسبت به ژئوگرید نوع ۱ دارد. لیکن مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات در حالات مختلف ژئوگرید بسیار ناچیز است. می‌توان گفت اضافه کردن ژئوگرید به خاک و تراکم کردن آن در هر حالت تغییرات زیادی در

در این روش رطوبت اولیه خاک طبیعی یا خاک مسلح شده که برابر ۱ درصد می‌باشد، با اضافه کردن آب به رطوبت ۱۰/۴ درصد که از آزمایش تراکم استاندارد بدست آمده است رسانده شد، سپس نمونه در قالبی مخصوص به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر در سه لایه به وسیله دستگاه بارگذاری ویژه با سرعت ۱/۵ میلی‌متر در دقیقه متراکم گردید. میزان بار موردنیاز برای رسیدن به وزن واحد حجم خشک  $(14/9 \text{ KN/m}^3)$  در هر لایه به روش سعی و خطا بدست آمد. پس از تهیه نمونه، آن را داخل دستگاه مخصوص آزمایش رگاب، در بالای استوانه شماره ۲ (شکل ۲) قرار داده تا تحت تأثیر اختلاف ارتفاع آب ۲ سانتی‌متر به مدت ۱۲ ساعت اشباع گردد. پس از اشباع شدن نمونه، در بازه‌های زمانی مشخص ارتفاع آب در استوانه شماره ۱ افزایش داده شد و حجم آب خروجی از نمونه تا وقوع پدیده رگاب اندازه‌گیری شد. مقدار سرعت نشت نیز با استفاده از روابط (۱ تا ۳) محاسبه گردید (Das et al., 2009).

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

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

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

$V$  سرعت ظاهری  $n$  (m/s) تخلخل نمونه خاک،  $Q$  حجم آب خروجی از نمونه  $(\text{m}^3)$ ،  $A$  سطح مقطع نمونه ( )  $v_s$  سرعت نشت  $i$  (m/s) شیب هیدرولیکی،  $\Delta h$  اختلاف ارتفاع آب در مخزن و نمونه خاک (m)،  $L$  طول نمونه خاک و  $t$  زمان اندازه‌گیری حجم آب خروجی  $Q$  برحسب ثانیه است.

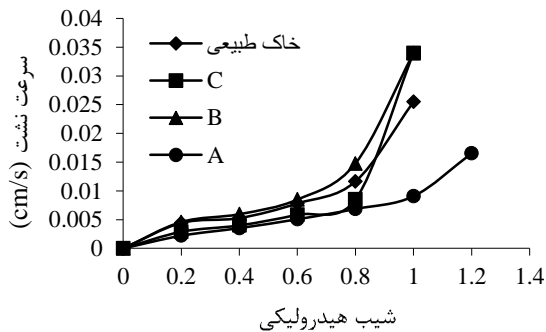
مقدار شیب هیدرولیکی بحرانی ( $i_{cr}$ ) از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$i_{cr} = \frac{\Delta h_c}{L} \quad (\text{رابطه ۴})$$

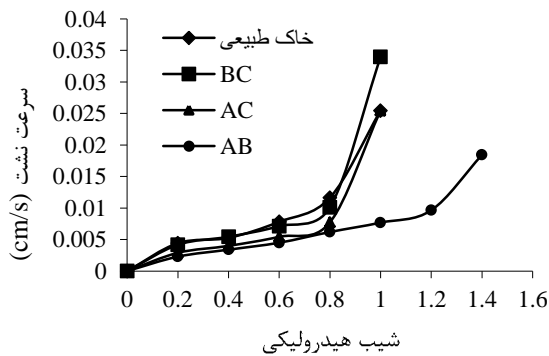
در این رابطه  $\Delta h_c$  معادل ارتفاع آبی است که در آن ارتفاع، ذرات شروع به حرکت می‌کنند و  $L$  طول نمونه می‌باشد. برای محاسبه مقدار نسبت تخلخل ( $e$ ) برای نمونه مسلح شده از رابطه (۵) (Zornberg, 2002) به شرح زیر استفاده شد:

شکل (۱۰) منحنی تغییرات سرعت نشت و شیب هیدرولیکی برای خاک طبیعی و حالات مختلف (AB, AC, BC) قرار گرفتن در وضعیت دو صفحه ژئوگرید را نشان می‌دهد. در این حالت شیب هیدرولیکی بحرانی برای موقعیت قرار گرفتن صفحات ژئوگرید در قسمت AB نمونه برابر ۱/۲ می‌گردد که ۵۰ درصد نسبت به خاک طبیعی افزایش می‌یابد.

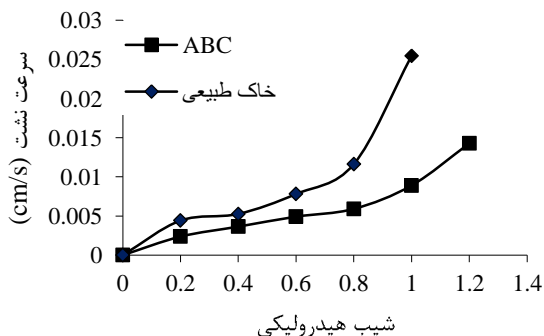
در شکل (۱۱) منحنی تغییرات سرعت نشت و شیب هیدرولیکی بحرانی برای سه صفحه ژئوگرید نوع ۱ همراه با خاک طبیعی نشان می‌دهد همان طوریکه ملاحظه می‌شود شیب هیدرولیکی ۲۵ درصد نسبت به خاک طبیعی افزایش می‌یابد.



شکل ۹. سرعت نشت در مقابل تغییرات شیب هیدرولیکی برای یک صفحه ژئوگرید نوع ۱

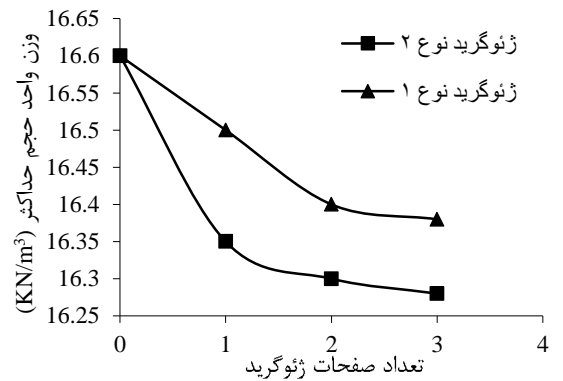


شکل ۱۰. سرعت نشت در مقابل تغییرات شیب هیدرولیکی برای دو صفحه ژئوگرید نوع ۱

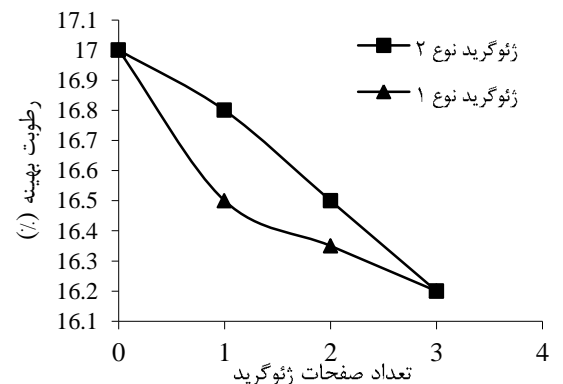


شکل ۱۱. سرعت نشت در مقابل تغییرات شیب هیدرولیکی برای سه صفحه ژئوگرید نوع ۱

پارامترهای تراکمی ایجاد نمی‌کند.



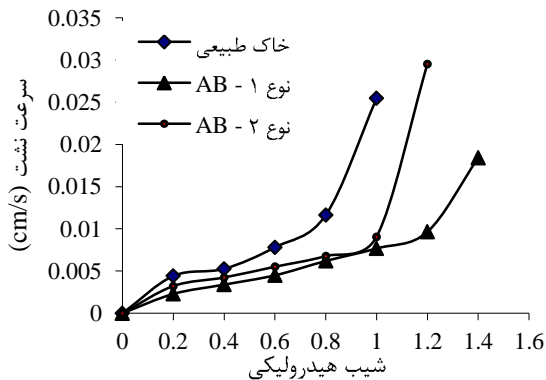
شکل ۷. تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه با تعداد و نوع صفحات ژئوگرید



شکل ۸. تغییرات رطوبت بهینه با تعداد و نوع صفحات ژئوگرید

در شکل (۹) منحنی تغییرات سرعت نشت در مقابل شیب هیدرولیکی برای خاک طبیعی و خاک مسلح شده با ژئوگرید نوع ۱ در حالات مختلف (A, B, C) نشان داده شده است. همان طوریکه در این شکل ملاحظه می‌گردد، منحنی تغییرات سرعت نشت و شیب هیدرولیکی برای خاک طبیعی و مسلح شده در قسمت ابتدایی تقریباً به صورت خطی است و از یک ناحیه به بعد تغییرات از حالت خطی خارج شده و به صورت یک منحنی در می‌آید. شیب هیدرولیکی بحرانی با استفاده از نقطه تقاطع دو مماس که از ابتدای قسمت خطی منحنی و انتهای قسمت منحنی ترسیم شده، حاصل می‌گردد (این روش توسط محققینی مانند *Sivakumar et al.* (2008) نیز به کار برده شده است). بر این اساس شیب هیدرولیکی بحرانی برای حالات گوناگون بدست آمده است. شیب هیدرولیکی بحرانی برای خاک طبیعی ۰/۸ برآورد شده و مقدار آن برای صفحه ژئوگرید نوع ۱ در موقعیت C, B و A (شکل ۹) به ترتیب ۰/۸، ۰/۸ و ۱ بدست آمد. بطوریکه در حالت قرار گرفتن در موقعیت A، موجب افزایش ۲۵ درصدی شیب هیدرولیکی بحرانی نسبت به خاک طبیعی می‌گردد و در موقعیت B و C، نتیجه قابل قبولی که موجب بهسازی شده باشد، بدست نمی‌آید.

$\gamma_w$  وزن واحد حجم آب،  $i_{cr}$  شیب هیدرولیکی بحرانی و  $V$  حجم نمونه خاک طبیعی یا مسلح شده می‌باشد.



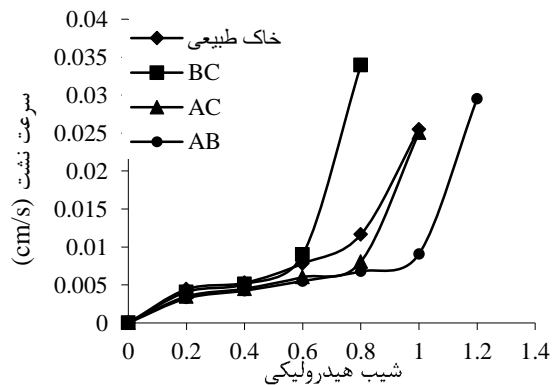
شکل ۱۳. سرعت نشت در مقابل تغییرات شیب هیدرولیکی برای دو صفحه ژئوگرید نوع ۱ و ۲

در جدول شماره (۳)، برای مثال در حالت کاربرد یک صفحه ژئوگرید در قسمت C نمونه خاک، علیرغم اینکه میانگین سه تکرار ذکر شده برای شیب هیدرولیکی بحرانی برابر  $0.73$  بدست می‌آید، به دلیل اینکه مقدار شیب هیدرولیکی بحرانی در دو تکرار انجام‌شده برابر  $0.8$  می‌باشد، میانگین را نیز  $0.8$  در نظر می‌گیریم.

همانطوریکه در این جدول ملاحظه می‌گردد افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی که بر اثر مسلح سازی ایجاد شده است، موجب افزایش نیروی مقابله با نشت می‌گردد. نیروی نشت برای خاک طبیعی (N)  $1/57$  می‌باشد، برای ژئوگرید نوع ۱ و ۲ در حالت یک صفحه‌ای و در موقعیت A نمونه، این مقدار به (N)  $1/96$  تغییر می‌یابد که افزایشی معادل  $24/8$  درصد را نشان می‌دهد. با استفاده از دو صفحه ژئوگرید مقادیر نیروی نشت برای ژئوگرید نوع ۱ و ۲ به ترتیب معادل (N)  $2/36$  و  $1/96$  می‌گردد که افزایش آن‌ها نسبت به خاک طبیعی معادل  $50/3$  و  $24/8$  درصد می‌باشد. در حالت استفاده از سه صفحه مقادیر نیروی نشت برای هر دو نوع ژئوگرید یکسان و معادل (N)  $1/96$  می‌باشد. در حالت یک صفحه‌ای و سه صفحه‌ای عملکرد هر دو ژئوگرید یکسان است. گرچه این نتایج به صورت سه تکرار است و در اینجا میانگین آن‌ها آورده شده است.

می‌توان گفت علت اینکه مسلح سازی موجب افزایش مقاومت توده خاک در برابر پدیده رگاب می‌گردد، اصطکاک بین ذرات خاک و صفحات ژئوگرید می‌باشد. بنابراین هرچه صفحه ژئوگرید بیشتر در خاک فرو رود، اصطکاک بین ذرات با صفحات بیشتر شده که افزایش مقاومت مجموعه را در پی دارد. از طرفی در یک حجم ثابت هرچه صفحه ژئوگرید بیشتر در خاک فرو

مقایسه حالات سه، دو و یک صفحه‌ای نشان می‌دهد که در حالت سه صفحه مقدار شیب هیدرولیکی بحرانی یکسان با شیب هیدرولیکی بحرانی در بهترین حالت یک صفحه (موقعیت A) بوده و برابر ۱ است و نسبت به شیب هیدرولیکی بحرانی در حالت دو صفحه‌ای که برابر  $1/2$  می‌باشد، ۲۰ درصد کاهش یافته است. مشابه این نتایج برای ژئوگرید نوع ۲ نیز بدست آمده است. به عنوان نمونه، حالت دو صفحه‌ای از این نوع ژئوگرید در موقعیت‌های مختلف در شکل (۱۲) نشان داده شده است، که مقادیر شیب هیدرولیکی بحرانی برای حالات مختلف AC، BC و AB نسبت به خاک طبیعی به ترتیب ۲۵ درصد کاهش، بدون تغییر و ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۱۴. سرعت نشت در مقابل تغییرات شیب هیدرولیکی برای دو صفحه ژئوگرید نوع ۲

در جدول (۳) مقادیر شیب هیدرولیکی بحرانی برای خاک طبیعی و خاک مسلح شده با صفحات ژئوگرید نوع ۱ و ۲ آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌گردد با مقایسه نتایج شیب هیدرولیکی بحرانی مشخص می‌شود که در حالت یک صفحه‌ای و سه صفحه‌ای عملکرد هر دو ژئوگرید تقریباً یکسان است. لیکن در حالت استفاده از دو صفحه ژئوگرید، مطابق شکل (۱۳) که سرعت نشت در مقابل تغییرات شیب هیدرولیکی خاک طبیعی و دو نوع ژئوگرید ۱ و ۲ در حالت دو صفحه‌ای (AB) را نشان می‌دهد، ژئوگرید نوع ۱ موجب افزایش شیب هیدرولیکی بحرانی از  $0.8$  (برای خاک طبیعی) به  $1/2$  می‌گردد، در صورتی که این مقدار در ژئوگرید نوع ۲ برابر ۱ می‌باشد.

براساس نتایج بدست آمده از شیب هیدرولیکی بحرانی با توجه به رابطه زیر اقدام به تعیین نیروی نشت (P) گردید که مقادیر آن در جدول (۳) نشان داده شده است.

$$p = \gamma_w i_{cr} V \quad (\text{رابطه ۹})$$

رود وزن واحد حجم نمونه حاوی ژئوگرید افزایش می‌یابد. به‌عنوان معیاری جهت افزایش مقاومت و نیز مقایسه خاک‌های بنابراین وزن واحد حجم برای یک خاک مسلح را می‌توان مسلح شده با تعداد صفحات گوناگون مورد استفاده قرار داد.

جدول ۳. نتایج آزمایش رگاب برای دو نوع ژئوگرید

نوع نمونه	موقعیت صفحات	نوع ۱			نوع ۲		
		$i_{cr}$		P(N) میانگین	$i_{cr}$		P(N) میانگین
		تکرار	میانگین		تکرار	میانگین	
خاک طبیعی		۰/۸		۰/۸			
		۰/۸	۱/۵۷	۰/۸	۰/۸	۱/۵۷	
		۰/۸		۰/۸			
C		۰/۸		۰/۸			
		۰/۸	۱/۵۷	۰/۸	۰/۸	۱/۵۷	
		۰/۶		۰/۸			
یک صفحه ژئوگرید	B			۱			
			۱/۵۷	۰/۸	۰/۸	۱/۱۸	
				۰/۸	۰/۶	۰/۶	
A			۱				
		۱/۹۶	۱	۱/۹۶	۱	۱/۹۶	
			۱				
BC		۰/۸		۰/۸			
		۰/۶	۱/۵۷	۰/۸	۰/۶	۱/۱۸	
		۰/۶		۰/۸			
دو صفحه ژئوگرید	AC			۰/۸			
			۱/۵۷	۰/۸	۰/۸	۱/۵۷	
				۱			
AB				۱			
		۲/۳۶	۱/۲	۱/۲	۱/۹۶	۱/۹۶	
			۱/۲	۱/۲			
سه صفحه ژئوگرید	ABC			۱			
			۱/۹۶	۱	۱/۹۶	۱/۹۶	
				۱	۰/۸		

منحنی شکل (۷) تغییرات وزن واحد حجم بیشینه با تعداد صفحات ژئوگرید) نشان می‌دهد وقتی که در نمونه (با حجم ثابت) تعداد صفحات ژئوگرید بیشتر گردد وزن واحد حجم کاهش می‌یابد، به عبارتی اصطکاک بین بعضی صفحات و ذرات خاک در مقایسه با دو صفحه کمتر است. لذا می‌توان گفت این عمل موجب کاهش مقاومت در برابر رگاب می‌گردد. مقایسه نتایج یک صفحه و دو صفحه‌ای نشان می‌دهد که علیرغم اینکه در حالت دو صفحه‌ای وزن واحد حجم نسبت به یک صفحه کمتر است لیکن مقاومت در برابر رگاب بیشتر است. در این حالت تعداد اجزای تشکیل‌دهنده صفحات ژئوگرید که با خاک در تماس است بیشتر از حالت یک صفحه‌ای است. زیرا هرچه مجموعه نقاط تماس بین ژئوگرید و خاک بیشتر باشد اصطکاک بیشتر و مقاومت افزایش می‌یابد.

۳- سازوکار بهسازی خاک در مقابل رگاب با استفاده از صفحات ژئوگرید ناشی از اصطکاک ایجادشده بین ذرات خاک و صفحه یا صفحات ژئوگرید می‌باشد و این سازوکار بستگی به نوع ژئوگرید دارد، بطوریکه در ژئوگرید نوع ۱ نسبت به نوع ۲ بیشتر 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.

### نمادها

A	سطح مقطع نمونه
$G_f$	وزن مخصوص الیاف
$G_s$	وزن مخصوص خاک
$\Delta h$	اختلاف ارتفاع آب
$\Delta h_c$	اختلاف ارتفاع بحرانی
i	شیب هیدرولیکی
$i_{cr}$	شیب هیدرولیکی بحرانی
L	طول نمونه
n	تخلخل نمونه
P	نیروی نشت
Q	حجم آب خروجی

در این کار تحقیقاتی مسلح سازی یک خاک غیرچسبنده با استفاده از دو نوع مختلف صفحات ژئوگرید به منظور مقابله با پدیده رگاب مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

۱- استفاده از صفحات ژئوگرید در مسلح سازی خاک موجب کاهش وزن واحد حجم بیشینه و رطوبت بهینه در آزمایش تراکم استاندارد می‌گردد. این کاهش تابعی از تعداد صفحات و نیز نوع صفحات می‌باشد. بطوریکه این تغییرات در بیشینه وزن واحد حجم در ژئوگرید نوع ۲ نسبت به نوع ۱ بیشتر است.

۲- مسلح سازی خاک با صفحات ژئوگرید موجب بهسازی و افزایش مقاومت خاک در مقابله با نیروی نشت آب و به تأخیر انداختن پیدایش شیب هیدرولیکی بحرانی نسبت به خاک طبیعی می‌گردد. بهسازی ایجادشده در خاک به تعداد صفحات و

### نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری

۱- استفاده از صفحات ژئوگرید در مسلح سازی خاک موجب کاهش وزن واحد حجم بیشینه و رطوبت بهینه در آزمایش تراکم استاندارد می‌گردد. این کاهش تابعی از تعداد صفحات و نیز نوع صفحات می‌باشد. بطوریکه این تغییرات در بیشینه وزن واحد حجم در ژئوگرید نوع ۲ نسبت به نوع ۱ بیشتر است.

۲- مسلح سازی خاک با صفحات ژئوگرید موجب بهسازی و افزایش مقاومت خاک در مقابله با نیروی نشت آب و به تأخیر انداختن پیدایش شیب هیدرولیکی بحرانی نسبت به خاک طبیعی می‌گردد. بهسازی ایجادشده در خاک به تعداد صفحات و

### REFERENCES

- Das, A., Jayashrec, Ch. and Viswandahm, B.V.S. (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.
- Foster, M.A., Fell, R. and Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37 (5), 1000-1024.
- Iizuka A., Kawai, K., Kim, E.R. and Hirata, M. (2004). Modeling of the confining effect due to the geosynthetic wrapping of compacted soil specimens. *Geotextiles and Geomembranes*, 22 (5), 329-358.
- Ojha, C.S., Singh, V.P. and Adrian, D.D., (2003). Determination of critical head in soil piping. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 129 (7), 511-518.
- Patra, C.R., Das, B.M. and Atalar, C., (2005). Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 23 (5), 454-462.
- Park, T. and Tan S.A., (2005). Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber. *Geotextiles and Geomembranes*, 23 (4), 348-361.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Talbot, J.R., (1984). Basic properties of sand and gravel filters. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 110 (6), 684-700.



- Skempton, A.W., and Brogan, J.M., (1994). Experiments on piping in sandy Gravel, *journal of Geotechnique*, 44 (3), 444-460.
- Sivakumar Babu, G.L., Vasudevan, A.K., (2008). Seepage velocity and piping resistance of coir fiber mixed soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 134 (4), 485-492.
- Vidal, M.H. (1978). The development and future of reinforced earth. Proceedings of a Symposium on Earth Reinforcement at the ASCE Annual Convention, Pittsburgh, Pennsylvania, 1-61.
- Varuso, R.J., Grieshaber, J.B. and Nataraj M.S. (2005). Geosynthetic reinforced levee test section on soft normally consolidated clays. *Geotextiles and Geomembranes*, 23 (4), 362-383.
- Zornberg, J.G. (2002). Discrete Framework for Limit Equilibrium Analysis of Fibre-Reinforced Soil. *Géotechnique*, 52 (8), 593-604.
- ASTM D698. Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. *ASTM International West Conshohochen, PA, USA*.