

## عملکرد مصالح ژئوتکستایل با کاربری صافی در مجاورت مصالح زهکش

محمد مهدی جباری<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل شمسایی<sup>۲</sup>، علی نورزاد<sup>۳</sup>، جمشید صدر کریمی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۴/۰۵

### چکیده

امروزه استفاده از مصالح ژئوتکستایل به عنوان جایگزین مناسبی برای صافیهای دانه‌ای مطرح می‌باشد. با توجه به اهمیت کاربرد این مصالح، در این تحقیق سعی شده است تا نفوذپذیری و امکان گرفتگی مصالح ژئوتکستایل که به عنوان صافی در مجاورت مصالح زهکش با شرایط مختلف قرار گرفته است، بررسی شود. در این راستا، دستگاه آزمایش نفوذپذیری به منظور بررسی امکان گرفتگی مصالح ژئوتکستایل با بهره‌گیری از معیار ASTM-5101 با اعمال اصلاحات لازم به منظور تکمیل و ثبت خودکار و دقیقتر اطلاعات طراحی، و منحصراً برای مطالعه حاضر ساخته شده است. به منظور انجام آزمایش از نمونه‌های مختلف مصالح ژئوتکستایل در مسیر یک جریان لایه ای زهکشی استفاده شده است. جهت شبیه‌سازی شرایط مختلف زهکشی از دو نوع لایه ی زهکشی مختلف شامل لایه دانه ای متشکل از گویه‌های فلزی با ابعاد مختلف، و صفحات سوراخدار، که ساختار زهکشی زمین را شبیه‌سازی می‌نمایند، استفاده شده است. میزان و نوع تماس بین ذرات زهکش و ژئوتکستایل در فضای آزاد مورد نیاز جریان آب اثر گذاشته، و بر اساس آزمایشهای انجام گرفته مشخص می‌گردد که ضمن کاهش میزان تخلیه جریان به صورت غیر خطی با کاهش فضای آزاد در محل تماس، امکان گرفتگی مصالح ژئوتکستایل بویژه در زهکشی با صفحات سوراخدار، با کاهش فضا افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** ژئوتکستایل، صافی، گرفتگی، نفوذپذیری.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲- استاد واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی.

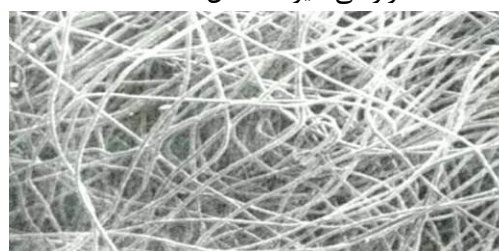
۳- استادیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).

۴- دانشیار دانشکده فنی دانشگاه تبریز.

\*- نویسنده مسئول: mmjabbari@yahoo.com

## مقدمه

با توجه به گسترش روز افزون کاربرد مصالح ساختمانی زمینی<sup>۱</sup> در مهندسی عمران، کاربرد این مصالح در سدهای خاکی نیز اهمیت خاصی پیدا کرده است. در این راستا مصالح ژئوتکستایل<sup>۲</sup> به عنوان صفحاتی تراوا، که از الیاف پلی پرولین و یا پلی استر، و به دو صورت کلی بافته شده و بافته نشده ساخته می شوند، مورد استفاده بیشتری است. این مصالح به علت نفوذپذیری مناسب و بافت ریز قابل تنظیم، عموماً به عنوان جایگزین صافیهای دانه‌ای مورد استفاده قرار می گیرند (شکل ۱).

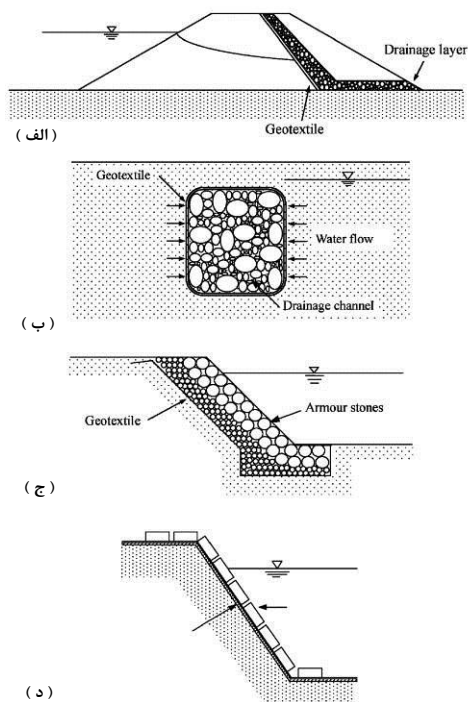


شکل ۱: تصویر ذره بینی از مصالح ژئوتکستایل

شاید اولین کاربرد مصالح ژئوتکستایل در سال ۱۹۵۰ به عنوان صافی در جلوگیری از فرسایش خاک در ایالت فلوریدای آمریکا بوده است. در اواسط دهه ی ۱۹۶۰، هیأت مهندسی آمریکا، این کاربرد را در سامانه‌های جلوگیری از فرسایش و حفاظت شیبها مورد بررسی قرار داده، و در سال ۱۹۷۵ مجموعه ای از معیارهای فنی را در این رابطه ارائه کردند. پس از این مرحله در هلند نیز حفاظت سواحل رود ها با همین روش مورد توجه قرار گرفت.

از مهمترین مزایای کاربرد بافت زمین به جای صافیهای دانه‌ای می‌توان به برتری و سرعت از نظر اجرا، بهینه بودن از نظر اقتصادی، مقاومت شیمیایی، کاربری آسان، عدم تغییر در دانه‌بندی، ضخامت کم، حمل و نقل آسان و عمل بهتر در برابر خاکهای واگرا اشاره نمود. همچنین، می‌توان به مقاومت کششی مناسب و مقاومت در برابر مواد اسیدی (در کوتاه مدت) اشاره کرد. صافیهای دانه‌ای علاوه بر مشکلات متعدد در تهیه و استقرار در محل، دارای نوسانهای زیادی در برابر فشار آب منفذی می باشند که این موضوع در بافت زمینها مشاهده نمی‌شود.

علاوه بر کاربرد به‌عنوان صافی، این مصالح می‌توانند در کنار مصالح سنگچین فاقد زهکشی قرار گرفته یا در نهر زهکشی حفر شده در مسیر زهکشها استفاده شوند (شکل ۲).



شکل ۲: کاربرد ژئوتکستایل در صافی و زهکشی

(الف) صافی در سدهای خاکی (ب) مسیر زهکشها

(ج) بستر رود در مجاورت پوشش محافظ سنگی (د) بستر

## پوششهای بتونی

از آنجا که رفتار یک سامانه‌ی صافی کردن ترکیبی خاک-ژئوتکستایل، تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند نوع خاک، ضخامت و نوع مصالح ژئوتکستایل، و وضعیت و حالات جریان قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی مقایسه‌ای وضعیت جریان و امکان گرفتگی<sup>۳</sup> مصالح ژئوتکستایل با شرایط مختلف با استفاده از معیارهای موجود امکان‌پذیر خواهد بود.

پوششهای محافظ بتنی و سنگی، شیروانیهای سدهای خاکی و سواحل و بسترهای اجرا شده در زیر خود را در برابر فرسایش ناشی از جریان آب محافظت کرده و تنها فضای کمی را برای جریان آب باقی می‌گذارند. از آنجا که بسترهای فوق الذکر دارای تماس مستقیم با پوششهای

1 - Geosynthetics

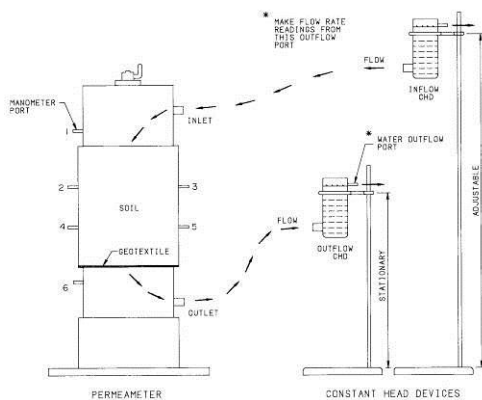
2 - Geotextile

ترکیب ژئوتکستایل به‌عنوان صافی در کنار خاک به‌عنوان سامانه صافی استفاده شده است، دو آزمایش نسبت شیب (GR)<sup>۱</sup> و نسبت هدایت آبی (HCR)<sup>۲</sup> برای برآورد اثر شرایط مرزی بر رفتار سامانه‌ی صافی خاک و ژئوتکستایل بطور متداولتری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### معیار مورد استفاده در آزمایشها

باتوجه به توضیحات فوق الذکر، می‌توان با استفاده از معیار ASTM-D5101، روش آزمایش جهت اندازه‌گیری امکان گرفتگی مصالح ژئوتکستایل را به‌وسیله‌ی نسبت شیب متغیر مورد ارزیابی قرار داد.

شکل ۳ وضعیت استفاده از آزمایش نفوذپذیری طبق معیار فوق الذکر را با استفاده از دستگاه اصلی و مخازن ثابت و متحرک، به صورت طرح واره نشان می‌دهد. در این مجموعه، با تغییر ارتفاع مخزن می‌توان شیب آبی متغیری را جهت بررسی تأثیر مقدار شیب آبی در فراسنجهای مورد بررسی ایجاد کرد.



شکل ۳: طرح واره آزمایش نفوذپذیری.

در شکل ۴، جزئیات دستگاه اصلی نفوذپذیری به منظور اندازه‌گیری امکان گرفتگی مصالح ژئوتکستایل نشان داده شده است. فراسنجهای این مجموعه براساس معیار ASTM-D5101، شامل مسیرهای ورودی و خروجی جریان آب مخازن اصلی به دستگاه، مخزن استوانه‌ای جهت قرارگیری نمونه خاک، بستر و شبکه‌ی سیمی مورد نیاز جهت قرارگیری نمونه‌ی مصالح ژئوتکستایل و مصالح خاکی بر روی آن، شش خروجی فشارسنج قرار گرفته در فواصل مشخص جهت اندازه‌گیری فشار جریان در نقاط

سنگی یا بتنی محافظ می‌باشند، سطوح تماس دچار کاهش تعداد منافذ برای جریان آب می‌گردند. در این راستا، انسداد مسیرهای جریان به وسیله‌ی ذرات رسوبی می‌تواند باعث تغییر الگوی جریان و افزایش فشار منفذی گردند. تحقیقات معدودی در ارتباط با ساختار تماسی مصالح صافی ژئوتکستایل با مصالح زهکشی بستر انجام گرفته است، به‌عنوان مثال، می‌توان به بررسی حرکت ذرات از یک زیرلایه به داخل ژئوتکستایل به‌وسیله‌ی شبیه‌سازی آزمایشگاهی تحت بارگذاری دوره‌ای که به وسیله‌ی لافلور همکاران (۱۹۹۰)، بل و همکاران (۱۹۸۲) و هوار (۱۹۸۲) انجام گرفته است، اشاره نمود.

همان‌طور که گفته شد، مصالح ژئوتکستایل همزمان به‌عنوان یک جداکننده و صافی عمل می‌کنند. در مطالعه‌ی در ارتباط با رفتار مصالح ژئوتکستایل در جریانهای ناپایدار به‌وسیله‌ی کازوفی و همکاران (۱۹۹۹)، بسترهای سنگی جهت شبیه‌سازی لایه پوششی مورد استفاده قرار گرفتند. لافلور و همکاران (۱۹۹۶) از دو توده‌ی زیرلایه‌ای در مطالعه‌ی به‌منظور ارزیابی تأثیر فراسنجهای گوناگون بر توانایی ژئوتکستایل در نگهداری ذرات استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که کاهش اندازه‌ی ذرات باعث کاستی میزان گرفتگی لایه خواهد شد. با این حال، مطالعات انجام شده به‌وسیله‌ی وو و همکاران (۲۰۰۲) در مورد تأثیر گرفتگی مصالح ژئوتکستایل با کاربری صافی، به وسیله‌ی ذرات زهکشی و تأثیر اندازه‌ی ذرات در ناحیه زهکشی شده بر امکان گرفتگی محدود می‌باشد.

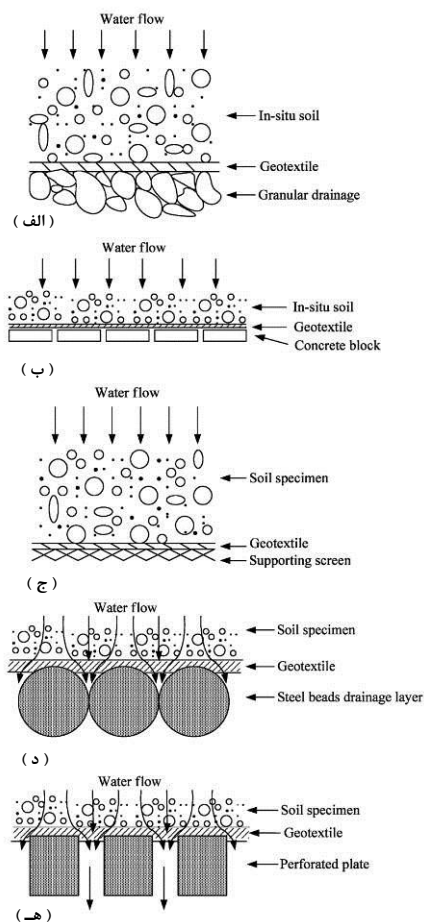
با توجه به توضیحات ذکر شده، می‌توان گفت که هدف اصلی از این مطالعه بررسی تأثیر نوع بستر زهکش استفاده شده در زیرلایه‌ی مصالح ژئوتکستایل می‌باشد. در این راستا، بررسی میزان افزایش یا کاهش امکان گرفتگی مصالح ژئوتکستایل تحت تأثیر میزان فضای باز ایجاد شده بین این مصالح، و مصالح بستر، به منظور بهینه‌سازی و طراحی مناسب مصالح بستر و انتخاب مصالح ژئوتکستایل مناسب با آن، مورد توجه بوده است.

### مواد و روشها

از میان روشهای آزمایشگاهی متعددی که برای مشخص کردن شیب آبی و ارزیابی امکان گرفتگی در مواردی که از

1 - Gradient Ratio

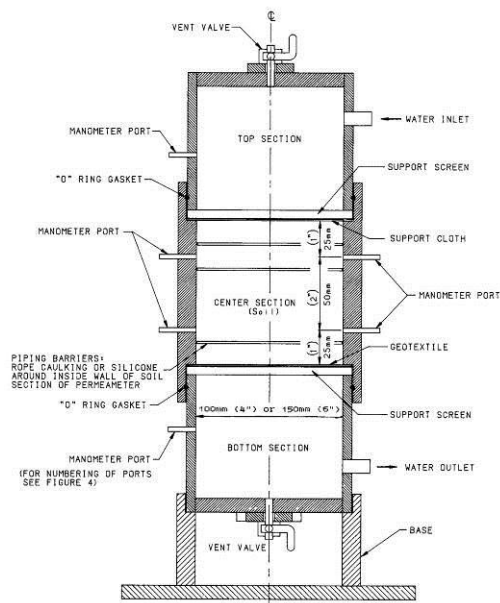
2 - Hydraulic Conductivity Ratio



شکل ۵: مقطع عرضی زهکشی در سامانه‌ی ژئوتکستایل- خاک: الف) مصالح دانه‌ای زهکش در مسیر جریان ب) قطعات بتنی در مسیر جریان ج) شبکه سیمی تحتانی در قسمت تحتانی لایه‌ی ژئوتکستایل در آزمایش GR د) گویه‌های فلزی در مسیر جریان ه) صفحه‌ی سوراخدار در مسیر جریان.

بسترهای دانه را مطابق شکل ۶-د با گویه‌های فلزی و بسترهای دارای روزنه مانند قطعات بتنی را مطابق شکل ۶-ه با صفحات سوراخدار شبیه سازی شد. در مطالعه کنونی شاید نتوان بطور کامل ویژگی‌های تماس بین مصالح ژئوتکستایل و مصالح بستر دانه ای و بسترهای دارای روزنه را شبیه‌سازی کرد، ولی در هر حال، این روش می تواند نشان دهنده کاهش نسبی فضای موجود در محل اتصال برای جریان، و عدم تناسب توانایی صافی به دلیل فشردگی ژئوتکستایل در نقاط تماسی باشد.

مختلف مورد نیاز، شیرهای تخلیه و هواگیری سامانه و ... می‌گردد.



شکل ۴: مقطع دستگاه مورد استفاده در آزمایش نفوذپذیری بر پایه ی معیار ASTM-5101

### شبیه سازی بستر

در شکل ۵ مقاطعی از وضعیت محل تماس مصالح ژئوتکستایل با انواع بسترهای طبیعی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده‌اند. در شکل ۶-الف وضعیت جریان آب با بسترهای دانه‌ای عرضه گردیده، و در شکل ۶-ب بستر ساخته شده با قطعات بتنی نمایش داده شده است. شکل ۶-ج، استفاده از شبکه‌های سیمی را در آزمایش GR بر پایه ی معیار آزمایش ASTM-D5101 نشان می‌دهد.

## طراحی و ساختن دستگاه آزمایش

باتوجه به توضیحات ذکر شده، مجموعه‌ی دستگاه آزمایش مورد نظر مطابق شکل ۶ با استفاده از دستگاه نفوذپذیری نشان داده شده در شکل ۷، طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است. در طراحی این دستگاه، به منظور بررسی فراسنجهای بیشتر، و نیز ثبت کاملتر و دقیقتر اطلاعات مورد نیاز، برخی جزئیات نسبت به معیار ذکر شده بهینه‌سازی، و یا اضافه گردیده است. از جمله موارد قابل توجه در طراحی و ساختن این دستگاه، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:



شکل ۶: مجموعه‌ی دستگاههای آزمایش نفوذپذیری.

الف) اندازه‌گیری فشار آب: به‌منظور افزایش دقت و سرعت در ثبت اطلاعات، به‌جای استفاده از فشارسنجهای معمولی، با طراحی صورت گرفته از حسگرهای الکترونیکی اندازه‌گیری فشار<sup>۱</sup> با دقت ۰/۲ مقیاس نهایی استفاده گردیده است.

ب) اعمال و اندازه‌گیری بار قائم: به منظور بررسی اثر تنش قائم در مطالعات، علاوه بر امکان اعمال بار قائم بر روی سامانه، با استفاده از یک حسگر الکترونیکی بار<sup>۲</sup>، میزان بار و تنش وارده قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

ج) اندازه‌گیری دمای آزمایش: در این رابطه نیز از یک حسگر الکترونیکی دما<sup>۳</sup> استفاده شده است.

د) سامانه‌ی ثبت اطلاعات<sup>۴</sup>: کلیه اطلاعات مورد نیاز شامل خروجی حسگرهای فشار، بار و دما به این سامانه وارد و از

طریق این سامانه به صورت مستقیم و یا با استفاده از اتصال به رایانه قابل ویرایش و ثبت می‌باشد (شکل ۸). این دستگاه با طراحی خاص انجام گرفته و قادر است اطلاعات مورد نظر را با دقت ۱٪ واحد مورد استفاده در سامانه را ثبت، و بر روی دستگاه رایانه، و یا حافظه‌ی جانبی خود در قالبهای مختلف ضبط، و با نرم‌افزار مربوطه نمودار لحظه‌ای و کلی تغییرات را نمایش دهد.

همچنین، با استفاده از نرم‌افزار ذکر شده می‌توان دستگاه آزمایش را واسنجی کرد و درصد خطای آزمایش به حداقل رساند. از دیگر مزایای این دستگاه امکان ثبت طولانی مدت اطلاعات با فاصله‌ی زمانی دلخواه حتی در حد ثانیه می‌باشد، که به رغم ایجاد حجم اطلاعاتی بسیار بالا، از آن جا که از مدارهای الکترونیکی خاص استفاده شده، امکان ذخیره‌سازی کلیه‌ی اطلاعات میسر گردیده است.

لازم به ذکر است که علاوه بر امکان استفاده از نرم‌افزار قابل نصب در رایانه‌ی متصل به سامانه، این دستگاه می‌تواند با استفاده از یک صفحه‌ی نمایش لمسی، ضمن نمایش لحظه‌ای کلیه اطلاعات در حال ثبت، ثبت اطلاعات و تنظیمهای اساسی مورد نیاز را بدون اتصال به دستگاه رایانه انجام دهد.

ه) سامانه‌ی شبیه‌سازی بستر: همان‌طور که در شکل ۹ نیز دیده می‌شود، صفحه‌ی تحتانی مصالح ژئوتکستایل و نمونه‌ی خاکی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که علاوه بر امکان ایجاد شرایط زهکشی مطابق مشخصات ذکر شده در معیار ASTM-D5101، قادرند شرایط شبیه‌سازی بسترهای مختلف را در فضای اختصاص داده شده به‌منظور قراردادن گویهای فلزی، صفحات سوراخدار و حتی مصالح طبیعی، ایجاد کنند.

و) ویژگیهای دیگر دستگاه: علاوه بر موارد بالا، دستگاه طراحی شده با استفاده از مصالح شفاف گلاس در بدنه ساخته شده و امکان مشاهده مسقیم وضعیت جریان و نمونه‌ها میسر گردیده است. همچنین، با بهره‌گیری از سامانه‌ی آب بندی خاص در طراحی دستگاه، قرارگیری نمونه و نیز تخلیه آن بعد از انجام آزمایش، بسیار راحتتر گردیده است.

- 1 - Pressure Transmitter
- 2 - Load Cell
- 3 - Temperature Transducer
- 4 - Data Logger

جدول ۱: مشخصات ژئوتکستایلهای مورد استفاده.

| G <sub>2</sub> | G <sub>1</sub> | ساختار زمین                           |
|----------------|----------------|---------------------------------------|
| پلی استر       | پلی استر       | نوع پلیمر                             |
| ۵۰۰            | ۳۰۰            | حجم به ازای واحد مساحت (گرم/متر مربع) |
| ۲/۵            | ۱/۵            | ضخامت (میلی متر)                      |
| ۰.۱۰           | ۰.۱۴           | O <sub>95</sub> (میلی متر)            |

ج) بسترهای زهکشی: همان طور که قبلاً نیز گفته شد، بسترهای شبیه سازی شده به دو صورت زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

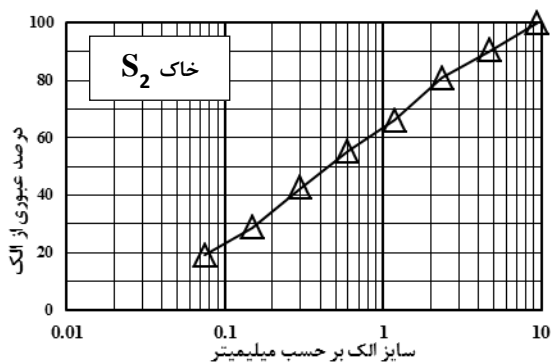
- گوی‌های فلزی با نسبت فضای آزاد در محل تماس مصالح ژئوتکستایل و بسترهای متفاوت که شامل نسبتهای ۳۲، ۵۳، ۷۴ و ۱۰۰ درصد می‌گردد.

- صفحات سوراخدار با نسبت فضای آزاد در محل تماس مصالح ژئوتکستایل و بسترهای متفاوت که شامل نسبتهای ۲۸، ۴۹، ۸۲ و ۱۰۰ درصد می‌گردد.

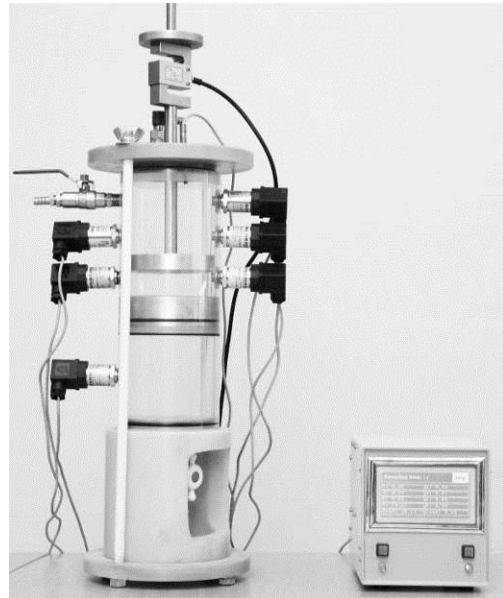
جهت ارزیابی تغییرات شدت جریان تخلیه هنگام آزمایش، جریان مراحل ابتدایی، انتهایی و حداکثر مقدار ممکن به ترتیب با فراسنجهای  $Q_i$ ،  $Q_f$  و  $Q_p$  معرفی و نمایه‌های  $I_{pf}$  و  $I_{if}$  نیز به صورت معادلات ۱ و ۲، قابل تعریف خواهند بود.

$$I_{pf} = \frac{Q_f}{Q_p} \quad (1)$$

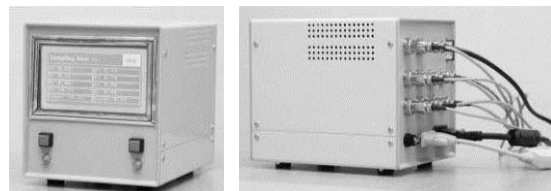
$$I_{if} = \frac{Q_f}{Q_i} \quad (2)$$



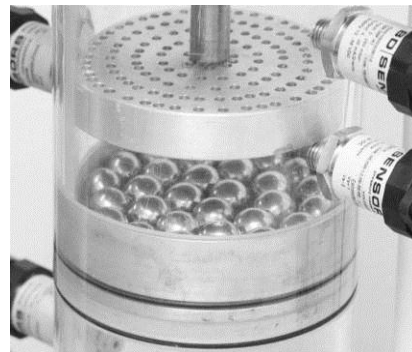
شکل ۱۰: دانه بندی مصالح خاکی نمونه S1 و S2



شکل ۷: دستگاه طراحی و ساخته شده نفوذ پذیری به منظور اندازه گیری امکان گرفتگی مصالح ژئوتکستایل.



شکل ۸: دستگاه اندازه گیری و ثبت اطلاعات.



شکل ۹: بستر شبیه سازی شده در دستگاه آزمایش.

#### مصالح مورد استفاده

مصالح مورد آزمایش در مطالعه حاضر به شرح ذیل می‌باشند:

الف) مصالح ژئوتکستایل: ژئوتکستایل مورد استفاده در آزمایشهای این مطالعه به عنوان صافی، از دو نوع مختلف مطابق مشخصات ذکر شده در جدول ۱ می‌باشد.

ب) مصالح خاکی: از دو نوع خاک مختلف در آزمایشها استفاده گردیده است، که دانه بندی مصالح مزبور مطابق شکل ۱۰ مورد توجه می‌باشد.

## نتایج آزمایشها

جدول ۲: نتایج آزمایش صافی با بستر زهکشی ساخته شده از گویهای فلزی

| شماره‌ی آزمایش | نسبت فضای آزاد (%) | شیب آبی | بده‌ی تخلیه اولیه (ml/s) | بده‌ی تخلیه حداکثر (ml/s) | بده‌ی تخلیه نهایی (ml/s) | ژئوتکستایل |          |
|----------------|--------------------|---------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|------------|----------|
|                |                    |         |                          |                           |                          | $I_{pr}$   | $I_{ff}$ |
| ۱              | ۳۲                 | ۱       | ۰/۲۷                     | ۰/۲۹                      | ۰/۱۶                     | ۰/۵۵       | ۰/۵۹     |
| ۲              | ۳۲                 | ۴       | ۰/۶۵                     | ۰/۶۷                      | ۰/۴۱                     | ۰/۶۱       | ۰/۶۳     |
| ۳              | ۵۳                 | ۱       | ۰/۳۰                     | ۰/۳۲                      | ۰/۱۷                     | ۰/۵۳       | ۰/۵۷     |
| ۴              | ۵۳                 | ۴       | ۰/۷۸                     | ۰/۸۰                      | ۰/۵۴                     | ۰/۶۸       | ۰/۶۹     |
| ۵              | ۷۴                 | ۱       | ۰/۳۵                     | ۰/۳۷                      | ۰/۲۲                     | ۰/۵۹       | ۰/۶۲     |
| ۶              | ۷۴                 | ۴       | ۱/۲۰                     | ۱/۲۴                      | ۰/۹۵                     | ۰/۷۷       | ۰/۷۹     |
| ۷              | ۱۰۰                | ۱       | ۰/۴۰                     | ۰/۴۲                      | ۰/۲۹                     | ۰/۶۹       | ۰/۷۳     |
| ۸              | ۱۰۰                | ۴       | ۱/۴۲                     | ۱/۴۵                      | ۱/۱۲                     | ۰/۷۷       | ۰/۷۹     |
| ۹              | ۳۲                 | ۱       | ۰/۲۵                     | ۰/۲۷                      | ۰/۱۳                     | ۰/۴۸       | ۰/۵۲     |
| ۱۰             | ۳۲                 | ۴       | ۰/۶۰                     | ۰/۶۲                      | ۰/۳۶                     | ۰/۵۸       | ۰/۶۰     |
| ۱۱             | ۵۳                 | ۱       | ۰/۲۷                     | ۰/۲۸                      | ۰/۱۴                     | ۰/۵۰       | ۰/۵۲     |
| ۱۲             | ۵۳                 | ۴       | ۰/۷۷                     | ۰/۷۸                      | ۰/۴۷                     | ۰/۶۰       | ۰/۶۱     |
| ۱۳             | ۷۴                 | ۱       | ۰/۳۲                     | ۰/۳۳                      | ۰/۱۹                     | ۰/۵۸       | ۰/۵۹     |
| ۱۴             | ۷۴                 | ۴       | ۱/۰۱                     | ۱/۰۴                      | ۰/۶۹                     | ۰/۶۶       | ۰/۶۸     |
| ۱۵             | ۱۰۰                | ۱       | ۰/۳۸                     | ۰/۳۹                      | ۰/۲۴                     | ۰/۶۲       | ۰/۶۳     |
| ۱۶             | ۱۰۰                | ۴       | ۱/۳۸                     | ۱/۴۲                      | ۱/۰۴                     | ۰/۷۳       | ۰/۷۵     |

جدول ۳: نتایج آزمایش صافی با بستر زهکشی ساخته شده از صفحات سوراخدار.

| شماره‌ی آزمایش | نسبت فضای آزاد (%) | شیب آبی | بده‌ی تخلیه اولیه (ml/s) | بده‌ی تخلیه حداکثر (ml/s) | بده‌ی تخلیه نهایی (ml/s) | نمونه‌ی خاک |          |
|----------------|--------------------|---------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|----------|
|                |                    |         |                          |                           |                          | $I_{pr}$    | $I_{ff}$ |
| ۱۷             | ۲۸                 | ۱       | ۱/۲۸                     | ۱/۶۵                      | ۱/۴۸                     | ۰/۹۰        | ۱/۱۶     |
| ۱۸             | ۲۸                 | ۴       | ۵/۰۸                     | ۵/۷۰                      | ۵/۱۲                     | ۰/۹۰        | ۱/۰۱     |
| ۱۹             | ۴۹                 | ۱       | ۱/۶۴                     | ۲/۰۵                      | ۱/۹۱                     | ۰/۹۳        | ۱/۱۶     |
| ۲۰             | ۴۹                 | ۴       | ۷/۱۲                     | ۷/۵۲                      | ۷/۳۰                     | ۰/۹۷        | ۱/۰۳     |
| ۲۱             | ۸۲                 | ۱       | ۱/۹۶                     | ۲/۳۰                      | ۲/۱۵                     | ۰/۹۳        | ۱/۱۰     |
| ۲۲             | ۸۲                 | ۴       | ۸/۷۰                     | ۸/۹۵                      | ۸/۶۰                     | ۰/۹۶        | ۰/۹۹     |
| ۲۳             | ۱۰۰                | ۱       | ۲/۰۵                     | ۲/۳۹                      | ۲/۲۸                     | ۰/۹۵        | ۱/۱۱     |
| ۲۴             | ۱۰۰                | ۴       | ۹/۴۰                     | ۹/۹۴                      | ۹/۸۰                     | ۰/۹۹        | ۱/۰۴     |
| ۲۵             | ۲۸                 | ۱       | ۰/۳۲                     | ۰/۳۵                      | ۰/۲۲                     | ۰/۶۳        | ۰/۶۹     |
| ۲۶             | ۲۸                 | ۴       | ۱/۲۲                     | ۱/۲۵                      | ۱/۱۵                     | ۰/۹۲        | ۰/۹۴     |
| ۲۷             | ۴۹                 | ۱       | ۰/۴۵                     | ۰/۴۶                      | ۰/۳۱                     | ۰/۶۷        | ۰/۶۹     |
| ۲۸             | ۴۹                 | ۴       | ۲/۰۱                     | ۲/۰۴                      | ۱/۸۹                     | ۰/۹۳        | ۰/۹۴     |
| ۲۹             | ۸۲                 | ۱       | ۰/۵۲                     | ۰/۵۵                      | ۰/۴۰                     | ۰/۷۳        | ۰/۷۷     |
| ۳۰             | ۸۲                 | ۴       | ۲/۳۲                     | ۲/۳۶                      | ۲/۱۶                     | ۰/۹۲        | ۰/۹۳     |
| ۳۱             | ۱۰۰                | ۱       | ۰/۵۱                     | ۰/۵۳                      | ۰/۳۸                     | ۰/۷۲        | ۰/۷۵     |
| ۳۲             | ۱۰۰                | ۴       | ۲/۳۲                     | ۲/۳۴                      | ۲/۱۰                     | ۰/۹۰        | ۰/۹۱     |

پس از واسنجی دستگاه، جایگذاری نمونه، قراردادن خاک طبق معیار بر روی نمونه، ایجاد شیب آبی مورد نظر و تخلیه‌ی هوای موجود در سامانه، ثبت اطلاعات آغاز می‌گردد. در این راستا، با توجه به بسترهای زهکشی اشاره شده در بخش قبل، آزمایشهای پر شماری با شیبهای آبی و نمونه‌های خاک و ژئوتکستایل متفاوت، به شرح ذیل انجام گرفته است.

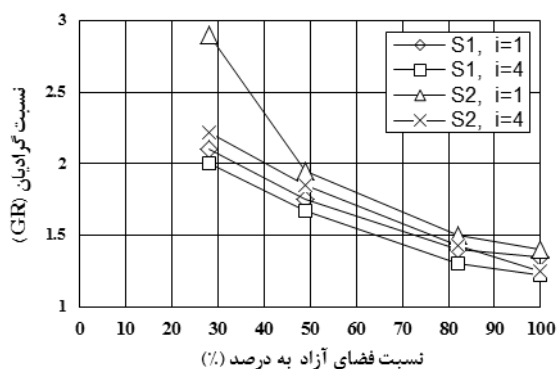
## تغییرات میزان بده‌ی تخلیه

با توجه به آزمایشهای انجام گرفته، تغییرات بده‌ی تخلیه نسبت به درصد فضای آزاد در محل اتصال ژئوتکستایل و بستر در دو حالت زیر بررسی گردیدند:

الف) بستر ساخته شده از گویهای فلزی: در ابتدای کار، ذرات انتقال یافته به وسیله‌ی جریان از سامانه با توجه به میزان کدري آب جریان خروجی قابل اندازه‌گیری بودند. پس از این مرحله، شدت جریان به حداکثر خود رسید، سپس به آرامی بعد از دقایقی تدریجاً کاهش یافت.

نتایج به دست آمده از مجموعه‌ی آزمایش انجام گرفته، مطابق جدول ۲، قابل بررسی می‌باشند. همچنین، منحنی شدت جریان عادی بین سامانه‌های صافی با نسبت فضای باز متفاوت و مقایسه آن با فضای باز کامل، در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که شدت جریان نهایی سامانه با افزایش میزان فضای باز، زیاد می‌شود. با این حال، رابطه‌ی بین شدت جریان و نسبت فضای باز برای ژئوتکستایلها کاملاً خطی نیست.

ب) بستر ساخته شده از صفحات سوراخدار: با توجه به نتایج به دست آمده با استفاده از این نوع بستر (جدول ۳)، طبق شکل ۱۲ متوجه خواهیم شد که میزان کاهش مقدار بده‌ی تخلیه شده از سامانه‌ی صافی تشکیل شده به وسیله‌ی مصالح ژئوتکستایل و زهکشهای شبیه‌سازی شده با صفحات سوراخدار از بسترهای مورد استفاده از گویهای فلزی کمتر می‌باشد. همچنین در این سامانه، شدت بده‌ی نهایی خروجی از سامانه‌ی صافی، با افزایش فضای آزاد، افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشها نشان می‌دهند که شیب آبی دارای تأثیر ناچیزی بر رابطه‌ی بین نسبت بده جریان و نسبت فضای باز است.



شکل ۱۴: تغییرات نسبت شیب (GR) به درصد فضای آزاد در آزمایش با بستر ساخته شده از صفحات سوراخدار.

### نتیجه گیری

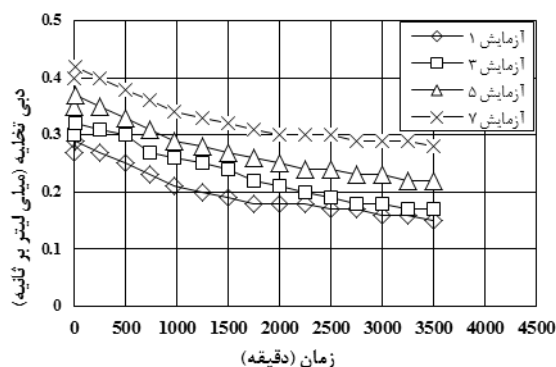
در مطالعه‌ی انجام گرفته، دو نوع روش زهکشی شامل صفحات سوراخدار و گویهای فلزی، که وضعیت بسترهای دارای منفذ و مصالح دانه‌ای را شبیه‌سازی می‌نمایند، در کنار مصالح ژئوتکستایل که به‌عنوان صافی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بررسی گردیدند. باتوجه به نتایج آزمایشهای انجام گرفته، می‌توان به دستاوردهای زیر اشاره نمود:

(الف) اندازه‌ی بدهی تخلیه بر اساس ضرایب به‌دست آمده از روابط ۲، ۱ و ۲، و همچنین نحوه‌ی عبور جریان آب از بسترهای شبیه‌سازی شده فوق‌الذکر، وابسته به میزان فضای آزاد در بین مصالح ژئوتکستایل و بسترهای ذکر شده بوده، لکن این تغییرات بطور خطی نیستند.

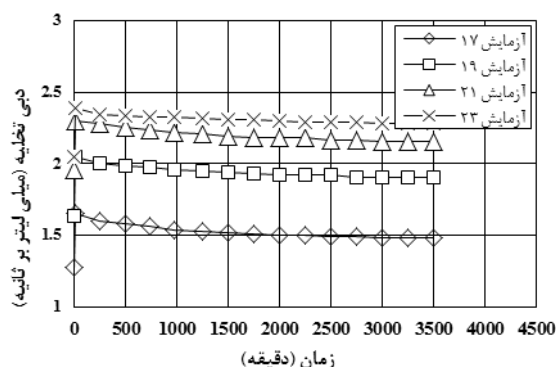
(ب) زمانی که بسترهای ذکر شده به‌منظور تشکیل یک لایه زهکشی در مسیر جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند، امکان گرفتگی با کاهش فضای آزاد در محل تماس مصالح ژئوتکستایل و بستر زهکشی افزایش می‌یابد، بنابراین، ایجاد یک فضای آزاد تجربی نزدیک به ۱۰۰٪، که می‌تواند از طریق استفاده از شبکه‌های سیمی در زیر بستر تأمین گردد، کمترین امکان گرفتگی را به وجود خواهد آورد.

(ج) تأثیر تغییر ضخامت مصالح ژئوتکستایل در شدت امکان گرفتگی با بسترهای زهکشی مختلف چندان زیاد نبوده، ولی با افزایش ضخامت مصالح ژئوتکستایل، فضای آزاد ایجاد شده در محل اتصال بستر و ژئوتکستایل، به‌دلیل انعطاف‌پذیری کمتر نسبت به ژئوتکستایل‌های نازکتر، بیشتر شده و در نتیجه امکان گرفتگی نیز کمتر می‌گردد.

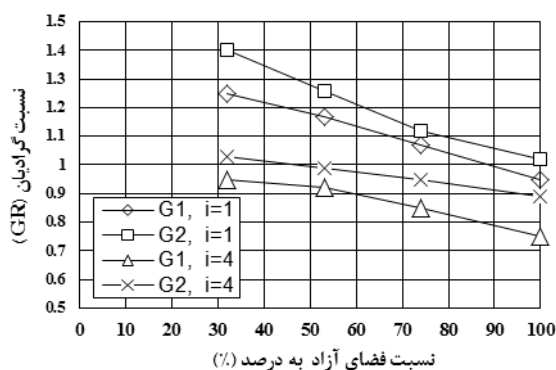
بررسی تغییرات نسبت شیب: به‌منظور بررسی تغییرات نسبت شیب نیز در دو حالت بستر زهکش با گویهای فلزی و صفحات سوراخدار بررسی گردیدند. شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب نمودار تغییرات نسبت شیب به درصد فضای باز را در دو بستر ذکر شده نشان می‌دهند.



شکل ۱۱: بدهی تخلیه در سامانه‌ی صافی با ژئوتکستایل  $G_1$  آزمایش شده با خاک  $S_2$  و زهکش متشکل از گویهای فلزی.



شکل ۱۲: بدهی تخلیه در سامانه‌ی صافی با ژئوتکستایل  $G_1$  آزمایش شده با خاک  $S_1$  و زهکش متشکل از صفحات سوراخدار.



شکل ۱۳: تغییرات نسبت شیب (GR) به درصد فضای آزاد در آزمایش با بستر ساخته شده از گویهای فلزی.



**References:**

1. ASTM (American Society of Testing and Materials). 2004. Annual Book of ASTM Standards, D 5101-01. Section 4. vol. 04.13.
2. Aydilek, A.H., Oguz, S.H., and Edil, T.B. 2005. Constriction size of geotextile filters. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.* ASCE. 131(1). 28–38.
3. Bell, A.L., McCullough, L.M., Snaith, M.S. 1982. An experimental investigation of subbase protection using geotextiles. In: *Proceedings of Second International Conference on Geotextiles*. Las Vegas. United States. vol. 2, pp. 435–440.
4. Bhatia, S K., Moraille, J., and Smith, J. L. 1998. Performance of granular vs. geotextile filters in protecting cohesionless soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.* ASCE. No.78. 1–29.
5. Cazzuffi, D.A., Mazzucato, A., Moraci, N., Tondello, M. 1999. A new test apparatus for the study of geotextiles behavior as filters in unsteady flow conditions: relevance and use. *J.Geotextiles and Geomembranes* 17 (5–6), 313–329.
6. Cho-Sen, W., Yung-Shan, H., Yun-Wei, Y., Bow-Shung, C. 2006. Soil-nonwoven geotextile filtration. *J. Geotextiles and Geomembranes* 24, 1–10.
7. Fischer, G.R., Christopher, B.R., Holtz, R.D. 1990. Filter criteria based on pore size distribution. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, The Hague. The Netherlands, vol. 1, pp. 289–294.
8. Hagerty, D.J., Parola, A.C. 2001. Members, ASCE. Seepage Effects in some riprap revetments. *J.Hydraulic Engrg.*, ASCE, 127(7), 556–566.
9. Hoare, D.J. 1982. A laboratory study into pumping clay through geotextiles under dynamic loading. In: *Proceedings of Second International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, United States, vol. 2. pp. 423–428.
10. John, N.W.M. 1987. *Geotextiles*, Blackie, Glasgow, UK, Chapter 3, pp. 56–67.
11. Lafleur, J., Assi, M., Mlynarek, J. 1996. Behavior of nonwoven geotextiles under pumping loads. *Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites*. In: Bhatia, S. K., Suits, D. (Eds.), ASTM STP 1281, pp. 211–221.
12. Lafleur, J., Rollin, A.L., Mlynarek, J. 1990. Clogging of geotextiles under pumping loads. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, The Hague, The Netherlands, vol. 1, pp. 189–192.
13. Wu, C.S., Hong, Y.S., Yan, Y.W., Chang, B.S. 2002. The influence of the drainage particle contact area on soil-nonwoven geotextile filtration behavior. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics*. A. A. Balkema Publishers, Nice, France, pp. 1079–1082.

