

# بررسی پارامترهای مؤثر بر توانایی فیلترها در متوقف کردن فرسایش از میان ترک خوردگی هم‌زمان در هسته و فیلتر سدهای خاکی

سیده محمد علی زهردیان\* (استادیار)

دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

محمد جمالی مقدم (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

مهم‌ترین سؤال درباره‌ی عملکرد فیلترها در سدهای خاکی، توانایی فیلتر برای مقاومت در برابر تغییرشکل‌های ناشی از ترک خوردگی و توقف نشت از میان ترک یا منطقه‌ی آسیب‌دیده است. به همین منظور دستگاهی ساخته شد که بتوان عملکرد فیلتر هنگامی که مصالح هسته و فیلتر در سدهای خاکی به‌طور هم‌زمان ترک می‌خورند را با کمک آن ارزیابی کرد. در حالت فیلتر موفق، فیلتر ریزش می‌کند تا ترک خوردگی را پُر کند و همچنین نرخ جریان خروجی کاهش و فشار آب افزایش می‌یابد. در این نوشتار به بررسی آثار عرض ترک خوردگی، جهات آن، میزان فرسایش مصالح تا پُر شدن ترک، آثار تغییر فشار، چگالی نسبی، گرادیان هیدرولیکی و زمان‌های تراکم در حالت ترک خوردگی هم‌زمان هسته و فیلتر پرداخته می‌شود.

واژگان کلیدی: سد خاکی، ترک خوردگی، آب‌سُستگی، آزمایش فیلتر.

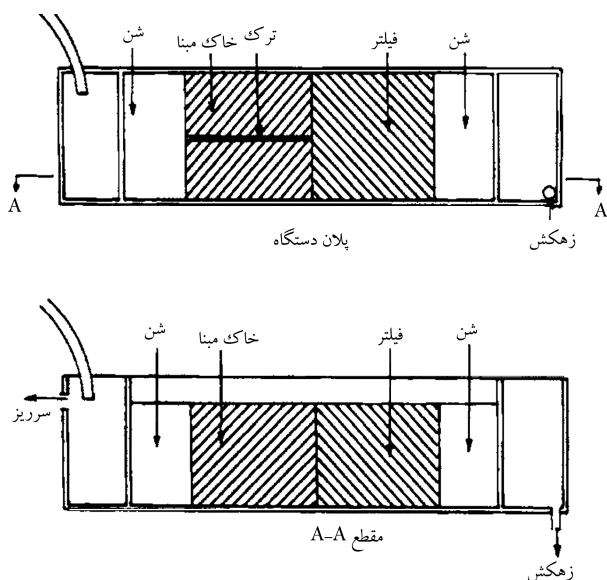
## ۱. مقدمه

تحقیقات نشان داده است که دلیل اصلی خرابی سدهای خاکی در اثر نشت آب، آب‌سُستگی مصالح، و پدیده‌ی رگاب است. سد بالدرهد<sup>۱</sup> در انگلستان، سدهای تون<sup>۲</sup>، بالدوین هیلز<sup>۳</sup>، و فوتنل<sup>۴</sup> در ایالات متحده‌ی آمریکا، سد نانک ساگار<sup>۵</sup> در هندوستان از جمله سدهایی هستند که به‌علت عدم توانایی فیلتر در جلوگیری از شسته‌شدن مصالح دچار خرابی شده‌اند.<sup>[۱]</sup> هسته‌ی مرکزی سدهای خاکی و سنگریزه‌ی از انباشته‌های مترکم خاک‌های مبنایی تشکیل شده است که حاوی مقادیر قابل توجهی ریزدانه هستند. فیلتر سدها به‌منظور نگهداشت ذرات فرسایش‌یافته از این خاک‌های ریزدانه با هدف برقراری ایمنی هسته و کل سازه‌ی سد طراحی می‌شوند. از طرفی لایه‌ی فیلتر باید به اندازه‌ی کافی ریز باشد تا قابلیت جلوگیری از فرسایش ذرات خاک مورد محافظت را داشته باشد و همچنین به اندازه‌ی کافی درشت باشد تا اجازه‌ی زهکشی را به خاک موردنظر بدهد. اگر فیلتر ایجاد شده فیلتری موفق باشد، فقط در لحظات اولیه مقداری از ذرات ریز خاک مینا کاملاً از فیلتر عبور می‌کنند و شسته می‌شوند. به مرور زمان ذرات بزرگ‌تر خاک مینا در فضا‌های مصالح فیلترگیر می‌کنند و این ذرات نیز، خاک مینا را نگه می‌دارند و بدین صورت حالت پایدار در تمام سطح مشترک خاک مینا به‌وجود می‌آید. مهم‌ترین

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۲/۲۴، اصلاحیه ۱۳۸۹/۸/۲، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۴.

سؤالی که درباره‌ی عملکرد فیلترها تاکنون بدون جواب مانده است، در واقع، توانایی فیلتر برای مقاومت در برابر تغییرشکل‌های ناشی از ترک خوردگی و توقف نشت از میان ترک خوردگی یا منطقه‌ی آسیب‌دیده است. علاوه بر معیار اندازه‌ی دانه‌ها که اطمینان از نگه‌داشتن خاک مینا در حین عبور آزاد نشت را می‌دهد، دانه‌بندی یک فیلتر باید به‌صورتی باشد که متحمل ترک نشود. برای اطمینان از اینکه فیلتر ترک خوردگی را تجربه نکند، معیار دانه‌بندی موجود باید به گونه‌ی باشد که کمتر از ۵٪ از مصالح فیلتر ریزتر از الک شماره ۲۰۰ باشد و این ذرات ریزدانه نباید خمیری باشند. به جز محدودیت میزان و خصوصیات پلاستیسیته‌ی ریزدانه‌ها در فیلتر، معیار دیگری که مستقیماً پتانسیل فیلتر برای تحمل ترک خوردگی را بیان کند، موجود نیست. معمولاً فرض می‌شود که فیلترهای پایین دست هسته در سدهای خاکی از فرسایش و پاپینگ ناشی از ترک‌های عرضی در سدها جلوگیری می‌کنند. این فرض بر این اساس است که فیلتر غیرجسینده است و دچار ترک خوردگی نمی‌شود. به هر حال همان‌طور که در سدهای کریک یاردز، ماتاهینا و ویدالسواتن دیده شده است این امر همیشه صادق نیست.<sup>[۲]</sup> توانایی یک فیلتر به‌منظور فراهم کردن یک خط اطمینان قابل قبول در برابر فرسایش و پاپینگ بستگی به طبیعت غیرجسینده‌ی مصالح فیلتر و توانایی آن به‌منظور ریزش و دچار ترک خوردگی نشدن دارد. به همین ترتیب منطقه‌های متوقف‌کننده‌ی ترک در بالادست هسته‌ی سد نیز باید به‌گونه‌ی طراحی شوند که به داخل ترک سُسته شوند و ترک خوردگی را پُر کنند. به همین منظور در سال



شکل ۲. دستگاه مجرای استفاده شده. [۱۰]

آزمایش‌های نفوذسنجی به ۵ روش انجام می‌شوند که عبارتند از: آزمایش‌های استاندارد، آزمایش‌های گل آب، آزمایش‌های شکاف، آزمایش فیلتر بدون فرسایش (NEF) [۱۵-۱۳، ۷-۲] یا آزمایش‌های بین هول<sup>۹</sup> و آزمایش فیلتر با فرسایش ممتد (CEF)<sup>۱۰</sup> [۸]. این آزمایش‌ها در شرایط اولیه‌ی خاک مینا با هم تفاوت دارند، به طوری که تفسیر داده‌های آزمایش براساس ایجاد یک فیلتر کارآمد انجام می‌شود. برپا کردن آزمایش استاندارد اساساً شبیه به آزمایش نفوذپذیری معمول است. جریان آب با اعمال گرادیان هیدرولیکی از میان یک لایه‌ی خاک مینای سالم و سپس لایه‌ی فیلتر عبور می‌کند. در اینجا به نمونه‌ی از آخرین دستگاه‌های آزمون نفوذسنجی فیلتر اشاره می‌شود.

بیس‌واس (۲۰۰۵) به بررسی مدل‌سازی‌های عددی همچنین آزمایشگاهی فیلترها پرداخت. وی با مطالعه‌ی اندرکنش بین فیلتر دانه‌ی و خاک چسبیده به‌منزله‌ی هسته و در نظر گرفتن آثار گرادیان هیدرولیکی به این نتیجه رسید که در گرادیان‌های هیدرولیکی بالا، تمایل برای وقوع پدیده‌ی پیننگ، هنگامی که فیلتر تحت اثر لرزش (با اعمال ضربه به‌وسیله‌ی چکش سرنلستیکی) قرار می‌گیرد؛ افزایش می‌یابد. [۱۱] بنابراین، نرخ افزایش گرادیان هیدرولیکی عملکرد فیلتر را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. به این ترتیب که افزایش سریع در گرادیان هیدرولیکی همانند لرزش عمل می‌کند. این مطلب به افزایش سریع در هد، جلوگیری از قرارگیری ذرات خاک مینا روی حفره‌های فیلتر نسبت داده می‌شود. وی دستگاهی مطابق شکل ۳ که از یک استوانه‌ی فولادی با توانایی مقاومت در برابر فشارهای هیدرولیکی تا ۱ مگاپاسکال با قطر ۱۵۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۴۵ میلی‌متر تشکیل شده است، را ساخت. یک مبدل فشار در بالای دستگاه برای اندازه‌گیری فشار اعمال شده برحسب کیلوپاسکال نصب و مقادیر از طریق یک مولتی‌متر نمایش داده شد. یک حفره به قطر ۳ میلی‌متر در وسط لایه‌ی رس (خاک مینا) ایجاد شد، همچنین به‌منظور کاهش آشفته‌گی هنگام اعمال فشار هیدرولیکی در حین انجام آزمایش یک صفحه‌ی آلومینیومی سوراخ شد و یک لایه‌ی سنگی دست‌چین روی رس متراکم‌شده قرار گرفت.

به‌منظور تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی، فشار آب از صفر و با افزایش‌های ۱۰-۵ کیلوپاسکال در بازه‌های زمانی ۳۰-۶۰ دقیقه تا هنگامی که جریان یکنواخت مشاهده شود، اعمال شد. میزان فرسایش نیز به دو روش محاسبه شد، در روش اول

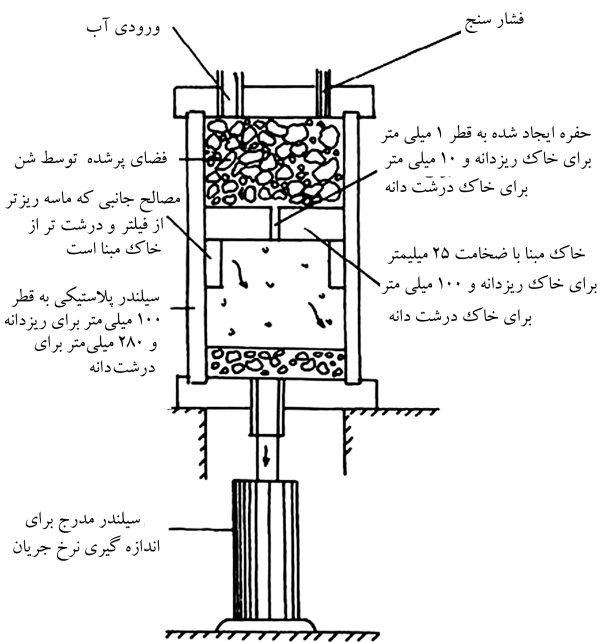
۲۰۰۶ براساس پیشنهاد محققان [۱۲] و با ایجاد اصلاحاتی، دستگاهی طراحی شد که عملکرد فیلتر هنگامی که مصالح هسته و فیلتر در سدهای خاکی به‌طور هم‌زمان ترک می‌خورند پارامترهای مؤثر بر عملکرد فیلتر را در این حالت می‌توان به کمک آن ارزیابی کرد. دستگاه اصلاح‌شده، درحقیقت اجازه‌ی تغییر جهات ترک‌خوردگی و جریان را به‌صورت افقی یا قائم می‌دهد. این دستگاه با مقطع استوانه‌ی دارای قطری برابر با ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر است. در حالت‌هایی که فیلتر موفق عمل کرده و ریزش می‌کند ترک‌خوردگی پُر شده و همچنین نرخ جریان خروجی کاهش و فشار آب افزایش می‌یابد. در حالت‌های فیلتر ناموفق نرخ جریان بالا و میزان فشار پایین باقی می‌ماند. ترک‌های عرضی در سدهای خاکی می‌توانند ناشی از نشست‌های پس از ساخت یا تغییر شکل‌های زلزله باشند. درحقیقت، مسئله‌ی جدی در هر دو مورد هنگامی است که این ترک‌ها باعث جدایی بین سد خاکی و سازه‌ی بتنی مجاور آن شوند.

## ۲. دستگاه‌های آزمون فیلتر

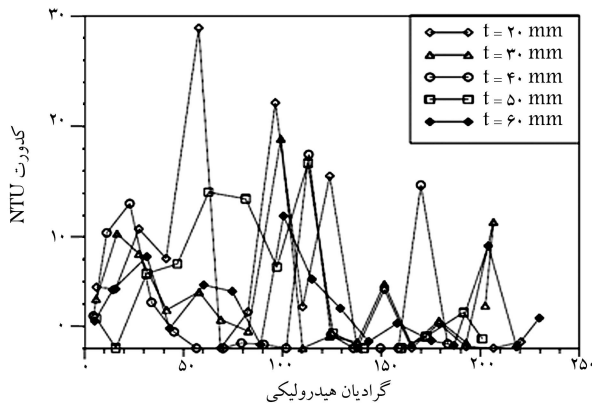
در گذشته انواع مختلفی از دستگاه‌های آزمایش فیلتر به‌منظور توسعه‌ی معیار طراحی فیلتر استفاده شده است. این دستگاه‌ها را می‌توان به آزمایش‌های فیلتر نفوذسنجی<sup>۶</sup> (شکل ۱) و فیلتر مجرای<sup>۷</sup> (شکل ۲) تقسیم‌بندی کرد. [۱۲]

### ۲.۱. آزمایش‌های فیلتر نفوذسنجی

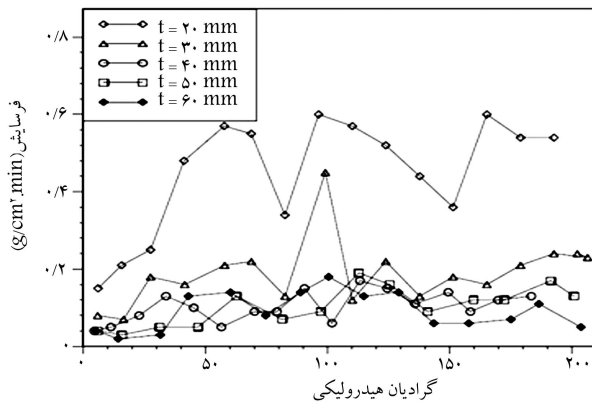
این آزمایش‌ها شامل جریان یافتن آب از میان خاک هسته به سمت فیلتر است. خاک‌های هسته و فیلتر معمولاً در یک مجرای تحت فشار استوانه‌ی محبوس می‌شوند؛ به طوری که در بالا و پایین با لایه‌های خاکی نفوذپذیر و یا صافی محدود می‌شوند. نمونه‌ی از دستگاه نفوذسنجی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. دستگاه نفوذسنجی آزمایش فیلتر. [۹]



شکل ۴. نتایج آزمایشگاهی کدورت نسبت به گرادیان هیدرولیکی (t ضخامت فیلتر). [۱۱]

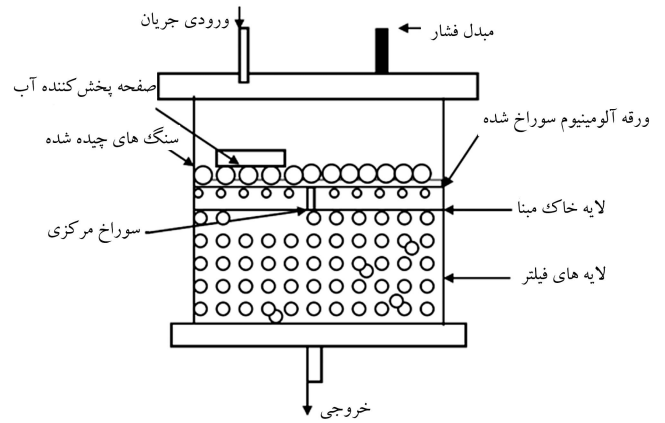


شکل ۵. مقایسه‌ی میزان فرسایش نسبت به ضخامت‌های مختلف فیلتر. [۱۱]

به قطر ۳ میلی‌متر و ضخامت ۳۰-۴۰ میلی‌متر است. در هر آزمایش، بیشینه‌ی میزان فرسایش متناظر با افزایش ناگهانی در کدورت همراه است. در حالت گرادیان هیدرولیکی بحرانی هم افزایش ناگهانی در کدورت و هم افزایش در میزان فرسایش دیده می‌شود.

## ۲.۲. آزمایش‌های فیلتر مجرای (فلوم)

این آزمایش‌ها به منظور آزمون رگاب در سدهای خاکی و با تمرکز بر روی مصالح هسته‌ی ترک‌خورده انجام می‌شود. در آزمایشی در سال ۱۹۸۷، مجرای ساخته شد که طولی برابر با ۲٫۳ متر و مقطع عرضی ۹۳ سانتی‌متر مربع داشت. [۱۲] یک تیغه‌ی لاستیکی در پایین مجرا قرار گرفته بود، به طوری که یک تنش فشاری را می‌توانست به نمونه‌ی مورد آزمایش اعمال کند. یک ترک اولیه که در بالای خاک مینا در حین ساخت نمونه با یک میخ چوبی در حین تهیه‌ی نمونه ایجاد می‌شد. در سری آزمایش‌های آن‌ها، ترک فقط در حدود ۱۰ تا ۵٪ طول خاک مینا نفوذ می‌کرد. صفحه‌ی پلکسی‌گلاس مجرا اجازه‌ی مشاهده‌ی روند پیشرفت فرسایش را می‌داد. در سال ۱۹۸۳ یک مجرای چوبی به منظور آزمایش سیستم‌ها با هسته‌ی (خاک مینا) ترک‌خورده ساخته شد. [۱۰] نمای این دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است. ترک با متراکم کردن خاک اطراف یک ورق فولادی که در داخل مجرا قرار داده شده بود، شکل می‌گرفت، سپس این ورق بیرون کشیده می‌شد تا یک کانال جریان باز شکل بگیرد.



شکل ۳. دستگاه استفاده شده برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی. [۱۱]

یک لیتر از جریان خروجی برای یک مدت معین جمع و سپس در گرمکن خشک و اندازه‌گیری شد، در روش دوم پس از انجام آزمایش با جمع کردن فیلتر و خاک‌های مینای نگه داشته شده از هر لایه ۱-۲ سانتی‌متر مقدار آن‌ها اندازه‌گیری شد. رفتار بین سطح میانی فیلترها در نگه داشتن ذرات مینای فرسایش یافته براساس اندازه‌گیری وزن فرسایش است.

از آنجایی که گرادیان‌های هیدرولیکی واقعی به ندرت به ۳۰ می‌رسد، بنابراین تصمیم گرفته شد که بیشینه‌ی فشارهای تولیدکننده‌ی گرادیان هیدرولیکی به همین مقدار یا کمی بالاتر محدود شود. به منظور مشاهده‌ی اثر توزیع اندازه‌ی دانه‌ی ۱۱ هر آزمایش تحت شرایط هیدرولیکی مشابهی قرار گرفت.

فشارها با افزایش‌های ۵-۱۰ کیلوپاسکال زیاد می‌شدند تا هنگامی که افزایشی بالا در کدورت و میزان فرسایش اتفاق بیفتد، که بیان‌گر فشار بحرانی و نتیجتاً گرادیان هیدرولیکی بحرانی است. فشار ورودی تا هنگامی که حالت یکنواخت یا جریان ثابت به دست آید، بدون تغییر نگه داشته می‌شود. از معادلات ۱ و ۲، برای تعیین گرادیان هیدرولیکی استفاده می‌شود:

$$p = \rho gh \quad (۱)$$

که در آن  $p$  فشار آب بر حسب کیلوپاسکال،  $\rho$  چگالی آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $g$  شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه، و  $h$  هد گرادیان بر حسب متر است. بنابراین:

$$i = \frac{h}{l} \quad (۲)$$

که در آن  $l$  ضخامت خاک مینا در جهت جریان است. شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی نتایج کدورت جریان خروجی برای فیلتری با ضخامت‌های متغیر است. نتایج نشان می‌دهد که در گرادیان‌های هیدرولیکی بین ۱۰۰ تا ۱۲۰ بیشینه‌ی کدورت در همه‌ی حالت‌ها صرف‌نظر از ضخامت فیلتر ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده شد که هیچ تغییر عمده‌ی در گرادیان هیدرولیکی بحرانی با تغییر ضخامت فیلتر ایجاد نمی‌شود، مگر در ضخامت فیلتری که کوچک است (۲۰ میلی‌متر در این پژوهش)، در حالی که مقدار کدورت بالای ۲۸ (NTU) در گرادیان هیدرولیکی ۶۰ که قبل از کدورت ۲۲ NTU در گرادیان ۱۰۰ است، ایجاد می‌شود. شکل ۵ نشان‌دهنده‌ی فرسایش ذرات از میان فیلتر در حین آزمایش است. فرسایش محاسبه شده بر حسب گرم بر مجذور سانتی‌متر در دقیقه است.

این محاسبه براساس جمع‌آوری یک لیتر از جریان خروجی در یک زمان معین است. سطحی که در معرض فرسایش قرار می‌گیرد برابر با سطح داخلی سوراخ سوزنی

### ۳. آزمایش‌های مربوط به پدیده‌ی ترک خوردگی

به‌طورکلی هدف از معیارهای محدودکردن مقدار ریزدانه در فیلتر آن است که حتی‌المقدور این بخش غیرجسبنده باشد و دچار ترک‌خوردگی نشود و اگر نهایتاً ترکی در فیلتر ایجاد شود، قابلیت ریزش و پُرکردن ترک را داشته باشد. در سال ۲۰۰۴ توصیه‌هایی در مورد طراحی فیلتر از جمله این که فیلتر نباید حاوی بیش از ۵٪ ریزدانه‌ی عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ (ریزتر از ۰٫۰۷۵ میلی‌متر) باشد و این ریزدانه‌ها باید غیرجسبنده باشند، مطرح شد.<sup>[۱۳]</sup> همچنین در پژوهش دیگری طراحی فیلترها برای محافظت از هسته‌ی سدهای ترک‌خورده در برابر فرسایش (۱۹۷۸) بیان شد که دست‌کم ۲٫۵٪ از مصالح فیلتر به‌منظور مؤثر بودن در نگهداری ذرات ریزدانه‌ی هسته‌ی رسی، باید از الک شماره‌ی ۲۰۰ عبور کند.<sup>[۱۳]</sup> تعیین اندازه‌ی ریزترین ذره‌ی رسی با اجرای آزمایش‌های هیدرومتری انجام می‌شود. همچنین در این پژوهش آزمایش قلعه‌ی ماسه‌ی ۱۳ برای تعیین میزان چسبندگی در فیلتر پیشنهاد شد. این آزمایش با وارونه‌کردن یک سطل ماسه روی یک سینی و پُرکردن آب در اطراف آن انجام می‌شود. اگر ماسه با زاویه‌ی برابر با زاویه‌ی استقرار ۱۴ خود در هوا فرو ریخت، نشان‌دهنده‌ی غیرجسبندگی بودن مصالح ماسه‌ی است.

همچنین در سال ۲۰۰۴ محققان نشان دادند که نتایج آزمایش‌های قلعه‌ی ماسه‌ی تحت تأثیر ریزدانه، حالت خمیری ریزدانه‌ها، و درصد رطوبت تراکم قرار می‌گیرند و نمونه‌های با ریزدانه‌ی غیرخمیری تا ۱۵٪ هم فوراً ریزش می‌کنند، ولی نمونه‌های حاوی بیش از ۵٪ ریزدانه با حالت خمیری بالا (که در درصد رطوبت بیشتر از ۵٪ متراکم شده‌اند)، فوراً ریزش نمی‌کنند. در ضمن آزمایش قلعه‌ی ماسه‌ی برای امتحان‌کردن پتانسیل ریزی فیلترهای انتخابی مفید است و عوامل مهم کنترل‌کننده‌ی پتانسیل ریزی فیلتر می‌توانند تغییر نکنند. لذا، سریعاً توانایی یک فیلتر برای ریزش تحقیق شد.<sup>[۱۵]</sup>

### ۴. انجام آزمایش‌های فیلتر متوقف‌کننده فرسایش از میان ترک خوردگی

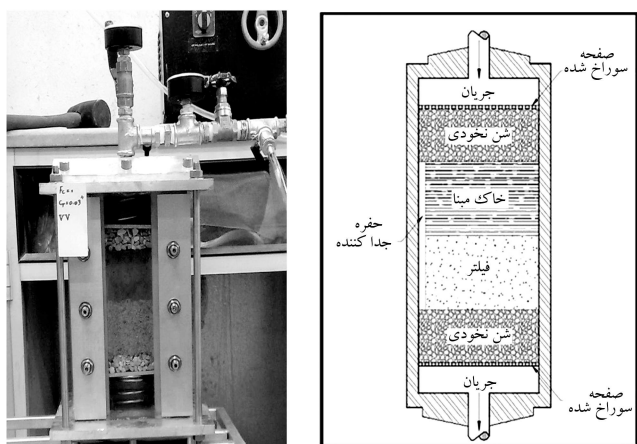
دستگاهی که در این نوشتار ساخته شده است،<sup>[۱۶]</sup> مشابه دستگاه ساخته‌شده‌ی براندون و همکارانش شامل المان‌هایی از هر دو دستگاه نفوذسنجی و مجرایبی است (شکل ۶).<sup>[۳]</sup> نمونه‌ی مورد آزمایش می‌تواند مانند دستگاه‌های نفوذسنج تحت یک جریان آبی تحت فشار قرار گیرد و یا مانند یک دستگاه مجرایبی، یک نمونه‌ی نسبتاً بزرگ در آن قرار گیرد. به‌منظور کاستن از آثار خوردگی و کاهش وزن، این دستگاه از جنس آلومینیم ساخته شد و در آن نمونه‌های فیلتر با بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌ی ۶ میلی‌متر می‌تواند آزمایش شود. در واقع، روش اولیه‌ی به‌کار گرفته‌شده در این دستگاه انجام آزمایش در حالت ترک‌خوردگی هم‌زمان در هسته و فیلتر سد خاکی و بررسی توانایی ریزش و پُرشدن ترک خوردگی و نگهداشت خاک مینا توسط فیلتر است. پژوهشگران اشاره می‌کنند که ریزدانه‌های غیرخمیری تا ۱۵٪ نیز به اندازه‌ی کافی غیرجسبنده‌اند تا ترک‌خوردگی ایجادشده در فیلتر و هسته را پُر و مصالح مینا را محافظت کنند، اما در تحقیق آن‌ها اشاره‌ی بی‌کاهش نفوذپذیری فیلتر در اثر افزایش ریزدانه که ممکن است عملکرد آن‌را تحت الشعاع قرار دهد نشده است.<sup>[۳]</sup> در این دستگاه علاوه‌بر مشاهده‌ی چشمی، تغییرات فشار، نرخ جریان خروجی، میزان مصالح فرسایش‌یافته تا پُرشدن ترک‌خوردگی نیز اندازه‌گیری می‌شود. ضخامت لایه‌ی فیلتر

و هسته در بیشتر آزمایش‌ها ۷٫۵ سانتی‌متر است و نهایتاً یک لایه به ضخامت ۳ سانتی‌متر از شن نخودی به‌منظور پخش‌کردن جریان ورودی در ابتدا و انتهای نمونه قرار می‌گیرد.

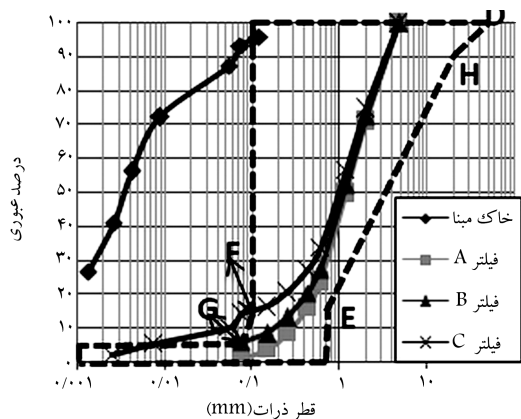
### ۵. آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش

در این پژوهش، ۳ نمونه‌ی فیلتر با افزودن درصد‌های وزنی مختلفی سنگ شکسته ساخته شد، به‌طوری‌که هر ۳ فیلتر معیارهای ارائه‌شده‌ی پژوهشگران را ارضاء می‌کنند.<sup>[۸]</sup> از هسته‌ی سد رودبال داراب در استان فارس به‌منزله‌ی خاک مینا استفاده شد. سد رودبال روی رودخانه‌ی رودبال در ۱۹ کیلومتری شمال غربی شهرستان داراب در استان فارس در دست احداث است. فیلتر A در واقع با حذف بخش ریزدانه (کوچک‌تر از ۰٫۰۷۵ میلی‌متر) ایجاد شده است و فیلترهای B و C به ترتیب با اضافه‌کردن ۵ و ۱۵٪ وزنی ریزدانه‌ی غیرخمیری به فیلتر اصلی ایجاد شده‌اند. نمودار دانه‌بندی فیلترها و خاک مینای مورد استفاده در این نوشتار در شکل ۷ نشان داده شده است. ناحیه‌ی خط‌چین مشخص شده در این شکل بیان‌گر دامنه‌ی دانه‌بندی براساس مشخصات USBR ۱۵ (۱۹۹۴) برای فیلترهای دانه‌ی است. نقاط مشخص شده روی شکل ۷ به این شرح هستند:

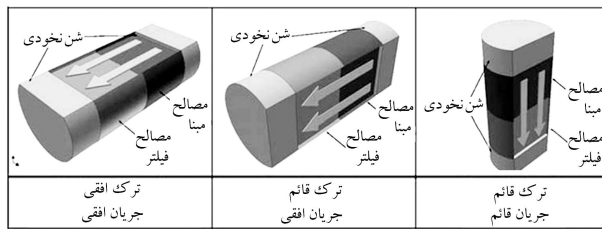
- نقطه‌ی D اندازه‌ی بیشینه‌ی ذرات فیلتر،



شکل ۶. دستگاه ساخته‌شده در این تحقیق.



شکل ۷. نمودار دانه‌بندی خاک مینا و فیلتر.



شکل ۱۰. جهت های ترک خوردگی و جریان.



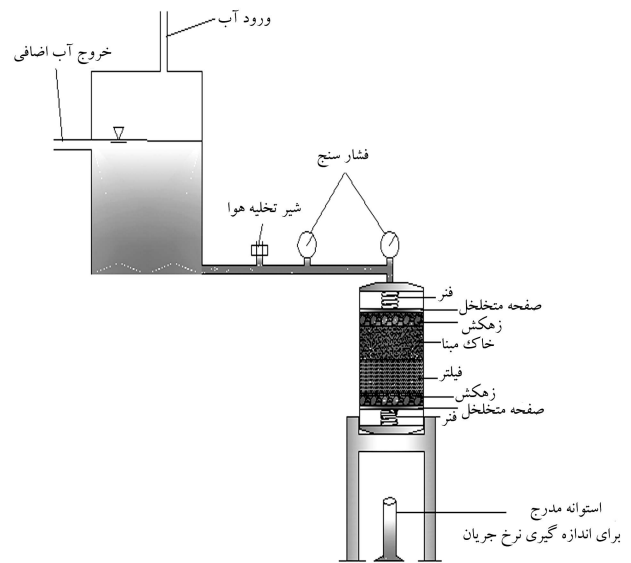
شکل ۱۱. حالت ترک خوردگی قائم و جریان افقی.

مغایرت عمده در نتایج، به منزله‌ی آزمایش صحیح قبول شد. از مزیت های این دستگاه می‌توان به تغییر جهات جریان و ترک اشاره کرد که در دستگاه های آزمون فیلتر ساخته شده‌ی قبلی این قابلیت وجود ندارد (شکل ۱۰). این تغییر جهات اثر مهمی روی نتایج آزمایش دارد. در واقع، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، جریان افقی از میان ترک خوردگی قائم شبیه‌ترین حالت در طبیعت را نشان می‌دهد. البته باید به این نکته نیز اشاره کرد که در این دستگاه شرایط مرزی آزمایش در حالت ترک قائم با جریان افقی باعث به دست آمدن نتایج بامعنی نمی‌شوند، زیرا حتی اگر فیلتر به خوبی عمل کند، در بالای نمونه هنگامی که فیلتر فرو می‌ریزد، حفره‌ی ایجاد می‌شود و آب از میان این فضا جریان می‌یابد. در حالی که در شرایط طبیعی، این حفره تا هنگامی که مصالح کافی و مناسب در ترازهای بالاتر ترک خوردگی وجود دارند و ترک را پر می‌کنند، انتظار نمی‌رود. بنابراین بیشتر آزمایش‌ها در حالت ترک خوردگی و جریان قائم انجام شد.

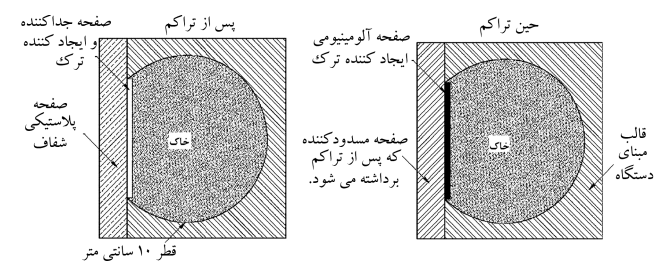
در حالت ترک افقی و جریان افقی (شکل ۱۰) به علت اینکه مصالح فیلتر تحت تأثیر نیروی ثقل قرار می‌گیرند، قابلیت ریزش و پُر کردن ترک خوردگی را ندارند، بنابراین حالتی پایدار که نشان‌دهنده‌ی عملکرد موفق فیلتر باشد به دست نمی‌آید، به بیان دیگر، حالت موفق فیلتر هنگامی است که فیلتر ریزش و ترک را مسدود کند و نتیجتاً جریان خروجی کاهش می‌یابد و به میزان ثابتی می‌رسد، همچنین از کدورت جریان خروجی کاسته و جریان شفاف می‌شود. در حالت ترک قائم و جریان افقی نیز همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، فضای خالی در بالای فیلتر ایجاد می‌شود و علی‌رغم ریزش فیلتر این فضای ایجاد شده، منجر به عملکرد ناموفق فیلتر می‌شود؛ البته در طبیعت به علت وجود سربار در بالای مصالح،

- نقطه‌ی E اندازه‌ی بیشینه‌ی  $D_{10F}$  (اندازه‌ی از فیلتر است که ۱۵ درصد دانه‌ها از آن کوچکترند) به منظور تأمین عملکرد نگهداشت فیلتر،
- نقطه‌ی F کمینه‌ی  $D_{10F}$  به منظور تأمین نفوذپذیری فیلتر،
- نقطه‌ی G بیشینه‌ی ۵ درصدی میزان ریزدانه‌ی فیلتر،
- نقطه‌ی H بیشینه‌ی  $D_{90F}$  (اندازه‌ی از فیلتر است که ۹۰ درصد دانه‌ها از آن کوچکترند) براساس ملاحظات جداسازی فیلتر.

در این نوشتار ترک خوردگی‌هایی به عرض ۱، ۱/۵ و ۲/۵ میلی‌متر تحت آزمایش قرار گرفت که اندکی از مقادیر استفاده شده توسط براندون و همکارانش [۶] بزرگ‌تر است. نمایی از دستگاه استفاده شده در این پژوهش (SCT) در شکل ۸ نشان داده شده است. درحقیقت همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، پس از قراردادن صفحه‌ی آلومینیومی و تراکم نمونه، با برداشتن این صفحه، ترک موردنظر با ضخامت دلخواه به دست می‌آید. پس از برداشتن صفحه‌ی آلومینیومی، یک صفحه‌ی شفاف به منظور مشاهده‌ی حرکت ذرات روی دستگاه قرار می‌گیرد و نهایتاً با سوار کردن گیج‌های فشار آزمایش آغاز می‌شود. دبی خروجی از طریق اندازه‌گیری میزان جریان خروجی به داخل استوانه‌ی مدرج در زمان‌های مختلف به دست می‌آید. همچنین میزان مصالح فرسایش یافته در زمان‌های مختلف از طریق جمع‌آوری جریان خروجی و خشک کردن آن و نهایتاً توزین با استفاده از یک ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۱ گرم به دست می‌آید. به منظور اطمینان از نتایج، هر آزمایش ۳ بار تکرار شده است و در صورت عدم



شکل ۸. نمایی از دستگاه SCT استفاده شده به همراه متعلقات اضافی.



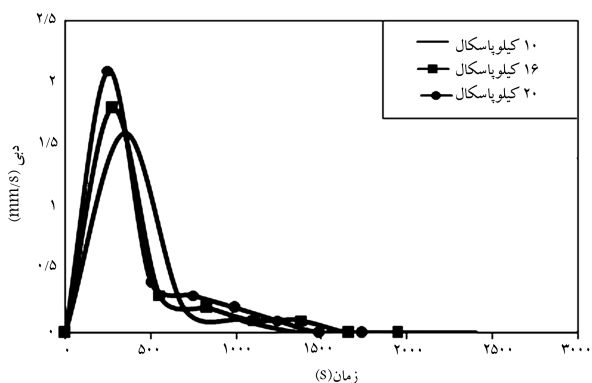
شکل ۹. مقطع عرضی دستگاه SCT در حالت‌های قبل و بعد از برداشتن صفحه‌ی آلومینیومی و شکل‌گیری ترک خوردگی.

این مجرا ایجاد نخواهد شد. بنابراین همان‌طور که اشاره شد، نتایج ذکر شده در اینجا مربوط به انجام آزمایش‌هایی است که ترک‌خوردگی و جهت جریان هر دو قائم هستند.

## ۶. بررسی اثرات تغییر فشار آب

به‌منظور بررسی اثرات تغییر فشار و گرادیان هیدرولیکی تا حد امکان سعی شد که فشارها در مقادیر کمی باشند تا حتی‌الامکان به حالت طبیعی نزدیک‌تر شوند. بنابراین فشارهای ۱۰، ۱۶ و ۲۰ کیلوپاسکال و فیلتر A یعنی فیلتر سنگدانه بدون اضافه‌کردن ریزدانه انتخاب شدند. فشار اولیه پس از بازکردن شیر کاهش یافت و با ریزش و پر شدن ترک‌خوردگی فشار به حدود اولیه بازگشت. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، با بازکردن شیر ورودی دبی جریان افزایش یافته است و به تدریج و با ریزش فیلتر جریان خروجی کاهش می‌یابد تا به میزان ثابتی برسد. دبی جریان خروجی از اندازه‌گیری میزان جریان خارج شده از دستگاه در ظرف مدرج، با اندازه‌گیری زمان به دست می‌آید. شکل ۱۳ نشان‌دهنده همین نمودار و در زمان بیشتر است. همچنین در شکل ۱۳ مشاهده شد که با افزایش فشار دبی اولیه افزایش و اما پس از زمان اندکی کاهش می‌یابد، و به مقدار ثابتی می‌رسد که نشان‌دهنده عملکرد موفق فیلتر است.

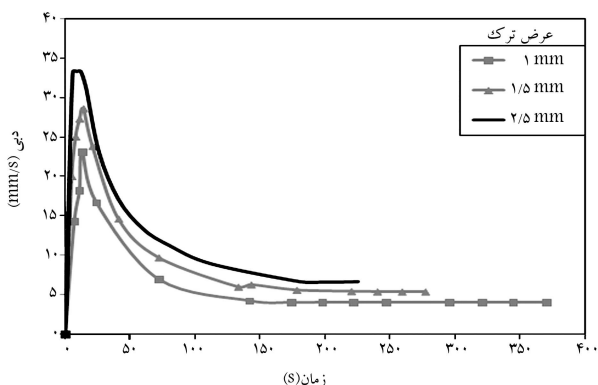
با بررسی میزان مصالح فرسایش یافته نیز مشخص شد که مصالح فرسایش یافته با افزایش فشار بیشتر می‌شوند و در مجموع نیز میزان مصالح فرسایش یافته برای فشارهای ۱۰، ۱۶ و ۲۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر با ۱٫۹، ۲٫۵ و ۳٫۱ گرم است که شکل ۱۴ بیان‌گر این مطلب است.



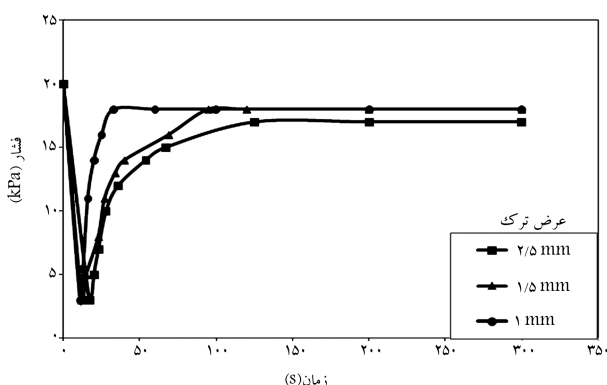
شکل ۱۴. مصالح فرسایش یافته در برابر زمان برای فشارهای مختلف.

## ۷. اثرات عرض ترک خوردگی

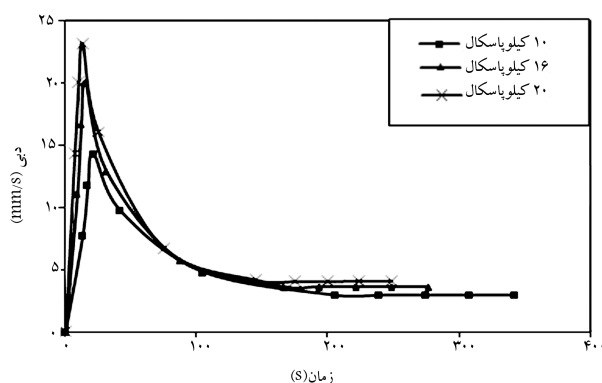
با هدف بررسی عرض ترک‌خوردگی، سه نوع صفحه با برجستگی‌هایی به ارتفاع ۱، ۱٫۵ و ۲٫۵ میلی‌متر ساخته شد. در این سری از آزمایش‌ها فشار برابر با ۲۰ کیلوپاسکال و بنابراین گرادیان هیدرولیکی ۲۷ خواهد بود و فیلتر از نوع A یعنی سنگدانه‌ی بدون ریزدانه است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش ترک‌خوردگی میزان دبی خروجی اولیه افزایش یافته است، اما نهایتاً به میزان ثابتی می‌رسد که در این حالت نیز هرچه عرض ترک بیشتر باشد، میزان دبی خروجی اندکی افزایش می‌یابد. در شکل ۱۶ نمودار تغییرات فشار در برابر زمان از شروع



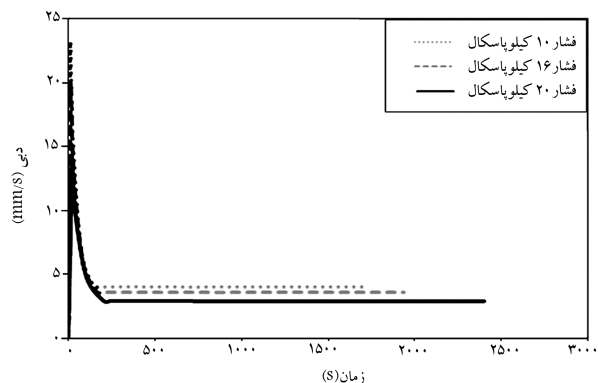
شکل ۱۵. نمودار دبی در برابر زمان برای عرض‌های ترک‌خوردگی مختلف.



شکل ۱۶. نمودار فشار در برابر زمان برای عرض‌های ترک‌خوردگی مختلف برای گیبج در مسیر جریان.

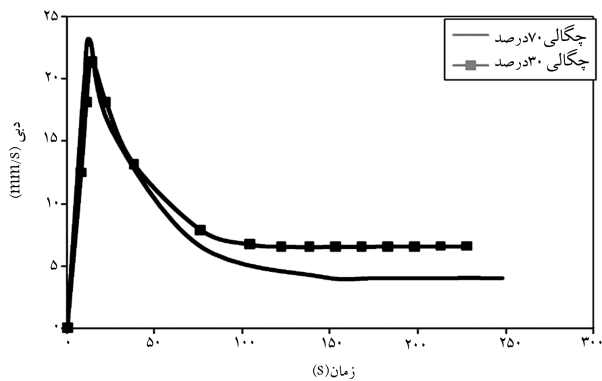


شکل ۱۲. تغییرات دبی در برابر زمان برای فشارهای مختلف در زمان کوتاه.

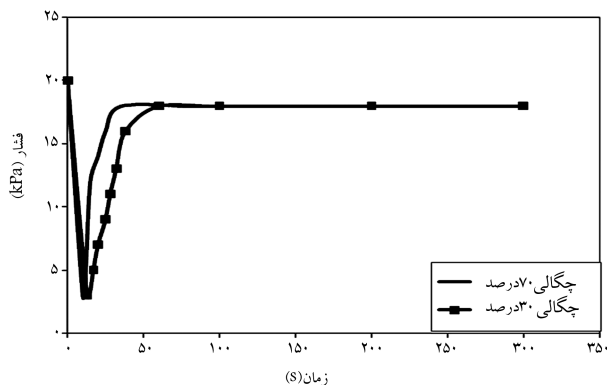


شکل ۱۳. تغییرات دبی در برابر زمان برای فشارهای مختلف در زمان طولانی.

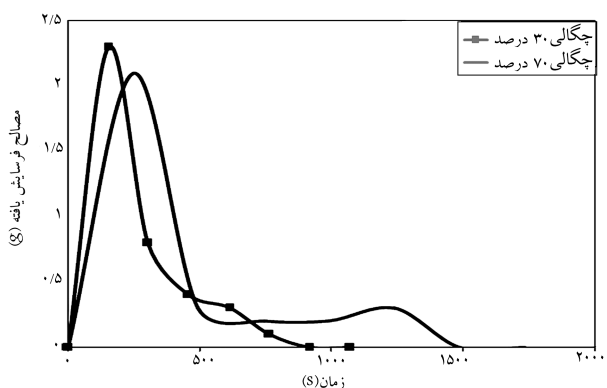




شکل ۱۸. منحنی دبی در برابر زمان برای چگالی‌های نسبی مختلف.



شکل ۱۹. منحنی فشار در برابر زمان در چگالی‌های مختلف.



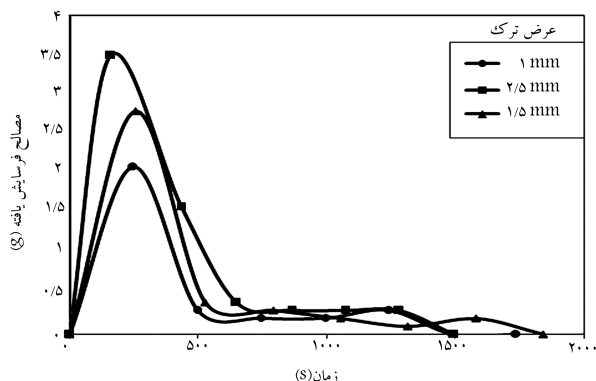
شکل ۲۰. منحنی میزان مصالح فرسایش یافته در برابر زمان در چگالی‌های مختلف.

به ۳٫۹ گرم می‌رسد، که این مطلب ناشی از افزایش فرسایش پذیری مصالح به علت کاهش چگالی نسبی است.

## ۹. اثرات ریزدانه‌ی فیلتر

سه گروه فیلتر A، B و C که به ترتیب حاوی ۰، ۵ و ۱۵٪ ریزدانه هستند و به مشخصات دانه‌بندی آن‌ها اشاره شد (شکل ۷)، انتخاب شدند. این ریزدانه‌ها غیرخمیری بودند. شکل ۲۱، بیان‌گر آزمایش‌های انجام شده روی فیلتر با ریزدانه‌های مختلف است.

چنان که دیده می‌شود، با افزایش میزان ریزدانه نرخ جریان خروجی کاهش و دبی اولیه اندکی کاهش می‌یابد، که این موضوع به علت کاهش خلل و فرج فیلتر



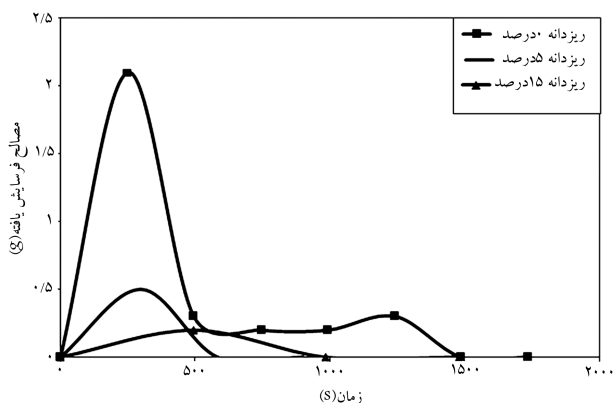
شکل ۱۷. منحنی میزان مصالح فرسایش یافته در برابر زمان برای عرض‌های ترک خوردگی مختلف.

آزمایش نشان داده شده است. در شکل ۱۶ مشخص است زمانی که طول می‌کشد تا فشار به مقدار اولیه برسد (حدود ۲۰ کیلو پاسکال) با افزایش عرض ترک خوردگی افزایش می‌یابد که این مطلب ناشی از به تأخیر افتادن زمان ایجاد لایه‌ی خودفیلتر در منطقه‌ی میان هسته و فیلتر با افزایش ترک اندکی است. همچنین از شکل ۱۶ برداشت می‌شود که در عرض ترک ۲٫۵ میلی‌متری فشار به حدود ۱۷ کیلو پاسکال می‌رسد در حالی که در عرض‌های ترک خوردگی ۱ و ۱٫۵ میلی‌متر فشار نهایی ۱۸ کیلو پاسکال است. شکل ۱۷ منحنی میزان مصالح فرسایش یافته در برابر زمان را نشان می‌دهد؛ با افزایش عرض ترک خوردگی میزان مصالح فرسایش یافته نیز افزایش می‌یابد، به این صورت که در عرض‌های ترک ۱، ۱٫۵ و ۲٫۵ میلی‌متری به ترتیب میزان مصالح فرسایش یافته تا انتهای آزمایش برابر با ۳٫۱، ۴ و ۶٫۴ گرم بوده است. ولی در هر صورت در هر سه حالت عرض ترک خوردگی، نرخ جریان خروجی کاهش یافته است و جریان نیز شفاف می‌شود که نشان دهنده‌ی عملکرد موفق فیلتر در ریزش و پُر کردن ترک خوردگی است.

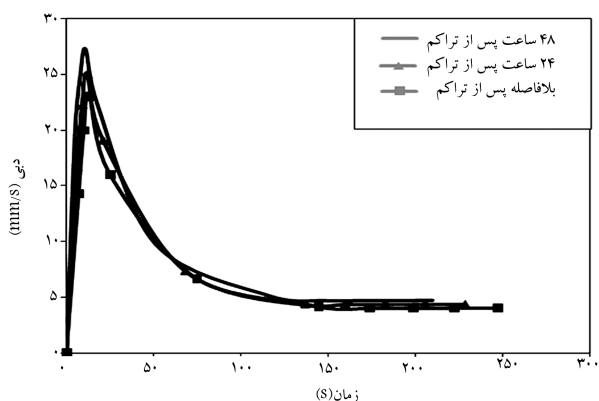
## ۸. اثرات چگالی نسبی

به منظور بررسی اثرات چگالی نسبی فیلتر در رفتار ریزشی آن، دو گروه فیلتر با چگالی‌های نسبی ۳۰ و ۷۰٪ در نظر گرفته شد. فیلتر انتخاب شده نوع A بود، این تذکر لازم است که آزمایش‌های بررسی عرض ترک و تغییر فشار نیز در چگالی‌های نسبی ۷۰٪ انجام شده است. همچنین به منظور اطمینان از آزمایش‌ها، هر آزمایش ۳ بار تکرار شد و در صورت وجود عدم مغایرت عمده به منزله‌ی آزمایش مورد قبول در نظر گرفته شده است. شکل ۱۸، نشان دهنده‌ی منحنی دبی در برابر زمان برای چگالی‌های نسبی مورد آزمایش است. در شکل ۱۸ دیده شد که با کاهش چگالی نسبی، میزان دبی خروجی تا ثابت شدن نرخ جریان افزایش می‌یابد، اگرچه در این حالت نیز فیلتر ریزش می‌کند و جلوی ترک خوردگی را می‌گیرد. شکل ۱۹، نشان‌گر تغییرات فشار در برابر زمان برای چگالی‌های مورد نظر است. دیده می‌شود که هرچه چگالی نسبی کمتر باشد، زمان برگشت گیبج فشار به مقدار اولیه افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر با افزایش چگالی نسبی زمان شکل‌گیری لایه‌ی خودفیلتر کاهش می‌یابد که این مطلب به علت کاهش خلل و فرج مصالح فیلتر در چگالی نسبی بالاست.

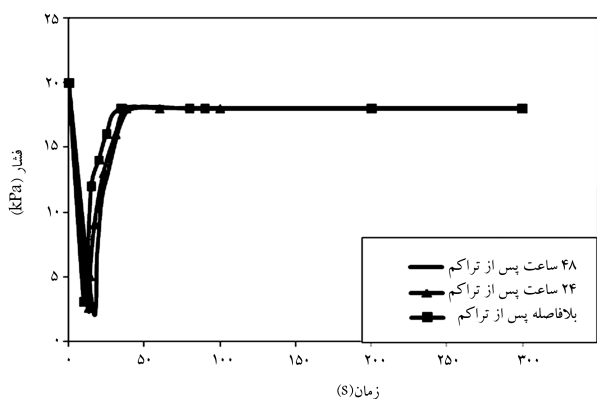
همچنین چنان که در شکل ۲۰ دیده می‌شود، با کاهش چگالی نسبی میزان مصالح فرسایش یافته افزایش می‌یابد به طوری که کل مصالح فرسایش یافته از ۳ گرم



شکل ۲۳. منحنی مصالح فرسایش یافته در برابر زمان برای درصدهای ریزدانه‌ی مختلف.



شکل ۲۴. منحنی دبی در برابر زمان برای زمان‌های مختلف تراکم.



شکل ۲۵. منحنی فشار در برابر زمان برای زمان‌های مختلف تراکم.

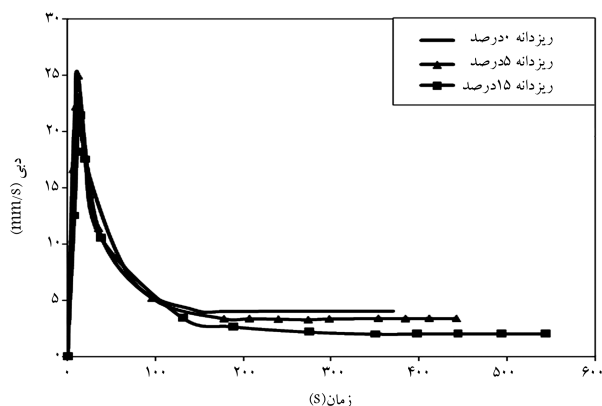
برابر می‌رسد، اما باز هم هرچه زمان گذشته از تراکم بیشتر می‌شود، دبی نهایی اندکی افزایش می‌یابد. در شکل ۲۵ دیده می‌شود که با افزایش زمان تراکم، زمان برگشت گیب فشار به حالت فشار اولیه نیز اندکی افزایش می‌یابد، در شکل ۲۶، این مطلب در زمانی کوتاه به نمایش گذاشته شده است. شکل ۲۷ که نشان دهنده‌ی میزان مصالح فرسایش یافته با گذشت زمان است، بیانگر کاهش میزان مصالح فرسایش یافته با افزایش زمان تراکم است. شکل ۲۸، بیانگر میزان مصالح فرسایش یافته‌ی کل در زمان‌های مختلف تراکم است، روشن است که با افزایش زمان تراکم از میزان مصالح فرسایش یافته‌ی کل کاسته می‌شود.

در اثر افزایش ریزدانه است. شکل ۲۲، منحنی تغییرات فشار در برابر زمان را نشان می‌دهد. در این شکل به وضوح دیده می‌شود که افزایش ریزدانه تأثیر چندانی بر تغییرات فشار ندارد و هر سه فیلتر انتخاب شده به خوبی عملکرد ریزش و پُر کردن ترک را انجام داده‌اند. اما این در حالی است که افزایش ریزدانه باعث کاهش نفوذپذیری فیلتر می‌شود، به طوری که ممکن است این مطلب منجر به افزایش فشار آب حفره‌ی و نهایتاً منجر به پدیده‌ی پایینگ شود. به هر حال به نظر می‌رسد که میزان ریزدانه‌ی پیشنهادی توسط آئین‌نامه‌ها که ۵٪ است، برای عملکرد فیلتر در هر شرایطی مناسب است.

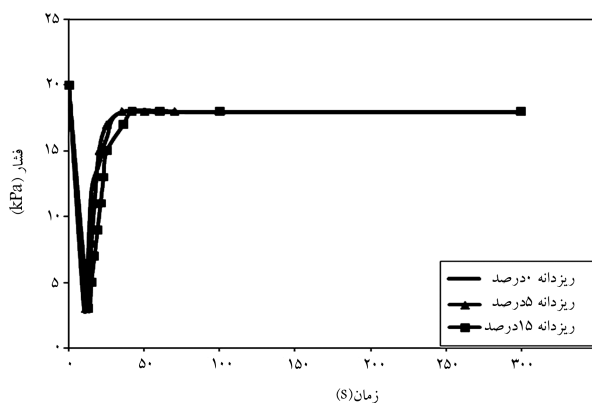
شکل ۲۳، نشان دهنده‌ی تغییرات میزان مصالح فرسایش یافته با گذشت زمان است، همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش میزان ریزدانه از میزان مصالح کاهش یافته تا حد زیادی کاسته می‌شود.

## ۱۰. بررسی اثر مدت زمان گذشته از تراکم نمونه

برای بررسی اثرات مدت زمان گذشته از تراکم، نمونه‌ها در حالت‌های بلافاصله پس از تراکم، ۲۴ ساعت پس از تراکم و ۴۸ ساعت پس از تراکم در نظر گرفته شد. به بیان دیگر، عملیات آماده‌سازی نمونه انجام گرفته و صفحه‌ی تراکم برداشته می‌شود، اما صفحه‌ی پلاستیکی روی نمونه قرار نمی‌گیرد و نمونه در معرض هوای طبیعی آزمایشگاه قرار می‌گیرد. فیلتر انتخاب شده نوع A بود. همان‌طور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان گذشته از تراکم، دبی اولیه اندکی افزایش پیدا می‌کند، اما پس از ریزش فیلتر و پُر شدن ترک، نرخ دبی خروجی به مقداری تقریباً

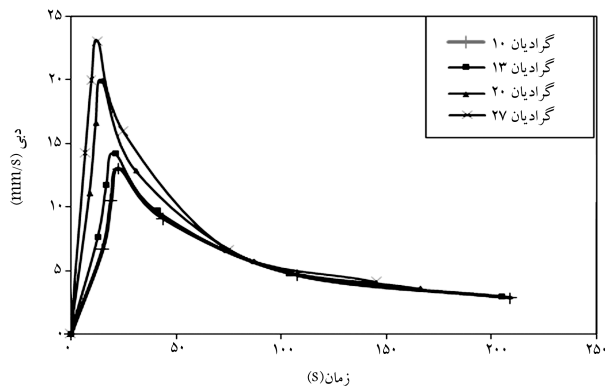


شکل ۲۶. منحنی دبی در برابر زمان برای درصدهای ریزدانه‌ی مختلف.

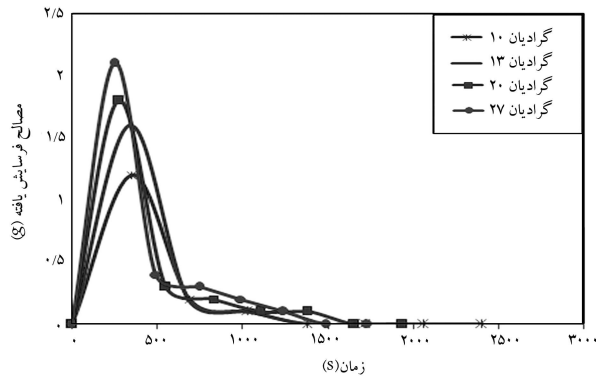


شکل ۲۷. منحنی فشار در برابر زمان برای درصدهای ریزدانه‌ی مختلف.





شکل ۲۵. منحنی دبی در برابر زمان برای گرادیان‌های هیدرولیکی مختلف.



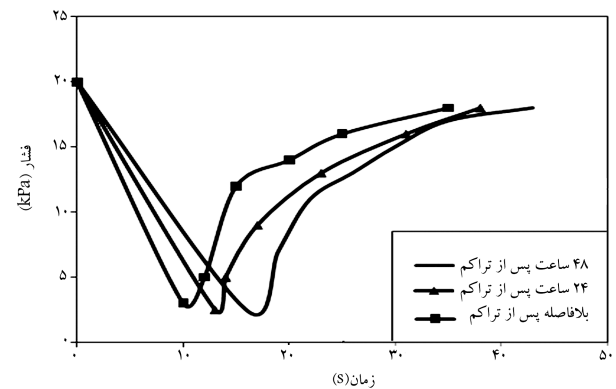
شکل ۳۰. منحنی مصالح فرسایش‌یافته در برابر زمان برای گرادیان‌های هیدرولیکی مختلف.

مشاهده می‌شود که با افزایش گرادیان هیدرولیکی از ۱۰ به ۲۷، دبی اولیه افزایش می‌یابد اما پس از زمان اندکی کاهش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی عملکرد موفق فیلتر است.

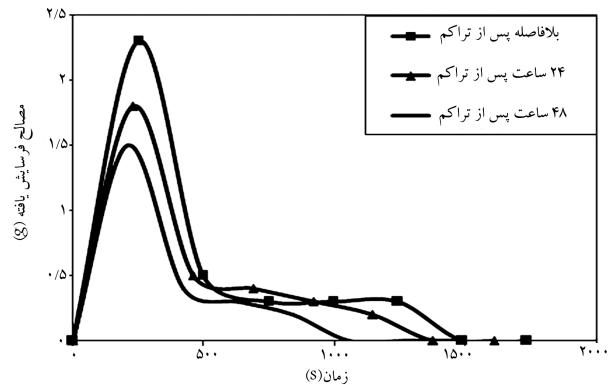
با بررسی میزان مصالح فرسایش‌یافته (شکل ۳۰) نیز مشخص شد مصالح فرسایش‌یافته با افزایش گرادیان هیدرولیکی رابطه‌ی مستقیم دارد و بیشتر می‌شود و در مجموع نیز میزان مصالح فرسایش‌یافته برای گرادیان‌های هیدرولیکی ۱۰، ۱۳، ۲۰ و ۲۷ به ترتیب برابر با ۱٫۷۵، ۱٫۹، ۲٫۵ و ۳٫۱ گرم است. به هر حال به نظر می‌رسد با افزایش گرادیان هیدرولیکی ذرات راحت‌تر از جای خود حرکت می‌کنند و میزان مصالح فرسایش‌یافته بیشتر می‌شود و زمان رسیدن به حالت پایدار در فیلتر اندکی به تأخیر می‌افتد، اما به هر حال فیلتر ریزش می‌کند و نرخ جریان خروجی به میزان ثابتی می‌رسد که این امر نشان‌دهنده‌ی عملکرد موفق فیلتر است.

## ۱۲. نتیجه‌گیری

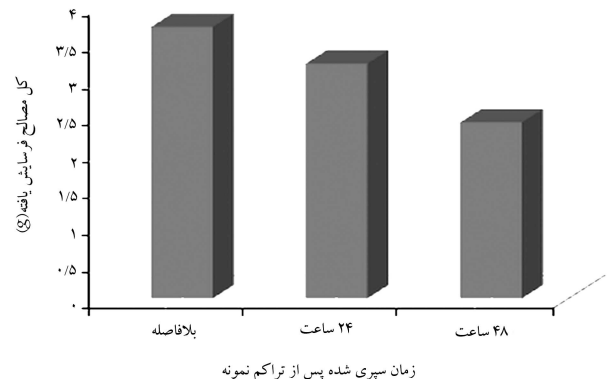
با هدف بررسی اثرات ترک خوردگی هم‌زمان هسته و فیلتر در سدهای خاکی، دستگاه ساخته‌شده توسط براندون و همکاران<sup>[۳]</sup> اصلاح و ساخته شد. دستگاه معرفی‌شده در این نوشتار که در حقیقت ترکیبی از دستگاه‌های ارائه‌شده‌ی آزمون فیلتر است، آزمایش شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار اولیه، دبی خروجی افزایش می‌یابد، همچنین میزان مصالح فرسایش‌یافته نیز با افزایش فشار رابطه‌ی مستقیم دارد. در عرض‌های ترک مختلف، رفتار ریزشی فیلتر به این ترتیب خواهد بود که با افزایش عرض ترک، میزان دبی خروجی و مصالح فرسایش‌یافته افزایش می‌یابند و



شکل ۲۶. منحنی فشار در برابر زمان در مدت کوتاه برای زمان‌های مختلف تراکم.



شکل ۲۷. منحنی میزان مصالح فرسایش‌یافته در برابر زمان برای زمان‌های مختلف تراکم.



شکل ۲۸. منحنی میزان مصالح فرسایش‌یافته کل برای زمان‌های مختلف تراکم.

## ۱۱. بررسی اثر تغییر گرادیان هیدرولیکی

به منظور بررسی اثر گرادیان هیدرولیکی، تا حد امکان سعی شد که فشارها در مقادیر کمی باشد، تا شرایط به حالت طبیعی نزدیک‌تر شود. بنابراین، فشارهای ۱۰، ۱۶ و ۲۰ کیلو پاسکال که معادل گرادیان‌های هیدرولیکی ۱۰، ۱۳، ۲۰ و ۲۷ است و فیلتر A یعنی سنگدانه بدون اضافه‌کردن ریزدانه انتخاب شدند، به منظور رسیدن به گرادیان‌های هیدرولیکی پایین‌تر علاوه بر کاهش فشار ورودی، ضخامت هسته از ۷٫۵ به ۱۰ سانتی‌متر افزایش داده شد تا گرادیان هیدرولیکی معادل ۱۰ به دست آید. همان‌طور که در شکل ۲۹ مشاهده می‌شود، با بازکردن شیر ورودی دبی جریان افزایش و به تدریج و با ریزش فیلتر جریان خروجی کاهش می‌یابد تا به میزان ثابتی برسد، همچنین

کاهش می‌یابد. با افزایش مدت زمان سپری شده از تراکم، زمان برگشت گنج فشار به حالت اولیه و یا به عبارت دیگر ایجاد حالت پایدار در فیلتر، در زمان بیشتری صورت می‌گیرد، همچنین با افزایش زمان تراکم میزان مصالح فرسایش یافته کاهش می‌یابد. با افزایش گرادیان هیدرولیکی دبی اولیه افزایش می‌یابد، اما پس از زمان اندکی کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی عملکرد موفق فیلتر است. مصالح فرسایش یافته با افزایش گرادیان هیدرولیکی رابطه‌ی مستقیم دارد.

برگشت گنج فشار به مقدار اولیه با زیاد شدن عرض ترک، طولانی‌تر می‌شود. همچنین هرچه چگالی نسبی فیلتر کاهش یابد، زمان رسیدن به حالت پایدار در فیلتر افزایش پیدا می‌کند، به این ترتیب که با کاهش چگالی نسبی میزان دبی خروجی افزایش یافته و زمان برگشت گنج به حالت اولیه افزایش می‌یابد و مصالح فرسایش یافته نیز افزایش پیدا می‌کند. با افزایش ریزدانه‌ی فیلتر در صورتی که ریزدانه‌ها غیرخمیری باشند تا ۱۵٪ هم فیلتر رفتار ریزی خود را به خوبی ایفا می‌کند، اما نفوذپذیری آن

### پانویس

1. Balder Head
2. Teton
3. Baldwin Hills
4. Fontenelle
5. Nanak Sagar
6. permeameter filter tests
7. flume filter tests
8. no erosion filter
9. Pin hole
10. continuous erosion filter
11. particle size distribution (PSD)
12. nephelometric turbidity units
13. sand castle test
14. angle of repose
15. U.S. department of the interior bureau of reclamation
16. simultaneous cracking test

فیلترهای موفق و ناموفق، چهارمین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران (اردیبهشت ۱۳۸۷).

۷. یثربی، شهاب‌الدین؛ اردکانی، علیرضا و یثربی، حنیف، ضرورت بررسی آزمایشگاهی کارایی فیلتر سدهای خاکی با توجه به معیارهای موجود، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران (اردیبهشت ۱۳۸۷).

8. Foster, M. and Fell, R. "Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(5), pp. 398-407 (2001).

9. Sherard, J.L. and Dunnigan, L.P. "Filters and leakage control in embankment dams," *Proceedings, Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments*, Vole, R.L. and Kelly, W.E., Eds., ASCE, pp. 1-30 (1985).

10. Hillis, S.F. and Truscott, E.G. "Magat dams: Design of internal filters and drains", *Canadian Geotechnic Journal*, **20**(3), pp. 491-501 (1983).

11. Biswas, S., *Study of Cohesive Soil Granular Filter Interaction Incorporating Critical Hydraulic Gradient and Clogging*, Master of Science Thesis, University Of Wollongong, Australia (2005).

12. Townsend, F.C.; Shiau, J.M. and Pietrus, T.J. "Piping susceptibility and filter criteria for sands", *Engineering Aspects of Soil Erosion, Dispersive Clays and Loess Geotechnical Special Publication.*, **10**, Lovell, C.W. and Wiltshires, R.L., ASCE, NY, pp. 46-66 (1987).

13. U.S. Army Corps of Engineering, *General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams*, Washington, DC, EM 1110-2-2300, (30 July 2004).

14. Vaughan, P.R. "Design of filters for the protection of cracked dam cores against internal erosion", *ASCE Convention & Exposition*, Chicago, pp. 16-20 (October 1978).

15. Park, Y., *Investigation of the Ability of Filters to Stop Erosion through Cracks in Dams*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University (2004).

### منابع (References)

1. Indraratna, B. "Design methods for granular filters critical review", *Proceed Civil Engineering Geotechnic*, **137**, pp.137-147 (1999).
2. Hsu, S.J.C. "Aspects of piping resistance to seepage in clayey soils", *Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, A.A. Balkema Publishers*, **1**, pp. 421-428 (1981).
3. Brandon, T.; Park, Y. and Duncan, J.M. "New apparatus for evaluating filter performance for dams containing cracks", *Geotechnical Testing Journal*, **30**(1), pp.1-12 (2006).
4. Sherard, J.L. and Dunnigan, L.P. "Critical filters for impervious soils", *Journal Geotechnic Engineering*, **115**(7), pp.546-566 (1989).
۵. معمار، میثم و زمردیان، سیدمحمد علی، بررسی پارامترهای موثر در طراحی فیلتر سدهای خاکی، هشتمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه شیراز (اردیبهشت ۱۳۸۸).
۶. اردکانی، علیرضا؛ یثربی، حنیف و یثربی، شهاب‌الدین، بررسی تأثیر میزان ریزدانه‌ی موجود در فیلتر بر عملکرد سیستم خاک فیلتر در حالت‌های

۱۶. جمالی مقدم؛ محمد و زمردیان، سیدمحمد علی، بررسی پارامترهای موثر بر توانایی فیلترها در متوقف کردن فرسایش از میان ترک خوردگی هم‌زمان در هسته و فیلتر سدهای خاکی، کنفرانس سراسری آب‌خیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان (آذر ۱۳۸۸).

