

بررسی آزمایشگاهی تأثیر میزان مواد ریزدانه موجود در مصالح فیلتر بر عملکرد سیستم خاک - فیلتر

علیرضا اردکانی^۱، سید شهاب الدین یثربی^{۲*}

پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۵

دریافت مقاله: ۸۸/۱۱/۷

چکیده

فیلتر بحرانی در سدهای خاکی، نقش حفاظت از خاک هسته را در برابر فرسایش دارد. انتخاب مشخصات فیلتر مناسب برای پروژه که هم نیاز طرح را پاسخ دهد و هم به لحاظ اقتصادی جوابگو باشد، مسائل فنی و اقتصادی مهمی را پیش روی مهندسان قرار داده است. از آنجا که روش های آزمایشگاهی می توانند ویژگی های متعددی از سیستم خاک-فیلتر را تحت پوشش قرار دهند، به عنوان روش هایی مطمئن برای بررسی عملکرد فیلتر می باشند. آزمایش فیلتر مانع فرسایش (NEF) یکی از کامل ترین و جامع ترین روش ها برای کنترل فیلتر مورد استفاده در سدهای خاکی است. اغلب معیارهای طراحی فیلتر و بسیاری از تحقیقات انجام شده برای بررسی منحنی دانه بندی فیلتر، صرفاً به بررسی اثر پارامتر D_{15} فیلتر پرداخته اند و کمتر به بررسی ذرات ریزتر از D_{15} فیلتر و ریزدانه عبوری از الک #۲۰۰ پرداخته شده است. در این تحقیق ۲۴ آزمایش NEF بر روی دو گروه فیلتر، که هر گروه دارای فیلترهایی با منحنی دانه بندی یکسان در ذرات بزرگتر از D_{15} و دانه بندی مختلف در ذرات کوچک تر از D_{15} می باشند، انجام شده است. نتایج آزمایش ها نشان می دهد بر خلاف معیارهای موجود، میزان مواد ریزدانه و ذرات کوچک تر از D_{15} موجود در فیلتر، می تواند تأثیر قابل ملاحظه ای بر بهبود یا تضعیف عملکرد فیلتر در توقف فرسایش داشته باشد.

کلید واژه ها: سد خاکی، فیلتر، آزمایش NEF، ذرات کوچک تر از D_{15} ، ریزدانه

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

* مسئول مکاتبات

مقدمه

رگاب و فرسایش داخلی از مهم‌ترین عوامل خرابی در سدهای خاکی بزرگ می‌باشند به طوری که تقریباً دو درصد سدهای خاکی با ارتفاع بیش از ۱۵ متر این پدیده را تجربه کرده‌اند (Fell et al., 2003). از آنجایی که وظیفه فیلتر، محافظت سد خاکی در برابر فرسایش می‌باشد، اساسی‌ترین بخش سد بعد از هسته، قلمداد می‌شود.

بنابراین با توجه به اهمیت نقش فیلتر در ایمنی سدهای خاکی و همچنین ملاحظات اقتصادی ناشی از هزینه‌های مراحل تولید فیلتر در حجم وسیع برای یک سد، طراحی فیلتر مناسب مدت‌هاست که ذهن پژوهشگران و موسسات مختلف را به خود معطوف کرده است. شروع مطالعات فیلتر از دهه ۱۹۲۰ می‌باشد، که ترزاقی معیار معروف اندازه‌ها را برای فیلتر ارائه داد (Sherard et al., 1984).

مطالعات فیلتر در دو گروه عمده مطالعات عددی و آزمایشگاهی ادامه پیدا کرده است. از آنجا که روش‌های آزمایشگاهی می‌توانند عوامل متعددی از سیستم خاک-فیلتر را تحت پوشش قرار دهند و با توجه به پیچیدگی‌های مربوط به مدل‌سازی عددی به ویژه در مورد خاک‌های چسبنده، این روش‌ها مناسب‌ترین روش برای بررسی عملکرد فیلتر می‌باشند (یثربی و آزاد، ۲۰۰۴ و ۱۳۸۶). نحوه مطالعات آزمایشگاهی بسیاری از محققین به این صورت بوده که فیلتر و خاک مبنا را درون یک سلول قرار می‌دادند، و به بررسی عملکرد فیلتر تحت تراوش می‌پرداختند. با توجه به لزوم در نظر گرفتن ترک‌خوردگی هسته در عملکرد فیلتر، مطالعات فیلتر در دهه ۱۹۸۰ توسط شرارد و همکاران دچار تحولات اساسی گردید. به طوری که از آن زمان مفهوم فیلتر بحرانی، که لازم است از فرسایش خاک مبنای ترک خورده، تحت جریان شدید ناشی از جریان متمرکز جلوگیری کند، گسترش یافت (Sherard & Dunnigan, 1989). به طوری که از آن زمان شیار یا سوراخ برای مدل کردن ترک خوردگی هسته، در نظر

گرفته شد و به دنبال آن آزمایش فیلتر مانع فرسایش (No Erosion Filter Test, NEF) توسط آن محققین ارائه گردید. برخلاف سایر آزمایش‌های مطرح در مورد سدهای خاکی، آزمایش فیلتر مانع فرسایش در مراجعی همچون ASTM و غیره ذکر نشده و روش واحد و استاندارد، برای انجام آن در دسترس نیست. اما این آزمایش مورد تأیید موسسات بزرگی همچون کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) و اداره داخلی آبادانی ایالات متحده (USBR) قرار گرفت (سروش و طباطبایی، ۱۳۸۵). این موسسات همواره برای اطمینان از صحت عملکرد فیلتر، استفاده از این آزمایش را توصیه می‌نمایند.

آزمایش فیلتر مانع فرسایش NEF

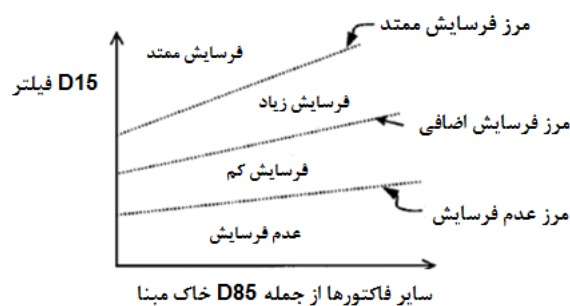
Sherard et al. (1984) در پایان مطالعات جامع خود پیرامون فیلترها، آزمایش فیلتر مانع فرسایش یا NEF را ارائه کردند. این آزمایش علاوه بر تکرار پذیری، توانایی خوبی در ارزیابی عملکرد دارد. این آزمایش به صورت کامل در مقاله Sherard and Dunnigan (1989) منعکس شده است. نمای کلی و ابعاد دستگاه آزمایش در شکل ۱ آمده است. دستگاه از یک استوانه پلاستیکی به عنوان سلول اصلی تشکیل شده که دارای دو سرپوش بالایی و پایینی است و شیرهای ورود و خروج آب و هوا نیز بر روی آنها تعبیه شده است. در داخل سلول به ترتیب از پایین زه‌کش شنی، فیلتر مورد آزمایش که تحت سرباری معادل ۱۰ کیلوگرم ارتعاش همزمان به تراکم نسبی حدود ۱۰۰-۸۰ درصد رسیده، خاک هسته که در شرایط نزدیک به رطوبت بهینه و دانسیته ماکزیمم تراکم شده و در نهایت لایه زه‌کش شنی قرار می‌گیرد. شرایط بحرانی یا ترک در هسته با یک سوراخ به قطر ۱ میلی‌متر برای خاک ریزدانه و ۵ تا ۱۰ میلی‌متر برای خاک درشت‌دانه مدل می‌شود.

است. بنابراین فیلتری موفق است که قطر سوراخ موجود در هسته آن تقریباً بدون تغییر باقی بماند (Sherard and Dunnigan, 1989).

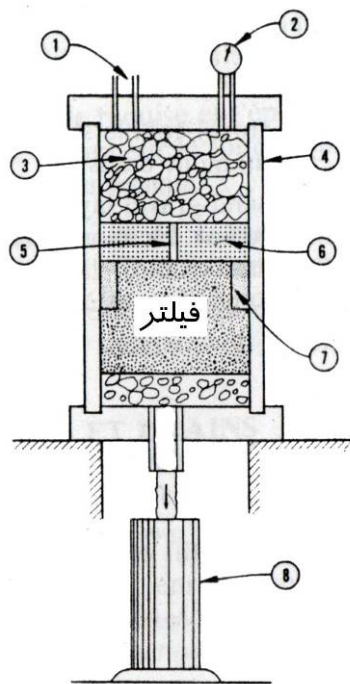
معیارهای طراحی فیلتر

با توجه به اهمیت موضوع، محققین زیادی تلاش کرده‌اند تا معیارهای مناسبی را در انتخاب فیلتر پیشنهاد دهند. جدول ۱ تعدادی از این معیارها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، اکثر معیارهای ارائه شده وابسته به D_{15} فیلتر می‌باشد و گاهی این معیارها با هم تفاوت زیادی دارند.

Foster and Fell (2001) در تحقیقات خود با این مسئله مواجه شدند که «چرا با وجود عدم رضایت از مشخصات فیلتر برخی از سدها با آزمایش NEF، آن سدها دچار مشکل نشده‌اند». آنها آزمایش NEF را به عنوان بهترین آزمایش برای پیدا کردن مرز مانع فرسایش پذیرفتند، ولی پس از انجام آنالیزهای آماری، مرزهای دیگری را نیز برای فرسایش بیان کردند. این مرزها به طور شماتیک در شکل ۲ نمایش داده شده است. بر این اساس با توجه به اندازه D_{15} فیلتر و برخی از مشخصات خاک مینا (مانند D_{85}) یک فیلتر می‌تواند باعث «عدم فرسایش»، «فرسایش کم»، «فرسایش زیاد» و یا «فرسایش ممتد» خاک مینا می‌گردد.



شکل ۲- نمایش شماتیک نواحی و مرزهای فرسایش (Foster & Fell, 2001)



۱. ورودی آب با فشار
 ۲. فشارسنج
 ۳. زهکش بالایی
 ۴. استوانه پلاستیکی (قطر ۱۰۰ میلی‌متر برای خاک‌های ریزدانه و قطر ۲۸۰ میلی‌متر برای خاک‌های درشت‌دانه)
 ۵. سوراخ ایجاد شده در خاک مینا (۱ میلی‌متر برای خاک ریزدانه و ۱۰-۵ میلی‌متر برای خاک درشت‌دانه)
 ۶. خاک مینا (به ضخامت ۲۵ میلی‌متر برای خاک‌های ریزدانه و ۱۰۰ میلی‌متر برای خاک‌های درشت‌دانه)
 ۷. مصالح جداری
 ۸. ظرف جمع‌آوری آب برای تعیین دبی خروجی
- شکل ۱- دستگاه آزمایش NEF (یثربی و آزاد، ۱۳۸۶)

پس از اشباع کردن نمونه و خروج هوای موجود، با ورود آب با فشاری معین آزمایش شروع شده و حدود ۱۰ دقیقه طول می‌کشد و در پی آن میزان تغییرات قطر سوراخ و تغییرات دبی و شفافیت آب خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین خروجی این آزمایش تغییرات قطر سوراخ می‌باشد، به طوری که هر چه افزایش قطر سوراخ کمتر باشد، حاکی از این است که فیلتر در کنترل فرسایش عملکرد بهتری داشته

جدول ۱- خلاصه‌ای از معیارهای محققین مختلف برای طراحی فیلتر (Lone et al., 2005)

ملاحظات	C _{uf}	D ₁₅	D ₅₀ / d ₅₀	D ₁₅ / d ₈₅	D ₁₅ / d ₁₅	سال	محقق
منحنی دانه بندی فیلتر و خاک مینا موازی باشد	<۲	...	...	<۴	>۴	۱۹۲۹	Terzaghi
برای خاک مینای دارای بیش از ۸۵٪ عبوری از الک #۲۰۰ هستند.	...	...	...	≤۹	...	۱۹۸۵	Sherard et al
برای خاک مینای دارای ۴۰٪ تا ۸۵٪ عبوری از الک #۲۰۰ هستند.		<۰.۷mm					
برای خاک مینای دارای کمتر از ۱۵٪ عبوری از الک #۲۰۰ هستند.				≤۴			
برای خاک مینای دارای ۴۰٪ تا ۸۵٪ عبوری از الک #۲۰۰ هستند. (A درصد عبوری از الک #۲۰۰)							
D ₁₅ /d ₅₀ <5 و D ₅ /d ₅₀ <4	≤۶		...	...	...	۱۹۸۵	Kenney et al
مقدار ریزدانه عبوری از الک #۲۰۰ کمتر از ۵ درصد باشد.	<۱۰		...	<۵	>۵	۱۹۸۷	USBR
مقدار نفوذپذیری فیلتر بیش از ۲۵ برابر خاک مینا باشد.							
خاک مینا دارای نسبت $d_{95}/d_{75} \leq 7$ باشد.	...		...	۵/۵ تا ۰/۵	...	۱۹۸۹	Honjo and Veneziano
برای $d_{85}=40-60\mu m$	...		...	<۵ - ۵/۵	...	۱۹۹۶	Inderaratna et al
برای $d_{85}=60-90\mu m$	...		...	<۴-۵	...		
برای خاک مینای دارای بیش از ۸۵٪ عبوری از الک #۲۰۰ هستند. برای سایر خاک‌های مینا مشابه Sherard اما طبقه بندی خاک مینا قدری متفاوت است.	...		...	≤۹	...	۲۰۰۰	Foster and Fell

C_{uf}: ضریب یکنواختی فیلترD_x: اندازه‌ای که X درصد وزنی دانه‌های فیلتر از آن کوچک‌تر هستند.C_{ub}: ضریب یکنواختی خاک میناd_x: اندازه‌ای که X درصد وزنی دانه‌های خاک مینا از آن کوچک‌تر هستند.

معیارهای نفوذپذیری، درصد ریزدانه و چسبندگی فیلتر

شرط فیلتر مناسب، علاوه بر جلوگیری از فرسایش خاک مینا، داشتن نفوذپذیری کافی می‌باشد تا مانع بالارفتن نیروهای تراوش و فشار آب شود. برخی از معیارهای محققین مختلف در این باره توسط نسبت D₁₅ فیلتر به D₁₅ خاک مینا در جدول ۱ ارائه شد. ICOLD در بولتن ۹۵، در مورد معیار نفوذپذیری فیلتر بیان می‌کند که خاک فیلتر نفوذپذیری و ظرفیت تخلیه کافی جریان را داشته باشد یعنی جریان تراوشی که از خاک مجاور فیلتر (خاک مینا) وارد فیلتر می‌شود، باید بدون تجمع براحتی تخلیه گردد. بدین منظور بیان می‌کند که لازم است نفوذپذیری مصالح فیلتر بیش از ۱۰۰ برابر نفوذپذیری خاک مینا باشد. همچنین اداره کشاورزی ایالات

متحده (USDA) برای نفوذپذیری فیلتر، معیارهای زیر را داشته است:

$$\frac{D_{15Filter}}{D_{15Base}} \geq 4 \quad (1)$$

$$D_{15Filter} \geq 0.1mm \quad (2)$$

همچنین در این معیار برای کنترل نفوذپذیری و جلوگیری از استعداد ترک خوردگی فیلتر، مواد ریزدانه موجود در آن را به ۵ درصد محدود می‌نماید. باتوجه به این معیار تأثیر میزان مواد ریزدانه بر عملکرد فرسایش آن کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

برای کنترل اینکه فیلتر چسبنده نشده باشد و قابلیت حفظ ترک را نداشته باشد از آزمایش «قلعه ماسه‌ای» که توسط

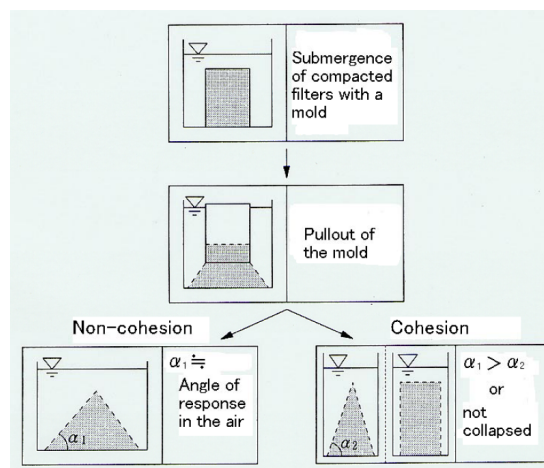
کنترل پایداری داخلی

علاوه بر معیارهایی که برای کنترل فرسایش و نفوذپذیری فیلتر وجود دارد، لازم است مصالح فیلتر در مورد پایداری داخلی کنترل شود.

تعداد محدودی روش برای بررسی کنترل پایداری بودن داخلی پیشنهاد شده است که در میان آنها روش Kenney and Lau (1985) جزو جامع‌ترین آنها است. علت برتری این روش آن است که برای دامنه وسیعی از خاک‌های دانه‌ای ارائه شده و تقریباً در نوع خود بی‌رقیب است و بر همین اساس توسط کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) به عنوان روشی مطمئن پیشنهاد شده است.

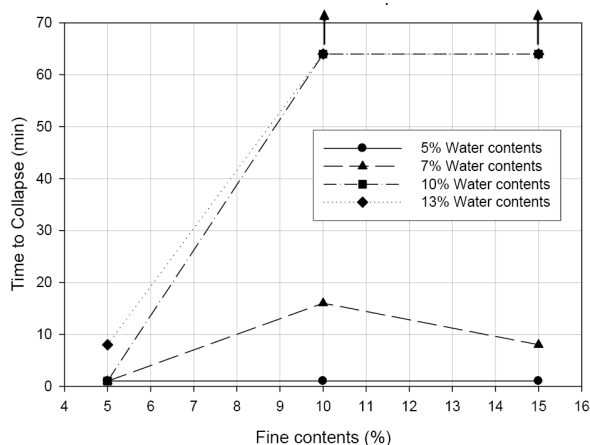
این روش با توجه به منحنی دانه‌بندی (D-F)، منحنی دیگری (H-F) که منحنی شکل خوانده می‌شود، را تولید می‌کند (شکل ۵). F، درصد عبوری متناظر با هر اندازه D، در منحنی دانه‌بندی می‌باشد و براساس آن پارامتر H، که درصدی از دانه‌ها که در محدوده اندازه D و 4D قرار دارد، تعیین می‌گردد. اگر منحنی شکل تولید شده، در زیر خط معیار H=F واقع شود، در ناحیه پایدار خواهد بود و در غیر این صورت ناپایدار داخلی است. البته محدوده کنترلی برای خاک‌های مختلف متفاوت است. برای این منظور کنی و لو دو دسته خاک را معرفی کرده اند. گروه اول خاک‌های NG (Narrowly Graded) که به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که دارای ضریب یکنواختی کمتر از ۳ هستند و گروه دوم دارای ضریب یکنواختی بیشتر از ۳ بوده و (Widely Graded) خوانده می‌شوند. برای تشخیص پایداری و یا ناپایداری داخلی در خاک‌های دانه‌ای، محدوده صفر تا سی درصد H، برای خاک‌های NG و صفر تا بیست درصد H؛ و برای خاک‌های WG معیار کنترل می‌باشد. یعنی بسته به نوع خاک در محدوده تعیین شده از H، مقایسه میان منحنی شکل و خط H=F مشخص کننده پایداری است.

(Vaughn and Soares 1982) ارائه شد می‌توان بهره گرفت. ICOLD این آزمایش را برای بررسی چسبندگی و خاصیت خود ترمیمی فیلتر توصیه کرده است.



شکل ۳- آزمایش قلعه ماسه‌ای (Sakamoto et al, 2002)

این آزمایش توسط Park (2003) به طور گسترده‌ای انجام شده است. وی نتایج آزمایش قلعه‌ماسه‌ای را تابع سه عامل چسبندگی ریزدانه، میزان مواد ریزدانه و میزان آب تراکمی می‌داند. وی نشان داد که نمونه‌های با مواد ریزدانه بدون خاصیت خمیری و تا ۱۵ درصد مواد ریزدانه فوراً ریزش می‌کنند و یا به عبارتی غیرچسبنده هستند. وی همچنین نتایج آزمایش‌ها بر روی فیلتر با خاصیت خمیری بالا (PI=40) را مطابق شکل ۴ ارائه نمود.



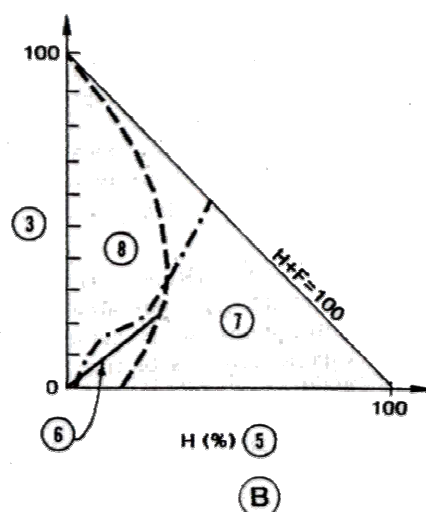
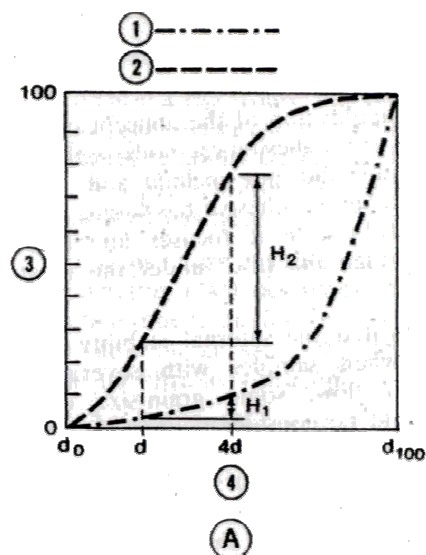
شکل ۴- نتایج آزمایش‌های بر روی مواد ریزدانه با خاصیت

خمیری بالا؛ انجام شده توسط پارک (۲۰۰۳)

شده، به ۱۰ دسته مصالح یکنواخت بین الک‌های "۳/۸، #۴، #۸، #۱۰، #۱۶، #۲۰، #۴۰، #۶۰، #۸۰، #۱۰۰ و #۲۰۰" توسط الک کردن و شستشو جدا شده است. سپس با ترکیب آنها با توجه به درصد وزنی مشخص، منحنی دانه‌بندی فیلتر مورد استفاده، تولید شده است. همچنین برای ریزدانه مورد استفاده در فیلترها از گرد سیلیس استفاده شده است. به دلیل اینکه اولاً خاک غیر خمیری بوده (آزمایش‌های قلعه ماسه‌ای انجام شده به وسیله Park (2003) نشان دادند که فیلترها دارای تا ۱۵ درصد ریزدانه غیر خمیری، دارای استعداد ترک خوردگی نمی‌باشند) ثانیاً اینکه رنگ گرد سیلیس قابل تمایز از رنگ خاک مینا می‌باشد. بنابراین برای بررسی عامل کدورت آب خروجی آزمایش NEF (شسته شدن فیلتر یا خاک مینا) مناسب می‌باشد.

(Lone et al. (2005) و همچنین یشیری و آزاد (۱۳۸۶) با بررسی معیارهای مختلف، نوعی عدم هماهنگی میان معیارهای موجود و نتایج برخی از آزمایش‌ها را نشان دادند. بنابراین دانه‌بندی فیلترهای مورد استفاده با توجه به نتایج چند آزمایش NEF اولیه، بر روی خاک مینا تعیین شده است. به طوری که در این تحقیق از ۲ گروه فیلتر استفاده شده است.

گروه اول شامل فیلترهای A1، A2 و A3 است، که دارای D_{15} برابر 0.75 میلی‌متر می‌باشند و به ترتیب دارای ۰، ۵ و ۱۰ درصد عبوری از الک #۲۰۰ می‌باشد و منحنی دانه‌بندی آنها در شکل ۵ نمایش داده شده است. این گروه از فیلترها نماینده فیلترهای موفق می‌باشند. گروه دوم فیلترهای B1، B2، B3، B4 و B5 که دارای D_{15} برابر 0.36 میلی‌متر می‌باشند و نماینده فیلترهای ناموفق می‌باشند که منحنی دانه‌بندی آنها در شکل ۷ نمایش داده شده است. خلاصه مشخصات دانه‌بندی و نفوذپذیری فیلترهای مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ و شکل ۸ مشخصات و منحنی دانه‌بندی خاک مینا ارائه شده است.



A: منحنی دانه‌بندی، B: منحنی شکل، I: فیلتر شماره ۱، ناپایدار داخلی، ۲: فیلتر شماره ۲، پایدار داخلی، ۳: درصد وزنی ریزتر، ۴: اندازه دانه‌ها (d)، ۵: H ، ۶: مرز $H=F$ ، ۷: پایدار، ۸: ناپایدار

شکل ۵ - طریقه رسم و تشخیص پایداری داخلی

(Kenney & Lou, 1985)

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

در این تحقیق از محل منابع قرضه یک سد خاکی در حال احداث، خاک مینا انتخاب شده است. سپس آزمایش‌های مقدماتی شناسایی نظیر دانه‌بندی، هیدرومتری، حدود اتربرگ، تراکم استاندارد بر روی آنها انجام گرفت.

برای مصالح فیلتر، از ماسه شکسته استفاده شده است. برای اطمینان از دقت دانه‌بندی مورد استفاده، ابتدا مصالح تهیه

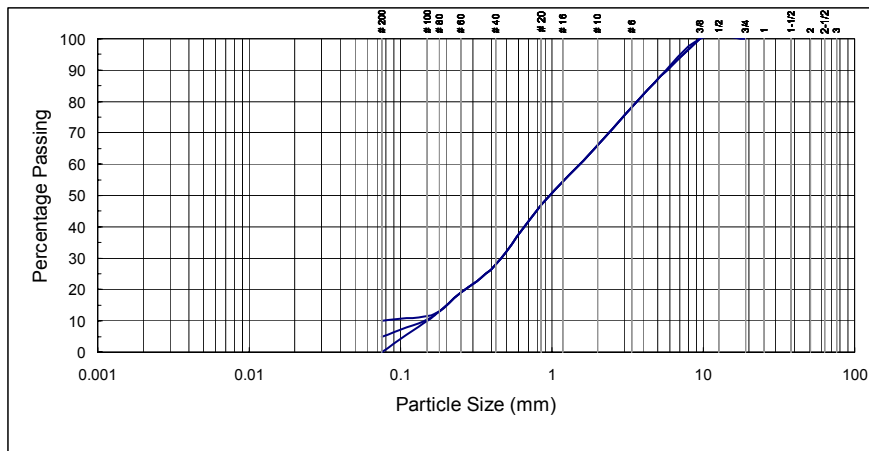
جدول ۲ - مشخصات فیلترهای مورد استفاده در آزمایشها NEF

نام	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₅ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₅ (mm)	F _c (%)	K (cm/s)
A1	۱/۵۳	۰/۴۶	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۱۱	۰	۰/۰۱۳
A2	۱/۵۳	۰/۴۶	۰/۲۰	۰/۱۴	۰/۰۷۵	۵	۰/۰۰۵
A3	۱/۵۳	۰/۴۶	۰/۲۰	۰/۰۷۵	۰/۰۲	۱۰	۸e-۵
B1	۲/۰۹	۰/۶۸	۰/۳۷	۰/۳۰	۰/۲۵	۰	۰/۰۴۸
B2	۲/۰۹	۰/۶۸	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۲۰	۰	۰/۰۳۵
B3	۲/۰۹	۰/۶۸	۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۱۹	۰	۰/۰۳۳
B4	۲/۰۹	۰/۶۸	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۰۷۵	۵	۰/۰۲۴
B5	۲/۰۹	۰/۶۸	۰/۳۳	۰/۰۷۵	۰/۰۲	۱۰	۰/۰۳۴

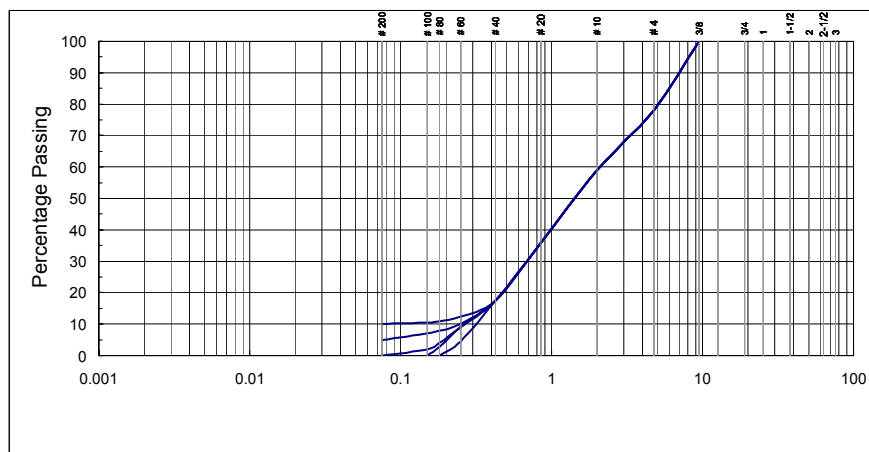
D₆₀ - D₃₀ - D₁₅ - D₁₀ D₅: قطر نظیر ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درصد عبوری

F_c: درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰# در منحنی دانه‌بندی

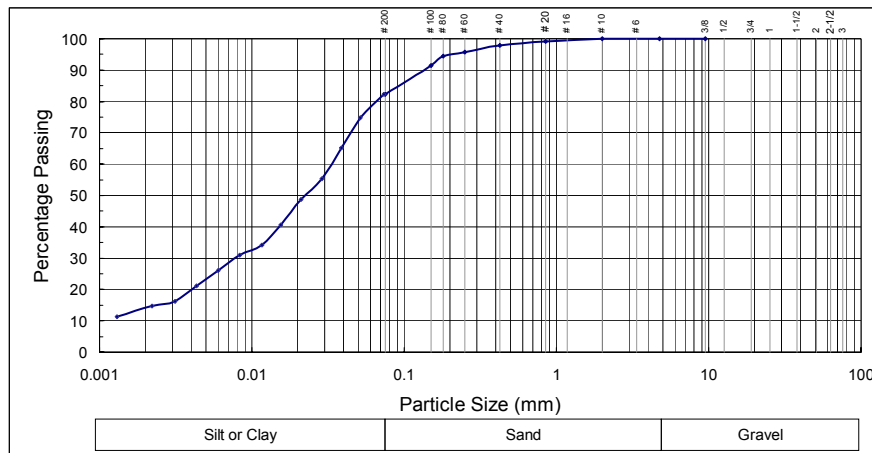
K: نفوذپذیری



شکل ۶- نمودارهای دانه‌بندی فیلترهای A1، A2، و A3



شکل ۷- نمودارهای دانه‌بندی فیلترهای B1، B2، B3، B4، و B5



شکل ۸- نمودار دانه‌بندی خاک مینا مورد استفاده

جدول ۳ - مشخصات خاک مینا در آزمایشات NEF

رنگ	F _c (%)	درصد رس	درصد سیلت	D ₉₅ (μm)	D ₈₅ (μm)
قهوه‌ای مایل به سرخ	82	15	67	210	90
$\gamma_{d,max}$ (gr/cm ³)	ω_{opt} (%)	LL (%)	PI (%)	K (cm/s)	
1.85	20	23	NPI	4E-7	

LL : Liquid Limit

PL : Plastic Limit

PI : Plastic Index

$\gamma_{d,max}$: دانسیته ماکزیمم خشک

ω_{opt} : درصد رطوبت بهینه

و پایین، در مقطع خاک مینا نیز بررسی شده است. بدین ترتیب بررسی میزان فرسایش و گشادشدگی به مراتب دقیق‌تر بررسی شده است.



شکل ۹- استفاده از واشر کاغذی و خمیر بنتونیت به منظور

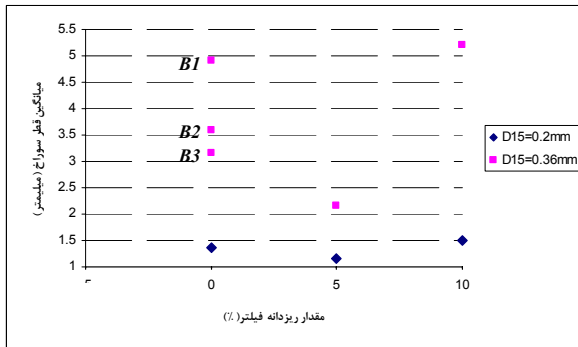
جلوگیری از اثر جدارهای

آزمایش فیلتر مانع فرسایش بر روی فیلترهای گروه A و B انجام شد. همچنین برای اطمینان از صحت و تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر آزمایش ۲ تا ۳ مرتبه تکرار شده است. آزمون‌های NEF مشابه روش Sherard and Dunnigan (1989) انجام شده است ولی در جزئیات تفاوت‌هایی به شرح ذیل وجود دارد:

- به جای مصالح جدارهای که شرارد و همکاران در آزمایش‌های خود استفاده می‌کردند، مطابق شکل ۹ از واشر کاغذی و خمیر بنتونیت استفاده شده است. زیرا در صورت استفاده از مصالح جدارهای احتمال مخلوط شدن آن با مصالح فیلتر وجود دارد و ممکن است، باعث تغییر عملکرد شود.

- برای بررسی دقیق‌تر تغییرات قطر سوراخ، بعد از انجام آزمایش، موم به داخل نمونه تزریق شده است و بعد از شکستن نمونه مطابق شکل ۱۰، تغییرات سوراخ علاوه بر بالا

در جدول ۴ وضعیت کدورت آب خروجی در دقایق مختلف نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۳ نمودارهای میانگین قطر سوراخ در خاک مینا در برابر مقدار مواد ریزدانه موجود در فیلتر، برای هر دو دسته فیلتر مورد استفاده، ترسیم شده است.



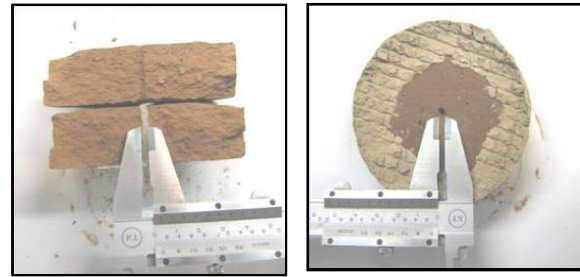
شکل ۱۳- میانگین قطر سوراخ در برابر مقدار مواد ریزدانه فیلتر

بررسی پایداری داخلی فیلتر

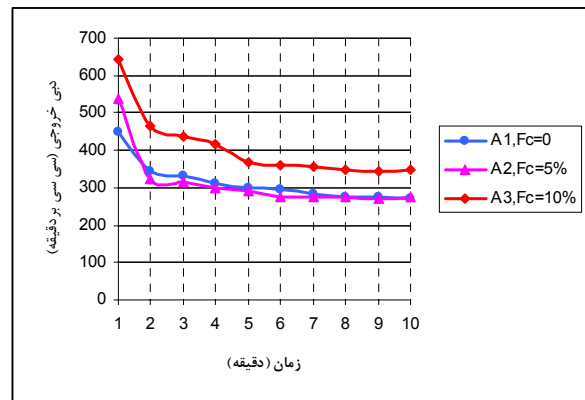
با توجه به قسمت ۵، پایداری داخلی فیلترها، به روش شرح داده شده بررسی شد و منحنی شکل، برای فیلترهای آزمایش شده در شکل ۱۴ رسم شده است. با توجه به اینکه ضریب یکنواختی (C_u) کلیه فیلترهای مورد استفاده، بزرگتر از ۳ می باشد، لازم است منحنی شکل فیلترهای رسم شده، در ناحیه صفر تا بیست درصد H ، بررسی شود. بر این اساس طبق شکل ۱۴ مشاهده می شود که تمامی منحنی های شکل به جز منحنی مربوط به فیلتر B5، در زیر خط معیار ($H=F$) قرار گرفته است و می توان مطمئن بود که این پارامتر در نتایج آزمایش ها (به جز آزمایش های مربوط به B5) دخیل نمی باشد.

جدول ۴- وضعیت کدورت آب خروجی در دقایق مختلف آزمایش

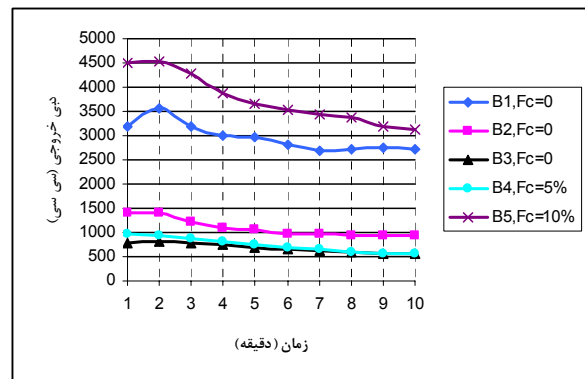
نام فیلتر	مقدار ریزدانه (%)	محدوده زمانی کاملاً کدر (min)	محدوده زمانی نسبتاً کدر (min)	محدوده زمانی نسبتاً شفاف (min)	محدوده زمانی شفاف (min)
A1	۰	۱-۰	۳-۱	۵-۳	۱۱-۵
A2	۵	۱-۰	۴-۱	۸-۴	۱۱-۸
A3	۱۰	۲-۰	۵-۲	۱۱-۵	-
B1	۰	۱-۰	۲-۱	۳-۲	۱۱-۳
B2	۰	۱-۰	۲-۱	۳-۲	۱۱-۳
B3	۰	۱-۰	۲-۱	۳-۲	۱۱-۳
B4	۵	۳-۰	۷-۳	۱۱-۷	-
B5	۱۰	۱-۰	۳-۱	۱۱-۳	-



شکل ۱۰- بررسی گشاد شدگی قطر سوراخ در پلان و مقطع



شکل ۱۱- تغییرات دبی در طول آزمایش در فیلترهای سری A



شکل ۱۲- تغییرات دبی در طول آزمایش در فیلترهای سری B

تحلیل نتایج

با توجه به مقدمات ذکر شده، هدف اصلی این تحقیق روشن شدن تأثیرات میزان ریزدانه و ذرات کوچکتر از D_{15} موجود در فیلتر بر نتایج آزمایش NEF و عملکرد سیستم خاک-فیلتر می‌باشد. برای بررسی این عامل با توجه به ترکیبات مختلف منحنی دانه‌بندی تأثیرات این پارامتر بررسی شده است.

تأثیر منحنی دانه‌بندی فیلتر بر میزان فرسایش

بررسی تأثیر منحنی دانه‌بندی فیلتر بر نتایج آزمایش‌های NEF در دو بخش می‌تواند مورد بررسی قرارگیرد. بخش اول تغییرات کلی دانه‌بندی فیلتر است که از بررسی فیلترهای سری A با فیلترهای سری B نتیجه می‌شود. تغییرات کلی دانه‌بندی منحنی فیلتر (صرف‌نظر از مسئله پایداری داخلی) می‌تواند باعث تغییر در مقدار و اندازه حفرات موجود در فیلتر گردد و لذا این عامل به طور کاملاً مستقیم با میزان فرسایش خاک مبنا در ارتباط است. در نتیجه هرچه منحنی دانه‌بندی فیلتر درشت‌تر باشد، میزان حفرات منفذی آن بزرگ‌تر و در نتیجه میزان فرسایش در آن بیشتر است. به‌طوری‌که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، میزان فرسایش در فیلترهای سری B به مراتب بیشتر از فیلترهای سری A می‌باشد. اما در بسیاری از تحقیقات انجام شده برای بررسی منحنی دانه‌بندی فیلتر و یا حفرات منفذی فیلتر، صرفاً به بررسی اثر پارامتر D_{15} فیلتر پرداخته شده است و کمتر به بررسی ذرات ریزتر از D_{15} فیلتر و ریزدانه عبوری از الک #۲۰۰ پرداخته شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده است، درصد ریزدانه و ذرات کوچکتر از D_{15} فیلتر می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد و راندمان فیلتر داشته باشد. با توجه به این شکل در حالتی که مقدار ریزدانه فیلتر در حدود ۵ درصد می‌باشد، فیلتر بهترین عملکرد را دارد. اما با توجه به اندازه D_{15} فیلتر، شدت این تغییر عملکرد، متفاوت است. یعنی در حالتی که D_{15} فیلتر برابر $0/2$ میلی‌متر می‌باشد، شدت این تغییرات نسبت به حالتی که مقدار D_{15} فیلتر برابر $0/36$ میلی‌متر

می‌باشد، به مراتب کمتر است. بنابراین بر خلاف بسیاری از معیارهای طراحی که تنها D_{15} فیلتر را مدنظر قرار داده‌اند، ذرات کوچکتر از D_{15} مانند مقادیر D_5 و D_{10} ، می‌توانند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان فرسایش داشته باشند.

همچنین با توجه به شکل ۱۳، تا مقدار ریزدانه ۵ درصد، هر چه کوچک‌ترین اندازه فیلتر و ذرات ریزتر از D_{15} فیلتر، ریزتر باشد، فیلتر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. هنگامی که مقدار ریزدانه، در فیلتر دارای D_{15} برابر $0/36$ میلی‌متر، به ۱۰ درصد افزایش پیدا می‌کند، افزایش ناگهانی در میزان فرسایش رخ می‌دهد. این افزایش ناگهانی در میزان فرسایش ناشی از ناپایداری داخلی فیلتر می‌باشد. به طوری که در بخش ۷ مشاهده شد که فیلتر B5 بر طبق روش Kenney and Lau (1985) ناپایدار داخلی می‌باشد.

همچنین با توجه به اینکه هر آزمایش ۲ تا ۳ مرتبه تکرار شده است، مشاهده شد که آزمایش NEF از نظر تغییرات قطر سوراخ، که مهم‌ترین خروجی آزمایش است، تکرارپذیری خوبی دارد.

تأثیر منحنی دانه‌بندی فیلتر بر میزان دبی و کدورت آب

خروجی

تأثیر ریزدانه و ذرات کوچکتر از D_{15} بر میزان دبی و کدورت آب خروجی آزمایش NEF در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و جدول ۴ نمایش داده شده است. از آنجایی که مهم‌ترین خروجی آزمایش، تعیین افزایش قطر سوراخ یا توانایی فیلتر در جلوگیری از فرسایش می‌باشد، سایر خروجی‌ها مانند کدورت آب یا میزان دبی در زمان‌های مختلف به صورت عوامل کنترلی هستند. به طوری‌که میزان دبی خروجی به عواملی همچون میزان فرسایش یا افزایش قطر سوراخ، نفوذپذیری اولیه و تغییرات نفوذپذیری فیلتر در طی آزمایش وابسته است. بنابراین تغییرات دبی خروجی نیز نشان دهنده رفتار سیستم خاک-فیلتر می‌باشد.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد مهم‌ترین عامل در میزان دبی آب خروجی، میزان قطر سوراخ (میزان فرسایش) می‌باشد. به طوری‌که طبق شکل ۱۲ در فیلتر B5 (دارای ۱۰ درصد

است. با توجه به اینکه دانه بندی فیلتر بر روی حفرات موجود در فیلتر و مقدار نفوذپذیری آن تأثیرگذار است، به طور کلی می توان گفت که هر چه نفوذپذیری فیلتر کمتر باشد، فیلتر عملکرد بهتری در برابر کنترل فرسایش دارد. البته همان طور که قبلاً گفته شد، لازم است به حداقل نفوذپذیری فیلتر توجه شود. در مورد اثر مقدار ریزدانه بر نفوذپذیری فیلتر مشاهده می شود که در فیلترهای سری A، افزایش درصد ریزدانه باعث کاهش شدید نفوذپذیری در فیلتر شده است. در فیلتر سری B افزایش ریزدانه در ابتدا باعث کاهش نفوذپذیری (البته با شدت بسیار کمتر نسبت به فیلتر سری A) شده است ولی افزایش مقدار ریزدانه از ۵ درصد به ۱۰ درصد، باعث افزایش نفوذپذیری فیلتر شده است. بنابراین مقدار ریزدانه موجود در فیلتر می تواند اثر قابل ملاحظه ای بر نفوذپذیری آن داشته باشد. در مورد تأثیر مقدار ریزدانه در نفوذپذیری فیلترهای B1 تا B4 مشاهده می شود که هر چه ذرات ریزتر از D₁₅ کوچکتر باشد، مقدار نفوذپذیری کاهش می یابد. بنابراین بر مبنای مقایسه شکل ۱۳ و جدول ۲ هر چه مقدار نفوذپذیری کاهش پیدا کند، میزان فرسایش خاک مینا (قطر سوراخ) در آزمایش NEF کمتر می شود. در فیلتر B5 وجود ۱۰ درصد ریزدانه باعث ایجاد ناپایداری داخلی آن شده است و در نتیجه میزان فرسایش افزایش یافته است. به طوری که طبق شکل ۱۴ مشاهده شد، فیلتر B5 طبق روش Kenney and Lau (1985) ناپایدار داخلی می باشد. منحنی دانه بندی این فیلتر در ذرات بزرگتر از D₁₅ مشابه فیلترهای B1 الی B4 می باشد، بنابراین نتیجه می شود، افزایش ریزدانه علت ناپایداری داخلی فیلتر B5 است. این موضوع علاوه بر آزمایش های NEF، در آزمایش نفوذپذیری نیز مشاهده می شود به طوری که طبق مقایسه مقادیر نفوذپذیری فیلترهای B4 و B5، افزایش ریزدانه از ۵ درصد به ۱۰ درصد، باعث افزایش نفوذپذیری فیلتر شده است، که حاکی از ناپایداری داخلی فیلتر B5 می باشد.

بررسی معیارهای طراحی فیلتر

فیلترهای سری A و B دارای D₁₅ به ترتیب برابر ۰/۲۰ و ۰/۳۶ میلی متر می باشد و مقدار $D_{15Filter} / D_{85Base}$ سری A

ریزدانه) بیشترین مقدار فرسایش (قطر سوراخ) و بیشترین میزان دبی خروجی به طور همزمان رخ داده است. لازم به توضیح است که تکرارپذیری آزمایش NEF در مورد میزان دبی خروجی ایده آل نمی باشد که با توجه به طبیعت ناهمگن خاک و ایجاد جریان های بحرانی، این موضوع طبیعی می باشد. بنابراین در کلیه نمودارهای ارائه شده، از میانگین نتایج استفاده شده است.

تغییر کدورت و زمان شفاف شدن آب خروجی، به میزان فرسایش خاک مینا و شسته شدن ریزدانه موجود در فیلتر وابسته است. همچنین تغییرات کدورت آب خروجی در طول آزمایش نشان دهنده نرخ فرسایش در طول آزمایش می باشد. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، از آنجایی که در کلیه آزمایش ها کدورت آب خروجی در دقایق ابتدایی آزمایش بسیار بیشتر از سایر دقایق می باشد، بیشترین مقدار فرسایش در لحظات ابتدایی آزمایش رخ داده است. همچنین در این آزمایش ها برای مشخص شدن نقش ریزدانه فیلتر در کدورت آب خروجی، از گرد سیلیس که رنگ آن متفاوت از خاک مینا می باشد، استفاده شده است. با توجه به جدول ۴ مشاهده می شود که ریزدانه موجود در فیلتر تأثیر قابل توجه بر کدورت آب خروجی دارد، به طوری که در فیلتر دارای ۱۰ درصد ریزدانه، آب خروجی حتی در لحظات انتهایی کاملاً شفاف نمی شود. همچنین عامل دیگر در تغییر کدورت آب خروجی، میزان دبی خروجی می باشد. به طوری که اگرچه مقدار ریزدانه فیلتر B4 نصف ریزدانه فیلتر B5 است، اما به دلیل کم بودن دبی خروجی نسبت به فیلتر B5، ریزدانه موجود در آن به تدریج شسته شده است و باعث کدورت بیشتر آب خروجی در دقایق ابتدایی آزمایش شده است. به عبارت دیگر هر چه دبی آب خروجی بیشتر باشد، ریزدانه موجود در فیلتر سریعتر شسته می شود و می تواند باعث سریعتر شفاف شدن آب خروجی گردد.

تأثیر نفوذپذیری فیلتر بر نتایج آزمایش ها

در این تحقیق با توجه به مقدار نفوذپذیری فیلترهای مورد استفاده، تأثیر میزان نفوذپذیری بر عملکرد فیلتر بررسی شده

توجه به نتایج آزمایش‌ها، هرچه ذرات کوچک‌تر از D_{15} ریزتر باشند (نه در حدی که ریزتر از الک #۲۰۰ باشند) می‌توانند به طور قابل توجهی باعث بهبود راندمان فیلتر شوند. این مسئله بر خلاف معیارهای موجود، صرفاً اندازه D_{15} فیلتر را ملاک عملکرد فیلتر قرار داده است. بنابراین کاراترین روش برای طراحی و بررسی عملکرد فیلتر انجام آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

- در فیلتر موفق، وجود مواد ریزدانه تا حد ۱۰ درصد، تأثیر چندانی بر عملکرد کنترل فرسایش فیلتر در آزمایش NEF ندارد، اما می‌تواند سبب کاهش شدید نفوذپذیری فیلتر شود. - در فیلتر ناموفق، وجود ۵ درصد مواد ریزدانه، ضمن اینکه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نفوذپذیری فیلتر ندارد، می‌تواند باعث بهبود قابل توجه عملکرد فیلتر در آزمایش NEF شود. اما وجود مواد ریزدانه بیشتر (تا حد ۱۰ درصد) می‌تواند باعث ناپایداری داخلی مصالح فیلتر شده و باعث افت شدید در عملکرد فیلتر گردد.

- با توجه به کثرت عوامل مؤثر در طراحی فیلتر، بهترین روش برای طراحی و کنترل کارایی فیلتر، انجام آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد. البته باید توجه داشت که نگارندگان قصد حذف یا تخفیف در معیار میزان ریزدانه برای سدها را ندارند بلکه اظهار می‌دارند که فیلترهایی که دارای مواد ریزدانه بیش از ۵ درصد می‌باشند، با انجام کلیه آزمایش‌ها و اطمینان از عملکرد آزمایشگاهی آنها می‌توانند به عنوان یک گزینه (در مواردی که ترک‌خوردگی فیلتر مطرح نمی‌باشد) استفاده شوند.

- مهمترین پارامتر خروجی آزمایش NEF تغییرات قطر سوراخ می‌باشد و قضاوت اصلی بر اساس آن صورت می‌گیرد.

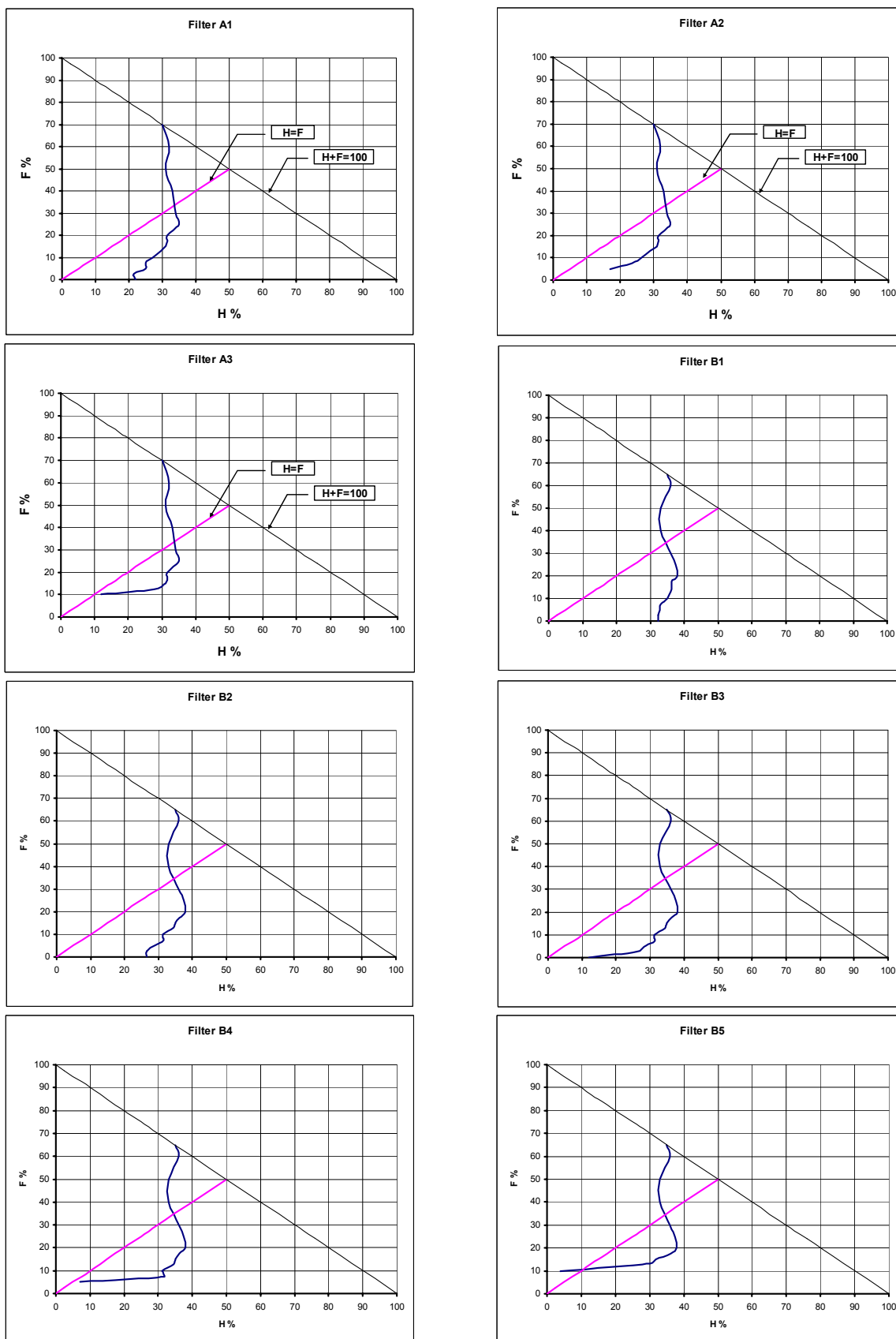
اما توجه به پارامترهای خروجی دیگر مانند تغییرات دبی آب خروجی، در کمک به قضاوت ضروری می‌باشد، به طوری که غالباً هرچه افزایش قطر سوراخ بیشتر باشد، میزان دبی آب خروجی بیشتر می‌شود. ولی تکرار آزمایش NEF، از نظر میزان دبی خروجی، خیلی ایده‌آل نمی‌باشد.

و B به ترتیب برابر ۲/۲ و ۴ می‌باشد. بنابراین با توجه به معیارهای ارائه شده در جدول ۱ در هر دو فیلتر A و B نسبت به خاک مینا این معیار برآورده شده است. البته برای فیلترهای سری B این نسبت در حالت مرزی معیار $D_{15Filter} / D_{85Base}$ (1996) Indrartna et al. قرار دارد و با وجود اینکه این نسبت برای همه آنها برابر می‌باشد ولی میزان فرسایش در آنها دارای اختلاف زیادی می‌باشد. به طوری که در معیار آنها لازم است نسبت $D_{15Filter} / D_{85Base}$ کوچک‌تر از ۴ الی ۵ باشد. البته همان‌طور که قبلاً بیان شد، علت فرسایش زیاد در فیلتر B5 ناپایداری داخلی آن می‌باشد ولی از مقایسه فیلترهای B1 و B4 مشاهده می‌شود که علیرغم تأثیر زیاد ذرات کوچک‌تر از D_{15} ، این عامل در هیچ کدام از معیارها و حتی مرزهای مختلف فرسایش که توسط (2001) Foster and Fell ارائه شده، مدنظر قرار نگرفته است.

در مورد معیارهای نفوذپذیری، D_{15} فیلترهای سری A و B بزرگ‌تر از ۰/۱ میلی‌متر است. همچنین مقدار $D_{15Filter} / D_{15Base}$ سری A و B به ترتیب برابر ۷۵ و ۱۳۰ می‌باشد، بنابراین با توجه به بخش ۴ کلیه معیارهای دانه‌بندی در رابطه با نفوذپذیری بجز معیار حداکثر میزان ریزدانه، رعایت شده است. همچنین با توجه به تحقیقات (2003) Park از آنجایی که ریزدانه فیلترها غیرخمیری و کمتر از ۱۵٪ است، دارای پتانسیل ترک‌خوردگی نیستند و نفوذپذیری فیلتر به نفوذپذیری خاک مینا برای کلیه فیلترها بجز فیلتر A3 به مراتب بزرگ‌تر از ۱۰۰ می‌باشد. این نسبت برای فیلتر A3 در حدود ۲۰۰ می‌باشد. بنابراین افزایش ریزدانه در فیلترهایی که از نظر کنترل فرسایش عملکرد مناسبی دارند، می‌تواند باعث عدم ارضای معیار نفوذپذیری شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحلیل آزمایش‌ها نتایج این تحقیق عبارتند از: - ذرات کوچک‌تر از D_{15} و وجود ریزدانه در فیلتر می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و راندمان فیلتر داشته باشند. با



شکل ۱۴- آنالیز پایداری داخلی طبق روش Kenney and Lau (1985)

دارد. بنابراین نمی‌توان از این عامل به طور مستقیم در پیش‌بینی عملکرد فیلتر استفاده کرد.

تشکر و سپاس

این کار تحقیقاتی با حمایت معاونت امور پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران (دفتر امور پژوهشی و پشتیبانی علمی) انجام شده است و نویسندگان کمال قدردانی و سپاسگزاری را از سازمان فوق دارند.

- تغییرات کدورت آب خروجی در آزمایش‌ها با فیلتر بدون مواد ریزدانه نشان داد که بخش اعظم فرسایش در دقایق ابتدایی آزمایش رخ می‌دهد. تغییرات کدورت آب خروجی در آزمون‌هایی که در آنها از فیلتر دارای مواد ریزدانه استفاده شده است، نشان داد که بخش زیادی از کدورت آب در دقایق ابتدایی آزمایش، ناشی از ریزدانه موجود در فیلتر می‌باشد و شفاف شدن آب خروجی بستگی به میزان دبی آب خروجی

منابع

- سروش، ع. و طباطبایی شوریجه، پ. ۱۳۸۵، خبرنامه انجمن ژئوتکنیک، دوره جدید، شماره ۶، مهرماه ۱۳۸۵.
- یثربی، س.ش. و آزاد، ع. ۱۳۸۶، مطالعه آزمایشگاهی کارایی فیلتر بر اساس معیارهای طراحی در سدهای خاکی، مجله بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت، شماره ۲، جلد ۱۸، صفحات ۹۹ الی ۱۱۰.
- Fell, R., Wan, C.F, Cyganiewicz, J. and Foster, M. 2003. Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams. *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE*, April, pp. 307-314.
- Foster, M., and Fell, R. 2001. Assessing Embankment Dam Filters That Do Not Satisfy Design Criteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE*, pp.398-407.
- ICOLD (1994), *Embankment Dams Granular Filters and Drains*, Bulletin No. 95.
- Indraratna, B., Vafai, F., and Dilema, E. 1996. An experimental study of the filtration of a lateritic clay slurry by sand filters. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 119, 75-83.
- Kenney, T.C. and Lau, D. 1985. Internal Stability of Granular Filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22:215-225.
- Lone, M.A., Hussain, B. and Asawa, G.L. 2005. Filter Design criteria For Graded Cohesionless Bases. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE*, pp.251-259.
- Park Y. 2003. Investigation of the Ability of Filters to Stop Erosion through Cracks in Dam. PhD Thesis in Civil Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Sakamoto, T., Yamaguchi, Y. and Satoh, H. 2002. Identification of Non-cohesive Filters to Prevent Migration of Impervious Materials for Embankment Dams due to Large Earthquakes (fault movement). The 22nd USSD Annual Meeting and Conference Pre-Conference Workshop 3rd U.S.-JAPAN Workshop on Advanced Research on Earthquake Engineering for Dams.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Talbot, J.P. 1984. Basic properties of sand and gravel filters. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6): 684-700.
- Sherard, J.L. and Dunnigan, L.P. 1989. Critical Filters for Impervious Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(7): 927-947.
- U.S Department of Agriculture (USDA). 1994. Gradation Design of Sand and Gravel Filters. Chapter 26, *National Engineering Handbook, Part 663, Soil Conservation Service, Washington, D.C.*
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR) 1994. Design Standards No.13: *Embankment Dams. Chapter 5 – Protective Filters*, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, CO.
- Vaughn R. and Soares F. 1982. Design of Filters For Clay Cores of Dam. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.108, No.GT1, PP.17-31.
- Yasrobi, S.S. and Azad, A. 2004. Assessment of Granular Filter Functioning in Embankment Dams. *Proceeding of International Conference on Soil properties and Processes, Eurosoil, Germany*