2022, Vol.8, No.4, Pages 69 to 76
Journal of Water and Sustainable Development

سال هشتم، شماره ٤، ١٤٠٠، صفحات ٦٩ تا ٧٦
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Technical paper

نوع مقاله: فنی و ترویجی

Filter Performance of Embankment Dams by No Erosion Filter Test (Case study: Bar and Bidvaz Dam)

A.R. Raeisosadat[1] , A. Akhtarpour[2*], M. Nazari[3]

1,2,3-MSc and Associate Professor and MSc student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: Akhtarpour@um.ac.ir)

Received: 04-09-2021 Revised: 19-12-2021
Accepted: 22-12-2021 Available Online: 19-03-2022

بررسی فیلتر سدهای خاکی با آزمایش فیلتر مانع فرسایش (مطالعه موردی: سد بار و بیدواز)

علیرضا رئیس السادات[1]، علی اخترپور[2*]، ملیحه نظری[3]

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشیار و دانشجوی کارشناسی‌ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: Akhtarpour@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸

Abstract

Internal erosion and piping pose major hazards to earth dams. Experimental method of filter performance evaluation and design method based on criteria with simple parameters are the two main groups of filter selection and design in earth dams. Determining the appropriate gradation for the filter of earth dams, despite the apparent simplicity of experimental criteria, has posed important technical and economic issues for engineers in large numbers of large projects. This problem has become larger in situations where the clay soil is dispersive or suspected of dispersivity because on the one hand, estimating the true potential of dispersivity is not easy due to the multiplicity of detection tests, and on the other hand, the application of few criteria in filter design prevents erosion of available dispersive soils, usually leading to the selection of very fine and costly gradation. With this approach, a no erosion filter test device was made to perform laboratory tests and study the accuracy of the design methods. As a case study, by performing basic dispersivity experiments on the clay core samples of Bar Neishabour and Bidvaz Esfarayen dams, the degree of dispersivity potential in these soils was determined. By performing a number of No Erosion Filter tests, the best grain size of the filter, which prevents the erosion of the soil of Neishabour Bar Dam at different pressures, was obtained with an accuracy of 0.1 mm which is different from the filter executed in the dam. Also by testing the design criteria and the laboratory method of filter design for the core soil of Bidvaz Esfarayen dam, it was found that there is a big difference in the results of each design method.

Keywords: Filter Design Criteria, Internal Erosion, No Erosion Filter Test, Dispersivity.

چکیده

فرسایش داخلی و رگاب مخاطرات اساسی را برای سدهای خاکی و سنگریزه‌ای ایجاد می‌کنند. روش آزمایشگاهی ارزیابی عملکرد فیلتر و روش طراحی بر اساس معیار، با پارامترهای ساده، دو گروه عمده انتخاب و طراحی فیلتر در سدهای خاکی هستند. تعیین دانه‌بندی مناسب برای فیلتر سدهای خاکی، با وجود سادگی ظاهری معیارهای تجربی، در تعداد زیادی از پروژه‌های بزرگ مسائل فنی و اقتصادی مهمی را پیش روی مهندسان قرار داده است. این مشکل، در شرایطی که خاک قرضه واگرا یا مشکوک به واگرایی بوده، گسترش پیدا می‌کند. زیرا از یک‌سو، به دلیل تعداد بسیار آزمایش‌های شناسایی، ارزیابی میزان واقعی واگرایی خاک‌ها چندان ساده نیست و از سوی دیگر، کاربرد معیارهای معدودی که در مراجع برای طراحی فیلتر مانع فرسایش خاک‌های واگرا در دسترس هستند، بیشتر به انتخاب دانه‌بندی‌های بسیار ریز و پرهزینه منجر می‌شود. با این رویکرد دستگاه آزمایش فیلتر مانع فرسایش برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و مطالعه تفاوت‌های نتایج روش‌های طراحی ساخته شد. به‌عنوان یک مطالعه موردی، با انجام آزمایش‌های پایه و واگرایی بر روی نمونه‌های هسته سدهای بار نیشابور و بیدواز اسفراین، میزان پتانسیل واگرایی در این خاک‌ها مشخص شد. با انجام تعدادی آزمایش فیلتر مانع فرسایش، بهترین دانه‌بندی فیلتری که در فشارهای مختلف مانع از فرسایش خاک هسته سد بار نیشابور می‌شود با دقت ۰/۱ میلی‌متر به‌دست آمد که با فیلتر موجود در سد تفاوت‌هایی دارد. همچنین با بررسی معیارهای طراحی و روش آزمایشگاهی طراحی فیلتر برای خاک هسته سد بیدواز اسفراین مشخص شد تفاوت زیادی در نتایج هرکدام از روش‌های طراحی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: معیارهای طراحی فیلتر، فرسایش داخلی، واگرایی، آزمایش فیلتر مانع فرسایش NEF.

How to cite this article: Raeisosadat A.R., Akhtarpour A. and Nazari M. 2022. Filter Performance of Embankment Dams by No Erosion Filter Test (Case study: Bar and Bidvaz Dam). Journal of Water and Sustainable Development, 8(4): 69-76. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v8i4.2109.1077

مقدمه

پدیده فرسایش داخلی مشکلات فراوانی برای سازه‌های خاکی به‌ویژه سدهای خاکی سنگریزه‌ای به‌وجود می‌آورد. صرف‌نظر از علت‌های بی‌شمار شروع فرسایش داخلی، برای جلوگیری از ادامه آن، از اجرای فیلتر در پایین‌دست و بالادست هسته استفاده می‌شود. فیلترها ۱- از شسته شدن و حرکت ذرات خاک مجاور جلوگیری می‌کنند و ۲- با تأمین نفوذپذیری کافی، تخلیه جریان را آسان می‌نمایند. همچنین فیلتر مناسب توانایی کنترل و ترمیم منافذ و ترک‌های ایجاد شده در هسته را دارد. به‌این‌علت، پیوسته طراحی این بخش از سدهای خاکی حساسیت ویژه‌ای داشته و محققین و مهندسین طراح را با چالش مواجه ساخته است. ملاحظات اقتصادی ناشی از هزینه‌های مراحل تولید فیلتر در حجم وسیع برای یک سد نیز اهمیت طراحی مناسب فیلتر را دوچندان می‌کند. پارامترهای زیادی در عملکرد فیلتر مؤثر می‌باشند که تأثیر هرکدام متفاوت است. این تأثیرات در کنار یکدیگر می‌توانند طراحی فیلتر را تحت تأثیر قرار دهند. بااین‌حال هیچ‌گاه در ارائه معیارهای طراحی، همه پارامترهای مؤثر در کنار یکدیگر بررسی نشده‌اند و هم‌زمان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. این پارامترها، متغیرهایی هستند که میان معیارهای طراحی و نتایج آزمایشگاهی اختلاف ایجاد می‌کنند. اما در آزمایش فیلتر کلیه عوامل مؤثر به‌صورت هم‌زمان و با اثر اندرکنشی بر روی یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند. استفاده از معیارها روشی بسیار سریع بوده و تنها با محاسبه یک یا چند رابطه، طرحی از فیلتر را در اختیار طراح قرار می‌دهد. اما روش آزمایشگاهی نسبت به روش قبل، زمان‌بر بوده و کنترل‌کننده است. در واقع روش آزمایشگاهی، عملکرد موفق یا ناموفق یک سیستم مشخص از فیلتر-خاک مبنا را ارزیابی می‌کند. علاوه‌برآن واردکردن پارامترهای شناخته‌شده موجود در مدل‌سازی‌های عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی برای رسیدن به مدلی واقعی‌تر و کامل‌تر ضروری به نظر می‌رسد.

Terzaghi (۱۹۲۲) اولین معیار طراحی فیلتر را ارائه نمود که دو شرط نفوذپذیری و آب‌شستگی داشت. Bertram (۱۹۴۰) و Lund (۱۹۴۹) از نخستین افرادی بودند که حدود کاربرد معیار Terzaghi (۱۹۲۲) را در آزمایشگاه مطالعه کردند و معیار جدید ارائه دادند. همچنین در مطالعات USACE[1] که در حدود سال‌های ۱۹۴۱ تا ۱۹۴۸ در مرکز تحقیقات آزمایشگاهی آغاز شد همانند مطالعات Terzaghi (۱۹۲۲) دو شرط برای پایداری و نفوذپذیری فیلتر ارائه شد.

Sherard و همکاران (۱۹۸۴) در فاصله سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۲ آزمایش‌هایی برای تعیین معیارهای طرح فیلتر انجام دادند و متناسب با نتایج، معیارهایی را ارائه دادند (Sherard و همکاران، ۱۹۸۴). Kenney و Lau (۱۹۸۵) و Lafleur و Mlynarek (۱۹۸۹) با آزمایش‌هایی در خصوص بررسی پایداری داخلی خاک‌ها، معیارهایی را برای طراحی فیلتر ارائه دادند.Fell و Foster (۲۰۰۱)، آزمایش NEF[2] را بهترین آزمایش برای پیداکردن مرزی که از فرسایش جلوگیری می‌کند، پذیرفتند اما سعی کردند با انجام آزمایش دیگری به نام CEF[3] مرزهایی مانند مرز فرسایش اندک و فرسایش اضافی را نیز بیابند. park (۲۰۰۳) مطالعاتی با هدف بررسی توانایی فیلتر در توقف فرسایش ترک در سد خاکی انجام داد که تفاوت‌هایی با آزمایش Sherard وهمکاران (۱۹۸۴) داشت که از جمله این تفاوت‌ها می‌توان به استفاده از ترک به‌جای سوراخ در نمونه اشاره کرد. Tabatabaei shourijeh و Soroush (۲۰۰۹) kdc اهمیت آزمایش NEF در طراحی فیلتر سدهای خاکی را بررسی کردند.

در این مطالعه ۱- عملکرد فیلتر طراحی شده در سد بار نیشابور و بیدواز اسفراین با استفاده از دستگاه آزمایش فیلتر مانع فرسایش که برای همین مطالعه ساخته شده بررسی شد؛ ۲- باتوجه‌به اینکه اصلی‌ترین خطر در خصوص طراحی و کارایی فیلتر در سدهای خاکی پدیده واگرایی است، ارزیابی پتانسیل واگرایی برای هر دو سد و رابطه آن با عملکرد هسته طراحی شده، بررسی شد.

مواد و روش‌ها

• منطقه مورد مطالعه

- **سد بار:** طرح سد بار در ۲۱ کیلومتری شمال غرب شهرستان نیشابور و شمال شرق شهر فیروزه (بزغان) در مجاورت روستای حسین‌آباد شامل سازه‌های اصلی یک سد اصلی، سد فرعی، سد انحرافی و کانال انتقال آب است. حجم مخزن در تراز نرمال ۲۳/۵ میلیون مترمکعب، حداکثر ارتفاع سد از پی برابر ۴۳/۵ متر، و طول تاج ۱۵۰۰ متر است. در تاریخ ۱۳۹۲/۱/۳۱ مخزن سد بار به میزان تقریبی ۴۰۰ هزار مترمکعب آبگیری شد. در تاریخ ۱۳۹۲/۳/۴ اولین فروچاله‌ها درون مخزن در محدوده‌ای در نزدیکی سد اصلی مشاهده شده است. پس از این موضوع با هماهنگی مشاور و کارفرما آب محدوده فروچاله‌ها به قسمت دیگر مخزن پمپ شد و با پایین آمدن سطح آب مشاهده شد فروچاله‌ها به‌صورت فرسایش پس‌رونده فرسایش یافته‌اند. همچنین علاوه‌بر فروچاله‌ها ترک‌های سطحی و اثراتی از نشست‌های سطحی مشاهده شد. باتوجه‌به اینکه جنس خاک رس بلانکت از همان خاک هسته رسی می‌باشد و ایجاد این فروچاله‌ها احتمال واگرا بودن این خاک را ایجاد نمود؛ ازاین‌رو این مطالعات با هدف بررسی واگرایی و همچنین عملکرد فیلتر سد اصلی انجام شد.

- سد بیدواز اسفراین: سد بیدواز در اسفراین در سال ۱۳۸۴ احداث شد. این سد از نوع سد خاکی سنگ‌ریزه‌ای با هسته مایل است. آبرفت زیر بدنه سد از جنس شن متراکم و با حداکثر عمق ۲۳ متر

است. برای آب‌بندی سد از پرده آب‌بند با بتن پلاستیک استفاده شد. ارتفاع این سد ۶۶ متر و طول تاج آن در حدود ۱۰۴ متر است. حجم کل خاکریز سد در حدود ۲/۲ میلیون مترمکعب و ارتفاع تراز تاج ۱۵۳۴+ است. در اواخر سال ۱۳۹۱ با افزایش تراز آب تا ارتفاع ۱۵۲۱+ متر فروچاله‌هایی در جناح چپ بر روی وجه بالادست و پایین‌دست سد ظاهر شد. بررسی اولیه اعداد گزارش شده از ابزار دقیق نشان می‌دهد فشار آب داخل بدنه از تراز آب مخزن تبعیت می‌کند. این موضوع بیانگر این است که آب مخزن به طور مستقیم با پیزومترهای داخل بدنه سد در ارتباط است. یعنی خاک هسته دچار فرسایش شده یا فیلتر سد به‌صورت ناقص عمل می‌کند. در ادامه با حفر گمانه در بدنه سد و مطالعات ژئوفیزیک وضعیت سد دقیقتر بررسی شد. نتایج نشان داد خاک هسته در جناح چپ سد دچار آسیب و فرسایش شده است. برای توجیه مشاهدات ۳ فرضیه بیان شده است. فرضیه اول وقوع شکست هیدرولیکی و به دنبال آن فرسایش داخل مصالح هسته می‌باشد. فرضیه دوم شسته شدن مصالح هسته به داخل درز و ترک سنگ بستر و فرضیه سوم شسته شدن خاک هسته به داخل پی آبرفتی است. باتوجه‌به بافت دانه‌ای خاک پی مصالح هسته سد فرضیه‌های دوم و سوم زمانی به وقوع می‌پیوندد که فیلتر سد به‌صورت ناموفق عمل کند.

• بررسی واگرایی و آزمایش‌های پایه بر روی مصالح

برای انجام مطالعه بر روی این دو سد، ۶ نمونه از خاک هسته سد بار و ۱ نمونه از خاک هسته سد بیدواز به آزمایشگاه منتقل شد. همچنین برای ارزیابی میزان پتانسیل واگرایی دو نمونه از شش نمونه (نمونه‌های شماره ۲ و ۶) اخذ شده از خاک قرضه سد بار نیشابور و نمونه گرفته‌شده از سد بیدواز انتخاب و پس از انجام آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری و آزمایش تراکم استاندارد هر چهار آزمایش هیدرومتری دوگانه، شیمیایی، پین هول و کرامب بر روی آن انجام شد. نتایج آزمایش واگرایی و دانه‌بندی و به شرح جدول (۱) است. حدود مصالح هسته و فیلتر در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی نهایی واگرایی نمونه‌های خاک هسته

ردیف	شماره نمونه	آزمایش هیدرومتری مضاعف	آزمایش پین هول	آزمایش شیمیایی	آزمایش کرامب	نتیجه‌گیری
۱	۲ سد بار	غیر واگرا	ND۳	نیمه واگرا	واکنش متوسط	نیمه واگرا
۲	۶ سد بار	غیرواگرا	ND۴	نیمه واگرا	واکنش متوسط	نیمه واگرا
۳	۱ سد بیدواز	غیر واگرا	ND۲ , ND۱	غیر واگرا	واکنش خفیف	غیر واگرا

جدول ۲- حدود مصالح هسته و فیلتر سد بار نیشابور

خاک	D_{10}	D_{15}	D_{30}	D_{60}	D_{85}	۴/۷۵mm>٪	۰/۰۷۵mm>٪	C_u	C_c
پوش ریز هسته	-	-	۰/۰۰۶۵	۰/۰۲۷	۰/۰۷۵	۰	۱۵	-	-
پوش درشت هسته	-	۰/۰۰۴	۰/۰۱۷	۴/۵	۵۱	۳۸	۵۴	-	-
پوش ریز فیلتر	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۶	۱/۵	۵۵	۱۰۰	۵	۰/۸
پوش درشت فیلتر	۰/۴۲	۰/۵	۱	۳	۲۵	۹۰	۱۰۰	۷/۱۵	۰/۷۹

• معرفی دستگاه آزمایش و مکانیزم آزمایش

Sherard و همکاران (۱۹۸۴) آزمایش فیلتر مانع فرسایش NEF که قابل استفاده برای خاک‌های نفوذناپذیر (شامل مقدار زیادی درشت‌دانه) باشد، ابداع کردند. با انجام این آزمایش می‌توان اندازه D_{15} فیلتر بحرانی را درحالی‌که هیچ‌گونه فرسایشی در دیواره کانال جریان مشاهده نشود، تعیین کرد. دستگاه ساخته شده در این تحقیق پیچیدگی زیادی ندارد و ساخت آن از مقاله Sherard و همکاران (۱۹۸۴) ایده گرفته شد و هر دو آزمایش NEF و CEF توسط این دستگاه قابل انجام است. این دستگاه شدیدترین شرایط نشت متمرکز از داخل هسته رسی ترک خورده را در سیستم خاک فیلتر را مدل می‌کند. در شکل (۱) نمایی از دستگاه ساخته شده، مشاهده می‌شود.

در آزمایش‌هایی که D_{15} فیلتر به‌کار رفته، کوچکتر از D_{15} فیلتر بحرانی باشد، افزایش مشخصی در قطر سوراخ اولیه در نمونه خاک مبنا، مشاهده نمی‌شود اما زمانی‌که D_{15} فیلتر به‌کار رفته، بزرگتر از D_{15} فیلتر بحرانی باشد، سوراخ اولیه دچار فرسایش شده و میزان فرسایش با افزایش D_{15} زیاد می‌شود. برای هر خاک مبنایی، مقدار D_{15} فیلتر بحرانی منحصربه‌فرد بوده و می‌توان با آزمایش NEF آن را با دقت ۰/۱ میلی‌متر تعیین کرد (Sherard و Dunnigan، ۱۹۸۵). به‌عبارت‌دیگر برای هر خاک مبنا می‌توان این مقدار را به‌عنوان یکی از خواص اصلی خاک (مانند حدود اتربرگ یا مقاومت برشی)، در نظر گرفت. کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ در نشریه شماره ۹۵ (ICOLD، ۱۹۹۴)، انجام آزمایش NEF را برای تعیین مشخصات فیلتر بحرانی توصیه کرده است.

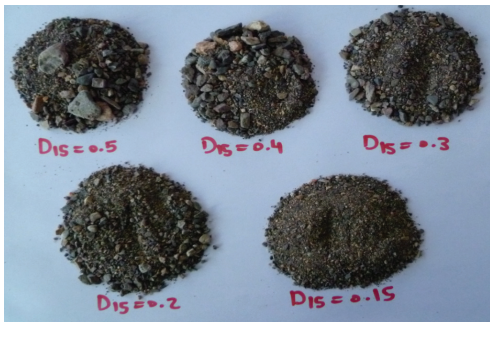
شکل ۱- نمایی از دستگاه ساخته شده

• ساخت فیلتر

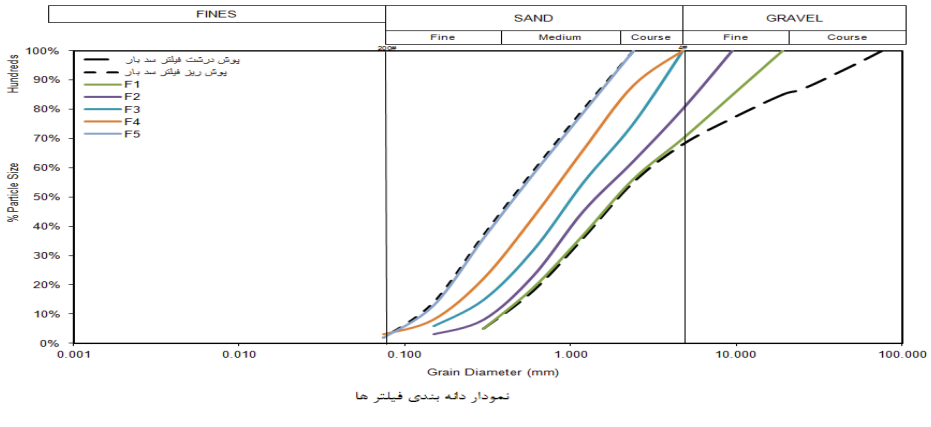
برای ساخت فیلتر ابتدا مصالح با نزدیکترین الک‌های موجود از هم تفکیک شد. به دلیل اینکه رنگ آب خروجی آزمایش یکی از پارامترهای تفسیر نتایج است، مصالح مانده روی هر الک به‌دقت شسته و دسته‌بندی شد. برای این مطالعه تعداد ۵ نوع فیلتر ساخته شد که تفاوت اصلی آن‌ها در اندازه دانه‌بندی با تمرکز بر اندازه مشخصه $D_{۱۵}$ بود. تصویری از فیلترهای ساخته شده در شکل (۲) نشان‌داده‌شده است. همچنین باتوجه‌به اینکه برای انجام آزمایش NEF نیاز به دانستن دانسیته نسبی فیلتر است، بر روی مصالح فیلتر با دانه‌بندی مطابق شکل (۳) آزمایش‌های تعیین حداکثر و حداقل وزن مخصوص طبق روش استاندارد ASTM D۴۲۵۴ و ASTM D۴۲۵۳ انجام شد. مقدار $D_{۱۵}$ برای هر فیلتر در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر $D_{۱۵}$ متناظر هر فیلتر

فیلترهای آماده شده در آزمایشگاه					
نام فیلتر	$F_۱$	$F_۲$	$F_۳$	$F_۴$	$F_۵$
$D_{۱۵}$	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱۵



شکل ۲-دانه‌بندی فیلترها



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی تمام فیلترهای ساخته شده

هدف از انجام آزمایش‌های NEF تعیین فیلتر بحرانی است که مانع از فرسایش مصالح هسته شود. در مجموع ۱۶ آزمایش NEF بر روی ۶ نمونه هسته سد بار انجام شده است. در تمامی آزمایش‌ها از آب شهری برای برقراری جریان عبوری استفاده شده است. آزمایش‌های NEF در دو سری الف و ب، به شرح ذیل انجام شده‌اند:

آزمایش‌های سری الف: در این آزمایش‌ها همانند آزمایش‌های مرسوم NEF از فشار آب ۴۰۰ کیلو پاسکال استفاده شده است.

آزمایش‌های سری ب: در این آزمایش‌ها از فشار آب ۲۰۰ کیلو پاسکال استفاده شد.

برای ارزیابی کیفی و ظاهری کدورت جریان خروجی بر اساس مشاهده پساب خروجی، جدول (۴) برای یکسان‌سازی نتایج ارائه شده است (سروش و طباطبایی، ۱۳۹۰).

جدول ۴- نمادهای مورد استفاده برای نشان‌دادن کدورت جریان خروجی

علامت اختصاری	تفسیر	
VD	Very Dark	کاملاً تیره
D	Dark	تیره
MD	Moderately Dark	نسبتاً تیره
SD	Slightly Dark	کمی تیره
BV	Barely Visible	تقریباً واضح
C	Clear	شفاف
PC	Perfectly Clear	کاملاً شفاف

نتایج

• نتیجه آزمایش NEF در سد بار و پوش اصلاح شده مصالح فیلتر

براساس نتایج آزمایش‌های NEF پوش اصلاح شده مصالح فیلتر بحرانی به‌صورت شکل (۶) و جدول (۷) پیشنهاد می‌شود. در این شکل فیلتر $F_۳$ نمایانگر مرز درشت پوش فیلتر است و مرز ریز فیلتر بدون تغییر باقی می‌ماند. در جدول (۵) و (۶) نتایج آزمایشات با فشارهای ۴ و ۲ بار نشان داده شده است.

باتوجه به نتایج، پوش اصلاح شده برای فیلتر سد بار به‌دست آمد و در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های NEF با فشار ۴ بار (سد بار)

شماره آزمایش	مشخصات خاک مبنا		مشخصات فیلتر		$D_{۱۵}/D_{۸۵}$	تطابق با معیار طراحی	زمان آزمایش (دقیقه)	فشار آب (bar)	نتیجه آزمایش
	نمونه هسته	PI (٪)	نمونه فیلتر	$D_۲$ (٪)					
۱	۱	۱۲	$F_۱$	۸۰	۹/۰۹	خیر	۸	۴	ناموفق
۲	۱	۱۲	$F_۱$	۸۰	۹/۰۹	خیر	۷	۴	ناموفق
۳	۱	۱۲	$F_۱$	۸۰	۹/۰۹	خیر	۹	۴	ناموفق
۴	۲	۱۱	$F_۱$	۷۰	۹/۴	خیر	۱۰	۴	ناموفق
۵	۳	۱۰	$F_۱$	۷۵	۱۰	خیر	۸	۴	ناموفق
۶	۴	۱۱	$F_۱$	۸۰	۱۰/۴	خیر	۱۰	۴	ناموفق
۷	۵	۱۲	$F_۱$	۸۰	۸/۹	بله	۱۱	۴	ناموفق
۸	۶	۱۱	$F_۱$	۸۰	۹/۴	خیر	۱۰	۴	ناموفق
۹	۵	۱۲	$F_۲$	۸۰	۷/۱۴	بله	۱۰	۴	ناموفق
۱۰	۵	۱۲	$F_۳$	۸۰	۵/۳۵	بله	۱۰	۴	ناموفق
۱۱	۵	۱۲	$F_۴$	۸۰	۳/۵۷	بله	۱۱	۴	موفق
۱۲	۲	۱۱	$F_۴$	۸۰	۳/۷۷	بله	۸	۴	موفق
۱۳	۵	۱۲	$F_۵$	۸۰	۲/۶	بله	۸	۴	موفق

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های NEF با فشار۲ بار (سد بار)

شماره آزمایش	مشخصات خاک مبنا		مشخصات فیلتر		$D_{۱۵}/D_{۸۵}$	تطابق با معیار طراحی	زمان آزمایش (دقیقه)	فشار آب (bar)	نتیجه آزمایش
	نمونه هسته	PI (٪)	نمونه فیلتر	$D_۲$ (٪)					
۱۴	۵	۱۲	$F_۳$	۸۰	۵/۳	بله	۶	۲	موفق
۱۵	۵	۱۲	$F_۲$	۸۰	۷/۱۴	بله	۱۰	۲	ناموفق
۱۶	۲	۱۱	$F_۳$	۸۰	۵/۶	بله	۷	۲	موفق

جدول ۷- مشخصات دانه‌بندی پوش اصلاح شده براساس نتایج آزمون NEF (سد بار)

خاک	قطر مشخصه (میلیمتر)					٪۴/۷۵>	٪۰/۰۷۵>	C_U	C_C
	$D_{۱۰}$	$D_{۱۵}$	$D_{۳۰}$	$D_{۶۰}$	$D_{۸۵}$	mm	mm		
پوش ریز فیلتر	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۶	۱/۵	۱۰۰	۰	۴/۶	۰/۸
پوش درشت فیلتر	۰/۲۲	۰/۳	۰/۵۵	۱/۵	۳/۲	۱۰۰	۰	۶/۸۱	۰/۹۱

شکل (۴) به ترتیب الف و ب تصویری از نمونه موفق و ناموفق در انتهای آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵) منحنی پوش اصلاح شده فیلتر برای سد بار نشان داده شده است.

• آزمایش‌های NEF روی سد بیدواز و نتایج آن‌ها

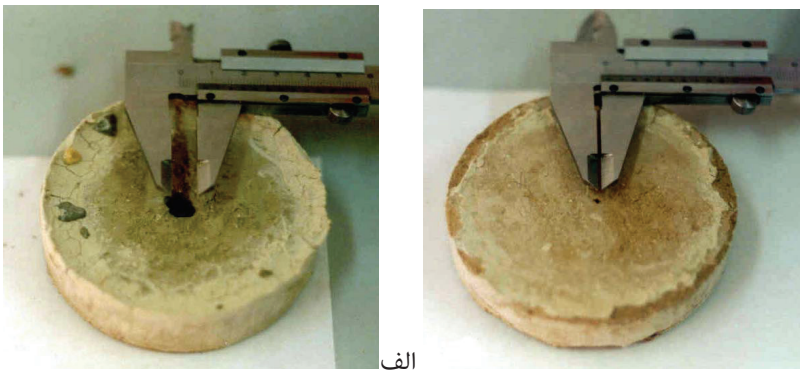
در مجموع ۵ آزمایش NEF بر روی ۱ نمونه هسته انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها از آب شهری برای برقراری جریان عبوری استفاده شده است. آزمایش‌های NEF در دو سری الف و ب به شرح ذیل انجام شد:

آزمایش‌های سری الف: در این آزمایش‌ها همانند آزمایش‌های مرسوم NEF از فشار آب ۴۰۰ کیلو پاسکال استفاده شد.

آزمایش‌های سری ب: در این آزمایش‌ها از فشار آب ۲۰۰ کیلو پاسکال استفاده شد.

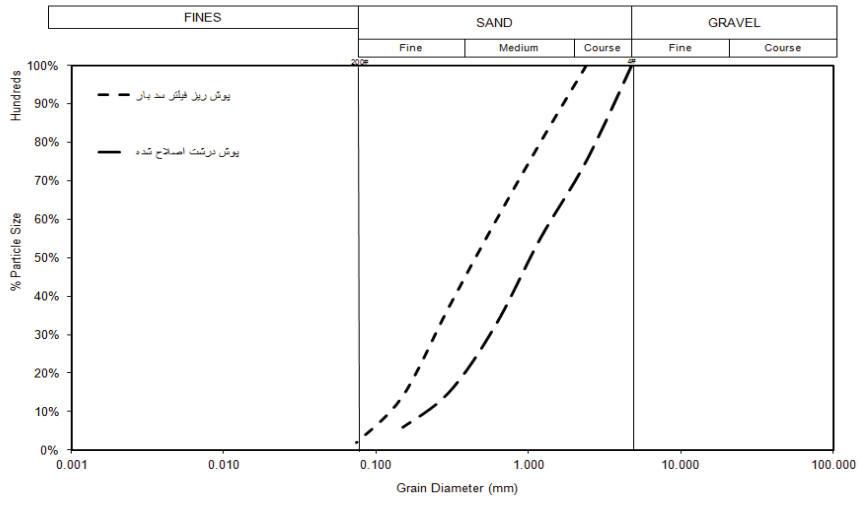
برای ارزیابی کیفی و شهودی کدورت جریان خروجی بر اساس مشاهده پساب خروجی، از جدول (۴) استفاده شد.

در جدول (۸) نتایج حاصل از آزمایشات با معیارهای گفته شده مقایسه شدند، و در شکل (۶) منحنی دانه‌بندی فیلتر بر اساس این آزمایشات رسم شده است.



ب الف

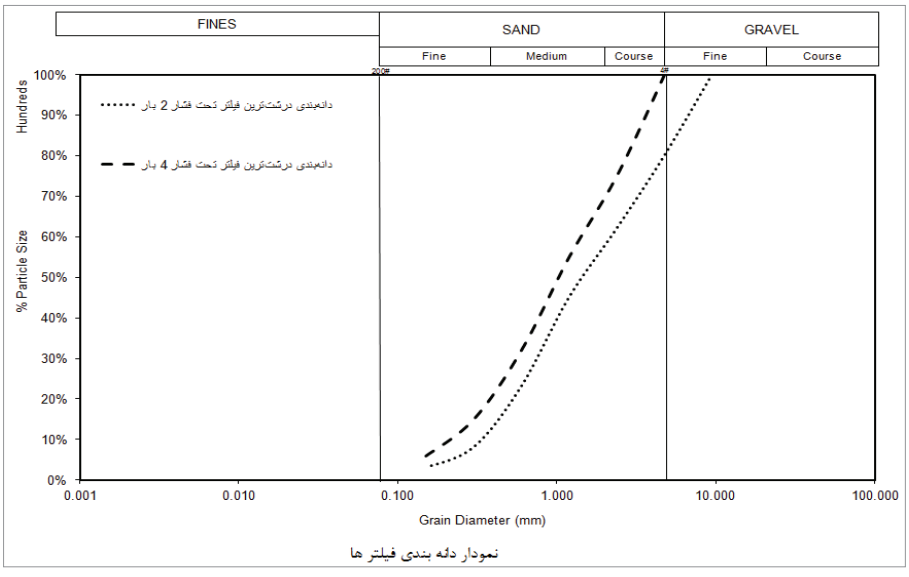
شکل ۴- الف و ب به ترتیب نمونه موفق و ناموفق در انتهای آزمایش



شکل ۵- منحنی دانه‌بندی پوش اصلاح شده سد بار بر اساس نتایج آزمون NEF

جدول ۸- مقایسه نتایج آزمایش NEF با معیار شرارد-دانیگان و فل-فاستر

شماره آزمایش	گروه خاک مبنا	فیلتر	D_{15F}	ارضای معیار شرارد و دانیگان	ارضای معیار فل و فاستر	فشار آزمایش	نتیجه آزمایش NEF
۱	۲	$F_۳$	۰/۳	بله	بله	۲	موفق
۲	۲	$F_۴$	۰/۴	بله	بله	۲	موفق
۳	۲	$F_۵$	۰/۵	بله	بله	۲	ناموفق
۴	۲	$F_۳$	۰/۳	بله	بله	۴	موفق
۵	۲	$F_۴$	۰/۴	بله	بله	۴	ناموفق



شکل ۶- منحنی دانه بندی فیلترهای طراحی شده برای هسته سد بیدواز به وسیله آزمون NEF

نتیجه‌گیری

معیارهای تجربی طراحی فیلتر بر اساس تعداد زیادی آزمایش‌های عملکرد فیلتر توصیه شده است، اما نتایج عملکرد فیلتر وابسته به نوع خاک بوده و بدون انجام آزمایش‌های NEF و تنها بر اساس این معیارهای تجربی نمی‌توان به‌طورقطع از موفقیت عملکرد فیلتر اطمینان حاصل نمود، این مسئله به طور خاص در خاک‌های واگرا اهمیت بیشتری دارد. همچنین در برخی از سدها نیز این معیارها محافظه‌کارانه است و استفاده از آزمایش‌های NEF می‌تواند فیلتر اقتصادی‌تری را طراحی و اجرا نماید.

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها و مقایسه‌هایی که با نتایج معیارها انجام شده، روشن است معیارهای به‌کار گرفته شده نتوانسته‌اند تصویری واقعی از عملکرد فیلتر در برابر خاک مبنا ارائه کنند. از طرفی برخی سازگاری‌ها میان نتایج آزمایشگاه و ارضای معیارها حاکی‌از وجود توانایی این روابط در پیش‌بینی رفتار فیلتر است. این نکته به‌این معنا است که نمی‌توان به‌طورقطع استفاده از معیارها را به‌عنوان روش‌هایی ناکارآمد کنار گذاشت بلکه اصلاحات و تحقیقات بیشتری نیاز است تا معیارها را به توانایی کامل جهت انتخاب فیلتری مناسب، هرچند در محدوده‌ای مشخص از خاک‌ها، رهنمون سازند. به‌عبارت‌دیگر این تحقیقات باید دامنه توانایی هر معیار را روشن ساخته و اصلاحاتی نو در رفع دامنه ضعف آن بیابد.

- نتایج پژوهش نشان داد آزمایش NEF می‌تواند در طرح دقیق فیلتر سدهای خاکی در مرحله طراحی بسیار مفید و قابل‌استفاده باشد، بنابراین توصیه می‌شود در شروع عملیات اجرایی هم‌زمان با تولید مصالح فیلتر در کارگاه مطالعات مشابه این تحقیق صورت گیرد.

- باتوجه‌به نتایج آزمایش واگرایی در جدول (۱)، خاک هسته سد بار نیمه واگرا بوده که خطر فرسایش داخلی را افزایش داده و از طرفی باعث طرح فیلتر ریز و پرهزینه می‌شود.

- فیلتر بحرانی با $D_{۱۵}$ برابر با ۰/۳ میلیمتر در شرایط استفاده از فشار آب ۲ بار و فیلتر بحرانی با $D_{۱۵}$ برابر با ۰/۲ میلیمتر

در شرایط استفاده از فشار ۴ بار در آزمایش NEF، مانع از فرسایش هسته سد بار نیشابور است. درحالی‌که فیلتر بحرانی استفاده شده در سد بار با $D_{۱۵}$ برابر با ۰/۵ میلیمتر (پوش درشت فیلتر طراحی شده) است که توانایی پیشگیری فرسایش مصالح هسته را ندارد.

- براساس آزمایش‌های NEF انجام شده و در نظر گرفتن ارتفاع سد، فیلتر بحرانی با $D_{۱۵}$ کوچکتر از ۰/۳ میلیمتر و یا حداکثر مساوی با ۰/۳ میلیمتر توانایی پیشگیری فرسایش مصالح هسته در بدنه سد بار نیشابور را دارد، همچنین بر اساس نتایج آزمایش‌های NEF، پوش اصلاح شده فیلتر برای بدنه سد بار نیشابور پیشنهاد شد.

- فیلتر بحرانی با $D_{۱۵}$ برابر با ۰/۴ میلیمتر در شرایط استفاده از فشار آب ۲ بار و فیلتر بحرانی با $D_{۱۵}$ برابر با ۰/۳ میلیمتر در شرایط استفاده از فشار آب ۴ بار در آزمایش NEF، توانایی پیشگیری فرسایش مصالح هسته سد بیدواز اسفراین را دارد.

نتایج این مطالعه بیان می‌کند احتمال فرسایش داخلی در هسته سد بار بسیار زیاد است و در مرحله پایش سد باید توجه خاصی به آن صورت گیرد. هرگونه مشاهده آب گل‌آلود در پایین‌دست می‌تواند نشانه‌ای از وقوع فرسایش داخلی در هسته سد باشد.

پی‌نوشت

1-U. S. Army Corps of Engineering
2-No Erosion Filter Test
3-Continuing Erosion Filter Test

منابع

سروش، ع. و طباطبایی، پ. ۱۳۹۰. پژوهش نظری و آزمایش‌های فیلتر و فرسایش در مصالح سد مخزنی سومبار. شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان شمالی. طرح تحقیقاتی شماره ۱۰۱۰/۱۲۷/۴۴.

Bertram G. E. 1940. An Experimental Investigation of Protective Filters. Harvard Soil Mechanics Series No.7, Graduate School of Engineering Harvard University, Combrige, MA.

Foster M. and Fell R. 2001. Assessing Embankment Dam Filters that Do Not Satisfy Design Criteria. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(5): 398–407.

ICOLD. 1994. Embankment Dams Granular Filters and Drains, Bulletin No.95.

Kenney T.C. and Lau D. 1985. Internal Stability of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal, 22: 215-225.

Lafleur J. and Mlynarek J. 1989. Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, 115(12): 1747-1

Lund A. 1949. An Experimental Study of Graded Filters. Master of Science thesis in University of London.

Park Y. 2004. Investigation of the Ability of Filters to Stop Erosion through Cracks in Dam. PhD Thesis in Civil Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University.

Sherard J. L., Dunnigan L. P. and Talbot J. R. 1984. Basic Properties of Sand and Gravel Filters. Journal of Geotechnical Engineering, 6: 684–700.

Tabatabaei Shourijeh P. and Soroush A. 2009. A Review of the No Erosion Filter Test. Geotechnical Testing Journal, 32(3): 209-218.

Terzaghi K. 1922. Der Grundguch an Stauwerken und seine Verhütung (The failure of dams by piping and its prevention). Die Wasserkraft, 17: 445–449.