

ارزیابی خصوصیات مهندسی مصالح فیلتر مانع فرسایش در سد خاکی کبودوال استان گلستان

علی حسن شریفی^۱، علی ارومیه‌ای^{۲*}، سید محمود فاطمی عقدا^۳

پذیرش مقاله: ۹۱/۵/۹

دریافت مقاله: ۹۰/۸/۴

چکیده

انتخاب مصالح فیلتر مناسب در یک سد خاکی، در محافظت از هسته و پوسته در مقابل فرسایش نقش مؤثری دارد و این مصالح یک زون انتقالی میان آن‌ها و لایه زهکش به وجود می‌آورد. لایه زهکش نیز به نوبه خود وظیفه تخلیه آب از بدنه و شالوده سد و همچنین کاهش فشار آب بین منفذی در ساختگاه سد را دارد. از آنجا که استفاده از زهکش در ساختمان سدهای خاکی از ضروریات طراحی است، به کارگیری لایه فیلتر در ایجاد زون انتقالی نیز ضرورت پیدا می‌کند.

در این مقاله خصوصیات مصالح فیلتر مورد استفاده در ساختمان سد کبودوال مورد بررسی قرار گرفته است. سد کبودوال نوعی سد خاکی همگن با ارتفاع ۳۵/۸ متر در جنوب شهرستان علی‌آباد کنول از استان گلستان است. منطقه عموماً دربرگیرنده خاک‌های ریزدانه حاصل از هوازدگی سنگ‌های شیستی می‌باشد. در این بررسی با توجه به خصوصیات دانه‌بندی، شاخص‌های خمیری و میزان گسترش خاک‌ها، انتخاب منابع قرضه به عنوان فیلتر مانع فرسایش صورت پذیرفت. از آنجا که دانه‌بندی مصالح فیلتر مورد استفاده در محدوده D_5 تا D_{50} مصالح بدنه است و از مرز بحرانی D_{15} فراتر می‌رود، بنابراین در این تحقیق علاوه بر ارزیابی توان واگرایی مصالح مورد استفاده، خصوصیات فرسایش‌پذیری آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا خصوصیات دانه‌بندی و شاخص‌های دانه‌بندی ۲۵ نمونه مطالعه شد. از میان آن‌ها ۵ نمونه که از نظر دانه‌بندی ریزتر بودند جهت آزمایش‌های واگرایی و آزمایش فرسایش‌پذیری NEF انتخاب شدند. از نظر واگرایی نمونه‌ها در رده غیرواگرا طبقه‌بندی شدند و از نظر فرسایش‌پذیری، نمونه K11 با $D_{85}=0.017\text{mm}$ مناسب‌ترین نمونه خاک برای تعیین D_{15} بحرانی فیلتر انتخاب شد. بر اساس مقایسه نتایج به دست آمده از مجموع آزمایش‌های NEF انجام شده بر روی نمونه خاک‌های منتخب، D_{15} بحرانی فیلتر برای خاک‌های غیر فرسایشی بین ۰/۳۵ تا ۰/۵۰ به دست آمد که برای اطمینان بیشتر مبنای طراحی D_{15} برابر با ۰/۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

کلید واژه‌ها: فیلتر مانع فرسایش، مصالح زهکش، سد کبودوال، منابع قرضه ریزدانه، سد خاکی همگن

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی

۲. دانشیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، uromeia@modares.ac.ir

۳. دانشیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

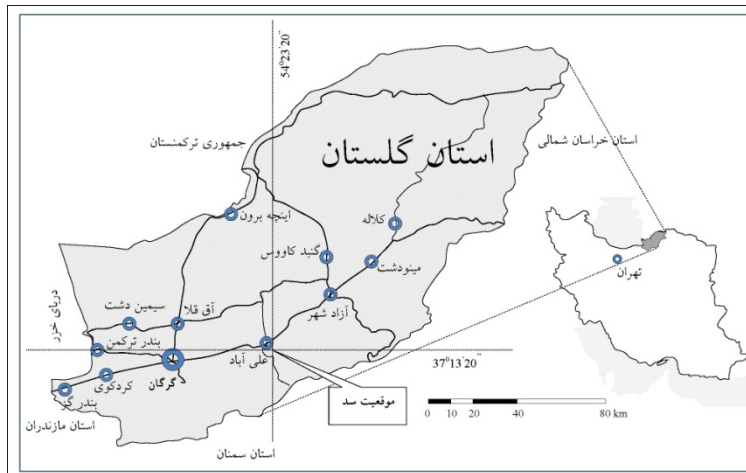
فیلتر یکی از بخش‌های اساسی در ساختمان سدهای خاکی به شمار می‌آید و هدف از به‌کارگیری آن محافظت از مصالح هسته و پوسته و همچنین جلوگیری از فرسایش آن‌ها به سمت لایه زهکش می‌باشد. انتخاب مصالح مناسب برای فیلتر می‌تواند با عملکرد ساده از وقوع هرگونه آب‌شستگی، فرسایش درونی خاک و در نتیجه بالا رفتن فشار آب بین منفذی جلوگیری کرده و در صورت ایجاد ترک در هسته باعث ترمیم و بسته شدن آن گردد.

باتوجه به اهمیت موضوع طراحی و انتخاب نوع مصالح فیلتر در سدهای خاکی، پژوهشگران متعدد طرح‌های پژوهشی فراوانی را در این زمینه انجام داده‌اند که می‌توان به عنوان مثال به چند مورد به شرح زیر اشاره کرد: از جمله اولین کارهای صورت گرفته در این زمینه توسط (Silviera 1965) بود که بر مبنای روش آماری میزان مهاجرت مصالح خاک مینا به سمت فیلتر را مورد بررسی قرار داد. ضرورت تعیین درصد مواد ریزدانه در مصالح فیلتر جهت ارزیابی کارایی آن توسط (Arulandan and Perry 1983) مورد مطالعه قرار گرفت. ابزاری آزمایشگاهی توسط (Sherard and Dunnigan 1989) طراحی شد که خصوصیات فیلتر از نظر دانه‌بندی و شکل، مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که مصالح شکسته و گوشه‌دار می‌توانند بهترین منابع برای مصالح فیلتر باشند، (Locke and Indaratna 2002) با تجزیه و تحلیل نحوه جابه‌جایی مصالح خاک مینا به درون مصالح فیلتر، میزان فرسایش درونی خاک مینا و دوره زمانی لازم برای آن را پیش‌بینی کردند، (Yasrobi and Azad 2004) با مطالعه کارایی فیلتر در سدهای خاکی به نتیجه رسیدند که فقط با انجام آزمایش مانع فیلتر NEF می‌توان به انتخاب و طراحی نوع فیلتر پرداخت. (Indraratna and Raut 2006) مکانیسم جابه‌جایی و جایگزینی مصالح خاک مینا به درون مصالح فیلتر را مورد بررسی قرار دادند، مباحث نظری آزمایش‌های طراحی فیلتر به‌وسیله (Soroush and Shourijeh 2009) مورد بازنگری قرار گرفت و الگوی مناسبی برای طراحی تکمیلی

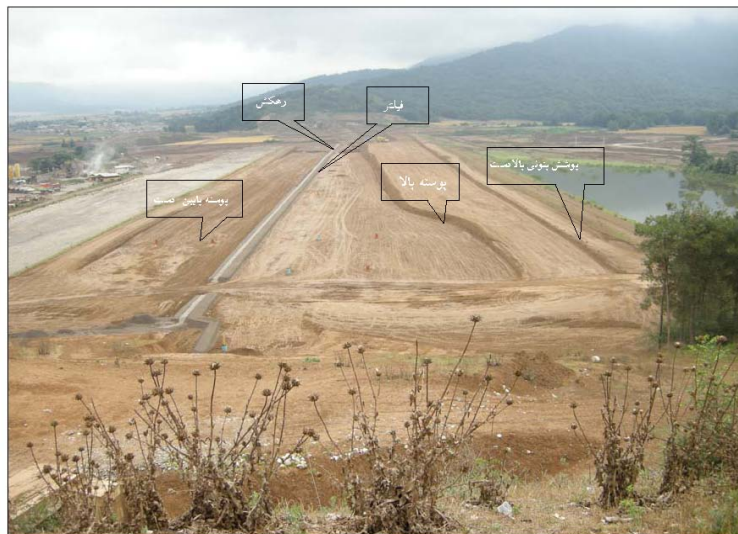
دستگاه آزمایش NEF پیشنهاد داده شد. حائری و حسینی (۱۳۷۹) ضمن بررسی شاخص‌های طراحی مصالح فیلتر در سدهای خاکی، پیشنهادهایی در رابطه با مقدار D_{15} بحرانی را ارائه دادند.

باتوجه به تفاوت دیدگاه‌ها در رابطه با معرفی معیارهای شاخص برای مصالح فیلتر، در این مقاله بر مبنای پیشنهادها ارائه شده توسط (Sherard and Dunnigan 1989) نوع مصالح خاکی مورد استفاده برای سد کبودال مطالعه و معیارهای طراحی فیلتر برای آن انجام پذیرفت. سد کبودال از نوع خاکی همگن با ارتفاع ۳۴ متر و طول تاج ۱۳۷۰ متر است و در فاصله یک کیلومتری جنوب شهرستان علی‌آباد کنول واقع شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به ساختگاه سد را نشان می‌دهد. این سد قابلیت ذخیره سازی آب به ظرفیت ۱۹ میلیون مترمکعب را دارد که قسمت اعظم آن برای فعالیت‌های کشاورزی و مقداری نیز برای مصرف شرب در نظر گرفته شده است. نمای عمومی ساختگاه سد در شکل ۲ نمایش داده شده است.

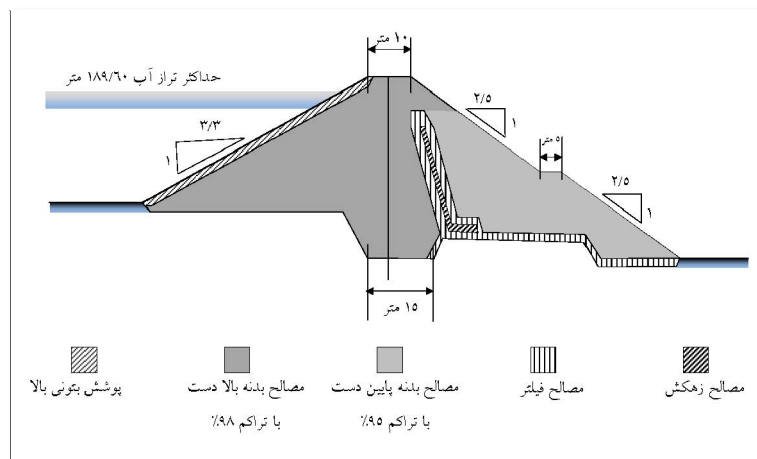
از نظر زمین‌شناسی، ساختگاه سد در زون ساختاری البرز قرار گرفته و شیست‌های سبز گران بستر سنگی منطقه را تشکیل می‌دهند. خاک‌های حاصل از هوازدگی این سنگ‌ها (با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی منطقه از نظر میزان بارش و دما) عمدتاً خاک‌های ریزدانه سیلتی و رسی با خاصیت خمیری پایین هستند. باتوجه به گسترش و یکنواختی خاک‌های منطقه، سد از نوع خاکی همگن طراحی شده و بیش از ۴/۵ میلیون مترمکعب مصالح خاکی از نوع رس در ساختمان سد مورد استفاده قرار گرفت. خاک‌ها با دو میزان تراکم ۹۸٪ و ۹۵٪ به ترتیب برای قسمت‌های بالادست و پائین دست انجام شد. لایه زهکش در قسمت میانی سد قرار دارد که پیرامون آن را مصالح فیلتر پوشش می‌دهد. اجزای مختلف ساختمان سد در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی سد کبودال و راه‌های دسترسی به آن در استان گلستان



شکل ۲. نمای عمومی از ساختگاه سد کبودال و اجزای مختلف آن در زمان ساخت



شکل ۳. اجزای مختلف ساختمانی و مصالح مورد استفاده در سد کبودال

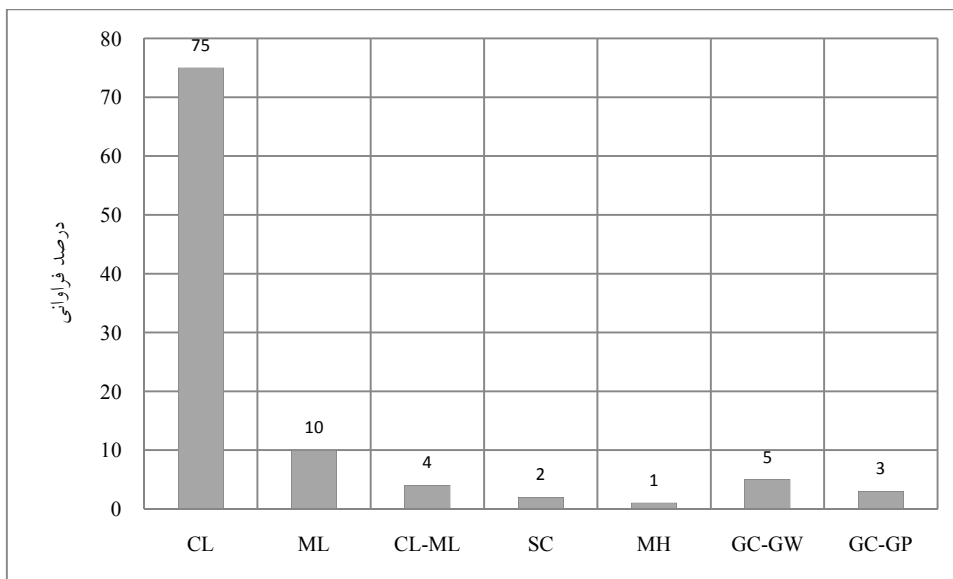
۲. خصوصیات ژئوتکنیکی ساختگاه

جهت ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها در ساختگاه سد کبودال در مجموع ۲۵ نمونه خاک منطقه از ۲۱ نقطه و از حداکثر عمق ۴ متر برداشت شد و مورد آزمایش‌های متداول مکانیک خاک قرار گرفت. این مطالعات در سه مرحله توسط شرکت مهندسین مشاور پژوهاب (۱۳۸۲)، شرکت راهسازی و عمران ایران (۱۳۸۵) و دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران (۱۳۸۶) انجام پذیرفت. در این آزمایش‌ها خصوصیات دانه‌بندی، شاخص‌های خمیری، تراکم پذیری و

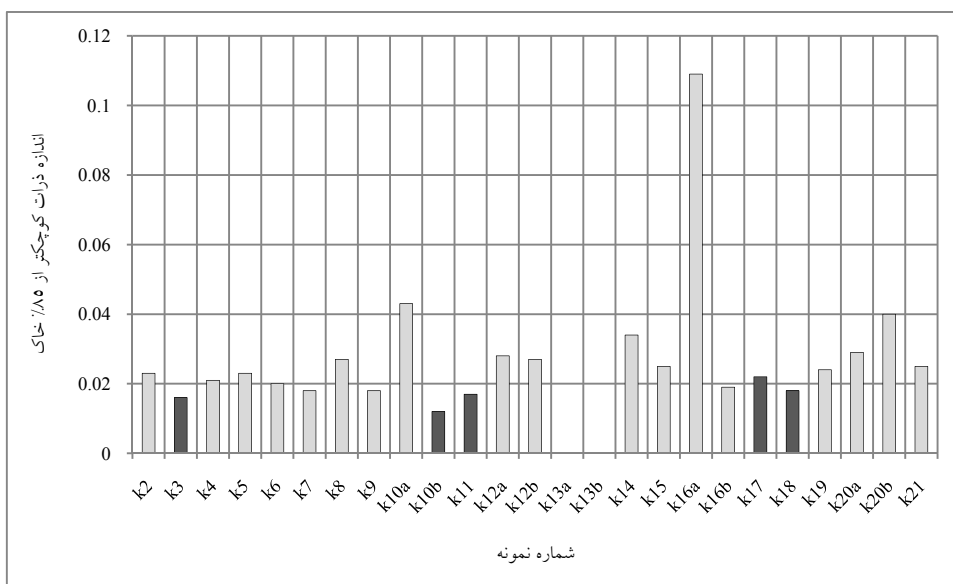
قابلیت واگرایی خاک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مطالعات انجام پذیرفته در جدول ۱ خلاصه شده است. مطالعات نشان می‌دهد، عمده خاک‌های منطقه ریزدانه بوده و در طبقه‌بندی یونیفاید در رده CL قرار دارند. فراوانی نسبی خاک‌های مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده‌اند. نمونه‌های مورد مطالعه از نظر میزان فراوانی اندازه ذرات کمتر از ۰.۸۵٪ (D₈₅) نیز مورد بررسی قرار گرفتند که این مقایسه در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های خصوصیات دانه‌بندی و شاخص‌های خمیری خاک

شماره نمونه	عمق (متر)	درصد رطوبت	D ₈₅ (mm)	% عبور از الک ۲۰۰	حد روانی %	شاخص خمیری %	رده بندی UCS
۱	۰-۴	۲۳	۰/۰۲۳	۹۵	۳۰	۱۰	CL
۲	۰-۴	۱۳	۰/۰۱۶	۹۹	۲۸	۱۱	CL
۳	۰-۴	۲۴	۰/۰۲۱	۹۸	۳۲	۱۱	CL
۴	۰-۴	۱۸	۰/۰۲۳	۹۷	۳۶	۱۴	CL
۵	۰-۴	۲۰	۰/۰۲۰	۹۹	۳۲	۱۱	CL
۶	۰-۴	۲۲	۰/۰۱۸	۹۵	۳۷	۱۶	CL
۷	۰-۴	۲۰	۰/۰۲۷	۹۵	۳۲	۱۲	CL
۸	۰-۴	۱۷	۰/۰۱۸	۹۸	۴۱	۱۷	CL
۹	۰-۲	۱۷	۰/۰۴۳	۸۸	۳۳	۱۱	CL
۱۰	۰-۴	۲۱	۰/۰۱۲	۹۷	۳۲	۱۰	CL
۱۱	۰-۴	۲۰	۰/۰۱۷	۹۷	۳۸	۱۷	CL
۱۲	۰-۲	۱۵	۰/۰۲۸	۸۵	۳۸	۱۷	CL
۱۳	۲-۴	۲۲	۰/۰۲۷	۹۴	۳۱	۱۱	CL
۱۴	۰-۴	۱۵	۰/۰۷۳	۶۴	۳۳	۱۷	CL
۱۵	۲-۴	۱۶	۱/۲۲۵	۶۱	۲۴	۷	CL-ML
۱۶	۰-۴	۱۷	۰/۰۳۴	۸۴	۳۰	۱۰	CL
۱۷	۰-۴	۲۱	۰/۰۲۵	۹۶	۴۱	۱۹	CL
۱۸	۰-۲	۱۷	۰/۱۰۹	۷۸	۴۴	۱۸	CL
۱۹	۲-۴	۲۱	۰/۰۱۹	۹۷	۳۵	۱۲	CL
۲۰	۰-۴	۲۴	۰/۰۲۲	۹۷	۳۴	۱۲	CL
۲۱	۰-۴	۱۸	۰/۰۱۸	۹۶	۴۳	۱۷	CL
۲۲	۰-۴	۱۸	۰/۰۲۴	۹۷	۴۱	۱۷	CL
۲۳	۰-۲	۱۵	۰/۰۲۹	۹۲	۳۶	۱۲	CL
۲۴	۲-۴	۱۴	۰/۰۴۰	۸۲	۳۴	۱۰	ML
۲۵	۰-۴	۱۶	۰/۰۲۵	۹۳	۳۸	۱۵	CL



شکل ۴. فراوانی نسبی نوع خاک ها در منطقه سد کبودال



شکل ۵. اندازه ذرات کوچکتر از D₈₅ نمونه‌های خاک منطقه

توجه شود: ۱- ستون‌های تیره رنگ معرف نمونه‌های هستند که مورد آزمایش NEF قرار گرفتند
 ۲- دو نمونه k13a و k13b به خاطر داشتن D₈₅ زیاد (به ترتیب ۰/۷۷۳ و ۱/۲۲۵) در نمودار ارائه نشدند.

منحنی دانه‌بندی نمونه‌ها یکنواختی و همگنی خاک را نشان می‌دهند و از نظر موقعیت آن‌ها در قسمت انتهایی (دانه‌بندی ریز مجاز) پوش طراحی قرار دارند بنابراین لازم است از نظر دانه‌بندی اصلاح یافته تا معیارهای لازم برای یک فیلتر مناسب را پیدا کنند. همچنین با توجه به مشاهده آثار واگرایی در منطقه و فرسایش بخشی از گودبرداری‌های مسیر جاده‌ها در

از میان نمونه‌های ارائه شده در نمودار شکل ۵، پنج نمونه که عموماً دانه‌بندی ریزتری داشته و در D₈₅ در آنها نسبتاً پایین بوده برای انجام آزمایش فیلتر مانع فرسایش NEF انتخاب شدند. این نمونه‌ها با شماره‌های K18، K17، K11، K10b، K03 و K18 معرفی شده‌اند. منحنی دانه‌بندی این نمونه‌ها و موقعیت آن‌ها نسبت به پوش طراحی فیلتر اولیه در شکل ۶ ارائه شده است.

۱۹۴۸ ارائه شده است (Das 1994). این معیارها مطابق روابط ۱ و ۲ ارائه می‌شوند:

$$D_{15F} / D_{85B} < 4 \dots\dots\dots [۱]$$

$$D_{15F} / D_{15B} > 4 \dots\dots\dots [۲]$$

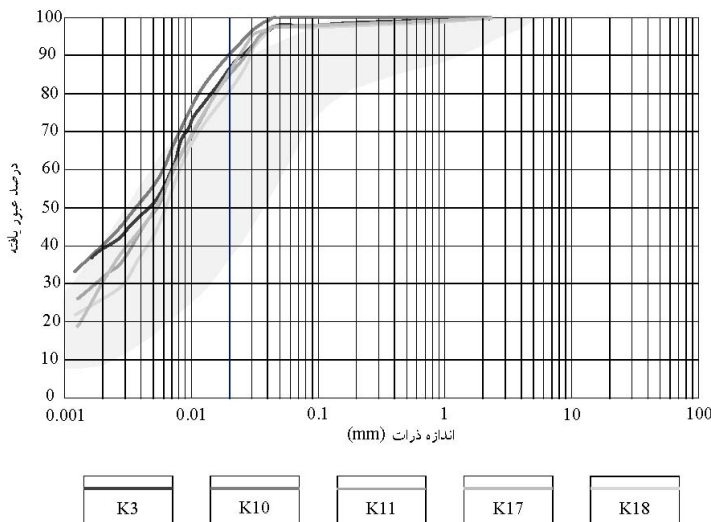
رابطه ۱ برای جلوگیری از جابه‌جایی مصالح خاک (مبنا) به درون مصالح فیلتر و رابطه ۲ جهت جلوگیری از بالا رفتن فشار آب بین منفذی در ساختمان خاک مبنا طراحی شده است. رابطه ۲ توسط گروه مهندسين مشاور ارتش آمریکا (Corps of Engineers, 1994) به صورت رابطه ۳ اصلاح شد.

$$D_{15F} / D_{15B} > 3-5 \dots\dots\dots [۳]$$

هنگام و پس از دوره بارندگی، آزمایش‌های واگرایی شامل دو آزمایش "هیدرومتری دو بل" و "پین‌هول" بر روی پنج نمونه فوق انجام شد. نتایج آزمایش‌های واگرایی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که خاک‌های مورد نظر عموماً غیر واگرا هستند و می‌توانند به عنوان مصالح فیلتر در ساختمان سد به کار گرفته شوند.

۳. معیارهای طراحی مصالح فیلتر

باتوجه به اهمیت نقش فیلتر در سدهای خاکی، موضوع انتخاب مناسب مصالح فیلتر مورد توجه بسیاری از محققین بوده و اولین معیارهای طراحی توسط ترزاقی و پک در سال



شکل ۶. دامنه دانه‌بندی خاک‌های ریزدانه منطقه و دامنه دانه‌بندی مصالح فیلتر

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های واگرایی بر روی نمونه‌های ریزدانه

ردیف	شماره نمونه	آزمایش هیدرومتر دو بل		آزمایش پین هول	
		درصد واگرایی	ارزیابی	درجه واگرایی	ارزیابی
۱	K03	٪۲۶	غیر واگرا	ND1	غیر واگرا
۲	K10b	٪۲۱	غیر واگرا	ND3	واگرایی متوسط
۳	K11	٪۳۱	واگرایی متوسط	ND2	غیر واگرا
۴	K17	٪۳۴	واگرایی متوسط	ND1	غیر واگرا
۵	K18	٪۴۲	واگرایی متوسط	ND1	غیر واگرا

خاک فیلتر در سدهای خاکی است که توسط شرارد در سال ۱۹۸۵ پیشنهاد شد (Sherard and Dunigan (1985). ابزار مورد استفاده و نمای کلی دستگاه آزمایش NEF در شکل ۷ نشان داده شده است. نمونه‌های مورد مطالعه منطقه در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تهران مورد آزمایش NEF قرار گرفتند (دانشکده عمران، ۱۳۸۶).

معیارهای دیگری برای طراحی فیلتر وجود دارند که هرکدام در شرایط خاصی کاربرد دارند. خلاصه‌ای از معیارهای طراحی فیلتر در جدول ۳ ارائه شده است.

۴. آزمایش NEF (فیلتر مانع فرسایش)

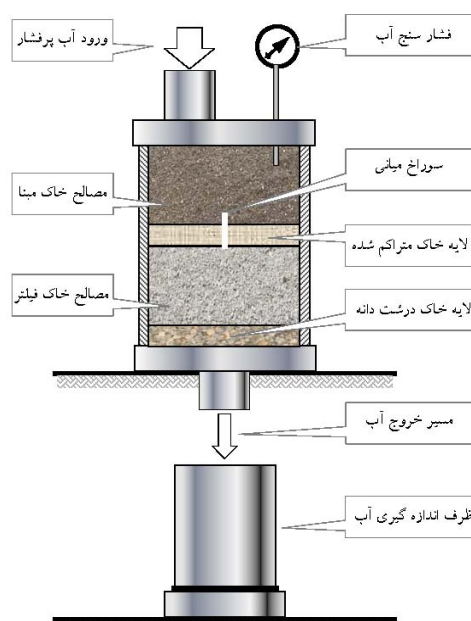
آزمایش NEF یکی از آزمایش‌های متداول و استاندارد نشده برای ارزیابی توان مصالح جهت جلوگیری از فرسایش مصالح

جدول ۳. مقایسه معیارهای طراحی مصالح فیلتر

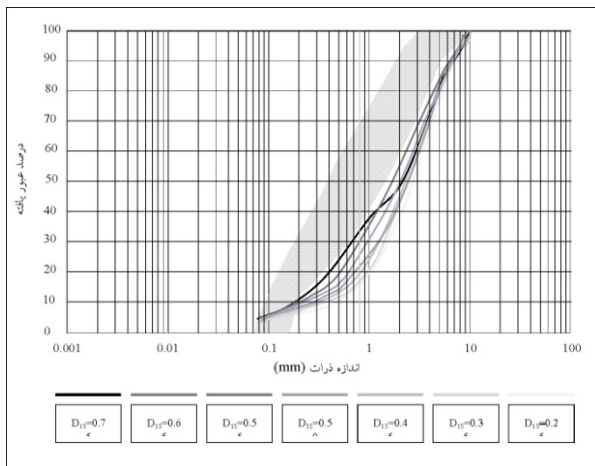
معیار طراحی	محدودیت کاربرد	نام مرجع	ردیف
$D_{15F} \leq 9D_{85B}$ $D_{15F} \leq 0.7 \text{ mm}$ $D_{15F} \leq 4D_{85B}$	$85\% < F_c < 100\%$ $40\% < F_c < 80\%$ $0\% < F_c < 15\%$	Sherard and Dunnigan (1989)	۱
$D_{15F} / D_{85B} \leq 5$ $D_{15F} / D_{85B} \leq 4$	$40\% < D_{85B} < 60 \mu\text{m}$ $60\% < D_{85B} < 90 \mu\text{m}$	Indraratna, Vafai, and Haque (1996)	۲
$5 < D_{50F} / D_{50B} < 10$ $12 < D_{15F} / D_{15B} < 40$	Poorly graded soils	ICOLD (1995)	۳
$12 < D_{50F} / D_{50B} < 50$ $12 < D_{15F} / D_{15B} < 40$	Well graded soils		

۵. طرح اختلاط دانه‌بندی فیلتر

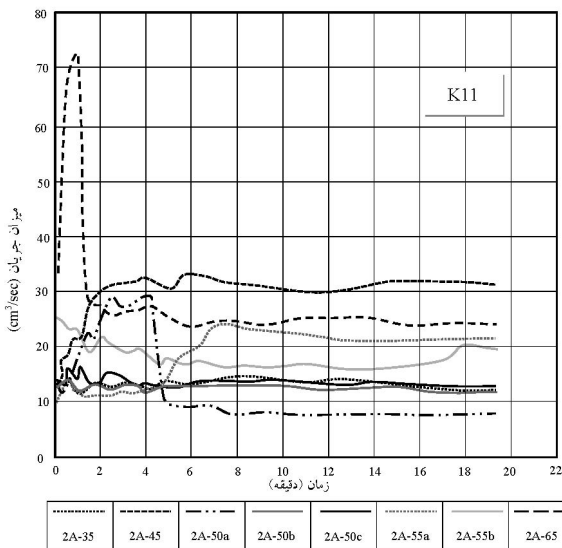
باتوجه به اینکه خاک‌های منطقه عموماً ریزدانه و در رده خاک‌های CL هستند (جدول ۱) بنابراین به منظور تهیه مصالح فیلتر مناسب مطابق با استانداردهای آزمایش NEF، تعداد هفت نمونه از خاک‌های ریزدانه منطقه با درصد‌های وزنی متفاوتی از خاک‌های درشت‌دانه مخلوط شدند. محصول نهایی این اختلاط تهیه نمونه‌هایی با D_{15} برابر با ۰/۷۵، ۰/۶۵، ۰/۵۵، ۰/۵۰، ۰/۴۵، ۰/۳۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر گردید. منحنی دانه‌بندی این نمونه‌ها به همراه پوش طراحی در شکل ۸ ارائه شده است. منحنی‌های دانه‌بندی نشان می‌دهند که همگی نمونه‌ها در قسمت درشت‌دانه پوش طراحی فیلتر قرار دارند و شرایط مناسب استفاده در ساختمان سد را دارا می‌باشند. همان‌طور که از مقایسه D_{85} دانه‌بندی خاک‌های مورد بررسی (نمودار شکل ۵) بر می‌آید، به لحاظ عملکرد فیلتر مانع



شکل ۷. ابزار مورد استفاده در آزمایش NEF توصیه شده توسط Sherard and Dunnigan (1985)



شکل ۸. نمودارهای مصالح فیلتر منتخب منطقه در مقایسه با دامنه دانه بندی مصالح فیلتر



شکل ۹. نمودار تغییرات میزان جریان در آزمایش NEF با خاک

K11

۲-۶. آزمایش NEF با خاک K10b

از میان نمونه های خاک مورد مطالعه در ساختگاه سد، نمونه K10b به لحاظ اندازه D_{85} ریزترین خاک محدوده اصلی منابع فرضه به شمار می آید. همان گونه که در جدول ۴ نشان داده شده، تعداد ۷ آزمایش NEF بر روی این خاک صورت گرفته است که در آن ها D_{15} فیلتر به ترتیب برابر $0/25$ ، $0/35$ ، $0/45$ ، $0/55$ ، $0/75$ میلی متر تعیین شدند. پنج مورد از نمونه ها شرایط مناسب برای فیلتر مانع فرسایش را دارا بودند و دو نمونه شرایط لازم را به دست نیاوردند (جدول ۴). تغییرات میزان جریان آب در طول آزمایش ها در

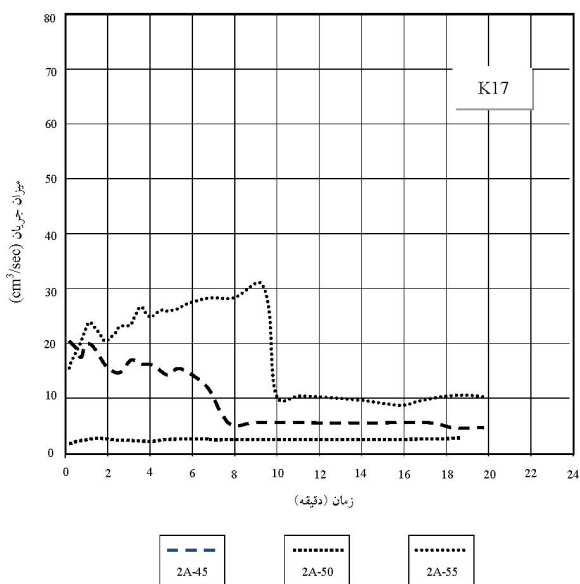
فرسایش فیلتر، نمونه K10b با D_{85} برابر با $0/12$ میلی متر، ریزترین خاک از میان ۲۵ نمونه مورد مطالعه است. در صورتی که مبنای انتخاب نمونه شاخص فرضه سطح 95% قابلیت اعتماد قرار داده شود، نمونه K11 با D_{85} برابر با $0/17$ میلی متر مناسب ترین نمونه خاک برای تعیین D_{15} بحرانی فیلتر خواهد بود. بر این اساس آزمایش های اصلی NEF بر روی دو نمونه فوق الذکر انجام گرفت و نمونه K3 که از لحاظ اندازه D_{85} بین دو نمونه فوق قرار دارد، ولی به لحاظ درصد ذرات کوچک تر از 2 میکرومتر و ذرات بزرگ تر از D_{95} از بقیه خاک های ریزدانه متمایز است. نمونه های K17 و K18 به ترتیب با D_{85} برابر $0/22$ و $0/18$ میلی متر جهت انجام آزمایش های تکمیلی و کنترلی انتخاب شدند. خصوصیات هفت نمونه خاک مبنای مورد استفاده در آزمایش NEF قبل از اختلاط در جدول ۴ خلاصه شده است. همچنین نتایج به دست آمده از آزمایش NEF و ارزیابی خاک های مورد استفاده از نظر فیلتر مانع فرسایش، در جدول ۴ ارائه شده است.

۶. یافته های حاصل از آزمایش NEF

۱-۶. آزمایش NEF با خاک K11

نمونه خاک K11 با D_{85} برابر $0/17$ میلی متر را می توان به لحاظ عملکرد مانع فرسایش، با سطح قابلیت اعتماد حدود 95% ، به عنوان نمونه شاخص جهت تعیین D_{15} بحرانی فیلتر سد انتخاب کرد. تعداد ۹ آزمایش فیلتر بر روی این خاک صورت گرفت که در آن ها D_{15} فیلتر مورد استفاده به ترتیب برابر $0/35$ ، $0/45$ ، $0/50$ ، $0/55$ ، $0/75$ (۲ آزمایش) و $0/65$ میلی متر بوده است. نتایج به دست آمده از این آزمایش ها در جدول ۴ منعکس شده است و منحنی دانه بندی نمونه ها برای استفاده به عنوان فیلتر مانع فرسایش، در شکل ۸ مشخص شده است. تغییرات میزان جریان آب در طول آزمایش ها در نمودار شکل ۹ ارائه شده است.

بر روی این نمونه صورت گرفت که در هر دوی آنها، اندازه D_{15} فیلتر برابر $0/55$ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود، فیلتر مورد آزمایش یک‌بار موفق (نمونه 2A-55a) و بار دیگر ناموفق (نمونه 2A-55b) بوده است. نمودار نمونه موفق و نمونه ناموفق به ترتیب روند نزولی و روند تصاعدی از نظر میزان جریان آب را نشان می‌دهند (نمودارهای شکل ۱۲).



شکل ۱۱. نمودار تغییرات میزان جریان در آزمایش NEF با خاک K17

۵-۶. آزمایش NEF با خاک K3

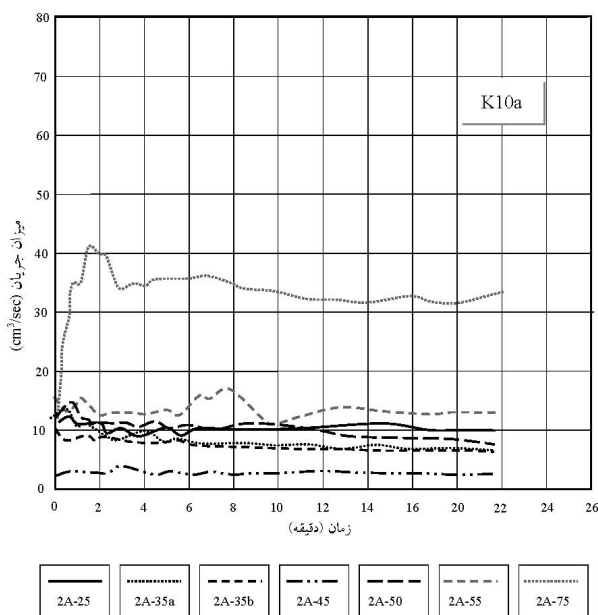
اندازه D_{85} نمونه خاک K3 برابر $0/16$ میلی‌متر است و بدین لحاظ این خاک، پس از خاک K10 ریزترین خاک محسوب می‌شود. ویژگی آن نسبت به نمونه‌های K10 و K11 حدود خمیری نسبتاً کم آن است.

اندازه D_{15} فیلترهای آزمایش شده با این خاک به ترتیب برابر $0/45$ ، $0/5$ و $0/55$ میلی‌متر (۲ آزمایش) می‌باشد. میزان جریان آب در طول آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۳ ارائه شده است. چنان‌که در جدول ۴ نیز ملاحظه می‌شود، فیلتر با D_{15} برابر $0/45$ میلی‌متر موفق و فیلترهای دیگر ناموفق بوده است.

نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که برای این خاک فیلترهای با D_{15} تا $0/5$ میلی‌متر توانسته‌اند از فرسایش خاک جلوگیری کنند.

۳-۶. آزمایش NEF با خاک K17

نمونه خاک K17 به لحاظ اندازه D_{85} آن (برابر $0/22$ میلی‌متر)، درشت‌دانه‌ترین نمونه خاک از میان ۵ نمونه منتخب است. تعداد ۳ آزمایش کنترلی با فیلترهای دارای D_{15} برابر $0/45$ ، $0/50$ و $0/55$ میلی‌متر بر روی این خاک انجام گرفت. مطابق جدول ۴، دو آزمایش نخست موفق و آزمایش سوم ناموفق بوده است. تغییرات میزان جریان آب در طول آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۱ ارائه شده است. نمودار نمونه 2A-55 (شکل ۱۱) ناهنجاری بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر نشان می‌دهد و این نشانه عدم مناسب بودن نمونه برای انتخاب به عنوان فیلتر است.



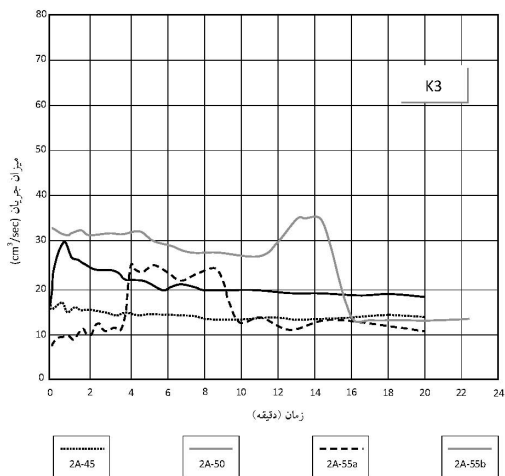
شکل ۱۰. نمودار تغییرات میزان جریان در آزمایش NEF با خاک K10

۴-۶. آزمایش NEF با خاک K18

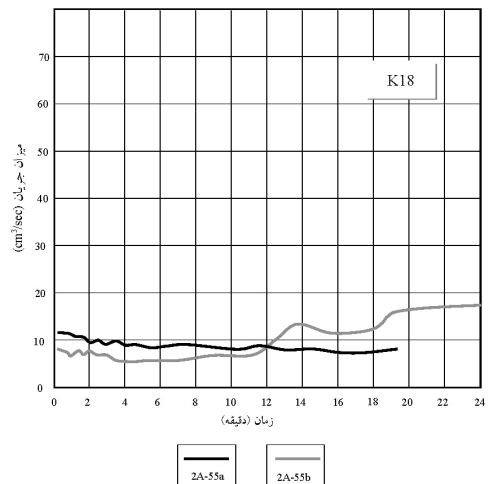
اندازه D_{85} نمونه خاک K18 برابر $0/18$ میلی‌متر است. ویژگی این خاک، در مقایسه با ۴ خاک انتخاب شده دیگر، حد روانی نسبتاً زیاد آن است ($LL=43\%$). تنها دو آزمایش

جدول ۴. نتایج آزمایش NEF بر روی مصالح انتخاب شده برای فیلتر

نتایج آزمایش NEF		فشار آب آزمایش (اتمسفر)	خاک فیلتر		خصوصیات خاک مبنا					شماره نمونه	تعداد آزمایش
N فرسایشی	NE غیر فرسایشی		D ₁₅ (mm)	شماره نمونه	D ₈₅ (mm)	عبور از الک ۲۰۰	درصد رطوبت	γ_d kN/m ³	عمق (متر)		
	✓	۳/۲	۰/۳۵	2A-35	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴	K11	۱
▲		۳/۲	۰/۴۵	2A-45	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴		۲
▲		۳/۲	۰/۵۰	2A-50a	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴		۳
	✓	۳/۲	۰/۵۰	2A-50b	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴		۴
	✓	۳/۲	۰/۵۰	2A-50c	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴		۵
	✓	۳/۲	۰/۵۰	2A-50d	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴		۶
▲		۳/۲	۰/۵۵	2A-55a	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴		۷
▲		۳/۲	۰/۵۵	2A-55b	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴		۸
▲		۳/۲	۰/۶۵	2A-65	۰/۰۱۷	٪۹۷	۱۹/۰	۱۶/۶۹	۰-۴		۹
	✓	۲/۸	۰/۲۵	2A-25	۰/۰۱۲	٪۹۷	۲۰/۵	۱۶/۱۲	۲-۴	K10	۱
	✓	۲/۸	۰/۳۵	2A-35	۰/۰۱۲	٪۹۷	۲۰/۵	۱۶/۱۲	۲-۴		۲
	✓	۲/۹	۰/۳۵	2A-55	۰/۰۱۲	٪۹۷	۲۰/۵	۱۶/۱۲	۲-۴		۳
	✓	۲/۶	۰/۴۵	2A-45	۰/۰۱۲	٪۹۷	۲۰/۵	۱۶/۱۲	۲-۴		۴
	✓	۲/۶	۰/۵۰	2A-50	۰/۰۱۲	٪۹۷	۲۰/۵	۱۶/۱۲	۲-۴		۵
▲		۲/۸	۰/۵۵	2A-55	۰/۰۱۲	٪۹۷	۲۰/۵	۱۶/۱۲	۲-۴		۶
▲		۳/۵	۰/۷۵	2A-75	۰/۰۱۲	٪۹۷	۲۰/۵	۱۶/۱۲	۲-۴		۷
	✓	۳/۲	۰/۴۵	2A-45	۰/۰۲۲	٪۹۷	۱۹/۰	۱۷/۲۵	۰-۴	K17	۱
	✓	۳/۳	۰/۵۰	2A-50	۰/۰۲۲	٪۹۷	۱۹/۰	۱۷/۲۵	۰-۴		۲
▲		۳/۱	۰/۵۵	2A-55	۰/۰۲۲	٪۹۷	۱۹/۰	۱۷/۲۵	۰-۴		۳
	✓	۳/۳	۰/۵۵	2A-55a	۰/۰۱۸	٪۹۶	۲۰/۰	۱۶/۴۴	۰-۴	K18	۱
▲		۳/۴	۰/۵۵	2A-55b	۰/۰۱۸	٪۹۶	۲۰/۰	۱۶/۴۴	۰-۴		۲
	✓	۲/۷	۰/۴۵	2A-45	۰/۰۱۶	٪۹۹	۱۶/۵	۱۷/۴۸	۰-۴	K3	۱
▲		۳/۵	۰/۵۰	2A-50	۰/۰۱۶	٪۹۹	۱۶/۵	۱۷/۴۸	۰-۴		۲
▲		۲/۷	۰/۵۵	2A-55a	۰/۰۱۶	٪۹۹	۱۶/۵	۱۷/۴۸	۰-۴		۳
▲		۲/۶	۰/۵۵	2A-55b	۰/۰۱۶	٪۹۹	۱۶/۵	۱۷/۴۸	۰-۴		۴



شکل ۱۳. نمودار تغییرات میزان جریان درآزمایش NEF با خاک K3



شکل ۱۴. نمودار تغییرات میزان جریان درآزمایش NEF با خاک K18

۷. بررسی نتایج

با بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های NEF و با در نظر گرفتن اطلاعات ارائه شده در جدول ۴ می‌توان چنین بیان داشت که مرز انتخاب مصالح فیلتر مانع فرسایش D_{15} برابر با ۰/۵ میلی‌متر است. بنابراین مصالح مورد استفاده به عنوان فیلتر بهتر است کوچک‌تر از آن و حداکثر ۰/۴۵ میلی‌متر انتخاب شوند. این انتخاب با نتایج به دست آمده توسط حائری و حسینی (۱۳۷۹) و همچنین نتایج مطالعات انجام گرفته توسط (Yasrebi and Azad (2004) که اندازه کمتر از ۰/۴۰ را توصیه می‌کنند، مطابقت دارند. در حالی که Locke and Indraratna (2002) مبنای طراحی فیلتر را D_{15} برابر با ۰/۱۹ میلی‌متر پیشنهاد داده‌اند. (Indraratna and Raut (2006) برای طراحی فیلتر $D_{15} = 0.4-0.6$ mm توصیه می‌کنند و Sherard and Dunnigan (1989) معیار طراحی را $D_{15} = 0.5-0.7$ mm در نظر می‌گیرند. هرچند نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج بیشتر محققین هم‌پوشانی دارد ولی همچنان اختلافاتی در ارائه یک الگوی طراحی واحد دیده می‌شود. بنابراین لازمست برای هر منطقه با در نظر گرفتن نتایج آزمایش NEF، شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و متناسب با خصوصیات طرح معیار طراحی فیلتر مانع فرسایش، به طور مستقل پیشنهاد شود.

۸. نتیجه گیری

بررسی‌های انجام شده در این مقاله در رابطه با انتخاب مصالح فیلتر برای سد کبودال نتایج زیر را نشان می‌دهد:

۱. منابع قرضه مورد استفاده در ساختمان سد از خاک‌های سطحی منطقه برداشت شده‌اند که عموماً شامل خاک‌های ریزدانه با دانه‌بندی در حد CL و ML و به لحاظ توزیع دانه‌بندی و خواص خمیری از همگنی نسبتاً زیاد

منابع

- شرکت راه سازی و عمران ایران. ۱۳۸۵. گزارش مشخصات فنی و اسناد سد کبودال، جلد دوم، ۲۰۰ ص.
دانشکده عمران. ۱۳۸۶. گزارش آزمایشات فیلتر مانع فرسایش، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ۹۱ ص.

برخوردار هستند. این خاک‌ها در نتیجه‌ی هوازگی سنگ بستر (شیست‌های گرگان) بوده و به صورت برجا تشکیل شده‌اند.

۲. جهت ارزیابی میزان واگرایی خاک‌های مورد استفاده در فیلتر، نمونه‌های انتخاب شده از خاک منطقه مورد آزمایش پین‌هول و آزمایش هیدرومتری دوگانه قرار گرفتند که ۳ نمونه از ۵ نمونه مورد بررسی به‌طور متوسط واگرا و ۲ نمونه غیر واگرا تشخیص داده شدند.
۳. مقدار D_{15} خاک‌ها بین ۰/۳۵ تا ۰/۷۵ میلی‌متر متغیر بوده که با افزایش D_{15} قابلیت فرسایش‌پذیری ذرات خاک بیشتر می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که تغییرات D_{85} تأثیر قابل توجهی در افزایش و یا کاهش فرسایش‌پذیری خاک نداشته است.
۴. به منظور تضمین عملکرد مانع فرسایش برای لایه‌های فیلتر سد، اندازه D_{15} مصالح تولید شده در کارگاه جهت ساخت فیلتر بایستی کوچک‌تر و یا حداکثر مساوی ۰/۵ میلی‌متر باشد.
۵. در صورتی که مبنای انتخاب نمونه شاخص فیلتر بر مبنای D_{15} برابر با ۰/۴۵ در نظر گرفته شود، نمونه K11 با $D_{85}=0.017$ mm مناسب‌ترین نمونه خاک برای تعیین D_{15} بحرانی فیلتر خواهد بود.

تشکر و قدردانی

از مسئولین محترم شرکت راه‌سازی و عمران ایران (پیمانکار سد مخزنی کبودال) در خصوص همکاری صمیمانه، جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات و انجام بازدیدهای صحرائی تشکر و قدردانی می‌شود.

- مهندسیین مشاور پژوهش. ۱۳۸۲. گزارش نقشه ۲۰۵، آلبوم نقشه‌های پروژه سد مخزنی کبودوال.
- حائری، سید محسن و حسینی، سید عباس. ۱۳۷۹. تعیین معیارهای طراحی فیلتر سدهای خاکی و سنگریز برای هسته مرکزی متشکل از مصالح با دانه‌بندی مخلوط، چهارمین کنفرانس سدسازی ایران، ص ۱۱۶۲-۱۱۵۴.
- Arulandan, K., Perry, E.B., 1983. Erosion relation to filter design criteria in earth dams. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 109(5): 682-698.
- Corps of Engineers, 1994. Earth and rock-fill dams, general design construction considerations, U.S. Department of the Army, EM-1110-2-2300, July.
- Das, B.M., 1994. *Principle of Geotechnical Engineering*, 3rd edition, PWS Publication Company, Boston, 672 p.
- Indraratna, B., Raut, A.K., 2006. Enhanced criterion base soil retention in embankment dam filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(12): 1621-1627.
- Indraratna, B., Vafai, F., Haque, A., 1996. Laboratory and analytical modeling of granular filters. *Proceedings 8th Australia New Zealand Conference on Aeromechanics*, vol. 1, pp. 80-85.
- ICOLD, 1995. *Embankment Dams Granular Filter and Drains, Review and Recommendations*, International Commission on Large Dams, Bulletin No.100,
- Locke, M., Indraratna, B., 2002. Filtration of broadly graded soils-the reduced PSD method. *Geotechnique*, 52(4): 285-287.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., 1989. Critical filters for impervious soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 115(7): 927-947.
- Silviera, A., 1965. An analysis of the problem of washing through in protective filters. *Proceeding 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canada, vol.2, 551-555.
- Soroush, A., Shourijeh, P.T., 2009. A review of the no erosion filter test. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 32(3): 12 pages.
- Yasrobi, S., Azad, A., 2004. Assessment of granular filter functioning in embankment dams. *Proceedings of EuroSoil 2004 conference*, Freiburg, Germany, 8pages.