Archive of SID

نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران, شماره ۲, جلد ۱۸, تابستان ۱۳۸۶, صفحه ۱۱۰-۹۹
ویژه‌نامه مهندسی عمران

مطالعه آزمایشگاهی کارایی فیلتر بر اساس معیارهای طراحی در سدهای خاکی

سید شهاب‌الدین یثربی و علی آزاد

چکیده: دسترسی به روشی که پتانسیل فیلترها را در کنترل فرسایش خاک هسته ارزیابی کرده و یا طراحی نماید، مدتهاست که ذهن پژوهشگران را به خود مشغول کرده است. روش آزمایشگاهی ارزیابی عملکرد فیلتر در برابر روش طراحی بر اساس معیار با پارامترهای ساده دو گروه عمده‌ای هستند که علاوه بر روشهای تحلیلی و عددی، تکنیک‌های اصلی انتخاب و طراحی فیلتر در سدهای خاکی می‌باشند. در این میان آزمایش فیلتر مانع فرسایش NEF و معیارهای شرارد و دانیگان جزو کاملترین و جامعترین تحقیقات در سالهای اخیر می‌باشد. در جریان انتخاب و طراحی فیلتر در چند سد خاکی با هسته رسی، تعدادی آزمایش NEF در آزمایشگاه انجام شد. برخی از نتایج آزمایشات نوعی ناسازگاری با معیارهای موجود را نشان می‌داد. تحلیل‌ها و بررسی‌های انجام شده در این تحقیق عدم وجود پارامترهایی برای کنترل سایر عوامل موثر در عملکرد فیلتر علاوه بر آنهایی که در معیارها وارد شده را علت برتری روشهای آزمایشگاهی به دلیل مدلسازی کامل شرایط واقعی تعیین می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فیلتر، سدخاکی همگن، آزمایش NEF ، معیارطراحی

۱. مقدمه

فیلتر در سدهای خاکی پس از بخش اصلی یعنی هسته نفوذناپذیر، اساسی‌ترین بخش قلمداد می‌شود. این اهمیت به لحاظ نقشی است که در محافظت از خاک هسته بر عهده دارد. به صورت کلی فیلتر نقش حفاظتی در برابر فرسایش و آبشستگی دارد و با مکانیزمی ساده این مهم را انجام می‌دهد. به علاوه فیلتر مناسب توانایی کنترل و ترمیم منافذ و ترکهای ایجاد شده در هسته را نیز داراست. به همین علت 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 مزید بر علت خواهد بود. در میان تمامی روشهای موجود، آنچه که بیش از همه مورد توجه است، روشهای آزمایشگاهی در ارزیابی عملکرد سیستم فیلتر-خاک مبنا و استفاده از معیارهای ساده طراحی است که معمولا منجر به انتخاب فیلتری مناسب خواهند شد. اما نکته قابل توجه توانایی‌های هرکدام از دو روش آزمایشگاهی و روش استفاده از معیار است. استفاده از معیارها روشی بسیار سریع بوده و تنها 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 می‌باشد. در واقع روش آزمایشگاهی، عملکرد موفق یا ناموفق یک سیستم مشخص از فیلتر- خاک مبنا را ارزیابی می‌کند. به همین سبب برای رسیدن به طرحی مناسب نیاز است تا به صورت حدس و خطا تعدادی آزمایش انجام گیرد. آنچه در این تحقیق به آن پرداخته شده است مقایسه‌ای میان این دوگانگی است. مقاله حاضر دربرگیرنده برآیند مطالعات و نتایج آزمایشاتی است که در جریان طراحی و انتخاب فیلتر مناسب برای چندین سد خاکی ناهمگن در کشور توسط نویسندگان این تحقیق انجام شده است. از مجموع آزمایشات انجام شده هشت گروه از ترکیبات فیلتر-خاک مبنا که شاخص‌تر بوده‌اند به عنوان نماینده کل آزمایشات برای ارائه در این مقاله انتخاب شده‌اند. به عبارت دیگر نتایج آزمایشات، حاصل تکرارهای متعددی بوده و صحت آن به اثبات مولفین رسیده است و تنها جهت جمع‌بندی این تحقیق دوباره ۲ الی ۳ بار تکرار

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۱۲/۲۷ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۵/۸/۲۳ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر سید شهاب‌الدین یثربی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، yasrobis@modares.ac.ir
علی آزاد، کارشناس‌ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت مدرس، aliazad_geo@yahoo.com

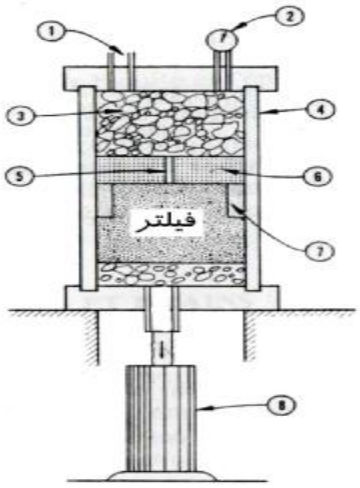
www.SID.ir

Archive of SID

گردیده‌اند. هشت گروه آزمایشات عنوان شده از ترکیب شش نمونه خاک هسته (خاک مبنا) و هفت نمونه فیلتر آماده شده در کارگاه و یا به صورت طبیعی تشکیل شده‌اند. یعنی هر چند هیچ‌کدام از آزمایشات شبیه به هم نمی‌باشند اما ممکن است فیلتر یا خاک هسته در چند آزمایش یکی باشند. آنچه در پی می‌آید مطالعه‌ایست در ارزیابی استفاده از معیارها و توانایی آنها در طراحی فیلتر در سدهای خاکی ناهمگن.

۲. آزمایش فیلتر مانع فرسایش *NEF*

شرارد و همکاران در پایان مطالعات جامع خود پیرامون فیلترها به نوعی آزمایش جدید دست یافتند که تکرارپذیر بود و توانایی خوبی در ارزیابی عملکرد مجموعه‌ای از خاک مبنا-فیلتر را داشت. آزمایش عنوان شده آزمایش فیلتر مانع فرسایش یا *NEF (No Erosion Filter test)* است که امروزه در اکثر آزمایشگاهها موجود است. این آزمایش به صورت کامل در مقاله سال ۱۹۸۹ شرارد و دانیگان [۱] منعکس شده است.
نمای کلی و ابعاد دستگاه آزمایش در شکل ۱ آمده است.



۱. ورودی آب با فشار
۲. فشارسنج
۳. زه‌کش بالایی
۴. استوانه پلاستیکی (قطر۱۰۰میلی‌متر برای خاکهای ریزدانه و قطر ۲۸۰ میلی‌متر برای خاکهای درشت‌دانه)
۵. سوراخ ایجاد شده در خاک مبنا (۱میلی‌متر برای خاکهای ریزدانه و ۵-۱۰میلی‌متر برای خاکهای درشت دانه)
۶. خاک مبنا (به ضخامت ۲۵میلی‌متر برای خاکهای ریزدانه و ۱۰۰میلی‌متر برای خاکهای درشت دانه)
۷. مصالح جداری
۸. ظرف جمع‌آوری آب برای تعیین دبی خروجی

شکل ۱. دستگاه آزمایش *NEF*، [۱]

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 روی آنها تعبیه شده است. از پایین در سلول به ترتیب زه-کش شنی، فیلتر مورد آزمایش که تحت سرباری معادل ۱۰ کیلوگرم و ارتعاش همزمان به تراکم نسبی حدود ۸۰-۱۰۰ درصد رسیده باشد، خاک هسته که در شرایط نزدیک به رطوبت بهینه و دانسیته ماکزیمم متراکم شده باشد و در نهایت لایه زه‌کش شنی قرار می‌گیرد. شرایط بحرانی یا ترک در هسته با یک سوراخ به قطر ۱ میلی‌متر برای خاک ریز دانه و ۵ تا ۱۰ میلی‌متر برای خاک درشت دانه مدل می‌شود. پس از اشباع کردن نمونه و خروج هوای موجود، با ورود فشار آب معادل ۴۲۰ کیلوپاسکال آزمایش شروع شده و حدود ۱۰ دقیقه طول می‌کشد. قطر سوراخ پس از آزمایش و تغییرات دبی و کدورت آب خروجی در مجموع تعیین کننده موفقیت یا عدم موفقیت فیلتر در جلوگیری از فرسایش خاک مبناست. بنابراین فیلتری موفق است که قطر سوراخ موجود در هسته آن تقریبا بدون تغییر باقی بماند، دبی آب در پایان آزمایش ثابت شود و کدورت نیز به سمت شفاف شدن پیش رود. گروهی را نیز می‌توان در دسته نیمه موفق جای داد که قطر سوراخ افزایش کمی داشته باشد ولی در انتهای آزمایش مانع فرسایش شوند. این گروه از فیلترها توانایی استفاده در سدهایی با شرایط بحران کمتر نظیر بندها و سدهای با ارتفاع متوسط و یا فیلترهای غیربحرانی (مثل فیلتر بالادست) که گرادیان هیدرولیکی کمتری را تحمل می-کنند دارا می‌باشند.

۳. معیارهای ارائه شده توسط محققین

محققین زیادی تلاش کرده‌اند تا معیارهای مناسبی را در انتخاب فیلتر پیشنهاد دهند. جدول ۱ تعدادی از این معیارها را که با توجه به دانه‌بندی خاکهای مورد مطالعه در تحقیق حاضر قابل کاربرد هستند نشان می‌دهد. جامع‌ترین آنها، معیارهای شرارد و دانیگان (۱۹۸۹) است که با توجه به نتایج مطالعات آزمایشگاهی *NEF* بدست آمده‌اند (جدول ۲). انتخاب این معیارها بر مبنای محدودیت D_{15} فیلتر با توجه به نوع خاک بکار رفته شده در هسته تعیین شده‌اند. هرچند که معیارهای هونژو برای خاکهای غیرچسبنده ارائه شده اما در بقیه خاکها نیز استفاده می‌شود.

جدول ۱. معیارهای استفاده شده برای مقایسه

محقق یا محققین	سال	محدوده معیار	معیار
هونژو [2]	۱۹۸۹	$\frac{D_{95B}}{D_{75B}} \le 7$	$\frac{D_{15F}}{D_{85B}} \le 5.5 - 0.5\frac{D_{95B}}{D_{75B}}$
شرارد و دانیگان [1]	۱۹۸۹	جدول ۲	
ایندراراتنا [3]	۱۹۹۶	$40 < D_{85B} < 60\ \mu m$	$D_{15F} / D_{85B} \le 5 \sim 5.5$
		$60 < D_{85B} < 90\ \mu m$	$D_{15F} / D_{85B} \le 4 \sim 5$
فستر و فل [4]	۱۹۹۹	شبیه معیارهای شرارد و دانیگان (جدول ۲) با این تفاوت که به جای عدد ۴۰ درصد در مرز گروه ۳و۲ عدد ۳۵ درصد جایگزین می‌شود	

www.SID.ir

Archive of SID

علاوه بر معیارهای بالا که مشخصات نسبی خاک مبنا و فیلتر را بررسی می‌کند، پایداری داخلی فیلتر از دیگر پارامترهایست که در این تحقیق کنترل شده است.

به عبارتی قبل از آنکه فیلتر یا خاک بتوانند در کنار یکدیگر فرسایش را کنترل کنند بایستی دارای شرایط اولیه‌ای باشند. این شرایط برای خاک مبنا خیلی جدی نیست و به جز در موارد خاصی که خاکهای واگرا مشکل آفرین می‌باشند تقریبا از هر خاکی می‌توان کمک گرفت.

جدول ۲. معیارهای طراحی شرارد و دانیگان، ۱۹۸۹ [1]

گروه خاک مبنا	مشخصات	معیار طرح فیلتر
۱	رس و سیلت ریزدانه؛ بیش از ۸۵ درصد ریزدانه*	$D_{15F} \le 9D_{85B}$**
۲	ماسه، سیلت، رس و ماسه رسی یا سیلتی؛ بین ۴۰ تا ۸۵ درصد ریزدانه*	$D_{15F} \le 0.7_{mm}$
۳	ماسه رسی یا سیلتی و شن؛ بین ۱۵ تا ۳۹ درصد ریزدانه*	$D_{15F} \le \frac{40-A}{40-15}(4\times D_{85B}-0.7_{mm})+0.7_{mm}$
۴	شن و ماسه؛ کمتراز ۱۵ درصد ریزدانه*	$D_{15F} \le 4D_{85B}$***

** مقدار عبوری از الک نمره ۲۰۰ (۷۵ میکرون) = A

* اگر D_{85B} 9 از عدد 0.2 mm کمتر شد، از 0.2 استفاده می‌شود.

*** اگر D_{85B} 4 از عدد 0.7 mm کمتر شد، از 0.7 استفاده می‌شود

D_{85B} : قطر نظیر ۸۵ درصد عبوری خاک مبنا در منحنی دانه‌بندی

اما فیلترها قبل از هرچیز بایستی در برابر فرسایش دانه‌های خود مقاوم باشند. پتانسیل فیلتر در نگهداری ریزدانه‌های خود و جلوگیری از فرسایش آنها پایداری داخلی فیلتر تعریف می‌شود.

تعداد محدودی روش در کنترل پایداربودن داخلی پیشنهاد شده است که در میان آنها روش کنی و لو (۱۹۸۵) [۵] جزو جامع‌ترین آنهاست.

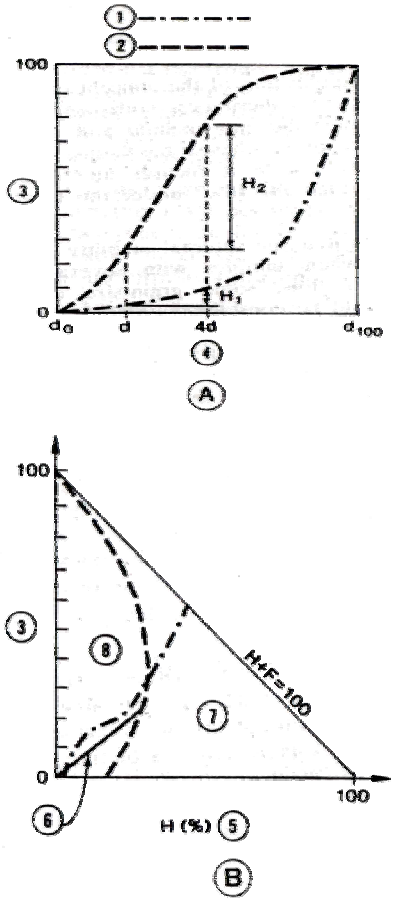
علت برتری این روش آنست که برای دامنه وسیعی خاکهای دانه‌ای ارائه شده و تقریبا در نوع خود بی‌رقیب است و بر همین اساس توسط کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ *(ICOLD)* به عنوان روشی مطمئن پیشنهاد شده است [۶].

این روش با توجه به منحنی دانه‌بندی *(D-F)* منحنی دیگری *(H-F)* که منحنی شکل خوانده می‌شود را تولید میکند که شکل۲ نحوه رسم آن را نشان داده است.

منحنی شکل تولید شده اگر در زیر خط معیار H=F واقع شود در ناحیه پایداری خواهد بود و در غیر اینصورت ناپایدار داخلیست. البته محدوده کنتری برای خاکهای مختلف متفاوت است. برای این منظور کنی و لو دو دسته خاک را معرفی کرده‌اند.

گروه اول خاکهای NG (Narrowly Graded) که به خاکهایی اتلاق می‌شود که دارای ضریب یکنواختی کمتر از ۳ هستند و گروه دوم دارای ضریب یکنواختی بیشتر از ۳ دارند و WG (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 برای خاکهای WG معیارکنترل می‌باشد. یعنی بسته به نوع خاک در محدوده تعیین شده از H مقایسه میان منحنی شکل و خط H=F مشخص کننده پایداریست.



*A: منحنی دانه‌بندی، B: منحنی شکل، 1: فیلتر شماره ۱، ناپایدار داخلی، 2 : فیلتر شماره ۲ ، پایدار داخلی، 3 : درصد وزنی ریزتر، 4 : اندازه دانه‌ها(**d**)، 5: **H**، 6: مرز **H=F**، 7: پایدار، **8** : ناپایدار*

شکل ۲. طریقه رسم و تشخیص پایداری داخلی به روش کنی-لو *[5]*

۴. آزمایش‌های *NEF* انجام شده در این تحقیق

آزمایشات فیلتر مانع فرسایش در قالب ۸ گروه (۶ نمونه خاک مبنا و ۷ نمونه فیلتر) انجام شد. آزمایشات مقدماتی شناسایی نظیر دانه‌بندی الک در هر ۱۳ نمونه و آزمایشات هیدرومتری، حدود اتربرگ و تراکم استاندارد در ۶ نمونه خاک ریزدانه (خاک مبنا) انجام گرفت.

شکل ۳ منحنی‌های دانه‌بندی در ۸ گروه آزمایش را به تفکیک فیلتر و خاک مبنا (Filter, Base Soil) نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳ نیز مشخصات فیلتر مستخرج شده از منحنی دانه‌بندی را آورده است. جدول ۴ و ۵ تمامی پارامترهای معمول بدست آمده از آزمایشات شرح داده شده در خاکهای مبنا را در خود جای داده‌اند.
به طور مشخص جدول ۴ نمایانگر پارامترهایی است که از آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری استخراج شده و جدول ۵ نتایج آزمایش حدود اتربرگ و تراکم استاندارد بدست آمده را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات فیلتر در آزمایشات NEF

شماره آزمایش	D_{10} (mm)	D_{15} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_C	F_C (%)
1	0.07	0.25	0.75	2.3	32.9	0.98	10.2
2	0.25	0.37	0.9	2.7	10.8	0.81	6.2
3	0.18	0.35	1.1	3.7	20.6	0.93	4.9
4	0.07	0.1	0.28	1.2	17.1	0.65	10.6
5-6	0.25	0.4	0.9	2.6	10.4	0.78	4.9
7	0.5	0.6	0.8	1.8	3.6	0.59	0
8	0.25	0.35	0.7	2.2	8.8	0.64	5.1

D_{60} - D_{30} - D_{15} -D_{10} : قطر نظیر ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درصد عبوری
F_c : درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرون) در منحنی دانه‌بندی

$C_u = D_{60} / D_{10}$
$C_c = D_{30}^2 / (D_{60} \times D_{10})$

جدول ۴. مشخصات خاک مبنا در آزمایشات NEF

شماره آزمایش	F_c (%)	درصد رس	درصد سیلت	نسبت درصد رس به سیلت	D_{85} (mm)
1-2	89.1	40	49.1	0.81	0.04
3-4	99.2	32	67.2	0.48	0.026
5	55.1	24	31.1	0.77	0.4
6	85	32	53	0.60	0.075
7	93	26	67	0.39	0.03
8	48.8	24	24.8	0.97	0.8

F_c : درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرون) در منحنی دانه‌بندی
D_{85} : قطر نظیر ۸۵ درصد عبوری در منحنی دانه‌بندی

جدول ۵. خواص تراکم و خمیری خاک مبنا در آزمایشها

شماره آزمایش	$\gamma_{d,max}$ (g/cm3)	ω_{opt} (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
1-2	1.76	20	41	24	17
3-4	1.74	13.2	27	19	8
5	1.85	16	25	13	12
6	1.82	14	37	21	16
7	1.78	17	34	20	14
8	1.91	15	36	20	16

$\gamma_{d,max}$: دانسیته ماکزیمم خشک
ω_{opt} : درصد رطوبت بهینه

LL : Liquid Limit
PL : Plastic Limit
PI : Plastic Index

همانگونه که عنوان گردید آزمایش فیلتر مانع فرسایش در ۸ گروه انجام شد و برای هر هشت گروه، سوراخ ایجاد شده در نمونه با توجه به نوع خاک هسته یک میلی‌متر انتخاب گردید.
برای آنکه از نتایج بتوان برای مقایسه استفاده کرد سایر مشخصات نظیر فشار(گرادیان هیدرولیکی) و تراکم فیلتر و خاک مبنا نیز عینا شبیه مدل پیشنهادی بکار گرفته شده‌اند.
شکل ۴ دو نمونه از آزمایشات موفق و ناموفق را نشان می‌دهد. نتایج آزمایشات نیز در جدول ۶ آمده است.

۵. مقایسه نتایج آزمایشات با معیارهای طراحی

با توجه به نوع خاکهای مبنا در آزمایشات از ۳ معیار برای مقایسه استفاده شده است.
به سبب آنکه معیارهای فستر و فل (۱۹۹۹) در نوع خاکهای مورد آزمایش با معیارهای شرارد مشابهت دارند، از ذکر آن خودداری شده است.
در زیر به ترتیب نتایج آزمایشگاهی با معیارهای مختلف مقایسه شده است.

جدول۶. نتایج آزمایش فیلتر مانع فرسایش

شماره آزمایش	نتیجه آزمایش فیلتر مانع فرسایش	تعداد تکرار آزمایش
۱	ناموفق	۳
۲	ناموفق	۳
۳	نیمه موفق	۳
۴	نیمه موفق	۳
۵	موفق	۲
۶	موفق	۲
۷	موفق	۳
۸	ناموفق	۲

۵-۱. مقایسه با معیارهای شرارد و دانیگان ۱۹۸۹

جدول ۷ نشان می‌دهد که خاکهای مبنای بکارگرفته شده در دو دسته ۱و۲ از معیارهای شرارد جای دارند.
این جدول همچنین نشان می‌دهد که فقط در ۲ مورد از آزمایشات معیار و نتیجه آزمایش همخوانی دارد.
ستون آخر نشان می‌دهد که تقریبا هیچ رابطه‌ای میان موازی بودن دو منحنی دانه‌بندی خاک مبنا و فیلتر وجود ندارد که شرارد نیز به آن اشاره کرده است.

۵-۲. مقایسه با معیارهای هونژو و ایندراراتنا

در بین این دو معیار تنها معیار ایندراراتنا برای دو آزمایش اول همخوانی دارد. در جدول ۸ نتایج این مقایسه آمده است.
مشاهده می‌شود که به غیر از آزمایش ۵ که در محدوده هیچکدام از معیارها نیست، بقیه حداقل در محدوده یک معیار قرار می‌گیرند.

۵-۳. کنترل پایداری داخلی فیلتر

منحنی شکل برای تمامی فیلترهای آزمایش شده در شکل ۵ رسم شده‌اند.
این منحنی‌ها نشان می‌دهند با توجه به جایگیری تمامی فیلترها در گروه *WG* (C_u>3) و قرارگیری تمامی منحنی های شکل در زیر خط معیار در ناحیه صفر تا بیست درصد *H*، همه فیلترها پایدارداخلی می‌باشند.

www.SID.ir

Archive of SID

۶. تفسیر نتایج

هر چند که با توجه به تعداد آزمایشات و نوع نتایج حاصله نمی‌توان به تعمیم روشی کلی پرداخت اما در اینجا سعی شده است تا در هر مورد از آزمایشات به ذکر یافته‌ها و یا جستجوی علت پرداخته شود.

۶-۱. پایداری داخلی فیلتر

همانگونه که قبلا هم عنوان شد تحلیل پایداری داخلی گویای آن است که تمامی فیلترها پایدار بوده و در مواردی که آزمایش ناموفق بوده است می‌توان مطمئن بود که این پارامتر در نتیجه دخیل نمی‌باشد. به همین دلیل باید در جستجوی سایر عوامل موثر بود.

۶-۲. مقایسه معیارها در پیش‌بینی نتایج آزمایش

با دقت در جداول ۷و ۸ مشخص می‌شود که به غیر از گروههای ۱، ۲و ۶ آزمایش *NEF*، در سایر موارد ارضاء روابط در معیارهای سه‌گانه یکسان می‌باشد.

این موضوع نوعی هماهنگی میان معیارها را نشان می‌دهد و شاید بدان علت باشد که در هر سه معیار همانندی مشخصی میان پارامترهای موثر وجود دارد.

جدول۷. مقایسه نتایج آزمایش فیلتر مانع فرسایش و معیار شرارد و دانیگان

شماره آزمایش	گروه خاک مبنا *	معیار مربوط	پارامتر های مورد نیاز معیار		D_{15F} / D_{85B}	ارضای معیار	عملکرد فیلتردر آزمایش NEF	موازی بودن منحنی فیلتر و خاک مبنا
			D_{15F} mm	D_{85B} mm				
۱	۱	$D_{15F} \le 9D_{85B}$	0.25	0.06	4.17	بلی	ناموفق	خیر
۲	۱	$D_{15F} \le 9D_{85B}$	0.37	0.06	6.17	بلی	ناموفق	خیر
۳	۱	$D_{15F} \le 9D_{85B}$	0.3	0.03	10	خیر	نیمه موفق	بلی
۴	۱	$D_{15F} \le 9D_{85B}$	0.1	0.03	3.34	بلی	نیمه موفق	بلی
۵	۲	$D_{15F} < 0.7_{mm}$	0.425	-	-	بلی	موفق	خیر
۶	۱	$D_{15F} \le 9D_{85B}$	0.425	0.075	5.67	بلی	موفق	خیر
۷	۱	$D_{15F} \le 9D_{85B}$	0.6	0.03	20	خیر	موفق	بلی
۸	۲	$D_{15F} < 0.7_{mm}$	0.35	-	-	بلی	ناموفق	خیر

* طبقه‌بندی شرارد و دانیگان (۱۹۸۹)

جدول۸. مقایسه نتایج آزمایش فیلتر مانع فرسایش و معیارهای هونژو و ایندراراتنا

شماره آزمایش	نتیجه آزمایش *NEF*	معیارهونژو					معیار ایندراراتنا	
		D_{75B} mm	D_{85B} mm	D_{95B} mm	D_{15F} mm	ارضای معیار	D_{85B} mm	ارضای معیار
۱	ناموفق	0.012	0.04	0.4	0.25	-	40	خیر
۲	ناموفق	0.012	0.04	0.4	0.37	-	40	خیر
۳	نیمه موفق	0.025	0.026	0.035	0.35	خیر	26	خیر
۴	نیمه موفق	0.025	0.026	0.035	0.1	بلی	26	بلی
۵	موفق	0.22	0.4	2	0.4	-	400	-
۶	موفق	0.038	0.075	0.23	0.4	خیر	75	خیر
۷	موفق	0.02	0.03	0.14	0.6	خیر	30	خیر
۸	ناموفق	0.85	0.8	4.2	0.35	بلی	800	-

اما آنچه که اهمیت دارد یکسانی در ارضاء همزمان معیارها و موفقیت فیلتر است که با عنوان سازگاری میان معیار و نتایج آزمایشگاهی در جدول ۹ مطرح شده است.

باید توجه داشت که در مورد آزمایشات ۳ و ۴ که آزمایشاتی نیمه موفق می‌باشند، برای مقایسه، آزمایش موفق قلمداد شده‌اند. به همین سبب کمتر می‌توان در مورد این آزمایشات اظهار نظر کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۹. سازگاری معیار و نتایج آزمایش NEF

شماره آزمایش *NEF*	سازگاری ارضای معیارها و نتایج آزمایش		
	شرارد و دانیگان	ایندراراتنا	هونژو
۱	خیر	بلی	-
۲	خیر	بلی	-
۳	خیر*	خیر*	خیر*
۴	بلی*	بلی*	بلی*
۵	بلی	-	-
۶	بلی	خیر	خیر
۷	خیر	خیر	خیر
۸	خیر	خیر	خیر

* برای مقایسه، آزمایش نیمه موفق، آزمایشی موفق در نظر گرفته شده است

با توجه به جدول مشاهده می‌شود که تنها معیارهای شرارد و دانیگان در دو مورد آزمایش ۵ و ۶ و معیارهای ایندراراتنا در آزمایش ۱ و ۲ با نتایج آزمایشگاهی سازگار است و در واقع پیش‌بینی درستی از نتایج را در برداشته‌اند.

وجه تمایز اصلی این دو سری از آزمایشات مقدار F_c یا درصد ریز دانه می‌باشد. F_c در آزمایش ۱ و ۲ بالاتر از ۵ درصد و در آزمایش ۵ و۶ پایین‌تر از این مقدار است.

۵ درصد دقیقا مقدار بحرانی ریزدانه است که هم توسط شرارد و دانیگان (۱۹۸۹) و هم توسط فستر و فل (۱۹۹۹) گزارش شده است و توصیه شده که مقدار ریزدانه فیلتر برای عدم تولید پتانسیل ترک در فیلتر کمتر از ۵ درصد باشد.

وجه تمایز دیگر، تفاوت میان درصد رس در خاک مبنای این دو سری از آزمایشات است.

۶-۳. توازی منحنی‌های فیلتر و خاک مبنا

با توجه به آنچه که در جدول ۷ و شکل منحنی دانه‌بندی (شکل ۳) منعکس شده است، در ۳ آزمایش (آزمایشات ۳، ۴و ۷) منحنی فیلتر و خاک مبنا موازی است و در این میان تنها آزمایش ۴ با موفقیت کارایی فیلتر روبرو بوده است.

این در حالی است که در شرایط غیر موازی نیز آزمایشات موفق وجود دارد (آزمایش ۱، ۲، ۵و ۸). با توجه به این نتایج و نظر سایر محققین می‌توان نتیجه گرفت که ارتباط مناسبی میان کارایی فیلتر و موازی بودن این دو منحنی وجود ندارد.

۶-۴. بررسی سایر عوامل

نتایج و مقایسه‌ها ارتباط معینی میان خصوصیات تراکم خاک مبنا و یا حدود اتربرگ با کارایی فیلتر را نشان نمی‌دهند. این نتیجه نیز در تحقیقات شرارد و دانیگان (۱۹۸۹) بیان شده است.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به روشنی نمی‌توان ارتباطی مشخص میان نتایج آزمایشات و معیارها یافت. اما آنچه مسلم است، آنست که معیارهای بکارگرفته شده نتوانسته‌اند تصویری واقعی از عملکرد فیلتر در برابر خاک مبنا ارائه کنند.

از طرفی برخی سازگاری‌ها میان نتایج آزمایشگاه و ارضای معیارها حاکی از وجود توانایی این روابط در پیش‌بینی رفتار فیلتر می‌باشد.

این نکته بدان معناست که نمی‌توان به طور قطع استفاده از معیارها را به عنوان روش‌هایی ناکارا کنارگذاشت بلکه اصلاحات و تحقیقات بیشتری نیاز است تا معیارها را به توانایی کامل جهت انتخاب فیلتری مناسب، هرچند در محدوده و بازه مشخص از خاکها، رهنمون سازند.

به عبارت دیگر این تحقیقات بایستی دامنه توانایی هر معیار را روشن ساخته و اصلاحاتی نو در رفع دامنه ضعف آن بیابد. یافته‌های تحقیق حاضر در همین راستا در سه دسته کلی جای دارد.

۱- کارایی موثر معیارهای شرارد و دانیگان در محدوده درصد ریز دانه کمتر از پنج درصد و بالعکس در مورد معیارهای ایندراراتنا

۲- عدم وجود ارتباط میان موازی بودن منحنی دانه‌بندی خاک‌مبنا و فیلتر و عملکرد فیلتر

۳- عدم وجود ارتباط میان مشخصات تراکم خاک مبنا و یا حدود اتربرگ با عملکرد فیلتر

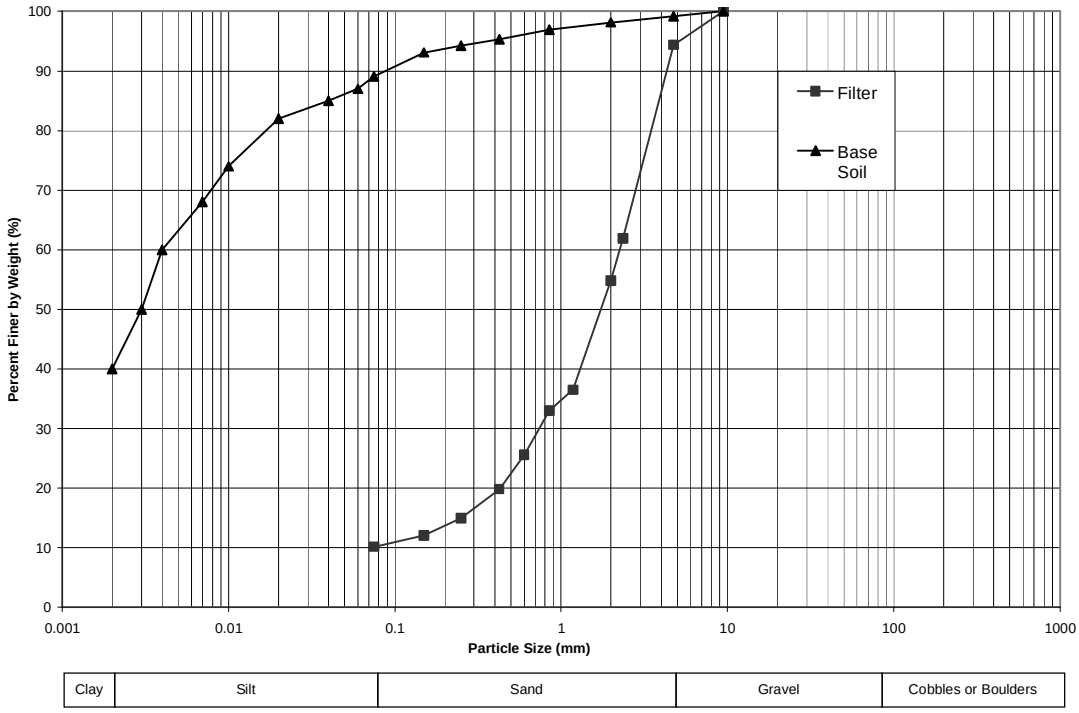
۸. تشکر و سپاس

نویسندگان در اینجا بر خود لازم می‌دانند تا از کلیه عزیزانی که ما را در طول این تحقیق یاری‌رسان بودند تشکر نمایند.

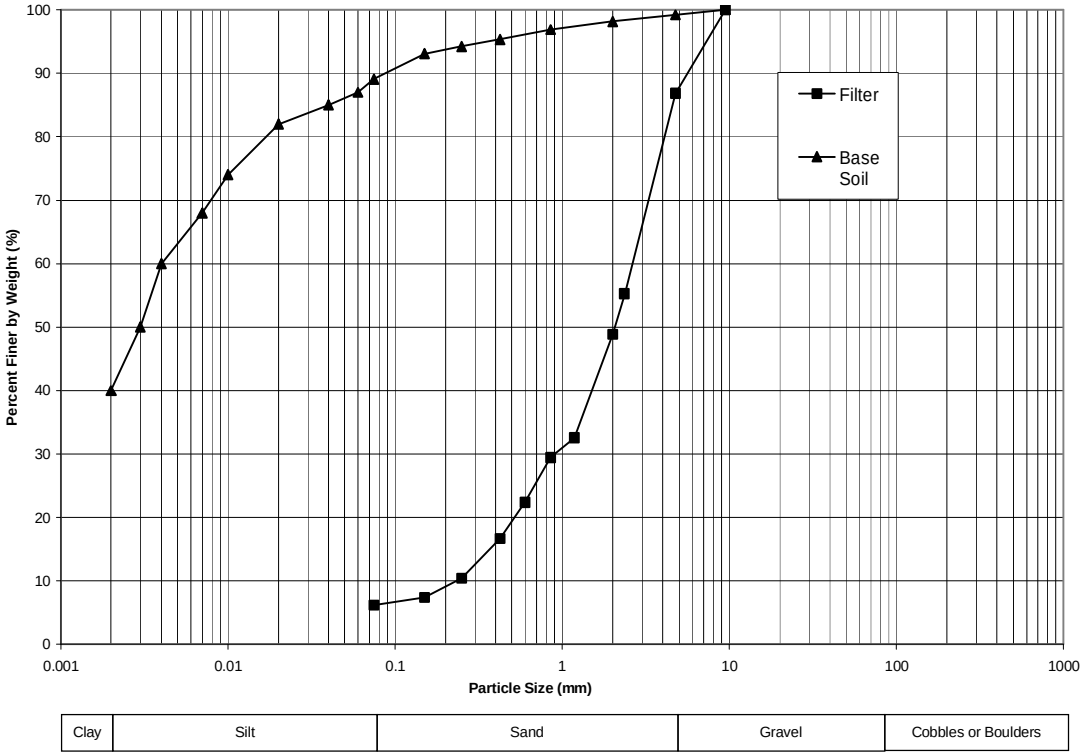
همچنین از آقای مهندس ایمان عشایری که در انتقال تجربیات خود از هیچ تلاشی فروگذار نبوده‌اند صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID



آزمایش ۱ (عملکرد ناموفق فیلتر)

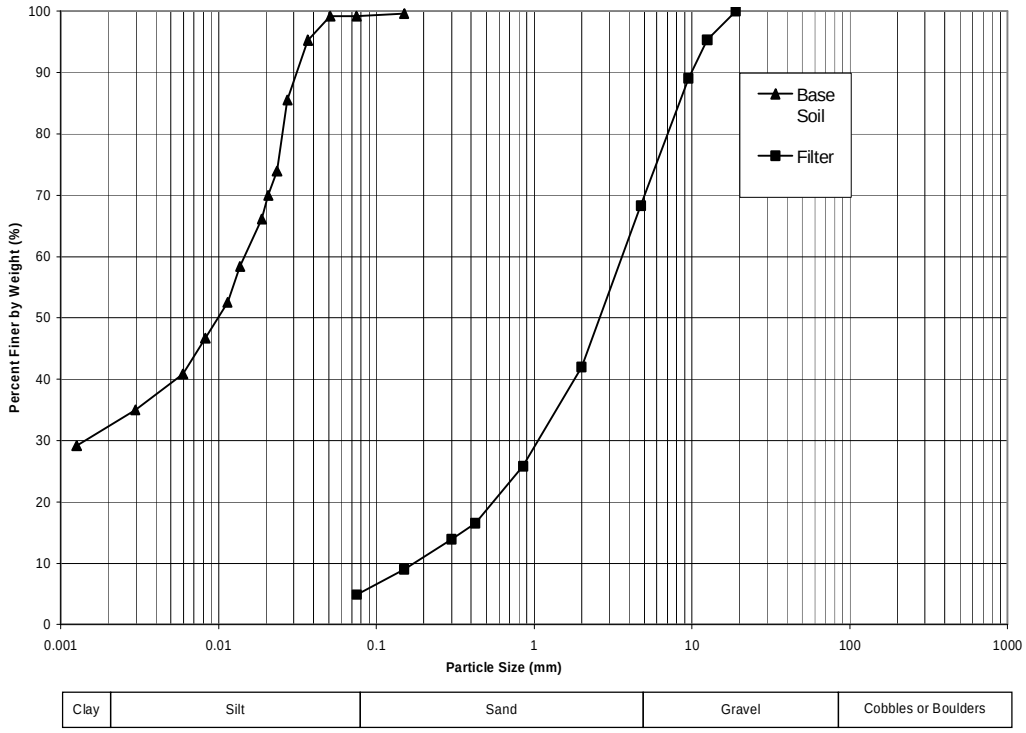


آزمایش ۲ (عملکرد ناموفق فیلتر)

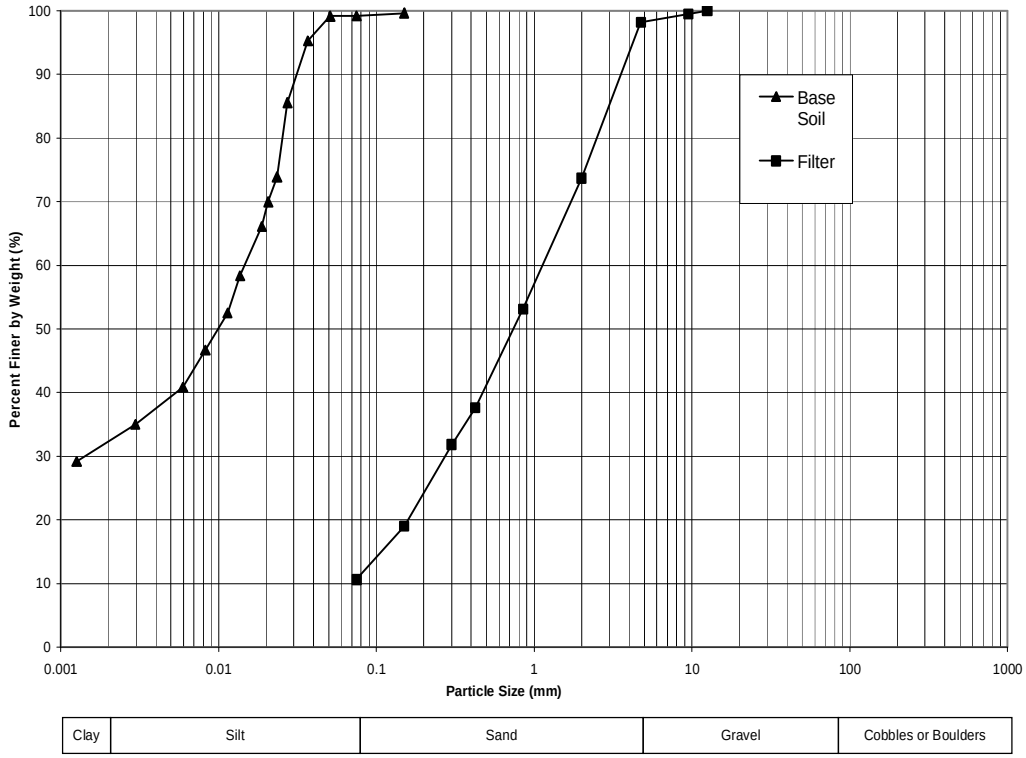
شکل ۳. نمودار منحنی‌های خاک مبنا و فیلتر در آزمایشات انجام شده

www.SID.ir

Archive of SID



آزمایش ۳ (عملکرد نیمه موفق فیلتر)

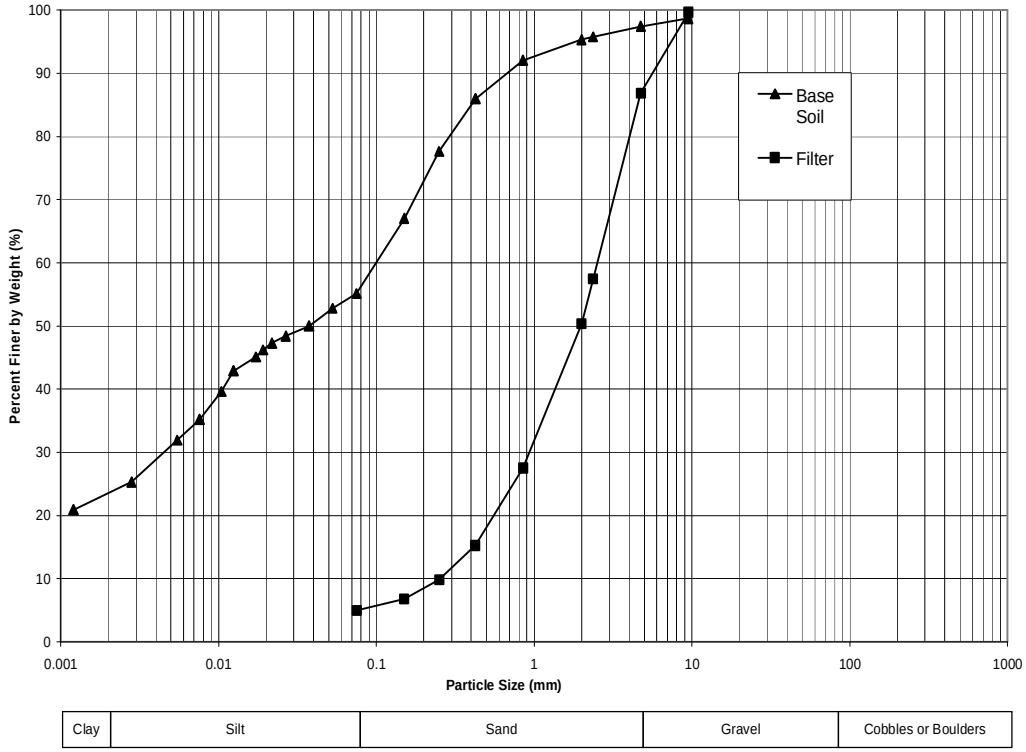


آزمایش ۴ (عملکرد نیمه موفق فیلتر)

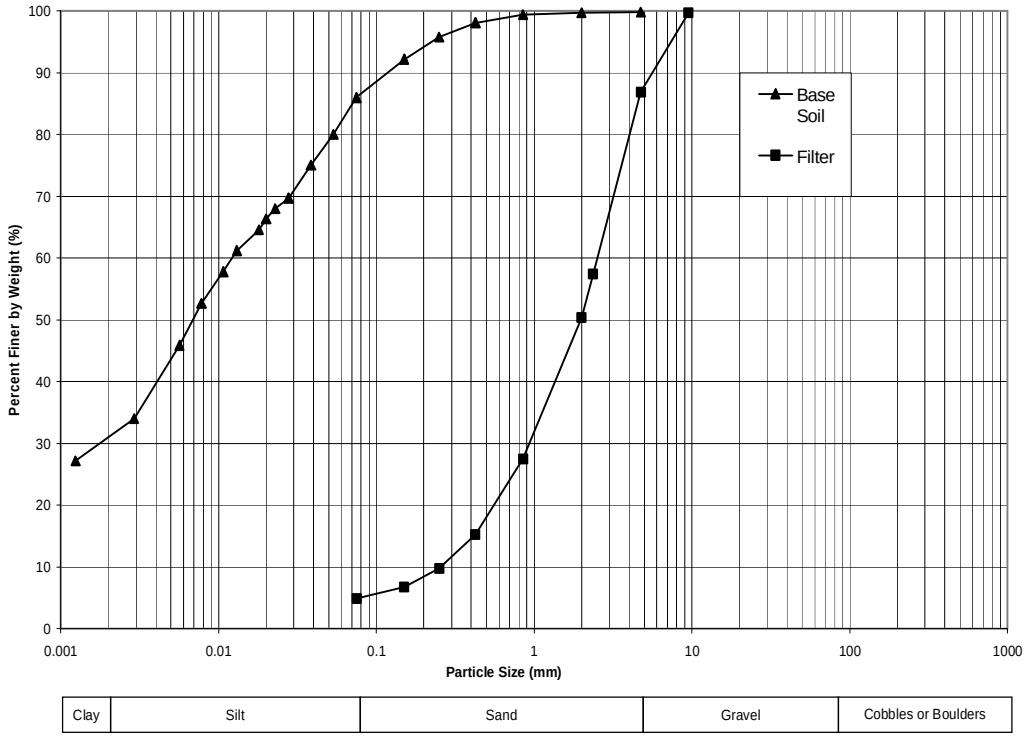
شکل ۳. نمودار منحنی‌های خاک مبنا و فیلتر در آزمایشات انجام شده (ادامه)

www.SID.ir

Archive of SID



آزمایش ۵ (عملکرد موفق فیلتر)

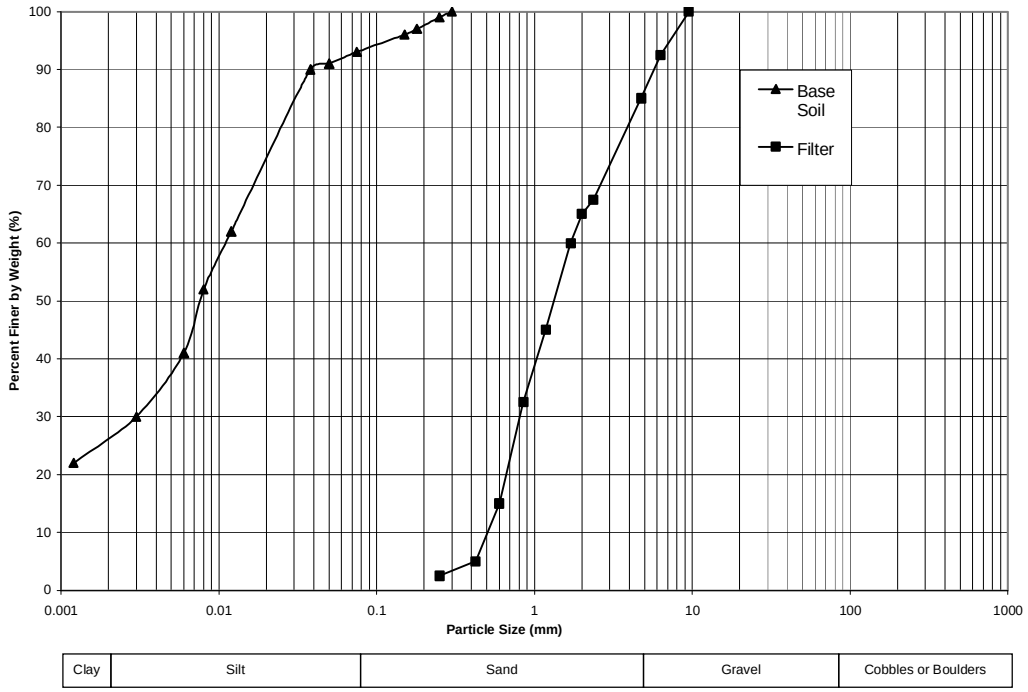


آزمایش ۶ (عملکرد موفق فیلتر)

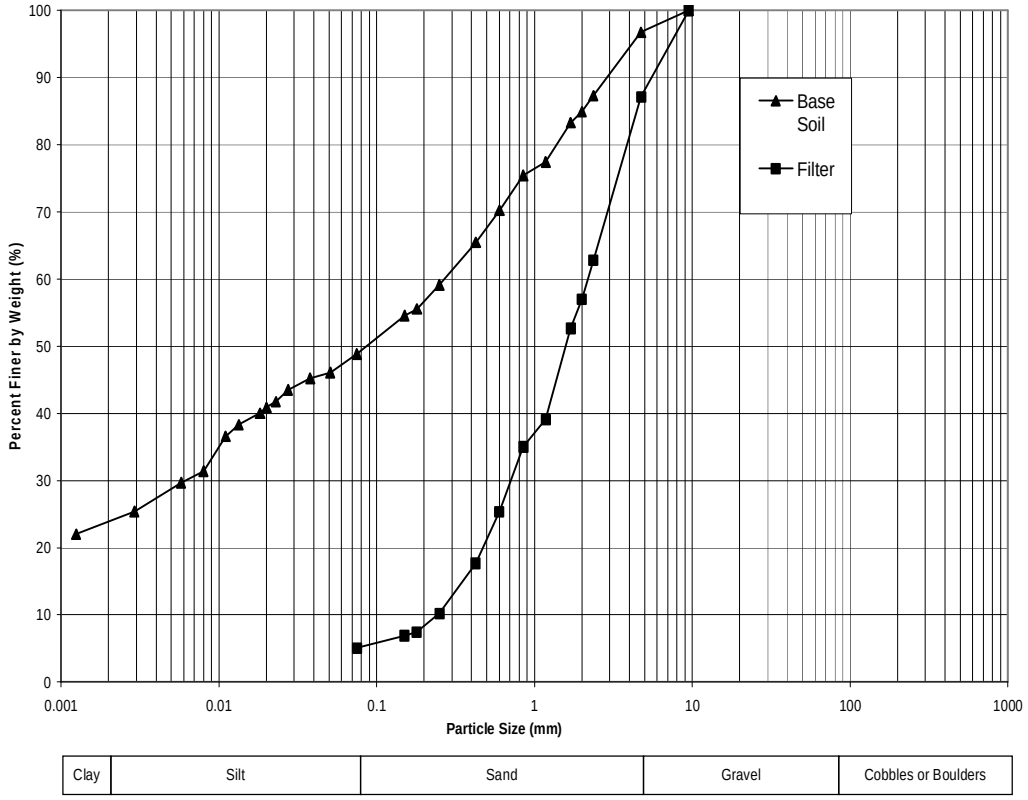
شکل ۳. نمودار منحنی‌های خاک مبنا و فیلتر در آزمایشات انجام شده (ادامه)

www.SID.ir

Archive of SID



آزمایش ۷ (عملکرد موفق فیلتر)

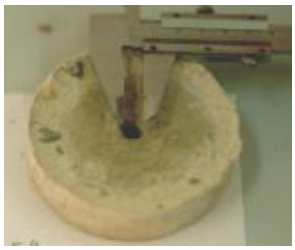


آزمایش ۸ (عملکرد ناموفق فیلتر)

شکل ۳. نمودار منحنی‌های خاک مبنا و فیلتر در آزمایشات انجام شده (ادامه)

www.SID.ir

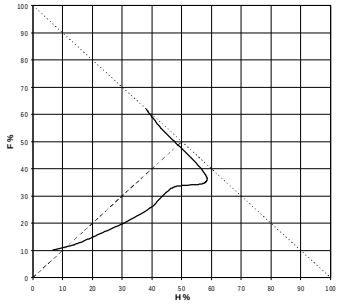
Archive of SID



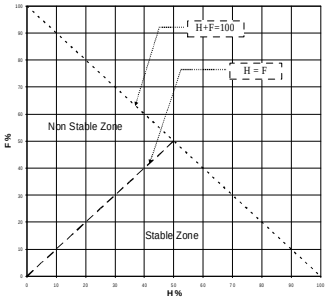
آزمایش ناموفق

آزمایش موفق

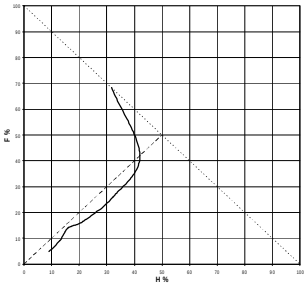
شکل ۴. نمونه خاک هسته بعد از آزمایش *NEF*



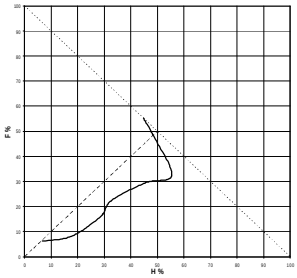
فیلتر در آزمایش ۱



بخش‌های مختلف نمودار

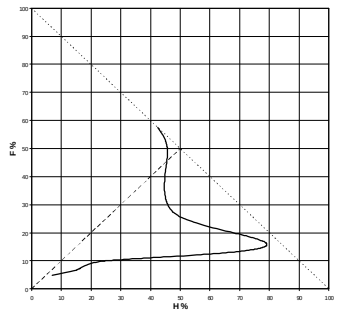


فیلتر در آزمایش ۳

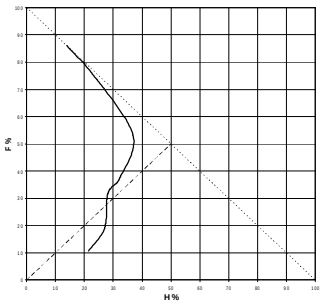


فیلتر در آزمایش ۲

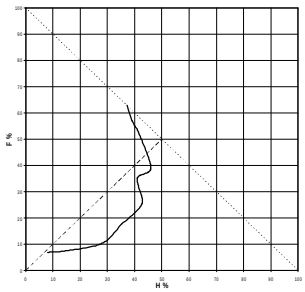
شکل ۵. آنالیز پایداری داخلی طبق روش کنی



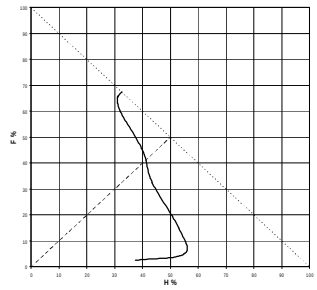
فیلتر در آزمایش ۵ و ۶



فیلتر در آزمایش ۴



فیلتر در آزمایش ۸



فیلتر در آزمایش ۷

شکل ۵. آنالیز پایداری داخلی طبق روش کنی (ادامه)

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

[1] Shererd, J.L., and Dunnigan, P., "*Critical Filters for Impervious Soils*", Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(7), pp. 927-947.

[2] Honjo, Y., and Veneziano, D., "*Improved Filter Criterion for Cohesion Soils*", Journal of Geotechnical Engineering, 1989,115(1), pp. 75-94

[3] Indraratna, B., Vafai, F., and Haque, A., "*Laboratory and Analytical Modelling of Granular Filters*", Proceedings 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Vol. 1, 1996, pp. 80-85.

[4] Foster, M., and Fell, R., "*Filter Testing for Dams- No Erosion and Continuing Erosion Boundaries*", Proceedings 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Vol. 2, 1999, pp. 503-511.

[5] Kenney, T.C., and Lau, D., "*Internal Stability of Granular Filters*", Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22, 215-225.

[6] ICOLD, "*Embankment Dams Granular Filters and Drains*", 1994, Bulletin No. 95.

www.SID.ir