

مروری بر انواع فیلترها از نظر مقاومت در برابر فرار مصالح در سازه های ساحلی و مقایسه آنها



فصلنامه علمی تخصصی

مهندسی و مدیریت ساخت

سال اول، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵

نویسنده مسئول:

امیر ارسلان کرمی متین

آدرس ایمیل:

a.karamimatin@modares.ac.ir

امیر ارسلان کرمی متین
دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
مهدی شفیعی فر
استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده:

فیلترها در بسیاری از سازه های دریایی و هیدرولیکی برای جلوگیری از فرار مصالح و تامین زهکشی به کار می روند. فیلترها در حالت کلی از نظر مقاومت در برابر فرار مصالح بستر به سه دسته هندسه بسته، هندسه باز پایدار، هندسه باز ناپایدار تقسیم بندی می شوند. در فیلترهای هندسه بسته تحت هر مقدار بارگذاری هیدرودینامیکی، فرار مصالح رخ نمی دهد، اما در فیلترهای هندسه باز پایدار امکان فرار مصالح وجود دارد. در فیلترهای هندسه باز ناپایدار نیز مقداری فرار مصالح که مانع از وارد آمدن آسیب جدی به سازه می شود، قابل قبول است. به منظور عملکرد فیلترهای هندسه باز، مطالعات آزمایشگاهی گسترده ای تا به امروز صورت گرفته، اما هنوز هم دانش مختصری در این زمینه در دسترس است. به همین دلیل محققین حوزه هیدرولیک این روش طراحی را در سازه های ساحلی استفاده نمی کنند. لذا هم چنان در سازه های ساحلی، فیلترها به صورت هندسه بسته اجرا و طراحی می شوند. با توجه به اهمیت بسیار بالای لایه فیلتر در سازه های ساحلی، این نوشتار به بررسی پیشینه مطالعاتی در زمینه دسته بندی انواع فیلترها از نظر مقاومت در برابر فرار مصالح بستر و مقایسه آنها می پردازد.

کلمات کلیدی: فیلتر، فیلترهای هندسه بسته، هندسه باز، فرار مصالح، سازه های ساحلی

Challenges Of Integrated Urban Water And Waste Water Management : Case Study Of Romania



JECM
Journal of Engineering &
Construction Management

V. 01 No. 03 - autumn 2016

Corresponding author:
Amir Arsalan Karami Matin

Email address:
a.karamimatin@modares.ac.ir

Amir Arsalan Karami Matin*

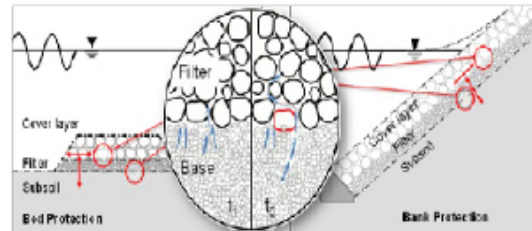
maritime graduate student, Faculty of Civil and Environmental Engineering,
Tarbiat Modarres University

Mehdi Shafieefar

Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modarres
University

۱- مقدمه:

در مهندسی سواحل لایه فیلتر که گاهی زیرلایه نیز نامیده می شود، لایه‌ای است که جهت محافظت از مصالح لایه زیرین یا خاک زیرین در مقابل فرار مصالح ناشی از امواج و جریان‌ها بدون آن که فشار آب حفره‌ای در مصالح لایه زیرین افزایش یابد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیلتر می‌تواند متشکل از مصالح دانه‌ای، ژئوتکستایل، ترکیب ژئوتکستایل با مصالح دانه‌ای باشد. شکل زیر نمونه‌ای از لایه فیلتر در سازه‌های حفاظت بستر و حفاظت شیب می‌باشد.



شکل ۱- نمونه‌ای از فیلتر در سازه‌های ساحلی [۶]

به طور کلی لایه‌های فیلتر اهداف زیر را تأمین می‌کنند:

- ۱- جلوگیری از فرار مصالح هسته در اثر فشارهای منفی ناشی از نوسانات و حرکت سیال درون سازه و کمک به زهکشی. در غیاب لایه فیلتر یا عملکرد نامناسب آن، مصالح لایه زیرین آن فرار کرده و فضاهای خالی در قسمت‌هایی از سازه ایجاد می‌کنند. در واقع سازه پوک و توخالی می‌شود و سطح تاج سازه نشست می‌کند (در موج شکن‌ها) و در نتیجه ممکن است باعث نشست‌های نامتقارن و کاهش تراز تاج سازه گردد.
- ۲- کاهش بارهای هیدرودینامیکی بر روی لایه‌های سنگی خارجی سازه
- ۳- ایجاد سطح مناسب برای احداث لایه پوششی.
- ۴- معانعت از نشست لایه پوششی به داخل لایه زیرین فیلتر و ایجاد بستری پایدار برای لایه پوششی.
- ۵- توزیع مناسب وزن سازه بر روی مصالح بستر.
- ۶- حفاظت از مصالح مغزه در مقابل توفان‌های متوسط طی دوره احداث سازه موج شکن.
- ۷- جلوگیری از نفوذ دانه‌های ریز بستر دریا به داخل موج شکن

۲- انواع فیلترها از نظر مقاومت در برابر فرار مصالح در سازه‌های ساحلی

فیلترها به لحاظ مقاومت در برابر فرار مصالح بستر در سازه‌های حفاظت شیب یا سازه‌های حفاظت بستر در سواحل، به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند: الف) فیلترهای هندسه‌ای بسته (Geometrically closed-Geometrically tight filters)

ب) فیلترهای هندسه‌ای باز پایدار (Stable geometrically open filters)
ج) فیلترهای هندسه‌ای باز ناپایدار یا فیلترهای با فرض فرار مصالح (unstable open filters)

در فیلترهای با هندسه‌ای بسته هیچ گونه فرار مصالح از بستر سازه یا هسته موج شکن تحت اثر هر مقدار بارگذاری هیدرودینامیکی اتفاق نمی‌افتد و در واقع تحت بارگذاری‌های هیدرودینامیکی پایدار است. به عبارت دیگر فواصل بین دانه‌های مصالح فیلتر (یا روزه‌های ژئوتکستایل) آن قدر کوچک هستند که مصالح ریز بستر سازه قادر به انتقال نبوده و نمی‌توانند از لایه مورد نظر فرار کنند.

در فیلترهای با هندسه‌ای باز پایدار، فضای بین دانه‌های فیلتر از اندازه مصالح بستر بزرگتر است و امکان فرار مصالح وجود دارد، اما به طور کلی بارگذاری هیدرودینامیکی کمتر از آن است که بتواند ذرات بستر را از منافذ لایه فیلتر عبور دهد. در واقع بارهای هیدرودینامیکی امواج و هیدرولیکی جریان‌ها کمتر از مقدار نیروی لازم برای شروع حرکت مصالح بستر هستند؛ به همین دلیل فرار ذرات رخ نمی‌دهد.

در فیلترهای با هندسه‌ای باز ناپایدار نیز مانند فیلترهای هندسه‌ای باز پایدار، فضای بین دانه‌های فیلتر از اندازه ذرات بستر بزرگتر است، اما نیروهای هیدرودینامیکی و هیدرولیکی موجود بیشتر از مقدار آستانه حرکت ذرات بستر هستند و به همین دلیل فرار مصالح در این گونه فیلترها رخ می‌دهد.

لازم به ذکر است که منظور از فرار مصالح در سازه‌های حفاظت بستر، فرار مصالح بستر است و در سازه‌های حفاظت شیب مثل موج‌شکن‌ها، فرار هسته یا مغزه است.

۱-۲- فیلترهای هندسه بسته

همانطور که در مقدمه ذکر شد در این فیلترها فرار مصالح تحت هیچ شرایطی رخ نخواهد داد و لایه‌ی فیلتر اغلب با دانه بندی مشخصی که متناسب با فرض تعداد لایه‌های فیلتر در حالت هندسه بسته از نوع هندسه باز پایدار معمولاً بیشتر است و تعداد لایه‌های فیلتر در نوع هندسه باز پایدار نیز احتمال می‌رود از تعداد لایه‌های فیلتر هندسه باز ناپایدار بیشتر باشد.

۱-۱-۲- مروری بر مطالعات فیلترهای هندسه بسته

معیارهای به دست آمده در مطالعات صورت گرفته برای فیلترهای هندسه بسته به منظور جلوگیری از فرار مصالح مغزه در سازه‌های ساحلی به صورت مستند در جدول ۱ ذکر شده است. علاوه بر آن Rankilor (۱۹۸۱) منحنی‌هایی برای طراحی فیلتر به صورت تجربی بدست آورد که در آن نمودار، نسبت $\frac{D_{15}}{d_{15}}$ (d) قطر مصالح فیلتر یا لایه زیرین و D قطر مصالح لایه بالایی است، تابعی از ضریب یکنواختی خاک بستر ($\frac{d_{60}}{d_{10}}$) است و برای جریان‌های دائمی پایدار و تناوبی پایدار نمودار جداگانه‌ای ارائه شده است.

بسیاری از معیارهای به دست آمده برای فیلترهای هندسه بسته که در طراحی سازه‌های ساحلی استفاده می‌شوند، شبیه به روابط فیلتر برای جریان‌های دائمی هستند که برگرفته از معیارهای تریزاقی در طراحی فیلتر است. طبق تحقیقات Sherard (۱۹۸۴)، معیارهای ارائه شده نسبتاً محافظه‌کارانه و برای جریان‌های دائمی هستند. معیار $4-5 < \frac{D_{15}}{d_{15}}$ که جزء معیارهای فیلترهای هندسه بسته است، معیاری بسیار محافظه‌کارانه و با ضریب اطمینان بالایی بدست آمده است (ضریب اطمینان ۲). با این وجود سوالی مطرح می‌شود که آیا این معیار حتی با ضریب اطمینان ۲ می‌تواند معیاری استاندارد و قابل قبول برای سازه‌های ساحلی باشد. به همین منظور، تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ای توسط De Graauw و همکاران (۱۹۸۳) و Molen-Kamp و همکاران (۱۹۷۹) و همچنین Belyashevskii و همکاران (۱۹۷۲) روی فیلترها با شرایط جریان تناوبی (Cyclic Flow) انجام شد، ولی به پاسخی برای این سوال نرسیدند. بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی De Graauw و همکاران (۱۹۸۳) برای پایداری فیلترهای دانه‌ای تحت اثر جریان‌های آشفته و غیر یکنواخت، معیارهای سخت‌گیرانه‌تری برای جریان‌های آشفته دیده می‌شود (طبق گزارش PIANC). هم چنین بدون آن که تعریفی از جریان‌های بسیار آشفته ارائه داده باشد، معیار زیر را ارائه داد:

$$\frac{D_{F50}}{d_{50}} < 3-5 \quad (1)$$

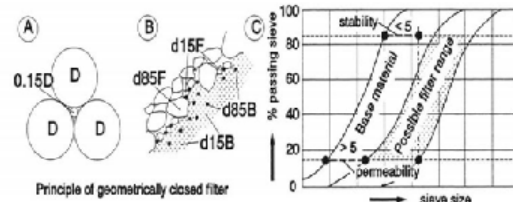
آخرین تحقیقات در مورد فیلترهای هندسه بسته در سازه‌های ساحلی توسط Schiereck (۲۰۰۴) صورت گرفته که منجر به تدوین سه معیار برای طراحی فیلترهای هندسه بسته گردیده است. معیارهای به دست آمده در جدول ۱ ذکر شده‌اند. سه معیار به دست آمده از این تحقیق آزمایشگاهی به ترتیب از بالا به پایین بر اساس پایداری بین لایه فیلتر و لایه بستر، پایداری داخلی و نفوذ پذیری بوده است.

$$\frac{d_{F15}}{d_{s15}} < 5 \quad (2)$$

$$\frac{d_{60}}{d_{10}} < 10 \quad (3)$$

$$\frac{d_{F15}}{d_{s15}} > 5 \quad (4)$$

شکل ۲ نمودار دانه بندی مصالح فیلتر و بستر و نحوه به دام افتادن ذرات بستر را در فیلترهای هندسه بسته نشان می‌دهد.



شکل ۲- بلوکه شدن ذرات بستر و نمودار دانه بندی مصالح فیلتر و بستر [۱۱]

همچنین لازم به ذکر است که تحقیقات Schü renkamp و همکاران (۲۰۱۲) در زمینه طراحی فیلترهای دانه‌ای برای حفاظت سازه‌های فراساحلی در برابر فرار ذرات بستر نشان داد که معیارهای موجود در طراحی فیلترهای هندسه بسته، برای حفاظت این سازه‌ها قابل قبول نبوده و نمی‌تواند سازه‌های فراساحلی را در برابر خطرات ناشی از فرار مصالح ایمن نماید. در جدول ۱ معیارهای موجود برای فیلترهای هندسه بسته در سازه های ساحلی ذکر شده است (D قطر مصالح لایه بالاتر و d قطر مصالح لایه زیرین است).

جدول ۱- معیارهای به دست آمده در فیلترهای هندسه بسته برای سازه های ساحلی

شماره	نام محقق	معیار طراحی فیلتر	نوع سازه ساحلی
۱	Belyashevskii و همکاران (۱۹۷۲)	$\frac{D_{60}}{D_{10}} < 0.2 \frac{D_{30}}{d_{50}}$	فیلترهای سنگی دانه بندی شده
۲	Ahrens (۱۹۷۵)	$\frac{D_{15}}{d_{15}} < 4$	برای زیرلایه های پوشش های ساحلی توده سنگی
۳	Thompson و Shuttler (۱۹۷۶)	$\frac{D_{15}}{d_{15}} < 4$ $\frac{D_{30}}{d_{30}} < 7$ $\frac{D_{15}}{d_{15}} < 7$	برای زیرلایه های پوشش های ساحلی توده سنگی
۴	De Graauw و همکاران (۱۹۸۳)	$\frac{D_{f50}}{d_{350}} < 3-5$	فیلترهای دانه ای تحت بارگذاری جریان های تناوبی
۵	Van Orschot (۱۹۸۳)	$\frac{D_{30}}{d_{30}} < 3$ یا $\frac{N_{50} \text{ mmu}}{W_{50} \text{ fillo}} < 25-30$	زیرلایه های موج شکن های توده سنگی
۶	SPM (۱۹۸۴)	$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$	آرمورهای سنگی دانه بندی شده، پتوهای زهکشی (فیلتر)، لایه های بستر
۷	Engineer Manual (۱۹۸۶)	$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4-5 < \frac{D_{15}}{d_{15}}$	برای لایه زیرین فیلترهای سنگی دانه بندی شده
		$\frac{D_{15}}{d_{15}} < 4$	برای زیرلایه آرمور سنگی
۸		$\frac{d_{f15}}{d_{325}} < 5$ $\frac{d_{60}}{d_{10}} < 10$ $\frac{d_{f15}}{d_{315}} > 5$	سازه های توده سنگی
۹	CEM (۲۰۰۸)	$\frac{D_{15}}{d_{85}} = 4-5$	سازه های توده سنگی

آخرین معیار موجود در جدول ۱ دارد و مبنای طراحی فیلترهای دانه ای در سازه های ساحلی داخل کشور از جمله موج شکن های توده سنگی است. برخی از این معیارها علاوه بر جلوگیری از فرار مصالح مغزه از فیلتر، نفوذپذیری و پایداری داخلی را نیز تامین می‌کنند.

۲-۲- فیلترهای هندسه باز پایدار و ناپایدار

در بندهای قبیل فیلترهای هندسه باز ناپایدار و پایدار توضیح داده شدند. تفاوت این دو نوع فیلتر در مقدار بارهای هیدرودینامیکی وارده در سطح مشترک لایه فیلتر و بستر است. به عبارت دیگر در فیلترهای هندسه باز پایدار، بارگذاری هیدرودینامیکی در سطح مشترک فیلتر و بستر آنقدر کاهش می‌یابد که فرار مصالح ریز بستر اتفاق نمی‌افتد. اما در بارهای هیدرودینامیکی بزرگتر از نیروی لازم برای شروع فرار ذرات، امکان فرار مصالح وجود دارد. در فیلترهای هندسه باز ناپایدار، نیروهای وارده بیشتر از مقدار نیروی لازم برای حرکت و فرار ذرات ریز است و مقداری مشخص و قابل پیش بینی، فرار مصالح اتفاق می‌افتد و در نتیجه مقداری نشست رخ می‌دهد. عملکرد این فیلتر به نحوی است که فرار مصالح و نشست ناشی از آن به مقدار مشخصی که برای سازه ایجاد ناپایداری نکند، محدود می‌شود. همچنین ممکن است تعداد لایه‌های فیلتر در فیلترهای هندسه باز ناپایدار نسبت به حالت هندسه باز پایدار کاهش یابد.

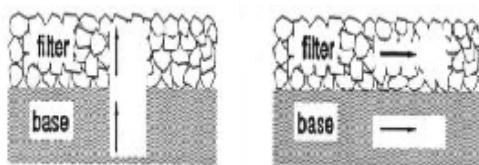
۲-۲-۱- تحقیقات پیشین در زمینه فیلترهای هندسه باز

از اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی تحقیقات جدیدی روی فیلترهای هندسه باز انجام شد. تعدادی از این مطالعات آزمایشگاهی روی فیلترهای هندسه باز پایدار صورت گرفت. نتیجه حاصل شده منجر به طراحی اقتصادی تر لایه فیلتر گردید. از آنجا که فرار مصالح مغزه در این نوع فیلترها (هندسه باز پایدار) اتفاق می‌افتد، نیاز به بررسی گسترده تر و تحقیقات آزمایشگاهی دقیق تری در مورد پدیده فرار مصالح و شرایط موثر در شروع فرار ذرات دیده می‌شود. در این فیلترها، پایداری زمانی مفهوم پیدا می‌کند که مقدار بسیار ناچیزی فرار ذرات در طول عمر مفید سازه دیده شود.

عمده تحقیقات فیلترهای هندسه باز برای حالت ناپایدار بوده و بررسی عملکرد هندسه باز پایدار به تعداد کمی محدود شده است. علت محدودیت مطالعات در این زمینه را شاید بتوان نزدیک بودن عملکرد این فیلترها در فرار مغزه نسبت به حالت هندسه بسته دانست.

در طول سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ تحقیقات متعددی برای به دست آوردن معیار شروع حرکت ذرات مغزه در فیلترهای هندسه باز انجام شد. دو نوع جریان متفاوت در بررسی رفتار این فیلترها دیده شد. ۱- جریان موازی در مرز بین فیلتر و بستر و ۲- جریان عمود بر مرز بین فیلتر و بستر. شکل ۳ این مسئله را به تصویر کشیده است. بارگذاری ناشی از این جریان‌ها می‌تواند دائمی و تناوبی (امواج) باشد. تعدادی از تحقیقات فقط به بررسی جریان‌های موازی و بعضی دیگر به جریان‌های عمود بر مرز فیلتر و بستر پرداختند. در نهایت ۴ حالت بارگذاری در بررسی این فیلترها به صورت زیر وجود دارد:

- جریان‌های دائمی موازی با سطح مشترک فیلتر و بستر
- جریان‌های تناوبی موازی با سطح مشترک فیلتر و بستر
- جریان‌های دائمی عمود بر سطح مشترک فیلتر و بستر
- جریان‌های تناوبی عمود بر سطح مشترک فیلتر و بستر



شکل ۳- جریان‌های موازی و عمود بر سطح مشترک فیلتر و بستر [۱۱]

لازم به ذکر است که ترکیبی از موارد فوق نیز می‌تواند ایجاد شود. De Graauw و همکاران (۱۹۸۴) با داده‌های حاصل شده از مدل آزمایشگاهی یک سازه حفاظت بستر، به معیاری برای پایداری سطح مشترک فیلتر و بستر دست یافتند. بررسی پایداری از طریق مقدار گرادبان هیدرولیکی بحرانی i_{cr} صورت گرفت. i_{cr} به طور مستقیم در مرز بین فیلتر و بستر با استفاده از

معیارهایی که امروزه برای طراحی فیلترها استفاده می‌شود، شباهت بسیاری به

$$P_2 = \rho_2 \left(\frac{U_{f,cr}}{U_{f,cr}} - 1 \right)^2 \quad (10)$$

ρ_2 چگالی مصالح انتقال یافته

P_2 دبی انتقال بر حسب متر مکعب بر ثانیه بر متر

$U_{f,cr}$ سرعت بحرانی فیلتر بر حسب متر بر ثانیه

$U_{f,cr}$ گرادیان هیدرولیکی بحرانی موازی سطح مشترک بستر و فیلتر این فرمول ها با فرض یک جریان آشفته بوده و گرادیان هیدرولیکی متناسب با مجذور سرعت لایه فیلتر است. روابط فوق نشان می دهند که نرخ فرار ذرات ریز بستر وابسته به $\frac{U_{f,cr}}{U_{f,cr}}$ و $\frac{U_{f,cr}}{U_{f,cr}}$ است. به عبارت دیگر هر چقدر گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده در مرز فیلتر و بستر (موازی مرز) از گرادیان هیدرولیکی بحرانی که نقطه شروع فرار ذرات است، بزرگتر باشد؛ نرخ فرار مصالح بستر، بیشتر است. این موضوع در مورد نسبت سرعت ها نیز صادق است.

Klein Breteler و همکاران (۱۹۹۲) چندین آزمایش نیز روی همان بستر ماسه ای و فیلتر دانه ای، اما این بار تحت بارگذاری تناوبی انجام دادند و مشاهده نمودند روابطی که در گذشته برای شروع فرار ذرات بستر با جریان های دائمی ارائه گردیده، در شرایط جریان های تناوبی نیز می تواند مورد پذیرش قرار بگیرند. مطالعه آزمایشگاهی Halter (۱۹۹۹) به منظور درک بهتر عملکرد فیلترهای هندسه باز با بارهای هیدرودینامیکی امواج صورت گرفت. این تحقیق در فوم موج ساز با امواج منظم و شکسته نشده با هدف یافتن ارتفاع بحرانی امواج برای فرار مصالح بستر و ایجاد ناپایداری در آن شکل گرفت. Halter در تحقیقات خود به نتایج زیر دست یافت:

- مقدار بار هیدرولیکی بحرانی برای ذرات کوچکتر لایه فیلتر نسبت به ذرات درشت تر، مقدار بزرگتری است.

- یک فیلتر ضخیم تر برای جلوگیری از فرار ذرات بستر از یک فیلتر با ضخامت کم، عملکرد بهتری دارد. همچنین ارتفاع بحرانی امواج برای فیلترهای ضخیم تر، بزرگتر است.

- در دوره تناوب های بزرگتر امواج، ارتفاع بحرانی موج کاهش می یابد.

- برای دانه های بزرگتر لایه فیلتر، ارتفاع بحرانی موج، کمتر از حالت بدون فیلتر است.

- در این تحقیق هیچ ارتباط مشخصی بین سرعت های محاسبه شده در لایه فیلتر و شروع حرکت ذرات فیلتر دیده نشد.

- گرادیان هیدرولیکی بحرانی محاسبه شده در این مطالعه کمتر از مقادیر محاسبه شده توسط فرمول De Graauw و همکاران (۱۹۸۴) است.

Sumer و همکاران (۲۰۰۱) آزمایش هایی جهت تعیین شروع فرار ذرات مغزه بر اساس پارامتر شیلدز، از بین بلوک های آرمور که با چیدمان منظم قرار گرفته بودند، انجام دادند. در این مطالعه آزمایشگاهی، لایه فیلتر روی یک بستر ماسه ای و تحت بارگذاری جریان مورد بررسی قرار گرفت. Cokgor و Albayrak (۲۰۰۵) آزمایش هایی شبیه به Sumer و همکاران (۲۰۰۱) با تمرکز روی ایجاد جریان های دائمی غیریکنواخت در بستر انجام دادند. لایه فیلتر در این تحقیق متشکل از مصالح سنگی با قطر ثابت (هم اندازه) بود. این مطالعه با تمرکز روی شروع فرار ذرات مغزه از درون لایه فیلتر بوده است. Cokgor و Albayrak نشان دادند که ذرات انتقال یافته از مغزه به نقاط مشخصی صورت نگرفته است. با این وجود در چند آزمایش، مقدار فرار ذرات اندازه گیری شد، اما به طور کلی حجم ذرات منتقل شده در شرایط گفته شده، مقدار کمی گزارش شده است.

اولین مطالعه روی فیلترهای هندسه باز در موج شکن های توده سنگی توسط Uelman (۲۰۰۶) ارائه گردید. مدل فیزیکی موج شکن توده سنگی با هسته ماسه ای و فیلتر هندسه باز ناپایدار در داخل فوم موج ساز دانشگاه دلفت هلند ساخته شد. امواج برخوردی به سازه، منظم و با ارتفاع ۱۰ سانتی متر و پرپود ۱/۲ ثانیه بوده است. هفت مدل فیزیکی موج شکن توده سنگی با ضخامت های مختلف و قطر اسمی مختلف برای لایه فیلتر داخل فوم اجرا شد. اهداف Uelman از این مطالعه، به دست آوردن رابطه بین نرخ فرار مصالح هسته، شروع فرار ذرات، قطر دانه های هسته، قطر دانه های فیلتر، ضخامت لایه فیلتر و بارهای هیدرولیکی بوده است. Uelman مشاهده نمود که فرار مصالح هسته به صورت بار بستر و بار معلق شکل می گیرد. زمانی که لایه فیلتر ضخیم و اندازه دانه های هسته کوچک اجرا شد، عمدتاً فرار مصالح هسته توسط جریان های ورقه ای صورت گرفت. همچنین با کاهش ضخامت لایه فیلتر و افزایش دانه های آن، نرخ فرار ذرات هسته افزایش یافته و از حالت بار بستر به بر معلق

قرار دادن سنسورهای محاسبه فشار (گرادیان هیدرولیکی حاصل از تغییرات فشار در مقطع مورد نظر بود) محاسبه می شد. به ازای گرادیان هیدرولیکی های بزرگتر از گرادیان هیدرولیکی بحرانی، در سطح مشترک فیلتر و بستر (filter-bed interface)، فرار ذرات شکل گرفته و به تبع آن سازه ناپایدار می شود. در این آزمایش ها برای نسبت ثابت بین قطر مصالح فیلتر و بستر، با افزایش قطر ذرات فیلتر، گرادیان هیدرولیکی بحرانی کاهش می یافت. علت این مسئله بزرگتر بودن سرعت های منفذی (pore velocities) در دانه های درشت فیلتر نسبت به ذرات ریز فیلتر گزارش گردید. همچنین با استفاده از داده های به دست آمده از این مطالعه، رابطه ای تجربی برای گرادیان هیدرولیکی بحرانی به دست آمد:

$$U_{f,cr} = 1.3 d_{50}^{0.57} + 8.3 \times 10^{-4} d_{50}^{-1.2} \quad (5)$$

$$i_{cr} = \left[\frac{0.06}{U_{f,cr}^2 d_{50}^{1/3}} + \frac{U_{f,cr}^2}{1000 d_{50}^{2/3}} \right] U_{f,cr}^2 \quad (6)$$

$U_{f,cr}$ سرعت برشی بحرانی در مصالح بستر بر حسب متر بر ثانیه قطر اسمی

d_{50} مصالح بستر بر حسب متر

i_{cr} گرادیان هیدرولیکی بحرانی موازی سطح مشترک بستر و فیلتر

$\eta_{f,cr}$ تخلخل مصالح فیلتر

d_{15} قطری که ۱۵ درصد ذرات فیلتر از آن ریزتر هستند. محاسبه سرعت

برشی بحرانی با روش شیلدز نشان داد که گرادیان هیدرولیکی بحرانی

در بارگذاری تناوبی همان مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی در بارگذاری

جریان های دائمی (Steady flow) حاصل شده در تحقیق De Graauw

و همکاران (۱۹۸۴) است. بررسیهای Van Os (۱۹۹۸) بعداً نشان داد که

فرار ذرات بستر ممکن است در گرادیان هیدرولیکی های کوچکتر از گرادیان

هیدرولیکی بحرانی محاسبه شده توسط De Graauw اتفاق بیفتد.

Klein Breteler و همکاران (۱۹۸۷) تحقیقات آزمایشگاهی روی فیلترهای دانه ای با بستر ماسه ای تحت اثر جریان های غیردائمی موازی با سطح مشترک فیلتر و بستر انجام دادند. آنها مدل فیزیکی سازه را در داخل فوم موج ساز ساخته و آزمایش های خود را با پرپود دو ثانیه انجام دادند. نتایج نشان داد که برای دوره تناوب های بیشتر از دو ثانیه، مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی، نزدیک به مقادیر خروجی حاصل از فرمول De Graauw و همکاران (۱۹۸۴) می باشد.

Klein Breteler (۱۹۸۹) یک تحقیق آزمایشگاهی روی یک بستر ماسه ای با فیلتر دانه ای تحت اثر جریان دائمی (Steady flow) به انجام رساند. در این آزمایش ها مقدار فرار ذرات ماسه اندازه گیری شده و همچنین سرعت بحرانی در لایه فیلتر ($U_{f,cr}$) و گرادیان هیدرولیکی بحرانی موازی با سطح مشترک فیلتر و بستر در آستانه فرار ذرات بستر محاسبه گردید. بر اساس این مطالعه و تحقیقات انجام شده توسط Den Adel (۱۹۹۲) روابطی برای سرعت بحرانی فیلتر ارائه گردید که مبنای شروع حرکت ذرات بستر تحت جریان های دائمی قرار گرفت.

$$U_{f,cr} = \left[\frac{\rho_s}{\rho} \left(\frac{D_{50}}{v_w} \right)^3 (\Psi \cdot \Omega_s \cdot d_{50} \cdot g)^{0.5} \right]^{1/3} \quad D_{50} < 1mm \quad (7)$$

$$U_{f,cr} = \frac{\rho_s}{0.22} \sqrt{\Psi \cdot \Omega_s \cdot d_{50} \cdot g} \quad D_{50} > 0.7mm \quad (8)$$

گشتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه

ρ_s ویسکوزیته سینماتیکی آب بر حسب متر مربع بر ثانیه ضرایب بدون بعد

C,m که وابسته به قطر اسمی

پارامتر شیلدز برای ذرات بستر

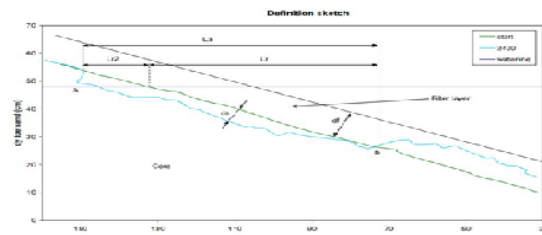
Ω_s چگالی نسبی مغروق مصالح بستر

Klein Breteler و همکاران (۱۹۹۲) بر اساس رابطه ارائه شده برای گرادیان هیدرولیکی بحرانی توسط De Graauw و همکاران (۱۹۸۴)، دو رابطه تجربی برای محاسبه نرخ فرار مصالح بستر (T) بر حسب $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$ در جریان های دائمی به دست آوردند که به شرح زیر است:

$$\rho_s \cdot P_1 \cdot \left(\frac{i}{i_{cr}} - 1 \right)^2 \quad (9)$$

تبدیل گردید. فرار مصالح هسته و عمق آن به طور کلی وابسته به ضخامت لایه فیلتر بوده و همچنین با افزایش ضخامت لایه فیلتر، عمق فرار ذرات و فرسایش کل کاهش یافت.

شکل ۴ مقطعی از موج شکن توده سنگی در مطالعه Uelman و عمق فرار مصالح مغزه را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقطعی از موج شکن توده سنگی در مطالعه آزمایشگاهی Uelman [۴]

Ockeloen (۲۰۰۷) ادامه تحقیقات Uelman (۲۰۰۶) را در دانشگاه دلفت با امواج نامنظم روی موج شکن توده سنگی با هسته ماسه‌ای انجام داد.

Ockeloen ۲ رابطه برای ناحیه فرسایش یافته بر اساس گرادیان هیدرولیکی موازی با شیب سازه، ضخامت نسبی فیلتر $(\frac{d_f}{D_{f50}})$ و شرایط بارگذاری موج ارتفاع امواج، طول موج و تعداد امواج) به شکل زیر ارائه داد:

$$\frac{A_s}{H_{ms}L_0} = 0.16 \sqrt{\frac{N}{m}} \quad \frac{A_s}{H_{ms}L_0} = 0.21 \left(\frac{N}{m} \right)^{0.4} - 0.4 \quad (11,12)$$

A_s سطح مقطع ناحیه فرسایش یافته بر حسب متر مربع
 L_0 طول موج در آب عمیق بر حسب متر
 I_{ms} (گرادیان هیدرولیکی) جذر میانگین مربعات
 m ضخامت نسبی فیلتر
 N تعداد امواج

از محدودیت‌ها و نقاط ضعف این دو رابطه این است که محاسبه گرادیان هیدرولیکی دشوار بوده و در هر دو رابطه وجود دارد. همچنین تأثیر اندازه ذرات هسته در آن دیده نمی‌شود. نتایج مشاهده شده توسط Ockeloen عبارتند از:

- مقدار فرار مصالح هسته متناسب با ریشه دوم تعداد امواج است.
- مقدار نیروی لازم برای آستانه فرار مصالح به دست آمد که در مقادیر کمتر از آن هیچ فراری رخ نمی‌دهد. این آستانه فرار ذرات، منطبق با معیارهای موجود برای طراحی فیلترهای هندسه باز است.
- مقدار فرار ذرات هسته وابسته به ارتفاع و طول موج، گرادیان هیدرولیکی، تعداد امواج و ضخامت نسبی لایه فیلتر است. گرادیان هیدرولیکی تابعی از پارامترهای موج و پارامترهای سازه است.
- پیروید موج تأثیر زیادی روی فرآیند فرار مصالح دارد.

بررسی فیلترهای دانه ای هندسه باز برای یک بستر افقی ماسه‌ای تحت تأثیر امواج و جریان‌ها و ترکیب موج و جریان توسط Van Gent و Wolters (۲۰۱۲) در دانشگاه دلفت انجام پذیرفت. امواج تولید شده توسط فلوم موج ساز با استفاده از طیف جانسواپ با ارتفاع مشخصه ۰٫۲ متر و سرعت جریان تا ۱٫۲۵ متر بر ثانیه ساخته شد. عمق آب در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر ۰٫۴ متر و رژیم جریان نیز آشفته بوده است. Van Gent و Wolters در طول اجرای مدل فیزیکی بستر ماسه‌ای، مقدار فرار مصالح بستر را محاسبه کرده و رابطه بدون بعدی برای نرخ فرار ذرات بستر ارائه دادند:

$$T' = \frac{T/\tilde{h}_s}{\sqrt{AgD_{s0.5}}} \quad (13) \quad \Delta = \frac{\tilde{h}_s}{\tilde{h}_w} - 1$$

چگالی نسبی مغزوق مصالح بستر

تعداد محدودی آزمایش نیز برای بررسی تأثیر اجرای لایه فیلتر روی فرار مصالح بستر انجام گردید. Van Gent و Wolters نتایج ذکر شده در ذیل را مشاهده نمودند:

- فرار مصالح دانه‌ای بستر تابعی از $\frac{z_{95}}{z_{50}}$ بوده و مستقل از شرایط بارگذاری است.

- برای $\frac{z_{95}}{z_{50}} < 3$ ، اگر لایه فیلتر نازک باشد (با ضخامتی حدود ۲ تا ۵ برابر قطر اسمی مصالح)، نرخ فرار ذرات کاهش می‌یابد.

- در شرایط بارگذاری امواج به تنهایی و جریان به تنهایی، نرخ فرار مصالح بستر بسیار پایین است و برای شرایط ترکیب موج و جریان، نرخ فرار افزایش می‌یابد.

- برای $\frac{z_{95}}{z_{50}} > 3$ ، فرار مصالح به مقدار قابل توجهی افزایش یافت. به همین دلیل انتظار می‌رود در پروتوتیپ، فرسایش قابل توجهی در مصالح رخ دهد.

- تأثیر بسیار زیاد ضخامت لایه فیلتر روی فرار ذرات مشاهده شد.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع فیلترها در سازه‌های ساحلی از نظر مقاومت در برابر فرار مصالح تشریح شده و روی پیشینه مطالعاتی هر کدام جداگانه بحث شده است. فیلترها در سازه‌های ساحلی از نظر مقاومت در برابر فرار ذرات بستر به دو دسته هندسه بسته و هندسه باز (پایدار، ناپایدار) تقسیم بندی می‌شوند. تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط محققین مختلف روی مدل فیزیکی سازه‌های حفاظت بستر و موج‌شکن‌های توده سنگی در این مقاله توضیح داده شده است. نتایج حاصل از این تحقیقات و مقایسه آنها عبارتند از:

- در فیلترهای هندسه بسته، فرار مصالح تحت هیچ شرایطی رخ نمی‌دهد و مستقل از بارهای وارده به سازه است.
- بسیاری از معیارهای به دست آمده در تحقیقات پیشین فیلترهای هندسه بسته که امروزه در طراحی سازه‌های ساحلی استفاده می‌شوند، شبیه به روابط فیلتر برای جریان‌های دائمی هستند که برگرفته از معیارهای ترازقی در طراحی فیلتر است.

- استفاده از فیلترهای هندسه باز در سازه‌های توده سنگی می‌تواند تعداد لایه‌های مورد نیاز را در مقایسه با حالت فیلتر هندسه بسته کاهش دهد.

- عمده ترین تفاوت فیلترهای هندسه باز پایدار و ناپایدار این است که در فیلترهای هندسه باز پایدار، امکان فرار ذرات بستر به صورت بالقوه وجود دارد، اما با توجه به لزوم شناخت بارهای هیدرودینامیکی در طراحی، باید نیروی وارده کمتر از مقدار نیروی لازم برای شروع فرار مصالح باشد و در نهایت فرار ذرات رخ نمی‌دهد. اما در حالت هندسه باز ناپایدار، امکان فرار ذرات به صورت بالفعل وجود داشته و حتما مقداری (محدود) اتفاق می‌افتد.

- استفاده از فیلترهای هندسه باز ناپایدار، لزوم نیاز به پیش بینی فرار مصالح و تدوین معیاری برای مقدار قابل قبول آن دیده می‌شود.

- فیلترهای هندسه باز ناپایدار معمولاً از هندسه باز پایدار اقتصادی تر بوده و فیلترهای هندسه باز پایدار از حالت هندسه بسته اقتصادی تر است. همچنین اجرای حالت هندسه باز از هندسه بسته آسان تر است.

- با وجود تحقیقات متعدد در زمینه فیلترهای هندسه باز و به دست آوردن روابط تجربی گوناگون در زمینه مقدار فرار ذرات و آستانه حرکت مصالح، هنوز این روش طراحی مورد قبول متخصصان حوزه هیدرولیک قرار نگرفته است. لذا نیاز به مطالعات گسترده‌تر در این زمینه احساس می‌شود.

- با توجه به تفاوت قابل توجه نرخ فرار ذرات در ترکیب موج و جریان نسبت به جریان به تنهایی و موج به تنهایی، در آزمایش‌های مربوط به فیلترهای هندسه باز باید حتماً ترکیب موج و جریان نیز در نظر گرفته شود.

مراجع

- [1] PIANC: " State- of- the- Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters", Report of WG 40, 2003.
- [2] M. R.A. van Gent, Guido Wolters. Granular slopes with openfilters under wave loading, Coastal Engineering 104 (2015).
- [3] Guido W and M.R.A. van Gent. granular open filters on a horizontal bed under wave and current loading. coastal engineering 2012.
- [4] Uelman E.F., 'Granular geometrically open filters in breakwaters with a sand core'MSc thesis, Delft University of

- Technology, 2006.
- [5] Wouter.J.Ockeloen, Open filters in breakwaters with a sand core, Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2007.
- [6] David.Sch, Hocine .O, Jan. K, Fabian. K. NUMERICAL AND LABORATORY EXPERIMENTS ON STABILITY OF GRANULAR FILTERS IN MARINE ENVIRONMENT.
- [7] Wessel. H. Stability of open granular filters under wave loading. at the Delft University of Technology and the National University of Singapore 2015.
- [8] Halter, W.. (in dutch) "Het gedrag van zakkingsfilters onder de invloed van golfbelasting". MSc. Thesis Delft University of Technology 1999.
- [9] de Graauw, A. F., van der Meulen, T., & van der Does de Bye, M. R. Granular Filters: Design Criteria. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 80-94, 1984.
- [10] van Os, P Hydraulische belastingen op een geometrisch open filterconstructie . MSc. Thesis Delft University of Technology, 1998.
- [11] Schiereck, G. J., & Verhagen, H. Introduction to bed, bank and shore protection. Delft : VSSD, 2004.
- [12] SUMER, B.M., COKGOR, S., & FREDSE E, J, Suction Removal of Sediment from between Armor Blocks, Journal of hydraulic engineering, 293-306, 2001.
- [13] De Graauw, A.F. et al. (1983): Design criteria for granular filters. Waterloopkundig Laboratorium Delft Hydraulics Laboratory. Publication No. 287, Jan. 1983.
- [14] Ahrens, J.P. Large wave tank tests of rip rap stability. TM57-, US Army Corps of Eng., CERC, Fort Belvoir, 1975.
- [15] Belyashevskii, N. N. et al. (1972): Behaviour and selection of the composition of graded filters in the presence of fluctuating flow. Gidrotechniskoe Stroitelstvo, 1972 No. 6.
- [16] SPM (1984): Shore Protection Manual. CERC, Vicksburg 1984.
- [17] Thompson, D.M. and Shuttler, R.M. (1976): Design of rip-rap slope protection against wind waves. CIRIA Report No. 61, Dec. 1976.
- [18] Sherard, J.L. et al.: Basic properties of sand and gravel filters. ASCE, Journal of Geotechn. Eng. Div. Vol. 110, T No. 6, pp 685 - 700, 1984.
- [19] Van Oorschot, J.H. (1983): Breakwater design and the integration of practical construction techniques. Proc. Of Conf. Coastal Structures 83, 1983. ASCE.
- [20] den Adel H. 'Transportmodel voor filters dl 3 parallele stroming'. 1992.
- [21] Klein Breteler, M., Den Adel, H., Koenders, M.A., Placed (pitched) stone revetments. Filter Design Rules, Report M1795/H195, XXI. Delft Hydraulics & Geo Delft, 1992.
- [22] Dixen, F.H., Sumer, B.M., Fredsoe, J. Suction removal of sediment from between armor blocks. II: waves. J. Hydrol. Eng. vol. 134. ASCE, 2008.
- [23] معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری: راهنمای کاربرد ژئوتکتایل در سازه های حفاظتی دریایی؛ نشریه شماره ۵۲۸.
- [24] چگینی، وحید (۱۳۹۰): فرهنگ تشریحی مهندسی سواحل و فیزیک دریا؛ مجموعه کتاب های مهندسی دریا.