

## بررسی لزوم به کارگیری لایه فیلتر در موج شکن های سکویی شکل پذیر

امیر ارسلان کرمی متین<sup>۱</sup>، مهدی شفیعی فر<sup>۲\*</sup>، حسن اکبری<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

a.karamimatin@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت ۹۸/۰۷/۲۵

### چکیده

موج شکن های سکویی شکل پذیر در خارج کشور به صورت دو لایه با آرمور و هسته، ولی در ایران با توجه به شرایط معادن سنگ به صورت سه لایه با آرمور، فیلتر و هسته طراحی و اجرا می شوند. به دلیل اهمیت بالای طراحی و ساخت این سازه ها و اجرای هزینه بر آنها، این پژوهش، با هدف بررسی لزوم اجرای لایه فیلتر و بررسی تأثیر پارامترهای محیطی و سازه ای مؤثر بر فرار مصالح لایه هسته در موج شکن های سکویی صورت گرفته است. پارامترهای مؤثر شامل تعداد امواج، ارتفاع و پرورد امواج، عمق آب پای سازه، ضریب دانه بندی و عرض سکو است. در این راستا مطالعات آزمایشگاهی روی موج شکن های دو لایه و سه لایه تحت اثر امواج نامنظم انجام شده است. مشاهده های آزمایشگاهی نشان داد که در صورت وجود یک عرض سکوی بهینه در موج شکن های سکویی، فرار مصالح لایه هسته اتفاق نمی افتد. در نتیجه نیازی به لایه فیلتر نیست و از این رو می توان با اجرای یک عرض مناسب سکو که در آن فرار مصالح لایه هسته اتفاق نمی افتد و برای موج طرح غالب پایداری سکو نیز حفظ می شود، لایه فیلتر را از این سازه ها حذف نمود. در این پژوهش ضمن بررسی تأثیر عرض سکو بر فرار مصالح هسته و پایداری موج شکن، یک معیار بدون بعد برای ارزیابی آستانه فرار مصالح هسته در موج شکن های سکویی پیشنهاد شده است. همچنین با توجه به شرایط محیطی و سازه ای پژوهش آزمایشگاهی حاضر، برای محاسبه عرض بهینه سکو پیشنهاد می شود که مقدار فرسایش عرض سکو (Rec) از رابطه شکاری و شفیعی فر (۲۰۱۳) محاسبه شود و به آن حداقل به اندازه ۲ تا ۴ برابر قطر اسمی مصالح آرمور اضافه شود. باتوجه به مشکلات اجرای لایه فیلتر و تبعات زمانی و هزینه ای آن، انتخاب عرض بهینه سکو و حذف لایه فیلتر می تواند در کاهش هزینه و زمان اجرای این نوع سازه بسیار مؤثر باشد.

**واژگان کلیدی:** موج شکن های سکویی، لایه فیلتر، فرار مصالح، عرض بهینه سکو.

### ۱- مقدمه

سنگی<sup>۱</sup> از رایج ترین نوع موج شکن های اجرا شده در سراسر دنیا هستند. موج شکن های توده سنگی دارای انواع مختلفی هستند که می توان آنها را به طور کلی به دو دسته سنتی و شکل پذیر تقسیم بندی کرد [1، 2].

موج شکن ها سازه هایی هستند که برای ایجاد آرامش در بندرگاه ها، کاهش انرژی ناشی از امواج و حفاظت از سواحل در مقابل امواج احداث می شوند. از میان انواع موج شکن ها، موج شکن های توده

هیدرولیکی موازی با شیب سازه، ضخامت نسبی فیلتر، شرایط بارگذاری موج (ارتفاع امواج، طول موج و تعداد امواج) ارائه شد. از دیگر نتایج آن می‌توان به تأثیر زیاد پریود موج روی فرآیند فرار مصالح اشاره کرد [6].

از آخرین پژوهش‌هایی که در زمینه فیلترها صورت گرفته، پژوهش آزمایشگاهی فن خنت و ولترز (۲۰۱۸) است. به منظور توسعه تحقیق فن خنت و ولترز (۲۰۱۵)، مطالعات جدیدی روی مدل فیزیکی سه بعدی سازه‌های شیب‌دار سنگریزه‌ای صورت گرفت تا مقدار فرسایش و برافزایش مصالح ماسه‌ای بستر تحت اثر برخورد امواج مایل (زوایای بین صفر تا ۷۵ درجه) ارزیابی شود. همچنین تأثیر مدت طوفان نیز در آزمایش‌ها بررسی شد. مشاهده‌ها نشان داد که با افزایش مدت طوفان، میزان فرسایش و برافزایش مصالح ماسه‌ای افزایش یافت، به طوری که تا حدود ۱۰۰۰۰ موج، میزان فرسایش و برافزایش در حال رشد بوده، اما پس از ۲۵۰۰۰ موج نرخ فرسایش و برافزایش بسیار کم شده و یا حتی متوقف شده است. همچنین زاویه برخورد مایل یکی از پارامترهای مؤثر در فرسایش و برافزایش بوده و با افزایش زاویه برخورد امواج از ۷۵ درجه تا صفر درجه (صفر درجه برخورد عمودی موج است)، میزان فرسایش و برافزایش، افزایش می‌یابد [4، 7].

موج‌شکن‌های سکویی دسته‌ای از موج‌شکن‌های توده سنگی شکل‌پذیر هستند که نیمرخ سمت دریای آن‌ها بر اثر برخورد امواج، دچار تغییر شکل شده و در نهایت شکل پایداری به خود می‌گیرند [8]. موج‌شکن‌های سکویی در کشور ایران به صورت سه لایه (فیلتر، آرمور، هسته) و در خارج کشور به صورت دو لایه (آرمور، هسته) اجرا می‌شوند. در واقع با توجه به وضعیت معادن سنگی در سواحل کشور ایران، مصالح استخراجی از بیشتر معادن شامل مصالح ریزدانه هستند که در عمل از این مصالح در هسته موج‌شکن استفاده می‌شود. به همین دلیل از یک لایه فیلتر بین آرمور و هسته در موج‌شکن‌های سکویی، برای جلوگیری از کشیده شدن مصالح ریزدانه‌ی هسته بر اثر فشارهای منفی ناشی از نوسانات و حرکت سیال درون سازه به سمت لایه درشت دانه آرمور استفاده می‌شود. اجرای لایه فیلتر

بررسی لزوم به کارگیری لایه فیلتر در موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر موج‌شکن‌های توده سنگی با سه لایه آرمور، فیلتر و هسته اجرا می‌شوند. لایه هسته از مصالح مناسب و نسبتاً ریزدانه خروجی معدن ساخته می‌شود. سپس روی هسته لایه میانی یا فیلتر قرار می‌گیرد. لایه فیلتر برای جلوگیری از فرار مصالح هسته و ممانعت از نشست مصالح لایه آرمور به داخل هسته اجرا می‌شود. اصلی‌ترین لایه موج‌شکن‌های توده سنگی که در برابر بارهای وارد شده از طرف امواج دریا مقاومت می‌کند، لایه آرمور است [1].

لایه فیلتر لایه‌ای است که در سازه‌های نفوذپذیر برای جلوگیری از فرار مصالح (بستر) در اثر فشارهای منفی ناشی از نوسانات و حرکت سیال درون سازه استفاده می‌شود [3]. فیلترها به لحاظ مقاومت در برابر فرار مصالح در سازه‌های ساحلی، به سه دسته فیلترهای هندسه بسته<sup>۲</sup>، فیلترهای هندسه باز پایدار<sup>۳</sup>، فیلترهای هندسه باز ناپایدار<sup>۴</sup> یا فیلترهای با فرض فرار مصالح تقسیم‌بندی می‌شوند. در فیلترهای با هندسه بسته هیچ‌گونه فرار مصالح از بستر سازه یا هسته موج‌شکن تحت اثر هر مقدار بارگذاری هیدرودینامیکی اتفاق نمی‌افتد. در فیلترهای با هندسه باز پایدار، بارگذاری هیدرودینامیکی کمتر از آن است که بتواند ذرات بستر را از منافذ لایه فیلتر عبور دهد و در واقع فرار ذرات رخ نمی‌دهد. از سوی دیگر، در فیلترهای با هندسه باز ناپایدار، نیروهای هیدرودینامیکی و هیدرولیکی موجود بیشتر از مقدار آستانه حرکت ذرات هسته هستند و به همین دلیل فرار مصالح در این‌گونه فیلترها رخ می‌دهد [4].

اولین مطالعه روی فیلترهای هندسه باز در موج‌شکن‌های توده سنگی توسط اوالمن<sup>۵</sup> (۲۰۰۶) انجام شد. از اهداف مهم این مطالعه، به دست آوردن رابطه بین نرخ فرار مصالح هسته، شروع فرار ذرات، قطر دانه‌های هسته، قطر دانه‌های فیلتر، ضخامت لایه فیلتر و بارهای هیدرولیکی بوده است. نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش ضخامت لایه فیلتر و افزایش دانه‌های آن، نرخ فرار ذرات هسته افزایش یافته و از حالت بار بستر به بار معلق تبدیل شد [5]. اوکلونن (۲۰۰۷) ادامه پژوهش‌های اوالمن (۲۰۰۶) را با امواج نامنظم انجام داد. در این پژوهش، دو رابطه برای ناحیه فرسایش یافته بر اساس گردادیان

4 Unstable open filters  
5 Uelman

2 Geometrically closed  
3 Stable geometrically open filters

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- محدوده پارامترهای محیطی و سازه‌ای

یکی از نکات قابل توجه در انتخاب دوره و ارتفاع امواج، محدوده تیزی امواج است. بهتر است تیزی امواج حاصل از ترکیب این دو پارامتر، در محدوده پیشنهادی فن در میر (۱۹۸۸) ( $0.015 < S_{om} < 0.07$ ) قرار گیرند [9]. باید انتخاب ارتفاع و پریود امواج طوری انجام شود که در دوره‌های موجود، با کمترین تعداد ارتفاع موج بتوان هم محدوده پیشنهادی تیزی موج و هم بیشترین اعداد بدون بعد پایداری (بین ۱/۵ و ۴ بین ۶۰ تا ۱۰۰) را پوشش داد [10]. در نتیجه، ارتفاع امواج بین ۶/۱ تا ۱۰/۱ سانتی متر و دوره امواج بین ۱ تا ۱/۵ ثانیه انتخاب شد. به دلیل تأثیر قطر اسمی در حدود اعداد پایداری و به منظور برقراری اعداد بدون بعد ذکر شده، یک قطر اسمی برای آرمور با توجه به نکات گفته شده انتخاب شد که برابر ۲ سانتی متر است.

برای انتخاب پارامتر عمق آب باید محدودیت‌های مختلف از جمله عمق فلوم موج آزمایشگاه، کمینه عمق آب برای جلوگیری از شکست امواج در نظر گرفته شود. با در نظرگیری نکات گفته شده، عمق آب ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده و به منظور بررسی اثر عمق آب بر فرار مصالح هسته عمق آب بین ۲۰ تا ۳۰ سانتی متر انتخاب شد.

با توجه به وسعت دامنه اندازه مصالح استخراجی از بیشتر معادن جنوب کشور و استفاده بهینه از بیشتر مصالح استخراج شده از معادن در طراحی و اجرای موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، در آزمایش‌های این پژوهش از دانه‌بندی عریض استفاده شد. همه آزمایش‌های این پژوهش با دانه‌بندی عریض با ضریب دانه‌بندی ۱/۶ (لایه آرمور) انجام شده است. لازم به ذکر است که دانه‌بندی بر اساس الگوی خطی دانه‌بندی فن در میر (۱۹۸۸) صورت گرفته است [9].

در این پژوهش با توجه به اینکه دانه‌بندی لایه فیلتر یکی از پارامترهای مورد مطالعه در لزوم اجرای لایه فیلتر است، از دو نوع دانه‌بندی عریض و بسیار عریض استفاده شده است. در مدل‌های موج‌شکن سکویی از فیلتر با دانه‌بندی عریض با ضریب دانه‌بندی ۱/۷۵ و در مطالعه اثر پارامتر ضریب دانه‌بندی

در این سازه‌ها منجر به ایجاد سازه‌ای متفاوت با سایر موج‌شکن‌های سکویی در دنیا خواهد شد (شکل ۱) [1].

شکل ۱. مقطعی از موج‌شکن سکویی دو لایه و سه لایه

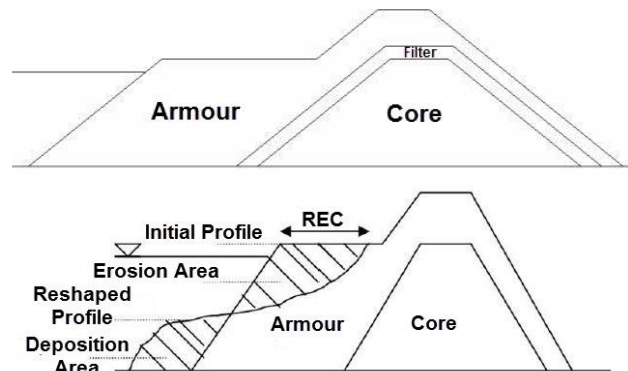


Fig. 1. Cross-section of berm breakwater two layer and three layer

تاکنون هیچ مطالعه‌ای روی لزوم اجرای لایه فیلتر در موج‌شکن‌های سکویی سه لایه صورت نگرفته است. همچنین پژوهش ارائه شده‌ای در زمینه حذف لایه فیلتر در موج‌شکن‌های سکویی دو لایه در دست نیست و تنها مقطعی دو لایه از موج‌شکن سکویی در آیین‌نامه (PIANC 2003) ارائه شده است. پس با توجه به بضاعت معادن کشور، نیاز کشور به ساخت این سازه‌ها و عدم بررسی لزوم به کارگیری لایه فیلتر در موج‌شکن‌های سکویی سه لایه، مطالعه و بررسی در زمینه لزوم اجرای لایه فیلتر در موج‌شکن‌های سکویی در قالب این پژوهش ضروری است. همچنین از آنجایی که اجرای موج‌شکن‌ها از نظر اقتصادی مستلزم صرف هزینه‌های بالایی است، به کارگیری هر گونه طرحی به منظور کاهش هزینه‌های اجرایی، قابل توجه است و می‌تواند مزایای اقتصادی قابل توجهی برای طرح و اجرای موج‌شکن‌های سکویی در داخل کشور داشته باشد.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی لزوم اجرای لایه فیلتر در موج‌شکن‌های سکویی، عوامل مؤثر بر فرار مصالح هسته‌ای موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر (که شامل تعداد امواج  $N$ ، ارتفاع موج  $H_s$ ، پریود امواج  $T_p$ ، عمق آب  $d$ ، ضریب دانه‌بندی لایه فیلتر  $f_g$  و عرض سکوی سازه  $B$  است) و به دست آوردن آستانه فرار مصالح هسته‌ای است.

برای اجرای لایه هسته در مدل آزمایشگاهی موج شکن سکویی، از مصالح با وزن تقریبی کمتر از ۰/۰۱ وزن مصالح لایه آرمور استفاده شده است. مصالح به کار برده شده در لایه هسته، مصالح ماسه‌ای شسته شده با قطر اسمی حدود ۱/۸ میلی‌متر و با وزن مخصوص ۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. در بین پژوهش‌هایی که تاکنون روی مدل‌های موج شکن سکویی صورت گرفته، مصالح لایه هسته این پژوهش آزمایشگاهی جزء ریزترین مصالح است [1]. لازم به ذکر است که در تمام آزمایش‌ها، قطر اسمی مصالح هسته ثابت در نظر گرفته شده و برابر ۱/۸ میلی‌متر بوده است.

برای به حداقل رساندن اثر لزجت (گرانروی) بر اساس توصیه فن در میر (۱۹۸۸) عدد رینولدز  $Re = \frac{D_{n50}\sqrt{gH_s}}{\nu}$  (۱۹۸۸) عدد رینولدز  $Re = \frac{D_{n50}\sqrt{gH_s}}{\nu}$  در محدوده  $10^4 < Re < 4 \times 10^4$  در نظر گرفته شده است [9].

در جدول (۱) حدود تغییرات پارامترهای محیطی و سازه‌ای و در جدول (۲) محدوده پارامترهای بی‌بعد آزمایش‌ها ارائه شده است.

لازم به ذکر است که برای ترکیب پارامترهای ارتفاع و دوره موج در سازه‌های شکل‌پذیر از پارامترهایی مثل تیزی موج ( $S_{om}$ ) و پارامتر  $H_0T_0$  (عدد پایداری) می‌توان استفاده کرد [9]. طبق بررسی‌های صورت گرفته توسط مقیم و همکاران (۲۰۱۱) پارامتر بدون بعد جدیدی ( $H_0\sqrt{T_0}$ ) معرفی شده است. مقیم و همکاران (۲۰۱۱) پارامتر  $H_0\sqrt{T_0}$  را برای لحاظ کردن مناسب اثر توام پارامتر ارتفاع و دوره امواج در موج شکن‌های توده سنگی شکل‌پذیر پیشنهاد نمودند. از این پارامتر می‌توان نتیجه گرفت که اثر ارتفاع امواج یک مرتبه بیشتر از پرئود موج است [12]. پژوهش‌های شکاری و شفیع‌فر (۲۰۱۳) نیز مؤید همین نتیجه بوده است [13].

## ۲-۲- مدل سازی آزمایشگاهی

آزمایش‌ها روی مقطع مدل موج شکن سکویی شکل‌پذیر سه لایه در فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. این فلوم دارای ۱۶ متر طول، ۱ متر عرض و ۱ متر عمق است. در این پژوهش، امواج برخوردی به نیمرخ

بررسی لزوم به کارگیری لایه فیلتر در موج شکن‌های سکویی شکل‌پذیر فیلتر، از دانه‌بندی بسیار عریض با ضریب دانه‌بندی ۲/۶ استفاده شد.

طبق تحقیقات پژوهشگران گذشته و بر اساس توصیه آیین‌نامه PIANC، باید عرض اولیه سکوی سازه مقداری انتخاب شود که پس از فرسایش سکو در اثر موج طرح، حداقل دو تا چهار سنگ در انتهای سکو به صورت تخریب نشده باقی بماند. بنابراین می‌توان مقدار فرسایش سکوی موج شکن سکویی را از یکی از روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف، محاسبه شده و به آن حداقل ۲ تا ۴ برابر قطر سنگ اضافه شود [10، 11]. با توجه به روش گفته شده، مقدار فرسایش عرض سکو تعیین شده و به آن ۲ برابر قطر اسمی مصالح آرمور، افزود شد. بنابراین مقدار عرض اولیه سکو ۲۵ سانتی‌متر انتخاب شد. برای ارزیابی اثر تغییرات عرض سکو روی فرار مصالح هسته، سه عرض اولیه متفاوت ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شد.

ایستایی داخلی، داشتن نفوذپذیری کافی، عدم آب شستگی و فرار مصالح و نیز قابلیت ایجاد تکیه‌گاه مناسب برای لایه آرمور از جمله مواردی هستند که باید در طراحی لایه فیلتر توجه کرد. برای تامین اهداف ذکر شده، باید در مصالح لایه فیلتر معیارهای

پایداری داخلی  $\frac{d_{50f}}{d_{10c}} < 10$ ، شرط فرار مصالح مغزه از فیلتر  $\frac{d_{15f}}{d_{85c}} < (4-5)$  و شرط نفوذپذیری  $\frac{d_{15f}}{d_{15c}} > (4-5)$  برقرار باشند (اندیس f مربوط به لایه فیلتر و اندیس c مربوط به لایه هسته است).

لایه فیلتر با مصالحی با وزن متوسط وزن اسمی مصالح لایه آرمور که حدود ۲ گرم می‌شود ساخته شد. قطر اسمی مصالح لایه فیلتر در آزمایش‌های انجام شده ثابت بوده و برابر ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ضخامت این لایه برابر ۴ سانتی‌متر هم در وجه جلویی و هم در وجه پشتی سازه فرض شده است. برای دانه‌بندی مصالح لایه فیلتر از الک‌های استاندارد استفاده شده است. شماره الک‌های مورد استفاده برای دانه‌بندی لایه فیلتر از بالا به پایین اینچ و الک شماره ۴ بوده، طوری که مانده بین این دو الک به عنوان مصالح لایه فیلتر استفاده می‌شوند. همچنین وزن مخصوص مصالح این لایه برابر ۲۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جنس مصالح از نوع سنگ‌های رسوبی است.

جدول ۲. محدوده تغییرات پارامترهای بدون بعد

Parameter	Range of parameter
$H_0$	1.67 to 3.25
$T_0$	17.44 to 29.96
$H_0\sqrt{T_0}$	34.35 to 97.37
$Re(\div 10000)$	
N (number of waves)	1000 to 12000
$B/D_{n50}$	10 to 18.5

Table 2. Range of dimensionless parameters

جدول ۳. مشخصات مصالح استفاده شده در مدل آزمایشگاهی موج شکن

	Armour layer	Filter layer	Core
$D_{n50}(m)$	0.02	0.01	0.0018
$f_g = D_{n85}/D_{n15}$	1.6	1.75	1.57
Mass density $\rho_a (kg/m^3)$	2550	2550	1800

Table 3. Material properties

شکل ۲. مقطعی از مدل آزمایشگاهی اجرا شده از موج شکن سکویی با لایه فیلتر و بدون فیلتر



Fig. 2. Cross-section of berm breakwater with filter and without filter.

مدل موج شکن سکویی شکل پذیر از نوع امواج نامنظم با طیف انرژی جانسواپ<sup>۶</sup> بوده که ضریب  $\gamma$  در آن برابر  $3/3$  در نظر گرفته شده است. در طول کانال ۴ حسگر ارتفاع سنج نوع مقاومتی به کار گرفته شد که توانایی ثبت تغییر ارتفاع سطح آب را با دقت یک میلی متر دارند.

به منظور برداشت نیمرخ اولیه سازه و تغییر شکل یافته آن، از تراز سنج نصب شده در بالای فلوم استفاده می شود. در جدول (۳) مشخصات مصالح استفاده شده در مدل آزمایشگاهی موج شکن سکویی ذکر شده و در شکل (۲) تصویری از مدل موج شکن سکویی دو لایه (غیر ایرانی) و سه لایه (ایرانی) نمایش داده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا تعداد امواج برخورد کننده با هدف تعیین مدت زمان لازم برای تابش امواج به مدل مقطع سازه مشخص شده و سپس تأثیر پارامترهای مختلف محیطی و سازه ای مختلف بر فرار مصالح هسته بررسی می شود. پس از بررسی اثر پارامترها و تحلیل نتایج به دست آمده، پارامتر بدون بعدی برای آستانه فرار مصالح هسته در موج شکن های سکویی ارائه داده می شود. در جدول (۴) چیدمان آزمایش ها و جزئیات مربوط به آنها منعکس شده است.

جدول ۱. محدوده تغییرات پارامترهای محیطی و سازه ای در مدل موج شکن سکویی

Parameter	Range of parameter
Wave height $H_s(m)$	0.061 to 0.101
Peak wave period $T_p(s)$	1 to 1.5
Berm width $B(m)$	0.2 to 0.30
Water depth at the toe of structure $d(m)$	0.2 to 0.3
Stone grading (Filter layer) $f_g$	1.75 , 2.6
Front slope below and above berm	1:1.25

Table 1. Range of sea state and structural parameters in berm breakwater

انجام شده در حین آزمایش بررسی شده قرار گرفت. در حین برخورد ۴ آزمایش اول که با هدف تعیین مدت زمان تعادل سازه بوده است، فرار مصالح هسته رخ نداد و همچنین به آستانه فرار نیز نرسید. برای حصول اطمینان بیشتر از عدم تأثیر تعداد امواج یا مدت طوفان بر فرار مصالح، دو آزمایش دیگر با تعداد امواج بیشتر که به ترتیب ۸۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ موج بود، انجام گرفت. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که در این دو آزمایش نیز نه تنها فرار مصالح رخ نمی‌دهد، بلکه مصالح به آستانه فرار نیز نمی‌رسند.

شکل ۳. درصد فرسایش عرض سکو در هر تعداد موج نسبت به حالت نهایی برای یک ترکیب ثابت ارتفاع و پریود موج

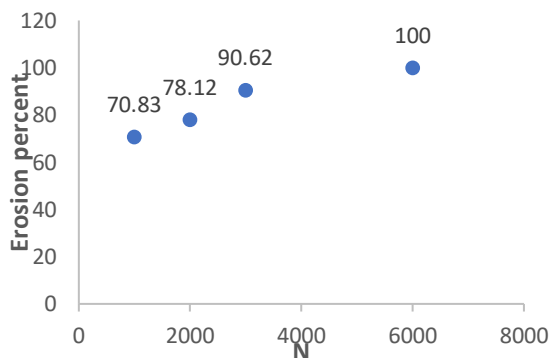


Fig. 3. Berm recession percentage in different number of waves in comparison to ultimate state for a invariable combination of wave height

### ۳-۲- تأثیر ارتفاع و پریود موج بر فرار مصالح هسته موج شکن‌های سکویی

آزمایش‌ها با ارتفاع امواج برخوردی ۶/۱، ۸ و ۱۰/۱ سانتی‌متر و پریود امواج ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ ثانیه انجام شده است. در این آزمایش‌ها عرض سکو ۲۵ سانتی‌متر و عمق آب ۲۵ سانتی‌متر بوده است. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که ترکیب امواج مختلف در مدل آزمایشگاهی مطالعه شده با دانه‌بندی در نظر گرفته شده برای مصالح سازه، تأثیری بر فرار مصالح هسته ندارند. دلیل این مسئله به این صورت است که سکوی موج شکن سکویی با عرض مناسب به دلیل داشتن حجم زیادی از مصالح سنگی با محیط متخلخل باعث استهلاک انرژی امواج برخورد کننده و در نتیجه بی اثر کردن نیروهای محرک وارد بر لایه‌های زیرین می‌شود. پس ذرات ریز لایه

بررسی لزوم به کارگیری لایه فیلتر در موج شکن‌های سکویی شکل پذیر جدول ۴. برنامه انجام آزمایش‌ها برای شرایط محیطی و سازه‌ای مختلف

Parameter	N	$H_0\sqrt{T_0}$	$\frac{d}{D_{n50}}$	$\frac{B}{D_{n50}}$	$f_g$	$\frac{D_a}{D_c}$	Number of tests
N	6	1	1	1	1	1	6
$H_s, T_p$	1	6	1	1	1	1	6
d	1	3	2	1	1	1	6
$f_g$	1	6	1	1	2	1	12
B	1	6	1	2	1	1	12
$B_{opt}$	1						4

Table 4. Test program for various sea state and structural conditions

### ۳-۱- تعیین مدت زمان تعادل و تأثیر تعداد امواج بر فرار مصالح هسته

به منظور تعیین مدت زمان لازم برای تابش امواج به مقطع سازه (مدت زمان تعادل) و بررسی هم زمان تأثیر تعداد امواج بر فرار مصالح هسته از طریق مشاهده‌های آزمایشگاهی، ۶ آزمایش انجام شد. این آزمایش‌ها در یک شرایط ارتفاع و پریود موج ثابت صورت گرفته و نتایج آن در شکل (۳) ارائه شده است. تعداد امواج برخوردی برای تعیین مدت تعادل ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ موج و برای بررسی تأثیر آن بر فرار مصالح، علاوه بر این ۴ آزمایش، ۲ آزمایش دیگر با تعداد امواج ۸۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ موج انجام شده است.

همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش تعداد امواج برخوردی به سازه، مقدار فرسایش عرض سکو افزایش یافته، اما مقطع سازه در نهایت به یک تعادل نسبی رسیده است؛ به شکلی که تفاوت بین مقدار فرسایش برای ۳۰۰۰ موج و ۶۰۰۰ موج ناچیز است. ملاکی که برای تعیین مدت زمان آزمایش یا مدت زمان تعادل سازه در نظر گرفته شده، رسیدن به ۹۰ درصد تغییر شکل است. به این منظور مقطع سازه تحت برخورد امواجی با تعداد بین ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ قرار داده شد و بعد از هر برخورد، نیمرخ تغییر شکل یافته برداشت شد و این عمل تا زمانی که دو عرض فرسایش یافته متوالی تفاوت ناچیزی داشته باشند ادامه یافت. سپس با توجه به عرض فرسایش یافته نهایی، تعداد امواجی که باعث ۹۰ درصد فرسایش و تغییر شکل نهایی شده، به عنوان مدت زمان تعادل مقطع سازه در نظر گرفته شد.

برای مطالعه تأثیر تعداد امواج بر فرار مصالح هسته، مقطع مدل موج شکن سکویی ساخته شده در فلوم از طریق مشاهده‌های

کاهش تنش‌های ناشی از برخورد موج به دانه‌های لایه‌های زیرین توسط سکوی سازه است که در قسمت قبل نیز به آن اشاره شد.

#### ۴-۳- تأثیر ضریب دانه‌بندی لایه فیلتر بر فرار مصالح

##### هسته

در این آزمایش‌ها ضریب دانه‌بندی لایه فیلتر برابر ۱/۷۵ و ۲/۶ است که به ترتیب دانه‌بندی عریض و بسیار عریض محسوب می‌شوند. همچنین ارتفاع موج ۶/۱، ۸ و ۱۰/۱ سانتی‌متر و پرید موج ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ ثانیه، عمق آب پای سازه ۲۵ سانتی‌متر و عرض سکو ۲۵ سانتی‌متر بوده است. با استناد بر مشاهده‌های آزمایشگاهی در شرایط محیطی و سازه‌ای تحقیق حاضر با تغییر ضریب دانه‌بندی لایه فیلتر، فرار مصالح رخ نداده و صرف وجود لایه فیلتر در موج‌شکن‌های سکویی با هر دانه‌بندی، فرار مصالح رخ نمی‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت اصولاً لایه فیلتر در عدم فرار مصالح هسته تأثیر دارد. در واقع شرایط زوال انرژی امواج برخوردی به مدل سازه با دانه‌بندی بسیار عریض، شبیه مدل موج‌شکن با دانه‌بندی عریض است و توده سنگی متخلخل، به اندازه کافی استهلاک انرژی امواج تابشی را فراهم می‌کند تا باعث جابجایی و فرار مصالح هسته نشوند.

#### ۵-۳- اثر عرض سکو بر فرار مصالح هسته در موج‌شکن

##### سکویی

به‌منظور بررسی اثر عرض اولیه سکو بر فرار مصالح هسته در موج‌شکن سکویی دو لایه، ابتدا برنامه‌ریزی برای اجرای مقطع سازه با دو عرض ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر صورت گرفت. اما از آنجا که فرار مصالح در عرض ۲۵ سانتی‌متر مشاهده نشد، از بررسی اثر افزایش عرض سکوی موج‌شکن بر فرار ذرات ریز هسته صرف نظر نموده و فقط اثر کاهش عرض سکو مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه تأثیر عرض سکوی سازه با رسیدن به دو هدف انجام شد. هدف اول بررسی تأثیر عرض اولیه سکوی موج‌شکن سکویی بر فرار مصالح هسته و تعیین آستانه فرار مصالح است. هدف دوم این است که با توجه به پراکندگی زیاد بین روابط موجود در تخمین عرض سکو، یک عرض بهینه برای سکوی موج‌شکن برای بحرانی‌ترین شرایط

هسته تحت اثر نیروهای برخوردی امواج، به حرکت در نیامده و در واقع فرار مصالح رخ نمی‌دهد.

شکل (۴) مقطع قبل و بعد از برخورد موج با ارتفاع ۱۰/۱ سانتی‌متر و دوره ۱/۵ ثانیه را که بزرگترین ترکیب موج است، نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که فرار مصالح هسته در مقطع رخ نداده است.

شکل ۴. مقطع قبل و بعد از برخورد موج با ارتفاع ۱۰/۱ سانتی‌متر و

پرید ۱/۵ ثانیه به مدل موج‌شکن سکویی

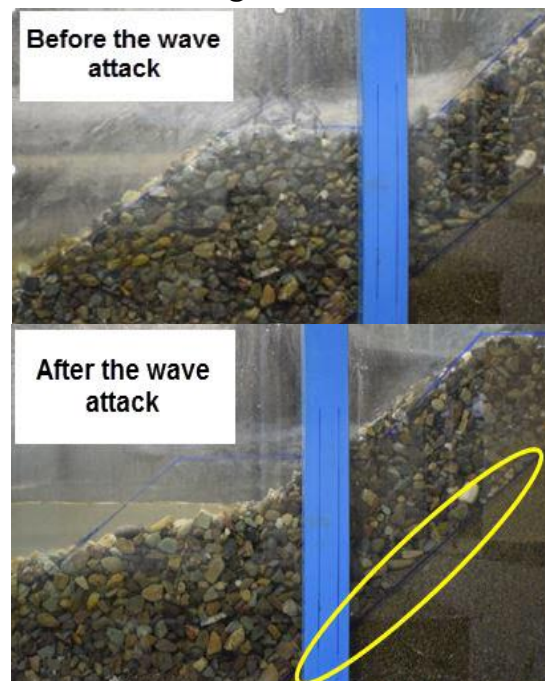


Fig. 4. The cross section of berm breakwater before and after attacking a wave with  $H_s=10.1\text{cm}$  and  $T_p=1.5\text{s}$

#### ۴-۳- تأثیر عمق آب بر فرار مصالح هسته

برای بررسی تأثیر عمق آب بر فرار مصالح موج‌شکن سکویی، ۶ آزمایش برای دو عمق ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. در این آزمایش‌ها ترکیب امواج با ارتفاع ۶/۱، ۸ و ۱۰/۱ سانتی‌متر و دوره ۱/۲۵، تعداد امواج برخوردی ۳۰۰۰ موج و عرض سکوی سازه ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این آزمایش‌ها نیز مشاهده‌های آزمایشگاهی از طریق مقطع مدل اجرا شده در فلوم نشان داد که با تغییر عمق آب نیز مانند پارامترهای تعداد امواج و ارتفاع و پرید موج، فرار مصالح هسته رخ نداده و حتی مصالح هسته در مرز بین هسته و آرمور به آستانه فرار و حرکت نرسید. علت عدم فرار مصالح در تغییرات عمق آب فراهم نمودن توده سنگی بزرگ برای جذب انرژی امواج و در نتیجه

بالاروی در شیب سازه، تعداد بیشتری از مصالح هسته در پایین روی امواج شروع به فرار از مرز بین آرمور و هسته به سمت لایه آرمور نمودند. نکته مهم این است که سکوی سازه در عرض ۲۵ سانتی متر برای ترکیب موجی که در عرض ۲۰ سانتی متر باعث فرار مصالح هسته شده، ناپایدار شده و در واقع مدل موج شکن به دلیل ناپایداری سکو، تخریب شد. اما در عین تخریب سازه، نه تنها فرار مصالح اتفاق نیفتاد، بلکه مصالح ریز لایه هسته به آستانه فرار نیز نرسیدند.

لازم به ذکر است که اگرچه امکان محاسبه تعداد و حجم ذرات ماسه انتقال یافته به سمت آرمور وجود نداشت، اما پس از اتمام آزمایش تغییری در مرز بین لایه آرمور و هسته در مقطع مدل موج شکن سکوی مشاهده نشد. با توجه به اینکه آستانه فرار مصالح و فرآیند فرار ذرات ماسه در عرض ۲۰ سانتی متر ( $10D_{n50}$ ) رخ داده است، می توان گفت که یکی از عوامل مؤثر در فرار مصالح هسته در موج شکن های سکویی، عرض سکو است. در جدول (۶) نتایج آزمایش های اثر عرض سکو بر فرار مصالح هسته نشان داده شده است.

جدول ۶. مشخصات پارامترهای مورد استفاده در بررسی اثر عرض سکو بر فرار مصالح و نتایج مشاهده شده

parameter	$H_0\sqrt{T_0}$	Berm width (m)	Water depth	Number of wave	Erosion of core
B Berm (width)	8.21	0.25	0.25	3000	No erosion
	9.21	0.20	0.25	3000	No erosion
	10.75	0.25	0.25	3000	No erosion
	12.07	0.20	0.25	3000	No erosion
	15.21	0.25	0.25	3000	No erosion
	16.7	0.20	0.25	3000	erosion

Table 6. properties of the parameters used in investigate the effect of berm width decrease on erosion of core material and observed conclusions

با توجه به اینکه در عرض ۲۰ سانتی متر برای بزرگترین ترکیب ارتفاع و پیروی موج فرار مصالح رخ داده، اما برای همین ترکیب

بررسی لزوم به کارگیری لایه فیلتر در موج شکن های سکویی شکل پذیر سازه ای و محیطی ارائه شود که در صورت حذف لایه فیلتر از سازه، به صورت هم زمان از فرار مصالح هسته جلوگیری نموده و پایداری سکو را تامین نماید.

برای رسیدن به دو هدف گفته شده، آزمایش هایی با ترکیب های متفاوت ارتفاع و دوره موج انجام شد. آزمایش ها با هدف بررسی اثر کاهش عرض سکو بر فرار مصالح انجام شده است. جزئیات پارامترهای مختلف در جدول (۵) ارائه شده است.

در آزمایش های با ارتفاع ۰/۰۸ و ۰/۰۶۱ متر ( $8.21 < H_0\sqrt{T_0} < 12.07$ ) فرار مصالح اتفاق نیفتاد و مصالح هسته نیز به آستانه فرار نرسیدند. در آزمایش های با ارتفاع ۰/۱۰۱ متر، در دوره ۱/۲۵ ثانیه ( $H_0\sqrt{T_0} = 15.21$ ) شرایط دقیقاً مانند چهار آزمایش قبل بود. در آخرین آزمایش مربوط به تأثیر کاهش عرض سکو یعنی ارتفاع موج ۰/۱۰۱ متر و دوره ۱/۵ ثانیه ( $H_0\sqrt{T_0} = 16.67$ ) در دقایق اولیه آزمایش، ذرات ماسه در لایه ی هسته در مرز بین این لایه و لایه آرمور شروع به حرکت نمودند.

جدول ۵. مشخصات پارامترهای استفاده شده در بررسی اثر کاهش عرض سکو بر فرار مصالح

parameter	$H_s(m), T_p(s)$	Berm width (m)	Water depth	Number of wave
B Berm (width)	0.061	1 1.25	0.2 0.25	0.25 3000
	0.08	1 1.25	0.2 0.25	0.25 3000
	0.101	1.25 1.5	0.2 0.25	0.25 3000

Table 5. properties of the parameters used in investigate the effect of berm width decrease on erosion of material

در واقع آستانه فرار مصالح در این ترکیب موج و شرایط سازه ای ارائه شده در جدول (۵) رخ داده است. مشاهده های آزمایشگاهی نشان داد که در اثر بالاروی امواج برخوردی به مقطع سازه، تعداد محدودی از دانه های ماسه در مرز بین آرمور و لایه هسته در بالای تراز ایستابی به سمت بالای شیب حرکت کرده و پس از رسیدن جریان بالارونده به بالاترین تراز



جدول ۷. جزئیات پارامترهای مربوط به آزمایش‌های تعیین عرض بهینه سکو برای بحرانی‌ترین شرایط محیطی و سازه‌ای

Residual of berm width	Erosion of materials	Water depth d(m)	Berm width B(m)	Wave period $T_p$ (s)	Wave height $H_s$ (m)
Fail	No erosion	0.28	0.3	1.5	0.101
Fail	No erosion	0.25	0.3	1.6	0.091
$1D_{n50}$	No erosion	0.25	0.35	1.7	0.101
$2D_{n50}$	No erosion	0.25	0.37	1.7	0.101

Table 7. parameters of determination of optimum berm width tests for the most critical sea state and structural conditions

با توجه به جدول (۷) می‌توان دریافت که با تامین پایداری سکوی موج‌شکن سکویی، عدم فرار مصالح هسته نیز تامین خواهد شد.

با توجه به توضیحات ارائه شده، نتایج جدول (۶) و عدم تأثیر سایر پارامترها بر فرار مصالح هسته، می‌توان معیاری برای آستانه فرار مصالح هسته به دست آورد (رابطه ۱).

$$\begin{cases} H_0\sqrt{T_0} \geq 16.7 \\ \frac{B}{D_{n50}} \leq 10 \end{cases} \quad (1)$$

معیاری که به صورت عدد بدون بعد برای آستانه فرار مصالح هسته ارائه شده است (رابطه ۱)، با توجه به محدودیت‌های دامنه کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش که به صورت زیر اشاره شده، دارای اعتبار بوده و قابل کاربرد است:

$$\begin{aligned} 1000 &\leq N \leq 12000 \\ 10 &\leq \frac{d}{D_{n50}} \leq 15 \\ f_g &= 1.6 \\ 0.09 &\leq \frac{d}{L} \leq 0.21 \\ \frac{D_c}{D_a} &= 0.09 \end{aligned} \quad (2)$$

با توجه به رابطه (۱) و حدود اعتبار آن (رابطه ۲)، اگر هم‌زمان  $H_0\sqrt{T_0} \geq 16.7$  و  $\frac{B}{D_{n50}} \leq 10$  باشد، مصالح هسته به آستانه فرار رسیده و در مرز بین لایه آرمور و هسته شروع به حرکت

موج در عرض ۲۵ سانتی‌متر فرار مصالح اتفاق نیفتاده است، به نظر می‌رسد که وجود یک عرض بهینه در موج‌شکن‌های سکویی مانع از فرار مصالح لایه هسته خواهد شد. در واقع وجود یک سکو با عرض بهینه از ایفای نقش توسط لایه فیلتر در عدم فرار مصالح ممانعت نموده و مانع از نیاز لایه هسته برای جلوگیری از حرکت و فرار مصالح آن به لایه فیلتر می‌شود. در نهایت پس از بررسی عوامل مختلف بر فرار مصالح هسته می‌توان نتیجه‌گیری کرد که موج‌شکن‌های سکویی سه لایه (نوع ایرانی) نیز مانند نوع غیر ایرانی می‌توانند دو لایه اجرا شوند و لایه فیلتر از این سازه‌ها حذف شد. اما در صورت حذف لایه فیلتر نیاز به یک عرض بهینه برای سکو وجود دارد تا هم فرار مصالح هسته رخ ندهد و هم در عین حفظ پایداری، دارای کمترین حجم ممکن باشد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش‌های مربوط به تأثیر دانه‌بندی فیلتر در فرار مصالح هسته، اجرای لایه فیلتر در فرار مصالح هسته موج‌شکن‌های سکویی تأثیر دارد، اما با اجرای یک عرض بهینه لزوم اجرای آن دیده نمی‌شود. در نهایت با توجه به اینکه در بحث پایداری موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، شرط پایداری و عدم آسیب این سازه‌ها نرسیدن نیم‌رخ تغییر شکل یافته در شیب پایین سکو به شیب بالایی سکو است، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عرض بهینه برای موج‌شکن سکویی عرضی است که دارای کمترین حجم ممکن باشد اما مشروط به اینکه فرار مصالح هسته در آن رخ ندهد و به آستانه فرار نیز نرسند. در عین حال برای موج طرح غالب نباید نیم‌رخ تغییر شکل یافته به شیب بالایی سازه برسد و باید کمترین به اندازه  $2D_{n50}$  از عرض سکو باقی بماند. به منظور تعیین عرض بهینه سکو، ۴ آزمایش برای بحرانی‌ترین شرایط محیطی و سازه‌ای انجام شد. جدول (۷) جزئیات پارامترهای این چهار آزمایش را نشان می‌دهد. با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته برای تعیین عرض بهینه سکو، عرض سکوی موج‌شکن برای همه آزمایش‌ها برابر  $18.5D_{n50}$  مناسب تشخیص داده شد. در تعیین این عرض، همه شرایط گفته شده لحاظ شده است و در نتیجه در صورت حذف لایه فیلتر از موج‌شکن‌های سکویی نوع ایرانی، می‌توان مقطع موج‌شکن را به صورت دو لایه و با عرض  $18.5D_{n50}$  برای بحرانی‌ترین شرایط محیطی و سازه‌ای اجرا نمود.

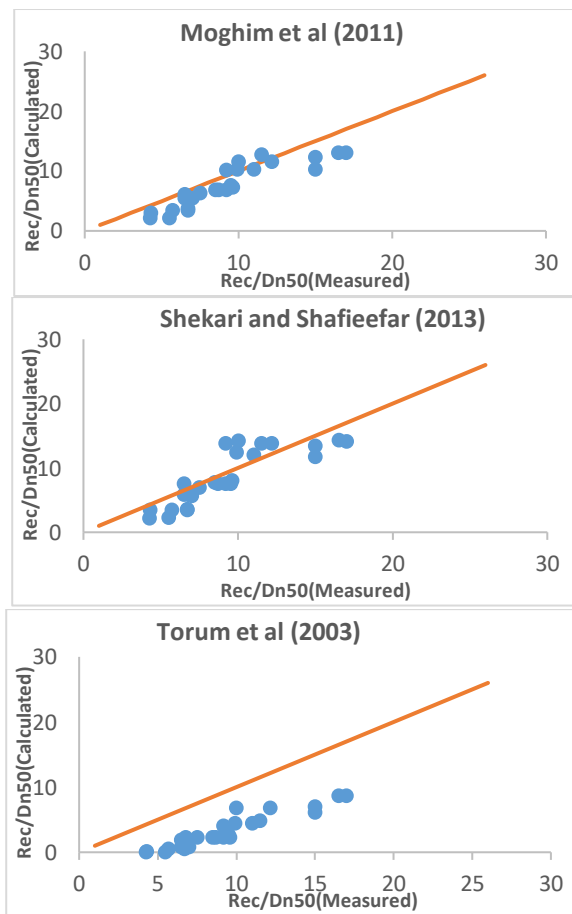
جدول ۸ شاخص‌های ارزیابی به دست آمده برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی این پژوهش با نتایج روابط پژوهشگران مختلف

	Moghim et al (۲۰۱۱)	Shekari and Shafieefar (۲۰۱۳)	Torum et al (۲۰۰۳)
R <sup>2</sup> (%)	۸۱/۶	۸۷/۵	۷۲/۵
Bias	-۱/۶۸	-۰/۷۲	-۵/۹۸
E(%)	۲۰/۸۷	۱۰/۹۴	۷۰/۱۶

**Table 8.** Evaluation indexes for comparison of current study experimental results with the results of other researchers

همان‌گونه که در جدول (۸) مشاهده می‌شود مقادیر به دست آمده توسط روابط مقیم و همکاران (۲۰۱۱) و شکاری و شفیعی‌فر (۲۰۱۳) به داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش نزدیکتر هستند. با توجه به شاخص‌های ارزیابی جدول (۶) رابطه شکاری و شفیعی‌فر (۲۰۱۳) مناسب‌ترین فرمول برای تخمین عرض فرسایش یافته سکو برای داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش است.

شکل ۵. مقایسه بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی بدون بعد شده برای داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش



**Fig. 5.** Comparison of dimensionless measured and calculated data of the present study

بررسی لزوم به کارگیری لایه فیلتر در موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر می‌کنند. پس با توجه به این نتیجه و نتایج جدول (۷) می‌توان گفت در صورتی که عرض سکو بیش از ۱۰ برابر قطر متوسط سنگ لایه آرمور و عدد پایداری کوچکتر از ۱۷ باشد می‌توان لایه فیلتر را حذف نمود. مسئله مهم دیگر این است که نمی‌توان معیاری برای آستانه فرار مصالح بر اساس تیزی امواج ارائه نمود؛ چون در امواج با تیزی تقریباً برابر، در یک حالت مصالح هسته به آستانه فرار رسید، اما در امواج دیگر با تقریباً همان تیزی موج مصالح هسته به آستانه فرار نرسیدند. در واقع امواج و  $(H_s = 0.10m, T_p = 1.5s)$  و  $(H_s = 0.08m, T_p = 1.25s)$  دارای  $S_{om}$  و هم تیزی موج با دوره اوجی) تقریباً یکسانی هستند، اما فقط در  $(H_s = 0.10m, T_p = 1.5s)$  مصالح هسته به آستانه فرار رسیدند.

در انتها برای ارائه پیشنهاد عرض بهینه در موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، نتایج آزمایش‌های انجام شده (داده‌های مشاهداتی) در این قسمت با سایر روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف از جمله تورام و همکاران (۲۰۰۳) [14]، مقیم و همکاران (۲۰۱۱) و شکاری و شفیعی‌فر (۲۰۱۳) مقایسه شده است. جدول (۸) مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش‌های این پژوهش با روابط پژوهشگران ذکر شده را نشان می‌دهد. در این جدول از سه شاخص ارزیابی که شامل ضریب همبستگی (R)، میزان درصد خطای نسبی (E) و بایاس (Bias) است، استفاده شده که روابط آن در ادامه ارائه شده است:

$$R = \frac{N \sum XY - (\sum X \sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (۳)$$

$$E = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y - X}{Y} \right| \quad (۴)$$

$$Bias = \bar{X} - \bar{Y} \quad (۵)$$

در روابط (۳، ۴ و ۵)،  $\bar{X}$  متوسط مقادیر به دست آمده از فرمول و  $\bar{Y}$  متوسط مقادیر داده‌های آزمایشگاهی است و X مقدار محاسبه شده از روابط و Y مقدار داده‌های آزمایشگاهی و N تعداد داده‌های آزمایشگاهی است.

۳- وجود یک سکو با عرض بهینه از فرار مصالح ممانعت می‌نماید. در نتیجه موج‌شکن‌های سکویی سه لایه (آرمور، فیلتر و هسته) می‌توانند دو لایه اجرا شوند و با داشتن یک عرض بهینه، لایه فیلتر را از این سازه‌ها حذف نمود. عرض بهینه برای موج‌شکن سکویی عرضی است که دارای کمترین حجم ممکن باشد، اما مشروط به اینکه فرار مصالح هسته در آن رخ نداده و به آستانه فرار نیز نرسند. در عین حال برای موج طرح غالب، نیمرخ تغییر شکل یافته به شیب بالایی سازه نرسیده و حداقل به اندازه  $2D_{n50}$  از عرض سکو باقی بماند.

۴- برای محاسبه عرض بهینه سکو می‌توان با در نظر داشتن شرایط محیطی و سازه‌ای این پژوهش، مقدار فرسایش عرض سکو (Rec) را از رابطه شکاری و شفییعی فر (۲۰۱۳) محاسبه نمود و به آن حداقل به اندازه ۲ تا ۴ برابر قطر سنگ اضافه کرد.

## References

## ۵- مراجع

- 1-Reshaping Berm Breakwaters Design Manual, Port and Maritime Organization, Department of Coasts and Ports Engineering, 2010. "(In Persian)".
- 2-Moghim, M.N. and Andersen, T.L. 2015 Armor stability of hardly (or partly) reshaping berm breakwaters. *Coastal engineering*, **104**, 1-12.
- 3-Wolters, G. and Van Gent, M.R. 2012 Granular open filters on a horizontal bed under wave and current loading. *Proc. Coastal Eng*, **1**(33), 10-9753
- 4-van Gent, M.R. and Wolters, G. 2015 Granular slopes with open filters under wave loading. *Coastal Engineering*, **104**, 135-150.
- 5-Uelman, E.F. 2006 Geometrically open filters in breakwaters. *Report of Delft University of Technology*.
- 6-Ockeloen, W.J. 2007 Open filters in breakwaters with a sand core: Study into the stability of granular geometrically open, hydraulically sand-open filters in breakwaters with a sand core. *Report of Delft University of Technology*.
- 7-van Gent, M.R. and Wolters, G. 2018 Effects of storm duration and oblique wave attack on open filters underneath rock armoured slopes. *Coastal Engineering*, **135**, 55-65.

شکل (۵) مقایسه‌ای بین نتایج مشاهداتی (آزمایشگاهی) و محاسباتی بدون بعد شده به دست آمده از روابط پژوهشگران مختلف در خصوص تخمین عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن‌های سکویی برای داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش را نشان می‌دهد. محور افقی نمودارها، نتایج مشاهداتی بدون بعد شده و محور قائم نتایج محاسباتی بدون بعد شده حاصل از روابط پژوهشگران است. با توجه به شرایطی که برای عرض بهینه سکو ذکر شد، برای محاسبه این پارامتر با در نظر داشتن شرایط محیطی و سازه‌ای این پژوهش، مقدار فرسایش عرض سکو (Rec) از رابطه شکاری و شفییعی فر (۲۰۱۳) محاسبه شود و به آن حداقل به اندازه ۲ تا ۴ برابر قطر سنگ اضافه شود.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی در فلوم موج با امواج نامنظم به مطالعه لزوم اجرای لایه فیلتر و تأثیر پارامترهای محیطی و سازه‌ای مؤثر بر فرار مصالح لایه هسته در موج‌شکن‌های سکویی پرداخته شده است. نتایج اصلی این بررسی‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- در شرایط محیطی و سازه‌ای آزمایش‌های این پژوهش روی مدل‌های موج‌شکن سکویی، با تغییر پارامترهای تعداد امواج، ارتفاع و دوره موج، عمق آب و ضریب دانه‌بندی لایه فیلتر، فرار مصالح هسته رخ نداد و حتی مصالح هسته در مرز بین هسته و آرمور به آستانه فرار و حرکت نرسیدند. مهم‌ترین علت عدم فرار مصالح، وجود یک توده سنگی بزرگ برای جذب و استهلاک انرژی امواج و در نتیجه از بین رفتن تنش‌های ناشی از برخورد امواج به ذرات ریز لایه‌های زیرین توسط سکوی سازه است.

۲- در بین پارامترهای مؤثر بر فرار مصالح هسته، پارامتر عرض سکو در آستانه فرار مصالح هسته تأثیر چشمگیری دارد. با توجه به محدودیت‌های دامنه کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این

پژوهش، اگر 
$$\begin{cases} H_0\sqrt{T_0} \geq 16.7 \\ \frac{B}{D_{n50}} \leq 10 \end{cases}$$
 باشد، مصالح هسته به

آستانه فرار می‌رسند و در مرز بین لایه آرمور و هسته شروع به حرکت می‌کنند.

- 8-Shafieefar, M. and Shekari, M.R. 2014 An experimental study on the parameterization of reshaped seaward profile of berm breakwaters. *Coastal engineering*, **91**, 123-139.
- 9-Van der Meer, J.W. 1988 Rock slopes and gravel beaches under wave attack. Doctoral Thesis Delft University of Technology, *Also Delft Hydraulics, Communication No 396*.
- 10- Lykke Andersen, T. 2006 Hydraulic Response of Rubble Mound Breakwaters: scale effects-berm breakwaters. *Aalborg University report 27*.
- 11-PIANC, W. 2003 State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters” . *Report of working group*,40.
- 12-Moghim, M.N., Shafieefar, M., Tørum, A. and Chegini, V. 2011 A new formula for the sea state and structural parameters influencing the stability of homogeneous reshaping berm breakwaters. *Coastal Engineering*, **58**(8), 706-721.
- 13-Shekari, M.R. and Shafieefar, M. 2013 An experimental study on the reshaping of berm breakwaters under irregular wave attacks. *Applied Ocean Research*, **42**, 16-23.
- 14-Tørum, A., Kuhnén, F. and Menze, A. 2003 On berm breakwaters. Stability, scour, overtopping. *Coastal engineering*, **49**(3), 209-238.

# An Investigation on Application of Filter Layer in Reshaping Berm Breakwaters

A. A. KARAMIMATIN<sup>1</sup>, M. SHAFIEEFAR<sup>\*2</sup>, H. AKBARI<sup>3</sup>

1- M.Sc. Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Prof., Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

3- Assistant Prof, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

\*a.karamimatin@modares.ac.ir

## Abstract

Reshaping berm breakwaters has a large berm above still water level (SWL) and their seaward profile is reshaped under wave attack. When a quarry is available near the construction site but it is not possible to produce a sufficient quantity of large armor stones for a conventional rubble mound breakwater, a berm breakwater is a feasible solution. According to the conditions of the rock quarries in the coastal regions of Iran, it is difficult to produce large armor stone from them. Thus, the concept of berm breakwater has attracted engineers to develop design and construction of this type breakwater in many projects in Iran. Berm breakwater are normally constructed with only two layers. Due quarry yield of rock quarries, not only producing large armor stone is difficult, but also quarry runs - which are used for core layer - have very small size. So, application of a secondary or filter layer is necessary for using such small size materials as core layer. Thus, most of the Iranian berm breakwaters have been designed and constructed with three layers. The present study aims to investigate the necessity for of filter layer to be applied in reshaping berm breakwater by considering the influence of sea states and structural parameters on the erosion of the core layer materials that includes the number of waves, waves height and period waves, water depth, the gradation coefficient of filter layer and the berm width. In this regard, experimental studies were carried out on two layers and three layers breakwaters under irregular waves with JONSWAP wave energy spectrum. Results showed that a wide berm width can preclude erosion of core material under design wave condition. Hence, berm breakwaters can be constructed without filter layer by using an optimized berm width to protect core materials against erosion. A dimensionless parameter is proposed to evaluate the threshold for eliminating filter layer of core materials in berm breakwaters. Considering the aforementioned conditions for optimum berm width and sea state and structural conditions of the present study, required berm width of a two-layered berm breakwater can be calculated using formula of Shekari and Shafieefar (2013) for recession plus at least 4 times of stone diameter. Due to difficulties of implementing a filter layer, selecting the optimized berm width and removing the filter layer can be very effective in reducing the cost and execution time of this type of structure. Filter is a layer in penetrable structures (mostly in coastal and slope protection structures) that precludes erosion of materials due to waves and currents without increasing pore water pressure in materials of lower layers. Filter, in a sense, may contain granular materials, geotextiles, or a combination of geotextiles and granular materials. Further, filters have different applications including prevention of erosion in core's materials which is due to the negative pressure fluctuations and movement of fluid through the structure, reduction of hydrodynamics loadings on outer stone layers, and drainage. Filters are categorized into three types based on their resistance to erosion of bed materials in shore or slope protection structures: Geometrically tight filters, Stable with geometrically open filters and Unstable open filters.

**Keywords:** Berm Breakwaters, Filter Layer, Erosion of Material, Optimized Berm Width, core.