



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

پژوهش‌های آب‌نخرداری

شاپا: ۲۹۸۱-۲۰۳۸



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

پایداری سازه‌های حفاظتی بندر گناوه در برابر امواج شمالی خلیج فارس

- محمدرضا غریب‌رضا*^۱، مهدی نیکوکار^۲، گیتا برادران ابراهیمی^۳، ارسلان پناهی^۴، احسان صفا^۵
- ۱- دانشیار گروه مهندسی رودخانه و حفاظت سواحل، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
- ۲- دانشجوی دکتری و رئیس اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، سازمان بنادر و دریانوردی ایران
- ۳- دانشجوی دکتری و معاون اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، سازمان بنادر و دریانوردی ایران
- ۴- دکتری تخصصی اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، سازمان بنادر و دریانوردی ایران
- ۵- دکتری تخصصی عمران، سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تبریز، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

مناطق ساحلی در پایاب آبخیزهای ساحلی به دلیل جایگاه استقرار بخش قابل توجهی از آبخیزنشینان، محل برقراری زنجیره خدمات و تولید میان بخش داخلی کشور و خارج و فعالیت‌های دریامحور، پراهمیت هستند. از سوی دیگر، نوار ساحلی به دلیل سنگ‌شناسی ذاتی واحدهای سنگی و شکل‌های زمین ساحلی و شرایط آب‌پویایی امواج، تحت تأثیر فرسایش و دگرشکلی هستند. از این رو، فعالیت‌های دریامحور در پناه سازه‌های حفاظتی به‌ویژه موج‌شکن‌ها انجام می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی پایداری سازه حفاظت ساحل‌های توده‌سنگی در شرایط برخورد امواج شمالی خلیج فارس بود.

مواد و روش‌ها

در تقسیم‌بندی سازه حفاظتی، دو جنبه ویژگی‌های سازه‌ای و مصالح متشکله آنها، آرایش و موقعیت قرارگیری موج‌شکن‌ها مد نظر است. برای دستیابی به هدف این پژوهش، پایداری نیم‌رخ از بدنه سازه حفاظتی بندر گناوه با بیشترین سطح برخورد امواج شکن نزدیک به رأس موج‌شکن با یک الگوی امواج مشخص با استفاده از روش مدل‌سازی در آزمایشگاه شبیه‌ساز امواج پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، آزموده شد. بندر گناوه در شمال خلیج فارس از دیدگاه تجاری و صیادی اهمیت زیادی دارد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: gharibreza4@yahoo.com

استناد: غریب‌رضا، م.ر.، نیکوکار، م.، پناهی، ا.، صفا، ا.، برادران ابراهیمی، گ. ۱۴۰۴. پایداری سازه‌های حفاظتی بندر گناوه در برابر امواج شمالی خلیج فارس. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۸ (۳): ۳۹-۱۶.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.367798.1604

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۴۸، پاییز ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱۶ تا ۳۹.

© نویسنندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



وجود چالش‌هایی مانند تداخل شدید امواج، فرسایش ساحلی و عملکرد نامطلوب موج‌شکن‌ها در برابر امواج غالب منطقه، بررسی دقیق‌تر پایداری سازه‌های حفاظتی این منطقه، ضروری است. موج‌شکن‌های این بندر نقش حیاتی در پایداری و ایمنی حوضچه بندر دارند؛ از این رو، تحلیل رفتار آن‌ها در شرایط متفاوت آب‌پویایی با مدل‌سازی در فلوم موج‌ساز می‌تواند دستاوردهای ارزشمندی در راستای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد این سازه‌ها ارائه دهد. در این پژوهش، ابعاد لایه آرمور سازه حفاظتی (موج‌شکن) بندر گناوه تعیین شد. وزن قطعه‌های سنگی، یکی از سنجه‌های تأثیرگذار در انتخاب مناسب‌ترین گزینه برای آرمور بود. سنجه‌های مهم در طراحی سازه حفاظتی و موج‌شکن توده‌سنگی به سه دسته سنجه‌های محیطی (مربوط به موج)، سنجه‌های آبی (هیدرولیکی) و سنجه‌های سازه‌ای تقسیم شدند. آسیب واردشده به لایه آرمور (ha) با شمارش تعداد قطعه‌های جابه‌جاشده بلوک‌های آرمور یا با اندازه‌گیری سطح فرسایش‌یافته لایه آرمور در نیم‌رخ عرضی برآورد شد. روش محاسبه شاخص بر پایه شرایط بدون جابه‌جایی قطعه‌های آرمور که به شکل تکی تکان خورده بودند و یا قطعه‌های آرمور که به شکل تکی از مکان اولیه خود و به اندازه کم و مشخصی جابه‌جاشده بودند، بود. ترازهای حدی بالاروی (Ru) و پایین‌روی (Rd) آب روی نیم‌رخ سازه در هر برخورد موج به وجود می‌آید. این ترازها نسبت به سطح ایستایی تعریف‌شده است و از جمله سنجه‌های مهم طراحی هستند. مدل‌سازی با استفاده از یک فلوم مولد امواج دوبعدی به طول ۳۳ متر و عرض ۵/۵ متر و ظرفیت آبیگری تا ژرفای ۱/۵ متر انجام شد. ابعاد سازه‌ای با مقیاس ۱:۲۰ ریزمقیاس‌سازی شد. شرایط آب‌پویایی (هیدرودینامیکی) سنجش پایداری نیم‌رخ انتخاب‌شده شامل طیف امواج نامنظم JONSWAP با دوره بازگشت ۵۰ ساله، بلندی مؤثر امواج (Hs) ۲/۷ متر و دامنه ۶ ثانیه بود. این مشخصات با ضریب ۱/۲ نیز برای لحاظ کردن شرایط بسیار بحرانی نیز استفاده شد. این امواج به مدت ۱۰۰ الی ۱۱۰ دقیقه معادل ۱۵۰۰ عدد موج شکن و در چهار شرایط آب‌بالا (مد دریا همراه با خیزاب باد و موج)، جزر، دوره بازگشت یک‌ساله و ۱/۲ برابر آب‌بالا بر نیم‌رخ انتخاب‌شده (P6) تابیده شد. تغییرات به‌دست آمده از برخورد امواج شکن با عکس‌برداری قبل و بعد از نیم‌رخ و با استفاده از روش تصویرسنجی بررسی شد.

نتایج و بحث

نتایج مدل فیزیکی بررسی پایداری سازه حفاظت ساحلی طراحی‌شده برای شرایط امواج شمالی خلیج فارس نشان داد که طراحی بلندی و شیب برای ساخت سازه بندر گناوه قابل قبول بود. به بیان دیگر، طرح ارائه‌شده برای اجرای سازه حفاظتی در منطقه گناوه از دو دیدگاه عملکردی و ساختاری قابل اطمینان بود. از سوی دیگر، در این طراحی، لایه آرمور سازه حفاظتی در شرایط بسیار بحرانی دچار تغییر در نیم‌رخ شیب و نشست جزئی در لایه فیلتر شد. در آزمایش‌های مربوط به شرایط آب بالا، به‌طور میانگین ۸۸٪ از اندازه بالاروی مشاهده‌شده در تراز طراحی تاج سازه یا کمتر از آن بود. جابجایی قطعه‌های لایه آرمور نیز فقط در شرایط معادل ۲/۱ برابر آب‌بالا و به شکل بسیار محدود مشاهده شد. همچنین، پس از تابش ۱۳۰۰ موج، نشست لایه فیلتر به تدریج رخ داد. این شرایط با دوره بازگشت امواج ۱۰۰ ساله تطابق داشت. از این رو، نیاز بود تا سازه با بلندی بیشتر و ابعاد سنگ‌های وزین‌تر بازطراحی شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، با استفاده از مدل فیزیکی سازه حفاظتی بندر گناوه اندرکنش شرایط متفاوت امواج بر بدنه و به‌ویژه لایه آرمور توده‌سنگی به‌طور موفقیت‌آمیزی سنجیده شد و شرایط پایدار برای اجرا و کاهش هزینه‌های نهاد مجری (سازمان بندر و دریانوردی) پیش‌بینی شد. از این رو، در شرایطی که امواج شکننده بسیار بحرانی و همزمان با بیشترین سطح جزر و مد نجومی باشند، سازه محافظ بندر گناوه می‌شکند. بنابراین پیشنهاد می‌شود نهاد مجری از تردد کاربران در امتداد موج‌شکن جلوگیری کند و دیگر راهکارهای حفاظتی را نیز در نظر بگیرد. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود از روش به‌کار گرفته شده در این پژوهش، برای بهینه‌سازی و توسعه سازه‌های حفاظتی در دیگر مناطق ساحلی مشابه در شمال خلیج فارس استفاده شود.

واژگان کلیدی: پایداری سازه، سازه حفاظت ساحلی، شمال خلیج فارس، گناوه، موج‌شکن توده‌سنگی

مقدمه

موج‌شکن‌های توده‌سنگی یکی از پرکاربردترین سازه‌های حفاظتی ساحل‌ها در جنوب کشور هستند. موج‌شکن توده‌سنگی سازه‌ای است که بیشتر از قطعه‌های سنگی ریخته‌شده یا قرار داده‌شده روی بستر دریا تشکیل می‌شود. لایه خارجی این سازه با استفاده از قطعه‌های سنگی که وزن بیشتری در مقایسه با دیگر لایه‌ها و یا قطعه‌های بتنی دارند، ساخته می‌شود. با توجه به مخارج ساخت این سازه‌ها، طراحی صحیح و پیش‌بینی خرابی‌های به‌وجودآمده، از دو جنبه کارایی و وضعیت اقتصادی کاملاً ضروری و مهم است. سنجه‌های آبی مربوط به چگونگی فعالیت موج روی سازه (واکنش‌های آبی) است. واکنش آبی اصلی شامل بالاروی و پائین‌آمدگی موج، انعکاس، سرریزی و انتقال موج هستند. سنجه‌های زمین‌فناوری (ژئوتکنیکی) مربوط به روانگرایی، شیب‌های پویایی و فشارهای اضافی حفره‌ها است. سازه با برخی از سنجه‌های سازه‌ای مهم از جمله: شیب سازه، وزن و جرم حجمی سنگ‌ها، شکل سنگ، همواری و صافی سطح، چسبندگی، تخلخل، نفوذپذیری، مدول‌های برشی و حجمی، ابعاد و مقطع عرضی سازه تشریح می‌شود. اندازه فشارهای وارد بر سازه یا اجزای سازه بستگی به سنجه‌های محیطی، آبی، زمین‌فناوری و سازه‌ای دارد. این فشارها، به فشارهای حرکت خارجی آب روی شیب، فشارهای تولیدشده در اثر حرکت داخلی آب در درون سازه و زلزله تقسیم می‌شود. عامل‌هایی که روی حرکت خارجی و داخلی آب تأثیرگذارند شامل تغییر شکل موج (شکست یا شکسته نشدن آن)، بالاروی یا پائین‌آمدگی موج، انتقال، سرریزی و انعکاس موج هستند. (بروس و همکاران ۲۰۰۹). حرکت داخلی آب، استهلاک یا نفوذ آب به درون سازه، تغییرات فشار حفره‌ای و سطح ایستایی را تشریح می‌کند. بیشتر سنجه‌های سازه‌ای روی فشارهای وارده تأثیرگذارند. زبری شیب تحت تأثیر اندازه، شکل و دانه‌بندی سنگ‌های آرمور است. از این‌رو، روی بالاروی و پائین‌آمدگی موج اثرگذار است. اندازه فیلتر و دانه‌بندی آن به همراه خصوصیات

سنگ‌های لایه محافظ آرمور، روی نفوذپذیری و حرکت داخلی آب تأثیرگذار است (چگینی ۲۰۰۸). در تقسیم‌بندی سازه حفاظتی دو جنبه ویژگی‌های سازه‌ای و مصالح مصرفی و آرایش و موقعیت قرارگیری موج‌شکن‌ها مد نظر است. موج‌شکن‌ها از دیدگاه سازه‌ای انواع گوناگونی مانند توده‌سنگی (با نیم‌رخ ثابت و متغیر)، دیواره‌ای (صندوقه‌ای، سلولی با سپر فلزی یا بتنی، مرکب، بتنی مشبک)، شناور، شمعی، پنوماتیکی، آبی هستند که هر یک از آن‌ها را بر اساس شرایط موجود می‌توان برای ساخت موج‌شکن‌های متصل به ساحل و یا جدا از ساحل به کار گرفت. از دیدگاه آرایش کلی و موقعیت قرارگیری نیز می‌توان سازه حفاظتی را به سازه حفاظتی موازی با ساحل با دهانه ورودی با موج‌شکن عرضی و سازه حفاظتی با موج‌شکن موازی با ساحل با دهانه ورودی به طرف دریا تقسیم کرد (قنبریان ۲۰۱۰). با توجه به انواع موج‌شکن‌های نامبرده، عامل‌های انتخاب و اجرای آن شامل عملکرد قابل انتظار از سازه حفاظتی، ژرفای آب در محل ساخت سازه حفاظتی، شرایط بستر، در دسترس بودن مصالح برای ساخت سازه حفاظتی مد نظر، شرایط محیطی (جوی)، ماشین‌آلات، تجهیزات مناسب و در دسترس برای ساخت سازه حفاظتی است (قنبریان ۲۰۱۰).

موج‌شکن‌های توده‌سنگی

سازه‌های حفاظتی موج‌شکن توده‌سنگی، سازه‌هایی با نیم‌رخ شیب‌دار هستند که بدنه آن‌ها از لایه‌های متفاوت سنگی تشکیل شده است. این سازه‌ها در دو نوع با نیم‌رخ ثابت (استاتیکی) و با نیم‌رخ متغیر (دینامیکی و شکل‌پذیر) و در سه لایه هسته، لایه میانی یا لایه فیلتر و لایه پوششی یا لایه آرمور طراحی و اجرا می‌شوند. مقطع عرضی سازه توده‌سنگی به شکل دوزنقه و در لایه‌های گوناگون آن قطعه‌های سنگی با دانه‌بندی متفاوت است. سازه حفاظتی توده‌سنگی با نیم‌رخ ثابت، از چند لایه سنگی با دانه‌بندی متفاوت ساخته شده است، به‌طوری که سنگ‌های ریزتر لایه‌های داخلی در اثر شسته شدن، از میان فضاها خالی موجود در لایه‌های بیرونی فرار

$$h_c = h + R_c \quad (1)$$

h : متغیری است که به تغییر تراز بستر دریا وابسته است. به طوری که عمدتاً با پیش روی سازه موج شکن از خشکی به سوی دریا و افزایش ژرفای آب، اندازه h نیز افزایش خواهد یافت. اندازه h نیز متأثر از سنجه های پرشماری از جمله بلندی موج، بالاروی موج، سرریزی عبور موج و... است. البته اساساً آبدهی کم سرریزی برای سازه موج شکن مجاز شمرده شده است یا خیر، در تعیین اندازه h مهم است. اما، به گونه ای h تعیین می شود که آبدهی سرریزی در شرایط طرح از حد قابل قبولی کمتر باشد.

ضخامت لایه آرمور

در این پژوهش با استفاده از رابطه ۲ اندازه این سنجه تعیین شد (آیین نامه طراحی بنادر و سازه های دریایی ایران ۲۰۰۶).

$$t = nk_{\Delta} \left(\frac{W}{\rho_a g} \right)^{1/3} \quad (2)$$

n : تعداد لایه های آرمور (معمولاً دولایه) است. اما، در شرایطی بسته به شکل قطعه ها نیز ممکن است یک لایه و یا سه لایه باشد. k_{Δ} : ضریب لایه، W : وزن قطعه آرمور، ρ_a : جرم مخصوص قطعه آرمور، g : شتاب ثقل زمین و تعداد قطعه های آرمور در واحد سطح با استفاده از رابطه ۳ به دست آمد.

$$N = nk_{\Delta} (1 - n_j) \left(\frac{W}{\rho_a g} \right)^{-2/3} \quad (3)$$

n_j : ضریب ایمنی عرض تاج است که به شکل تجربی تعیین می شود و از ۱ تا ۵ متغیر است. دیگر مولفه ها مانند رابطه ۲ است. عرض تاج موج شکن توده سنگی تابعی از اندازه سرریزی موج از روی سازه و دیگر شرایط سازه ای (مانند بلندی آزاد تاج نسبت به سطح ایستایی (SWL)، بلندی موج و...) است. هرگاه از روی موج شکن سرریزی نباشد، امواج در تعیین عرض تاج نقشی ندارند. اما، از آنجایی که آبدهی کم سرریزی در شرایط نبودن پیامد وخیم برای سازه مجاز است، معمولاً موج شکن ها بر اساس مجاز بودن اندازه کمی آبدهی سرریزی در شرایط مدی موج طراحی می شوند. از این رو، عرض تاج موج شکن بایستی به اندازه ای در نظر گرفته شود که امکان قرار دادن

نکند. لایه آرمور، دانه بندی، اندازه و مشخصات (شکل، جرم مخصوص و...) (قطعه های سنگی به گونه ای است که توان مقابله و پایداری در برابر حمله امواج را داشته باشد. یعنی اندازه حرکت و جابه جایی قطعه های نزدیک به صفر و یا در حد قابل چشم پوشی باشد. به این ترتیب نیم رخ این سازه ثابت و بدون تغییر شکل باقی می ماند. سازه های حفاظتی/موج شکن توده سنگی در مقایسه با دیگر انواع موج شکن ها مزایا و معایبی دارند. مزایای آن ها شامل سهولت در اجرا، امکان استفاده از ماشین آلات و تجهیزات نسبتاً ساده، امکان به کارگیری و ساخت آنها در بسترهای سست، سهولت نگهداری، هزینه کم تعمیرات آنها و صرفه اقتصادی در ساخت این نوع موج شکن ها در مناطقی با منابع غنی سنگی است. معایب این موج شکن ها در مناطقی با ژرفای آب زیاد است که سبب می شود اجرای آنها نیازمند مصالح سنگی بسیار زیادی باشد. به دلیل شیب دار بودن بدنه موج شکن، امکان استفاده از قسمت داخلی موج شکن به عنوان پهلویی و اسکله وجود ندارد، هنگام اجرای لایه مغزه به ویژه در شرایطی که دریا ناآرام باشد، امکان شسته شدن مصالح سنگی وجود دارد. از سوی دیگر، امکان جابه جایی و پراکندگی سنگ های لایه حفاظتی نیز وجود دارد که این موضوع، هزینه های تعمیر و نگهداری را افزایش خواهد داد (چگینی ۲۰۰۸).

مواد و روش ها

روش طراحی لایه آرمور

سنجه های مربوط به مقطع عرضی، پرشمارند. در این پژوهش، اندازه این سنجه ها بر اساس روش هاریو (۲۰۰۷)، تعیین شدند. روش تعیین اندازه مهم ترین سنجه های استفاده شده به شرح زیر است:

بلندی سازه موج شکن

بلندی سازه موج شکن یا تراز تاج آرمور نسبت به بستر دریا برابر است با مجموع دو سنجه که اختلاف تراز سطح ایستایی (SWL) نسبت به بستر دریا و بلندی آزاد تاج نسبت به سطح ایستایی (SWL) که با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

سنجه دیگر مربوط به سنگ و بیانگر دانه‌بندی سنگ است. D_{85} و D_{15} اندازه قطر سنگی است که به ترتیب ۸۵ و ۱۵ درصد وزنی دانه‌ها از آن کوچک‌ترند. این سنجه برای بررسی مسئله پایداری لایه‌های آرمور از جمله مهم‌ترین سنجه‌ها به‌شمار می‌آید.

$D_{85}/D_{15} < 4$ -دانه‌بندی کم‌عرض

$D_{85}/D_{15} > 4$ -دانه‌بندی عریض

$D_{85}/D_{15} > 20$ -دانه‌بندی بسیار عریض

سنجه‌های سازه‌ای مربوط به مقطع عرضی، معرف شکل هندسی سازه هستند. این سنجه‌ها ابعاد مقطع عرضی سازه مد نظر و ضخامت لایه‌های متفاوت سنگی به کار رفته در سازه را مشخص می‌کند (برگی ۲۰۰۸).

یکی از سنجه‌های مهم در این رابطه ضریب آسیب است. این ضریب نخست تابعی از شکل آرمور است. اما، به شیب سازه نیز بستگی دارد. ضریب آسیب از اندازه ۲ برای سنگ تا اندازه‌های بسیار بیشتر برای برخی از قطعه‌ها با خاصیت درگیری زیاد متغیر است. بر اساس این رابطه مشخص است هر چه اندازه ضریب آسیب بیشتر باشد وزن قطعه‌های لازم کمتر خواهد بود.

عبور موج

گاهی انرژی موج در موج‌شکن‌های تاج کوتاه به ناحیه پشت موج‌شکن منتقل می‌شود که این پدیده را عبور موج می‌نامند. عبور موج در سازه‌های توده‌سنگی در اثر سرریزی سازه و یا عبور امواج با دوره تناوب (پریود) بلند از میان سازه نفوذپذیر است. البته در برخی شرایط عبور موج از ترکیب دو وضعیت نامبرده پدید می‌آید. تعیین اندازه عبور موج در طراحی موج‌شکن تاج کوتاه که به‌منظور حفاظت ساحل‌ها ساخته می‌شوند و یا در طراحی موج‌شکن‌های استفاده‌شده در بنادر که در آن‌ها عبور امواج با دوره تناوب (پریود) بلند موجب حرکت کشتی‌ها و یا دیگر اجسام شناور در آن‌ها می‌شوند، اهمیت دارد. اندازه عبور موج در موج‌شکن‌های تاج کوتاه به هندسه سازه (به‌ویژه بلندی آزاد تاج، عرض تاج و ژرفای آب)،

حداقل سه قطعه آرمور در آن فراهم باشد. عرض تاج موج‌شکن با استفاده از رابطه ۴ تعیین شد (آیین‌نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران ۲۰۰۶).

$$B = m k_{\Delta} \left(\frac{W}{\rho_a g} \right)^{1/3} \quad (4)$$

B : عرض تاج موج‌شکن، m : تعداد قطعه‌های آرمور روی تاج، ρ_a : جرم‌مخصوص آرمور، W : وزن قطعه آرمور، k_{Δ} : ضریب لایه و g : شتاب ثقل زمین است. شیب سازه موج‌شکن به سنجه‌های متفاوتی از جمله وزن قطعه‌های آرمور و خاصیت درگیری (چفت‌وبست) قطعه‌های آرمور بستگی دارد. هر چه وزن قطعه‌های آرمور و خاصیت درگیری آن‌ها بیشتر باشد می‌توان سازه موج‌شکن را با شیب بیشتری ساخت و برعکس هر چه سازه با شیب کمتر و ملایم‌تر ساخته شود، وزن قطعه‌های آرمور لازم برای پایداری در مقابل حمله موج، کمتر خواهد بود. افزون بر این، برای افزایش پایداری آرمور و کاهش روگذری موج می‌توان شیب آرمور در وجه رو به دریای موج‌شکن را به شکل S و یا یک سکوی افقی طراحی کرد (یواس‌ای ۲۰۰۵). یکی از مراحل مهم این پژوهش، تعیین ابعاد لایه آرمور سازه حفاظتی/موج‌شکن گناوه بود. یکی از عامل‌های مهم در تعیین قطعه‌های مناسب برای آرمور اولیه وزن آن‌ها بود که با استفاده از روابط پایداری قابل محاسبه بود. به بیان دیگر، وزن قطعه‌های آرمور برای شرایط معین با استفاده از روابط پایداری محاسبه شد. یکی از معروف‌ترین روابط پایداری رابطه هادسون (۱۹۵۹) است (رابطه ۵) که به‌وسیله سورنسن (۱۹۹۳) تشریح شد.

$$(\Delta D_{n50}) = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad (5)$$

رابطه ۵ به شکل رابطه ۶ تغییر یافت.

$$\frac{\rho_a g H^3}{k_D \Delta^3 \cot \alpha} \quad (6)$$

H : بلندی موج، Δ : جرم‌مخصوص نسبی قطعه آرمور نسبت به آب، $K_D (\rho_u / \rho - 1)$: ضریب آسیب (ضریب پایداری هادسون)، D_{n50} : قطر اسمی قطعه آرمور، α : زاویه شیب موج‌شکن نسبت به افق، ρ_a : جرم‌مخصوص قطعه آرمور و ρ_u : جرم‌مخصوص آب دریا است.

نفوذپذیری سازه و شرایط موج (به‌ویژه بلندی و دوره تناوب موج) بستگی دارد (فن در میر ۱۹۹۹).
آب‌دهی کم روگذری در شرایطی که پیامد وخیمی برای سازه و ناحیه حفاظت‌شده نداشته باشد، مجاز است. معمولاً موج‌شکن‌ها و دیوارهای دریایی بر اساس مجاز بودن اندازه کمی آب‌دهی روگذری تحت شرایط حدی موج طراحی می‌شوند. سنج به بی‌بعد میانگین آب‌دهی روگذری $[Q]$ به‌وسیله اُون (۱۹۸۰) و به شکل رابطه ۷ تعریف شده است.

$$Q = \frac{q}{\left(gH_s^3\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{S}{2\pi}\right)^{1/2}} \quad (7)$$

Q : میانگین آب‌دهی روگذری، H_s : بلندی موج شاخص و S تیزی موج است که از رابطه $S = H/L$ تعیین می‌شود. H و L به ترتیب بلندی و طول موج هستند.

سنج‌های طراحی سازه توده‌سنگی

سنج‌های مهم در طراحی سازه حفاظتی/موج‌شکن توده‌سنگی به سه دسته سنج‌های محیطی (مربوط به موج)، سنج‌های آبی و سنج‌های سازه‌ای تقسیم می‌شوند. سنج‌های محیطی شامل بلندی و دوره تناوب موج، ژرفای آب، شکل طیف موج (خاصیت گروهی موج) و مدت طوفان است. طراح معمولاً امکان اثرگذاری روی آن‌ها را ندارد. مثلاً بلندی موج (H) یکی از سنج‌های بسیار مهم در پایداری موج‌شکن‌های توده‌سنگی است که اثر آن در رابطه هادسون (۱۹۵۹) بسیار مشهود است (وزن قطعه‌های آرمور با مجذور بلندی موج متناسب است). از سنج‌های محیطی می‌توان به بلندی موج وارده (H)، دوره تناوب (T)، زاویه انتشار موج و ژرفای آب (d) اشاره کرد. اثر بلندی و دوره تناوب موج با استفاده از سنج تیزی موج بیان می‌شود. این سنج به بی‌بعد نسبت بلندی موج به طول موج است. در شرایطی که طول موج در آب ژرف با سنج L تعریف می‌شود (نجفی جیلانی و همکاران ۲۰۱۴).

از سنج‌های آبی مهم در طراحی سازه حفاظتی/موج‌شکن توده‌سنگی شامل بالاروی و پایین‌آمدگی موج است. فعالیت موج روی سازه توده‌سنگی موجب نوسان تراز آب در پهنه قائمی که

معمولاً بیش از بلندی موج تابشی است، می‌شود. ترازهای حدی که در هر برخورد موج حاصل می‌شود، بالاروی R_u و پایین‌آمدگی R_d نامیده می‌شوند. این ترازها نسبت به سطح ایستایی تعریف شده‌اند و از جمله سنج‌های مهم طراحی هستند. تراز بالاروی موج برای تعیین تراز تاج سازه، حد بالایی حفاظت و دیگر اجزای سازه‌ای است و به‌عنوان معیاری برای تعیین اندازه آب‌دهی سرریزی موج یا عبور محتمل موج استفاده می‌شود. تراز پایین‌آمدگی موج برای تعیین اندازه ادامه لایه حفاظتی آرمور در پایین سازه و یا تعیین تراز سکوی پنجه به‌کار برده می‌شود. معمولاً اندازه بالاروی موج بیش از اندازه پایین‌آمدگی آن است. گاهی آب‌دهی کم روگذری در شرایط نبودن پیامد وخیمی برای سازه و ناحیه حفاظت‌شده به‌وسیله آن، مجاز است. موج‌شکن‌ها و دیوارهای دریایی بر اساس مجاز بودن اندازه کمی آب‌دهی روگذری تحت شرایط حدی موج طراحی می‌شوند. سنج‌های سازه‌ای مهم در طراحی موج‌شکن‌های توده‌سنگی به چهار دسته سنج‌های سازه‌ای مربوط به سنگ، سنج‌های سازه‌ای مربوط به مقطع عرضی، سنج‌های سازه‌ای مربوط به امواج و سنج‌های سازه‌ای مربوط به واکنش سازه تقسیم می‌شوند که تشریح همه آن‌ها در مجال این مقاله نمی‌گنجد.

پایداری لایه آرمور

نیروهای جریان ناشی از موج روی قطعه‌های آرمور را می‌توان با استفاده از رابطه ۸ محاسبه کرد (موریسون و همکاران ۱۹۵۰).

$$\frac{F_D + F_L}{F_G} \approx \frac{\rho_w D_n^2 v^2}{g (\rho_s - \rho_w) D_n^3} = \frac{v^2}{g \Delta_n} \quad (8)$$

F_D : نیروی پسا (درگ)، F_L : نیروی کشش و F_i : نیروی لختی (اینرسی) است. نیروی پایدارکننده نیز نیروی گرانش F_G است. در معادله موریسون و همکاران (۱۹۵۰) با فرض اینکه در مرحله ناپایداری، نیروهای پسا و کشش بر نیروی لختی حاکم خواهند بود، نسبتی کیفی برای پایداری را در قالب مجموع نیروهای پسا و کشش تقسیم بر نیروی گرانش ارائه شد. از سوی دیگر، سنج‌های مرتبط با شرایط محیطی دریا شامل بلندی مشخصه موج $H_{1/3}$ ، H_s

شیب‌های تند جابه‌جایی‌ها به شکل لغزش لایه آرمور به دلیل نشست یا فقدان تکیه‌گاه کافی رخ داده بودند. اندازه آسیب در قالب قطعه‌های جابه‌جاشده معمولاً به شکل جابه‌جایی نسبی D ارائه شد و به شکل نسبت تعداد قطعه‌های جابه‌جاشده به تعداد کل قطعه‌ها و یا ترجیحاً نسبت به تعداد قطعه‌ها در ناحیه‌ای مشخص در پیرامون تراز آب ساکن (SWL)، تعریف شد. پس از بررسی ویژگی‌های نامبرده، روش‌شناسی اجرای این پژوهش تنظیم شد و مدل مفهومی آن به دست آمد (شکل ۱). در این پژوهش، برای مدل‌سازی، فلوم موجود در پژوهشکده خاک و آبخیزداری، تجهیز شد. این فلوم، ۳۳ متر طول، ۱/۵ متر ژرفا و ۵/۵ متر عرض داشت. عرض فلوم به سه بخش جداگانه تقسیم شد. بخش میانی فلوم مربوط به استقرار سازه بود و دو بخش کناری از قطعه‌های سنگی متخلخل جاذب امواج ورودی برای جذب امواج و رفع مشکل انعکاس مجدد امواج تعبیه شده که شیب استقرار آن‌ها ۱:۱۰ است، بود. دیواره‌های جانبی فلوم برای مشاهده سازه از جنس پلکسی‌گلاس شفاف بود و امکان مشاهده و ضبط فرآیند برخورد و جذب موج را در فرآیند آزمایش فراهم شد. همچنین، برای مشاهده و تنظیم سطح آب و پایش نیم‌رخ سازه هنگام آزمایش مناسب بود. ساختار این فلوم به گونه‌ای بود که قابلیت دستگاه موج‌ساز طبیعی با تولید هرگونه موج منظم و نامنظم داشت که فرآیند تنظیم مشخصات موج با استفاده از نرم‌افزار Wave pack انجام شد. همچنین، این فلوم موج‌مجهز به ساختار موج‌ساز^۴ DHI و پاروی محرک انتشار موج بود. یکی از مراحل پیش و پس از آزمون تصویربرداری از سازه برای استفاده از روش فتوگرامتری بود که با استفاده از یک ریل از سراسر سازه انجام شد (شکل ۲). در این پژوهش، برای بررسی تغییرات شکل نیم‌رخ سازه و تعیین پایداری قطعه‌های آرمورها از روش نیم‌رخ‌برداری استفاده شد. در این روش، در گام تجربی پس از استقرار سازه موج‌شکن نقاطی به عنوان معیار انتخاب شد. همراه با سکوی محرک (شکل ۲) در بالای شیب سازه، بدنه

$(H_{1/10}, H_o)$ و طول مشخصه موج (L_p, L_{om}, L_m) هستند. همچنین، سنجه‌های سازه‌ای استفاده شده در این پژوهش برای بررسی پایداری آرمور نیم‌رخ سمت دریا سازه، شامل زاویه شیب لایه آرمور، بلندی آزاد، جرم‌مخصوص قطعه آرمور ρ_s ، سنجه‌های دانه‌بندی آرمور سنگی $(D_{n85}, D_{n15}, D_{n50})$ و جرم M و شکل قطعه‌های آرمور جرم‌مخصوص قرارگیری، الگوی چینش و ضخامت لایه آرمور اصلی تخلخل و نفوذپذیری لایه‌های زیرین، لایه (های) فیلتر و مغزه بودند (برگی ۲۰۰۸). در این پژوهش سنجه پایداری^۱ با استفاده از ۹ به دست آمد.

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} \quad (9)$$

ρ_s : معادل جرم‌مخصوص قطعه آرمور، ρ_w : جرم‌مخصوص آب، V : سرعت مشخصه جریان^۲، N_s : سنجه پایداری است. با جایگزینی برای بلندی موج‌شکن H در رابطه ۹، اندازه N_s محاسبه شد. $D_n = \frac{1}{3}$ (حجم قطعه آرمور) طول یک ضلع مکعب معادل است و $\Delta = (\rho_w / \rho_s - 1)$ است. در این شرایط، نبودن تجاوز از اندازه مد نظر ناپایداری یا به بیان دیگر، درجه مشخصی از آسیب را می‌توان به شکل رابطه ۱۰ ارائه شد.

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} \leq K_1^a K_2^b K_3^c \dots \quad (10)$$

آسیب وارد شده به لایه آرمور با شمارش تعداد قطعه‌های جابه‌جاشده یا اندازه‌گیری سطح فرسایش یافته لایه آرمور در نیم‌رخ سازه برآورد شد. در هر دو حالت، اندازه آسیب به شرایط آب‌پویایی دریا در بازه زمانی مشخص سنجیده شد. روش محاسبه بر پایه شرایطی همچون بدون جابه‌جایی، تغییر جزئی جایگاه قطعه‌های آرمور (تکان‌خورده) و تغییر موقعیت قطعه‌های آرمور معادل حداقل معینی D_n یا ha گزارش شده که در آن ha طول (بلندی) قطعه آرمور بود. جابه‌جایی‌ها یا به شکل خارج شدن قطعه‌های آرمور به بیرون لایه و یا به شکل لغزش در امتداد شیب در راستای پر کردن فضای خالی به وجود آمده، بود. در

1 Stability parameter

2 Characteristic flow velocity

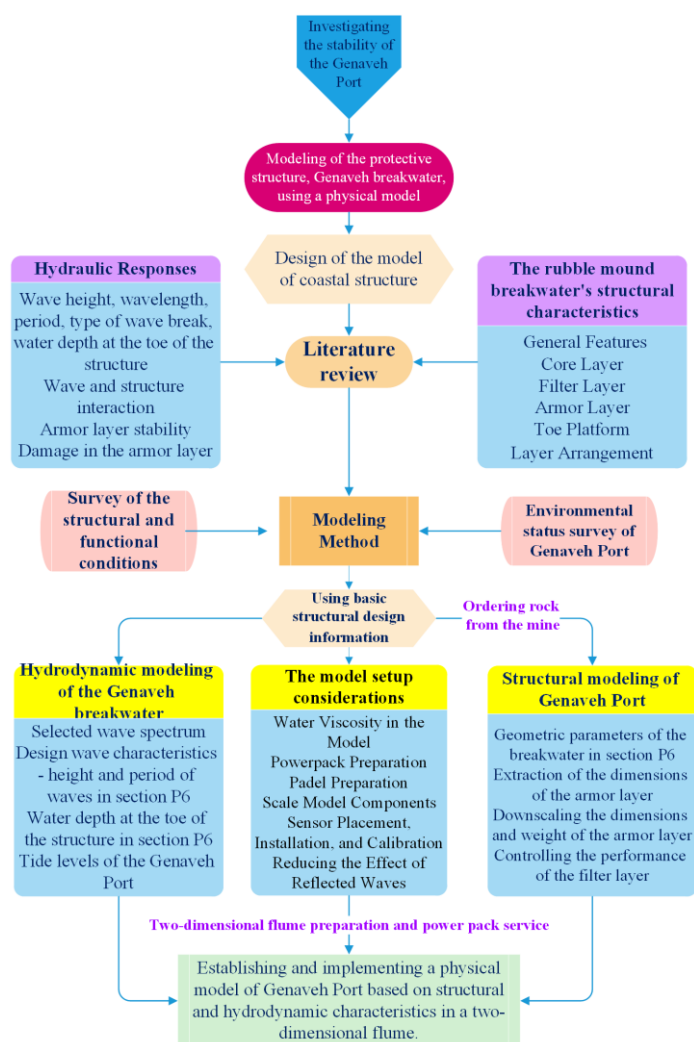
شیب موج شکن به ۱۰ ردیف، و هر ردیف به ۱۰ بخش تقسیم شد. همچنین، با استفاده از دوربین دیجیتال (Canon EOS 750d) تصویرهای قبل و بعد از انتشار امواج به سازه مد نظر، ثبت شد. سپس، با استفاده از این تصویرها و نقاط معیار تعیین شده، فرآیند تحلیل پایداری قطعه های آرمور با استفاده از نرم افزار ArcGIS انجام شد. مراحل اجرا، آماده سازی و مدل سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. برخی از فرض های روند پژوهش به این شرح بود. در این پژوهش، این مدل سازی در مقیاس کوچک به شکل هندسی و پویایی مشابه با شرایط واقعی انجام شد. موج های تولید شده در فلوم موج ساز نمایانگر شرایط واقعی (از دیدگاه بلندی، دوره تناوب) بودند. اثر باد و جریان های آب پایین و آب بالا در این مدل سازی نادیده گرفته شد و فقط تأثیر موج بر هندسه بندر و پدیده های آب پویایی ناشی از آن بررسی شد. مرزهای جانبی و کف فلوم به عنوان مرزهای سخت و بازتابنده در نظر گرفته شده اند. در این مدل سازی، اثر نیروی گرانش ثابت و برابر با شرایط آزمایشگاهی استاندارد در نظر گرفته شد. معیار مقیاس، یکی از مهم ترین موضوع ها در اجرای مدل سازی است. در این پژوهش، اثرات مقیاس رینولد و فرود لحاظ شد و بر اساس تشابه فرود مدل سازی شد. افزون بر این، از پدیده های رسوب گذاری و انتقال رسوب صرف نظر شد. توزیع ژرفای آب در طول فلوم به شکل یکنواخت و همگن

انجام شد و تغییرات ژرفای منطقه واقعی در مقیاس مدل لحاظ نشد. تا حد امکان پدیده هایی مانند شکست موج، تلاطم شدید و ورود هوا به داخل آب (aeration) در مقیاس آزمایشگاهی ساده سازی شد. در شرایط آرامش اولیه مدل سازی انجام شد و سپس امواج از حالت سکون به حرکت در آمدند. با استفاده از ساحل جاذب یا ساختار جذب کننده موج پدیده انعکاس موج از انتهای فلوم مهار شد یا جذب شد تا اثرات بازتاب در نتایج خطا ایجاد نکند. در این پژوهش فلوم استفاده شده مجهز به ساختار جاذب موج بود.

نتایج و بحث

محاسبات اجزای اصلی موج شکن بندر گناوه

بر اساس اطلاعات در دسترس از شرایط آب پویایی محل موج شکن بندر گناوه، و با توجه به اینکه برای سازه مد نظر دوره بازگشت ۵۰ ساله در نظر گرفته شده بود و همچنین با لحاظ کردن زوایای برخورد موج با ساحل، مشخصات امواج وارده به موج شکن به در جدول ۱ آورده شده است. اجزاء، برپایی و نتایج مدل فیزیکی بندر گناوه مطابق با دستور العمل موسسه DHI دانمارک و DELFT هلند انجام شد. نتایج این پژوهش در راستای پایداری سازه حفاظتی با پوشش توده سنگی و از دیدگاه آستانه پایداری نیم رخ سازه و تغییرات در شرایط طوفانی با نتایج پژوهش ولتر و همکاران (۲۰۰۷) هماهنگی دارد.



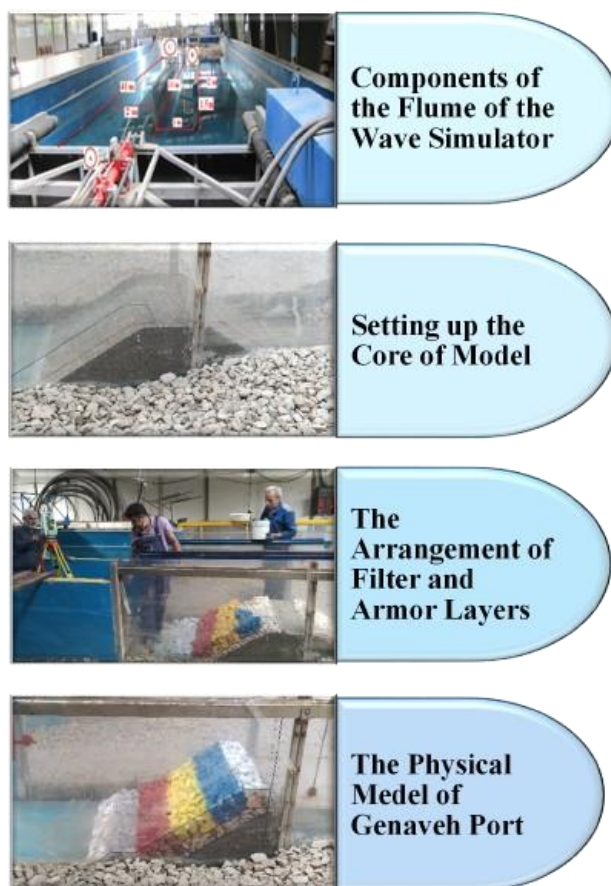
شکل ۱- مدل مفهومی روش پژوهش.

Figure 1- The conceptual model of the research methods.



شکل ۲- فتوگرامتری مدل فیزیکی سازه حفاظتی بندر گناوه قبل و بعد از آزمایش‌ها.

Figure 2- Photogrammetry of the physical model of protective structure of Genaveh port before and after tests.



شکل ۳- روند نمای آماده‌سازی و مدل‌سازی سازه حفاظتی بندر گناوه.

Figure 3- Procedures of the physical model setup of the protective structure of Genaveh Port.

جدول ۱- مشخصات امواج در مدل‌سازی موج‌شکن بندر گناوه.

Table 1- Characteristics of waves using modeling of the Genaveh Port.

Selected profile	Direction of the breakwater	Effective wave height (hs)	Design wave height (m)	Wave period (s)
P6 Section	157	2.67	2.67	6.8
	180	2.53	2.53	6.9
	270	2.42	2.42	5.9
	292	2.34	2.34	6.4
	315	2.71	2.71	6.4

و فیلتر تهیه شد. ویژگی‌های مصالح سنگی برای لایه‌های آرمور و فیلتر به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

مدل‌سازی دانه‌بندی لایه‌های موج‌شکن با استفاده از روابط تجربی فن‌درمیر (۱۹۹۹) و هادسن (۱۹۵۹) اندازه D_{n50} و دامنه وزنی و حجمی آرمورهای استفاده شده و سنگ به دست آمد. بر اساس مقیاس هدف که ۱:۲۰ بود مصالح سنگی برای لایه‌های آرمور

جدول ۲- دامنه وزنی و ابعادی لایه آرمور در مقیاس ۱:۲۰

Table 2- The weight ranges of rocks in 1:20 scale used in the modeling of the armor layer of the Genaveh Port.

Rock component ratio	Weight range of armor layer (gr)	Dimension range of armor layer (cm)
25 %	326 - 380	5.33 – 5.61
25 %	380 - 435	5.61 – 5.87
25 %	435 - 489	5.87 – 6.1
25 %	489 - 543	6.1 – 6.32

جدول ۳- دامنه وزنی و ابعادی لایه فیلتر در حالت مقیاس ۱:۲۰

Table 3- The weight ranges of rocks in a 1:20 used in the modeling of the filter layer of the Genaveh Port.

Rock component ratio	Weight range of filter layer (gr)	Dimension range of filter layer (cm)
50 %	32.6 – 70.5	2.48 – 3.2
50 %	70.5 – 108.7	3.2 – 3.7

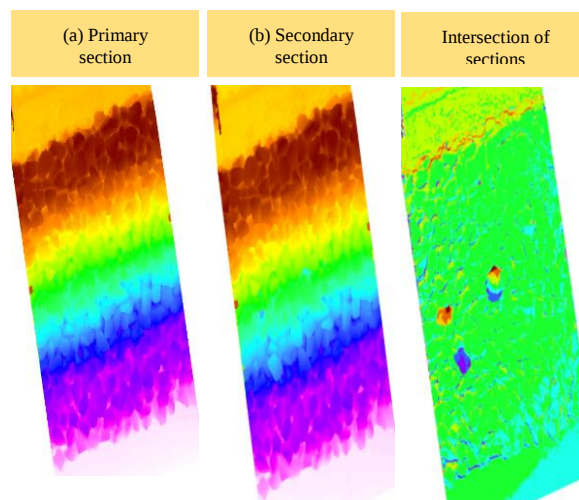
ویژگی‌های امواج مدل‌سازی

ویژگی‌های امواج استفاده‌شده قبل از ریزمقیاس سازی در جدول ۴ ارائه‌شده است. داده‌های این جدول یک ابزار مهم برای جمع‌بندی و تحلیل نتایج آزمایش‌های گوناگون طراحی‌شده است. هدف اصلی انجام این آزمایش‌ها بررسی رفتار و عملکرد موج‌شکن‌های توده‌سنگی تحت شرایط متفاوت امواج و ژرفای آب بود. جدول ۴، شامل اطلاعات جامع و با جزئیات لازم که به محققان و طراحان کمک می‌کند تا تحلیل دقیقی از نتایج به‌دست‌آمده انجام دهند. نتایج هر کدام از آزمایش‌های این جدول برای ارزیابی شرایط مختلف در طراحی و عملکرد موج‌شکن‌ها به‌کاربرده شد. هر یک از این آزمون‌ها، دو بار تکرار و با پسوندهای a, b, c مشخص شدند. این تکرارها برای ارزیابی دقت و صحت نتایج در شرایط مشابه انجام شدند تا از نتایج به‌دست‌آمده اطمینان حاصل شود و قابلیت بازتولید و اعتبار افزایش یابد. آزمایش اولیه (T1) در شرایط پایه برای طراحی موج‌شکن انجام شد. آزمایش (T2) در شرایط متفاوت از لحاظ تراز آب یا تغییرات موج انجام شد. آزمایش (T3) در شرایط بحرانی‌تر که در آن بلندی موج اکثراً متغیر بود انجام شد. آزمایش (T4) در بحرانی‌ترین شرایط از دیدگاه امواج و ژرفای‌های گوناگون برای بررسی بیشترین تأثیرات انجام شد. دوره بازگشت امواج در

ستون دوم جدول ۴، به‌طور ویژه روی دوره بازگشت امواج تمرکز دارد که در آن، زمان رخداد امواج با مشخصات ویژه در یک بازه زمانی معین آورده‌شده است. دوره بازگشت امواج، به‌عنوان یک سنجش مهم در طراحی سازه‌های دریایی، برای پیش‌بینی تغییرات امواج و تأثیر آن‌ها در طول زمان استفاده می‌شود. در جدول ۴، سه نوع متفاوت از دوره‌های بازگشت ۵۰ ساله آب‌بالا آورده‌شده است که مربوط به امواجی است که در طول یک دوره بازگشت ۵۰ ساله به‌طور میانگین در بالاترین سطح از بلندی بوده‌اند. این سناریو به‌ویژه برای ارزیابی پایداری موج‌شکن‌ها در برابر امواج شدید و غیرعادی در نظر گرفته‌شده است. یک دوره بازگشت ۵۰ ساله آب‌پایین، مربوط به امواجی است که در طول یک دوره بازگشت ۵۰ سال به‌طور میانگین در پایین‌ترین سطح از بلندی بوده‌اند. از این داده‌ها برای پیش‌بینی رفتار سازه‌ها در شرایط با بحران کم و در زمان‌هایی که امواج ضعیف‌تر هستند، استفاده شد. دوره بازگشت یک‌ساله، معمولاً مربوط به امواجی است که در یک دوره زمانی یک‌ساله (همانند آب‌پایین و آب‌بالا) رخداد آن‌ها احتمال دارد. این سناریو بیشتر برای بررسی رفتار سازه‌ها در شرایط نوسان‌های کوتاه‌مدت امواج به‌کار می‌رود. سناریوی حد نهایی و بحرانی ۱/۲ برابر آب‌بالا (برای آزمون

تغییرات ریخت‌شناسی نیم‌رخ سازه
تغییرات ریخت‌شناسی نیم‌رخ سازه با روش
فتوگرامتری قبل و بعد از آزمون تحت تابش ۱۱۰
دقیقه امواج در شرایط آب‌بالا و آب‌پائین (دوره
بازگشت ۵۰ ساله)، دوره بازگشت یکساله و ۱/۲ برابر
آب‌بالا و هرکدام با دو تکرار به‌دست آمد. یک نمونه از
این تغییرات در شکل ۴ برای آزمون نهم در شرایط
۱/۲ برابر آب‌بالا نشان‌داده شده است.

پایانی)، مربوط به امواجی است که با شدت بسیار زیاد
و ۱/۲ برابر از حالت آب‌بالا می‌باشند. ستون پنجم
جدول ۴، نشان‌دهنده تراز بستر در مقایسه با CD
است. این تراز مربوط به بلندی یا ژرفای بستر در
مقایسه با سطح طراحی CD است. بستر دریا تأثیر
زیادی بر شیوه انتقال انرژی موجی و عملکرد
موج‌شکن‌ها دارد. اطلاعات مربوط به این داده‌ها در
جدول ۴، به‌ویژه در طراحی دقیق‌تر و تحلیل رفتار
موج‌شکن‌ها در بسترهای گوناگون اهمیت زیادی دارد.



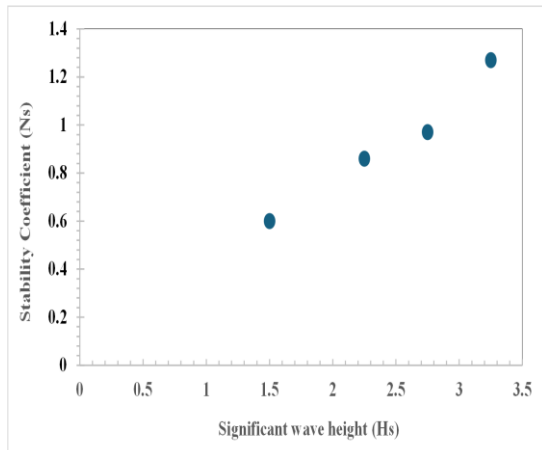
شکل ۴- ریخت‌شناسی مقطع P6 (a) قبل از تابش موج، (b) بعد از تابش موج، (c) تغییرات ریخت‌شناسی.
Figure 4- Represents a) the profile shape before test, b) the profile after test, c) the intersection of
profiles after the 9th test.

جدول ۴- نتایج تقابل موج مشخصه جلوی پاروی مولد موج و ورودی سازه موج‌شکن.

Table 4- Resultant data on the interaction of waves in front of the paddle and reaching waves to the
model.

Test No.	Return Period (yr)	Wave height (m)	Period (s)	Bed elevation related to Chart Datum (m)	Elevation of design (m)	Depth (m)
T1A	50 in high tide	2.7	7	5	2.7	7.7
T1B	50 in high tide	2.7	7	5	2.7	7.7
T1C	50 in high tide	2.7	7	5	2.7	7.7
T2A	50 in low tide	2.2	7	5	Low tide	5
T2B	50 in low tide	2.2	7	5	Low tide	5
T2C	50 in low tide	2.2	7	5	Low tide	5
T3A	One year	1.5	5.2	5	2.7	7.7
T3B	One year	1.5	5.2	5	2.7	7.7
T3C	One year	1.5	5.2	5	2.7	7.7
T4*1.20A	1.2 * 50 in high tide	3.24	7	5	2.7	7.7
T4*1.20B	1.2 * 50 in high tide	3.24	7	5	2.7	7.7
T4*1.20C	1.2 * 50 in high tide	3.24	7	5	2.7	7.7

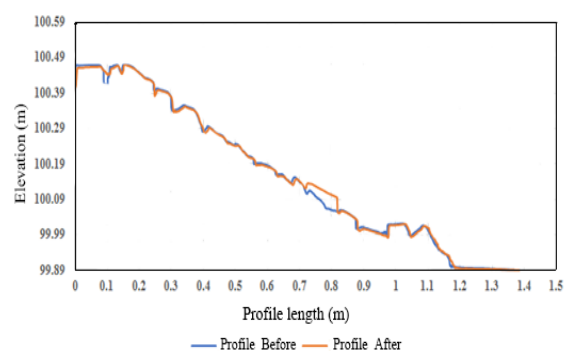
ابعاد و چیدمان صحیح آرمورها وابسته است سبب افزایش پایداری سازه‌های توده‌سنگی شد. به بیان دیگر، هر چه اندازه این سنجه بیشتر باشد، موج‌شکن توانایی بیشتری در مقابله با نیروهای شدید موجی و جریان‌های دریایی دارد و احتمال جابه‌جایی و نابودی آرمورها کمتر است. این یافته به‌ویژه در شرایطی که بلندی امواج و شدت جریان‌ها بیشتر باشد، اهمیت بیشتری دارد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در شرایط بهینه، موج‌شکن توده‌سنگی قادر است نیروهای وارده را به شکل مؤثری جذب کند و از جابه‌جایی‌های ناخواسته سنگ‌ها جلوگیری کند. افزون بر این، آرمورها در این شرایط به‌طور یکنواخت و پایدار روی هم قرار می‌گیرند و اثرات منفی فرسایش یا لغزش به حداقل می‌رسد. این ویژگی بر کاهش تعمیرات و هزینه‌های نگهداری سازه‌های موج‌شکن تأثیرگذار است. چکیده تحلیل سنجۀ پایداری (N_s) در برابر بلندی ویژه امواج (H_s) در شرایط چهارگانه آزمون در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار رابطه سنجۀ پایداری و ژرفای مؤثر.
Figure 6- Diagram of the relationship of the stability parameter and significant wave height.

رابطه میان سنجۀ پایداری و بلندی ویژه در موج‌شکن‌ها یکی از مسائل مهم در طراحی و ارزیابی عملکرد این سازه‌ها است. این دو عامل به‌طور مستقیم با شیوۀ رفتار موج‌شکن در برابر نیروهای محیطی و تأثیرات موجی و جریان‌های دریایی ارتباط دارند. این دو عامل به شکل زیر به یکدیگر وابسته است.

این جابجایی‌ها بر اساس موقعیت هر قطعه در ابر نقاط به نقاط معیاراً سنجیده شد. سپس، از اندازه‌های کمی برای تهیه نمودار جابجایی‌ها و آسیب به موج‌شکن استفاده شد (شکل ۵). استفاده از روش تصویرسنجی در این پژوهش به‌وسیله پژوهش روته و همکاران (۲۰۱۶) مبنی بر بررسی ناپایداری لایه آرمور در مدل آزمایشگاهی تأکید شده است. در این پژوهش نیز از روش به‌کار گرفته شده به‌وسیله روته و همکاران (۲۰۱۶) برای محاسبه ضریب ناپایداری (N_s) استفاده شد.



شکل ۵- نمونه تغییرات رخ داده در شکل نیم‌رخ شیب سازه در آزمون نهم مدل‌سازی.

Figure 5- Representative changes in the slope profile of physical model structure observed during the 9th test.

تحلیل سنجۀ پایداری لایه آرمور

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی پایداری در این پژوهش، سنجۀ پایداری لایه آرمورها بود که نشان‌دهنده وضعیت پایداری و کارایی آرمورها در موقعیت‌های گوناگون طراحی بود. سنجۀ پایداری آرمورها به‌منظور بررسی عملکرد سازه‌های موج‌شکن توده‌سنگی در برابر نیروهای محیطی گوناگون، به‌ویژه امواج و جریان‌های دریایی، ارزیابی شد. سنجۀ پایداری آرمورها بیانگر بررسی شیوۀ چیدمان و مقاومت سنگ‌ها در برابر نیروهای اعمالی و اندازه احتمال جابه‌جایی یا نابودی آنها تحت تأثیر شرایط جوی و موجی گوناگون است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش اندازه سنجۀ پایداری که به‌طور مستقیم به

اثر بلندی موج بر پایداری سازه

در بلندی‌های بیشتر، نیروی امواج و جریان‌ها به شدت روی سازه‌های موج‌شکن تأثیرگذارند. این تأثیرات باعث می‌شود که برای پایداری سازه در بلندی‌های بیشتر، نیاز به چیدمان بهتر، ابعاد بزرگ‌تر مصالح و افزایش مقاومت مصالح باشد. این تغییرات در طراحی می‌تواند به افزایش سنجه پایداری منجر شود. زیرا، سازه برای مقابله با نیروهای بیشتر و خطرات فرسایش و جابه‌جایی باید مقاوم‌تر باشد. اثر سنجه پایداری بر بلندی ویژه، در شرایط مشابه، زمانی که سنجه پایداری افزایش یابد، سازه‌های موج‌شکن نیروهای بیشتری را تحمل می‌کنند و در بلندی‌های بیشتر و شرایط سخت‌تر عملکرد بهتری دارند. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که امواج به شدت به سازه برخورد می‌کنند، اهمیت دارد. در چنین شرایطی، بلندی ویژه موج‌شکن و اندازه‌گیری صحیح آن می‌تواند به جلوگیری از جابه‌جایی سنگ‌ها و نابودی سازه کمک کند. در زمان طراحی موج‌شکن‌ها باید ارتباط میان بلندی ویژه و سنجه پایداری با دقت بررسی شود. مثلاً، در سازه‌هایی که در بلندی‌های ویژه کم ساخته می‌شوند، ممکن است نیاز به کاهش ابعاد و وزن مصالح باشد. زیرا، نیروی موجی در این ژرفاها کمتر است. اما، در بلندی‌های بیشتر، سازه باید با استفاده از مصالح بزرگ‌تر و مقاوم‌تر طراحی شود تا بتواند با نیروی بیشتر امواج مقابله کند. بلندی ویژه تأثیر زیادی بر چگونگی وارد شدن نیروهای موجی به سازه دارد و در ژرفاهای بیشتر، نیروی موجی افزایش می‌یابد. سنجه پایداری بیانگر اندازه مقاومت سازه در برابر این نیروها است و در ژرفاهای بیشتر برای حفظ پایداری باید افزایش یابد. طراحی موج‌شکن‌ها باید به گونه‌ای باشد که سنجه پایداری بر اساس بلندی ویژه بهینه‌سازی شود تا بتواند نیروی امواج را به‌طور مؤثر جذب کند و از جابه‌جایی یا نابودی سنگ‌ها جلوگیری کند. در طراحی صحیح موج‌شکن‌ها باید رابطه دقیق و بهینه‌ای میان بلندی ویژه و سنجه پایداری در نظر گرفت تا سازه در برابر تغییرات محیطی و نیروی امواج مقاوم باشد و طول عمر بیشتری داشته باشد. بر اساس شکل

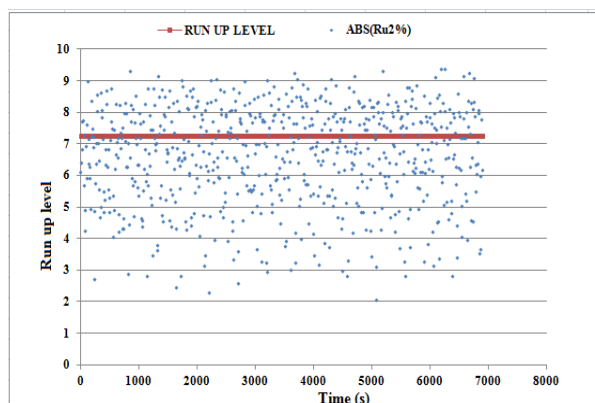
۶، لایه آرمور در شرایط آب‌بالا با امواج H_s برابر $2/8$ به مرز ناپایداری رسید. این در حالی بود که شرایط ناپایداری برای شرایط $1/2$ آب‌بالا در برابر $3/3$ رخ خواهد داد. نتایج پژوهش پاور و همکاران (۲۰۲۵) از دیدگاه اجرای مدل، نوع آزمون‌ها و بررسی پایداری با نتایج این پژوهش مقایسه شد. در پژوهش پاور و همکاران (۲۰۲۵) نیز مقطع انتخاب‌شده، مقطع نزدیک رأس موج شکن بود و همچون بندر گناوه پایداری دو لایه فیلتر و دو لایه آرمور سنجیده‌شده است. نتایج پژوهش پاور و همکاران (۲۰۲۵) مبنی بر ناپایداری نیم‌رخ در شرایط طوفانی با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

نتایج و تحلیل سنجه بالاروی و روگذری

در این پژوهش هدف مهم از مقایسه نتایج آزمایشگاهی بالاروی امواج در موج‌شکن‌ها با نتایج بالاروی معیار به‌دست آمده از محاسبات مهندسان مشاور، ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها و صحت مدل‌های طراحی موج‌شکن‌ها بود. نتایج مقایسه بالاروی امواج در آزمایشگاه با نتایج به‌دست آمده از محاسبات این امکان را برای مهندسان فراهم می‌آورد تا نتایج آزمایشگاهی را با محاسبات نظری مقایسه کنند و مدل‌های طراحی و پیش‌بینی عملکرد موج‌شکن‌ها را بهینه‌سازی کنند. اندازه صحت نتایج به‌دست آمده از محاسبات به‌شکل آزمایشگاهی نیز تحلیل می‌شود. در حالی که با آزمایش‌های فیزیکی می‌توان نتایج دقیق‌تری در شرایط ویژه و پیچیده ارائه داد، محاسبات مهندسان مشاور ابزار سریع‌تر و مقرون به‌صرفه‌تری برای پیش‌بینی‌های اولیه و طراحی سازه‌های موج‌شکن هستند. استفاده از این دو روش به‌شکل ترکیبی، سبب طراحی‌های بهینه‌تر و کارآمدتر برای حفاظت از سازه‌ها در برابر امواج خواهد شد.

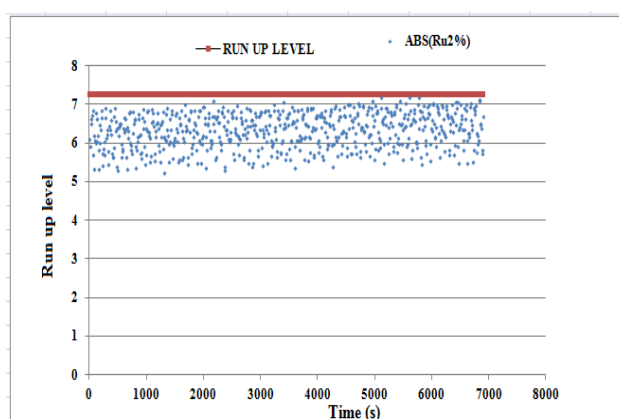
عبور امواج از بدنه موج‌شکن یک پدیده مهم در تحلیل عملکرد سازه‌های بندری است که در آن امواج پس از برخورد با موج‌شکن یا سازه‌های مشابه، قسمتی از انرژی خود را از دست می‌دهند و قسمتی از آن‌ها به سمت بخش داخلی بندر یا ساحل عبور می‌کند (هوانگ

جیانگ (۲۰۱۵). این پدیده می‌تواند تأثیرات زیادی از این‌رو، در طراحی سازه‌های بندری باید به آن توجه روی رفتار آب و سازه‌ها داشته باشد. ویژه‌ای شود.



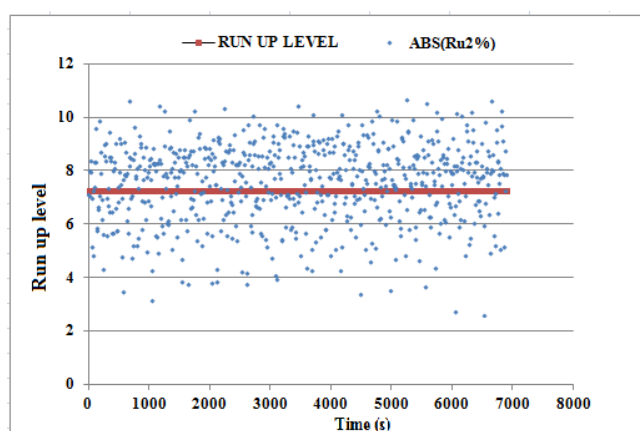
شکل ۷- مقایسه بالاروی پیش‌بینی شده در طراحی و Ru2% در آزمایش تکرار T1A.

Figure 7- The comparison of the designed wave run-up and Ru2% of the T1A test.



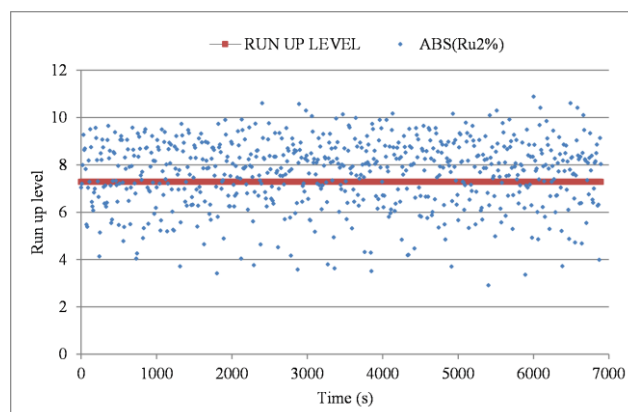
شکل ۸- مقایسه بالاروی پیش‌بینی شده در طراحی و Ru2% در آزمایش تکرار T2B.

Figure 8- The comparison of the designed wave run-up and Ru2% of the T2B test.



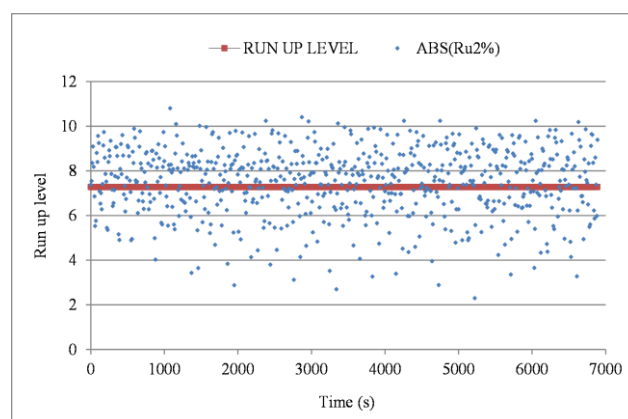
شکل ۹- مقایسه بالاروی پیش‌بینی شده در طراحی و Ru2% در آزمایش تکرار T3C.

Figure 9- The comparison of the designed wave run-up and Ru2% of the T3C test.



شکل ۱۰- مقایسه بالاروی پیش‌بینی‌شده در طراحی و Ru2% در آزمایش تکرار T4B.

Figure 10- The comparison of the designed wave run-up and Ru2% of the T4B test.



شکل ۱۱- مقایسه بالاروی پیش‌بینی‌شده در طراحی و Ru2% در آزمایش تکرار T4C.

Figure 11- The comparison of the designed wave run-up and Ru2% of the T4C test.

ج) عبور امواج از میان ساختار موج‌شکن:

سرانجام، زمانی که امواج به مدت کافی با بدنه موج‌شکن درگیر می‌شوند، ممکن است بخش‌هایی از آب از میان شکاف‌ها، فضاهای خالی یا نواحی با مقاومت کمتر سازه عبور کنند و به سمت پشت موج‌شکن برسند. این موضوع می‌تواند سبب تغییر در ویژگی‌های امواج، مانند کاهش بلندی و تغییر در جهت آن‌ها شود. بر اساس روند آزمایش‌ها، افزون بر موضوع روگذری امواج، پدیده عبور از بدنه تاج موج‌شکن نیز بررسی شد. نتایج به دست آمده از روگذری و عبور موج در آزمایش‌های اصلی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

مراحل عبور امواج از بدنه موج‌شکن

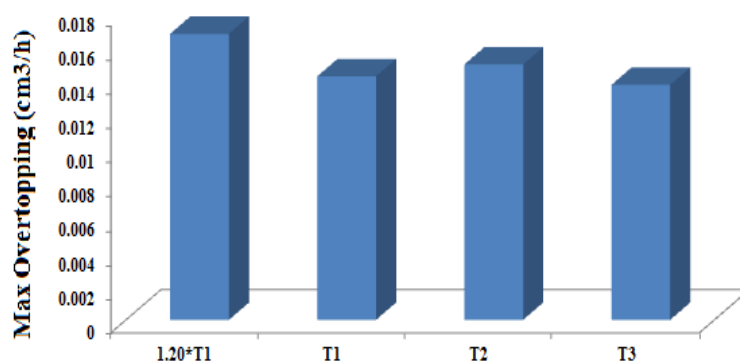
مراحل عبور امواج از بدنه موج‌شکن شامل سه مرحله اصلی بود.

الف) برخورد اولیه امواج با موج‌شکن:

در این مرحله، امواج در برخورد با بدنه موج‌شکن بخشی از انرژی خود را به واسطه ویژگی‌های سازه‌ای مانند شیب، زبری سطح و هندسه از دست می‌دهند.

ب) کاهش بلندی امواج در اثر شکست:

پس از برخورد اولیه، در اثر تعامل موج با سطح شیبدار یا لایه‌های آرمور، بخشی از انرژی موج مستهلک شده و منجر به شکست موج و کاهش بلندی آن می‌شود.



شکل ۱۲- نتایج روگذری و عبور امواج.

Figure 10- The results of the overtopping waves from the breakwater.

باشد. در آزمون T1B، اندازه روگذری ۰/۰۱۴۳ سانتی‌متر مکعب بر متر به‌دست آمد. این اندازه بیانگر عبور حجم معینی از آب است که در مقایسه با دیگر آزمون‌ها کمتر بود. از سوی دیگر، در آزمون T2B، اندازه روگذری به ۰/۰۱۵ سانتی‌متر مکعب بر متر افزایش یافت. این یافته بیانگر آن بود که در شرایط مشابه ولی با یک تغییرات جزئی در شرایط آزمایش (مثل شدت امواج یا سرعت جریان)، اندازه آب‌دهی روگذری کمی افزایش یافت. در آزمون T3B، اندازه روگذری به ۰/۰۱۳۸ سانتی‌متر مکعب بر متر کاهش یافت. این اندازه کمی کمتر از آزمون‌های دیگر بود. این یافته بیانگر شرایط گوناگون جریان آب یا ویژگی‌های ویژه امواج در این آزمایش بود. در آزمون 1.2*T1B، که مربوط به شرایط بحرانی‌تر از دیدگاه بلندی موج بود، اندازه روگذری به ۰/۰۱۶۸ سانتی‌متر مکعب بر متر به‌دست آمد. این داده بیشتر از نتایج دیگر آزمون‌ها بود و بیانگر افزایش آب‌دهی روگذری متناسب با افزایش بلندی موج یا شدت امواج بود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان گفت که افزایش بلندی موج (در آزمون 1.2*T1B) سبب افزایش آب‌دهی روگذری از سازه شد و این افزایش تقریباً ۱۳٪ آزمون T1B بود. این یافته بیانگر آن بود که حتی تغییرات کوچک در بلندی موج بر اندازه روگذری به‌طور قابل‌توجهی تأثیرگذار بودند. این یافته بیانگر آن بود که سازه‌های موج‌شکن حساس به تغییرات بلندی موج هستند و ممکن است در شرایط امواج بحرانی

در این پژوهش، آزمایش‌هایی برای تحلیل رفتار سازه موج‌شکن بندر گناوه در شرایط آزمایشگاهی و در مقیاس مدل‌سازی شده در کانال فلوم انجام شد. هدف از انجام این آزمایش‌ها ارزیابی پدیده روگذری^۵ از سازه‌های موج‌شکن در برابر امواج و جریان‌های گوناگون بود. پدیده روگذری بیانگر اندازه آبی است که از سازه موج‌شکن عبور می‌کند و به‌طور مستقیم به دریا یا فضای پشت سازه وارد می‌شود. در این پژوهش، اندازه روگذری امواج به‌وسیله آبگیر تعبیه شده در پشت سازه تعیین شد. مقطع این آبگیر چهارضلعی و بلندی آن مشخص بود. بنابراین، واحد اندازه‌گیری روگذری بر مبنای پر شدن بلندی آبگیر در ازای آب‌دهی وارده، تعیین شد. در این فرآیند، آب‌دهی روگذری اندازه‌گیری و بر اساس سانتی‌متر مکعب بر متر به ازای هر متر بلندی (h) گزارش شد. برای تحلیل دقیق‌تر، هر آزمایش در شرایط ویژه انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. یکی از جنبه‌های مهم در تحلیل پدیده روگذری، بررسی شیوه تغییر اندازه آب‌دهی روگذری در آزمایش‌های گوناگون است. در این پژوهش، نتایج آزمایش‌های روگذری نشان داد که تغییرات اندازه روگذری در هر یک از آزمایش‌ها کم، اما معنادار بود. این تغییرات می‌تواند ناشی از تفاوت شدت امواج یا تغییرات جزئی در طراحی و شرایط محیطی آزمایش

^۵ Overtopping

دچار مشکلاتی در جلوگیری از عبور آب شوند. در شرایطی که تغییرات میان آزمون‌ها به‌طور آشکار به تغییرات در بلندی موج نسبت داده می‌شود، باید توجه داشت که دیگر سنج‌های محیطی نظیر ویژگی‌های موج، سرعت جریان آب، جنس و طراحی سازه نیز می‌توانند تأثیرگذار باشند. مثلاً اگر در آزمایش T2B جریان آب با سرعت بیشتری وارد کانال فلوم شده باشد، می‌تواند باعث افزایش اندازهٔ روگذری در مقایسه با آزمایش T3B که در آن جریان کندتر است، شود. به این ترتیب، در طراحی موج‌شکن‌ها باید سازه‌ها به‌شکلی طراحی شوند که بتوانند در شرایط گوناگون به‌ویژه در برابر امواج با بلندی‌های متفاوت، عملکرد مناسبی داشته باشند. نتایج این پژوهش نشان داد که سازه‌های موج‌شکن در بندر گناوه تحت تأثیر بلندی موج و شرایط محیطی دیگر (سرعت جریان آب) بودند. همچنین، این نتایج بیانگر آن بود که افزایش بلندی موج به‌طور معناداری سبب افزایش آب‌دهی روگذری شد. مثلاً، در آزمایش $T1B \times 1.2$ ، که مربوط به شرایط بحرانی‌تری بود، اندازهٔ روگذری 0.168 سانتی‌متر مکعب بر متر به‌دست آمد. این یافته بیانگر تأثیر زیاد افزایش بلندی موج بر عملکرد سازه بود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی سازه‌های مشابه در دیگر بنادر و مناطق ساحلی باشد. در طراحی موج‌شکن‌ها، باید به بلندی و شدت امواج توجه شود تا از بروز مشکلات ناشی از روگذری جلوگیری شود و عملکرد سازه‌ها در برابر امواج بحرانی بهبود یابد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، موج‌شکن بندر گناوه بر اساس شرایط آب‌پویایی منطقه تحلیل و طراحی شد. در این راستا، با در نظر گرفتن دورهٔ بازگشت ۵۰ ساله برای امواج و استفاده از ویژگی‌های موج‌شکن، مشخصات امواج وارده به موج‌شکن شامل بلندی موج، دوره تناوب و جهت‌گیری امواج بر اساس اطلاعات موجود تعیین شد. از این داده‌ها به‌عنوان داده‌های ورودی برای طراحی سازه و انتخاب مقطع مناسب موج‌شکن در

استفاده شد. همچنین، با استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌های استفاده‌شده، تغییرات ریخت‌شناسی و پایداری سازه در مواجهه با امواج بررسی شد. نتایج تحلیل پایداری لایه‌های آرمور با استفاده از رابطهٔ موریسون و نیروی گرانش، کشش و درگ نشان داد که برای جلوگیری از ناپایداری، باید نسبت‌های مشخصی از سنج‌های گوناگون رعایت شود. نتایج این پژوهش در طراحی مقاوم‌تر و مؤثرتر موج‌شکن‌ها کاربرد دارد و می‌توان از آنها به‌عنوان بستری مطمئن در طراحی سازه‌های مشابه در دیگر بندها و نواحی ساحلی با شرایط مشابه و به‌ویژه در مواجهه با شرایط بحرانی امواج با دوره بازگشت بلندمدت، استفاده کرد. با استفاده از این نتایج می‌توان طراحی موج‌شکن‌ها و محافظت بهتر از سواحل در برابر امواج را بهبود داد و در بلندمدت هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سازه‌ها را کاهش داد. دانه‌بندی و مشخصات مصالح با استفاده از رابطه‌های تجربی ون‌درمیر و هادسن تعیین شد و ویژگی‌های فیزیکی مصالح لایه‌های آرمور و فیلتر برای مقیاس مدل $1:20$ محاسبه شد. در این مقیاس، دانه‌بندی مصالح برای لایهٔ آرمور در دامنهٔ ابعاد $5/33$ تا $6/32$ سانتی‌متر و برای لایهٔ فیلتر در دامنهٔ ابعاد $2/48$ تا $3/7$ سانتی‌متر تعیین شد. نتایج نشان داد که دامنهٔ وزن مصالح هر لایهٔ آرمور از 326 تا 543 گرم با توزیع یکنواخت 25% برای هر گروه بود. دامنهٔ وزن مصالح هر لایهٔ فیلتر نیز از $32/6$ تا $108/7$ گرم با توزیع 50% برای هر گروه بود. این دانه‌بندی‌ها برای بهینه‌سازی عملکرد سازه و افزایش پایداری در برابر نیروهای موجی انتخاب شدند. نتایج تحلیل تغییرات ریخت‌شناسی مقطع P6، نشان داد که سازه موج‌شکن پس از تابش امواج، از دیدگاه شکل و ترکیب لایه‌های آرمور دچار تغییرات قابل‌توجهی شد. تصویرهای مربوط به ریخت‌شناسی قبل و بعد از تابش موج نشان داد که تغییرات ساختار سطحی موج‌شکن در آزمون نهم، مهم بودند. تغییرات ریخت‌شناختی تأثیر زیادی بر پایداری و کارایی سازه در طول زمان دارد. در تحلیل پایداری لایهٔ آرمور از رابطهٔ موریسون به‌منظور بررسی نیروهای درگ، کشش

و اینرسی وارد بر قطعه‌های آرمور، استفاده شد. نتایج نشان داد که نیروهای درگ و کشش به‌طور غالب بر نیروهای اینرسی تأثیرگذار بودند. برای ارزیابی پایداری لایه آرمور، از نسبت نیروهای درگ و کشش به نیروی گرانش (به‌عنوان معیاری برای ناپایداری) استفاده شد. این نسبت به‌شکل یک معیار کیفی برای پایداری لایه آرمور ارائه شد. رابطه‌ای برای پیش‌بینی پایداری لایه آرمور بر اساس مشخصات امواج و خصوصیات مصالح به‌دست آمد. در این رابطه، از سنجح نسبت پایداری بر اساس بلندی موج و اندازه‌گیری‌های دانه‌بندی مصالح برای مقطع آرمور استفاده شد. نتایج نشان داد که برای اطمینان از پایداری لایه آرمور در برابر امواج با دوره بازگشت ۵۰ ساله، لازم است که نسبت پایداری از حد مشخصی تجاوز نکند، که این محدودیت به‌وسیله ضریب‌های تجربه‌شده و هم‌سنجی (کالیبراسیون) مدل‌های آزمایشگاهی تأیید شد. بر اساس نتایج این پژوهش استفاده از دانه‌بندی‌های دقیق و مناسب برای لایه‌های آرمور و فیلتر در مقیاس‌های مدل‌شده (۱:۲۰) سبب بهبود عملکرد و پایداری موج‌شکن‌ها خواهد شد. افزون بر این، مدل‌های استفاده‌شده در آزمایشگاه بیانگر اهمیت ارزیابی دقیق نیروهای وارد بر سازه و به‌ویژه نیروهای درگ و کشش در تحلیل پایداری موج‌شکن‌ها بودند. برخی از محدودیت‌های این پژوهش مقیاس مدل آزمایشگاهی بود. به‌رغم رعایت تشابه Froude، برخی پدیده‌های غیرخطی مانند شکست موج یا اندرکنش‌های پیچیده میان موج و سازه در مقیاس واقعی ممکن است متفاوت باشند. در نظر نگرفتن اثرات باد و جریان‌های ساحلی (مانند جزر و مد و جریان‌های ناشی از تغییر دما و شوری) بر رفتار آب‌پویایی سازه‌ها در شرایط واقعی تأثیرگذارند. محدودیت دیگر در نظر نگرفتن رسوب‌گذاری یا فرسایش بستر بود که در محیط واقعی نقش مهمی در پایداری سازه‌ها و تغییر شکل بستر دارند. همچنین، محدودیت نبودن امکان بررسی رفتار طولانی‌مدت سازه‌ها سبب می‌شود تا آزمایش‌ها معمولاً در بازه‌های زمانی کوتاه انجام شوند و اثرات بلندمدت مانند

خستگی یا تحلیل رفتن مصالح قابل بررسی نباشند. با وجود استفاده از جاذب موج یا دیواره‌های شیب‌دار، بازتاب جزئی موج‌ها ممکن است نتایج را دستخوش تغییرات کند. از سوی دیگر، دقت تجهیزات اندازه‌گیری مانند سنسورهای موج، اندازه‌گیری‌کننده آب‌دهی یا ابزارهای مکان‌نگاری ممکن است محدود باشد و منجر به خطای اندازه‌گیری در برخی سنجح‌ها شود. بر اساس نتایج این پژوهش، در راستای بهبود طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های ساحلی و بندری در مناطق مشابه و برای توسعه پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود از دانه‌بندی بهینه مصالح در لایه‌های آرمور و فیلتر استفاده شود. زیرا، این موضوع نقش مؤثری در افزایش پایداری موج‌شکن در برابر نیروهای موجی دارد. همچنین، پیشنهاد می‌شود در طراحی موج‌شکن‌های دیگر بنادر با شرایط آب‌پویایی مشابه، از بازه‌های دانه‌بندی ارائه‌شده در این پژوهش بهره‌برداری شود. از سوی دیگر، نتایج تحلیل نیروهای مؤثر بر قطعات آرمور نشان‌دهنده تأثیر بیشتر نیروهای درگ و کشش در مقایسه با نیروهای اینرسی بر پایداری بود. از این‌رو، در مدل‌سازی‌های آتی و طراحی دقیق‌تر سازه‌ها، تأکید بر تحلیل نیروهای درگ و کشش ضروری است و سبب ارتقای دقت در پیش‌بینی رفتار سازه می‌شود.

از سوی دیگر، به‌دلیل محدودیت‌های موجود در مقیاس آزمایشگاهی و اثرات پدیده‌های پیچیده‌ای همچون شکست موج، اندرکنش غیرخطی موج و سازه، و نیز شرایط محیطی حقیقی مانند باد، جریان‌های ساحلی، رسوب‌گذاری و فرسایش بستر، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های کامل‌تری انجام شود. در این راستا، انجام بررسی‌های عددی و میدانی در مقیاس‌های بزرگ‌تر یا حقیقی (پروتوتایپ) و نیز بررسی اثرات بلندمدت از جمله خستگی مصالح و تحلیل عملکرد در بازه‌های زمانی بلندمدت پیشنهاد می‌شود. افزون بر این، توسعه مدل‌های عددی مبتنی بر پویایی سیالات محاسباتی (CFD) و واسنجی آن‌ها با نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های فیزیکی، می‌تواند درک دقیق‌تری از رفتار سازه‌های محافظتی در برابر

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، به‌وسیله مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، راهبری پژوهش، آماده‌سازی فلوم مدل فیزیکی، نگارش مقاله
نویسنده دوم: همکاری در راهبری پژوهش، حمایت مالی پژوهش

نویسنده سوم: مشاوره در اجرای پژوهش، بررسی صحت آزمایش‌ها
نویسنده چهارم: هماهنگی اجرای طرح، بررسی نتایج به‌دست آمده

نویسنده پنجم: پیاده‌سازی مدل فیزیکی، انجام آزمون‌ها و تحلیل نتایج و همکاری در نگارش مقاله

امواج فراهم آورد. همچنین، با توجه به اهمیت تغییرات ریخت‌شناسی و تأثیر آن بر کارایی سازه، پیشنهاد می‌شود تحلیل‌های آینده بر بررسی جامع‌تری از پایداری سازه در طول زمان، با در نظر گرفتن تأثیر عامل‌های محیطی، تمرکز داشته باشند. در طراحی سامانه‌های جاذب موج در آزمایشگاه‌ها، توجه به بازتاب جزئی موج‌ها و تأثیر آن بر نتایج اندازه‌گیری‌ها می‌تواند سبب افزایش دقت تحلیل‌ها شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

فهرست منابع

- Arunjith A, Sannasiraj SA, Sundar V. 2013. Wave overtopping over crown walls and run-up on rubble mound breakwaters with Kolos armour under random waves. *International Journal of Ocean and Climate Systems*. 4(2): 125–132. <https://doi.org/10.1260/1759-3131.4.2.125>
- Ahrens JP, Ward DL. 1992. Overtopping rates for seawalls. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Report. (Publication title and pages to be confirmed).
- Bargi K. 2008. *Fundamentals of Marine Engineering*. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).
- Bruce T, Van der Meer JW, Franco L, Pearson JM. 2009. Overtopping performance of different armor units for rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*. 56(2):166–179. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.07.015>
- Chegini V. 2008. *Manual of the design of breakwaters*. Tehran: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. (In Persian).
- CIRIA. 2007. *The rock manual: The Use of Rock in Hydraulic Engineering*. C683. 36 p. London: CIRIA.
- Ghanbarian M. 2010. *The rubble mound breakwaters*. Tehran: Noah-Ghorb (Khatam-al-Anbia Construction Headquarters). (In Persian).
- Hudson RY. 1959. Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters. *ASCE Transactions*. No. 3213. 25 p.
- Morison JR, O'Brien MP, Johnson JW, Schaaf SA. 1950. The force exerted by surface waves on piles. *Petroleum Transactions, American Institute of Mining Engineers*. 189(5): 149–154. <https://doi.org/10.2118/950149-G>
- Najafi Jilani A, Monshizadeh M. 2014. Laboratory investigations on wave run-up and transmission over breakwaters covered by Antifer unit. *Scientia Iranica, Transaction A: Civil Engineering*. 17(6): 457–470.
- Owen MW. 1980. Design of seawalls allowing for wave overtopping. *HR Wallingford Report EX-924*. 40 p.
- Power M., Bayram A, Salim A, Rosenstein PE. 2025. Design optimization of a rubble-mound breakwater using physical model test. *Ports*. 2025: 237-245.
- Ports and Maritime Organization. 2006. *Manual of the design of ports and maritime structures of Iran*. Tehran: PMO. No. 300–5. 414 p.
- Rute L, Maria ARL, João R, José AR. 2016. Photogrammetric analysis of rubble mound breakwaters scale model tests. *AIMS Environmental Science*. 3(3): 541-559.

Sorensen RM. 1993. Basic wave mechanics for coastal and ocean engineering. New York: John Wiley & Sons. 2nd ed., 304 p.

Troch P, De Rouck J, Burcharth HF. 2003. Experimental study and numerical modeling of wave induced pore pressure attenuation inside a rubble mound breakwater. In J. M. Smith (Ed.), Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering—Solving Coastal Conundrums. Singapore: World Scientific. Vol. 2, pp. 1607–1619.
https://doi.org/10.1142/9789812791306_0135

U.S. Army Corps of Engineers. 2005. Coastal engineering manual (CEM) (EM 1110-2-1100, Washington, D.C.: USACE. 6 vols. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.201>

Van der Meer JW. 1999. Conceptual design of rubble-mound breakwaters. In Advances in Coastal and Ocean Engineering. Singapore: World Scientific. Vol. 5, pp. 221–315.
https://doi.org/10.1142/9789812797582_0005

Wolter G, W. Allsop, Gironella X, Van Gent M 2007. Guidelines for physical model testing of breakwaters: Rubble mound breakwater. Delft Hydraulic, HydrolabIII. NA3.1: 39.



Stability of Genaveh Port Protection Structure against Northern Waves of the Persian Gulf

Mohammadreza Gharibreza^{1*} , Mehdi Nikokar² , Gitta Baradara Ebrahimi³
Arsalan Panahi⁴ , Ehsan Safa⁵

- 1- Associate Professor, River Engineering and Coastal Protection Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran
- 2- Ph.D. Student and Head of the General Directorate of Ports and Coasts Engineering, Ports and Maritime Organization of Iran
- 3- Ph.D. Student and Deputy Director General of Coastal and Port Engineering, Ports and Maritime Organization of Iran
- 4- Ph.D. of Ports and Coasts Engineering, Ports and Maritime Organization of Iran
- 5- Ph.D. of Civil Engineering, Coasts, Ports and Marine Structures, Tabriz University, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Coastal areas in the foothills of coastal watersheds are important due to the presence of a considerable portion of the watershed's inhabitants, serving as a hub for of services and production between the inland parts of the country and abroad, as well as for sea-oriented activities. On the other hand, the coastal zone is affected by erosion and deformation due to the inherent lithology of rock units and coastal landforms, as well as the hydrodynamic conditions of waves. Therefore, sea-oriented activities are carried out under the shelter of protective structures, especially breakwaters. The aim of this research was to investigate the stability of rock mass coastal protection structures under the impact of waves from the northern Persian Gulf.

Materials and Methods

In classifying protective structures, two aspects are considered: structural characteristics and their constituent materials, and the arrangement and location of breakwaters. To achieve the goal of this research, the stability of a profile of the protective structure of the Genaveh Port with the highest impact surface of the breaking waves near the head of the breakwater with a specific wave pattern was tested using a modeling method in the wave simulation laboratory of the National Institute of Soil Conservation and Watershed Management. The port of Genaveh in the northern Persian Gulf is of great commercial and fishing importance.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** gharibreza4@yahoo.com

Citation: Stability of Coastal Protection Structure in Genaveh Port under the Northern Persian Gulf Waves Condition. Watershed Management Research. 38(3): 16-39.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.367798.1604

Received: 09 April 2025, **Received in revised form:** 07 May 2025, **Accepted:** 21 June 2025

Published online: 23 September 2025

Watershed Management Research, Vol. 38, No. 3, Ser. No: 148, Autumn 2025, pp. 16-39.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



Given the challenges such as severe wave interference, coastal erosion, and poor performance of breakwaters against the prevailing waves in the region, it is necessary to more closely examine the stability of protective structures in this area. The breakwaters of this port play a vital role in the stability and safety of the port basin; therefore, analyzing their behavior under different hydrodynamic conditions using modeling in the wave-making flume can provide valuable consequences in optimizing the design and performance of these structures. In this study, the dimensions of the armor layer of the protective structure (breakwater) of the port of Genaveh were determined. The weight of the rock blocks was one of the influential metrics in selecting the most appropriate option for the armor. The important metrics in the design of the protective structure and rubble mound breakwater were divided into three categories: environmental metrics (related to waves), hydraulic metrics, and structural metrics. The damage to the armor layer (ha) was estimated by counting the number of displaced armor blocks or by measuring the eroded area of the armor layer in the transverse profile. The method of calculation the index was based on condition without displacement of armor blocks that were shaken individually or those that were displaced, individually, from their original location by a small and specific amount. The run-up (Ru) and rundown (Rd) levels of water on the slope of the structure are created in each wave impact. These levels are defined relative to the static level and are among the important design metrics. Modeling was implemented using a two-dimensional wave generator flume with a length of 33 m and a width of 5.5 m, with a water intake capacity of up to 1.5 m depth. The structural dimensions were scaled down to a scale of 1:20. The hydrodynamic conditions for the stability assessment of the selected profile included the JONSWAP irregular wave spectrum with a return period of 50 years, an effective wave height (H_s) of 2.7 m, and an amplitude of 6 seconds. This specification with a factor of 1.2 was also used to account for very critical conditions. These waves were radiated for 100 to 110 minutes, equivalent to 1500 breakwater, and in four conditions: high tide (sea tide with wind and wave surge), low tide, one-year return period, and 1.2 times of high tide on the selected profile (P6). The changes resulting from the impact of breakwater were investigated by taking before and after profile photographs using the image measurement method.

Results and Discussion

The results of the physical model to study the stability of the coastal protection structure designed for the northern wave conditions of the Persian Gulf showed that the height and slope design for the construction of Genaveh Port were acceptable. In other words, the design presented for the construction of the protection structure in the Genaveh region was reliable from both functional and structural perspectives. On the other hand, in this design, the armor layer of the protection structure was changed in the slope profile and partial settlement in the filter layer under very critical conditions. During tests related to high tide conditions, an mean of 88% of the observed run-up was at or below the design head of the structure. Displacement of armor layer pieces was also observed only at conditions equivalent to 1.2 times high water and to a very limited extent. Also, after 1300 waves of radiation, the filter layer gradually settled. These conditions were consistent with a 100-year wave return period. Therefore, it was necessary to redesign the structure with a higher height and heavier stone dimensions.

Conclusion and Suggestion

In this research, using the physical model of the Genaveh Port protective structure, the interaction of different wave conditions on the structure, especially the rock mass armor layer, was successfully measured, and stable conditions were predicted for implementation and cost reduction for the implementing agency (Ports and Maritime Organization, PMO). Therefore, in conditions where the breakwater are very critical and coincide with the highest astronomical tide level, the protective structure of Genaveh Port breaks. Therefore, it is recommended that the implementing agency prevent users from traveling along the breakwater and consider other protective measures. In addition, it is suggested that the method used in this study be used to optimize and develop protective structures in other similar coastal areas in the northern Persian Gulf.

Keywords: Coastal protection structure, rubble mound breakwater, stability of the structure, the northern Persian Gulf

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We express our sincere gratitude to Dr. Garshasbi, Dr. Davoodi, Mr. Pashootani, and Dr. Rahmani, members of the Technical Division of the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, for their technical and logistical support, which significantly contributed to the success of our research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

First Author: Conceptualization, research leadership, preparation of the physical model flume, writing of the article

Second Author: Collaboration in research leadership, financial support of the research

Third Author: Consulting in conducting the research, checking the accuracy of the experiments

Fourth Author: Coordinating the research procedures, checking the resultant data

Implementation of the physical model, conducting the tests and analyzing the results and

Fifth Author: collaboration in writing the article