

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1400.7.2.1.4

درصد همانندی: ۷٪

بررسی تجربی بازتاب موج از دیوارهای دریایی شیب‌دار مهدی اسماعیلی

استادیار، گروه اقیانوس‌شناسی، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار
esmaeili@cmu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴

چکیده:

در این مطالعه، رفتار بازتابی دیوارهای دریایی متخلخل شیب‌دار به صورت تجربی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. امواج منظم در طیف گسترده‌ای از ارتفاع‌ها و دوره‌های تناوب استفاده شدند. آزمایش‌ها برای عمق ثابت آب ۰/۲۷ متر و شیب‌های مختلف دیوار دریایی ($\theta = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) انجام شدند. مشخص شد که عوامل تیزی موج، عمق نسبی آب، عامل تشابه شکست و شیب دیوار دریایی در پیش‌بینی ضریب بازتاب موج مؤثر هستند. ضریب بازتاب برای دیوارهای دریایی شیب‌دار در محدوده ۰/۳۶-۰/۷۷ و برای دیواره متخلخل قائم در محدوده ۰/۵۹-۰/۸۳ قرار دارد، درحالی‌که برای دیوار صاف قائم، تقریباً برابر یک است. کاهش بازتاب موج برای دیوارهای دریایی شیب‌دار در مقایسه با دیوار متخلخل قائم حدود ۲۸ درصد بود. معادله‌های تجربی جدید برای تخمین ضرایب بازتاب از دیوارهای دریایی پیشنهادی، با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی توسعه داده شدند. این فرمول‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS بر اساس نتایج تجربی صحت‌سنجی شدند. نتایج این مطالعه در طراحی دیوار اسکله‌های قائم مستهلک کننده انرژی در بنادر، دیوارهای دریایی شیب‌دار برای حفاظت از ساحل در برابر فرسایش و موج‌شکن‌های کیسونی شیب‌دار مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بازتاب موج؛ دیوار دریایی شیب‌دار؛ مدل‌سازی آزمایشگاهی؛ امواج منظم

۱. مقدمه

انواع مختلفی از سازه‌های حفاظت ساحلی مانند دیوارهای دریایی، آب‌شکن‌ها و موج‌شکن‌های فراساحلی برای تثبیت ساحل در برابر فرسایش ناشی از امواج استفاده می‌شود. هر سازه محاسن و معایب خاص خود را داشته و انتخاب سازه مناسب برای حفاظت از ساحل بستگی به شرایط محیطی محل احداث آن دارد. دیوارهای دریایی قائم به‌طور گسترده در سراسر جهان به‌عنوان سازه‌های حفاظتی و دیواره اسکله در بنادر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما نقطه‌ضعف آن‌ها افزایش حرکات ذرات آب در جلوی سازه به دلیل بازتاب قابل توجه موج است که به افزایش بار موج روی دیوار و افزایش آبشستگی پای سازه منجر می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، دیوارهای دریایی شیب‌دار معرفی شده‌اند [۱]. از سوی دیگر، دیوارهای دریایی متخلخل^۱ نیز به‌عنوان راه‌حلی برای رفع مشکلات ناشی از افزایش تلاطم امواج در جلوی سازه‌های قائم در مناطق ساحلی به کار گرفته می‌شوند. دیوارهای متخلخل می‌توانند انرژی موج تابشی را مستهلک کنند و ارتفاع موج منعکس شده را کاهش دهند و در نهایت شرایط مناسبی برای حفاظت و بهره‌برداری از سواحل فراهم سازند [۲].

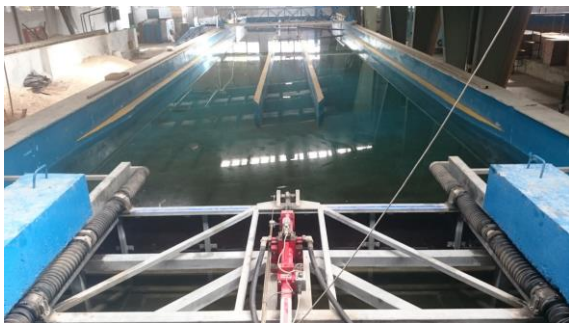
مقدار اتلاف انرژی موج به‌وسیله دیوارهای دریایی شیب‌دار در مقایسه با دیوارهای دریایی عمودی تا حد زیادی به شیب ارائه شده بستگی دارد. اگر شیب دیواره ملایم باشد، تعداد بیشتری از امواج با ریزش روی سطح دیوار می‌شکنند که از نظر کاهش سینماتیک ذرات آب مفید است؛ اما شیب ملایم‌تر، هزینه احداث سازه را افزایش می‌دهد. از این رو دیوارهای دریایی شیب‌دار با وجه مستهلک‌کننده انرژی به‌صورت هیدرودینامیکی جایگزینی برای دیوارهای با شیب ملایم محسوب می‌شوند و باعث کاهش اثرات ناشی از بازتاب موج، بار موج روی دیواره و آبشستگی پای سازه می‌شوند [۳]. در زمینه نحوه برهم‌کنش امواج با سازه‌های حفاظت ساحلی مطالعات بسیاری انجام شده اما تنوع زیاد در

طراحی و ساخت این سازه‌ها سبب شده تا این تحقیقات همچنان جزو مطالعات به‌روز باشد. در این راستا نتایج تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در خصوص بررسی ضریب بازتاب^۲ (K_r) از سازه‌های دریایی بیان می‌شود. تئوچاریس و همکاران نوع جدیدی از دیوار اسکله جاذب موج را برای کاهش ارتفاع موج و افزایش استهلاک انرژی موج در حوضچه بنادر طراحی و مدل‌سازی کردند. نتایج تجربی به‌دست آمده با داده‌های میدانی صحت‌سنجی^۳ شد و کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی ارتفاع امواج در مقابل دیوار اسکله جاذب موج جدید مشاهده شد [۴]. در مطالعه نیلامانی و سندیا با اندازه‌گیری ضریب بازتاب، کارایی بالاتر دیوار دریایی دنداندار نسبت به دیوار صاف در کاهش بازتاب موج مشخص شد. همچنین با انجام آنالیز رگرسیون چندگانه روی داده‌های اندازه‌گیری شده، فرمول‌های جدیدی برای ضریب بازتاب معرفی شد [۳]. کوریم و راجه عملکرد هیدرودینامیکی سازه‌های متخلخل عمودی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی در قالب نمودارهایی تغییرات ضریب بازتاب و ضریب اتلاف انرژی موج (K_d) را برحسب پارامترهای بدون بعد تیزی موج (H_i/L_i) و عمق نسبی آب (d/L_i) نشان داد. در نهایت روابط تجربی جدیدی برای برآورد مقادیر K_r و K_d به دست آمد که در مقایسه با نتایج تجربی دیگر توافق قابل‌قبولی را نشان داد [۵]. در مطالعه نجم و نصار عملکرد بازتابی دیوارهای دریایی قائم و شیب‌دار تحت امواج منظم بررسی و نتایج با هم مقایسه شد. آزمون‌های مدل فیزیکی روی دیوار صاف، دیوار مستهلک‌کننده انرژی با بلوک مثلثی و مستطیلی شکل و دیوار حفره‌دار با شیار افقی انجام شد. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و تحلیل ابعادی در نرم‌افزار آماری SPSS، روابط جدیدی برای محاسبه ضریب بازتاب هر دیوار دریایی ارائه شده است [۶]. نصار و همکاران به بررسی عملکرد هیدرودینامیکی دیوارهای دریایی با وجه دندان‌ای و شکاف‌دار پرداختند. بر اساس نتایج مدل‌سازی فیزیکی و آنالیز رگرسیونی فرمول‌های تجربی جدیدی تعیین شد [۷].

دیوارهای دریایی شیب‌دار در برخورد با امواج است. برای دستیابی به این هدف، آزمون‌های آزمایشگاهی برای دیوارهای دریایی در طیف وسیعی از شرایط ورودی تحت امواج منظم، در عمق ثابت آب ۰/۲۷ متر و شیب‌های مختلف دیوارهای دریایی انجام شد. نتایج آزمایشگاهی به صورت نمودارهایی تغییرات ضریب بازتاب را برحسب تیزی موج، عمق نسبی آب، شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست^۵ (ξ) نشان می‌دهد. به علاوه، بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، آنالیز ابعادی و تحلیل رگرسیون چندگانه، روابط تجربی نیز برای برآورد ضرایب بازتاب ارائه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

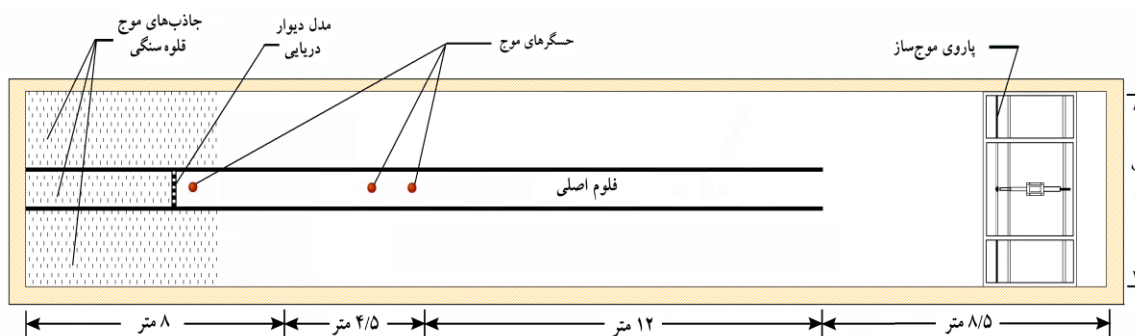
آزمون‌های مدل فیزیکی دیوار دریایی در فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران که ۳۳ متر طول، ۵/۵ متر عرض و ۱/۵ متر ارتفاع دارد، انجام شده است (شکل ۱). امواج منظم با پاروی مولد موج به طول ۵ متر و عمق آبخور ۱ متر از نوع پیستونی قائم که در انتهای فلوم موج قرار گرفته است تولید می‌شوند. ثبت نوسانات سطح تراز آب به وسیله سه دستگاه ارتفاع‌سنج موج در حین انجام آزمایش صورت گرفته و در رایانه ذخیره می‌شوند. یک دستگاه ارتفاع‌سنج موج در جلوی سازه برای اندازه‌گیری امواج تابشی ترکیب‌شده با امواج بازتابی و دو دستگاه ارتفاع‌سنج دیگر برای اندازه‌گیری مقدار بازتاب در فاصله مشخصی از مدل دیوار دریایی نصب می‌شوند (شکل ۲).



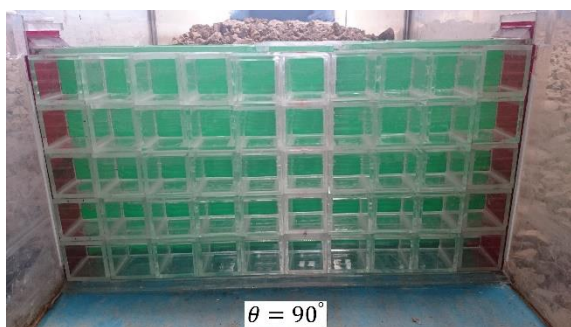
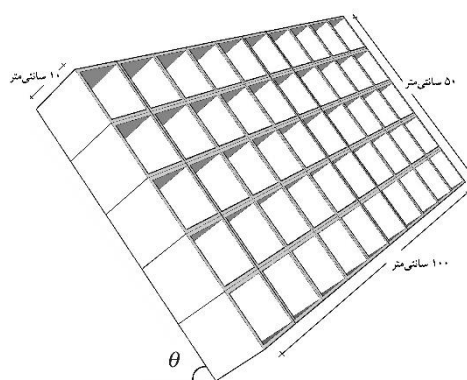
شکل ۱. فلوم موج پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران

اسماعیلی و همکاران با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی، پدیده بازتاب موج از دیوارهای ساحلی قائم کیسونی را بررسی نمودند. ضرایب بازتاب برای دیوارهای نیمه‌متخلخل و متخلخل مدل شده به ترتیب در حدود ۰/۶۰ و ۰/۷۵ تعیین شده که در مقایسه با دیوار صلب با ضریب بالاتر از ۰/۹۰ کاهش قابل توجهی را نشان داد. بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و آنالیز رگرسیون چندگانه، روابط تجربی جدیدی نیز برای پیش‌بینی ضریب بازتاب برای هر دیوار ارائه شده است [۲]. احسانی و همکاران بازتاب موج از موج‌شکن‌های سکویی چندلایه را تحت امواج نامنظم با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی مورد مطالعه قرار داده و تأثیر پارامترهای مختلف ارتفاع موج، دوره موج و عمق آب را بر ضریب بازتاب موج بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده فرمول جدیدی برای تخمین ضریب بازتاب پیشنهاد شد. نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی آماری نشان داد که بازتاب موج پیش‌بینی شده با استفاده از فرمول جدید دقت بیشتری نسبت به روابط قبلی دارد [۹]. در تحقیق دیاز- کاراسکو و همکاران ارائه یک فرمول بهبودیافته و دقیق‌تر برای برآورد ضریب بازتاب موج‌شکن‌های توده‌سنگی مدنظر قرار گرفت. برای این منظور آزمایش‌های مدل فیزیکی انجام شده و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، رابطه‌ای برای تخمین ضریب بازتاب موج بر اساس دو پارامتر عمق نسبی آب و زاویه شیب جلوی سازه (θ) ارائه شده است [۱۰]. بررسی پدیده بازتاب موج از سازه‌های دریایی در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است [۱۱-۱۷].

با توجه به تحقیقات محدود انجام شده در مورد مکانیسم بازتاب موج از دیوارهای دریایی شیب‌دار، در تحقیق حاضر ویژگی‌های بازتابی نوعی از دیوارهای دریایی شیب‌دار متخلخل (مشبک^۴) با شیب‌های ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بررسی شده است. هدف از این مطالعه، بررسی عملکرد



شکل ۲. نمای بالایی فلوم موج و نحوه استقرار سازه، پاروی مولد و حسگرهای موج

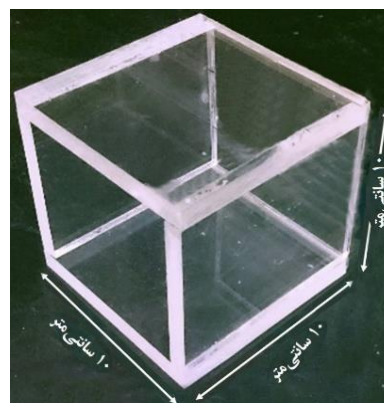


شکل ۴. مدل دیوار دریایی شیب‌دار

در مدل‌سازی آزمایشگاهی سازه‌های دریایی نیروی وزن، نیروی غالب محسوب شده و از معیار فرود^۶ به‌عنوان معیار مناسب برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. عدد فرود برابر با جذر نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ثقلی است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$N_{Fr} = V/\sqrt{gL} \quad (1)$$

برای ساخت مدل دیوار دریایی در ابتدا با استفاده از ورقه‌های پلکسی‌گلاس به ضخامت‌های ۱ سانتی‌متر، بلوک‌های مکعبی شکلی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر با یک وجه باز ساخته می‌شود (شکل ۳). سپس این بلوک‌ها در داخل یک قالب نگهدارنده با ابعاد $100 \times 50 \times 10$ سانتی‌متر روی هم چیده و با کلروفورم ثابت می‌شوند تا قالب نهایی مدل دیوار دریایی شکل بگیرد (شکل ۴). انتخاب ابعاد مدل دیوار مشبک طراحی شده بر اساس محدوده ارتفاع امواج، عمق آب و عرض یک متری قسمت اصلی فلوم موج صورت گرفته است.



شکل ۳. بلوک استفاده‌شده برای ساخت مدل دیوار دریایی

تقریباً همه سازه‌های دریایی بخشی از انرژی موج برخوردی را بازتاب می‌دهند، این پدیده با ضریب بازتاب موج بیان می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_r = H_r/H_i \quad (3)$$

که در آن، H_i ارتفاع موج تابشی و H_r ارتفاع موج بازتابی است. برای محاسبه ضرایب بازتاب از دیوارهای دریایی در فلوم موج از حسگرهای ارتفاع سنج موج استفاده می‌شود. این حسگرها از دو میله بلند فولادی ۶۵ سانتی‌متری ساخته شده است که در انتهای آن یک خازن تصحیح‌کننده قرار گرفته است و بر اساس خاصیت خازنی عمل می‌کند. با بالا آمدن سطح آب فلوم در اثر موج، آب به عنوان دی‌الکتریک بین دو میله حسگر باعث تغییر سطح خازن و در نهایت تغییر ظرفیت آن می‌شود. با تغییرات ولتاژ اعمال‌شده به حسگرها بر اساس تغییر سطح آب و در نتیجه تغییر ظرفیت خازن، نوسانات سطح آب ثبت می‌شود. حسگرها برای ثبت ارتفاع امواج با توجه به بیشینه طول موج (L_{max}) برابر با ۴/۴۷ متر در مدل‌سازی فیزیکی، به ترتیب در فاصله ۶ و ۶/۷۰ متری از سازه نصب شده ($\Delta l=70 \text{ cm}$) و با کابل به رایانه متصل می‌شوند و میزان نوسانات تراز سطح آب را در زمان‌های مختلف ثبت می‌کنند (شکل ۵). این فواصل بر اساس فرضیات روش گودا و سوزوکی (۱۹۷۶) طوری تعیین می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$0.05 \leq (\Delta l/L) \leq 0.45 \quad (4)$$

علاوه بر شرط بالا، از آنجایی که ارتفاع موج در نزدیکی سازه نوسان می‌کند تا به یک حد مشخصی برسد و ثابت بماند، پیشنهاد شده که حسگرها در فاصله‌ای حداقل برابر یک طول موج بیشینه از سازه قرار گیرند. در فاصله بیشتر از یک طول موج بیشینه این نوسانات قابل اغماض است [۱۸]. به کمک سری‌های زمانی تراز آب برداشت‌شده به وسیله حسگرهای ارتفاع سنج موج و برنامه Wave Pack واحد

که V سرعت، g شتاب گرانش و L طول است. با در نظر گرفتن معیار فرود و مقیاس انتخابی ۱:۱۰، عدد مقیاس برای پارامترهای مختلف عبارت است از:

$$N_{H_i} = N_{L_i} = N_{L_0} = N_d = \frac{1}{10} \quad (2)$$

$$N_T = \frac{1}{\sqrt{10}}$$

با توجه به قوانین مدل‌سازی، دامنه تغییرات پارامترهای مورد مطالعه در آزمایش‌های مدل فیزیکی در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر واقعی این پارامترها بر اساس روابط (۲) تعیین می‌شوند.

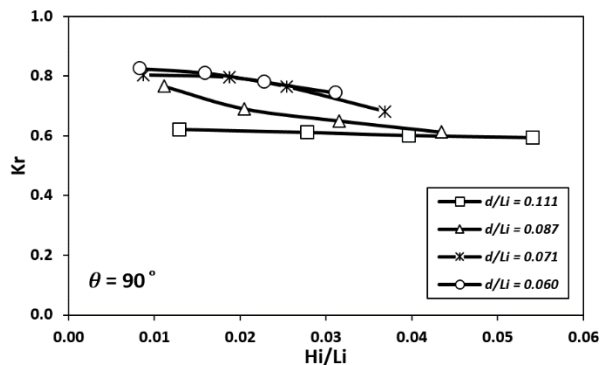
جدول ۱. محدوده پارامترهای حاکم بر مدل‌سازی فیزیکی

پارامتر	محدوده تغییرات
ارتفاع موج (H_i)	۳/۱۴ تا ۱۴/۲ سانتی‌متر
دوره تناوب موج (T)	۱/۶۱ تا ۲/۸۱ ثانیه
عمق آب (d)	۲۷ سانتی‌متر
طول موج فرودی (L_i)	۲/۴۳ تا ۴/۴۷ متر
طول موج ژرفاب (L_0)	۴/۰۳ تا ۱۲/۳ متر
شیب دیوار دریایی (θ)	۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه
زاویه برخورد موج (β)	۹۰ درجه

انتخاب محدوده پارامترهای بیان‌شده بر اساس ابعاد بلوک‌ها و مدل دیوار دریایی طراحی شده صورت گرفته است. محدوده تغییرات پارامترهای هیدرولیکی بدون بعد نیز در انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی در جدول ۲ مشخص شده است. این پارامترها به عنوان متغیرهای مستقل در بحث آنالیز رگرسیونی برای تعیین روابط ضریب بازتاب استفاده می‌شوند.

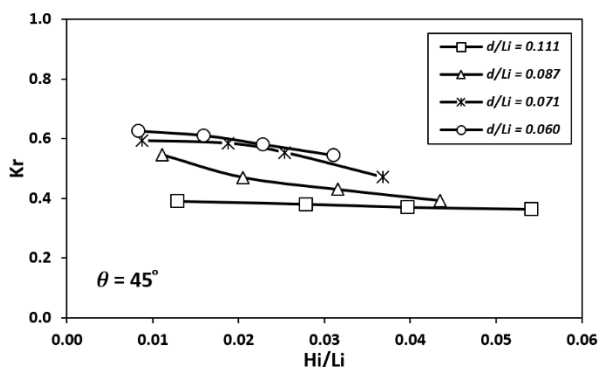
جدول ۲. محدوده تغییرات پارامترهای بی‌بعد برای امواج منظم

پارامتر بی‌بعد	محدوده تغییرات
تیزی موج (H_i/L_i)	۰/۰۵۲ تا ۰/۰۱۱
عمق نسبی آب (d/L_i)	۰/۱۱۱ تا ۰/۰۶۰
ارتفاع نسبی موج (H_i/d)	۰/۵۱۸ تا ۰/۱۱۶
پارامتر تشابه شکست (ξ)	۴/۰۸ تا ۴/۳
$\cot \theta$	۰/۲۶۷، ۰/۵۷۷ و ۱



شکل ۶. تأثیر ارتفاع موج بر ضریب بازتاب برای دیوار دریایی قائم متخلخل به ازای دوره‌های تناوب موج مختلف

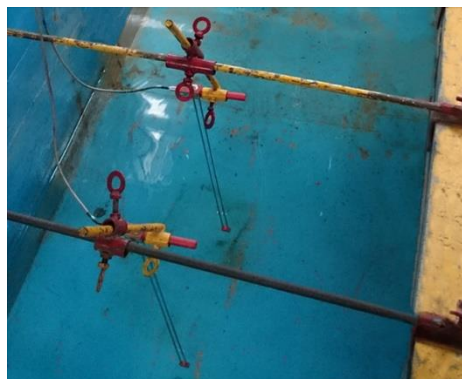
در شرایط هیدرودینامیکی یکسان، برای مدل‌های دیوار دریایی شیب‌دار، به دلیل شیب سازه در کنار ساختار مشبک، شرایط شکست موج و استهلاک انرژی موج برخوردی تقویت شده و کاهش بیشتر مقادیر ضریب بازتاب در مقایسه با دیواره قائم مشاهده شده است. برای دیوارهای دریایی با زاویه شیب ۴۵ درجه، K_r در محدوده ۰/۳۶ تا ۰/۶۳ تغییر می‌کند که نسبت به دیوار قائم کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد (شکل ۷).



شکل ۷. تأثیر ارتفاع موج بر K_r برای دیوار دریایی با زاویه شیب ۴۵ درجه به ازای دوره‌های تناوب موج مختلف

ضریب بازتاب برای دیوارهای با شیب ۷۵ درجه و ۶۰ درجه نیز به ترتیب در محدوده ۰/۴۳-۰/۷۷ و ۰/۴۰-۰/۶۷ تغییر است. با کاهش زاویه شیب دیوار از ۹۰ به ۴۵ درجه، روند کاهش مقدار K_r مشاهده شد که با نتایج تئوری مطابقت دارد. نتایج نشان می‌دهد که برای مقادیر ثابت عمق نسبی، با

نرم‌افزاری فلوم موج، ضرایب بازتاب موج و ارتفاع موج تابشی در جلوی سازه محاسبه می‌شود.



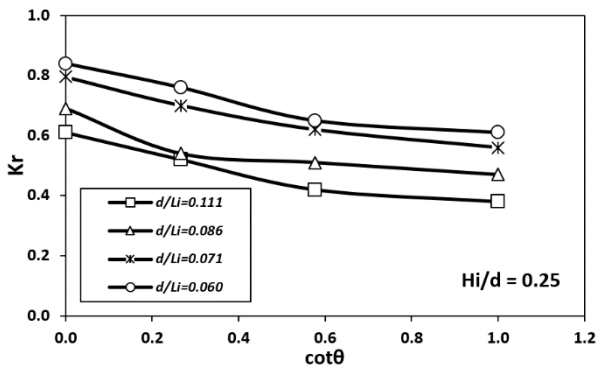
شکل ۵. حسگرهای ارتفاع سنج موج

پارامترهای مربوط به امواج در شروع هر آزمایش به‌عنوان ورودی برنامه Wave Pack تعیین می‌شوند. با در نظر گرفتن محدوده ارتفاع‌ها و دوره‌های تناوب موج و مدل دیوار دریایی با چهار شیب متفاوت، در مجموع ۹۶ آزمون مدل فیزیکی در این تحقیق انجام شده است.

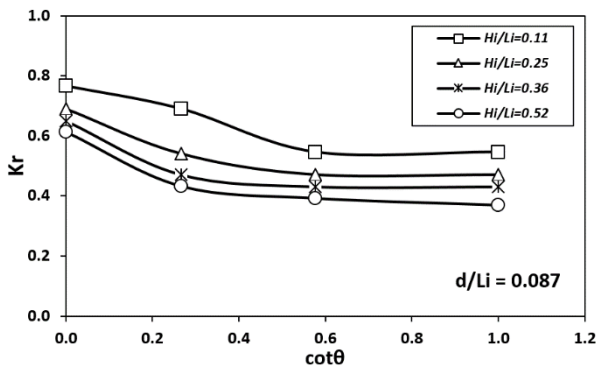
۳. نتایج و بحث

در این بخش اثر ارتفاع موج (بر مبنای تیزی موج)، دوره تناوب موج (در قالب عبارت عمق نسبی آب)، شیب دیوار دریایی (برحسب ترم $\cot(\theta)$) و پارامتر تشابه شکست (ξ) بر ضریب بازتاب، برای دیوارهای دریایی مدل شده بررسی می‌شود. در ابتدا برای اعتبارسنجی روش آزمایشگاهی، ضریب بازتاب از دیوار صاف قائم اندازه‌گیری شده است. مقادیر به‌دست آمده در محدوده ۰/۹۳-۰/۹۸ نشان‌دهنده قابل قبول بودن نتایج مدل‌سازی فیزیکی است. برای دیوار قائم متخلخل، ضریب بازتاب موج به ازای تمامی مقادیر تیزی موج و عمق نسبی در محدوده ۰/۵۹ تا ۰/۸۳ قرار دارد که نشان‌دهنده کاهش متوسط ۲۵ درصدی مقدار K_r در مقایسه با دیوار صاف به دلیل ساختار مشبک وجه جلویی دیوار متخلخل و اتلاف انرژی موج برخوردی است (شکل ۶).

بر ضریب بازتاب موج را مشخص می‌کنند. همان‌طور که انتظار می‌رود کاهش مقادیر ضرایب بازتاب با کم شدن زاویه شیب دیوار (افزایش $\cot(\theta)$) قابل مشاهده است. البته این روند کاهشی در محدوده شیب دیوار ۶۰-۹۰ بیشتر از بازه ۴۵-۶۰ درجه است.



شکل ۹. تغییرات K_r برحسب شیب دیوار دریایی به ازای عمق‌های نسبی مختلف ($H_i/d = 0.25$)



شکل ۱۰. تغییرات K_r برحسب شیب دیوار دریایی به ازای تیزی‌های موج مختلف ($d/L_i = 0.087$)

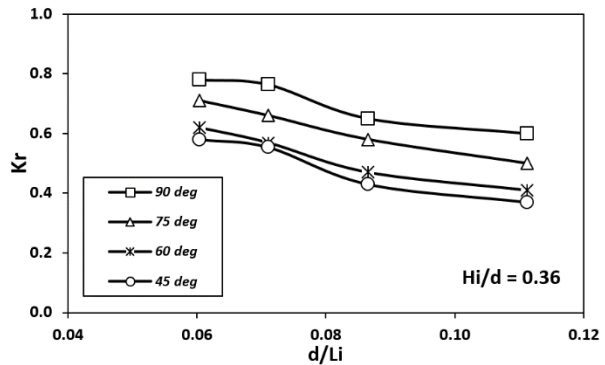
پارامتر تشابه شکست (عدد ایریبارن^۷) با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = \tan\theta / (H_i/L_0)^{0.5} \quad (5)$$

مقدار ξ برای دیوارهای مدل شده در محدوده ۴/۳ - ۴۰/۸ قرار دارد که نشان می‌دهد، امواج آزمایشگاهی تولیدشده از نوع امواج شکن‌های لغزشی^۸ هستند. طبق شکل ۱۱، با افزایش مقدار ξ میزان K_r نیز افزایش می‌یابد.

افزایش تیزی موج، مقدار K_r کاهش یافته که علت آن اتلاف بیشتر انرژی موج و کاهش ارتفاع موج بازتابی برای امواج با مقدار تیزی بالاتر است. در حالت کلی مقادیر K_r برای دیوارهای دریایی شیب‌دار در محدوده ۰/۳۶ تا ۰/۷۷ قرار دارد که در مقایسه با دیوار قائم به‌طور متوسط کاهش ۲۸ درصدی را نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر دوره تناوب موج بر ضرایب بازتاب، نمودار تغییرات K_r برحسب عمق نسبی در یک ارتفاع نسبی ثابت ($H_i/d = 0.36$) برای دیوارهای دریایی در شکل ۸ رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که ضریب بازتاب با عمق نسبی نسبت وارونه دارد و با افزایش مقدار d/L_i (ناشی از کاهش دوره تناوب موج در عمق آب ثابت)، مقدار K_r کاهش می‌یابد.



شکل ۸. تأثیر دوره تناوب موج بر K_r برای دیوارهای دریایی با شیب متفاوت ($H_i/d = 0.36$)

با شرایط ورودی مشابه، ضریب بازتاب برای دیوارهای دریایی شیب‌دار بین ۱۳ تا ۴۲ درصد در مقایسه با دیوار قائم کاهش یافته است. این نتایج عملکرد بهتر دیوارهای شیب‌دار را در مقایسه با دیوار با وجه قائم نشان می‌دهد؛ بنابراین، برای امواج منظم، ضریب بازتاب موج با افزایش تیزی موج و عمق نسبی کاهش می‌یابد. این روند در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شده است [۱، ۳، ۵-۹، ۱۲، ۱۶-۱۷].

در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودار تغییرات K_r برحسب $\cot(\theta)$ رسم شده است. این نمودارها در واقع اثر شیب دیوار دریایی

مستقل تیزی موج، عمق نسبی، شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست با متغیر وابسته ضریب بازتاب نشان می‌دهد. اطلاعات آنالیز واریانس و خلاصه ضرایب مربوط به معادله رگرسیونی پیشنهادی برای دیوار دریایی شیب‌دار در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۴. جدول آنالیز واریانس معادله رگرسیونی (۵)

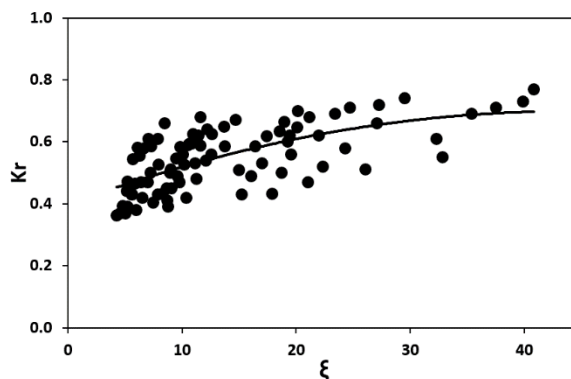
مدل	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری Sig.
رگرسیون	۱/۹۳۸	۳	۰/۴۸۴	۸۴/۴۶۶	۰/۰۰۰ ^a
مانده	۰/۲۵۸	۴۵	۰/۰۰۶		
کل	۲/۱۹۶	۴۹			

جدول ۵. جدول خلاصه ضرایب معادله رگرسیونی (۵)

مدل	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	آماره t	سطح معنی‌داری Sig.
	B	خطای معیار			
عدد ثابت	-۲/۸۱۸	۰/۱۳۵	-۲۰/۸۳۱	-۲۰/۸۳۱	۰/۰۰۰
LNdLi	-۰/۵۹۰	۰/۰۵۱	-۰/۶۳۱	-۱۱/۵۳۶	۰/۰۰۰
LNHiLi	۰/۹۰۶	۰/۳۲۸	۲/۳۴۶	۲/۷۶۶	۰/۰۰۸
LNcotθ	۱/۹۷۴	۰/۶۳۴	۱۲/۹۹۵	۳/۱۱۳	۰/۰۰۳
LN ξ	۲/۱۳۵	۰/۶۶۵	۱۳/۴۹۹	۳/۲۱۳	۰/۰۰۲

a. متغیرهای مستقل: (عدد ثابت)، LNdLi، LNHiLi، LNcotθ، LN ξ
b. متغیر وابسته: LNKR

با توجه به مقدار احتمال کوچک‌تر از ۰/۰۵ ($P < 0.05$) در جدول ۵، تأثیر تغییرات متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته ضریب بازتاب معنی‌دار است، به‌منظور صحت‌سنجی^۹ روابط پیش‌بینی‌شده، معادله‌های رگرسیونی به‌دست‌آمده به یک‌سوم باقی‌مانده داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده است و آزمون نمونه‌های زوجی^{۱۰} بر روی مقادیر ضرایب بازتاب اندازه‌گیری شده $(K_r)_m$ و پیش‌بینی شده $(K_r)_p$ انجام شده است (جدول ۶). با توجه به سطح معنی‌داری نزدیک به یک (۰/۸۴)، اختلاف شاخصی در مقایسه بین مقادیر K_r اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده مشاهده نشد.

شکل ۱۱. تغییرات K_r برحسب پارامتر تشابه شکست برای دیوارهای دریایی شیب‌دار

به‌طورکلی می‌توان گفت که با افزایش شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست، مقدار ضریب بازتاب افزایش یافته است. این نتیجه توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۱، ۳، ۷-۸].

برای تعیین روابط تجربی ضرایب بازتاب، پارامترهای بدون بعد تیزی موج، عمق نسبی آب، شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست به‌عنوان پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر K_r لحاظ شده و معادله کلی زیر در نظر گرفته شده است [۱۹].

$$K_r = a(d/L_i)^b (H_i/L_i)^c (\xi)^d (\cot \theta)^e \quad (6)$$

در این بخش آنالیز رگرسیون چندگانه روی دوسوم داده‌های آزمایشگاهی که به‌صورت تصادفی انتخاب شده است با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام می‌شود. مقادیر پارامترهای a ، b ، c ، d و e جهت محاسبه ضریب بازتاب برای دیوارهای دریایی قائم و شیب‌دار در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای ضرایب بازتاب پیش‌بینی‌شده برای دیوارهای دریایی قائم و شیب‌دار

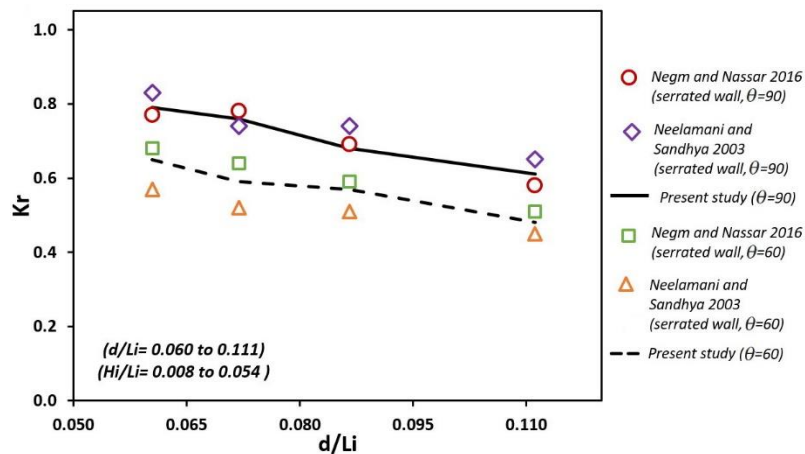
نوع دیوار	a	b	C	d	e	R ²	Eq.
قائم	۰/۱۹	-۰/۳۸	-۰/۰۹	۰	۰	۰/۹۱	(۴)
شیب‌دار	۰/۰۶	-۰/۵۹	۰/۹۱	۲/۱۳	۱/۹۷	۰/۸۸	(۵)

مقادیر بالای ضرایب تعیین (R^2) به‌دست‌آمده از آنالیز رگرسیونی در جدول ۳ ارتباط قابل‌قبولی را بین متغیرهای

به‌منظور اعتبارسنجی^{۱۱} روابط تجربی به‌دست‌آمده، مقایسه ضرایب بازتاب برای دیوارهای دریایی مشبک با نتایج محدود حاصل از کارهای محققان دیگر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، توافق خوبی در پیش‌بینی K_r بین نتایج حاصل از مطالعه حاضر و نتایج مطالعات محققان دیگر مشاهده می‌شود.

جدول ۶. جدول آزمون نمونه‌های زوجی برای اعتبارسنجی معادله (۵)

	تفاضل‌های زوجی				t	df	سطح معنی‌داری	
	میانگین	انحراف معیار	خطای معیار میانگین	تفاضل‌های با بازه اطمینان ۹۵٪				
				حد پایینی				حد بالایی
جفت معادله ۴ (K_r)m-(K_r)p	۰/۰۰۰۸	۰/۲۰۴	۰/۰۰۴۲	-۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۹۴	۰/۲	۲۴	۰/۸۴۳



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر K_r به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر با مطالعات قبلی برحسب عمق نسبی

مؤثر، معادله‌های پیشنهادی برای برآورد ضرایب بازتاب ارائه شد. نتایج مهم به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱. به ازای تمامی مقادیر ارتفاع و دوره تناوب موج، ضریب بازتاب برای دیوار قائم، در محدوده $۰/۵۹-۰/۸۳$ قرار دارد و در شرایط هیدرودینامیکی یکسان، مقدار K_r برای دیوارهای دریایی شیب‌دار در بازه $۰/۳۶$ تا $۰/۷۷$ متغیر است؛
۲. مقایسه مقادیر ضرایب بازتاب دیوارهای دریایی شیب‌دار با دیوار قائم، کاهش متوسط ۲۸ درصدی را نشان داد. این نتایج

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضرایب بازتاب ناشی از امواج منظم در برخورد با دیوارهای دریایی شیب‌دار به کمک مدل‌سازی فیزیکی در فلوم موج مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر ارتفاع موج، دوره تناوب موج، شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست بر مقادیر K_r بررسی شد. در نهایت بر اساس اندازه‌گیری‌ها و انجام آنالیز رگرسیونی غیرخطی بر روی پارامترهای بدون بعد

- seawalls via experimental modelling. *Procedia Engineering*. 2016;154:919-27.
- [7] Nassar K, Mahmud WE, Tawfik A, Raghe O, Negm A, Fath H. Developing empirical formulas for assessing the hydrodynamic behaviour of serrated and slotted seawalls. *Ocean Engineering*. 2018;159:388-409.
- [8] Pratola L, Rinaldi A, Molfetta MG, Burno MF, Pasquali D, Dentale F, Mossa M. Investigation on the reflection coefficient for seawalls protected by a rubble mound structure. *Journal of Marine science and Engineering*. 2021;159:388-409.
- [9] Ehsani M, Moghim MN, Shafieefar M, Mostaghiman A. Wave reflection of irregular waves from multi-layer berm breakwaters. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*. 2020;9(9):937-52.
- [10] Diaz-Carrasco P, Eldrup MR, Anderson TL. Advance in wave reflection estimation for rubble mound breakwaters: The importance of the relative water depth. *Coastal Engineering*. 2021;168:1-13.
- [۱۱] اسماعیلی مهدی، رشیدی حسینی، فرجامی حسین. بررسی خصوصیات استهلاکی دیوار دریایی جاذب موج عمودی. فصلنامه علمی دریا فنون. ۱۴۰۰؛ ۸(۴): ۳۰-۳۹.
- [۱۲] کرمی‌خانیک علی، شکرلب ملوک. ارزیابی آزمایشگاهی انعکاس امواج از دیواره‌های ساحلی صندوقه‌ای. فصلنامه پژوهش و سازندگی. ۱۳۸۴؛ ۱۸(۲): ۱۱-۱۷.
- [13] Hodaei SMR, Chamani MR, Moghim MN, Mansoorzadeh S, Kabiri-Samani A. Experimental study on reflection coefficient of curved perforated plate, *Journal of Marine Science and Application*, 2016;15(4):382-387.
- [14] Lima Neto I. Wave reflection from submerged rectangular obstacles: experiments and predictive formula, *Acta Scientiarum Technology*, 2018;40(1):20-25.
- [15] Setiyawan A. Analysis breakwater type cube of the transmission coefficient (K_t), reflection coefficient (K_r), and dissipation coefficient (K_d), *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018;13(17): 4696-4703.
- [16] Koraim AS, Heikal EM, Abo Zaid AA. Hydrodynamic characteristics of porous seawall protected by submerged breakwater, *Applied Ocean Research*, 2014; 46:1-14.
- [17] Nassar K, Mahmud WE, Tawfik A, Raghe O, Negm A, Fath H. Developing empirical formulas عملکرد بهتر دیوارهای دریایی شیب‌دار را در مقایسه با دیوارهای با وجه قائم نشان می‌دهد؛
۳. ضرایب بازتاب از دیوارهای دریایی شیب‌دار با تیزی موج و عمق نسبی آب رابطه وارونه و با زاویه شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست رابطه مستقیم دارد؛
۴. مقادیر ضرایب بازتاب به دست آمده از معادله‌های پیش‌بینی شده توافق قابل قبولی را با نتایج آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده توسط محققان دیگر نشان داد؛
۵. نتایج بررسی انجام شده روی دیوار دریایی شیب‌دار نشان‌دهنده مناسب بودن کاربرد این نوع از سازه‌ها به عنوان سازه حفاظت ساحلی است.

سپاسگزاری

از مسئولان محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران برای فراهم آوردن امکانات مورد نیاز برای انجام دادن آزمون‌های فیزیکی این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک آن مرکز، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] El-Alfy KS, Rageh OS, Nassar KA. Wave hydrodynamic characteristics of vertical and sloped seawalls. *Mansoura Engineering Journal*. 2015 Mar 26;40(1):1-18.
- [2] Esmaeili M, Rahbani M, Karami Khaniki A. Experimental investigating on the reflected waves from the caisson-type vertical porous seawall. *Acta Oceanologica Sinica*. 2019;38(6):117-23.
- [3] Neelamani S, Sandhya N. Wave reflection characteristics of plane, dentated and serrated seawalls. *Ocean Engineering*. 2003;30(12):1507-33.
- [4] Theocharis I, Anastasaki EN, Costantinos IM, Giantsi T. A new wave absorbing quay-wall for wave height reduction in a harbor basin, *Ocean Engineering*, 2011;38:1967-78.
- [5] Koraim A, Rageh O. Hydrodynamic performance of vertical porous structures under regular waves. *China Ocean Engineering*. 2013;4(27):451-68.
- [6] Negm A, Nassar K. Determination of wave reflection formulae for vertical and sloped

for assessing the hydrodynamic behaviour of serrated and slotted seawalls, Ocean Engineering, 2018; 159:388-409.

[18] Goda Y, Suzuki Y. Estimation of incident and reflected waves in random waves. In: Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering. New York;1976. P.828-45.

[19] Hughes SA. Physical models and laboratory techniques in Coastal Engineering. Singapore: Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Publishing; 1993. p.568.

پی‌نوشت

1. Porous seawalls
2. Reflection coefficient
3. Verification
4. Perforated
5. Surf similarity parameter
6. Froude criterion
7. Iribarren number
8. Surging
9. Verification
10. Paired samples test Verification
11. Validation