

انعکاس امواج منظم از دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای

مهدی اسماعیلی^۱، مریم راهبانی^{۲*}، علی کرمی خانیکی^۳

esmaeili@cmu.ac.ir

m_rahbani@hormozgan.ac.ir

akk7239@gmail.com

^۱ استادیار، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

^۳ عضو هیئت علمی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۰۹

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۱۶

چکیده

در این مقاله، ویژگی‌های انعکاسی دیوارهای ساحلی قائم صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل تحت امواج منظم با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی بررسی می‌شود. آزمایش‌های متعددی برای طیف گسترده‌ای از ارتفاع‌ها و دوره‌های موج و عمق‌های مختلف آب در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران انجام شد. بر اساس این آزمایش‌ها این نتایج به دست آمد که دیوار ساحلی متخلخل نسبت به دیوار صلب و نیمه‌متخلخل در کاهش انعکاس موج عملکرد بهتری دارد. ضریب انعکاس (K_r) ناشی از امواج منظم برای دیوار ساحلی متخلخل در محدوده ۰/۵۷-۰/۸۹ و دیوار نیمه‌متخلخل در محدوده ۰/۹۴ - ۰/۷۰ قرار دارد، در حالی که برای دیواره صلب عمودی بیشتر از ۰/۹۰ است. همچنین مشخص شد که ضریب انعکاس با افزایش تیزی موج (H_i/L)، عمق نسبی آب (d/L) و تخلخل دیوار (n) کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج برای شرایط ورودی یکسان، نشان می‌دهد که کاهش متوسط در K_r برای دیوارهای ساحلی نیمه‌متخلخل و متخلخل در مقایسه با دیوار صلب به ترتیب حدود ۱۸ و ۳۲ درصد است. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، تحلیل ابعادی و آنالیز رگرسیون چندگانه، روابط تجربی جدیدی برای پیش‌بینی ضریب انعکاس موج ارائه شده است. اعتبارسنجی فرمول‌های پیش‌بینی شده با نتایج تجربی دیگر نشان داد که معادله‌ها می‌توانند برای اهداف عملی مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: انعکاس موج، امواج منظم، دیوار ساحلی متخلخل، مدل فیزیکی

۱. مقدمه

تداخل امواج تابشی و بازتابی وضعیت ناپایداری را جلوی دیوارهای ساحلی به وجود می‌آورد. از این رو در طراحی این سازه‌ها سعی می‌شود تا با انتخاب شکل مناسب برای دیوار، انعکاس را کاهش و استهلاك انرژی موج را افزایش داد. امروزه مهندسان سواحل برای رفع این مشکلات و کاهش هزینه‌های ساخت، استفاده از بلوک‌های بتنی متخلخل صندوقه‌ای (کیسونی) را برای ساخت دیوارهای ساحلی، راهکاری مناسب معرفی می‌کنند. میزان کارایی این گونه دیوارهای ساحلی برای جذب انرژی امواج به پارامترهای سازه‌ای (شکل و ابعاد حفره‌ها، نحوه چیدمان بلوک‌ها و شیب

دیوارهای ساحلی به منظور حفاظت از سواحل در برابر امواج، جلوگیری از ورود آب به سواحل و در راستای به کارگیری مناسب زمین‌های ساحلی طراحی و ساخته می‌شوند. مهم‌ترین بارهای وارد بر دیوارهای ساحلی، امواج دریا هستند که مسلماً در حالت طوفانی شدت آن‌ها زیاد خواهد بود [۱]. دیوارهای ساحلی می‌توانند به اشکال هندسی مختلفی مانند دیوارهای قائم، شیب‌دار، شیب دوگانه یا چندگانه و انحنادار اجرا شوند. هر کدام از این دیوارها معایب و محاسنی دارند و انتخاب آن بر مبنای بررسی رفتار سازه در مواجهه با امواج و شرایط محیطی حاکم صورت می‌گیرد [۲].

دادند. بررسی‌های تحلیلی نشان داد که ویژگی‌های بازتابی دیوار دریایی متخلخل در اصل به تخلخل صفحه و ارتفاع موج تابشی بستگی دارد. مقایسه ضرایب بازتابی نتایج تحلیلی با نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش‌های مدل فیزیکی توافقی خوبی را نشان داد [۷].

در مطالعه‌ای نیلمانی و سندهیا در سال ۲۰۰۳، عملکرد هیدرودینامیکی دیوارهای دریایی عمودی صاف و دنداندار را با استفاده از مدل فیزیکی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها برای شیب‌های مختلف دیوار دریایی، عمق آب ثابت و برای هر دو موج منظم و تصادفی اجرا شده است. با اندازه‌گیری بازتاب موج برای تعیین ویژگی‌های استهلاکی دیوارهای دریایی مشخص شد که دیوار دریایی دنداندار نسبت به دیوار دریایی صاف در کاهش بازتاب موج مؤثرتر است. تحلیل رگرسیون چند متغیره داده‌ها انجام شده و روابط جدیدی برای ضریب انعکاس^۲ ارائه شده است [۸].

بر اساس مطالعه کورایم و راجه در سال ۲۰۱۳، عملکرد هیدرودینامیکی سازه‌های متخلخل عمودی تحت امواج منظم با استفاده از مدل‌های فیزیکی بررسی شده است. مشخص شد که ضریب انعکاس با افزایش عمق نسبی آب، تیزی موج، عرض نسبی موج‌شکن، ارتفاع نسبی موج‌شکن و تخلخل موج‌شکن افزایش می‌یابد. روابط تجربی برای برآورد ضریب انعکاس توسعه یافته و نتایج حاصل از این روابط با دیگر نتایج تجربی و نظری مقایسه و یک توافق منطقی به دست آمده است [۹].

در مطالعه کورایم و همکاران در سال ۲۰۱۴، عملکرد هیدرودینامیکی یک نوع دیوار دریایی متخلخل جدید به طور آزمایشگاهی با استفاده از مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. دیوار دریایی متشکل از صفحه متخلخل جلویی فولادی، دیوار صلب پشتی، پر از قلوه‌سنگ و یک موج‌شکن مستغرق در مقابل آن قرار داده شده است. انعکاس موج از دیوار دریایی با و بدون موج‌شکن مستغرق مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ضریب بازتاب با افزایش عمق نسبی آب، تیزی موج، عرض نسبی دیوار و تخلخل دیوار کاهش می‌یابد [۱۰].

بستر) و پارامترهای مربوط به موج (ارتفاع، دوره تناوب و تراز سطح آب) بستگی دارد [۳]. سازه‌های متخلخل با خاصیت انعکاس کمتر یا استهلاک بیشتر انرژی امواج، شرایط مناسبی برای محافظت و بهره‌برداری از سواحل فراهم می‌سازند. به همین دلیل برای بهبود عملکرد هیدرولیکی سازه‌های متخلخل باید انعکاس را به حداقل و استهلاک را به حداکثر رساند. با ورود موج به سازه متخلخل پارامترهای اصلی موج دستخوش تغییر می‌شوند، بنابراین شناخت هرچه بیشتر پدیده اندرکنش موج با محیط متخلخل مهندسان را در طراحی یک سازه بهینه توانا تر می‌سازد [۴]. با توجه به رفتار تصادفی امواج، نمی‌توان رفتار سازه‌های ساحلی را فقط با تکیه بر تئوری‌های موجود به طور دقیق معین نمود، بنابراین در این موارد استفاده از مطالعات آزمایشگاهی اهمیت بسیاری خواهد داشت [۱]. اگرچه مطالعات زیادی در زمینه نحوه برهمکنش امواج با دیوارهای ساحلی صورت گرفته است، امکان استفاده از گونه‌های بسیار متنوع در طراحی و ساخت دیواره‌های ساحلی، این تحقیقات را کماکان از جمله تحقیقات به روز قرار داده است. در ادامه فرضیه‌ها و نتایج تعدادی از بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته در این زمینه بیان شده است.

در پژوهشی، شیریان و همکاران در سال ۱۳۸۴، تأثیر امواج نامنظم دریا بر میزان بازتاب امواج از موج‌شکن‌های توده سنگی شکل‌پذیر را مورد بررسی قرار داده‌اند. پژوهش حاضر با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی در فلوم موج انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی به صورت نمودارها و روابط جدید ضرایب بازتاب و روش‌های رگرسیونی، ارائه شده است [۵].

بر اساس مطالعه حسین پورو همکاران در سال ۱۳۸۹، ضریب بازتاب از موج‌شکن‌های شکل‌پذیر با استفاده از نتایج مدل فیزیکی در فلوم موج تحت امواج نامنظم تعیین شده است. نتایج در قالب نمودارهایی، تغییرات ضرایب بازتاب موج را برحسب پارامترهای بدون‌بعد نشان می‌دهد. در نهایت رابطه جدیدی برای تعیین ضریب بازتاب موج ارائه شده است [۶].

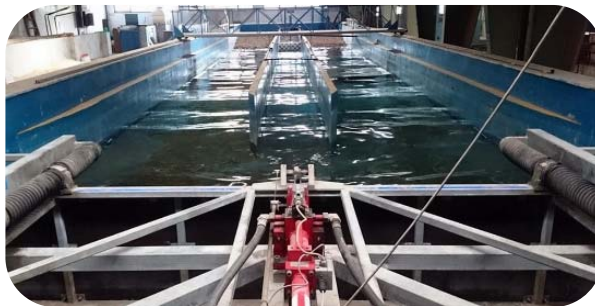
در تحقیقی ژو و چوانگ در سال ۲۰۰۱ بر اساس تئوری موج خطی و روش بسط تابع ویژه^۱، برهم‌کنش بین امواج و دیوار دریایی متخلخل را به طور تحلیلی و تجربی مورد مطالعه قرار

نیمه‌متخلخل ($n=0.32$) و دیوار متخلخل ($n=0.64$) مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج با دیوار ساحلی صلب مقایسه شده است.

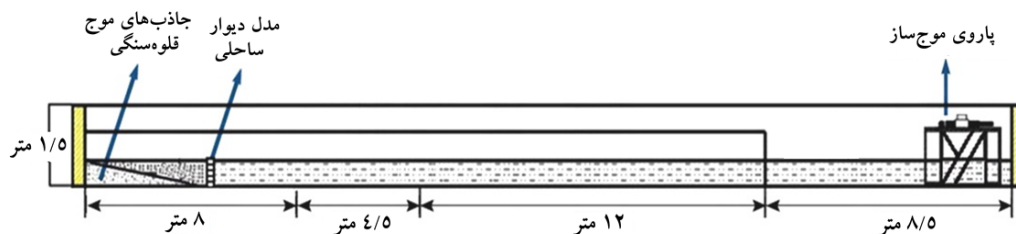
۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. فلوم موج

در تحقیق حاضر فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران برای یک بازه زمانی سه‌ماهه در تابستان ۱۳۹۵ مورد استفاده قرار گرفت. فلوم مورد نظر ۳۳ متر طول، ۵/۵ متر عرض و ۱/۵ متر ارتفاع دارد. برای جلوگیری از ایجاد امواج عرضی، فلوم موج با دو دیواره به طول ۲۴/۵ متر از انتهای فلوم و به ارتفاع یک متر از بستر و به فاصله یک متر از یکدیگر به سه بخش مجزا تقسیم شده است (شکل ۱). مقاطع مدل شده دیوارهای ساحلی مورد آزمایش، در انتهای قسمت میانی فلوم و در قسمت قابل رؤیت آن قرار می‌گیرد (شکل ۲). این فلوم مجهز به یک سیستم مولد موج پیستونی شامل؛ واحدهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری (برنامه Wave Pack) با قابلیت ایجاد امواج منظم و نامنظم است. در آزمایش‌های انجام شده برای ثبت ارتفاع موج از حسگرهای ارتفاع سنج موج استفاده شد.



شکل ۱. فلوم موج پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران



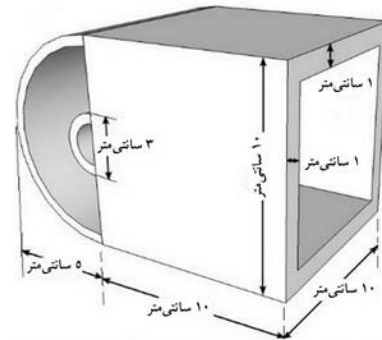
شکل ۲. مقطع عرضی فلوم موج، نحوه استقرار سازه و پاروی مولد موج

در مطالعه نجم و نصار در سال ۲۰۱۶، خصوصیات انعکاسی امواج در برخورد با دیوارهای دریایی قائم و شیب‌دار در شرایط هیدرودینامیکی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. آزمون‌های آزمایشگاهی روی دیوار دریایی صاف، دیوار صاف با بلوک مستهلک‌کننده انرژی مستطیلی و مثلثی شکل در سطح دیواره، همچنین دیوار دریایی با شکاف افقی انجام شده و نتایج با هم مقایسه شده است. با استفاده از تحلیل ابعادی، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزار SPSS فرمول‌های پیش‌بینی برای تعیین ضریب انعکاس برای هر دیوار دریایی مورد آزمایش ارائه شده است [۱۱].

با توجه به فعالیت‌های محدود انجام شده در رابطه با انعکاس موج در برخورد با دیوارهای ساحلی متخلخل، در تحقیق حاضر ویژگی‌های انعکاسی نوع جدیدی از دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، شناخت بهتر عملکرد دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای در برخورد با امواج و افزایش دانش در مورد این نوع از سازه‌های دریایی است. پژوهش حاضر با استفاده از روش مدل فیزیکی در فلوم موج انجام شده و امواج تاییده شده به مقطع مدل دیوارهای ساحلی از نوع منظم است. برای بررسی میزان انعکاس از دیوارهای ساحلی، دو مدل دیوار

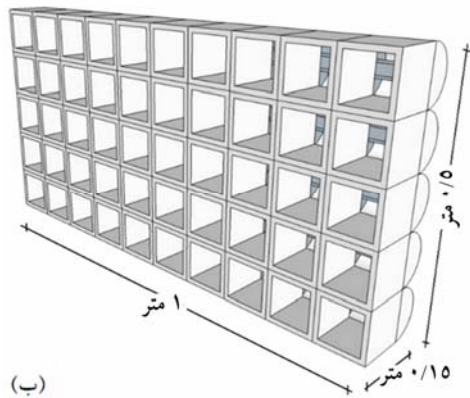
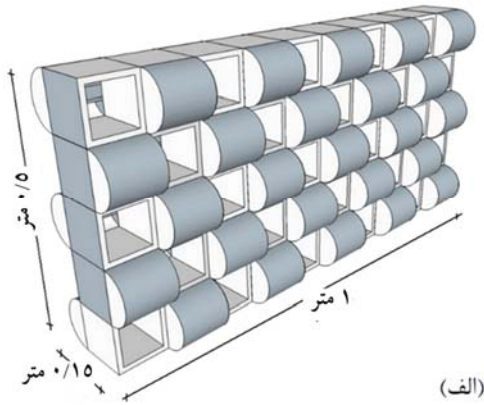
۲-۲. طراحی مدل دیوار ساحلی

برای ساخت بلوک‌های مدل دیوار ساحلی از ورقه‌های پلکسی گلاس به ضخامت‌های ۱ و ۰/۳ سانتی‌متر، نیم‌لوله‌های پلکسی گلاس با قطرهای خارجی ۱۰ و ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر استفاده شده است. هر بلوک از یک قسمت مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر دو سو باز و افزودن نیم‌لوله به یک سمت باز مکعب مطابق شکل ۳ تشکیل شده است. طراحی اولیه ابعاد قطعات بلوک در محیط نرم‌افزار کورل دراو صورت گرفته و قطعات پلکسی گلاس لازم برای ساخت بلوک‌ها با دستگاه لیزر برش داده شد. در ادامه قطعات با کلروفرم به هم چسبانده شده تا قالب نهایی بلوک شکل گیرد.



شکل ۳. بلوک طراحی شده برای ساخت مدل دیوار ساحلی

با توجه به این که عرض قسمت میانی فلوم موج یک متر (۱۰) بلوک) و ارتفاع مدل دیوار ۵۰ سانتی‌متر (۵ بلوک) در نظر گرفته شده است، برای ساخت هر یک از دیوارهای ساحلی از ۵۰ عدد بلوک استفاده شد. با قرار دادن بلوک‌ها روی هم درون یک قاب نگهدارنده، شکل نهایی دیوار ساحلی صندوقه‌ای شکل می‌گیرد (شکل ۴). برای این منظور دو دیوار ساحلی به شکل نیمه‌متخلخل (شکل ۴ الف) و متخلخل (شکل ۴ ب) تهیه شد. بلوک‌ها روی هم چیده شده و با چسب سیلیکونی ثابت شدند.



شکل ۴. مدل دیوار ساحلی صندوقه‌ای الف) نیمه‌متخلخل ب) متخلخل

۲-۳. مدل‌سازی فیزیکی

در آزمایش‌های مربوط به مدل‌سازی سازه‌های ساحلی نیروی غالب، نیروی وزن یا گرانش است. از این رو معیار مناسب برای مدل‌سازی، معیار فرود است. با توجه به مقیاس ۱:۱۰ انتخاب شده، محدوده ارتفاع موج منظم (H_i) ۳ تا ۱۵ سانتی‌متر، دوره‌های تناوب (T) $1/6$ تا $2/8$ ثانیه و سه عمق آب $16/5$ ، 27 و $37/5$ سانتی‌متر برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. انتخاب محدوده پارامترهای یادشده بر اساس ابعاد بلوک‌ها و مدل دیوار ساحلی طراحی شده صورت گرفته است. در جدول ۱ محدوده تغییرات پارامترهای هیدرولیکی بی‌بعد در انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی مشخص شده است.

جدول ۱. محدوده تغییرات پارامترهای بی‌بعد برای امواج منظم

محدوده تغییرات	پارامتر بی‌بعد
۰/۰۰۷ - ۰/۰۵۴	تیزی موج (H_i/L)
۰/۰۴۷ - ۰/۱۳۵	عمق نسبی آب (d/L)
۰/۰۸۷ - ۰/۵۴۳	ارتفاع نسبی موج (H_i/d)

در شروع هر آزمایش پارامترهای مربوط به امواج باید به‌عنوان ورودی برنامه Wave Pack مشخص شوند. با در نظر گرفتن چهار ارتفاع موج، چهار دوره تناوب موج، سه عمق آب و سه مدل دیوار ساحلی، در مجموع ۱۳۲ آزمون مدل فیزیکی در این تحقیق انجام شده است. به کمک سری‌های زمانی تراز آب برداشت شده به وسیله حسگرهای ارتفاع‌سنج موج و برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب بر اساس روش تفکیک گودا و سوزوکی، ضرایب انعکاس موج در برخورد با دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای محاسبه می‌شود. در روش گفته شده با استفاده از دو حسگر، ارتفاع سطح آب، یک اختلاف فاز زاویه‌ای اندازه‌گیری شده و با تبدیل فوریه سریع^۳، امواج تابشی و انعکاسی تفکیک می‌شوند [۱۲].

در نهایت با رسم نمودارهای تغییرات ضریب انعکاس (K_r) بر حسب تیزی موج (H_i/L) و عمق نسبی آب (d/L)، انعکاس امواج منظم از دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای بررسی می‌شود. به‌علاوه، بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، تحلیل ابعادی و تحلیل رگرسیون چندگانه، روابط تجربی جدیدی برای تعیین ضریب انعکاس از دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای ارائه می‌شود.

۳. نتایج و بحث

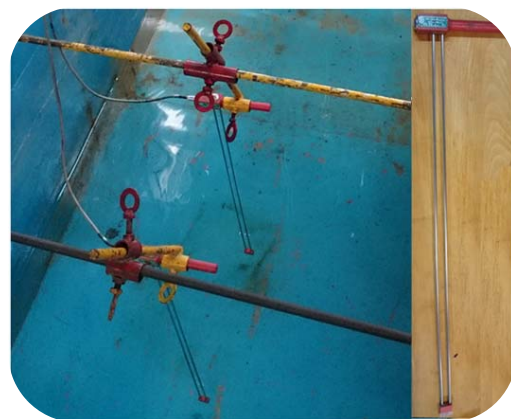
برای بررسی اثر ارتفاع موج (بر مبنای تیزی موج (H_i/L)) بر ضریب انعکاس موج، تغییرات K_r بر حسب تیزی موج برای دیوارهای صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که برای دوره تناوب موج ثابت (یا همان طول موج ثابت برای عمق آب ثابت)، تغییرات تیزی موج معرف تغییرات ارتفاع موج است. از آنجا که روند تغییرات K_r بر حسب تیزی موج برای سه عمق ۳۷/۵، ۲۷ و ۱۶/۵ سانتی‌متر تقریباً مشابه است، در این بخش نتایج عمق ۳۷/۵ سانتی‌متری برای دوره تناوب‌های موج مختلف (عمق نسبی ۰/۰۷۲ تا ۰/۱۳۵) ارائه شده است.

برای دیوار صلب، ضریب انعکاس موج به ازای تمامی مقادیر تیزی موج و عمق نسبی (d/L) در محدوده ۰/۹۰ تا ۰/۹۸ قرار دارد که تقریباً نزدیک به مقدار واحد در حالت بازتاب کامل است. همان‌گونه که در شکل ۶ (الف) نشان داده شده، دامنه تغییرات ضریب بازتاب در این حالت به دلیل صلب بودن

تقریباً همه سازه‌های دریایی بخشی از انرژی موج تابشی را منعکس می‌کنند. این پدیده با ضریب انعکاس موج (K_r) بیان می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

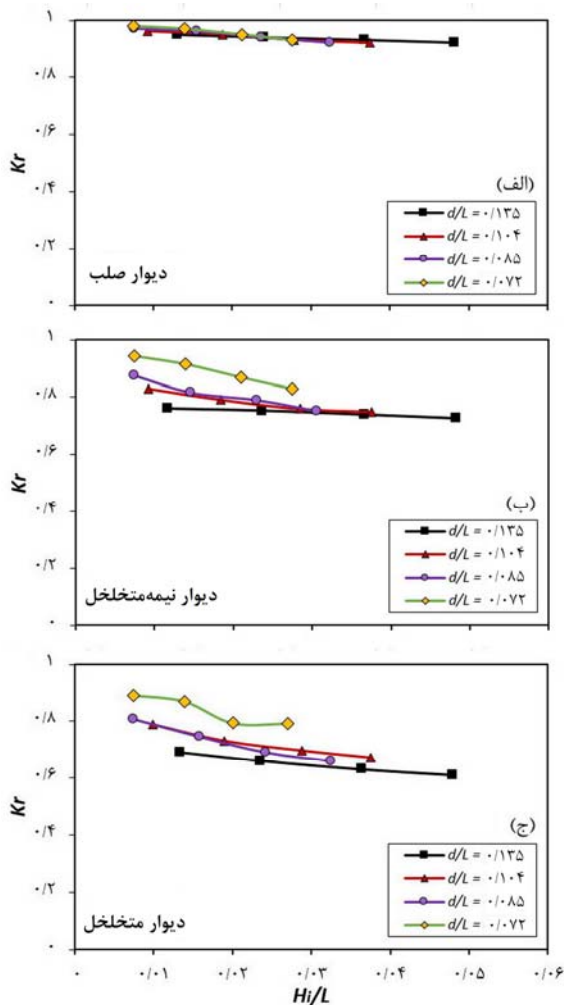
$$K_r = \frac{H_r}{H_i} = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در آن، H_i ارتفاع موج تابشی، H_r ارتفاع موج بازتابی، E_i انرژی موج تابشی و E_r انرژی موج بازتابی است. برای محاسبه ضریب انعکاس از دیوارهای ساحلی از سه مدل فیزیکی مختلف شامل مدل صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل استفاده شده و برپایی مدل سه بار تکرار شده است. حسگرهای ارتفاع‌سنج موج برای ثبت ارتفاع امواج با توجه به طول موج بیشینه ($L_{max}=5/22$ m)، به ترتیب در فاصله ۶ و ۶/۷۰ متری از دیواره مدل نصب شده‌اند (شکل ۵). حسگرهای ارتفاع‌سنج موج از دو میله بلند فولادی ضدزنگ به طول ۶۵ سانتی‌متر تشکیل شده‌اند که در انتها به یک خازن تصحیح‌کننده متصل می‌شوند و اساس کار آن‌ها خاصیت خازنی است. هنگامی که سطح آب بالا می‌آید، دی‌الکتریک بین دو میله حسگر که همان آب است باعث تغییر سطح خازن (تغییر طول فرو رفته در آب) و در نتیجه تغییر ظرفیت آن می‌شود. ثبت نوسانات سطح آب به صورت تغییرات ولتاژ اعمال‌شده به حسگرها بر اساس تغییر سطح آب و در نتیجه تغییر ظرفیت خازنی انجام می‌پذیرد. در مرحله کالیبراسیون حسگرهای ارتفاع‌سنج موج، تغییرات ۱۰ سانتی‌متری در تراز سطح آب معادل با ولتاژ ۱۰ ولت تنظیم شده است. این حسگرها با کابل به رایانه متصل و میزان تغییرات تراز سطح آب را در زمان‌های مختلف و دقت ۰/۰۱ ولت (معادل ۰/۱ میلی‌متر) ثبت می‌کنند.



شکل ۵. حسگرهای ارتفاع‌سنج موج نصب شده در فلوم موج

که خصوصیات انعکاسی دیوار نیمه متخلخل بین دیوار صلب و دیوار کاملاً متخلخل قرار دارد.



شکل ۶. تغییرات ضریب انعکاس بر حسب تیزی موج برای دیوار ساحلی (الف) صلب، (ب) نیمه متخلخل و (ج) متخلخل، برای دوره های موج مختلف در عمق ۳۷/۵ سانتی متری آب

برای بررسی اثر دوره تناوب موج (در قالب عبارت عمق نسبی آب (d/L)) بر ضریب انعکاس موج، نمودار تغییرات K_r بر حسب عمق نسبی در یک ارتفاع نسبی (H_i/d) ثابت، برای دیوارهای صلب، نیمه متخلخل و متخلخل در شکل ۷ رسم شده است. در این حالت برای عمق آب ثابت، تغییرات عمق نسبی معرف تغییرات دوره تناوب موج است. روند کلی این نمودارها نشان می دهد که ضریب انعکاس برای دیوارهای نیمه متخلخل و متخلخل در عمق های مختلف، با عمق نسبی نسبت وارونه دارد و با افزایش مقدار d/L (ناشی از کاهش

دیوار کم است. در شرایط هیدروفریزیک یکسان، مقدار K_r برای دیوار نیمه متخلخل در محدوده 0.70 تا 0.94 قرار دارد (شکل ۶ ب). در این حالت به دلیل تخلخل دیوار $(n=0.32)$ ، امواج ایستای کمتری در جلوی دیوار تشکیل شده و در نتیجه مقدار ضریب انعکاس نسبت به دیوار صلب کاهش یافته است. در مدل دیوار متخلخل (شکل ۶ ج)، به دلیل وجود بلوک های توخالی - که مانند حفره هایی در مقابل موج قرار می گیرند - و دیوار نازک بین بلوک ها - که مانند تیغه ای در مقابل موج قرار می گیرد - مقادیر ضریب انعکاس با حالت صلب که دیوار منعکس کننده خوبی است، تفاوت زیادی دارد. وجود تیغه ها و حفره ها شرایط شکست موج و ایجاد تلاطم را تقویت می کند. وقتی موج به دیوار می رسد، توده هوای به دام افتاده بین حفره ها و موج بسیار حجیم تر از حالتی است که موج با دیوار صلب مواجه می شود. بنابراین انفجار توده هوای به دام افتاده، باعث استهلاک انرژی موج تابشی می شود که در مقایسه با دیوار صلب بیشتر است. در این حالت K_r در محدوده 0.57 تا 0.89 تغییر می کند که نسبت به دیوار صلب کاهش چشمگیری نشان می دهد. همچنین به دلیل تخلخل بیشتر دیوار $(n=0.64)$ و جذب بیشتر انرژی موج برخوردی به وسیله بلوک ها، ضریب انعکاس در این حالت کمتر از مدل دیوار نیمه متخلخل است. نتایج نشان می دهد که برای مقادیر ثابت عمق نسبی، با افزایش تیزی موج، مقدار K_r کاهش یافته که علت آن استهلاک بیشتر انرژی و کاهش ارتفاع موج بازتابی برای امواج با مقدار تیزی بالاتر است [۸-۱۰]. البته برای دیوار صلب این روند کاهشی در مقایسه با دیوارهای نیمه متخلخل و متخلخل به مراتب کمتر است. مقایسه مقادیر K_r برای هر سه مدل دیوار ساحلی نشان می دهد که ضریب انعکاس به طور میانگین برای دیوارهای نیمه متخلخل و متخلخل به ترتیب حدود 18% و 32% نسبت به دیوار صلب کاهش یافته است. این نتایج عملکرد بهتر دیوار متخلخل را در مقایسه با دیوار صلب در احداث دیوارهای ساحلی با وجه قائم نشان می دهد. از سوی دیگر، می توان گفت

ضریب انعکاس امواج منظم در بین سه دیوار مدل شده دارد. بنابراین، برای امواج منظم، ضریب انعکاس موج با افزایش تیزی موج و عمق نسبی کاهش می‌یابد. در تحقیقات کرمی‌خانگی در سال ۱۳۸۴ و حسین‌پور در سال ۱۳۸۹ نتایج مشابهی گزارش شده است [۳ و ۶].

برای تعیین روابط تجربی جدید برای ضریب انعکاس موج، با استفاده از تئوری باکینگهام^۴ در تحلیل ابعادی، پارامترهای بدون بعد تیزی موج و عمق نسبی آب به‌عنوان پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر K_r لحاظ شده و معادله کلی زیر در نظر گرفته شد [۱۳].

$$K_r = a(d/L)^b(H_i/L)^c \quad (2)$$

در این بخش تجزیه و تحلیل رگرسیونی روی ۷۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی که به‌صورت اتفاقی انتخاب شده با استفاده از نسخه ۲۱ نرم‌افزار آماری SPSS انجام می‌شود [۹]. روابط تجربی جدید به‌دست آمده برای محاسبه ضریب انعکاس برای دیوارهای ساحلی صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل برای امواج منظم در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. معادله‌های پیش‌بینی شده ضریب انعکاس موج

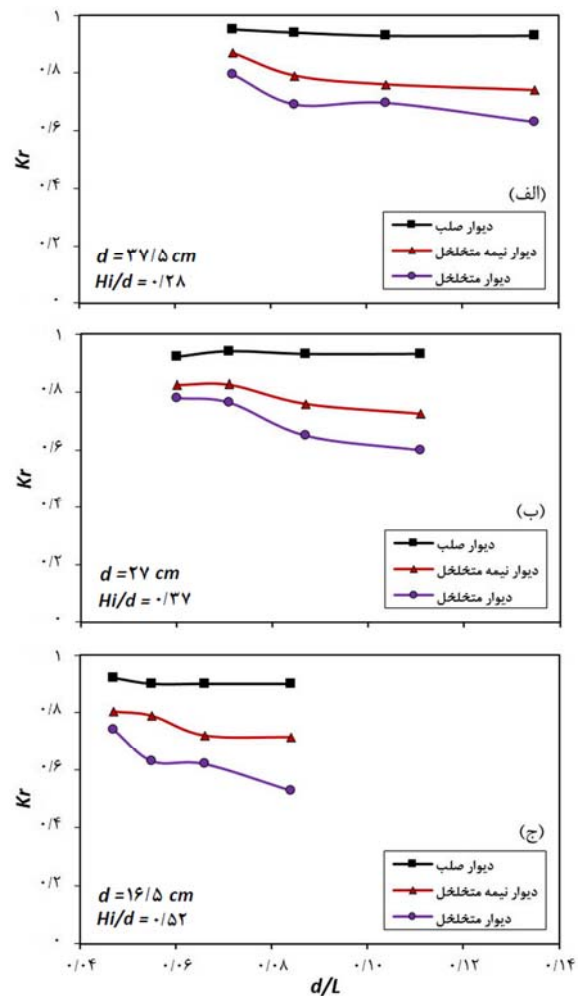
برای دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای مختلف

نوع دیوار	رابطه پیشنهادی	R^2	Eq.
صلب	$K_r = 0.186(d/L)^{0.26}(H_i/L)^{-0.39}$	۰.۷۸	(۳)
نیمه‌متخلخل	$K_r = 0.145(d/L)^{-0.75}(H_i/L)^{-0.11}$	۰.۷۴	(۴)
متخلخل	$K_r = 0.129(d/L)^{-0.88}(H_i/L)^{-0.176}$	۰.۷۶	(۵)

مقادیر به‌نسبت بالای ضرایب تعیین (R^2) به‌دست آمده از تحلیل رگرسیونی در جدول ۲ ارتباط قابل‌قبولی را بین متغیرهای مستقل تیزی موج و عمق نسبی با متغیر وابسته ضریب انعکاس موج نشان می‌دهد.

برای نمونه اطلاعات خلاصه مدل و آنالیز واریانس مربوط به معادله رگرسیونی پیشنهادی برای دیوار متخلخل به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

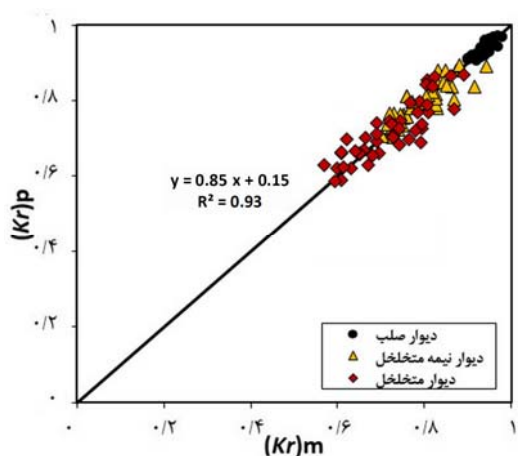
دوره تناوب موج در عمق آب ثابت)، مقدار K_r کاهش می‌یابد [۸-۱۱].



شکل ۷. تغییرات ضریب انعکاس برحسب عمق نسبی آب برای دیوارهای ساحلی صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل در عمق آب (الف) ۳۷/۵ (ب) ۲۷ و (ج) ۱۶/۵ سانتی‌متر، برای مقدار ثابت ارتفاع نسبی (H_i/d)

البته در بعضی نقاط این روند کمی متفاوت است و علت آن می‌تواند وجود خطا در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی باشد. علاوه بر این، برای دیوار صلب-همان‌طور که در این شکل‌ها قابل مشاهده است-افزایش پارامتر عمق نسبی اثر بسیار کمی بر کاهش ضریب انعکاس دارد. برای شرایط ورودی یکسان، مقایسه مقادیر ضریب انعکاس برای هر سه مدل دیوار نشان می‌دهد که مقدار K_r برای دیوار ساحلی نیمه‌متخلخل بین ۱۴٪ تا ۲۲٪ و برای دیوار ساحلی متخلخل بین ۲۲٪ تا ۴۱٪ در مقایسه با دیوار صلب کاهش یافته است. در نتیجه دیوار ساحلی صندوقه‌ای متخلخل بالاترین کارایی را در کاهش

در یک سری اطلاعات اندازه گیری شده روی یک موضوع وجود دارد یا خیر؟ طبق جدول ۵ برای دیوار متخلخل، با توجه به سطح معنی داری به دست آمده در حدود ۰/۸۸ (نزدیک به یک) برای مقایسه دو نمونه جفت شده، اختلاف اساسی و مهمی بین مقادیر میانگین های K_T اندازه گیری و پیش بینی شده، وجود ندارد و ارتباط خوبی بین زوج داده ها مشاهده می شود. همچنین مقایسه مقادیر ضریب انعکاس اندازه گیری و پیش بینی شده برای دیوارهای ساحلی صلب، نیمه متخلخل و متخلخل در شکل ۸، همبستگی قابل قبولی را برای امواج منظم ($R^2 = 0.93$) نشان می دهند.



شکل ۸ مقایسه مقادیر K_T اندازه گیری و پیش بینی شده برای دیوارهای ساحلی صلب، نیمه متخلخل و متخلخل

جدول ۳. جدول خلاصه مدل معادله (۵)

مدل	R	R ²	تعدیل شده	خطای معیار برآورد
۵	۰/۸۷۰ ^a	۰/۷۵۶	۰/۷۳۷	۰/۰۶۱۱۷۸۵

a. متغیرهای مستقل: (عدد ثابت)، LNHiL، LNdl

جدول ۴. جدول آنالیز واریانس ANOVA^b معادله (۵)

مدل	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F	سطح معنی داری
رگرسیون	۰/۲۹۰	۲	۰/۱۴۵	۳۸/۷۹	۰/۰۰۰ ^a
مانده	۰/۰۹۴	۲۷	۰/۰۰۴		
کل	۰/۳۸۴	۲۹			

a. متغیرهای مستقل: (عدد ثابت)، LNHiL، LNdl

b. متغیرهای وابسته: LNkr

با توجه به سطح معنی داری در حد صفر در جدول ۴، تأثیر تغییرات متغیرهای تیزی موج و عمق نسبی بر ضریب انعکاس معنی دار است ($P < 0.05$). معادله های رگرسیونی به دست آمده به ۳۰ درصد باقیمانده داده های آزمایشگاهی برازش داده شده و به منظور صحت سنجی^۵ روابط به دست آمده، آزمون T نمونه های زوجی^۶ به روی دو دسته از داده ها صورت گرفته است [۵]. درحقیقت، آزمون T این فرض را آزمایش می کند که تفاوت اساسی بین دو نمونه جفت شده

جدول ۵. خروجی آزمون T-Test برای صحت سنجی معادله (۵)

	تفاضل های زوجی				t	df	سطح معنی داری	
	میانگین	انحراف معیار	تفاضل های با بازه اطمینان ۹۵٪					
			حد پایینی	حد بالایی				
جفت شماره ۵ (Kr)m-(Kr)p	-۰/۰۰۱۵	۰/۰۳۵۳	۰/۰۰۹۸	-۰/۰۲۲۹	۰/۰۱۹۸	-۱/۵۷	۱۲	۰/۸۷۸

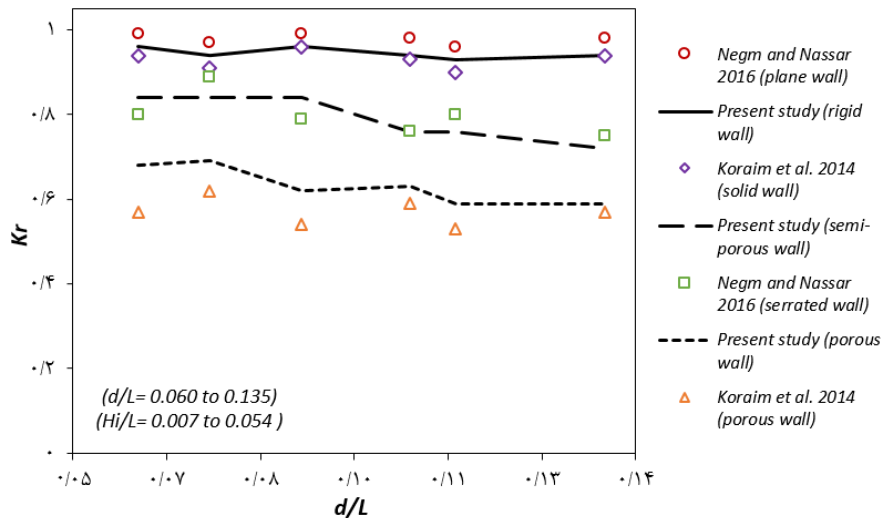
حاصل از مطالعه حاضر و نتایج مطالعات محققان دیگر مشاهده می شود.

(۱) نتایج این بررسی می تواند در طراحی هیدرودینامیکی بهتر سازه های قائم مانند دیوار اسکله های مستهلک کننده انرژی موج در بنادر و دیوارهای دریایی شیب دار برای حفاظت از سواحل در برابر فرسایش، مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این تحقیق به طور حتم نمی تواند کاربرد یا

به منظور اعتبارسنجی^۷ معادله های تجربی جدید، نتایج به دست آمده با بررسی های محدود انجام شده روی دیوارهای ساحلی قائم مقایسه شده است. مقایسه ضرایب انعکاس به دست آمده برای دیوارهای ساحلی صلب، نیمه متخلخل و متخلخل با نتایج حاصل از کارهای محققان دیگر برای امواج منظم در شکل ۹ نشان داده شده است. بر اساس بررسی های انجام شده، توافق قابل قبولی ($R^2 = 0.75$) در پیش بینی K_T بین نتایج

تا حداکثر ۵ متر در نوسان است؛ اگر بخواهیم از این نوع سازه‌ها به‌طور مستقیم در دریا استفاده کنیم باید آزمون‌هایی با امواج نامنظم مرتفع‌تر انجام گیرد تا کارایی این دیوارهای ساحلی مشخص شود.

عدم کاربرد این نوع دیوارهای ساحلی را در سواحل ایران توجیه کند و برای اعلام نظر در این مورد به تحقیقات بیشتر نیاز است. از سوی دیگر، با توجه به این که ارتفاع امواج در سواحل جنوبی دریای خزر به حدود ۴ متر هم می‌رسد و در سواحل خلیج فارس ارتفاع موج



شکل ۹. مقایسه مقادیر K_r به دست آمده از مطالعه حاضر با مطالعات قبلی بر حسب عمق نسبی

متخلخل به ترتیب حدود ۱۸٪ و ۳۲٪ نسبت به دیوار صلب کاهش یافته است. این نتایج عملکرد بهتر دیوار متخلخل را در مقایسه با دیوارهای صلب و نیمه‌متخلخل در احداث دیوارهای ساحلی با وجه قائم نشان می‌دهد.

۳. ضریب انعکاس از دیوارهای ساحلی با افزایش تیزی موج و عمق نسبی آب، کاهش می‌یابد.

۴. معادله‌های تجربی جدید ارائه شده برای برآورد ضریب انعکاس موج از توافق قابل قبولی ($R^2 = 0.75$) در مقایسه با روابط به دست آمده توسط محققان دیگر برخوردار است.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مسئولان محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران برای پشتیبانی و فراهم آوردن امکانات مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک آن مرکز، تقدیر و تشکر می‌کنیم.

۴. نتیجه‌گیری

ضریب انعکاس ناشی از امواج منظم در برخورد با دیوارهای ساحلی صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل به صورت آزمایشگاهی در فلوم موج مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر ارتفاع موج، دوره تناوب موج و عمق آب بر ضرایب بازتاب بررسی شد و در نهایت با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیونی و پارامترهای بدون بعد، معادله‌های پیشنهادی برای پیش‌بینی ضریب انعکاس ارائه شد. نتایج مهم به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱. برای مقادیر مختلف ارتفاع و دوره تناوب موج منظم، ضریب انعکاس روی دیوار صلب به ازای تمامی مقادیر عمق نسبی آب و تیزی موج، بیشتر از ۰/۹۰ است. در شرایط هیدرودینامیکی یکسان، K_r برای دیوارهای ساحلی نیمه‌متخلخل و متخلخل، به ترتیب در محدوده ۰/۷۰ - ۰/۹۴ و ۰/۸۹ - ۰/۵۷ قرار دارد.

۲. مقایسه مقادیر K_r برای هر سه دیوار نشان می‌دهد که ضریب انعکاس به‌طور میانگین بر دیوارهای نیمه‌متخلخل و

مراجع

- [7] Zhu S, Chwang AT. Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall. Coastal Engineering. 2001 Jun 22;43(2):93-104.
- [8] Neelamani S, Sandhya N. Wave reflection characteristics of plane, dentated and serrated seawalls. Ocean Engineering. 2003 Aug 29;30(12):1507-33.
- [9] Koraim A, Rageh O. Hydrodynamic performance of vertical porous structures under regular waves. China Ocean Engineering. 2013 Jun 28;4(27):451-68.
- [10] Koraim A, Heikal EM, Abo Zaid AA. Hydrodynamic characteristics of porous seawall protected by submerged breakwater. Applied Ocean Research. 2014 Feb 25;46:1-14.
- [11] Negm A, Nassar K. Determination of Wave Reflection Formulae for Vertical and Sloped Seawalls via Experimental Modelling. Procedia Engineering. 2016 Aug 21;154:919-27.
- [12] Goda Y, Suzuki Y. Estimation of incident and reflected waves in random waves. In: Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering. 15th International Conference on Coastal Engineering; 1976 Jul 11-17; United States, Honolulu, Hawaii. New York: American Society of Civil Engineers;1977. p.828-45.
- [13] Hughes SA. Physical models and laboratory techniques in Coastal Engineering. Singapore: Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Publishing; 1993. p.568.
- [1] وفایی پور سرخابی رامین، لطف‌اللهی یقین محمدعلی، امین فر محمدحسین. تأثیر دوره تناوب امواج تصادفی بر واکنش دیوارهای ساحلی با اشکال هندسی مختلف به روش عددی. اقیانوس شناسی. ۱۳۹۰؛۲(۸):۶۹-۷۸.
- [2] چگینی وحید. راهنمای طراحی موج شکن‌ها. تهران: انتشارات شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری؛ ۱۳۷۷. ص. ۷۵-۹۱. (مجموعه کتاب‌های مهندسی دریا، جلد دوم).
- [3] کریمی خانیکی علی، شکرلب ملوک. ارزیابی آزمایشگاهی انعکاس امواج از دیواره‌های ساحلی صندوقه‌ای. فصلنامه پژوهش و سازندگی. ۱۳۸۴؛۱۸(۲):۱۱-۱۷.
- [4] ایروانی نیکتا، منتظری‌نمین مسعود. مدل‌سازی عددی اندرکنش موج با دیوار متخلخل ساحلی در فضای دوبعدی قائم. نشریه مهندسی دریا. ۱۳۹۳؛۹(۱۷):۱۵-۲۶.
- [5] شیریان ناصر، شفیع فر مهدی، آق‌تومان پیمان، چگینی وحید. تعیین ضرایب بازتاب امواج نامنظم از موج شکن‌های شکل‌پذیر با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی. فصلنامه پژوهش و سازندگی. ۱۳۸۴؛۱۷(۱):۶۸-۷۷.
- [6] حسین پور محبوبه، چگینی وحید، شیریان ناصر، آق‌تومان پیمان، شفیع فر مهدی. تعیین ضرایب بازتاب امواج نامنظم از موج شکن‌های شکل‌پذیر با استفاده از نتایج مدل فیزیکی. اقیانوس شناسی. ۱۳۸۹؛۱(۱):۵۷-۶۲.

پی‌نوشت

1. Eigenfunction expansion method
2. reflection coefficient
3. Fast Fourier Transform (FFT)
4. Buckingham theorem
5. verification
6. Paired Samples Test (T-Test)
7. validation