

## عملکرد دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای در برابر نیروی امواج

مریم راه‌بانی<sup>۱</sup>، مهدی اسماعیلی<sup>۲\*</sup>، علی کرمی‌خانیک<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، پست الکترونیکی:

maryamrahbani@yahoo.com

۲- دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، پست الکترونیکی:

esmaeili@cmu.ac.ir

۳- عضو هیات علمی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، دانشکده علوم دریایی، چابهار

۴- عضو هیات علمی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، پست الکترونیکی: akk239@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۲۷

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۲۰

### چکیده

هدف از مطالعه حاضر برآورد نیروی موج وارد بر دیوارهای ساحلی قائم صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی است. تست‌های آزمایشگاهی برای امواج تصادفی دریا در طیف گسترده‌ای از ارتفاع‌ها و پریودهای موج و عمق‌های مختلف آب انجام گرفت. مقایسه مقادیر حداکثر نیروی موج ( $F_{max}$ ) اندازه‌گیری شده وارد بر سه دیوار نشان می‌دهد که نیروی وارد بر دیوارهای ساحلی نیمه‌متخلخل و متخلخل به ترتیب حدود ۲۸ و ۴۶ درصد بیشتر از دیوار صلب نفوذناپذیر است. بنابراین دیوارهای ساحلی نیمه‌متخلخل و متخلخل نسبت به دیوار صلب در استهلاك انرژی موج و در نتیجه کاهش ضریب انعکاس کارایی بالاتری دارند. همچنین مشخص شد که  $F_{max}$  با افزایش تیزی موج ( $H_s/L_p$ ) و کاهش عمق نسبی آب ( $d/L_p$ )، افزایش می‌یابد. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و آنالیز رگرسیون چندگانه، روابط تجربی جدیدی برای پیش‌بینی حداکثر نیروی موج وارد بر هر دیوار ارایه شده است.

کلمات کلیدی: نیروی موج، دیوار ساحلی صندوقه‌ای، مدل‌سازی فیزیکی، امواج تصادفی.

### ۱. مقدمه

انحنا دار اجرا شوند. هرکدام از این دیوارها دارای معایب و محاسنی هستند و انتخاب آن بر مبنای بررسی رفتار سازه در مواجهه با امواج و همچنین شرایط محیطی حاکم صورت می‌گیرد (چگینی، ۱۳۷۷).

تداخل امواج تابشی و بازتابی وضعیت ناپایداری را در جلوی دیوارهای ساحلی به وجود می‌آورند. 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 مهندسين سواحل جهت رفع این مشکلات و کاهش هزینه‌های

دیوارهای ساحلی به منظور حفاظت از سواحل در برابر امواج و جلوگیری از ورود آب به سواحل و در راستای به‌کارگیری مناسب از زمین‌های ساحلی طراحی و ساخته می‌شوند. مهم‌ترین بارهای وارد بر دیوارهای ساحلی، امواج دریا هستند که در حالت طوفانی، شدت آنها زیاد خواهد بود (وفایی‌پور سرخابی و همکاران، ۱۳۹۰). دیوارهای ساحلی می‌توانند به اشکال هندسی مختلفی نظیر دیوارهای قائم، شیب‌دار، شیب دوگانه یا چندگانه و

ضریب تصحیحی برای برآورد فشار موج در ارتباط با فرمول Goda پیشنهاد دادند و همچنین تجزیه و تحلیل آماری روی داده‌های فشار اندازه‌گیری شده، انجام دادند.

نیروهای موج وارد بر موج‌شکن‌های کیسونی قائم، به کمک آزمایش‌های مدل هیدرولیکی با امواج منظم و نامنظم در فلوم موج توسط Chiu و همکاران (۲۰۰۷) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق فشار موج روی دیواره عمودی و در پایین کیسون به‌طور همزمان اندازه‌گیری شد و بر این اساس حداکثر نیروی افقی و نیروی بالابرنده محاسبه و با نظریه‌های نیروی موج Goda مقایسه گردید.

بر اساس مطالعه‌ی Ozgur و Kabdasli (۲۰۰۹) کاهش بارهای موج وارد بر نوعی از موج‌شکن‌های کیسونی نیمه‌متخلخل بررسی شد. آنها مدل آزمایشگاهی از سازه را تحت امواج منظم و نامنظم ناشکنای دو بعدی آزمایش کرده و نیروی موج افقی را اندازه‌گیری کردند. آزمون‌ها را برای سازه با وجه عمودی صاف تحت امواج یکسان نیز انجام دادند و بارهای موج وارد بر وجه عمودی را با استفاده از فرمول Goda (1985) محاسبه کردند.

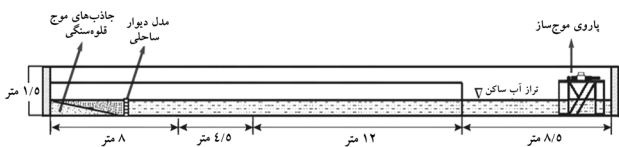
در مطالعه‌ی Thaha و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد دیوار دریایی صفحه متخلخل در استهلاک انرژی امواج به کمک مدل فیزیکی بررسی شد. آنها سه مدل را با ضریب تخلخل متفاوت در یک شیب دیواره‌ی ۴۵ درجه و ارتفاع‌ها و پرپوده‌های موج مختلف شبیه‌سازی کردند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که ضریب تخلخل بالاتر صفحه، قابلیت اتلاف انرژی موج را افزایش داده و انعکاس را به حداقل می‌رساند. آنها همچنین نشان دادند که پارامتر تیزی موج و ضریب تخلخل به‌طور قابل‌توجهی در انعکاس موج و اتلاف انرژی موج مؤثر هستند.

نیروی موج افقی وارد بر دیواره‌های عمودی موج‌شکن کیسونی متخلخل توسط Ji و همکاران (۲۰۱۴) به‌طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. آنها حداکثر نیروی موج افقی وارد بر کیسون متخلخل را با یک و دو اتاقک موج اندازه‌گیری کرده و با یکدیگر مقایسه نمودند. با تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی به‌دست آمده، مشخص کردند که زمانی که عرض کل اتاقک برای هر دو کیسون یکسان در نظر گرفته شود، نیروی موج افقی کل وارد بر کیسون با دو اتاقک موج به‌طور متوسط ۹ درصد کوچک‌تر از کیسون تک اتاقکی است. آنها دلیل چنین کاهش نیرویی در کیسون دو اتاقکی را اتلاف اضافی انرژی موج در

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 (شامل شکل و ابعاد حفره‌ها، نحوه چیدمان بلوک‌ها و شیب بستر) و نیز پارامترهای مربوط به موج (شامل ارتفاع، پرپود و تراز سطح آب) بستگی دارد (کرمی - خانیکی و شکرلب، ۱۳۸۴). سازه‌های متخلخل با خاصیت انعکاس کمتر و یا استهلاک بیشتر انرژی امواج، شرایط مناسبی برای محافظت و بهره‌برداری از سواحل فراهم می‌سازند. به همین دلیل برای بهبود عملکرد هیدرولیکی سازه‌های متخلخل می‌بایست انعکاس را به حداقل و استهلاک را به حداکثر رساند. با ورود موج به سازه متخلخل پارامترهای اصلی موج دستخوش تغییر می‌شوند. لذا شناخت هرچه بیشتر پدیده اندرکنش موج با محیط متخلخل مهندسان را در طراحی یک سازه بهینه توانا تر می‌سازد (ایروانی و منتظری نمین، ۱۳۹۲). با توجه به رفتار تصادفی امواج، نمی‌توان رفتار سازه‌های ساحلی را فقط با تکیه بر تئوری‌های موجود به‌طور دقیق معین نمود، لذا در این موارد استفاده از مطالعات آزمایشگاهی حائز اهمیت خواهد بود (وفایی‌پور سرخابی و همکاران، ۱۳۹۰). اگرچه مطالعات زیادی در زمینه‌ی نحوه‌ی برهمکنش امواج تصادفی با دیوارهای ساحلی صورت گرفته است، لذا 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 این راستا در ادامه فرضیه‌ها و نتایج، تعدادی از بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته در این زمینه بیان شده است.

در مطالعه‌ی Neelamani و همکاران (۱۹۹۹) برای برآورد فشار ناشی از امواج منظم در برخورد با دیوارهای دریایی صاف نفوذناپذیر، روش محاسبه ساده‌ای معرفی شده است. آنها با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه بر داده‌های فشار اندازه‌گیری شده، یکدسته روابط تجربی برای محاسبه فشار ناشی از موج ارائه دادند. همچنین این محققین بیان کردند که رابطه‌ای قوی بین بازتاب موج و فشار موج وارد بر دیوارهای دریایی وجود دارد. در تحقیقی Munireddy و Neelamani (۲۰۰۴) کاهش فشار موج بر دیوارهای دریایی کیسونی را با قرار دادن یک موج‌شکن فراساحلی در مقابل دیوار بررسی کردند. آنها با استفاده از مدل فیزیکی آزمایش‌هایی به منظور بررسی مرتبه کاهش فشار موج برای ارتفاع‌های مختلف موج‌شکن انجام دادند. بر این اساس

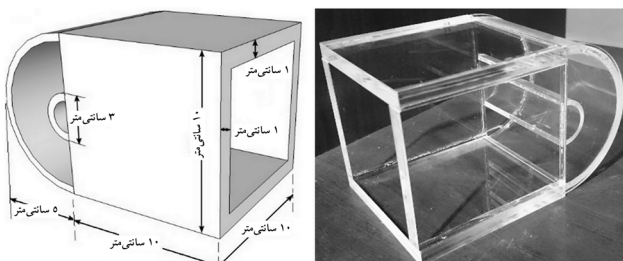
برای جلوگیری از ایجاد امواج عرضی، فلوم موج توسط دو دیواره به طول ۲۴/۵ متر از انتهای فلوم و به ارتفاع یک متر از بستر و به فاصله‌ی یک متر از یکدیگر به سه بخش مجزا تقسیم شدند. مقاطع مدل شده دیوارهای ساحلی مورد آزمایش، در انتهای قسمت میانی فلوم و در قسمت قابل رویت آن قرار می‌گیرد (شکل ۱). این فلوم مجهز به یک سیستم مولد موج پیستونی شامل واحدهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری (برنامه Wave Pack) با قابلیت ایجاد امواج منظم و نامنظم است. در آزمایش‌های آزمایشگاهی برای ثبت ارتفاع امواج از حسگرهای ارتفاع‌سنج موج و برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر سازه از حسگرهای نیروسنج موج استفاده می‌شود.



شکل ۱: مقطع عرضی فلوم موج و نحوه استقرار سازه و پاروی مولد موج

## ۲-۲ طراحی مدل دیوار ساحلی

برای ساخت بلوک‌های مدل دیوار ساحلی از ورقه‌های پلکسی‌گلاس به ضخامت‌های ۱ سانتی‌متر و ۰/۳ سانتی‌متر و نیم‌لوله‌های پلکسی‌گلاس با قطرهای خارجی ۱۰ و ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر استفاده شده است. هر بلوک از یک قسمت مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر دو سو باز و افزودن نیم‌لوله به یک سمت باز مکعب مطابق شکل ۲ تشکیل شده است. طراحی اولیه ابعاد قطعات بلوک در محیط نرم‌افزار CorelDRAW صورت گرفته و قطعات پلکسی‌گلاس لازم برای ساخت بلوک‌ها توسط دستگاه لیزر برش داده شد. در ادامه قطعات با کروفورم به هم چسبانده شده تا قالب نهایی بلوک شکل گیرد.



شکل ۲: بلوک طراحی شده برای ساخت مدل دیوار ساحلی

دیواره میانی متخلخل سازه بیان کردند، که نیروی ضربه‌ای موج بر روی دیوار عقبی را کمی کاهش می‌دهد.

بر اساس مطالعه‌ی Alkhalidi و همکاران (۲۰۱۵) فشارها و نیروهای موج وارد بر موانع عمودی متخلخل به‌عنوان سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی بررسی گردید. مدل‌های فیزیکی برای ارزیابی نیروهای موج وارد بر موانع موج تک و دو صفحه‌ای با ضریب تخلخل متفاوت تحت طیف گسترده‌ای از شرایط موج به‌کار گرفته شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که تخلخل به‌طور قابل‌توجهی فشارهای دینامیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد به‌خصوص در نزدیکی سطح آزاد، اما نزدیکتر به بستر این اثر کمتر است. علاوه بر این، نیروها در پانل جلویی در حالت موانع موج دو صفحه‌ای ۲۵-۲۰ درصد بیشتر از یک دیوار متخلخل تنها است.

در تحقیق حاضر با توجه به فعالیت‌های محدود انجام شده در رابطه با استهلاک انرژی موج در برخورد با دیوارهای ساحلی متخلخل، تأثیر امواج تصادفی دریا بر میزان حداکثر نیروی موج ( $F_{max}$ ) وارد بر دیوارهای ساحلی قائم صندوقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش حاضر با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی در فلوم موج انجام گردید. امواج تابیده شده به مقطع مدل دیوارهای ساحلی در فلوم موج از نوع تصادفی با طیف انرژی JONSWAP به‌عنوان یک طیف متداول موج است. برای بررسی میزان کارایی دیوارهای ساحلی در استهلاک انرژی امواج، دو مدل دیوار نیمه‌متخلخل ( $n=0.32$ ) و دیوار متخلخل ( $n=0.64$ ) مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج با دیوار ساحلی صلب مقایسه گردید. نتایج آزمایشگاهی به صورت نمودارهایی، تغییرات  $F_{max}$  را بر حسب تیزی موج ( $H_s/L_p$ ) و عمق نسبی آب ( $d/L_p$ ) نشان می‌دهد. به علاوه، بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و آنالیز رگرسیون چندگانه، روابط تجربی جدیدی برای برآورد حداکثر نیروی موج وارد بر دیوارهای ساحلی ارائه می‌گردد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱-۲ فلوم موج

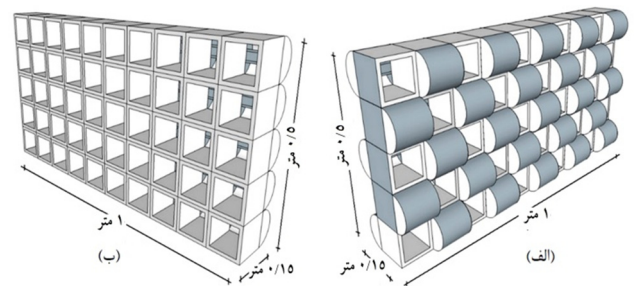
در تحقیق حاضر فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران مورد استفاده قرار گرفت. فلوم مورد نظر ۳۳ متر طول، ۵/۵ متر عرض و ۱/۵ متر ارتفاع دارد.

جدول ۱: محدوده‌ی تغییرات پارامترهای بی‌بعد برای امواج تصادفی

پارامتر بی‌بعد	محدوده‌ی تغییرات
تیزی موج ( $H_s/L_p$ )	۰/۰۰۷ - ۰/۰۴۲
عمق نسبی آب ( $d/L_p$ )	۰/۰۴۷ - ۰/۱۳۵
ارتفاع نسبی موج ( $H_s/d$ )	۰/۰۹۳ - ۰/۴۷۵

برای محاسبه حداکثر نیروی موج وارد بر دیوارهای ساحلی از سه مدل فیزیکی مختلف شامل مدل صلب، نیمه‌متخلخل (شطرنجی) و متخلخل استفاده شده و برپایی مدل سه بار تکرار شده است. برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر دیواره، از حسگرهای نیروسنج موج استفاده می‌شود (شکل ۴ الف). این حسگرهای از یک کرنش‌سنج<sup>۳</sup> تشکیل شده که برای اندازه‌گیری کرنش و تغییرات فیزیکی ناشی از اعمال فشار وارد بر سازه‌ها طراحی شده است. معمولاً کرنش‌سنج‌ها را از سیم‌هایی با جنس مس-نیکل می‌سازند که دارای مقاومتی از چند هزارم تا چند دهم اهم می‌باشند. میزان مقاومت رسانای به کار رفته در کرنش‌سنج با تغییرات طول آن به صورت خطی تغییر می‌کند. تغییر مقاومت الکتریکی ایجاد شده در کرنش‌سنج متناسب با میزان نیروی اعمال شده به آن می‌باشد. ثبت میزان نیروی وارده بر سازه به صورت تغییرات ولتاژ اعمال شده به حسگرهای نیروسنج موج، بر اساس تغییر مقاومت الکتریکی در کرنش‌سنج صورت می‌پذیرد. برای کالیبراسیون حسگر نیروسنج موج، تغییرات ولتاژ ایجاد شده ناشی از کشش یک وزنه ۱۰۰ گرمی (معادل ۰/۹۸ نیوتن) برابر با یک ولت تنظیم شده است. این حسگرها توسط کابل به رایانه متصل شده و میزان نیروی وارد بر هر بلوک را در زمان‌های مختلف ثبت می‌کنند. حسگرهای نیروسنج موج به کمک یک پایه نگهدارنده در خارج از فلوم و در جلوی سازه قرار داده شدند. پایه نگهدارنده شامل قرقره‌هایی به قطر یک سانتیمتر و ضخامت سه میلی‌متر می‌باشد. قرقره‌ها با شکاف مسطح و حتی‌الامکان بدون اصطکاک هستند. برای ثبت نیروی موج وارد بر بلوک‌های ستون میانی (ستون پنجم) مقطع دیوار، سه حسگر نیروسنج موج روی پایه به فواصل معین نصب گردیدند. با توجه به عمق آب در هر حالت، بلوک سطح تراز آب و بلوک‌های بالایی و پایینی آن از طریق یک رشته سیم ویولن غیرقابل انبساط که از روی قرقره‌ها عبور می‌کند، به یک حسگر نیروسنج موج در روی پایه متصل شده است (شکل ۴). حسگرهای ارتفاع‌سنج موج نیز برای ثبت ارتفاع امواج در فاصله‌ی مشخصی از دیواره نصب شده‌اند (شکل

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 ۳). برای این منظور دو دیوار ساحلی به شکل نیمه‌متخلخل (شکل ۳ الف) و متخلخل (شکل ۳ ب) تهیه گردید. بلوک‌ها روی هم چیده شده و با چسب سیلیکونی ثابت می‌شوند. البته این عمل برای بلوک‌های ستون میانی (ستون پنجم) مقطع دیوار جهت محاسبه نیروی موج صورت نمی‌گیرد و بلوک‌های این ستون با توجه به شکل قاب نگهدارنده قابلیت جابجایی اندکی دارند.



شکل ۳: مدل دیوار ساحلی صندوقه‌ای الف) نیمه‌متخلخل ب) متخلخل

### ۳-۲ 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، برای امواج تصادفی محدوده‌ی ارتفاع موج مشخصه<sup>۱</sup> ( $H_s$ ) ۳ تا ۱۲ سانتی‌متر، دوره‌های تناوب اوجی<sup>۲</sup> ( $T_p$ ) ۱/۶ تا ۲/۸ ثانیه و سه عمق آب ۱۶/۵، ۲۷ و ۳۷/۵ سانتی‌متر در آزمایشات آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. انتخاب محدوده‌ی پارامترهای ذکر شده بر اساس ابعاد بلوک‌ها و مدل دیوار ساحلی طراحی شده صورت گرفته است. در جدول ۱ محدوده‌ی تغییرات پارامترهای هیدرولیکی بی‌بعد در انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی مشخص شده است.

<sup>1</sup> Significant wave height

<sup>2</sup> Peak period

<sup>3</sup> Strain Gauge

نیروسنج، انتقال کامل نیروی موج به حسگرها صورت نمی‌گیرد. این عوامل باعث کمتر بودن مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به مقادیر محاسباتی بر اساس روابط Goda می‌شود. با انجام آنالیز رگرسیونی بر داده‌های اندازه‌گیری شده برای دیوار صلب، برای حذف اثرات کاهنده‌ی نیروی ثبت شده، تصحیحات لازم اعمال شده است.

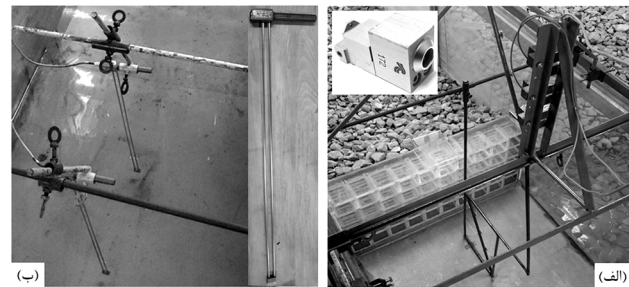
برای بررسی اثر ارتفاع موج (بر مبنای تیزی موج  $(H_s/L_p)$ ) بر حداکثر نیروی موج وارده بر دیوارهای ساحلی، تغییرات  $F_{max}$  بر حسب تیزی موج برای دیوار صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل در شکل ۵ نشان داده شده است. از آنجایی‌که روند تغییرات  $F_{max}$  بر حسب تیزی موج برای سه عمق  $۳۷/۵$ ،  $۲۷$  و  $۱۶/۵$  سانتی‌متر تقریباً مشابه می‌باشد، در این بخش نتایج عمق  $۲۷$  سانتی‌متری برای پریردهای موج مختلف (عمق نسبی  $۰/۰۶۰$  تا  $۰/۱۱۱$ ) ارایه شده است.

مقایسه نتایج حاصل از سه مدل دیوار ساحلی نشان می‌دهد که برای مقادیر ثابت عمق نسبی، با افزایش تیزی موج (ناشی از افزایش ارتفاع موج در پریرود ثابت)، مقدار نیروی وارد بر دیوار افزایش می‌یابد که علت آن استهلاک بیشتر انرژی برای امواج با مقدار تیزی بالاتر می‌باشد. روند مشابهی در مطالعات کرمی‌خانیک (Chiu و Neelamani، ۱۳۹۱)، Sandhya و (۲۰۰۴) و همکاران (۲۰۰۷) مشاهده شده است. از طرفی با توجه به قرار گرفتن بلوک توخالی در سطح ایستابی در عمق  $۲۷$  سانتی‌متری، نتایج مدل نیمه‌متخلخل و متخلخل در این حالت تقریباً یکسان می‌باشد.

در مدل دیوار ساحلی متخلخل، به دلیل وجود بلوک‌های توخالی (که مانند حفره‌هایی در مقابل موج قرار می‌گیرند) و دیوار نازک بین بلوک‌ها (که مانند تیغه‌ای در مقابل موج قرار می‌گیرد)، مقادیر نیروی ثبت شده با حالت صلب که دیوار منعکس‌کننده‌ی خوبی است، تفاوت زیادی دارد. وجود تیغه‌ها و حفره‌ها شرایط شکست موج و ایجاد تلاطم را تقویت می‌کند. وقتی موج به دیوار می‌رسد، توده هوای به دام افتاده بین حفره‌ها و موج بسیار حجیم‌تر از حالتی است که موج با دیوار صلب مواجه می‌شود. بنابراین انفجار توده هوای به دام افتاده، نیروی بزرگی به دیوار در سطح ایستابی وارد می‌کند که در مقایسه با دیوار صلب بیشتر است.

برای بررسی اثر دوره تناوب موج (در قالب عبارت عمق نسبی آب  $(d/L_p)$ ) بر حداکثر نیروی موج، نمودار تغییرات  $F_{max}$

۴ ب). حسگرهای ارتفاع‌سنج موج از دو میله بلند فولادی ضد زنگ به طول  $۶۵$  سانتی‌متر تشکیل شده‌اند که در انتها به یک خازن تصحیح‌کننده متصل می‌شوند و اساس کار آنها خاصیت خازنی است. هنگامی‌که 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 اعمال شده 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 نیز توسط کابل به رایانه متصل و میزان تغییرات تراز سطح آب را در زمان‌های مختلف ثبت می‌کنند.



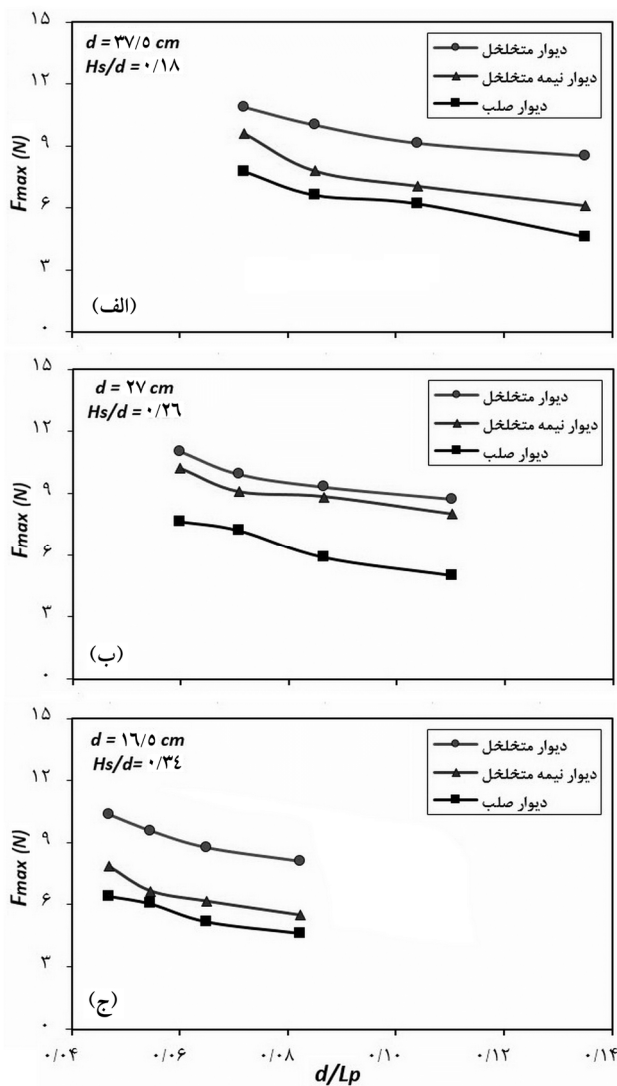
شکل ۴: حسگرهای نصب شده روی پایه نگهدارنده در فلوم موج (الف) نیروسنج موج (ب) ارتفاع‌سنج موج

در شروع هر آزمایش پارامترهای مربوط به امواج به‌عنوان ورودی برنامه Wave Pack مشخص شده و پاروی مولد موج می‌شود. با در نظر گرفتن سه ارتفاع موج، چهار پریرود موج، سه عمق آب و سه مدل دیوار ساحلی، مجموعاً تعداد  $۱۰۸$  آزمون مدل فیزیکی در این تحقیق انجام شده است.

### ۳. نتایج و بحث

مقادیر نیروی موج اندازه‌گیری شده برای هر سه مدل دیوار ساحلی در عمق‌های مختلف آب نشان می‌دهد که مقدار نیروی وارد بر بلوک‌هایی که در تراز سطح آب قرار دارند، حداکثر است و به سمت بالا و پایین کاهش می‌یابد. این روند با الگوی توزیع فشار بدست آمده توسط Goda (1985) روی دیوارهای قائم همخوانی دارد. البته به دلیل وجود اصطکاک بین بلوک‌ها و همچنین نیروی منفی وارده از سمت پشت به بلوک‌های متصل به

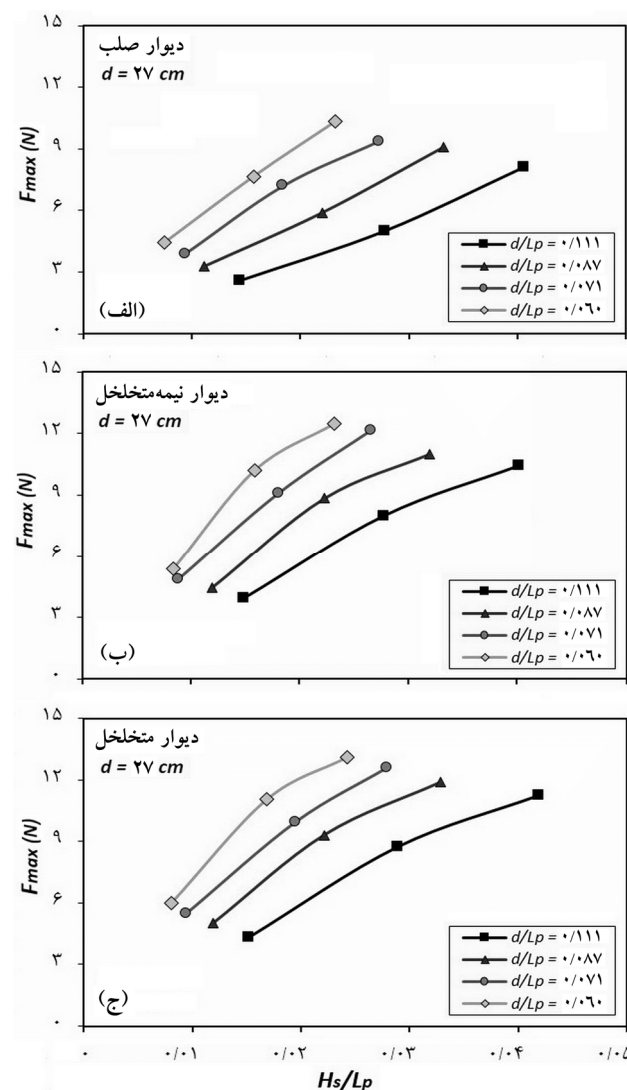
که  $F_{max}$  برای دیوار نیمه‌متخلخل در محدوده‌ی  $۳/۲ - ۱۲/۵$  و برای دیوار کاملاً متخلخل در محدوده‌ی  $۴/۳ - ۱۳/۱$  نیوتن قرار دارد. بر این اساس، بیشینه نیروی وارد بر دیوارهای ساحلی نیمه‌متخلخل و متخلخل به ترتیب حدود ۲۸ و ۴۶ درصد در مقایسه با دیوار صلب افزایش یافته است که نشان‌دهنده‌ی جذب و استهلاک بالاتر انرژی امواج و در نتیجه کاهش ضریب انعکاس در برخورد با این نوع از دیوارهای صندوقه‌ای است.



شکل ۶: تغییرات حداکثر نیروی موج بر حسب 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 ( $H_s/d$ )

مشابه با تحقیقات انجام شده توسط Neelamani و همکاران (۱۹۹۹)، Sandhya و Neelamani (۲۰۰۴) و Munireddy و Neelamani (۲۰۱۴)، برای تعیین رابطه‌ی حداکثر نیروی موج

بر حسب عمق نسبی در یک ارتفاع نسبی ( $H_s/d$ ) ثابت، در شکل ۶ رسم شده است. روند کلی این نمودارها نشان می‌دهد که نیروی وارد بر هر دیوار با عمق نسبی نسبت عکس دارد و با افزایش مقدار  $d/L_p$  (ناشی از کاهش پریود موج در عمق ثابت)، نیروی موج وارد بر هر بلوک کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی برای فشار و نیروی وارد بر سازه در تحقیقات کرمی‌خانیکی (۱۳۹۱)، Sandhya و Neelamani (۲۰۰۲)، Chiu و همکاران (۲۰۰۴) و Alkhalidi و همکاران (۲۰۱۵) گزارش شده است.



شکل ۵: تغییرات حداکثر نیروی موج بر حسب تیزی موج برای دیوار ساحلی (الف) صلب، (ب) نیمه‌متخلخل و (ج) متخلخل، برای پریودهای موج مختلف

برای مقادیر مختلف ارتفاع و پریود موج، مقدار حداکثر نیروی وارد بر دیوار صلب از  $۲/۶$  تا  $۱۰/۴$  نیوتن متغیر است، در حالی

#### ۴. نتیجه‌گیری

نیروی ناشی از امواج تصادفی وارد بر دیوارهای ساحلی صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل با استفاده از مدل فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیر ارتفاع و پرپود موج و عمق آب بر حداکثر نیروی موج بررسی شد. نتایج مهم بدست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱) حداکثر نیروی وارد بر دیوار ساحلی با تیزی موج رابطه مستقیم و با عمق نسبی آب رابطه معکوس دارد. به بیان دیگر، با افزایش ارتفاع و پرپود موج، بیشینه نیروی وارد بر دیوار صندوقه‌ای افزایش می‌یابد.

۲) حداکثر نیروی وارد بر دیوارهای ساحلی نیمه‌متخلخل و متخلخل به ترتیب حدود ۲۸ و ۴۶ درصد بیشتر از نیروی وارد بر دیوار صلب است که نشان‌دهنده‌ی استهلاک بالاتر انرژی امواج و در نتیجه کاهش ضریب انعکاس در برخورد با این نوع از دیوارهای صندوقه‌ای است.

۳) معادلات تجربی برای برآورد حداکثر نیروی موج ( $F_{max}$ ) با استفاده از تحلیل ابعادی و آنالیز رگرسیون چندگانه برای امواج تصادفی پیشنهاد شده است. مقایسه روابط پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی توافق خوبی را نشان می‌دهد.

۴) نتایج این مطالعه می‌تواند در طراحی هیدرودینامیکی بهتر سازه‌های ساحلی قائم نظیر دیوار اسکله مستهلک‌کننده انرژی موج در بنادر و دیوارهای دریایی برای حفاظت از سواحل مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵. سپاسگزاری

بدین وسیله از مسوولین محترم مرکز تحقیقات 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 به‌عمل می‌آید.

#### منابع

ایروانی، ن؛ منتظری نمین، ن.، ۱۳۹۲. مدل‌سازی عددی اندرکنش موج با دیوار متخلخل ساحلی در فضای دو بعدی قائم، نشریه مهندسی دریا، سال نهم، شماره ۱۷، صفحات ۲۶-۱۵.

وارد بر دیوارهای ساحلی از آنالیز رگرسیونی چندگانه استفاده شده است. با استفاده از روش باگینکهام (Hughes, 1993) در تحلیل ابعادی، پارامترهای بدون بعد تیزی موج و عمق نسبی آب به‌عنوان پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر  $F_{max}$  لحاظ گردیده و معادله کلی ۱ در نظر گرفته شد.

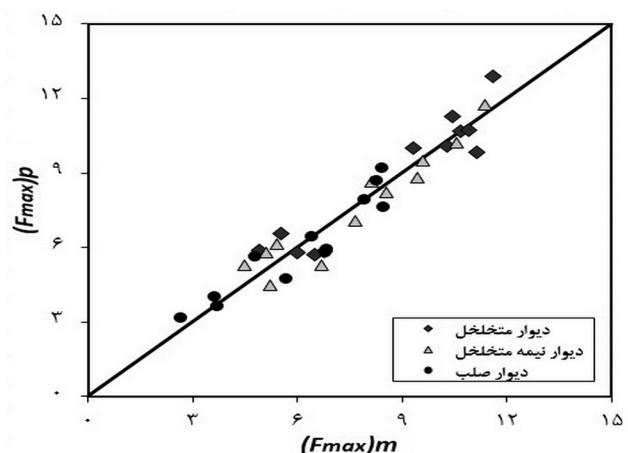
$$F_{max} = a (d/L_p)^b (H_s/L_p)^c \quad \text{معادله ۱}$$

در این بخش تجزیه و تحلیل رگرسیونی روی ۷۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، نسخه ۲۱ انجام می‌شود. روابط تجربی بدست آمده جهت محاسبه  $F_{max}$  برای دیوارهای ساحلی صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: معادلات پیش‌بینی شده حداکثر نیروی موج برای دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای مختلف

نوع دیوار	معادله پیشنهادی	ضریب رگرسیون ( $R^2$ )	محدوده کاربردی
صلب	$F_{max} = 9/8 (d/L_p)^{-1/3} (H_s/L_p)^{1/6}$	۰/۸۵	$0.047 < d/L_p < 0.135$
نیمه‌متخلخل	$F_{max} = 18/5 (d/L_p)^{-1/4} (H_s/L_p)^{1/6}$	۰/۹۲	$0.007 < H_s/L_p < 0.42$
متخلخل	$F_{max} = 28/5 (d/L_p)^{-1/4} (H_s/L_p)^{1/6}$	۰/۸۷	

۳۰ درصد باقیمانده داده‌های نیروی موج برای اعتبارسنجی روابط بدست آمده، استفاده شده است. مقایسه مقادیر  $F_{max}$  اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در شکل ۷، همبستگی ( $R^2 = 0.91$ ) قابل قبولی را نشان می‌دهند.



شکل ۷: نمودار پراکندگی حداکثر نیروی موج اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای دیوارهای ساحلی صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل

- Ocean Engineering. World Scientific Publishing, Singapore, 568P.
- Ji, C.H.; Oh, S.H.; Oh, Y.M.; Jang, S.C.; Lee, D.S., 2014. Experimental investigation of horizontal wave forces on the perforated caisson with single and double wave chambers. Proceedings of the 34th international conference on coastal engineering, Seoul, South Korea, 321-329PP.
- Munireddy, M.G.; Neelamani, S., 2004. Wave pressure reduction on vertical seawalls/caissons due to an offshore breakwater. Indian Journal of Marine Sciences, 33(4): 329-337.
- Neelamani, S.; Schüttrumpf, H.; Muttray, M.; Oumeraci, H., 1999. Prediction of wave pressures on smooth impermeable seawalls. Ocean Engineering, 26(8): 739-765.
- Neelamani, S.; Sandhya, N., 2004. Wave reflection, run-up, run-down and pressures on plane, dentated and serrated seawalls. Coastal Engineering, 46(2): 141-169.
- Ozgun, V.S.; Kabdasli, M.S., 2009. Reduction of non-breaking wave loads on caisson type breakwaters using a modified perforated configuration. Ocean Engineering, 36(17): 1316-1331.
- Thaha, M.A.; Dwipuspita, A.I.; Minggu, W., 2013. The performance of perforated screen seawall in dissipating waves, minimizing reflected wave and run-up/run-down, 4th International Seminar of HATHI, 6-8 September, Yogyakarta, Indonesia.
- چگینی، و.، ۱۳۷۷. مجموعه کتاب‌های مهندسی دریا، راهنمای طراحی موج‌شکن‌ها، جلد دوم، چاپ اول، شرکت جهاد تحقیقات و آبخیزداری تهران، ۲۷۶ صفحه.
- کرمی‌خانیک، ع.؛ شکرلب، م.، ۱۳۸۴. ارزیابی آزمایشگاهی انعکاس امواج از دیواره‌های ساحلی صندوقه‌ای، فصلنامه پژوهش و سازندگی، سال هجدهم، شماره ۲، صفحات ۱۷-۱۱.
- کرمی‌خانیک، ع.، ۱۳۹۱. بررسی پایداری دیوارهای دریایی خاک مسلح، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، وزارت جهاد کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران، ۱۷۷ صفحه.
- وفایی‌پور سرخابی، ر.؛ لطف‌اللهی یقین، م.ع.؛ امین‌فر، م.ح.، ۱۳۹۰. تأثیر دوره‌ی تناوب امواج تصادفی بر واکنش دیوارهای ساحلی با اشکال هندسی مختلف به روش عددی، نشریه اقیانوس‌شناسی، سال دوم، شماره ۸، صفحات ۷۸-۶۹.
- Alkhalidi, M.; Neelamani, S.; Assad, A., 2015. Wave pressures and forces on slotted vertical wave barriers. Ocean Engineering, 108: 578-583.
- Chiu, Y.F.; Lin, J.G.; Chang, S.C.; Lin, Y.J.; Chen, C.H., 2007. An experimental study of wave forces on vertical breakwater. Journal of Marine Science and Technology, 15(3): 158-170.
- Dhinakaran, G.; Sundar, V.; Sundaravivelu, R.; Graw, K., 2002. Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves. Ocean Engineering, 29(15): 1981-2004.
- Goda, Y., 1985. Random seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press, Japan, 443P.
- Hughes, S.A., 1993. Physical models and laboratory techniques in Coastal Engineering, Advanced Series on