

## مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1401.8.1.1.9

درصد همانندی: ۹٪

## برآورد نیروی موج وارد بر دیوارهای دریایی متخلخل پلکانی

مهدی اسماعیلی<sup>۱\*</sup>، سعید فرهادی پور<sup>۲</sup><sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه اقیانوس شناسی، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار

esmaeili@cmu.ac.ir

saeed.farhadypoor@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار هواشناسی، مرکز هواشناسی و اقیانوس شناسی چابهار، چابهار

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۴

## چکیده

در این مطالعه، نیروی ناشی از موج وارد بر دیوارهای دریایی متخلخل پلکانی به صورت تجربی با استفاده از مدل سازی بررسی شده است. امواج منظم در طیف گسترده ای از ارتفاع ها و دوره های تناوب موج استفاده شدند. آزمایش ها برای عمق ثابت آب ۰/۳۷۵ متر و شیب های مختلف دیوار دریایی متخلخل (یعنی  $45^\circ$ ،  $60^\circ$ ،  $75^\circ$ ،  $90^\circ$ ) انجام شدند. مشخص شد که پارامترهای عمق نسبی آب، تیزی موج، شیب دیوار دریایی و پارامتر تشابه شکست در پیش بینی بیشینه نیروی موج ( $F_m$ ) مؤثر هستند. مقادیر  $F_m$  برای دیوارهای دریایی با وجه پله ای در محدوده  $4/1 - 16/7$  نیوتن و برای دیواره متخلخل قائم در محدوده  $3/8 - 12/6$  نیوتن قرار دارد. مقایسه مقادیر  $F_m$  اندازه گیری شده برای دیوارهای دریایی نشان داد که نیروی ناشی از امواج وارد بر دیوارهای با وجه پله ای حدود ۱۸ درصد بیشتر از دیواره قائم است؛ بنابراین دیوارهای دریایی با وجه پله ای نسبت به دیوار قائم در جذب و استهلاک انرژی موج برخوردی عملکرد بهتری دارند. بر اساس داده های اندازه گیری شده، تحلیل ابعادی و آنالیز رگرسیون غیرخطی، روابط تجربی جدیدی برای پیش بینی بیشینه نیروی موج ارائه شده است. این فرمول ها با استفاده از نرم افزار SPSS بر اساس نتایج تجربی صحت سنجی شدند. یافته های تحقیق حاضر می تواند برای بهینه سازی معیارهای طراحی دیوارهای دریایی شیب دار برای حفاظت از ساحل در برابر فرسایش استفاده شود.

واژه های کلیدی: نیروی موج، دیوار دریایی پلکانی، امواج منظم، مدل سازی فیزیکی

## ۱. مقدمه

در دهه های گذشته بالا آمدن سطح تراز آب دریاها یکی از جدی ترین مسائلی بوده که باعث ایجاد پدیده فرسایش خطوط ساحلی شده است. در نتیجه این شرایط خاص،

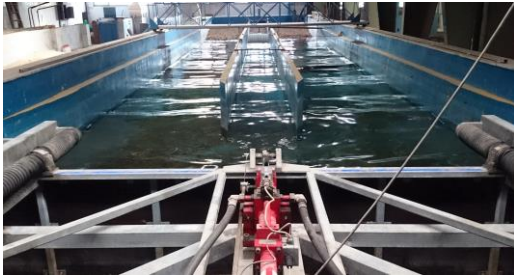
سازه های حفاظت ساحلی نظیر موج شکن ها، آب شکن ها و دیوارهای دریایی به کار گرفته شده اند. وظیفه اصلی دیوارهای دریایی حفاظت از خط ساحلی در برابر فرسایش ناشی از حمله امواج دریا است [۱]. این سازه ها به موازات خط ساحلی در

اشکال مختلفی نظیر دیواره‌های قائم، انحنادار، پلکانی و شیب‌دار احداث می‌شوند [۲]. برای دیواره‌های حفاظتی قائم، افزایش سرعت ذرات آب در جلوی سازه به دلیل انعکاس قابل توجه موج به افزایش بار موج روی دیوار و افزایش آبستگي پای سازه منجر می‌شود. برای حل این مسئله، دیواره‌های دریایی شیب‌دار معرفی شده‌اند [۳]. دیواره‌های دریایی متخلخل نیز به‌عنوان راه‌حلی برای رفع مشکلات ناشی از افزایش تلاطم امواج در جلوی سازه‌های قائم و کاهش هزینه‌های ساخت به کار گرفته شده‌اند. دیواره‌های متخلخل با استهلاك انرژی موج تابشی شرایط مناسبی برای حفاظت و بهره‌برداری از سواحل فراهم می‌سازند [۴]. میزان کارایی این گونه دیوارها برای جذب انرژی امواج به پارامترهای سازه‌ای و پارامترهای مربوط به موج بستگی دارد. با توجه به رفتار پیچیده امواج، نمی‌توان رفتار سازه‌های دریایی را فقط با تکیه بر تئوری‌های موجود به‌طور دقیق معین نمود، لذا در این موارد استفاده از مدل‌سازی فیزیکی اهمیت خواهد داشت [۵].

به عملکرد موج بر روی سازه‌های دریایی در بسیاری از پژوهش‌های اخیر توجه شده است اما امکان استفاده از گونه‌های بسیار متنوع در طراحی و ساخت این دیوارها سبب شده تا این مطالعات همچنان جزو تحقیقات به‌روز باشد. نتایج تعدادی از بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه در ادامه بیان شده است.

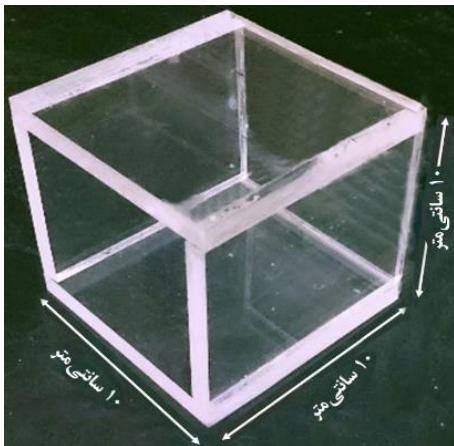
نیلامانی و همکاران با محاسبه فشار ناشی از امواج منظم در برخورد با دیواره‌های دریایی صاف نفوذناپذیر نشان دادند که رابطه‌ای قوی بین انعکاس موج و فشار موج وارد بر دیواره‌های دریایی وجود دارد. همچنین با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه بر روی داده‌های فشار اندازه‌گیری شده روابط تجربی جدیدی برای محاسبه فشار ناشی از موج ارائه کردند [۶]. در مطالعه چپو و همکاران فشار موج بر روی دیواره موج‌شکن‌های کیسونی قائم با آزمایش‌های مدل هیدرولیکی تحت امواج منظم و تصادفی اندازه‌گیری شد. بر این اساس حداکثر نیروی افقی محاسبه و با نظریه‌های نیروی موج Goda مقایسه گردید [۷]. حداکثر نیروی موج افقی وارد بر کیسون متخلخل با یک و دو اتاقک موج توسط جی و همکاران به‌صورت تجربی اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شده است.

اتلاف اضافی انرژی موج در دیواره میانی متخلخل کیسون دو اتاقکی باعث کاهش نیروی موج افقی نسبت به کیسون با یک اتاقک موج بیان شده است [۸]. الخلیدی و همکاران با استفاده از مدل‌های فیزیکی، نیروهای موج وارد بر موانع موج تک و دو صفحه‌ای با ضرایب تخلخل متفاوت را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که نیروهای وارد بر پانل جلویی در حالت مانع موج دو صفحه‌ای ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از یک دیوار متخلخل تنهاست [۹]. نیلامانی و ال‌انجری فشار ناشی از موج بر روی موانع عمودی شکاف‌دار را تحت امواج تصادفی بررسی کردند. آزمون‌های آزمایشگاهی برای پیکربندی با درصد تخلخل و تعداد دیواره شکافدار متفاوت انجام شده است. به‌طور کلی فشار دینامیکی وارده با افزایش عمق نسبی آب ( $d/L_p$ ) کاهش یافته و تغییر ارتفاع موج نسبی ( $H_i/d$ ) تأثیر ناچیزی را نشان داد [۱۰]. در مطالعه‌های دیگر، مختار و همکاران فشار ناشی از امواج ضربه‌ای سونامی بر دیواره‌های دریایی عمودی صلب و متخلخل را به‌صورت تجربی اندازه‌گیری کردند. امواج سونامی در شرایط آزمایشگاهی به روش شکست سد<sup>۱</sup> تولید شده و اثر تخلخل دیواره جلویی در کاهش ضرایب حداکثر فشار ( $P_{max}$ ) وارد بر دیوار دریایی بررسی شد. معادله پیش‌یابی برای برآورد مقادیر  $P_{max}$  با استفاده از تحلیل رگرسیون چندگانه ارائه و با فرمول‌های تجربی قبلی نیز مقایسه شده است [۱۱]. نینگ و همکاران عملکرد دیواره‌های دریایی عمودی ساحلی را در شرایط توفانی دریا برای تعیین حداکثر فشار وارد بر دیوار به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی نشان داد که مدل عددی توسعه یافته قادر به پیش‌بینی دقیق حداکثر بار موج بر روی دیواره‌های دریایی عمودی است [۱۲]. در مطالعه راه‌بانی و همکاران، حداکثر نیروی موج وارد بر دیواره‌های ساحلی قائم صلب، نیمه‌متخلخل و متخلخل با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی محاسبه شد. مقایسه مقادیر به‌دست آمده برای سه مدل دیوار نشان داد که نیروهای وارد بر دیواره‌های متخلخل و نیمه‌متخلخل به ترتیب حدود ۴۶ و ۲۸ درصد بیشتر از نیروی وارد بر دیوار صلب است؛ بنابراین افزایش تخلخل وجه دیوار باعث استهلاك بیشتر انرژی موج تابشی و در نتیجه کاهش ضریب بازتاب از سطح دیواره



شکل ۱. فلوم موج پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران

برای ساخت مدل دیوار دریایی پلکانی در ابتدا بلوک‌های مکعبی شکلی با ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر با استفاده از ورقه‌های پلکسی‌گلاس به ضخامت‌های یک سانتی‌متر ساخته می‌شود (شکل ۲). طراحی اولیه بلوک در محیط نرم‌افزار CorelDRAW صورت گرفته و قطعات پلکسی‌گلاس لازم برای ساخت بلوک‌ها با دستگاه لیزر برش داده شده است. با قرار دادن این بلوک‌ها در داخل یک قاب نگهدارنده و ثابت کردن آن‌ها با کلروفورم، قالب نهایی مدل دیوار دریایی پلکانی شکل می‌گیرد (شکل ۳). البته برای اندازه‌گیری نیروی موج وارد بر بلوک‌های ستون میانی دیواره با توجه به شکل قاب نگهدارنده قابلیت جابه‌جایی اندکی دارند. انتخاب ابعاد بلوک و مدل دیوار پلکانی بر اساس محدوده عمق آب، ارتفاع امواج و عرض یک متری قسمت میانی فلوم موج صورت گرفته است.



شکل ۲. بلوک طراحی شده برای ساخت مدل دیوار دریایی

می‌شود [۱۳]. برآورد بار موج وارد بر سازه‌های دریایی در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است [۱۴-۱۹]. با توجه به پژوهش‌های محدود انجام شده در خصوص برآورد نیروی موج وارد بر دیوارهای دریایی شیب‌دار، در مطالعه حاضر نیروی موج وارد بر دیوارهای دریایی متخلخل پلکانی بررسی می‌شود. در طراحی مدل دیوار دریایی ترکیب اثر تخلخل و شیب دیواره هم‌زمان در نظر گرفته شده تا کارایی بهتر سازه مشخص شود. آزمون‌های مدل فیزیکی تحت امواج منظم در عمق آب ثابت  $0.375$  متر و شیب‌های متفاوت  $90$ ،  $75$ ،  $60$  و  $45$  درجه انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی به صورت نمودارهایی تغییرات بیشینه نیروی موج وارد بر دیوار دریایی را برحسب پارامترهای مؤثر عمق نسبی آب، تیزی موج، شیب دیواره و پارامتر تشابه شکست<sup>۲</sup> (ξ) نشان می‌دهد. به‌علاوه، تحلیل رگرسیون خطی چندگانه بر داده‌های آزمایشگاهی انجام شده و روابط تجربی برای برآورد بیشینه نیروی موج ارائه شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

تست‌های آزمایشگاهی برای محاسبه نیروی وارد بر مدل دیوار دریایی پلکانی در فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران انجام شده است (شکل ۱). این فلوم به طول  $33$  متر، عرض  $5/5$  متر، ارتفاع  $1/5$  متر و مجهز به یک سیستم مولد موج پیستونی قائم با مشارکت مؤسسه هیدرولیک دانمارک<sup>۳</sup> (DHI) طراحی، تجهیز و راه‌اندازی شده است. امواج منظم با پاروی مولد موج به طول  $5$  متر و عمق آبخور  $1$  متر که در انتهای فلوم موج قرار داده شده تولید می‌شوند. در آزمون‌های مدل فیزیکی از حسگرهای ارتفاع سنج و نیروسنج موج استفاده می‌شود. این حسگرها به ترتیب نوسانات سطح تراز آب و نیروی وارد بر مدل دیوار را در حین آزمایش‌ها ثبت و در رایانه ذخیره می‌کنند.

با توجه به قوانین شبیه‌سازی، دامنه تغییرات پارامترهای انتخابی در آزمون‌های مدل فیزیکی در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱. محدوده پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی فیزیکی

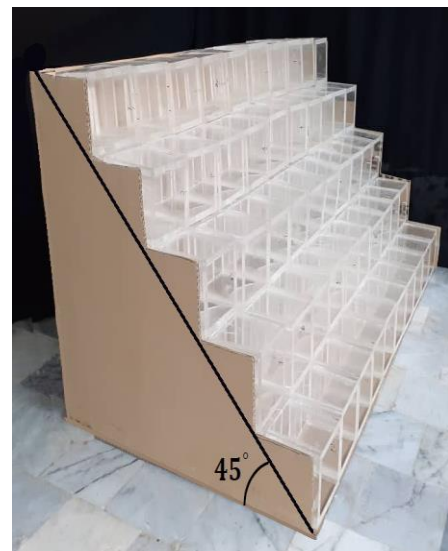
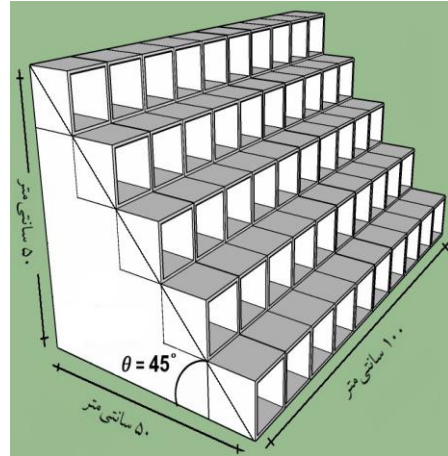
پارامتر	محدوده تغییرات
ارتفاع موج ( $H_i$ )	۳/۱۴ تا ۱۴/۲ سانتی‌متر
دوره تناوب موج ( $T$ )	۱/۶۱ تا ۲/۸۱ ثانیه
عمق آب ( $d$ )	۳۷/۵ سانتی‌متر
طول موج تابشی ( $L_i$ )	۲/۷۸ تا ۵/۲۲ متر
طول موج آب عمیق ( $L_0$ )	۴/۰۳ تا ۱۲/۳ متر
شیب دیوار دریایی ( $\theta$ )	۶۰، ۷۵، ۹۰ و ۴۵ درجه
تیزی موج ( $H_i/L_i$ )	۰/۰۴۸ تا ۰/۰۰۷
عمق نسبی آب ( $d/L_i$ )	۰/۱۳۵ تا ۰/۰۷۲
ارتفاع نسبی موج ( $H_i/d$ )	۰/۳۸۳ تا ۰/۰۸۷
پارامتر تشابه شکست ( $\xi$ )	۴۳/۲ تا ۴/۵
$\cot \theta$	۰/۵۷۷، ۰/۲۶۷ و ۰

انتخاب بازه پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی بر اساس ابعاد بلوک طراحی شده و مدل دیوار پلکانی تعیین شده است. مقادیر واقعی این پارامترها بر اساس روابط (۲) تعیین می‌شوند. پارامتر تشابه شکست (عدد ایریبارن<sup>۵</sup>) معمول‌ترین عدد بدون بعد برای بیان اثر امواج بر سازه‌های شیب‌دار است و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = \tan\theta / (H_i/L_0)^{0.5} \quad (3)$$

به طوری که در رابطه فوق  $\tan\theta$  شیب سازه و  $H_i/L_0$  تیزی موج ژرفاب می‌باشد.

برای ثبت نوسانات سطح آب در فلوم موج از حسگر ارتفاع‌سنج موج استفاده می‌شود. این حسگر از دو میله بلند فولادی ۶۵ سانتی‌متری تشکیل شده که در انتهای آن یک خازن تصحیح‌کننده<sup>۶</sup> قرار دارد (شکل ۴). هنگام بالا آمدن سطح آب در اثر موج، آب به‌عنوان دی‌الکتریک بین دو میله حسگر با تغییر سطح خازن باعث تغییر ظرفیت آن می‌شود. با تغییرات ولتاژ اعمال‌شده به حسگرها بر اساس تغییر سطح آب و در نتیجه تغییر ظرفیت خازن، داده‌های تراز آب برداشت خواهد شد. در مرحله کالیبراسیون حسگر ارتفاع‌سنج موج،



شکل ۳. مدل دیوار دریایی پلکانی

با توجه به اینکه نیروی گرانش، نیروی غالب در مدل‌سازی آزمایشگاهی سازه‌های دریایی است، از معیار فرود<sup>۴</sup> به‌عنوان معیار مناسب در طراحی مدل‌های مقیاسی استفاده می‌شود. عدد فرود در واقع اهمیت نسبی نیروهای اینرسی وارد بر یک ذره سیال به وزن ذره را نشان می‌دهد و با رابطه زیر بیان می‌شود:

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

که در آن  $V$  سرعت،  $g$  شتاب گرانش و  $d$  عمق آب است. با در نظر گرفتن مقیاس انتخابی ۱:۱۰ و معیار فرود، عدد مقیاس برای پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی عبارت‌اند از:

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

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

کرنش سنج، میزان نیروی وارده بر بلوک‌های دیوار اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. در مرحله کالیبراسیون حسگرهای نیروسنج موج، تغییرات ولتاژ ایجادشده در اثر کشش یک وزنه ۱۰۰ گرمی برابر یک ولت لحاظ شده است.



شکل ۶. پایه نگهدارنده با حسگرهای نیروسنج نصب شده

پارامترهای امواج برخوردی به دیواره مدل، در شروع هر آزمایش به‌عنوان ورودی برنامه Wave Pack سیستم مولد موج تعریف می‌شوند. با در نظر گرفتن محدوده ارتفاع‌ها و دوره‌های تناوب موج و مدل دیوار متخلخل پلکانی با چهار شیب متفاوت، در مجموع تعداد ۹۶ آزمون مدل آزمایشگاهی در این پژوهش برنامه‌ریزی و اجرا شده است.

### ۳. نتایج و بحث

در این بخش اثر ارتفاع موج (برحسب تیزی موج)، دوره تناوب موج (در قالب عبارت عمق‌نسبی آب)، شیب دیوار دریایی (بر مبنای ترم  $\cot(\theta)$  و پارامتر تشابه شکست  $(\xi)$  بر بیشینه نیروی موج ( $F_m$ )، برای دیوارهای دریایی مدل شده بررسی می‌شود. مقادیر نیروی موج اندازه‌گیری شده وارد بر سه بلوک دیوارهای مدل شده نشان می‌دهد که بیشینه نیروی موج به بلوک واقع در سطح تراز آب وارد می‌شود.

ولتاژ ۱۰ ولتی معادل با تغییرات ۱۰ سانتی‌متری در سطح تراز آب در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. حسگر ارتفاع سنج موج

برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر مدل دیوار پلکانی از حسگرهای نیروسنج موج استفاده می‌شود (شکل ۵). این حسگر از یک کرنش‌سنج<sup>۷</sup> تشکیل شده که برای اندازه‌گیری تغییرات فیزیکی ناشی از اعمال فشار وارد بر سازه کاربرد دارد.

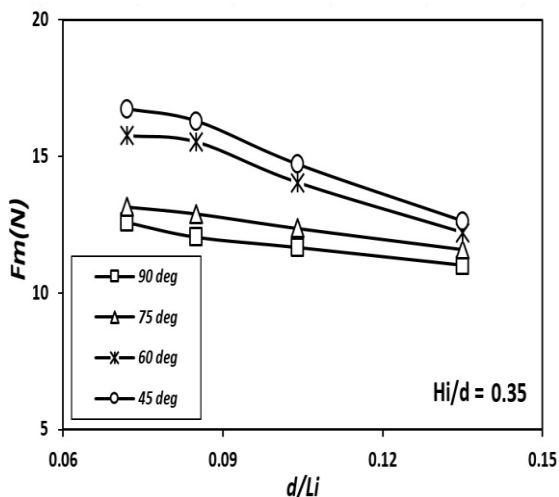


شکل ۵. حسگر نیروسنج موج

حسگرهای نیروسنج موج به دلیل ضد آب نبودن، در جلوی مدل دیوار دریایی با استفاده از یک پایه نگهدارنده در خارج از سطح آب قرار داده می‌شوند (شکل ۶). برای ثبت نیروی موج وارد بر سه بلوک بالایی ستون پنجم مقطع دیوار، سه حسگر نیروسنج موج روی پایه نصب شد. با توجه به عمق آب ۰/۳۷۵ متر، بلوک سطح تراز آب و بلوک‌های بالایی و پایین آن با یک رشته سیم ویولن غیرقابل انبساط که از روی قرقره‌ها عبور می‌کند، به حسگرهای نیروسنج موج در روی پایه متصل شده است. با تغییرات ولتاژ اعمال‌شده به حسگرهای نیروسنج موج بر اساس تغییر مقاومت الکتریکی در

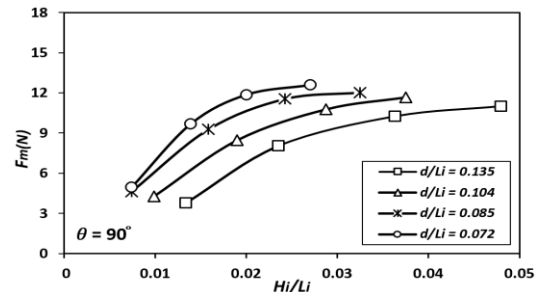
مقادیر بیشینه نیروی موج برای دیوارهای پلکانی با شیب ۶۰ و ۷۵ درجه به ترتیب در محدوده ۱۶/۴-۴/۵ و ۱۴/۹-۴/۱ نیوتن قرار دارد. با کاهش زاویه شیب دیوار از ۹۰ به ۴۵ درجه، روند افزایشی مقدار  $F_m$  مشاهده شد که با مفاهیم تئوری مطابقت دارد. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش تیزی موج برای مقادیر ثابت عمق نسبی، مقدار  $F_m$  افزایش یافته است که دلیل آن اتلاف بیشتر انرژی موج برخوردی برای امواج با مقدار تیزی بالاتر است. در حالت کلی مقادیر  $F_m$  برای دیوارهای پلکانی در محدوده ۴/۱ تا ۱۶/۷ نیوتن قرار دارد که در مقایسه با دیوار قائم بین ۸ تا ۲۵ درصد (به‌طور میانگین ۱۸ درصد) افزایش یافته است. این نتایج عملکرد بهتر دیوارهای پلکانی را در جذب و استهلاک انرژی امواج در مقایسه با دیوار قائم نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر دوره تناوب موج بر بیشینه نیروی موج، نمودار تغییرات  $F_m$  بر حسب عمق نسبی در یک ارتفاع نسبی ثابت ( $H_i/d = 0.35$ ) برای دیوارهای دریایی با شیب مختلف در شکل ۹ رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش نسبت  $d/L_i$  (ناشی از کاهش دوره تناوب موج در عمق آب ثابت)، مقدار  $F_m$  کاهش یافته است. بنابراین در حالت کلی می‌توان گفت که مقادیر  $F_m$  با افزایش تیزی موج و عمق نسبی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. این روند در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شده است [۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۳].



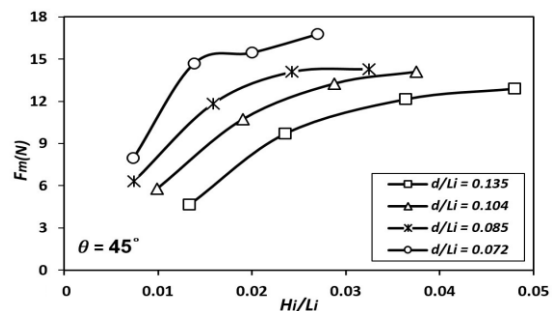
شکل ۹. تأثیر دوره تناوب موج بر بیشینه نیروی موج وارد برای دیوارهای دریایی پلکانی با شیب‌های متفاوت ( $H_i/d=0.35$ )

برای دیوار متخلخل قائم ( $\theta = 90^\circ$ ) مقادیر  $F_m$  اندازه‌گیری شده به ازای تمامی مقادیر تیزی موج و عمق نسبی در محدوده ۳/۸ تا ۱۲/۶ نیوتن قرار دارد (شکل ۷). در این حالت با توجه به بستر افقی فلوم موج، امواج برخوردی به دیواره مدل از نوع امواج ناشکنا هستند.



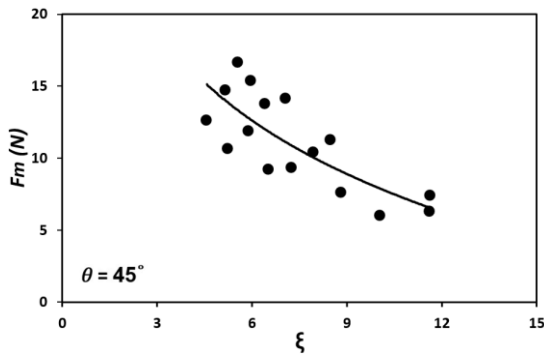
شکل ۷. تأثیر ارتفاع موج بر بیشینه نیروی موج وارد بر دیوار متخلخل قائم به ازای دوره‌های تناوب موج مختلف

برای مدل‌های دیوار متخلخل پلکانی، بیشینه نیروی موج اندازه‌گیری شده در مقایسه با دیوار قائم مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد. برای دیوار پلکانی با زاویه شیب ۴۵ درجه،  $F_m$  در محدوده ۴/۶ تا ۱۶/۷ نیوتن تغییر می‌کند که نسبت به دیوار قائم افزایش یافته است (شکل ۸). این روند افزایشی برای دیوار پلکانی می‌تواند به دلیل شیب دیواره باشد که در کنار ساختار متخلخل باعث شکسته شدن امواج فرودی روی سازه و اتلاف بیشتر انرژی موج می‌شود. از سوی دیگر، هر چه بتوان انرژی بیشتری از موج تابشی به سازه را مستهلک کرد می‌توان گفت که از افزایش ارتفاع موج و اغتشاش در جلوی سازه جلوگیری شده و با کاهش ضریب بازتاب موج، محیط آرام‌تری را در جلوی سازه خواهیم داشت و امکان بهره‌برداری بهینه از مناطق ساحلی فراهم خواهد شد.



شکل ۸. تأثیر ارتفاع موج بر بیشینه نیروی موج وارد بر دیوار متخلخل پلکانی با زاویه شیب ۴۵ درجه به ازای دوره‌های تناوب موج مختلف

تشابه شکست، مقدار ضریب بازتاب افزایش یافته است. این نتیجه توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۴، ۷، ۹، ۱۳].



شکل ۱۲. تغییرات بیشینه نیروی موج برحسب پارامتر تشابه شکست برای دیوار دریایی پلکانی با زاویه شیب ۴۵ درجه

برای تعیین روابط تجربی بیشینه نیروی موج با استفاده از روش باکینگهام در تحلیل ابعادی، پارامترهای بدون بعد تیزی موج، عمق نسبی آب، شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست به عنوان پارامترهای مؤثر بر مقدار  $F_m$  لحاظ شده و معادله کلی زیر در نظر گرفته شده است [۲۰].

$$F_m = a(d/L_i)^b (H_i/L_i)^c (\xi)^d (\cot \theta)^e \quad (۴)$$

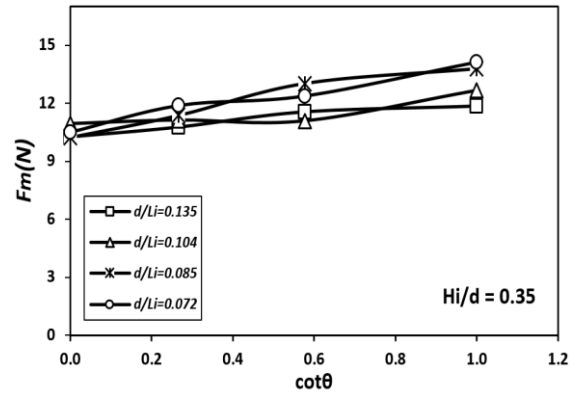
در این بخش آنالیز رگرسیون خطی چندگانه بر دو سوم داده‌های آزمایشگاهی که به صورت تصادفی انتخاب شده در نرم‌افزار آماری SPSS انجام یافته است. مقادیر ضرایب رگرسیونی  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ،  $d$  و  $e$  برای محاسبه مقادیر بیشینه نیروی موج برای دیوارهای دریایی متخلخل پلکانی و قائم در جدول ۲ ارائه شده است. نیروی بیشینه با تیزی موج رابطه مستقیم دارد و مقدار ضریب مربوط به آن مثبت است ( $c > 0$ ). برای بقیه ضرایب چون نیروی بیشینه با عمق نسبی، پارامتر تشابه شکست و شیب دیوار رابطه وارون دارد، مقادیر این ضرایب منفی است ( $b, d, e < 0$ ).

جدول ۲. مقادیر پارامترهای بیشینه نیروی موج پیش‌بینی شده برای دیوارهای دریایی پلکانی و قائم

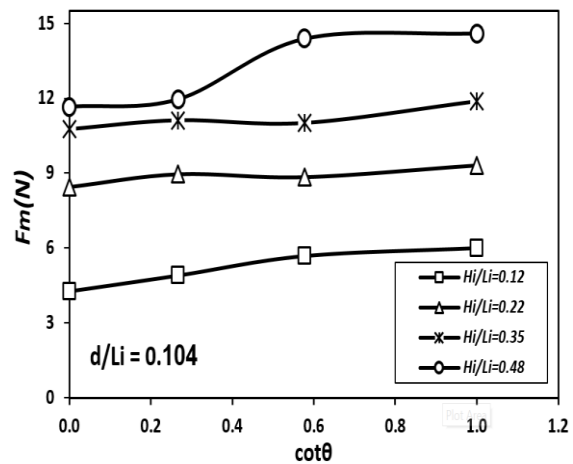
نوع دیوار	a	b	c	d	E	R <sup>2</sup>	Eq.
قائم	۱۵/۸	-۰/۹۸	۰/۷۵	۰	۰	۰/۹۲	(۵)
پلکانی	۱۱/۵	-۱/۱	۰/۱۴	-۱/۶	-۱/۵	۰/۹۱	(۶)

مقادیر بالای ضرایب تعیین ( $R^2$ ) به دست آمده از آنالیز رگرسیونی در جدول ۲ ارتباط قابل قبولی را بین متغیرهای

برای بررسی اثر شیب دیوار بر بیشینه نیروی موج، نمودار تغییرات  $F_m$  برحسب  $\cot(\theta)$  در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رسم شده است. این نمودارها نشان می‌دهد که با کم شدن زاویه شیب دیوار از ۹۰ به ۴۵ درجه (افزایش مقدار  $\cot(\theta)$  از ۰ تا ۱)، مقادیر بیشینه نیروی موج در نتیجه شکست موج روی سازه، افزایش یافته است.



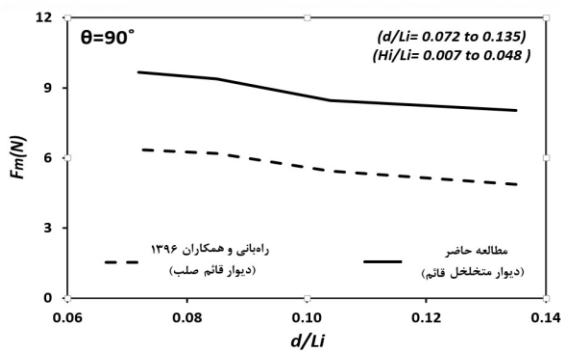
شکل ۱۰. تغییرات بیشینه نیروی موج برحسب شیب دیوار پلکانی به ازای عمق‌های نسبی مختلف ( $H_i/d = 0.35$ )



شکل ۱۱. تغییرات بیشینه نیروی موج برحسب شیب دیوار پلکانی به ازای تیزی‌های موج مختلف ( $d/L_i = 0.104$ )

با توجه به مقادیر  $\xi$  که در محدوده ۴/۵ - ۴۳/۲ قرار دارد می‌توان گفت که امواج آزمایشگاهی تولید شده از نوع امواج شکنای لغزشی<sup>۸</sup> هستند. بررسی نمودار تغییرات  $F_m$  با  $\xi$  نشان می‌دهد که مطابق انتظار با افزایش مقدار پارامتر تشابه شکست، بیشینه نیروی وارد بر سازه کاهش یافته است (شکل ۱۲). به‌طور کلی می‌توان گفت که با کاهش شیب دیواره و پارامتر

اندازه گیری شده  $(F_m)_M$  و پیش بینی شده  $(F_m)_P$  انجام شده است (جدول ۵). با توجه به سطح معنی داری نزدیک به یک  $(0/93)$ ، اختلاف شاخصی در مقایسه بین مقادیر  $F_m$  اندازه گیری شده و پیش بینی شده مشاهده نمی شود. با توجه به متفاوت بودن پارامترهای سازه ای دیوار دریایی متخلخل پلکانی در مقایسه با سازه های مدل شده در مطالعات پیشین، امکان مقایسه بیشینه نیروی موج بر اساس معادلات رگرسیونی وجود ندارد. تنها موردی که با مطالعه حاضر به لحاظ شرایط سازه ای و هیدرودینامیکی همخوانی دارد، مطالعه راهبانی و همکاران (۱۳۹۶) است که مقادیر بیشینه نیروی وارد بر دیوار قائم صلب را برآورد نموده است. مقایسه مقادیر  $F_m$  برای دیوار قائم صلب و دیوار متخلخل نشان می دهد که نیروی بیشینه وارد بر دیوار متخلخل افزایش یافته است و دیوار در جذب انرژی موج کارایی بیشتری دارد (شکل ۱۳). با توجه به اینکه برای دیوار متخلخل نیروی بیشتری به سازه وارد شده است پس انرژی بیشتری از موج تابشی جذب شده و می توان از این نوع از دیوارها به عنوان سازه های مستهلک کننده انرژی موج در بحث حفاظت ساحلی استفاده نمود.



شکل ۱۳. مقایسه مقادیر بیشینه نیروی موج وارد بر دیوار قائم صلب و دیوار قائم متخلخل بر حسب عمق نسبی

مستقل تیزی موج، عمق نسبی، شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست با متغیر وابسته بیشینه نیروی موج نشان می دهد. اطلاعات مربوط به آنالیز واریانس و خلاصه ضرایب معادله رگرسیونی پیشنهادی برای دیوارهای دریایی پلکانی در جدول های ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. جدول آنالیز واریانس معادله رگرسیونی پیشنهادی

مدل	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F	سطح معنی داری Sig.
رگرسیون	۶/۶۶۳	۳	۲/۲۱۱	۱۶۵/۵۴۱	۰/۰۰۰ <sup>a</sup>
مانده	۰/۵۸۸	۴۳	۰/۰۱۳		
کل	۷/۲۲۱	۴۷			

جدول ۴. جدول خلاصه ضرایب معادله رگرسیونی پیشنهادی

مدل	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	آماره	سطح معنی داری Sig.
	B	خطای معیار	$\beta$	t	
عدد ثابت	۲/۴۴۴	۰/۱۳۱		۱۳/۵۰۶	۰/۰۰۰
LNdLi	-۱/۰۷۹	۰/۰۵۴	-۰/۶۹۶	-۱۹/۹۹۳	۰/۰۰۰
LNHiLi	-۰/۱۴۴	۰/۷۳۳	-۰/۲۱۸	-۰/۱۹۷	۰/۰۰۰
LN $\xi$	-۱/۶۰۵	۱/۴۶۵	-۲/۷۶۶	-۱/۰۹۵	۰/۰۰۶
LNcot $\theta$	-۱/۴۷۰	۱/۴۲۹	-۲/۳۴۵	۱-۰/۲۹	۰/۰۱۳

a. متغیرهای مستقل: (عدد ثابت)، LNcot $\theta$ ، LN  $\xi$ ، LNHiLi، LNdLi  
b. متغیر وابسته: LNFm

در جدول ۴، با توجه به مقدار احتمال کوچک تر از ۰/۰۵  $(P < 0.05)$ ، تأثیر تغییرات متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته بیشینه نیروی موج معنی دار می باشد. به منظور صحت سنجی<sup>۹</sup> روابط پیش بینی شده، معادلات رگرسیونی به دست آمده به یک سوم باقیمانده داده های آزمایشگاهی برازش داده شده و آزمون نمونه های جفتی<sup>۱۰</sup> بر روی مقادیر بیشینه نیروی موج

جدول ۵. جدول آزمون نمونه های زوجی برای صحت سنجی معادله (۵)

	تفاضل های زوجی					t	df	سطح معنی داری
	میانگین	انحراف معیار	تفاضل های با بازه اطمینان ۹۵٪					
			خطای معیار میانگین	حد بالایی / حد پایینی				
جفت معادله ۵ $(F_m)_M - (F_m)_P$	-۰/۰۰۷۶	۰/۳۰۵	۰/۰۸۷۶	-۰/۱۹۴۴	۰/۱۷۹۱	-۰/۰۸۷	۱۵	۰/۹۳۲



## مراجع

- [1] Dang BL, Nguyen-Xuan H, Abdel Wahab M. Numerical study on wave forces and overtopping over various seawall structures using advanced SPH-based. *Engineering Structures*. 2021;226:1-9.
- [2] Koraim AS, Heikal EM, Abo Zaid AA. Hydrodynamic characteristics of porous seawall protected by submerged breakwater. *Applied Ocean Research*. 2014; 46:1-14.
- [3] El-Alfy KS, Rageh OS, Nassar KA. Wave hydrodynamic characteristics of vertical and sloped seawalls. *Mansoura Engineering Journal*. 2015;40(1):1-18.
- [۴] ابروانی نیکتا، منتظری‌نمین مسعود. مدل‌سازی عددی اندرکنش موج با دیوار متخلخل ساحلی در فضای دوبعدی قائم. نشریه مهندسی دریا. ۱۳۹۲؛ ۹(۱۷): ۱۵-۲۶.
- [۵] وفایی‌پور سرخابی رامین، امین‌فر محمدحسین، لطف‌اللهی یقین محمدعلی. بررسی عددی شیب بهینه دیوارهای ساحلی در مواجهه با امواج تصادفی دریایی با استفاده از نرم‌افزار SACS. نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست. ۱۳۹۰؛ ۴۰(۳): ۳۷-۴۸.
- [6] Neelamani S, Schüttrumpf H, Muttray, M, Oumeraci H. Prediction of wave pressures on smooth impermeable seawalls. *Ocean Engineering*. 1999;26(8):739-765.
- [7] Chiu YF, Lin JG, Chang SC, Lin YJ, Chen, CH. An experimental study of wave forces on vertical breakwater. *Journal of Marine science and technology*. 2007;15(3):158-170.
- [8] Ji CH, Oh SH, Oh YM, Jang SC, Lee DS. Experimental investigation of horizontal wave forces on the perforated caisson with single and double wave chambers. *Proceedings of the 34<sup>th</sup> international conference on coastal engineering*. Seoul, South Korea. 2014;321-329.
- [9] Alkhalidi M, Neelamani S, Assad A. Wave pressures and forces on slotted vertical wave barriers. *Ocean Engineering*. 2015;108:578-583.
- [10] Neelamani S, Al-Anjari N. Experimental investigations on wave induced dynamic pressures over slotted vertical barriers in random wave fields. *Ocean Engineering*. 2021; 220:1-15.
- [11] Mokhtar ZA, Mohammed TA, Yusuf B, Lau TL. Experimental investigation of tsunami bore impact pressure on a perforated seawall. *Applied Ocean Research*. 2019;84:291-301.
- [12] Ning D, Wang R, Chen L, Li J, Zang J, Cheng L, Liu S. Extreme wave run-up and pressure on a vertical seawall. *Applied Ocean Research*. 2017;67:188-200.
- [۱۳] راه‌بانی مریم، اسماعیلی مهدی، گرمی‌خانیکی علی. عملکرد دیوارهای ساحلی صندوقه‌ای در برابر نیروی امواج. نشریه اقیانوس‌شناسی. ۱۳۹۶؛ ۸(۳۱): ۱۱-۱۸.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بیشینه نیروی ناشی از امواج منظم در برخورد با دیوارهای دریایی پلکانی با مدل‌سازی فیزیکی در فلوم موج بررسی شد. تأثیر ارتفاع موج، دوره تناوب موج، شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست بر مقادیر  $F_m$  ارزیابی شد. در نهایت بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده و تحلیل رگرسیونی بر روی پارامترهای مؤثر، روابط پیشنهادی برای برآورد بیشینه نیروی موج معرفی شد. نتایج مهم به‌دست‌آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱. به ازای تمامی مقادیر ارتفاع‌ها و دوره‌های تناوب موج، بیشینه نیروی موج وارد بر دیوار متخلخل قائم، در بازه  $3/8$  تا  $12/6$  نیوتن متغیر است. در شرایط هیدرودینامیکی یکسان، مقادیر  $F_m$  نیز برای دیوارهای دریایی پلکانی در محدوده  $4/1$  تا  $16/7$  نیوتن قرار دارد؛
۲. مقادیر بیشینه نیروی موج وارد بر دیوارهای دریایی پلکانی در مقایسه با دیوار متخلخل قائم، افزایش متوسط  $18$  درصدی را نشان داد. این نتایج عملکرد بهتر دیوارهای پلکانی را در جذب و استهلاک انرژی امواج نشان می‌دهد؛
۳. بیشینه نیروی موج وارد بر دیوارهای دریایی پلکانی با تیزی موج رابطه مستقیم و با عمق‌نسی آب، زاویه شیب دیوار و پارامتر تشابه شکست رابطه وارونه دارد؛
۴. مقادیر بیشینه نیروی موج به‌دست‌آمده از معادلات پیش‌بینی شده توافق قابل‌قبولی را با نتایج آزمایشگاهی نشان داد؛
۵. نتایج بررسی انجام‌شده بر روی دیوار دریایی پلکانی نشان می‌دهد کاربرد این نوع از سازه‌ها در بحث حفاظت ساحلی به‌عنوان سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی موج و کاهش اثرات مخرب امواج بسیار مفید خواهد بود.

## سپاسگزاری

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

- [14] Ozgur VS, Kabdasli MS. Reduction of non-breaking wave loads on caisson type breakwaters using a modified perforated configuration, *Ocean Engineering*. 2009;36(17): 1316–1331.
- [15] Munireddy MG, Neelamani S. Wave pressure reduction on vertical seawalls/caissons due to an offshore breakwater. *Indian Journal of Marine Sciences*. 2004;33(4):329-337.
- [16] Chowdhury S, MG, Anand KV, Sannasiraj SA, Sundar V. Nonlinear wave interaction with curved front seawalls. *Ocean Engineering*. 2017;140:84-96.
- [17] Md Noar NAZ, Elliott-Sands M, Greenhow M. Wave impacts on structures with rectangular geometries: Part 1. Seawalls. *Applied Ocean Research*. 2015;53:132-141.
- [18] Md Noar NAZ, Greenhow M. Wave impacts on structures with rectangular geometries: Part 2 decks, baffles and seawalls with impermeable or porous surfaces. *Applied Ocean Research*. 2019;90:1-18.
- [19] Dhinakaran G, Sundar V, Sundaravadivelu R, Graw KU. Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves. *Ocean Engineering*. 2002;29:1981-2004.
- [20] Hughes SA. Physical models and laboratory techniques in Coastal Engineering. Singapore: Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Publishing; 1993. p.568.

## پی نوشت‌ها

1. Dam-break method
2. Surf similarity parameter
3. Danish Hydraulic Institute(DHI)
4. Froude criterion
5. Iribarren number
6. Compensation
7. Strain Gauge
8. Surging breaker waves
9. Verification
10. Paired samples te