

مطالعه انعکاس امواج از موج شکن توده سنگی سنتی و سکویی غیر شکل پذیر

عباس یگانه بختیاری^{۱*}، میلاد ذبیحی^۲، محمدحسین کاظمی نژاد^۳، میثم بالی^۴

۱- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: yeganeh@iust.ac.ir
۲- کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: zabihi@civileng.iust.ac.ir

۳- استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: mkazeminezhad@inio.ac.ir

۴- دانشجوی دکترا، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: meysam.bali@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۸

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۱۸

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس شناسی ۱۳۹۳، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس شناسی است.

چکیده

هنگامی که امواج منعکس شده از سازه، به سمت دریا باز می گردند، تداخل این امواج با امواج تابشی به سمت سازه باعث ایجاد امواج نیمه ایستاده و تلاطم نسبتاً زیادی در جلوی بدنه موج شکن می گردد و می تواند محیطی ناامن در اطراف بدنه سازه موج شکن و یا در مجاورت دهانه ورودی بندرگاه ایجاد نماید و ورود شناورها به داخل حوضچه بندر را با مشکلاتی مواجه سازد. بنابراین، پارامتر انعکاس موج در طراحی هیدرولیکی موج شکن ها از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این مقاله در ابتدا صحت رابطه ارائه شده برای موج شکن های توده سنگی سنتی با استفاده از مجموعه داده های با مقیاس بزرگ مورد ارزیابی قرار می گیرد. سپس با شناخت پارامترهای موثر بر پدیده انعکاس از یک موج شکن سکویی غیر شکل پذیر، تاثیر وجود سکوی موج شکن مورد ارزیابی قرار می گیرد و در ادامه با بکارگیری مدل درختی 'M5' بر روی مجموعه داده های آزمایشگاهی در دسترس به ارائه یک مدل جدید که علاوه بر دقت بالا به لحاظ فیزیکی نیز توجیه پذیر باشد، پرداخته می شود.

کلمات کلیدی: بتن ضریب انعکاس، مدل درختی 'M5'، موج شکن، پارامتر تشابه شکست.

۱. مقدمه

هیدرولیکی موج شکن ها دارای اهمیت فراوانی است (آیین نامه طراحی بنادر و سازه های دریایی ایران، ۱۳۸۴). برای مقاصد طراحی از تعریف ضریب انعکاس موج که برابر با نسبت ارتفاع موج منعکس شده از موج شکن به ارتفاع موج برخورد کننده به آن است استفاده می شود. هنگامی که امواج منعکس شده از سازه با امواج تابشی به سمت سازه تداخل نمایند، باعث ایجاد امواج

موج شکن های توده سنگی یکی از متداول ترین سازه های دریایی هستند که به منظور احداث بندر، ایجاد محیط آبی آرام درون بندرگاه و حفاظت از سواحل در برابر امواج و جریان های دریایی احداث می شوند. پیش بینی پدیده انعکاس موج در طراحی

and van der Meer, 2006) معادله ۳ را برای ضریب انعکاس پیشنهاد داده‌اند:

$$C_r = \tanh(a\xi_0^b) \quad (۳)$$

در معادله بالا نیز ξ_0 پارامتر تشابه شکست در شرایط آب عمیق است و ضرایب تجربی a, b با توجه به نوع سنگ و ضریب زبری مصالح به‌کار رفته در موج‌شکن تعیین می‌شود. تنها رابطه‌ای که مستقل از پارامترهای سازه‌ای است و فقط به شرایط موج بستگی دارد رابطه ارائه شده توسط (Muttray et al., 2006) به‌صورت زیر است:

$$C_r = 1/(1.3 + 3d.2\pi/L) \quad (۴)$$

در معادله ۴، d عمق آب، L طول موج و نسبت d/L عمق نسبی است.

موج‌شکن‌های سکویی از انواع موج‌شکن‌های توده‌سنگی می‌باشد که ساخت آنها در سال‌های اخیر روند رو به رشدی داشته و در وجه جلویی این موج‌شکن‌ها، سکویی در نزدیکی سطح ایستایی قرار دارد. شاید مهمترین مزیت موج‌شکن‌های سکویی آن است که می‌توان از مصالح سبک‌تر، با دانه‌بندی گسترده‌تر نسبت به موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی مرسوم استفاده نمود که می‌تواند به خوبی سبب کاهش هزینه‌های اجرای آن نسبت به موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی شود (Andersen, 2006). از طرف دیگر طراحی سازه موج‌شکن سنگریزه‌ای براساس میزان استخراج واقعی مصالح به‌دست آمده از معدن صورت می‌گیرد. هرگاه معدن سنگ در نزدیکی محل احداث موج‌شکن در دسترس نباشد و یا امکان فراهم کردن مقدار کافی سنگ‌های بزرگ برای لایه آرمور موج‌شکن توده‌سنگی سنتی وجود نداشته باشد، آنگاه احداث موج‌شکن‌های سکویی می‌تواند یک گزینه محتملاً کاملاً اقتصادی و مطلوب باشد (چگینی، ۱۳۷۷).

موج‌شکن‌های سکویی را بیشتر به‌صورت شکل‌پذیر طراحی می‌کنند، ولی در سال‌های اخیر به‌دلیل جلوگیری از شکست مصالح سنگی در اثر حرکات رو به بالا و پایین درحین برخورد موج با لایه‌های سنگی موج‌شکن، گرایش به ساخت موج‌شکن‌های سکویی غیر شکل‌پذیر زیاد شده و به ویژه در مناطقی که برخورد امواج مورب سنگین و امکان تغییر مکان کرانه‌ای سنگ‌های لایه آرمور موج‌شکن وجود دارد، استفاده از

نیمه ایستاده و تلاطم نسبتاً زیادی در جلوی بدنه موج‌شکن می‌گردد که می‌تواند محیطی ناامن در اطراف بدنه سازه موج‌شکن و یا در مجاورت دهانه ورودی بندرگاه ایجاد نماید و ورود شناورها به داخل حوضچه بندر را با مشکلاتی مواجه سازد. علاوه بر این، انعکاس موج و جریان‌های متلاطم ناشی از آن بر جابجایی رسوبات در پای سازه اثر می‌گذارند و می‌توانند موجب ایجاد پدیده آبشستگی در پای سازه و تخریب آن شوند (Zanuttigh and van der Meer, 2006).

تعیین ضریب انعکاس از موج‌شکن‌های توده‌سنگی موضوع تحقیقات نسبتاً زیادی بوده است و بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، روابط تجربی برای ضریب انعکاس پیشنهاد شده است (CEM, 2006). یکی از اولین روابط ارائه شده که مبتنی بر نحوه شکست موج است توسط (Seelig and Ahrens, 1981) مطرح شده است:

$$C_r = a\xi^2/(b + \xi^2) \quad (۱)$$

در معادله ۱، ξ پارامتر تشابه شکست و a, b ضرایب تناسب در معادله است. پارامتر تشابه شکست در واقع نسبت شیب سازه به جذر تیزی موج است و نسبت ارتفاع موج به طول موج یا H/L را تیزی موج می‌گویند. ضرایب a, b با توجه به نوع سازه تعیین می‌شود و برای مثال برای شیب‌های سنگی نفوذپذیر $a = 0.6, b = 6.6$ در نظر گرفته می‌شود. یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روابط موجود که در آیین‌نامه‌های مختلف جهت پیش‌بینی ضریب انعکاس موج از موج‌شکن‌های توده‌سنگی پیشنهاد شده، معادله ۲ است که توسط (Postma, 1989) ارائه شده است. وی با انجام مطالعه‌ای گسترده به این نتیجه رسید که پارامتر تشابه شکست به تنهایی بیانگر پدیده انعکاس موج نیست و استفاده از این پارامتر موجب کاهش دقت در پیش‌بینی‌ها می‌شود، هرچند امکان اعمال شیب‌های مختلف سازه را ایجاد می‌کند. بنابراین، با استفاده از پارامترهای نفوذپذیری، تیزی موج و شیب موج‌شکن، ضریب انعکاس به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$C_r = 0.071P^{-0.082} \text{Cotg } \alpha^{-0.62} S_{op}^{-0.46} \quad (۲)$$

در رابطه بالا، p ضریب نفوذپذیری موج‌شکن که به روش (van der Meer, 1993) تعیین می‌شود، α زاویه شیب موج‌شکن و S_{op} تیزی موج در شرایط آب عمیق است. سپس (Zanuttigh and

یک پدیده مهندسی پرداخته شود. مدل‌سازی بر مبنای مدل درختی بندرت در حوزه مسایل مهندسی سواحل و مهندسی آب به‌کار رفته است (Etemad-shahidi and Ghaemi, 2011). و در این تحقیق از این روش برای اولین بار برای پیش‌بینی انعکاس موج از یک سازه موج‌شکن توده‌سنگی استفاده می‌شود. یکی از مزایای مدل‌سازی بر مبنای مدل درختی نسبت به روش الگوریتم‌های قبلی همانند شبکه‌های عصبی به‌کارگیری قوانین قابل فهم و ساده‌تر در حل مسایل پیچیده مهندسی است. بنابراین، هدف این مقاله مدل‌سازی انعکاس موج از یک سازه موج‌شکن توده‌سنگی به کمک الگوریتم M5' مدل درختی به‌منظور ارزیابی نحوه عملکرد و صحت رابطه ارائه شده در مطالعه قبلی (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۱) بر روی داده‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس جدید و نیز ارائه مدلی جهت پیش‌بینی انعکاس موج از موج‌شکن‌های سکویی غیرشکل‌پذیر با در نظر گرفتن اثر سکوی موج‌شکن است.

۲. مدل‌سازی ضریب انعکاس موج

ارائه قوانین کاربردی برای بعضی از پدیده‌های پیچیده مهندسی ساحل به راحتی امکان‌پذیر نیست و استفاده از روش‌های جدید مدل‌سازی مبتنی بر داده‌کاوی، که از آنها به روش‌های مدل‌سازی نرم یاد می‌گردد، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار توانا در بررسی این پدیده به‌کار برده شود. برای انجام مدل‌سازی به کمک داده‌کاوی به داده‌های جامعی که در آنها پارامترهای مختلف مورد آزمایش و یا ارزیابی قرار گرفته‌اند، نیاز است. در این بخش مراحل کلی مدل‌سازی ضریب انعکاس موج از یک موج‌شکن توده‌سنگی با کمک مدل درختی و بر مبنای به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی موجود تبیین می‌گردد. در ادامه در بخش (۱-۲)، داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده و شاخص‌های آماری که جهت مقایسه روابط موجود با روابط جدید به‌کار می‌روند معرفی می‌شوند. سپس در بخش (۲-۲) راجع به الگوریتم M5' مدل درختی شرح مختصری ارائه می‌گردد. برای انجام مدل‌سازی نیز، در ابتدا یک سری پارامترهای بدون بعد موثر ساخته می‌شوند که در ساخت آنها به برهمکنش موج و بستر و برهمکنش موج و سازه توجه می‌شود، سپس برای لحاظ اثر سکوی موج‌شکن، شیب‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و شیب مناسب جهت ساخت مدل انتخاب می‌شود. در

موج‌شکن‌های غیر شکل‌پذیر منطقی‌تر به نظر می‌رسد (Andersen, 2006). البته از ایراداتی که به موج‌شکن‌های سکویی غیر شکل‌پذیر وارد شده می‌توان به بالا بودن میزان انعکاس امواج در آنها به علت وجود شیب تندتر در جلوی سازه، اشاره کرد. اندرسن در سال ۲۰۰۶ با مطالعه آزمایشگاهی موج‌شکن‌های سکویی به این نتیجه رسید که شیب موج‌شکن و به تبع آن پارامتر تشابه شکست در طول شیب سازه تغییر می‌کنند و نمی‌توان شکست موج روی سازه و اختلاف فاز بین انعکاس ایجاد شده از بخش‌های مختلف سازه را به یک مقدار ξ نسبت داد (Andersen, 2006). در واقع در این مطالعات از اثر شیب بالای سطح متوسط تراز آب صرف‌نظر شده و میزان انعکاس موج تابعی از پارامتر شکست در پای سازه است که بر اساس پرپود چکادی موج برخوردی (Tp) و زاویه شیب میانگین محاسبه می‌شود. این زاویه شیب میانگین بین 1.5Hmo زیرسطح متوسط تا تراز سطح آب محاسبه می‌شود (Andersen, 2006). سپس زانتی و وندرمریر در سال ۲۰۰۸ برای لحاظ کردن اثر سکوی در حالتی که سکوی در محل تراز ایستابی و یا بالای آن قرار گرفته، پارامتر تشابه شکست را بر مبنای شیب موج‌شکن در محدوده بالاروی و پایین‌روی موج پیشنهاد کردند (Zanutigh and van der Meer, 2008).

با مرور مطالعات قبلی مشاهده می‌شود که در اکثر تحقیقات انجام شده، پارامتر تشابه شکست به‌عنوان تنها پارامتر حاکم بر پدیده انعکاس موج شناخته شده است. در حالی که مطالعه اخیر نشان می‌دهد که استفاده از پارامتر عمق نسبی در شرایط آب کم عمق و یا انتقالی باعث بهبود دقت پیش‌بینی می‌شود (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۱). از سوی دیگر در زمینه انعکاس موج از موج‌شکن‌های سکویی مطالعه محدودی انجام شده است، به‌طوری که در نظر گرفتن اثر سکوی موج‌شکن نیاز به مطالعه دقیق‌تری دارد. آنالیز آماری انجام شده بر روی انعکاس موج از موج‌شکن‌های سکویی نیز نشان می‌دهد که تنها رابطه موجود برای پیش‌بینی انعکاس موج از موج‌شکن سکویی غیر شکل‌پذیر دارای خطای نسبتاً زیادی است.

مدل‌سازی عددی و یا مطالعات تحلیلی برای حل بعضی از مسایل پیچیده مهندسی همچون انعکاس موج از سازه موج‌شکن نیازمند صرف وقت و هزینه فراوان است، حال آنکه با استفاده از روش‌های مدل‌سازی جدید مبتنی بر مطالعات نرم مثل شبکه عصبی (کرمانی و بای، ۱۳۹۲) و مدل درختی می‌توان به شکل ساده‌تر و دقیق‌تری به کشف بهتر روابط علت و معلولی در مطالعه

برابر با $d = 0.38$ در نظر گرفته شد. داده‌های آزمایشگاهی اندرسن بر روی موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی بیش از ۱۵۰ داده است که در آنها پارامترهای مختلفی مثل عمق آب، ارتفاع موج و پریود پیک تغییر کرده‌اند. در این سری از داده‌ها برای ساخت مقاطع موج‌شکن از دو اندازه متفاوت برای هسته موج‌شکن استفاده شده است.

همان طوری که ذکر شد، داده‌های مورد استفاده برای بررسی اثر سکو نیز شامل آزمایش‌های انجام شده توسط اندرسن بر روی مقاطع سکویی می‌باشد. آزمایشات اندرسن در یک فلوم به طول ۲۱/۵ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱/۵ متر در دانشگاه آلبورگ انجام شد. بستر فلوم دارای شیب 1V:20H (۱ قائم به ۲۰ افقی) می‌باشد. در داده‌های موجود برای ساخت مقاطع موج‌شکن سکویی از ۴ اندازه سنگ متفاوت استفاده شده است. سنگ آرمور نوع ۱ که سنگین‌ترین مصالح به کار رفته است جهت ساخت موج‌شکن سکویی غیر شکل‌پذیر مورد استفاده قرار گرفته است، چرا که وزن بالای آن مانع تغییر شکل زیاد موج‌شکن می‌شود. از طرفی در تعدادی از آزمایش‌ها از تغییر شکل موج‌شکن به‌وسیله یک سیم توری فولادی جلوگیری به عمل آمده است.

برای ارزیابی و سنجش دقت مدل‌سازی انجام شده و مقایسه آن با مدل‌های موجود از شاخص‌های آماری شامل ضریب همبستگی^۱ (R)، جذر متوسط مربع خطاها^۲ (RMSE)، شاخص پراکندگی^۳ (SI) و شاخص اریبی (BIAS) استفاده می‌شود:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (6)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}}{\bar{x}} \quad (7)$$

پایان از الگوریتم M5' مدل درختی برای ارائه رابطه‌ای جهت پیش‌بینی ضریب انعکاس موج استفاده می‌شود.

۱-۲. معرفی داده‌های آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی که در مدل‌سازی انعکاس موج از موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از: (الف) داده‌های آزمایشگاهی دپارتمان هیدرولیک دانشگاه دلفت هلند (Postma, 1989)، (ب) داده‌های اندازه‌گیری شده در موسسه تحقیقات هیدرولیک والینگ‌فورد (Allsop and Channel, 1989) و (ج) داده‌های آزمایشگاهی اندرسن (Andersen, 2006). برای مدل‌سازی انعکاس موج از موج‌شکن‌های سکویی نیز از داده‌های آزمایشگاهی اندرسن که بر روی مقاطع سکویی انجام شده استفاده می‌شود (Andersen, 2006). مطالعه آزمایشگاهی دانشگاه دلفت هلند در وهله اول جهت بررسی پایداری لایه آرمور انجام شد. بیش از ۲۵۰ آزمایش بر روی موج‌شکن‌های توده‌سنگی با مقطع دوزنقه‌ای و با شیب مستقیم انجام و در کلیه آزمایشات دبی روگذری موج صفر بوده است. در برخی از آزمایشات با ایجاد یک بستری شیب‌دار با شیب ملایم 1V:30H، عمق آب در پای سازه تغییر داده شده تا اثر پارامتر عمق آب نیز در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که ضریب نفوذپذیری سازه P به کمک تعریفی که ون در میر از نفوذپذیری ارائه کرده تعیین شده است (van der Meer, 1993).

همچنین شیب وجه جلویی موج‌شکن‌هایی که مورد آزمایش واقع شده بودند در محدوده $1.5 \leq \cot \alpha \leq 6$ قرار داشت. بدین ترتیب اثر شیب را می‌توان به‌خوبی لحاظ کرد. مطالعه آزمایشگاهی موسسه تحقیقات هیدرولیک والینگ‌فورد، در وهله اول جهت بررسی مسایل و مشکلاتی که آشفتگی امواج در بنادر کوچک موجود در دریای کارائیب به وجود می‌آورد، طرح‌ریزی شد. یکی از این مشکلات مساله انعکاس امواج بود. امواجی که در این آزمایش‌ها به کار رفت، امواج نامنظم بوده است. به‌طور کلی نوزده مقطع در این آزمایش‌ها ساخته شد تا اثرات پارامترهای مختلف، مثل شیب وجه جلویی موج‌شکن، اندازه سنگ آرمور و زبری سطح شیب‌دار مورد بررسی قرار گیرد. همچنین ۹ حالت مختلف امواج برای مطالعه تاثیر پارامترهایی مثل ارتفاع موج، پریود حداکثر، طول موج و تیزی موج طراحی شد. البته عمق آب در پای سازه در تمامی این آزمایش‌ها ثابت و

¹ Correlation Coefficient

² Root Mean Square Errors

³ Scatter Index

توده‌سنگی از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی در دسترس یعنی داده‌های آزمایشگاهی دپارتمان هیدرولیک دانشگاه دلفت هلند و داده‌های اندازه‌گیری شده در موسسه تحقیقات هیدرولیک والینگ‌فورد استفاده شد. بدین ترتیب معادله ۹ جهت تخمین ضریب انعکاس موج به‌دست آمد (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$C_r = 0.072 P^{-0.115} \xi_{op}^{0.657} (d / L_{toe})^{-0.253} \quad (9)$$

در رابطه فوق، P ضریب نفوذپذیری و ξ_{op} پارامتر تشابه شکست در شرایط آب عمیق است که با استفاده از دوره تناوب حداکثر موج محاسبه می‌شود. d عمق آب و L_{toe} طول موج در پای سازه است. معادله ۹ به لحاظ آماری نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که خطای پیش‌بینی آن به میزان ۲۰ درصد نسبت به رابطه پستما کاهش یافته است (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۱).

در این مقاله در گام اول، رابطه به‌دست آمده در مطالعه قبلی بر روی داده‌های آزمایشگاهی با مقیاس بزرگ (Andersen, 2006) مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۱ مقایسه بین نتایج معادله استخراج شده از مدل درختی (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۱) و معادله (Postma, 1989) برای پیش‌بینی میزان انعکاس موج از یک موج شکن توده‌سنگی را ارائه می‌کند. چنان که از جدول ۱ مشاهده می‌شود هر دو معادله میزان انعکاس موج از یک موج شکن توده‌سنگی را بسیار خوب پیش‌بینی می‌کنند، هرچند که هر دو معادله ضریب انعکاس را کمی دست پایین تخمین می‌زنند. معادله استخراج شده از مدل درختی، دارای خطای پیش‌بینی به مراتب کمتر (حدود ۱۹ درصد برای داده‌های اندرسن و حدود ۱۰ درصد برای کلیه داده‌ها) نسبت به رابطه پستما است. بنابراین، معادله ارائه شده توسط (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۱) ضریب انعکاس موج را بهتر پیش‌بینی می‌کند.

در گام دوم اقدام به ساخت مدل جدیدی برای پیش‌بینی میزان انعکاس موج از یک موج شکن توده‌سنگی با کمک مدل درختی و بر مبنای به‌کارگیری کلیه داده‌های آزمایشگاهی موجود گردید. معادله حاصل، مدل جدیدی به شکل زیر است:

$$C_r = 0.072 P^{-0.113} \xi_{op}^{0.667} (d / L_{toe})^{-0.226} \quad (10)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (8)$$

۲-۲. مدل درختی

یکی از پرکاربردترین روش‌های داده‌کاوی، درخت‌های تصمیم‌گیری هستند. در درخت‌های تصمیم بر خلاف شبکه‌های عصبی مصنوعی که داده‌های ورودی آن‌ها باید به‌صورت عددی در نظر گرفته شوند، هیچ محدودیتی برای نوع داده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. از سوی دیگر، بر خلاف شبکه‌های عصبی که نحوه عملکردشان را به کاربر نشان نمی‌دهند، درخت‌های تصمیم‌گیری پیش‌بینی خود را به شکل یک‌سری روابط و قوانین قابل فهم ارائه می‌کنند. درخت تصمیم‌گیری به‌صورت یک درخت واژگون است، بدین ترتیب که یک ریشه در قسمت بالای آن وجود دارد و برگ‌های آن در قسمت پایین قرار می‌گیرند. زمانی که درخت تصمیم‌گیری در گره برگ قوانین خطی شامل متغیرهای مختلف را ارائه دهد، به ساختار درخت ایجاد شده، مدل درختی گویند. الگوریتم M5 متداول‌ترین الگوریتم برای اعمال مدل درختی روی داده‌ها است که در سال ۱۹۹۲ معرفی شد (Quinlan, 1992). این الگوریتم بعدها اصلاح شد و با نام الگوریتم M5' معرفی شد (Wang and Witten, 1997). برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مراجع اشاره شده و یا به مطالعه قبلی انجام شده مراجعه کرد (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۱).

۳. نتایج و بحث بر روی آن

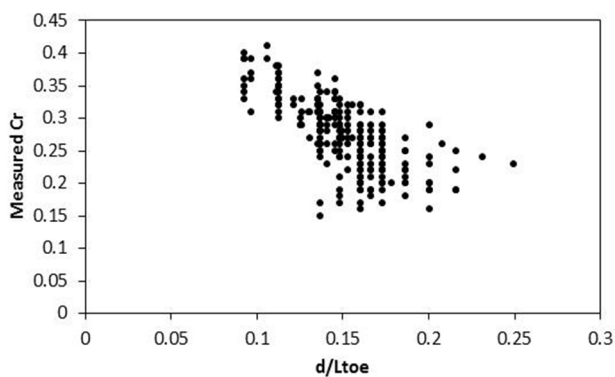
۳-۱. مدل ارائه شده برای موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی

پارامترهای موثر بر پدیده انعکاس موج از یک موج‌شکن را می‌توان به دو دسته پارامترهای محیطی مثل ارتفاع موج شاخص H_s ، زمان تناوب حداکثر موج T_p ، طول موج L ، عمق آب d و پارامترهای سازه‌ای مثل نفوذپذیری P ، شیب موج‌شکن $\tan \alpha$ و تعداد لایه‌های آرمور تقسیم کرد. از آنجا که مقادیر پارامترهای با بعد مربوط به مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس بسیار کوچک‌تری نسبت به نمونه‌های واقعی هستند، برای انجام مدل‌سازی باید از پارامترهای بدون بعد استفاده کرد. در مطالعه قبلی برای پیش‌بینی ضریب انعکاس موج از موج‌شکن‌های

روی سازه و استهلاك انرژی موج برخوردی به موج‌شکن است نشان داده می‌شود. بنابراین به‌کارگیری معادله جدید علاوه بر دقت نسبی بیشتر نسبت به رابطه پستما در پیش‌بینی انعکاس موج از موج‌شکن، امکان تبیین بهتر مکانیزم‌های هیدرودینامیکی که در رخداد پدیده میزان انعکاس موج از یک موج‌شکن توده‌سنگی رخ می‌دهد را نیز بهتر فراهم می‌سازد.

۳-۲. مدل‌سازی انعکاس موج از موج‌شکن‌های سکویی غیر شکل‌پذیر

چنان‌که اشاره شد مکانیزم‌های هیدرودینامیکی که در رخداد پدیده انعکاس موج رخ می‌دهد را می‌توان در دو مرحله انتشار موج که به‌طور عمده حاکی از اهمیت برهمکنش موج و بستر بوده (پارامتر عمق نسبی در آن تاثیرگذار است) و مرحله بعد از برخورد موج به سازه که برهمکنش موج و سازه است (در واقع بیانگر نحوه شکست موج روی موج‌شکن است)، تبیین نمود. در ادامه برای مدل‌سازی انعکاس موج از موج‌شکن‌های سکویی غیر شکل‌پذیر از مکانیزم‌های هیدرودینامیکی مشابه بهره گرفته می‌شود. شکل ۱ تغییرات عمق نسبی در مقابل ضریب انعکاس موج را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تغییرات عمق نسبی در مقابل ضریب انعکاس موج

شکل کلی معادله جدید ارائه شده برای پیش‌بینی ضریب انعکاس موج از یک موج‌شکن توده‌سنگی شباهت زیادی با معادله ۹ دارد و پارامترهای اصلی آن عبارتند از ضریب نفوذپذیری، پارامتر تشابه شکست در شرایط آب عمیق و عمق نسبی آب در پای سازه موج‌شکن است. جدول ۲ مقایسه بین نتایج شاخص‌های آماری معادله فوق و معادله (Postma, 1989) برای پیش‌بینی میزان انعکاس موج از یک موج‌شکن توده‌سنگی را ارائه می‌کند. چنان‌که از مقایسه شاخص‌های آماری در جدول ۲ مشاهده می‌شود هر دو معادله میزان انعکاس موج از یک موج‌شکن توده‌سنگی را بسیار خوب پیش‌بینی می‌کنند ولی معادله جدید ارائه شده ضریب انعکاس موج را بهتر پیش‌بینی می‌کند. با توجه به اینکه معادله ۱۰ بر روی داده‌های با مقیاس بزرگ‌تر نیز نتایج خوبی نشان می‌دهد، بنابراین می‌توان معادله ۱۰ را به‌عنوان یک رابطه کلی در تخمین انعکاس موج پیشنهاد داد.

به‌علاوه با استفاده از معادله جدید ارائه شده برای ضریب انعکاس موج می‌توان مکانیزم‌های هیدرودینامیکی که در رخداد پدیده انعکاس موج رخ می‌دهد را در دو مرحله به شرح زیر توضیح داد. مرحله اول انتشار موج بر روی بستر تا قبل از رسیدن امواج به سازه موج‌شکن است که عمدتاً حاکی از اهمیت اندرکنش موج و بستر بوده و پارامتر عمق نسبی در آن تاثیرگذار است. به عبارت دیگر، شکل حرکت‌های مداری موج و اینکه موج قبل سازه می‌شکند یا خیر با پارامتر عمق نسبی نشان داده می‌شود. در واقع تیزی موج که در رابطه پستما بکار گرفته شده اصولاً بیانگر شرایط شکست موج در آب عمیق و در شرایط دور از ساحل است، در حالی که داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده نشان می‌دهند که موج در ناحیه انتقالی قرار دارد. مرحله دوم انعکاس موج، اهمیت برهمکنش موج و سازه را نشان می‌دهد و به‌وسیله پارامترهای تشابه شکست و نفوذپذیری که به‌ترتیب بیانگر نحوه شکست موج

جدول ۱: مقایسه آماری روابط (۲) و (۹)

نویسنده	رابطه	مجموعه داده‌ها	R	RMSE	SI	Bias
پستما	$C_r = 0.071 P^{-0.082} (Cotg^{-0.62} \alpha) S_{op}^{-0.46}$	اندرسن	-۰/۸۷	-۰/۰۳۶	۱۴/۳	-۰/۰۱۹۷
رابطه مدل درختی	$C_r = 0.072 P^{-0.115} \zeta_{op}^{0.657} (d / L_{toe})^{-0.253}$	اندرسن	-۰/۸۸	-۰/۰۲۹	۱۱/۷۸	-۰/۰۰۹۷
پستما	$C_r = 0.071 P^{-0.082} (Cotg^{-0.62} \alpha) S_{op}^{-0.46}$	والینگفورد، دلفت، اندرسن	-۰/۹۴	-۰/۰۴۵	۱۴/۱۰	-۰/۰۰۵
رابطه مدل درختی	$C_r = 0.072 P^{-0.115} \zeta_{op}^{0.657} (d / L_{toe})^{-0.253}$	والینگفورد، دلفت، اندرسن	-۰/۹۶	-۰/۰۴۰	۱۲/۸۱	-۰/۰۱۰

جدول ۲: مقایسه آماری روابط (۲) و (۱۰)

نویسنده	رابطه	مجموعه داده‌ها	R	RMSE	SI	Bias
پستما	$C_r = 0.071 P^{-0.082} (Cotg^{-0.62} \alpha) S_{op}^{-0.46}$	والینگفورد، دلفت، اندرسن	-۰/۹۴	-۰/۰۴۵	۱۴/۱۰	-۰/۰۰۵
معادله (۱۰) مدل درختی	$C_r = 0.072 P^{-0.113} \zeta_{op}^{0.667} (d / L_{toe})^{-0.226}$	والینگفورد، دلفت، اندرسن	-۰/۹۶	-۰/۰۳۷	۱۱/۷۷	-۰/۰۰۱

(CEM, 2006). در این مقاله برای محاسبه زاویه شیب توصیه شده در CEM به صورت زیر عمل شده است (شکل ۲):
اگر سکوی موج‌شکن در بالای تراز سطح آب باشد، شیب قسمت پایینی سکو ($\tan \alpha_d$) به عنوان شیب سازه در نظر گرفته می‌شود. ولی اگر سکوی موج‌شکن زیر تراز سطح آب قرار داشته باشد و در صورتی که شیب سطح بالایی و پایینی سکو مساوی و برابر با $\tan \alpha_d$ باشد، تانژانت زاویه شیب معادل از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\tan \alpha_{eq} = \frac{2H_s \tan \alpha_d}{2H_s + B \tan \alpha_d} \quad (14)$$

بدین ترتیب پارامتر تشابه شکست را می‌توان به شکل زیر نوشت.

$$\xi_{CEM} = \tan \alpha_{eq} / \sqrt{H_s/L_0} \quad (15)$$

در روابط بالا، B عرض سکوی موج‌شکن و H_s ارتفاع مشخصه موج است.

برای ارزیابی اثر سکو بر انعکاس موج از موج‌شکن سکویی غیر شکل‌پذیر، از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی در دسترس که تعداد کل آزمایش‌های انجام شده در آن ۶۹۵ عدد است، استفاده می‌شود (Andersen, 2006). در این تحقیق، برای بررسی رفتار موج‌شکن‌های سکویی غیر شکل‌پذیر داده‌ها به دو دسته شکل‌پذیر و غیر شکل‌پذیر تقسیم شدند. معیار جداسازی به صورتی است که اگر نسبت عرض فرسایش به عرض سکو کمتر از ۰/۰۵ باشد، موج‌شکن غیر شکل‌پذیر در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، تعداد داده‌هایی که در آن‌ها موج‌شکن تغییر شکل نداده و یا تغییر شکل آن بسیار ناچیز است، ۲۴۱ داده است. با توجه به اینکه در این آزمایش‌ها شیب وجه رو به دریای موج‌شکن ثابت بوده است، بنابراین، استفاده از پارامتر تشابه شکست $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H_s/L_0}$ که فقط اثرات تیزی موج را نشان می‌دهد، نمی‌تواند انتخاب مناسبی باشد. از سوی دیگر پارامتر بدون بعد عرض سکو به طول موج، یعنی B/L نیز وابستگی مشهودی با ضریب انعکاس موج ندارد.

نمودار تغییرات B/L در مقابل ضریب انعکاس موج در شکل ۳ رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که تغییرات عرض سکو نمی‌تواند تاثیر چندانی بر انعکاس موج داشته باشد.

در محدوده داده‌های آزمایشگاهی موجود و با توجه به شکل ۱ موج در ناحیه انتقالی قرار دارد. چنان که از شکل فوق مشخص می‌گردد، هرچه به منطقه آب عمیق نزدیک‌تر شویم، امواج دارای طول موج بلندتر و ارتفاع کوتاه‌تری خواهند بود. از آنجا که انرژی موج وابسته به ارتفاع موج است، بنابراین امواج با انرژی کمتری به سازه می‌رسند و در نتیجه کمتر منعکس می‌شوند. در بررسی انعکاس موج از یک موج‌شکن سکویی غیر شکل‌پذیر آنچه که حائز اهمیت است، تعیین یک زاویه شیب مناسب جهت مدل کردن شیب سازه و در نتیجه نحوه شکست موج روی موج‌شکن است.

Zanuttigh و همکاران (۲۰۰۸) برای لحاظ اثر سکو در حالتی که سکو در محل تراز ایستایی و یا بالای آن قرار گرفته، با تعریف یک زاویه شیب میانگین، پارامتر تشابه شکست را به صورت زیر تعریف کردند (Zanuttigh and van der Meer, 2008). اگر عمق آب بزرگتر از ۱/۵ برابر ارتفاع موج باشد:

$$\xi_0 = \xi_{Zvd} = \frac{[\tan \alpha_d \cdot (d - 1.5H_{mo}) + 1.5H_{mo} \cdot \tan \alpha_{inc}]}{d \cdot (\sqrt{H_{mo}/L_0})} \quad (11)$$

اگر عمق آب کوچکتر یا مساوی ۱/۵ برابر ارتفاع موج باشد:

$$\xi_0 = \xi_{Zvd} = \frac{\tan \alpha_{inc}}{\sqrt{H_{mo}/L_0}} \quad (12)$$

در روابط ۱۱ و ۱۲، d عمق آب در پای موج‌شکن، α_d زاویه شیب سازه در زیر سکو، H_{mo} ارتفاع موج، L_0 طول موج در آب عمیق و α_{inc} زاویه شیب سازه در محل بالاروی و پایین‌روی موج است. محدوده بالاروی و پایین‌روی موج و زاویه شیب سازه بین ۱/۵ برابر ارتفاع موج بالای سکو و ۱/۵ برابر ارتفاع موج پایین سکو اندازه‌گیری می‌شود. بدین ترتیب رابطه زیر جهت تخمین انعکاس موج از موج‌شکن‌های سکویی ارائه شد (Zanuttigh and van der Meer, 2008).

$$C_r = \tanh(a\xi_0^b) \quad (13)$$

در رابطه بالا a, b به ضریب زبری بستگی دارد و پارامتر تشابه شکست با توجه به روابط ۱۱ و ۱۲ تعیین می‌شود. بیان دیگری از شیب سازه در صورت وجود سکو، زاویه شیبی است که در آیین نامه مهندسی سواحل ارتش آمریکا تعریف شده است

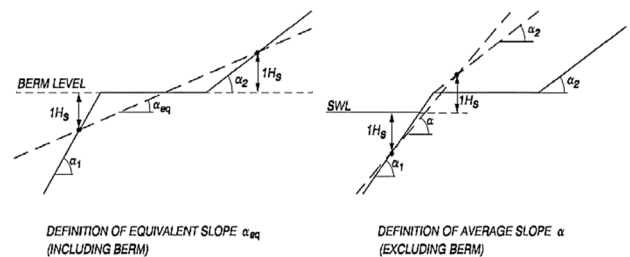
به کارگیری داده‌های آزمایشگاهی موجود معادله زیر که بهترین نتایج را ارائه می‌دهد ارائه می‌گردد:

$$C_r = 0.066 \xi_{CEM}^{0.1} \left(\frac{d}{L_{10e}} \right)^{-0.678} \quad (16)$$

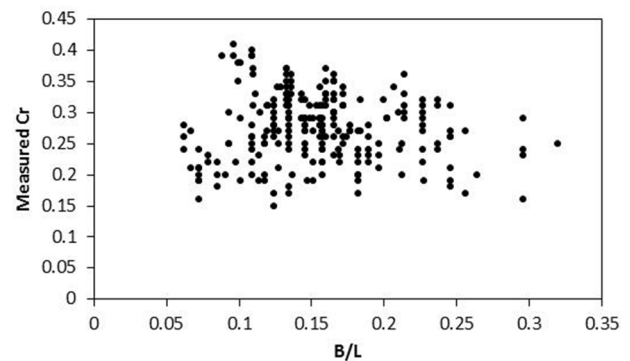
شکل کلی معادله ۱۶ با معادله ۱۰ که برای پیش‌بینی ضریب انعکاس موج از یک موج‌شکن توده‌سنگی پیشنهاد شده شباهت زیادی دارد، با این تفاوت که اثر ضریب نفوذپذیری P در آن لحاظ نشده است. علت عدم وارد کردن پارامتر نفوذپذیری آن است که اولاً مقدار این ضریب در این آزمایش‌ها مشخص نشده است و علاوه بر این مقطع موج‌شکن‌های مورد آزمایش نیز مشابه با نیم‌رخ‌هایی که (van der Meer, 1993) نفوذپذیری آن‌ها را تعیین کرده است، نیست. ثانیاً در واقع موج‌شکن‌های سکویی مورد آزمایش همگی تنها از دو لایه آرمور و هسته تشکیل شده‌اند و با موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی که عموماً از سه لایه تشکیل می‌شوند، تفاوت دارند. بنابراین می‌توان فرض کرد که نفوذپذیری همه مقاطع مورد آزمایش برابر با $p=0/6$ است. در این صورت در نظر گرفتن اثر ضریب نفوذپذیری بر پدیده انعکاس با توجه به ثابت بودن ضریب نفوذپذیری امکان‌پذیر نیست. بنابراین، انتخاب پارامتری غیر از پارامتر تعریف شده توسط (van der Meer, 1993) که معیاری برای استهلاک انرژی موج درون سازه یا نفوذپذیری موج‌شکن باشد می‌تواند در تحقیقات آتی مورد مطالعه قرار بگیرد.

دومین تفاوت معادله ۱۶ با معادله ۱۰ در زاویه شیبی است که برای اعمال اثر سکو در نظر گرفته شده است. برای بهبود دقت روابط موجود، شیب‌های تعریف شده در بخش ۳-۲ در داخل معادلات ۲ و ۳ گنجانده شده‌اند. جدول ۴ ارزیابی آماری روابط مذکور را با توجه به اصلاحات انجام شده نشان می‌دهد. در معادله (Postma, 1989) استفاده از شیب تعریف شده در CEM به لحاظ همه شاخص‌های آماری بهترین نتیجه را به دست می‌دهد. در معادله (Zanuttigh and van der Meer, 2006) استفاده از $\tan \alpha_{CEM}$ موجب بهبود شاخص ضریب همبستگی می‌شود ولی به لحاظ پراکندگی استفاده از $\tan \alpha_{inc}$ منجر به کاهش این شاخص می‌شود. همچنین با توجه به جدول ۴ استفاده از رابطه استخراج شده از مدل درختی منجر به کاهش خطای چشم‌گیری می‌شود. همچنین استفاده از رابطه پیشنهادی جدید برای تخمین ضریب انعکاس موج موجب می‌شود تا پراکندگی

جهت آموزش و ارزیابی دقت مدل، داده‌های آزمایشگاهی به دو دسته به صورت تصادفی تقسیم می‌گردد به طوری که دو سوم داده‌ها جهت آموزش مدل و یک سوم داده‌ها جهت آزمون به کار گرفته شدند. از آنجا که مدل درختی روابط خطی بین متغیر هدف و پارامترهای ورودی به دست می‌دهد، بنابراین، برای حل این مشکل و ارائه مدل به صورت جامع‌تر همه پارامترهای ورودی و خروجی به صورت لگاریتمی به نرم‌افزار معرفی می‌شوند.



شکل ۲: زاویه شیب تعریف شده در CEM برای لحاظ کردن اثر سکو



شکل ۳: تغییرات نسبت عرض سکو به طول موج در مقابل ضریب انعکاس موج

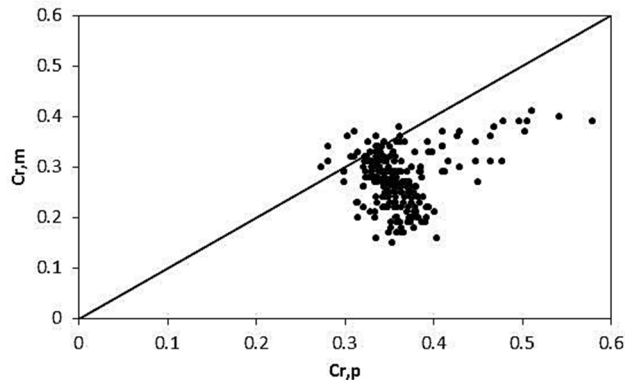
جدول ۳ ترکیبات مختلفی از پارامترهای بدون بعد که دارای مفاهیم فیزیکی‌اند و به‌عنوان ورودی مدل معرفی شده‌اند را نشان می‌دهد. مدل‌های مختلفی ساخته می‌شوند و در نهایت مدلی که به لحاظ فیزیکی توجیه‌پذیر و به لحاظ آماری دقیق باشد انتخاب شده است.

جدول ۳: پارامترهای ورودی و خروجی برای ساخت مدل درختی

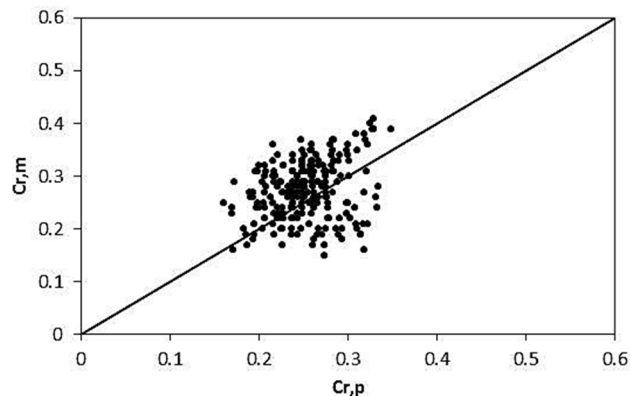
خروجی	پارامترهای بدون بعد ساخته شده به عنوان ورودی مدل
C_r	$\xi_{op}, d_{10e}/L_{10e}, S_{op}, \tan \alpha_d, \tan \alpha_{inc}, H_s/d, \xi_{CEM}, \xi_{Zvd}$

پس از ساخت مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی میزان انعکاس موج از یک موج‌شکن سکویی با کمک مدل درختی و بر مبنای

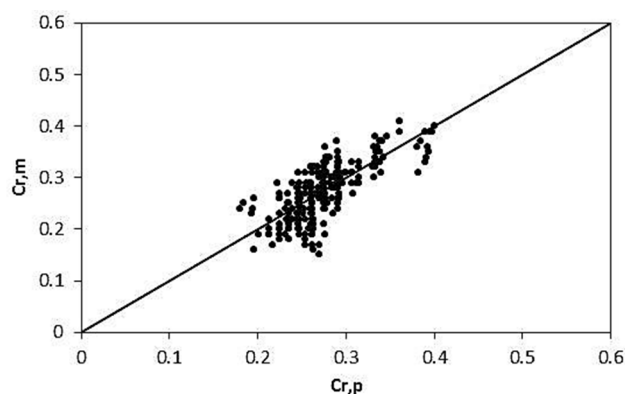
موج‌شکن‌های سکویی، شاخص پراکندگی رابطه جدید به اندازه سه برابر نسبت به پراکندگی رابطه موجود کاهش یافته است که نشان دهنده دقت بیشتر روابط جدید است.



الف- رابطه Z & VdM با استفاده از ξ_{ZVd}



ب- رابطه Z & VdM با شیب $\tan\alpha_{inc}$



ج- رابطه به دست آمده از مدل درختی
شکل ۴: مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری برای مدل‌های مختلف

- مکانیسم‌های هیدرودینامیکی که در رخداد پدیده انعکاس موج رخ می‌دهد را می‌توان در دو مرحله بیان کرد.

بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری تا حدود ۳۰۰ درصد نسبت به رابطه پیشنهاد شده توسط Zanuttigh and van der Meer (رابطه ۱۳) کاهش یابد. همچنین ضریب همبستگی رابطه جدید (رابطه ۱۶) نسبت به رابطه ۱۳ بیش از ۳ برابر بهبود یافته است.

مقایسه پراکندگی بین مقادیر آزمایشگاهی $C_{r,m}$ و مقادیر پیش‌بینی $C_{r,p}$ برای روابط مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که پراکندگی زیادی بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری برای معادله ۱۳ وجود دارد، درحالی که معادله جدید ارائه شده بر مبنای مدل درختی این پراکندگی را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده و ضریب انعکاس موج را بسیار بهتر پیش‌بینی می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به مدل‌سازی ضریب انعکاس موج با کمک مدل درختی و بر مبنای به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی موجود پرداخته شده است. در ابتدا میزان اعتبار معادله ارائه شده در مطالعه قبلی برای ضریب انعکاس امواج از موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی بر مبنای داده‌های جدید آزمایشگاهی با مقیاس بزرگ‌تر مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با مدل‌سازی ضریب انعکاس موج به کمک کلیه داده‌های موجود و با به‌کارگیری مدل درختی الگوریتم $M5'$ ، یک معادله جدید جهت تخمین انعکاس امواج از موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی استخراج شد.

در بخش بعدی، موج‌شکن سکویی غیر شکل‌پذیر مورد مطالعه قرار گرفت و شیب‌های مختلف مورد ارزیابی واقع شد و سپس پارامترهای بدون بعد موثر بر پدیده انعکاس موج که ترکیبی از پارامترهای نشانگر اندرکنش موج و بستر و برهمکنش موج و سازه بودند، انتخاب و به کمک الگوریتم $M5'$ معادله جدیدی برای پیش‌بینی ضریب انعکاس موج از موج‌شکن‌های سکویی غیر شکل‌پذیر ارائه شد. نتایج مهم این مطالعه را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- استفاده از مدل درختی علاوه بر اینکه منجر به رابطه‌ای ساده می‌شود، تخمین دقیق‌تری از ضریب انعکاس موج نیز به‌دست می‌دهد، به‌طوری که روابط جدید ارائه شده (شامل معادلات ۱۰ و ۱۶) به لحاظ همه شاخص‌های آماری به‌ترتیب بهتر از معادله ۲ و ۱۳ هستند. برای مثال در مورد

جدول ۴: مقایسه آماری روابط موجود و رابطه جدید ارائه شده برای پیش‌بینی انعکاس موج از موج‌شکن سکویی غیر شکل‌پذیر

نویسنده	رابطه	شیب یا شاخص شکست مورد استفاده	R	RMSE	SI	Bias
پستما	$C_r = 0.071P^{-0.082}(Cotg^{-0.62} \alpha) S_{op}^{-0.46}$	$\tan \alpha_d$	-۰/۴۷	-۰/۰۶۹	۲۵	-۰/۰۴۷
		$\tan \alpha_{CEM}$	-۰/۵۴	-۰/۰۶۵	۲۳/۸۱	-۰/۰۳۲
		$\tan \alpha_{inc}$	-۰/۲۶	-۰/۰۸۱	۲۹/۵۴	-۰/۰۶۳
زانتی و وندرمیر	$C_r = \tanh(a\xi_0^b)$	$\tan \alpha_d$	-۰/۴۷	-۰/۸۶۶	۶۰/۳۵	-۰/۱۵۸
		$\tan \alpha_{CEM}$	-۰/۵۱	-۰/۱۵	۵۶/۰۱	-۰/۱۳
		$\tan \alpha_{inc}$	-۰/۲۶	-۰/۰۶	۲۲	-۰/۰۲۱
		ξ_{ZVd}	-۰/۲۲	-۰/۱	۳۸/۴۴	-۰/۰۸۷
مدل درختی(کل داده‌ها)	$C_r = 0.066\xi_{CEM}^{0.1} \left(\frac{d}{L_{10e}}\right)^{-0.678}$	$\tan \alpha_{CEM}$	-۰/۷۴	-۰/۰۲۶	۱۳/۲۱	-۰/۰۰۱
مدل درختی(داده‌های آزمون)	$C_r = 0.066\xi_{CEM}^{0.1} \left(\frac{d}{L_{10e}}\right)^{-0.678}$	$\tan \alpha_{CEM}$	-۰/۷۶	-۰/۰۲۵	۱۲/۶۸	-۰/۰۰۱

Allsop, N. W. H.; Channel, A. R., 1989. Wave reflection in harbors: Reflection performance of rock armored slopes in random waves, breakwaters. Hydraulic Research, Wallingford.

Andersen, T.L., 2006. Hydraulic Response of rubble mound breakwaters, Scale effects, Berm Breakwaters. Ph.D. Thesis. Aalborg University, Denmark, 429p.

CEM., 2006. Coastal engineering manual, Coastal engineering research center, Department of army corps of engineers, Volume 1-6.

Etemad-Shahidi, A.; Ghaemi, N., 2011. Model tree approach for prediction of pile groups scour due to waves. Ocean Engineering, 38: 522-527.

Muttray, M.; Oumeraci, H.; Oever, E. T., 2006. Wave reflection and wave run-up at rubble mound breakwaters. Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, 5: 4337-4349.

Postma, G.M., 1989. Wave reflection from rock slopes under random wave attack. MSc Thesis. Delft University of Technology, Netherland, 112p.

Quinlan, J. R., 1992. Learning with continuous classes. Proceedings of AI92 (Adams and Sterling Eds), World Scientific, 343-348 p.

Seelig, W. N.; Ahrens, J. P., 1981. Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for

مرحله اول، مرحله انتشار موج است که عمدتاً حاکی از اهمیت برهمکنش موج و بستر بوده و پارامتر عمق نسبی در آن تاثیر گذار است و مرحله دوم، مرحله بعد از برخورد موج به سازه است که بیانگر برهمکنش موج و سازه بوده و می‌توان آنرا به کمک پارامتر تشابه شکست که با توجه به روشی مشابه با روش توصیه شده در CEM محاسبه می‌شود، تبیین نمود.

- در محدوده داده‌های موجود عرض سکوی موج‌شکن تاثیری در میزان انعکاس موج از موج‌شکن توده‌سنگی ندارد.
- نتایج تحقیق حاضر در حالتی که عمق نسبی بین ۰/۰۹ تا ۰/۲۵ (شرایط آب انتقالی) و در حالی که تیزی موج بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۶ باشد، صادق است.

منابع

- چگینی، و.، ۱۳۷۷. راهنمای طراحی موج شکن‌ها. شرکت جهاد آب و آبخیزداری تهران، جلد دوم و سوم.
- ذبیحی، م.؛ یگانه بختیاری، ع.؛ کاظمی‌نژاد، م.ح.، ۱۳۹۱. بررسی ضریب انعکاس از موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی با استفاده از مدل درختی. چهاردهمین همایش صنایع دریایی. تهران.
- ذونعمت کرمانی، م.؛ بای، ی.، ۱۳۹۲. واکاوی کارایی روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره در پیش‌بینی کشند. مجله اقیانوس‌شناسی، (۱۳) : ۴-۱۰-۱.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۴. آیین‌نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران: موج شکن‌ها و سازه‌های حفاظتی، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

- Zanuttigh, B.; van der Meer, J. W., 2006. Wave reflection from coastal structures. Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, 5: 4337-4349.
- Zanuttigh, B.; van der Meer, J. W.; Andersen, T. L.; Lara, J. L.; Losada, I. J., 2008. Analysis of wave reflection from structures with berm through an extensive database and 2dv numerical modeling. Proceedings of the 31th International Conference on Coastal Engineering, 3: 3285-3297.
- beaches, revetments and breakwaters. CERC, Technical Paper, Fort Belvoir. No. 81/1. 41 pp.
- van der Meer, J.W., 1993. Wave run-up and overtopping on dikes. (in Dutch), Tech. Advisory Committee on Water Defenses, Delft, Netherland.
- Wang, Y.; Witten, I. H., 1997. Introduction of model trees for predicting continuous classes. Proceeding of the poster papers of the European Conference on Machine Learning. University of Economics, Faculty of Information and Statistics, Prague.