

## بررسی اثر عمق آب در پایداری موج شکن توده سنگی

پرویز قدیمی<sup>۱</sup>، مرتضی کلاهدوزان<sup>۲</sup>، میثم بالی<sup>۳</sup>

pghadimi@aut.ac.ir

- ۱- استاد دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه امیر کبیر
- ۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه امیر کبیر
- ۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه امیر کبیر

### چکیده

میزان پایداری موج شکن بستگی شدیدی به ارتفاع امواج دارد. به علت نامنظم بودن امواج، انتخاب ارتفاع مناسب جهت تعیین پایداری موج شکن بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه، از ارتفاع موج  $H_{50}$  که میانگین ۵۰ موج بلند رسیده به موج شکن در طی عمر مفید سازه است، برای محاسبه پایداری موج شکن استفاده شده است. علاوه بر این، در این تحقیق اثر پارامتر عمق آب در پایداری موج شکن‌های سنتی مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از مدل درختی، یک رابطه برای تعیین اندازه سنگ‌های آرمور پیشنهاد شده است. در جهت توسعه این مدل، از داده‌های امواج نامنظم که خرابی آن‌ها در محدوده ۲ تا ۸ بوده است، استفاده شده است. سپس نتایج حاصل از درخت تصمیم‌گیری با روابط تجربی قبلی مقایسه شده است. با استفاده از معیارهای آماری نشان داده شده است که رابطه ارائه شده دارای دقت بیشتری در پیش‌بینی عدد پایداری موج شکن در مقایسه با روابط تجربی موجود است.

واژگان کلیدی: موج شکن توده سنگی، مدل درختی، عدد پایداری، عمق آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۶/۲۳

## ۱- مقدمه

امروزه به دلیل توسعه روز افزون در جهت استفاده از منابع دریایی و همچنین رشد صنعت حمل و نقل دریایی، تلاش بسیاری در جهت توسعه محیطی امن و آرام برای پهلوگیری شناورها مبدول گردیده است. یکی از مهم ترین سازه‌هایی که جهت ایجاد حوضچه آرامش در بندرگاه برای تامین ورود مطمئن کشتی‌ها به آبراه‌ها و بنادر ساخته می‌شود، موج‌شکن است.

موج‌شکن‌ها دارای انواع مختلفی هستند که انتخاب هر یک از آن‌ها بر اساس شرایط مختلف صورت می‌گیرد. در این میان، یکی از پرکاربردترین موج‌شکن‌هایی که در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی هستند.

با توجه به هزینه بالای ساخت موج‌شکن‌ها، طراحی صحیح آن‌ها هم از جهت کارایی و هم از نظر اقتصادی کاملاً ضروری به نظر می‌رسد. در موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی، یکی از مهم ترین بخش‌های طراحی، طراحی لایه سنگ آرمور است که در واقع محافظ لایه‌های زیرین نیز می‌باشد.

طراحی دقیق آرمور با شناخت تمامی عوامل تأثیرگذار بر روی خرابی موج‌شکن، امکان‌پذیر است. اما با شناخت پارامترهای قابل اندازه‌گیری و تأثیرگذاری مانند ارتفاع موج، دوره تناوب موج، شیب ساحل، شیب موج‌شکن و جنس سنگ‌ها می‌توان طراحی نسبتاً دقیقی انجام داد. در طراحی موج‌شکن‌های سنتی، تعیین ابعاد قطعات لایه آرمور معمولاً بر اساس محاسبه عدد پایداری صورت می‌گیرد [۱].

هادسن در سال ۱۹۵۸ رابطه‌ای را بر اساس عدد پایداری، نوع آرمور، درصد خرابی و شیب موج‌شکن برای امواج منظم ارائه کرد [۱]. فن در میر نیز در سال ۱۹۸۸ رابطه خود را با معرفی پارامترهای تأثیرگذار و شرایط آزمایشگاهی جدیدتری (مانند در نظر گرفتن پارامترهای نفوذپذیری، تعداد امواج، ضریب پارامتر شکست و شرایط امواج نامنظم) نسبت به رابطه هادسن، پیشنهاد داده است [۲]. رابطه ارائه شده توسط او اثر تعداد موج را - که رابطه مستقیم با خرابی موج‌شکن دارد - در نظر می‌گیرد، اما تنها برای توزیع رایلی در آب عمیق اعتبار دارد [۳]. اما موج‌شکن‌ها در منطقه ساحلی و کم عمق که توزیع ارتفاع امواج رایلی نیست، نیز ساخته می‌شوند. به همین علت او برای این

شرایط  $H_2\%$  که میانگین دو درصد از بلندترین امواج رسیده به موج‌شکن است را به جای  $H_s$  در رابطه خود پیشنهاد کرد. اگرچه این کار باعث بهبود پیش‌بینی‌ها می‌شود، اما نمی‌تواند کاملاً تغییرات ناشی از توزیع ارتفاع را در منطقه ساحلی در نظر بگیرد [۳]. به همین دلیل، ویدال و همکاران در سال ۲۰۰۶ با انجام آزمایشی اثر ارتفاع موج بر پایداری موج‌شکن را بررسی کردند [۳].

لذا، رابطه فن در میر قادر به پیش‌بینی دقیق پایداری نیست. به همین دلیل محققین بسیاری به ارائه رابطه جدید به منظور حل مشکلات ذکر شده پرداختند. برای حل مسئله کاهش خطا در رابطه فن در میر [۲]، بعضی محققین از شبکه‌های عصبی و منطق فازی جهت افزایش دقت در پیش‌بینی پایداری استفاده کردند.

کیم و پارک در سال ۲۰۰۵ از مدل‌های مختلف شبکه عصبی استفاده کردند و به نتایجی بهتر از روابط فن در میر دست یافتند [۴]. اما دامنه داده‌های آموزشی با بعد (ارتفاع موج مؤثر و دوره تناوب متوسط موج) در قیاس با مقدار واقعی، بسیار کوچک بود و نمی‌توان از نتایج بدست آمده از این مدل، در عمل استفاده نمود [۵].

کیم و همکاران در سال ۲۰۰۸ در مطالعات خود، قابلیت روش شبکه عصبی احتمالاتی را برای پیش‌بینی عدد پایداری موج‌شکن مورد بررسی قرار دادند و از ۶۴۱ داده آزمایشگاهی فن در میر جهت ساخت مدل استفاده کردند [۶]. روش آن‌ها اگرچه دقت مطلوبی داشته است، اما دو اشکال بر این مطالعه وارد است. اول آنکه، آن‌ها برای ساخت مدل از ۶۴۱ داده آزمایشگاهی فن در میر استفاده کردند که این داده‌ها شامل موج‌شکن‌های معمولی و موج-شکن‌های تاج کوتاه<sup>۱</sup> است. در حالی که فن در میر برای موج‌شکن‌های تاج کوتاه روابط دیگری ارائه می‌کند و روابط تجربی مذکور تنها برای موج‌شکن‌های معمولی معتبر است. دوم اینکه، یکی از مدل‌ها بر اساس تعداد موج برخوردکننده ۱۰۰۰ موج و دیگری بر مبنای تعداد موج برخوردکننده ۳۰۰۰ موج است و در نتیجه این مدل‌ها نمی‌توانند برای سایر شرایط (تعداد امواج) بکار روند، هر چند که دقت مطلوبی داشته باشند [۵]. اردیک در سال ۲۰۰۹ با استفاده از منطق فازی ۳۷۱ قانون جهت پیش‌بینی عدد پایداری به شکل ایجاد رابطه "اگر... بنابراین..." میان پارامتر

<sup>۱</sup> Low-Crested

را معرفی کردند [۸]. رابطه آن‌ها هم مشکلات مربوط به آب کم‌عمق را تا حدودی حل کرده است و هم نسبت به سایر روابط پیش‌بینی دقیق‌تری از عدد پایداری داشته است.

در تمامی روابط بیان‌شده، اثر عمق آب در نظر گرفته نشده است. این در حالی است که با افزایش عمق آب پای سازه، مقدار شار تکانه بیشینه رسیده به پای سازه افزایش یافته و با توجه به اینکه مقدار شار تکانه بیشینه رسیده به پای سازه با نیروی وارد به موج‌شکن رابطه مستقیم دارد [۱۰]، منجر به کاهش ناپایداری خواهد شد. به همین دلیل، در این مطالعه اثر عمق آب در محاسبات در نظر گرفته می‌شود.

در این مطالعه، ابتدا روابط موجود برای محاسبه عدد پایداری معرفی و ارزیابی خواهند شد. در ادامه داده‌های مورد استفاده در این تحقیق توضیح داده خواهد شد و به کمک آن‌ها روابط موجود ارزیابی می‌شوند. در ادامه با توضیح و معرفی مدل درختی و تحلیل‌های ابعادی صورت گرفته در مورد عوامل مؤثر در پایداری، رابطه جدیدی پیشنهاد داده خواهد شد که اثر عمق آب را نیز در نظر می‌گیرد.

امروزه، از مدل درختی در بسیاری از تحقیقاتی که در زمینه مهندسی دریا صورت می‌گیرد، استفاده می‌شود. اعتماد شهیدی و جعفری در سال ۲۰۱۴ با استفاده از مدل درختی، نرخ روگذری را در موج‌شکن‌های توده سنگی تخمین زدند [۱۱]. بنکدار و همکاران در سال ۲۰۱۵ به تخمین نیروی ناشی از موج بر یک شمع منفرد در میان گروه شمع‌ها پرداختند [۱۲]. کاظمی نژاد و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵ با استفاده از مدل درختی میزان بالاروی امواج را بر روی شمع‌های قائم تخمین زدند [۱۳]. اعتماد شهیدی و همکاران در سال ۲۰۱۶ نرخ روگذری موج‌شکن‌های قائم کیسونی را با استفاده از مدل درختی محاسبه کردند [۱۴].

در این مطالعه، امکان ارائه یک رابطه جدید با استفاده از داده‌های موجود و با به‌کارگیری مدل درختی، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## ۲- روابط موجود برای پیش‌بینی عدد پایداری

تاکنون چندین روش تجربی جهت طراحی سازه‌های موج‌شکن‌ها ارائه شده است. این روش‌ها بر پایه مدل‌های آزمایشگاهی استوار است. از این میان چند مورد از

خروجی (عدد پایداری) و پارامترهای خروجی ایجاد کرده است. اما به علت تعداد زیاد روابط نمی‌توان از این روابط به راحتی جهت طراحی استفاده کرد [۷]. علاوه بر این، روش‌های عصبی و منطق فازی تقریباً به صورت جعبه سیاه عمل می‌کنند و عملاً رابطه‌ای جهت طراحی ارائه نمی‌کنند. روش‌های ذکر شده مانند شبکه‌های عصبی، منطق فازی، الگوریتم ژنتیک و یا ماشین بردار پشتیبان<sup>۱</sup> به عنوان ابزارهای نرم<sup>۲</sup> شناخته می‌شوند که به کشف دانش در پایگاه داده‌ها (داده‌کاوی) کمک می‌کنند.

یکی دیگر از ابزارهای نرم، مدل درختی<sup>۳</sup> است که شفافیت بیشتری نسبت به سایر روش‌های نرم داشته و می‌توان با استفاده از آن به روابط ساده دست یافت.

اعتماد شهیدی و بنکدار در سال ۲۰۰۹ با استفاده از مدل درختی رابطه جدیدی برای پایداری موج‌شکن‌های توده سنگی سنتی ارائه کردند، اما روابط آن‌ها تنها برای داده‌های آزمایش فن‌درمیر نتایج خوبی داده و فقط پیش‌بینی دقیقی از داده‌های آزمایشگاهی فن‌درمیر بوده است و برای داده‌های آزمایشگاهی دیگر مانند داده‌های آزمایشگاهی ویدال و همکاران [۳] چندان موفق نبوده است [۸]. علاوه بر این، آن‌ها نیز در روابط خود از ارتفاع موج  $H_s$  استفاده کردند که نمی‌تواند برای مناطق کم‌عمق قابل اعتماد باشد.

کوک و همکاران نیز در سال ۲۰۱۶ امکان پیش‌بینی عدد پایداری با الگوریتم ژنتیک را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که دقت قابل قبولی در پیش‌بینی عدد پایداری داده‌های آزمایشگاهی فن‌درمیر بدست می‌آید [۹]. این رابطه هم به دلیل استفاده از ارتفاع موج شاخص، تنها برای آب عمیق معتبر است. علاوه بر این، ارزیابی مدل آن تنها برای داده‌های آزمایشگاهی فن در میر بوده است.

در جهت حل مسئله انتخاب ارتفاع مناسب برای طراحی موج‌شکن در منطقه کم‌عمق ساحلی ویدال و همکاران در سال ۲۰۰۶ با معرفی  $H_{50}$  به جای  $H_s$  در رابطه فن‌درمیر رابطه جدیدی را معرفی کردند [۳]. آن‌ها با این مطالعه مشکلات مربوط به آب کم‌عمق را تا حدودی کاهش دادند.

اعتماد شهیدی و بالی نیز در سال ۲۰۱۲ با استفاده از ارتفاع موج  $H_{50}$  و ترکیب داده‌های مختلف رابطه جدیدی

<sup>1</sup> Support Vector Machin (SVM)

<sup>2</sup> Soft Computing

<sup>3</sup> Tree Model

$$N_{50} = 0.716 S^{0.2} P^{-0.13} \zeta_m^p \cot \alpha^{0.5} For \begin{cases} \zeta_m \geq \zeta_{mc} \\ \cot \alpha > 4 \end{cases} \quad (6)$$

که در این رابطه  $N_{50}$  عدد پایداری است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$N_{50} = \frac{H_{50}}{\Delta D_{n50}} \quad (7)$$

ضرایب ۴/۴۴ و ۰/۷۱۶ در معادله (۵) و (۶) با میانگین ۰/۲۸۶ و انحراف معیار ۰/۰۵۷ بدست آمده اند [۳].

رابطه ویدال و همکاران مستقل از پارامتر تعداد امواج است و همچنین برای توزیع غیرایلی و همچنین منطقه آب کم عمق نتایج مطلوبی ارائه می کند. در واقع آن ها ثابت کردند که با جایگزینی  $H_{50}$  به جای  $H_s$  در رابطه عدد پایداری و اصلاح رابطه فن در میر [۲]، نتایج پیش بینی عدد پایداری در منطقه ساحلی بهتر از نتایج رابطه فن در میر خواهد شد.

### ۲-۳- رابطه اعتماد شهیدی و بالی (EB) [۸]

اعتماد شهیدی و بالی با در نظر گرفتن  $H_{50}$  و نادیده گرفتن اثر تعداد امواج رابطه زیر را بمنظور محاسبه عدد پایداری ارائه نمودند:

$$If \xi_m \leq 2 \quad N_{50} = 4.18 P^{0.16} S^{0.18} \xi_m^{-0.53} \quad (8)$$

$$If \xi_m > 2 \quad N_{50} = 3.57 P^{0.2} S^{0.18} \xi_m^{-0.24} \quad (9)$$

آن ها در این رابطه به خوبی نشان دادند که با افزایش پریود امواج تناژ بیشتری جهت پایداری موج شکن نیاز است. روابط آن ها از دقت خوبی برخوردار است. اما در این رابطه اثر عمق آب در نظر گرفته نشده است.

### ۳- داده های موجود و ارزیابی روابط پیشین

برای ارزیابی دقت روابط موجود از ترکیب داده های آزمایش فن در میر و داده های آزمایش ویدال و همکاران استفاده شده است. داده های فن در میر شامل امواج نامنظم و ۵۷۹ داده مربوط به موج شکن معمولی که ۲۱ داده از آن بزرگ مقیاس هستند. داده های آزمایش ویدال و همکاران شامل امواج منظم و نامنظم و در مجموع ۲۷۰ داده است. آزمایش ها با دو پارامتر تشابه شکست  $\xi_m = 2/5$  و  $\xi_m = 3/5$ ، مقدار نفوذپذیری  $P = 0/45$  و شیب موج شکن  $\cot \alpha = 1/5$  انجام شده است. محدوده پارامترهای مختلف داده های آن ها در جدول (۱) آمده است.

معروف ترین و معتبرترین روش های تجربی که تا به امروز مورداستفاده قرار گرفته است، در ادامه به طور خلاصه معرفی می گردند.

### ۲-۱- رابطه فن در میر (VdM) [۲]

رابطه فن در میر برای  $N_w$  موج نامنظم تابیده شده به موج شکنی با عدد پایداری  $N_s$ ، خرابی  $S$  را به همراه خواهد داشت. ارتباط بین پارامترهای ذکر شده به صورت زیر بیان شده است:

$$N_s = 6.2 S^{0.2} P^{0.18} N_w^{-0.1} \zeta_m^{-0.5} \quad for \begin{cases} \zeta_m < \zeta_{mc} \\ \cot \alpha \leq 4 \end{cases} \quad (1)$$

$$N_s = 1.0 S^{0.2} P^{-0.13} N_w^{-0.1} \zeta_m^p \cot \alpha^{0.5} For \begin{cases} \zeta_m \geq \zeta_{mc} \\ \cot \alpha > 4 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن رابطه (۱) برای امواج شیرجه ای و رابطه (۲) برای امواج لغزشی ارائه شده است. در این رابطه  $P$  میزان نفوذپذیری موج شکن،  $\zeta_m = \tan \alpha / \sqrt{H_s / L_0}$  پارامتر تشابه شکست موج ( $\tan \alpha$  شیب موج شکن،  $H_s$  ارتفاع موج در آب عمیق و  $L_0 = gT_m^2 / 2\pi$  طول موج در آب عمیق است) و همچنین  $N_s$  به عنوان عدد پایداری به صورت زیر تعریف می شود:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \quad (3)$$

عدد بی بعد  $S$  را که، از حاصل تقسیم سطح فرسایش یافته  $D_{n50}$  به مربع میانگین اندازه سنگ ها بدست می آید، خرابی گویند. شرایط تغییر از موج چرخان به موج لغزشی توسط رابطه زیر تعیین می شود:

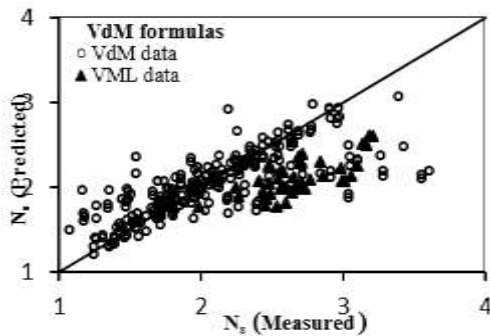
$$\xi_{mc} = (6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{1/(P+0.5)} \quad (4)$$

مقدار پیشنهادی  $P$  نیز بین ۰/۱ برای هسته نفوذناپذیر تا مقدار ۰/۶ برای هسته نفوذپذیر است. ضرایب ۶/۲ و ۱/۰ در معادله (۱) و (۲) با میانگین ۰/۴۰ و انحراف معیار ۰/۰۸ بدست آمده اند [۲].

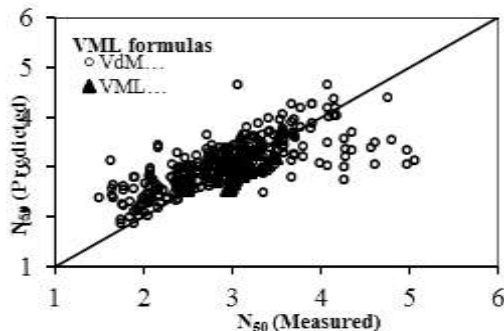
### ۲-۲- رابطه ویدال و همکاران (VML) [۳]

رابطه آن ها نیز با حذف پارامتر تعداد امواج و با جایگزینی  $H_{50}$  به جای  $H_s$  در فرمول فن در میر و اصلاح ضرایب آن به صورت زیر بیان می شود:

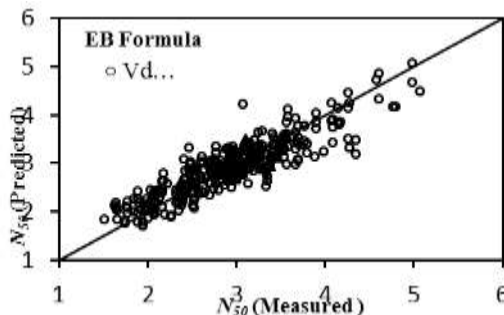
$$N_{50} = 4.44 S^{0.2} P^{0.18} \zeta_m^{-0.5} \quad for \begin{cases} \zeta_m < \zeta_{mc} \\ \cot \alpha \leq 4 \end{cases} \quad (5)$$



شکل (۱) مقایسه عدد پایداری اندازه گیری و پیش بینی شده برای ۳۰۶ داده ترکیبی با استفاده از رابطه فن در میر.



شکل (۲) مقایسه عدد پایداری اندازه گیری و پیش بینی شده برای ۳۰۶ داده ترکیبی با استفاده از رابطه ویدال و همکاران.



شکل (۳) مقایسه عدد پایداری اندازه گیری و پیش بینی شده برای ۳۰۶ داده ترکیبی با رابطه اعتماد شهیدی و بالی.

هر چند این رابطه داده های آزمایشگاهی خودش را نسبت به سایر روابط بهتر پیش بینی کرده است. رابطه پیشنهادی اعتماد شهیدی و بالی. نسبت به سایر روابط پیش بینی دقیق تری نسبت به دو رابطه دیگر دارد. جهت ارزیابی دقت روابط، از چهار شاخص آماری که شامل شاخص توافق<sup>۱</sup> ( $I_a$ )، ضریب همبستگی<sup>۲</sup> ( $CC$ )، شاخص پراکندگی<sup>۳</sup> ( $SI$ ) و

با توجه به مباحث بالا، ۵۷۹ داده فن در میر و ۲۷۰ داده ویدال و همکاران و در مجموع ۸۴۹ داده برای موج شکن های معمولی، استفاده شده است. از آنجایی که امواج در طبیعت به صورت نامنظم هستند و عموماً امواج منظم یافت نمی شود، برای بررسی، از امواج منظم داده های ویدال و همکاران صرف نظر شده است. همچنین به این علت که در خرابی بزرگ تر از ۸، لایه های زیر سنگ لایه آرمور مشاهده می شود، و خرابی کوچک تر از ۲ بسیار ناچیز است، تنها داده هایی که خرابی آن ها در محدوده ۲ تا ۸ است، در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب از بین ۸۴۹ داده موجود، ۳۰۶ داده، ۲۶۵ داده فن در میر و ۴۱ داده ویدال و همکاران، برای ارزیابی رابطه ها به کار گرفته شده است. محدوده پارامترهای به کار رفته برای ۳۰۶ داده ترکیبی در جدول (۱) آمده است.

### ۳-۱- ارزیابی روابط پیشین

برای ارزیابی کلی، تمام روابط در ۳۰۶ داده ترکیبی بررسی شده اند. شکل های (۱) تا (۳) نمودار پراکندگی را برای روابط مختلف نشان می دهد. همان طور که از نمودارها مشاهده می شود، هر چند روابط فن در میر داده های آزمایشگاهی را نسبت به سایر روابط موجود، بهتر پیش بینی می کنند اما عدد پایداری داده های ویدال را کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می کنند.

رابطه فن در میر همچنین در پیش بینی داده های خود به ویژه برای اعداد پایداری بالا نتایج مطلوبی ارائه نمی دهد. اما رابطه ویدال و همکاران در داده های فن در میر و به ویژه برای اعداد پایداری بالا و پایین نتایج مطلوبی را ارائه نمی دهد.

جدول (۱) محدوده تغییرات پارامترها.

پارامتر	VdM	VML	ترکیب داده ها
$N$	۱۰۰۰-۳۰۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰-۳۰۰۰
$P$	۰/۱-۰/۶	۰/۴۵	۰/۱-۰/۶
$\zeta m$	۰/۲-۷/۵۸	۲/۵-۳/۵	۱/۴۳-۴/۲۵
$cota$	۱/۵-۶/۰	۱/۵	۱/۵-۶/۰
$S$	۰/۳۵-۳۲/۹	۰-۱۵/۲۶	۲-۸
$N_s$	۰/۷۹-۴/۳۷	۰/۷۲-۳/۱۴	۱/۰۷-۳/۶۱
$N_{50}$	۱/۱۱-۶/۱۵	۰/۷۸-۳/۳۰	۱/۵۱-۵/۰۶
$d/L$	۰/۰۶۵-۰/۳۴	۰/۱۳-۰/۳۲	۰/۰۶۵-۰/۳۴

<sup>۱</sup> Agreement Index

<sup>۲</sup> Correlation Coefficient

<sup>۳</sup> Scatter Index

جدول (۲) نتایج شاخص‌های آماری برای روابط مختلف.

مدل	<i>Bias</i>	<i>SI</i>	<i>CC</i>	<i>I<sub>a</sub></i>
NW	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۸۵	۰/۹۲
EB	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۸۹	۰/۹۴
VDM	-۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۷۳	۰/۸۰
VML	۰/۱۰	۰/۱۷	۰/۷۲	۰/۸۱

برازش استاندارد، شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک و درخت‌های تصمیم‌گیری از شناخته‌شده‌ترین روش‌های داده‌کاوی است. در این مطالعه از درخت‌های تصمیم‌گیری جهت داده‌کاوی استفاده شده است. مدل درختی M5 یکی از روش‌های محاسبات نرم جدید است که اولین بار توسط کویننلن در سال ۱۹۹۲ معرفی شده است [۱۵]. مهم‌ترین برتری مدل‌های درختی این است که آن‌ها روابطی که برای مهندسی قابل‌درک است، ارائه می‌کنند [۱۶].

برخلاف شبکه‌های عصبی که داده‌های ورودی در آن تنها به صورت عددی در نظر گرفته می‌شود، در این روش هیچ محدودیتی برای نوع داده‌ها وجود ندارد. مهم‌ترین مزیت روش درختی نسبت به شبکه‌های عصبی این است که درخت‌های تصمیم‌گیری برخلاف شبکه‌های عصبی به تولید قانون می‌پردازد. یعنی درخت‌های تصمیم‌گیری پیش‌بینی خود را در قالب یکسری قوانین توضیح می‌دهد. درحالی‌که در شبکه‌های عصبی تنها پیش‌بینی بیان می‌شود و چگونگی انجام کار بیان نمی‌شود. از ویژگی‌های درخت تصمیم‌گیری این است که: ۱- هیچ داده‌ای حذف نمی‌شود (تمام داده‌های ورودی با مجموع داده‌ها در شاخه‌های ایجاد شده برابر است) ۲- فهمیدن مدل ایجاد شده توسط درخت تصمیم‌گیری آسان است. ۳- از روی شباهت داده‌های ذخیره شده در پارامترهای پیش‌بینی کننده، دسته‌بندی داده‌ها در درخت تصمیم‌گیری ایجاد می‌شود. درخت تصمیم‌گیری شامل ۳ مرحله ساخت درخت، هرس کردن و هموارسازی است.

درخت تصمیم‌گیری به شکل یک درخت وارونه است، به طوری که یک ریشه<sup>۱</sup> در بالای آن وجود دارد و برگ‌های<sup>۲</sup> آن در پایین هستند. سپس یک رکورد وارد ریشه می‌شود و در این گره یک آزمون صورت می‌گیرد تا مشخص شود که این رکورد به کدام یک از شاخه‌های پایین‌تر می‌رود. معمولاً روش‌های مختلفی برای انتخاب این آزمون اولیه وجود دارد،

شاخص اربیبی (*BIAS*) میباید، استفاده شده است که به صورت روابط (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) ارائه میشوند.

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \quad (10)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}}{\bar{X}_i} \quad (11)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (Y_i - X_i) \quad (13)$$

در این روابط،  $N$  تعداد داده‌ها،  $Y_i$  مقدار پیش‌بینی و  $X_i$  مقدار اندازه‌گیری است.  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  به ترتیب میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است.

جدول (۲) شاخص‌های خطا را به منظور مقایسه روابط مختلف نشان می‌دهد. با توجه به جدول مشخص می‌شود که در میان روابط ذکر شده رابطه اعتماد شهیدی و بالای نسبت به سایر روابط از دقت بیشتری برخوردار است.

با وجود دقت قابل قبول این روابط اما، نکته قابل ذکر در این قسمت این است که هیچ‌کدام از روابط اثر عمق آب را که تأثیر مستقیمی در مقدار شار انرژی دارد، در نظر نمی‌گیرند. بر اساس روابط موجود، مقدار تناژ سنگ برای دو قسمت که مشخصات هیدرودینامیکی و سازه‌ای یکسان، ولی عمق مختلفی دارند یکسان است که به نظر می‌رسد چندان منطقی نباشد. در ادامه با معرفی مدل درختی و آنالیز ابعادی پارامترهای تأثیرگذار، رابطه جدیدی که عمق آب را در نظر می‌گیرد پیشنهاد شده است.

#### ۴- مدل درختی

استخراج معادلات برای بعضی از پدیده‌های مهندسی به لحاظ پیچیدگی به راحتی امکان پذیر نیست. برای این منظور، داده‌کاوی ابزاری مناسب در جهت حل مسئله و تشریح پدیده مربوط به آن است. مفهوم داده‌کاوی در حقیقت کشف دانش در پایگاه داده‌ها است. برای این منظور، روش‌ها و فن‌های مختلفی جهت دسته‌بندی و پیش‌بینی داده‌ها وجود دارد.

<sup>1</sup> Root

<sup>2</sup> Leaves

مدل های  $M5'$  ابزار قوی در جهت برآزش توابع خطی  $Y = a_1 X_1^{b_1} + a_2 X_2^{b_2} + \dots + a_n X_n^{b_n}$  است. ویژگی اصلی این مدل تعیین شکستگی های رفتاری تابع ( $Y$ ) برای هر یک از پارامترهای مستقل ( $X_n$ ) و ارائه تابع به صورت روابط چند ضابطه ای و بدون دخالت کاربر است. با استفاده از مدل درختی روابط زیر پیشنهاد شده است که در آن، پارامتر تعداد امواج در نظر گرفته نشده است و از عدد پایداری  $N_{50}$  استفاده شده است. پارامترهای مؤثر در پایداری موج شکن توده سنگی به صورت زیر است:

$$N_{50} = f(S, P, \cot \alpha, \zeta_{md}) \quad (14)$$

در رابطه بالا، پارامتر جدید  $\zeta_{md}$  به جای  $\zeta_m$  پیشنهاد شده است. تفاوت پارامتر جدید  $\zeta_{md}$  با پارامتر  $\zeta_m$  در این است که  $\zeta_{md}$  اثر عمق را در نظر می گیرد و همچنین در این پارامتر  $H_{50}$  جایگزین  $H_s$  شده است:

$$\zeta_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / L_0}} \quad (15)$$

در رابطه بالا طول موج آب عمیق ( $L_0$ ) در نظر گرفته شده است و این در حالی است که مقدار طول موج در مناطق کم عمق تغییر می کند و بنابراین مقدار طول موج در پای سازه می تواند در پایداری مؤثر باشد. از طرفی مقدار ارتفاع موج شاخص در این رابطه لحاظ شده است که این ارتفاع نیز می تواند با ارتفاع  $H_{50}$  جایگزین شود. بنابراین پارامتر جدید  $\zeta_{md}$  به صورت زیر بیان می شود:

$$\zeta_{md} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_{50} / L}} \quad (16)$$

مقدار طول موج ( $L$ ) به عمق آب بستگی دارد. از این رو عمق آب می تواند به عنوان پارامتر مؤثر در رابطه طول موج لحاظ شود:

$$L = L_0 \sqrt{\tanh\left(\frac{2\pi d}{L_0}\right)} \quad (17)$$

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T_m^2 \quad (18)$$

رابطه (۱۷) یک رابطه تجربی برای پیش بینی طول موج در هر منطقه ای از آب دریا است که در CEM (Coastal Engineering Manual) به آن اشاره شده است [۱۷]. بر اساس تجربیات نویسندگان، خطای این رابطه نسبت به رابطه پخش (رابطه اصلی پیش بینی طول موج که از تئوری موج ابری بدست می آید) کمتر از ۵ درصد است. همان طور که از روابط فن درمیر هم قابل استنباط است، ارتباط میان

ولی در نهایت هدف همه آنها انتخاب روشی است که بهترین جداسازی را در کلاس های هدف، انجام دهد. این روند آن قدر تکرار می شود تا رکورد به گره برگ ها برسد. تمامی رکوردهایی که به یک برگ می رسند، در یک کلاس قرار می گیرند. برای رسیدن از گره ریشه تا برگ تنها یک راه وجود دارد و آن راه در واقع یکی از قوانین تولید شده توسط درخت است.

برای صحت سنجی قوانین از یک سری داده های آزمایش استفاده می شود که برای ساخت درخت از آن استفاده نشده باشد و با داده های اولیه متفاوت باشد. معیاری که اندازه گیری می شود هم عبارت است از درصد داده هایی که درست دسته بندی می شوند و دسته پیش بینی شده با دسته واقعی آنها یکی باشد. در واقع الگوریتم درخت تصمیم گیری با انتخاب آزمونی آغاز می شود که بهترین جداسازی را برای دسته ها انجام دهد. در مراحل بعدی، همین کار برای گره های بعدی با داده های کمتر صورت می گیرد تا بهترین قانون حاصل شود.

درخت اولیه با استفاده از یک معیار جداسازی شکل می گیرد که انحراف معیار داده های کلاس بندی شده ای که به یک گره می رسند، است. صفتی که کمترین انحراف معیار در هر گره را داشته باشد به عنوان صفتی که روی آن شاخه زده می شود، انتخاب می گردد. فرآیند جداسازی در صورتی که مقادیر خروجی تمامی نمونه هایی که به گره مورد نظر می رسند، تغییرات ناچیزی داشته باشد و یا تعداد کمی از نمونه ها باقی بمانند، متوقف می شود. اطلاعات بیشتر در مورد درخت تصمیم گیری و نحوه عملکرد آن در مطالعات اعتماد شهیدی و بالی آورده شده است.

#### ۴-۱- نتایج و بحث

با توجه به قسمت قبلی مشخص می شود که انتخاب ارتفاع مناسب تا چه اندازه در بهبود پیش بینی مؤثر بوده است. در این قسمت سعی شده است با انتخاب پارامترهای مؤثر در پایداری موج شکن های توده سنگی رابطه جدیدی پیشنهاد شود. در این مطالعه، روش  $M5'$  (با استفاده از نرم افزار Weka) جهت پیش بینی عدد پایداری موج شکن به کار گرفته شده است.  $M5'$  یک نسخه ای از الگوریتم  $M5$  است که توسط ونگ و ویتن در سال ۱۹۷۹ پیشنهاد شده است [۱۶]. این الگوریتم شبیه الگوریتم  $M5$  عمل می کند اما کارایی آن بیشتر است.

این شکل، به خوبی نشان می‌دهد که رابطه جدید هم در پیش‌بینی داده‌های آزمایشگاهی فن‌درمیر [۲] و هم داده‌های آزمایشگاهی ویدال و همکاران [۳] موفق بوده است.

به نظر می‌رسد که  $M5$  در تشخیص اثر پارامترهای مؤثر بر پایداری موج‌شکن توده‌سنگی موفق بوده است. با افزایش نفوذپذیری مقدار زیادی از انرژی امواج وارد محیط متخلخل خواهد شد و در نتیجه عدد پایداری بیشتر و اندازه سنگ کوچک‌تری احتیاج خواهد بود. این مسئله با توان مثبت پارامتر نفوذپذیری به‌درستی در نظر گرفته شده است.

قبول مقدار خرابی بیشتر در زمان طراحی عدد پایداری بزرگ‌تر و در نتیجه اندازه سنگ کوچک‌تری را نتیجه خواهد داد. در این مسئله نیز توان مثبت پارامتر خرابی به‌درستی در نظر گرفته شده است. با افزایش موج مقدار انرژی بیشتری به موج‌شکن وارد خواهد شد و در نتیجه عدد پایداری کمتر و اندازه سنگ بیشتری نیاز خواهد بود. با توجه به اینکه  $\zeta_{md}$  رابطه مستقیمی با پرید امواج دارد، افزایش آن منجر به افزایش  $\zeta_{md}$  و افزایش این پارامتر منجر به کاهش عدد پایداری در رابطه خواهد شد که این مسئله هم به خوبی توسط مدل درختی نشان داده شده است. افزایش شیب منجر به پایداری بیشتر و کوچک‌تر شدن تناژ می‌شود. در رابطه بالا عدد پایداری با  $\cot \alpha^{(0.49-0.15)} = \cot \alpha^{(0.34)}$  دیده شده است.

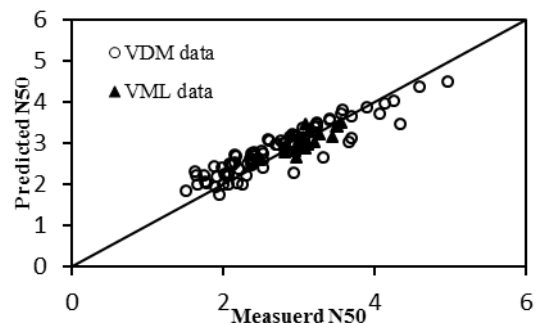
مهم‌ترین پارامتر، عمق آب است که تنها در رابطه جدید، دیده شده است. با افزایش عمق آب پای سازه، مقدار شار تکانه بیشینه رسیده به پای سازه نیز افزایش یافته و در نتیجه مقدار نیروی وارد بر موج‌شکن افزایش خواهد یافت. برای توضیح بیشتر، باید اشاره نمود که مقدار شار تکانه بیشینه رسیده به پای سازه با نیروی وارد به موج‌شکن رابطه مستقیم دارد.

در رابطه فوق، با افزایش عمق آب مقدار  $\zeta_{md}$  با توجه به روابط (۱۷) و (۱۸) افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش  $\zeta_{md}$  که رابطه معکوس با عدد پایداری در رابطه جدید دارد، منجر به کاهش عدد پایداری و در نهایت بزرگ‌تر شدن اندازه سنگ‌ها خواهد شد. اما نکته جالب توجه در این مسئله این است که تنها در منطقه کم‌عمق با افزایش عمق آب مقدار شار تکانه بیشینه افزایش می‌یابد ولی در منطقه

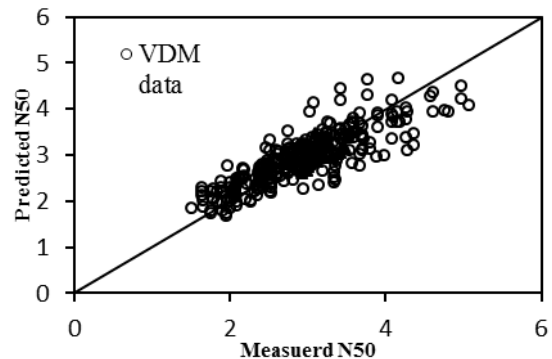
پارامترهای ورودی و پارامتر خروجی (که همان عدد پایداری است) خطی نیست و از طرف دیگر مدل درختی تنها قادر به ایجاد رابطه خطی میان آن‌ها است. از این رو، برای غلبه بر این محدودیت، از لگاریتم داده‌های ورودی استفاده شده است. برای ایجاد مدل از ۳۰۶ داده ترکیبی استفاده شده است. از میان داده‌های موجود ۲۰۶ داده جهت آموزش رابطه جدید و ۱۰۲ داده جهت آزمایش رابطه استفاده شده می‌شود. در نهایت رابطه پیشنهادی<sup>۱</sup> با استفاده از ۲۰۶ داده آموزشی و به کارگیری مدل درختی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$N_{50} = 4.55 P^{0.14} S^{0.15} \zeta_{md}^{-0.49} \cot \alpha^{-0.15} \quad (19)$$

شکل‌های (۴) و (۵) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده عدد پایداری و همچنین پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه جدید را به ترتیب برای داده‌های آزمایش و همچنین کل داده‌ها نشان می‌دهد. تمرکز داده‌ها بر روی خط بهینه در این شکل‌ها، به خوبی نشان می‌دهند که رابطه جدید از توانایی خوبی در پیش‌بینی دقیق‌تر عدد پایداری برخوردار می‌باشد.



شکل (۴) مقایسه عدد پایداری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه جدید برای داده‌های آزمایش



شکل (۵) مقایسه عدد پایداری اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه جدید، برای ۳۰۶ داده ترکیبی رابطه.

<sup>1</sup> New Formula (NW)



## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، پایداری موج شکن‌های توده‌سنگی سنتی مورد بررسی قرار گرفتند. برای این هدف، در ابتدا عوامل تأثیرگذار بر پایداری موج شکن‌های توده‌سنگی سنتی بررسی شد. از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در پایداری موج شکن‌ها، پارامتر ارتفاع موج است. در این مطالعه، نشان داده شد که چگونه پیش‌بینی پایداری موج شکن با انتخاب ارتفاع مناسب  $H_{50}$  و به کارگیری عمق آب بهبود می‌یابد. با به کارگیری این رویکرد و استفاده از مدل درختی، رابطه جدیدی پیشنهاد گردیده است. برای این منظور، از ترکیب داده‌های فن‌درمیر و ویدال و همکاران استفاده شده است. در این راستا، از داده‌هایی که در آن امواج نامنظم با محدوده خرابی ۲ تا ۸ بوده است، استفاده شده است. برای ساخت مدل نیز از دوسوم این داده‌ها جهت آموزش و از باقی آن جهت آزمایش رابطه جدید استفاده شده است. نتایج نشان داده است که رابطه جدید علیرغم تک ضابطه‌ای بودن، پیش‌بینی خوبی نسبت به سایر روابط ارائه می‌دهد. در علم داده‌کاوی، با افزایش تعداد ضابطه‌ها، دقت روابط نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در این مطالعه که از ۳۰۶ داده آزمایشگاهی برای ساخت رابطه جدید استفاده شده است، یک رابطه با ۳۰۶ ضابطه می‌تواند کمترین خطا را داشته باشد. رابطه اعتماد شهیدی و بالی که در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است یک رابطه دو ضابطه‌ای است که با این وجود، دقت محسوسی نسبت به رابطه جدید که یک رابطه تک ضابطه‌ای است، دارد.

مهم‌ترین پیام این مقاله، ارائه یک رابطه برای تعیین عدد پایداری است به طوری که در این رابطه با در نظر گرفتن عمق آب، اندازه سنگ‌ها مستقل از نوع شکست موج است.

## ۶- تشکر

نویسندگان این مقاله از آقای فن در میر و همچنین ویدال به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات خودشان تشکر می‌کنند.

## ۷- مراجع

- [1] Hudson, R.Y., "Design of Quarry Stone Cover Layer for Rubble Mound Breakwaters", Research Report No. 2-2, Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Centre, Vicksburg, MS, 1958.

آب عمیق، عمق آب تأثیری در پایداری و خرابی موج شکن ندارد.

این بدان علت است که در منطقه کم‌عمق، عمق آب پارامتر تأثیرگذاری در نوع شکست موج است. این مسئله نیز به خوبی در رابطه بالا دیده می‌شود. با افزایش عمق آب مقدار  $Tanh(2\pi d / L_0)$  افزایش می‌یابد، اما با عمیق‌تر شدن دریا مقدار  $Tanh(2\pi d / L_0)$  به سمت ۱ میل خواهد نمود و افزایش عمق تأثیری نخواهد داشت. این مسئله به خوبی نشان داده است که رابطه ارائه شده تا چه حدی با فیزیک مسئله سازگار خواهد بود.

نکته حائز اهمیت دیگر در مورد برتری رابطه جدید به روابط قبلی تک ضابطه‌ای بودن این رابطه است. این رابطه نشان می‌دهد که مقدار عدد پایداری با افزایش مقدار  $\zeta_{md}$  و یا پریرود امواج همواره کاهش و مقدار سنگ افزایش می‌یابد. این مسئله تنها در رابطه اعتماد شهیدی و بالی دیده شده بود. سایر روابط بررسی شده بیان می‌کنند که عدد پایداری موج شکن در شکست لغزشی و با افزایش پریرود (کاهش تیزی موج) زیادتر و در نتیجه آن تناژ کمتر می‌شود.

جدول ۲ شاخص‌های خطا را به منظور مقایسه روابط مختلف نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ مشخص می‌شود که رابطه (۱۹) در تمام شاخص‌های آماری نتایج بهتری نسبت به سایر روابط جز رابطه اعتماد شهیدی و بالی دارد. همان‌طور که از این جدول مشخص است رابطه اعتماد شهیدی و بالی به لحاظ شاخص خطا تا حدودی نسبت به رابطه پیشنهاد شده بهتر است، اما در واقع مزیت اصلی رابطه جدید نسبت به آن‌ها، تک ضابطه‌ای بودن و در نظر گرفتن اثر عمق آن به لحاظ فیزیکی است.

نتیجه دیگری که از استخراج رابطه (۱۹) حاصل می‌شود، این است که پایداری موج شکن‌ها برخلاف مطالعات گذشته به نوع شکست موج بستگی ندارد. در تمامی روابط گذشته، عدد پایداری سنگ‌ها به نوع شکست موج که می‌تواند شیرجه‌ای و یا لغزشی باشد، بستگی داشته است. اعتماد شهیدی و بالی در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که وابستگی عدد پایداری (اندازه سنگ‌ها) به نوع شکست موج بسیار ناچیز است [۸]. در این مطالعه، مشخص شده است که رابطه پایداری موج شکن‌ها با در نظر گرفتن اثر عمق آب می‌تواند کاملاً مستقل از نوع شکست موج باشد.

Department of Army Corps of Engineers, US.  
(Chapter VI, Part 5).

- [2] Van der Meer, J.W., "Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack". PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1988.
- [3] Vidal, C., Medina, R., Lomonanco, P. "Wave Height Eparameter for Damage Description of Rubble Mound Breakwater." Coastal Engineering, Vol.53, pp.712-722, 2006
- [4] Kim, D.H., Park, W.S., "Neural Network for Design and Reliability Analysis of Rubble Mound Breakwaters", Ocean Engineering, Vol.32, pp.1332-1349, 2005.
- [5] Etemad-Shahidi, A., Bonakdar, L., "Design of Rubble Mound Breakwater using M'5 Machine Learning Method", Applied Ocean research, Vol.31, pp.197-201, 2009.
- [6] Kim, D., Kim, D.H., Chang, S., "Application of Probabilistic Neural Network to Design Breakwater Armor Blocks", Ocean Engineering, Vol.35, pp.294-300, 2008.
- [7] Erdik, T., "Fuzzy Logic Approach to Conventional Rubble Mound Atructures Design", Expert Systems with Applications, Vol.36, pp.4162-4170, 2008
- [8] Etemad-Shahidi, A., Bali, M., "Stability of rubble-mound breakwater using H50 wave height parameter", Coast. Eng., 59, 38-45, 2011
- [9] Koç, M.L., Balas, C.E. and Koç, D.İ., 2016. Stability assessment of rubble-mound breakwaters using genetic programming. Ocean Engineering, 111: 8-12.
- [10] Hughes, S.A. 2004 "Wave momentum flux parameter: a descriptor for nearshore waves." Coast. Eng. Journal. Elsevier 51 (11), 1067-1084.
- [11] Jafari, A. and Etemad-Shahidi, A., 2014. Design of rubble-mound breakwater: Introducing a formula for the permeability. Coastal Engineering Proceedings, 1(34): 34
- [12] Bonakdar, L., Oumeraci, H. and Etemad-Shahidi, A., 2015. Wave load formulae for prediction of wave-induced forces on a slender pile within pile groups. Coastal Engineering, 102: 49-68.
- [13] Kazeminezhad, M.H. and Etemad-Shahidi, A., 2015. A new method for the prediction of wave runup on vertical piles. Coastal Engineering, 98: 55-64.
- [14] Etemad-Shahidi, A., Shaeri, S. and Jafari, E., 2016. Prediction of wave overtopping at vertical structures. Coastal Engineering, 109: 42-52.
- [15] Quinlan, J.R., 1992. Learning with continuous class. In: Adams, Sterling (Eds.), Proceeding of AI'92. World Scientific.
- [16] Wang, Y., Witten, I. H. 1997. "Induction trees for predicting continuous classes." Proceeding of the Poster Papers of the European Conference on Machine Learning, 1997 Prague. University of Economics. Faculty of Informatics Statistics.
- [17] Coastal Engineering Manual (CEM), 2006. Coastal Engineering Research Center.