

M. T. Alami*

Department of Water
Resources Engineering,
Faculty of Civil Engineering,
University of Tabriz.

e-mail: mtaalami@tabrizu.ac.ir

R. Vafaeipour Sorkhabi

Department of Civil
Engineering, Tabriz Branch,
Islamic Azad University.

e-mail: raminvafaei@yahoo.com

A. R. Naseri

Water Engineering and
Hydraulic Structures, Aras
International Campus,
University of Tabriz.

e-mail: naseri@gmx.com

A. R. Mojtabaei

Department of Water
Resources Engineering,
Faculty of Civil Engineering,
University of Tabriz.

e-mail:
alireza242424@gmail.com

Enhancing Stability and Reduce Damage in Rubble-Mound Reshaping Breakwaters by Using Obstacles in Front of the Structure

Strengthening breakwaters can reduce the damages that lead to hydraulic instability. Aiming to enhance the stability of reshaping breakwaters, this experimental study presents a method for controlling and reducing structural damages against waves by attaching a submerged obstacle to the structure toe and installing a floating wave barrier at a certain distance. In the tests, the breakwater was exposed to a total of 3000 random waves based on the JONSWAP spectrum. By generating an integrated 3D digital model of the structure using close-range photogrammetry, the displacement of armour units was recorded, and the damage parameter was calculated. Moreover, a comparison of the results between reinforced and simple breakwater indicated that the damage parameter was reduced by 37.19 and 34.14 percent by, respectively, attaching the submerged obstacle and installing the floating wave barrier, which confirms the good performance of the proposed models. Breakwater reinforcement with the submerged obstacle and the floating wave barrier simultaneously reduced the damage parameter by 51.79 percent, which was the highest efficiency among the different models. Also, the results show that with increasing the stability number, the damage parameter also increases, and the interaction between the wave steepness and the damage parameter indicates that the damage parameter decreases with increasing the wave sharpness values.

Keywords: Random Waves, Damage Parameter, Stability, Rubble-Mound Breakwater, Submerged Obstacle.

* Corresponding author

Received 15 September 2021, Revised 19 October 2021, Accepted 24 October 2021.
DOI: 10.22091/cer.2021.7367.1297

ارتقای پایداری و کاهش آسیب در موج‌شکن‌های توده سنگی با به کارگیری موافع در جلوی سازه

* محمد تقی اعلمی*

استاد، گروه مهندسی آب،
دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه تبریز.

پست الکترونیک:
mtaalami@tabrizu.ac.ir

رامین وفایی پور سرخابی
استادیار، گروه عمران واحد تبریز،
دانشگاه آزاد اسلامی.

پست الکترونیک:
raminvafaei@yahoo.com

علیرضا ناصری

پردیس ارس، دانشگاه تبریز.
پست الکترونیک:
naseri@gmx.com

علیرضا مجتهدی

دانشیار، گروه مهندسی آب،
دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه تبریز.

پست الکترونیک:
alireza2424@gmail.com

تقویت موج‌شکن‌ها می‌تواند میزان آسیب‌های منجر به ناپایداری هیدرولیکی را کاهش دهد. در این تحقیق، با هدف ارتقای پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر، مدلی برای کنترل و کاهش آسیب سازه در مواجهه با امواج، با قرار دادن یک مانع مستغرق متصل به پنجه سازه و یک موج‌گیر شناور در فاصله معین، ارائه و به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. در روند انجام آزمایش‌ها، موج‌شکن در معرض تعداد ۳۰۰۰ موج تصادفی تحت طیف جانسواب، قرار گرفته و با ساخت مدل رقومی و سه بعدی یکپارچه سازه به وسیله فتوگرامتری برد کوتاه، تغییرمکان مصالح آرمور و تغییرشکل موج‌شکن در آزمایش‌های مختلف، ثبت و پارامتر آسیب محاسبه شده است. در تحلیل اثر امواج بر سازه، مشاهده گردید که با افزایش ارتفاع نسبی موج و رشد پریوی نسبی موج، پارامتر آسیب افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه نتایج آزمایش مدل‌های تقویت شده نسبت به موج‌شکن ساده، نشان داد که پارامتر آسیب با قرارگیری مانع متصل، به میزان ۳۷/۱۹ درصد و با به کارگیری موج‌گیر شناور، معادل ۳۴/۱۴ درصد کاهش می‌یابد که مؤید عملکرد خوب مدل‌های پیشنهادی است. تقویت موج‌شکن به وسیله مانع مستغرق و موج‌گیر شناور به طور همزمان نیز، مقدار پارامتر آسیب را ۵۱/۷۹ درصد کاهش داده و بهترین عملکرد را در بین مدل‌ها ثبت نموده است. همچنین بررسی رفتار شاخص پایداری و پارامتر آسیب، روند همسو و افزایشی تغییرات این دو پارامتر را نشان می‌دهد و رصد عملکرد متناظر تیزی موج و پارامتر آسیب، نشان‌دهنده کاهش عدد آسیب با افزایش مقدار تیزی موج می‌باشد.

واژگان کلیدی: امواج تصادفی، عدد آسیب، پایداری، موج‌شکن توده‌سنگی، مانع مستغرق.

طرح و اجرا می‌شوند که با پدید آوردن نیمرخی پایدار برای سازه، نیروهای هیدرودینامیکی وارد از طرف امواج را به حداقل برسانند [۱]. مطالعات متعددی درباره ویژگی‌های عملکردی موج‌شکن‌های توده سنگی پویا، مانند پایداری لایه آرمور و ابعاد سازه و آسیب در برابر امواج، صورت گرفته است. به عنوان نمونه‌ای از این دست، سایاؤ و داسیلوا^۱ ارتباط ویژگی‌های سازه مانند شیب

۱- مقدمه

موج‌شکن‌ها برای کاهش اثر عملکرد امواج در سواحل ساخته می‌شوند و هدف از احداث آنها ایجاد محیط آرام برای شناورها و حفاظت از تأسیسات بندری است. موج‌شکن‌های توده سنگی شکل‌پذیر، به گونه‌ای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۲۴، بازنگری ۱۴۰۰/۰۸/۰۲، پذیرش ۱۴۰۰/۰۸/۲۷.

DOI: 10.22091/cer.2021.7367.1297

^۱- Sayao and Da Silva

نسبت به دیگر سازه های مورد بررسی بود. از دیگر نکات مهم در این بررسی، می توان به کاهش یافتن نیروی واردہ از امواج با افزایش شعاع انحنای سازه اشاره نمود [۶]. در طول عمر یک سازه توده سنگی، ممکن است لایه آرمور به واسطه مواجهه با امواجی بزرگتر از موج طرح و یا مواجهه با طوفان هایی متوالی باشد تی نزدیک به شرایط طرح دچار آسیب گردد [۷]. مدل سازی پیشرفت آسیب و بررسی پارامترهای شاخص این فرآیند، بر بهبود عملکرد و افزایش عمر موج شکن مؤثر است. دستاوردهای محققانی مانند کامپوس^۲ و همکاران، مؤید اهمیت این موضوع است. این پژوهشگران در سال ۲۰۲۰ پیشنهاد نمودند که به دلیل ماهیت تصادفی برخورد امواج، و پیچیدگی پیشرفت آسیب در لایه آرمور، رصد عملکرد سازه به وسیله روش های دقیق تصویر برداری، بسیار مفید و حائز اهمیت است [۸]. در بررسی پایداری موج شکن های شکل پذیر، احسانی و همکاران، مدلی آزمایشگاهی را برای ارزیابی پایداری هیدرولیکی موج شکن های سکویی چندلایه با تمرکز بر پارامترهایی مانند ارتفاع سنگ کلاس I، تراز سکو از سطح ایستابی و عمق آب پای سازه مورد مطالعه قرار داده و مشاهده نمودند که با افزایش ارتفاع کلاس I در یک ترکیب ثابت موج، مقدار پارامتر آسیب روند کاهشی پیدا می کند و با افزایش عمق آب پای سازه و همچنین افزایش تراز سکو از سطح ایستابی در یک ترکیب ثابت موج، سطح آسیب سازه نیز افزایش می پابد [۹]. همچنین ویرا^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۱، روند پیشرفت آسیب در یک موج شکن با پوشش آرمور مکعب های بتونی با الگوی چیدمان منظم را از طریق مدل سازی فیزیکی دوبعدی و با بررسی تأثیر متغیرهایی مانند تخلخل لایه آرمور، ارتفاع تاج و تیزی موج تحلیل نمودند. یکی از نوادری های این تحقیق، استفاده از تکنولوژی پردازش تصویر برای افزایش سرعت و دقیقت در

دیواره، عرض تاج و ارتفاع موج شکن با رفتار امواج برخورد کننده را بررسی نمودند [۲]. شفیعی فر و همکاران، تأثیر مشخصات هندسی سکوی پنجه بر پایداری موج شکن های شکل پذیر سکویی را بررسی نموده و نتیجه گرفته اند که میزان فرسایش سکو و آسیب در موج شکن دارای سکوی پنجه کمتر است. همچنین مشاهده نمودند که افزایش عرض و ضخامت سکوی پنجه بر کاهش فرسایش موج شکن تأثیر قابل توجهی دارد و براساس نتایج آزمایش ها توانستند رابطه ای بین میزان فرسایش سکو و مشخصات سکوی پنجه ارائه نمایند [۳]. مدل سازی های دیگری نیز، با تأکید بر اهمیت وضعیت عمق آب پای سازه و شرایط آب کم عمق صورت گرفته است. نتایج پژوهشی نشان داد که ضرایب کاهش تغییر شکل پروفیل سازه، به ارتفاع موج، عمق شکست، تیزی موج و شبیب کف مرتبط است [۴]. همچنین نصیرائی و همکاران در بخشی از مدل سازی عددی نیروهای واردہ از طرف امواج بلند بر موج شکن های کیسونی در سال ۱۳۹۵، تأثیر جانمایی موج شکن در طول بستر شبیه دار، بر مقدار نیروهای وارد به آن را بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با حرکت سازه به سمت ساحل (به علت کاهش در عمق آب، سرعت، طول موج و سطح فشار)، نیروهای واردہ در ابتدا با روند کاهشی (تقریباً خطی) همراه بوده، اما با نزدیک شدن به ساحل و تغییر تدریجی فرم موج از ناشکنا به شکنا، میزان نیرو افزایش یافته و پس از نقطه شکست، به صورت قابل ملاحظه ای کاهش یافته است [۵]. در پژوهشی با هدف سنجش توان سازه های ساحلی برای کاهش انرژی امواج، توسط لطف الله یقین و نصیرائی (۱۳۹۴)، مطالعه عددی نیروهای ناشی از امواج بر سازه های ساحلی، انجام یافت و روابطی برای محاسبه اندازه نیروهای واردہ از طرف امواج شکنا و ناشکنا بر موج شکن های کیسونی، دیوارهای ساحلی با زاویه ۴۵ درجه و دیوارهای ساحلی با شعاع انحنای مختلف ارائه شد. نتایج بررسی ها حاکی از نقش پرنگ سازه های دارای انحنا در کاهش نیروهای واردہ

²- Campos³- Vieira

بهینه موجشکن است. همچنین در این مطالعه، مشاهده گردید بهویژه زمان‌هایی که موجشکن در معرض امواج مورب قرار می‌گیرد و اندرنکنش موج و سازه از پیچیدگی بیشتری برخوردار است؛ افت انرژی موج عبوری از روی موجشکن با دقت بیشتری نسبت به مدل‌های مرسوم دو بعدی برآورد می‌گردد [۱۴]. همچنین برخی پژوهش‌ها، مؤید اهمیت پارامترهایی مثل ضریب عبور موج، بالاروی و تغییرات حرکت موج در مطالعات موجشکن‌های مستغرق می‌باشد [۱۵]. نویس^۸ و همکاران نیز (۲۰۰۷) در بررسی‌های مشابه، بر اثرگذاری میزان نفوذپذیری موجشکن‌های مستغرق بر سرعت و سایر ویژگی‌های جریان تأکید نمودند [۱۶]. ایده استفاده از مجموعه موائع مستغرق برای کاهش انرژی امواج نیز قابل بررسی است. در یک مطالعه آزمایشگاهی، بانگین^۹ در سال ۲۰۲۰ مجموعه‌ای از مکعب‌های ۵ سانتیمتری با فواصل ۱/۱ سانتیمتر در مسیری به طول ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتیمتر چیدمان نمود و اثر آن را به عنوان مانع مستغرق مورد مطالعه قرار داد. عملکرد این موائع منجر به کاهش ۶۰ تا ۸۰ درصدی ارتفاع موج گردید [۱۷]. سازه‌ها و موائع مستغرق علاوه بر آرام‌سازی سواحل، به منظور تقویت موجشکن‌های موجود و یا بازسازی موجشکن‌های آسیب دیده و یا تخریب شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یک پروژه، برای جلوگیری از گسترش آسیب تاج یک موجشکن آسیب دیده و با هدف کاهش انرژی امواج، از یک موجشکن مستغرق استفاده شد و روند تعمیر سازه آسیب دیده تسهیل گردید [۱۸]. براساس خصوصیات عملکردی مانع مستغرق، بهره‌گیری از آن به عنوان عامل تقویت کننده جلوی موجشکن شکل‌پذیر نیز مناسب به نظر می‌رسد. در طراحی این نوع سازه‌های ترکیبی به اطلاعات دقیق و مهمی مانند مشخصات موج و ویژگی‌های سازه نیاز است. در طرحی، در مقایسه شرایط مختلف، با

ثبت تغییرات بلوك‌های بتی در مواجهه با امواج بود. تکیه بر ثبت دقیق جابه‌جایی و تغییرات لایه آرمور به وسیله پردازش تصویری، رابطه‌ای مستقیم بین افزایش ارتفاع تاج و افزایش ناپایداری هیدرولیکی مشاهده گردید [۱۰]. یوکسل^۴ و همکاران در مطالعه پایداری موجشکن سکویی با پوشش بلوك‌های مکعبی بتی در بخش پایین سکو، عملکرد پایداری شبیه را یکبار با چیدمان دو ردیف منظم مکعب بتی و یکبار با پوشش نامنظم مکعب‌ها بررسی و مقایسه نمودند و چیدمان منظم را در پایداری بلوك‌های آرمور در بخش پایین شبیه سکو مؤثرتر ارزیابی نمودند [۱۱]. در پژوهشی دیگر، گالیاتساتو^۵ و همکاران سازوکار اصلی خرابی موجشکن‌های متداول را عمدتاً ناشی از آسیب لایه آرمور یا آبسستگی پنجه سازه یا بالاروی و روگذری امواج ارزیابی نمودند [۱۲]. انتخاب متغیرهای اصلی و مهم به عنوان پارامترهای ورودی در تخمین آسیب موجشکن، با هدف کاهش تعداد آزمایش‌ها بدون تأثیر بر نتایج، همواره مورد توجه برخی محققان بوده و از طریق روش‌های مختلف مانند روش رگرسیون، مؤلفه‌های اصلی^۶ بررسی شده است [۱۳].

موجشکن‌های تاج‌کوتاه و مستغرق نیز به عنوان سازه‌های مدافع ساحلی برای اتلاف انرژی و کاهش تأثیر امواج بر تأسیسات و شناورهای ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. لی و ژانگ^۷ در قالب یک مدل عددی سه‌بعدی، عبور موج در موجشکن‌های تاج‌کوتاه و مستغرق را برای بررسی تأثیر بر همکنش امواج مورب و موجشکن بر کاهش انرژی پتانسیل امواج، براساس ضریب انتقال انرژی، در سال ۲۰۱۹ شبیه‌سازی نمودند. نکته شایسته توجه در این مطالعه، مدل‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان و ویژگی‌های موج، مانند ضریب عبور موج و تلاطم و اتلاف انرژی موج در پیرامون موجشکن و در نتیجه مکان‌یابی و طراحی

⁴⁻ Yuksel⁵⁻ Galiatsatou⁶⁻ Principal Component Regression (PCR)⁷⁻ Li and Zhang

⁸⁻ Neves
⁹⁻ Bungin

موج شکن توده سنگی در مواجهه با امواج و طوفان دچار ریزش مصالح و جابه جایی سنگ های آرمور شده و تغییر شکل می دهد. این پدیده ممکن است آسیب جدی و ناپایداری سازه را به همراه داشته باشد [۷]. وجود مانع مستغرق در جلوی پنجه، به عنوان تکیه گاه عمل نموده و باعث کاهش ریزش مصالح می گردد، شکل پایدار موج شکن را در محدوده کوچکتری ایجاد کرده و در نهایت باعث کاهش عدد آسیب می گردد. همچنین قرار دادن موج گیر شناور جلوی موج شکن می تواند مشخصه های تهاجمی موج را کاهش دهد. کاربرد عمده این موج شکن ها در استهلاک امواج می باشد. این سازه ها مانند سایر موج شکن ها انرژی موج را با کاهش ارتفاع موج تابشی کاهش داده و باعث حفاظت محدوده سمت ساحل می شوند. در برخورد موج با موج گیر شناور، بخشی از موج بازتاب داده می شود. قسمتی در اثر آشفتگی و شکست مستهلك شده و بخشی نیز از سازه عبور می کند [۲۳]. نیروی اصلی وارد به موج شکن که باعث تغییر شکل و ریزش مصالح می گردد؛ نیروی موج است و در صورت کاهش این نیرو، کاهش انرژی تخریبی آن با توان دوم ارتفاع موج صورت می پذیرد؛ بنابراین موج گیر شناور که در مقابل امواج ایستاده و ارتفاع آن را کاهش می تواند انرژی تخریبی موج و به تبع آن عدد آسیب را کاهش دهد. از این رو، مقایسه بین مانع و موج گیر یا اثر توأم آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و موضوع این مطالعه نیز بر همین مسأله استوار است.

۱-۱- آزمایش ها

هدف مطالعه آزمایشگاهی حاضر، بررسی و ارزیابی تقویت موج شکن توده سنگی شکل پذیر به وسیله مانع مستغرق متصل و موج گیر شناور در فاصله ۵۰ سانتیمتری با تمرکز بر پایداری و میزان آسیب به سازه است. در این مقاله، به منظور بیان ساده تر، از واژگان «مانع، موج گیر و موج شکن» به ترتیب بجای «مانع مستغرق، موج گیر شناور و موج شکن توده سنگی شکل پذیر» استفاده گردیده است.

طراحی یک ردیف موج شکن مستغرق برای استهلاک امواج و حفاظت از سازه توده سنگی موجود در نزدیکی ساحل، این نتیجه حاصل شد که می توان با استفاده از سازه مانع مستغرق، مشخصات وزنی لایه آرمور را در سازه شکل پذیر اصلی کاهش داد [۱۹]. استفاده از موج شکن های ترکیبی و روش هایی مبتنی بر افزایش استهلاک انرژی جریان نیز همیشه مورد توجه بوده است. به طور مثال، در پروژه ای، ترکیب موج شکن های پنوماتیکی و مستغرق با در نظر گرفتن شیب های متعدد جلوی موج شکن براساس مدل های آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت و شیب بهینه حاصل گردید [۲۰]. نتایج حاصل از مدل سازی عددی دیگری برای تجزیه و تحلیل اثر ترکیبی موج شکن مستغرق و پنوماتیکی در کاهش انرژی امواج، حاکی از افزایش قابل ملاحظه ظرفیت استهلاک انرژی تا ۳۵ درصد نسبت به موج شکن منفرد بوده است [۲۱]. لازم به ذکر است در شرایط ویژه و در مواجهه با امواج بلند نیز ایده استفاده از موج شکن های تقویت شده، مورد توجه می باشد. در یک پروژه، تأثیر استفاده از موج شکن های توده سنگی برای مقابله با امواج بلند مورد بررسی قرار گرفت. براساس آزمایش های انجام شده، مقادیر آستانه پارامتر آسیب مورد استفاده برای توصیف خسارت (شروع آسیب، شروع تخریب و تخریب کامل) مشخص گردید. همچنین استفاده از سازه کمکی تأثیر قابل ملاحظه ای بر سطح آسیب سازه اصلی داشت [۲۲].

در ادامه مطالب، تأثیر قرار گیری مانع مستغرق و موج گیر شناور جلوی موج شکن توده سنگی با تمرکز بر عدد آسیب به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. در این مدل سازی، مدافعانه مستغرق به صورت متصل به سازه و موج گیر شناور در فاصله ۵۰ سانتیمتری قرار گرفته و تحت تأثیر امواج تصادفی، رفتار و تغییر شکل موج شکن و عدد آسیب به دست آمده و مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش ها

بر مبنای طیف جانسوپ در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب این طیف، انرژی طیفی بالاست و در نبود یک طیف میدانی در بررسی آزمایشگاهی، یکی از مناسب‌ترین طیف‌ها برای تحقیق می‌باشد. در جدول‌های ۱ و ۲، حدود تغییرات پارامترهای محیطی و سازه‌ای و پارامترهای بدون بعد مورد استفاده در تحقیق ارائه شده است.

رفتار سازه‌های پایدار استاتیکی، توسط تعداد قطعات جابه‌جا شده یا میزان پیشروی آسیب (تفاوت در مقطع عرض سازه قبل و پس از طوفان) مورد بررسی قرار می‌گیرد و پارامتر آسیب (S_d) که با سطح فرسایش یافته مرتبط است، به عنوان پارامتر اصلی در تعیین میزان آسیب در موج‌شکن‌های توده سنگی مطرح می‌شود [۷]. امواج ایجاد شده توسط دستگاه موج‌ساز نیز از نوع طیفی

جدول ۱- محدوده پارامترهای محیطی و سازه‌ای مدل

دامنه تغییرات	نماد	پارامتر
۱۵، ۱۲، ۹	H_s	ارتفاع موج (سانتیمتر)
۱/۵، ۱/۲، ۰/۹	T_p	پریود موج (ثانیه)
۶۰۰۰	N	تعداد امواج به روش قطع تراز صفر رو به بالا
۱/۷	D_{n50}	قطر اسمی مصالح آرمور مدل (سانتیمتر)
۲/۵۵	ρ	جرم مخصوص آرمور (گرم بر سانتیمترمکعب)
۲۵	d_i	عمق آب در محل موج‌شکن (سانتیمتر)
۱/۲۵	$cot \alpha$	شیب اولیه سازه
۱/۲۵	$cota_1$	شیب دیواره مانع مستغرق

جدول ۲- محدوده پارامترهای بدون بعد

دامنه تغییرات	نماد	پارامتر
۱۵	t_A/D_{n50}	نسبت ضخامت لایه آرمور به قطر اسمی
۱/۱۴	D_{n85A}/D_{n15A}	دانه‌بندی مصالح آرمور
۰/۰۷۰ تا ۰/۰۱	s_{om}	تیزی موج
۰/۴	B/d	عرض نسبی تاج مانع
۰/۳۲	h/d	ارتفاع نسبی تاج مانع

مستندنگاری بالاتر باشد؛ ارزیابی ارزشمندتر و به واقعیت نزدیک‌تر می‌گردد. استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه، غیرمخرب است و اندازه‌گیری را منطبق با واقعیت، سرعت و دقت بالا فراهم می‌کند [۲۴]. از این‌رو، با ساخت مدل یکپارچه سه‌بعدی، اندازه‌گیری و تعیین دقیق میزان تغییرشکل موج‌شکن و جابه‌جایی مصالح آرمور در برخورد با امواج امکان‌پذیر می‌شود.

آزمایش‌های حاضر در این پژوهش برای شرایط مختلف ارتفاع موج و پریود موج انجام شده است. یکی از مسائل قابل توجه در انتخاب ارتفاع و پریود امواج، محدوده

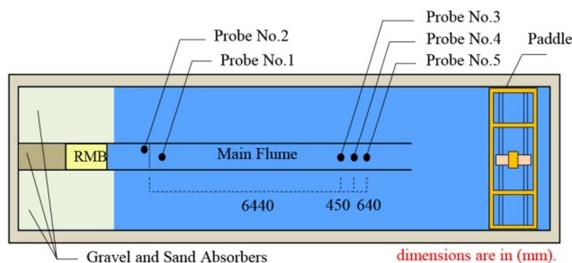
استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه برای رصد رفتار سازه در برابر طوفان، مفید و مناسب است. در فتوگرامتری برد کوتاه، با استفاده از تحلیل تصاویر اخذ شده از فاصله نزدیک، مدل‌های اولیه و تغییرشکل یافته موج‌شکن با قابلیت رصد دقیق تغییرات و جابه‌جایی مصالح با دقت زیاد میسر می‌گردد. از آنجاکه تغییر پروفیل موج‌شکن در مواجهه با امواج، در طول سازه دارای شکل منظم و روند یکسانی نبوده و در حال تغییر است، این امر باعث پیچیدگی ثبت و تحلیل تغییرات می‌شود. بدیهی است به هر میزان کیفیت و دقت داده‌ها در زمان

$$R_e = \frac{\sqrt{gH_s} D_{n50}}{v} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $\sqrt{gH_s}$ نشان دهنده سرعت مشخصه، D_{n50} طول مشخصه و v لزجت سینماتیکی است. کمینه مقدار عدد رینولدز در آزمایش های انجام یافته، $10^{10} \times 1.59$ است و می توان از اثر مقیاس ناشی از لزجت صرف نظر نمود.

۲-۲- فلوم موج و مدل موج شکن

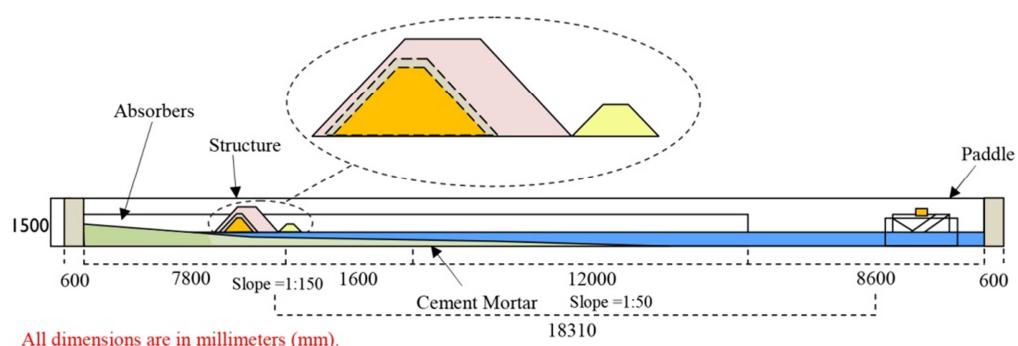
آزمایش های این تحقیق، به صورت دو بعدی در فلوم موج پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به طول ۳۵، عرض ۵ و عمق ۱ متر انجام شد که مشخصات این فلوم در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- پلان فلوم آزمایش و موقعیت مدل و حسگرهای

برای جلوگیری از ایجاد امواج عرضی، فلوم موج توسط دو دیواره به طول $24/5$ و ارتفاع ۱ متر به سه بخش تقسیم شده است. امواج به وسیله بازوی مولد پیستونی قائم به طول $5/5$ و ارتفاع ۱ متر که در انتهای فلوم قرار گرفته، تولید می گردند. این مولد، توانایی تولید امواج منظم و تصادفی با طیف های مختلف را دارد.

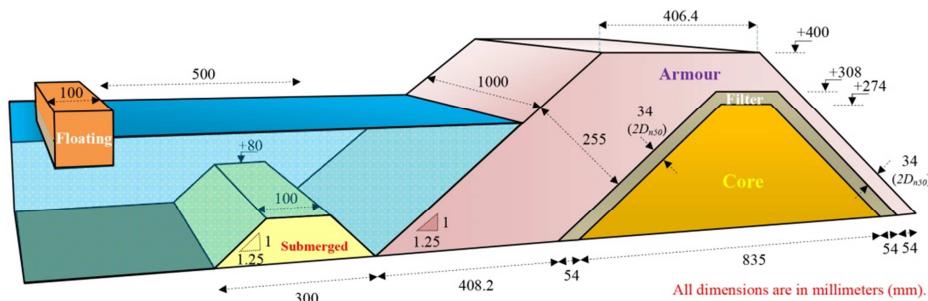
تیزی موج است. ارتفاع و پریود موج باید به گونه ای در نظر گرفته شوند که تیزی موج تولید شده از ترکیب این دو پارامتر، در محدوده پیشنهادی فن در میر (۰/۰۱۵ تا ۰/۰۷) قرار گیرد [۲۵]. برخی تحقیقات نیز تنظیم ترکیب ارتفاع و پریود امواج را در محدوده تیزی بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ پیشنهاد داده است [۲۶]. انتخاب محدوده ارتفاع امواج با توجه به امکانات آزمایشگاه و شرایط عمق و نوع مولد موج، بین ۴ تا ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است؛ زیرا در امواج با ارتفاع کمتر از ۴ سانتیمتر احتمال به وجود آمدن اثرات مقیاس وجود دارد و ارتفاع زیاد امواج نیز ممکن است در محل پارویی مولد موج، به دلیل ایجاد تغییر مکان های بزرگ، در سطح امواج تولید شده باعث آشفتگی شود که این امر، خدشه در صحت داده های برداشت شده را در پی دارد. در این تحقیق صرفا مطالعه امواج ناشکنا صورت گرفته و در حین آزمایش ملاحظه گردید زمانی که ارتفاع موج مؤثر از ۱۵ سانتیمتر فراتر می رود، موج قبل از رسیدن به موج شکسته می شود. در آزمایش های مدل های دریایی، نیروی ثقل به عنوان نیروی غالب در نظر گرفته می شود. اثرات مقیاس که عمدتاً به دلیل مقادیر کوچک عدد رینولدز و رفتار هیدرولیکی متفاوت مدل و نمونه واقعی رخ می دهد؛ باید مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. برای به حداقل رساندن اثر مقیاس و نیروی لزجت، جریان پای سازه باید به اندازه کافی آشفته باشد. بررسی و کنترل این پدیده، با استفاده از رابطه (۱) صورت گرفته است [۲۵]:



شکل ۲- مقطع طولی فلوم و موقعیت مدل آزمایشگاهی موج شکن و مانع و موج گیر

میلیمتر ساخته شده و وزن آن با دقت فراوان به گونه‌ای تنظیم شده که نیمی از عمق آن (با استغراق ۵۰ درصد) به صورت تراز درون آب قرار گیرد و به وسیله کابل‌های سیمی به کف فلوم متصل و مهار شده است. برای جلوگیری از انعکاس نور و بروز خطا در تصویربرداری و ثبت موقعیت مکانی نقاط و پروفیل‌ها، روی سازه مانع با پارچه سفید ضد انعکاس پوشانده شده است. مشخصات موج‌شکن، مانع و موج‌گیر، در شکل ۳ و تصاویر آنها حین ساخت در شکل ۴ نشان داده شده است.

موج‌شکن اصلی به صورت توده سنگی گلپذیر با شبیب دیواره ۱:۱/۲۵ درون فلوم ساخته شده است. جلوی موج‌شکن اصلی رو به امواج، یک مانع مستغرق ذوزنقه‌ای به ارتفاع ۸۰ میلیمتر و شبیب دیواره ۱:۱/۲۵ به صورت متصل به سازه قرار داده شده است. مانع از جنس پلکسی گلس ساخته شده و برای اینکه کاملاً مستغرق و در برابر امواج با ثبات عمل نماید، درون آن به وسیله قطعات و مصالح سنگین کاملاً پر شده است. همچنین موج‌گیر شناوری از جنس پلکسی گلس با ابعاد مقطع ۱۰۰



شکل ۳- ابعاد و فواصل اجزای مدل آزمایشگاهی



شکل ۴- تصاویر مراحل ساخت موج‌شکن، مقطع سازه، مانع مستغرق و موج‌گیر شناور

در مرور مطالعات مشابه، می‌توان مشاهده نمود که بررسی پایداری موج‌شکن عمدتاً در مقطع کناری یا میانی سازه انجام یافته است؛ اما در تحقیق حاضر، با استفاده از تصویربرداری و فتوگرامتری برد کوتاه، امکان تهیه ابر نقاط^{۱۰} و مدل سه‌بعدی یکپارچه^{۱۱} با بافت واقعی و ترازهای مختلف ارتفاعی و در نتیجه قابلیت ایجاد مدل

۳-۲- برداشت داده‌ها و ثبت تغییرات

پیش از انجام هریک از آزمایش‌ها، دستگاه مولد و حسگرهای کالیبره و کنترل شده است. پیش‌فرضهایی نیز در انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است مانند: صرف‌نظر نمودن از امواج ثانویه در روند تولید موج، افقی فرض نمودن بستر دریا، عدم تجمع آب پشت مانع، صرفاً مطالعه عملکرد هیدرولیکی مدل و صرف‌نظر از برخورد امواج بازگشتی از سمت سازه با امواج جدید [۲۷].

¹⁰- Dense Cloud

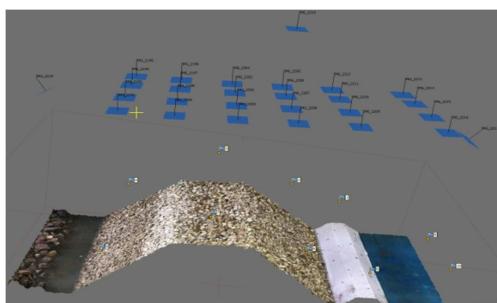
¹¹- Integrated 3D Model

منتقل گردید. برخی از ویژگی های مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار در جدول ۳ ارائه شده است. عکس برداری از روی سازه و با روند منظم و فوائل مشخص انجام شد. برای برداشت هریک از موقعیت های آزمایش بین ۲۵ تا ۲۷ عکس تهیه و به نرم افزار منتقل و مدل سه بعدی ایجاد شد. ثبت موقعیت مارکرها روی فلوم، نمونه ای از موقعیت مارکرها و عکس های ثبت شده از موج شکن در محیط AGISOFT، در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.

کامل موج شکن، قبل و بعد از برخورد امواج فراهم شده است. برای تهیه مدل سه بعدی، ابتدا با برداشت مختصات محدوده موج شکن، به وسیله دوربین نقشه برداری، ۱۱ نقطه کنترل زمینی (مارکر)، مشخص گردید. سپس برای هریک از بخش های مطالعات، قبل از انجام و پس از اتمام آزمایش (و یا پس از برخورد تعداد مشخصی از امواج با سازه)، عکس برداری از سازه موج شکن انجام و تصاویر برای پردازش و رقومی سازی و تهیه بلوك عکس به نرم افزار

جدول ۳- مشخصات مدل تصویری سه بعدی موج شکن

تعداد تصاویر دوربین ها	تعداد نقاط کنترل زمینی (مارکرها)	ابر نقاط متراکم	ارتفاع نقاط گرهی (m)	تعداد دوربین ها (m)	سطح پوشش (m ²)
۲۷	۱۱	۲۰۷۳۶۲۲	۲۰۴۷۱	۱/۱۳	۲/۲۸



(ب)



(الف)

شکل ۵- (الف) ثبت موقعیت نقاط کنترل (مارکرها) روی فلوم و (ب) موقعیت مارکرها و دوربین های تصویربرداری نسبت به موج شکن اصلی و مانع

شکل ۷- ب، همپوشانی تصاویر دوربین ها و در شکل ۷- پ، مدل رقومی ارتفاع نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش ها براساس پارامترهای شاخص، در مطالعه پایداری هیدرولیکی موج شکن شکل پذیر، یکی از مهم ترین بخش های این پژوهش است.

۱-۳- تحلیل امواج

پدال موج ساز از نوع پیستونی است و موج ساز امکان تولید امواج منظم و تصادفی را دارد. حسگرها نیز قابلیت اندازه گیری نوسانات موقعیت سطح آب نسبت به سطح ساکن آب را با دقت بالا دارند. با استفاده از سری زمانی برداشت شده در آزمایش ها، ارتفاع موج برای هر تک موج

همچنین در شکل ۶- الف، مجموعه نقاط گرهی^{۱۲} مشاهده می گردد که می توان آنها را به دلیل اشتراک در دو یا چند تصویر، به عنوان نقاط مرجع^{۱۳} و شاخص برای ساخت مدل در نظر گرفت. در شکل ۶- ب نیز ابر نقاط متراکم^{۱۴} که دارای مختصات سه بعدی و به وجود آور نده سطح خارجی مدل هستند، نشان داده شده است. مطابق جدول ۳، برای هریک از مدل های مورد استفاده در این مطالعه، بیش از بیست هزار نقطه گرهی و بیش از دو میلیون ابر نقطه تعریف شده است. در شکل ۶- پ نیز، مدل نهایی پس از افزودن بافت به سطوح دیده می شود. در شکل ۷- الف، مدل ساخته شده از مجموعه تصاویر، در

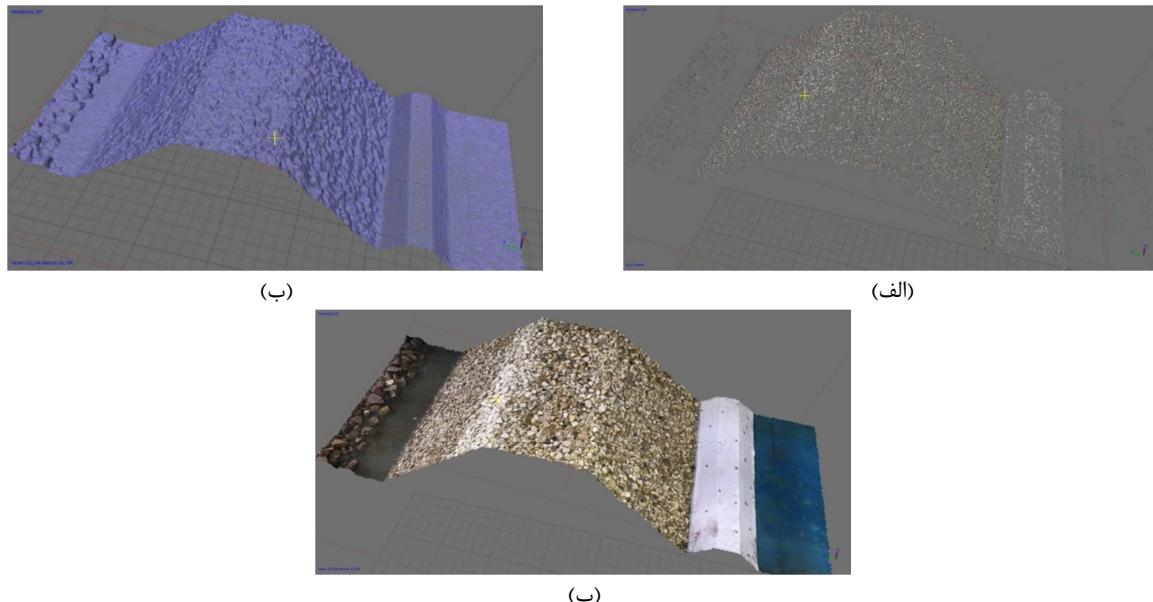
¹²- Tie points

¹³- Reference point

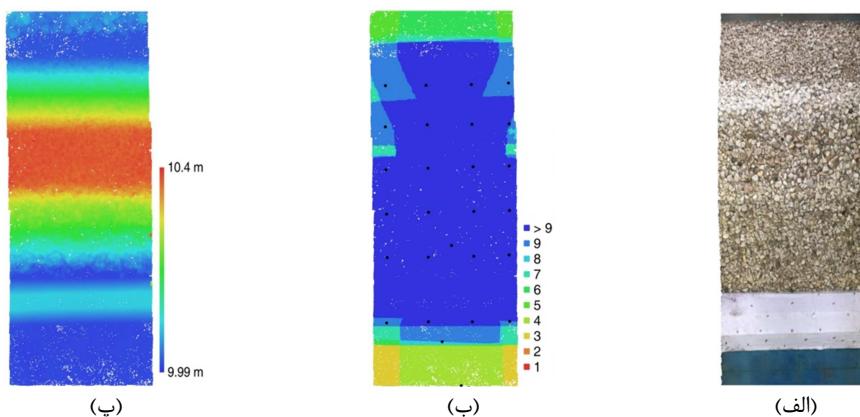
¹⁴- Dense point cloud

به دست می‌آید.

از سری امواج با استفاده از روش قطع تراز صفر رو به بالا

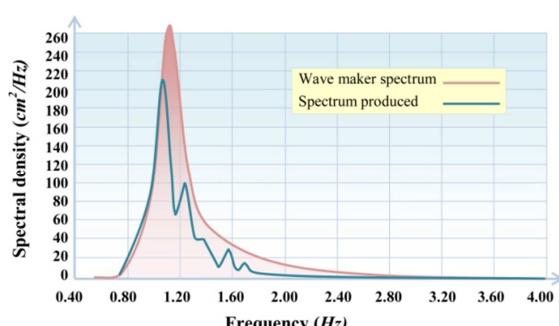


شکل ۶- (الف) مجموعه نقاط گرهی روی مدل، (ب) ابر نقاط متراکم و شبکه یکپارچه مدل و (پ) مدل تکامل یافته و نهایی



شکل ۷- (الف) مدل نهایی، (ب) همپوشانی تعداد دوربین‌ها در برداشت تصاویر و (پ) مدل رقومی ارتفاعی سازه

طول موج و فرکانس حاصل می‌گردد. شکل ۸، طیف جانسوپ و طیف برداشت شده از سطح آب نشان می‌دهد.



شکل ۸- طیف جانسوپ و طیف برداشت شده از سطح آب

در این روش، تقاطع سطح آب در حالت موج با سطح ساکن آب دارای دو نقطه تقاطع است. یکی از این تقاطع‌ها در حالت خیزآب و دیگری، فروآب می‌باشد. فاصله بین دو نقطه تقاطع خیزآب و سطح ساکن آب یک موج را تشکیل می‌دهد. بدین منظور، برنامه‌ای در نرم افزار MATLAB، تهیه شده که از سری زمانی سطح آب، امواج را یک به یک تفکیک کرده و ارتفاع و پریود تک‌تک امواج را ارائه می‌دهد. از روی ارتفاع و پریودهای به دست آمده، ارتفاع بیشینه، ارتفاع موج مؤثر، ارتفاع موج میانگین، پریود بیشینه، پریود موج مؤثر، پریود میانگین،

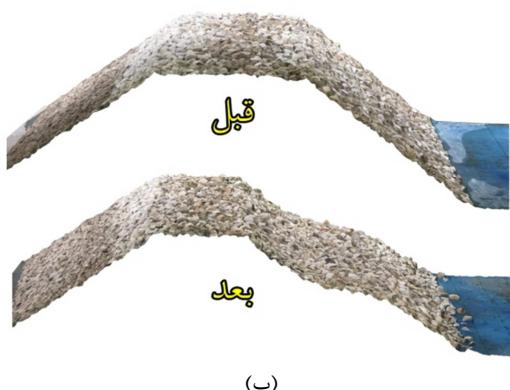
آن موج در شمارش امواج حذف می گردد. طبق آزمایش های انجام یافته، تفاوت این دو عدد از لحاظ تأثیر تعداد امواج بر تغییر شکل موج شکن قابل اعتماد بوده و این موضوع در آزمایش ها کنترل گردیده است.

۲-۳- تحلیل اثر امواج بر تغییر شکل و میزان آسیب

در ابتدا، برای بررسی و مقایسه دقیق عملکرد مانع و موج گیر و ارزیابی تحقق اهداف، موج شکن اصلی (بعنوان شاهد) در معرض برخورد امواج تصادفی قرار گرفت و رفتار و تغییر شکل آرمور و سطح آسیب موج شکن در ارتفاعها و پریوودهای مختلف امواج، مورد بررسی قرار گرفت. عدد آسیب، پارامتر بدون بعدی است که مطابق معادله (۲) مورد استفاده قرار می گیرد [۲۵ و ۲۶]:

$$S_d = \frac{A}{D_{n50}^{\frac{e}{2}}} \quad (2)$$

در رابطه فوق، A_e ، مساحت فرسایش یافته و D_{n50} قطر اسمی لایه آرمور است. در شکل ۹، برداشت هایی از تغییر شکل و جایه جایی مصالح آرمور و پروفیل نهایی سازه از جهات مختلف مشاهده می شود. در شکل ۱۰ نیز، مدل رقومی ساخته شده از موج شکن ساده و موج شکن به همراه مانع با یک برش دلخواه طولی از سازه و نمای مقاطع سازه در برش مذکور، قبل و بعد از آزمایش نشان داده شده است. به دلیل تعداد زیاد تصاویر از درج تمام شکل های مرتبط با آزمایش ها صرف نظر شده است.



(ب)

براساس نتایج حاصل از روش قطع تراز صفر رو به بالا، تفکیک امواج دقیقا ارتفاع موج و پریوود خواسته شده را ارائه نمی دهد و نتایج با مقادیر داده شده از دستگاه موج ساز منطبق نیست. با این حال، از بین سه ارتفاع و پریوود موج متوسط، مؤثر و بیشینه، حالت مؤثر به ارتفاع و پریوود دستگاه نزدیک تر است. این موضوع هم در طیف جانسواپ داده شده به دستگاه موج ساز و طیف ایجاد شده از سطح آب قابل مشاهده است و هم نتایج برنامه تفکیک امواج، مؤید این موضوع است. به عنوان مثال در ارتفاع موج ۱۲ سانتیمتری تعریف شده به دستگاه موج ساز، ارتفاع موج در حالت های متوسط، مؤثر و بیشینه، به ترتیب $5/3$ ، $11/38$ و $15/59$ سانتیمتر حاصل شده است. نتایج تمام آزمایش های انجام یافته این مطلب را تأیید می کند.

بنابراین با تقریب می توان ارتفاع و پریوود داده شده به دستگاه موج ساز را همان ارتفاع و پریوود مؤثر در نظر گرفت. تعداد امواج ایجاد شده از سطح آب نیز کمتر از ۱۲ تعداد مورد انتظار است؛ به عنوان مثال در ارتفاع موج ۱۲ سانتیمتر، پریوود ۱ ثانیه و مدت زمان کار کرد 5400 ثانیه (یک و نیم ساعت)، انتظار ایجاد 5400 تک موج می رود؛ در صورتی که نتایج حاصل روش قطع تراز صفر رو به بالا، 5173 موج را ارائه می دهد. این مسئله بدین دلیل اتفاق می افتد که در موج های بسیار ریز، سطح آب بدون آنکه تراز صفر را قطع کند به موج بعدی منتقل می شود و عملا

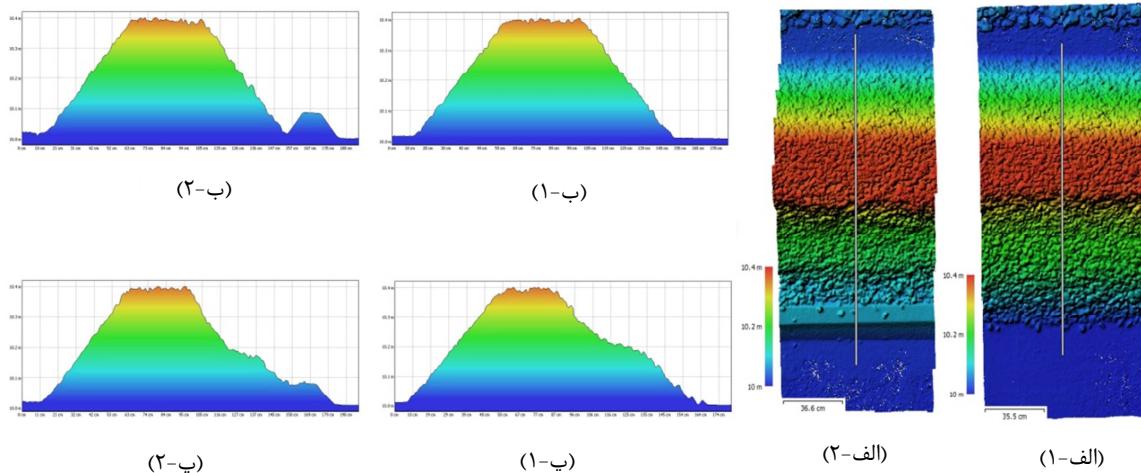


(الف)

شکل ۹- نمایه ای از (الف) ایزومتریک و (ب) مقطع موج شکن بدون مانع قبل و بعد از انجام آزمایش

مانع متصل به موج‌شکن مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی روند پایداری، مقطع سازه با تعداد امواج برخورده بین ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ مورد آزمایش قرار گرفت.

در ادامه، پارامترهای ارتفاع، پریود و تعداد امواج (مدت طوفان) به عنوان مهم‌ترین گزینه‌های مؤثر بر پایداری سازه و رصد میزان فرسایش، در حالت استقرار



شکل ۱۰ - (الف) مدل رقومی ارتفاعی و برش منتخب (ب) مقطع برش منتخب قبل از آزمایش (ج) مقطع برش منتخب پس از آزمایش

که باعث رشد جذب انرژی امواج و کاهش ضریب انعکاس سازه می‌گردد.

اثر ارتفاع‌های مختلف موج بر میزان فرسایش سازه، در پریود ثابت (یک ثانیه) بررسی شد و امواج ۱۵، ۱۲، ۹ و ۳۰۰۰ سانتیمتر توسط پارو به سمت موج‌شکن تولید و میزان فرسایش و تغییرشکل پروفیل در مدت طوفان مؤثر (۳۰۰۰ موج) ثبت گردید. نمودار شکل ۱۱، عدد آسیب (ی بعد) را در برابر ارتفاع موج بی‌بعد که از بین عبارات H/H_{max} ، H/d ، H/gT^2 و H/H_{max} ارتفاع موج، d ، عمق آب، g ، شتاب نقل و T ، پریود موج) انتخاب گردید، به تصویر کشیده است. انتخاب این پارامتر بدین دلیل است که به‌علت محدودیت در تعداد آزمایش‌ها، پریود ثابت بوده و انتخاب T نمی‌تواند منطقی باشد. همچنین تعداد ارتفاع موج‌های انتخابی، سه عدد بوده که از بین این مقادیر، انتخاب بیشینه آن‌ها، نمی‌تواند تعمیمی برای ارتفاع موج‌های متعدد باشد. رابطه بین ارتفاع موج بی‌بعد و عدد آسیب، یک برازش خطی است که به صورت معادله (۳) به‌دست می‌آید:

$$S_d = 1.936 \left(\frac{H}{d} \right) - 0.363 \quad (R^2 = 0.99) \quad (3)$$

با محاسبه عدد آسیب از رابطه (۲)، مشاهده می‌گردد که بیشینه تغییر پروفیل (بیش از ۵۰ درصد) و آسیب به سازه، در اوایل طوفان و مدت زمان برخورد ۱۰۰۰ موج اولیه رخ می‌دهد و فرسایش لایه آرمور تا ۳۰۰۰ موج (اواسط طوفان)، روند افزایشی داشته، پس از آن، روند فرسایش سازه بعد از ۳۰۰۰ موج به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد، این روند کاهشی، تا انتهای طوفان (۶۰۰۰ موج) ادامه یافته و می‌توان مشاهده نمود که در واقع بسیار ناچیز و نامحسوس است. بر این اساس با توجه به اینکه فرسایش، آسیب و تغییر پروفیل موج‌شکن در برخورد ۳۰۰۰ موج به مقطع سازه، به بیش از ۹۰ درصد حد نهایی می‌رسد؛ زمان برخورد ۳۰۰۰ موج را به عنوان مدت زمان تعادل می‌توان در نظر گرفت و در مدل‌های فیزیکی انجام یافته تعداد ۳۰۰۰ موج به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود. پس از ریزش مصالح آرمور و وقوع تغییرشکل اولیه مقطع (۱۰۰۰ موج)، شبیه دیواره در مواجهه با بقیه امواج، ملایم می‌گردد. تغییر پروفیل و ریزش مصالح به تدریج موجب می‌شود سطح تماس و فرسایش بیشتری در روند جذب انرژی امواج ایجاد شود

در ادامه تحقیق، به بررسی مدل تقویت شده به وسیله مانع مستغرق و موج گیر شناور پرداخته شده که آزمایش های این مرحله به شرح ذیل نام گذاری و تعریف شده است:

جدول ۴- پریود موج نسبی و عدد آسیب

T/T_{max}	۰/۶	۰/۸	۱
S	۰/۴۲۸۴	۰/۵۵۶۰	۰/۷۱۳۱

(الف) RB: موج شکن بدون مانع

(ب) RBS: موج شکن تقویت شده با مانع متصل به سازه

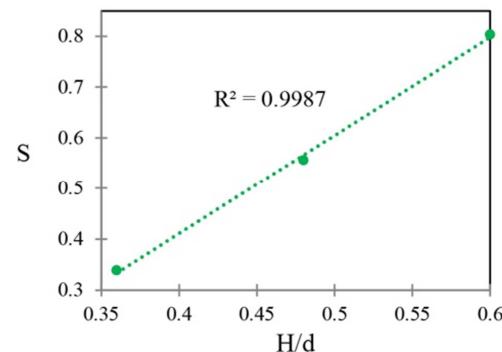
(پ) RBF: موج شکن تقویت شده با موج گیر در فاصله ۵۰ سانتیمتر

(ت) RBSF: موج شکن تقویت شده با مانع متصل به سازه و موج گیر در فاصله ۵۰ سانتیمتر

جدول ۵، عدد آسیب در مقاطع، ارتفاع، پریود و تعداد امواج به دست آمده در آزمایش های انجام یافته را نشان می دهد. در این جدول، H_{wm} ارتفاع موج تعریف شده به موج ساز، H_s ارتفاع موج مؤثر برداشت شده از سطح آب، T_s پریود موج تعریف شده به موج ساز، N تعداد امواج پرداشت شده از سطح آب مورد انتظار و N_{pr} تعداد امواج برداشت شده از سطح آب است.

شکل ۱۲، پروفیل نهایی سازه در هر یک از مقاطع عرضی را به طور یکجا برای آزمایش RBSF نشان می دهد. نتایج تصویربرداری، تغییرشکل سه بعدی را بر مبنای تغییرشکل نقاط شاخص ارائه داده و با مقطع زدن در هر تصویر، مساحت ریزش کرده (A_e) و در نتیجه عدد آسیب به دست می آید. شکل ۱۳، پروفیل تغییرشکل یافته موج شکن در تمام حالت های آزمایش را نشان می دهد. بر مبنای اعداد جدول ۵، عدد آسیب در موج شکن، تحت امواج تصادفی برابر با ۱/۱۱۶ به دست آمده است. همانطور که در جدول مشاهده می گردد،

با توجه به کم بودن تعداد نقاط، این معادله صرفاً یک تخمین اولیه می باشد و نمی توان در حالت کلی به آن استناد نمود. بر مبنای این اعداد، به ازای رشد ارتفاع موج نسبی از ۰/۳۶ به ۰/۴۸ و از ۰/۶ به ۰/۴۸، عدد آسیب به ترتیب ۳۹/۱۲ و ۴۴/۴۴ درصد افزایش می باید. در ارتفاع ۱۵ سانتیمتر، سرریزی موج از روی موج شکن ملاحظه گردید. از این رو، از ارتفاع موج ۱۲ سانتیمتر، در مدل های فیزیکی استفاده شد.



شکل ۱۱- نمودار رابطه عدد آسیب با ارتفاع موج

بررسی پریود امواج نیز به عنوان پارامتری مؤثر بر پایداری موج شکن مؤید این امر است که در یک ارتفاع ثابت موج، با افزایش پریود موج، مقدار فرسایش نیز افزایش می باید. در جدول ۴، اعداد پریود موج نسبی (پریود بر حداکثر پریود) و عدد آسیب مشاهده می شود. این اعداد نشان می دهد که به ازای رشد پریود موج نسبی از ۰/۶ به ۰/۸ و از ۰/۸ به ۱، عدد آسیب ۲۲/۹۴ و ۲۶/۲۸ را درصد افزایش می باید. با این اعداد ملاحظه می شود که افزایش پریود، عدد آسیب را افزایش می دهد ولی افزایش ارتفاع موج، اثر بیشتری دارد. در پریود موج ۰/۹ ثانیه، تیزی موج زیاد بوده و بعضی ملاحظه گردید که قبل از رسیدن موج به موج شکن، شکست موج اتفاق می افتد و برای پریود موج ۱/۵ ثانیه، تعداد امواج تابشی در مدت زمان معین کاهش می باید. از این رو، از پریود موج ۱/۲ سانتیمتر، در مدل های فیزیکی استفاده گردید.

۳-۳- بررسی و مقایسه مدل های تقویت شده

بیشترین عدد آسیب در بین مقاطع برداشت شده مربوط به مقطع ۲۰ سانتیمتری از دیواره می‌باشد.

جدول ۵- عدد آسیب در مقاطع، ارتفاع، پریود و تعداد امواج به دست آمده در آزمایش‌های انجام یافته

	$H(cm)$		$T(s)$		N		S											
	H_{wm}	H_s	T_{wm}	T_s	N_0	N_{pr}	S_{10}	S_{20}	S_{30}	S_{40}	S_{50}	S_{60}	S_{70}	S_{80}	S_{max}	$S_{min (final)}$		
RB	۱۲	۱۱/۵۲	۱	۰/۹۵	۳۰۰۰	۲۷۸۳	۱/۰۳۳	۱/۱۱۶	۱/۰۷۵	۱/۰۹۹	۱/۰۴۸	۱/۰۱۴	۱/۰۱۷	۰/۹۵۹	۱/۱۱۶			
RBS	۱۲	۱۱/۲۹	۱	۰/۹۶	۳۰۰۰	۲۹۵۳	۰/۶۲۶	۰/۵۷۴	۰/۵۷۲	۰/۷۰۱	۰/۶۹۹	۰/۶۹۸	۰/۶۶۰	۰/۵۱۶	۰/۷۰۱	۰/۵۳۸		
RBF	۱۲	۱۱/۲۹	۱	۰/۹۴	۳۰۰۰	۲۷۰۹	۰/۵۴۹	۰/۶۲۹	۰/۶۶۷	۰/۶۲۸	۰/۶۰۱	۰/۵۷۶	۰/۷۳۵	۰/۵۰۳	۰/۷۳۵			
RBSF	۱۲	۱۱/۵۹	۱	۰/۹۷	۳۰۰۰	۲۷۸۷	۰/۵۰۲	۰/۴۸۶	۰/۴۴۳	۰/۴۸۵	۰/۴۷۲	۰/۵۳۸	۰/۴۳۳	۰/۴۸۰	۰/۵۳۸			

به کارگیری مانع، با کاهش ۳۷/۱۹ درصدی، عدد آسیب را به ۰/۷۰۱ تقلیل داده و به کارگیری موج‌گیر، عدد آسیب را به ۰/۷۳۵ (معادل ۳۴/۱۴ درصد) کاهش داده است. بنابراین از بین مانع و موج‌گیر، مانع تأثیر بهتری داشته است. استفاده از مانع همزمان با موج‌گیر، عدد آسیب را ۵۱/۷۹ درصد کاهش می‌دهد. از لحاظ فیزیکی، می‌توان تصور نمود که در به کارگیری مانع متصل به سازه، تکیه‌گاهی برای موج‌شکن ایجاد شده که در برابر لغزش و واژگونی مؤثر بوده و مقداری از بخش فرسایش یافته با آن برخورد کرده و متوقف می‌شود. طبیعتاً همزمانی به کارگیری مانع و موج‌گیر بیشترین تأثیر را داشته و موج با انرژی کاهش یافته به موج‌شکن دارای مانع موجود برخورد می‌کند. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که کاهش ۵۱/۷۹ درصدی در عدد آسیب، می‌تواند در کاهش ابعاد موج‌شکن و به تبع آن کاهش قابل ملاحظه هزینه‌ها منجر شود.

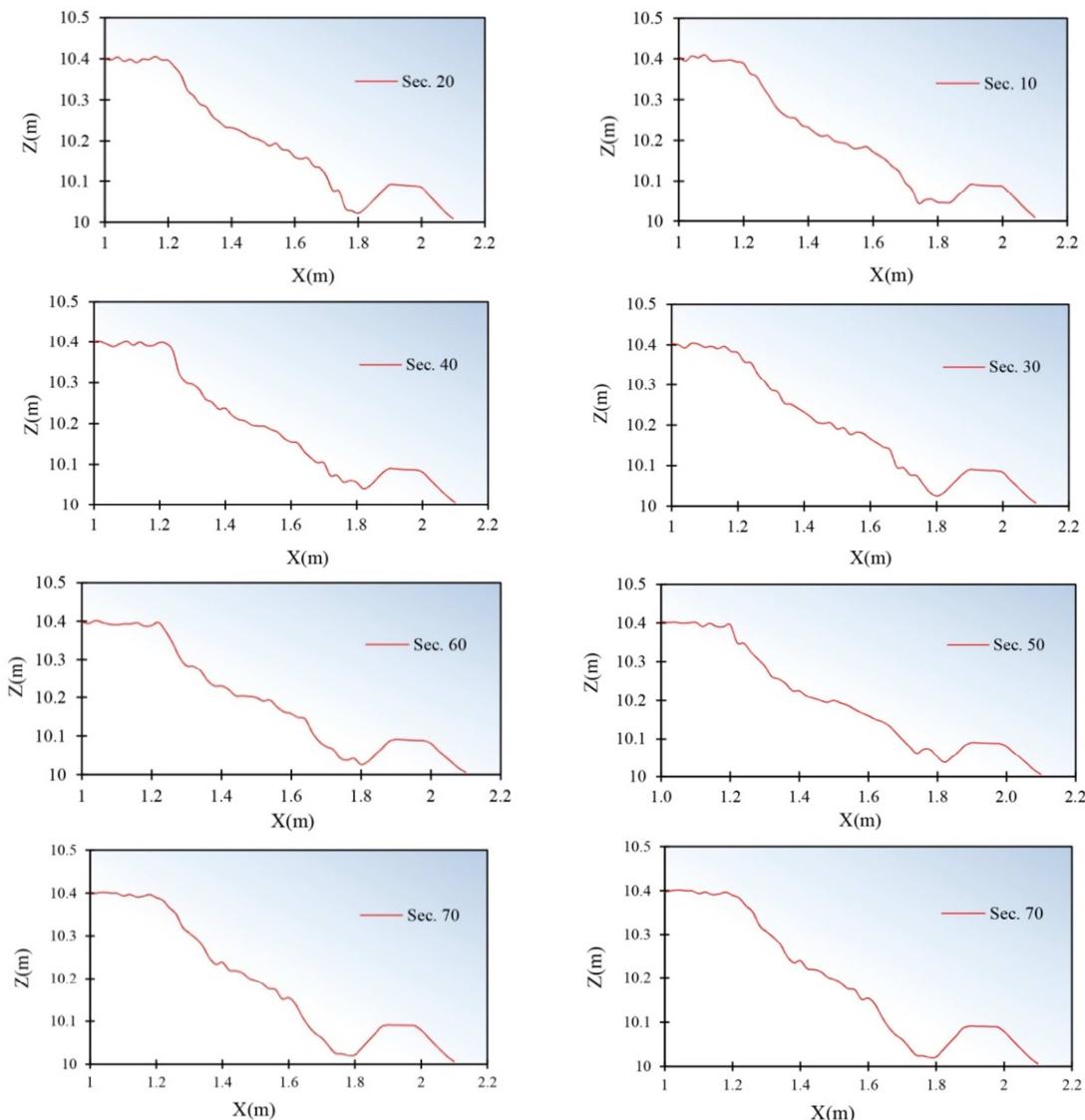
همانطور که در نمودار شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد؛ در تمام آزمایش‌های مدل تقویت شده موج‌شکن در این تحقیق، بخش پایین منحنی تغییرشکل آرمور، به علت برخورد با مدافع مستغرق متوقف شده و این رخداد، حاکی از عملکرد مطلوب و قابل قبول مانع مستغرق است که از

این موضوع به خاطر پیچیدگی رفتار موج در برخورد به موج‌شکن بوده که موج در برخورد به سنگ‌های درشت لایه آرمور، در جهت عرضی نیز حرکاتی را موجب می‌گردد. به علاوه به دلیل اغتشاش جریان در این ناحیه، حرکت‌های نامنظمی در لایه آرمور شکل می‌گیرد؛ بنابراین صرفاً با انتخاب یک مقطع در موج‌شکن برای بررسی پایداری نمی‌توان قضایت دقیق و صحیحی داشت و برای ارزیابی بهتر، بایستی تعداد مقاطع بیشتری در نظر گرفته شود. با تکیه بر قابلیت‌های مدل رقومی سه‌بعدی و با نگاه به اعداد جدول ۵ که برای آزمایش‌های مختلف، S_{10} تا S_{80} را در تمام مقاطع بررسی و محاسبه نموده، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط مختلف، میزان آسیب به بخش‌های مختلف سازه متفاوت است. به عنوان مثال در آزمایش RB، مقطع S_{20} در آزمایش RBS، مقطع S_{40} در آزمایش RBF، مقطع S_{70} در آزمایش RBSF و مقطع S_{60} حائز بیشترین مقدار عدد آسیب است.

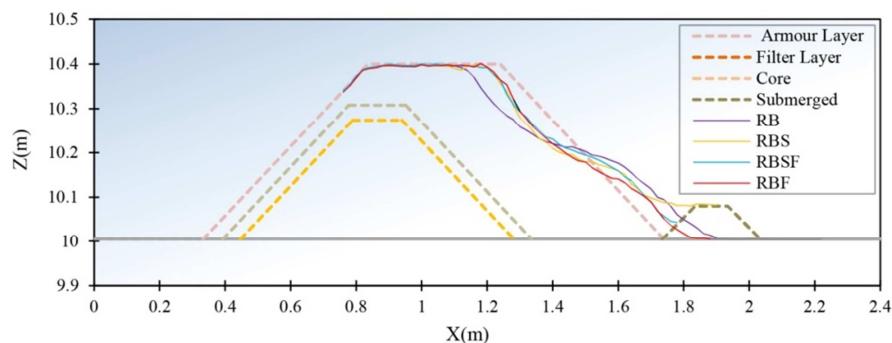
مجدداً تاکید می‌گردد که این موضوع به دلیل پیچیدگی رفتار موج و اغتشاشات سطح آب در جلوی موج‌شکن می‌باشد و به نظر می‌رسد در حالت تابش موج در حالت غیر عمود بر سازه (که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار نگرفته است)، اهمیت بیشتری نیز پیدا کند.

تقریباً به وسط شیب مدافع برخورد کرده و ریزش آرمور با حضور مانع به عنوان تکیه گاه، به طور کامل متوقف شده است.

پیشروی فرسایش و تغییر شکل به سمت دریا جلوگیری نموده است. در این شکل، بررسی تغییر شکل لایه آرمور مربوط به آزمایش تقویت موج شکن به وسیله مانع و موج گیر به صورت همزمان، نشان می دهد که منحنی

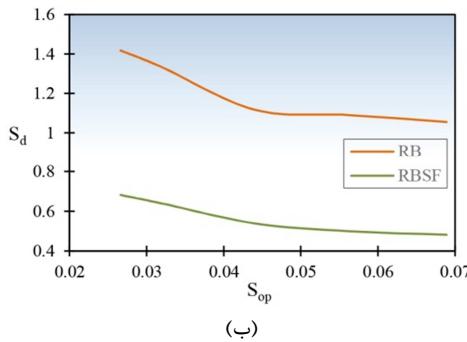


شکل ۱۲ - پروفیل تغییر شکل یافته موج شکن در هر یک از مقاطع عرضی در مدل RBSF



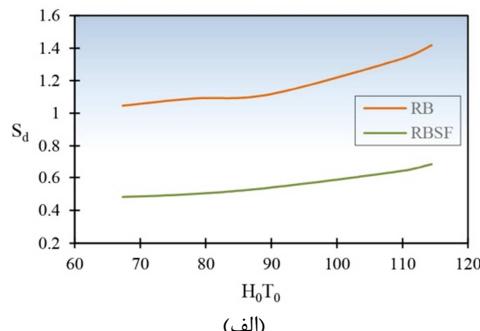
شکل ۱۳ - پروفیل تغییر شکل یافته موج شکن در تمام حالت های آزمایش

ویژگی‌های امواج بهشمار می‌آیند و با توجه به تغییرات بهوجود آمده در آزمایش مدل تقویت شده بهوسیله مانع و موج‌گیر، در شکل ۱۴ به آن پرداخته شده است.



(ب)

بنا به اهمیت پارامترهای شاخص پایداری و تیزی موج در مطالعات مربوط به موج‌شکن‌ها، بررسی رفتار متقابل این پارامترها و عدد آسیب در آزمایش مدل‌های مختلف، مفید بهنظر می‌رسد. این پارامترها در زمرة



(الف)

شکل ۱۴- رابطه (الف) شاخص پایداری و (ب) تیزی موج با پارامتر آسیب

آسیب در هر مقطع از موج‌شکن را با دقت بالا بهدست آورد.

۲- در تحلیل اثر امواج بر موج‌شکن، مشاهده می‌گردد که در مدت برخورد ۱۰۰۰ موج اولیه، بیشینه تغییر پروفیل (بیش از ۵۰ درصد) رخ می‌دهد و فرسایش لایه آرمور تا ۳۰۰۰ موج، روند افزایشی داشته و پس از آن روند فرسایش بهطور محسوسی کاهش می‌یابد و عملاً ناچیز است.

۳- بر این اساس با توجه به اینکه فرسایش و تغییر پروفیل موج‌شکن در مدت زمان برخورد ۳۰۰۰ موج به مقطع سازه، به بیش از ۹۰ درصد حد نهایی می‌رسد؛ می‌توان آن را به عنوان زمان تعادل فرض نمود.

۴- با افزایش ارتفاع موج عدد آسیب افزایش می‌یابد بهطوری که، به ازای رشد ارتفاع موج نسبی از ۰/۳۶ به ۰/۴۸ و از ۰/۴۸ به ۰/۶، عدد آسیب به ترتیب ۴۴/۴۴ و ۳۹/۱۲ درصد افزایش می‌یابد.

۵- افزایش پریود نیز پارامتر آسیب را افزایش می‌دهد و به ازای رشد پریود موج نسبی از ۰/۸ به ۰/۸ و از ۲۸/۲۶ به ۱، عدد آسیب به ترتیب ۲۲/۹۴ و ۲۲/۹۴ درصد افزایش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۱۴- الف مشاهده می‌گردد با افزایش شاخص پایداری، پارامتر آسیب نیز افزایش می‌یابد و مقایسه آزمایش‌های موج‌شکن ساده و مدل تقویت شده (با مانع و موج‌گیر) نشان می‌دهد که اعداد آسیب مدل تقویت شده در مقادیر مختلف شاخص پایداری کوچکتر از مدل ساده می‌باشد. در بررسی تغییرات عدد آسیب و تیزی موج نیز، در شکل ۱۴- ب ملاحظه می‌گردد که با افزایش تیزی موج، عدد آسیب کاهش می‌یابد و مطابق شکل، در محدوده مقادیر کوچک تیزی، کاهش پارامتر آسیب چشمگیرتر و در اعداد تیزی بزرگتر، روند کاهش آهسته‌تر می‌باشد. مشابه شکل ۱۴- الف، همان تقاضا رفتار بین موج‌شکن با (و بدون) موانع نیز قابل توجه است.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی تقویت موج‌شکن توده‌سنگی بهوسیله مانع مستغرق و موج‌گیر شناور با هدف ارتقای پایداری و کاهش آسیب پرداخته است. نتایج شاخص این بررسی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

۱- استفاده از تصویربرداری فتوگرامتری برد کوتاه و ساخت مدل سه‌بعدی تغییرشکل موج‌شکن، روشی مؤثر بوده و می‌توان از طریق آن پارامتر

- می دهد. کاهش این پارامتر و ارتقای پایداری سازه، می تواند منجر به کاهش ابعاد موج شکن و به تبع آن کاهش قابل ملاحظه هزینه ها گردد.
- ^۹- بررسی رفتار پارامتر آسیب و شاخص پایداری در مدل های اولیه و تقویت شده، بیانگر روند همسو و افزایشی تغییرات این دو پارامتر می باشد.
- ^{۱۰}- مطالعه عملکرد متقابل تیزی موج و پارامتر آسیب، نشان دهنده کاهش عدد آسیب با افزایش مقادیر تیزی موج می باشد.
- ^{۱۱}- همسو با مطالعات این تحقیق و در قالب پیشنهادات آتی، می توان تأثیر تغییرات عرض مانع مستغرق و یا تغییر فاصله استقرار موج گیر شناور را بر میزان پایداری موج شکن و آسیب واردہ به سازه مورد بررسی قرار داد.

۶- بر مبنای مشاهدات و همچنین نتایج آزمایش ها، میزان آسیب در مقاطع عرضی با هم تفاوت داشته و قطعاً نمی توان مقاطع میانی را به عنوان مقاطع پیشنهادی برای بررسی پایداری معرفی نمود.

۷- در آزمایش مدل های فیزیکی، به کار گیری مانع، پارامتر آسیب را به ۰/۷۰۱ (۳۷/۱۹ درصد) تقلیل داده و استفاده از موج گیر، موجب کاهش پارامتر آسیب به ۰/۷۳۵ (برابر با ۳۴/۱۴ درصد) می شود که نشان دهنده عملکرد مطلوب اجزای تقویت کننده در کاهش آسیب موج شکن است و مقایسه عملکرد این اجزا، تأثیر بهتر مانع نسبت به موج گیر را نتیجه می دهد.

۸- به کار گیری همزمان مانع و موج گیر برای تقویت موج شکن، پارامتر آسیب را ۵۱/۷۹ درصد کاهش

مراجع

- [1] Ghanbarian, M. (2010). "Rubble-Mound Breakwaters Vol.1: Types of Breakwaters, Principles, and Overview", Khatam Al-Anbiya Construction Headquarter.
- [2] Da Silva, R. F., Sayao, O., & Conceicao, L. P. (2016). "Analysis of Rubble-Mound Breakwater Damage: Case Study of Existing Breakwater Rehabilitation", *IX Pinac Copedec Conference*.
- [3] Shafeefar, M., Shakeri, M. R., & Hofland, B. (2020). "Influence of Toe Berm Geometry on Stability of Reshaping Berm Breakwaters", *Coastal Engineering*, 157, 103636.
- [4] Lamberti, A., Tomasicchio, G.R., & Guiducci, F. (1994). "Reshaping Breakwaters in Deep and Shallow Water Conditions", *Proceeding of 24th International Conference on Coastal Engineering*, Kobe, Japan, ASCE, 1343-1358.
- [5] Nassiraei, H., Heidarzade, M., Shafeefar, M. (2016). "Numerical Simulation of Long Waves (Tsunami) Forces on Caisson Breakwaters", *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32.2(3.2), 3-12.
- [6] Lotfollahi-Yaghin, M.A., & Nassiraei, H. (2016). "Numerical Simulation of Tsunami Waves Forces on Coastal Structures", *Journal of Oceanography*, 6(24), 23-30.
- [7] Mousavi, Sh. (2010). "Rubble-Mound Breakwaters Vol.2: Design of Rubble-Mound Breakwaters", Khatam Al-Anbiya Construction Headquarter.
- [8] Campos, A., Castillo, C., & Sánchez, R. (2020). "Damage in Rubble-Mound Breakwaters. Part I: Historical Review of Damage Models", *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 317.
- [9] Ehsani, M., Moghim, M., & Shafeefar, M. (2020). "An Experimental Study on the Hydraulic Stability of Icelandic Type Berm Breakwaters", *Coastal Engineering*, 156, 103599.
- [10] Vieira, F., Taveira-Pinto, F., & Rosa-Santos, P. (2021). "Damage Evolution in Single-Layer Cube Armoured Breakwaters with a Regular Placement Pattern", *Coastal Engineering*, 169, 103943.
- [11] Yuksel, Y., Cevik, E., Van Gent M. R. A., Sahin, C., & Altunsu, A. (2020). "Stability of Berm Type Breakwater with Cube Blocks in the Lower Slope and Berm", *Ocean Engineering*, 217, 107985.
- [12] Galiatsatou, P., Makris, C., & Prinos, P. (2018). "Optimized Reliability Based Upgrading of Rubble-Mound Breakwaters in a Changing Climate", *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(3), 92.
- [13] Janardhan, P., Harish, N., Rao, S., & Shirral, K. G. (2015) "Performance of Variable Selection Method for the Damage Level Prediction of Reshaped Berm Breakwater", *ICWRCOE 2015*, Aquatic Procedia, 4, 302- 307.

- [14] Li, X., & Zhang, W. (2019). "3D Numerical Simulation of Wave Transmission for Low-Crested and Submerged Breakwaters", *Coastal Engineering*, 156, 103517.
- [15] Twu, S. W., Liu, C. C., & Hsu, W. H. (2001). "Wave Damping Characteristics of Deeply Submerged Breakwaters", *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 127(2), 97-105.
- [16] Neves, A., Veloso-Gomes, F., & Taveira-Pinto, F. (2007). "Analysis of the Wave-Flow Interaction with Submerged Breakwaters", *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 46, 147-154.
- [17] Bungin, E. R. (2021). "The Effect of Square Submerged Breakwater on Wave Transmission in the Coastal Area", *AC2SET 2020*, IOP Conference series: Materials Science and Engineering.
- [18] Tulsi, K., & Phelp, D. (2009). "Monitoring and Maintenance of Breakwaters which Protect Port Entrances", *28th Annual Transport Conference (SATC) 2009*, Pretoria, South Africa, 317-325.
- [19] Stefanutti Stocks, M. (2015). "Rubble-Mound Breakwater vs. Tandem Breakwater Cost Estimation", Cape Town, Stefanutti Stocks Marine.
- [20] He, F., Huang, Z., & Law, A.W. (2012). "Hydrodynamic Performance of a Rectangular Floating Breakwater with and without Pneumatic Chambers: An Experimental Study", *Ocean Engineering*, 51(1), 16-27.
- [21] Tiao-Jian, X., Xiao-Rong, W., Wei-Jun G., Guo-Hai, D., & Hui-Min, H. (2020). "Numerical Simulation of Combined effect of Pneumatic Breakwater and Submerged Breakwater on Wave Damping", *Ships and Offshore Structures*, 1-15.
- [22] Quiroga, I., Vidal, C., Lara, J., Gonzalez, M. & Sainz, A. (2018). "Stability of Rubble-Mound Breakwaters under Tsunami First Impact and Overflow Based on Laboratory Experiments", *Coastal Engineering*, 135, 39-54.
- [23] Hakimzadeh, H., & Kabiri, A. (2018). "Numerical Investigation into Effect of Geometries of Floating Breakwaters Having the Same Draft and Mass on their Efficiencies", *Marine Engineering*, 14(27), 81-94.
- [24] Mohammadzadeh, M. R., Arefi, H., & Alidoost, F. (2018). "Comprehensive Evaluation of Modeling and Surface Simplification Methods for 3D Building Reconstruction from Dense Point Cloud", *Journal of Geomatics Science and Technology*, 7(4), 163-175.
- [25] Van Der Meer, J.W. (1988). "Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack", PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft Hydraulics Communication.
- [26] Andersen, T. L. (2006). "Hydraulic Response of Rubble-Mound Breakwaters: Scale Effects - Berm Breakwaters", *Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering Aalborg University*.
- [27] Ataie Ashtiani, B. (2006). *Coastal Engineering (Coastal Hydrodynamics)*. ACECR, Amirkabir University of Technology Branch.