

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر فاصله مانع سکویی مستغرق جلوی موج‌شکن توده‌سنگی شکل‌پذیر در کاهش عدد آسیب

محمدتقی اعلمی^{۱*}، رامین وفاپور سرخابی^۲، علیرضا ناصری^۳، علیرضا مجتهدی^۴

^۱ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

^۳ دانشجوی دکتری آب و سازه‌های هیدرولیکی، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تبریز

^۴ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۱۴۰۲/۲/۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۸، نشر آنلاین: ۱۴۰۳/۳/۸)

چکیده

هدف از مطالعه حاضر، بررسی آزمایشگاهی تأثیر وجود مدافع سکویی مستغرق در پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر و تعیین فاصله بهینه مدافع از موج‌شکن، با تکیه بر عدد آسیب می‌باشد. آزمایش‌های تحقیق در فلوم (Flume) موج‌ساز ۳۵ متری پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام یافت و امواج اثرگذار بر موج‌شکن از نوع تصادفی با طیف جانسواپ (JONSWAP) در نظر گرفته شد. به وسیله روش فتوگرامتری (Photogrammetry) برد کوتاه و با ساخت مدل موج‌شکن، تغییر شکل سازه بر مبنای برداشت جابه‌جایی مصالح در نقاط شاخص انجام و تغییر پروفیل موج‌شکن ترسیم و مساحت فرسایش یافته و عدد آسیب، در ۸ مقطع عرضی، در فواصل یکسان به دست آمد. بر مبنای آزمایش‌های انجام یافته، با تحلیل اثر تعداد امواج برخوردکننده به موج‌شکن، ۳۰۰۰ موج برای رسیدن به حالت پایدار، در نظر گرفته شد. به‌ازای رشد ارتفاع موج نسبی از ۰/۳۶ به ۰/۴۸ و از ۰/۴۸ به ۰/۶، عدد آسیب به ترتیب ۳۹/۱۲ و ۴۴/۴۴ درصد و به‌ازای رشد پریود موج نسبی از ۰/۶ به ۰/۸ و از ۰/۸ به ۰/۱۰، عدد آسیب به ترتیب ۲۲/۹۴ و ۲۸/۲۶ درصد افزایش می‌یابد. با به‌کارگیری مانع متصل جلوی سازه، عدد آسیب ۰/۷۰۱ و در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری اعداد آسیب به ترتیب ۰/۶۷۹، ۰/۷۶۸، ۰/۸۲۶ و ۰/۹۹۳ می‌گردد که فاصله ۵ سانتی‌متری مدافع از موج‌شکن بیش‌ترین تأثیر و کم‌ترین عدد آسیب را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که وجود مانع در این فاصله، باعث کاهش ۳۹/۱۵ درصدی عدد آسیب می‌شود. از این‌رو بر مبنای مطالعه آزمایشگاهی انجام‌یافته در این تحقیق، فاصله ۵ سانتی‌متری مدافع مستغرق از موج‌شکن شکل‌پذیر توده‌سنگی به‌عنوان بهترین فاصله پیشنهاد می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: موج‌شکن توده‌سنگی، موج تصادفی، عدد آسیب، مانع مستغرق، فتوگرامتری.

۱- مقدمه

(قنبریان، ۱۳۸۹). تاکنون مسائلی از قبیل پایداری لایه آرمور و ابعاد سازه در موج‌شکن‌های توده سنگی شکل‌پذیر به کرات مورد آزمایش قرار گرفته است. به‌طور مثال در یک مطالعه، رابطه ویژگی‌های سازه مانند شیب دیواره، عرض تاج و ارتفاع موج‌شکن با رفتار موج مهاجم بررسی گردید (Da Silva و Sayao، ۲۰۱۶). مدل‌سازی‌های دیگری نیز، با تأکید بر اهمیت وضعیت عمق آب پای سازه و شرایط آب کم‌عمق (که اکثر موج‌شکن‌ها در این محدوده قرار می‌گیرند)، نشان داد که ضرایب کاهش

موج‌شکن‌های توده‌سنگی، به‌منظور استهلاک انرژی امواج دریا، ایجاد و باعث جلوگیری از آسیب به تأسیسات و مناطق ساحلی می‌شوند. این سازه‌ها عموماً از سه لایه اصلی هسته، فیلتر و آرمور^۱ تشکیل می‌شوند (خسروی بابادی و همکاران، ۱۳۹۶). موج‌شکن‌های توده سنگی شکل‌پذیر، به‌گونه‌ای طرح و اجرا می‌شوند که با پدید آوردن نیم‌رخ پایدار برای سازه، نیروهای هیدرودینامیکی وارده از طرف امواج را به حداقل برسانند

1. Armor

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۴۰۱۳۴۸۸

آدرس ایمیل: alireza1naseri@gmail.com (ع. ناصری)، mtaalami@tabrizu.ac.ir (م. ت. اعلمی)، raminvafaei@yahoo.com (ر. وفاپور)،

a.mojtahedi@tabrizu.ac.ir (ع. مجتهدی).

تغییر شکل نیمرخ نهایی علاوه بر ارتفاع موج، به عمق شکست، تیزی موج، و شیب کف نیز مرتبط است (Lamberti و همکاران، ۱۹۹۴). همچنین در بخشی از مدل سازی عددی نیروهای وارده از طرف امواج بلند بر موج شکن های کیسونی^۲، تأثیر جانمایی موج شکن در طول بستر شیب دار، بر مقدار نیروهای وارده به آن، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که با حرکت سازه به سمت ساحل (به علت کاهش در عمق آب، سرعت، طول موج و سطح فشار)، نیروهای وارده 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 (نصیرائی و همکاران، ۱۳۹۵). توان موج شکن ها و سازه های ساحلی برای کاهش انرژی امواج، الگوی اصلی در طرح و ساخت می باشد. در مطالعه عددی نیروهای ناشی از امواج سونامی بر سازه های ساحلی، روابطی برای محاسبه اندازه نیروهای وارده از طرف امواج شکنا و ناشکنای سونامی بر موج شکن های کیسونی، دیوارهای ساحلی با زاویه ۴۵ درجه و دیوارهای ساحلی با شعاع انحنا مختلف ارائه شد. نتایج این مدل سازی حاکی از نقش مؤثرتر سازه های دارای انحناء در کاهش نیروهای اعمالی از سوی امواج، نسبت به دیگر سازه های مورد بررسی بود. از نکات قابل توجه در این بررسی، می توان به کاهش یافتن نیروی وارده از امواج با افزایش شعاع انحنا سازه اشاره نمود (لطف اللهی یقین و نصیرائی، ۱۳۹۴).

آسیب موج شکن، نشانگر تخریب (کلی و یا جزئی) سازه و بی ثباتی هیدرولیکی در برابر امواج است (موسوی، ۱۳۸۹). مدل سازی پیشرفت آسیب و بررسی پارامترهای شاخص این فرآیند، بر بهبود عملکرد و افزایش عمر موج شکن مؤثر است. پیشرفت آسیب در لایه آرمور به دلیل ماهیت تصادفی برخورد امواج، پیچیده است؛ لذا رصد عملکرد سازه به وسیله روش های دقیق تصویربرداری، بسیار مفید و حائز اهمیت است (Campos و همکاران، ۲۰۲۰).

در بررسی پایداری موج شکن های شکل پذیر بر حسب پارامتر تشابه شکست، نفوذپذیری سازه، تأثیر بسزایی در پایداری هیدرولیکی سازه دارد (Sayao، ۱۹۹۸). ابعاد سنگ های مورد استفاده در موج شکن نیز با میزان آسیب آرمور در برابر امواج مرتبط است. آزمایش ها، نشان داده است که با کوچک شدن ابعاد سنگ ها، میزان آسیب وارده به آنها افزایش می یابد (Rao و Pramod، ۲۰۰۳). همچنین در مطالعه دیگری، سازوکار اصلی خرابی موج شکن های متداول، عمدتاً ناشی از آسیب لایه آرمور یا آب شستگی پنجه سازه یا بالاروی و روگذری

امواج ارزیابی شده است (Panagiota و همکاران، ۲۰۱۸). انتخاب متغیرهای اصلی و مهم به عنوان پارامترهای ورودی در تخمین آسیب موج شکن، با هدف کاهش تعداد آزمایش ها بدون تأثیر بر نتایج، همواره مورد توجه بوده و از طریق روش های مختلف مانند روش رگرسیون مؤلفه های اصلی (PCR) بررسی شده است (Janardhan و همکاران، ۲۰۱۵).

موج شکن مستغرق، نیز یکی از راه حل های نوین در برابر فرسایش سواحل است. شکست موج توسط موج شکن های مستغرق موجب ایجاد تلاطم پای موج شکن می شود. به علت مقاومت ناشی از اصطکاک و وجود تلاطم، استهلاک انرژی و دفع موج بیشینه گردیده و این امر موجب کاهش انعکاس موج و آب شستگی کف و در نتیجه کنترل میزان رسوب می شود (خسروی بابادی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین در موج شکن های مستغرق، انتقال موج، بالاروی و تغییرات حرکت موج مدنظر قرار می گیرد (Twu و همکاران، ۲۰۰۱).

میزان نفوذپذیری موج شکن های مستغرق بر ویژگی های جریان ناشی از امواج اثرگذار بوده و باعث کاهش سرعت افقی جریان می شود (Neves و همکاران، ۲۰۰۷). استفاده از مجموعه موج شکن های مستغرق نیز بر کاهش انرژی امواج مؤثر است. در یک مطالعه آزمایشگاهی، چیدمان مجموعه ای از مکعب های ۵ سانتی متری با فواصل ۱/۱ سانتی متر در مسیری به طول ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر به عنوان موج شکن مستغرق، منجر به کاهش ۶۰ تا ۸۰ درصدی ارتفاع موج گردید (Bungin، ۲۰۲۱). موج شکن مستغرق علاوه بر حفاظت از سواحل و تأسیسات، برای حفاظت از موج شکن های موجود نیز کاربرد دارد. از این سازه به منظور بازسازی موج شکن های تخریب شده و یا آسیب دیده استفاده می شود تا از برخورد امواج شدید محفوظ بماند (Juhl و Jensen، ۱۹۹۵). در یک مطالعه، به منظور حفاظت از تاج یک موج شکن آسیب دیده، نقش یک موج شکن مستغرق بررسی گردید. این سازه مستغرق، امکان درهم شکستن و تضعیف امواج ناشی از طوفان را فراهم و از بخش آسیب دیده موج شکن حفاظت می کرد و در نهایت تعمیر موج شکن اصلی نیز با سهولت بیشتری انجام یافت (Tulsi و Phelp، ۲۰۰۹). براساس خصوصیات عملکردی مانع مستغرق، بهره گیری از آن به عنوان سازه ای در کنار موج شکن شکل پذیر نیز مناسب به نظر می رسد. در طراحی این نوع سازه های ترکیبی به اطلاعات دقیق و مهمی مانند مشخصات موج و ویژگی های سازه نیاز است. همچنین ابعاد، شیب دیواره و موقعیت سازه مستغرق نیز، در عملکرد بهینه تقویت و حفاظت موج شکن اصلی کمک می کند (Smith و همکاران، ۱۹۹۶). در یک طرح، در مقایسه شرایط مختلف، با طراحی یک ردیف

۲- مواد و روش‌ها

مانع مستغرق نقش سکوی موج‌شکن به هنگام تغییر شکل را ایفا کرده و هنگام ریزش مصالح، تکیه به مانع، باعث کاهش ریزش شده و شکل پایدار موج‌شکن را در محدوده کوچک‌تری ایجاد می‌کند. تعیین فاصله مانع از پنجه و اثر آن بر عدد آسیب، نقش اساسی در پایداری دارد. انتخاب فاصله کم، ممکن است باعث شود تا ریزش مصالح از روی مانع اتفاق بیافتد و درواقع مانع مستغرق بخشی از بدنه موج‌شکن تلقی گردد و انتخاب فاصله زیاد نیز ممکن است عملکرد مانع به‌عنوان تکیه‌گاه را تضعیف نموده و کارایی لازم را نداشته باشد. در این راستا تعیین فاصله به‌منظور رسیدن به حداقل عدد آسیب به‌عنوان یکی از شاخص‌های پایداری می‌تواند مثرتر واقع گردد. در مقاله حاضر، به‌منظور بیان ساده‌تر، به‌جای مانع سکویی مستغرق، از کلمه مانع و به‌جای موج‌شکن توده‌سنگی شکل‌پذیر از کلمه موج‌شکن استفاده گردیده است.

۲-۱- آزمایش‌ها

هدف مطالعه آزمایشگاهی حاضر، بررسی تأثیر موقعیت مانع بر پایداری موج‌شکن توده سنگی شکل‌پذیر بوده که در فواصل مختلف (در سمت دریا) قرار می‌گیرد. در طول آزمایش مدل، موقعیت مانع تغییر کرده و بر اساس میزان تغییر فاصله، تأثیر آن بر عدد آسیب موج‌شکن بررسی می‌گردد. موج‌شکن، یک بار بدون وجود مانع و در شرایط مشابه، با مانع در فواصل صفر تا بیست سانتی‌متر با گام‌های پنج سانتی‌متری مورد آزمایش قرار گرفته است. در مرور مطالعات پیشین می‌توان مشاهده نمود که بررسی پایداری موج‌شکن عمدتاً در مقطع کناری یا میانی سازه انجام یافته است؛ در صورتی که در تحقیق حاضر، با استفاده از تصویربرداری و فتوگرامتری بُرد کوتاه، امکان تهیه ابر نقاط^۴ و مدل سه‌بعدی یکپارچه^۵ با بافت واقعی و ترازهای مختلف ارتفاعی و در نتیجه قابلیت ایجاد مدل کامل موج‌شکن، قبل و بعد از برخورد امواج فراهم شده است. در فتوگرامتری بُرد کوتاه با استفاده از تحلیل تصاویر اخذ شده از فاصله نزدیک، مدل تغییر شکل یافته موج‌شکن با قابلیت دسترسی به مقدار جابه‌جایی با دقت زیاد در هر نقطه میسر می‌گردد؛ بدین معنی که مدل‌سازی سه‌بعدی، با استفاده از تصاویر برداشت شده از جسم، به‌دست می‌آید. 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 پیچیده شدن برداشت عوارض و تغییرات می‌گردد. بدیهی است به هر میزان کیفیت و دقت داده‌ها در زمان

موج‌شکن مستغرق برای استهلاک امواج و حفاظت از سازه توده‌سنگی موجود در نزدیکی ساحل، این نتیجه حاصل شد که می‌توان با استفاده از سازه مانع مستغرق، مشخصات وزنی لایه آرمور را در سازه شکل‌پذیر اصلی کاهش داد (Stefanutti و Stocks، ۲۰۱۵). همچنین در یک بندر، موج‌شکنی به‌صورت تقویت‌شده اجرا شد؛ به‌طوری‌که با فاصله‌ای کم از جلوی سازه اصلی، موانع سنگی مستغرق قرار داده شد. اجرای این پروژه نتایج خوبی را در پی داشت. نقش ترکیبی - تقویتی سازه، باعث بهبود عملکرد و کاهش حجم مصالح مصرفی شد. همچنین با بررسی عملکرد این سازه، امکان کاهش ارتفاع سازه اصلی تا ۱/۵ متر فراهم گردید که صرفه‌جویی اقتصادی مناسبی را به‌دنبال داشت (Clark و Cox، ۱۹۹۲).

روش‌های ابداعی نیز همیشه مدّ نظر برخی پژوهش‌گران بوده است. به‌عنوان مثال، ترکیب موج‌شکن‌های پنوماتیکی^۳ و مستغرق با در نظر گرفتن شیب‌های متعدّد جلوی موج‌شکن بر اساس مدل‌های آزمایشگاهی و عددی موردبررسی قرار گرفت و شیب بهینه حاصل گردید (He و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در پروژه‌ای دیگر برای تجزیه و تحلیل اثر ترکیبی موج‌شکن مستغرق و پنوماتیکی در کاهش انرژی امواج، حاکی از افزایش قابل‌ملاحظه ظرفیت استهلاک انرژی تا ۳۵ درصد نسبت به موج‌شکن منفرد بوده است (Jian Xu و همکاران، ۲۰۲۰).

در تحقیق دیگری موج‌شکن‌های مستغرق در یک و دو ردیف در مواجهه با امواج منظم، به روش الگوریتم اندرکنش جریان و سازه (FSI) مدل‌سازی عددی شده و به‌کارگیری ردیف دوم موج‌شکن، مؤثر ارزیابی شد (Qin و همکاران، ۲۰۱۹). لازم به ذکر است در شرایط بحرانی نیز ایده استفاده از سازه مستغرق در کنار موج‌شکن، موردتوجه می‌باشد. در یک پروژه تأثیر استفاده از موج‌شکن‌های توده‌سنگی برای مقابله با امواج ناشی از سونامی موردبررسی قرار گرفت. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده، مقادیر آستانه پارامتر آسیب‌مورد استفاده برای توصیف خسارت (شروع آسیب، شروع تخریب و تخریب کامل) به هنگام سونامی مشخص گردید. همچنین استفاده از سازه کمکی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر سطح آسیب سازه اصلی داشت (Quiroga و همکاران، ۲۰۱۸).

در مقاله حاضر، مطالعه آزمایشگاهی تأثیر وجود مدافع سکویی مستغرق در پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر و تعیین فاصله بهینه مدافع از موج‌شکن، با تکیه بر عدد آسیب انجام یافته است. از این‌رو مدافع سکویی مستغرق در فواصل صفر تا ۲۰ سانتی‌متری قرار گرفته و تحت تأثیر امواج تصادفی، اعداد آسیب به‌دست آمده و مقایسه شده‌اند.

شکست (نسبت ارتفاع موج در حال شکست به عمق آب) برای موج تصادفی، حداکثر ارتفاع موج مدل سازی شده، ۱۵ سانتی متر تعیین گردید. در این تحقیق صرفاً مطالعه امواج ناشکنا صورت گرفته و حین آزمایش ملاحظه شد زمانی که ارتفاع موج مؤثر از ۱۵ سانتی متر فراتر می رود، موج قبل از رسیدن به موج شکن شکسته می شود.

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای محیطی و سازه ای مدل آزمایشگاهی موج شکن شکل پذیر

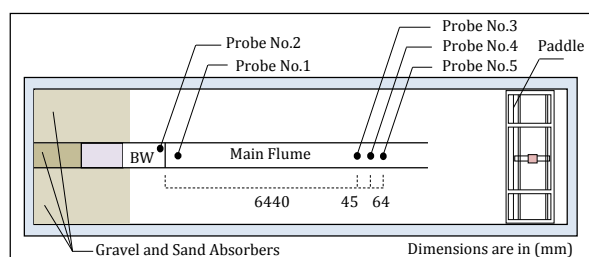
پارامتر	نماد	دامنه تغییرات
ارتفاع موج (سانتی متر)	H_s	۱۵، ۱۲، ۹
پریود موج (ثانیه)	T_p	۱/۵، ۱/۲، ۰/۹
تعداد امواج به روش قطع تراز صفر رو به بالا	N	۶۰۰۰
قطر اسمی مصالح آرمور در مدل (سانتی متر)	D_{n50}	۱/۷
جرم مخصوص آرمور (گرم بر سانتی متر مکعب)	ρ	۲/۵۵
عمق آب در محل موج شکن (سانتی متر)	d_i	۲۵
شیب اولیه سازه	$\cot \alpha$	۱/۲۵
شیب سازه مانع مستغرق	$\cot \alpha_1$	۱/۲۵
فاصله مانع تا موج شکن اصلی (سانتی متر)	X	۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵، ۰

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای بدون بعد

پارامتر	نماد	دامنه تغییرات
نسبت ضخامت لایه آرمور به قطر اسمی	t_A / D_{n50}	۱۵
دانه بندی مصالح آرمور	D_{n85A} / D_{n15A}	۱/۱۴
تیزی موج	S_{om}	۰/۰۷ تا ۰/۰۱
موقعیت استقرار مانع	X/d	۰/۸ تا ۰/۲
عرض نسبی تاج مانع	B/d	۰/۴
ارتفاع نسبی تاج مانع	h/d	۰/۳۲

۲-۳- فلوم موج

آزمایش ها، در فلوم موج به طول ۳۵ متر و عرض ۵ متر و عمق ۱ متر انجام شد که مشخصات این فلوم در شکل های (۱) و (۲) نشان داده شده است. برای جلوگیری از ایجاد امواج عرضی، فلوم موج توسط دو دیواره به طول ۲۴/۵ متر و ارتفاع ۱ متر به سه بخش تقسیم شده است.



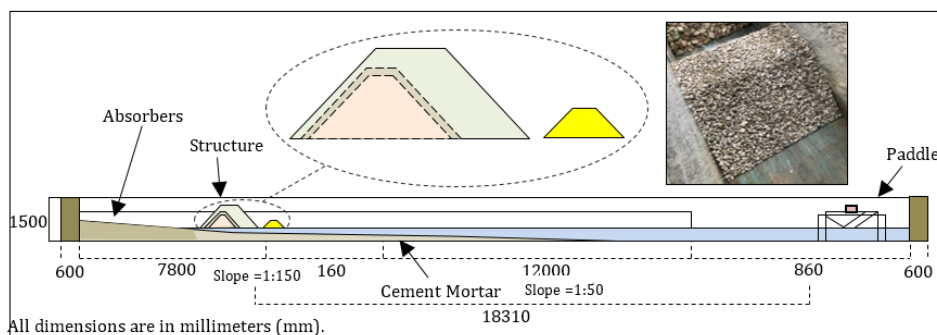
شکل ۱- پلان فلوم آزمایش و موقعیت سازه موج شکن شکل پذیر و موج نگارها

مستندنگاری بالاتر باشد، نتیجه تحقیق به مراتب از ارزش بیشتری برخوردار خواهد بود. از این رو اندازه گیری و تعیین دقیق میزان تغییر شکل موج شکن و جابه جایی مصالح آرمور در برخورد با امواج امکان پذیر می گردد. استفاده از این روش، غیر مخرب و بدون ایجاد عارضه است که اندازه گیری سه بعدی را منطبق با واقعیت، سرعت و دقت بالا فراهم می کند. همچنین امواج ایجاد شده توسط دستگاه موج ساز از نوع طیفی، بر مبنای طیف جانسوای در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب این طیف، بالا بودن انرژی طیفی بوده و در نبود یک طیف میدانی در بررسی های آزمایشگاهی، یکی از مناسب ترین طیف ها برای تحقیق می باشد.

۲-۲- متغیرهای مستقل محیطی و سازه ای مدل آزمایشگاهی

در مطالعه پایداری موج شکن های شکل پذیر، تعداد، ارتفاع و پریود امواج عمده به عنوان پارامترهای شاخص و مؤثر بر فرسایش و تغییر شکل سازه، مطرح می گردد. در بررسی نقش مانع در پایداری موج شکن نیز، بررسی این متغیرها از اهمیت بالایی برخوردار است. در جدول های (۱) و (۲)، حدود تغییرات پارامترهای محیطی و سازه ای و پارامترهای بدون بعد مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است. یکی از مسائل قابل توجه در انتخاب ارتفاع و پریود امواج، محدوده 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 ۰/۱۵ تا ۰/۰۷ قرار گیرد (Van der Meer, ۱۹۹۳).

برخی تحقیقات نیز تنظیم ترکیب ارتفاع و پریود امواج را در محدوده تیزی بین ۰/۰۵۴ تا ۰/۰۱ را پیشنهاد داده است (Andersen, ۲۰۰۶). انتخاب محدوده ارتفاع امواج با توجه به امکانات آزمایشگاه و شرایط عمق و نوع موج ساز بین ۴ تا ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است؛ زیرا در امواج با ارتفاع کمتر از ۴ سانتی متر احتمال به وجود آمدن اثرات مقیاس وجود دارد و همچنین ارتفاع زیاد امواج، ممکن است در محل پاروی مؤلّد موج، به دلیل به وجود آمدن تغییر مکان های بزرگ، در سطح امواج تولید شده باعث آشفستگی شود، که این امر، خدشه در صحت داده های برداشت شده را در پی دارد. انتخاب دو پارامتر فوق الذکر باید به گونه ای صورت گیرد که با حداقل تعداد ارتفاع موج در پریودهای موجود بتوان محدوده پیشنهادی موجود در جدول های (۱) و (۲) را پوشش داد. کاهش بیش از حد عمق آب، منجر به شکست موج قبل از رسیدن به پای سازه شده و ممکن است حداکثر ارتفاع موج در نظر گرفته شده در پای سازه محقق نشود. بنابراین با در نظر گرفتن محدوده تیزی امواج، عمق آب معادل ۲۵ سانتی متر انتخاب شده است. همچنین با توجه به ضریب

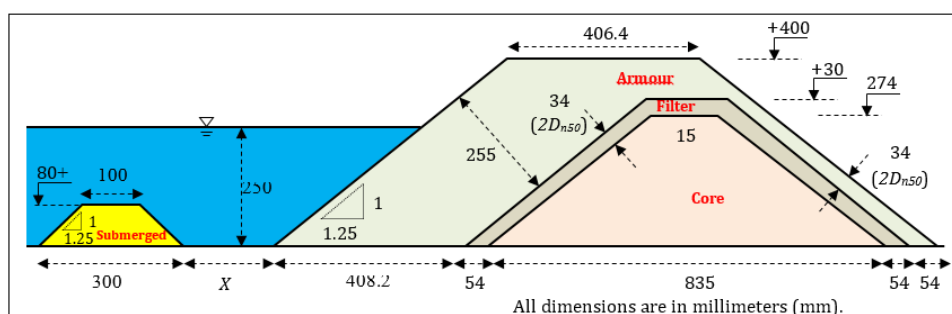


شکل ۲- مقطع طولی فلوم آزمایش و موقعیت مدل آزمایشگاهی موج شکن شکل پذیر و مانع مستغرق

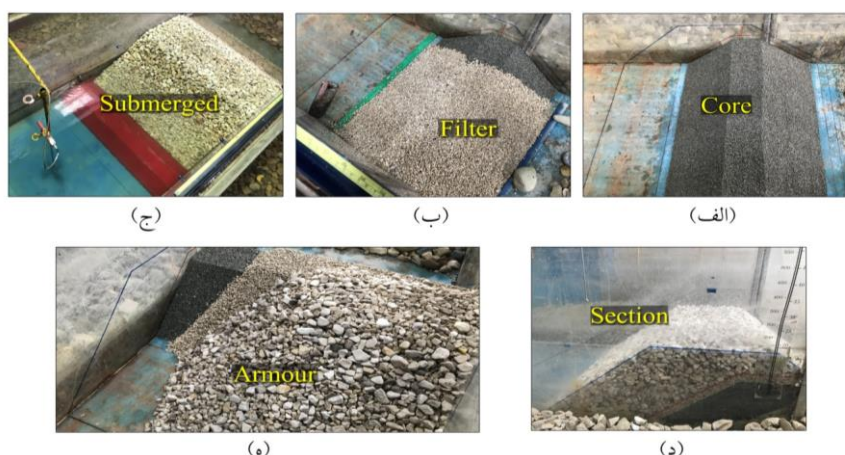
۴-۲- موج شکن شکل پذیر

موج شکن اصلی به صورت توده سنگی شکل پذیر با شیب دیواره ۱:۱/۲۵ درون فلوم ساخته شده است. جلوی موج شکن اصلی به سمت دریا، یک مانع مستغرق دوزنقه‌ای به ارتفاع ۸۰ میلی متر و شیب دیواره ۱:۱/۲۵ قرار داده شده است. مانع از جنس پلکسی گلس^۶ ساخته شده و برای این که کاملاً مستغرق و در برابر امواج با ثبات عمل نماید؛ درون آن به وسیله قطعات و مصالح سنگین کاملاً پر شده است.

امواج به وسیله بازوی مولد پیستونی قائم به طول ۵/۵ متر و ارتفاع ۱ متر که در انتهای فلوم قرار گرفته تولید می گردد. این مولد موج، توانایی تولید امواج منظم و تصادفی با طیف های مختلف را دارد. امواج تابشی به مقطع سازه در تمام آزمایش ها، تصادفی و مطابق با طیف JONSWAP است. در طول فلوم از ۵ موج نگار استفاده شده است که قابلیت ثبت تغییر ارتفاع سطح آب با دقت یک میلی متر را دارند.



شکل ۳- ابعاد و فواصل موج شکن اصلی و مانع



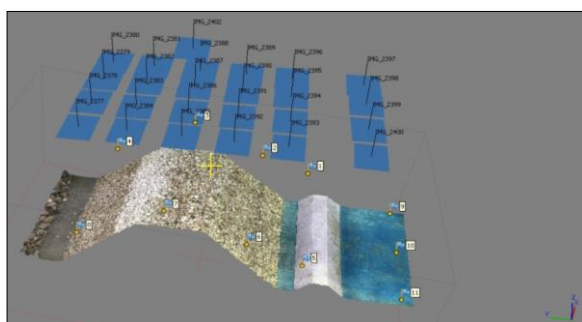
شکل ۴- (الف) هسته، (ب) فیلتر، (ج) مانع مستغرق، (د) مقطع کلی موج شکن، (ه) آرمور

جدول ۳- مشخصات مدل تصویری سه بعدی موج شکن

Aligned Cameras	GCP (Markers)	Dense Point Cloud	Tie Points	Flying Altitude (m)	Coverage Area (m ²)
۲۷	۱۱	۲۰۷۳۶۲۲	۲۰۴۷۱	۱/۱۳	۲/۲۸



شکل ۵- نقشه برداری نقاط پایه و جانمایی مارکرها



شکل ۶- موقعیت مارکرها و دوربین های تصویربرداری نسبت به موج شکن اصلی و سازه مستغرق

برای برداشت هر یک از موقعیت های آزمایش بین ۲۵ تا ۲۷ عکس تهیه و به نرم افزار منتقل و مدل سه بعدی ایجاد شد. نرم افزار AGISOFT، با توانایی یکپارچه سازی و تهیه مدل با امکان تنظیم و تبدیل مختصات و ساخت مدل رقومی (DEM) ^۸ و DSM) ^۹ و ابر نقطه، نمایش ناهمواری ها و تغییرات با استفاده از داده های ارتفاع از تراز مبنا توسط یک شبکه سلولی (پیکسل ها) را با دقت بسیار بالا (دقت ارتفاعی و مکانی) میسر می کند. مدل سه بعدی شبیه سازی شده، امکان بررسی دقیق تغییر شکل پروفیل موج شکن و جابه جایی مصالح آرمور را فراهم نمود که در بخش های بعدی به آن ها اشاره می گردد. در شکل (۷-الف)، مجموعه تصاویر برداشت شده و یکپارچه سازی شده از سازه، در شکل (۷-ب)، هم پوشانی دوربین ها در برداشت و مدل سازی تصاویر و در شکل (۷-ج)، مدل رقومی ارتفاع نشان داده شده است.

برای جلوگیری از انعکاس نور و بروز خطا در تصویربرداری و ثبت موقعیت مکانی نقاط و پروفیل ها، روی سازه مانع با پارچه سفید ضد انعکاس پوشانده شده است. مشخصات موج شکن و مانع، در شکل (۳) و تصاویر آن ها حین ساخت و آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۳)، فاصله X ، از صفر (حالت اتصال مانع به موج شکن) شروع شده و در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متر آزمایش ها تکرار می گردند. شکل (۴-ه)، مصالح هسته، فیلتر و آرمور را به صورت یکجا، برای رؤیت بهتر نشان می دهد.

۲-۵- برداشت و تفسیر داده ها

برای بررسی واکنش های سازه ای و پایداری موج شکن با استقرار مانع، مدل آزمایشگاهی بدون مانع و همچنین با جانمایی مانع در فواصل صفر تا ۲۰ سانتی متر با گام ۵ سانتی متر، مورد آزمایش قرار گرفت. پیش از انجام آزمایش ها، دستگاه مولد موج برای یافتن ارتفاع صحیح موج با توجه به ترکیب مناسب حرکت پارو و پریود موج برای عمق های مختلف آب، کالیبره شد. موج نگارها نیز برای اصلاح دمایی و جلوگیری از بروز خطا به صورت روزانه پیش از انجام آزمایش کالیبره شدند. پیش فرض هایی نیز در انجام آزمایش ها در نظر گرفته شد؛ مانند: صرف نظر نمودن از موج های ثانویه در روند تولید موج، افقی فرض نمودن بستر دریا، عدم تجمع آب پشت مانع، صرفاً مطالعه عملکرد هیدرولیکی مدل و صرف نظر از برخورد امواج بازگشتی از سمت سازه با امواج جدید (عطایی آشتیانی، ۱۳۸۵). برای تهیه مدل سه بعدی، ابتدا با برداشت مختصات محدوده موج شکن به وسیله دوربین نقشه برداری، ۱۱ نقطه مارکر^۷ روی بدنه فلوم، مشخص شد.

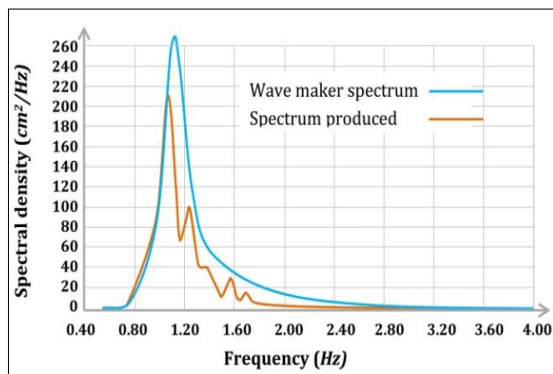
سپس برای هر یک از بخش های مطالعات، قبل و پس از انجام آزمایش (و یا پس از برخورد تعداد مشخصی از امواج با سازه)، عکس برداری از موج شکن با دوربین عکاسی حرفه ای انجام و تصاویر برای پردازش و تهیه بلوک عکس به نرم افزار منتقل گردید. برخی از ویژگی های مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار، در جدول (۳) ارائه شده است. عکس برداری از روی سازه و با روند منظم و فواصل مشخص به گونه ای انجام شد که هر عکس با عکس قبلی خود حدود ۶۰ درصد پوشش طولی و حدود ۲۰ درصد پوشش عرضی (پوشش بین باندهای حرکت) داشته باشد. بخشی از روند نقشه برداری و جانمایی مارکرها در شکل های (۵) و (۶)، نشان داده شده است.

9. Digital surface model

7. Marker point

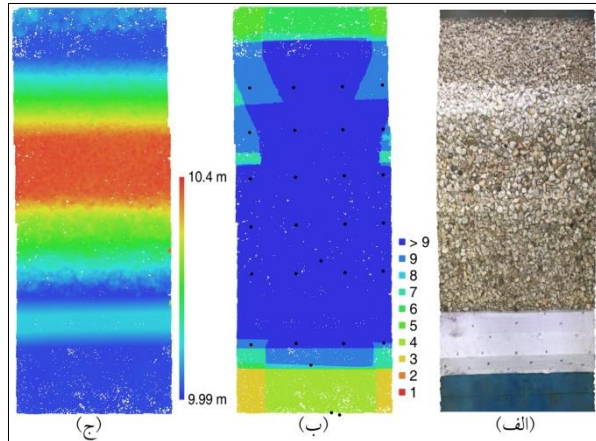
8. Digital elevation model

موج و فرکانس حاصل می‌گردد. شکل (۸)، طیف جانسواپ و طیف برداشت شده از سطح آب را نشان می‌دهد.



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

بر اساس نتایج حاصل از روش قطع تراز صفر رو به بالا، تفکیک امواج دقیقاً ارتفاع موج و پریود خواسته شده را ارائه نمی‌دهد و نتایج با مقادیر داده شده از دستگاه موج ساز منطبق نیست. لیکن از بین سه ارتفاع و پریود موج متوسط، مؤثر و بیشینه، حالت مؤثر به ارتفاع و پریود 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، این موضوع را نشان می‌دهد. به عنوان مثال در ارتفاع موج ۱۲ سانتی متری تعریف شده به دستگاه موج ساز، ارتفاع موج در حالت های متوسط، مؤثر و بیشینه، به ترتیب ۵/۳، ۱۱/۳۸ و ۱۵/۵۹ سانتی متر حاصل شده است. نتایج تمام آزمایش های انجام یافته مؤید این مطلب است. بنابراین با تقریب می توان ارتفاع و پریود داده شده به دستگاه موج ساز را همان ارتفاع و پریود مؤثر در نظر گرفت. تعداد امواج ایجاد شده از سطح آب نیز کم تر از تعداد مورد انتظار است؛ به عنوان مثال در ارتفاع موج ۱۲ سانتی متر، پریود ۱ ثانیه و مدت زمان کارکرد ۵۴۰۰ ثانیه (یک و نیم ساعت)، انتظار ایجاد ۵۴۰۰ تک موج می رود، در صورتی که نتایج حاصل از روش قطع تراز صفر رو به بالا، ۵۱۷۳ موج را ارائه می‌دهد. این مسئله بدین دلیل اتفاق می افتد که در موج های بسیار ریز، سطح آب بدون آن که تراز صفر را قطع کند به موج بعدی منتقل می شود و عملاً 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 اغماض بوده و این موضوع در آزمایش ها کنترل گردیده است.



شکل ۷- (الف) تصاویر ثبت و یکپارچه شده، (ب) اثر هم پوشانی دوربین ها در برداشت تصاویر، (ج) مدل رقومی ارتفاعی سازه

۳- نتایج و بحث

تحلیل نتایج آزمایش ها بر اساس پارامترهای شاخص، در مطالعه پایداری هیدرولیکی موج شکن، یکی از بخش های مهم این پژوهش است که در آن به بررسی تأثیر حضور مانع در فواصل مختلف بر پایداری موج شکن و مقایسه میزان آسیب سازه بر مبنای عدد آسیب، در حالات مختلف نسبت به سازه بدون مانع، با در نظر گرفتن پارامترهای مربوط به موج (تعداد امواج، ارتفاع و پریود موج) پرداخته می شود.

۳-۱- موج تصادفی

پدل موج ساز از نوع پیستونی بوده و مولد موج، قادر به ایجاد امواج منظم و تصادفی تحت طیف های برتشنایدر^{۱۰}، پیرسون-موسکوویچ^{۱۱} و جانسواپ بوده و حداکثر ارتفاع موج تولیدی، ۲۰ سانتی متر می باشد. موج نگارها، از نوع سنسورهای مقاومتی می باشند و قابلیت اندازه گیری نوسانات موقعیت سطح آب نسبت به سطح ساکن آب را با دقت بالا دارا می باشند. با استفاده از سری زمانی برداشت شده، طی آزمایش ها، ارتفاع موج برای هر تک موج از سری امواج با استفاده از روش قطع تراز صفر رو به بالا حاصل گردید. در این روش، تقاطع سطح آب در حالت موج با سطح ساکن آب دارای دو نقطه تقاطع است. یکی در حالت خیز آب و دیگری، فرو آب می باشد. فاصله بین دو نقطه تقاطع خیز آب و سطح ساکن آب یک موج را تشکیل می دهد. بدین منظور برنامه ای در نرم افزار MATLAB تهیه شده که از سری زمانی سطح آب، امواج را یک به یک تفکیک کرده و ارتفاع و پریود تک امواج را ارائه می دهد. از روی ارتفاع و پریودهای به دست آمده، ارتفاع بیشینه، ارتفاع موج مؤثر، ارتفاع موج میانگین، پریود بیشینه، پریود موج مؤثر، پریود میانگین، طول

۲-۳- پروفیل‌های تغییر شکل

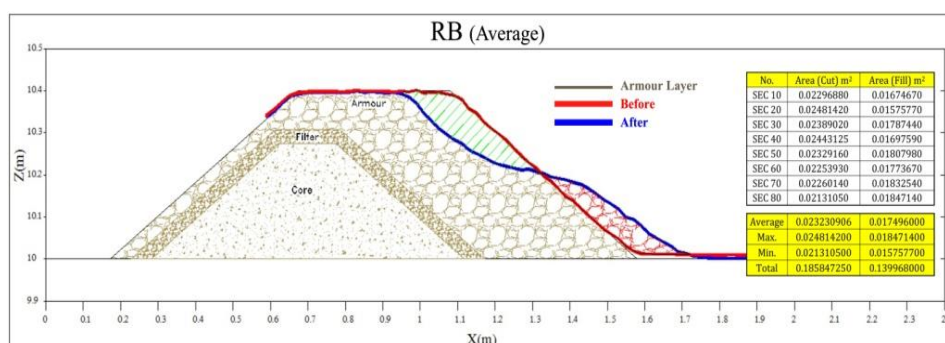
در ابتدای آزمایش‌ها، برای بررسی دقیق عملکرد مانع مستغرق و ارزیابی تحقق اهداف، موج‌شکن شکل‌پذیر اصلی (به‌عنوان شاهد) در معرض برخورد امواج تصادفی قرار گرفت و میزان تغییر شکل آرمور در ارتفاع‌ها و پریودهای مختلف امواج، مورد بررسی قرار گرفت تا سازه شاهد در برابر امواج، مقایسه واقع‌گرایانه و دقیقی را برای محاسبه سطح آسیب موج‌شکن فراهم سازد. منظور از عدد آسیب ($S = \frac{A_e}{D_{n50}^2}$)، می‌باشد که A_e مساحت فرسایش یافته و D_{n50} قطر اسمی لایه آرمور است. در شکل (۹)، برداشت‌هایی از تغییر شکل و جابه‌جایی مصالح آرمور و پروفیل نهایی سازه از جهات مختلف مشاهده می‌شود. میزان مصالح جابه‌جاشده در شکل (۱۰)، به‌صورت مقدار متوسط (میانگین تغییرات در ۸ نوار عرضی) نشان داده شده است. در شکل (۱۱)، مدل رقومی ساخته‌شده به‌همراه یک برش دلخواه طولی از وسط سازه و نمای مقاطع در برش مذکور قبل و بعد از آزمایش مشاهده می‌گردد. به‌دلیل تعداد زیاد تصاویر از تکرار شکل‌ها برای تمام آزمایش‌های موجود در این تحقیق صرف‌نظر شده است.

۳-۳- بررسی اثر شرایط امواج بر تغییر شکل موج‌شکن

نظر به این‌که وجود مانع از مباحث اصلی تحقیق حاضر است، در این راستا بررسی تأثیر ارتفاع، پریود و تعداد امواج، بر مبنای وجود مانع در جلوی موج‌شکن صورت می‌پذیرد. این امکان وجود دارد که حضور مانع، بر ویژگی‌های امواج وارده بر موج‌شکن تأثیرگذار باشد. بررسی تأثیر شرایط امواج تصادفی بر فرسایش نیم‌رخ سازه، می‌تواند به تکمیل فرآیند تحلیل کمک نموده و منجر به ارائه نتایج مفیدی گردد. در ادامه آزمایش‌ها، پارامترهای ارتفاع، پریود و تعداد امواج (مدت طوفان) به‌عنوان مهم‌ترین گزینه‌های مؤثر بر پایداری سازه و رصد میزان فرسایش، در حالت استقرار مانع مستغرق جلوی موج‌شکن مورد بررسی قرار گرفته است. برای مطالعه روند پایداری، مقطع سازه در شرایط موج با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و پریود ۱ ثانیه، با تعداد امواج برخوردی بین ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ مورد آزمایش قرار گرفته که نتایج این آزمایش‌ها، در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

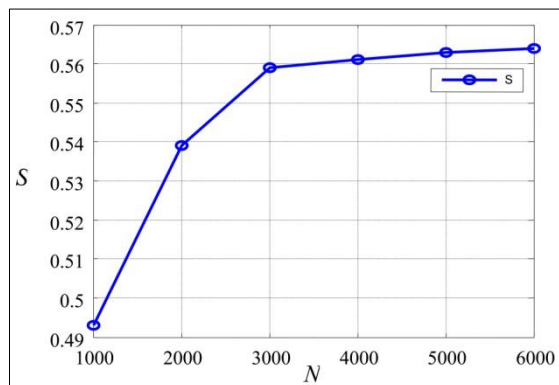


شکل ۹- نمایشی از پلان، ایزومتریک و مقطع موج‌شکن شکل‌پذیر بدون مانع قبل و بعد از انجام آزمایش



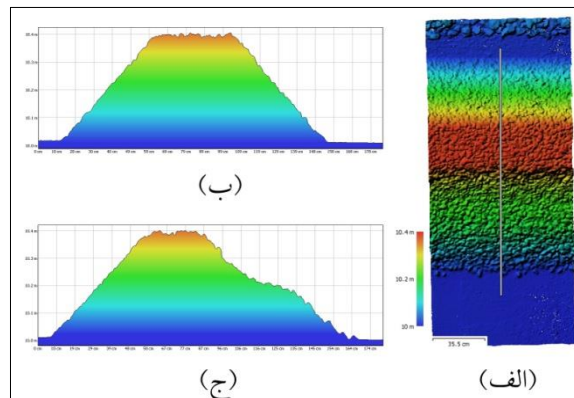
شکل ۱۰- مساحت متوسط مصالح جابه‌جاشده و تغییر پروفیل موج‌شکن بدون مانع

سمت جلو می‌شود و این امر باعث می‌شود سطح تماس و فرسایش بیشتری در روند جذب انرژی امواج ایجاد شود که باعث رشد جذب انرژی امواج و کاهش ضریب انعکاس سازه کاهش می‌شود. نمودار شکل (۱۲)، تغییرات عدد آسیب را با تعداد امواج تابانده شده نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- تغییرات عدد آسیب با تعداد امواج مختلف

برای مطالعه اثر ارتفاع‌های مختلف موج بر میزان فرسایش سازه، در پریود یک ثانیه، امواج ۹، ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر توسط پارو به سمت موج‌شکن تولید شد و میزان فرسایش و تغییر شکل پروفیل در مدت طوفان مؤثر (۳۰۰۰ موج) ثبت گردید. نمودار شکل (۱۳)، عدد آسیب (بی‌بعد) را در برابر ارتفاع موج بی‌بعد که از بین اعداد $\frac{H}{d}$ ، $\frac{H}{H_{max}}$ ، $\frac{H}{d} \cdot \frac{H}{gT^2}$ و $\frac{H}{d}$ ، ارتفاع موج، d ، عمق آب، g ، شتاب ثقل و T ، پریود موج) انتخاب گردید، نشان می‌دهد. انتخاب این پارامتر بدین دلیل است که به خاطر محدودیت در تعداد آزمایش‌ها، پریود ثابت بوده و انتخاب T نمی‌تواند منطقی باشد. همچنین تعداد ارتفاع موج‌های انتخابی ۳ عدد بوده که از بین ۳ عدد، انتخاب بیشینه آن‌ها، نمی‌تواند تعمیمی برای ارتفاع موج‌های متعدد باشد. از برازش به‌دست‌آمده از نمودار، معادله یک برازش خطی بین ارتفاع موج بی‌بعد و عدد آسیب با ضریب رگرسیون ۰/۹۹ به‌صورت $S = 1.936(\frac{H}{d}) - 0.363$ حاصل گردید. با توجه به کم بودن تعداد نقاط، این معادله نمی‌تواند در حالت کلی به‌کار گرفته شود و صرفاً یک تخمین اولیه می‌باشد. جدول (۴)، اعداد ارتفاع موج نسبی (ارتفاع موج بر عمق آب) و عدد آسیب رانشان می‌دهد. بر مبنای این اعداد، به‌زای رشد ارتفاع موج نسبی از ۰/۳۶ به ۰/۴۸ و از ۰/۴۸ به ۰/۶، عدد آسیب به ترتیب ۳۹/۱۲ و ۴۴/۴۴ درصد افزایش می‌یابد. در ارتفاع موج ۱۵ سانتی‌متر، سرریزی موج از روی موج‌شکن ملاحظه گردید؛ از این‌رو از ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر، در مدل‌های فیزیکی استفاده شد.

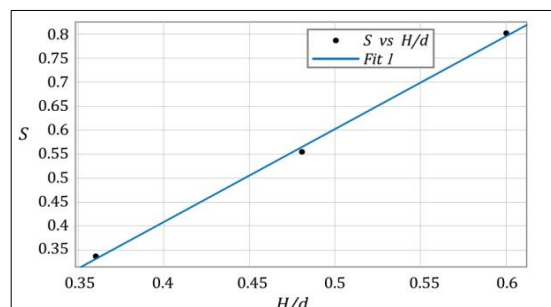


شکل ۱۱- الف) مدل رقومی ارتفاعی و برش منتخب از سازه، ب) مقطع برش منتخب قبل از آزمایش، ج) مقطع برش منتخب پس از آزمایش

مطابق نتایج، می‌توان مشاهده نمود که با افزایش تعداد امواج برخوردی به سازه، میزان فرسایش آرمور افزایش می‌یابد اما با گذشت زمان، از سرعت آن کاسته شده و مقطع سازه در نهایت به تعادل نسبی می‌رسد که در آن نرخ تغییر فرسایش به‌شدت کاهش می‌یابد. باید در نظر داشت که حتی پس از رسیدن به حالت تعادل، نرخ تغییرات فرسایش در سازه متوقف نشده و با افزایش برخورد امواج، تغییرات محدودی در شکل سازه مشاهده خواهد شد. حد کفایت تغییر شکل، تحقق ۹۰ درصدی تغییر شکل نهایی سازه است. به این منظور مقطع سازه را تحت شرایط طوفانی با تعداد ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ با گام افزایشی ۱۰۰۰ موج قرار داده و نیم‌رخ تغییر شکل یافته را برداشت نموده و این عمل تا زمانی که فرسایش لایه آرمور با امواج متوالی تفاوت کمی داشته باشد ادامه می‌یابد. به‌زای هر آزمایش عدد آسیب از رابطه $(S = \frac{Ae}{D_{n50}^2})$ ، به‌دست‌آمده و 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 آهنگ فرسایش سازه بین امواج ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ به‌طور محسوس کاهش می‌یابد و فرسایش از ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ موج، عملاً بسیار ناچیز و نامحسوس است. بر این اساس با توجه به این‌که فرسایش و تغییر پروفیل موج‌شکن در برخورد ۳۰۰۰ موج به مقطع سازه، به بیش از ۹۰ درصد حد نهایی (۶۰۰۰ موج) می‌رسد، زمان برخورد ۳۰۰۰ موج را به‌عنوان مدت زمان تعادل می‌توان در نظر گرفت و در مدل‌های انجام یافته تعداد ۳۰۰۰ موج به‌صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود. پس از ریزش مصالح سنگی لایه آرمور و وقوع تغییر شکل اولیه مقطع موج‌شکن (۱۰۰۰ موج)، شیب دیواره در مواجهه با بقیه امواج، ملایم می‌گردد. تغییر پروفیل و ریزش مصالح به‌تدریج موجب حرکت سنگ‌دانه‌ها به

شکل (۱۴)، پروفیل تغییر شکل یافته موج شکن را در هر یک از مقاطع عرضی در آزمایش RBS5، نشان می‌دهد. با مقطع زدن در هر تصویر، مساحت ریزش کرده (A_e) و در نتیجه عدد آسیب به دست می‌آید. شکل (۱۵)، پروفیل تغییر شکل یافته موج شکن در تمام حالت‌های آزمایش را نشان می‌دهد. شکل (۱۶)، مقایسه عدد آسیب در تمام حالت‌های آزمایش را در یک نمودار نشان می‌دهد. جدول (۷)، عدد آسیب در مقاطع، ارتفاع، پریود و تعداد امواج به دست آمده در آزمایش‌های انجام یافته را بیان می‌کند. در این جدول، H_{wm} ، ارتفاع موج تعریف شده به موج ساز، H_s ، ارتفاع موج مؤثر برداشت شده از سطح آب، T_{wm} ، پریود موج تعریف شده به موج ساز، T_s ، پریود موج مؤثر برداشت شده از سطح آب، N ، تعداد امواج مورد انتظار و N_{pr} ، تعداد امواج برداشت شده از سطح آب است. بر مبنای اعداد جدول (۷)، عدد آسیب در موج شکن تحت امواج تصادفی ۱/۱۶ به دست آمده است. همان طوری که در جدول مشاهده می‌گردد، بیشترین عدد آسیب در بین مقاطع برداشت شده مربوط به مقطع ۲۰ سانتی متری از دیواره می‌باشد. این موضوع به خاطر پیچیدگی رفتار موج در برخورد به موج شکن بوده و 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؛ لذا صرفاً با انتخاب یک مقطع در موج شکن برای بررسی پایداری نمی‌توان قضاوت دقیق و صحیحی داشت و برای ارزیابی بهتر، بایستی تعداد مقاطع بیشتری در نظر گرفته شود. با به کارگیری مانع متصل، عدد آسیب ۰/۷۰۱ و در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متری اعداد آسیب به ترتیب ۰/۶۷۹، ۰/۷۶۸، ۰/۸۲۶، ۰/۹۹۳ خواهد شد که فاصله ۵ سانتی متری مدافع از موج شکن بیشترین تأثیر و کمترین عدد آسیب را نشان می‌دهد. به طوری که وجود مانع در این فاصله، باعث کاهش ۳۹/۱۵ درصدی عدد آسیب می‌شود.

شکل (۱۶)، مقایسه عدد آسیب در حالات مختلف آزمایش را نشان می‌دهد. از لحاظ فیزیکی، می‌توان تصور نمود که در به کارگیری مانع متصل به سازه، تکیه گاهی برای موج شکن ایجاد شده که در برابر لغزش و واژگونی مؤثر بوده و مقداری از بخش فرسایش یافته با آن برخورد کرده و متوقف می‌شود. زمانی که مانع از موج شکن فاصله دارد، قسمت‌های فرسایش یافته آرمور در آن بخش ریزش کرده و در واقع تبدیل به بخشی از موج شکن شده و به پایداری سازه کمک می‌کند. این فاصله (به صورت بهینه)، مطابق آزمایش‌های انجام یافته در این تحقیق، برابر با ۵ سانتی متر تعیین گردید.



شکل ۱۳- نمودار تغییرات عدد آسیب با ارتفاع موج

جدول ۴- ارتفاع موج نسبی و عدد آسیب

H/d	۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۶۰
S	۰/۳۳۸۴	۰/۵۵۶۰	۰/۸۰۳۱

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، مقدار فرسایش نیز افزایش می‌یابد. جدول (۵)، اعداد پریود موج نسبی (پریود بر حداکثر پریود) و عدد آسیب را نشان می‌دهد. این اعداد نشان می‌دهد که به ازای رشد پریود موج نسبی از ۰/۶ به ۰/۸ و از ۰/۸ به ۱، عدد آسیب ۲۲/۹۴ و ۲۸/۲۶ درصد افزایش می‌یابد. با این اعداد ملاحظه می‌شود که افزایش پریود، عدد آسیب را افزایش می‌دهد ولی افزایش ارتفاع موج، اثر بیشتری دارد. در پریود موج ۰/۹، ثانیه، تیزی موج زیاد بوده و بعضاً ملاحظه شد که قبل از رسیدن موج به موج شکن، شکست اتفاق می‌افتد و برای پریود موج ۱/۵، ثانیه، تعداد امواج تابشی در مدت زمان معین کاهش می‌یابد. از این رو از پریود ۱/۲ سانتی متر، در مدل‌های فیزیکی استفاده گردید.

جدول ۵- پریود موج نسبی و عدد آسیب

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

۴-۳- مدل‌های فیزیکی

آزمایش‌های انجام یافته در تحقیق، مطابق جدول (۶) نام گذاری شده است.

جدول ۶- آزمایش‌های انجام یافته

نام آزمایش	نحوه چیدمان موج شکن و مانع مستغرق
RB	موج شکن بدون مانع
RBS0	موج شکن با مانع متصل به موج شکن
RBS5	موج شکن با مانع در فاصله ۵ سانتی متری از موج شکن
RBS10	موج شکن با مانع در فاصله ۱۰ سانتی متری از موج شکن
RBS15	موج شکن با مانع در فاصله ۱۵ سانتی متری از موج شکن
RBS20	موج شکن با مانع در فاصله ۲۰ سانتی متری از موج شکن

جدول ۷- عدد آسیب در مقاطع، ارتفاع، پرید و تعداد امواج به دست آمده در آزمایش های انجام یافته

S										N		T (s)		H (cm)		
S_{min}	S_{max}	S_{80}	S_{70}	S_{60}	S_{50}	S_{40}	S_{30}	S_{20}	S_{10}	N_{pr}	N_0	T_s	T_{wm}	H_s	H_{wm}	
۱/۱۱۶	۰/۹۵۹	۱/۰۱۷	۱/۰۱۴	۱/۰۴۸	۱/۰۹۹	۱/۰۷۵	۱/۰۷۵	۱/۱۱۶	۱/۰۳۳	۲۷۸۳	۳۰۰۰	۰/۹۵	۱	۱۱/۵۲	۱۲	RB
۰/۷۰۱	۰/۵۱۶	۰/۶۶۰	۰/۶۹۸	۰/۶۹۹	۰/۷۰۱	۰/۵۷۲	۰/۵۷۴	۰/۶۲۶	۰/۶۲۶	۲۵۹۳	۳۰۰۰	۰/۹۶	۱	۱۱/۲۹	۱۲	RBS0
۰/۶۷۹	۰/۴۷۴	۰/۴۰۲	۰/۴۹۵	۰/۶۷۹	۰/۶۰۱	۰/۶۱۳	۰/۵۹۱	۰/۶۱۳	۰/۶۱۳	۲۷۲۹	۳۰۰۰	۰/۹۸	۱	۱۱/۳۸	۱۲	RBS5
۰/۷۶۸	۰/۴۷۱	۰/۶۳۰	۰/۶۴۷	۰/۷۶۸	۰/۵۹۱	۰/۵۸۳	۰/۵۴۱	۰/۵۱۷	۰/۵۱۷	۲۸۰۱	۳۰۰۰	۰/۹۴	۱	۱۱/۶۳	۱۲	RBS10
۰/۸۲۶	۰/۶۶۲	۰/۷۳۴	۰/۷۴۶	۰/۷۵۸	۰/۷۳۶	۰/۸۲۶	۰/۶۲۷	۰/۶۴۲	۰/۶۴۲	۲۸۵۵	۳۰۰۰	۰/۹۸	۱	۱۱/۷۳	۱۲	RBS15
۰/۹۹۳	۰/۸۴۵	۰/۹۹۳	۰/۸۹۴	۰/۸۷۲	۰/۹۴۵	۰/۸۲۲	۰/۷۶۳	۰/۸۲۴	۰/۸۲۴	۲۶۹۹	۳۰۰۰	۱/۰۱	۱	۱۱/۴۱	۱۲	RBS20

قابل ملاحظه هزینه ها شود. این تحقیق صرفاً برای بررسی عدد آسیب صورت گرفته و برای سایر پارامترها و محاسبات اجرا و هزینه، مستلزم تحقیقات بیشتری است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر فاصله مانع مستغرق در کاهش عدد آسیب موج شکن توده سنگی شکل پذیر پرداخته شده است. نتایج این بررسی در تعیین فاصله مناسب مانع برای کاهش عدد آسیب را می توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- استفاده از تصویربرداری فتوگرامتری و تهیه نقشه های سه بعدی از تغییر پروفیل موج شکن ها، روشی مؤثر بوده و می توان عدد آسیب در هر مقطع از موج شکن را به دست آورد.

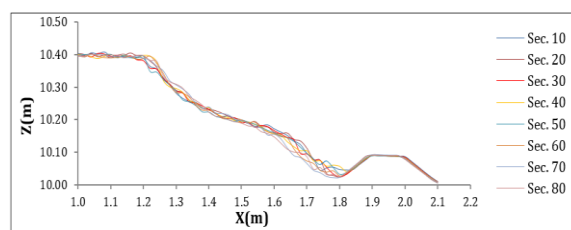
۲- آزمایشات نشان داد در مدت برخورد ۱۰۰۰ موج اولیه، بیشینه تغییر پروفیل (بیش از ۵۰ درصد) رخ می دهد و فرسایش لایه آرمور تا ۳۰۰۰ موج، روند افزایشی داشته و پس از آن آهنگ فرسایش سازه بین امواج ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ به طور محسوسی کاهش می یابد و فرسایش از ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ موج، عملاً ناچیز و نامحسوس است.

۳- با توجه به این که فرسایش و تغییر پروفیل موج شکن در برخورد ۳۰۰۰ موج به مقطع سازه، به بیش از ۹۰ درصد حد نهایی (۶۰۰۰ موج) می رسد؛ با افزایش ارتفاع موج، عدد آسیب افزایش می یابد به طوری که، به ازای رشد ارتفاع موج نسبی از ۰/۳۶ به ۰/۴۸ و از ۰/۴۸ به ۰/۶، عدد آسیب به ترتیب ۳۹/۱۲ و ۴۴/۴۴ درصد افزایش می یابد.

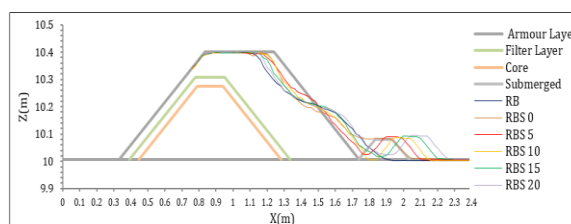
۴- افزایش پرید و عدد آسیب را بیشتر می کند و به ازای رشد پرید موج نسبی از ۰/۶ به ۰/۸ و از ۰/۸ به ۱، عدد آسیب به ترتیب ۲۲/۹۴ و ۲۸/۲۶ درصد افزایش می یابد.

۵- بر مبنای نتایج مأخوذه میزان آسیب در مقاطع عرضی باهم تفاوت داشته و قطعاً نمی توان مقطع میانی را به عنوان مقطع پیشنهادی برای بررسی پایداری معرفی نمود.

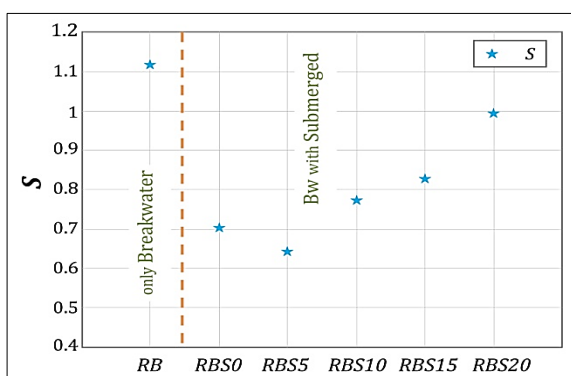
۶- در آزمایش مدل های فیزیکی، عدد آسیب در موج شکن بدون مانع، تحت امواج تصادفی، برابر با ۱/۱۱۶ به دست



شکل ۱۴- پروفیل تغییر شکل یافته موج شکن در هر یک از مقاطع عرضی



شکل ۱۵- پروفیل تغییر شکل یافته موج شکن در تمام حالت های آزمایش



شکل ۱۶- مقایسه عدد آسیب در تمام حالت های آزمایش

به عبارت بهتر وقتی فاصله زیادتر می شود عملکرد قسمت فرسایش یافته و ریخته شده در آن فاصله کمتر می شود. همچنین می توان نتیجه گرفت که کاهش ۳۹/۱۵ درصدی عدد آسیب، می تواند موجب کاهش ابعاد موج شکن و به تبع آن کاهش

- structures and breakwaters. Thomas Telford, London, 1992, 111-121.
- He F, Huang Z, Law AW, "Hydrodynamic performance of a rectangular floating breakwater with and without pneumatic chambers: An experimental study", *Ocean Engineering*, 2012, 51, 16-27.
- Janardhan P, Harish N, Rao S, Shirlal KG, "Performance of variable selection method for the damage level prediction of reshaped berm breakwater", *ICWRCOE, Aquatic Procedia*, 2015, 4, 302-307.
- Jian Xu T, Wang XR, Guo WJ, Dong H, Hou HM, "Numerical simulation of combined effect of pneumatic breakwater and submerged breakwater on wave damping", Taylor and Francis: Ships and offshore structures, 2020.
- Juhl J, Jensen OJ, "Features of berm breakwaters and practical experience", *Proceeding of International Conference on coastal and port Eng. in developing countries. RJ Brazil*, 1307-1320.
- Lamberti A, Tomasicchio GR, Guiducci F, "Reshaping breakwaters in deep and shallow water conditions", *Proceeding of 24th International Conference on Coastal Engineering Kobe, Japan, ASCE*, 1994, 1343-1358.
- Neves AC, Veloso Gomes F, Taveira Pinto F, "Analysis of the wave-flow interaction with submerged breakwaters", *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 2007, 46, 147-154.
- Panagiota G, Christos M, Panayotis P, "Optimized reliability-based upgrading of rubble mound breakwaters in a changing climate", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2018, 6 (92).
- Qin H, Mu L, Tang W, Hu Z, "Numerical study of the interaction between peregrine breather based freak waves and twin-plate breakwater", *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 87, 206-227.
- Quiroga I, Vidal C, Lara J, Gonzalez M, Sainz A, "Stability of rubble-mound breakwaters under tsunami first impact and overflow based on laboratory experiments", *Coastal Engineering*, 2018, 135, 39-54.
- Rao S, Pramod rao B, "Stability of berm breakwater with reduced armour stone weight", *Ocean Engineering*, 2003, 31, 1577-1589.
- Sayao O, Da Silva RF, "Analysis of rubble mound breakwater damage: Case study of existing breakwater rehabilitation", *IX Pinac Copedec Conference*, 2016.
- Sayao O, "On the profile reshaping of berm breakwaters", *Coastal structures*, 1998, 99, 224-265.
- Smith DAY, Warner PS, Sorensen RM, "Submerged-crest breakwater design, advances in coastal structures and breakwaters", Thomas Telford, London, 1996, 208-219.
- Stefanutti Stocks Marine, "Rubble mound breakwater vs tandem breakwater cost estimation", Cape Town, Stefanutti Stocks Marine, 2015.
- Tulsi K, Phelp D, "Monitoring and maintenance of breakwaters which protect port entrances", *Proceeding of the 28th South African Transport Conference*, 2009, 317-332.
- Twu SW, Liu CC, Hsu WH, "Wave damping characteristics of deeply submerged breakwaters", *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2001, 127 (2), 97-105.
- آمد. با به کارگیری مانع متصل، عدد آسیب ۰/۷۰۱ و در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متری اعداد آسیب به ترتیب معادل ۰/۶۷۹، ۰/۷۶۸، ۰/۸۲۶، ۰/۹۹۳ گردید.
- ۷- مشخص شد که فاصله ۵ سانتی متری مدافع از موج شکن، بیشترین تأثیر و کمترین عدد آسیب را نشان می دهد؛ به طوری که وجود مانع در این فاصله، باعث کاهش ۳۹/۱۵ درصدی عدد آسیب می شود. از این رو بر مبنای مطالعه آزمایشگاهی انجام یافته در این تحقیق، فاصله بهینه بین مدافع مستغرق و موج شکن شکل پذیر توده سنگی، ۵ سانتی متر پیشنهاد می گردد.
- ۸- کاهش عدد آسیب، می تواند به کاهش ابعاد موج شکن و به تبع آن کاهش قابل ملاحظه هزینه ها منجر شود.
- ### ۵- مراجع
- خسروی بابادی م، گلشنی ع، قانع اردکانی ا، کرمی متین ا، "اصول طراحی موج شکن ها"، سازمان صنایع دریایی، ۱۳۹۶، ۴۲-۲۳.
- عطایی آشتیانی ب، "مهندسی سواحل (هیدرودینامیک سواحل)"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵، ۲۱۴-۲۱۸.
- قنبریان م، "موج شکن های توده سنگی جلد اول (انواع موج شکن ها، مبانی طراحی و کلیات)"، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا (ص)، ۱۳۸۹، ۱۵-۱۹.
- لطف الله یقین م ع، نصیرائی ح، "مدل سازی عددی نیروهای وارده از طرف امواج سونامی بر سازه های ساحلی"، *اقیانوس شناسی*، ۱۳۹۴، ۶ (۲۴)، ۳۰-۲۳.
- موسوی ش، "موج شکن های توده سنگی جلد دوم (طراحی موج شکن های توده سنگی)"، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا (ص)، ۱۳۸۹، ۹۳-۱۱۵.
- نصیرائی ح، حیدرزاده م، شفیعی فر م، "مدل سازی عددی نیروهای وارده از طرف امواج بلند (سونامی) بر موج شکن های کیسونی"، *مهندسی عمران شریف*، ۱۳۹۵، ۲ (۳/۲)، ۳۲، ۳-۱۲.
- Andersen TL, "Hydraulic response of rubble mound breakwaters (scale effects- berm breakwaters)", University of Alborg, Denmark, 2006.
- Bungin ER, "The effect of square submerged breakwater on wave transmission in the coastal area", *AC2SET (2020), IOP Conf. series: Materials Science and Engineering*, 2021.
- Burcharth HF, "Design of breakwaters", Department of Civil Engineering, Alborg University, Denmark, 1993.
- Campos A, Castillo C, Sanchez RM, "Damage in rubble mound breakwaters. Part I: Historical review of damage models", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8, 317.
- Cox JC, Clark GR, "Design and development of a tandem breakwater system for Hammond Indiana", *Coastal*

Van der Meer JW, "Conceptual design of rubble mound breakwaters", Delft Hydraulics, Report No. 483, 1993.

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Analysis of the Effect of the Distance of a Submerged Berm in front of a Reshaping Rubble Mound Breakwater on Diminishing the Damage Parameter

Mohammad Taghi Alami^{a,*}, Ramin Vafaeipour Sorkhabi^b, Alireza Naseri^c, Alireza Mojtahedi^a

^a Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^c Aras International Campus, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 26 April 2021; Accepted: 29 May 2021

Keywords:

Rubble mound breakwater, Random wave, Damage parameter, Submerged obstacle, Photogrammetry.

1. Introduction

Numerous studies have been conducted on the performance of breakwaters. Armor layer stability and structural porosity, height, and size on reshaping rubble mound breakwaters have been frequently studied. Sayao and Da Silva (2016) analyzed the relationships of breakwater parameters, e.g., wall slope, crest width, and height, with the behavior of incident waves. It is crucial to evaluate the stability and damage parameter of breakwaters. Research has shown that characteristic variables are important in the damage estimation of breakwaters to improve accuracy and reduce tests (Janardhan et al., 2015). Submerged breakwaters reduce wave energy and can be an effective alternative to protect the existing breakwaters (Bungin, 2021). The present study aimed to explore the effects of a submerged obstacle in the seaward (and its position) on the stability of a rubble mound breakwater based on the damage parameter. Tests were carried out in the absence and presence of a submerged obstacle at a distance of 0-20 cm with 5-cm intervals (seaward) to evaluate the effect of the distance on the breakwater damage parameter.

2. Details of experimental study

The tests were performed in a 35-m flume at the SCWMRI, and random waves with a JONSWAP spectrum were employed to evaluate structural performance. The features of breakwater and obstacle, are shown in Fig. 1.

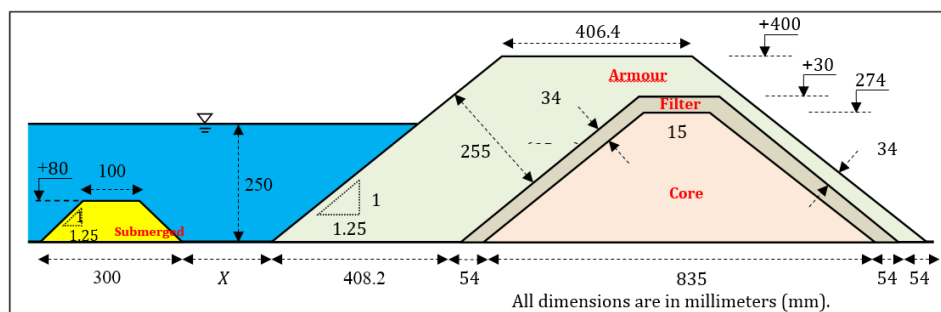


Fig. 1. Transversal section of the wave flume and the position of the breakwater and the obstacle

* Corresponding Author

E-mail addresses: mtaalami@tabrizu.ac.ir (Mohammad Taghi Alami), raminvafaei@yahoo.com (Ramin Vafaeipour Sorkhabi), alireza1naseri@gmail.com (Alireza Naseri), a.mojtahedi@tabrizu.ac.ir (Alireza Mojtahedi).

Research has shown that damage propagation is complex in the armor layer as wave incidence is stochastic. Hence, it is important to monitor breakwaters through advanced imaging equipment and damage propagation modeling and investigate the significant parameters of the process (Campos et al., 2020). Close-range photogrammetry was employed, developing a 3D model of the breakwater to plot the breakwater deformation profile through displacement imaging. The 3D plot measured the eroded area and damage parameter in eight transverse sections. A literature review suggests that stability was evaluated only in the side or middle section of breakwaters in earlier works. However, the present study used imaging to obtain the dense cloud and 3D integrated model with a realistic structure and different elevations before and after wave incidence.

3. Results and discussion

Tests performed in the research are shown in Table 1. By the test results, the first 3000 wave hits account for 90% of the breakwater's final erosion and profile transformation. As well, increasing the wave height increases the damage parameter; increasing the relative wave height from 0.36 to 0.48 and then to 0.6 increases the damage parameter by 39.12 and 44.44%, respectively. Also, the damage parameter increased with longer periods. Increasing the relative wave period from 0.6 to 0.8 and then to 1 increases the damage parameter by 22.94 and 28.26%, respectively. Also, Table 2 demonstrates damage parameters in sections, height, period, and the number of waves calculated based on the experiments. In this table, H_{wm} is the wave height defined for the wave maker, H_s , the significant wave height taken from the water surface, T_{wm} , the wave period specified for the wave maker, T_s , the significant wave period taken from the water surface, N , the number of waves expected and N_{pr} the number of waves taken from the water surface.

Table 1. Performed tests

Test	Breakwater arrangement modes with obstacle
RB	Breakwater without obstacle
RBS0	Breakwater along with the connected obstacle
RBS5	Breakwater along with the obstacle at 5 cm
RBS10	Breakwater along with the obstacle at 10 cm
RBS15	Breakwater along with the obstacle at 15 cm
RBS20	Breakwater along with the obstacle at 20 cm

Table 2. Damage parameter in sections, height, period, and number of waves calculated in tests

Breakwater	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	12	11.52	1	0.95	3000	2783	1.033	1.116	1.075	1.099	1.048	1.014	1.017	0.959	1.116	0.679
RBS0	12	11.29	1	0.96	3000	2593	0.626	0.574	0.572	0.701	0.699	0.698	0.660	0.516	0.701	
RBS5	12	11.38	1	0.98	3000	2729	0.613	0.591	0.613	0.601	0.679	0.495	0.402	0.474	0.679	
RBS10	12	11.63	1	0.94	3000	2801	0.517	0.541	0.583	0.591	0.768	0.647	0.630	0.471	0.768	
RBS15	12	11.73	1	0.98	3000	2855	0.642	0.627	0.826	0.736	0.758	0.746	0.734	0.662	0.826	
RBS20	12	11.41	1	1.01	3000	2699	0.824	0.763	0.822	0.945	0.872	0.894	0.993	0.845	0.993	

Fig. 2. compares the reshaped rubble mound breakwater profile in all test conditions. Analysis of the test results shows that a defender distance of 5 cm from the breakwater was the most effective distance and minimized the damage parameter; it led to a 39.15% reduction in the damage parameter. From a physical perspective, it was observed that the submerged obstacle in front of the breakwater served as a support structure and reduced sliding, preventing armor layer erosion. The distance between the submerged obstacle and breakwater would be filled with the eroded portion of the armor layer, which becomes a part of the breakwater and contributes to its stability.

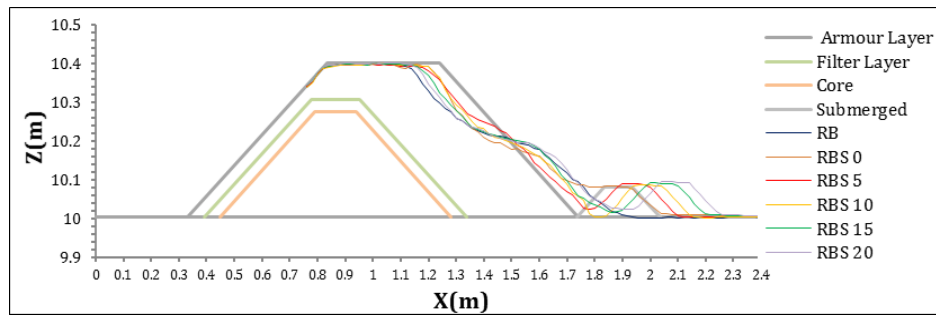


Fig. 2. Reshaped Rubble mound breakwater profiles in all test modes

4. Conclusions

Using a submerged obstacle in front of the main structure to protect against the waves intense effect can be considered a suitable and effective method. The tests revealed that at 5 cm, spacing between the submerged obstacle and the rubble mound breakwater was the most effective in lowering the damage parameter by 39.15%. Accordingly, a 5 cm distance was proposed between the submerged obstacle and the rubble mound breakwater. It should be mentioned that the calculations were carried out merely based on the damage parameter, and future studies are required to evaluate other parameters.

5. References

- Bungin ER, "The effect of square submerged breakwater on wave transmission in the coastal area", AC2SET (2020), IOP Conference series: Materials Science and Engineering, 2021.
- Campos A, Castillo C, Sanchez RM, "Damage in rubble mound breakwaters. Part I: Historical review of damage models", Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8, 317.
- Janardhan P, Harish N, Rao S, Shirlal KG, "Performance of variable selection method for the damage level prediction of reshaped berm breakwater", ICWRCOE, Aquatic Procedia, 2015, 4, 302-307.
- Sayao O, Da Silva RF, "Analysis of rubble mound breakwater damage: Case study of existing breakwater rehabilitation", IX Pinac Copedec Conference, 2016.