

مطالعه عددی روگذری موج از روی موج شکن‌های توده‌سنگی (مطالعه موردی: موج شکن

توده‌سنگی بندر پارسیان)

مجید احسانی^{۱*}، محمد صمدی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران مرکز

^۲شرکت مشاور ساحل امید ایرانیان

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷)

چکیده

در مقاله حاضر، نظر به اهمیت ارزیابی مناسب واکنش‌های هیدرولیکی در برابر برخورد امواج تابشی به موج شکن توده‌سنگی، انجام مطالعه‌ای سیستماتیک با هدف شناخت و بررسی پدیده روگذری موج از روی موج شکن‌های توده‌سنگی مدنظر قرار گرفت. برای این منظور، مطالعه‌ای عددی در گستره مناسب از پارامترهای مختلف محیطی و هندسی برای بررسی پدیده روگذری موج از روی موج شکن توده‌سنگی انجام شد. در تحقیق حاضر تأثیر هر یک از پارامترهای محیطی شامل ارتفاع موج، پریود موج و عمق آب پای سازه و همچنین تأثیر پارامترهای مختلف هندسی از قبیل شیب لایه آرمو، عرض سکو، و تراز تاج سازه بر مقدار دبی سرریزی موج از روی تاج موج شکن مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند. در مطالعه حاضر برای انجام مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است. برای انجام صحت‌سنجی، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. نتایج دبی روگذری موج از روی موج شکن پارسیان حاصل از مدل‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی، حاکی از تطابق نتایج و عملکرد مناسب مدل عددی است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که با افزایش ارتفاع و پریود موج برخوردی و عمق آب پای سازه مقدار دبی روگذری موج از روی تاج سازه افزایش یافته است. همچنین با افزایش پارامترهای سازه‌ای از قبیل عرض سکو و تراز تاج سازه مقدار سرریزی موج از روی تاج سازه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است. با تندتر شدن شیب لایه آرمو، مقدار دبی روگذری موج از روی تاج سازه بیشتر شده و بالاروی موج نیز به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: موج شکن توده‌سنگی، روگذری موج، موج شکن بندر پارسیان، مدل‌سازی عددی

۱. مقدمه

اولویت‌های اساسی در برنامه‌ریزی توسعه کشور است. بنابراین، در دهه‌های اخیر با توجه به رشد صنعت حمل و نقل دریایی و همچنین نیاز بشر به استفاده بیشتر از منابع دریایی، تلاش گسترده‌ای برای ساخت بنادر به‌منظور ایجاد یک منطقه امن و آرام برای پناه دادن به شناورها انجام شده است. یکی از قسمت‌های مهم بندر، موج شکن است، که در برابر امواج سهمگین دریا مقاومت می‌کند و محلی آرام برای پهلوگیری، باراندازی و بارگیری شناورها ایجاد می‌کند. با توجه به پرهزینه بودن ساخت یک موج شکن برای احداث بندر، طراحی صحیح و بهینه این سازه‌ها، هم از نظر پایداری و کارایی و هم از نظر اقتصادی کاملاً ضروری به‌نظر می‌رسد.

مناطق ساحلی هر کشور در زمره منابع ارزشمند ملی آن به‌شمار می‌آیند. سواحل و مناطق مجاور با آب‌های آزاد، نه تنها بخش زیادی از مبادلات کالا بین کشورهای مختلف را برعهده دارند، بلکه مجموعه‌ای از استعدادهای متنوع برای فعالیت‌های اقتصادی، فرهنگی، اجتماعی و نظامی را عرضه می‌دارند. درعین حال، دریا به‌عنوان منبع این استعدادهای بعضاً دارای کنش‌ها و رفتارهای پیچیده‌ای است که عدم شناخت و توجه به این رفتارها، منجر به اختلال در بهره‌برداری از این استعدادهای و یا حتی پدید آمدن خسارت‌های هنگفت جانی و مالی می‌شود. از طرفی با توجه به وجود بیش از ۳۰۰۰ کیلومتر خط ساحلی در سواحل کشور و ضرورت حفاظت و بهره‌برداری مناسب از این سواحل، انجام مطالعات و پژوهش در زمینه مهندسی سواحل یکی از

همگن انجام داد و رابطه‌ای نیمه تجربی برای تخمین عرض روگذری موج پیشنهاد کرد. Krom [۷] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی توزیع روگذری موج نامنظم روی موج‌شکن‌های سکویی با سکوی شکل‌ناپذیر پرداخت. اخیراً محققانی مانند Vanneste و Troch [۸] و Dentale و همکاران [۹] به منظور شبیه‌سازی اندرکنش موج با محیط متخلخل موج‌شکن توده‌سنگی از نرم‌افزار عددی FLOW-3D استفاده کردند. Nematollahi و Moghim [۱۰] با استفاده از مدل‌سازی عددی به وسیله‌ی نرم‌افزار FLOW-3D، دبی روگذری کلی و توزیع دبی روگذری موج روی تاج سازه را مطالعه کردند. Li و همکاران [۱۱] سرریزی موج را با استفاده از قطعات آرمور متفاوت مطالعه عددی کردند. آن‌ها بیان کردند که مدل عددی مطالعه‌شان می‌تواند برای پیش‌بینی سرریزی موج از روی موج‌شکن با بلوک‌های آرمور مصنوعی استفاده شود. Van و Mata و Gent [۱۲] دبی روگذری موج از روی موج‌شکن توده‌سنگی را با استفاده از نرم‌افزار منبع باز OpenFOAM بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل؛ شیب سازه، تاج سازه، سکوی موج‌شکن و تیزی موج را مطالعه کردند. مطالعه آن‌ها نشان داده است که سرریزی موج از روی موج‌شکن، قویاً به شیب سازه وابسته است و از این‌رو یک روش برای محاسبه سرریزی موج با در نظرگیری اثر شیب سازه پیشنهاد کردند.

بازخوانی مطالعات انجام شده توسط سایر محققین نشان می‌دهد که عمده پژوهش‌ها در زمینه پدیده سرریزی موج از روی موج‌شکن توده‌سنگی به صورت مدل آزمایشگاهی انجام شده و با توجه به محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی، گستره تغییرات پارامترهای مختلف نیز در دامنه محدودی دچار تغییر شده‌اند. درحالی‌که در پژوهش حاضر، بررسی و شناخت تأثیر پارامترهای مختلف محیطی و هندسی به صورت مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شد و از این‌رو، مدل‌های پیش‌بینی شده به صورت سیستماتیک و با گستره تغییرات مناسب مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. نکته قابل ذکر دیگر آنکه، به نظر می‌رسد که مطالعه حاضر بتواند در پروژه‌های مشابه نیز قابل تعمیم باشد و نتایج بدست آمده از آن برای سایر پروژه‌ها نیز بینش مناسبی را برای طراحی موج‌شکن‌های مشابه ایجاد کند. در واقع یکی از مزیت‌های این پژوهش این است که استفاده از این پروژه هیچ‌گونه محدودیت زمانی نخواهد داشت و می‌تواند شناخت مناسبی برای استفاده طراحان و کارفرمایان پروژه‌های موج‌شکن‌های توده‌سنگی حتی در سالیان آتی ایجاد نماید. بررسی جنبه‌های کاربردی این پژوهش از دیدگاه دیگری نیز حائز اهمیت است. پژوهش حاضر می‌تواند سبب کاهش آزمایش‌های در نظر گرفته شده برای پروژه‌های مشابه که دستگاه اجرایی انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی را در آن ضروری می‌داند، شود.

در میان انواع موج‌شکن‌ها می‌توان به موج‌شکن توده‌سنگی^۱ به عنوان متداول‌ترین گزینه اشاره کرد. موج‌شکن‌های توده‌سنگی عموماً از سه قسمت اصلی شامل هسته، فیلتر و لایه آرمور تشکیل می‌شوند. معمولاً طراحی و اجرای مقطع موج‌شکن‌های توده‌سنگی به شکل ذوزنقه انجام می‌شود؛ به طوری که در صورت طراحی صحیح سازه، ضمن حفظ پایداری سازه، نیم‌رخ سمت دریای آن بتواند نیروهای ناشی از امواج برخوردی را به خوبی مستهلک کند.

با توجه به ماهیت پیچیده امواج در حین برخورد با سازه‌های دریایی، شناخت هر چه بیشتر مسائل مطرح در طراحی سازه‌های دریایی سبب طراحی بهینه‌تر و کارآمدتر سازه در طول عمر مفید آن می‌شود، که با توجه به هزینه‌های بسیار زیاد طرح و اجرای سازه‌های دریایی، نباید به آسانی از آن گذر کرد. یکی از مهمترین پارامترهای مطرح در طراحی موج‌شکن‌های توده‌سنگی، بررسی پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر این سازه‌ها مانند روگذری موج از روی سازه است [۱]. پدیده روگذری با عبور موج برخوردی از تاج موج‌شکن اتفاق می‌افتد و در بعضی موارد باعث تخریب موج‌شکن و حتی آسیب به سازه‌های پشت موج‌شکن می‌شود. از این‌رو، پیش‌بینی صحیح روگذری موج از روی موج‌شکن‌ها و در نظر گرفتن تمهیدات برای آن، از نظر تأمین ایمنی سازه و جان افراد در مهندسی دریا اهمیت زیادی دارد. مقدار حجم آب گذرنده در اثر بالاروی موج و عبور آب از تاج موج‌شکن که در وجه رو به دریا قرار دارد، بیانگر میزان روگذری موج از روی سازه است.

در خصوص تعیین مقادیر مجاز سرریزی، تحقیقات مختلفی انجام شده است. در این خصوص ابتدا Fukuda و همکاران [۲] تحقیقاتی را انجام داده‌اند. De Gerloni و همکاران [۳] با مطالعه-ی موج‌شکن‌های قائم، دبی‌های سرریزی بحرانی را که باعث ایجاد خطر برای اتومبیل‌ها و مردم می‌شود را در نظر گرفتند. Goda [۴] تحقیقاتی را با در نظر گرفتن نمونه‌های واقعی (پروتوتایپ) در شرایط مختلف امواج و موقعیت‌های متفاوت بر روی موج‌شکن‌ها انجام داد. برای یک دبی میانگین مشخص، حجم بزرگترین سرریزی حادث شده می‌تواند با تغییر شرایط امواج و نوع سازه تغییر کند. از این‌رو برای محاسبه آن در سازه‌های مختلف احتیاج به اطلاعات و آزمایش‌های مختلف است که در سال ۲۰۰۵ با انجام پروژه‌ی بزرگ CLASH اطلاعات جامع و کاملی در این خصوص ارائه شده است [۵]. Lykke Andersen [۶] آزمایش‌های وسیعی با هدف بررسی اثرات پارامترهای مختلف شامل عرض سکو، ارتفاع سکو از تراز ایستایی، ارتفاع موج، پیروید موج، مدت طوفان، اندازه سنگ‌دانه، عمق آب پای سازه، عرض تاج، تراز تاج، اثر مقیاس و اثر دانه‌بندی لایه آرمور بر سرریزی موج از روی موج‌شکن سکویی

¹ Rubble mound breakwater

شده است. برای ساخت هندسه مدل، بدنه موج‌شکن توده‌سنگی شامل لایه‌های مختلف سنگی در نرم‌افزار اتوکد ساخته شد. سپس هندسه سازه به‌صورت یک جسم صلب با فرمت *.stl^۳ برای نرم‌افزار FLOW-3D تعریف شده است. به منظور مدلسازی محیط متخلخل از رابطه Forchheimer [۱۵] استفاده می‌شود. در مدل‌سازی عددی حاضر، مشابه با مطالعه Vanneste و Troch [۸]، شبکه‌بندی در یک بلوک و در سراسر میدان حل به‌صورت یکنواخت متشکل از سلول‌های مستطیلی در نظر گرفته شده است. در هر بلوک شبکه‌بندی، شش وجه مشخص شامل (X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} , Z_{max}) برای تعریف شرایط مرزی وجود دارد. در مطالعه حاضر، مطابق با جدول (۱) شرایط مرزی در وجوه مختلف بلوک تعریف شده است.

جدول (۱) - شرایط مرزی تعریف شده در مدل‌سازی عددی حاضر

شرایط مرزی	وجه مدنظر
تقارن	X_{min}
موج	X_{max}
تقارن	Y_{min}
تقارن	Y_{max}
دیوار	Z_{min}
تقارن	Z_{max}

در مقاله حاضر صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از مدل آزمایشگاهی موج‌شکن بندر پارسیان انجام شده است. مقاطع نهایی و بحرانی موج‌شکن پارسیان به‌صورت شکل (۱) در نظر گرفته شده است. مبنای مدل‌سازی عددی نیز مقاطع نهایی ارائه شده است. تعیین مناسب‌ترین شبکه‌بندی یکی از مهمترین گام‌ها در مدل‌سازی عددی محسوب می‌شود؛ چراکه با شبکه‌بندی درشت گرادیان تغییرات بیشتر می‌شود و از این‌رو بدیهی است که به جواب صحیح نمی‌توان رسید. لذا شبکه‌بندی با سلول‌های محاسباتی با ابعاد کوچکتر باید مدنظر قرار گیرد تا با اعمال فشرده‌سازی نقاط شبکه در مناطقی که متغیرهای جریان تحت گرادیان‌های شدید قرار دارند، بتوان تمام تغییرات را بررسی کرد و با ارزیابی همه جوانب عددی در یک سلول محاسباتی به پاسخ مناسب‌تری دست یافت. البته شایان توجه است که کوچکتر کردن ابعاد سلول‌های محاسباتی و ریز کردن شبکه باید به‌صورت اصولی باشد؛ زیرا که یکی از پیامدهای آن زیاد شدن تعداد سلول‌های محاسباتی و در نتیجه آن افزایش حجم محاسبات و طولانی شدن زمان حل عددی است.

نکته قابل توجه کاربردی دیگر آنکه شناخت مناسب پارامترهای مختلف سبب خواهد شد، در کشور ایران به‌خصوص در جنوب کشور که تأمین و تولید بلوک‌های سنگی با تناژ بزرگ هزینه‌بر و مشکل بوده و از طرفی استفاده از بلوک‌های بتنی نیز هزینه بسیار زیادی برای پروژه‌ها ایجاد خواهد کرد، مصالح معدن قرصه بهینه‌تر استفاده شود و در نهایت منجر به کاهش هزینه می‌شود.

در مجموع به‌نظر می‌رسد، انجام مطالعه در زمینه پارامترهای مورد نیاز برای طراحی موج‌شکن‌های توده‌سنگی بتواند نقش مناسبی برای جلوگیری از ابهامات فنی در این زمینه ایفا کند. بنابراین در مطالعه حاضر، بررسی پارامترهای مختلف نظیر تراز تاج موج‌شکن، شیب لایه آرمور سازه، ایجاد عرض سکو و عمق آب پای سازه به جهت کاهش ابهامات فنی در بخش طراحی مورد توجه است. علاوه‌براین ارتفاع موج و پرپود موج به عنوان دو پارامتر محیطی اثرگذار بر روگذری موج از روی تاج سازه بررسی می‌شوند.

۲. روش تحقیق

در مطالعه حاضر، از نرم‌افزار FLOW-3D برای حل عددی معادلات حاکم جریان استفاده می‌شود. FLOW-3D برای بررسی رفتار دینامیک سیالات در محیط‌های مختلف طراحی شده است. در این نرم‌افزار از دو روش حجم سیال (VOF^1) و کسر مساحت - حجم مانع ($FAVOR^2$) برای شبیه‌سازی هندسی مرز سیالات و مرزهای صلب استفاده شده است. روش حجم سیال برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش کسر مساحت - حجم مانع برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد [۱۳]. در نرم‌افزار FLOW-3D، قوانین حاکم بر جریان سیال تراکم‌ناپذیر و لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله اندازه حرکت در جهت محورهای سه‌گانه مختصات، معادلات ناویر-استوکس، بیان می‌شوند [۱۴].

نرم‌افزار FLOW-3D قابلیت استفاده از شش مدل آشفتگی شامل صفر معادله‌ای طول اختلاط پرناتل، یک معادله‌ای، دو معادله‌ای $k-\epsilon$, $k-\omega$, RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را دارد. بررسی پژوهش‌های انجام شده در بررسی اندرکنش موج-سازه متخلخل، حاکی از آن است که در عمده مطالعه‌های مربوط به موج‌شکن‌های توده‌سنگی از مدل آشفتگی دو معادله‌ای RNG استفاده می‌شود. در مدل‌سازی عددی حاضر، جریان به‌صورت تک فاز و سیال تراکم‌ناپذیر تعریف شده است. برای در نظر گرفتن مشخصات سیال، آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تعریف شده و جهت انجام مدل‌سازی آشفتگی از مدل آشفتگی RNG استفاده

³ Stereolithography

¹ Volume of Fluid

² Fractional Area-Volume Obstacle Representation

میلیون سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۳/۴ سانتی‌متر) و ۱/۲ میلیون سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۳/۲ سانتی‌متر) انجام شده است.

جدول (۲) - مشخصات شبکه‌بندی انجام شده در مدل‌سازی عددی

شماره اجرا	مقطع	تعداد سلول	حجم محاسبات (ساعت)
Run 1	W ₃	۳۰۰۰۰۰	۱۲
Run 2		۷۰۰۰۰۰	۱۹
Run 3		۱۰۰۰۰۰۰	۲۶
Run 4		۱۲۰۰۰۰۰	۳۵
Run 5	W ₅	۳۰۰۰۰۰۰	۱۳
Run 6		۷۰۰۰۰۰۰	۱۸
Run 7		۱۰۰۰۰۰۰۰	۲۸
Run 8		۱۲۰۰۰۰۰۰	۳۷

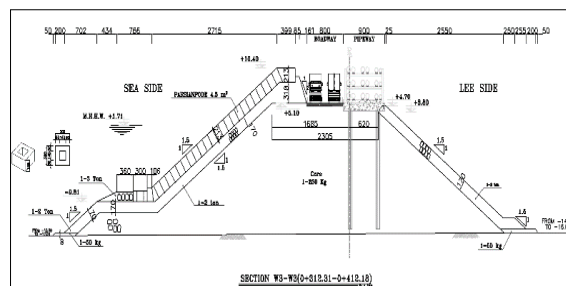
نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت برای روگذری موج از روی تاج سازه با مشخصاتی که پیشتر بیان شد، در جدول (۳) ارائه شده است.

همان‌طور که در این جدول قابل مشاهده است با کوچکتر شدن اندازه سلول محاسباتی، تطابق نتایج مدل عددی برای هر دو مقطع مورد مطالعه در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری شده مدل فیزیکی بهبود یافته است. البته کوچکتر شدن اندازه سلول‌های محاسباتی، منجر به افزایش زمان لازم برای انجام محاسبات می‌شود.

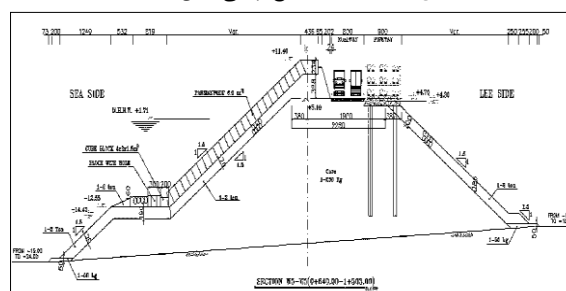
در جدول (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سلول محاسباتی از ۱ میلیون به ۱/۲ میلیون عدد برای مقطع W₃، یک درصد تغییر در میزان روگذری موج و برای مقطع W₅، چهار درصد تغییر نتیجه حاصل شده است.

این در صورتی است که زمان محاسبات حداقل ۳۷ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این برای ارزیابی دقیق‌تر شبکه‌بندی برای مدل عددی در پروژه حاضر، خطای اجراهای مختلف مدل عددی اجرا شده در جدول (۳) نشان داده شده است.

همچنین نمودار شکل (۲) روند تغییرات مقادیر خطا برای هر مدل را نسبت به تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده در شبکه‌بندی متفاوت مشخص می‌کند. با توجه به مطالب فوق‌الذکر در این مطالعه برای مدل‌سازی عددی از ۱ میلیون سلول محاسباتی به عنوان شبکه بهینه حل استفاده شده است.



شکل (۱) - الف - مقطع نهایی مدل W₃



شکل (۱) - ب - مقطع نهایی مدل W₅

پس از شبیه‌سازی فیزیکی مدل حاضر، لازم است بهینه‌سازی شبکه‌بندی انجام شود. در مطالعه حاضر به منظور حساسیت‌سنجی مدل عددی نسبت به تعداد سلول محاسباتی، ۴ اجرای مختلف برای هر یک از مقاطع W₃ و W₅ انجام شده است. برای بررسی موج‌شکن با هندسه‌هایی که پیشتر تشریح شده‌اند؛ معادله مربوط به فیزیک محیط متخلخل معادله فورسهایمر، ضریب تخلخل لایه آرمور ۰/۵۳ و لایه‌های زیرین ۰/۴ و ضریب درگ غیرخطی برابر ۲/۵، مدل آشفتگی RNG، شرایط مرزی مطابق جدول (۱) و مدت زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

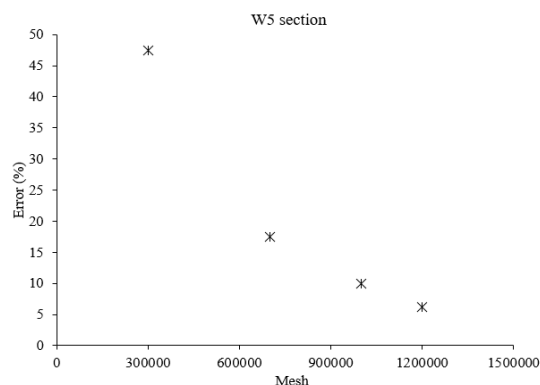
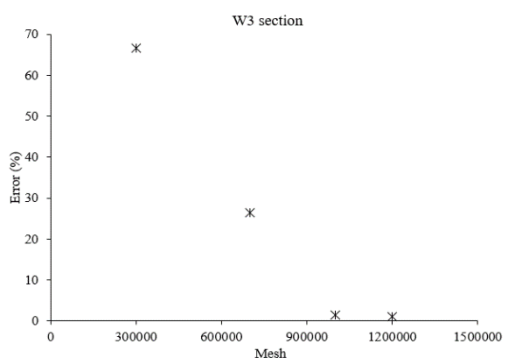
همان‌طور که در جدول (۲) قابل مشاهده است، تحلیل حساسیت برای چهار شبکه محاسباتی برای مقطع W₃ با شرایط محیطی (شامل $H_s=10.44$ cm, $T_p=1.33$ s)؛ شامل ۳۰۰ هزار سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۴/۵ سانتی‌متر)، ۷۰۰ هزار سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۳/۴ سانتی‌متر)، ۱ میلیون سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۰/۳ سانتی‌متر) و ۱/۲ میلیون سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۲/۸ سانتی‌متر) و چهار شبکه محاسباتی برای مقطع W₅ با شرایط محیطی (شامل $H_s=10.55$ cm, $T_p=1.3$ s)؛ شامل ۳۰۰ هزار سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۵ سانتی‌متر)، ۷۰۰ هزار سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۳/۸ سانتی‌متر)، ۱

جدول (۳)-الف- نتایج مقایسه‌ی مدل‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی برای مقطع W_3 با شبکه‌بندی متفاوت

شماره اجرا	مقطع		Q (L)	Error (%)
Run 1	W_3	Model	3.4	66
		Num	10.2	
Run 2		Model	7.5	26
		Num	10.2	
Run 3		Model	10.05	2
		Num	10.2	
Run 4		Model	10.1	1
		Num	10.2	

جدول (۳)-ب- نتایج مقایسه‌ی مدل‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی برای مقطع W_5 با شبکه‌بندی متفاوت

شماره اجرا	مقطع		Q (L)	Error (%)
Run 5	W_5	Model	2.1	47
		Num	4	
Run 6		Model	3.3	17
		Num	4	
Run 7		Model	4.4	10
		Num	4	
Run 8		Model	4.25	6
		Num	4	



شکل (۲) - روند تغییرات مقادیر خطا برای هر مدل نسبت به تعداد سلول‌های شبکه‌ی حل

۳. نتایج و بحث

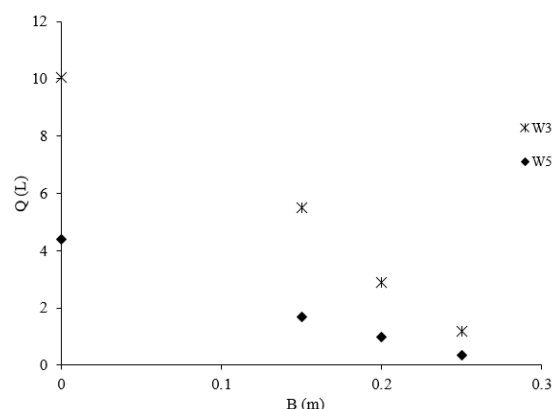
۳-۱. بررسی تأثیر شیب لایه آرمور بر روگذری موج از روی سازه موج‌شکن

شیب لایه آرمور از جمله پارامترهای تعیین‌کننده در حجم مصالح مصرفی و همچنین رفتار سازه‌ای و هیدرولیکی موج‌شکن توده‌سنگی به حساب می‌آید، که بررسی تأثیر آن بر پدیده روگذری موج از روی موج‌شکن توده‌سنگی می‌تواند مکانیسم رفتاری آن را در اثر برخورد موج به سازه تبیین نماید. در مطالعه حاضر، به منظور بررسی اثر شیب لایه آرمور بر روی روگذری موج از روی موج‌شکن بندر پارسیان، آزمایش‌هایی برای سه شیب متفاوت ($1:1/25$ ، $1:1/5$ و $1:2$) برای مقطع W_3 با شرایط محیطی ($H_s=10.44$ cm، $T_p=1.33$ s) و مقطع W_5 با شرایط محیطی ($H_s=10.55$ cm، $T_p=1.3$ s) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است

در این بخش، تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با هدف بررسی روگذری موج از روی موج‌شکن بندر پارسیان انجام شده است. برای این منظور تأثیر هر یک از پارامترهای محیطی شامل ارتفاع موج، پریود موج، عمق آب پای سازه و همچنین تأثیر پارامترهای هندسی نظیر شیب لایه آرمور و تراز تاج سازه بر مقدار پدیده روگذری موج از روی سازه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. علاوه بر این، نظر به اینکه برخورد و حرکت موج بر روی موج‌شکن با محیط متخلخل مانند موج‌شکن پژوهش حاضر، منجر به ایجاد پدیده‌های فیزیکی پیچیده مانند اندرکنش موج با سازه متخلخل و ایجاد جریان در داخل محیط متخلخل می‌شود؛ شناخت جریان‌های ایجاد شده حائز اهمیت زیادی است. از این رو در مطالعه حاضر مکانیسم اثر هر یک از پارامترهای مطرح شده در طول وقوع جریان بالارونده و پایین‌رونده بر روی سازه بررسی می‌شوند.

سازه قرار دارد و علاوه بر کاهش اثرات مخرب موج، اجرای موج-شکن را آسان می‌کند. انتخاب بهینه و مناسب عرض سکوی موج-شکن در یک پروژه موج‌شکن توده‌سنگی سکویی می‌تواند نقش بسیار مهمی در اقتصاد پروژه ایفا کند [۱۶]. از طرف دیگر، بررسی این مهم که موج‌شکن توده‌سنگی به‌صورت شیب‌دار مستقیم طرح گردد یا آنکه دارای سکو باشد، یکی از گزینه‌های مطرح است که باید طراح همواره در نظر گرفته و بررسی‌های مختلفی انجام دهد. در واقع یکی از مهمترین دستاوردهای پروژه تحقیقاتی حاضر بررسی عرض سکو است. از آنجاییکه با ایجاد یک سکوی متخلخل کاربری سازه از موج‌شکن نوع شیب‌دار مستقیم به نوع موج‌شکن سکویی تغییر می‌یابد، بدین ترتیب می‌توان سازه جایگزینی برای سازه اصلی بررسی نمود.

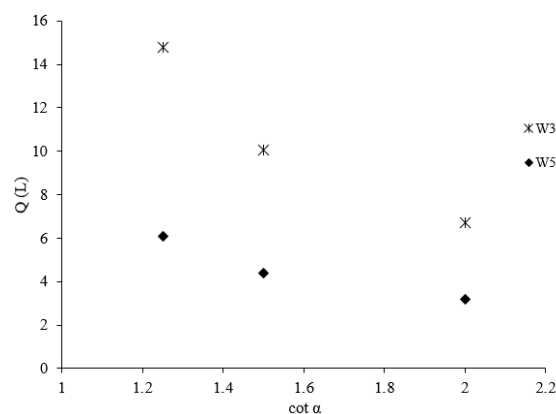
در مطالعه حاضر، به‌منظور بررسی پارامتر عرض سکوی موج-شکن سکویی بر سرریزی موج از روی سازه، تعداد ۸ آزمایش انجام شده است. آزمایش‌ها برای سه عرض سکو متفاوت (۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر) برای مقطع W_3 با شرایط محیطی ($H_s=10.44\text{ cm}$) و $T_p=1.33\text{ s}$ و مقطع W_5 با شرایط محیطی ($H_s=10.55\text{ cm}$) و $T_p=1.3\text{ s}$ و همچنین لایه آرمور شیب‌دار مستقیم طراحی و انجام شده‌اند. شایان ذکر است که در آزمایش‌های مربوط به بررسی اثر دیگر پارامترها، پارامتر عرض سکو در نظر گرفته نشده است. شکل (۵) تأثیر عرض سکوی موج‌شکن را بر مقدار روگذری موج از روی سازه، برای مقاطع مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش عرض سکوی موج‌شکن، مقدار روگذری موج روند کاهشی دارد. در واقع به‌نظر می‌رسد با افزایش عرض سکو، موج به یک سکوی بزرگتر با حجم متخلخل بیشتری از مصالح سنگ‌دانه‌ای برخورد کرده و بخش اعظمی از انرژی آن در هنگام برخورد و حرکت بر روی سکو مستهلک می‌شود.



شکل (۵) - تأثیر عرض سکو بر پارامتر روگذری موج از روی موج‌شکن (Q) در هر یک از مقاطع

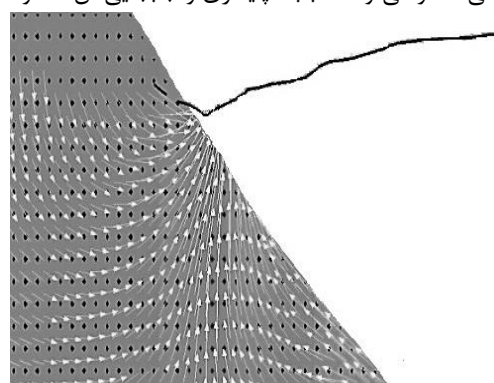
مشاهده‌های آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند که با افزایش عرض سکو، بالاروی موج به میزان قابل توجهی کاهش

که پارامترهای دیگر محیطی و هندسی ثابت فرض شده‌اند. برای نمایش نحوه اثرگذاری پارامتر شیب لایه آرمور بر پارامتر سرریزی موج از روی سازه (Q)، شکل (۳) ارائه شده است.



شکل (۳) - تأثیر شیب لایه آرمور بر پارامتر روگذری موج از روی موج‌شکن (Q) در هر یک از مقاطع

با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی، الگوی جریان خروجی از داخل موج‌شکن توده‌سنگی در زمان وقوع بیشینه‌ی پایین‌روی موج، در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در محل تقریبی بیشینه پایین‌روی موج، جهت حرکت جریان به سمت بیرون و به‌صورت عمود بر سازه است؛ نیروی عمودی ناشی از جریان تراوشی ایجاد شده از داخل به خارج سازه در طول جریان پایین‌رونده موج بر روی شیب سازه، همانند یک نیروی محرک بر بلوک‌های سنگی بر روی لایه آرمور عمل می‌کند و می‌تواند سبب ناپایداری و جابجایی آن‌ها شود.



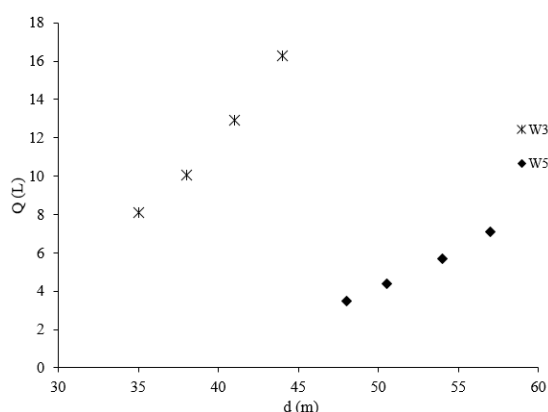
شکل (۴) - جهت تراوش جریان در محیط متخلخل موج‌شکن توده-سنگی سکویی چندلایه در زمان تقریبی بیشینه پایین‌روی موج

۳-۲. بررسی تأثیر عرض سکو بر روگذری موج از روی سازه موج‌شکن

سکو قسمتی از موج‌شکن سکویی است که در وجه روبه دریای

W_3 با شرایط محیطی ($H_s=10.44 \text{ cm}$, $T_p=1.33 \text{ s}$) و چهار عمق آب متفاوت شامل 0.48 ، 0.51 ، 0.54 و 0.57 متر برای مقطع W_5 با شرایط محیطی ($H_s=10.55 \text{ cm}$, $T_p=1.3 \text{ s}$) در نظر گرفته شده است.

شکل (۶) تأثیر پارامتر عمق آب پای سازه بر مقدار سرریزی موج از روی تاج موج‌شکن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است عمق آب پای سازه پارامتر بسیار مهمی در بررسی روگذری موج بوده، به طوری که با افزایش عمق آب پای سازه، پارامتر دبی سرریزی نیز افزایش می‌یابد. به طور مثال با افزایش تقریباً ۱۶ درصدی عمق آب پای سازه در مقطع W_3 با شرایط محیطی ($H_s=10.44 \text{ cm}$, $T_p=1.33 \text{ s}$)، مقدار روگذری موج از روی تاج سازه بیش از ۱/۵ برابر بیشتر شده است.



شکل (۶) - تأثیر عمق آب پای سازه بر پارامتر روگذری موج از روی موج‌شکن (Q) در هر یک از مقاطع

بر اساس تحقیق Hughes [۱۷]، یکی از پارامترهای مهم در بحث اندرکنش موج با سازه، مقدار شار تکانه بیشینه موج است که رابطه مستقیمی با بالاروی موج بر روی لایه آرمور و نیروی حاصل از برخورد موج با سازه دارد. با بیشتر شدن عمق آب پای سازه، مقدار بیشینه شار تکانه موج بیشتر شده و موج نیروی بزرگتری به سازه وارد می‌کند. با افزایش نیروی حاصل از برخورد موج به سازه موج‌شکن، علاوه بر آنکه نیروی محرک بزرگتری به سنگ‌دانه‌ها وارد می‌شود، منجر به افزایش بالاروی موج شده و در نتیجه آن سرریزی موج از روی سازه محتمل‌تر می‌شود. مشاهده‌های آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند که تغییر عمق آب پای سازه، تأثیری اساسی بر میزان بالاروی و پایین‌روی موج بر سازه دارد. به طوری که با افزایش عمق آب، میزان بالاروی و پایین‌روی بیشتری حاصل شده و منجر به روگذری بیشتر موج از روی تاج سازه می‌شود. نکته حائز اهمیت دیگری که با بررسی مکانیسم حرکت موج بر لایه آرمور سازه بدست می‌آید عبارت است از آنکه، در اثر ایجاد جریان بالارونده روی شیب سازه، نیروی محرک به موازات شیب ایجاد شده و باعث لق‌شدگی احتمالی سنگ‌دانه‌ها در جای خود و کم

یافته است. در پی آمد این اتفاق و با کاهش فاصله بین تراز بالاروی و پایین‌روی موج بر روی لایه آرمور، مؤلفه‌ی سرعت جریان موازی شیب سازه و نیروی ناپایدارکننده حاصل از آن به موازات شیب سازه در حین بالاروی موج کاهش می‌یابد. علاوه بر این، کاهش تراز جریان بالارونده و پایین‌رونده روی لایه آرمور، جریان‌های ایجاد شده در داخل سازه در اثر پر و خالی شدن محیط متخلخل در طول بالاروی و پایین‌روی موج روی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که از تراز سطح آب داخل سازه کاسته شده و بدین ترتیب سبب کاهش نیروی فشاری به سمت خارج سازه می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان کرد که افزایش عرض سکو و به تبع آن افزایش حجم محیط متخلخل، منجر به اضمحلال بیشتر انرژی موج تابشی و کاهش بالاروی و پایین‌روی موج شده و متعاقباً نیروهای محرک ایجاد شده جهت ناپایداری سنگ‌دانه‌ها، کاهش می‌یابند، و دیگر پیامد مکانیسم ذکر شده کاهش قابل توجه پدیده روگذری موج از روی تاج سازه است. در واقع افزایش عرض سکو سبب می‌شود که موج برخوردی بر روی طول بیشتری از سکوی متخلخل با قابلیت نفوذپذیری زیاد حرکت کرده، و بدین ترتیب مقدار بیشتری از انرژی موج بر روی سکوی سازه مستهلک می‌شود و به تبع آن بالاروی موج بر روی لایه آرمور و سرریزی آن از روی سازه کاهش می‌یابد.

در صورتی که سازه به صورت موج‌شکن سکویی طرح شود، یکی از نکاتی که طراح باید به آن توجه داشته باشد، برقراری عملکرد مناسب سکو در اثر برخورد موج به سازه است. به طوری که در اثر برخورد امواج به سازه، سکوی موج‌شکن توسط موج احساس شود و موج با انرژی زیادی به شیب بالای سکوی موج‌شکن به طور مستقیم برخورد نکند. از آنجایی که سکوی موج‌شکن نقش تعیین‌کننده‌ای در استهلاک انرژی امواج دارد، عدم دخالت آن در استهلاک انرژی موج تابشی می‌تواند منجر به روگذری بسیار شدید موج از روی تاج سازه و آسیب قابل توجه به شیب لایه آرمور شود.

۳-۳. بررسی تأثیر عمق آب پای سازه بر روگذری موج از روی سازه موج‌شکن

از پارامترهای محیطی دارای تأثیر قابل توجه در میزان روگذری موج از روی سازه موج‌شکن، عمق آب پای سازه است. به طور کلی عمق آب در پای سازه، شرایط محیطی را دستخوش تغییرات قرار می‌دهد. تغییر عمق آب در پای سازه، شرایط و رفتار امواج و همچنین معادلات حاکم بر آن‌ها را تغییر می‌دهد. به عنوان مثال موج در آب کم عمق به صورت غیرخطی و در آب عمیق به صورت خطی‌تر رفتار می‌کند [۱۷]. در تحقیق حاضر برای بررسی اثر عمق آب پای سازه بر روگذری موج از روی تاج موج‌شکن، چهار عمق آب مختلف شامل 0.35 ، 0.38 ، 0.41 و 0.44 متر برای مقطع

تأثیر ارتفاع آزاد تاج سازه بر مقدار روگذری موج از روی سازه در شکل (۷) ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که ارتفاع آزاد تاج سازه در میزان سرریزی موج از روی موج‌شکن دارای تأثیر اساسی است، به طوری که با افزایش ارتفاع آزاد تاج سازه، مقدار روگذری موج دارای روند کاهشی قابل ملاحظه‌ای می‌شود. با بررسی میزان اثرگذاری این پارامتر بر مقدار سطح فرسایش یافته سازه می‌توان بیان کرد که با ۱۶ درصد افزایش در مقدار ارتفاع آزاد تاج سازه، به عنوان مثال در مقطع W_3 ، مقدار سرریزی موج از روی تاج سازه به میزان ۴۳ درصد کاهش یافته است. با افزایش ارتفاع آزاد تاج سازه، موج برخوردی به سازه در طول لایه آرمور متخلخل حرکت کرده و بدین ترتیب سبب استهلاک بیشتر انرژی موج برخوردی می‌شود، که متعاقباً روگذری موج از روی تاج سازه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، این امر منجر به کاهش نیروی حاصل از برخورد موج به سازه‌ی موج‌شکن و افزایش پایداری آن نیز می‌شود.

۳-۵. بررسی تأثیر ارتفاع موج بر روگذری موج از روی سازه موج‌شکن

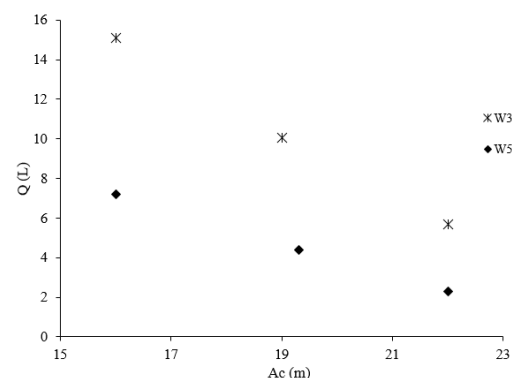
یکی از تأثیرگذارترین پارامترها در بین متغیرهای هندسی و محیطی بر روی سرریزی موج از روی موج‌شکن‌های توده‌سنگی، پارامتر ارتفاع موج است، که افزایش آن ارتباط مستقیمی با افزایش روگذری موج از روی سازه دارد. تاکنون مطالعات آزمایشگاهی زیادی در زمینه بررسی نحوه تأثیر این پارامتر بر روگذری موج از روی موج‌شکن‌های توده‌سنگی انجام شده است. تمامی مطالعات بر روی سرریزی موج از روی سازه‌های توده‌سنگی، افزایش دبی میانگین سرریزی امواج در اثر افزایش ارتفاع موج را نشان می‌دهند. آزمایش‌های مربوط به اثر ارتفاع موج سازه بر روگذری موج از روی تاج موج‌شکن برای چهار ارتفاع موج متفاوت (۰/۰۸، ۰/۰۹، ۰/۱۰۴، ۰/۱۱۵ و ۰/۱۱۵ متر) برای مقطع W_3 و همچنین چهار ارتفاع موج متفاوت (۰/۰۸۵، ۰/۰۹۵، ۰/۱۰۵ و ۰/۱۱۵ متر) برای مقطع W_5 انجام شده است. شکل (۸) نحوه اثرگذاری پارامتر ارتفاع موج بر روگذری موج از روی تاج سازه در مقادیر ثابت پرپود موج شامل ($Tp=1.33 s$) برای مقطع W_3 و ($Tp=1.3 s$) برای مقطع W_5 را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل (۸) مشخص است، با افزایش ارتفاع موج برخوردی در یک پرپود موج ثابت، مقدار دبی سرریزی موج از روی تاج سازه افزایش یافته است.

با توجه به آن که انرژی موج با توان دوم ارتفاع موج مرتبط است، هرچه ارتفاع موج بیشتر شود انرژی موج برخوردی به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت؛ از این رو، قدرت بالاروی امواج از سازه افزایش یافته و در نتیجه‌ی آن سرریزی امواج افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که با افزایش انرژی موج، توانایی موج

شدن نیروی مقاوم ناشی از درهم‌فصل‌شدگی بین سنگ‌دانه‌ها می‌شود. از طرف دیگر، در حین پایین‌روی موج، علاوه بر نیروی پسی ایجاد شده به موازات شیب سازه، نیروی ناشی از گرادیان فشار به سمت خارج محیط متخلخل نیز به عنوان نیروی برآ بر سنگ‌دانه‌ها وارد می‌شود. در واقع، هم‌زمان با وقوع جریان خروجی از سازه، جریان روی سازه نیز در حال پایین‌روی است. مشاهده‌های آزمایشگاهی حاضر نشان می‌دهد که با کاهش درهم‌فصل‌شدگی بین سنگ‌های مجاور هم در حین بالاروی موج روی سازه، اگر سنگ‌دانه‌ای اتکای خود به بقیه سنگ‌دانه‌ها را از دست بدهد، در زمان وقوع پایین‌روی موج بر روی سازه، به دلیل وجود نیروی ناشی از جریان پایین‌رونده و همچنین اثر وزن سنگ‌دانه، ذرات سنگی می‌توانند از جای خود درآمده و به سمت پای سازه بغلتند. مکانیسم بیان شده نشان می‌دهد، در صورتی که نتوان انرژی موج را با تمهیداتی مانند ایجاد سکو مستهلک نمود و از بالاروی موج و سرریزی آن جلوگیری کرد، بر احتمال ناپایداری سازه نیز افزوده می‌شود.

۳-۴. بررسی تأثیر تراز تاج سازه بر روگذری موج از روی سازه موج‌شکن

بازنگری مطالعات گذشته بر روی موج‌شکن‌های توده‌سنگی بیانگر آن است که تراز تاج سازه پارامتر بسیار مهمی در بررسی روگذری موج از روی سازه محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت پارامتر تراز تاج سازه (R_c)، در مطالعه حاضر تعداد ۹ آزمایش برای بررسی اثر این پارامتر بر روی سرریزی موج از روی سازه در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر برای بررسی اثر تراز تاج موج‌شکن بر روگذری موج، سه تراز تاج سازه مختلف شامل ۰/۱۶، ۰/۱۹ و ۰/۲۲ متر برای مقطع W_3 با شرایط محیطی ($H_s=10.44 cm$) و $1.33 s$ ($Tp=1.33 s$) و مقطع W_5 با شرایط محیطی ($H_s=10.55 cm$) در نظر گرفته شده است.

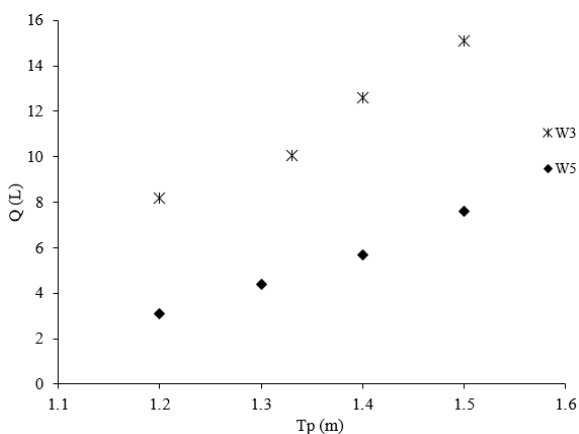


شکل (۷) - تأثیر ارتفاع آزاد تاج سازه (R_c) بر پارامتر روگذری موج از روی موج‌شکن (Q) در هر یک از مقاطع

۳-۶. بررسی تأثیر پرپود موج بر روگذری موج از روی سازه موج‌شکن

دیگر پارامتر محیطی که نقش بسیار تعیین کننده‌ای در روگذری موج از روی سازه‌ها ایفا می‌کند، پرپود موج است و از این رو، ضروری است که اثر این پارامتر مطالعه شود. در پژوهش حاضر، برای بررسی تأثیر پرپود موج بر سرریزی موج، چهار پرپود موج متفاوت شامل $1/2$ ، $1/3$ ، $1/4$ و $1/5$ ثانیه برای مقطع W_3 با $H_s=0.104 m$ و چهار پرپود موج متفاوت شامل $1/2$ ، $1/3$ ، $1/4$ و $1/5$ ثانیه برای مقطع W_5 با $H_s=0.105 m$ مورد مطالعه قرار گرفتند. در شکل ۴-۲۱ تأثیر پارامتر پرپود موج بر سرریزی موج از روی سازه ارائه شده است. با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که با افزایش پرپود موج در یک ارتفاع موج ثابت، مقدار روگذری موج از روی سازه دارای روند افزایشی است.

پرپود موج تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی انرژی موج می‌گذارد و در نتیجه آن، بالاروی موج از روی لایه آرمور سازه افزایش چشمگیری می‌یابد. از آنجاییکه مقدار دبی روگذری موج از روی سازه و بالاروی موج رابطه مستقیم دارند، با افزایش بالاروی موج میزان سرریزی موج از روی سازه زیاد می‌شود. بررسی نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با افزایش ۱۵ درصدی در مقدار پرپود موج در مقطع W_5 ، سرریزی موج از روی تراز موج‌شکن تقریباً ۷۳ درصد بیشتر شده است.

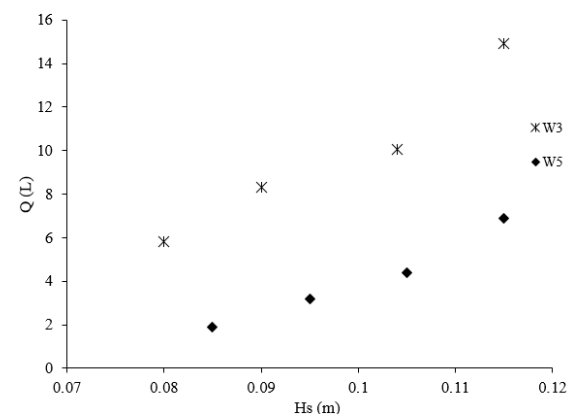


شکل (۹) - تأثیر پرپود موج (T_p) بر پارامتر روگذری موج از روی موج-شکن (Q) در هر یک از مقاطع

۴. نتیجه گیری

در مطالعه حاضر پدیده روگذری موج از روی موج‌شکن‌های توده‌سنگی با مطالعه موردی موج‌شکن بندر پارسیان، با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شده است. برای این منظور پس از اعتبارسنجی نتایج مستخرج از نرم‌افزار FLOW-3D با داده‌های

برای جابجایی سنگ‌دانه‌ها در لایه آرمور سازه افزایش یافته و در نتیجه، سطح آسیب و یا میزان تغییرشکل‌پذیری سازه‌های توده‌سنگی نیز بیشتر می‌شود.



شکل (۸) - تأثیر ارتفاع موج (H_s) بر پارامتر روگذری موج از روی موج‌شکن (Q) در هر یک از مقاطع

از طرف دیگر، بررسی مکانیسم جریان بر روی لایه آرمور حاکی از آن است که با افزایش ارتفاع موج برخوردی، تراز بالاروی موج بیشتر شده و در واقع سرعت جریان بالارونده بر روی سازه بیشتر می‌شود؛ که در نتیجه توانایی بیشتری برای جابجایی سنگ‌دانه‌ها به سمت بالای شیب سازه بوجود خواهد آمد. در پی آمد این اتفاق، جریان پایین‌رونده قوی‌تری بر روی سازه شکل گرفته و همچنین جریان تراوشی از داخل محیط متخلخل به خارج آن بوجود آمده که احتمال از جا در آمدن سنگ‌دانه‌ها را افزایش خواهد داد. بررسی دقیق‌تر مکانیسم جابجایی سنگ‌دانه‌ها در لایه آرمور سازه در اثر افزایش انرژی موج نشان می‌دهد، زمانی که سازه موج‌شکن سکویی چندلایه در معرض امواج قرار می‌گیرد، جریان بالارونده و پایین‌رونده ایجاد شده بر روی شیب سازه و جریان تراوشی به سمت خارج محیط متخلخل، سبب کاهش درهم قفل‌شدگی بین سنگ‌دانه‌ها شده و با ایجاد لقی بین سنگ‌ها، منجر به تکان خوردن آن‌ها در جای خود به سمت بالا و پایین می‌شوند. به دلیل لق شدن سنگ‌دانه‌ها، سنگ‌ها در اثر وجود جریان بالارونده روی شیب امکان بلند شدن حول نقطه تکیه‌گاهی خود را پیدا کرده و به سمت بیرون سازه متمایل می‌شوند. در انتهای پروسه‌ی مکانیسم جابجایی سنگ‌ها، سنگ‌دانه‌ها در حین پایین‌روی جریان بر روی شیب لایه آرمور و تحت اثر نیروی وزن خود، به سمت پایین سازه می‌غلطند. علاوه بر موارد ذکر شده، با افزایش ارتفاع موج، آشفته‌گی زیادی بر روی شیب سازه بوجود خواهد آمد. در اثر آشفته‌گی بیشتر، تنش برشی بزرگتری نیز به سنگ‌دانه‌ها وارد شده و به این ترتیب احتمال از جا در آورده شدن و ناپایداری سنگ‌دانه‌ها بیشتر می‌شود.

- نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع آزاد تاج سازه، مقدار روگذری موج از روی موج‌شکن کاهش یافته است. با افزایش ارتفاع آزاد تاج سازه، به دلیل افزایش اضمحلال انرژی موج ناشی از افزایش سطح متخلخل در معرض برخورد موج، بالاروی موج از روی لایه آرمور و در نتیجه آن، سرریزی موج از روی موج‌شکن کاهش می‌یابد.

- ارتفاع موج دارای تأثیری اساسی بر دبی روگذری موج از روی سازه است، به طوری که با افزایش ارتفاع موج برخوردی در یک پیوند موج ثابت، مقدار سرریزی موج از روی سازه به اندازه قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. هرچه ارتفاع موج بیشتر شود، انرژی موج برخوردی به سازه موج‌شکن افزایش خواهد یافت. با افزایش انرژی موج، توانایی موج برای بالاروی از روی سازه و متعاقباً سرریزی موج از روی سازه بیشتر می‌شود.

- مطالعه حاضر نشان می‌دهد، یکی دیگر از پارامترهایی که نقش تعیین‌کننده‌ای در مقدار دبی روگذری موج از روی سازه دارد، پیوند موج است. با افزایش پیوند موج در یک ارتفاع موج ثابت، مقدار روگذری موج از روی سازه دارای روند افزایشی است.

۵. مراجع

- [1] M. Ehsani, M. N. Moghim, M. Shafieefar and A. Mostaghiman, "Wave reflection of irregular waves from multi-layer berm breakwaters," *International Journal of Coastal, Offshore and Environmental Engineering*, vol. 5(1), pp.11-23, 2020.
- [2] N. Fukuda, T. Uno, and I. Irie, "Field observations of wave overtopping of wave absorbing revetment," *Coastal Engineering in Japan*, vol. 17(1), pp.117-128, 1974.
- [3] M. De Gerloni, "The safety of breakwaters against wave overtopping," In *Coastal Structures and Breakwaters: Proceedings of the Conference Organized by the Institution of Civil Engineers, and Held in London on 6-8 November 1991* (p. 335). Thomas Telford, 1992.
- [4] Y. Goda, "Statistical Variability of sea state parameters as a function of wave," *Coastal Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 39-52. 1998.
- [5] J. De Rouck, "CLASH-D46: Final Report," Ghent Univ., Belgium, 2005.
- [6] T. Lykke Andersen, "Hydraulic response of rubble mound breakwaters: scale effects - berm breakwaters," Ph.D. Thesis, Aalborg Univ., Aalborg, Denmark, 2006.
- [7] J. Krom, "Wave overtopping at rubble mound breakwaters with non-reshaping berm," M.Sc. Thesis, Delft University of Technology, Netherland, 2012.
- [8] D. Vanneste, P. Troch, "2D numerical simulation of large-scale physical model tests of wave interaction with a rubble-mound breakwater," *Coastal Engineering*, vol. 103, pp. 22-41, 2015.
- [9] F. Dentale, F. Reale, A. Di Leo, and E. P. Carratelli, "A CFD approach to rubble mound breakwater design. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*," vol. 10(5), pp. 644-650, 2018.
- [10] M. Nematollahi, M. N. Moghim, "Numerical Simulation of Spatial Distribution of Wave Overtopping on Non-Reshaping Berm Breakwaters," *Journal of Marine Science and Application*, vol. 19(2), pp.301-316, 2020.

آزمایشگاهی، از این نرم‌افزار استفاده شده است. همچنین در پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای مختلف محیطی و سازه‌ای بر روگذری موج از روی سازه موج‌شکن مطالعه شد. در نتیجه این پژوهش بینش مناسبی در تحلیل نحوه اثرگذاری پارامترهای مختلف محیطی شامل ارتفاع موج، پیوند موج و عمق آب پای سازه و پارامترهای هندسی متفاوت شامل تراز تاج سازه، شیب لایه آرمور و عرض سکو بر دبی روگذری موج از روی سازه موج‌شکن ایجاد شد و مکانیسم ایجاد شده در اثر اندرکنش امواج با محیط متخلخل سازه در طول وقوع جریان بالارونده و پایین‌رونده موج روی شیب سازه مطالعه شده است. در ذیل به برخی از نتایج مستخرج از این تحقیق اشاره می‌شود؛

- نتایج بررسی شیب لایه آرمور بر روگذری موج نشان می‌دهد، با ملایم‌تر شدن شیب لایه آرمور، مقدار روگذری موج از روی سازه کمتر شده است. با ملایم‌تر شدن شیب لایه آرمور، طول غرقاب شده سازه موج‌شکن و در نتیجه سطح در معرض موج آن بیشتر شده و بنابراین انرژی بیشتری از امواج تابشی می‌تواند مستهلک شوند که منجر به کاهش دبی روگذری موج از روی سازه می‌شود. علاوه بر این بررسی جریان بالارونده و پایین‌رونده موج بر روی شیب سازه در حین اجرای آزمایش نشان می‌دهد که با ملایم شدن شیب سازه، بالاروی موج به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

- نتایج دبی روگذری موج از روی سازه زمانی که موج‌شکن به صورت سکویی طراحی شده است، حاکی از تأثیر قابل ملاحظه ایجاد سکو بر روی پارامترهای محیطی است. به طوری که با افزایش عرض سکوی موج‌شکن، مقدار سرریزی موج از روی سازه کمتر شده است. با افزایش عرض سکو، موج به یک سکوی بزرگتر با حجم محیط متخلخل بیشتری از مصالح سنگ‌دانه‌ای برخورد کرده و بخش اعظمی از انرژی آن در هنگام برخورد و حرکت بر روی سکو مستهلک می‌شود. همچنین با افزایش عرض سکو، بالاروی موج بر روی لایه آرمور نیز به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد، زیرا موج برخوردی به سازه بر روی طول بیشتری از سکوی متخلخل با قابلیت نفوذپذیری زیاد حرکت کرده، و بدین ترتیب مقدار بیشتری از انرژی موج بر روی سکوی سازه مستهلک می‌شود.

- نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که عمق آب پای سازه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان دبی سرریزی موج از روی موج‌شکن دارد، به طوری که با افزایش تقریباً ۱۶ درصدی این پارامتر، مقدار روگذری موج از روی تاج سازه بیش از ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. با بیشتر شدن عمق آب پای سازه، مقدار بیشینه شار تکانه موج بیشتر شده و موج نیروی بزرگتری به سازه وارد می‌کند. با افزایش نیروی حاصل از برخورد موج به سازه موج‌شکن، بالاروی موج از روی لایه آرمور بیشتر شده و به تبع آن سرریزی موج از روی سازه افزایش می‌یابد.

- [11] J. Y. Li, Q. H. Zhang, and Y. J. Lu, "Numerical simulation of random wave overtopping of rubble mound breakwater with armor units," *China Ocean Engineering*, vol. 35(2), pp.176-185.
- [12] M. I. Mata, and M. R. van Gent, "Numerical modelling of wave overtopping discharges at rubble mound breakwaters using OpenFOAM®," *Coastal Engineering*, vol. 181, p.104274.
- [13] J. M. Sicilian, C. W. Hirt, and R. P. Harper, "FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers," *Flow Science Report*, 1987.
- [14] C.W. Hirt, "Flow-3D user manual version 10," *Flow Science*, 2011.
- [15] P. Forchheimer. *Z. Wasserbewegung durch boden*, Ver. Deutsch, Ing, vol. 45:1782-8, 1901.
- [16] M. Ehsani, M. N. Moghim, and M. Shafieefar, "On berm design of Icelandic-type breakwaters (case study: Sirevåg berm breakwater)," In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, vol. 175(1), pp. 14-29. Thomas Telford Ltd. (2022, March).
- [17] S. A. Hughes, "Wave momentum flux parameter: A Descriptor for Nearshore Waves," *Coastal Engineering*, vol. 51, pp. 1067-1084, 2003.