

مطالعه عددی روگذری موج از روی موج‌شکن‌های توده‌سنگی (مطالعه موردی: موج‌شکن

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 موج‌شکن توده‌سنگی، انجام مطالعه‌ای سیستماتیک با هدف شناخت و بررسی پدیده روگذری موج از روی موج‌شکن‌های 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 موج‌شکن 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 موج‌شکن 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 موج‌شکن 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: موج‌شکن توده‌سنگی، روگذری موج، موج‌شکن 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، موج‌شکن 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 موج‌شکن برای احداث بندر، طراحی صحیح و بهینه این سازه‌ها، هم از نظر پایداری و کارایی و هم از نظر اقتصادی کاملاً ضروری به‌نظر می‌رسد.

در میان انواع موج‌شکن‌ها می‌توان به موج‌شکن توده‌سنگی^۱

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 استعدادها بعضاً دارای کنش‌ها و رفتارهای پیچیده‌ای است که عدم شناخت و توجه به این رفتارها، منجر به اخلاص در بهره‌برداری از این استعدادها 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

^۱ Rubble mound breakwater

به عنوان متداول ترین گزینه اشاره کرد. موج شکن های توده سنگی عموماً از سه قسمت اصلی شامل هسته، فیلتر و لایه آرمور تشکیل می شوند. معمولاً طراحی و اجرای مقطع موج شکن های توده سنگی به شکل دوزنقه انجام می شود؛ به طوری که در صورت طراحی صحیح سازه، ضمن حفظ پایداری سازه، نیم رخ سمت دریای آن بتواند نیروهای ناشی از امواج برخوردی را به خوبی مستهلک کند.

با توجه به ماهیت پیچیده امواج در حین برخورد با سازه های دریایی، شناخت هر چه بیشتر مسائل مطرح در طراحی سازه های دریایی سبب طراحی بهینه تر و کارآمدتر سازه در طول عمر مفید آن می شود، که با توجه به هزینه های بسیار زیاد طرح و اجرای سازه های دریایی، نباید به آسانی از آن گذر کرد. یکی از مهمترین پارامترهای مطرح در طراحی موج شکن های توده سنگی، بررسی پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر این سازه ها مانند روگذری موج از روی سازه است [۱]. پدیده روگذری با عبور موج برخوردی از تاج موج شکن اتفاق می افتد و در بعضی موارد باعث تخریب موج شکن و حتی آسیب به سازه های پشت موج شکن می شود. از این رو، پیش بینی صحیح روگذری موج از روی موج شکن ها 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 موج شکن 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 داده اند. De Gerloni و همکاران [۳] با مطالعه ی موج شکن های قائم، دبی های سرریزی بحرانی را که باعث ایجاد خطر برای اتومبیل ها و مردم می شود را در نظر گرفتند. Goda [۴] تحقیقاتی را با در نظر گرفتن نمونه های واقعی (پروتوتایپ) در شرایط مختلف امواج و موقعیت های متفاوت بر روی موج شکن ها انجام داد. برای یک دبی میانگین مشخص، حجم بزرگترین سرریزی حادث شده می تواند با تغییر شرایط امواج و نوع سازه تغییر کند. از این رو برای محاسبه آن در سازه های مختلف احتیاج به اطلاعات و آزمایش های مختلف است که در سال ۲۰۰۵ با انجام پروژه ی بزرگ CLASH اطلاعات جامع و کاملی در این خصوص ارائه شده است [۵]. Lykke Andersen [۶] آزمایش های وسیعی با هدف بررسی اثرات پارامترهای مختلف شامل عرض سکو، ارتفاع سکو از تراز ایستایی، ارتفاع موج، پریود موج، مدت طوفان، اندازه سنگ دانه، عمق آب پای سازه، عرض تاج، تراز تاج، اثر مقیاس و اثر دانه بندی لایه آرمور بر سرریزی موج از روی موج شکن سکویی همگن انجام داد و رابطه ای نیمه تجربی

برای تخمین عرض روگذری موج پیشنهاد کرد. Krom [۷] در مطالعه ای آزمایشگاهی به بررسی توزیع روگذری موج نامنظم روی موج شکن های سکویی با سکوی شکل ناپذیر پرداخت. اخیراً محققانی مانند Vanneste و Troch [۸] و Dentale و همکاران [۹] به منظور شبیه سازی اندرکنش موج با محیط متخلخل موج شکن توده سنگی از نرم افزار عددی FLOW-3D استفاده کردند. Nematollahi و Moghim [۱۰] با استفاده از مدل سازی عددی به وسیله ی نرم افزار 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. آن ها بیان کردند که مدل عددی مطالعه شان می تواند برای پیش بینی سرریزی موج از روی موج شکن با بلوک های آرمور مصنوعی استفاده شود. Mata و Van Gent [۱۲] دبی روگذری موج از روی موج شکن توده سنگی را با استفاده از نرم افزار منبع باز OpenFOAM بررسی کردند. آن ها در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل؛ شیب سازه، تاج سازه، سکوی موج شکن و تیزی موج را مطالعه کردند. مطالعه آن ها نشان داده است که سرریزی موج از روی موج شکن، قویاً به شیب سازه وابسته است و از این رو یک روش برای محاسبه سرریزی موج با در نظرگیری اثر شیب سازه پیشنهاد کردند.

بازخوانی مطالعات انجام شده توسط سایر محققین نشان می دهد که عمده پژوهش ها در زمینه پدیده سرریزی موج از روی موج شکن توده سنگی به صورت مدل آزمایشگاهی انجام شده و با توجه به محدودیت های تجهیزات آزمایشگاهی، گستره تغییرات پارامترهای مختلف نیز در دامنه محدودی دچار تغییر شده اند. در حالی که در پژوهش حاضر، بررسی و شناخت تأثیر پارامترهای مختلف محیطی و هندسی به صورت مدل سازی عددی در نظر گرفته شد و از این رو، مدل های پیش بینی شده به صورت سیستماتیک و با گستره تغییرات مناسب مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. نکته قابل ذکر دیگر آنکه، به نظر می رسد که مطالعه حاضر بتواند در پروژه های مشابه نیز قابل تعمیم باشد و نتایج بدست آمده از آن برای سایر پروژه ها نیز بینش مناسبی را برای طراحی موج شکن های مشابه ایجاد کند. در واقع یکی از مزیت های این پژوهش این است که استفاده از این پروژه هیچ گونه محدودیت زمانی نخواهد داشت و می تواند شناخت مناسبی برای استفاده طراحان و کارفرمایان پروژه های موج شکن های توده سنگی حتی در سالیان آتی ایجاد نماید. بررسی جنبه های کاربردی این پژوهش از دیدگاه دیگری نیز حائز اهمیت است. پژوهش حاضر می تواند سبب کاهش آزمایش های در نظر گرفته شده برای پروژه های مشابه که دستگاه اجرایی انجام آزمایش های مدل فیزیکی را در آن ضروری می داند، شود. نکته قابل توجه کاربردی دیگر آنکه

جهت انجام مدل سازی آشفتگی از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است. برای ساخت هندسه مدل، بدنه موج شکن توده سنگی شامل لایه های مختلف سنگی در نرم افزار اتوکد ساخته شد. سپس هندسه سازه به صورت یک جسم صلب با فرمت *.stl^۳ برای نرم افزار FLOW-3D تعریف شده است. به منظور مدل سازی محیط متخلخل از رابطه Forchheimer [۱۵] استفاده می شود. در مدل سازی عددی حاضر، مشابه با مطالعه Vanneste و Troch [۸]، شبکه بندی در یک بلوک و در سراسر میدان حل به صورت یکنواخت متشکل از سلول های مستطیلی در نظر گرفته شده است. در هر بلوک شبکه بندی، 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 مدل سازی 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 صحت سنجی مدل عددی با استفاده از مدل آزمایشگاهی موج شکن بندر پارسیان انجام شده است. مقاطع نهایی و بحرانی موج شکن پارسیان به صورت شکل (۱) در نظر گرفته شده است. مبنای مدل سازی عددی نیز مقاطع نهایی ارائه شده است.

تعیین مناسب ترین شبکه بندی یکی از مهمترین گام ها در مدل سازی عددی محسوب می شود؛ چراکه با شبکه بندی درشت گرادین تغییرات بیشتر می شود و از این رو بدیهی است که به جواب صحیح نمی توان رسید. لذا شبکه بندی با سلول های محاسباتی با ابعاد کوچکتر باید مدنظر قرار گیرد تا با اعمال فشرده سازی نقاط شبکه در مناطقی که متغیرهای جریان تحت گرادین های شدید قرار دارند، بتوان تمام تغییرات را بررسی کرد و با ارزیابی همه جوانب عددی در یک سلول محاسباتی به پاسخ مناسب تری دست یافت. البته شایان توجه است که کوچکتر کردن ابعاد سلول های محاسباتی و ریز کردن شبکه باید به صورت اصولی باشد؛ زیرا که یکی از پیامدهای آن زیاد شدن تعداد سلول های محاسباتی و در نتیجه آن افزایش حجم محاسبات و طولانی

شناخت مناسب پارامترهای مختلف سبب خواهد شد، در کشور ایران به خصوص در جنوب کشور که تأمین و تولید بلوک های سنگی با تناژ بزرگ هزینه بر و مشکل بوده و از طرفی استفاده از بلوک های بتنی نیز هزینه بسیار زیادی برای پروژه ها ایجاد خواهد کرد، مصالح معدن قرضه بهینه تر استفاده شود و در نهایت منجر به کاهش هزینه می شود.

در مجموع به نظر می رسد، انجام مطالعه در زمینه پارامترهای مورد نیاز برای طراحی موج شکن های توده سنگی بتواند نقش مناسبی برای جلوگیری از ایهامات فنی در این زمینه ایفا کند. بنابراین در مطالعه حاضر، بررسی پارامترهای مختلف نظیر تراز تاج موج شکن، شیب لایه آرمر سازه، ایجاد عرض سکو و عمق آب پای سازه به جهت کاهش ایهامات فنی در بخش طراحی مورد توجه است. علاوه بر این ارتفاع موج و پریود موج به عنوان دو پارامتر محیطی اثرگذار بر روگذری موج از روی تاج سازه بررسی می شوند.

۲. روش تحقیق

در مطالعه حاضر، از نرم افزار FLOW-3D برای حل عددی معادلات حاکم جریان استفاده می شود. FLOW-3D برای بررسی رفتار دینامیک سیالات در محیط های مختلف طراحی شده است. در این نرم افزار از دو روش حجم سیال (VOF^1) و کسر مساحت - حجم مانع ($FAVOR^2$) برای شبیه سازی هندسی مرز سیالات و مرزهای صلب استفاده شده است. روش حجم سیال برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می گیرد و روش کسر مساحت - حجم مانع برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد [۱۳]. در نرم افزار FLOW-3D، قوانین حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر و لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله اندازه حرکت در جهت محورهای سه گانه مختصات، معادلات ناویر-استوکس، بیان می شوند [۱۴].

نرم افزار FLOW-3D قابلیت استفاده از شش مدل آشفتگی شامل صفر معادله ای طول اختلاط پراتل، یک معادله ای، دو معادله ای $k-\omega$ ، $k-\epsilon$ و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ را دارد. بررسی پژوهش های انجام شده در بررسی اندرکنش موج-سازه متخلخل، حاکی از آن است که در عمده مطالعاتی مربوط به موج شکن های توده سنگی از مدل آشفتگی دو معادله ای RNG استفاده می شود. در مدل سازی عددی حاضر، جریان به صورت تک فاز و سیال تراکم ناپذیر تعریف شده است. برای در نظر گرفتن مشخصات سیال، آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تعریف شده و

¹ Volume of Fluid

² Fractional Area-Volume Obstacle Representation

³ Stereolithography

شدن زمان حل عددی است.

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	۳۰۰۰۰۰	۱۳
Run 6		۷۰۰۰۰۰	۱۸
Run 7		۱۰۰۰۰۰۰	۲۸
Run 8		۱۲۰۰۰۰۰	۳۷

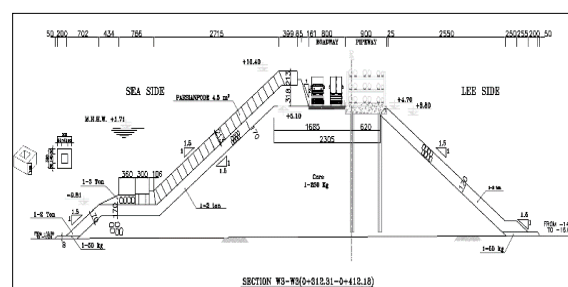
نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت برای روگذری موج از روی تاج سازه با مشخصاتی که پیشتر بیان شد، در جدول (۳) ارائه شده است.

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.

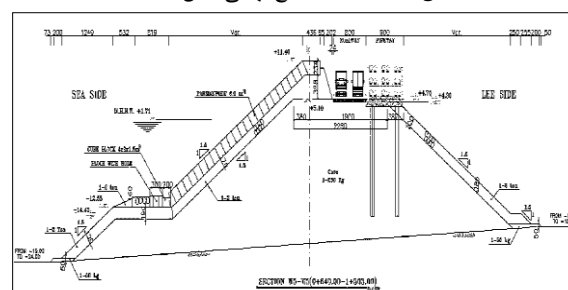
در جدول (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سلول محاسباتی از ۱ میلیون به ۱/۲ میلیون عدد برای مقطع W₃، یک درصد تغییر در میزان روگذری موج و برای مقطع W₅، چهار درصد تغییر نتیجه حاصل شده است.

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 حساسیت-سنجی 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.

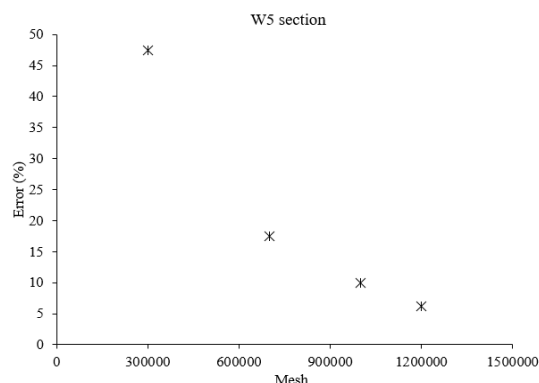
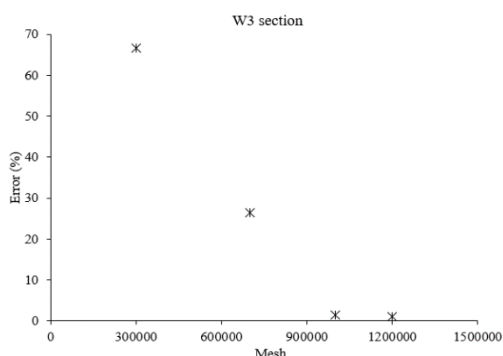
همان‌طور که در جدول (۲) قابل مشاهده است، تحلیل حساسیت برای چهار شبکه محاسباتی برای مقطع W₃ با شرایط محیطی (H_s=10.44 cm, T_p=1.33 s) شامل؛ ۳۰۰ هزار سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۴/۵ سانتی‌متر)، ۷۰۰ هزار سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت تقریباً ۳/۴ سانتی‌متر)، ۱ میلیون سلول (ابعاد سلول در هر سه جهت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

جدول (۳) الف- نتایج مقایسه‌ی مدل سازی عددی و مدل سازی فیزیکی برای مقطع W_3 با شبکه بندی 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 مدل سازی عددی و مدل سازی فیزیکی برای مقطع W_5 با شبکه بندی 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 سلول های شبکه ی حل

زیادی است. از این رو در مطالعه حاضر مکانیسم اثر هریک از پارامترهای مطرح شده در طول وقوع جریان بالارونده و پایین-رونده بر روی سازه بررسی می شوند.

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

شیب لایه آرمور از جمله پارامترهای تعیین کننده در حجم مصالح مصرفی و همچنین رفتار سازه های و هیدرولیکی موج شکن توده سنگی به حساب می آید، که بررسی تأثیر آن بر پدیده روگذری موج از روی موج شکن توده سنگی می تواند مکانیسم رفتاری آن را در اثر برخورد موج به سازه تبیین نماید. در مطالعه

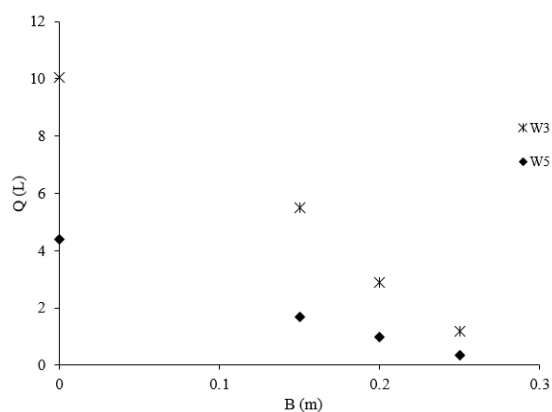
۳. نتایج و بحث

در این بخش، تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل سازی عددی با هدف بررسی روگذری موج از روی موج شکن بندر پارسین 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 موج شکن با محیط متخلخل مانند موج شکن پژوهش حاضر، منجر به ایجاد پدیده های فیزیکی پیچیده مانند اندرکنش موج با سازه متخلخل و ایجاد جریان در داخل محیط متخلخل می شود؛ شناخت جریان های ایجاد شده حائز اهمیت

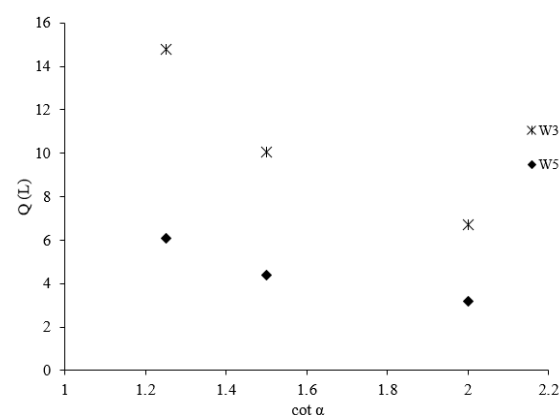
۲-۳. بررسی تأثیر عرض سکو بر روگذری موج از روی سازه موج شکن

سکو قسمتی از موج شکن سکویی است که در وجه روبه دریای سازه قرار دارد و علاوه بر کاهش اثرات مخرب موج، اجرای موج شکن را آسان می کند. انتخاب بهینه و مناسب عرض سکوی موج شکن در یک پروژه موج شکن توده سنگی سکویی می تواند نقش بسیار مهمی در اقتصاد پروژه ایفا کند [۱۶]. از طرف دیگر، بررسی این مهم که موج شکن توده سنگی به صورت شیب دار مستقیم طرح گردد یا آنکه دارای سکو باشد، یکی از گزینه های مطرح است که باید طراح همواره در نظر گرفته و بررسی های مختلفی انجام دهد. درواقع یکی از مهمترین دستاوردهای پروژه تحقیقاتی حاضر بررسی عرض سکو است. از آنجاییکه با ایجاد یک سکوی متخلخل کاربری سازه از موج شکن نوع شیب دار مستقیم به نوع موج شکن سکویی تغییر می یابد، بدین ترتیب می توان سازه جایگزینی برای سازه اصلی بررسی نمود.

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی پارامتر عرض سکوی موج شکن سکویی بر سرریزی موج از روی سازه، تعداد ۸ آزمایش انجام شده است. آزمایش ها برای سه عرض سکو متفاوت (۰، ۱/۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر) 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) و همچنین لایه آرمور شیب دار مستقیم طراحی و انجام شده اند. شایان ذکر است که در آزمایش های مربوط به بررسی اثر دیگر پارامترها، پارامتر عرض سکو در نظر گرفته نشده است. شکل (۵) تأثیر عرض سکوی موج شکن را بر مقدار روگذری موج از روی سازه، برای مقاطع مختلف نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است با افزایش عرض سکوی موج شکن، مقدار روگذری موج روند کاهشی دارد. در واقع به نظر می رسد با افزایش عرض سکو، موج به یک سکوی بزرگتر با حجم متخلخل بیشتری از مصالح سنگ دانه ای برخورد کرده و بخش اعظمی از انرژی آن در هنگام برخورد و حرکت بر روی سکو مستهلک می شود.

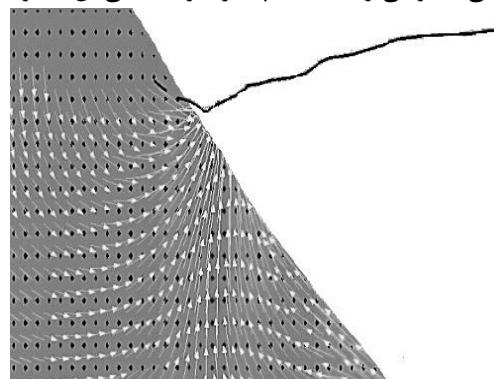


حاضر، به منظور بررسی اثر شیب لایه آرمور بر روی روگذری موج از روی موج شکن بندر پارسیان، آزمایش هایی برای سه شیب متفاوت (۱:۱/۵، ۱:۱/۲۵، ۱:۲) برای مقطع W_3 با شرایط محیطی ($H_s=10.44$ cm، $T_p=1.33$ s) و مقطع W_5 با شرایط محیطی ($H_s=10.55$ cm، $T_p=1.3$ s) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که پارامترهای دیگر محیطی و هندسی ثابت فرض شده اند. 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 موج شکن (Q) در هر یک از مقاطع

با استفاده از نتایج مدل سازی عددی، الگوی جریان خروجی از داخل موج شکن توده سنگی در زمان وقوع بیشینه ی پایین روی موج، در شکل (۴) ارائه شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، در محل تقریبی بیشینه پایین روی موج، جهت حرکت جریان به سمت بیرون و به صورت عمود بر سازه است؛ نیروی عمودی ناشی از جریان تراوشی ایجاد شده از داخل به خارج سازه در طول جریان پایین رونده موج بر روی شیب سازه، همانند یک نیروی محرک بر بلوک های سنگی بر روی لایه آرمور عمل می کند و می تواند سبب ناپایداری و جابجایی آن ها شود.



شکل (۴) - جهت تراوش جریان در محیط متخلخل موج شکن توده - سنگی سکویی چندلایه در زمان تقریبی بیشینه پایین روی موج

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 یافته است. در پی آمد این اتفاق و با کاهش فاصله بین تراز بالاروی و پایین‌روی موج بر روی لایه آرمر، 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 آرمر، 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، به‌طوری‌که 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. درواقع 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 آرمر و سرریزی آن از روی سازه کاهش می‌یابد.

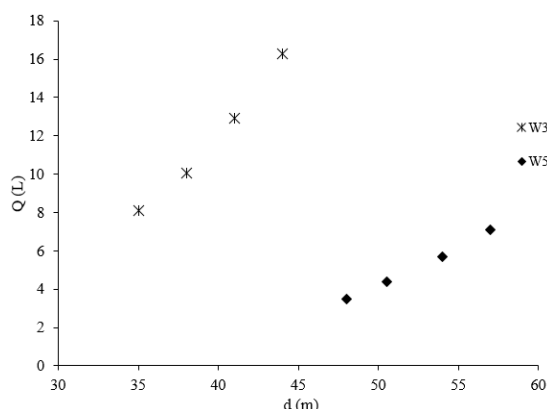
در صورتی‌که سازه به صورت موج‌شکن سکویی طرح شود، یکی از نکاتی که طراح باید به آن توجه داشته باشد، برقراری عملکرد مناسب سکو در اثر برخورد موج به سازه است. به‌طوری‌که در اثر برخورد امواج به سازه، سکوی موج‌شکن توسط موج احساس شود و موج با انرژی زیادی به شیب بالای سکوی موج‌شکن به‌طور مستقیم برخورد نکند. از آنجایی‌که 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 آرمر 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. به‌طور کلی عمق آب در پای سازه، شرایط محیطی را دستخوش

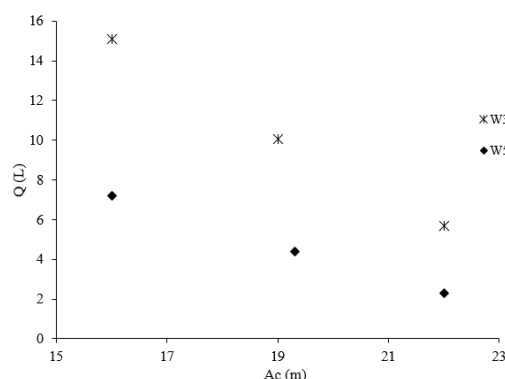
تغییرات قرار می‌دهد. تغییر عمق آب در پای سازه، شرایط و رفتار امواج و همچنین معادلات حاکم بر آن‌ها را تغییر می‌دهد. به عنوان مثال موج در آب کم عمق به‌صورت غیرخطی و در آب عمیق به‌صورت خطی‌تر رفتار می‌کند [۱۷]. در تحقیق حاضر برای بررسی اثر عمق آب پای سازه بر روگذری موج از روی تاج موج‌شکن، چهار عمق آب مختلف شامل ۰/۳۵، ۰/۳۸، ۰/۴۱ و ۰/۴۴ متر برای مقطع W_3 با شرایط محیطی ($H_s=10.44\text{ cm}$, $T_p=1.33\text{ s}$) و چهار عمق آب متفاوت شامل ۰/۴۸، ۰/۵۱، ۰/۵۴ و ۰/۵۷ 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، به‌طوری‌که با افزایش عمق آب پای سازه، پارامتر دبی سرریزی نیز افزایش می‌یابد. به‌طور 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

براساس 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 آرمر 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



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

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 موج شکن 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 سازه و موج شکن و افزایش پایداری آن نیز می‌شود.

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

یکی از تأثیرگذارترین پارامترها در بین متغیرهای هندسی و محیطی بر روی سرریزی موج از روی موج شکن‌های توده سنگی، 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 موج شکن‌های توده سنگی انجام شده است. تمامی مطالعات بر روی سرریزی موج از روی سازه‌های توده سنگی، 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 موج شکن برای چهار ارتفاع موج متفاوت (۰/۰۸، ۰/۰۹، ۰/۱۰۴ و ۰/۱۱۵ متر) برای مقطع W_3 و همچنین چهار ارتفاع موج متفاوت (۰/۰۸۵، ۰/۰۹۵، ۰/۱۰۵ و

پایین روی موج بر سازه دارد. به طوری که با افزایش عمق آب، میزان بالاروی و پایین روی 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 لق شدگی احتمالی سنگدانه‌ها در جای خود و کم شدن نیروی مقاوم ناشی از درهم قفل شدگی بین سنگدانه‌ها می‌شود. از طرف دیگر، در حین پایین روی موج، علاوه بر نیروی پسای 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. درواقع، هم زمان با وقوع جریان خروجی از سازه، جریان روی سازه نیز در حال پایین روی است. مشاهده‌های آزمایشگاهی حاضر نشان می‌دهد که با کاهش درهم قفل شدگی بین سنگ‌های مجاور هم در حین بالاروی موج روی سازه، اگر سنگدانه‌ای اتکای خود به بقیه سنگدانه‌ها را از دست بدهد، در زمان وقوع پایین روی موج بر روی سازه، به دلیل وجود نیروی ناشی از جریان پایین رونده 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 موج شکن

بازنگری مطالعات گذشته بر روی موج شکن‌های توده سنگی 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 موج شکن 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, $T_p=1.33$ s) و مقطع W_5 با شرایط محیطی ($H_s=10.55$ cm, $T_p=1.3$ s) در نظر گرفته شده است.

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، آشفتگی زیادی بر روی شیب سازه بوجود خواهد آمد. در اثر آشفتگی بیشتر، تنش برشی بزرگتری نیز به سنگ‌دانه‌ها وارد شده و به این ترتیب احتمال از جا در آورده شدن و ناپایداری سنگ‌دانه‌ها بیشتر می‌شود.

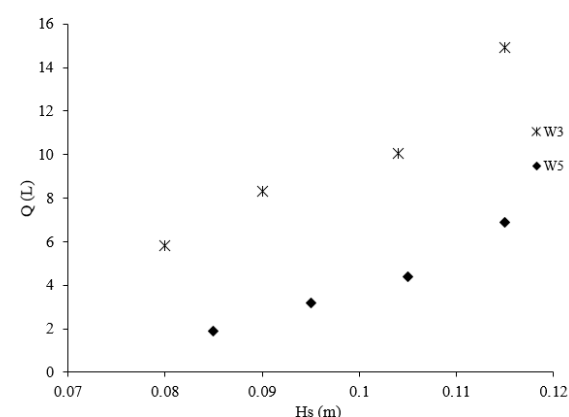
۳-۶. بررسی تأثیر پریود موج بر روگذری موج از روی سازه موج‌شکن

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

پریود 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 پریود موج در مقطع W_5 ، سرریزی موج از روی تراز موج‌شکن تقریباً ۷۳ درصد بیشتر شده است.

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 پریود موج شامل ($Tp=1.33\text{ s}$) برای مقطع W_3 و ($Tp=1.3\text{ s}$) برای مقطع W_5 را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل (۸) مشخص است، با افزایش ارتفاع موج برخوردی در یک پریود 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 این‌رو، 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 برای جابجایی سنگ‌دانه‌ها در لایه آرمور سازه افزایش یافته و در نتیجه، سطح آسیب و یا میزان تغییر شکل‌پذیری 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

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، به‌طوری‌که 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 موج-شکن، بالاروی موج از روی لایه آرمور بیشتر شده و به تبع آن سرریزی موج از روی سازه افزایش می‌یابد.

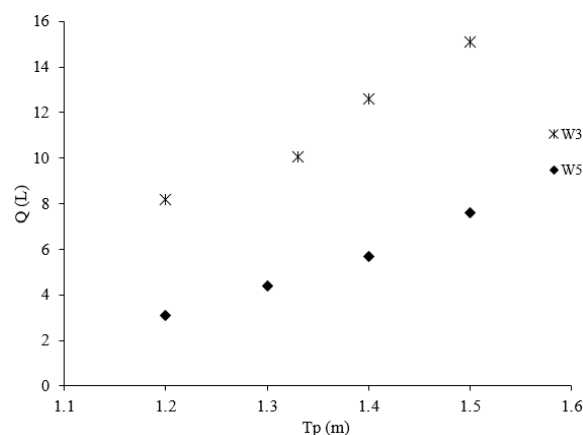
نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع آزاد تاج سازه، مقدار روگذری موج از روی موج‌شکن کاهش یافته است. با افزایش ارتفاع آزاد تاج سازه، به دلیل افزایش اضمحلال انرژی موج ناشی از افزایش سطح متخلخل در معرض برخورد موج، بالاروی موج از روی لایه آرمور و در نتیجه‌ی آن، سرریزی موج از روی موج‌شکن کاهش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

ارتفاع موج دارای تأثیری اساسی بر دبی روگذری موج از روی سازه است، به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع موج برخوردی در یک پریود 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، پریود موج است. با افزایش پریود 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. Shafieifar 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.



شکل (۹) - تأثیر پریود 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 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، پریود 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 موج-شکن 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 می‌توانند 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 موج-شکن به صورت سکویی طراحی شده است، حاکی از تأثیر قابل ملاحظه ایجاد سکو بر روی پارامترهای محیطی است. به‌طوری‌که

- [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.
- [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.