

تأثیر مشخصات سکوی سنگ کلاس I بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن سکویی چندلایه

مجید احسانی^۱، محمدنوید مقیم^{۲*}، مهدی شفیعی فر^۳^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ majid.ehsani@cv.iut.ac.ir^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ moghim@cc.iut.ac.ir^۳ استاد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس؛ shafiee@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از مهمترین مسائلی که در طراحی موج‌شکن‌ها مورد توجه است، ارزیابی پایداری سازه در برابر امواج برخوردی است. از این رو در مقاله حاضر، تأثیر پارامترهای مختلف بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن سکویی چندلایه مطالعه شده است. برای رسیدن به این هدف، مدل آزمایشگاهی دوبعدی موج‌شکن سکویی چندلایه در کانال موج دانشگاه تربیت مدرس ساخته شد و تحت اثر امواج نامنظم با طیف انرژی جوانسوپ، مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه شناخت تأثیر پارامترهای مختلف مرتبط با سکو مانند تراز سکو از سطح ایستابی و عمق آب پای سازه بر سطح آسیب موج‌شکن سکویی چندلایه مدنظر قرار گرفت. پارامتر ارتفاع سنگ کلاس I، به‌عنوان یک پارامتر جدید شناخته شده و نحوه اثرگذاری این پارامتر بر پایداری موج‌شکن سکویی چندلایه بررسی شد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع سنگ کلاس I، اتلاف انرژی موج برخوردی بیشتر شده و منجر به کاهش سطح آسیب سازه می‌شود. همچنین با افزایش عمق آب پای سازه به میزان ۲۳ درصد، نیروی وارد بر موج‌شکن افزایش یافته که منجر به افزایش ۲۵۰ درصدی خرابی سازه شده است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ۴۰ درصدی تراز سکو از سطح ایستابی، سطح فرسایش آرمور به میزان ۶۷ درصد بیشتر خواهد شد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:

موج‌شکن سکویی چندلایه

پایداری

مدل‌سازی آزمایشگاهی

کلاس سنگی I

The Effect of Stone Class I Characteristics on Hydraulic Stability of Multi-Layer Berm Breakwaters

Majid Ehsani¹, Mohammad Navid Moghim^{2*}, Mehdi Shafieefar³¹ Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology; majid.ehsani@cv.iut.ac.ir² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology; moghim@cc.iut.ac.ir³ Professor, Department of Civil and Environmental Engineering; Tarbiat Modares University; shafiee@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 24 Jun. 2019

Accepted: 2 Nov. 2019

Keywords:

Multi-layer berm breakwater

Stability

Experimental modeling

Stone class I

ABSTRACT

Assessing the stability of the breakwaters against incident waves is the most important issue in structure designing. Due to this fact, the effects of different parameters on the stability of multi-layer berm breakwater (MLBBs) have been presented in this study. A 2D experimental model of an MLBB with a JONSWAP spectrum of irregular waves is conducted. The effects of berm parameters such as berm elevation from SWL and water depth at the toe of the structure have been evaluated on MLBBs damage. The new parameter of stone class I height is assessed to find its effect on MLBBs stability. Outcomes disclose that an increase in stone class I height would increase the wave energy dissipation and consequently decrease the structure's damaged eroded area. Moreover, with a 23% increase in water depth, the forces on the structure would increase and as a result, the structural damage is enhanced to 250%. The results indicate as, with a 40% increase in berm elevation from SWL, the eroded area is enlarged to 67%.

نخستین بار در اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی زمانی که نیاز به احداث یک لایه محافظ شیب برای توسعه باند فرودگاه به سمت دریا در جزیره آلاسکا مطرح شد، ساخت یک موج‌شکن بر اساس شکل‌گیری طبیعی لایه آرمور وجه جلویی موج‌شکن در حین برخورد امواج، مورد توجه قرار گرفت [۱]. با قبول تفکر شکل‌پذیری در موج‌شکن‌های توده-سنگی می‌توان دریافت که قسمت فوقانی مقطع سازه موج‌شکن توده-سنگی پس از تغییر شکل به سمت پایین در کف دریا ریخته شده و عملکرد سازه‌ای تعیین‌کننده‌ای را از خود نشان نمی‌دهد. لذا به منظور کاهش حجم مصالح مصرفی در ساخت موج‌شکن، قسمت فوقانی از نیم‌رخ اولیه لایه آرمور حذف گردید تا در نهایت لایه سنگی در جلوی مقطع دوزنقه‌ای شکل موج‌شکن توده‌سنگی، که شبیه به یک سکو بود در سمت رو به دریای موج‌شکن، باقی بماند. در واقع موج‌شکن سکوی نوعی موج‌شکن توده‌سنگی است، که با ایجاد یک سکوی تقریباً بزرگ در تراز بالاتر یا هم‌تراز سطح ایستابی (SWL) در سمت دریا ساخته می‌شود. از مزایای موج‌شکن‌های سکوی نسبت به نوع سنتی این است که با ایجاد یک سکوی حجیم و متخلخل نزدیک سطح آب، قسمت اعظم انرژی امواج در هنگام برخورد به سازه مستهلک شده و به پایداری سازه کمک خواهد کرد.

موج‌شکن‌های سکوی از لحاظ طراحی و اجرا به دو نوع موج‌شکن سکوی همگن و موج‌شکن سکوی چندلایه تقسیم‌بندی می‌شوند. موج‌شکن‌های سکوی چندلایه به عنوان موج‌شکن‌های ایسلندی معروف هستند، به طوری که استفاده از این نوع موج‌شکن‌ها در کشور ایسلند بسیار مرسوم بوده و تاکنون بیش از ۲۰ مورد از آن‌ها در این کشور ساخته شده است. ساخت موج‌شکن‌های ایسلندی به دهه ۸۰ قرن بیستم میلادی برمی‌گردد و حدود ۴۰ سازه از این نوع موج‌شکن در سراسر دنیا و در گستره وسیعی از شرایط موج، عمق آب و شرایط جزر و مدی ساخته شده است [۲]. موج‌شکن سکوی ایسلندی، موج-شکن سکوی پایدار استاتیکی چندلایه است که فقط مقدار کمی تغییر شکل در آن‌ها مجاز است. این نوع از موج‌شکن‌ها توسط کلاس-های مختلف سنگی، بر اساس اندازه قطعات سنگی ساخته می‌شوند. فلسفه انتخاب کلاس‌های مختلف سنگی، استفاده بهینه از مصالح معدن در دسترس است. بزرگترین کلاس سنگ تحت عنوان سنگ کلاس I در محدوده تراز سکوی موج‌شکن و در برخی مواقع در شیب بالایی سکوی موج‌شکن که موج برخوردی بیشتری اثر را دارد، قرار می‌گیرد. از آنجایی که سنگ‌های کلاس I با ابعاد بزرگتر به صورت گزینشی جابجایی و به خوبی در هم قفل و بست می‌شوند، نقش مهمی در پایداری سازه ایفا می‌کنند [۲ و ۳]. کلاس‌های سنگی تشکیل شده از سنگ‌های کوچکتر در قسمت‌های پایینی شیب جلوی سکو و لایه‌های درونی موج‌شکن در جایی که تأثیر موج برخوردی کمتر است، قرار داده می‌شوند. عموماً سنگ‌های کلاس‌های کوچکتر از

کلاس I به صورت تقریبی از همان ابعاد سنگ‌های به کار رفته در موج‌شکن‌های سکوی شکل‌پذیر همگن هستند [۲].

هنگامی که معدن قرصه، نسبتاً نزدیک به محل ساخت یک پروژه موج‌شکن وجود دارد، گزینه موج‌شکن سکوی چندلایه به دلیل استفاده بهینه و حداکثری از معدن قرصه انتخابی، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است [۳]. از طرف دیگر تجربه‌های عملی ساخت این نوع موج‌شکن نشان می‌دهد که استفاده از چند کلاس سنگ و جایگذاری آن‌ها در مکان‌های مخصوص، حجم کل مصالح بکار برده شده را کمتر کرده و در نتیجه ساخت موج‌شکن سکوی چندلایه اقتصادی‌تر می‌شود [۴]. یکی دیگر از مزیت‌های موج‌شکن‌های سکوی چندلایه این است که بر روی پی با خاک نسبتاً ضعیف نیز قابل ساخت بوده و در بستریهایی با احتمال نشست‌هایی بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده مناسب هستند [۵].

مزیت‌های موج‌شکن سکوی چندلایه نسبت به موج‌شکن توده‌سنگی سنتی و موج‌شکن سکوی همگن شکل‌پذیر بوسیله محققان مختلفی مانند تورام و همکاران [۶]، اسوینرنسن [۳]، لیک اندرسن و بورخارت [۷]، سیگوردارسون و فن‌درمیر [۸] و مقیم و لیک اندرسن [۹] اشاره شده است. هزینه کل ساخت یک موج‌شکن توده‌سنگی مستقیماً به حجم و فاصله انتقال مصالح سنگی وابسته است. با توجه به اینکه ساخت موج‌شکن توده‌سنگی سنتی نیازمند استفاده از معادن با بلوک‌دهی مناسب است و از طرفی در کشور ما به خصوص در جنوب کشور دسترسی به معادن با خصوصیات ذکر شده کم است، ساخت این نوع موج‌شکن‌ها هزینه بسیار زیادی را به پروژه‌ها تحمیل می‌کند. از این رو استفاده از موج‌شکن‌های سکوی چندلایه با کاهش حجم مصالح سنگی با تناژ بالا، می‌تواند گزینه مناسب جایگزین برای سازه‌های توده‌سنگی سنتی باشند. از طرف دیگر مقایسه موج‌شکن سکوی چندلایه استاتیکی با موج‌شکن سکوی همگن شکل‌پذیر نشان می‌دهد که موج‌شکن چندلایه دارای کلاس‌های مختلف سنگی است، به طوری که دانه‌بندی هر کلاس سنگی به صورت جداگانه و کم عرض انتخاب می‌شود. در موج‌شکن سکوی همگن قابل تغییر شکل، به دلیل استفاده از یک نوع کلاس سنگی در کل لایه آرمور با دانه-بندی عریض، طیف وسیعی از اندازه سنگ‌ها در آن استفاده می‌شود. انتخاب دانه‌بندی کم عرض در کلاس‌های سنگی لایه آرمور موج‌شکن چندلایه، نفوذپذیری بیشتری را نسبت به کلاس‌های آرمور با دانه-بندی عریض در موج‌شکن تغییر شکل‌پذیر به وجود می‌آورد. نفوذپذیری بیشتر موج‌شکن سکوی چندلایه، سبب افزایش جذب انرژی موج برخوردی، افزایش پایداری سازه و همچنین کاهش سرریزی از روی سازه می‌شود [۳ و ۱۰].

نکته قابل توجه اینکه تجربه‌های موجود در مورد سازه‌های شکل‌پذیر نشان داده‌اند، زمانی که سنگ تحت اثر تغییر شکل شروع به بالا و پایین رفتن روی شیب سازه می‌کند، سنگ‌های در حال حرکت با

(^۳FR) و نسبتاً شکل‌پذیر (^۴PR) و موج‌شکن نوع ایسلندی به سازه به‌سختی شکل‌پذیر (^۵HR) و نسبتاً شکل‌پذیر (PR) تفکیک می‌شود. در این طبقه‌بندی براساس نوع سازه و نوع تغییر شکل سازه، موج‌شکن سکویی به چهار نوع شامل، موج‌شکن سکویی ایسلندی به‌سختی شکل‌پذیر (^۶HR-IC)، موج‌شکن سکویی ایسلندی نسبتاً شکل‌پذیر (^۷PR-IC)، موج‌شکن سکویی همگن نسبتاً شکل‌پذیر (^۸PR-MA) و موج‌شکن سکویی همگن کاملاً شکل‌پذیر (^۹FR-MA) تقسیم شده است (شکل ۱) [۱۳].

جدول ۱، دامنه تغییرات پارامترهای بی‌بعد شامل عدد پایداری

$$(H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}}), \text{ پارامتر آسیب } (S_d = \frac{A_e}{2 D_{n50}}) \text{ و عرض پسرفت}$$

بی‌بعد شده سکو ($\frac{Rec}{D_{n50}}$) را برای طبقه‌بندی انواع موج‌شکن‌های

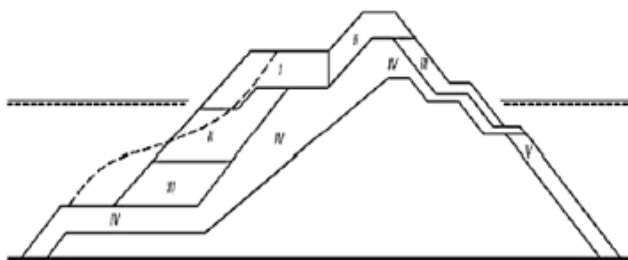
سکویی برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله بیان می‌کند. در این جدول H_s ارتفاع مشخصه موج، A_e مساحت فرسایش یافته،

$$(\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1) \text{ چگالی نسبی سنگ لایه آرمور، } \rho_s \text{ چگالی}$$

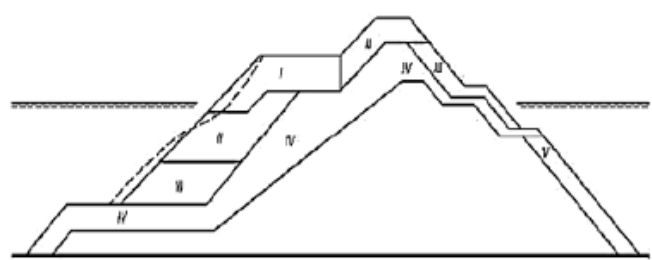
سنگ‌دانه‌ها، ρ_w چگالی آب، D_{n50} قطر متوسط سنگ لایه آرمور و Rec پسرفت عرض سکواست. شایان ذکر است که برای دوره‌های بازگشت کمتر و یا بیشتر از شرایط طرح، مقادیر کمتر و یا بیشتر از مقادیر پیشنهاد شده در این جدول متناسب با مقدار دوره بازگشت با نظر طراح انتخاب می‌شود [۱۳].

هم برخورد کرده و فرسایش و یا شکست سنگ امکان‌پذیر خواهد بود. در صورت فرسایش و یا شکست سنگ، قطر متوسط سنگ کاهش پیدا کرده و بعضاً منجر به کاهش پایداری سازه می‌شود [۱۱]. برخلاف موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، در موج‌شکن سکویی چندلایه، سنگ‌ها اجازه حرکت کمتری را داشته و در نتیجه احتمال شکست سنگ کمتر می‌شود. در موج‌شکن‌های چندلایه به‌دلیل باقی‌ماندن سنگ‌های بزرگتر در سکو و همچنین وجود فضای خالی بیشتر بین سنگ‌ها (تخلخل بیشتر از ۴۰٪) در طول عمر مفید سازه، جذب انرژی بالایی از موج اتفاق خواهد افتاد [۳، ۱۰ و ۱۱].

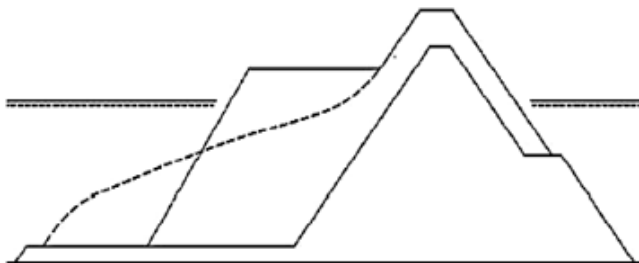
قدیمی‌ترین طبقه‌بندی موج‌شکن‌های سکویی توسط فن‌درمیر و پیلازیک تعریف شده است [۱۲]. پیانک براساس شکل‌پذیری سازه به دسته‌بندی موج‌شکن‌های سکویی پرداخت [۴]. اخیراً طبقه‌بندی جدیدی توسط سیگوردار سون و فن‌درمیر برای موج‌شکن سکویی انجام شده که بین موج‌شکن ایسلندی و نوع همگن تفاوت قائل می‌شود [۱۳]. طبقه‌بندی جدید براساس رفتار سازه‌ای موج‌شکن و همچنین تعداد کلاس سنگ بکار رفته در سازه، به اصلاح طبقه‌بندی قبلی صورت گرفته توسط پیانک پرداخته است. در این حالت ابتدا بین موج‌شکن سکویی همگن با یک کلاس سنگ (MA) و موج‌شکن ایسلندی با چند کلاس سنگ (IC) تفاوت قائل شده و سپس رفتار این دو نوع موج‌شکن مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌دلیل آنکه ابعاد سنگ‌های استفاده شده در موج‌شکن نوع همگن کوچکتر از سنگ‌های مورد استفاده در موج‌شکن نوع ایسلندی است، موج‌شکن نوع همگن به سازه کاملاً شکل‌پذیر



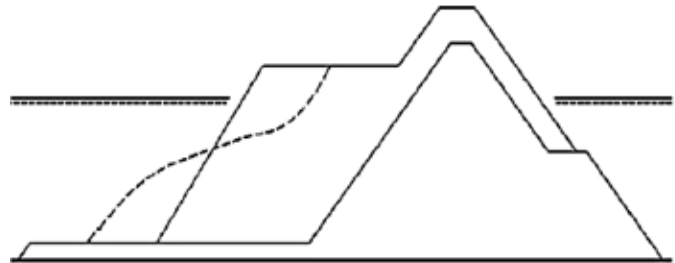
شکل ۱-ب- موج‌شکن سکویی ایسلندی نسبتاً شکل‌پذیر



شکل ۱-الف- موج‌شکن سکویی ایسلندی به‌سختی شکل‌پذیر



شکل ۱-د- موج‌شکن سکویی همگن کاملاً شکل‌پذیر



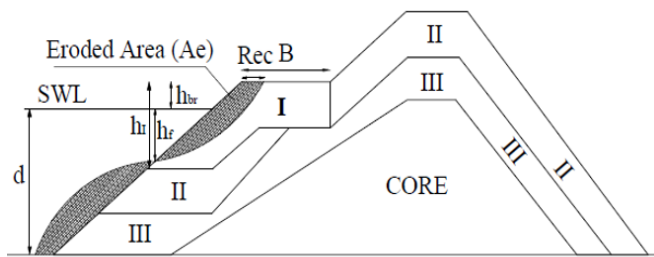
شکل ۱-ج- موج‌شکن سکویی همگن نسبتاً شکل‌پذیر

شکل ۱- انواع موج‌شکن‌های سکویی براساس طبقه‌بندی جدید [۱۳]

جدول ۱- طبقه‌بندی موج شکن سکوی برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله [۱۳]

| نوع موج شکن | نشان اختصاری | $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}}$ | S_d | $\frac{Rec}{D_{n50}}$ |
|---------------------------------------|--------------|------------------------------|-------|-----------------------|
| موج شکن سکوی ایسلندی به سختی شکل پذیر | HR-IC | ۱/۷-۲ | ۲-۸ | ۰/۵-۲ |
| موج شکن سکوی ایسلندی نسبتاً شکل پذیر | PR-IC | ۲-۲/۵ | ۱۰-۲۰ | ۱-۵ |
| موج شکن سکوی همگن نسبتاً شکل پذیر | PR-MA | ۲-۲/۵ | ۱۰-۲۰ | ۱-۵ |
| موج شکن سکوی همگن کاملاً شکل پذیر | FR-MA | ۲/۵-۳ | ----- | ۳-۱۰ |

سیگوردارسون و همکاران [۲۰]، لیک اندرسن و بورخارت [۷]، مقیم و همکاران [۲۱]، سیگوردارسون و فن درمیر [۸]، تورام و همکاران [۲۲]، شکاری و شفیع فر [۲۳]، بورخارت [۱۲]، تامسین و همکاران [۲۴]، مقیم و لیک اندرسن [۹] و فن درمیر و سیگوردارسون [۲۵] بر روی پایداری موج شکن‌های توده‌سنگی سکویی تحقیقات گسترده‌ای انجام دادند، که نتیجه برخی از این مطالعات آزمایشگاهی به ارائه روابطی برای ارزیابی پایداری سازه منجر شده است.



شکل ۲- شکل شماتیک فرسایش شیب لایه آرمور در موج شکن سکوی چندلایه

پژوهشگران مختلفی مانند لیک اندرسن و بورخارت [۷]، مقیم و همکاران [۲۱] و شکاری و شفیع فر [۲۳]، مطالعاتی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای محیطی و سازه‌ای مرتبط با سکوی سازه شکن شامل تراز سکو از سطح ایستابی و عمق آب پای سازه بر روی موج-شکن‌های سکوی همگن شکل پذیر انجام دادند. اسوینبرنسن [۳] نیز نحوه‌ی اثرگذاری پارامتر تراز سکو از سطح ایستابی را بر روی موج-شکن سکوی چندلایه بررسی کرد. در این پژوهش به منظور بررسی اثر تغییر تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری موج شکن، تراز سطح ایستابی تغییر می‌کرد و در این صورت علاوه بر تغییر تراز سکو از سطح ایستابی، عمق آب نیز دچار تغییر می‌شد که این امر منجر به تغییر دو پارامتر به صورت همزمان می‌شود. مقیم و همکاران [۲۱] با بررسی اثر تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری موج شکن سکوی همگن بیان کردند که این پارامتر، عامل اثرگذاری در بررسی پایداری و مقدار پسرفت سکو است، به طوری که با افزایش ارتفاع سکو در شرایط ثابت ترکیب موج، مقدار پسرفت سکو کمتر می‌شود. همچنین آن‌ها با بررسی عمق آب پای سازه دریافتند که با افزایش عمق آب در یک شرایط موج ثابت، مقدار پسرفت سکو بیشتر شده است. مقیم

در مطالعه پایداری هیدرولیکی موج شکن‌های سکوی، بدست آوردن روشی مناسب برای ارزیابی پایداری سازه، بسیار مهم قلمداد می‌شود. یکی از مهمترین پارامترهای حاکم در طراحی و اندازه‌گیری تغییر شکل موج شکن‌های سکوی همگن، مقدار فرسایش عرض سکوی آن (Rec) است که در صورتی که این مقدار بزرگتر از عرض سکوی موج شکن ($Rec > B$) باشد، ناپایداری و خرابی موج شکن سکوی اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر با توجه به عملکرد استاتیکی موج شکن‌های سکوی چندلایه، پارامتر آسیب (S_d) که توسط بردریک تعریف شده و با سطح فرسایش یافته و تعداد بلوک سنگی جابجا شده (تخریب شده) مرتبط است، به عنوان پارامتر اصلی در تعیین میزان آسیب در موج شکن‌های سکوی چندلایه مطرح می‌شود [۱۴]. پارامتر مهم دیگر در توصیف نیمرخ تغییر شکل یافته در موج شکن‌های سکوی، فاصله نقطه تقاطع نیمرخ تغییر شکل یافته و نیمرخ اولیه نسبت به تراز سطح ایستابی (h_f) است [۶]. این پارامتر در موج شکن‌های سکوی چندلایه حائز اهمیت است، زیرا باید به لحاظ حفظ پایداری سازه، بزرگترین کلاس سنگ (کلاس I) تا نقطه تقاطع نیمرخ تغییر شکل یافته و نیمرخ اولیه ادامه یابد. در غیر این صورت تغییر شکل به کلاس II خواهد رسید که سبب تشدید در مقدار سطح فرسایش یافته در کلاس I خواهد شد. بطور خلاصه می‌توان بیان داشت که بدلیل عملکرد استاتیکی موج شکن‌های سکوی چندلایه، استفاده از پسرفت سکو دارای پراکندگی زیادی در نتایج خواهد بود [۹]. در سازه‌های استاتیکی، گاهی عملاً سازه پسرفت سکو ندارد، اما لایه آرمور دارای سطح فرسایش یافته است. بنابراین استفاده از پارامتر آسیب که با سطح فرسایش سازه در ارتباط است، به عنوان پارامتر مناسب برای ارزیابی پایداری موج شکن‌های سکوی چندلایه، تعریف می‌شود [۹]. شکل ۲ پارامترهای مطرح در زمینه پایداری هیدرولیکی موج شکن‌های سکوی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه پایداری هیدرولیکی موج شکن‌های توده‌سنگی انجام شده است، که عمده آن بر روی سازه‌های شکل پذیر بوده است. هادسون [۱۵]، فن درمیر [۱۶]، جوول و اسلوس [۱۷]، تورام و همکاران [۶]، سیگوردارسون و همکاران [۱۸]، راوو و همکاران [۱۹]، اسوینبرنسن [۳]،

سکو قرار گرفت. برای حصول اطمینان از عدم وقوع سرریزی، قبل از انجام آزمایش‌های اصلی، آزمایش‌های اولیه در بحرانی‌ترین شرایط محیطی و سازه‌ای موردنظر در این تحقیق انجام شد، که نتایج بیانگر مناسب بودن تراز تاج انتخابی براساس شرایط طراحی آزمایش‌ها بود. همچنین در طراحی موج‌شکن سکویی چندلایه برای کلیه مقاطع مورد بررسی، تراز نقطه تقاطع پروفیل اولیه و تغییر شکل یافته باید بالاتر از انتهای سنگ کلاس I جایابی شود. اسوینبرسن [۳] توصیه کرد که عمق سنگ کلاس I به اندازه بیشترین مقدار بین دو مقدار $1.45\Delta \times D_{n50I}$ و $1.85\Delta \times D_{n50II}$ در زیر سکو ادامه یابد. برای کنترل توصیه‌های اسوینبرسن [۳]، قبل از انجام آزمایش‌های اصلی، بر روی مقطع طراحی شده آزمایش‌های اولیه صورت گرفت و در نهایت سنگ‌های کلاس II پایین‌تر از فاصله نقطه تقاطع نیم‌رخ تغییر شکل یافته و اولیه نسبت به تراز سطح ایستایی جایابی شدند.

برای ثبت نوسانات سطح آب در حین آزمایش، از سه حسگر بین سازه و موج‌ساز استفاده شده است (شکل ۴). حسگرهای بکار برده شده از نوع خازنی با فرکانس ۱۰ هرتز و دقت یک میلی‌متر بوده و تراز لحظه‌ای موج را در هر ۱۰۰ میلی ثانیه برداشت می‌کنند. چینش حسگرها براساس الگوی پیشنهادی منسارد و فونک است [۲۷]. براساس الگوی آن‌ها فاصله بین حسگرها از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$X_{12} = L/10 ; L/6 \leq X_{13} \leq L/3 ; X_{13} \neq L/5, L/10 \quad (1)$$

که در آن L_p طول موج متناظر با پریود اوج، X_{12} فاصله حسگر اول (سمت موج‌ساز) تا حسگر میانی و X_{13} فاصله حسگر اول تا حسگر سوم (سمت سازه) است. همچنین فاصله اولین حسگر تا سازه نیز به اندازه یک طول موج از سازه فاصله دارد. پس از اتمام هر آزمایش، امواج حاصل از ترکیب موج برخوردی و انعکاسی براساس الگوی منسارد و فونک [۲۷] و با استفاده از نرم‌افزار IWS تفکیک شدند.

برای نصب تجهیزات اندازه‌گیری نیم‌رخ سازه بر روی فلوم، یک جفت ریل ثابت در امتداد طولی و بالای آن قرار گرفت. جهت به‌منظور نیم‌رخ‌برداری سازه، از متر لیزری نصب شده بر روی ارباهای با قابلیت حرکت در راستای طول و عرض فلوم استفاده شد. برای اطمینان از ساخت دقیق هندسه اولیه سازه و همچنین برداشت پروفیل سازه بعد از اصابت امواج، برداشت نیم‌رخ در پنج مقطع جداگانه و با حرکت روی ریل فلوم برای فواصل 0.2 متری انجام شده است. مقطع میانی در وسط فلوم و مقاطع کناری با فاصله 0.2 متر از یکدیگر قرار دارند. همچنین در انتخاب مقاطع، فاصله آخرین مقطع کناری تا دیواره فلوم برای کنترل اثر دیواره بر نتایج آزمایش‌ها، مقدار 0.1 متر لحاظ شده است. در نهایت میانگین نیم‌رخ‌های پنج مقطع به‌عنوان نیم‌رخ اولیه و تغییر شکل یافته در

و همکاران [۲۱] در بررسی تأثیر عمق آب پای سازه، با تغییر این پارامتر، ارتفاع سکو از کف کانال را به‌نحوی تغییر دادند که ارتفاع تراز سکو از سطح ایستایی ثابت باقی بماند. بورخارت [۱۲]، فن‌درمیر و سیگوردارسون [۲۵] به اهمیت پارامترهای تراز سکو از سطح ایستایی و عمق آب پای سازه در بررسی پایداری موج‌شکن سکویی چندلایه اشاره و شناخت آن‌را توصیه کردند.

بررسی‌های انجام شده بر روی مطالعات پژوهشگران حاکی از آن است که اطلاعات و تحقیقات اندکی در زمینه پایداری موج‌شکن سکویی چندلایه وجود دارد، به‌طوری‌که عدم کفایت تحقیقات موجود در این زمینه، منتج به عدم شناخت صحیح تأثیر پارامترهای اثرگذار بر روی پایداری این سازه شده است. از این‌رو، در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای محیطی و سازه‌ای مرتبط با سکو شامل تراز سکو از سطح ایستایی و عمق آب پای سازه بر روی پایداری موج‌شکن سکویی چندلایه بررسی می‌شوند. همچنین پارامتر ارتفاع سنگ کلاس I به-عنوان پارامتر هندسی جدید معرفی و نحوه اثرگذاری آن بر پایداری مورد بحث قرار خواهد گرفت.

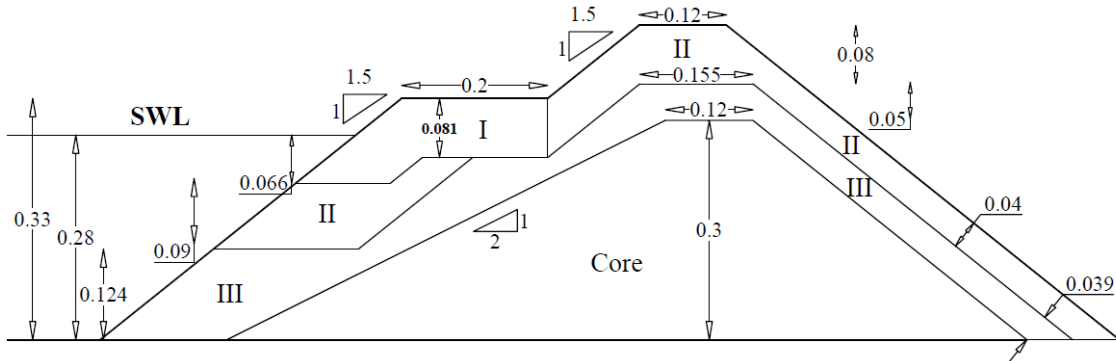
۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی و روش انجام آن

مطالعه آزمایشگاهی حاضر به‌صورت مدل آزمایشگاهی دو بعدی در آزمایشگاه هیدرولیک دریا دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. کانال موج دانشگاه تربیت مدرس به طول ۱۶ متر، عرض ۱ متر و عمق ۱ متر است. دیواره‌ها و کف کانال از جنس شیشه نشکن و شفاف تشکیل شده است تا برای مشاهدات و فیلم‌برداری کیفیت لازم را داشته باشد. دستگاه موج‌ساز مورد استفاده از نوع پیستونی با توانایی تولید امواج منظم و نامنظم با بیشینه خطای جایابی ۱ میلی‌متر است. در آزمایش‌های حاضر از موج نامنظم با طیف انرژی جوانسواپ با ضریب $\gamma = 10$ برابر $3/3$ ، استفاده شده است. ایده اصلی مقطع مدل آزمایشگاهی از طرح اجرا شده‌ی موج‌شکن سکویی چندلایه Sirevåg در کشور نروژ گرفته شده است [۲۶]. در مطالعه حاضر جهت ساخت موج‌شکن به غیر از لایه هسته، از سه کلاس سنگ استفاده شده است. ارتفاع کل مقطع موج‌شکن مورد نظر 0.43 متر، شیب لایه آرمور $1:1/5$ ، شیب لایه هسته $1:2$ و ارتفاع قسمت تاج هسته از کف فلوم برابر با 0.3 متر در نظر گرفته شدند. در همه مقاطع، مقادیر فوق دارای مقدار ثابتی هستند. همچنین تعداد موج در هر آزمایش برابر با ۳۰۰۰ موج است. شکل ۳ مقطعی از مدل موج‌شکن طراحی شده و اجرا شده در کانال موج را نشان می‌دهد.

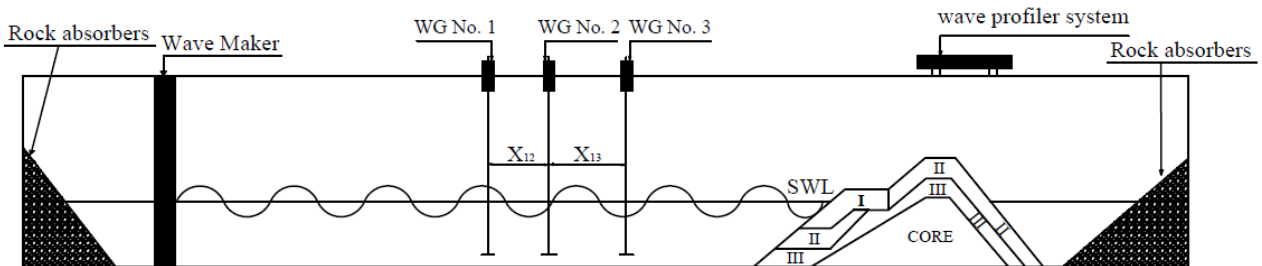
از آنجایی‌که هدف از انجام آزمایش‌ها، بررسی پایداری هیدرولیکی موج‌شکن سکویی چندلایه است، باید موج‌شکنی طراحی شود که در بحرانی‌ترین حالت به‌صورت غیرسرریز شونده عمل کند. در تمامی آزمایش‌ها تراز تاج در سازه‌ی طراحی شده در فاصله 0.1 متری از

شده است. به منظور تفکیک بهتر مصالح در کلاس‌های مختلف سنگی و مشاهده بهتر مکانیزم حرکتی آن‌ها در حین انجام آزمایش‌ها مصالح کلاس‌های مختلف با اسپری رنگ آمیزی شدند.

نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح تشکیل دهنده کلاس‌های مختلف سنگی موج شکن سکوی چندلایه شامل قطر اسمی، چگالی و عرض منحنی دانه‌بندی در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین روند اجرای مراحل ساخت مدل آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده



شکل ۳- مقطع اولیه موج شکن سکوی چندلایه طراحی شده در آزمایش‌ها



شکل ۴- مقطع عرضی کانال موج و نحوه استقرار اجزای مختلف در آزمایش‌ها

جدول ۲- مشخصات مصالح بکار رفته در لایه‌های مختلف سنگی موج شکن سکوی چندلایه اجرا شده

| مشخصه | هسته | سنگ کلاس III | سنگ کلاس II | سنگ کلاس I |
|---|-------|--------------|-------------|------------|
| قطر اسمی سنگ‌دانه (m) | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲۷ |
| ضریب منحنی دانه‌بندی ($f_g = D_{n85} / D_{n15}$) | ۱/۵ | ۱/۵ | ۱/۵ | ۱/۲ |
| جرم مخصوص (Kg / m^3) | ۲۶۵۰ | ۲۶۵۰ | ۲۶۵۰ | ۲۶۵۰ |



۵-ب- اجرای کلاس III موج شکن سکوی چندلایه



۵-الف- اجرای هسته موج شکن سکوی چندلایه



۵-د- اجرای کامل موج شکن سکویی چندلایه



۵-ج- اجرای کلاس II موج شکن سکویی چندلایه

شکل ۵- تصاویری از اجرای مدل موج شکن سکویی چندلایه در آزمایشگاه

۳- گستره پارامترهای بامعد و بی بعد

که در آن عبارت $\sqrt{gH_s}$ معرف سرعت مشخصه، D_{n50} طول مشخصه و U لزجت سینماتیکی است. دای و گمل [۲۸]، جنسن و کلینتینگ [۲۹]، فن درمیر [۱۶] از جمله محققانی هستند که بر روی اثر مقیاس مطالعاتی انجام دادند. براساس توصیه فن درمیر [۱۶] برای به حداقل رساندن اثر لزجت، عدد رینولدز باید در محدوده $2 \times 10^4 \leq Re \leq 4 \times 10^5$ باشد. کمترین مقدار عدد رینولدز در مجموعه آزمایش‌های این پژوهش 2.05×10^4 بوده و از این رو در تحقیق حاضر اثر مقیاس ناشی از لزجت قابل نظر کردن است.

۴- نتایج و بحث

در بخش حاضر، نخست تأثیر پارامترهای عمق آب پای سازه و تراز سکو از سطح ایستایی بر پایداری موج شکن سکویی چندلایه بررسی می‌شود. در بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها بر پایداری، به منظور ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، تراز ارتفاعی سکو تغییر داده شد. با تحلیل نتایج بدست آمده، پارامتر ارتفاع و یا حجم سنگ کلاس I به عنوان پارامتر جدید تأثیرگذار معرفی گردید و در ادامه با انجام آزمایش‌هایی، تأثیر این پارامتر بر پایداری شناخته شد. در نهایت با ثابت نگه داشتن حجم سنگ‌های کلاس I، برای بررسی نحوه اثر گذاری عمق آب و تراز سکو از سطح ایستایی بر پایداری، آزمایش‌ها مجدد انجام شد که در ادامه به بیان این نتایج پرداخته خواهد شد.

آزمایش‌های حاضر در این پژوهش برای شرایط مختلف محیطی مانند ارتفاع موج، پرپود موج و عمق آب پای سازه و همچنین پارامترهای هندسی متفاوت از قبیل تراز سکو از سطح ایستایی و ارتفاع سنگ کلاس I انجام شده است. در جداول ۳ و ۴ محدوده تغییرات پارامترهای بامعد و بی بعد تحقیق حاضر، ارائه شده است. به منظور پوشش مناسب محدوده‌های تغییر برای پارامترهای بی بعد، قیدهایی مانند محدودیت‌های آزمایشگاهی، عدد رینولدز، تیزی موج (S_{op})، عدد شکست موج (ξ) و عدد پایداری (H_o) در نظر گرفته شدند. موج شکن طراحی شده از نظر رفتار سازه‌ای، گستره به سختی شکل-پذیر و نسبتاً شکل‌پذیر را پوشش می‌دهد. تیزی موج در مجموعه آزمایش‌های حاضر در گستره $0.016 < S_{op} < 0.065$ بوده که این گستره محدوده پیشنهادی توسط فن درمیر [۱۶] $0.015 < S_{op} < 0.07$ را پوشش داده است. همچنین عدد شکست موج در گستره $\xi = 1.97 - 6.37$ قرار گرفته به طوری که ناحیه شکست چرخان تا شکست لغزان را پوشش می‌دهد. در مفاهیم مدل سازی دریایی، نیروی غالب در موج شکن‌های توده-سنگی نیروی ثقل است و برای به حداقل رساندن اثر نیروی لزجت، باید جریان پای سازه به اندازه کافی آشفته باشد. برای ارزیابی اثر مقیاس در آزمایش‌های مربوط به مدل موج شکن‌های توده سنگی از عدد رینولدز بصورت رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$R_e = \frac{\sqrt{gH_s} D_{n50}}{\nu} \quad (2)$$

جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای محیطی و سازه‌ای برای بررسی پایداری سازه

| پارامتر | نشان اختصاری | گستره تغییر پارامتر |
|-------------------------|--------------|---------------------|
| ارتفاع مشخصه موج | H_s | ۰/۰۵۹ تا ۰/۱۰۳ متر |
| پرپود اوجی موج | T_p | ۱/۰ تا ۱/۶ ثانیه |
| قطر اسمی سنگ کلاس I | D_{n50I} | ۰/۰۲۷ متر |
| عمق آب پای سازه | d | ۰/۲۴ تا ۰/۳۲ متر |
| تراز سکو از سطح ایستایی | h_{br} | ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ متر |
| عرض سکو | B | ۰/۲ متر |
| ارتفاع سنگ کلاس I | h_I | ۰/۱۴ تا ۰/۲ متر |

| پارامتر | محدوده تغییر |
|--------------------|----------------|
| H_o | ۱/۳۱ تا ۲/۶ |
| T_o | ۱۹ تا ۳۱/۱ |
| N | ۳۰۰۰ |
| $H_o\sqrt{T_o}$ | ۵/۷۴ تا ۱۳/۶ |
| S_{op} | ۰/۰۶۵ تا ۰/۰۱۶ |
| ξ | ۱/۹۷ تا ۶/۳۷ |
| $R_e(\times 10^4)$ | ۲/۷۴ تا ۲/۰۵ |

۴-۱- بررسی تأثیر تراز سکواز سطح ایستابی بر پایداری سازه

افزایش ارتفاع تراز سکواز سطح ایستابی منجر به افزایش حجم مصالح مصرفی و در نتیجه افزایش هزینه اجرای سازه خواهد شد. از طرف دیگر کافی نبودن تراز سکواز سطح ایستابی باعث می‌شود که سکوی موج شکن عملکرد مناسبی نداشته و نتواند استهلاک انرژی را به خوبی انجام دهد. از این رو به نظر می‌رسد انتخاب بهینه این پارامتر، تأثیر مستقیمی بر اقتصاد پروژه و همچنین پایداری سازه داشته باشد. بررسی تحقیقاتی مختلف بیانگر تأثیر مهم پارامتر تراز سکواز سطح ایستابی بر پایداری هیدرولیکی موج شکن سکویی شکل پذیر و عدم کفایت تحقیقات سایرین در بررسی اثر این پارامتر در پایداری موج شکن سکویی چندلایه است. با توجه به مطالب ذکر شده ضرورت بررسی ارتفاع تراز سکواز سطح ایستابی در موج شکن سکویی چندلایه توجیه می‌شود.

برای بررسی نحوه اثرگذاری پارامتر تراز سکوی موج شکن سکویی چندلایه بر سطح آسیب سازه تحت اثر برخورد ۳۰۰۰ موج در ترکیب‌های مختلف ارتفاع و پیوند موج، ۱۶ آزمایش انجام شدند. آزمایش‌ها برای چهار تراز سکوی متفاوت (۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۷ متر) و با چهار ترکیب ارتفاع موج و پیوند موج طراحی شدند. در انجام آزمایش‌های مربوط به بررسی تراز سکواز سطح ایستابی در موج شکن‌های سکویی، ارتفاع سکواز کف بستر باید تغییر کند تا مقدار تراز سکواز سطح ایستابی به اندازه مدنظر برای انجام آزمایش حاصل شود. در این مجموعه از آزمایش‌ها نیز برای بررسی اثر تراز سکواز سطح ایستابی، به مانند تحقیقات سایر محققان مانند مقیم و همکاران [۲۱] و شکاری و شفیع‌فر [۲۳] تغییرات لازم برای اجرای آزمایش‌ها در تراز ارتفاعی سکواز انجام شد. شکل ۶ تأثیر تراز سکوی موج شکن را بر مقدار سطح آسیب موج شکن سکویی چندلایه، برای ترکیب‌های مختلف ارتفاع و پیوند موج نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است. با افزایش تراز سکواز سطح ایستابی، مقدار سطح آسیب سازه روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. در واقع به نظر

می‌رسد که پارامتر مؤثر دیگری نیز با تغییر تراز سکواز تغییر پیدا کرده و هم‌زمان بر سطح آسیب سازه اثر گذاشته است.

از آنجایی که برای انجام آزمایش در ترازهای مختلف سکواز، به حجم سنگ‌های کلاس I اضافه و یا از آن کم شده است، حجم سنگ‌های کلاس I با تغییر تراز سکواز، دستخوش تغییر شده و به نظر می‌رسد که پارامتر مؤثری متناسب با سنگ‌های کلاس I بصورت هم‌زمان با تغییر تراز سکواز، تغییر کرده و بر نتایج اثرگذار شده است. در واقع عدم وجود یک روند مشخص در بررسی اثر تراز سکواز بر پارامتر آسیب سازه برای یک ترکیب ارتفاع و پیوند ثابت به این دلیل است که در برخی از آزمایش‌ها، اثر تراز سکواز غالب بوده و در برخی دیگر اثر پارامتری متناسب با سنگ کلاس I دارای تأثیر بیشتری است. به عنوان مثال، برای ایجاد تراز سکوی ۰/۰۷ متر در ترکیب موج $H_s = 0.09m, T_p = 1.18s$ ، به سنگ‌های کلاس I افزوده شده است. اثر افزایش حجم سنگ کلاس I در کاهش سطح آسیب وارده به سازه به دلیل استهلاک انرژی بیشتر، نسبت به اثر افزایش تراز سکواز سطح ایستابی بر سطح آسیب غالب بوده و منجر به آسیب کمتری در سازه موج شکن شده است. به عنوان مثالی دیگر، برای ترکیب موج $H_s = 0.103m, T_p = 1.36s$ در آزمایش تراز سکواز ۰/۰۳ متر، کمینه مقدار آسیب وارد بر سازه رخ داده است. در این حالت علی‌رغم کاهش حجم سنگ‌های کلاس I، به دلیل کاهش تراز سکواز سطح ایستابی، امواج برخوردی به سازه بر روی طول بیشتری از سکواز توزیع شده و انرژی بیشتری از موج برخوردی مستهلک شده است و به پایداری سازه کمک می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان کرد که استفاده از روش متداول در موج شکن‌های سکویی همگن در بررسی اثر تراز سکواز سطح ایستابی، به طور صحیح نحوه اثرگذاری تراز سکواز بر پایداری موج شکن سکویی چندلایه را مشخص نخواهد کرد.

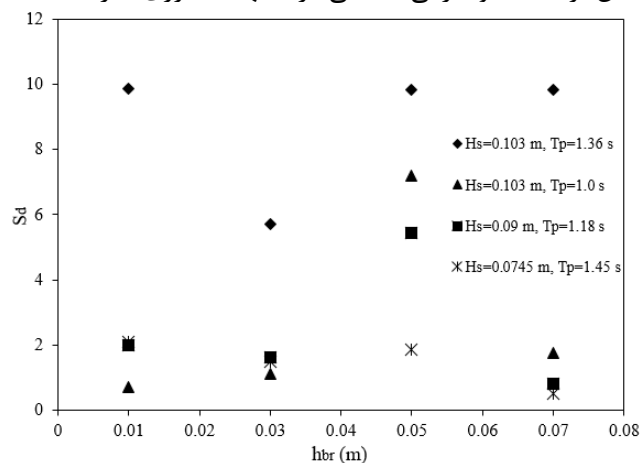
همچنین با بررسی مشاهدات آزمایشگاهی و تصاویر ثبت شده در حین انجام آزمایش‌های حاضر می‌توان بیان کرد که در حالت سکواز با تراز ۰/۰۱ متر، سکوی سازه عملکرد مناسبی در استهلاک انرژی موج برخوردی از خود نشان نداده است. از آنجایی که سکوی

۴-۲- بررسی تأثیر عمق آب پای سازه بر پایداری سازه

یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار محیطی در بحث پایداری سازه که در بسیاری از تحقیق‌های انجام شده در موج‌شکن‌های توده‌سنگی به آن اشاره شده است، عمق آب پای سازه است. در خصوص انتخاب این پارامتر باید محدودیت‌هایی از جمله ارتفاع فلوم، نسبت عمق آب به طول موج، حداقل عمق آب برای جلوگیری از شکست موج و حداکثر عمق آب برای جلوگیری وقوع سرریزی از سازه در نظر گرفته شوند. در مطالعه عمق آب باید به دو نکته اساسی توجه داشت. ابتدا اینکه با افزایش عمق آب تا حد امکان نباید سرریزی موج اتفاق افتد. زیرا سرریزی موج از روی سازه، منجر به از دست رفتن بخشی از انرژی موج شده و در نتیجه مطالعه پایداری هیدرولیکی سازه براساس کل انرژی موج برخوردی نخواهد بود. همچنین ذکر این نکته ضروری است که با تغییر عمق آب، باید تراز سکو از کف بستر تغییر یابد، به طوری که تراز سکو از سطح ایستایی ثابت باقی بماند.

برای بررسی اثر عمق آب پای سازه بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن سکویی چندلایه، چهار عمق آب مختلف (۰/۲۴، ۰/۲۶، ۰/۲۸ و ۰/۳۰ متر) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که در این مجموعه آزمایش‌ها برای ثابت نگه داشتن تراز سکو از سطح ایستایی، با تغییر تراز ایستایی از کف بستر، سنگ‌ها از تراز ارتفاعی سکو برداشته یا به آن اضافه شد، به طوری که در تمامی آزمایش‌ها تراز سکو از سطح ایستایی ثابت و برابر ۰/۰۵ متر باقی ماند. شکل ۸ تأثیر پارامتر عمق

موج شکن نقش تعیین‌کننده‌ای در استهلاک انرژی امواج دارد، عدم دخالت آن در استهلاک انرژی می‌تواند باعث آسیب بیشتر در سازه شود. نکته‌ی ذکر شده در تصاویر ثبت شده در آزمایشگاه (شکل ۷) مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل ۷-الف مشهود است، موج با انرژی زیادی به سازه نزدیک شده، اما سکوی موج‌شکن با تراز سکوی معادل ۰/۰۱ متر، خیلی توسط موج احساس نمی‌شود (شکل ۷-ب) و موج با انرژی زیادی (همانطور که در شکل ۷-ج به وضوح قابل رؤیت است) به شیب بالای سکوی موج شکن برخورد کرده و بدین ترتیب سکو کارایی مناسبی در استهلاک انرژی ندارد.



شکل ۶- تأثیر تراز سکو از سطح ایستایی بر روی پارامتر آسیب موج-شکن سکویی چندلایه برای ترکیب‌های متفاوت امواج



۷-ب- تأثیر گذاری کم سکو در استهلاک انرژی موج برخوردی



۷-الف- نزدیک شدن موج به سازه



۷-ج- برخورد موج با انرژی زیاد به شیب بالای سازه

شکل ۷- عدم کفایت تراز سکو ۰/۰۱ متر از سطح ایستایی

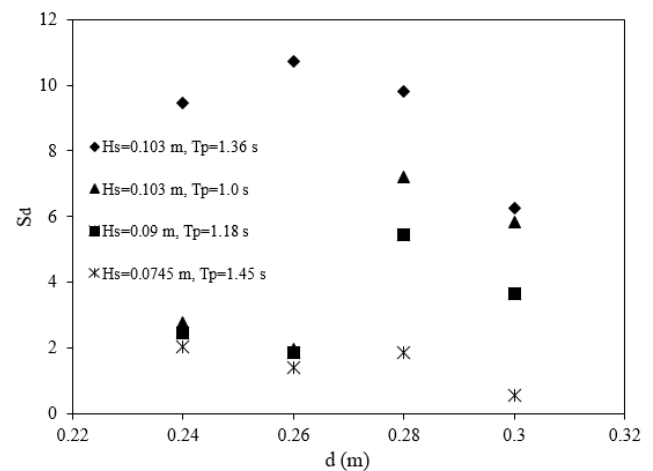
سنگ‌های کلاس I، ارتفاع سکو از کف بستر صرفاً با اضافه و یا کم کردن سنگ‌های کلاس II و III در لایه‌های پایین‌تر، تغییر یابد. با این روش ضمن ثابت ماندن ارتفاع کلاس I، تأثیر تراز سکو و یا عمق آب بر روی پایداری سازه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

از آنجایی که در موج شکن سکویی چندلایه در قسمت فوقانی سکوی موج شکن، بزرگترین سنگ‌دانه‌ها (سنگ کلاس I) قرار دارند، این سنگ‌ها وظیفه اصلی مقابله در برابر نیروهای وارده بر موج شکن را برعهده دارند. با توجه به این موضوع به نظر می‌رسد که تغییر در ارتفاع سنگ کلاس I اثر مستقیمی بر عملکرد موج شکن داشته و در مطالعه حاضر ارتفاع کلاس I به‌عنوان یک پارامتر جدید مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای بررسی نحوه اثرگذاری پارامتر ارتفاع کلاس I موج شکن سکویی چندلایه بر سطح آسیب سازه تحت اثر برخورد ۳۰۰۰ موج، تعداد ۱۲ آزمایش برای چهار ارتفاع کلاس I مختلف (۰/۱۴، ۰/۱۶، ۰/۱۸ و ۰/۲ متر) با سه ترکیب ارتفاع موج و پرپود موج ثابت طراحی و انجام شدند. در آزمایش‌های مربوط به بررسی اثر دیگر پارامترها، ارتفاع سنگ کلاس I ثابت و برابر با ۰/۱۸ متر است. در بررسی اثر ارتفاع کلاس I بر پایداری سازه، به‌منظور ثابت نگه داشتن تراز سکو از سطح ایستایی، ارتفاع کلاس‌های سنگی II و III در لایه‌های پایین‌تر که نقش کمتری در پایداری سازه دارند، دستخوش تغییر شدند. بدین ترتیب ضمن اینکه ارتفاع سنگ کلاس I تغییر کرد، از تغییرات تراز سکو جلوگیری شد.

شکل ۹ اثر پارامتر ارتفاع کلاس I بر مقدار آسیب سازه را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش ارتفاع کلاس I در یک ترکیب ثابت موج، مقدار پارامتر آسیب کمتر شده است. بنابراین پارامتر ارتفاع کلاس I به‌عنوان یک پارامتر اثرگذار در بررسی پایداری موج شکن سکویی چندلایه قابل تعریف است. با افزایش ارتفاع کلاس I، محیط متخلخل بزرگتری در ناحیه زیر تراز ایستایی ایجاد می‌شود و از این‌رو به‌دلیل حجم بالای فضای خالی بین سنگ‌های کلاس I، اتلاف انرژی موج برخوردی بیشتر شده و مقدار سرعت جریان و نیروهای موج برخوردی به سازه کمتر می‌شود.

همانطور که در شکل ۹ مشخص است برای هر کدام از ترکیب‌های امواج، از مقدار مشخصی از ارتفاع کلاس I به بعد، تغییرات ناچیزی در مقدار پارامتر آسیب اتفاق می‌افتد. با توجه به این مسئله می‌توان به این نکته پی برد که بیشتر کردن حجم سنگ‌دانه‌های بزرگ در کلاس I، از جایی به بعد تأثیر چندانی در پایداری سازه نداشته و صرفاً هزینه اجرایی بیشتری را برای یک پروژه به همراه خواهد داشت. نکته حاضر، امتیازی ویژه برای موج شکن سکویی چندلایه نسبت به موج-شکن توده‌سنگی سنتی و موج شکن سکویی همگن استاتیکی که در کل لایه آرمور آن‌ها از سنگ‌های بزرگ استفاده می‌شود، ایجاد می‌نماید. زیرا براساس این مطالعه استفاده از بلوک‌های سنگی با تناژ بالا

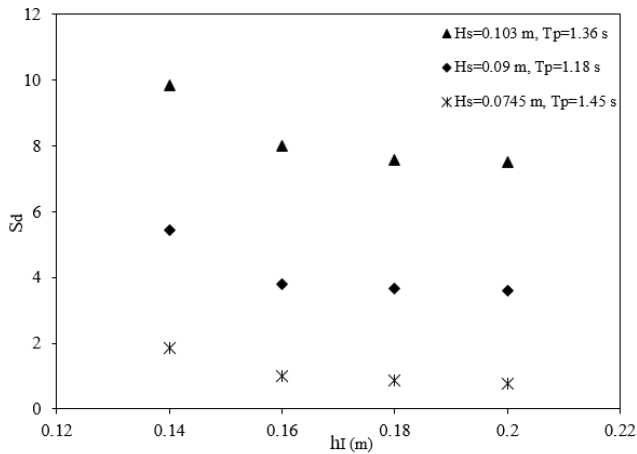
آب پای سازه بر مقدار سطح آسیب سازه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است عمق آب پای سازه پارامتر مهمی در بررسی پایداری سازه به‌نظر می‌رسد، اما روند مشخصی برای پارامتر آسیب با افزایش عمق آب پای سازه در شرایط مختلف امواج مشاهده نمی‌شود. دلیل اصلی این اتفاق را می‌توان در تغییر هم‌زمان پارامتر متنا سب با سنگ‌های کلاس I با تغییر عمق آب پای سازه دانست. به‌عنوان مثال، برای انجام آزمایش‌های با عمق آب ۰/۳ متر، به تراز ارتفاعی سکو سنگ‌های بزرگ (کلاس I) افزوده شد، از این‌رو محیط متخلخل بزرگتری در برابر امواج برخوردی ایجاد شده که منتج به استهلاک انرژی بیشتر و مقاومت بیشتر سازه شده است. در نتیجه در این مورد سنگ‌های کلاس I اثرگذاری بیشتری را نسبت به عمق آب پای سازه از خود نشان دادند. در مجموع با توجه به تغییر هم‌زمان دو پارامتر حجم سنگ کلاس I و همچنین عمق آب پای سازه در هر ترکیب موج، شرایطی برای آزمایش‌ها بوجود آمده که نمی‌توان بر آن اساس تحلیل روشنی در مورد نتایج ارائه کرد. از این‌رو در ادامه به معرفی پارامتر جدید ارتفاع کلاس I و بررسی اثرگذاری این پارامتر بر پایداری موج شکن سکویی چندلایه پرداخته خواهد شد.



شکل ۸- تأثیر عمق آب پای سازه بر روی پارامتر آسیب موج شکن سکویی چندلایه برای ترکیب‌های متفاوت امواج

۴-۳- بررسی تأثیر ارتفاع سنگ کلاس I بر پایداری سازه

با توجه به مطالب ذکر شده در قسمت‌های قبلی مشاهده شد که در بررسی اثر تراز سکو از سطح ایستایی و یا عمق آب در موج شکن سکویی چندلایه، با تغییر تراز ارتفاعی سکو از کف بستر، حجم سنگ کلاس I اضافه و یا کم شد و در این صورت در سنگ‌های کلاس I که نقش مهمی در پایداری سازه دارند، هم‌زمان با سایر پارامترها تغییر ایجاد می‌شود. بنابراین ضروری است که در بررسی اثر پارامترهای تراز سکو از سطح ایستایی و یا عمق آب پای سازه بر پایداری موج شکن سکویی چندلایه، به‌منظور ثابت نگه‌داشتن حجم



شکل ۹- تأثیر ارتفاع کلاس I بر پارامتر آسیب موج شکن سکویی چندلایه

۴-۴- بررسی تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری

سازه با ثابت نگه داشتن حجم سنگ کلاس I

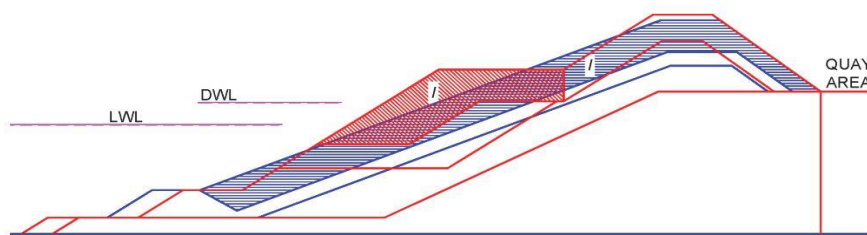
به منظور مطالعه پارامتر تراز سکو از سطح ایستابی موج شکن سکویی چندلایه بر سطح آسیب سازه، تعداد ۱۲ آزمایش در نظر گرفته شدند. در این سری از آزمایش ها، چهار تراز سکو از سطح ایستابی متفاوت (۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۶ و ۰/۰۷ متر) با سه ترکیب مختلف موج و تعداد موج برخوردی ۳۰۰۰ موج مورد بررسی قرار گرفتند. در آزمایش های مربوط به تغییر دیگر پارامترها، تراز سکو از سطح ایستابی ثابت و برابر ۰/۰۵ متر در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که در بررسی اثر این پارامتر، با تغییر تراز سکو از سطح ایستابی سایر پارامترها از جمله ارتفاع کلاس I و عمق آب پای سازه ثابت شدند.

تأثیر تراز سکو بر مقدار سطح آسیب سازه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. باتوجه به این شکل مشاهده می شود که تراز سکو از سطح ایستابی پارامتر مهمی در بررسی پایداری موج شکن است، به طوری که با افزایش تراز سکو در یک ترکیب موج ثابت، مقدار سطح آسیب سازه بیشتر می شود. به منظور مقایسه کمی و میزان اثرگذاری این پارامتر می توان بیان داشت که با افزایش ۴۰ درصدی در مقدار تراز سکو (به عنوان مثال در ترکیب موج $(H_s = 0.09m, T_p = 1.18s)$ ، مقدار سطح آسیب وارد بر سازه به میزان ۶۷ درصد افزایش یافته است.

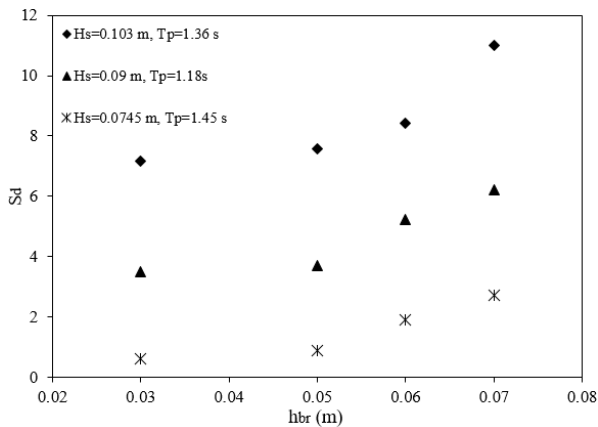
در بخش های پایینی لایه آرمور نقش مثرمتری در ایجاد مقاومت برای سازه در برابر امواج برخوردی ایفا نمی کند.

در شکل ۱۰ مقایسه ای بین حجم بزرگترین سنگ دانه بکار رفته در کلاس I موج شکن سکویی چندلایه و سنگ بکار رفته در لایه آرمور موج شکن توده سنگی سنتی را نشان می دهد. اگر به جای استفاده از موج شکن توده سنگی سنتی که لایه آرمور در آن با رنگ آبی مشخص شده است، از موج شکن سکویی چندلایه با بزرگترین سنگ دانه در کلاس I (با رنگ قرمز) استفاده شود، در این حالت حجم استفاده از بزرگترین کلاس سنگ (کلاس I)، به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. از آنجایی که استفاده از بزرگترین کلاس سنگ هزینه بالایی دارد، در کل طراحی موج شکن چندلایه می تواند اقتصادی تر باشد [۲۵]. نکته حاضر، مخصوصاً در کشورهایی که معادن با بلوک دهی مناسب در آن ها کم است (مانند مناطق جنوبی ایران)، بسیار کاربردی بوده و از این رو ساخت این نوع موج شکن ها، با کاهش حجم مصالح سنگی با تناژ بالا، می تواند یکی از بهترین گزینه های جایگزین برای سازه های توده سنگی با عملکرد استاتیکی باشند.

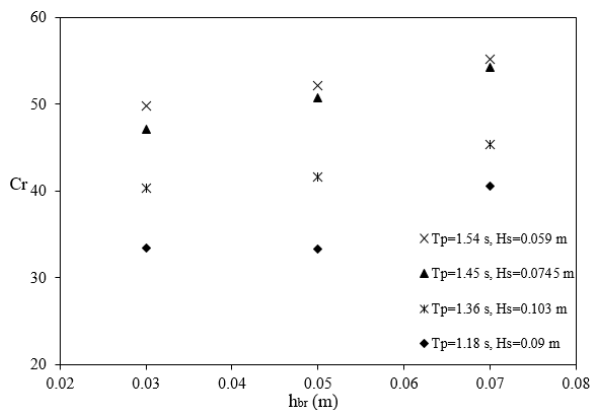
همچنین در مطالعه آزمایشگاهی حاضر مشاهده شد، در صورتی که تراز پایین روی موج به سنگ کلاس II برسد، آسیب وارد بر سازه افزایش یافته و پایداری سازه بطور چشم گیری کاهش می یابد. به عنوان توصیه می توان بیان کرد که ارتفاع کلاس I در موج شکن سکویی چندلایه حداقل باید تا پایین تر از نقطه تقاطع نیم رخ اولیه و نیم رخ تغییر شکل یافته ادامه پیدا کند. در واقع در صورتی که سنگ های لایه های زیرین در معرض امواج قرار گیرند، حمایت از سنگ های کلاس I برداشته شده و مقاومت سازه بسیار کاهش پیدا می کند. به عنوان یک مثال اجرایی می توان به موج شکن سکویی چندلایه نسبتاً شکل پذیر Sirevåg در کشور نروژ اشاره کرد، که در آن سنگ های کلاس I در فاصله ۱- متری از تراز ایستابی یعنی بالاتر از تراز نقطه تقاطع نیم رخ اولیه و نیم رخ تغییر شکل یافته خاتمه یافته است [۲۶]. تورام و همکاران [۲۶] و بورخارت [۱۱] نکته اشاره شده را به عنوان یک نقطه ضعف عمده در طراحی موج شکن Sirevåg معرفی کردند.



شکل ۱۰- مقایسه بزرگترین کلاس سنگ لایه آرمور در موج شکن سکویی چند لایه و لایه آرمور موج شکن



شکل ۱۱- تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر پارامتر آسیب موج شکن سکوی چندلایه



شکل ۱۲- تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر بازتاب امواج برخوردی به سازه

همانطور که در تاریخچه مطالعات پیشین بیان شد، نتایج تحقیق‌های پژوهشگران دیگر بر روی موج شکن‌های سکوی همگن دینامیکی نشان داد که با افزایش تراز سکو، پسرفت عرض سکو کمتر شده است. به‌طور کلی تفاوت عملکرد این دو سازه را می‌توان ناشی از تفاوت رفتاری این دو سازه با عملکرد استاتیکی و یا دینامیکی دانست. علاوه بر مطلب ذکر شده، پارامتر مورد بررسی در بحث پایداری هیدرولیکی نیز برای دو موج شکن متفاوت است، به‌طوری‌که در موج شکن نوع همگن عمدتاً از عرض فرسایش یافته سکو استفاده می‌شود در حالی- که در موج شکن نوع چندلایه، پارامتر آسیب مورد بحث است.

۴-۵- بررسی تأثیر عمق آب پای سازه بر پایداری سازه با

ثابت نگه داشتن حجم سنگ کلاس I

در تحقیق حاضر برای بررسی اثر عمق آب پای سازه بر پایداری موج- شکن سکوی چندلایه، چهار عمق آب مختلف (۰/۲۶، ۰/۲۸، ۰/۳ و ۰/۳۲ متر) بررسی شده است. همچنین آزمایش‌های اولیه‌ای برای کنترل عدم وجود سرریزی انجام شد. در آزمایش‌های مربوط به تغییر دیگر پارامترها، عمق آب پای سازه در کانال موج ثابت و برابر ۰/۲۸ متر در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که در بررسی اثر پارامتر عمق

اگر تراز آب به اندازه‌ای به سکوی موج شکن نزدیک شود ($h_{br} = 0.03 m$)، که سکو بتواند در برابر امواج برخوردی، کارایی مناسبی داشته باشد، در این صورت موج برخوردی به سازه در طول سکوی متخلخل حرکت کرده و انرژی بیشتری از موج را مستهلک می‌کند. این امر منجر به کاهش نیروهای وارد بر سازه‌ی موج شکن و افزایش پایداری آن می‌شود. از طرف دیگر افزایش تراز سکو در موج شکن سکوی چندلایه باعث می‌شود که سازه به‌مانند یک موج شکن توده سنگی سنتی عمل کرده و سکوی موج شکن که نقش زیادی را در مستهلک کردن انرژی دارد، عملکرد و کارایی مناسبی در استهلاک انرژی نداشته باشد، و در این حالت امواج برخوردی مستقیماً به شیب پایین سکوی سازه برخورد خواهند کرد و آسیب زیادی به سازه وارد می‌شود. بورخارت [۱۱] و مقیم و لیک اندرسن [۹] نتایج مشابهی را برای موج شکن سکوی به‌سختی شکل پذیر و نسبتاً شکل پذیر بیان کردند.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی برای دو حد بالا و پایین تراز سکو یعنی ترازهای ۰/۰۳ متر و ۰/۰۷ متر نشان می‌دهد، که در تراز سکوی کمتر، امواج در حین پروسه بالاروی، بر روی طول سکوی متخلخل و حتی شیب بالای سکو توزیع شده و منجر به استهلاک بیشتر انرژی موج برخوردی می‌شود. همچنین راوو و همکاران [۱۹] نتیجه گرفتند، اگر تراز سکو به تراز ایستابی نزدیک باشد، مقدار پایین روی کاهش می‌یابد. برعکس مطلب ذکر شده در حالت تراز سکوی بزرگتر، سکوی موج شکن شبیه یک مانع متخلخل در برابر امواج عمل کرده و عدم کارایی مناسب سکو، سبب کاهش میزان استهلاک انرژی موج خواهد شد. به‌منظور بررسی کمی تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر مقدار استهلاک انرژی موج برخوردی، نتایج بازتاب امواج برخوردی به سازه برای ترازهای متفاوت سکو در شکل ۱۲ نشان داده شده است. به‌طور معمول بازتاب موج با استفاده از ضریب بازتاب موج بصورت نسبتی از ارتفاع موج بازتابیده شده (H_r) به ارتفاع موج تابشی $C_r = \frac{H_r}{H_i}$ تعریف می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در اثر افزایش تراز سکو، بازتاب موج برخوردی افزایش یافته و در نتیجه استهلاک انرژی کمتری از موج برخوردی توسط سازه موج- شکن اتفاق می‌افتد. بنابراین مزیت دیگری که ایجاد یک سکو در موقعیتی بهینه نسبت به تراز آب ایجاد می‌کند، کاهش بازتاب امواج به مقدار قابل توجه است که خود مزیت مهمی محسوب می‌شود. زیرا برهم‌کنش امواج تابشی و بازتابی باعث بوجود آمدن محیطی متلاطم در جلوی سازه می‌شود که می‌تواند پهلوگیری شناورها را با مشکل مواجه کرده و باعث فرسایش، آب‌سستگی و در نهایت ناپایداری سازه شود.

$$\begin{cases} H_o = 1.31 - 2.6 \\ H_o \sqrt{T_o} = 5.74 - 13.56 \\ h_{br} / D_{n50I} = 1.11 - 2.59 \\ d / D_{n50I} = 9.63 - 11.86 \\ B / D_{n50I} = 7.4 \\ h_l / H_s = 1.36 - 2.68 \end{cases} \quad (3)$$

۵ - نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پایداری هیدرولیکی موج شکن سکویی چندلایه پایه ریزی شده است. برای رسیدن به این هدف، تأثیر پارامترهای مختلف مانند ارتفاع سنگ کلاس I، تراز سکو از سطح ایستابی و عمق آب پای سازه بر اساس مدل سازی آزمایشگاهی در کانال موج، تحت اثر امواج نامنظم بررسی شده و به بینشی مناسب از نحوه اثرگذاری این پارامترها و مکانیسم عملکردی آن‌ها بر پایداری موج شکن سکویی چندلایه منتج شده است. در نهایت در تحقیق حاضر، نتایج زیر به دست آمده اند:

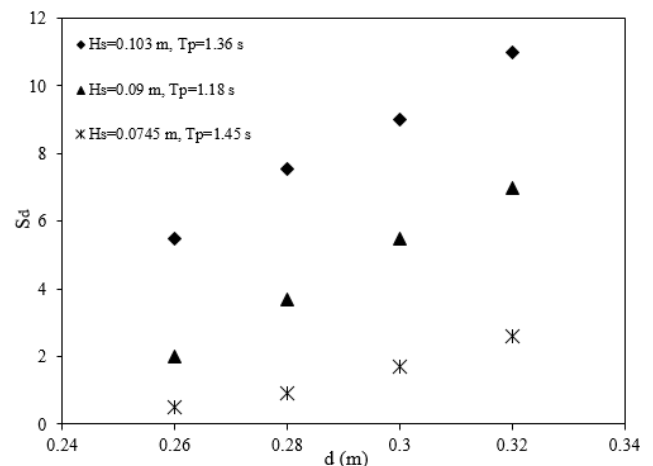
۱- در موج شکن سکویی چندلایه در قسمت سکوی موج شکن یعنی در محدوده تراز بالاروی و پایین روی موج، بزرگترین بلوک های سنگی (سنگ کلاس I) جایابی می شوند، که نقش اصلی را در مستهلک کردن انرژی امواج ایفا می کنند. از این رو، تغییر در ارتفاع سنگ کلاس I اثر مستقیمی بر عملکرد موج شکن داشته و برای اولین بار در این مطالعه، ارتفاع سنگ کلاس I به عنوان یک پارامتر جدید معرفی شده است.

۲- در مطالعه نحوه اثر پارامترهای تراز سکو از سطح ایستابی و یا عمق آب پای سازه بر پایداری موج شکن سکویی چندلایه، حجم سنگ دانه های کلاس I باید ثابت باقی بماند. برای این منظور ضروری است که ارتفاع سکوی سازه صرفاً با اضافه کردن و یا کم کردن سنگ های لایه های پایین تر مانند سنگ های کلاس II و III، که نقش کمتری در تحمل بارهای هیدرودینامیکی وارده دارند، انجام شود.

۳- در بررسی تأثیر ارتفاع کلاس I بر پایداری سازه مشاهده شد، با افزایش ارتفاع کلاس I در یک ترکیب ثابت موج، مقدار پارامتر آسیب روند کاهشی یافته و از جایی به بعد تغییرات ناچیزی در نتایج، برای ترکیب های مختلف امواج دیده شده است. از این رو می توان دریافت که بکار بردن بلوک های سنگی با تناژ بالا در بخش های پایینی لایه آرمور نه تنها نقشی در افزایش پایداری سازه ایفا نمی کند، بلکه منتج به هزینه زیادی نیز خواهد شد. نکته حاضر می تواند به عنوان مزیت اساسی موج شکن سکویی چندلایه نسبت به نوع توده سنگی سنتی بیان شود.

آب پای سازه، با تغییر این پارامتر، سایر پارامترها از جمله ارتفاع کلاس I و تراز سکو از سطح ایستابی ثابت بودند و صرفاً ارتفاع دو کلاس سنگ II و III در قسمت پایین سازه تغییر می کردند. شکل ۱۳ تأثیر پارامتر عمق آب پای سازه بر مقدار پارامتر آسیب سازه را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است عمق آب پای سازه پارامتر بسیار مهمی در بررسی پایداری سازه بوده به طوری که با افزایش عمق آب پای سازه، پارامتر آسیب سازه نیز افزایش می یابد. به گونه ای که با افزایش تقریباً ۲۳ درصدی عمق آب پای سازه در ترکیب موج $H_s = 0.09m, T_p = 1.18s$ ، مقدار سطح فرسایش - یافته آرمور به میزان ۲۵۰ درصد بیشتر شده است.

بر اساس تحقیق هیووس [۳۰]، یکی از پارامترهای مهم در بحث اندرکنش موج با سازه، مقدار شار تکانه بیشینه است که رابطه مستقیمی با نیروی وارده بر سازه دارد. زمانی که عمق آب پای سازه بیشتر می شود، مقدار شار انرژی موجود بیشتر شده و موج نیروی بزرگتری به سازه وارد می کند. افزایش نیروی وارده بر سازه موج شکن، باعث ایجاد نیروی محرک بزرگتر بر ذرات سنگی سازه شده و منجر به افزایش سطح فرسایش یافته سازه می شود. همچنین مشاهده های آزمایشگاهی حاضر نشان می دهند که تغییر عمق آب پای سازه، تأثیری اساسی بر میزان بالاروی 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 ایجاد آسیب بیشتر و در نتیجه کاهش پایداری سازه می شود.



شکل ۱۳- تأثیر عمق آب پای سازه بر سطح آسیب موج شکن سکویی چندلایه

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر بر اساس شرایط محیطی و سازه ای در نظر گرفته شده برای آزمایش های صورت گرفته در این تحقیق که بصورت رابطه ذیل ذکر شده، معتبر بوده و قابل کاربرد است.

10- Peak enhancement factor

۷- مراجع

- 1- Baird, W.F. and Hall, K.R., (1984), *The design of breakwaters using quarried stones*, Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering, Houston. Ch. 173.
- 2- Lykke Andersen, T., (2006), *Hydraulic Response of Rubble Mound Breakwaters. Scale Effects – Berm Breakwaters*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.
- 3- Sveinbjörnsson, P.I., (2008), *Stability of Icelandic type berm breakwaters*, Master Thesis, Department of Hydraulic Engineering, Delft University of Technology, Netherlands.
- 4- PIANC, (2003), *State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters*, International Navigation Association, Brussels, Belgium.
- 5- Sigurdarson, S., Smarason, O.B. and Viggooson, G., (2000), *Design considerations of berm breakwaters*, Proc. of the 27th International Conference on Coastal Engineering, Sidney, Australia, p.1610-1621.
- 6- Tørum, A., Kuhnén, F. and Menze, A., (2003), *On berm breakwaters. Stability, scour, overtopping*, Coastal engineering, Vol.49, p.209-238.
- 7- Lykke Andersen, T. and Burcharth, H.F., (2010), *A new formula for front slope recession of berm breakwaters*, Coastal engineering, Vol.57, p.359-374.
- 8- Sigurdarson, S. and van der Meer, J.W., (2011), *Front slope stability of the Icelandic-type berm breakwater*, Proceedings of Coastal Structures, ASCE, Yokohama, Japan, p.435-446.
- 9- Moghim, M.N. and Lykke Andersen, T., (2015), *Armor stability of hardly (or partly) reshaping berm breakwaters*, Coastal engineering, Vol.104, p.1-12.
- 10- Sigurdarson, S., Mocke, R., Primmer, M. and Gretarsson, S., (2011), *The Icelandic-type berm breakwater*, Proceedings of the 20th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 13th Australasian Port and Harbour Conference, Perth, Australia.
- 11- Burcharth, H.F., (2013), *On front slope stability of berm breakwaters*, Coastal Engineering, Vol.77, p.71-76.
- 12- Van der Meer, J.W. and Pilarczyk, K.W., (1986), *Dynamic stability of rock slopes and gravel beaches*, Proc. of the 20th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Taipei, Taiwan, p.1713-1726.
- 13- Sigurdarson, S. and van der Meer, J.W., (2012), *Wave overtopping at berm breakwaters in line with Eurotop*. Coastal Engineering Proceedings, ASCE, Spain.
- 14- Broderick, L.L., (1983), *Rip Rap Stability, a Progress Report*. Proceedings of the Coastal Structures, ASCE, p.320-330.

۴- در این تحقیق توصیه شد که ارتفاع کلاس I در موج‌شکن سکویی چندلایه باید حداقل تا تراز پایین تر از پارامتر ارزیابی عمق فرسایش سازه (h_f) ادامه یابد.

۵- با افزایش تراز سکو از سطح ایستایی در یک ترکیب ثابت موج، مقدار آسیب وارده به سازه بیشتر شده است. به عنوان مثال در ترکیب موج $H_s = 0.09m, T_p = 1.18s$ با ۴۰ درصد افزایش در مقدار تراز سکو، مقدار سطح آسیب وارد بر سازه به میزان ۶۷ درصد افزایش یافته است. اگر تراز آب به اندازه‌ای به سکوی موج‌شکن نزدیک شود که سکو بتواند در برابر امواج برخوردی اثرگذار واقع شود و کارایی مناسبی داشته باشد، تأثیر زیادی بر استهلاک انرژی دارد. از طرف دیگر به دلیل عملکرد استاتیکی موج‌شکن سکویی چندلایه، افزایش تراز سکو باعث می‌شود که سازه به‌مانند یک موج‌شکن توده‌سنگی سنتی عمل کرده و سکوی موج‌شکن کارایی چندانی در استهلاک انرژی موج نداشته باشد.

۶- نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که با افزایش عمق آب پای سازه، سطح آسیب سازه نیز افزایش می‌یابد. عمق آب پای سازه با مقدار شار انرژی موج رابطه مستقیم دارد، به طوری که با افزایش عمق آب پای سازه، شار انرژی موج و در نتیجه نیروی وارد بر سازه بیشتر شده و متعاقب آن سطح فرسایش یافته آرمور در موج‌شکن افزایش چشمگیری می‌یابد. به گونه‌ای که با افزایش تقریباً ۲۳ درصدی عمق آب پای سازه در ترکیب موج $H_s = 0.09m, T_p = 1.18s$ ، مقدار سطح فرسایش یافته آرمور به میزان ۲۵۰ درصد بیشتر شده است.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) و دانشگاه صنعتی اصفهان برای حمایت مالی انجام گرفته از این پروژه اعلام می‌دارند. همچنین از دانشگاه تربیت مدرس تهران به‌منظور فراهم آوردن تجهیزات لازم برای انجام آزمایش‌های مربوط به این تحقیق تقدیر می‌شود.

کلیدواژگان

- 1- Mass armored
- 2- Icelandic
- 3- Fully reshaping
- 4- Partly reshaping
- 5- Hardly reshaping
- 6- Hardly reshaping Icelandic berm breakwater
- 7- Partly reshaping Icelandic berm breakwater
- 8- Partly reshaping mass-armored berm breakwater
- 9- Fully reshaping mass-armored berm breakwater

- 23- Shekari, M.R. and Shafieefar, M., (2013), *An experimental study on the reshaping of berm breakwaters under irregular wave attacks*, Applied Ocean Research, Vol.42, p.16–23.
- 24- Thomsen, J.B., Røge, M.S., Christensen, N.F., Lykke Andersen, T. and Van der Meer, J.W., (2014), *Stability of hardly reshaping berm breakwaters exposed to long waves*, Coastal Engineering Proceedings, p.65.
- 25- Van der Meer, J.W. and Sigurdarson, S., (2016), *Design and Construction of Berm Breakwaters*, World Scientific Publishing Company.
- 26- Tørum, A., Arntsen, Ø.A., Mathiesen, M. and Bjørndal, S., (2003), *Sirevåg berm breakwater, Comparison Between Physical Model and Prototype Behavior*, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, Norway.
- 27- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., (1980), *The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method*. Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia, p.154-172.
- 28- Dai, Y.B. and Kamel, A.M., (1969), *Scale Effect Tests for Rubble Mound Breakwaters*. U. S. Army Engineer Waterway Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, Research Report H-69-2.
- 29- Jensen, O.J. and Klinting, P., (1983), *Evaluation of scale effects in hydraulic models by analysis of laminar and turbulent flow*. Coastal Engineering, Vol.7, p.319–329.
- 30- Hughes, S.A., (2004), *Wave momentum flux parameter: A Descriptor for Nearshore Waves*. Coastal. Engineering. Vol.51, p.1067-1084.
- 15- Hudson, R.Y., (1959), *Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters*, Journal of the Waterways and Harbors Division of ASCE, p.93-121.
- 16- Van Der Meer, J.W., (1988), *Rock slopes and gravel beaches under wave attack*. PhD Thesis, Delft University of Technology, Also: Delft Hydraulics Communication No. 396.
- 17- Juhl, J. and Sloth, P., (1998), *Berm breakwaters. Influence of stone gradation, permeability and armouring*, Proc. of the 26th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, Copenhagen, Denmark, p.1394 – 1406.
- 18- Sigurdarson, S., van der Meer, J.W., Burcharth, H.F. and Sørensen, J.D., (2007), *Optimum safety levels and design rules for the Icelandic-type berm breakwaters*, Proceedings of the 5th International Conference of Coastal Structures, Venice, Italy, 2–4 July. World Scientific.
- 19- Rao, S., Subrahmanya, K., Rao, B.K. and Chandramohan, V.R., (2008), *Stability aspects of nonreshaped berm breakwaters with reduced armor weight*, Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering, Vol.134, p.81-87.
- 20- Sigurdarson, S., van der Meer, J.W., Tørum, A. and Tomasicchio, R., (2008), *Berm Recession of the Icelandic-type Berm Breakwater*, ASCE, Proc. ICCE, Hamburg.
- 21- Moghim, M.N., Shafieefar, M., Torum, A. and Chegini, V., (2011). *A new formula for the sea state and structural parameters influencing the stability of homogeneous reshaping berm breakwaters*. Coastal Engineering, Vol.58, p.706–721.
- 22- Tørum, A., Moghim, M.N., Westeng, K., Hidayati, N. and Arntsen, Ø.A., (2012). *On Berm Breakwaters: Recession, Crown Wall Wave Forces, Reliability*, Coastal. Engineering, Vol.60, p.299–318.