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

مجید احسانی[۱]، محمدنوید مقیم[۲*]، مهدی شفیعی‌فر[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

اطلاعات مقاله

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

چکیده

یکی از مهمترین مسائلی که در طراحی موج‌شکن‌ها مورد توجه است، ارزیابی پایداری سازه در برابر امواج برخوردی است. از این‌رو 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 جوانسواپ، 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 منتج 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.

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

Majid Ehsani[1], Mohammad Navid Moghim[2*], Mehdi Shafieefar[3]

[1] Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology; majid.ehsani@cv.iut.ac.ir
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology; moghim@cc.iut.ac.ir
[3]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%.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

۱ - مقدمه

نخستین‌بار در اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی زمانی‌که 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 ذوزنقه‌ای شکل موج‌شکن توده‌سنگی، که شبیه به یک سکو بود در سمت رو به دریای موج‌شکن، باقی بماند. در واقع موج‌شکن سکویی 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 سکویی 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 سکویی از لحاظ طراحی و اجرا به دو نوع موج‌شکن سکویی همگن و موج‌شکن سکویی چندلایه تقسیم‌بندی می‌شوند. موج‌شکن‌های سکویی چندلایه به عنوان موج‌شکن‌های ایسلندی معروف هستند، به‌طوری‌که 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 سکویی ایسلندی، موج-شکن سکویی پایدار استاتیکی چندلایه است که فقط مقدار کمی تغییر شکل در آن‌ها مجاز است. این نوع از موج‌شکن‌ها توسط کلاس-های مختلف سنگی، براساس 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 بیشترین اثر را دارد، قرار می‌گیرد. ازآنجایی‌که سنگ‌های کلاس I با ابعاد بزرگتر به‌صورت گزینشی جایابی 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 جایی‌که تأثیر موج برخوردی کمتر است، قرار داده می‌شوند. عموماً سنگ‌های کلاس‌های کوچکتر از کلاس I به‌صورت تقریبی از همان ابعاد سنگ‌های به‌کار رفته در موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر همگن هستند [۲].

هنگامی‌که معدن قرضه، نسبتاً نزدیک به محل ساخت یک پروژه موج‌شکن وجود دارد، گزینه موج‌شکن سکویی چندلایه به‌دلیل استفاده بهینه و حداکثری از معدن قرضه انتخابی، از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه 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 سکویی چندلایه اقتصادی‌تر می‌شود [۴]. یکی دیگر از مزیت‌های موج‌شکن‌های سکویی چندلایه این است که بر روی پی با خاک نسبتاً ضعیف نیز قابل ساخت بوده و در بسترهایی با احتمال نشست‌هایی بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده مناسب هستند [۵].

مزیت‌های موج‌شکن سکویی چندلایه نسبت به موج‌شکن توده‌سنگی سنتی و موج‌شکن سکویی همگن شکل‌پذیر بوسیله محققان مختلفی مانند تورام و همکاران [۶]، اسوینبرنسن [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 ازطرفی در کشور ما به‌خصوص 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 این‌رو استفاده از موج‌شکن‌های سکویی چندلایه با کاهش حجم مصالح سنگی با تناژ بالا، می‌توانند گزینه مناسب جایگزین برای سازه‌های توده‌سنگی سنتی باشند. از طرف دیگر مقایسه موج‌شکن سکویی چندلایه استاتیکی با موج‌شکن سکویی همگن شکل‌پذیر نشان می‌دهد که موج‌شکن چندلایه دارای کلاس‌های مختلف سنگی است، به‌طوری‌که دانه‌بندی هر کلاس سنگی به‌صورت جداگانه و کم عرض انتخاب می‌شود. در موج‌شکن سکویی همگن قابل تغییر شکل، به‌دلیل 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 به‌وجود می‌آورد. نفوذپذیری بیشتر موج‌شکن سکویی چندلایه، سبب افزایش جذب انرژی موج برخوردی، افزایش پایداری سازه و همچنین کاهش سرریزی از روی سازه می‌شود [۳ و ۱۰].

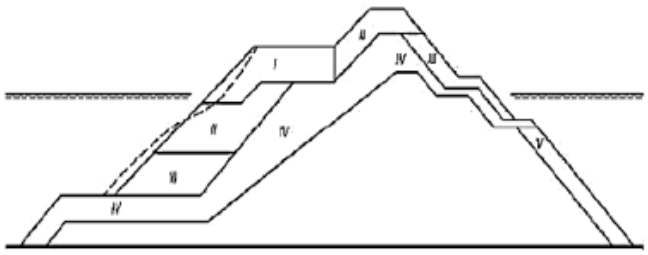
نکته قابل توجه اینکه تجربه‌های موجود در مورد سازه‌های شکل‌پذیر نشان داده‌اند، زمانی‌که سنگ تحت اثر تغییر شکل شروع به بالا و پایین رفتن روی شیب سازه می‌کند، سنگ‌های در حال حرکت با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

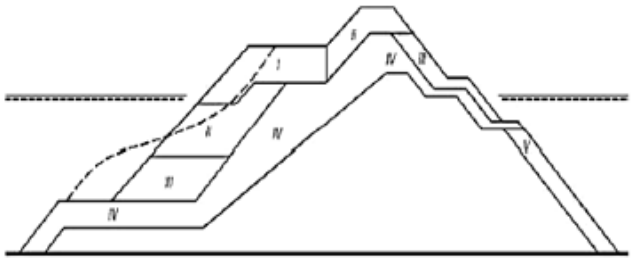
هم برخورد کرده و فرسایش و یا شکست سنگ امکان‌پذیر خواهد بود. در صورت فرسایش و یا شکست سنگ، قطر متوسط سنگ کاهش پیدا کرده و بعضاً منجر به کاهش پایداری سازه می‌شود [۱۱]. برخلاف موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، در موج‌شکن سکویی چندلایه، سنگ‌ها اجازه حرکت کمتری را داشته و در نتیجه احتمال شکست سنگ کمتر می‌شود. در 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 پیلارزیک تعریف شده است [۱۲]. پیانک براساس شکل‌پذیری سازه به دسته‌بندی موج‌شکن‌های سکویی پرداخت [۴]. اخیراً طبقه‌بندی جدیدی توسط سیگوردار سون و فن‌درمیر برای موج شکن 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[۱]) و موج‌شکن ایسلندی با چند کلاس سنگ (IC[۲]) تفاوت قائل شده و سپس رفتار این دو نوع موج‌شکن مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌دلیل آنکه ابعاد سنگ‌های استفاده شده در موج شکن نوع همگن کوچکتر از سنگ‌های مورد استفاده در موج‌شکن نوع ایسلندی است، موج‌شکن نوع همگن به سازه کاملاً شکل‌پذیر (FR[۳]) و نسبتاً شکل‌پذیر (PR[۴]) و موج‌شکن نوع ایسلندی به سازه به‌سختی شکل‌پذیر (HR[۵]) 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 (HR-IC[۶])، موج‌شکن سکویی ایسلندی نسبتاً شکل‌پذیر (PR-IC[۷])، موج شکن سکویی همگن نسبتاً شکل‌پذیر (PR- MA[۸]) و موج‌شکن سکویی همگن کاملاً شکل‌پذیر (FR- MA[۹]) تقسیم شده است (شکل ۱) [۱۳].

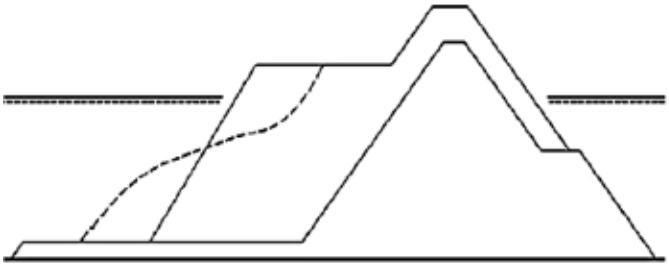
جدول ۱، دامنه تغییرات پارامترهای بی‌بعد شامل عدد پایداری $(H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}})$، پارامتر آسیب $(S_d = \frac{A_e}{D_{n50}^2})$ و عرض پسرفت بی‌بعد شده سکو $(\frac{\mathrm{Re}c}{D_{n50}})$ را برای طبقه‌بندی انواع موج شکن‌های سکویی برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله بیان می‌کند. در این جدول H_s ارتفاع مشخصه موج، A_e مساحت فرسایش یافته، $(\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)$ چگالی نسبی سنگ لایه آرمور، ρ_s چگالی سنگ‌دانه‌ها، ρ_w چگالی آب، D_{n50} قطر متوسط سنگ لایه آرمور و $\mathrm{Re}c$ پسرفت عرض سکو است. 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].



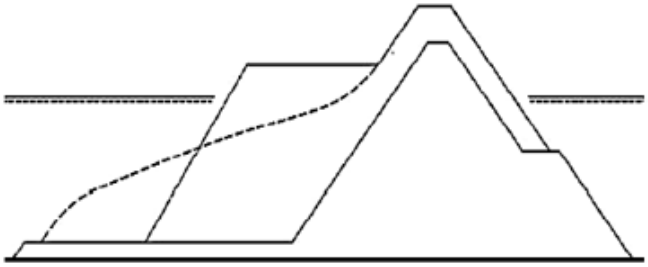
شکل ۱- الف- موج‌شکن سکویی ایسلندی به‌سختی شکل‌پذیر



شکل ۱- ب- موج‌شکن سکویی ایسلندی نسبتاً شکل‌پذیر



شکل ۱- ج- موج‌شکن سکویی همگن نسبتاً شکل‌پذیر



شکل ۱-د- موج‌شکن سکویی همگن کاملاً شکل‌پذیر

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

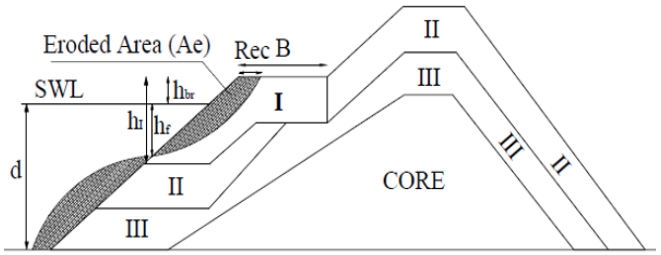
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

جدول ۱- طبقه‌بندی موج‌شکن سکویی برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله [۱۳]

نوع موج‌شکن	نشان اختصاری	$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}}$	S_d	$\frac{\mathrm{Re}\,c}{D_{n50}}$
موج‌شکن سکویی ایسلندی به‌سختی شکل‌پذیر	HR-IC	۱/۷-۲	۲-۸	۰/۵-۲
موج‌شکن سکویی ایسلندی نسبتاً شکل‌پذیر	PR-IC	۲-۲/۵	۱۰-۲۰	۱-۵
موج‌شکن سکویی همگن نسبتاً شکل‌پذیر	PR-MA	۲-۲/۵	۱۰-۲۰	۱-۵
موج‌شکن سکویی همگن کاملاً شکل‌پذیر	FR-MA	۲/۵-۳	---------	۳-۱۰

در مطالعه پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های سکویی، بدست آوردن روشی مناسب برای ارزیابی پایداری سازه، بسیار مهم قلمداد می‌شود. یکی از مهمترین پارامترهای حاکم در طراحی و اندازه‌گیری تغییر شکل موج‌شکن‌های سکویی همگن، مقدار فرسایش عرض سکوی آن ($\mathrm{Re}\,c$)است که درصورتی‌که این مقدار بزرگتر از عرض سکوی موج شکن ($\mathrm{Re}\,c > B$) باشد، ناپایداری و خرابی موج‌شکن سکویی اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر با توجه به عملکرد استاتیکی موج شکن‌های سکویی 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 موج‌شکن‌های سکویی چندلایه مطرح می‌شود [۱۴]. پارامتر مهم دیگر در توصیف نیم‌رخ تغییر شکل یافته در موج‌شکن‌های سکویی، فاصله نقطه تقاطع نیم‌رخ تغییر شکل یافته و نیم‌رخ اولیه نسبت به تراز سطح ایستابی (h_f) است [۶]. این پارامتر در موج‌شکن‌های سکویی 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 این‌صورت تغییر شکل به کلاس II خواهد رسید که سبب تشدید در مقدار سطح فرسایش‌یافته در کلاس I خواهد شد. بطور خلاصه می‌توان بیان داشت که بدلیل عملکرد استاتیکی موج‌شکن‌های سکویی 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 فرسایش‌یافته است. بنابراین استفاده از پارامتر آسیب که با سطح فرسایش سازه در ارتباط است، به‌عنوان پارامتر مناسب برای ارزیابی پایداری موج‌شکن‌های سکویی چندلایه، تعریف می‌شود [۹]. شکل ۲ پارامترهای مطرح در زمینه پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های سکویی را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های توده‌سنگی انجام شده است، که عمده آن بر روی سازه‌های شکل‌پذیر بوده است. هادسون [۱۵]، فن‌درمیر [۱۶]، جوول و اسلوس [۱۷]، تورام و همکاران [۶]، سیگوردارسون و همکاران [۱۸]، راوو و همکاران [۱۹]، اسوینبرنسن [۳]، سیگوردارسون و همکاران [۲۰]، لیک اندرسن و بورخارت [۷]، مقیم و همکاران [۲۱]، سیگوردارسون و فن‌درمیر [۸]، تورام و همکاران [۲۲]، شکاری و شفیعی‌فر [۲۳]، بورخارت [۱۲]، تامسِن و همکاران [۲۴]، مقیم و لیک اندرسن [۹] و فن‌درمیر و سیگوردارسون [۲۵] بر روی پایداری موج‌شکن‌های 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 موج‌شکن سکویی چندلایه

پژوهشگران مختلفی مانند لیک اندرسن و بورخارت [۷]، مقیم و همکاران [۲۱] و شکاری و شفیعی‌فر [۲۳]، مطالعاتی به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای محیطی و سازه‌ای مرتبط با سکوی سازه شامل تراز سکو از سطح ایستابی و عمق آب پای سازه بر روی موج-شکن‌های سکویی همگن شکل‌پذیر انجام دادند. اسوینبرنسن [۳] نیز نحوه‌ی اثرگذاری پارامتر تراز سکو از سطح ایستابی را بر روی موج-شکن سکویی چندلایه بررسی کرد. در این پژوهش به‌منظور بررسی اثر تغییر تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری موج‌شکن، تراز سطح ایستابی تغییر می‌کرد و در این‌صورت علاوه بر تغییر تراز سکو از سطح ایستابی، عمق آب نیز دچار تغییر می‌شد که این امر منجر به تغییر دو پارامتر به‌صورت همزمان می‌شود. مقیم و همکاران [۲۱] با بررسی اثر تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری موج‌شکن سکویی همگن بیان کردند که این پارامتر، عامل اثرگذاری در بررسی پایداری و مقدار پسرفت سکو است، به‌طوری‌که 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

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 ایستابی ثابت باقی بماند. بورخارت [۱۲]، فن‌درمیر و سیگوردارسون [۲۵] به اهمیت پارامترهای تراز سکو از سطح ایستابی 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 ایستابی و عمق آب پای سازه بر روی پایداری موج‌شکن سکویی چندلایه بررسی می‌شوند. همچنین پارامتر ارتفاع سنگ کلاس I به‌عنوان 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 جابجایی ۱ میلی‌متر است. در آزمایش‌های حاضر از موج نامنظم با طیف انرژی جوانسواپ با ضریب γ ۱۰ برابر ۳/۳، 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 موج شکن به غیر از لایه هسته، از سه کلاس سنگ استفاده شده است. ارتفاع کل مقطع موج‌شکن مورد نظر ۰/۴۳ متر، شیب لایه آرمور ۱:۱/۵، شیب لایه هسته ۱:۲ و ارتفاع قسمت تاج هسته از کف فلوم برابر با ۰/۳ 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 موج شکن طراحی شده و اجرا شده در کانال موج را نشان می‌دهد.

از آنجایی‌که هدف از انجام آزمایش‌ها، بررسی پایداری هیدرولیکی موج شکن سکویی چندلایه است، باید موج شکنی طراحی شود که در بحرانی‌ترین حالت به‌صورت غیرسرریزشونده عمل کند. در تمامی آزمایش‌ها تراز تاج در سازه‌ی طراحی شده در فاصله ۰/۱ متری از 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 کلیه‌ی مقاطع مورد بررسی، تراز نقطه تقاطع پروفیل اولیه و تغییر شکل‌یافته باید بالاتر از انتهای سنگ کلاس I جایابی شود. اسوینبرنسن [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 اسوینبرنسن [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 ایستابی 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:

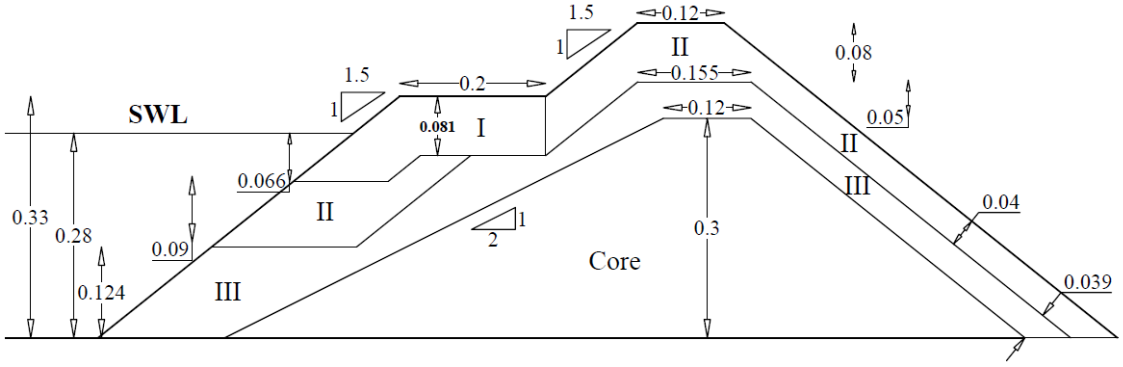
$$X_{12}=L/10\ ;\ L/6\le X_{13}\le L/3\ ;\ X_{13}\neq L/5, L/10 \qquad (۱)$$

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.

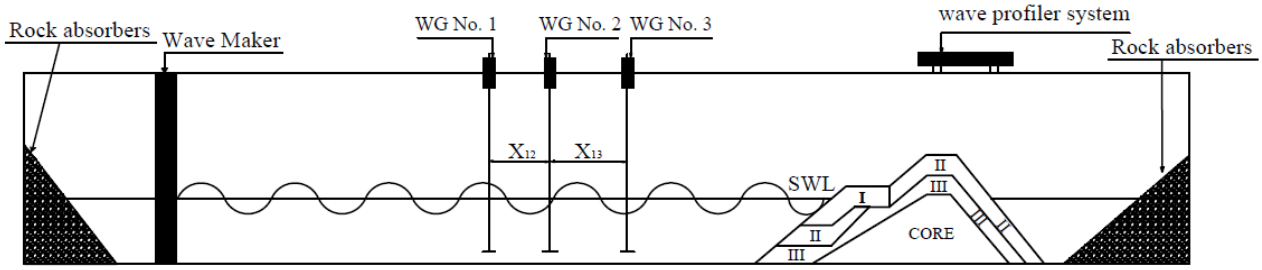
برای نصب تجهیزات اندازه‌گیری نیمرخ سازه بر روی فلوم، یک جفت ریل ثابت در امتداد طولی و بالای آن قرار گرفت. جهت به‌منظورنیمرخ‌برداری سازه، از متر لیزری نصب شده بر روی ارابه‌ای با قابلیت حرکت در راستای طول و عرض فلوم استفاده شد. برای اطمینان از ساخت دقیق هندسه اولیه سازه و همچنین برداشت پروفیل سازه بعد از اصابت امواج، برداشت نیمرخ در پنج مقطع جداگانه و با حرکت روی ریل فلوم برای فواصل ۰/۰۲ متری انجام شده است. مقطع میانی در وسط فلوم و مقاطع کناری با فاصله ۰/۲ متر از یکدیگر قرار دارند. همچنین در انتخاب مقاطع، فاصله آخرین مقطع کناری تا دیواره فلوم برای کنترل اثر دیواره بر نتایج آزمایش‌ها، مقدار ۰/۱ متر لحاظ شده است. در نهایت میانگین نیمرخ‌های پنج مقطع به‌عنوان نیمرخ اولیه و تغییر شکل یافته در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح تشکیل دهنده کلاس‌های مختلف سنگی موج‌شکن سکویی چندلایه شامل قطر اسمی، چگالی و عرض منحنی دانه‌بندی در جدول ۲ ارائه شـــده اســـت. همچنین روند اجرای مراحل ساخت مدل آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شـــده اســـت. به‌منظور تفکیک بهتر مصـــالح در کلاس‌های مختلف ســـنگی و مشـــاهده بهتر مکانیزم حرکتی آن ها در حین انجام آزمایش‌ها مصالح کلاس‌های مختلف با اسپری رنگ‌آمیزی شدند.



شکل ۳- مقطع اولیه موج‌شکن سکویی 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 موج‌شکن سکویی چندلایه اجراشده

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	۱/۲
جرم مخصوص (Kg/m^3)	۲۶۵۰	۲۶۵۰	۲۶۵۰	۲۶۵۰



۵- الف- اجرای هسته موج‌شکن سکویی چندلایه



۵- ب- اجرای کلاس III موج‌شکن سکویی چندلایه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]



۵- ج- اجرای کلاس II موج‌شکن سکویی چندلایه



۵- د- اجرای کامل موج‌شکن سکویی چندلایه

شکل ۵- تصاویری از اجرای مدل موج‌شکن سکویی چندلایه در آزمایشگاه

۳ – گستره پارامترهای بابعد و بی‌بعد

آزمایش‌های حاضر در این پژوهش برای شرایط مختلف محیطی مانند ارتفاع موج، پریود موج و عمق آب پای سازه و همچنین پارامترهای هندسی متفاوت از قبیل تراز سکو از سطح ایستابی و ارتفاع سنگ کلاس I انجام شده است. در جداول ۳ و ۴ محدوده تغییرات پارامترهای بابعد و بی‌بعد تحقیق حاضر، ارائه شده است. به منظور پوشش مناسب محدوده‌های تغییر برای پارامترهای بی‌بعد، قیدهایی مانند محدودیت‌های آزمایشگاهی، عدد رینولدز، تیزی موج (S_{op})، عدد شکست موج (ξ)و عدد پایداری (H_o)در نظر گرفته شدند. موج‌شکن طراحی شده از نظر رفتار سازه‌ای، گستره به‌سختی 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 فن‌درمیر [۱۶] $0.015 < S_{op} < 0.07$ را پوشش داده است. همچنین عدد شکست موج در گستره $\xi = 1.97 - 6.37$ قرار گرفته به‌طوری‌که ناحیه شکست چرخان تا شکست لغزان را پوشش می‌دهد.

در مفاهیم مدل‌سازی دریایی، نیروی غالب در موج‌شکن‌های 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 موج‌شکن‌های توده‌سنگی از عدد رینولدز بصورت رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$R_e = \frac{\sqrt{gH_s}\,D_{n50}}{\upsilon} \qquad (۲)$$

که در آن عبارت $\sqrt{gH_s}$ معرف سرعت مشخصه، D_{n50} طول مشخصه و υ لزجت سینماتیکی است.

دائی و کَمِل [۲۸]، جِنسِن و کلینتینگ [۲۹]، فن‌درمیر [۱۶] از جمله محققانی هستند که بر روی اثر مقیاس مطالعاتی انجام دادند. براساس توصیه فن‌درمیر [۱۶] برای به حداقل رساندن اثر لزجت، عدد رینولدز باید در محدوده $2\times10^4 \le \mathrm{Re} \le 4\times10^5$ باشد. کمترین مقدار عدد رینولدز در مجموعه آزمایش‌های این پژوهش 2.05×10^4 بوده و از این‌رو در تحقیق حاضر اثر مقیاس ناشی از لزجت قابل صرف نظر کردن است.

۴ – نتایج و بحث

در بخش حاضر، نخست تأثیر پارامترهای عمق آب پای سازه و تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری موج‌شکن سکویی چندلایه بررسی می‌شود. در بررسی تأثیر هریک از این پارامترها بر پایداری، به‌منظور ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، تراز ارتفاعی سکو تغییر داده شد. با تحلیل نتایج بدست آمده، پارامتر ارتفاع و یا حجم سنگ کلاس I به‌عنوان 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 اثرگذاری عمق آب و تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری، آزمایش‌ها مجدد انجام شد که در ادامه به بیان این نتایج پرداخته خواهد شد.

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
پریود 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 ایستابی	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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

جدول ۴- محدوده تغییرات بی‌بعد

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}	۰/۰۱۶ تا ۰/۰۶۵
ξ	۱/۹۷ تا ۶/۳۷
$R_e(\times 10^4)$	۲/۰۵ تا ۲/۷۴

۴- ۱- بررسی تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری سازه

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

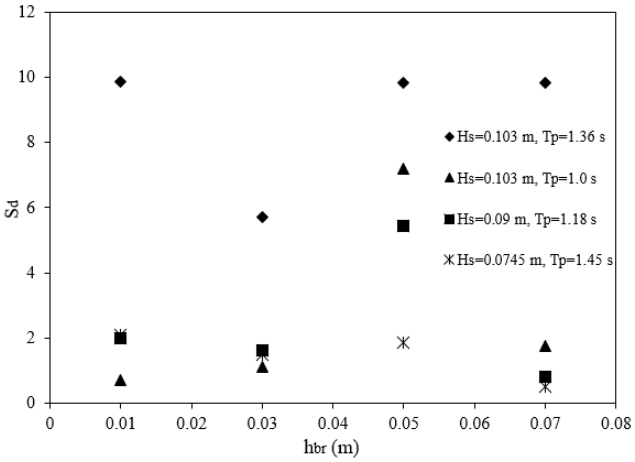
برای بررسی نحوه اثرگذاری پارامتر تراز سکوی موج‌شکن سکویی چندلایه بر سطح آسیب سازه تحت اثر برخورد ۳۰۰۰ موج در ترکیب‌های مختلف ارتفاع و پریود موج، ۱۶ آزمایش انجام شدند. آزمایش‌ها برای چهار تراز سکوی متفاوت (۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۷ متر) و با چهار ترکیب ارتفاع موج و پریود موج طراحی شدند. در انجام آزمایش‌های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

از آنجایی‌که برای انجام آزمایش در ترازهای مختلف سکو، به حجم سنگ‌های کلاس I اضافه و یا از آن کم شده است، حجم سنگ‌های کلاس I با تغییر تراز سکو، دستخوش تغییر شده و به‌نظر می‌رسد که پارامتر مؤثری متناسب با سنگ‌های کلاس I بصورت هم‌زمان با تغییر تراز سکو، تغییر کرده و بر نتایج اثرگذار شده است. درواقع عدم وجود یک روند مشخص در بررسی اثر تراز سکو بر پارامتر آسیب سازه برای یک ترکیب ارتفاع و پریود ثابت به این دلیل است که در برخی از آزمایش‌ها، اثر تراز سکو غالب بوده و در برخی دیگر اثر پارامتری متناسب با سنگ کلاس I دارای تأثیر بیشتری است. به‌عنوان 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 به‌دلیل استهلاک انرژی بیشتر، نسبت به اثر افزایش تراز سکو از سطح ایستابی بر سطح آسیب غالب بوده و منجر به آسیب کمتری در سازه موج شکن شده است. به‌عنوان مثالی دیگر، برای ترکیب موج $H_s = 0.103m, T_p = 1.36s$ در آزمایش تراز سکو ۰/۰۳ متر، کمینه مقدار آسیب وارد بر سازه رخ داده است. در این حالت علی‌رغم کاهش حجم سنگ‌های کلاس I، به‌دلیل کاهش تراز سکو از سطح ایستابی، امواج برخوردی به سازه بر روی طول بیشتری از سکو توزیع شده و انرژی بیشتری از موج برخوردی مستهلک شده است و به پایداری سازه کمک می شود. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان کرد که استفاده از روش متداول در موج‌شکن‌های سکویی همگن در بررسی اثر تراز سکو از سطح ایستابی، به‌طور صحیح نحوه اثرگذاری تراز سکو بر پایداری موج‌شکن 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 سکو با تراز ۰/۰۱ متر، سکوی سازه عملکرد مناسبی در استهلاک انرژی موج برخوردی از خود نشان نداده است. از آنجایی‌که سکوی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

موج شکن نقش تعیین‌کننده‌ای در ا ستهلاک انرژی امواج دارد، عدم دخالت آن در استهلاک انرژی می‌تواند باعث آ سیب 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 ســازه نزدیک شــده، اما ســکوی موج‌شــکن 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 و ضوح قابل رؤیت ا ست) 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 ایستابی بر روی پارامتر آسیب موج-شکن سکویی چندلایه برای ترکیب‌های متفاوت امواج

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، به‌طوری‌که تراز سکو از سطح ایستابی ثابت باقی بماند.

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



۷- الف- نزدیک شدن موج به سازه



۷- ب- تأثیرگذاری کم سکو در استهلاک انرژی موج برخوردی

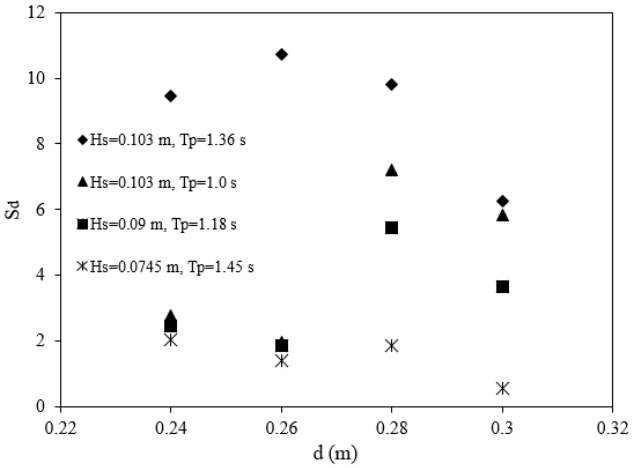


۷- ج- برخورد موج با انرژی زیاد به شیب بالای سازه

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

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. درمجموع 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 موج‌شکن سکویی چندلایه پرداخته خواهد شد.



شکل ۸- تأثیر عمق آب پای سازه بر روی پارامتر آسیب موج‌شکن 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 ایستابی و یا عمق آب در موج‌شکن 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 ایستابی و یا عمق آب پای سازه بر پایداری موج‌شکن سکویی چندلایه، به‌منظور ثابت نگه‌داشتن حجم 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.

ازآنجایی‌که در موج‌شکن سکویی چندلایه در قسمت فوقانی سکوی موج‌شکن، بزرگترین سنگ‌دانه‌ها (سنگ کلاس I) قرار دارند، این سنگ‌ها وظیفه اصلی مقابله در برابر نیروهای وارده بر موج‌شکن را برعهده دارند. باتوجه به این موضوع به‌نظر می‌رسد که تغییر در ارتفاع سنگ کلاس I اثر مستقیمی بر عملکرد موج‌شکن 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 موج‌شکن 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 پریود 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 ایستابی، 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 به عنوان یک پارامتر اثرگذار در بررسی پایداری موج‌شکن سکویی چندلایه قابل تعریف است. با افزایش ارتفاع کلاس I، محیط متخلخل بزرگتری در ناحیه زیر تراز ایستابی 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.

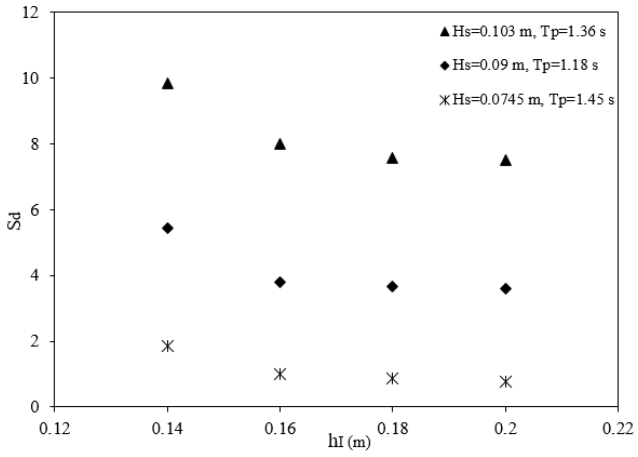
همانطور که در شکل ۹ مشخص است برای هر کدام از ترکیب‌های امواج، از مقدار مشخصی از ارتفاع کلاس I به بعد، تغییرات ناچیزی در مقدار پارامتر آسیب اتفاق می‌افتد. با توجه به این مسئله می‌توان به این نکته پی برد که بیشتر کردن حجم سنگ‌دانه‌های بزرگ در کلاس I، از جایی به‌بعد تأثیر چندانی در پایداری سازه نداشته و صرفاً هزینه اجرایی بیشتری را برای یک پروژه به همراه خواهد داشت. نکته حاضر، امتیازی ویژه برای موج‌شکن سکویی چندلایه نسبت به موج‌شکن توده‌سنگی سنتی و موج‌شکن 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

در بخش‌های پایینی لایه آرمور نقش مثمرثمری در ایجاد مقاومت برای سازه در برابر امواج برخوردی ایفا نمی‌کند.

در شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین حجم بزرگترین سنگ‌دانه بکار رفته در کلاس I موج‌شکن سکویی چندلایه و سنگ بکار رفته در لایه آرمور موج‌شکن توده‌سنگی سنتی را نشان می‌دهد. اگر به‌جای استفاده از موج‌شکن توده‌سنگی سنتی که لایه آرمور در آن با رنگ آبی مشخص شده است، از موج‌شکن سکویی چندلایه با بزرگترین سنگ‌دانه در کلاس I (با رنگ قرمز) استفاده شود، در این حالت حجم استفاده از بزرگترین کلاس سنگ (کلاس I)، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. از آنجایی‌که استفاده از بزرگترین کلاس سنگ هزینه بالایی دارد، در کل طراحی موج‌شکن چندلایه می‌تواند اقتصادی‌تر باشد [۲۵]. نکته حاضر، مخصوصاً در کشورهایی که معادن با بلوک‌دهی مناسب در آن‌ها کم است (مانند مناطق جنوبی ایران)، بسیار کاربردی بوده و از این‌رو ساخت این نوع موج‌شکن‌ها، با کاهش حجم مصالح سنگی با تناژ بالا، می‌توانند یکی از بهترین گزینه‌های جایگزین برای سازه‌های توده‌سنگی با عملکرد استاتیکی باشند.

همچنین در مطالعه آزمایشگاهی حاضر مشاهده شد، درصورتی‌که تراز پایین‌روی موج به سنگ کلاس II بر سد، آسیب وارد بر سازه افزایش یافته و پایداری سازه بطور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. به عنوان توصیه می‌توان بیان کرد که ارتفاع کلاس I در موج‌شکن سکویی چندلایه حداقل باید تا پایین‌تر از نقطه تقاطع نیم‌رخ اولیه و نیم‌رخ تغییر شکل‌یافته ادامه پیدا کند. درواقع در صورتی‌که سنگ‌های لایه‌های زیرین در معرض امواج قرار گیرند، حمایت از سنگ‌های کلاس I برداشته شده و مقاومت سازه بسیار کاهش پیدا می‌کند. به‌عنوان یک مثال اجرایی می‌توان به موج‌شکن سکویی چندلایه نسبتاً شکل‌پذیر Sirevåg در کشور نروژ اشاره کرد، که در آن سنگ‌های کلاس I در فاصله ۱- متری از تراز ایستابی یعنی بالاتر از تراز نقطه تقاطع نیم‌رخ اولیه و نیم‌رخ تغییر شکل‌یافته خاتمه یافته است [۲۶]. تورام و همکاران [۲۶] و بورخارت [۱۱] نکته اشاره شده را به‌عنوان یک نقطه ضعف عمده در طراحی موج‌شکن Sirevåg معرفی کردند.

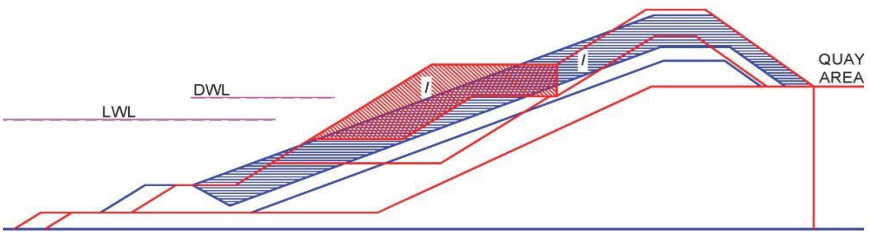


شکل ۹- تأثیر ارتفاع کلاس I بر پارامتر آسیب موج‌شکن سکویی چندلایه

۴- ۴- بررسی تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری سازه با ثابت نگه داشتن حجم سنگ کلاس I

به‌منظور مطالعه پارامتر تراز سکو از سطح ایستابی موج‌شکن سکویی چندلایه بر سطح آسیب سازه، تعداد ۱۲ آزمایش در نظر گرفته شدند. در این سری از آزمایش‌ها، 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 آزمایش‌های 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، به‌طوری که با افزایش تراز سکو در یک ترکیب موج ثابت، مقدار سطح آسیب سازه بیشتر می شود. به‌منظور مقایسه کمی و میزان اثرگذاری این پارامتر می‌توان 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.

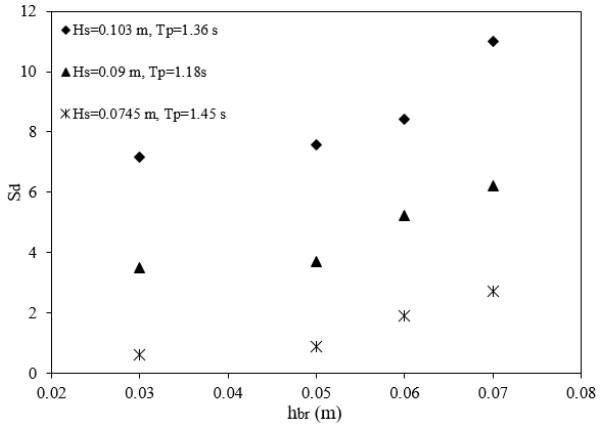


شکل ۱۰- مقایسه بزرگترین کلاس سنگ لایه آرمور در موج‌شکن سکویی چند لایه و لایه آرمور موج‌شکن

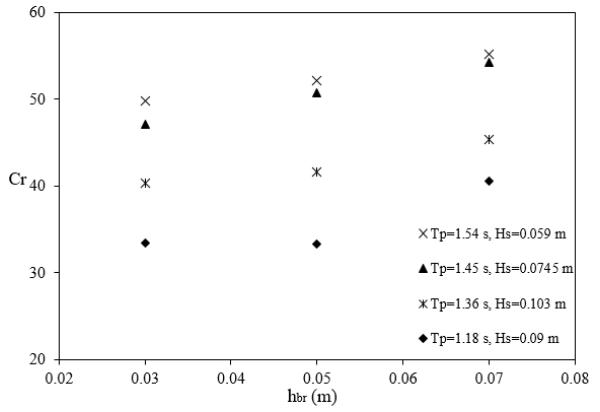
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

اگر تراز آب به اندازه‌ای به سکوی موج‌شکن نزد یک شود $(h_{br} = 0.03m)$، 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 موج‌شکن و افزایش پایداری آن می‌شود. از طرف دیگر افزایش تراز سکو در موج‌شکن سکویی چندلایه باعث می‌شود که سازه به‌مانند یک موج‌شکن توده‌سنگی سنتی عمل کرده و سکوی موج‌شکن که نقش زیادی را در مستهلک کردن انرژی دارد، عملکرد و کارایی منا سبی 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 موج‌شکن سکویی به‌سختی شکل‌پذیر و نسبتاً شکل‌پذیر 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 پایین‌روی کاهش می‌یابد. برعکس مطلب ذکر شده در حالت تراز سکوی بزرگتر، سکوی موج‌شکن شبیه یک مانع متخلخل در برابر امواج عمل کرده و عدم کارایی مناسب سکو، سبب کاهش میزان استهلاک انرژی موج خواهد شد. به‌منظور بررسی کمّی 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 (H_i) $C_r = H_r / H_i$ 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، آب‌شستگی و در نهایت ناپایداری سازه شود.



شکل ۱۱- تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر پارامتر آسیب موج‌شکن سکویی 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 موج‌شکن‌های سکویی همگن دینامیکی نشان داد که با افزایش تراز سکو، پسرفت عرض سکو کمتر شده است. به‌طورکلی 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 موج‌شکن متفاوت است، به‌طوری‌که در موج‌شکن نوع همگن عمدتاً از عرض فرسایش‌یافته سکو استفاده می‌شود در حالی-که در موج‌شکن نوع چندلایه، پارامتر آسیب مورد بحث است.

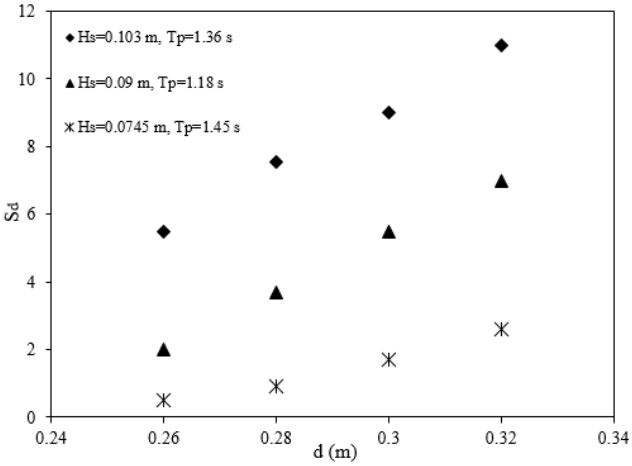
۴- ۵- بررسی تأثیر عمق آب پای سازه بر پایداری سازه با ثابت نگه داشتن حجم سنگ کلاس I

در تحقیق حاضر برای بررسی اثر عمق آب پای سازه بر پایداری موج-شکن سکویی 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

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 می‌کردند. شکل ۱۳ تأثیر پارامتر عمق آب پای سازه بر مقدار پارامتر آسیب سازه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است عمق آب پای سازه پارامتر بسیار مهمی در بررسی پایداری سازه بوده به‌طوری‌که با افزایش عمق آب پای سازه، پارامتر آسیب سازه نیز افزایش 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.

براساس 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. زمانی‌که عمق آب پای سازه بیشتر می‌شود، مقدار شار انرژی موجود بیشتر شده و موج نیروی بزرگتری به سازه وارد می‌کند. افزایش نیروی وارده بر سازه موج‌شکن، باعث ایجاد نیروی محرک بزرگتر بر ذرات سنگی سازه شده و منجر به افزایش سطح فرسایش‌یافته سازه می‌شود. همچنین مشاهده‌های آزمایشگاهی حاضر نشان می‌دهند که تغییر عمق آب پای سازه، تأثیری اساسی بر میزان بالاروی و پایین‌روی موج بر سازه دارد، به-طوری‌که با افزایش عمق آب، میزان بالاروی و پایین‌روی بیشتری حاصل شده و منجر به ایجاد آسیب بیشتر و در نتیجه کاهش پایداری سازه می‌شود.



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

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر براساس شرایط محیطی و سازه‌ای در نظر گرفته شده برای آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق که بصورت رابطه ذیل ذکر شده، معتبر بوده و قابل کاربرد است.

$$\begin{cases} H_o = 1.31 - 2.6 \\ H_o\sqrt{T_o} = 5.74 - 13.56 \\ h_{br} / D_{n50I} = 1.11 - 2.59 \\ d / D_{n50I} = 9.63 - 11.86 \\ B / D_{n50I} = 7.4 \\ h_I / H_s = 1.36 - 2.68 \end{cases} \quad (۳)$$

۵ – نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پایداری هیدرولیکی موج‌شکن سکویی چندلایه پایه‌ریزی 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 براساس مدل‌سازی 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 موج‌شکن سکویی چندلایه منتج شده است. درنهایت در تحقیق حاضر، نتایج زیر به‌دست آمده‌اند:

۱- در موج‌شکن سکویی چندلایه در قسمت سکوی موج‌شکن یعنی در محدوده تراز بالاروی و پایین‌روی موج، بزرگترین بلوک‌های سنگی (سنگ کلاس I) جایابی می‌شوند، که نقش اصلی را در مستهلک کردن انرژی امواج ایفا می‌کنند. ازاین‌رو، تغییر در ارتفاع سنگ کلاس I اثر مستقیمی بر عملکرد موج‌شکن داشته و برای اولین‌بار در این مطالعه، ارتفاع سنگ کلاس I به‌عنوان 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 موج‌شکن سکویی چندلایه، حجم سنگ‌دانه‌های کلاس I باید ثابت باقی بماند. برای این منظور ضروری است که ارتفاع سکوی سازه صرفاً با اضافه کردن و یا کم کردن سنگ‌های لایه‌های پایین‌تر مانند سنگ‌های 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 ترکیب‌های مختلف امواج دیده شده است. ازاین‌رو می‌توان دریافت که بکار بردن بلوک‌های سنگی با تناژ بالا در بخش‌های پایینی لایه آرمور نه‌تنها نقشی در افزایش پایداری سازه ایفا نمی‌کند، بلکه منتج به هزینه زیادی نیز خواهد شد. نکته حاضر می‌تواند به‌عنوان مزیت اساسی موج‌شکن سکویی چندلایه نسبت به نوع توده‌سنگی سنتی بیان شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

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

۵- با افزایش تراز سکو از سطح ایستابی 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 به‌دلیل 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، به‌طوری‌که با افزایش عمق آب پای سازه، شار انرژی موج و در نتیجه نیروی وارد بر سازه بیشتر شده و متعاقب آن سطح فرسایش‌یافته 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 فرسایش‌یافته 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
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 Viggosson, G., (2000), *Design considerations of berm breakwaters*, Proc. of the 27th International Conference on Coastal Engineering, Sidney, Australia, p.1610-1621.
6- Tørum, A., Kuhnen, 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]

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.
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 Bjørdal, 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.9.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.53]