بررسی آزمایشگاهی پایداری پنجه در موج‌شکن‌های توده سنگی با آرمور بتنی آکروپاد

عباس باغشاهی[۱] ، مهدی شفیعی فر[۲] ، محمدرضا مطلبی زاده[۳]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سواحل،بنادر و سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس
[۲] استاد، گروه مهندسی سواحل،بنادر و سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس
[۳] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

کلمات کلیدی:
مطالعه آزمایشگاهی
موج‌شکن توده سنگی
پایداری پنجه
پنجه عمیق
پریود موج

چکیده

پنجه ساختاری با عملکرد پشتیبانی از لایه آرمور و جلوگیری از آبشستگی بستر است. به دلیل قرارگیری پنجه در زیر آب، طراحی ایمن این لایه حائز اهمیت است. در این پژوهش پایداری پنجه موج‌شکن‌های توده سنگی با استفاده از مدلسازی فیزیکی در کانال موج آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها با هدف بررسی اثر پارامترهای ارتفاع و پریود موج، عمق آب، قطر اسمی سنگ، عرض پنجه و ارتفاع سکو انجام شده اند. بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، پریود موج تأثیر زیادی در پایداری پنجه دارد. در مرحله بعد عمق آب بالای پنجه در میزان آسیب وارد شده به پنجه حائز اهمیت است. با افزایش قطر اسمی سنگ پنجه کاهش محسوسی در مقدار آسیب مشاهده نشد. کاهش شیب پیشانی پنجه از ۱:۱,۵ به ۱:۳ راه حلی جهت دستیابی به پایداری بود. با کاهش شیب پیشانی، عرض کلی سکو افزایش می‌یابد؛ بنابراین تصمیم گرفته شد پنجه با شیب پیشانی ۱:۱,۵ اجرا شود و عرض سکو به اندازه دو قطر اسمی ادامه یابد. در این حالت در اثر برخورد امواج؛ شیب پیشانی پنجه تغییر شکل داده و به پایداری می‌رسد.

Experimental Evaluation of the deep toe stability of rubble mound breakwater with Accropod concrete armor

Abbas Bagheshahi[1], Mehdi Shafieefar [2], Mohammad reza Motalebizadeh [3]

[1] Master's student, Department of Coastal Engineering, Ports and Marine Structures, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University
[2] Professor, Department of Coastal Engineering, Ports and Marine Structures, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University
[3] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Yazd

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 06 Mar 2024
Accepted: 24 Sep 2024
Available online: 25 Sep 2024

Keywords:
Experimental Study
Rubble-mound Breakwater
Toe Stability
Deep Water
Wave Period
Accropod

ABSTRACT

The Toe is a structure with the function of supporting the armor layer and preventing scouring of the substrate. Due to the location of the toe under water, the safe design of this layer is important. Experiments have been conducted in order to investigate the effect of variable parameters including wave period, water depth, nominal stone diameter, toe width and berm height on toe stability of rubble mund breakwaters. Based on the results of the experiments, the wave period has a great effect on the stability of the toe. In the next step, the water depth above the toe is important in the amount of toe damage. By increasing the nominal diameter of the toe stone, no significant reduction in the amount of damage was observed. Decreasing the front slope of the toe from 1:1.5 to 1:3 was a solution to achieve stability. By reducing the front slope, the overall width of the berm increases; Therefore, it was decided to implement the toe with a front slope of 1:1.5 and the width of the berm to be 2 nominal diameters. In this case, due to the collision of waves, The front slope of the toe is changed and becomes stable.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]

۱ – مقدمه

موج‌شکن‌های توده سنگی یکی از پرکاربردترین سازه‌های دریایی در کشور علی‌الخصوص در مناطق جنوبی هستند. با توجه به هزینه‌های بالای ساخت موج‌شکن‌ها، طراحی صحیح، پیش‌بینی خرابی‌های حاصله و تخمین مصالح مصرفی موردنیاز از دو جنبهٔ کاربردی و اقتصادی کاملاً ضروری و مهم است. درگذشته موج‌شکن‌های توده سنگی در آب‌های کم‌عمق احداث می‌شدند. گسترش بنادر باعث گردید که موج‌شکن‌ها در آب های عمیق ساخته شوند. احداث موج‌شکن‌های توده سنگی در آب عمیق و مکان‌های مستقر در معرض امواج بلند، باعث جایگزینی قطعات آرمور بتنی به‌جای سنگ‌های با وزن زیاد می شود. پایداری این قطعات در مقابل حملهٔ امواج علاوه بر وزن، در اثر درگیری قطعات مجاور حاصل می‌شود. در موج‌شکن‌های توده سنگی در آب کم عمق لایه آرمور تا پای سازه ادامه می‌یابد؛ درحالی‌که در آب عمیق به دلیل اینکه با افزایش عمق آب، نیروهای وارده کاهش می‌یابد. در این حالت برای جلوگیری از ادامه‌دادن لایه آرمور تا پای سازه با توجه به هزینه‌ای که این لایه به پروژه تحمیل می‌کند، باید پنجه در تراز مناسبی بر روی سکو قرار گیرد. منظور از سکو در این پژوهش ادامه یافتن فیلتر در زیر پنجه برای بالاآوردن تراز است. در این حالت تراز قرارگیری پنجه و قطر سنگی که می‌تواند پایداری پنجه و در ادامه پایداری لایه آرمور را حفظ کند از اهمیت بالایی برخوردار است. در این میان نیاز به شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار پنجه تحت اثر امواج و جریان است.

به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف در پایداری پنجه موج شکن با آرمور بتنی آکروپاد، در مطالعات حاضر مشخصات مقطع بخش موازی ساحل موج‌شکن شرقی بندر پارسیان در مدلسازی فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است.. حداکثر عمق آب در این ناحیه ۱۷ متر است. در آزمایشگاه این مقطع با مقیاس ۴۵,۴۶ مدل شده است. این مقیاس برای تمامی مصالح شامل مصالح فیلتر و هسته اعمال شده است. چگالی سنگ ها مطابق با چگالی سنگ های منطقه پارسیان و برابر ۲,۴ تن بر مکعب است. قطعات بتنی آکروپاد مورد استفاده دارای وزن متوسط ۹۶ گرم بودند.

۲ – مروری بر مطالعات قبلی

در این بخش به معرفی مطالعات صورت گرفته در زمینه ارزیابی پایداری پنجه پرداخته می شود. اکرات (۱۹۸۳)، در مورد خرابی موج‌شکن ها نتایجی را منتشر کرد که طی این مطالعات بیان نمود هدف اصلی پنجه جلوگیری از خرابی لایه آرمور و در مرحله بعد جلوگیری از آبشستگی در مجاورت سازه است. آبشستگی رابطه مستقیمی با ضریب بازتاب موج دارد. در صورتی که عمق آب کمتر ازدو برابر ارتفاع مشخصه موج وضریب انعکاس بیشتر از ۰,۲۵ باشد، وقوع آبشستگی در آب های کم عمق مورد انتظار است. طبق بررسی های صورت گرفته آبشستگی در فاصله یک چهارم طول موج رخ می دهد[۱]. راهنمای حفاظت از ساحل (۱۹۸۴) وزن سنگ لایه پنجه را در حدود یک دهم وزن لایه آرمور پیشنهاد می کند [۲]. گردینگ (۱۹۹۳) با انجام مدلسازی فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلفت هلند به بررسی پایداری پنجه پرداخته و رابطه ای را برای تعیین قطر سنگ لایه پنجه ارایه کرده است. طبق بررسی های انجام شده توسط گردینگ تیزی موج و عرض پنجه تاثیری بر پایداری ندارند. او پارامتر آسیب Nod را معرفی و مقدار ۲ را به عنوان معیار طراحی معرفی کرد[۳]. پارامتر Nod نسبت تعداد سنگ های خارج شده از لبه پنجه به تعداد سنگ‌هایی است که قبل از خرابی، روی پیشانی پنجه قرار گرفته بودند.

$$N_{od} = \frac{N}{(L/D_{n50})} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) L طول بخشی از موج‌شکن است که در آن سنگ‌های جابه‌جا شده شمارش می‌شوند.

فن‌لیون (۱۹۹۶) با انجام آزمایش های مدل فیزیکی، به بررسی تاثیر شکل سنگ و چگالی نسبی (Δ) در فرمول گردینگ پرداخت. براساس نتایج بدست آمده در پژوهش فن لیون شکل سنگ بر پایداری پنجه تاثیرگذار است. در این آزمایش ها آسیب برای سنگ های تیز گوشه کمتر از گردگوشه بود[۴].

باتوجه به محدودیت کاربرد فرمول گردینگ (۱۹۹۳) و جواب های غیرمنطقی و دست بالای آن برای محدوده آب عمیق، فن درمیر(۱۹۹۸) به بررسی بیشتر بروی آزمایش های گردینگ پرداخت. او فرمول جدیدی را ارائه و Nod=۰,۵ را به عنوان معیار طراحی پیشنهاد کرد[۵].

راهنمای مهندسی سواحل (۲۰۰۶) بیان می‌کند اگر واحد های آرمور جابجا شده و روی پنجه قرار بگیرند، پایداری پنجه افزایش می‌یابد. براساس این راهنما، سنگ های پنجه می توانند کوچکتر از آرمور باشند، اما در آب های بسیار کم عمق پنجه باید برابر تناژ سنگ آرمور باشند. همچنین در آب های عمیق پنجه می‌تواند روی سکو قرار بگیرد[۶]. مرجع راهنمای سنگ (۲۰۰۷) حداقل ضخامت لایه پنجه را مانند لایه آرمور ۲ لایه و عمق آب بالای پنجه را ۱ تا ۱,۵ برابر ارتفاع مشخصه موج پیشنهاد می‌کند. این راهنما چهار ساختار را برای پنجه ارائه کرده است.

بارت(۲۰۰۸) برای معیار خرابی پنجه پارامتر آسیبی را معرفی کرد که در آن عرض پنجه در نظر گرفته شده است. این آسیب به این معنی است که نه تنها ابتدا سنگ‌های واقع در پیشانی پنجه می‌توانند جابه‌جا شوند؛ بلکه تمام سنگ‌های موجود در سطح پنجه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]

قادر به جابه‌جایی هستند[۷]. پارامتر آسیب Nod_B تعداد سنگی است که از سطح پنجه نسبت به مقدار سنگی که قبل از آزمایش در این لایه قرار گرفته، جابه‌جا شده است.

$$N_{odB} = \frac{N}{(L/D_{n50} \cdot B_t/D_{n50})} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) مقادیر L/D_{n50} و B_t/D_{n50} به ترتیب برابر تعداد سنگ های قرارگرفته در یک ردیف و تعداد سنگ های قرار گرفته در عرض پنجه است.

ابن (۲۰۰۹) با انجام مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شیب ساحل بر پایدرای پنجه را بررسی کرد. براساس مطالعات انجام گرفته عمق نسبی برای پنجه قرار گرفته در آب های کم عمق اهمیتی ندارد. ابن از پارامتر N% برای محاسبه آسیب پنجه استفاده کرد[۸]. این پارامتر درصد آسیب را بر اساس تعداد سنگ‌های جابه‌جا شده نشان می‌دهد. برای محاسبه درصد آسیب نیاز به تخلخل و ابعاد دقیق پنجه هست.

$$N\% = \frac{N.(D_{n50})^3}{(1-n)V_{tot}}.100 \qquad (۳)$$

فن‌خنت و فن‌درمیر (۲۰۱۴) پایداری پنجه در موج شکن های توده سنگی در شرایط آب عمیق را مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار دادند. ارتفاع موج شاخص، پریود موج، عمق آب بالای پنجه، عرض و ضخامت پنجه از پارامتر های تاثیر گذار در نظرگرفته شدند. ارزیابی آسیب به وسیله شمارش و جابجایی متعارف انجام شده است. نتایج تخریب به صورت پارامتر آسیب (N%) ارائه شده است. در آزمایش-های اضافی از بلوک های بتنی V شکل برای پنجه استفاده شده است. تخریب بلوک های بتنی V شکل به صورت سریع و ناگهانی گزارش شده است[۹].

هررا و مدینا (۲۰۱۵) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر عمق آب بروی پنجه های غوطه ور(ht>0) و بیرون از آب (ht<0) پرداختند. آنها دریافتند در صورتی که قطر لازم سنگ پنجه در معادن سنگ منطقه یافت نشود، در این شرایط پنجه باید به آب عمیق منتقل یا از بلوک های بتنی استفاده شود. آنها Nod=۰,۵ را به عنوان معیار طراحی پیشنهاد کردند[۱۰]. در ادامه هررا و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی آسیب وارد بر پنجه موج‌شکن توده سنگی پرداختند. آنها برای کاهش اثر امواج و در نتیجه افزایش پایداری پنجه اصلی (اسمی) موج شکن، یک پنجه اضافی در جلو پنجه اسمی بعنوان پنجه قربانی قراردادند. براساس نتایج آزمایش های انجام شده، با افزایش قطر اسمی سنگ و افزایش عرض پنجه،مقدار Nod افزایش می‌یابد[۱۱].

اعتماد شهیدی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تاریخچه کارهای انجام شده در راستای پایداری پنجه و ارائه یک فرمول جامع با جمع آوری پایگاه داده از مطالعات قبلی پرداختند[۱۲].

شفیعی فر و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تاثیر پنجه بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن های سکویی شکل پذیر پرداختند[۱۳]. نتایج نشان می‌دهد که میزان فرسایش سکو در موج‌شکن های سکویی شکل پذیر که دارای پنجه هستند، ٪۳۵ کمتر از موارد مشابه بدون پنجه است. افزیش عرض و ارتفاع پنجه هردو تاثیر قابل توجهی بر کاهش فرسایش دارند. با این حال ارتفاع پنجه نسبت به عرض پنجه تاثیر نسبتا بیشتری بر فرسایش دارد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی یک فرمول جدید برای برآورد فرسایش سکو با در نظر گرفتن تاثیر ساختار پنجه ارائه شد[۱۳].

۳ - انتخاب مقیاس مدل و اثرات مقیاس

انتخاب مقیاس برای تمام مدل های سازه های دریایی، با توجه به دو موضوع صورت می گیرد. اول آن که هرچه مدل با مقیاس بزرگتر ساخته شود، اثرات مقیاس کاهش پیدا می‌کند. دوم اینکه علیرغم این واقعیت، ساخت مدل های بزرگ مستلزم صرف هزینه بیشتر و امکانات وسیعتر است. محدوده قابل قبول مقیاس برای سازه های توده سنگی، به عواملی چون اندازه قابل ساخت قطعه آرمور مدل، عمق آب قابل تامین در حوضچه یا فلوم و ظرفیت تولید موج بستگی دارد[۱۴]. اثرات مقیاس شامل مواردی است که در نمونه واقعی چندان اهمیت ندارند. حال آنکه تاثیر زیادی در مدل از خود بر جای می‌گذارند. انعکاس و انتقال موج، کشش سطحی، شکست موج، اصطکاک و لزجت و اثرات چگالی آب آزمایشگاهی مهمترین تاثیرات مقیاس در مدل های سازه های توده سنگی هستند. معمولا هرچه مدل با مقیاس کوچکتر ساخته شود، این اثرات نمود بیشتری پیدا می‌کنند. فن‌درمیر در مطالعات خود بیان می‌کند در صورت استفاده ازD_{n50} و H_s در رابطه رینولدز، اثرات لزجت برای لایه آرمور دارای اعداد بزرگتر از ۴×۱۰^۴ ناچیز است[۱۴]. شبیه سازی مناسب انعکاس و انتقال موج، به ویژه برای سازه های نفوذپذیر که از طریق شیب و تخلخل سطحی موجب استهلاک انرژی می‌شوند بسیار مهم است. استفاده از مدل های با مقیاس بزرگتر، روشی برای کاهش اثرات مقیاسی انعکاس و انتقال موج است. مقیاس محاسبه شده جهت ساخت این مدل آزمایشگاهی ۴۵,۴۶ بوده است.

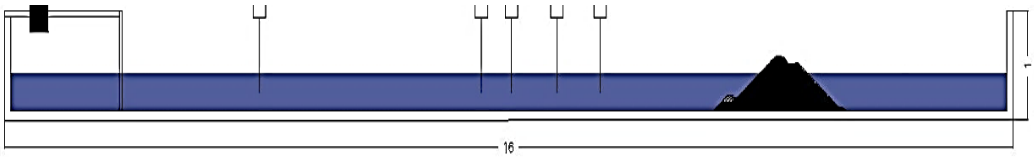
۴ – برپایی مدل آزمایشگاهی

بررسی پایداری پنجه موج‌شکن های توده سنگی در آزمایشگاه سازه‌های دریایی دانشگاه تربیت مدرس با فلوم موج مجهز به موج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]

ساز پیستونی، انجام شده است. طول فلوم موج ۱۶ متر و عرض و ارتفاع آن برابر ۱ متر است. با توجه به استقرار سنگ‌های مشبک جاذب موج در انتهای فلوم، بخش قابل توجهی از انرژی موج در بخش انتهایی مستهلک می شوند. موج ساز آزمایشگاه قابلیت تولید امواج دوبعدی به صورت منظم و نامنظم در طیف‌های مختلف مانند جان سوآپ را دارا است. برای ثبت نوسانات سطح آب از حسگرهای ارتفاع سنج موج استفاده شده است. حسگرهای ارتفاع سنج موج از دو میله بلند فولادی ضد زنگ تشکیل شده‌اند. اساس کار این حسگرها خاصیت خازنی است. ثبت نوسانات سطح آب به صورت تغییرات ولتاژ اعمال شده به حسگرها بر اساس تغییر سطح آب و در نتیجه تغییر ظرفیت خازنی انجام می‌پذیرد. تغییرات دمایی و متغیرهای محیطی دیگر باعث تغییر در رفتار حسگرها شده و احتمال خطا در ثبت و اندازه‌گیری‌ها را بالا می‌برد، لذا می‌بایست دوره ای، حسگرها در دامنه اندازه گیری خود مجدداً کالیبره شوند. در آزمایش های انجام شده از پنج حسگر ارتفاع سنج موج استفاده شده است. شکل ۱ نمایی ازقرار گیری موج‌شکن و حسگر ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱ – موقعیت قرار گیری مدل فیزیکی و سنسور ها در فلوم

۴-۱- ساخت مدل آزمایشگاهی

جدول ۱ حداقل و حداکثر مقادیر مربوط به هرلایه از موج‌شکن ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. از قطعات بتنی آکروپاد با وزن متوسط ۹۶ گرم به صورت یک لایه به عنوان لایه آرمور استفاده شده است.

جدول ۱ حداقل و حداکثر مقادیر مربوط به هرلایه از موج شکن در مدل آزمایشگاهی

پارامتر	واحد	هسته		فیلتر		پنجه۱		پنجه۲	
		حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
W_p	gr	0.09	9.77	9.4	18.7	31	56	53	95
D	cm	0.24	1.6	1.6	2	2.36	2.86	2.81	3.41
ρ_{sp}	t/m^3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ρ_{wp}	t/m^3	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
Δ_p	-	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34

در شکل ۲ نمایی از طیف سنگ‌دانه‌های مورد استفاده قابل مشاهده است.

مصالح لایه پنجه۱ با قطر اسمی ۲,۶ سانتی متر

مصالح لایه پنجه با قطر اسمی 3.1 سانتی متر

مصالح لایه هسته

مصالح لایه فیلتر

شکل ۲ – دانه بندی اجزای تشکیل دهنده مدل فیزیکی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]

برای ساخت مدل در فلوم ابتدا نقشه مقطع عرضی مدل بر روی دیواره فلوم چسبانده و در مرحله بعد نقشه مدل با استفاده از الگوی تهیه شده بروی کاغذ بر روی دیواره فلوم ترسیم شد. بعد از رسم مدل بر روی شیشه نوبت به اجرای سازه می‌گردد که در ابتدا لایه هسته و سپس لایه های فیلتر ،پنجه و آرمور اجرا می‌شود. لایه های هسته و فیلتر توسط ماله کاملا صاف و شیب با دقت بالا پیاده شده است

شکل ۳ - نمونه ای از مقطع اجرا شده در فلوم آزمایشگاه

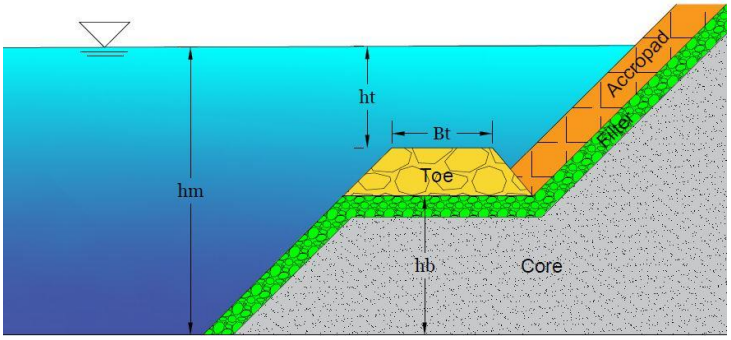
۵-دامنه تغییرات متغیرهای مورد مطالعه

به طور کلی دامنه تغییرات متغیرهای مورد مطالعه برای بررسی پایداری و کلیه واکنش‌های هیدرولیکی در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار ارتفاع موج مشخصه در تمام تست ها ثابت و برابر ۱۰,۸ سانتی که معادل ۴,۹ متر در محیط واقعی است. دامنه پریود ها معادل ۷,۶۸ تا ۱۱,۸۶ ثانیه در محیط واقعی است. در تمامی آزمایش ها، تعداد امواج براساس مطالعات پیشین تا رسیدن پنجه به پایداری ۲۰۰۰ موج در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ - محدوده تغییرات متغیر های مورد مطالعه

متغیرها	نماد	واحد	دامنه تغییرات
پریود موج	T_p	ثانیه	۱,۱۴ تا ۱,۷۶
قطر اسمی مصالح	$D_{n50,toe}$	سانتی متر	۲,۶ و ۳,۱
عرض پنجه	Bt	سانتی متر	۳ و ۵ برابر قطر
عمق آب در محل	hm	سانتی متر	۳۴ تا ۵۰
تراز سکو	h_b	سانتی متر	۹ و ۱۶

شکل ۴ پارامترهای مورد استفاده در توصیف پایداری پنجه در موج‌شکن های توده سنگی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - نمایش پارامترهای مختلف مورد استفاده در توصیف رفتار پنجه

۶- تحلیل نتایج

در ادامه به تأثیر تک‌تک پارامترهای مختلف بر پایداری پنجه در موج‌شکن توده سنگی و به تجزیه و تحلیل نحوه اثرگذاری تمام پارامترهای مورد نظر بر تغییر شکل پنجه پرداخته می‌شود.

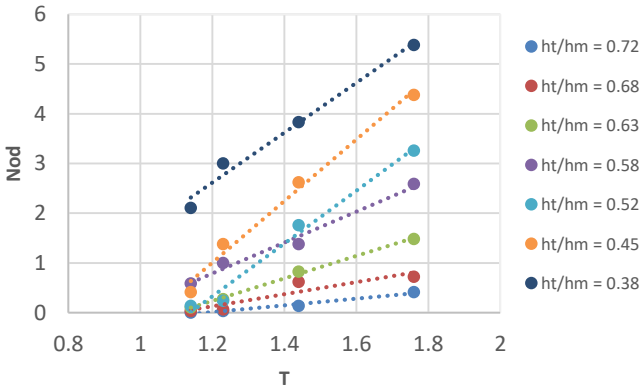
۶-۱ اثر پریود موج

پریود موج پارامتر بسیار مؤثری بر پایداری پنجه در موج‌شکن‌های توده سنگی است. هنگامی که موج با پریود زیاد (طول‌موج بلند) به سازه برخورد می‌کند، امواج پیش‌رونده اجازه عقب‌نشینی کامل را به امواج بازگشتی از پای سازه می‌دهد که درست در این لحظه سطح

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]

آب پایین آمده و شرایط آسیب‌پذیری برای پنجه فراهم می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار پریود، آسیب افزایش می‌یابد. هنگامی که عمق نسبی در محدوده ۰,۳۸ تا ۰,۵۲ قرار می‌گیرد، تأثیر پریود بیشتر شده و آسیب پنجه با شیب بیشتری خود را نشان می‌دهد. در پریود های کوچک، آسیب در عمق نسبی‌های مختلف به هم نزدیک است؛ ولی با افزایش مقدار پریود از ۱,۴۴ ثانیه تا ۱,۷۶ ثانیه، اختلاف آسیب به طور چشمگیر افزایش می‌یابد. امواج با پریود بیشتر (در نتیجه طول موج بزرگ‌تر) با تولید یک جریان روی پنجه در ابتدا باعث ایجاد نیروی بلند کننده روی سنگ‌ها شده و سپس سنگ‌ها را به سمت بالا جابه‌جا می‌کند. در امواج کوتاه با انرژی کم تنها قادر به ایجاد یک نیروی بلند کننده هستند و توان جابه‌جایی سنگ‌ها را به سمت بالا ندارند و امواج سریعاً شروع به عقب‌نشینی کرده و سنگ‌ها با نیروی وزن خود به سمت پایین پنجه جابه‌جا می‌شوند.



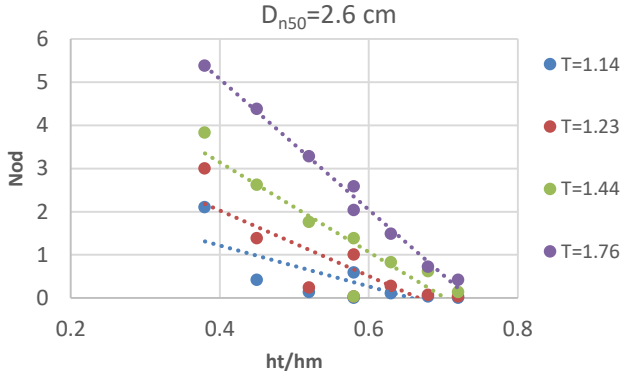
شکل ۵ - اثر پریود بر پایداری پنجه

باتوجه به شکل ۵ مشاهده می شود برای عمق نسبی ht/hm=0.72 تغییر مقدار پریود از ۱,۱۴ ثانیه به ۱,۷۶ ثانیه مقدار آسیب Nod از ۲ به ۵,۵ افزایش می یابد. این افزایش آسیب به معنای جابجایی بیشاز دو برابری سنگ های پنجه است. همچنین باتوجه به شیب تغییرات مقدار آسیب برای عمق های نسبی دیگر در این شکل، مشاهده می شود برای عمق های نسبی کمتر، کماکان افزایش پریود موج باعث افزایش آسیب Nod می شود.

از ویژگی‌های امواج با طول موج بزرگ و تیزی موج کم نسبت به امواج با تیزی بیشتر، استهلاک انرژی کمتر در موقع شکست موج روی شیب وجه جلویی سازه است. در این حالت نیروهای وارد بر سنگ‌دانه‌ها هنگام بالاروی افزایش‌یافته در نتیجه هنگام پایین روی امواج، جریان قوی‌تری ایجاد می‌گردد که در این حالت نیروی وزن سنگ‌دانه‌ها نیز به کمک این جریان پایین‌رونده قوی آمده و باعث جابه‌جایی بیشتر مصالح و فرسایش آنها می‌شود. به عبارتی زمانی که طول موج کوتاه است سنگ‌های پنجه تنها از پیشانی پنجه جابه‌جا می‌شوند؛ ولی زمانی که پریود را افزایش می‌دهیم و طول موج هم زیاد می‌شود سنگ‌هایی که در پیشانی قرار دارند به همراه سنگ‌های سطح پنجه جابه‌جا می‌شوند. همچنین می‌توان گفت که با افزایش پریود موج، نیروی ناشی از موج در مدت‌زمان طولانی‌تری به سازه وارد می‌شود و این مسئله باعث افزایش تغییر شکل و آسیب پنجه می‌شود.

۶-۲-تاثیر عمق آب

پنجه به طور مستقیم از عمق آب اثرپذیر است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، در عمق نسبی ماکزیمم آسیب ها به همدیگر نزدیک هستند اما در عمق نسبی مینیمم اختلاف فاحشی بین آسیب وارد شده به پنجه تحت اثر امواج تولید شده وجود دارد. با نزدیک شده به عمق نسبی ۰,۵، اختلاف بین آسیب های وارده بیشتر شده و در عمق نسبی ۰,۳۸ شاهد افزایش آسیب به پنجه هستیم. هنگامی که ht/hm کوچک است، موج باعث ایجاد ضربه به پنجه می شود. از آنجا که فضای پنجه نزدیک به سطح آب است، موج حمله مستقیم به پنجه دارد. وقتی ht/hm بزرگ باشد، موج به سختی باعث تخریب پنجه می شود. از طرف دیگر زمانی که پنجه به اندازه کافی در زیر سطح آب ساخته شده است، فقط توسط سرعت آب محلی مورد حمله قرار می‌گیرد. بنابراین اگر عمق نسبی افزایش یابد، منجر به پایداری پنجه می‌شود و قطر سنگ کوچکتر (D_{n50}) یا ارتفاع مشخصه موج بزرگتر را می‌توان پذیرفت.



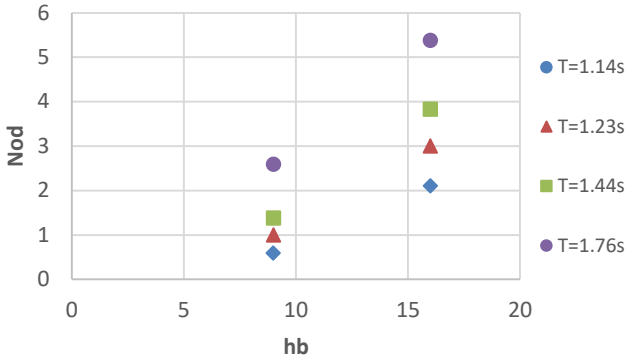
شکل ۶ - تاثیر عمق نسبی بر میزان آسیب به پنجه

۶-۳-تاثیر تراز سکو

شکل ۷ تأثیر پارامتر تراز سکو بر فرسایش پنجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با کاهش تراز سکو از سطح ایستابی آسیب پنجه افزایش می‌یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]

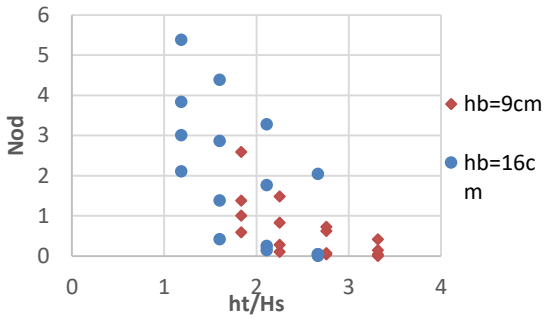


شکل ۷ - تاثیر پارامتر تراز سکو از سطح ایستابی بر پایداری پنجه

پارامتر تراز سکو پارامتر مؤثری در پایداری پنجه است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در یک شرایط محیطی ثابت، با کاهش تراز سکو از سطح ایستابی، میزان آسیب پنجه افزایش می‌دهد و با افزایش فاصله تراز سکو از سطح ایستابی، آسیب پنجه روند کاهشی خواهد داشت. دلیل این امر را به این صورت می‌توان بیان کرد که با کاهش تراز سکو از سطح ایستابی، عمق آب روی پنجه کاهش می‌یابد که این مسئله باعث افزایش تأثیر انرژی امواج بر روی پنجه می‌شود. دلیل دیگری که می‌توان برای افزایش آسیب پنجه در اثر کاهش تراز سکو از سطح ایستابی ارائه نمود این است که با افزایش تراز سکو پنجه به سمت آرمور جابه‌جا می‌شود و امواج در زمان پایین روی مستقیم بر روی پنجه اثر می‌گذارند.

۶-۴-تاثیر عمق آب بالای پنجه

شکل ۸ مقادیر بی بعد شده عمق آب بالای پنجه نسبت به ارتفاع موج شاخص به مقدار آسیب را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عمق آب بالای پنجه مقدار آسیب کاهش می‌یابد. مطابق توصیه‌های راهنمای سنگ (۱۹۹۱) ، در صورتی که



شکل ۸ - نمودار آسیب وارد شده به پنجه نسبت به تغییرات بی بعد شده عمق آب بالای پنجه

عمق آب بالای پنجه در محدوده ۱ تا ۱,۵ برابر ارتفاع موج شاخص انتخاب شود پنجه پایدار است. این درحالی است که بر اساس نتایج آزمایشگاهی، در صورتی که عمق آب بالای پنجه در محدوده ۲,۲ تا ۲,۵ برابر ارتفاع موج شاخص انتخاب شود پنجه پایدار است.

۶-۵-تاثیر عرض پنجه

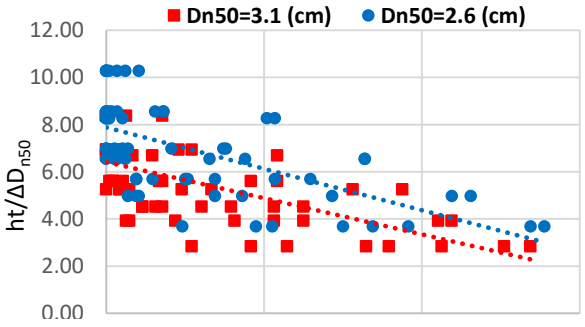
براساس مشاهدات آزمایشگاهی پارامتر عرض پنجه، پارامتر مؤثری برای امواج با پریود کوچک است. نمودارهای ترسیم شده نشان می‌دهند که در یک شرایط محیطی ثابت، با افزایش عرض پنجه زمانی که پریود کوچک است (۱,۱۴ و ۱,۲۳ ثانیه)، آسیب کاهش می‌یابد.

دلیل کاهش آسیب این است که زمانی که عرض پنجه افزایش می‌یابد، فاصله شیب پیشانی پنجه از پایین‌ترین لایه آرمور زیاد شده و امواج هنگام شکست روی آرمور اثر کمتری بر جابه‌جایی سنگ‌های پیشانی پنجه دارند. هنگامی که پریود بزرگ است (۱,۴۴ و ۱,۷۶ ثانیه) با افزایش عرض پنجه، حجم مصالح سنگی قرار گرفته در پنجه افزایش می‌یابد و تحت اثر امواج تعداد سنگ بیشتری از پنجه جابه‌جا می‌شوند. زمانی که عمق نسبی در محدوده آب کم عمق قرار دارد، تاثیرعرض پنجه قابل توجه است؛ ولی با رفتن به محدوده آب عمیق افزایش عرض پنجه هیچ تأثیری در پایداری پنجه ندارد.

۶-۶-تاثیر قطراسمی سنگدانه

در این آزمایش‌ها قطر سنگ‌هایی که برای پنجه استفاده شده ۲,۶ و ۳,۱ سانتی‌متر استفاده شده است. با افزایش قطر سنگ انتظار می‌رفت میزان آسیب پنجه کاهش پیدا کند؛ اما این کاهش خیلی چشمگیر نبود. شکل ۹ به طور کلی نشان می‌دهد با افزایش عدد پایداری، قطر اسمی سنگدانه پنجه کاهش و پارامترآسیب افزایش می‌یابد.

در اثر افزایش قطر اسمی سنگ، عمق آب بالای پنجه کاهش می‌یابد و پنجه مستعد آسیب بیشتر می‌شود. عامل دیگری که باعث ناپایداری پنجه در اثر افزایش قطر اسمی می‌شود، افزایش تخلخل است. زمانی که تخلخل زیاد می‌شود میزان درگیری بین سنگ‌های



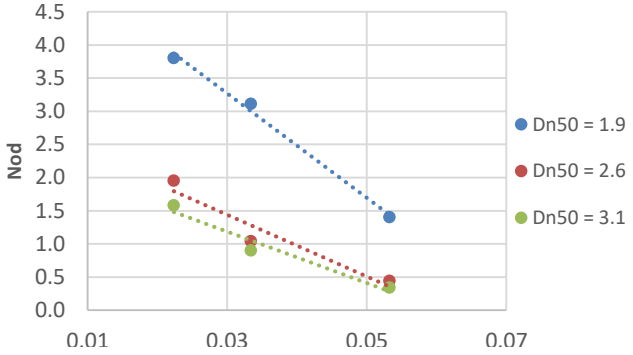
شکل ۹ - تاثیر قطر اسمی بر افزایش آسیب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]

پنجه کاهش می‌یابد و تحت اثر انرژی امواج به راحتی جابه‌جا می‌شوند.

شکل ۱۰ آسیب وارد شده به پنجه در مقابل تیزی موج برای سه

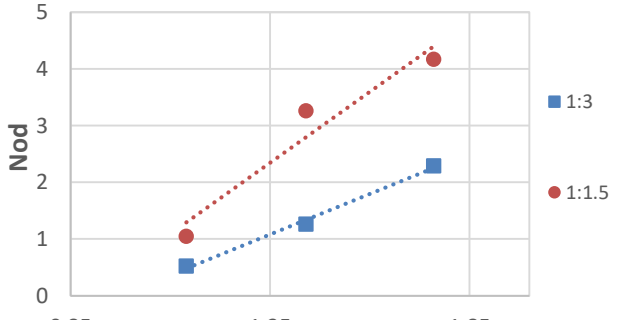


شکل ۱۰ - نمودار آسیب وارد شده به پنجه براساس تیزی موج برای سه قطر اسمی متفاوت

قطر اسمی ۲,۶،۱,۹ و ۳,۱ سانتی متر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، کاهش آسیب در اثر افزایش قطر اسمی نسبت به افزایش آسیب در اثر کاهش قطر اسمی بسیار ناچیز است.

۶-۷-تاثیر شیب پیشانی پنجه

هنگامی که پنجه تحت اثر امواج قرار می‌گیرد، ابتدا سنگ‌ها از ناحیه پیشانی پنجه جابه‌جا می‌شوند؛ بنابراین درصورتی‌که شیب پنجه را کاهش دهیم انتظار می‌رود مقدار آسیب کم شود. در شکل ۱۱ مقدار آسیب وارد شده به پنجه برای شیب های ۱:۱,۵ و ۱:۳ برحسب پریود های مختلف موج نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ پیداست در یک پریود مشخص، با افزایش شیب پیشانی پنجه، مقدار آسیب افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱ - تاثیر شیب پیشانی بر پایداری پنجه

کاهش شیب پیشانی یعنی پنجه از قبل تحت برخورد امواج قرار گرفته و در اثر تغییر شکل به پایداری رسیده است. در پریودهای بزرگ برخلاف پریودهای کوچک، کاهش آسیب مشهود است. در پریودهای کوچک عملاً جابه‌جایی سنگ‌های پنجه خیلی زیاد نیست؛ ولی زمانی که پریود افزایش می‌یابد جابه‌جایی سنگ‌ها نیز افزایش می‌یابد. وقتی شیب پنجه زیاد است تحت اثر امواج سنگ‌ها ابتدا از ناحیه پیشانی پنجه جدا شده و به پایین یا بالا حرکت می‌کند؛ ولی با کاهش شیب پیشانی این جابه‌جایی‌ها دیده شده و پنجه تحت حملات امواج پایدار می‌ماند با کاهش شیب پیشانی پنجه، عرض سکو افزایش می‌یابد که از لحاظ اقتصادی برای پروژه مطلوب نیست

۶-۸-تاثیر عرض سکو

انتخاب مقدار بهینه برای عرض سکوی موج‌شکن از نظر اقتصادی اهمیت بالایی دارد، چراکه تغییرات آن به میزان یک قطر مشخصه سنگ‌دانه در طول خط پروژه چندکیلومتری می‌تواند هزینه پروژه را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

برای بررسی تأثیر این پارامتر عرض پنجه $3D_{n50}$ و عرض سکو را یک‌بار به اندازه پنجه و بار دیگر عرض سکو به اندازه $2D_{n50}$ از جایی که شیب پنجه تمام می‌شود ادامه داده شده است.

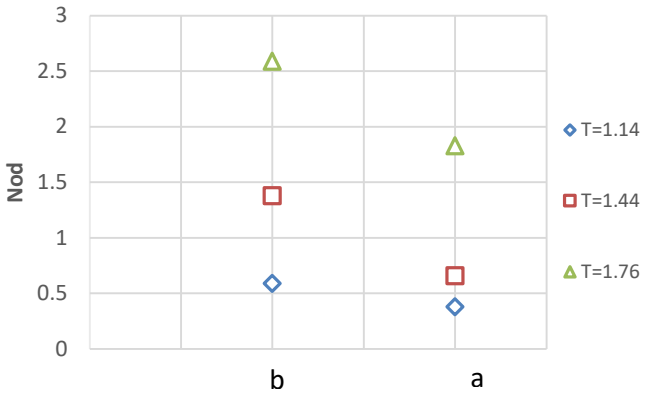
زمانی که پنجه تحت حمله امواج قرار می‌گیرد اگر سنگ‌ها به سمت بالا حرکت کنند نسبت به زمانی که به سمت پایین حرکت می‌کنند، پایداری پنجه را به خطر نمی‌اندازند. اگر عرض سکو به اندازه پنجه باشد، زمانی که سنگ‌ها از پیشانی پنجه جدا می‌شوند به پایین سکو حرکت و به بستر می‌افتند.

با انجام آزمایش سنگ‌هایی که روی سکو افتادند به‌عنوان آسیب شمارش نشده است. دلیل عدم شمارش این است سنگ‌هایی که به سکو منتقل شده‌اند همچنان جزوی از پنجه هستند و با برخورد امواج و جابه‌جایی سنگ‌های دیگر و قرارگیری آن‌ها روی سکو می‌توان پنجه‌ای که با شیب ۱:۱,۵ اجرا شده تحت اثر فرسایش و تغییر شکل به شیب ملایمی تبدیل شود.

بررسی نتایج داده‌های این سری از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عرض سکو در مقابل پنجه، آسیب کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان فراهم‌شدن بستری جهت انتقال سنگ‌های پنجه روی آن به جای اینکه از پنجه جدا شده و به بستر منتقل شوند دانست. در این حالت عرض سکو نسبت به زمانی که شیب پیشانی پنجه ۱:۳ باشد، ٪۱۱ کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۲).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]



شکل ۱۲ - تاثیر افزایش عرض سکو در پایداری پنجه

۷ - نتیجه گیری

در این مطالعه به منظور بررسی پایداری پنجه در موج‌شکن توده سنگی؛ ارزیابی آزمایشگاهی انجام شد. در مطالعه حاضر علاوه بر تحلیل میزان آسیب و خسارت؛ پایداری پنجه با رویکرد بررسی عوامل مؤثر بر خرابی پیش‌رونده ناشی از اندرکنش موج و سازه مورد بررسی قرار گرفته است.. اثر تغییرات سه پارامتر ارتفاع مشخصه امواج، پریود پیک موج و عمق آب در پایداری پنجه مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱- در این مجموعه آزمایش ها با افزایش قطر اسمی سنگ از ۲,۶ به ۳,۱ سانتی متر افزایش چشمگیری در پایداری پنجه مشاهده نشد. به دلیل اینکه با افزایش قطر اسمی؛ عمق آب بالای پنجه کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش قطر سنگ درگیری بین سنگ‌ها کمتر می شود و سنگ‌ها به راحتی تحت اثر امواج جابه‌جا می‌شوند.

۲- در صورتی که از پنجه سنگی استفاده شود و پارامتر آسیب زیاد باشد، از آنجایی که ممکن است افزایش تناژ سنگ راه حل مؤثری نباشد، می‌توان شیب پیشانی پنجه را کاهش داد. کاهش شیب پیشانی پنجه به این معنی است که جابه‌جایی‌هایی که قرار است توسط امواج به پنجه اعمال شود در طراحی در نظر گرفته می شوند. در این شرایط عملا امواج به یک پنجه تغییر شکل یافته برخورد می کنند. در این حالت عرض سکو افزایش می‌یابد. راه حل دیگر آن است که به جای کاهش شیب پنجه،، عرض سکو به اندازه دو تا سه قطر اسمی افزایش داده شود. در این حالت تحت اثر برخورد امواج، سنگ‌های جدا شده از پنجه به جای انتقال به بستر، بر روی عرض سکو افتاده و به مرور زمان با تغییر شکل احتمالی پنجه، پایداری برقار خواهد بود.

۳- پریود موج تأثیر زیادی در پایداری پنجه دارد. در پریود های ۱,۱۴ و ۱,۲۳ ثانیه آسیب برای عمق آب‌های مختلف نزدیک به هم هستند؛ ولی با افزایش پریود به ۱,۴۴ و ۱,۷۶ ثانیه آسیب به پنجه به صورت قابل توجهی رشد می‌کند. امواج با پریود بزرگ یا طول‌موج بلند پس از برخورد به سازه، در برگشت به‌خاطر پایین آمدن سطح آب و ایجاد فشار دینامیکی منفی، باعث جابجایی سنگ ها می‌شوند.

۴- عمق آب رابطه معکوس با آسیب دارد. با افزایش عمق آب، آسیب به پنجه کاهش می‌یابد. عمق آب پای سازه به دلیل اهمیت قرارگیری پنجه، پارامتر مناسبی جهت بررسی وضعیت پنجه نیست. عمق آب بالای پنجه نسبت به عمق آب پای سازه از اهمیت بیشتری برخوردار است. هرچه عمق آب بالای پنجه بیشتر باشد یا ht/hm نزدیک به ۱ باشد، پنجه نسبت به پارامتر های محیطی پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهد. براساس نتایج آزمایشگاهی، در صورتی که عمق آب بالای پنجه در محدوده ۲,۲ تا ۲,۵ برابر ارتفاع موج شاخص باشد، پنجه پایدار است.

۵- بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی معیار N٪ بهترین پارامتر آسیب است. این پارامتر در اکثر تست‌ها میزان آسیب واقعی و محاسبه شده را درست نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، در صورتی که آسیب پنجه بیشتر از ۳۰٪ باشد، پنجه ناپایدار است.

۸ - مراجع

[1] J. W. Eckert, “Design of toe protection for coastal structures,” in *Coastal Structures’ 83*, ASCE, 1983, pp. 331–341.

[2] U. S. A. E. W. E. S. C. E. R. Center, *SHORE PROTECTION MANUAL*. US Government Printing Office, 1984.

[3] E. Gerding, “Toe structure stability of rubble mound breakwaters.” Delft Hydraulics, 1993.

[4] L. D. Van Leeuwen, “Toe stability of rubble-mound breakwaters,” *Delft Univ. Technol.*, 1996.

[5] M. VAN DER, “Geometrical design of coastal structures,” *Inframm (www. inframm. nl), Marknesse, also Publ. as*, 1998.

[6] USACE (2006), “Coastal Engineering Manual (CEM): Part VI Design of coastal project elements,” *U.S. Army Corps Eng.*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]

(chl.erdc.usace.army.mil), Hughes, S.A. CHL, Vicksbg., 2006.

[7] S. A. Baart, "Toe structure for rubble mound breakwaters: Analysis of toe bund design tools and a method for toe rock stability description," 2008.

[8] R. E. Ebbens, S. H. Engineering, and D. M. Consultants, "Toe structures of rubble mound breakwaters Stability in depth limited conditions Stability in depth limited conditions," no. February, 2009.

[9] M. R. A. Van Gent and I. M. Van Der Werf, "Toe stability of rubble mound breakwaters," in *Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering; ASCE: Seoul, Korea*, 2014.

[10] M. P. Herrera and J. R. Medina, "Toe berm design for very shallow waters on steep sea bottoms," *Coastal Engineering*, vol. 103. pp. 67–77, 2015. doi: 10.1016/j.coastaleng.2015.06.005.

[11] M. P. Herrera, J. Molines, and J. R. Medina, "Hydraulic stability of nominal and sacrificial toe berms for mound breakwaters on steep sea bottoms," *Coastal Engineering*, vol. 114. pp. 361–368, 2016. doi: 10.1016/j.coastaleng.2016.05.006.

[12] A. Etemad-Shahidi, M. Bali, and M. R. A. van Gent, "On the toe stability of rubble mound structures," *Coast. Eng.*, vol. 164, p. 103835, 2021, doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103835.

[13] M. Shafieefar, M. R. Shekari, and B. Hofland, "Influence of toe berm geometry on stability of reshaping berm breakwaters," *Coast. Eng.*, vol. 157, p. 103636, 2020, doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103636.

[14] S. A. Hughes, *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*, vol. 7. World Scientific, 1993.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.70]