بررسی آزمایشگاهی پایداری موج‌شکن‌های توده‌سنگی با آرمور پیشنهادی بتنی جدید

سیدمرتضی مرعشیان[۱] ، مهدی عجمی[۲*] ، روح‌الله امیرآبادی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم؛ seyedmorteza.marashian@gmail.com
[۲] استادیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود؛ adjami@shahroodut.ac.ir
[۳] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم؛ r.amirabadi@qom.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

کلمات کلیدی:
تست آزمایشگاهی
موج‌شکن توده‌سنگی
آرمور پیشنهادی بتنی جدید
پایداری
خسارت پیش‌رونده

چکیده

آرمورها نوعی لایه محافظ تهیه شده از سنگ یا بتن هستند که در ساخت موج‌شکن‌ها یا خطوط ساحلی استفاده می‌شوند و با الگوی خاص چینش منظم یا نامنظم در موج‌شکن‌ها یا سواحل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. آسیب لایه آرمور در مواجه با امواج به عنوان مهم‌ترین حالت خرابی در قواعد طراحی موج‌شکن‌های توده‌سنگی بیان شده است. از آنجا که ساخت موج‌شکن پروژه ای پر هزینه است، پایداری این سازه در طول عمر بهره‌برداری بسیار حائز اهمیت خواهد بود. این مطالعه در بر دارنده نتایج بررسی آزمایشگاهی پایداری موج‌شکن توده‌سنگی پوشش داده شده با لایه آرمور متشکل از بلوک‌های آرمور جدید است. در این آزمایش‌ها که با استفاده از امواج نامنظم انجام شده است، تأثیر پارامترهای ارتفاع مشخصه امواج، پریود امواج و تغییرات سطح تراز آب بر روی پایداری این قطعات آرمور بتنی را مورد بررسی قرار داده است. نتایج بدست آمده از تخریب لایه آرموری در قالب پارامتر خسارت نسبی (N_{od}) ارائه شده است که پایداری آرمور با افزایش مقادیر ارتفاع مشخصه و پریود امواج کاهش یافته و لایه آرمور موج‌شکن توده‌سنگی خسارت خواهد دید. همچنین تاثیرات خسارت پیش‌رونده بر سایر اجزا موج‌شکن در مواجه با اندرکنش موج و سازه ارزیابی شد و نتایج این بررسی نشان دهنده کارایی آرمور پیشنهادی بتنی جدید است.

Experimental Evaluation of the Stability of Rubble Mound Breakwater with New Recommended Concrete Armor

Seyed Morteza Marashian[1], Mehdi Adjami [2*], Rouhollah Amirabadi[3]

[1] Ph.D. student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Qom; seyedmorteza.marashian@gmail.com
[2] Assistant Professor, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology; adjami@shahroodut.ac.ir
[3] Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Qom; r.amirabadi@qom.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 12 Jan. 2022
Accepted: 18 Jun. 2022

Keywords:
Experimental Test
Rubble-mound Breakwater
New Recommended Concrete Armor
Stability
Progressive Damage

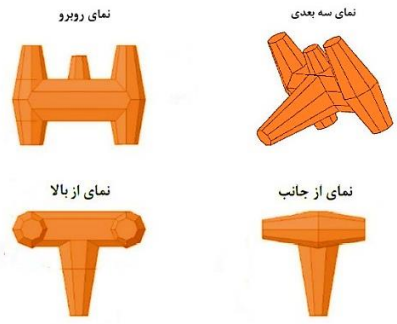
ABSTRACT

Armors are a kind of protective layer made of stone or concrete, used in breakwater constructions or coastal lines, arrayed with specific regular or irregular pattern on the breakwater or the coast. Armor damage due to wave attack is the principal failure mode to be considered when designing conventional rubble mound breakwaters. Since the cost of breakwater construction is high, the stability of this structure during its service life is important. This study includes the results of a experimental study stability of rubble mound breakwater covered with armor layers consisting of parsian national armor. In these experiments using irregular wave, the effect of significant wave height, wave period and water level changes on the stability of these concrete armor parts. The results obtained from the damage of the armor layer in the form N_{od} are presented that the stability of the armor decreases with increasing values of significant wave height and wave period and the armor layer of the rubble mound breakwater will be damaged. The effects of progressive damage on other breakwater components against wave interaction were also evaluated and the results of this study show the efficiency of this New Recommended Concrete Armor.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]

۱ – مقدمه

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که جهت ایجاد آرامش در حوضچه بنادر، پهلوگیری امن شناورها، کاهش انرژی ناشی از امواج و حفاظت از سواحل در مقابل امواج ساخته می‌شوند. از آنجایی که هزینه ساخت موج‌شکن بالا است، طراحی مناسب و بهینه این سازه از منظر پایداری و اقتصادی بسیار حاضر اهمیت است. مطالعات صورت گرفته در زمینه پایداری، تخریب، جابجایی و آسیب‌های پیش‌رونده از منظر اقتصادی و کارایی‌سنجی موج‌شکن‌ها بسیار حائز اهمیت است. عدم آشنایی با میزان تخریب در موج‌شکن‌های توده‌سنگی می‌تواند باعث شود که در طول دوره طراحی و بهره‌برداری از آن‌ها امکان دریافت پاسخ مناسب سازه‌ای کاهش یابد و در واقع طراحی موج‌شکن بدون آگاهی از میزان تخریب امکان‌پذیر نیست. آرمورهای بتنی به عنوان مناسب‌ترین گزینه جایگزین مصالح سنگی در لایه حفاظ موج‌شکن‌ها شناخته می‌شوند. با هدف کاهش هزینه‌های ساخت موج‌شکن توده‌سنگی یا عدم دسترسی به مصالح مناسب از معادن قرضه استفاده از آرمور بتنی جایگزینی مناسب برای آرمور سنگی بشمار می‌آید. امروزه استفاده از قطعات بتنی نظیر دالاس[۱]، تتراپاد[۲]، تری‌بار[۳] و ... به عنوان لایه محافظ در موج‌شکن‌ها رایج است. این قطعات بتنی باید از نظر شکل هندسی و وزن به گونه‌ای باشند که بتوانند در هنگام برخورد امواج به آن‌ها پایداری خود را حفظ کنند. از آنجایی که استفاده از آرمورهای رایج بتنی به دلیل شرایط تحریم و پرداخت هزینه‌های حقوق مالکیت با مشکلات متعددی روبرو است، ساخت و ارزیابی آرمور بتنی جدید ضرورتی غیر قابل انکار است. این آرمور با الهام از آرمور CORE-LOC و بازطراحی آن به شکلی منحصر به فرد و انجام مطالعات عددی به مرحله ارزیابی آزمایشگاهی رسیده است. در این مطالعه سعی شده است تا بر اساس مدلسازی فیزیکی پایداری قطعات آرمور بررسی و ارزیابی گردد. شکل ۱ نمایی از آرمور پیشنهادی بتنی جدید را نشان می‌دهد.



شکل ۱ – تصویر شماتیک آرمور پیشنهادی بتنی جدید

۲- مطالعات انجام شده

در این بخش به معرفی مطالعات صورت گرفته در زمینه ارزیابی پایداری آرمور بتنی و تخریب ناشی از اندرکنش موج و سازه پرداخته خواهد شد. از وظایف اصلی لایه آرمور اتلاف انرژی امواج به منظور کاهش بالاروی، کاهش روگذری و انعکاس و محافظت از مصالح فیلتر و هسته در برابر امواج است. بورچارت (۱۹۸۷)، در مورد خرابی موج‌شکن‌ها نتایجی را منتشر کرد که طی این مطالعات بیان نمود طراحی و ساخت موج‌شکن‌ها یک کار کلاسیک در مهندسی ساحل است. بورچارت با بررسی خرابی در موج‌شکن‌های توده‌سنگی به توسعه پایداری لایه آرمور آن‌ها پرداخت. در بررسی‌های صورت گرفته ریزش بخش‌های عمودی تاج موج‌شکن هنگام مواجه با امواج، شکستن قطعات آرمور سنگی و بتنی، عدم توجه به دانه‌بندی مناسب لایه‌های موج‌شکن و خروج سنگدانه‌های ریزتر از لایه آرمور، فرسایش بخش فوقانی موج‌شکن توسط پدیده روگذری موج و فرسایش لایه آرموری موج‌شکن توسط اندرکنش موج و سازه را از موارد مهم در خرابی موج‌شکن دانست [۱]. بورچارت و همکاران (۱۹۹۳)، به طراحی واحدهای آرمور دالاس پرداختند و گزارش دادند انواع واحدهای آرمور مانند تتراپاد و دالاس می‌توانند به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. بسیاری از خرابی‌های اخیر موج‌شکن‌های توده‌سنگی نشان می‌دهد که بین یکپارچگی ساختاری واحدها و پایداری هیدرولیکی (مقاومت در برابر جابجایی) لایه‌های آرمور تعادل وجود ندارد. مطالعات یاد شده فقط به آرمور دالاس پرداخته است و اولین نمودارها و فرمول‌های طراحی را ارائه کرده است که در آن فشارهای استاتیکی، شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای و همچنین معیارهای پایداری هیدرولیکی اعمال شده‌اند. همچنین بورچارت و همکاران (۱۹۹۸)، به بررسی تأثیر نفوذپذیری هسته بر ثبات لایه آرمور آکروپاد[۴] در خطوط ساحلی، سازه‌ها و موج‌شکن‌ها پرداختند [۳]. ملبی و همکاران (۱۹۹۸) بیان کردند روابط متغیرهای خرابی به عنوان تابعی از میانگین تخریب، امکان پیش-بینی شکل پروفیل و تغییرپذیری تخریب را فراهم می‌کند[۴]. یک معادله تجربی اولیه نیز توسط ایشان برای پیش‌بینی پیشرفت زمانی میانگین منطقه تخریب شده به عنوان تابعی از آمار موج - دامنه زمانی به عنوان پیشنهاد ارائه شد. در این مطالعات مهم‌ترین پارامترهای موثر بر پیش‌بینی تخریب موج‌شکن‌های توده‌سنگی ارتفاع موج مشخصه و قطر اسمی مصالح روی شیب موج‌شکن است. ون‌درمیر (۱۹۹۹)، شیب‌های صخره‌ای و سواحل ماسه‌ای را تحت برخورد امواج در دانشگاه دلفت هلند مورد بررسی قرار داد و در همان سال آرمورهای مکعبی[۵] و تتراپاد را ارزیابی کرد [۵].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]

چگینی و همکاران (۲۰۰۶)، بررسی پایداری موج‌شکن‌های توده-سنگی با لایه‌های آرمور متشکل از بلوک‌های آنتی‌فر[۶] را مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش‌ها که با استفاده از امواج نامنظم انجام شده است، تأثیر پارامترهای موج و شیب سازه بر روی پایداری این قطعات آرمور بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت و روابط پایداری قطعات مزبور استخراج گردیده است. سرانجام مقایسه‌ای بین این معادلات و روابط پایداری که به وسیله ون‌درمیر (۱۹۹۹) در مورد قطعات مکعبی به دست آمده، صورت گرفته شد [۶]. موسوی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی آزمایشگاهی واحدهای آرمور بتنی آنتی‌فر پرداختند. یافتند که یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این آرمور استفاده در آرایش منظم و نامنظم است [۷]. هنری‌کوئس و همکاران (۲۰۱۶) به منظور ارزیابی سطح تخریب لایه آرموری موج‌شکن توده‌سنگی از روش فوتوگرامتریک[۷] برای ثبت تخریب استفاده کردند که خود نشان دهنده استفاده روش‌های نوین به منظور ارزیابی سطح آسیب در تصویربردای هنگام آزمایش است [۸]. فورتس و همکاران (۲۰۱۹) گسترش آسیب در موج‌شکن‌های توده-سنگی تحت ثاثیر طوفان‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی را مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار دادند. تغییرات سطح تراز آب و ارتفاع امواج از پارامترهای تاثیرگذار در شرایط آزمایشگاهی تشکیل وقایع آب و هوایی در نظر گرفته شد. ارزیابی آسیب به‌وسیله روش شمارش و جابجایی متعارف و ثبت تصاویر توسط تکنیک فتومتریک‌استریو[۸] انجام شده است. نتایج تخریب به صورت پارامتر آسیب (S) و درصد جابجایی واحدهای آرمور ارائه شده است [۹]. کامپوس و همکاران (۲۰۲۰) به مرور تاریخچه ارزیابی خسارت، و اندازه‌گیری تخریب در موج‌شکن‌های توده‌سنگی پرداختند. در مطالعه صورت گرفته توسط کامپوس که گستره آن سال ۱۹۳۳ تا ۲۰۲۰ را شامل می‌شود، بیان نمود که در طراحی آینده موج‌شکن‌های توده‌سنگی به منظور افزایش طول عمر مفید سازه و کاهش اثرات تخریب از روش‌های مبتنی بر کنترل ریسک استفاده خواهد شد. به منظور دستیابی به این مهم، مدل‌های احتمالی پیشرفت آسیب حائز اهمیت هستند [۱۰]. مارس و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی آزمایشگاهی آسیب وارده بر آرمور موج‌شکن توده‌سنگی در شرایط عمق محدود و در مواجه با شکست امواج پرداختند. آن‌ها دریافتند که در زمان برخورد امواج با لایه آرموری آسیب ابتدا در وجه شیب‌دار موج‌شکن ظاهر می‌شود و در صورت ادامه روند تخریب در بخش تاج و وجه پشتی گسترش می‌یابد. همچنین سرعت رخداد و گسترش آسیب در تاج و وجه پشتی موج‌شکن بیشتر از وجه شیب‌دار است و این به دلیل تاثیر آرمور واقع شده در تاج موج‌شکن بر اتلاف انرژی امواج است [۱۱].

در تحقیق حاضر بررسی آزمایشگاهی پایداری موج‌شکن‌های توده-سنگی با لایه آرمور پیشنهادی بتنی جدید پرداخته شده است. از اینرو در ابتدا در بخش روش‌شناسی مطالعات تعاریف مربوط به تخریب و روابط ارزیابی آن ارائه شده است. با معرفی شرایط آزمایشگاهی و مشخصات مدل فیزیکی به بیان نحوه ساخت و برپایی شرایط آن‌ها پرداخته شده است. همچنین با بررسی نتایج صحت-سنجی؛ تفسیر نتایج ۱۷ سناریوی آزمایش به صورت تحلیلی انجام شده است. این مطالعه از نظر بررسی آرمور پیشنهادی بتنی جدید به عنوان ساختاری ابتکاری در میان آرمورهای بتنی و ارزیابی پایداری آن در قالب نتایج مدون آزمایشگاهی به منظور بهره‌برداری و اجرای آن در بندر پارسیان واقع در خلیج فارس حائز اهمیت است.

۳- روش‌شناسی مطالعات

پارامترهای حاکم بر ارزیابی پایداری موج‌شکن‌های توده‌سنگی از ترکیب پارامترهای مربوط به بارگذاری هیدرولیکی و ساختار تشکیل‌دهنده موج‌شکن تشکیل شده است. این پارامترها شامل[۱۲]:

- اندرکنش سازه موج‌شکن با موج و جریان
- مشخصه ساختاری آرمور
- مشخصات ابعادی، ساختاری و سطح مقطع موج‌شکن
- عملکرد و واکنش سازه موج‌شکن

با توجه به واکنش موج‌شکن‌ها هنگام جابجایی و تحرکات آرمور در برابر تاثیرات ناشی از بارگذاری موج و جریان (بارگذاری‌های هیدرولیکی) که شامل پارامترهای روگذری، تنش برشی و تغییرات سرعت جریان، تغییرات سطح تراز آب و ارتفاع موج است؛ (با توجه به عدم شبیه‌سازی جریان در فلوم آزمایشگاهی) در مطالعه حاضر اثر تغییرات سطح تراز آب (عمق)، ارتفاع موج و پریود آن مورد بحث قرار گرفته است. محورهای تحقیق و توسعه آرمورهای بتنی تمرکز بر افزایش مقاومت آن‌ها بوسیله وزن آرمور، اثرات قفل و بست[۹] آرموهای مجاور و اصطکاک بین اجزای تشکیل دهنده لایه آرمور است که بخش قابل توجهی از مقاومت لایه آرموری را شامل می-شود.

معمولا دو روش برای تعیین میزان خسارت در مدل‌های سازه‌های توده‌سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها شامل شمارش تعداد قطعات منفرد آرمور که از جای خود بیرون آمده‌اند و یا تعیین میزان تغییرات در سطح، که در محل جابجایی قطعات آرمور واقع می‌شوند [۱۳]. روش شمارش قطعات آرمور جابجا شده، مستلزم شناخت و تعیین روش‌هایی برای تعیین قطعات آرمور جابجا شده است. یک شیوه معمول، استفاده از قطعات آرمور رنگی است. برای تعیین بهتر تعداد قطعات جابجا شده از عکس‌برداری و فیلم‌برداری نیز استفاده می‌شود. تعیین خسارت با استفاده از بررسی میزان تغییرات حجم با مقایسه نیم‌رخ شیب لایه آرمور قبل و بعد از آزمایش در یک ناحیه مشخص می‌شود. بدین منظور مقطع مورد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]

آزمایش باید به ابعاد مناسب شبکه‌بندی شود. به‌طوری‌که تعیین میزان تغییرات نیم‌رخ با دقت خوبی صورت پذیرد. درصد خسارت را می‌توان با استفاده از روش‌های گوناگونی تعریف کرد. چند معیار خسارت (آسیب) در ادامه ارائه شده است. هادسون[10] خسارت را به صورت نسبت قطعات آرمور بیرون آمده از جای خود به تعداد کل قطعات آرمور سطح لایه، بر حسب درصد تعریف می‌کند. توروم[11] خسارت به صورت نسبت کاهش در ضخامت میانگین لایه آرمور بعد از آزمایش به ضخامت میانگین لایه آرمور قبل از آزمایش تعریف کرده است [۱۵].

رفتار سازه‌های پایدار ایستا را بوسیله میزان آسیب توصیف می‌نمایند که پارامتر جابه‌جایی آرمور را در بر بگیرد. آسیب را می‌توان از طریق سطح فرسایش یافته حول سطح ایستابی توصیف نمود. وقتی که این سطح فرسایش به اندازه آرمورها ارتباط داده شود، یک سطح تخریب بدون بعد را می‌توان نشان داد که مستقل از اندازه سازه (شیب و ارتفاع) باشد. لازم به ذکر است در ارزیابی آسیب بر روی وجه جلویی موج‌شکن؛ بررسی ناحیه فعال موج که شامل متوسط تراز سطح آب (MSL) و به میزان ارتفاع مشخصه موج (H_S) بالا و پایین این تراز است، حائز اهمیت هست.

رابطه (۱) بیانگر خسارت لایه آرمور در سازه‌های توده‌سنگی و رابطه (۲) معادل قطر اسمی آرمور است که به صورت زیر بیان شده است:

$$S=A_e/(D_{n50})^2 \quad (۱)$$

$$D_{n50}=(W_{50}/\rho_a)^{1/3} \quad (۲)$$

تعبیر فیزیکی معیار خسارت S، تعداد مربعاتی با بعد D_{n50} در ناحیه فرسایش یافته است. به عبارت دیگر تعداد واحدهای آرموری با بعد D_{n50} و جابجا شده به اندازه یک D_{n50} است [۱۲]. لازم به ذکر است وضعیت در معرض آسیب قرار گرفتن لایه فیلتر معادل گسیختگی در نظر گرفته شده است. ون‌درمیر خسارت را در قطعات آرمور بتنی با استفاده از پارامتر خسارت نسبی (N_o)، تعریف کرد. طوری که N_o برابر تعداد قطعات جابجا شده و یا تکان خورده در پهنایی به اندازه یک قطر اسمی قطعه آرمور است. قطر اسمی (D_n) برای مکعب‌ها برابر بعد مکعب، برای تتراپادها معادل ۰/۶۵D (طوری که D برابر با ارتفاع قطعه آرمور است)، برای آکروپادها معادل ۰/۶D و برای دالاس‌ها برابر ۰/۵۴D است. فن درمیر حرکت قطعات آرمور را به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

N_{od} : تعداد قطعاتی که از لایه آرمور خارج شده‌اند. به عبارت دیگر قطعاتی که جابجایی آن‌ها بیش از یک برابر D_n بوده است.

N_{or} : تعداد قطعاتی که در جای خود تکان خورده‌اند.

N_{omov} : تعداد کل قطعات حرکت کرده ($N_{omov}=N_{od}+N_{or}$)

N_{od} را می‌توان با معیار خسارت (S) مقایسه کرد. هرچند که (S) شامل جابجایی و نشست هم می‌شود [۱۵]. طبقه بندی خسارت در موج‌شکن‌های توده‌سنگی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ – طبقه‌بندی خسارت در موج‌شکن‌های توده‌سنگی

طبقه‌بندی خسارت	درصد قطعات جابجا شده	شرح خسارت
خسارت کم	۰ تا ۳	چند قطعه از لایه آرمور اولیه جابجا می‌شوند ولی شکاف بوجود آمده از ۴ قطعه بزرگتر نیست. لایه زیرین سالم باقی می‌ماند.
خسارت متوسط	۳ تا ۵	شکاف ایجاد شده بزرگتر از ۶ قطعه نیست. قطعات لایه زیرین کمی جابجا می‌شوند.
خسارت زیاد	۵ تا ۳۰	لایه فوقانی در سطح وسیعی جابجا می‌شوند. جابجایی لایه زیرین بزرگتر از ۲ قطعه نیست.
خسارت نهایی	بیش از ۳۰	لایه آرمور فوقانی و لایه زیرین در سطح وسیعی حرکت می‌کنند و مصالح زیرین قابل مشاهده خواهند بود.

هنگامی که از قطعات سنگی در لایه آرمور سازه‌های توده‌سنگی استفاده می‌شود، به طور معمول خسارت سازه و یا خرابی آن در اثر تنش‌های بوجود آورنده شکست سنگ‌های آرمور به عنوان یک مسئله اساسی مورد بررسی قرار نمی‌گیرد [۱۴]. در این مطالعه به گزارش تعداد آرمورهای شکسته شده نیز پرداخته می‌شود. همچنین پارامترهای موثر بر پایداری قطعات محافظ شامل؛ ارتفاع موج، پریود موج، تعداد امواجی که به سازه برخورد می‌کنند، شیب قرارگیری قطعات (شیب سازه) و تخلخل لایه پوششی است که هدف این مطالعه بررسی اثر پارامتر ارتفاع موج و پریود موج و تغییرات عمق بر پایداری قطعات آرمور است و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

۴- برپایی مدل آزمایشگاهی

پایداری موج‌شکن توده‌سنگی با لایه‌های آرمور جدید در آزمایشگاه ملی دریایی ایران با فلوم موج مجهز به موجساز پیستونی، انجام شده است. عمق آب فلوم برابر با ۴ متر و دستگاه موج‌ساز توانایی ایجاد موج تا ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر را داراست. همچنین طول فلوم موج ۴۰۰ متر و عرض آن برابر ۶ متر است. باتوجه به استقرار صفحات مشبک جاذب موج در انتهای فلوم، بخش قابل توجهی از انرژی موج در بخش انتهایی مستهلک خواهد شد. موجساز آزمایشگاه قابلیت تولید امواج دوبعدی به صورت منظم و نامنظم در طیف‌های مختلف مانند جانسوآپ را دارا است. شکل ۲ نمایی از موج منظم تولید شده در فلوم را نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]



شکل ۲ - موج منظم تولید شده توسط موجساز در فلوم آزمایشگاهی

طول مدل فیزیکی موج‌شکن ۱/۲۰ متر لحاظ شده است و در وسط فلوم (فاصله ۲۰۰ متری از موجساز) قرارگرفته و همچنین از دو طرف تا دیواره‌های انتهایی فلوم از سیستم جاذب موج استفاده شده است.

۴-۱- انتخاب مقیاس مدل و اثرات مقیاس

انتخاب مقیاس برای تمام مدل‌های سازه‌های ساحلی، با توجه به دو موضوع صورت می‌گیرد. اول آن که هرچه مدل با مقیاس بزرگتر ساخته شود، اثرات مقیاس کاهش پیدا می‌کند. دوم اینکه علیرغم این واقعیت، ساخت مدل‌های بزرگ مستلزم صرف هزینه بیشتر و امکانات وسیع‌تر است که با توجه به ساخت مدل فیزیکی در فلوم آزمایشگاهی با مشخصات عنوان شده؛ مدل فیزیکی موج‌شکن توده-سنگی با آرمور جدید بزرگ‌مقیاس محسوب می‌شود. محدوده قابل قبول مقیاس برای سازه‌های توده‌سنگی، به عواملی چون اندازه قابل ساخت قطعه آرمور مدل، عمق آب قابل تامین در حوضچه یا فلوم و ظرفیت تولید موج بستگی دارد. هادسون پیشنهاد کرد که محدوده مقیاس طولی مورد استفاده برای آزمایش‌های پایداری سازه‌های توده‌سنگی بین ۱:۵ تا ۱:۷۰ باشد [۱۴].

اثرات مقیاس در مدل‌های هیدرودینامیکی موج‌کوتاه عمدتا ناشی از این فرض در حین مقیاس کردن هست که گرانش نیروی فیزیکی غالبی است و با نیروهای اینرسی به تعادل می‌رسد. مقیاس کردن به صورت اشتباه بر اساس مقیاس فرود؛ این نتیجه را به همراه دارد که دیگر نیروهای فیزیکی ویسکوزیته، الاستیسیته، کشش سطحی و ... با این نیروها در فرآیندهای فیزیکی نقش و مداخله کمی دارند. [۱۶]. در مدل‌های هیدرولیکی موج‌کوتاه که با توجه به معیار فرود مقیاس می‌شوند، عدم همسانی نیروهای لزجت و نیروهای کشش سطحی می‌تواند به اثرات مقیاسی مانند انعکاس موج، انتقال موج، اتلاف اصطکاکی انرژی موج و اتلاف شکست موج منتهی شود. 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 مدل‌های سازه‌های توده‌سنگی ساحلی هستند. معمولا هرچه مدل با مقیاس کوچک‌تر ساخته شود، این اثرات نمود بیشتری پیدا می-کنند. اثر لزجت، انعکاس و انتقال موج، چگالی آب و اصطکاک از اثرات مقیاس مهم در فرآیند آزمایشگاهی هستند.

مهم‌ترین اثر مقیاس بر مدل‌های فیزیکی سازه‌های توده‌سنگی، نیروی لزجت ناشی از جریان عبوری از درون فیلتر و هسته سازه است. اگر مقیاس‌های متعارف برای مدل‌های پایداری سازه‌های توده‌سنگی در نظر گرفته شوند، اثرات مقیاسی لزجت برای لایه اول و تا حدی لایه دوم آرمور مهم نیست. زیرا عدد رینولدز بر اساس ابعاد قطعات آرمور به دست آمده و بزرگی آن‌ها برای ایجاد جریان آشفته در این لایه‌ها کفایت می‌کند. عدد رینولدز در رابطه (۳) آورده شده است که l_a مشخصه طولی قطعه آرمور است.

$$R=\frac{\sqrt{gH}.l_a}{V}\ ,\quad V_w=\sqrt{gH}\ ,\quad l_a=(\frac{W_a}{\gamma_a})^{1/3} \qquad (۳)$$

ون‌درمیر در مطالعات خود بیان می‌کند در صورت استفاده از D_{n50} و H_S در رابطه رینولدز، اثرات لزجت برای لایه آرمور دارای اعداد بزرگتر از $۱۰^۴ \times ۴$ ناچیز است [۱۴]. شبیه‌سازی مناسب انعکاس و انتقال موج، به‌ویژه برای سازه‌های نفوذپذیر که از طریق شیب و تخلخل سطحی موجب استهلاک انرژی می‌شوند بسیار مهم است. استفاده از مدل‌های با مقیاس بزرگتر، روشی برای کاهش اثرات مقیاسی انعکاس و انتقال موج است. در ارتباط با اثر چگالی به دلیل استفاده از آب معمولی به جای آب شور دریا در فلوم آزمایشگاهی می‌توان با لحاظ کردن چگالی آب معمولی در هنگام تعیین وزن مصالح لایه‌ها اثر مقیاس چگالی آب را حذف نمود. اثر مقیاس اصطکاک، شامل اصطکاک بستر، اصطکاک ناشی از برخورد بین قطعات آرمور مجاور و زبری سطح است. ملاحظه اثرات مقیاسی اصطکاک بستر در مدل سازه‌های ساحلی منوط به تولید موج در فاصله‌ای طولانی است. که به دلیل عمق ۴ متری فلوم موج مورد استفاده در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. اصطکاک ناشی از برخورد قطعات آرمور در مدل ممکن است بیشتر از نمونه واقعی باشد و در موج‌شکن‌های واقعی معمولا این اصطکاک در مقایسه با سایر نیروهای مقاوم در برابر امواج ناچیز محسوب می‌شود. همچنین برای جبران اختلاف زبری قطعات در نمونه واقعی و مدل، سعی می‌شود که با استفاده از رنگ‌آمیزی سطح قطعات، سطوح صاف‌تری در قطعات مدل بوجود آورد که در مدلسازی صورت گرفته قطعات به صورت رنگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۴].

این آرمور به منظور استفاده با شرایط محیطی بندر پارسیان در خلیج فارس با مقیاس ۱:۲۰ بر اساس دوره بازگشت موج ۱۰۰ ساله مدلسازی شده است که عمق پای سازه (d) برابر ۲۳ متر، ارتفاع موج در پای سازه (H_d) معادل ۵/۴۰ متر و پریود موج در پای سازه ۹ ثانیه هست. بر اساس مقیاس گفته شده پارامترهای هیدرولیکی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]

در ابعاد آزمایشگاهی در جدول ۲ آورده شده است و در جدول ۳ مشخصات آرمور در مقیاس آزمایشگاهی ذکر شده است. لازم به ذکر است شیب پای سازه مدلسازی شده در فلوم ۵ درصد هست.

جدول ۲- ابعاد آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی در مقیاس ۱:۲۰

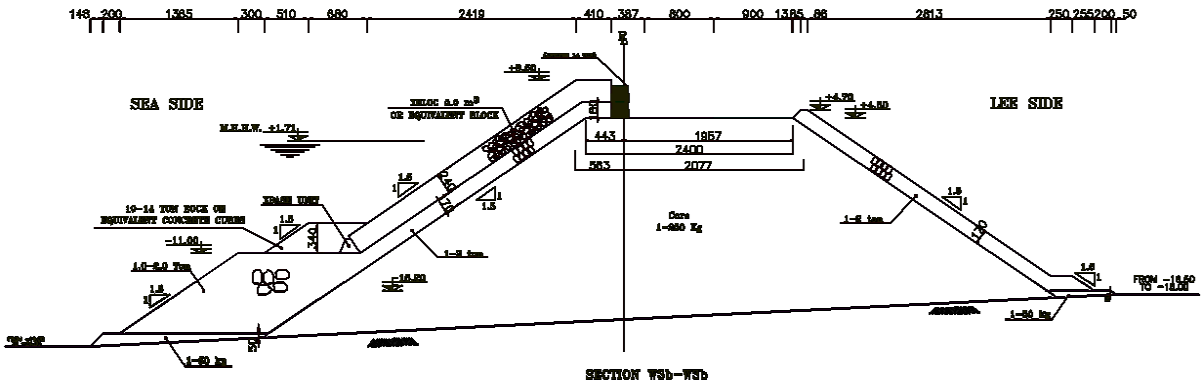
پارامتر	مقدار [m]	پارامتر	مقدار [m]
عمق آب پای سازه [d]	۱/۱۵	ارتفاع موج پای سازه [H_d]	۰/۲۸
ارتفاع موج آب عمیق [H_0]	۰/۳۳	طول موج پای سازه [L]	۵/۴۸
طول موج آب عمیق [L_0]	۶/۳۲	عمق پایانی [h_c]	۰/۲۳

جدول ۳- مشخصات آرمور مدلسازی شده در مقیاس آزمایشگاهی

کمیت [یکا]		مقدار
جرم حجمی آرمور [kg]		۰/۸۵۵
چگالی	[kg/m^3]	۱۰۰۲
حجم	[m^3]	۳/۷۸۷۵ × ۱۰$^{-۴}$

۴-۲- مشخصات مدل آزمایشگاهی

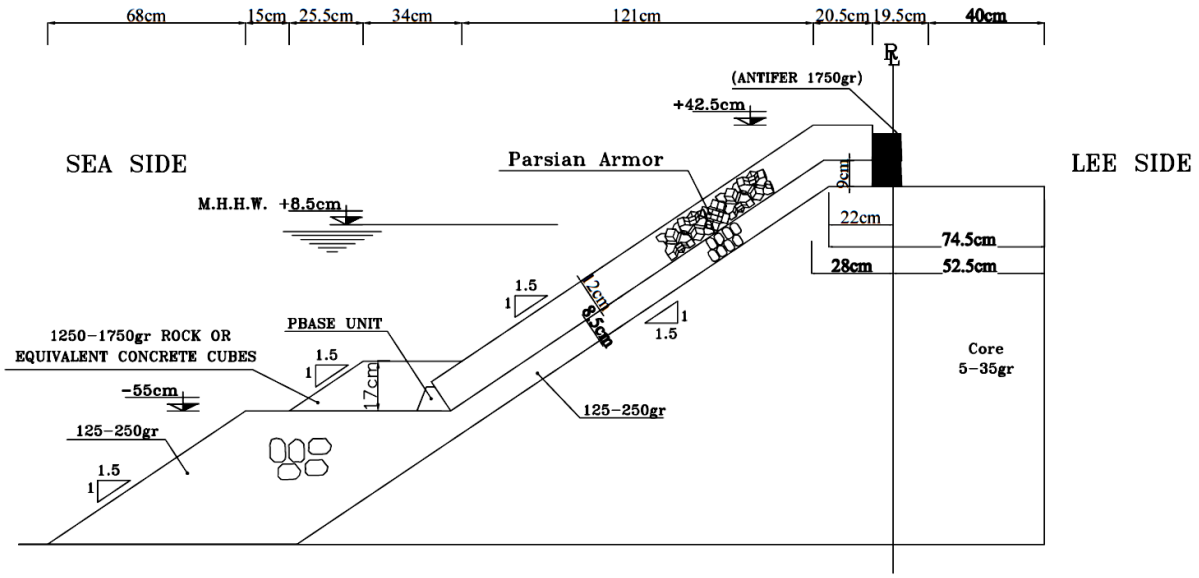
در این بخش به معرفی مقطع اصلی موج‌شکن بندر پارسیان و نحوه جایگذاری مصالح و آرمور مدل فیزیکی در محیط آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. شکل ۳ نمایانگر ابعاد مقطع اصلی موج‌شکن بندر پارسیان است. همچنین در شکل ۴ ابعاد مقطع مدل آزمایشگاهی و شکل ۵ پلان و نحوه چینش مصالح آرمور، فیلتر و هسته در فلوم آزمایشگاهی آورده شده است.



شکل ۳ – ابعاد مقطع اصلی موج‌شکن بندر پارسیان

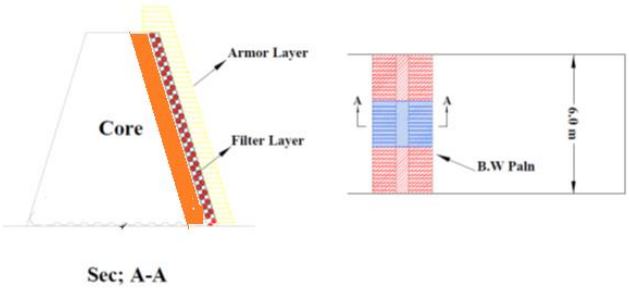
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]

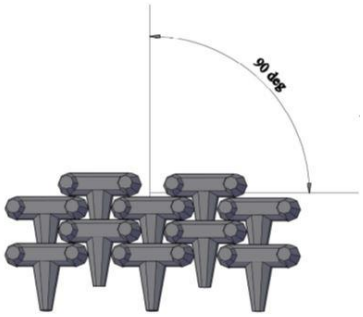


SECTION W3b-W3b

شکل ۴ – ابعاد مقطع مدل آزمایشگاهی موج‌شکن بندر پارسیان



شکل ۵ - پلان و نحوه چینش مصالح آرمور، فیلتر و هسته در فلوم آزمایشگاهی (بخش آبی: محل اجرا مدل فیزیکی)



شکل ۶ – نحوه قرارگیری آرمور جدید به صورت یک لایه با زاویه ۹۰ درجه

در شکل ۵ بخش آبی رنگ محل قرارگیری آرمور در مقطع موج-شکن است. با توجه به عرض ۶ متری فلوم و کاهش در هزینه‌های ساخت، بخش‌های قرمز رنگ به عنوان عبور دهنده و یا جاذب موج استفاده خواهد شد. لایه هسته در نظر گرفته شده برای مقطع A-A به صورت یک جعبه ذوزنقه‌ای شکل معادل مقیاس مدل آزمایشگاهی برای سهولت در اجرا و انجام آزمایشات به کار گرفته شده است. همچنین برای رسیدن به نسبت تخلخل ۰/۴۱ در قسمت مرکزی، لایه مغزی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر بکار رفته است که اندازه قطر اسمی برابر با ۲ تا ۴ سانتی‌متر را در بر می‌گیرند. در ساخت مدل فیزیکی از یک لایه آرمور جدید با چینش منظم به صورت ۹۰ درجه مطابق شکل ۶ استفاده شده است.

۴-۳- ساخت مدل آزمایشگاهی

با توجه به مقیاس گفته شده برای مصالح هسته، از سنگ‌های شسته شده در محدوده وزنی ۵ تا ۳۵ گرم، برای مصالح لایه فیلتر، از سنگ‌های شسته شده در محدوده وزنی ۱۲۵ تا ۲۵۰ گرم، برای مصالح لایه نگهدارنده آرمور، از سنگ‌های در محدوده وزنی ۱۲۵۰ تا ۱۷۵۰ گرم و به جهت تامین بخش پای سازه موج‌شکن از سنگ-های شسته شده تا وزن ۶ گرم استفاده شده است. در شکل ۷ نمایی از طیف سنگدانه‌های مورد استفاده قابل مشاهده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]


الف: وزن‌کشی مصالح سنگی
ب: مصالح لایه هسته
ج: مصالح لایه فیلتر
د: مصالح لایه نگهدارنده آرمور

شکل ۷ – دانه‌بندی اجزای تشکیل‌دهنده مدل فیزیکی بندر پارسیان

برای ساخت آرمور طبق مشخصات مورد محاسبه از قالب‌های وکیومی با هدف تسریع در فرآیند ساخت ۹۰۰ قطعه آرمور استفاده شده است که در شکل ۸ مراحل ساخت قالب وکیومی تا قالب‌گیری آرمورها و در انتها رنگ‌آمیزی آن‌ها نمایش داده شده است.


الف: قالب پایه به جهت ساخت قالب وکیومی
ب: نمونه قالب ساخته شده
ج: قالب‌گیری آرمورهای مدل
د: جداسازی آرمورها از قالب
ه: نمونه آرمور رنگ‌آمیزی شده
و: رنگ‌آمیزی آرمورها

شکل ۸ – مراحل ساخت آرمور جدید

به منظور قرارگیری مدل فیزیکی از زیرسازه فولادی در فلوم آزمایشگاهی با قابلیت تنظیم تراز موج‌شکن نسبت به سطح آب استفاده شده است. همچنین برای پیاده‌سازی دقیق مقطع موج‌شکن ۶ عدد قاب شابلونی ساخته شده و بر روی زیر سازه مورد نظر نصب گردید. به جهت افزایش استحکام قاب‌های شابلونی، قطعات فولادی به زیر سازه به وسیله جوش متصل گردیده است. در بخش‌های مجاور موج‌شکن (بخش قرمز رنگ مشخص شده در شکل ۵) به دلیل خاصیت استهلاکی برای امواج در هنگام تست، بدون لایه هسته در نظر گرفته شده است و صرفا لایه‌های فیلتر، آرمور و محافظ آرمور اجرا گردید. به جهت حفظ یکپارچگی بخش‌های مجاور از توری‌های مشبک فلزی برای نگهداری مصالح سنگی استفاده شده است. لازم به ذکر است در محل اجرای مدل فیزیکی (بخش آبی رنگ مشخص شده در شکل ۵) به طول ۱/۲۰ متر فاقد هرگونه توری نگهدارنده هست. روند ساخت زیر سازه و سازه موج-شکن در شکل‌های زیر به طور منظم نشان داده شده است. در شکل ۹ مراحل برپایی زیرسازه فولادی در فلوم، ساخت و نصب قاب‌های شابلونی مشخص شده است. همچنین در شکل ۱۰ توری‌های نگهدارنده مصالح در بخش‌های کناری مدل فیزیکی نشان داده شده است.


الف: برپایی زیرسازه فولادی در فلوم آزمایشگاهی
ب: ساخت قاب‌های شابلونی
ج: نصب قاب‌های شابلونی بر روی زیرسازه
د: رنگ‌آمیزی قاب‌های شابلونی بر روی زیرسازه

شکل ۹ – نمایی از مراحل برپایی زیرسازه فولادی در فلوم، ساخت و نصب قاب‌های شابلونی بر روی زیرسازه



شکل ۱۰ – نمایی از توری‌های نگهدارنده مصالح در بخش‌های کناری مدل فیزیکی

مراحل اجرای لایه‌های مختلف موج‌شکن توده‌سنگی به ترتیب در شکل ۱۱ به نمایش در آمده است. که در ابتدا از پایین‌ترین تراز شروع به چینش لایه پنجه و مصالح رسوبی جلوی پنجه شده است سپس لایه هسته اجرا گردید و بعد از هسته لایه فیلتر و نگهدارنده آرمور و در انتها لایه آرمور اجرا شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]



شکل ۱۱ – مراحل قرارگیری لایه‌های موج‌شکن در فلوم آزمایشگاهی

لازم به ذکر است مدل فیزیکی موج‌شکن در عمق ۱۰۸ سانتی‌متری معادل با جذر حداکثری منطقه طرح به آب‌اندازی شده است و اطلاعات تکمیلی در رابطه با تغییرات سطح تراز آب در منطقه طرح و مدلسازی فیزیکی در جدول ۴ آورده شده است و شکل ۱۲ نمای نهایی از به آب‌اندازی مدل فیزیکی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ – تغییرات سطح تراز آب در منطقه طرح و مدلسازی فیزیکی

تراز سطح آب	عمق در منطقه طرح [m]	عمق در فلوم [cm]
جزر حداکثر [LAT]	۲۱/۶	۱۰۸
متوسط تراز سطح آب [MSL]	۲۲/۸	۱۱۴



شکل ۱۲ – نمای نهایی از قرارگیری مدل فیزیکی در عمق ۱۰۸ سانتی‌متر

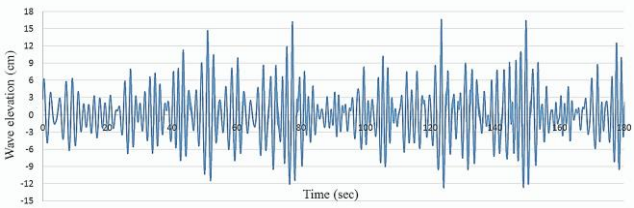
۴-۴- کالیبراسیون

به جهت تعیین ارتفاع در نزدیکی محل مدل فیزیکی، از موج‌نگار به فاصله طول موج در ۱۰ متری از پای سازه استفاده شده است. همچنین موج‌نگار قبل از برپایی مدل فیزیکی در فلوم کالیبره شده و صحت نتایج سری‌زمانی موج نامنظم تابشی از موج‌ساز و طیف جانسوآپ حاصل از آن مورد بررسی و اطمینان قرار گرفت. لازم به ذکر است برای ارزیابی و ثبت تغییرات و تخریب لایه آرمور بتنی، ناشی از تابش امواج از ۴ دوربین GOPRO با ظرفیت ضبط تصاویر معادل ۶۰ فریم بر ثانیه با کیفیت (۱۹۲۰×۱۰۸۰) Full HD از زوایای مختلف به صورت همزمان برای تصویربرداری استفاده گردید. شکل ۱۳ ادوات ثبت نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

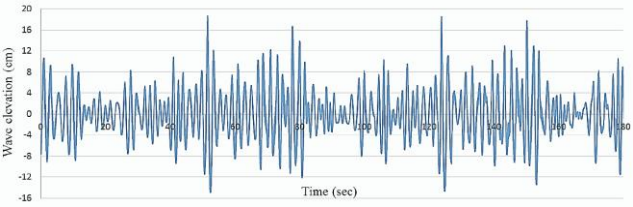


شکل ۱۳ – آمپلی‌فایرهای موج‌نگار، دوربین‌های ثبت تخریب لایه آرموری و سیستم کامپیوتری ثبت نتایج

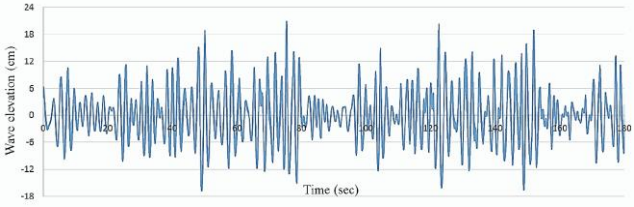
پیش از برپایی مدل فیزیکی موج‌شکن، برای اطمینان از عملکرد مناسب موج‌ساز، امواجی جهت نمونه در داخل فلوم ساخته شده است. طیف حاصل از این امواج در موقعیتی که برای نصب سازه پیش‌بینی شده بود با طیف‌های استاندارد جانسوآپ مقایسه شد. نمونه خروجی به دست آمده در شکل ۱۴ به صورت سری‌زمانی موج نامنظم و شکل ۱۵ به صورت طیف استاندارد ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌گردد تطابق بسیار خوبی بین مقادیر ثبت شده و مقادیر هدف برقرار است.



(الف) ارتفاع مشخصه ۱۶/۱۲ سانتی‌متر و دوره تناوب پیک ۱/۷۲ ثانیه



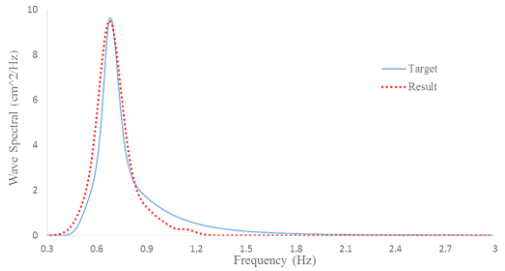
(ب) ارتفاع مشخصه ۱۸/۵۶ سانتی‌متر و دوره تناوب پیک ۱/۸۵ ثانیه



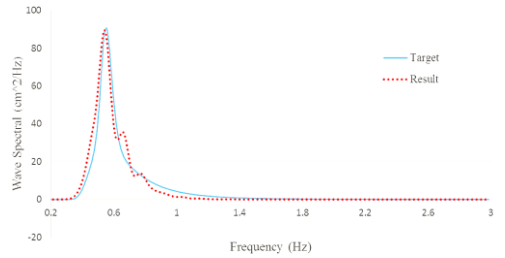
(ج) ارتفاع مشخصه ۲۲/۲۷ سانتی‌متر و دوره تناوب پیک ۲ ثانیه

شکل ۱۴ – سری‌زمانی موج نامنظم ثبت شده در فلوم آزمایشگاه

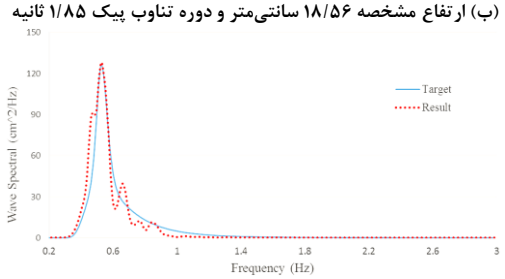
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]



(الف) ارتفاع مشخصه ۱۶/۱۲ سانتی‌متر و دوره تناوب پیک ۱/۷۲ ثانیه



(ب) ارتفاع مشخصه ۱۸/۵۶ سانتی‌متر و دوره تناوب پیک ۱/۸۵ ثانیه



(ج) ارتفاع مشخصه ۲۲/۲۷ سانتی‌متر و دوره تناوب پیک ۲ ثانیه

شکل ۱۵ – مقایسه نتایج طیف استاندارد و طیف نامنظم بدست آمده

با بررسی نمودارهای حاصل از شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد تطبیق به نسبت مناسبی میان طیف هدف و طیف حاصل از آزمایش در فلوم وجود دارد.

۴-۵- سناریوهای آزمایش

با در نظرگیری امواج در منطقه طرح و تبدیل به مقیاس آزمایشگاهی در حالت تراز متوسط تراز سطح آب (MSL) و تراز جزر حداکثری (LAT) در قالب ۱۷ سناریو امواج به مدل فیزیکی تابانده شد. در جدول ۵ سناریوهای انجام آزمایش آورده شده است.

جدول ۵ – سناریوهای انجام آزمایش

شماره آزمایش	d [cm]	H_s [cm]	T_p [sec]	Crest Level [cm]	Blocks row
۱	۱۰۸	۲۸	۲/۲۳	۰	۳
۲	۱۰۸	۱۲	۱/۷۲	۰	۲
۳	۱۰۸	۱۸	۱/۸۶	۰	۲
۴	۱۰۸	۲۰	۱/۸۶	۰	۲
۵	۱۰۸	۱۲	۱/۸۶	۰	۲
۶	۱۰۸	۱۵/۵	۱/۷۵	۰	۲
۷	۱۰۸	۲۱/۲	۱/۸۵	۰	۲
۸	۱۰۸	۲۳	۲/۱۵	۰	۲
۹	۱۰۸	۲۳	۲/۰۷	۰	۲
۱۰	۱۰۸	۲۸/۷	۲/۰۷	۰	۲
۱۱	۱۱۴	۲۰	۱/۸۶	۰	۲
۱۲	۱۱۴	۲۷	۲/۰۱	۰	۲
۱۳	۱۱۴	۳۲	۲/۲۴	۰	۲
۱۴	۱۱۴	۲۷	۲/۰۱	+۱۰	۱
۱۵	۱۱۴	۱۵	۱/۷۲	+۱۰	۱
۱۶	۱۱۴	۲۵	۱/۹۷	+۱۰	۱
۱۷	۱۱۴	۲۵	۱/۹۶	+۱۰	۱

در جدول ۴، d عمق آب پای سازه، H_S ارتفاع مشخصه موج و T_P پریود پیک موج است. در مجموع ۱۷ تست انجام گرفته است که ۱۰ تست در حالت تراز جزر حداکثری (LAT) و ۷ تست در حالت متوسط تراز سطح آب (MSL) هست و علاوه بر معیار طراحی طوفان ۱۰۰ ساله، مدلسازی طوفان ۱۲۰ ساله نیز در تست شماره ۱۳ انجام گرفته است. در ۵ تست آخر تراز تاج موج‌شکن به اندازه ۱۰ سانتی‌متر معادل با ۲ متر در مقیاس واقعی افزایش یافته و تعداد ردیف بلوک‌های تاج به ۱ کاهش پیدا نموده است.

۵- بیان و تحلیل نتایج

در سازه‌های توده‌سنگی خسارت با خروج آرمور روی سازه از جای خود به وجود می‌آید. این عمل در نهایت موجب آسیب مصالح زیرین خواهد شد. آرمورها معمولا تکان‌های درجا[9] را بدون آسیب تحمل می‌کنند. البته در مورد لایه آرمور دارای قطعات بتنی لاغر، تکان‌های درجا هم می‌تواند باعث شکستن قطعات آرمور در یک جابجایی کوچک شود. برخورد قطعات مجاور آرمور با یکدیگر، می‌تواند بر پایداری هر یک از قطعات آرمور تاثیر زیادی داشته باشد. بنابراین نباید انتظار خسارت یکنواخت در تمام عرض مدل فیزیکی را داشت. در این بخش به بیان و ارزیابی پایداری آرمورهای بتنی پرداخته می‌شود. در شکل ۱۶ نمای کلی از مقاطع قبل و بعد موج‌شکن در تمامی آزمایش‌هایی که منجر به تخریب شده است؛ ارائه شده است. همچنین در ادامه به تحلیل جامع از اثرات پارامترهای مهم در بوجود آمدن ناپایداری وجه جلویی موج‌شکن پرداخته شده است.

قبل بعد قبل بعد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]



آزمایش شماره ۹ (Tp=2.07 , Hs=23 , d=108)

قبل بعد

آزمایش شماره ۱ (Tp=2.23 , Hs=28 , d=108)

قبل بعد

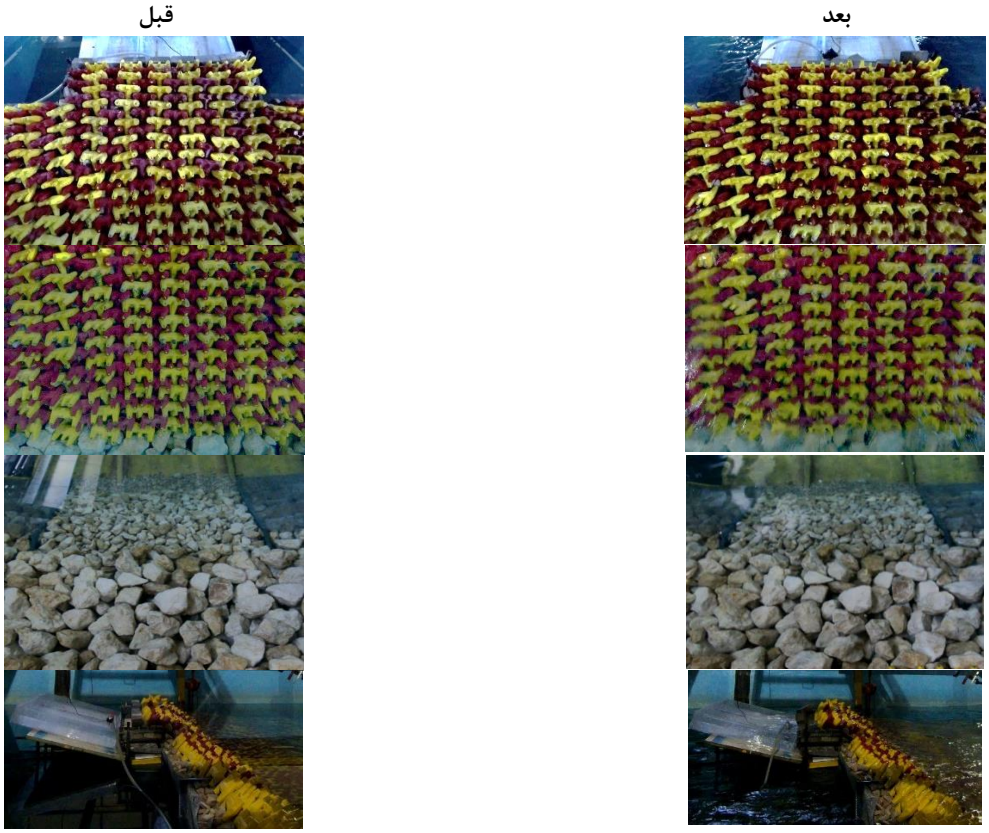


[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]



آزمایش شماره ۱۳ (Tp=2.24 , Hs=32 , d=114)　　آزمایش شماره ۱۲ (Tp=2.01 , Hs=27 , d=114)



آزمایش شماره ۱۴ (Tp=2.01 , Hs=27 , d=114)

شکل ۱۶- نمای کلی از مقاطع تخریب شده موج‌شکن طراحی شده با آرمور پیشنهادی بتنی جدید به همراه مقادیر Tp, Hs, d

۱۰۷ آزمایش شماره ۱ که از سه ردیف بلوک تاج استفاده شده است؛ براساس تصاویر ثبت شده از دوربین‌ها در قبل و بعد از اتمام تست مشاهده می‌شود که دو ردیف فوقانی بلوک‌ها کاملا تخریب گردیده و نیز سه ردیف فوقانی از آرمورها دچار تخریب ۸۰ درصدی شده است. همانطور که از تحلیل تصاویر مشخص است سایر ردیف‌های آرمور کاملا پایدار بوده و هیچ‌گونه تغییری در محل آن‌ها رخ نداده است. در آزمایش شماره ۹ که از دو ردیف بلوک تاج استفاده شده است؛ مشاهده می‌شود که بلوک‌های تاج بدون تخریب و جابجایی بوده‌اند و همچنین جابجایی جزئی یک ردیف آرمور به میزان ۵٪ تخریب بدست آمده است. در آزمایش شماره ۱۲ مشاهده می‌شود که بلوک-های تاج بدون تخریب و جابجایی بوده‌اند و همچنین جابجایی جزئی در یک ردیف آرمور معادل ۱۰٪ تخریب بدست آمده است. همچنین در آزمایش شماره ۱۳ در قبل و بعد از اتمام تست مشاهده می‌شود که بلوک‌های تاج بدون تخریب و جابجایی بوده‌اند در یک ردیف بالا ناپایداری در لایه آرمور مشاهده می‌شود که میزان تخریب ۲۵٪ بدست می‌آید. در انتها آزمایش شماره ۱۴ از دو ردیف بلوک تاج استفاده شده است که تخریب بلوک‌ها قابل مشاهده هست و یک لایه آرمور به میزان ۱۲٪ دارای تخریب است. در سایر آزمایشات بلوک‌های تاج بدون تخریب و جابجایی بوده‌اند و همچنین پایداری ردیف‌های آرمور و پنجه موج‌شکن (در تمامی سناریوها) ۱۰۰ درصد بدست آمده است. لازم به ذکر است مقادیر بدست آمده از پارامتر خسارت نسبی (N_{od})، در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- مقادیر بدست آمده از پارامتر خسارت نسبی (N_{od})

شماره آزمایش	N_{od}	شماره آزمایش	N_{od}
۱	۰/۸۴	۲	۰
۳	۰	۴	۰
۵	۰	۶	۰
۷	۰	۸	۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]

۹	۰/۰۷۶	۱۰	۰
۱۱	۰	۱۲	۰/۱۵۶
۱۳	۰/۳	۱۴	۰/۱۵
۱۵	۰	۱۶	۰
۱۷	۰	-	-

ناپایداری قطعات آرموری در وجه جلو مهم‌ترین حالت ناپایداری در موج‌شکن است. در این حالت، قطعات محافظ در اثر حمله امواج از محل خود خارج شده و در نتیجه لایه محافظ سازه از بین می‌رود. (جابجایی درجا بر روی اثرات قفل و بست بین آرمورها خصوصا در چینش منظم موثر است) بنابراین با از بین رفتن لایه محافظ موج-شکن و سپس در اثر برخورد امواج به لایه‌های زیرین سازه و در نهایت کل سازه آسیب خواهد دید. افزایش ارتفاع موج باعث افزایش انرژی امواج و همچنین افزایش پریود، منجر به افزایش طول موج می‌شود که کاهش تیزی موج را حاصل می‌شود. در امواج با تیزی کمتر، استهلاک انرژی کمتری نسبت به امواج با تیزی بیشتر، هنگام شکست موج اتفاق می‌افتد. بنابراین سرعت جریان بالاروی افزایش یافته و در نتیجه نیروهای وارد بر آرمور غوطه‌ور در آب هنگام بالاروی زیاد می‌شود و آرمورها با نیروی بزرگتری مواجه می‌شوند. تاثیر این فرآیند باعث شده است که لایه آرمور در تمامی سناریوهای منجر به تخریب؛ از ردیف بالایی دچار آسیب شوند. بیشترین تخریب مربوط به آزمایش شماره ۱ با ۸۰ درصد خسارت است و در ناحیه فعال بالایی موج صورت گرفته است که بالاروی موج به همراه اثر نیروی شیرجه امواج با از بین بردن ردیف بلوک‌های تاج سبب خروج آرمور از قفل و بست آن شده است و در نهایت با جابجایی دو ردیف آرمور باعث ایجاد خرابی پیش‌رونده[۱۲] و نفوذ آسیب به لایه فیلتر می‌شود. لازم به ذکر است این نوع خرابی علاوه بر افزایش مقادیر روگذری می‌تواند در جابجایی و تخریب وجه پشتی موج‌شکن موثر باشد. در پایداری لایه محافظ به طور کلی دو نوع نیروی اصطکاک در مقابل جابجایی و از جا در آمدن قطعات لایه محافظ مقاومت می‌کنند. یکی نیروی اصطکاک بین قطعات و لایه های زیرین آن‌ها که در جهت شیب عمل می‌کند و در مقابل لغزش قطعات مقاومت می‌کند. دیگری نیروی اصطکاک بین قطعات مجاور که در جهت عمود بر شیب عمل کرده و در مقابل از جا درآمدن قطعات مقاومت می‌کند. همین دو نیرو در مقابل نیروهای ناشی از برخورد موج بر روی سازه (شامل نیروهای بالابر[۱۳] و نیروهای پسا[۱۴]) نیز عامل مقاومت هستند. همچنین نیروی اصطکاک بین قطعات مجاور در بلوک‌های بتنی و بازودار[۱۵] قابل توجه بوده و می‌توان آن را به قفل و بست داخلی قطعات تعبیر کرد.

در آرمور جدید طبق بررسی تمامی آزمایش‌هایی که منجر به تخریب شده است می‌توان به این نکته پی برد که در ردیف منتهی به تاج موج‌شکن تخریب حاصل شده است. این حالت تخریب بیانگر آن است که در اثر نیروهای ناشی از موج ردیف بالایی به شدت آسیب‌پذیر است. قفل و بست نامناسب بازوی زیرین آرمور باعث شده که با وجود کارایی مطلوب آن به صورت یکپارچه در امتداد شیب سازه؛ در ردیف بالا به دلیل ماهیت پیش‌رونده تخریب؛ در مقابل نیروهای بالابر و پسا مقاومت مناسبی نداشته باشد. به خصوص در آرمورهای بتنی که پایداری آن‌ها به نسبت سنگ‌های طبیعی کمتر تابع وزن آن‌ها است و بیشتر تابع قفل و بست بین قطعات است. همچنین به دلیل حرکات پیوسته بالاروی و پایین‌روی موج باعث وارد کردن نیروهای رفت و برگشتی به قطعات آرمور می‌شود که در ادامه باعث کاهش اثرات قفل و بست بین قطعات آرموری و جابجایی آن‌ها شده است.

از دیگر مواردی که در پایداری موج‌شکن مورد ارزیابی حائز اهمیت است پایداری ردیف بلوک‌های تاج و تاثیر آن بر جابجایی قطعات آرموری است. مشاهده می‌شود که آرمور جدید در کاهش اثرات بالاروی، شیرجه امواج و روگذری در آزمایش‌های شماره ۱ و ۱۳ عملکرد مناسبی نداشته و با پیش‌روی تخریب موجب آسیب به تاج موج‌شکن شده است. همچنین با افزایش اثر پریود امواج همزمان با افزایش سایر پارامترهای متغیر؛ این آسیب به بخش‌های بلوک‌های تاج تسری پیدا کرده است. از دست رفتن بخش تاج موج‌شکن در افزایش روگذری امواج بسیار موثر هست. در بررسی اثر تغییر عمق بر آسیب جداره آرموری موج‌شکن؛ در آزمایش شماره ۱۲ با اینکه پریود و ارتفاع مشخصه موج نسبت به آزمایش شماره ۱ کاهش داشته ولی با افزایش عمق سازه، تخریب ۱۰ درصدی در موج‌شکن رخ داده است. این در حالی است که در آزمایش شماره ۱۳ با افزایش عمق همزمان با پریود و ارتفاع مشخصه موج تخریب از ۱۰ درصد به ۲۵ درصد افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین کارکردهای استفاده از پنجه در طراحی موج‌شکن‌های توده‌سنگی جلوگیری از آب شستگی پای موج‌شکن است. جریان‌ها و تلاطم آب ناشی از بازتاب امواج در پای سازه می‌توانند عوامل ناپایداری در پنجه و در نهایت باعث گسترش در سایر بخش‌های موج‌شکن شوند که در تمامی آزمایش‌ها پایداری پنجه باعث جلوگیری از ناپایداری آرمورهای محدوده فعال موج به هنگام پایین‌روی (MSL-Hs) شده است. شکسته شدن قطعات محافظ بتنی، حالت دیگری از ناپایداری است. این حالت در اثر نیروی ناشی از برخورد امواج با قطعات آرموری به وجود می‌آید. به منظور مقابله با این اثر، از قطعات مستحکم و با دوام استفاده شده است. با توجه به اینکه در طراحی آرمور از المان‌های لاغر استفاده شده است ولی در تمامی آزمایش ها آرمورها از نظر مقاومت در برابر نیروهای اندرکنش موج و سازه؛ عملکرد مناسبی داشته و دچار شکستگی نشده‌اند. در صورتی که حین آزمایش قطعه‌ای می‌شکست؛ علاوه بر بررسی پایداری هیدرولیکی، تعیین میزان تنش در قطعات آرمور بتنی نیز حائز اهمیت می‌بود. به این دلیل که شکست قطعات

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]

آرمور و کوچک‌تر شدن آن‌ها، موجب ایجاد ناپایداری هیدرولیکی قبل از زمان مفروض در طراحی می‌شود. همچنین ضربات ناشی از برخورد قطعات شکسته به قطعات سالم موجب ایجاد ترک در آن‌ها می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور بررسی پایداری آرمور پیشنهادی بتنی جدید مورد استفاده در موج‌شکن توده‌سنگی؛ ارزیابی آزمایشگاهی انجام شد. مطالعه حاضر علاوه بر تحلیل میزان آسیب و خسارت؛ پایداری آرمور را با رویکرد بررسی عوامل موثر بر خرابی پیش‌رونده ناشی از اندرکنش موج و سازه تحلیل کرده است. با در نظرگیری شرایط محیطی بندر پارسیان در محدوده خلیج‌فارس اثر تغییرات سه پارامتر ارتفاع مشخصه امواج، پریود پیک موج و عمق آب در پایداری این آرمور مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- در آزمایش شماره ۱ با تخریبی معادل با ۸۰ درصد؛ بیشترین میزان تخریب در لایه آرمور رخ داده است که علاوه بر گسیختگی لایه آرمور، لایه فیلتر نیز مشخص است. این درجه از تخریب درجه خسارت نهایی نامیده می‌شود. این آسیب از نوع پیش‌رونده بوده به دلیل بالا بودن شدت خسارت با وجود استفاده از ۳ ردیف بلوک تاج؛ به صورت کامل تاج موج‌شکن تخریب شده است و آسیب بوجود آمده باعث ایجاد روگذری غیرمجار و گسترش آسیب به وجه پشتی موج‌شکن خواهد شد.
- طبق ارزیابی تاثیرات ارتفاع مشخصه و پریود امواج مشخص می‌شود که پایداری آرمور پیشنهادی بتنی جدید با افزایش این مقادیر کاهش یافته و لایه آرمور موج‌شکن توده‌سنگی خسارت خواهد دید. این در حالی است که از ۱۷ آزمایش صورت گرفته فقط در ۵ آزمایش، خسارت گزارش شده است و لازم به ذکر است ۸۰ درصد خرابی بوجود آمده در محدوده خسارت کم هست. گزارش ارائه شده نشان دهنده عملکرد مناسب آرمور در شرایط محیطی بندر طرح است.
- ناحیه فعال موج که برابر است با متوسط تراز سطح آب (MSL) به میزان ارتفاع مشخصه موج (H_S) بالا و پایین سطح تراز؛ تاثیر مهمی در آسیب وارده بر لایه آرمور دارد. در آرمور پیشنهادی بتنی جدید با وجود بازوی بلند در بخش زیرین و اثر ثقلی در قفل و بست بین اجزا؛ در قسمت‌های پایین متوسط تراز سطح آب، تخریبی رخ نداده است. این در صورتی است که با وجود اثر اندرکنش موج و سازه در ردیف منتهی به تاج موج‌شکن؛ آرمورها از محل بازوی زیرین خارج شده‌اند. از آنجایی که طراحی این آرمور جنبه اجرایی در بنادر دارد با ارزیابی انجام شده، این آرمور در قفل و بست یا افزایش وزن در ردیف بالایی نیازمند باز طراحی است.
- در هیچ یک از بررسی‌های انجام شده شکستگی و ترک در آرمور پیشنهادی بتنی جدید مشاهده نگردید که این مسئله با توجه به دارا بودن المان لاغر در طراحی و ساخت، عملکرد مناسب آن را نشان می‌دهد.

۷- تقدیر و تشکر

تمامی تست‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه ملی دریایی ایران (NIMALA) صورت گرفته است. همچنین از مدیریت آزمایشگاه و تمامی کارشناسان این مجموعه کمال سپاس و تشکر به عمل آورده می‌شود.

کلید واژگان

1- Dolos
2- Tetrapod
3- Tribar
4- Acropod
5- Cob
6- Antifer
7- Photogrammetric
8- Stereo-Photogrammetric Techniques
9- Interlocking
10- Hudson
11- Tørum
12- Progressive
13- Uplift Force
14- Drag Force
15- Multilegged

۸- مراجع

1- Burcharth, H. F. (1987). The lessons from recent breakwater failures: developments in breakwater design.
2- Burcharth, H. F., & Liu, Z. (1993). Design of Dolos armour units. In Coastal Engineering 1992 (pp. 1053-1066).
3- Burcharth, H. F., Christensen, M., Jensen, T., & Frigaard, P. (1998). Influence of core permeability on Accropode armour layer stability. In Coastlines, Structures and Breakwaters: Proceedings of the International Conference. Thomas Telford.
4- Melby, J. A., & Kobayashi, N. (1998). Progression and variability of damage on rubble mound breakwaters. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, *124*(6), 286-294.
5- Van der Meer, J. W. (1999, June). Design of concrete armour layers. In *Proceedings of the Coastal Structures* (Vol. 99, pp. 213-221).
6- Chegini V, Aghtouman P. An Investigation on the Stability of Rubble Mound Breakwaters with Armour Layers of Antifer Cubes . marine-engineering. 2006; 2 (1) :86-93.
7- Mousavi, S. H., Kavianpour, M. R., & Aminoroayaie Yamini, O. (2017). Experimental analysis of breakwater stability with antifer concrete block. *Marine*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]

Georesources & Geotechnology, *35*(3), 426-434.

8- Henriques, M. J., Braz, N., Roque, D., Lemos, R., & Fortes, C. J. E. M. (2016, March). Controlling the damages of physical models of rubble-mound breakwaters by photogrammetric products-Orthomosaics and point clouds. In *Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Viena, Austria, 8pp*.

9- Fortes, C. J., Lemos, R., Mendonça, A., & Reis, M. T. (2019). Damage progression in rubble-mound breakwaters scale model tests, under a climate change storm sequence. Res. Eng. Struct. Mater., 5(4), 415-426.

10- Campos, Á., Castillo, C., & Molina-Sanchez, R. (2020). Damage in Rubble Mound Breakwaters. Part I: Historical Review of Damage Models. Journal of Marine Science and Engineering, 8(5), 317.

11- Mares-Nasarre, P., Argente, G., Gómez-Martín, M. E., & Medina, J. R. (2021). Armor Damage of Overtopped Mound Breakwaters in Depth-Limited Breaking Wave Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(9), 952.

12- The Rock Manual (2007), Chapter 5 (Physical Processes and Design Tools).

13- Veisy Zade, P. (1998). An Investigation of the Stability of Tetrapods, University of Science and Technology. (In Persian)

14- Hughes, Steven E., Physical models and Laboaratory Techniques in Coastal Eng, Waterway Experiment Stations USA, World Scientific Publishing Co., 1993.

15- Van der Meer, J. W. (1995). Conceptual design of rubble mound breakwaters. In *Advances In Coastal And Ocean Engineering: (Volume 1)* (pp. 221-315).

16- Kamphuis, J. W. (1991). 'Physical Modeling' in Handbook of Coastal and Ocean Eng, J. B. Herbich, Ed., *Vol 2, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.11.2]