

Investigating the behavior of single-layer and double-layer cubic armor in low-crested/submerged breakwaters

M. Mohammadnia*

Abstract

Cube-shaped armors are the first type of concrete armors used by humans. In the past, cubic blocks were used as a double-layers. The high consumption of concrete in double-layer cube-shaped armors made the idea of producing armors with an interlocking function that have corners and consume less concrete volume to be considered. For a long time, blocks with an interlocking were used in the armor layer, but due to some of their disadvantages, such as the possibility of breaking during transportation, the difficulty and complications of production, problems during installation, and difficulties related to the usage, caused renewed attention to cubic armors and other bulky armors. The use of cubic armors as a single layer has not been investigated much. Therefore, in this article, the behavior of single-layer cubic armors with regular and irregular placement and comparing its behavior with double-layer armors in low-crested/submerged breakwaters have been investigated. The results of the experiments showed that single-layer armors with regular placement perform relatively well and can be used instead of double-layer armors with irregular placement. While single-layer armor with irregular placement has a very poor performance against wave attack and the spread of damage in the armor layer occurs quickly in this case.

Keywords: Low-Crested Breakwater, Submerged Breakwater, Cubic Armor, Single-Layer, Double-Layer.

بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل تک لایه و دو لایه در موج شکن های تاج کوتاه و مستغرق

محمد محمدنیا^{۱*}

^۱ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

آرمورهای مکعبی شکل به عنوان نخستین ترین نوع آرمورهای بتنی مورد استفاده بشر هستند. در گذشته از بلوک های مکعبی شکل به عنوان لایه آرمور موج شکن، به صورت دو لایه استفاده می شد. مقدار مصرف قابل توجه بتن در آرمورهای مکعبی شکل باعث شد تا ایده تولید آرمورهای با عملکرد قفل شدگی که دارای زائده بوده و حجم بتن کمتری مصرف می کنند مورد توجه قرار گیرد. مدت ها بلوک های با عملکرد قفل شدگی در لایه آرمور مورد استفاده قرار می گرفت، لیکن به دلیل برخی از معایب آن ها نظیر احتمال شکسته شدن در حین جابه جایی، دشواری و پیچیدگی های زمان تولید، مشکلات هنگام نصب و دشواری های مربوط به زمان بهره برداری و تعمیرات سبب گردید توجه مجدد به سمت آرمورهای مکعبی شکل و سایر آرمورهای حجیم صورت گیرد. استفاده از آرمورهای مکعبی شکل به صورت یک لایه چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در مقاله حاضر به بررسی رفتار آرمورهای مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم و مقایسه رفتار آن با آرمورهای دو لایه در موج شکن های تاج کوتاه و مستغرق پرداخته شده است. نتایج آزمایش های انجام شده نشان داد که آرمورهای تک لایه با چیدمان منظم عملکرد نسبتاً خوبی دارد و می توان به جای آرمورهای دو لایه با چیدمان نامنظم بکار رود. در حالی که آرمورهای تک لایه با چیدمان نامنظم عملکرد بسیار ضعیفی در برابر برخورد موج دارد و گسترش خرابی در لایه آرمور در این حالت به سرعت رخ می دهد.

کلیدواژه ها: موج شکن تاج کوتاه، موج شکن مستغرق، آرمور مکعبی شکل، آرمور تک لایه، آرمور دو لایه

۱. مقدمه

موج شکن های تاج کوتاه یکی از انواع موج شکن های توده سنگی است. بر اساس تراز تاج موج شکن تاج کوتاه نسبت به تراز آب در پای آن، موج شکن توده سنگی از نوع تاج کوتاه یا مستغرق خواهد بود. موج شکن های تاج کوتاه و مستغرق را از نظر نوع ساخته شدن، می توان به سه دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول موج شکن های متعارف توده سنگی، دسته دوم موج شکن های همگن و دسته سوم موج شکن های مصنوعی می باشند. موج شکن مورد بررسی در پژوهش حاضر از نوع موج شکن های متعارف توده سنگی است که دارای سه بخش کلی مغزه، فیلتر و لایه آرمور می باشد. توجه اصلی پژوهش بر روی رفتار لایه آرمور در موج شکن مذکور می باشد.

به صورت سنتی استفاده از آرمورهای مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم مرسوم بوده است. اجرای لایه آرمور موج شکن با آرمورهای مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم اخیراً مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱]. آرمورهای مکعبی شکل

نسبت به سایر آرمورهای تک لایه نظیر آکروپاد، ایکس بلاک و کورلاک (که عمدتاً آرمورهای با عملکرد قفل شدگی می باشند) در دسترس تر و اقتصادی تر می باشد. بدیهی است که آرمور تک لایه نسبت به آرمور دو لایه (مانند آرمور تتراپاد، مکعب و آنتیفر) بسیار مقرون به صرفه تر است [۲].

آرمورهای مکعبی شکل تک لایه دارای مزایای فنی نسبت به سایر آرمورها، مخصوصاً آرمورهای با عملکرد قفل شدگی هستند. اجرای لایه آرمور مکعبی شکل در زیر تراز آب بسیار راحت تر است [۲]. آرمورهای مکعبی شکل به دلیل شکل ساده قالب، راحت تر تولید می شوند. همچنین امکان انبار کردن آنها پس از تولید بر روی همدیگر وجود دارد لذا فضای کمتری برای تولید آرمور نیاز دارند. مقاومت در برابر شکسته شدن بیشتری هم در مرحله انبار کردن و هم در زمان اجرا در لایه آرمور دارند. تعمیر لایه آرمور در صورت بروز خرابی راحت تر از سایر آرمورهای با رفتار قفل شونده است. به دلیل شکل ساده آنها، اجرا و حمل و نقل آنها راحت تر است [۲]. در مجموع می توان گفت

ون دن بوخ و همکاران [۸] به بررسی اثر تراکم چیدمان بر پایداری لایه آرمور موج‌شکن تاج بلند در آرمورهای دو لایه مکعبی شکل و تک لایه سنگی و تتراپاد پرداختند. بررسی آنها نشان داد که با افزایش تراکم چیدمان در لایه آرمور (آرمور سنگی و تتراپاد) پایداری هیدرولیکی لایه آرمور افزایش می‌یابد. این موضوع به صورت کامل برای لایه آرمور مکعبی صادق نیست. در لایه آرمور مکعبی با افزایش تراکم چیدمان لایه آرمور، پایداری هیدرولیکی افزایش می‌یابد لیکن وقتی تراکم چیدمان بیشتر افزایش می‌یابد، رفتار لایه آرمور مکعبی شکل مانند سنگ فرش می‌شود و حالت گسیختگی لایه آرمور به صورت آپلیفت و لغزش غالب می‌شود.

مارتین و مدینا [۹] و [۱۰] به بررسی پایداری لایه آرمور مکعبی شکل و کیوبی پاد با در نظر گرفتن تراکم چیدمان نامنظم در موج‌شکن تاج بلند پرداختند. آنها در طول آزمایش‌ها، تراکم چیدمان لایه آرمور در نزدیکی سطح آب و در تراز بالاتر از سطح آب را کمتر از تراکم چیدمان لایه آرمور در تراز زیر سطح آب در نظر گرفتند. بررسی‌های آنها نشان داد که در یک تیزی موج ثابت، پایداری هیدرولیکی آرمور کیوبی پاد در حالت دو لایه بیشتر از حالت تک لایه است. همچنین پایداری هیدرولیکی آرمور مذکور در دو حالت تک لایه و دو لایه بیشتر از پایداری آرمور مکعبی دو لایه است.

کورد و همکاران [۳] به بررسی و مقایسه آرمور کیوبی پاد به صورت تک لایه و دو لایه پرداختند. مدل‌سازی فیزیکی انجام شده در آزمایشگاه توسط آنها نشان داد که آرمور تک لایه عملکرد بسیار مناسبی در برابر نیروی امواج دارد. آنها اظهار داشتند که آرمور مکعبی شکل با چیدمان نامنظم سازگاری بسیار خوبی در برابر نشست بدنه موج‌شکن دارد.

ون گنت و لويس [۲] به بررسی عملکرد آرمور تک لایه مکعبی شکل پرداختند. آنها آرمور تک لایه مکعبی شکل را به عنوان یک گزینه اقتصادی برای اجرا در لایه آرمور معرفی کردند. آنها به بررسی مزایا و معایب آرمور مکعبی شکل و مقایسه آن با سایر آرمورها پرداختند.

مدینا و همکاران [۱۱] و [۱۲] براساس کارهای [۴]، [۶]، [۱۳] و [۱۴] نتیجه گرفتند که تراکم چیدمان لایه آرمور تأثیر قابل توجهی بر عدد پایداری دارد. آنها با طراحی تعدادی آزمایش مدل فیزیکی به بررسی رفتار لایه آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم و تراکم چیدمان‌های مختلف در موج‌شکن تاج بلند پرداختند و نهایتاً یک رابطه طراحی ارائه کردند. آنها تأکید کردند که دو پارامتر تخلخل لایه آرمور و تراکم چیدمان آن

علیرغم اینکه آرمورهای مکعبی شکل میزان بتن بیشتری برای تولید نیاز دارند، ولی تولید آنها مقرون به صرفه‌تر است. آرمورهای تک لایه قابلیت خود ترمیمی دارند و در مواقعی که یک بلوک آرمور از درون لایه بیرون می‌رود، سایر آرمورهای مجاور با جابه‌جا شدن در لایه آرمور، فضای خالی به وجود آمده را پر می‌کنند و مانع از پیشرفت خرابی می‌شوند [۲].

در مقاله حاضر با استفاده از انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی پایداری لایه آرمور موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق پرداخته شده است. بررسی‌ها بر روی آرمور مکعبی شکل تک لایه و دو لایه با چیدمان منظم و نامنظم در اثر برخورد امواج منظم و نامنظم انجام شده است.

۲. مرور ادبیات فنی

ون در میر [۴] به بررسی آرمورهای سنگی، مکعبی، تتراپاد و آکروپاد پرداخت و برای هر یک رابطه طراحی جداگانه‌ای ارائه کرد. سپس یک مقایسه بین پایداری لایه آرمور در هر یک از حالت‌ها انجام داد. بررسی آنها نشان داد که آرمور مکعبی دو لایه نسبت به آرمور سنگی عملکرد بهتری دارد لیکن نسبت به آرمور تتراپاد و آکروپاد عملکرد پایین‌تری دارد.

ون در میر و پیلاچ [۵] به بررسی پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های تاج کوتاه با لایه آرمور سنگی پرداختند. آنها اظهار داشتند که با کاهش تراز تاج موج‌شکن، پایداری لایه آرمور افزایش می‌یابد. آنها نتیجه گرفتند که اگر تراز تاج موج‌شکن‌های تاج کوتاه به حدی بالا باشد که امکان روگذری موج وجود نداشته باشد، می‌توان از روابط رایج ارائه شده برای موج‌شکن‌های تاج بلند استفاده کرد.

ون در میر [۶] سعی کرد تا با بررسی رفتار آرمورهای بتنی مختلف یک رابطه طراحی برای لایه آرمور بتنی ارائه کند. وی به مقایسه رفتار آرمورهای تک لایه و دو لایه مکعبی شکل نیز پرداخت. بررسی او نشان داد که آرمور دو لایه مکعبی شکل با چیدمان نامنظم رفتار نسبتاً خوبی در برابر امواج دارد و قطعات آرمور به راحتی جابه‌جا نمی‌شوند.

ون گنت و همکاران [۷] به بررسی و امکان‌سنجی اجرای آرمور تک لایه خصوصاً آرمور مکعبی شکل پرداختند. بررسی آنها نشان داد که عملکرد آرمور تک لایه مکعبی شکل در مقایسه با آرمور دو لایه مکعبی شکل خوب است. آنها نتیجه گرفتند که علت عملکرد قابل قبول آرمور تک لایه مکعبی شکل به دلیل وزن آرمور، نیروی ناشی از تماس بین دو آرمور و کاهش نیروی ناشی از موج به دلیل سطح صاف آرمورهای مکعبی تک لایه است.

یاکسل و همکاران [۲۱] به بررسی موج‌شکن تاج بلند با برم پرداختند. آنها به بررسی عملکرد آرمور مکعبی دو لایه با چیدمان منظم بر روی محدوده برم و شیب پایین‌تر از برم پرداختند. بررسی آنها نشان داد که نحوه چیدمان لایه آرمور در محل تلاقی برم با شیب پایین دست موج‌شکن تأثیر بسیار زیادی بر پایداری لایه آرمور دارد.

کمپاس و همکاران [۲۲] و [۲۳] به بررسی و مرور روابط موجود در خصوص طراحی لایه آرمور موج‌شکن‌های توده سنگی پرداختند. بررسی‌های آنها بر روی معیارهای خرابی لایه آرمور نشان داد که در حال حاضر یک رویه واحد در جهان برای اندازه‌گیری خرابی لایه آرمور تعریف نشده است. در واقع محققین برای ارائه روابط طراحی لایه آرمور از معیارهای خرابی مختلف تعریف شده توسط [۲۴] و [۲۵] استفاده می‌کنند که می‌تواند سبب ایجاد تفاوت در نتایج روابط مختلف ارائه شده باشد.

ویبرا و همکاران [۱] یک مرور تکنیکال در خصوص استفاده از آرمور مکعبی یک لایه در موج‌شکن‌های توده سنگی انجام دادند. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که استفاده از آرمور مکعبی به صورت یک لایه و چیدمان منظم و تخلخل پایین در موج‌شکن یک راه‌حل ابتکاری جدید است. البته آرمور یک لایه به اندازه آرمور دو لایه انعطاف‌پذیر نیست.

به صورت یک جمع‌بندی می‌توان گفت که بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل تک لایه در موج‌شکن‌های تاج بلند توسط محققین مختلف نظیر [۲]، [۷]، [۸]، [۱۶]، [۱۷]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]، [۳۵] و [۳۶] مورد ارزیابی قرار گرفته است. لیکن عملکرد آرمور مکعبی شکل تک لایه در موج‌شکن‌های تاج کوتاه تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در مقاله حاضر به بررسی عملکرد آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم پرداخته شده است. همچنین با مدل‌سازی‌های فیزیکی عملکرد آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم نیز با آرمور تک لایه منظم مقایسه شده است. یکی دیگر از وجه تمایزهای مورد توجه که در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت، اجرای آرمور مکعبی شکل با چیدمان نامنظم بود. در مقاله حاضر مقایسه رفتار آرمور مکعبی شکل با چیدمان منظم و نامنظم در دو حالت اجرای تک لایه و دو لایه برای موج‌شکن تاج کوتاه و مستغرق انجام گرفته است.

۳. روش تحقیق

به منظور انجام آزمایش‌های مورد نیاز از یک فلوم یک بعدی به طول ۲۵٫۲ متر و عرض ۱ متر و ارتفاع ۱٫۳ متر که بر روی یک شالوده بتنی به ضخامت ۰٫۵ متر قرار گرفته، استفاده شد. در

از جمله پارامترهای کلیدی هستند که در پروسه طراحی یک موج‌شکن باید مورد توجه قرار بگیرد.

هلینگا [۱۵] به بررسی شیب پشتی موج‌شکن تاج کوتاه با یک لایه آرمور مکعبی شکل پرداخت. بررسی‌های وی نشان داد که شیب پشتی موج‌شکن پایدارتر از شیب جلوی موج‌شکن است و می‌توان از آرمورهای مکعبی کوچک‌تری استفاده کرد.

ون در لیم و همکاران [۱۶] طراحی لایه آرمور موج‌شکن *SAL REI* را مورد بررسی قرار دادند. طراحی اولیه برای لایه آرمور شامل آرمور آکروپاد بوده است. لیکن در حین ساخت موج‌شکن و با بروز طوفان، آرمورهای مذکور دچار شکست سازه‌ای شدند. نهایتاً بررسی‌های آنها منجر به انتخاب آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم گردید.

ون گنت و ون در ورف [۱۷] به بررسی عملکرد آرمور مکعبی تک لایه در موج‌شکن تاج بلند برم دار پرداختند. آنها در قسمت زیر برم و در محدوده برم از آرمورهای مکعبی تک لایه استفاده کردند و سپس در تراز بالاتر از برم از آرمور سنگی استفاده کردند. بررسی‌های آنها نشان داد که هیچگونه خرابی در بخش آرمور بتنی رخ نداده است؛ یعنی عملکرد لایه آرمور بتنی تک لایه بسیار خوب برآورد گردید. همچنین آنها نتیجه گرفتند که استفاده از آرمور بتنی تک لایه در بخش برم و پایین‌تر از آن، باعث می‌شود تا بتوان از آرمورهای سنگی کوچک‌تری در بالای تراز برم استفاده نمود.

سرفراز و پاک [۱۸] و [۱۹] به بررسی پایداری لایه آرمور موج‌شکن تاج کوتاه با استفاده از ترکیب دو روش عددی لاگرانژی و مستقل از شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار (*SPH*) و اجزای مجزا (*DEM*) به ترتیب برای محاسبه نیروهای وارد بر قطعات آرمور از سوی امواج و بررسی پایداری قطعات، پرداختند. آنها تلاش کردند تا یک رابطه طراحی مناسب برای طراحی لایه آرمور موج‌شکن تاج کوتاه ارائه کنند. بررسی‌های آنها نشان داد که کمترین نیروی ناشی از موج به آرمورهای مکعبی در پنجه موج‌شکن وارد می‌گردد. همچنین بیشترین نیروی ناشی از موج در تراز سطح آب وارد می‌شود.

آرجنت و همکاران [۲۰] به بررسی پایداری لایه آرمور در موج‌شکن‌های با روگذری موج پرداختند. بررسی آنها بر روی موج‌شکن‌های متوسط تا تاج کوتاه انجام گرفت. آنها به بررسی و مقایسه رفتار آرمور مکعبی و سنگی دو لایه و آرمور کیوبی پاد تک لایه پرداختند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که آرمور مکعبی دو لایه نسبت به آرمور سنگی دو لایه دارای پایداری هیدرولیکی بیشتری است.

در هر بار آزمایش تعداد ۱۰۰۰ موج به بدنه موج شکن تابانده شد. امواج نامنظم براساس طیف *JONSWAP* تولید گردید.

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در بررسی رفتار بلوک‌های بتنی در لایه آرمور، میزان اصطکاک موجود بین آرمورها است. به منظور کاهش و حذف اثر زبری سطح آرمور بر پایداری لایه آرمور، سطح تمام آرمورها با استفاده از رنگ‌های مقاوم در برابر آب رنگ‌آمیزی گردید.

یکی دیگر از نکات قابل توجه در آزمایشگاه که در بررسی پایداری لایه آرمور مؤثر است، اختلاف وزن مخصوص آب شیرین و شور است. هیوز [۳۸] این موضوع را با در نظر گرفتن تفاوت وزن مخصوص آب شور و شیرین در وزن قطعات آرمور در نظر گرفته است. برای این منظور وزن قطعه آرمور در مدل‌سازی آزمایشگاهی براساس رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$\left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w}\right)_p = \left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w}\right)_m \quad (1)$$

که ρ_w وزن مخصوص آب، ρ_a وزن مخصوص آرمور، ρ_m مربوط به نتایج آزمایشگاه و ρ_p مربوط به نتایج کارهای واقعی است. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته از آب شیرین با وزن مخصوص برابر ۹۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد.

پس از انجام آزمایش‌ها و بدست آمدن نتایج، به منظور امکان مقایسه بین نتایج آزمایش‌های مختلف دو پارامتر بی‌بعد N_S و R_C/D_{n50} به شرح معادله (۲) و (۴) در نظر گرفته شد.

$$N_S = \frac{H}{\Delta D_{n50}} \quad (2)$$

که N_S عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور، D_{n50} قطر متوسط آرمورها که برابر ۳۵ میلیمتر، H ارتفاع موج خرابی و Δ برابر با معادله (۳) است.

$$\Delta = \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w} = \frac{2346 - 997}{997} = 1.353 \quad (3)$$

برای محاسبه پارامتر بی‌بعد R_C/D_{n50} از رابطه (۴) استفاده می‌گردد.

$$R_C/D_{n50} = \frac{L - h}{D_{n50}} \quad (4)$$

که L ارتفاع موج شکن و برابر ۳۷۰ میلیمتر، h عمق آب پای موج شکن که برابر پنج مقدار ۳۳۰، ۳۵۰، ۳۷۰، ۳۹۰ و ۴۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. در بخش تحلیل‌های مربوط به نتایج آزمایش‌ها از دو پارامتر بی‌بعد مذکور استفاده می‌شود.

لوزادا و همکارانش [۲۴] سه معیار خرابی که به صورت بصری قابل اندازه‌گیری است را ارائه نمودند. معیارهای خرابی آنها به صورت معیار شروع خسارت (Initiation of Damage)، خرابی

یک سوی کانال موج ساز و در انتهای دیگر کانال، دیواره‌ی بتنی قرار گرفته است. مولد موج ساز مورد استفاده در آزمایشگاه، از نوع پیستونی می‌باشد. این موج ساز قادر است امواج منظم و نامنظم را تولید کند. دامنه‌ی جابجایی تخته‌ی مولد موج در این مولد از ۱۲- تا ۱۲+ سانتیمتر پیش بینی شده است. پرپود امواج منظم قابل تولید توسط دستگاه بین ۰.۵ تا ۶ ثانیه و پرپود امواج نامنظم قابل تولید بین ۰.۵ تا ۵ ثانیه است. این دستگاه قابلیت تولید امواج با ارتفاع حداکثر ۲۵ سانتیمتر را دارد. به منظور اندازه‌گیری ارتفاع موج پای سازه از سنسورهای ابزار دقیق نوع Resistance wave gauge استفاده شده است. این سنسورها ولتاژی می‌باشند و با اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ آب بین دو سیم موازی، مقدار تراز آب را در هر لحظه ثبت می‌کنند. خطای اندازه‌گیری سنسورهای مذکور برابر ۰.۱ میلیمتر می‌باشد. همچنین این سنسورها در هر ثانیه ۵۰ داده برداشت می‌کنند.

در فلوم آزمایشگاه به منظور مدل‌سازی شیب بستر دریا در محدوده نزدیک ساحل، یک شیب کلی برابر ۱ به ۱۰ در کف فلوم اجرا گردید. وجود این شیب باعث می‌شود تا امواج با نزدیک شدن به موج شکن دچار شکست شوند. در تمام آزمایش‌ها ارتفاع موج شکن برابر با ۳۷ سانتیمتر در نظر گرفته شد. آرمورهای مورد استفاده در آزمایش‌ها از نوع مکعبی با طول ضلع ۳.۵ سانتیمتر بود. وزن مخصوص بتن ساخته شده برای آرمورها حدود ۲۳۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد، در نتیجه وزن هر آرمور حدود ۱۰۰ گرم با بازه تغییرات ۲ گرم می‌شود. با توجه به اینکه هدف انجام آزمایش‌ها، بررسی پایداری هیدرولیکی لایه آرمور در موج شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق است، لذا ارتفاع آب در پای موج شکن در تراز ۰.۳۳۰، ۰.۳۵۰، ۰.۳۷۰، ۰.۳۹۰ و ۰.۴۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. در این صورت در دو حالت از آزمایش‌ها تراز تاج موج شکن بالاتر از تراز آب و در ۲ حالت دیگر تراز تاج موج شکن پایین‌تر از تراز آب (به صورت مستغرق) است. در یک حالت نیز تراز تاج برابر با تراز آب در نظر گرفته شد. محققین [۲۷] یک محدوده تغییرات برای فرکانس و پرپود امواج ارائه کردند. بر این اساس محدوده تغییرات پرپود موج بین مقادیر ۰.۱ تا ۲۰ ثانیه ارائه شده است. امواج با پرپود کم دارای ارتفاع موج کمتر می‌باشند و در مقابل پرپودهای بالا باعث ایجاد موج با ارتفاع بیشتر می‌گردد. بررسی‌های آماری صورت گرفته بر روی طوفان‌های مختلف مخصوصاً در منطقه خلیج فارس نشان می‌دهد که عمده پرپود امواج در طوفان‌های مهم بین مقدار ۵ تا ۱۵ ثانیه متغیر بوده است. لذا پرپود امواج واقعی برای شبیه‌سازی در آزمایشگاه برابر ۰.۷، ۱.۱ و ۱.۳ ثانیه در نظر گرفته شد.

جهت اندازه‌گیری مشخصات موج تولید شده در فلوم آزمایشگاه، از سه سنسور در پای موج شکن استفاده شد. همچنین

حرکت بعدی موج ساز به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردد تا موج تولید شده دارای مشخصات مشابه با موج اول باشد. این روند تا پایان هر آزمایش بارها و بارها تکرار می‌گردد.

به منظور ثبت داده‌های آزمایش‌ها، سه دوربین در سه جهت مختلف از موج‌شکن قرار داده شد. دوربین اول که در جلو و بالای تراز آب است، وظیفه ثبت حرکت آرمورها در شیب جلویی موج‌شکن و تاج آن را بر عهده دارد. دوربین شماره دو در پشت موج‌شکن وظیفه ثبت حرکت آرمورهای موجود در شیب پشتی موج‌شکن و تاج آن را دارد. دوربین سوم که در خارج از فلوم قرار دارد، به‌گونه‌ای تنظیم گردید که حرکت امواج و بدنه موج‌شکن از بیرون فلوم ثبت نماید. دوربین شماره ۳ به منظور ثبت تغییرشکل‌های احتمالی در بدنه موج‌شکن و لایه آرمور در نظر گرفته شد.

۴. نتایج و بحث

عملکرد آرمور مکعبی شکل در موج‌شکن‌های تاج بلند به صورت دو لایه و تک لایه توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل در موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق تنها برای حالت استفاده از آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم توسط [۲۰] انجام شده است. استفاده از آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم برای موج‌شکن تاج کوتاه مورد بررسی قرار نگرفته است [۱]. به صورت یک جمع‌بندی می‌توان گفت که بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم در موج‌شکن‌های تاج بلند و تاج کوتاه انجام شده است. بررسی رفتار آرمور مکعبی تک لایه با چیدمان منظم تنها در موج‌شکن تاج بلند انجام شده است. بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم و همچنین آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم در موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق پرداخته شده است. تعداد آزمایش‌های انجام شده بر روی حالت‌های مختلف ذکر شده در جدول ۱ ارائه شده است. تمام آزمایش‌ها بر روی موج‌شکن با شیب بدنه 1.0V-1.5H، عرض تاج برابر $5D_{n50}$ و تراکم چیدمان ۰.۷ انجام گرفت.

جدول (۱). تعداد آزمایش مدل‌سازی شده در آزمایشگاه

ردیف	چیدمان	تعداد لایه	تعداد آزمایش
۱	چیدمان نامنظم	۲	۴۲
۲	چیدمان منظم	۱	۶۰

ایری برن (Iribarren's damage) و تخریب کامل (Destruction) در نظر گرفته شد. معیار خرابی در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر معیار شروع خسارت است. این سطح خرابی شرایطی که تعداد مشخصی از قطعات آرمور از موقعیت اولیه خود حرکت کرده و به اندازه حداقل قطر آرمور جابه‌جا شده است را بیان می‌کند.

با توجه به اینکه سنسورها از نوع ولتاژی می‌باشد، قبل از انجام آزمایش‌ها بایستی سنسورها کالیبره گردد. برای اندازه‌گیری ارتفاع موج تعداد سه سنسور مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (۱) موقعیت شماتیک قرارگیری سنسورها قبل از موج‌شکن نشان داده شده است. موقعیت قرارگیری سنسورها نسبت به موج‌شکن براساس روابط منسارد [۳۹] انجام گرفت. رابطه پیشنهادی به شرح رابطه ۵ و ۶ می‌باشد.

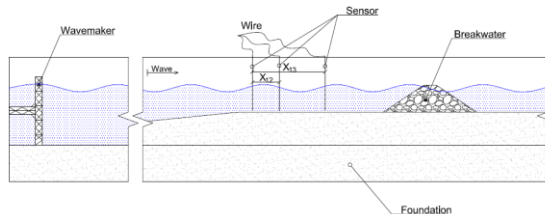
$$X_{12} = L_p/10 \quad (5)$$

$$L_p/6 < X_{13} < L_p/3, X_{13} \neq L_p/5, X_{13} \neq 3L_p/10 \quad (6)$$

X_{12} فاصله بین سنسور شماره ۱ و ۲، X_{13} فاصله بین سنسور ۱ و ۳ و L_p طول موج است. براساس عمق آب در پای موج‌شکن، طول موج در پریودهای مختلف متفاوت است و براساس رابطه ۷ محاسبه می‌گردد.

$$L_p = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(2\pi d/L_p) \quad (7)$$

d عمق آب در محل محاسبه طول موج و T پریود موج است. رابطه فوق بایستی به صورت سعی و خطا محاسبه گردد تا طول موج برای هر پریود موج و ارتفاع آب مشخص در پای موج‌شکن تعیین گردد.

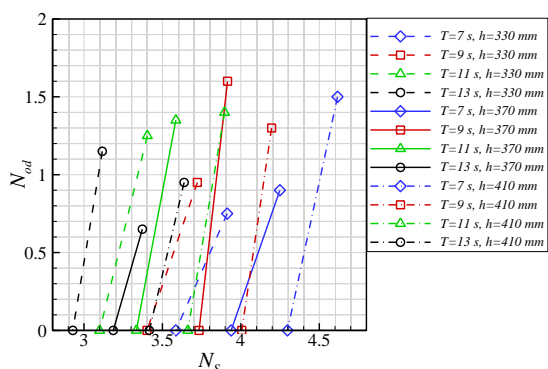


شکل (۱). نمایش مقطع شماتیک موج‌شکن و محل نصب سنسورها در فلوم موج ساز

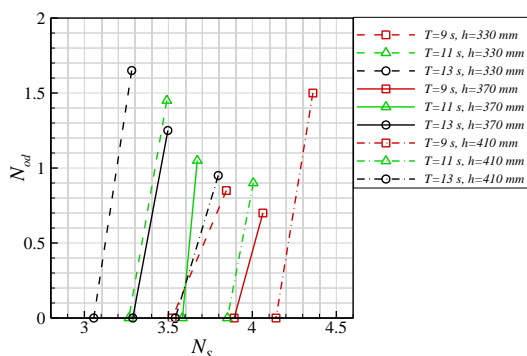
یکی دیگر از نکات حائز اهمیت در مدل‌سازی موج‌شکن‌ها در فلوم، موضوع امواج برگشتی از موج‌شکن در اثر برخورد موج اولیه می‌باشد. سیستم دستگاه موج ساز بکار رفته در آزمایش‌های صورت گرفته دارای یک سیستم اکتیو برای جذب امواج بازتاب شده از بدنه موج‌شکن است. روش کلی کارکرد آن بدین صورت است که پس از بازتاب اولین موج برخوردی به بدنه موج‌شکن، ارتفاع موج در محل دستگاه موج ساز توسط یک سنسور قرائت می‌گردد. سپس با انجام برخی محاسبات درون برنامه‌ای، نهایتاً

۳	چیدمان نامنظم	۱	۴۴
---	---------------	---	----

تعریف شده N_{od} در شکل (۲) ارائه شده است. نتایج ارائه شده برای آزمایش‌های با موج نامنظم و منظم ارائه شده است. آزمایش‌های با مقدار N_{od} بیشتر از صفر و کمتر از ۲ به عنوان آزمایش‌های با خرابی سطح "شروع خرابی" در نظر گرفته شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) مشخص می‌گردد که حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}=0$ برابر ۲٫۹۳ و حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}<2$ برابر ۳٫۱۲ شده است.



الف) موج نامنظم



ب) موج منظم

شکل (۲). تغییرات N_{od} برحسب N_s برای آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم

در شکل (۳) نیز نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمور مکعبی شکل دو لایه در ارتفاع آب‌های مختلف در پای موج‌شکن (۳۳۰، ۳۷۰، ۴۱۰ میلیمتر) و پیوند امواج برابر ۱٫۲۷۸، ۱٫۶۴۳، ۲٫۰۰۸ و ۲٫۳۷۳ در آزمایشگاه ارائه شده است.

همانطور که از شکل (۳) مشخص می‌گردد، با افزایش ارتفاع آب در پای موج‌شکن در تمام پیوندهای موج، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی در لایه آرمور افزایش می‌یابد؛ یعنی با مستغرق شدن هر چه بیشتر موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور با افزایش پیوند موج کاهش می‌یابد. این بدان معنا است که پیوندهای بالاتر امواج دریا به دلیل واردکردن نیروی موج در زمان

در [۴۰] عنوان شده است که استفاده از معیار خرابی برای انواع آرمور بتنی می‌تواند نامناسب باشد؛ زیرا تعریف یک سطح واحد کار دشواری است. برای آرمورهای بتنی معیار خرابی با پارامتر بی‌بعد N_{od} تعریف می‌شود. پارامتر N_{od} به معنای تعداد آرمور حذف‌شده از لایه آرمور بر عرض آرمور تعریف می‌شود که تعریف دقیق آن برابر است با:

$$N_{od} = \frac{N_o}{B/D_{n50}} \quad (۸)$$

N_o بیانگر تعداد آرمور جابه‌جا شده در لایه آرمور به اندازه حداقل قطر آرمور و B عرض فلوم دو بعدی است. در [۴۰] مقدار N_{od} برای سطح خرابی‌های مختلف لایه آرمور مکعبی شکل مقادیری پیشنهاد شده است. برای سطح "شروع خرابی" مقدار $N_{od}=0.2-0.5$ برای سطح "خرابی متوسط" مقدار $N_{od}=1$ و برای سطح "خرابی کامل لایه" مقدار $N_{od}=2$ ارائه شده است. البته [۴۱] و [۲۹] برای آرمور مکعبی شکل تک لایه در سطح "شروع خرابی" مقدار $N_{od}=0$ و برای سطح "خرابی کامل لایه" مقدار $N_{od}=0.2$ پیشنهاد کردند. به نظر می‌رسد که مقدار $N_{od}=0$ بسیار سختگیرانه است. در [۴۰] بیان شده است که سطح خرابی قابل قبول برای آرمور مکعبی شکل در حالت تک لایه و دو لایه با یکدیگر متفاوت است. لذا مقدار $N_{od}=2$ در آرمور دو لایه مکعبی شکل را معادل با $N_{od}=0.2$ در آرمور تک لایه مکعبی شکل در نظر گرفته است.

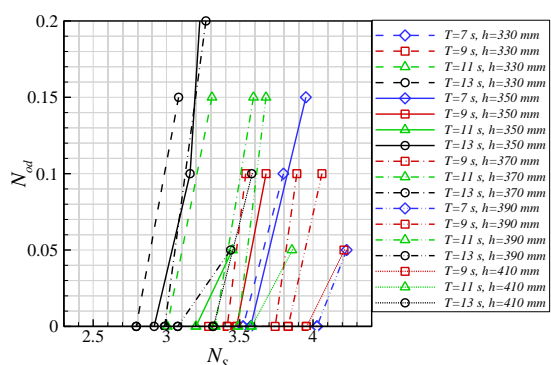
در مقاله حاضر معیار خرابی سطح "شروع خرابی" در نظر گرفته شده است، لذا در تمام آزمایش‌ها، مقدار $N_{od}<0.2$ برای آرمور مکعبی شکل تک لایه و مقدار $N_{od}<2$ برای آرمور مکعبی شکل دو لایه ملاک مقایسه قرار گرفته است.

عرض فلوم آزمایشگاه برابر یک متر است. با توجه به اینکه تمام آزمایش‌ها در تراکم چیدمان برابر ۰٫۷ انجام گرفت، لذا در هر ردیف چیدمان آرمور، تعداد ۲۰ عدد آرمور در نظر گرفته شد؛ بنابراین در حالت آرمور تک لایه با جابه‌جا شدن یک تا چهار آرمور و در حالت آرمور دو لایه با جابه‌جا شدن حداکثر ۴۰ آرمور در هر آزمایش، بیانگر معیار خرابی "شروع خرابی" است.

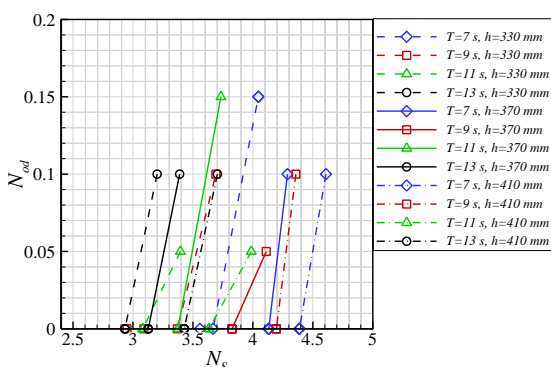
۴-۱. آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم

به منظور بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل در حالت چیدمان دو لایه نامنظم در موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق تعداد ۴۲ آزمایش در آزمایشگاه شبیه‌سازی گردید. آزمایش‌ها در دو حالت موج منظم و نامنظم انجام گرفت. بررسی خرابی‌های رخ داده در آرمور دو لایه مکعبی شکل با چیدمان نامنظم براساس معیار

نظر گرفتن $N_{od}=0$ برابر ۲,۷۹ و حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}<0.2$ برابر ۳,۰۸ شده است.



الف) موج نامنظم



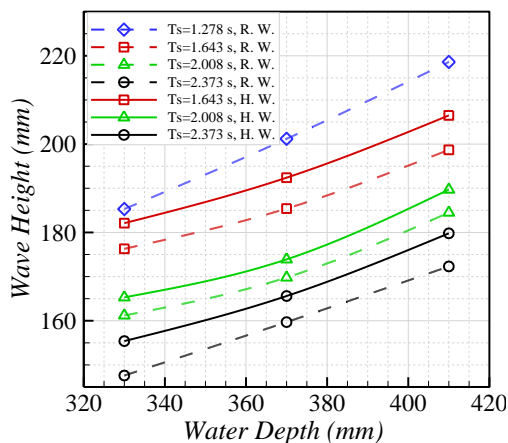
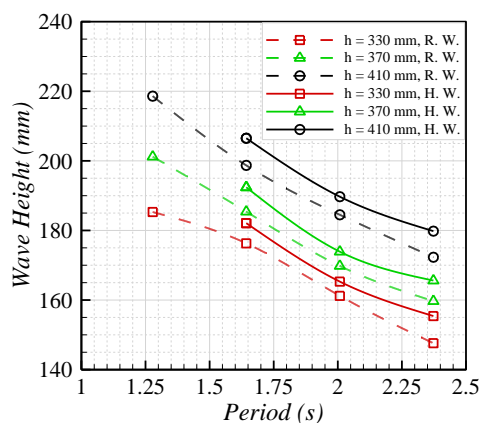
ب) موج منظم

شکل (۴). تغییرات N_{od} برحسب N_s برای آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم

در شکل (۵) نیز نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمور مکعبی شکل تک لایه در ارتفاع آب‌های مختلف در پای موج‌شکن و پی‌یود امواج برابر ۱,۲۷۸، ۱,۶۴۳، ۲,۰۰۸ و ۲,۳۷۳ در آزمایشگاه ارائه شده است.

همانطور که از شکل (۵) مشخص می‌گردد، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی با افزایش ارتفاع آب در پای موج‌شکن افزایش می‌یابد. برعکس با افزایش پی‌یود امواج (به دلیل وارد شدن نیروی موج در مدت زمان بیشتر) ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور کاهش می‌یابد. نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که امواج نامنظم مخرب‌تر از امواج منظم می‌باشند.

بیشتر به لایه آرمور می‌توانند مخرب‌تر باشند. این موضوع هم در حالت موج منظم و هم در حالت موج نامنظم مشاهده گردید. بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۳) نشان می‌دهد که همواره عدد پایداری لایه آرمور موج‌شکن در حالت برخورد موج منظم بیشتر از موج نامنظم است. این بدان معنا است که امواج نامنظم مخرب‌تر از امواج منظم می‌باشند.

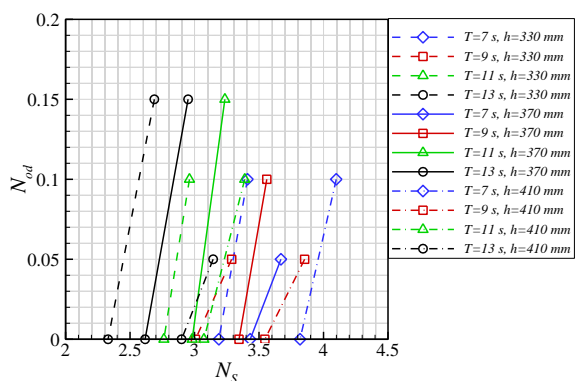


R.W.: موج نامنظم H.W.: موج منظم

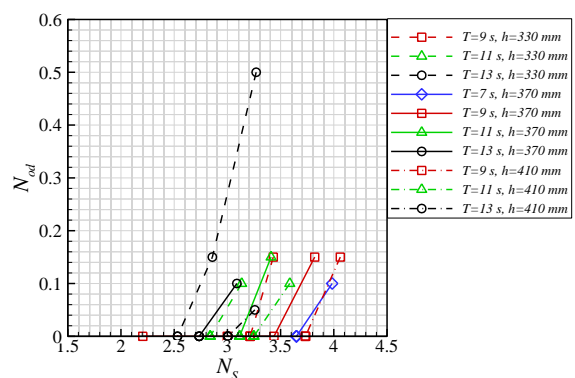
شکل (۳). نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمورهای مکعبی دو لایه با چیدمان نامنظم

۲-۴. آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم

به منظور بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل در حالت چیدمان تک لایه منظم در موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق تعداد ۶۰ آزمایش در آزمایشگاه شبیه‌سازی گردید. آزمایش‌ها در دو حالت موج منظم و نامنظم انجام گرفت. بررسی خرابی‌های رخ داده در آرمور تک لایه مکعبی شکل با چیدمان منظم براساس معیار تعریف شده N_{od} در شکل (۴) ارائه شده است. آزمایش‌های با مقدار N_{od} بیشتر از صفر و کمتر از ۰,۲ به عنوان آزمایش‌های با سطح شروع خرابی در نظر گرفته شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۴) مشخص می‌گردد که حداقل عدد پایداری با در



الف) موج نامنظم

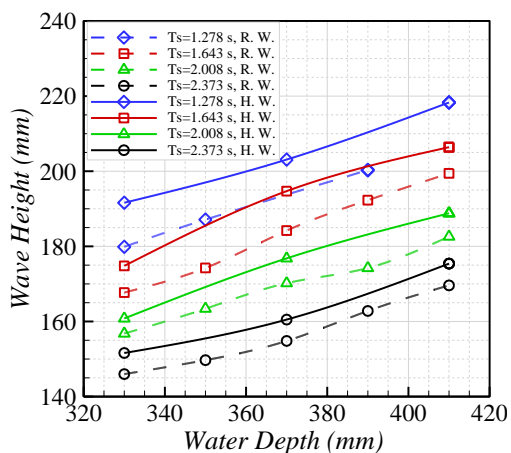
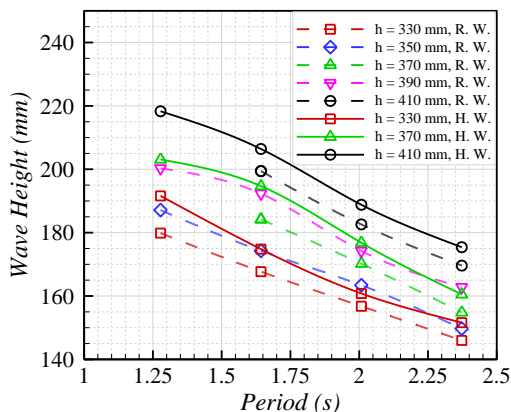


ب) موج منظم

شکل (۶). تغییرات N_{od} برحسب N_s برای آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم

در شکل (۷) داده‌های خام بدست آمده از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم ارائه شده است.

همانطور که از شکل (۷) مشخص می‌گردد و پیش‌تر نیز بیان شده است، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی با افزایش ارتفاع آب در پای موج شکن افزایش می‌یابد. برعکس با افزایش پریود امواج (به دلیل وارد شدن نیروی موج در مدت زمان بیشتر) ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور کاهش می‌یابد. نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد که امواج نامنظم مخرب‌تر از امواج منظم می‌باشند.



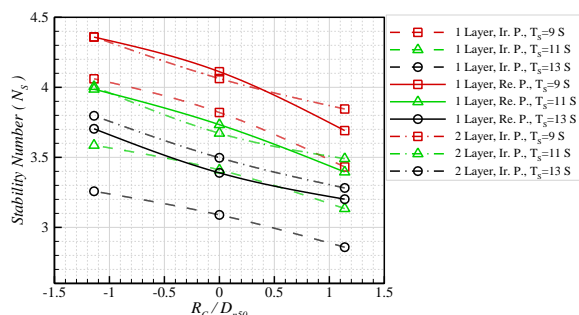
R.W. موج نامنظم H.W. موج منظم

شکل (۵). نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمورهای مکعبی تک لایه با چیدمان منظم

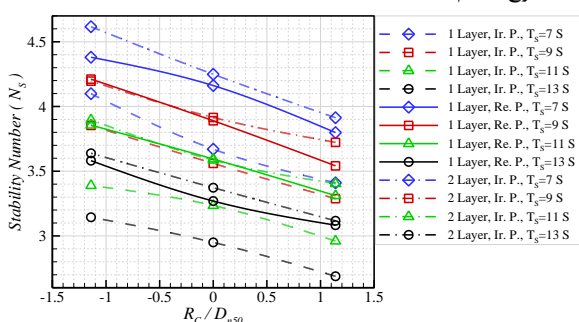
۳-۴. آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم

تعداد ۴۴ آزمایش برای بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل در حالت چیدمان تک لایه نامنظم (با امواج منظم و نامنظم) در آزمایشگاه شبیه‌سازی گردید. براساس توصیه [۴۰] برای بررسی معیار خرابی لایه آرمور مکعبی شکل از پارامتر بی‌بعد N_{od} استفاده شد. در شکل (۶) نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی امواج منظم و نامنظم در حالت آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم ارائه شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) مشخص می‌گردد که حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}=0$ برابر ۲,۳۳ و حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}<0.2$ برابر ۲,۶۷ شده است.

نامنظم در دو حالت برخورد موج منظم و نامنظم نشان داده شده است.



الف) موج منظم

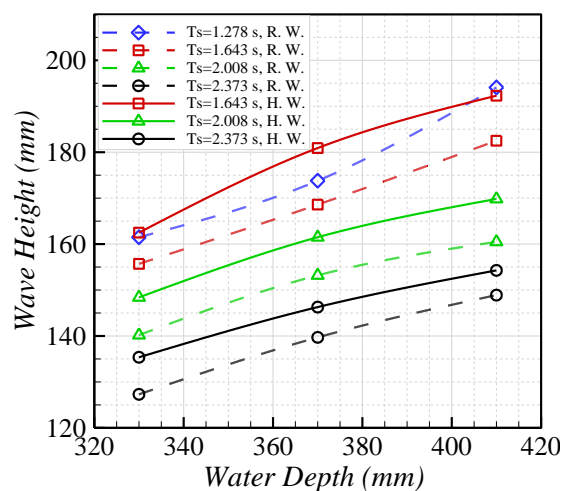
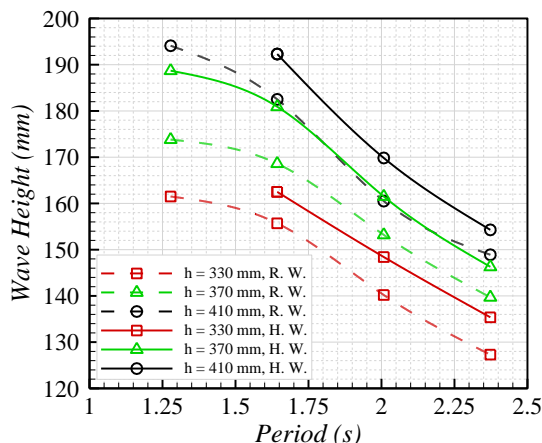


ب) موج نامنظم

شکل (۸). مقایسه نتایج آزمایش‌های بدست آمده برای N_S در مقابل R_C/D_{n50} برای آرمور دو لایه مکعبی نامنظم و آرمور تک لایه مکعبی منظم و نامنظم

همانطور که از نتایج شکل (۸) مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تراز آب در پای موج شکن، پایداری لایه آرمور افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش پریود امواج مقدار پایداری لایه آرمور به دلیل برخورد نیروی امواج در مدت زمان بیشتر به لایه آرمور، کاهش می‌یابد. این رفتار در هر سه حالت آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم، آرمور تک لایه مکعبی با چیدمان منظم و نامنظم مشاهده می‌گردد.

یکی دیگر از نکات جالب توجه که از شکل (۸) مشاهده می‌گردد این است که در تمام پریودهای مختلف امواج و ترازهای آب متفاوت در پای موج شکن، مقدار عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم از دو حالت دیگر کمتر است. این نشان می‌دهد که چیدمان نامنظم لایه آرمور مکعبی شکل تک لایه می‌تواند بسیار سست و ناپایدار باشد. در مقابل عدد پایداری هیدرولیکی آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم تقریباً مشابه با آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم است. می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که عملکرد آرمور تک لایه با چیدمان منظم مشابه با عملکرد آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم است. البته لازم به ذکر است که رفتار آرمور تک



R.W.: موج نامنظم H.W.: موج منظم

شکل (۷). نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمورهای مکعبی تک لایه با چیدمان نامنظم

۵. نتیجه گیری

در بخش قبل نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی آرمور دو لایه مکعبی شکل با چیدمان نامنظم و همچنین آرمور تک لایه مکعبی شکل با چیدمان منظم و نامنظم ارائه شد. در این بخش به مقایسه نتایج بدست آمده برای آرمور تک لایه و دو لایه پرداخته می‌شود و عملکرد آرمور تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم در برابر آرمور دو لایه مقایسه می‌شود.

یکی دیگر از پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده برای ارائه نتایج و مقایسه آنها با یکدیگر، پارامتر بی‌بعد تیزی موج است. تیزی موج برای هر آزمایش براساس رابطه ۹ محاسبه می‌گردد.

$$S_0 = \frac{2\pi H_S}{gT^2} \quad (9)$$

در شکل (۸) مقایسه مقدار عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور در برابر مقدار بی‌بعد شده ارتفاع آزاد موج شکن برای آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و آرمور تک لایه با چیدمان منظم و

بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که به صورت کلی با افزایش تیزی موج، مقدار پایداری هیدرولیکی لایه آرمور افزایش می‌یابد. این موضوع در هر سه حالت مورد آزمایش (آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم، آرمور تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم) مشاهده می‌گردد. همچنین با افزایش ارتفاع آزاد موج‌شکن، تیزی موج و در نتیجه عدد پایداری لایه آرمور برای شروع خرابی کاهش می‌یابد. بررسی اثر پارامتر تیزی موج بر پایداری لایه آرمور نشان می‌دهد که در یک تیزی موج یکسان بیشترین پایداری لایه آرمور مربوط به آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و در حالت تراز آب در پای موج‌شکن برابر ۴۱۰ میلی‌متر است. کمترین حالت پایداری نیز مربوط به آرمور تک لایه با چیدمان نامنظم و در حالت تراز آب در پای موج‌شکن برابر ۳۳۰ میلی‌متر است. البته مقدار عدد پایداری تک لایه آرمور منظم بسیار نزدیک به دو لایه نامنظم است. این رفتارها در هر دو حالت آزمایش با موج منظم و موج نامنظم مشاهده گردید.

۶. جمع‌بندی

در تحقیق حاضر به بررسی رفتار آرمور دو لایه مکعبی شکل با چیدمان نامنظم و آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم و منظم در دو حالت برخورد موج منظم و نامنظم پرداخته شده است. تمام آزمایش‌ها بر روی موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق با شیب بدنه 1.0V-1.5H و با عرض تاج موج‌شکن برابر $5D_{n50}$ انجام گرفت. تراز آب در پای موج‌شکن ۵ مقدار ۳۳۰، ۳۵۰، ۳۷۰، ۳۹۰ و ۴۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و ارتفاع موج‌شکن نیز برابر ۳۷۰ میلی‌متر بود. تراکم چیدمان لایه آرمور در تمام حالت‌ها برابر ۰,۷ در نظر گرفته شد. در حالت چیدمان آرمور دو لایه، تراکم چیدمان در هر لایه آرمور برابر ۰,۷ در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته به شرح موارد زیر می‌باشد.

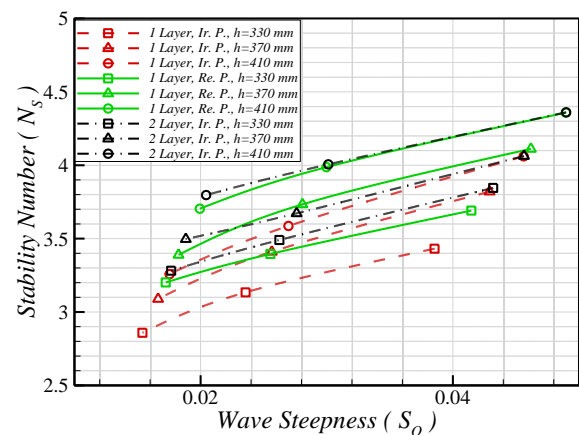
- نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که در تمام آزمایش‌ها، با افزایش ارتفاع آب در پای موج‌شکن، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی در لایه آرمور افزایش می‌یابد؛ یعنی با مستغرق شدن هر چه بیشتر موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر در یک شرایط یکسان هر چه موج‌شکن مستغرق‌تر گردد و تراز آب در پای موج‌شکن افزایش یابد، به منظور تأمین پایداری لایه آرمور در برابر موج طراحی، بلوک با قطر کمتر مورد نیاز است.

- نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش پیوند امواج برخوردی به لایه آرمور، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور کاهش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که امواج دریا با پیوندهای بالاتر توانایی تخریب بیشتری نسبت به امواج با پیوند

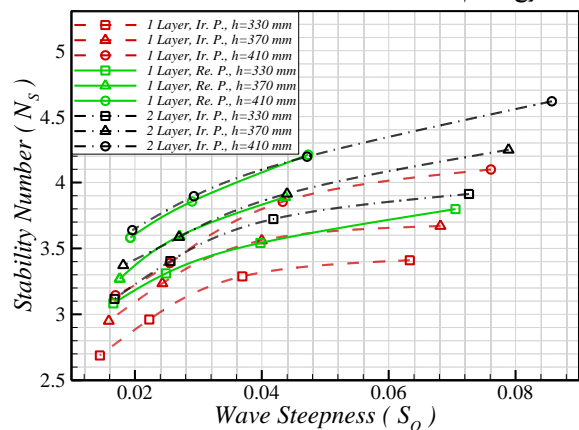
لایه مکعبی با چیدمان منظم بسیار ترد و شکننده است، به گونه‌ای که با جابه‌جا شدن تعداد اندک آرمور از درون لایه آرمور، خرابی کل لایه آرمور رخ می‌دهد. در مقابل آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم دارای انعطاف‌پذیری بیشتری می‌باشد و برای رسیدن به سطح خرابی کل لایه آرمور، تعداد آرمور بسیار بیشتری باید جابه‌جا شوند.

براساس نتایج نشان داده شده در شکل (۸)، حداقل عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم برابر $N_S > 2.69$ ، برای آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم برابر $N_S > 3.08$ و برای آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم برابر $N_S > 3.12$ است.

در شکل (۹) مقایسه مقدار تیزی موج در برابر عدد پایداری برای آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و آرمور تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم در دو حالت برخورد موج منظم و نامنظم نشان داده شده است.



الف) موج منظم



ب) موج نامنظم

شکل (۹). نتایج تیزی موج S_0 براساس N_S برای آرمور دو لایه مکعبی نامنظم و آرمور تک لایه مکعبی منظم و نامنظم

ANDRÉS BREAKWATER (PORT OF MALAGA, SPAIN). Coastal Engineering Proceedings, (33), 6-6.

[4] J. W. Van der Meer. (1988). Stability of cubes, tetrapods and accropode. In Conference Breakwaters88 (pp. 71-80).

[5] J. W. Van der Meer & K. W. Pilarczyk. (1993). Stability of low-crested and reef breakwaters. In Coastal Engineering 1990 (pp. 1375-1388).

[6] J. W. Van der Meer. (1999, June). Design of concrete armour layers. In Proceedings of the coastal structures (Vol. 99, pp. 213-221).

[7] M. R. A. Van Gent, S. E. Plate, E. Berendsen, G. B. H. Spaan, J. W. Van Der Meer & K. d'Angremond. (1999). Single-layer rubble mound breakwaters. In Proc. Coastal Structures (Vol. 99).

[8] A. Van den Bosch, K. D. Angremond, H. Jan Verhagen & J. Olthof. (2003). Influence of the density of placement on the stability of armour layers on breakwaters. In Coastal Engineering 2002: Solving Coastal Conundrums (pp. 1537-1549).

[9] M. E. Gómez-Martín, & J. R. Medina. (2009). Cubipod concrete armour unit and heterogeneous packing. In Coastal Structures 2007: (In 2 Volumes) (pp. 140-151).

[10] M. E. Gómez-Martín & J. R. Medina. (2014). Heterogeneous packing and hydraulic stability of cube and Cubipod armor units. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 140(1), 100-108.

[11] J. R. Medina, V. Pardo, J. Molines & M. E. Gómez-Martín. (2014). Armor porosity and hydraulic stability of mound breakwaters. International Conference on Coastal Engineering (ICCE).

[12] J. R. Medina, J. Molines & M. E. Gómez-Martín. (2014). Influence of armour porosity on the hydraulic stability of cube armour layers. Ocean Engineering, 88, 289-297.

[13] H. F. Burcharth & Z. Liu. (1992). Design of Dolos armour units. In Coastal Engineering 1992 (pp. 1053-1066).

[14] J. R. Medina, R. T. Hudspeth & C. Fassardi. (1994). Breakwater armor damage due to wave groups. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 120(2), 179-198.

[15] L. B. Hellinga. (2016). Stability of Single Layer Cubes on Breakwater Rear Slopes.

[16] J. C. Van der Lem, R. J. H. Stive & M. R. A. van Gent. (2016). SAL REI BREAKWATER WITH SINGLE LAYER CUBES.

[17] M.R.A. Van Gent, I.M. van der Werf. (2017). Single layer cubes in a berm. In: SAVE Proc. 8th SCACR Conference on Applied Coastal Research. Santander.

[18] M. Sarfaraz & A. Pak. (2017). An integrated SPH-polyhedral DEM algorithm to investigate hydraulic stability of rock and concrete blocks: Application to cubic armours in breakwaters. Engineering Analysis with Boundary Elements, 84, 1-18.

[19] M. Sarfaraz & A. Pak. (2018). Numerical investigation of the stability of armour units in low-crested breakwaters using combined SPH-Polyhedral DEM method. Journal of Fluids and Structures, 81, 14-35.

[20] G. Argente, M. E. Gómez-Martín & J. R. Medina. (2018). Hydraulic stability of the armor layer of overtopped breakwaters. Journal of Marine Science and Engineering, 6(4), 143.

[21] Y. Yuksel, E. Çevik, M. van Gent, C. Sahin, M. G. Gultekin & C. Gultekin. (2018). Stability effects of cube armor unit placement configurations in the berm of a breakwater. Coastal Engineering Proceedings, (36), 39-39.

کتر دارند. علت این موضوع می تواند به دلیل وارد شدن انرژی موج در مدت زمان بیشتری به بدنه موج شکن در پروده های بلندتر باشد.

- بررسی اثر نوع موج از نظر منظم و نامنظم بودن بر پایداری لایه آرمور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور در حالت موج منظم بزرگتر از موج نامنظم است.

- نتایج آزمایش های صورت گرفته نشان می دهد که برای سطح معیار خرابی "شروع خرابی" حداقل عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم برابر $N_s > 2.69$ ، برای آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم برابر $N_s > 3.08$ و برای آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم برابر $N_s > 3.12$ است. این بررسی به خوبی نشان می دهد که آرمور تک لایه با چیدمان نامنظم ضعیف تر از آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و آرمور تک لایه با چیدمان منظم است. همچنین می توان نتیجه گرفت که رفتار آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم مشابه آرمور تک لایه با چیدمان منظم است.

- به صورت کلی با افزایش تیزی موج، مقدار پایداری هیدرولیکی لایه آرمور افزایش می یابد. این موضوع در هر سه حالت مورد آزمایش (آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم، آرمور تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم) مشاهده می گردد. همچنین با افزایش ارتفاع آزاد موج شکن تیزی موج و در نتیجه عدد پایداری لایه آرمور برای شروع خرابی کاهش می یابد.

- بررسی اثر پارامتر تیزی موج بر پایداری لایه آرمور نشان می دهد که در یک تیزی موج یکسان بیشترین پایداری لایه آرمور مربوط به آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و در حالت تراز آب در پای موج شکن برابر ۴۱۰ میلی متر است. کمترین حالت پایداری نیز مربوط به آرمور تک لایه با چیدمان نامنظم و در حالت تراز آب در پای موج شکن برابر ۳۳۰ میلی متر است. البته مقدار عدد پایداری تک لایه آرمور منظم بسیار نزدیک به دو لایه نامنظم است. این رفتارها در هر دو حالت آزمایش با موج منظم و موج نامنظم مشاهده گردید.

۷. مراجع

[1] F. Vieira, F. Taveira-Pinto & P. Rosa-Santos. (2020). Single-layer cube armoured breakwaters: Critical review and technical challenges. Ocean Engineering, 216, 108042.

[2] M. R. Van Gent & L. Luis. (2013). Application of Cubes in a single layer. In Proc. 6th SCAR-International Short Course/Conference on Applied Coastal Research.

[3] A. Corredor, M. Santos, M. E. Gómez-Martín & J. R. Medina. (2012). PLACEMENT OF CUBIPOD ARMOR UNITS IN SAN

- [31] M. R. van Gent. (2014). Oblique wave attack on rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 88, 43-54.
- [32] G. Wolters & M. Van Gent. (2011). Oblique wave attack on cube and rock armoured rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, (32), 34-34.
- [33] L. I. P. Almeida. (2013). Experimental evaluation of the behaviour of rubble mound breakwaters with a single layer of cubic blocks. PhD diss .
- [34] R. Triemstra. (2000). The use of high-density concrete in the armour layer of breakwaters.
- [35] R. V. Van Buchem. (2009). Stability of a single top layer of cubes .
- [36] J. R. Medina, M. E. Gómez-Martín, & A. Corredor. (2010). Influence of armor unit placement on armor porosity and hydraulic stability. In *Proc. 32nd Int. Conf. on Coastal Engineering*.
- [37] L. H. Holthuijsen, "Waves in Oceanic and Coastal Waters: Cambridge Univ. Press, 387 p ".(2007).
- [38] S. A. Hughes. (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering (Vol. 7). World Scientific.
- [39] E. P. D. Mansard, and E.R. Funke, 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Coastal Engineering Proceedings* 17.
- [40] C. Ciria. (2007). *Cetmef (2007)-the rock manual. the use of rock in hydraulic engineering. Publicação, (C683)*.
- [41] K. d'Angremond, E. Berendsen, G. S. Bhageloe, M. R. A. Van Gent & J. W. Van der Meer. (1999). Breakwaters with a single armour layer. In *Fifth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries* (pp. 1441-1449).
- [22] Á. Campos, C. Castillo & R. Molina-Sanchez. (2020). Damage in rubble mound breakwaters. Part I: Historical review of damage models. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 317.
- [23] A. Campos, R. Molina-Sanchez & C. Castillo. (2020). Damage in rubble mound breakwaters. Part II: Review of the definition, parameterization, and measurement of damage. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 306.
- [24] M. A. Losada, J. M. Desire & L. M. Alejo. (1986). Stability of blocks as breakwater armor units. *Journal of Structural Engineering*, 112(11), 2392-2401.
- [25] C. Vidal, M. A. Losada & R. Medina. (1991). Stability of mound breakwater's head and trunk. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 117(6), 570-587.
- [26] E. Maciñeira & H. F. Burcharth. (2009). New formula for stability of cube armoured roundheads. In *Coastal Structures 2007: (In 2 Volumes)* (pp. 31-40).
- [27] E. G. Maciñeira & H. F. Burcharth. (2016). Stability of cube armoured roundheads exposed to long crested and short crested waves. *Coastal Engineering*, 112, 99-112.
- [28] M. R. A. Van Gent & G. B. H. Spaan. (1998). Breakwaters with a single layer of Cubes. *Delft Hydraulics report H*, 3387.
- [29] M. R. A. Van Gent, K. D'Angremond & R. Triemstra. (2002). Rubble mound breakwaters: Single armour layers and high-density concrete units. In *Breakwaters, coastal structures and coastlines: Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK on 26-28 September 2001* (pp. 307-318). Thomas Telford Publishing.
- [30] M. R. Van Gent. (2003). Recent developments in the conceptual design of rubble mound breakwaters. *COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka*.