بررسی پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر بر اساس نتایج آزمایشگاهی

پیمان عزآباد[۱] ، مهدی شفیعی‌فر[۲] ، ناصر شیریان[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانش‌آموخته دکترای سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در تحقیق حاضر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، وضعیت نیمرخ تغییرشکل یافته موج‌شکن‌های شکل‌پذیر، در فرآیند برخورد امواج در طول زمان مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این راستا ابتدا ۷ پارامتر مستقل موثر بر پایداری سازه که در مطالعات آزمایشگاهی دستخوش تغییر قرار گرفته‌اند، شناسایی شده و تاثیر آنها در پارامترهای هندسی معرف پایداری (۶ پارامتر)، بررسی شده است. این ۶ پارامتر وابسته به نحوی انتخاب شده‌اند که با کمترین تعداد ممکن، هندسه تغییرشکل یافته سازه را به طور کامل تبیین کنند.

در ادامه برای بدست آوردن مقدار این پارامترها، روابطی بر اساس مدلهای آماری ارائه شده‌اند که بر حسب ۷ پارامتر مستقل موثر می‌باشند. همچنین تلاشهای انجام گرفته در جهت افزایش هر چه بیشتر اعتبار و قدرت این روابط نیز نمایش داده شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها با استفاده از نتایج بدست آمده، نرم‌افزاری به نام IB برنامه‌ریزی شده که به کمک آن، نتایج این تحقیق با نرم‌افزار Breakwat و همچنین با نتایج آزمایشهای انجام شده مورد مقایسه قرار گرفته‌است.

کلمات کلیدی: موج‌شکن شکل‌پذیر، پایداری، مطالعات آزمایشگاهی، نرم‌افزارIB، مدلهای آماری

An Investigation on Stability of Reshaping Breakwaters Using Experimental Data

Abstract

This paper presents results of an experimental investigation on stability of reshaping breakwaters. Results of 82 test cases have been used to study the reshaped profile condition of such breakwaters during the process of wave attacks.

In this research, first 7 independent parameters having significant effects on structure stability have been identified and their consequence on geometric parameters of stability (6 parameters) have been studied. These 6 dependant parameters are selected so that they show completely the deformed geometry of the structure with the least probable tries. Then, using experimental data and fitting them to various statistical models, some formulae are suggested for estimation of geometrical parameters of reshaped profiles. Also efforts to increase the validity of these experimental formulae are presented.

Finally a software called IB has been developed using results of the present research. Then comparisons have been made between IB and BREAKWAT program. Results show that BREAKWAT fails to predict the reshaped profile in some test cases.

Keywords: Reshaping breakwater, Stability, Experimental studies, IB software, Statistical models, Reshaped profile

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]

۱- مقدمه

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که برای حفاظت بندرگاه از اثر امواج دریا و همچنین حفاظت سواحل، ساخته می‌شوند. این سازه‌ها که معمولا بصورت توده سنگی و با سطح مقطع ذوزنقه طرح و اجرا می‌گردند، عموما از سه لایه اصلی تشکیل می‌شوند که عبارتند از: هسته، لایه یا لایه‌های فیلتر و لایه آرمور که وظیفه اصلی مقاومت مستقیم در برابر امواج را به عهده دارد. اجزای تشکیل دهنده لایه آرمور عموما قطعه سنگهای بزرگ و سنگین هستند که از معادن استخراج شده و به محل حمل می‌گردند. در برخی موارد که امواج دریا بسیار مرتفع بوده و یا سنگهای بزرگ و مقاوم به سهولت در دسترس نباشد، نیاز به استفاده از قطعات بتنی با اشکال مختلف و خاص وجود دارد.

نسل جدید موج شکن های توده سنگی به گونه ای طرح و اجرا می‌شوند که اجازه بروز تغییرشکل در مقطع آنها وجود داشته باشد تا بدینوسیله بتوانند انرژی امواج را به خوبی جذب کرده و علاوه بر آن، نیمرخی برای سازه پدید بیاید که نیروهای هیدرودینامیکی وارده را به حداقل برساند.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در این راه انجام گرفته که می‌توان به آزمایشهای Van der Meer (۱۹۸۸) اشاره نمود که با استفاده از داده های آزمایشگاهی روابطی برای تخمین هندسه تغییر شکل یافته سازه ارائه نمود و بر اساس این روابط، نرم‌افزاری به نام Breakwat برنامه‌ریزی کرد. او در ارائه این روابط از پارامتر پایداری(=HoTo)، پارامتر سطح آسیب (S)، و نیز عواملی همچون هندسه اولیه سازه (شیب وجه جلویی) و نفوذپذیری سازه نیز استفاده نمود [۹].

در سال ۱۹۹۳ Lamberti و همکاران به اهمیت خاص شرایط عمق آب پای سازه اشاره نمودند و بیان داشتند که در شرایط آب کم‌عمق که عمده موج-شکن‌های موجود، در این شرایط قرار می‌گیرند؛ ضرایب کاهش تغییرشکل نیمرخ نهایی علاوه بر ارتفاع موج، به عمق شکست، تیزی موج، و شیب کف نیز مربوط می‌باشد [۵].

Sayao (۱۹۹۸) علاوه بر توصیف پایداری موج‌شکن شکل‌پذیر برحسب پارامتر تشابه شکست، دریافت که نفوذپذیری سازه تاثیر بسزایی در پایداری هیدرولیکی آن خواهد داشت. نفوذپذیری زیاد هسته پایداری وجه پشتی سازه را در معرض خطر قرار می دهد و در عین حال نفوذناپذیری هسته نیز می‌تواند باعث ناپایداری سنگهای آرمور گردد[۷].

Torum و همکاران (۲۰۰۲) نیز آزمایشهای گسترده‌ای را روی این دسته موج‌شکن‌ها (البته از نوع سکویی) انجام دادند و توانستند رابطه‌ای برای میزان عقب نشینی سکو در حالت تشکیل نیمرخ پایدار نهایی ارائه کنند. آنها در این روابط جملاتی شامل تاثیر ضریب دانه‌بندی و ضریب عمق را نیز به روابط خود اضافه نمودند[۸].

Rao و همکاران (۲۰۰۳)، با انجام آزمایشهایی دریافتند که با کوچک شدن ابعاد سنگها، میزان آسیب وارده به آنها افزایش می‌یابد. این دو با استفاده از پارامتر سطح آسیب(S) و کاهش ۱۰و ۳۰ درصدی وزن سنگها نشان دادند که یک رابطه نمایی بین افزایش پارامتر پایداری و افزایش سطح آسیب برقرار می‌باشد[۶].

در ایران نیز چند تحقیق در مورد موج شکن های شکل‌پذیر انجام شده است. چگینی و همکاران[۱] تغییرشکل موج‌شکن‌های شکل‌پذیر را در اثر برخورد امواج مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایش‌هایی بر روی مدل هیدرولیکی یک نوع موج‌شکن شکل‌پذیر موسوم به مسلح توده‌ای انجام دادند. همچنین آق‌تومان و همکاران [۲] در مورد اثر پارامترهای مختلف و از جمله ضخامت لایهٔ آرمور موج‌شکن‌های شکل‌پذیر تحقیق نموده اند.

در سال ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ شیریان مجموعه آزمایشهای وسیعی روی موج‌شکن شکل‌پذیر فاقد سکو در فلوم موج مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی انجام داد و واکنشهای هیدرولیکی آنها را مورد بررسی قرار داد. آنچه در تحقیق حاضر انجام شده، تحلیلهایی است که روی نتایج بدست آمده از این آزمایشها صورت گرفته است[۳].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]

در تحقیق حاضر با توجه به نتایج آزمایشهای فوق و با استفاده از داده های موجود، سعی شده‌است تاثیر کلیه پارامترها از جمله: ضریب دانه‌بندی، فاکتور عمق، فاکتور نفوذپذیری مورد بررسی قرار گیرند. پارامتر سطح آسیب به عنوان معیار اصلی فرسایش مورد توجه بوده و مشخصات موج، هندسه اولیه و نیز تعداد امواج برخوردی که شاخصه اصلی شکل‌پذیری می‌باشد نیز بررسی شده‌اند. در نهایت با توجه به پارامترهای مختلف مستقل و وابسته موثر در تخمین نیمرخ تغییرشکل یافته نهایی موج‌شکن شکل‌پذیر و با استفاده از تحلیلهای آماری مختلف، مدلهای ریاضی جهت بدست آوردن هر پارامتر هندسی معرفی شده است. درپایان نرم‌افزاری در این راه توسعه داده شده است که به کمک آن می‌توان نیمرخ تغییرشکل یافته سازه را مشاهده نمود.

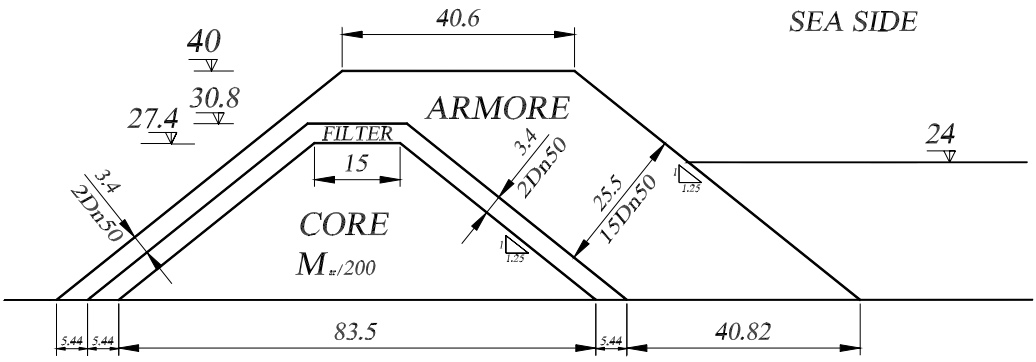
۲- انجام آزمایشها

همانگونه که اشاره شد شیریان در راستای تحقیق رساله دکتری خود آزمایشهای بسیار گسترده‌ای جهت بررسی واکنشهای هیدرولیکی موج شکن های شکل پذیر برای نخستین بار در چنین سطحی در داخل کشور انجام داد. ایشان در تحقیق خود صرفاً به بررسی واکنشهای هیدرولیکی پرداخته و راجع به پایداری این نوع موج شکنها بررسی و تحلیل انجام نداده است. با توجه به داده های بسیار ارزشمند تحقیق مذکور در رابطه به پایداری موج شکن‌های شکل‌پذیر، در تحقیق حاضر این داده‌های خاص پایداری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

در این بخش، شرایط آزمایشهایی که روی مدل انجام گرفته و پارامترهای مورد آزمایش به اختصار توضیح داده می‌شوند.

آزمایشها بر روی مدل هیدرولیکی مقطع موج شکن شکل‌پذیر مطابق شکل (۱) در فلوم موج با ۳۳ متر طول، ۱متر عرض و ۱متر ارتفاع انجام شده است. امواج توسط پاروی مولد موج به طول ۵/۵ متر و ارتفاع ۱ متر از نوع پیستونی قائم- که در انتهای فلوم امواج قرار گرفته- تولید می‌شدند. در تمامی آزمایش‌ها نیمرخ سازه در سمت پارو، قبل از شروع آزمایش و بعد از اصابت امواج، برداشت و ثبت شده است.

در مجموع ۸۲ سری آزمایش در رابطه با پایداری موج شکن‌های شکل‌پذیر انجام گرفته است که در آنها ارتفاع موج، پریود موج، عمق آب، شیب اولیه سازه، ضریب دانه‌بندی سنگهای آرمور، ضریب نفوذپذیری سازه و تعداد امواج برخوردی متغیر بوده اند. آزمایشها در مقیاس ۱/۵۰ و با Dn50 ثابت انجام گرفته است؛ به گونه‌ای که عدد پایداری موج‌شکن (Ns) بین ۱/۷۳ تا ۳/۸۳ و تیزی موج (som) بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ متغیر باشد. جدولهای ۱ و۲ حدود تغییرات را نمایش می دهند. شرایط انجام آزمایشها و محدودیتهای آنها در مرجع [۳] بیان گردیده‌اند.



شکل ۱- نمونهٔ مقطع عرضی مدل آزمایشگاهی موج‌شکن شکل‌پذیر مورد آزمایش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]

۳- تجزیه و تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی

برای اینکه بتوان نتایج بدست آمده از آزمایشها را به گونه‌ای ریاضی با پایداری هیدرولیکی موج شکن شکل‌پذیر ارتباط داد، به تجزیه و تحلیل آماری روی نتایج بدست آمده و نیز ورودیهای آزمایشها نیاز است. برای این امر لازم است پارامترهایی تعریف شوند تا بتوان آزمایشها را بر اساس آنها دسته بندی کرد. این پارامترها در دو نوع پارامتر مستقل و وابسته تقسیم‌بندی می‌گردند:

۳-۱- پارامترهای مستقل

پارامترهای مستقل پارامترهایی هستند که به دلخواه در طول انجام آزمایشها مورد تغییر قرار-می‌گیرند. انتخاب این پارامترها باید با دقت مناسبی صورت گیرد تا با کمترین تعداد پارامتر مستقل، بیشترین تنوع نتایج را از آزمایشها بدست آید. مشخصات امواج وارده به سازه به همراه پارامتر و عدد پایداری و نیز عامل تیزی موج در جدول (۱) آورده شده است. برای تعمیم نتایج از پارامترهای مستقل بدون بعد شده استفاده شده‌است و به منظور حصول نتایج کاملا معتبر از نوع تاثیر ارتفاع و پریود موج بر پایداری سازه، دو پارامتر H_oT_o و s_{om} به عنوان پارامترهای مستقل اصلی انتخاب شده‌اند تا تاثیر مستقیم و معکوس پریود موج بر پایداری، به خوبی بررسی شود. سایر متغیرهای مستقل (مجموعا ۷ پارامتر) عبارتند از:

$$\frac{d}{D_{n50}}, N, \frac{D_{n50}(armor)}{D_{n50}(core)}, \frac{D_{n85}}{D_{n15}}, \cot\alpha$$

مقادیر مختلف این پارامترهای مستقل در هر حالت و تعداد آزمایشهای انجام گرفته در حالات مربوطه در جدول ۲ نمایش داده شده است.

لازم به ذکر است شرایطی که بیشترین تعداد آزمایش، مربوط به هر مقدار پارامتر مستقل در آن انجام شده است، شرایط عمومی آزمایشها نام گرفته است.

جدول ۱- مشخصات امواج وارده به مدل سازه

متغیر مستقل	تعداد آزمایشها	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
ارتفاع موج(Hs)(m)	۸۲	۲/۴	۴/۸
پریود موج(Tp)(sec)	۸۲	۹/۰	۱۴/۰
تیزی موج(s_{om})	۸۲	۰/۰۱۲۴	۰/۰۶۶۱
عدد پایداری(Ns)	۸۲	۱/۷۳	۳/۸۳
پارامتر پایداری(H_oT_o)	۸۲	۴۸/۶	۱۳۶/۴

جدول ۲- مشخصات متغیرهای مستقل محیطی و سازه‌ای و تعداد آزمایشهای مربوطه

متغیر مستقل	حالت ۱		حالت ۲		حالت ۳		حالت ۴	
	مقدار	تعداد آزمایش	مقدار	تعداد آزمایش	مقدار	تعداد آزمایش	مقدار	تعداد آزمایش
تعداد امواج(N)	۱۰۰۰	۱۴	۲۰۰۰	۱۶	۳۰۰۰	۴۷	۶۰۰۰	۵
شیب اولیه(cot)	۱/۲۵	۶۶	۲/۰	۷	۲/۵	۹/۰		
عمق نسبی آب(d/Dn50)	۱۲/۳۵	۶	۱۴/۱۲	۶۹	۱۵/۸۸	۷		
فاکتور دانه بندی(f_g)	۱/۱۴	۲	۱/۴۴	۲	۱/۸۲	۷۸		
فاکتور نفوذپذیری(f_p)	۱/۰	۶	۳/۱۵	۶	۹/۴۴	۶۴	۵۰	۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]

۳-۲- پارامترهای وابسته

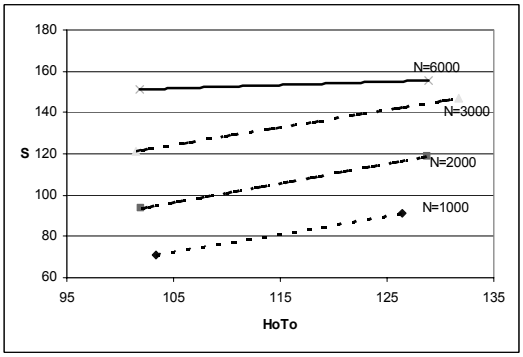
پارامترهایی هستند که در نتیجه آزمایشها تغییر می‌کنند و عموماً مرتبط با هندسه تغییرشکل یافته سازه انتخاب می‌شوند تا بتوانند پایداری هیدرولیکی موج‌شکن شکل‌پذیر با شیب یکنواخت را تبیین کنند. این پارامترها به گونه‌ای انتخاب می‌گردند که هیچ گونه همپوشانی در تعریف هندسه نهایی سازه با یکدیگر نداشته باشند [۷](شکل ۲). همچنین باید آنها را به نحو مناسبی بدون بعد نمود تا بتوان نتایج را تعمیم داد. به همین خاطر علاوه بر زوایا، از طولهایی استفاده می‌شود که به کمک پارامتر D_{n50} (که در این آزمایشها ثابت نگه داشته شده است) بدون بعد شده‌اند. لازم به ذکر است انتخاب قطر اسمی سنگ آرمور برای بدون بعد کردن پارامترها، پس از آزمایش کلیه پارامترهای مربوط به این امر بوده است. همچنین پارامتر S که به صورت $\frac{Ae}{D_{n50}^{\ 2}}$ تعریف شده نیز به عنوان پارامتر وابسته مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است چنانچه مساحتهای فرسایش یافته و انباشت شده را به صورت چهارضلعی‌های ساده شده‌ای (مشخص شده در شکل ۹) در نظر بگیریم، A_e مساحت دو چهارضلعی است که قاعدتا باید باهم برابر باشند. عمق فرونشینی(h_f) نشانگر فاصله محل برخورد ۲ چهارضلعی تا سطح آزاد آب می‌باشد. شیب میانی ($\tan\beta$) معرف شیب خطی است که از محل عمق فرونشینی سازه عبور کرده و نیمرخ نهایی را تشکیل می‌دهد. شیب فوقانی، تاثیر زبانه موج بر بخش فوقانی سازه را که بالای تراز آزاد آب قرار می‌گیرد نشان می‌دهد و با $\tan\gamma$ نمایش داده می‌شود. طول فرسایش تاج و طول انباشت روی پله که به ترتیب با L_c و L_s معرفی شده‌اند فاصله محل عمق فرونشینی را تا بیشترین محل فرسایش روی تاج و قوز تحتانی را نشان می‌دهند.

در نهایت ۶ پارامتر وابسته به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند که در شکل (۱) نوع تعریف آنها مشخص شده است:

$$\frac{L_C}{D_{n50}}, S, \frac{L_S}{D_{n50}}, \tan\beta, \tan\gamma, \frac{h_f}{D_{n50}}$$

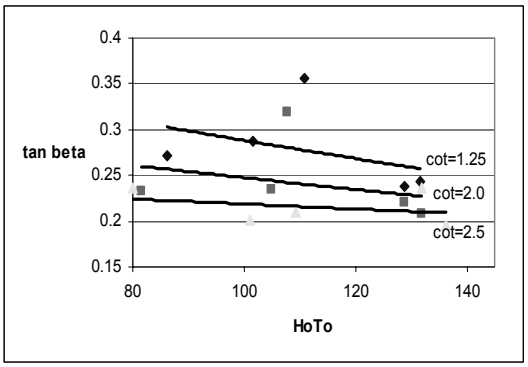
۴- نحوهٔ تاثیر پارامترها بر یکدیگر

برای حصول اطمینان از نتایج مدلهای آماری و نحوه تاثیر هر پارامتر مستقل بر پارامترهای وابسته و همچنین پایداری سازه و آسیب وارده به آن، نمودارهایی تهیه شده است که اهم آنها در شکلهای ۳ تا ۸ نمایش داده شده اند. به دلیل تاثیر غیر قابل انکار پارامتر پایداری (H_oT_o) بر تغییرشکل سازه شکل‌پذیر، ازاین عامل به عنوان محور افقی نمودارها استفاده شده است. محور قائم نمایشگر پارامتر وابسته است و نمودارهای مختلف، مقادیر متفاوت پارامتر مستقل مورد نظر را نشان می‌دهند. در هر نمودار، از مجموع ۸۲ آزمایش، آن دسته از داده‌هایی که کلیه شرایط در آنها یکسان بوده و تنها پارامتر مستقل مورد نظر تغییر کرده است مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

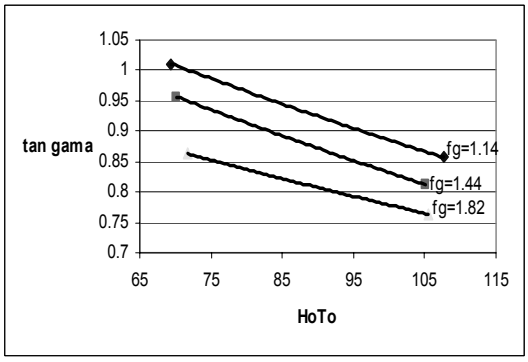


شکل ۳- تاثیر تعداد امواج بر پارامتر سطح آسیب

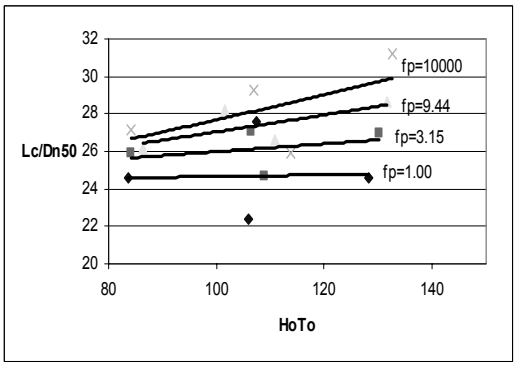
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]



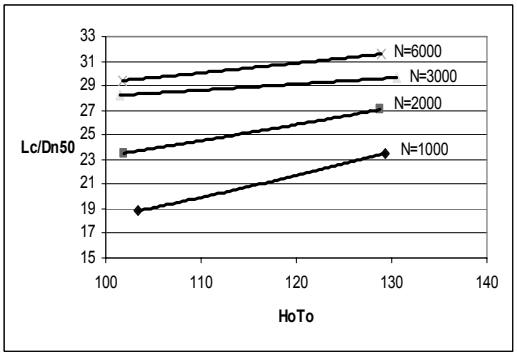
شکل ۴- نمودار تاثیر شیب اولیه سازه بر شیب میانی



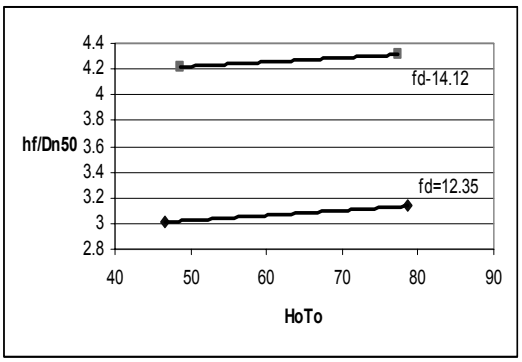
شکل ۵- نمودار تاثیر ضریب دانه‌بندی بر شیب فوقانی



شکل ۶- نمودار تاثیر نفوذپذیری بر طول فرسایش تاج



شکل ۷- نمودار تاثیر تعداد امواج بر طول فرسایش تاج



شکل ۸- نمودار تاثیر فاکتور عمق بر عمق فرونشینی

۵- مدلهای آماری

پس از بررسی‌های فراوان آماری روی پارامترهای مستقل و وابسته در حالات توابع لگاریتمی، نمایی، چندجمله‌ای خطی و ... که به کمک نرم‌افزار قوی و جامع SPSS 13 انجام گرفت؛ روابطی بدست آمد که به کمک آنها بتوان مقادیر پارامترهای وابسته را بر حسب پارامترهای مستقل (شرایط حاکم بر سازه پیش از طراحی) با دقت خوبی تخمین زد.برای این امر با استفاده از مدلهای آماری، روابطی استخراج گردیده‌اند که در ادامه ارایه می گردند و بیانگر نحوه نیمرخ تغییرشکل یافته سازه بر اثر تغییر پارامتر های موثر می‌باشند. مشخصات مدل آماری مربوط به هر رابطه بصورت جدول در کنار نتیجه مدل آمده است. این ۶ رابطه به صورت زیر نمایش داده می‌شوند و میزان اعتبار آنها در قالب R^2 مدل آماری، در کنار هر یک نوشته شده است. لازم به یادآوری است، شاخص فوق که به عنوان مجذور ضریب همبستگی شناخته می‌شود نشانگر میزان پراکندگی داده‌ها در کرانهای فوقانی و تحتانی مدل ریاضی ارائه شده می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]

$$S=\frac{H_oT_o^{2.165}*s_{om}^{1.162}*N^{0.344}*f_g^{0.463}*f_d^{0.444}*f_p^{0.006}}{205*\cot\alpha^{1.265}} \qquad R^2=0.915 \quad (۱)$$

جدول ۳- مشخصات مدل رگرسیون تراز سطح آسیب (رابطه ۱)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	32.929	7	4.704	113.768	.000[a]
	Residual	3.060	74	.041		
	Total	35.988	81			

$$tg\beta=\frac{3.82*f_g^{0.071}*f_d^{0.353}}{H_oT_o^{0.927}*s_{om}^{0.549}*N^{0.135}*\cot\alpha^{0.22}*f_p^{0.009}} \qquad R^2=0.861 \quad (۲)$$

جدول ۴- مشخصات مدل رگرسیون شیب میانی (رابطه ۲)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	7.104	7	1.015	65.458	.000[a]
	Residual	1.147	74	.016		
	Total	8.252	81			

$$tg\gamma=\frac{41.35*f_p^{0.005}}{H_oT_o^{0.463}*s_{om}^{0.047}*N^{0.077}*f_g^{0.128}*f_d^{0.473}*\cot\alpha^{0.101}} \qquad R^2=0.388 \quad (۳)$$

جدول ۵- مشخصات مدل رگرسیون شیب فوقانی (رابطه ۳)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1.714	7	.245	6.695	.000[a]
	Residual	2.707	74	.037		
	Total	4.422	81			

$$\frac{L_c}{D_{n50}}=\frac{1.32*H_oT_o^{0.658}*s_{om}^{0.265}*N^{0.140}*f_g^{0.214}*\cot\alpha^{0.096}*f_p^{0.002}}{f_d^{0.171}} \qquad R^2=0.853 \quad (۴)$$

جدول ۶- مشخصات مدل رگرسیون طول فرسایش تاج(رابطه ۴)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3.440	7	.491	61.136	.000[a]
	Residual	.595	74	.008		
	Total	4.035	81			

$$\frac{L_s}{D_{n50}}=(0.136H_oT_o)+(0.001N)+(166s_{om})+(3.6f_g)+(0.154f_d)-(0.529\cot\alpha)-(0.006f_p)-13.77 \qquad R^2=0.753 \quad (5)$$

جدول ۷- مشخصات مدل رگرسیون طول انباشت روی پله (رابطه ۵)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	990.909	7	141.558	32.227	.000[a]
	Residual	325.051	74	4.393		
	Total	1315.959	81			

$$\frac{h_f}{D_{n50}}=(0.323\ f_d)+(0.469\ \cot\ \alpha)-1.644 \qquad R^2=0.362 \quad (۶)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]

۶- نرم‌افزار IB

به منظور استفاده آسان و عملی از نتایج این تحقیق، نرم‌افزاری به نام IB برنامه‌ریزی شده است که با دریافت پارامترهای ورودی مورد نیاز از جمله پارامترهای مستقل(دارای دیمانسیون) و نیز هندسه سازه و با استفاده از روابط فوق، هندسه تغییر شکل‌یافته سازه را به طور کامل رسم نموده و نیز میزان عقب نشینی سکو(Rec) و طول انباشت روی بستر(L_o) را بر روی تصویر گرافیکی حک می‌کند. علاوه بر آن نتایج پایداری سازه را در قالب یک خروجی متنی ارائه می‌نماید. این نرم‌افزار در محیط برنامه نویسی MATLAB 7.0 نوشته شده و مشتمل بر بیش از ۵۰۰ خط برنامه می‌باشد و با استفاده از محیط گرافیکی پیش رفته، قابلیت استفاده برای کاربر را تا حد بسیار زیادی ساده نموده و امکان مقایسه نتایج را با آزمایشها و سایر نرم‌افزارها فراهم می‌سازد. برای محاسبه مقدار اولیه قطر اسمی سنگ آرمور، نرم‌افزار سطح پایداری مورد انتظار طراح را در قالب مقدار H_oT_o از کاربر سوال نموده و با استفاده از رابطه ۷، مقدار D_{n50} مورد نیاز را محاسبه می‌نماید. می‌دانیم که مقدار ۷۰ برای پارامتر پایداری به عنوان مرز شکل‌پذیری موج‌شکن پیشنهاد شده است. در شکل ۹، تصویری شماتیک از نحوه عملکرد این نرم‌افزار و ترتیب محاسبه پارامترهای مختلف (طولها، زوایا و مساحت فرسایش یافته) مشاهده می‌شود.

نرم‌افزار با منطق برابری مساحت نواحی فرسایش یافته و انباشت شده، پاره‌خط EF درشکل ۹ را رسم می‌نماید و پس از تکمیل نیمرخ تغییرشکل یافته نهایی، مساحت ناحیه فرسایش یافته در شکل ترسیمی را با مقدار بدست آمده از رابطه (۱) مقایسه می‌نماید.

۷- مقایسه نتایج

به کمک نتایج بدست آمده از نرم‌افزار IB ، مقایسه‌ای بین نتایج حاصله از آزمایش و نیز نرم‌افزارهای IB و Breakwat روی ۱۷ عدد از آزمایشهای صورت گرفته انجام گردید که نتایج مقایسه و درصد خطاهای بدست آمده از هر نرم‌افزار در جداول ۸ و۹ قابل مشاهده هستند. مقدار طولهای بدست آمده برای دو پارامتر طول عقب‌نشینی تاج و طول انباشت روی بستر بر حسب متر از دو نرم‌افزار بدست آمده و برای نتیجه آزمایش در مقیاس‌واقعی (۵۰ برابر) تعمیم داده و مقایسه شده است. پیشتر لازم به ذکر است که نرم‌افزار Breakwat ویژه موج‌شکن‌های توده سنگی سنتی توسعه داده شده اما یک بخش مخصوص موج‌شکن شکل‌پذیر نیز در آن دیده شده است که در مقایسه های صورت گرفته مورد استفاده واقع شده است.

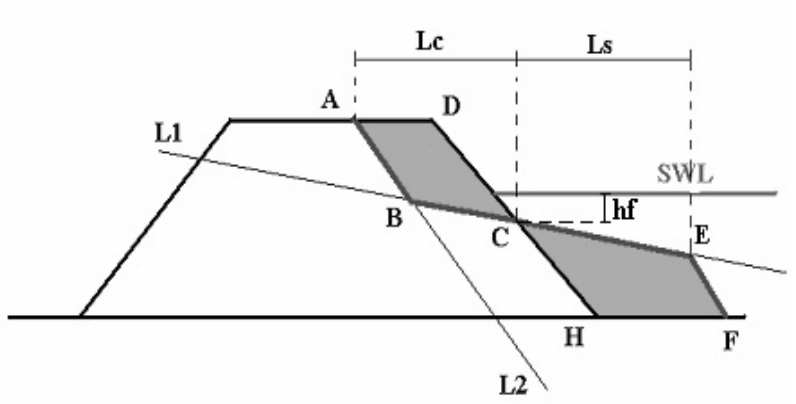
هرچند که شرایط انجام آزمایشها در این تحقیق با آزمایشهای انجام گرفته توسط Van der Meer (۱۹۸۸) متفاوت است، اما دقت بسیار بالا و خطای نرم‌افزار IB نسبت به Breakwat قابل توجه است. نکته قابل توجه در این نتایج مشاهده حتی خطای ۷۰۰ درصدی در نرم‌افزار Breakwat می‌باشد. با توجه به تجاری بودن نرم افزار مذکور، کاربرد آن برای موج شکن‌های شکل پذیر قابل تامل می باشد.

شکلهای ۱۰ تا ۱۴ مقایسهٔ تغییرشکل نهایی مقطع سازه را برای شرایط مختلف هر آزمایش مقدور می‌سازد که برای نرم‌افزار IB به صورت خط‌چین، نرم‌افزار Breakwat به صورت خط- نقطه و برای نتیجه حاصل از آزمایش به صورت خط پر نمایش داده شده است.

در مورد آزمایش شماره ۲۰۰۵ که در شرایط عمومی آزمایشها انجام شده است خطای بسیار زیاد Breakwat قابل مشاهده است (شکل ۱۰) و IB تنها در مورد مساحت فرسایش یافته اندکی خطا دارد که ناشی از اعتبار پایین معادله شیب فوقانی می‌باشد.

شکل ۱۱ نتایج آزمایش شماره ۳۱۰۶ را نشان می‌دهد که در آن شرایط عمومی ثابت نگه داشته شده و تنها عمق آب پای سازه مورد تغییر قرار گرفته است. در این شکل بار دیگر تطابق منحنی‌های آزمایش و IB و خطای Breakwat به وضوح به چشم می‌خورد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]



شکل ۹- مراحل ترسیم نیمرخ تقریبی تغییر شکل یافته سازه

جدول ۸- مقایسه مقادیر بدست آمده از آزمایش و نرم‌افزارها برای طول عقب‌نشینی تاج و طول انباشت روی بستر

	test		Breakwat		IB	
test NO.	Rec(m)	Lo(m)	Rec(m)	Lo(m)	Rec(m)	Lo(m)
2005	2	4	4.8	9.6	2.128	4.482
2017	5	8	8	21	5.793	7.344
2026	8	11	13	24	8.188	11.342
2031	11	16	15	25	13.121	12.567
3101	4	3	6.1	7.8	4.494	3.768
3106	4	7	15.6	17.8	5.913	5.169
3202	3	9	3.3	15.6	3.061	6.002
3205	1	4	0.17	20	0.248	3.167
4002	1	6	0	7.5	0.86	4.638
4003	-3	1	0	8	-1.116	1.698
4107	1	4	4.6	12.3	1.521	5.039
4108	-7	0	-10.7	0	-7.962	0
5005	5	8	10.7	7.8	4.513	6.186
5102	9	14	6.7	18.7	8.761	11.019
5203	5	9	8	20	5.632	8.322
6001	2	7	5	13	2.416	5.103
6202	10	14	11.4	21.4	12.008	17.026

جدول ۹- مقایسه درصد خطای نسبی نرم‌افزارهای IB و Breakwat

	Breakwat		IB	
test NO.	Rec	Lo	Rec	Lo
2005	140	140	6	12
2017	60	163	16	8
2026	63	118	2	3
2031	36	56	19	21
3101	53	160	12	26
3106	290	154	48	26
3202	10	73	2	33
3205	86	400	73	21
4002	34	25	12	23
4003	100	700	56	70
4107	360	208	52	26
4108	53	0	14	0
5005	114	3	6	23
5102	26	34	2	21
5203	60	122	13	8
6001	150	86	21	27
6202	14	53	20	22

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]

آنچه در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از آزمایش شماره ۴۰۰۲ می‌باشد که در آن شیب اولیه وجه جلویی سازه متغیر بوده است. بطوریکه ملاحظه می‌گردد هر سه نتیجه تا حد بسیار بالا و قابل قبولی بر یکدیگر تطابق دارند و این امر در جدول ۴ و درصد خطاهای تقریبا برابر نرم‌افزارها در این آزمایش نیز پیداست. هرچند که میزان این خطاها به هرحال بالاست و این می‌تواند ناشی از حساسیت نرم‌افزارها به تغییرات شیب اولیه سازه باشد.

در شکل ۱۳ نیز نیمرخها تطابق خوبی بر یکدیگر داشته‌اند و تنها تفاوت در شیب ناحیه فوقانی و همچنین طول فرسایش تاج می‌باشد. نیمرخ تغییر یافته در این شکل مربوط به آزمایش شماره ۵۰۰۵ می‌باشد و تنها عامل متغیر در آن فاکتور نفوذپذیری بوده است. البته میزان زیاد این تفاوت می‌تواند ناشی از نحوه متفاوت تعریف این فاکتور توسط Van derMeer با آزمایشهای اخیر باشد.

شکل ۱۴ مربوط به آزمایش شماره ۶۰۰۱ است که ضریب دانه‌بندی در آن مورد تغییر قرار گرفته است. در این شکل نیز مجدداً خطای قابل ملاحظه Breakwat در مقایسه با IB به چشم می‌خورد. هر چند که در این مورد مقدار عمق فرونشینی توسط نرم‌افزار IB با خطای بیشتری محاسبه شده است.

۸ - نتیجه‌گیری

در این مقاله بر اساس نتایج آزمایشگاهی، پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر و نحوهٔ تغییرات نیمرخ این نوع سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی روابط تجربی برای تعیین هندسه نیمرخ تغییر شکل یافته و از جمله محاسبه عمق فرونشینی (رابطه ۶) پیشنهاد شده است.

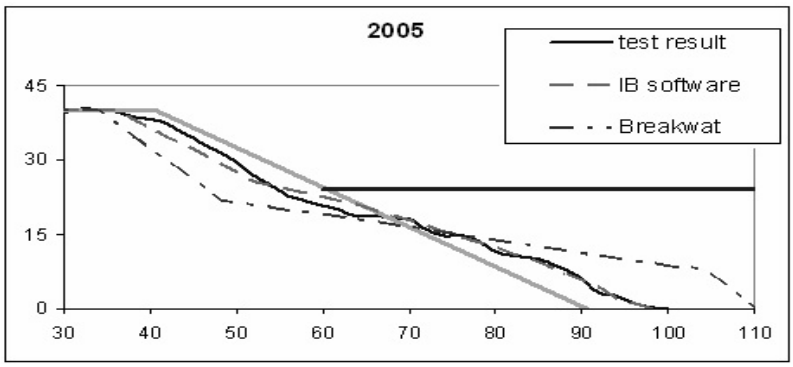
همچنین بر اساس نتایج تحقیق، نرم‌افزار IB توسعه داده شده است که با استفاده از آن می‌توان نتایج را به صورت گرافیکی و متنی نمایش داد. درصد خطای بسیار پایین نرم‌افزار در مقایسه با آزمایشها، نشانگر دقت قابل قبول مدلهای پیشنهاد شده می‌باشد.

ثابت بودن قطر اسمی سنگهای آرمور می‌تواند باعث کاهش دقت نتایج باشد. لازم به ذکر است که اعتبار روابط ارایه شده برای تعیین هندسه نیمرخ تغییر شکل یافته تنها برای محدوده پارامترهایی است که آزمایشها در آن انجام گرفته است و در جداول ۸ و ۹ ذکر شده است. انتخاب صحیح محدوده تغییرات پارامترهای مستقل در طول انجام آزمایشها، می‌تواند مانع بروز بسیاری از خطاهای محتمل گردد؛ این امر حتی می‌تواند برخی پارامترهای بسیار مهم را از مدل آماری حذف کند. مطمئنا آزمایشهایی که با مقیاسهای متفاوت صورت گیرند می‌توانند نتایج گسترده‌تری در اختیارمحققان قرار دهد.

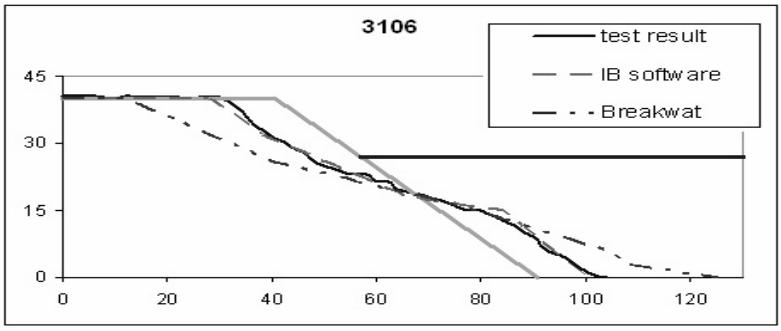
تقدیر و تشکر

داده های مورد استفاده در این تحقیق، در قالب یک طرح پژوهشی که مجری آن آقای دکتر وحید چگینی بوده اند در مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی تهیه شده اند. نویسندگان مقاله وظیفه خود می دانند از آقای دکتر چگینی بخاطر موافقت ایشان برای استفاده از داده ها و مشاوره های علمی و از مسؤولان محترم مرکز مخصوصا جناب آقای مهندس آق تومان برای فراهم آوردن امکان انجام آزمایشها تقدیر و تشکر نمایند.

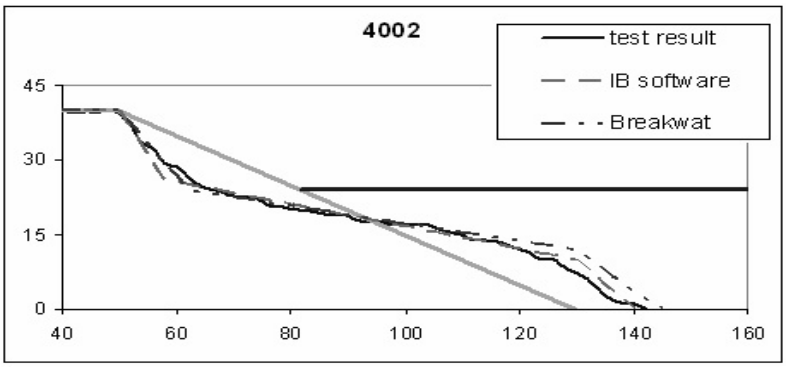
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]



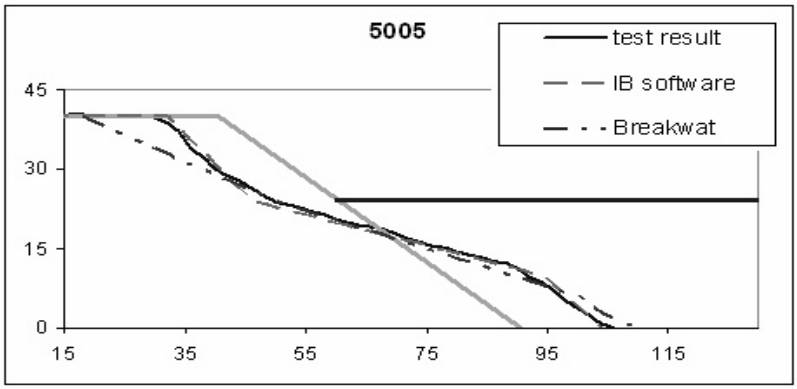
شکل ۱۰- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۲۰۰۵ با تخمین دو نرم‌افزار از نیمرخ تغییرشکل یافته



شکل ۱۱- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۳۱۰۶ با تخمین دو نرم‌افزار از نیمرخ تغییرشکل یافته

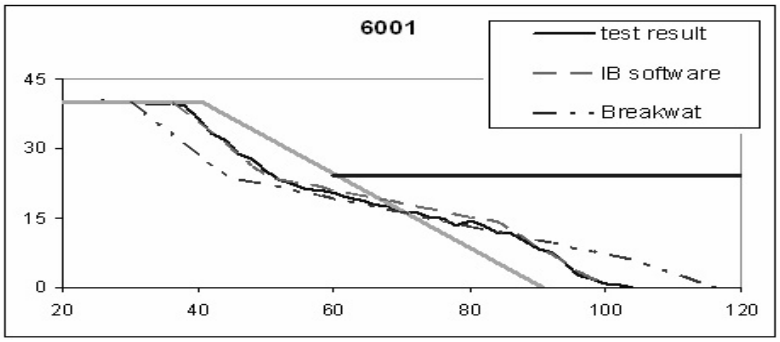


شکل ۱۲- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۴۰۰۲ با تخمین دو نرم‌افزار از نیمرخ تغییرشکل یافته



شکل ۱۳- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۵۰۰۵ با تخمین دو نرم‌افزار از نیمرخ تغییرشکل یافته

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]



شکل ۱۴- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۶۰۰۱ با تخمین دو نرم‌افزار از نیمرخ تغییرشکل یافته

۹- مراجع

۱- چگینی، و، آق تومان پ، یثربی ف و حسینی بندرآبادی س م : "بررسی تغییر شکل موج شکن های شکل‌پذیر" مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، تهران، دانشگاه علم و صنعت، ۱۱ تا ۱۴ آذر ۱۳۷۵، صفحات ۱۱۰-۱۲۳.

۲- آق تومان پیمان، چگینی وحید، شیریان ناصر، حجازی مهدی،
"Design of reshaping breakwater's Armour layer thickness".
دومین سمپوزیوم بین المللی سواحل، Isc 2nd، هوفن، ایسلند، ۵ تا ۸ ژوئن ۲۰۰۵.

۳- شیریان، ناصر. "مطالعه آزمایشگاهی هیدرولیکی و پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر" رساله دکترای رشته سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴.

4- International Navigation Association (2003), state of the art of designing and constructing Berm breakwaters, Report of working group 40 of the Maritime Navigation commission.

5- Lamberti, A. & Tomasicchio, G. R. & Guiducci, F. (1993), Reshaping breakwaters in deep and shallow water condetion , Coastal Engineering 1994, chap 97.

6- Rao, S. and Pramod, Ch. & Rao, B. (2003), Technical Note, Stability of berm breakwater with reduced armor stone weight, Ocean Engineering 31 (2004) , PP. 1577 – 1589.

7- Sayao, O. J. (1998), On the profile reshaping of berm breakwaters, Coastal structures` 99.

8- Torum, A. & Kuhnen, F. & Menze, A. (2002), On berm breakwaters. Stability, Scour, Overtopping, Coastal Engineering 49 (2003), PP.209-238.

9- Van derMeer, J.W (1988), Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Doctoral Thesis approved by Delft University of Technology.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.5.6]