تأثیر شرایط امواج نامنظم بر عرض فرسایش یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر

محمدنوید مقیم[۱]، مهدی شفیعی‌فر[۲]، وحید چگینی[۳]، پیمان آق‌توman[۴]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- عضو هیأت علمی مرکز ملی اقیانوس شناسی
۴- عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی

چکیده

عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر، نقش بسیار مهمی در پایداری و چگونگی تغییر شکل این سازه‌ها دارد. در این تحقیق عرض فرسایش یافته این نوع از موج‌شکن‌ها تحت شرایط مختلف امواج، با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی دو بعدی در فلوم موج، مورد بررسی قرار گرفته است. امواج تابیده شده به مدل مقطع موج‌شکن از نوع امواج نامنظم و طیف انرژی موج مورد استفاده، طیف موج JONSWAP است. برای بررسی مقدار عرض فرسایش یافته تحت اثر شرایط مختلف موج، تأثیر تغییرات مشخصات امواج از جمله ارتفاع موج، پریود موج و مدت طوفان بر روی این پدیده مورد بررسی قرار گرفته است. مجموعاً ۶۰ آزمایش در این تحقیق انجام شده است. به‌منظور تحلیل و بررسی نتایج، ابتدا پارامتر بی‌بعد جدیدی برای در نظرگیری اثر همزمان ارتفاع و پریود موج معرفی و سپس با استفاده از این پارامتر بی‌بعد، رابطه مناسبی برای عرض سکوی فرسایش یافته با در نظر گرفتن پارامترهای موج، ارایه گردیده است. نتایج بدست آمده از این رابطه در مقایسه با روابط سایر پژوهشگران در این زمینه، همبستگی بسیار مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی تحقیق حاضر و همچنین سایر پژوهشگران نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: امواج نامنظم، عرض سکوی فرسایش یافته، مدل آزمایشگاهی، موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر

EFFECTS OF IRREGULAR WAVE PARAMETERS ON BERM RECESSION OF RESHAPING BERM BREAKWATERS

M. N. Moghim[1], M. Shafieefar[2], V. Chegini[3], P. Aghtouman[4]

1- Department of Civil Eng., Faculty of Eng., Tarbiat Modares University
2- Department of Civil Eng., Faculty of Eng., Tarbiat Modares University
3-Iranian National Center for Oceanography (INCO)
4-Coastal Protection division of SCWMRI

Abstract

The berm recession of a reshaping berm breakwater has a very important role in the stability and reshaping of this structure. In this research, the recession of the berm due to wave parameters has been studied based on 2D experimental modeling method in a wave flume. Irregular waves with JONSWAP spectrum were used. A total of 60 tests have been performed to cover the impact of wave parameters such as significant wave height, mean wave period and storm duration on berm recession. A new dimensionless parameter is introduced to evaluate the simultaneous influence of wave height and wave period. Then, a new formula that includes the wave parameters is derived using the new dimensionless parameter for estimating the berm

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

recession. A comparison is made between the estimated berm recessions by this new formula and formulae given by other researchers. The results of this new formula in comparison with the other investigators formula show a proper correlation with the present experimental data and other experimental results.

Keywords: Irregular Waves, Berm Recession, Experimental Modeling, Reshaping Berm Breakwaters

۱- مقدمه

موج‌شکن سکویی نوعی موج‌شکن توده‌سنگی است، که با ایجاد سکویی بزرگ در تراز بالاتر و یا همتراز سطح ایستابی (SWL) در سمت دریا ساخته می‌شود (شکل۱). نیم‌رخ موج‌شکن سکویی پس از برخورد امواج به صورت نیم‌رخی به شکل حرف لاتین S خوابیده، تغییر شکل می‌دهد. ساخت موج‌شکن‌های سکویی با توجه به استفاده بهینه از مصالح معدن و ساخته شدن با وسایل و تجهیزات ساده‌تر نسبت به موج‌شکن‌های توده‌سنگی معمولی، ارزانتر از موج‌شکن‌های نوع دوم است. بعلاوه در موج‌شکن‌های نوع سکویی از سنگهای سبکتری استفاده می‌شود و شیب وجه جلویی آنها تیزتر است [۱].

به‌طور کلی موج‌شکن‌ها بر اساس عدد پایداری (H_o) طبقه‌بندی می‌شوند که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$H_o = \frac{H_s}{\Delta . D_{n,50}} \qquad (۱)$$

که در آن H_s: ارتفاع موج مشخصه (m)، Δ: چگالی شناوری نسبی قطعه آرمور ($\Delta = \frac{\rho_a}{\rho} - 1$)، ρ_a: جرم مخصوص سنگ (kg/m^3)، ρ: جرم مخصوص آب (kg/m^3) و $D_{n,50}$: قطر مشخصه سنگدانه‌ها (m) است. البته بدلیل آنکه عدد پایداری ذکر شده در رابطه فوق اثر پریود موج را در نظر نمی‌گیرد و با توجه به اینکه اثر پریود در پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر (مقادیر بالای H_o) مهم است، Van der Meer پارامتر بی‌بعد شده H_0T_0 را که اثر میانگین پریود موج را نیز در نظر می‌گیرد، به صورت زیر تعریف کرد [۲]:

$$H_oT_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \times T_m \times (g/D_{n50})^{\frac{1}{2}} \qquad (۲)$$

که در آن $T_o = T_m \times (g/D_{n50})^{\frac{1}{2}}$ (پارامتر بی‌بعد پریود موج)، T_m: پریود موج و g: شتاب ثقل می‌باشد.

جدول (۱) حدود و مقادیر دو شاخص فوق را برای سه دسته از موج‌شکن‌های سکویی نشان می‌دهد. عدد پایداری برای موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر در محدوده $2.5 < H_0 < 4$ و $60 < H_0T_o < 100$ قرار دارد.

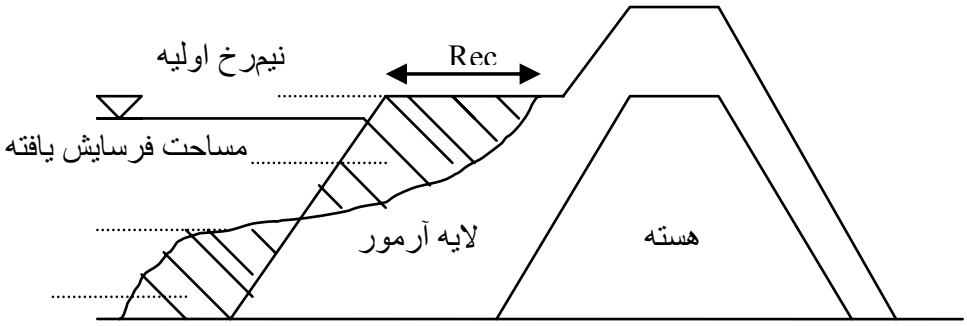
یکی از مهمترین پارامترهای حاکم در طراحی و اندازه‌گیری تغییر شکل موج‌شکن سکویی، میزان فرسایش سکوی آن (Rec) است، بطوریکه اگر این مقدار بزرگتر از عرض سکوی موج‌شکن باشد (Rec>B)، آسیب و احتمالاً ناپایداری موج‌شکن اتفاق می‌افتد [۳].

جدول ۱- تقسیم‌بندی انواع موج‌شکن‌های سکویی برحسب عدد پایداری [۳]

نوع موج‌شکن	$N_s \equiv H_o$	H_oT_o
موج‌شکن سکویی غیر قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی	<۱/۵-۲	<۲۰-۴۰
موج‌شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی	۱/۵-۲	۴۰-۷۰
موج‌شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار دینامیکی	>۲/۷	>۷۰

پژوهشگران گوناگونی از جمله Hall & Kao [۴]، چگینی و همکاران [۵]، Tørum [۶]، Tørum و همکاران [۷]، Sayao [۸]، Daskalov& Lissev [۹]، Rao & Pramod [۱۰]، Andersen [۱]، Van der Meer [۱۱]، Norton و Holmes [۱۲]، Van Gent [۱۳] و بهلولی [۱۴] تحقیقات متعددی بر روی پایداری موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر انجام داده‌اند. نتیجه برخی تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده به‌صورت روابط تجربی برای مقدار عرض فرسایش یافته سکو ارایه شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]



شکل ۱- موج‌شکن سکویی

Hall & Kao (۱۹۹۱) در مورد تأثیر سنگهای گرد گوشه بر تغییر شکل سکو، تحقیقاتی انجام دادند و فرمولی برای محاسبه میزان فرسایش سکوی همگن به صورت زیر ارائه کردند [۴]:

$$\frac{Rec}{D_{50}} = (-10.4 + 0.51.H_o^{2.5}) + 7.52(f_g) - 1.07(f_g)^2 + 6.12P_R \quad (۳)$$

که در آن $f_g = \frac{D_{85}}{D_{15}}$: ضریب منحنی دانه‌بندی سنگهای بکار رفته و P_R: درصد سنگهای گرد گوشه در لایه آرمور می‌باشند. D_{15} و D_{85} به‌ترتیب عبارتند از قطری که ۱۵ و ۸۵ درصد سنگها، قطری کمتر از آن دارند.

Tørum و همکاران (۲۰۰۳) فرمول ساده‌ای برای محاسبه عرض فرسایش یافته سکو و زمانی که موج به صورت عمود بر خط طولی موج‌شکن برخورد می‌کند، به‌دست آوردند. آنها در فرمول ارائه شده اثر ارتفاع موج، پریود موج، دانه‌بندی سنگها و عمق آب را در نظر گرفتند [۷].

$$\frac{\mathrm{Rec}}{D_{50}} = 0.0000027(H_0T_0)^3 + 0.000009(H_0T_0)^2 + 0.11(H_0T_0) - (9.9f_g^{\,2} + 23.9f_g - 10.5) - f_d \quad (۴)$$

که در آن f_d: ضریب عمق است. ضریب عمق برای دو حالت عمق بی‌بعد ($\frac{d}{D_{n50}} = 12.5,25$) تحلیل شده است که به عنوان تقریبی اولیه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_d = -0.16(\frac{d}{D_{n50}}) + 4.0 \quad (۵)$$

که در آن d: عمق آب در پای موج‌شکن است. شایان ذکر است که فرمول فوق برای بازه $(1.3 < f_g < 1.8)$ اعتبار دارد.

Andersen (۲۰۰۶) آزمایشهای وسیعی برای بررسی پدیده روگذری موج از روی موج‌شکن‌های سکویی انجام داد و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده و همچنین فرضیات اولیه، رابطه نیمه تجربی زیر را برای بدست آوردن عرض سکوی فرسایش یافته پیشنهاد کرد [۱].

$$\frac{Rec}{D_{n,50}} = \frac{(1+c_1).d - c_1.h_s}{d - h_B}.f_N.f_\beta. f_{Ho}.f_{grading} + \frac{cot(\alpha_d) - 1.05}{2.D_{n,50}}.(h_B - d) \quad (۶)$$

که در آن c_1: ضریبی ثابت برابر ۱/۲، h_B: ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی، h_s: فاصله تراز پله تا سطح ایستابی و α_d: زاویه شیب پایینی سکو هستند. در این رابطه برای در نظر گرفتن اثر تعداد امواج برخوردی (مدت طوفان) (N)، جهت موج برخوردی (β)، دانه‌بندی لایه آرمور و عدد پایداری، توابعی به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [۱]:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

$$\begin{cases} f_N = (N/3000)^{-0.046.H_o+0.3} \; for \quad H_o < 5 \\ f_N = (N/3000)^{0.07} \; for \quad H_o \geq 5 \end{cases} \quad (۷)$$

$$f_\beta = cos(\beta) \quad (۸)$$

$$\begin{cases} f_{grading} = 1 \quad for \quad f_g \leq 1.5 \\ f_{grading} = 0.43.f_g + 0.355 \, for 1.5 < f_g \leq 2.5 \\ f_{grading} = 1.43 \quad for \quad f_g > 2.5 \end{cases} \quad (۹)$$

$$\begin{cases} f_{Ho} = 19.8.\exp(-\frac{7.08}{H_o}).s_{om}^{-0.5} \, for T_o \geq T_o^* \\ f_{Ho} = 0.05.H_o T_o + 10.5 \, for T_o < T_o^* \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$T_o^* = \frac{19.8.\exp(-\frac{7.08}{H_o}).s_{om}^{-0.5} - 10.5}{0.05.H_o}$$

در رابطه فوق $s_{om} = \frac{H_s}{L_{om}}$: تیزی موج و L_{om}: طول موج در آب عمیق بر حسب پریود میانگین می‌باشد.

Van der Meer (۱۹۸۸) نتیجه کار خود را به‌صورت نرم‌افزاری به نام BREAKWAT برای تخمین نیم‌رخ تغییر شکل یافته ارائه نموده است [۱۱].

با توجه به آنکه نتایج بدست آمده از روابط پیشنهادی در این زمینه برای شرایط محیطی و سازه‌ای یکسان، نتایج متفاوتی نشان می‌دهند، در این تحقیق به مطالعه آزمایشگاهی موج‌شکن سکویی نوع ایرانی متشکل از سه لایه هسته، فیلتر و آرمور (برخلاف نوع غیر ایرانیِ متشکل از دو لایه هسته و آرمور) و همچنین تحلیل اثر شرایط متنوع امواج نامنظم بر این سازه‌ها برای دستیابی به پارامترهای بی‌بعد و روابط جدید مناسب، پرداخته خواهد شد.

۲- مدلسازی آزمایشگاهی

در این مدلسازی آزمایشگاهی، پایداری و مقدار عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر متشکل از سه لایه آرمور، فیلتر و هسته به‌صورت مدل دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

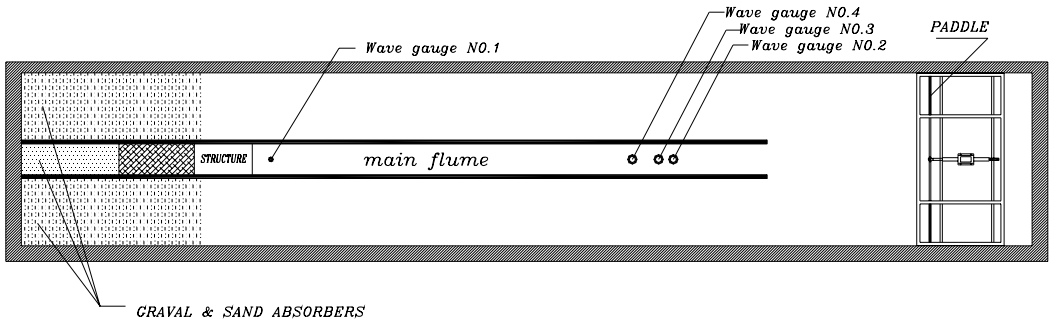
آزمایشهای مدل آزمایشگاهی بر روی مقطع موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر، در فلوم موج مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی با ۳۵ متر طول، ۵/۵ متر عرض در سه قسمت و ۱ متر ارتفاع، انجام شده است (شکل ۲). تولید موج در این فلوم به صورت نامنظم با طیف انرژی JONSWAP توسط دستگاه مولد موج ساخت شرکت DHI انجام شد. شکل (۳) مقطعی از مدل موج‌شکن ساخته شده در انتهای قسمت میانی فلوم موج را نشان می‌دهد.

شیب ۲۰ متر ابتدایی کف فلوم موج از سمت پارو به طرف سازه برابر ۱:۵۰، در ادامه تا فاصله ۴/۵ متر از شیب قبلی برابر با ۱:۱۵۰ است و کف فلوم پس از آن در قسمت انتهایی و محل احداث سازه موج‌شکن، به‌صورت افقی است. ثبت نوسانات سطح آب توسط چهار دستگاه ارتفاع سنج موج در حین انجام آزمایش صورت گرفت و در رایانه ذخیره شد. یک دستگاه ارتفاع‌سنج موج در جلوی سازه برای اندازه‌گیری امواج تابشی و سه دستگاه ارتفاع سنج دیگر برای اندازه‌گیری ضریب بازتاب موج در وسط فلوم نصب شد. داده‌های برداشت شده از حسگرهای بازتاب موج، با استفاده از روش Mansard و به وسیلهٔ نرم‌افزار WS (Wave Synthesizer) تحلیل شد و ضرایب بازتاب برای جدا نمودن ارتفاع موج تابشی و بازتابی محاسبه گردید.

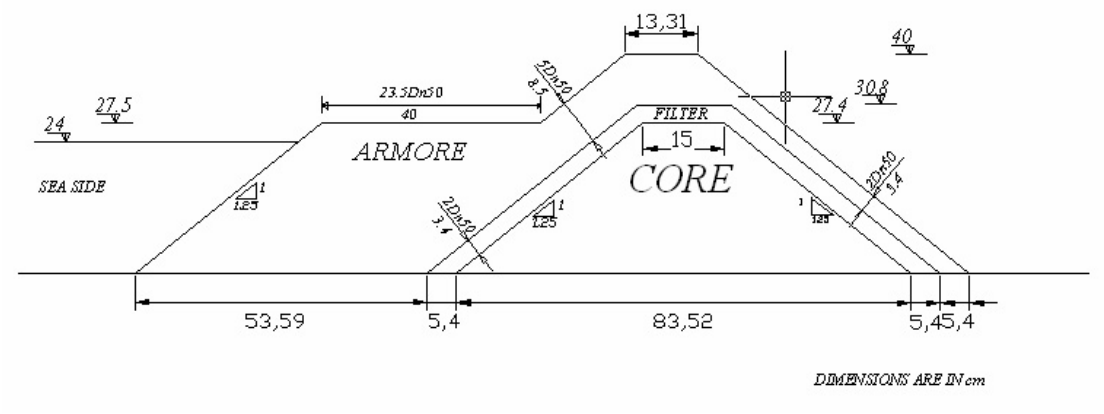
در تمامی آزمایش‌ها، نیم‌رخ سازه در سمت پارو قبل از شروع آزمایش و بعد از اصابت امواج در سه ردیف جداگانه (ردیف میانی در وسط فلوم و دو ردیف کناری در فاصله ۱۰ سانتیمتری از ردیف وسطی) ثبت گردید. در هر ردیف در فواصل ۲ سانتیمتری مقادیر خوانده شده توسط دستگاه پوینت گیج با کاوه کروی شکل به قطر ۱/۵ سانتیمتر ثبت می‌شد.

جدول (۲) مشخصات مصالح تشکیل دهنده موج‌شکن توده‌سنگی سکویی از جمله قطر اسمی، وزن، چگالی و ضریب منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها و همچنین شکل (۴) نمایی از مصالح تشکیل دهنده مدل موج‌شکن سکویی موردنظر را نشان می‌دهند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]



شکل ۲- پلانی از فلوم موج و موقعیتهای مربوط به حسگرهای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب



شکل ۳- مقطع مدل موج‌شکن شکل‌پذیر با مقطع ذوزنقه‌ای و موج‌شکن سکویی

جدول ۲- مشخصات مصالح سازنده موج‌شکن مورد مطالعه

	لایه آرمور	لایه فیلتر	هسته
قطر اسمی سنگدانه‌ها (m)	۰/۰۱۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳
وزن مصالح (kg)	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱۳	
ضریب منحنی دانه‌بندی	۱/۸۲	۱/۳۳	ماسه شسته شده
چگالی مصالح (kg/m3)	۲۶۰۰	۲۶۰۰	۱۷۰۰



شکل ۴- نمایی از مصالح هسته ،فیلتر و آرمور اجرا شده برای ساخت مدل موج‌شکن سکویی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

۳- دامنه تغییرات پارامترهای محیطی و سازه‌ای

آزمایشهای انجام گرفته در این تحقیق، برای در نظرگرفتن اثر سه پارامتر ارتفاع موج، پریود موج و تعداد موج برخوردی به سازه انجام شد. دامنه تغییرات پارامترهای بابعد و بی‌بعد موردنظر در این تحقیق به‌صورت جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. دامنه تغییرات ارتفاع موج به‌صورتی در نظر گرفته شد که تا حد امکان با توجه به پریودهای در نظر گرفته شده، با حداقل تعداد ارتفاع موج بتوان محدوده وسیعی از تیزی امواج (S_{om}) و عدد پایداری (H_o و H_oT_o) را پوشش داد. در مجموع در این دسته از آزمایشها حدود ۶۰ آزمایش انجام شد.

برای به حداقل رساندن اثر لزجت، کنترل از طریق معیار عدد رینولدز (Re) ممکن می‌شود که براساس توصیه Van der Meer باید در محدودهٔ رابطهٔ زیر قرار گیرد [۲]:

$$\mathrm{Re} = \frac{D_{n50} \times \sqrt{gH_S}}{\upsilon} > (1\times10^4 - 4\times10^4) \qquad (۱۱)$$

حداقل مقدار بدست آمده برای پارامترهای مذکور در این آزمایشها برابر با ($\mathrm{Re} = 1.13\times10^4$) است که مقدار مربوطه در محدوده مجاز پیشنهادی قرار دارد.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت ابتدا به بررسی چگونگی و میزان تأثیر هر یک از پارامترها و سپس به معرفی پارامتر بی‌بعد و رابطه جدید پرداخته خواهد شد. لازم بذکر است که آن دسته از آزمایشهایی که روگذری موج از روی سازه از حد مجاز فراتر رفته است، در تحلیل پایداری سازه حذف گردیده‌اند.

۴- ۱- تأثیر ارتفاع موج

شکل (۵) نیم‌رخ تغییر شکل یافته موج‌شکن سکویی برای سه ارتفاع موج متفاوت با پریود موج یکسان را نشان می‌دهد. در این سه آزمایش پریود اوجی (پیک) موج برابر ۱/۲۷۳ ثانیه و تعداد موج برخوردی برابر با ۳۰۰۰ است. با توجه به نیم‌رخ‌های ترسیم گردیده مشاهده می‌شود که ارتفاع موج پارامتر بسیار مؤثری در پایداری و میزان تغییر شکل موج‌شکن سکویی است، بطوریکه با افزایش ارتفاع موج در یک پریود ثابت، مقدار عرض سکوی فرسایش یافته بیشتر می‌شود. این مفهوم برای کلیه داده‌های موجود در شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود.

با ثابت بودن پریود امواج، هر چه ارتفاع موج برخوردی پای سازه بلندتر باشد، انرژی موج برخوردی با توان دوم ارتفاع موج افزایش یافته و همچنین با تیزتر شدن موج برخوردی، شکست موج به سمت شکست از نوع چرخان میل خواهد نمود. از خصوصات برجسته این نوع شکست موج نسبت به سایر حالات شکست موج، اتلاف انرژی بالا و تمرکز شکست و استهلاک انرژی در نقطه شکست موج است. بنابراین هنگام بالاروی موج روی سازه با افزایش سریع سرعت جریان در هنگام بالاروی و همچنین آشفتگی به‌وجود آمده در اثر شکست موج، تنش برشی بالایی بر ذرات سنگی وارد شده و نیروی خود را صرف تکان دادن ذرات سنگی می‌نمایند. جریان به‌وجود آمده بر روی شیب، بعد از شکست موج با سرعت بیشتری حرکت کرده و مسافت زیادتری را روی شیب سازه می‌پیماید. در لحظه‌های بعدی در هنگام پایین‌روی موج، جریان قوی‌تری هم بر روی سازه و هم از داخل سازه به سمت بیرون به‌وجود می‌آید. این امر منجر به تغییر شکل بیشتر سازه می‌شود.

شکل (۶) نشان می‌دهد که در ارتفاع‌های بالای موج در هر پریود، با افزایش ارتفاع موج، نرخ افزایش عرض سکوی فرسایش یافته کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به این صورت بیان کرد که در اثر برخورد اولیه موج و ایجاد شیب ملایمی از مصالح در قسمت میانی سازه، اولاً، امواج با ارتفاع بیشتر، در اثر توسعه و پهن شدن سازه به‌طرف جلو، زودتر جلوی سازه می‌شکنند و انرژی موج برخوردی را کاهش می‌دهند و ثانیاً طول محیط متخلخل بیشتری برای استهلاک و جذب انرژی موج به‌وجود می‌آید. همچنین در شکل (۶) مشاهده می‌شود که در پریودهای بالاتر موج، مقدار عرض فرسایش یافته با ارتفاع موج کمتری نسبت به پریودهای پایین، به مرحله کاهش نرخ افزایش عرض سکوی فرسایش یافته خواهد رسید.

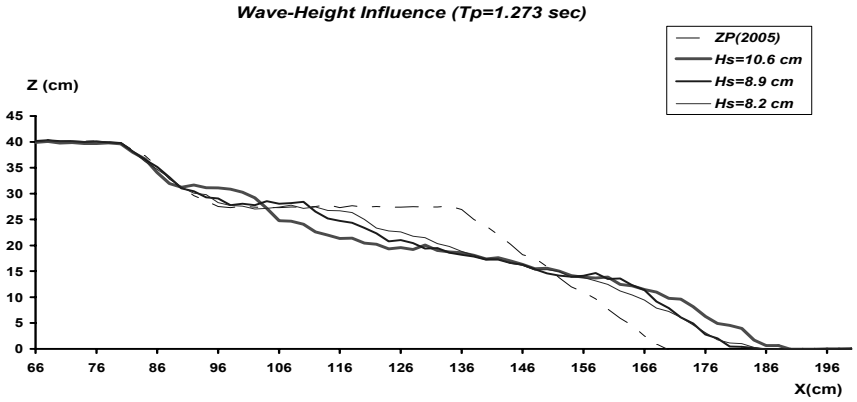
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای موجود برای بررسی پایداری سازه

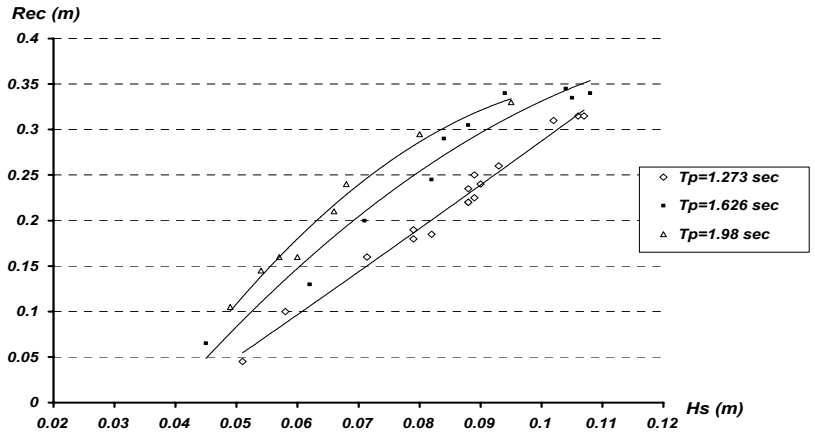
پارامتر مورد نظر	نماد	دامنه تغییرات
عرض سکوی موج‌شکن	B	۴۰ سانتیمتر
ارتفاع موج	Hs	۴/۵ تا ۱۰/۸ سانتیمتر
پریود اوجی موج	Tp	۱/۲۷۳، ۱/۶۲۶، ۱/۹۸ ثانیه
عمق آب پای سازه	d	۲۴ سانتیمتر
ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی	hb	۳/۵ سانتیمتر
شیب جلوی سازه	$cot\alpha$	۱/۲۵

جدول ۴- محدوده تغییرات پارامترهای بی‌بعد شده

پارامتر مورد نظر	دامنه تغییرات
H_o	۱/۶۵ تا ۳/۹
T_o	۲۴/۰۸، ۳۰/۷۶، ۳۷/۴۵
H_oT_o	۴۵ تا ۱۳۱
S_{om} (تیزی موج)	۰/۰۱۳ تا ۰/۰۶۸
Nتعداد موج	۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰، ۶۰۰۰

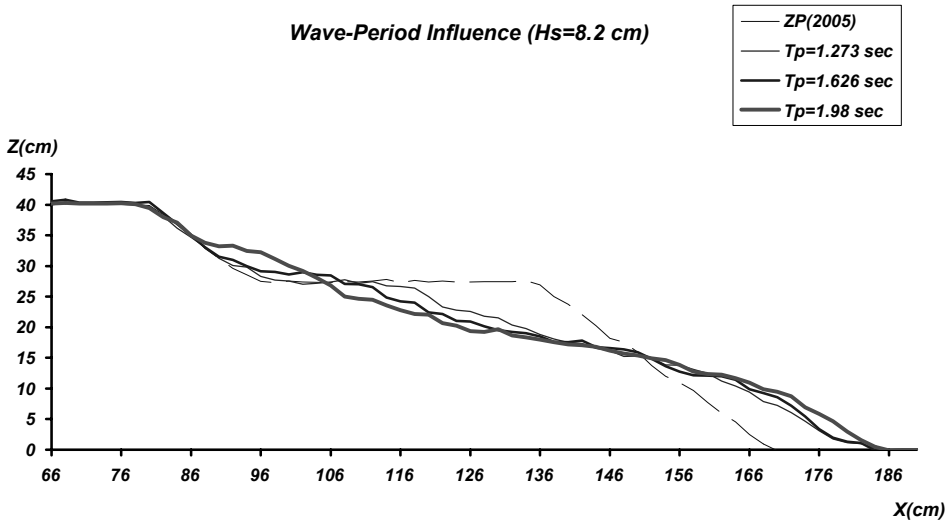


شکل ۵- اثر ارتفاع موج بر نیم‌رخ تغییر شکل یافته



شکل ۶- نمودار Rec بر حسب ارتفاع موج برای سه پریود موج متفاوت ($T_p = 1.273, 1.626, 1.98 \mathrm{sec}$)، عمق آب ۲۴ سانتیمتر، عرض سکو ۴۰ سانتیمتر، ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی ۳/۵ سانتیمتر و N=3000

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]



شکل ۷- اثر پریود موج بر نیم‌رخ تغییر شکل یافته

۴-۲- تأثیر پریود موج

شکل (۷) نیم‌رخ تغییر شکل یافته برای امواج با سه پریود متفاوت و ارتفاع یکسان را نشان می‌دهد. در این سه آزمایش ارتفاع موج برابر ۸/۲ سانتیمتر و تعداد موج برخوردی ۳۰۰۰ موج است. با توجه به نمودارهای ترسیم گردیده مشاهده می‌شود که پریود موج پارامتر بسیار مؤثری در پایداری و میزان تغییر شکل موج‌شکن سکویی است، بطوریکه با افزایش پریود موج در یک ارتفاع ثابت، مقدار عرض سکوی فرسایش یافته بیشتر می‌شود.

با افزایش پریود موج در یک ارتفاع موج ثابت، طول موج افزایش می‌یابد که این امر منجر به کاهش تیزی آن می‌شود. با نزدیک شدن موج به‌سمت شیب وجه جلویی موج‌شکن در حال تغییر شکل، شکست موج اتفاق می‌افتد. از خصوصیات برجسته شکست موج با تیزی کمتر نسبت به حالت شکست موج با تیزی بیشتر، اتلاف انرژی کمتر در اثر شکست موج است. در این حالت سرعت جریان بالاروی و همچنین تراز بالاروی موج روی سازه افزایش یافته و در نتیجه نیروی پسا (درگ) و لختی (اینرسی) وارد به قطعات سنگی شناور شده در آب، در حین بالاروی افزایش می‌یابند و بنابر این ذرات می‌توانند در جای خود لغزیده و با نیروی بیشتری به سمت بالای سازه حرکت کنند. در نتیجه‌ی این عمل در هنگام پایین‌روی جریان روی سازه، جریان قوی‌تری، هم روی سازه و هم از داخل سازه به سمت بیرون به وجود می‌آید که منجر به تغییر شکل سازه می‌شود.

۴-۳- انتخاب پارامتر بدون‌بعد برای ترکیب اثر ارتفاع و پریود موج بر روی سازه شکل‌پذیر

شکل (۸) مقدار عرض سکوی فرسایش یافته بی‌بعد شده ($\mathrm{Re}c/D_{n50}$) را بر اساس متغیر عدد پایداری (H_0 یا N_s) نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار عدد پایداری برای ارتفاعهای امواج متفاوت در سه پریود موج مختلف در نظر گرفته شده است. پراکندگی موجود بین داده‌های رسم گردیده حاکی از آن است که پریود موج در سازه‌های شکل پذیر به‌عنوان پارامتر بسیار مهمی محسوب می‌شود و در نتیجه باید اثر همزمان ارتفاع و پریود موج در نظر گرفته شوند.

به منظور بررسی اثر ترکیبی ارتفاع و پریود موج در این سازه‌ها از پارامترهایی از قبیل تیزی موج و همچنین اثر ترکیبی ارتفاع و پریود موج در پارامتر (H_oT_o) می‌توان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

استفاده کرد. پارامتر اخیر توسط Van der Meer با مفهوم اینکه اثر ارتفاع و پریود موج روی سازه از یک مرتبه است، ارائه گردید [۲]. نمودارهای شکل (۹) و (۱۰) اثر تیزی موج و پارامتر H_oT_o را بر عرض سکوی فرسایش یافته بی‌بعد شده نشان می‌دهند. نمودار شکل (۹) نشان می‌دهد که به‌دلیل پراکندگی زیاد داده‌ها پارامتر تیزی موج پارامتر خوبی برای توصیف عرض فرسایش یافته نیست. شکل (۱۰) اثر H_oT_o را بر عرض سکوی فرسایش یافته بی‌بعد شده نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که اگر چه پراکندگی داده‌ها برای در نظر گرفتن اثر توأم ارتفاع و پریود موج به‌مراتب کمتر از سایر پارامترهای بی‌بعد ذکر گردیده است، اما همچنان پراکندگی قابل توجهی بین داده‌ها موجود است، بطوریکه مقدار ضریب همبستگی برای مقادیر $\mathrm{Re}\,c/D_{n50}$ برحسب پارامتر بی‌بعد $H_o\,T_o$ برای داده‌های آزمایشگاهی برابر $R^2 = 80\%$ می‌باشد. نکته قابل توجه این است که برای آن دسته از ترکیبهای شرایط امواج با مقادیر ثابت H_oT_o، مقدار عرض فرسایش یافته بی‌بعد شده برای پریودهای کمتر و در نتیجه ارتفاع موج بزرگتر، مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. این مطلب نشان از هم مرتبه نبودن اثر ارتفاع و پریود موج در تغییر شکل سازه دارد و با توجه به این موضوع می‌توان بیان نمود که مرتبه ارتفاع امواج در ترکیب توأم اثر ارتفاع و پریود موج در تغییر شکل سازه، بیشتر از پریود امواج است.

به منظور بدست آوردن پارامتر بی‌بعد مناسب که توسط آن اثر توأم ارتفاع و پریود موج به‌طور مناسبی لحاظ گردند، شکل عمومی رابطه به صورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته شد و سپس برای بدست آوردن پارامتر بی‌بعد جدید و همچنین ضرایب مناسبی برای این رابطه، از روش رگرسیون چندگانهٔ غیر خطی توسط نرم افزار آماری Systat استفاده گردید، که نتیجه آن در رابطه (۱۳) ارائه گردیده است.

$$\mathrm{Re}\,c/D_{n50} = aH_o{}^bT_o{}^c \qquad (۱۲)$$

$$\mathrm{Re}\,c/D_{n50} = 0.182(H_o{}^2T_o)^{0.78} \qquad (۱۳)$$

با توجه به رابطه (۱۳) می‌توان بیان نمود که عرض فرسایش یافته بی‌بعد شده با پارامتر بی‌بعد جدید بصورت $H_o{}^2T_o$ تناسب دارد، به‌عبارت دیگر:

$$\mathrm{Re}\,c/D_{n50}\ \alpha\quad H_o{}^2T_o \qquad (۱۴)$$

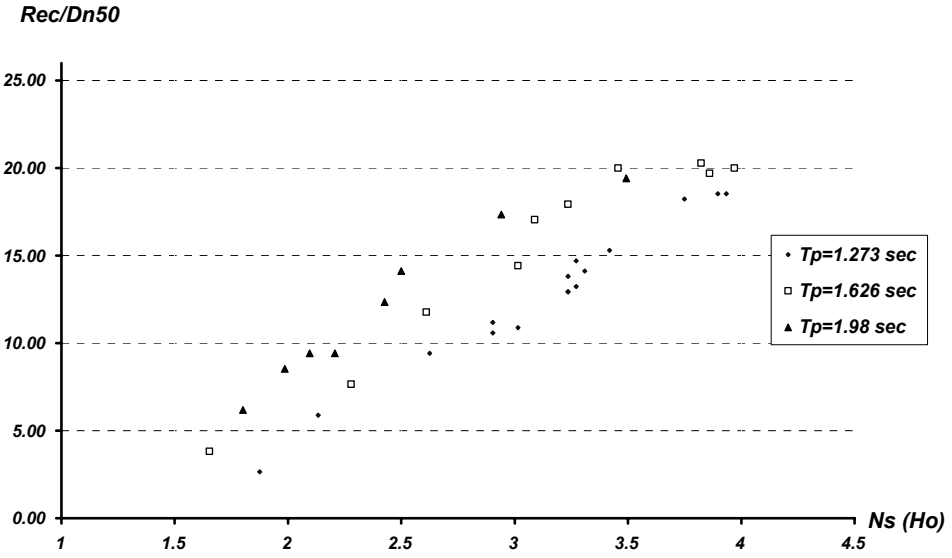
مقدار ضریب همبستگی برای مقادیر $\mathrm{Re}\,c/D_{n50}$ برحسب پارامتر جدید بی‌بعد شده $H_o{}^2T_o$، برای داده‌های آزمایشگاهی برابر با $R^2 = 94\%$ است. شکل (۱۱) مقادیر $\sqrt{H_o{}^2T_o}$ را در برابر عرض سکوی فرسایش یافته بی‌بعد شده نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که پراکندگی داده‌ها برای در نظر گرفتن اثر توأم ارتفاع و پریود موج به‌مراتب کمتر از سایر پارامترهای بی‌بعد ذکر گردیده است و با توجه به ضریب همبستگی موجود می‌توان این پارامتر را به‌عنوان پارامتر بی‌بعد مناسب برای در نظرگیری اثر توأم ارتفاع و پریود موج بر روی سازه شکل‌پذیر در نظر گرفت. با توجه به آنکه مقادیر بدست آمده از پارامتر بی‌بعد $H_o{}^2T_o$ مقادیر بالایی می‌باشند، بدین منظور از جذر این پارامتر به عنوان پارامتر بی‌بعد شده ($\sqrt{H_o{}^2T_o}$) استفاده می‌شود.

به‌منظور صحت سنجی پارامتر بی‌بعد بدست آمده، از نتایج کار آزمایشگاهی Andersen استفاده گردید [۱]. شایان ذکر است که آن دسته از داده‌های Andersen که در آنها روگذری موج در محدوده مجاز هستند، در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این کار بر روی نمودار شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. مقدار ضریب همبستگی برای داده‌های آزمایشگاهی $\mathrm{Re}\,c/D_{n50}$ برحسب پارامتر $\sqrt{H_o{}^2T_o}$، برابر با $R^2 = 87\%$ است. در حالی که همین مقدار در مورد پارامتر $H_o\,T_o$ برای داده‌های Andersen برابر با $R^2 = 79\%$ می‌باشد.

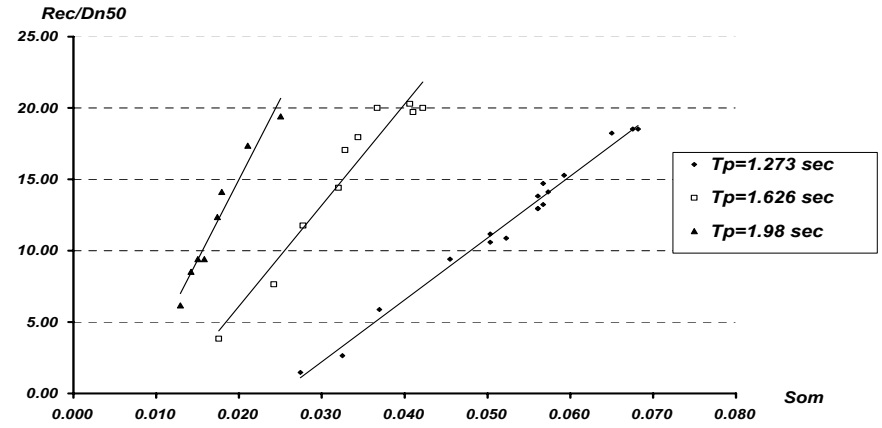
۴-۴- اثر تعداد موج (مدت طوفان) بر پایداری موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر

عامل مهمی که تأثیر زیادی بر پایداری و تغییر شکل موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر دارد، مدت طوفان است. این عامل به صورت پارامتر بی‌بعد تعداد امواج (N) مطرح می‌شود. اصولاً فلسفه طراحی یک موج‌شکن

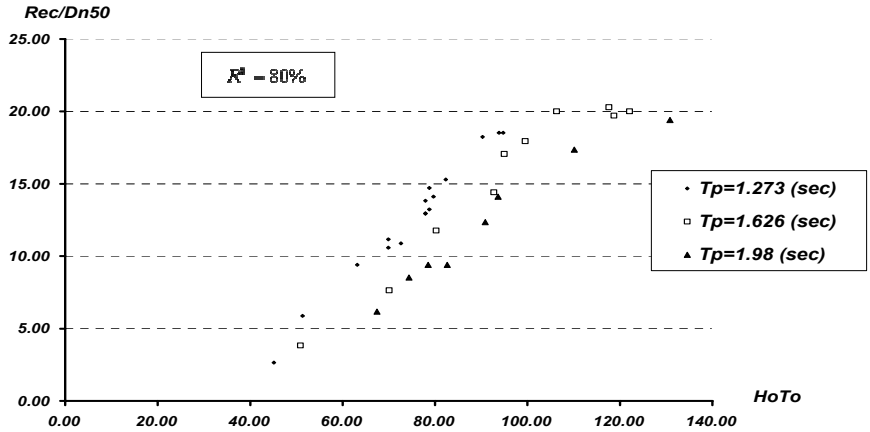
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]



شکل ۸- نمودار بررسی پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده ($\mathrm{Re}c/D_{n50}$) برحسب عدد پایداری (H_0)

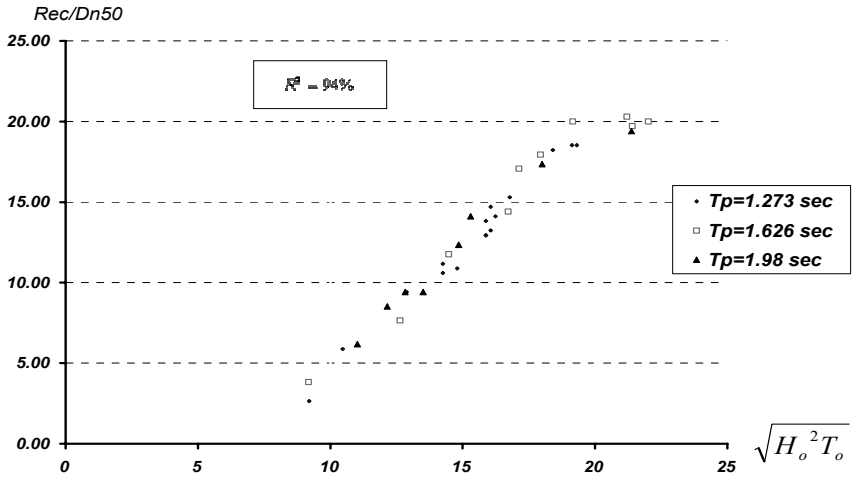


شکل ۹- نمودار بررسی پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده ($\mathrm{Re}c/D_{n50}$) برحسب تیزی موج (S_{om})

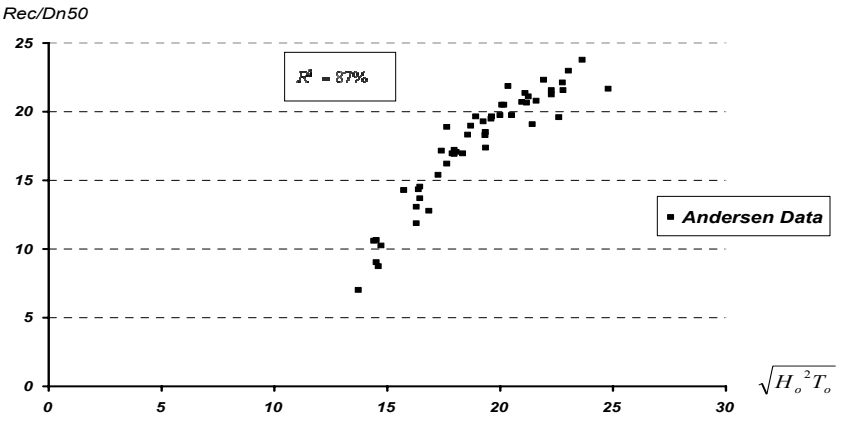


شکل ۱۰- نمودار بررسی پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده ($\mathrm{Re}c/D_{n50}$) برحسب پارامتر H_oT_o

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]



شکل ۱۱- نمودار بررسی پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده ($\mathrm{Re}c/D_{n50}$) برحسب پارامتر $\sqrt{H_o^2 T_o}$



شکل ۱۲- بررسی پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده ($\mathrm{Re}c/D_{n50}$) برحسب پارامتر $\sqrt{H_o^2 T_o}$ برای داده‌های Andersen

شکل‌پذیر، تغییر شکل آن در اثر طوفان طرح به صورت یک نیم‌رخ S شکل و حفظ پایداری این نیم‌رخ پس از وقوع طوفان طرح است. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که بیشترین تغییر شکل موج‌شکن شکل‌پذیر در اوایل طوفان و در طول برخورد چند صد موج اول به سازه، به‌وجود می‌آید (شکل ۱۳). در مرحله اولیه برخورد امواج یعنی پس از برخورد چند صد موج اول ظرفیت فرسایش زیادی از مصالح وجود دارد و در مرحله دوم، مساحت فرسایش یافته با سرعت کمتری نسبت به مرحله قبلی افزایش می‌یابد. در مرحله سوم مساحت و عرض فرسایش یافته به حالت تعادل نسبی میل می‌کند و نرخ تغییرات بسیار کاهش می‌یابد.

با توجه به آنکه با برخورد تعداد ۳۰۰۰ موج به مدل موج‌شکن، مساحت فرسایش یافته و یا تغییر شکل سازه به بیش از ۹۰ درصد از حالت نهایی می‌رسد و همچنین مدت طوفان متداول موجود (۶ ساعت در طبیعت) برای موج طرح در اکثر مناطق خلیج فارس معادل حدوداً ۳۰۰۰ موج است که این تعداد موج یا مدت طوفان به‌عنوان مدت تعادل در نظر گرفته شده است

برای نشان دادن تأثیر تعداد امواج بر میزان عرض سکوی فرسایش یافته، نمودار $\mathrm{Re}c$ بر حسب تعداد موج (N)، به تفکیک پریود در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر شکل موج‌شکن سکویی، برای ۵۰۰ موج برخوردی ابتدای شروع تغییر شکل بوده و برای تمامی ترکیبهای ارتفاع و پریود موج، روند افزایش عرض فرسایش یافته

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

سکوی موج‌شکن روند مشابهی تا ۲۰۰۰ موج برخوردی خواهد داشت و از آن به بعد، این روند افزایشی عرض فرسایش یافته، کاهش پیدا کرده و در حدود ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ تعداد موج، فرسایش عرض سکوی موج‌شکن به مقدار تقریباً ثابتی میل خواهد نمود. بنابراین می‌توان تابع تغییرات عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن نسبت به تعداد امواج را به‌صورت تابعی نمایی در نظر گرفت، که تقریباً روند منحنی تغییرات عرض فرسایش یافته نسبت به تعداد امواج، برای تمام ترکیبهای ارتفاع و پریود مشابه هم می‌باشند.

به‌منظور بررسی تأثیر مدت طوفان بر تغییر شکل سازه، توابع مختلف جبری توسط نرم‌افزار Systat بررسی گردیدند و از میان آنها فرم معادله نمایی به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\mathrm{Re}\,c \big/ D_{n50} = a\{b - \exp[-c*(N/3000)]\} \qquad (۱۵)$$

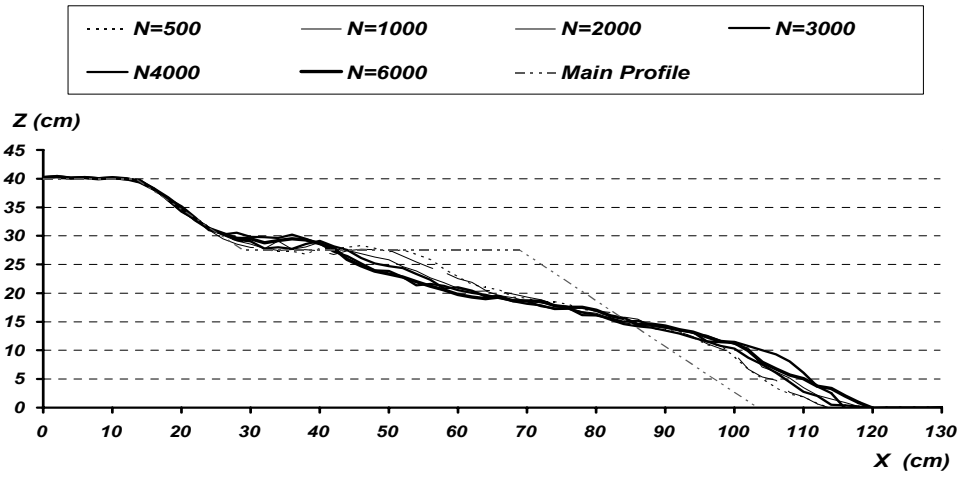
با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی حاضر، مطابق جدول (۴) ضرایب a، b و c برای هر یک از شرایط امواج بدست آمده‌اند.

بدلیل آنکه روند تغییرات عرض سکوی فرسایش یافته در برابر تعداد امواج مشابه یکدیگر می‌باشند و مقدار ضرایب b و c در معادله ذکر گردیده شکل و روند تغییر منحنی را نشان می‌دهد، بنابراین این ضرایب برای کلیه شرایط امواج تقریباً ثابت بوده ولی بدلیل وجود خطاهای آزمایشگاهی بخصوص خطای اندازه‌گیری، همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود مقداری پراکندگی بین مقادیر b و c برای شرایط مختلف موج وجود دارد. برای لحاظ نمودن مقداری ثابت برای این ضرایب، از میانگین ضرایب بدست آمده استفاده نموده و مقدار ضرایب b و c به‌ترتیب در حدود ۱/۶۱ و ۲/۲ در نظر گرفته می‌شود. مقدار ضریب a بدست آمده تابعی از شرایط امواج (ارتفاع و پریود موج) می‌باشد. بنابراین می‌توان رابطه زیر را برای لحاظ نمودن اثر تعداد امواج بر عرض سکوی فرسایش یافته در نظر گرفت:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{Re}\,c}{D_{n50}} = a*\{1.61 - \exp[-2.2*(N/3000)]\} \\ (a = f(H_s, T_m)) \end{cases} \qquad (۱۶)$$

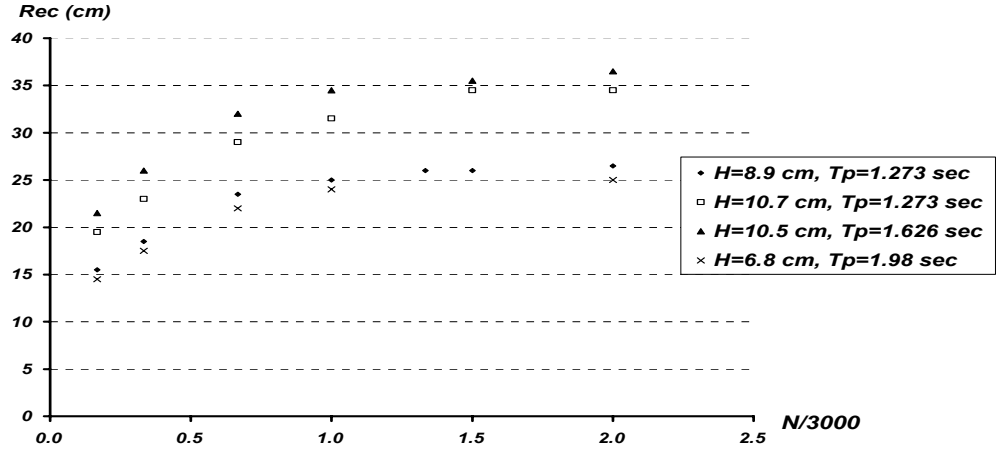
جدول ۵- مقادیر بدست آمده برای ضرایب a و b

c	b	a	T_p (Sec)	H_s (Cm)
۲/۳۳	۱/۵۹	۹/۸۶	۱/۲۷۳	۸/۹
۱/۷	۱/۶۴	۱۲/۷۸	۱/۲۷۳	۱۰/۷
۲/۳۳	۱/۶۴	۱۳/۱۴	۱/۶۲۶	۱۰/۵
۲/۳۴	۱/۵۶	۹/۵۵	۱/۹۸	۶/۸

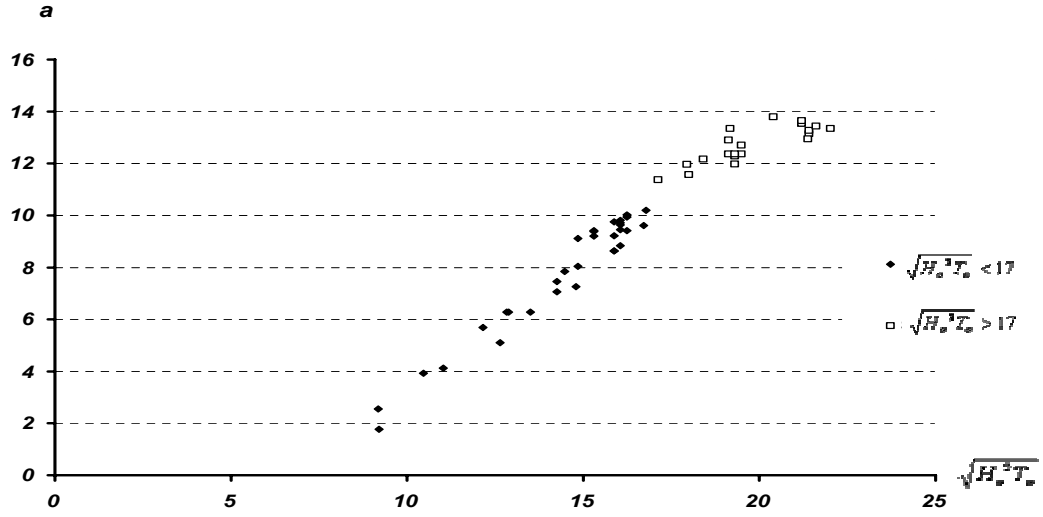


شکل ۱۳- مقایسه نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر تعداد امواج متفاوت
(T_p=1.273 sec و H_s =8.7 cm)

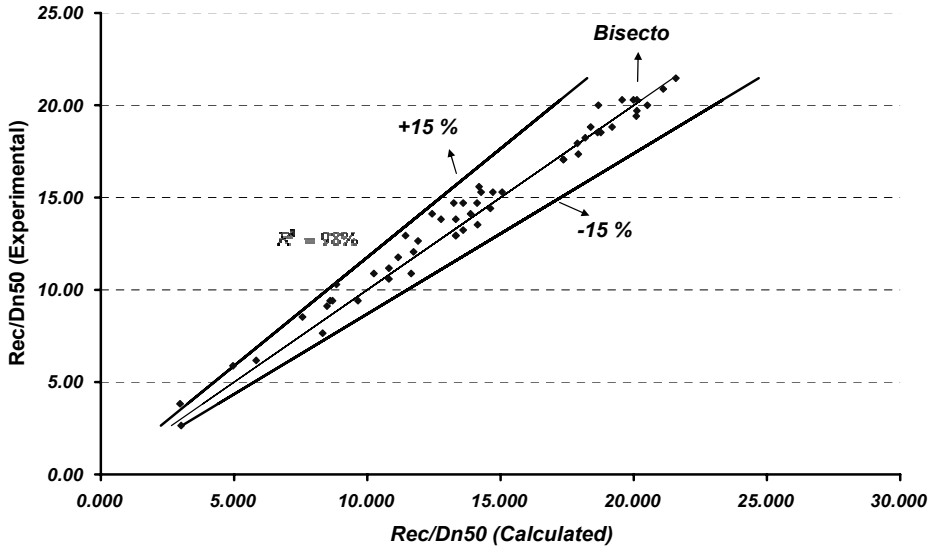
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]



شکل ۱۴- نمودار $\mathrm{Re}c$ بر حسب تعداد امواج، برای عمق آب ۲۴ سانتیمتر و عرض سکوی ۴۰ سانتیمتر



شکل ۱۵- مقادیر a بر حسب متغیر بی‌بعد $\sqrt{H_o^2 T_o}$



شکل ۱۶- نمودار عرض فرسایش یافته بدون بعد محاسبه شده توسط رابطه ۱۸ در برابر مقدار آزمایشگاهی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

۴-۵- تخمین عرض سکوی فرسایش یافته

به منظور بدست آوردن رابطه‌ای مناسب برای تخمین عرض سکوی فرسایش یافته بر حسب شرایط محیطی مختلف موج و همچنین ارزیابی عملکرد پارامتر بی‌بعد جدید بدست آمده، از رابطه (۱۶) استفاده شده و مقدار ضریب a بر حسب ارتفاع و پریود موج بدست آمده است. بدین منظور رابطه (۱۷) به‌صورت زیر در نظر گرفته و عبارت سمت راست معادله بر حسب متغیر بی‌بعد $\sqrt{H_o^2 T_o}$ روی نمودار شکل (۱۵) رسم گردیده است.

$$a = \frac{\mathrm{Re}c}{D_{n50} * \{1.61 - \exp[-2.2 * (N/3000)]\}} \qquad (۱۷)$$

همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود داده‌ها به دو محدوده تقسیم شده‌اند. محدوده اول برای $\sqrt{H_o^2 T_o} < 17$ و محدوده دوم برای $\sqrt{H_o^2 T_o} > 17$ تعریف شده است. در هر کدام از این محدوده‌ها تغییرات ضریب a در برابر پارامتر بی‌بعد مورد نظر تقریباً به صورت خطی است. بدین ترتیب رابطه (۱۸) برای تخمین عرض سکوی فرسایش یافته برای شرایط محیطی متفاوت بدست می‌آید.

$$\begin{cases} \mathrm{Re}c/D_{n50} = (1.03\sqrt{H_o^2 T_o} - 7.47) \\ * \{1.61 - \exp[-2.2 * (N/3000)]\} \quad \sqrt{H_o^2 T_o} < 17 \\ \mathrm{Re}c/D_{n50} = (0.43\sqrt{H_o^2 T_o} + 4.22) \\ * \{1.61 - \exp[-2.2 * (N/3000)]\} \quad \sqrt{H_o^2 T_o} > 17 \end{cases} \qquad (۱۸)$$

کاربرد رابطه فوق با توجه به محدوده دامنه کارهای آزمایشگاهی انجام شده به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} 9 < \sqrt{H_o^2 T_o} < 22 \\ 500 < N < 6000 \end{cases} \qquad (۱۹)$$

شکل (۱۶)، نمودار عرض فرسایش یافته بدون بعد مشاهداتی، بر حسب عرض فرسایش یافته بدون بعد پیشگویی شده از رابطه (۱۸) برای تمام داده‌های موجود نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این رابطه دارای عملکرد مناسبی برای تخمین داده‌های آزمایشگاهی است.

به منظور ارزیابی و بررسی عملکرد رابطه بدست آمده در برابر داده‌های آزمایشگاهی از شاخص‌های ارزیابی از جمله ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات نرمالایز شده (NRMSE) و میزان درصد خطای نسبی (E) استفاده می‌گردد که روابط آنها به‌صورت زیر است:

$$R = \frac{N\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N\sum X^2 - (\sum X)^2][N\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \qquad (۲۰)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y - X)^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2}} \qquad (۲۱)$$

$$E = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{Y - X}{Y}\right| \qquad (۲۲)$$

در این روابط X: مقدار محاسبه شده از رابطه (۱۸)، Y: مقدار آزمایشگاهی، $\bar{Y}$: مقدار متوسط داده‌های آزمایشگاهی و N: تعداد آزمایشها است.

مقدار ضریب همبستگی در حدود ۹۹ درصد، میزان درصد خطای نسبی در حدود ۵/۲۴ درصد و جذر میانگین مربعات نرمالایز شده در حدود ۰/۱۶۲ است.

۴-۶- مقایسه رابطه بدست آمده با نتایج سایرین

به‌منظور بررسی اعتبار رابطه بدست آمده در این تحقیق و همچنین اثبات برتری این رابطه نسبت به سایر روابط موجود در این زمینه، نتایج حاصل از این رابطه و رابطه Andersen، برای داده‌های آزمایشگاهی Andersen مورد ارزیابی قرار گرفتند.

داده‌های در نظر گرفته شده از مجموعه داده‌های Andersen برای آن دسته از آزمایشهایی می‌باشند که سازه مورد نظر تقریباً شرایط یکسانی با شرایط تحقیق حاضر داشته باشد. در این دسته از داده‌های Andersen، عمق آب پای سازه ۲۴ سانتیمتر، ارتفاع سکو از تراز سطح ایستابی ۴ سانتیمتر، شیب جلوی سازه ۱:۱/۲۵، عرض منحنی دانه‌بندی در حدود ۱/۴۵، قطر اسمی مصالح ۱/۹۸ سانتیمتر و چگالی سنگدانه‌ها ۲۶۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

جدول (۶) مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای نتایج بدست آمده از فرمولها و روابط مختلف در برابر داده‌های آزمایشگاهی Andersen را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود کلیه شاخص‌های ارزیابی برای نتایج بدست آمده توسط رابطه جدید مناسب‌تر از سایرین می‌باشد، بطوریکه درصد خطای نسبی برای نتایج رابطه جدید تقریباً ۱۴ درصد نسبت به نتایج فرمول Andersen که برای همین داده‌های آزمایشگاهی بدست آورده شده بهبود یافته است.

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای نتایج بدست آمده از فرمولها در برابر داده‌های آزمایشگاهی Andersen

نام محقق	Hall & Kao	Tørum	Andersen	تحقیق حاضر
R^2	۷۶/۷	۷۳/۷	۹۰/۰	۹۳/۲
E %	۳۰/۵	۴۷/۸	۲۰/۵	۶/۷
NRMSE	۱/۵۲	۲/۲۵	۱/۰۴	۰/۳۲۳

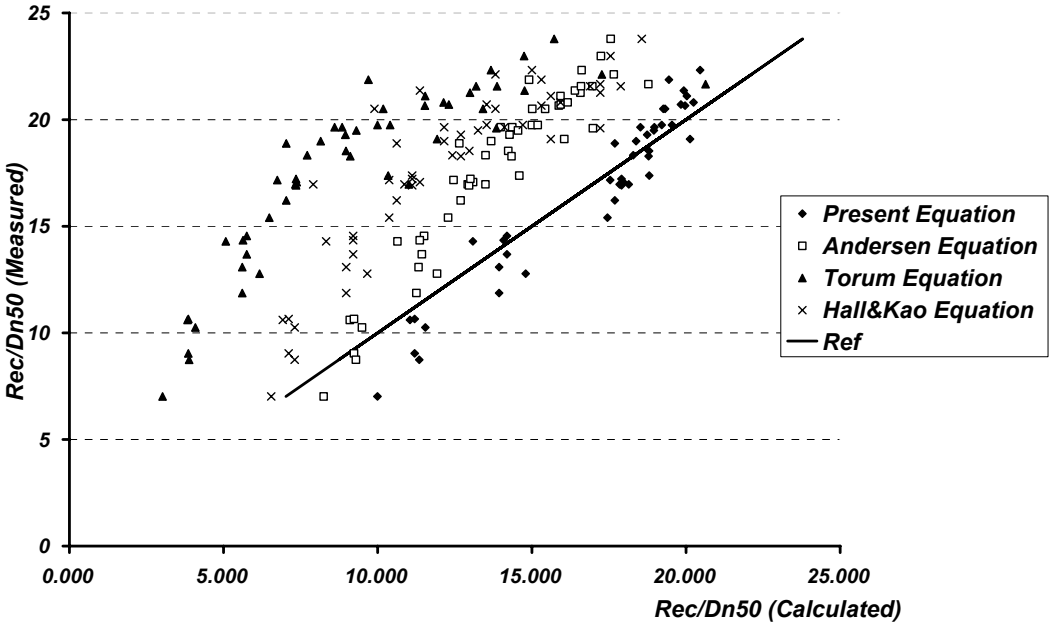
شکل (۱۷) نتایج بدست آمده از روابط مختلف ارایه شده در زمینه عرض فرسایش یافته بی‌بعد شده موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر در برابر داده‌های آزمایشگاهی Andersen را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مقادیر بدست آمده از رابطه جدید مناسب‌تر از سایر روابط دیگر از جمله خود رابطه Andersen است. اکثر روابط موجود در این زمینه مقدار کمتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌کنند. تنوع و تفاوت در شرایط آزمایشگاهی و طریقه انجام آزمایش، می‌تواند در این پدیده اثرگذار باشند.

۵- نتیجه‌گیری

تحقیق آزمایشگاهی حاضر به منظور بررسی اثر عرض فرسایش یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر تحت شرایط مختلف امواج نامنظم با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی دو بعدی در فلوم موج، انجام گرفته است. نتایج این بررسی‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- ارتفاع و پریود موج و همچنین تعداد امواج برخوردی، پارامترهای بسیار مؤثری در پایداری و میزان تغییر شکل موج‌شکن سکویی محسوب می‌شوند، بطوریکه با افزایش این پارامترها، مقدار عرض سکوی فرسایش یافته بیشتر می‌شود. همچنین بیشترین تغییر شکل موج‌شکن شکل‌پذیر در اوایل طوفان و در طول برخورد چند صد موج اول به سازه، به‌وجود می‌آید.

۲- تابع تغییرات عرض سکوی فرسایش یافته برحسب تعداد امواج برخوردی به‌صورت نمایی است.



شکل ۱۷- مقادیر اندازه‌گیری شده در تحقیق Andersen در برابر مقادیر بدست آمده از روابط مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

۳- پارامتر بی‌بعد جدید ارایه شده $\sqrt{H_o^2 T_o}$ برای لحاظ کردن مناسب اثر توأم ارتفاع و پریود موج در موج‌شکن توده‌سنگی شکل پذیر پیشنهاد می‌گردد، بطوریکه با بکارگیری این پارامتر جدید، ضریب همبستگی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی حاضر (۹۴٪) و نتایج تحقیق Andersen (۸۷٪) بدست می‌آید.

۴- رابطه مناسبی برای پیش‌بینی عرض سکوی فرسایش یافته از موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر به‌کمک رگرسیون چندگانهٔ غیر خطی (رابطهٔ ۱۶) ارائه شده است که از نظر آماری از دقت قابل قبولی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی حاضر و حتی داده‌های Andersen برخوردار می‌باشد، بطوریکه درصد خطای نسبی برای نتایج رابطه جدید تقریباً ۱۴ درصد نسبت به نتایج فرمول Andersen که برای همین داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده بهبود یافته است.

۶- تقدیر و تشکر

این مقاله بخشی از طرح تحقیقاتی با کد شناسایی TMU ۸۶-۰۳-۱۷ است که با حمایت مالی اداره کل مهندسی سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی در دانشگاه تربیت مدرس به انجام رسیده است. آزمایشهای مدل فیزیکی در فلوم موج مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی انجام گرفته است. بدین وسیله از مسئولین محترم این مرکز برای فراهم آوردن امکان انجام این تحقیق و به‌خصوص آقایان رحمت‌اله خلیلی، منصور پشوتنی و عبداله عبدالهی برای همکاریهای شبانه‌روزی در آزمایشگاه تقدیر و تشکر می‌شود.

۷- مراجع

1-Andersen, T.L. (2006). "Hydraulic Response of Rubble Mound Breakwaters (Scale Effects-Berm Breakwaters)." Doctoral Thesis, University of Aalborg, Denmark, Under Supervision of Burcharth, H. F..

2-Van der Meer, J.W. (1988). "Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack." Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Also: Delft Hydraulics Communication No. 396.

3-PIANC MarCom WG 40. (2003). "State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters." PIANC, Brussels.

4-Hall, K. and Kao, S. (1991). "A Study of the Stability of Dynamically Stable Breakwaters." Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 18, pp.916-925.

۵- چگینی، وحید و حسینی بندرآبادی، سید محمد. (۱۳۷۵). "معرفی موج‌شکن‌های شکل‌پذیر." هفتمین گردهمایی ارگانهای دریایی و سومین کنفرانس علوم و فنون دریایی، نور، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس.

6-Tørum, A. (1998). "On the Stability of Berm Breakwaters in Shallow and Deep Water." Proc. of the 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, ASCE.

7-Tørum, A., Kuhnen, F. and Menze, A. (2003). "On Berm Breakwaters. Stability, Scour, Overtopping." Elsevier, Journal of Coastal Engineering 49, Amsterdam, September Issue, pp. 209-238.

8-Sayao, O.J. (2000). "On the Profile Reshaping of Berm Breakwaters." Coastal Structures 99, Losada (ed.) Balkema, Rotterdam, Netherlands.

9-Lissev, N. and Daskalov, K. (2000). "Berm Type Breakwater – an Alternative Solution for New East Breakwater for Port of Burgas." Report No. R-8-93, Department of Structural Engineering, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology.

10-Rao, S. and Pramod, Rao, B. (2003). "Stability of Berm Breakwater with Reduced Armour Stone Weight." Ocean Engineering 31, pp. 1577-1589.

11-Van der Meer, J.W. and Koster, M.J. (1988). "Application of Computational Model on Dynamic Stabillity." Proc. Breakwaters' 88, Eastaburne, Thomas Telford.

12-Norton, P.A. and Holmes, P. (1992). "Armour Displacements on Reshaping Breakwaters." Proc. Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, New York, N.Y., 2, pp. 1448-1460.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]

13-Van Gent, Marcel M.A. (1995). "wave Interaction with Berm Breakwaters." ASCE, J. of WPC. and OE., Vol. 121, No. 5.

۱۴- بهلولی، اصغر. (۱۳۷۹). " مدلسازی کامپیوتری انتقال رسوب بستر در امتداد عمود بر سواحل شنی و موج‌شکن‌های شکل‌پذیر." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده عمران.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.9.3.1]