مطالعه آزمایشگاهی تاثیرعرض اولیه سکو و قطر مشخصه سنگدانه‌های لایه آرمور در پایداری موج شکن‌های سکویی شکل پذیر

محمد رضا شکاری مهرآبادی[1]،مهدی شفیعی فر[2*]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران،دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

طراحی موج شکن های سکویی شکل پذیر بر مبنای ایجاد سکویی عریض در نزدیکی سطح آب جهت ایجاد تغییر شکل تا رسیدن به نقطه تعادل، با بکار بردن قطعات آرمور کوچکتر در مقایسه با موج شکن های توده سنگی مرسوم، استوار است. درتحقیق حاضر، عرض فرسایش یافته این نوع ازموج شکن ها تحت تاثیر پارامترهای مختلف امواج و سازه با استفاده ازروش مدل آزمایشگاهی دوبعدی درفلوم موج مورد بررسی قرار گرفته است. مجموعا ۱۵۶ آزمایش در این تحقیق انجام شده است که امواج تابشی به مدل مقطع موج شکن از نوع امواج نامنظم با طیف انرژیJONSWAP بوده است. جهت بررسی تاثیر عرض اولیه سکو و قطر مشخصه سنگدانه ها بر میزان فرسایش، شرایط مختلف امواج از قبیل ارتفاع موج، پریود موج، تعداد موج برخوردی (مدت طوفان) در نظر گرفته شده است.جهت تحلیل و بررسی نتایج، رابطه مناسبی برای محاسبه عرض فرسایش یافته با در نظر گرفتن پارامترهای موج و سازه ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی :مدل آزمایشگاهی، موج شکن سکویی شکل پذیر، عرض فرسایش یافته، عرض اولیه، قطر سنگدانه.

Experimental Study on Effects of Initial Berm Width and Stone Grading on the Stability of Berm Breakwaters

M. R. Shekari[1], M. Shafieefar[2]

1- PhD student, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University
2- Professor, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

Abstract

The predominant principle included in the design of reshaping berm breakwaters is the supply of a wide berm at or nearby the water level with less armor stone size than that used in conventional design, which are allowed to reshape until an equilibrium slope is attained. In the present study, the recession of the berm due to wave and structure parameters has been investigated based on two dimensional experimental modeling in a wave flume. A series of 156 tests have beencarried out with irregular waves with JONSWAP spectrum to observe the behavior of the structure.To cover the effects of initial berm width and stone sizes on berm recession, several wave parameters such as wave height, wave period and storm duration have been considered. To analyze the results, the experimental data are presented together, leading to a formula for prediction of the berm recession considering foregoing parameters, i.e. wave and structural parameters.

Keywords: Experimental Modeling, Reshaping Berm Breakwater, Berm Recession, Initial Berm Width, Stone Size

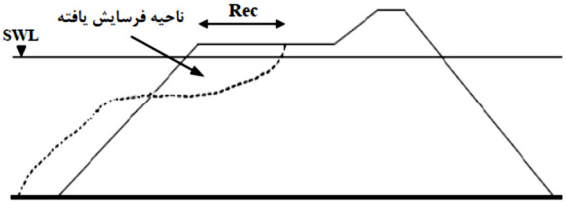
*نویسنده مسئول مقالهshafiee@modares.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

۱- مقدمه

موج شکن‌ها از لحاظ موقعیت قرار گیری، شکل هندسی و نوع مصالح بکار برده شده دارای انواع مختلفی می باشند که در این میان می توان به موج شکن های توده سنگی به عنوان متداول ترین نوع اشاره نمود. موج شکن های توده سنگی از نقطه نظر پایداری به دو دسته پایدار ایستا (پایدار استاتیکی، سنتی) و پایدار پویا (پایدار دینامیکی، غیر سنتی) تقسیم می شوند.

موج شکن های پایدار ایستا به قطعات سنگی بزرگ برای حفظ پایداری در برابر امواج نیاز دارند و در آنها تغییر شکل سازه مجاز نیست ، لذا با توجه به پتانسیل پایین معادن سنگ جهت استخراج سنگ های بزرگ این نوع موج شکن ها گران می گردد. سازه موج شکن شکل پذیر به عنوان یک سازه توده سنگی متشکل از محدوده وسیعی از اندازه های سنگ، بر اثر برخورد امواج دچار تغییر شکل شده بطوریکه نیم رخ آن پس از وقوع طوفان به یک نیم رخ پایدار تبدیل می شود. ساخت این نوع موج شکن ها به میزان قابل توجهی ارزانتر از موج شکن های توده سنگی سنتی است، بطوریکه امکان طراحی سازه براساس خروجی واقعی سنگ معدن به جای تعیین دانه بندی خاص برای سنگ آرمور فراهم می شود. موج شکن سکویی نیز یک موج شکن توده سنگی است.



شکل ۱- شمایی از فرسایش و عرض فرسایش یافته موج شکن سکویی

وجه جلوی این نوع موج شکن دارای سکویی است که در بالای سطح ایستایی قرار می گیرد. این سکو پس از برخورد امواج با موج شکن به صورت نیم رخی به شکل حرف لاتین S خوابیده تغییر شکل می دهد (شکل ۱) تا یک نیم رخ متعادل در سمت دریا حاصل شود، که این موضوع به شرایط خاص دریایی و ارتفاع موج بستگی دارد.

مهمتری پارامتری که ارتباط بین سازه و شرایط موج را نشان می دهد و موج شکن ها براساس آن طبقه بندی می شوند، عدد پایداری است که به صورت زیر تعریف می شود :

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta . D_{n50}} \qquad (۱)$$

که در آن H_s ارتفاع عمده موج است و به وسیله میانگین یک سوم مرتفع ترین امواج یا $\sqrt{4m_o}$ تعریف می شود، که m_o گشتاور مرتبه صفر طیف چگالی انرژی موج است. Δ نیز چگالی شناوری نسبی قطعه آرمور است و با رابط $\Delta = \rho_{ssd} / \rho_W$ بیان می شود که در آن ρ_{ssd}، جرم مخصوص اشباع سنگ با سطح خشک و ρ_w، جرم مخصوص آب است. D_{n50} نیز قطر اسمی سنگدانه ها است که که به وسیله مقدار ۵۰ درصد در منحنی دانه بندی تعین می شود.

از آنجاییکه عدد پایداری ذکر شده اثر پریود موج را در نظر نمی گیرد و اثر این پارامتر در پایداری موج شکن های سکویی شکل پذیر قابل توجه است، لذا این امکان وجود دارد که ارتفاع و پریود موج را به قطر اسمی مرتبط ساخته و یک متغیر ترکیبی ارتفاع-پریود موج را نتیجه گرفت که توسط فرمول زیر تعیین می شود :

$$H_0 T_0 = \frac{H_S}{\Delta D_{n50}} \times T_m \left(\frac{g}{D_{n50}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (۲)$$

که در آن $T_0 = T_m (g / D_{n50})^{1/2}$ پارامتر بی بعد پریود موج، T_m متوسط پریود امواج و g شتاب ثقل می باشد.PIANC حدود و مقادیر دو پارامتر ذکر شده را برای انواع موج‌شکن‌های سکویی مشخص نموده که در جدول ۱ ارائه شده است[۱]. جهت توصیف رفتار موج شکن ها متغیرهای متعددی وجود دارد.

در موج شکن های سکویی شکل پذیر از معیار نیمرخ تغییرشکل‌یافته، یا عرض فرسایش یافته سکو (Rec) به عنوان مهمترین پارامتر در بیان پایداری سازه استفاده می شود، بطوریکه اگر این مقدار بزرگ‌تر از عرض موجود باشد (Rec>B)، تخریب در سازه اتفاق می‌افتد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

جدول ۱- حدود مقادیر اعداد بدون بعد پایداری برای موج شکن های سکویی

نوع موج شکن	$N_s = H_0$	H_0T_0
موج شکن سکویی غیر قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی	۱/۵ -۲ >	۲۰ -۴۰ >
موج شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی	۱/۵ - ۲/۷	۴۰ - ۷۰
موج شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار دینامیکی	۲/۷ <	۷۰ <

بنابراین تخمین عرض سکوی این نوع از موج‌شکن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است و طراحی باید به گونه‌ای صورت بگیرد که بعد از رسیدن به پروفیل پایدار از عرض سکوی موج‌شکن به میزان $2D_{n50}$ تا $4D_{n50}$ باقی بماند و امواج به شیب بالایی سازه آسیب وارد نکنند(Torum)[۲]. محققین بسیاری بر روی عرض فرسایش یافته سکو و پارامترهای موثر بر آن تحقیق نموده‌اند که می‌توان به تحقیقات Hall & Kao [۳]، Tørum و همکاران[۴]، Van der Meer [۵]،Daskalov&Lissev[۶]، Sigurdson و همکاران [۷]، Andersen[۸] و مقیم [۹و۱۰]، اشاره نمود که نتیجه بعضی از تحقیقات به صورت روابط تجربی ارائه شده است. در میان پژوهشگران Tørum(۱۹۹۸) برای محاسبه عرض فرسایش سکو، زمانیکه موج بصورت عمود بر خط طولی موج شکن برخورد می‌کند، فرمولی بصورت ابتدا یک منحنی درجه دوم و سپس در سال ۱۹۹۹ یک منحنی درجه سوم (برازش شده از نقاط داده های موجود از سری آزمایشهای مختلف) بدست آورد[۲].

$$\frac{Rec}{D_{50}} = 0.000739(H_0T_0)^2 + 0.0499(H_0T_0) + 0.604 \qquad (۳)$$

$$\frac{Rec}{D_{50}} = 0.0000027\,(H_0T_0)^3 + 0.000009\,(H_0T_0)^2 + 0.11(H_0T_0) - 0.8 \qquad (۴)$$

روابط فوق در محدوده $H_0T_0 >$ 20-30 اعتبار دارد و با در نظر گرفتن عدد حدود 1.7 برای D_{85}/D_{15} ارائه شده است. Andersrn(۲۰۰۶) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی رابطه نیمه تجربی زیر را ارائه نمود[۸]:

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = \left[\frac{(1+c_1)d - c_1h_s}{h-h_b} f_\beta(\beta).f_N(N).f_{grading}(f_g)\times \; f_{H_0}(H_0) - \frac{cot(\alpha_d)-1.05}{2.D_{n50}}(h-h_b)\right] \qquad (۵)$$

در این رابطه در خصوص اثر تعداد امواج برخوردی، زاویه برخورد امواج، دانه‌بندی لایه آرمور و عدد پایداری توابع زیر را تعریف نمود:

$$f_\beta(\beta) = cos(\beta) \qquad (۶)$$

$$f_N = \begin{cases} (\frac{N}{3000})^{-0.046.H_0+0.3} & H_0 < 5 \\ (\frac{N}{3000})^{0.07} & H_0 \geq 5 \end{cases} \qquad (۷)$$

$$f_g = \begin{cases} 1 & f_g \leq 1.5 \\ 0.43.f_g + 0.355 & 1.5 < f_g < 2.5 \\ 1.43 & f_g > 1.5 \end{cases} \qquad (۸)$$

$$f_{HO} = \begin{cases} 19.8 \cdot exp(-\frac{7.08}{H_0}) \cdot s_{om}^{-0.5} & T_0 \geq T_0^* \\ 0.05 \cdot H_0T_0 + 10.5 & T_0 < T_0^* \end{cases} \qquad (۹)$$

$$T_0^* = \frac{19.8 \cdot exp(-\frac{7.08}{H_0}) \cdot s_{om}^{-0.5} - 10.5}{0.05 \cdot H_0} \qquad (۱۰)$$

که در آن c_1 ضریب ثابتی است برابر 1.2، d عمق آب پای سازه، h_b ارتفاع ترازسکوازسطح ایستابی، h_s ارتفاع تراز پله ازسطح ایستابی و α_dزاویه شیب پایینی سکو می‌باشند. ارتفاع ترازپله ازسطح ایستابی نیز بصورت $h_s = 0.65.H_{mo}.s_{om}^{-0.3}.f_N.f_\beta$ تعریف می‌شود. مقیم و همکاران نیز (۱۳۸۸) [۱۰] براساس یک سری آزمایشات عرض فرسایش یافته سکو را با $H_0\sqrt{T_0}$ متناسب دانسته و رابطه زیر را ارائه نمودند.

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = \begin{cases} (0.09(H_0\sqrt{T_0})^{1.3} - 0.95)\left\{1.61 - exp\left[-2.2\frac{N}{3000}\right]\right\}\times \\ (\frac{h_b}{D_{50}})^{-0.2}(\frac{d}{D_{50}})^{0.56} & H_0\sqrt{T_0} < 17 \\ (0.136H_0\sqrt{T_0} + 0.58)\left\{1.61 - exp\left[-2.2\frac{N}{3000}\right]\right\}\times \\ (\frac{h_b}{D_{50}})^{-0.2}(\frac{d}{D_{50}})^{0.56} & H_0\sqrt{T_0} \geq 17 \end{cases} \qquad (۱۱)$$

رابطه فوق باتوجه به محدودیتهای دامنه کارهای آزمایشگاهی انجام شده به صورت زیر قابل استفاده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

$$7.5 < H_0\sqrt{T_0} < 22.5 \qquad 0.88 < \frac{h_b}{D_{50}} < 4.4 \qquad 11.5 < \frac{d}{D_{50}} < 17.2$$

$$500 < N < 6000 \qquad 1.2 < f_g < 1.5 \qquad 0.09 < \frac{d}{l} < 0.25$$

۲- شرح مدلسازی آزمایشگاهی مقطع

مدلسازی آزمایشگاهی حاضر به پایداری موج شکن سکویی شکل پذیر تشکیل شده از سه لایه آرمور، فیلتر و هسته، به صورت دوبعدی پرداخته است. جهت بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان فرسایش آزمایش ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام می گیرد. فلوم موجود در آزمایشگاه دارای طول ۱۶ متر و عمق و عرضی برابر با ۱ متر می باشد که دستگاه موج ساز آن قابلیت تولید امواج منظم و نامنظم تحت طیف‌های مختلف را دارا است. در آزمایش‌ها از طیف JONSWAPکه ضریب γ در آن برابر با ۳/۳ است استفاده شده است. به منظور به حداقل رساندن بازتابش امواج به میزان کمتر از ۱۰٪ ، در آزمایشات اولیه در انتهای کانال از یک جاذب توده سنگی با شیب ۱:۹(۱ قائم و ۹ افق) استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از فلوم، نشان داده شده است. در طول فلوم از ۴ سنسور جهت برداشت تغییرات سطح آب استفاده می شود که چینش آن‌ها براساس الگوی پیشنهادی Mansard and Funke [۸] می‌باشد.

درتمامی آزمایشها، برداشت مقاطع قبل از شروع آزمایش و بعد از اصابت امواج توسط یک پوینت گیج که در بالای فلوم مستقر است انجام پذیرفته است. در انتخاب مقاطع فاصله مجاز تا دیواره فلوم حفظ شده است تا از اثرات دیواره بر نتایج آزمایشات کاسته شود. بدین منظور سه مقطع جداگانه انتخاب شد که مقطع میانی در وسط فلوم و دو مقطع کناری در طرفین مقطع میانی و به فاصله ۲۰ سانتی متر از آن می-باشند.به منظور تهیه مصالح مورد نیاز برای ساخت مدل موج شکن، ابتدا محدوده دانه بندی مصالح لایه آرمور، لایه فیلتروهسته بر اساس توصیه‌های موجود در CEM(2008) [۱۰] مشخص گردیده وسپس برای تهیه مصالح، حجم مصالح مورد نیاز محاسبه گردید. ضخامت لایه های فیلتر و هسته بر اساس توصیه های موجود به میزان $2D_{n50}$ در وجه جلویی و پشتی سازه برای هر سه لایه آرمور انتخاب گردید. جهت جلوگیری از سرریزی امواج در تمامی آزمایشات، تراز تاج سازه از سطح ایستابی به میزان $1.2H_S$ انتخاب گردید. مصالح موردنظربرای لایه آرمور و فیلتر از سنگهای نوع رسوبی باجرم حجمی حدود۲۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب وبرای هسته از ماسه شسته شده با جرم مخصوص حدود ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. برای لایه آرمور از سه نوع دانه بندی استفاده شده است و برای تعیین دانه بندی محدوده دانه بندی از الگوی خطی دانه بندی Van der Meer[۵] استفاده شده است:

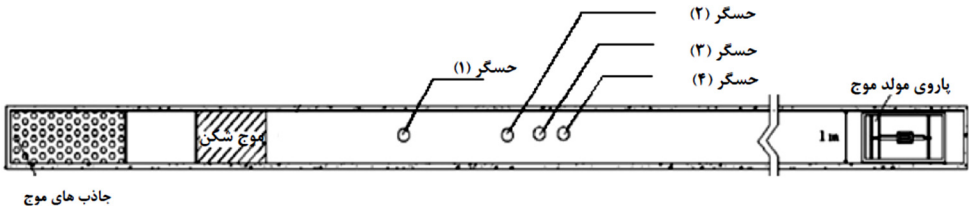
$$W_y = W_{50} \times \left(\frac{W_{85}}{W_{15}}\right)^{\left[\frac{y-0.5}{0.7}\right]} \qquad (۱۲)$$

مشخصات مصالح تشکیل دهنده لایه های مختلف موج شکن سکویی از جمله قطراسمی، وزن، چگالی و ضریب منحنی دانه بندی سنگدانه ها در جدول ۲، همچنین شمایی از مقطع سازه در شکل ۳ و نمایی از مدل موج شکن سکویی در شکل۴ نشان داده شده است.

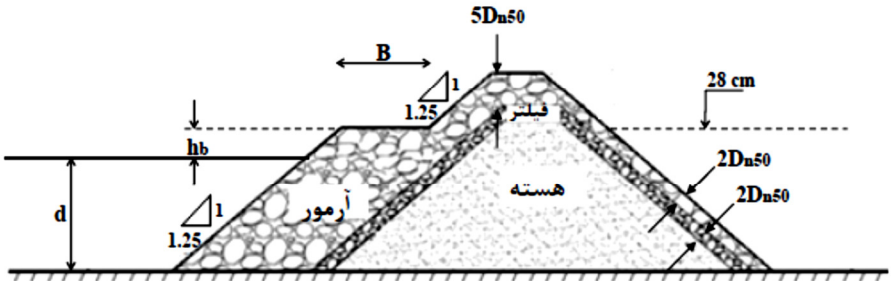
۳- محدوده تغییرات پارامترهای امواج و سازه ای

در جداول ۳ و ۴ محدوده تغییرات پارامترهای با بعد و بی بعد تحقیق حاضر ارائه شده است. دامنه تغییرات ارتفاع و پریود امواج با لحاظ کردن محدودیت-های ناشی از فلوم موج‌ساز به گونه‌ای انتخاب شده که با حداقل تعداد ارتفاع امواج بتوان محدوده وسیعی از تیزی امواج و اعداد پایداری را پوشش داد. از آنجاییکه طراحی مدل بر اساس عدد فرود انجام می‌گیرد، به این منظور عدد رینولدز باید در محدوده $1\times10^4<Re<4\times10^4$ [۵] قرار داشته باشد تا از اثرات نیروی لزجت صرف نظر شود. با توجه به آزمایشهای انجام شده، حداقل مقدار مذکور1.12×10^4بدست آمده است که در محدوده مجاز توصیه شده قرار دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]



شکل ۲- شمایی از فلوم آزمایشگاه



شکل ۳- مقطع مدل موج شکن سکویی در آزمایشگاه



شکل ۴- نمایی از مصالح آرمور و فیلتر و هسته اجرا شده جهت ساخت مدل موج شکن سکویی

جدول ۲- مشخصات مصالح موج شکن مورد مطالعه

پارامترهای سازه‌ای سنگدانه‌ها	نماد	لایه آرمور ۱	لایه آرمور ۲	لایه آرمور ۳	لایه فیلتر	لایه هسته
قطر ا سمی سنگدانه	D_{n50} (m)	۰/۰۱۷	۰/۰۲۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳
وزن مصالح	W_{n50} (kg)	۰/۰۱۴	۰/۰۲۵	۰/۰۴۲	۰/۰۰۱۴	-
عرض منحنی دانه بندی	$f_g = D_{n85}/D_{n15}$	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۳۲	ماسه شسته شده
چگالی مصالح	ρ_s (kg/m^3)	۲۷۰۰	۲۷۵۰	۲۷۷۰	۲۸۰۰	۱۸۰۰

جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای محیطی (امواج) و سازه ای

پارامتر	نماد	حدود تغییرات
عرض اولیه سکوی موج شکن	B	۳۰ تا ۴۵ سانتیمتر
ارتفاع موج	H_S	۴/۴۵ تا ۱۱/۸ سانتیمتر
پریود اوجی موج	T_P	۱ تا ۱/۵۴ ثانیه
عمق آب پای سازه	d	۲۴ سانتیمتر

جدول ۴- محدوده تغییرات پارامترهای بی بعد

پارامتر	حدود تغییرات
H_0	۱/۵۷ تا ۳/۴۷
T_0	۱۹/۸ تا ۳۶/۹۹
H_0T_0	۱۳۹/۱۳ تا ۳۳/۵۹
تیزی موج s_{om}	۰/۰۱ تا ۰/۰۷۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش ها

در این بخش به بررسی تاثیر هریک از پارامترهای امواج و سازه در پایداری و سپس معرفی رابطه‌ای جهت تخمین میزان فرسایش پرداخته شده است. جدول ۵ نیز چیدمان آزمایشها و خلاصه ای از پارامترهای مورد بحث در پایداری هیدرولیکی موج شکن های سکویی را نشان می دهد.

۴-۱- تاثیر ارتفاع و پریود امواج بر پایداری

به منظور بررسی اثر ارتفاع موج بر پایداری و تغییرشکل سازه با دانه‌بندی‌های مختلف، آزمایشهای متعددی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع موج در یک پریود ثابت مقدار عرض فرسایش یافته سکو افزایش می یابد، که در شکل ۵ نشان داده شده است. با ثابت بودن پریود امواج، هرچه ارتفاع موج برخوردی درپای سازه بیشتر باشد توان موج با نسبت توان دوم ارتفاع موج افزایش می‌یابد. آنچه از شکل ۵ پیداست، در دانه‌بندی‌های مختلف با افزایش ارتفاع امواج میزان فرسایش عرض سکو با نرخ کمتری افزایش می یابد. در واقع امواج با ارتفاع بلندتر در اثر توسعه سازه به سمت جلو و ایجاد شیب ملایم زودتر می شکنند وانرژی موج برخوردی کاهش می یابد.

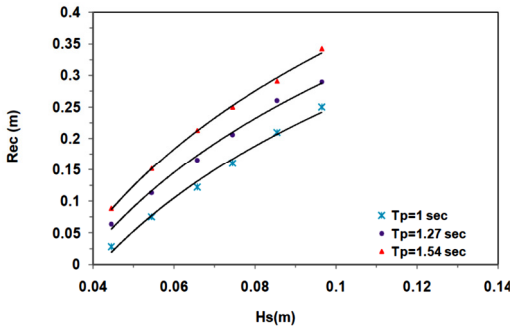
جهت بررسی تاثیر ارتفاع موج بر پروفیل تغییر شکل یافته و میزان فرسایش، شکل ۶ نشان داده شده است. مقایسه پروفیل‌ها نشان می دهد، با افزایش ارتفاع امواج میزان فرسایش و عرض فرسایش یافته سکو افزایش می‌یابد. جهت تخمین تاثیر پریود موج بر پایداری سازه، شکل ۷ نشان داده شده است. آنچه از نمودارهای ترسیم شده پیداست، با افزایش پریود موج در یک ارتفاع ثابت مقدار فرسایش و عرض فرسایش یافته سکو بیشتر می شودکه دلیل آن افزایش شار انرژی موج برخوردی و همچنین طول موج می باشد.

۴-۲- ترکیب اثر ارتفاع و پریود امواج بر پایداری

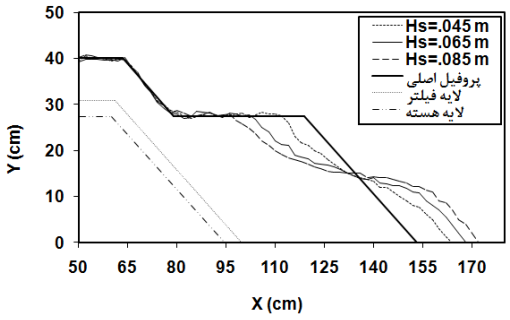
به منظور ترکیب پارامترهای ارتفاع و پریود موج ، در این قسمت به بررسی پارامتر عرض فرسایش یافته بدون بعد سکو (Rec/D_{n50}) بر حسب متغیرهای بدون بعد مختلف پرداخته شده است، که نمودار تغییرات آن بر حسب عدد بدون بعد پایداری (H_0) محاسبه شده بر اساس ارتفاع های متفاوت امواج و در پریودهای مختلف در شکل ۸ رسم شده است.

جدول ۵- آرایش آزمایشات انجام شده

پارامتر مورد مطالعه		تعداد آزمایشها
ارتفاع و پریود موج	۶ ارتفاع موج ۳پریود موج ۳قطر سنگدانه	۵۴
عرض اولیه سکو	۴ ترکیب موج ۴ عرض سکو ۳قطر سنگدانه	۴۸
تعداد موج	۳ ترکیب موج ۶ تعداد موج ۳قطر سنگدانه	۵۴
مجموع آزمایشها		۱۵۶



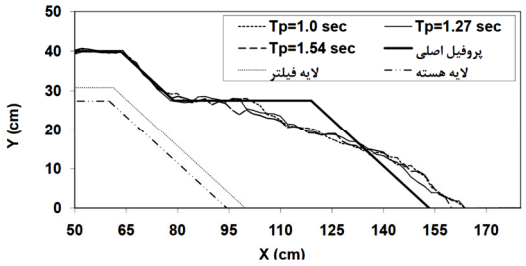
شکل ۵- نمودار فرسایش بر حسب ارتفاع امواج برای عرض سکوی ۴۰ سانتیمتر و تعداد امواج برخوردی ۳۰۰۰



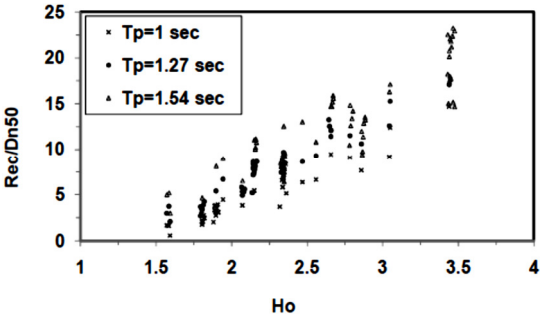
شکل ۶- مقایسه نیم رخ تغییر شکل یافته تحت اثر ارتفاع امواج (قطر سنگداده ها ۰/۰۱۷ متر، پریود اوجی موج ۱/۲۷ ثانیه و عرض سکو ۴۰ سانتی متر)

پراکندگی زیادی که بین داده‌های رسم شده وجود دارد اهمیت تاثیر پریود را در پایداری سازه نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

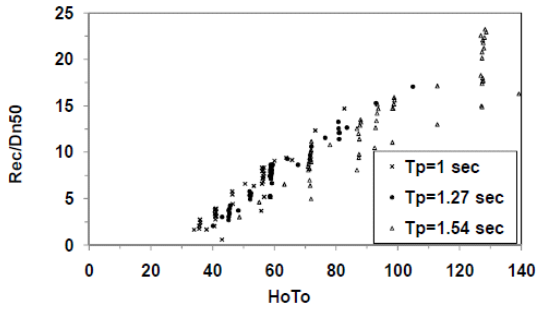


شکل ۷ - نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر پریود امواج (قطر سنگدانه‌ها ۰/۰۲۱ متر وارتفاع موج ۱۰/۵۵ سانتی-متر)



شکل ۸ - نمودار تغییرات عرض فرسایش یافته بدون بعد سکو بر حسب عدد پایداری .

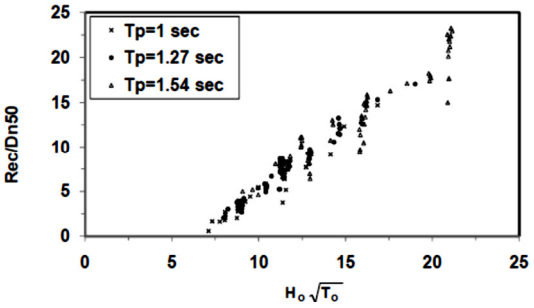
پارامتر بدون بعد دیگری که اثر ترکیبی ارتفاع و پریود موج را در نظر می‌گیرد، پارامتر (H_0T_0) است [۵و۸]. شکل۹ اثر پارامتر H_0T_0 را بر عرض فرسایش یافته بدون بعد نشان می‌دهد. آنچه از این شکل پیداست پراکندگی داده‌ها به مقدار قابل توجهی نسبت به پارامترهای بدون بعد قبلی کمتر است، اما همچنان پراکندگی قابل توجهی بین نتایج وجود دارد و مقدار ضریب همبستگی برای عرض فرسایش یافته بدون بعد سکو نسبت به پارامتر H_0T_0 برای داده‌های آزمایشگاهی برابر R^2=88.5% می باشد.



شکل ۹- نمودار تغییرات عرض فرسایش یافته بدون بعد سکو بر حسب پارامتر H_0T_0 .

پارامتر بدون بعد دیگری که اخیرا توسط مقیم و همکارانش (۱۳۸۸) معرفی شده است، پارامتر($H_o\sqrt{T_o}$) می‌باشد که اثر ارتفاع موج را یک مرتبه بیشتر از پریود موج لحاظ می کند.

شکل۱۰ اثر پارامتر $H_o\sqrt{T_o}$ بر عرض فرسایش یافته بدون بعد نشان می‌دهد. آنچه از شکل پیداست، پراکندگی داده‌ها با استفاده از این پارامتر بدون بعد به مراتب کمتر از سایر پارامترهای بدون بعد است. مقدار ضریب همبستگی نیز در این حالت برابر R^2=92% می‌باشد.

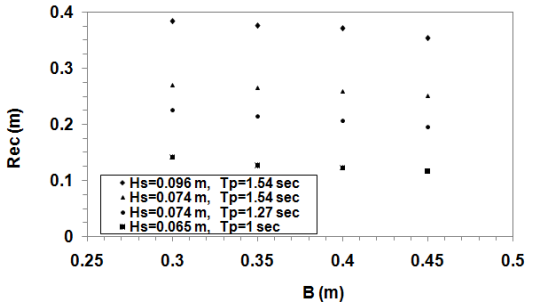


شکل ۱۰ - نمودار تغییرات عرض فرسایش یافته بدون بعد سکو بر حسب پارامتر $H_o\sqrt{T_o}$

۴-۳- تاثیر عرض اولیه سکو بر پایداری

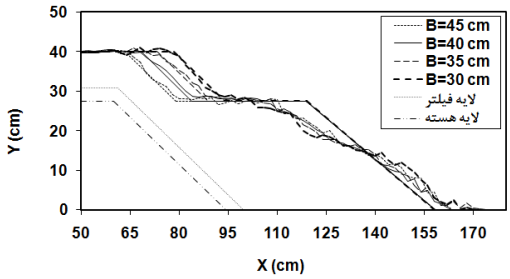
جهت بررسی تاثیر عرض اولیه سکو بر میزان فرسایش آزمایش های مختلفی انجام شده که نتایج آن در شکل ۱۱ برای چهار ترکیب موج و چهار عرض متفاوت سکو نشان داده شده است.

جهت بررسی تاثیر عرض اولیه سکو بر پروفیل تغییر شکل یافته و میزان فرسایش، شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمودار فرسایش بر حسب عرض اولیه سکو برای ترکیبات مختلف ارتفاع و پریود موج برای تعداد امواج برخوردیN=3000.

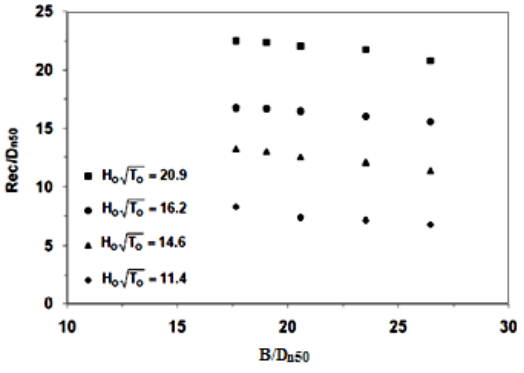
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]



شکل ۱۲- نمودار فرسایش بر حسب عرض اولیه سکو برای ترکیبات مختلف ارتفاع و پریود موج برای تعداد امواج برخوردیN=3000.

مقایسه پروفیل ها نشان می دهد، با افزایش عرض اولیه سکو انرژی بیشتری از موج جذب شده و میزان فرسایش کاهش می یابد. شکل ۱۳ تأثیر پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده (B/D_{n50}) را نسبت به عرض فرسایش یافته بدون بعد (Rec/D_{n50}) در ترکیبهای مختلف ارتفاع و پریود موج نشان می دهد. افزایش مقدار پارامتر B/D_{n50}، کاهشRec/D_{n50} را نشان می-دهد. به منظور بررسی تأثیر عرض اولیه سکو بر میزان فرسایش، فرم معادله توانی به شکل زیر توسط نرم افزار CurveExpertدر نظر گرفته شد:

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = a\left(\frac{B}{D_{n50}}\right)^{b} \qquad (۱۳)$$



شکل ۱۳- تاثیرB/Dn50 بر Rec/Dn50

با استفاده از نرم افزار اخیر و مقادیر داده‌های آزمایشگاهی حاضر مطابق جدول ۶، مقادیر a و bبرای شرایط مختلف موج بدست آمده‌اند.

بدلیل آنکه روند تغییرات عرض فرسایش یافته سکو در برابر تغییرات عرض سکو روند مشابهی داشته و ضریب b تقریبا مقدار یکسانی را نشان می‌دهد، لذا مقدار این ضریب برای کلیه شرایط امواج ثابت بوده ولی مقداری پراکندگی ناشی از خطاهای آزمایشگاهی بخصوص اندازه گیری در مقادیر آن مشاهده می شود. برای لحاظ نمودن مقدار ثابت برای ضریب b از میانگین ضرایب بدست آمده استفاده نموده و مقداری در حدود۰/۱۹- برای آن در نظر گرفته می شود.

جدول ۶- ضرایب a و b برای امواج مختلف

a	b	$H_O\sqrt{T_O}$
۳۹/۲۵	-۰/۱۸	۲۰/۹
۲۸/۶۱	-۰/۱۹	۱۶/۲
۲۰/۳۱	-/۲	۱۴/۶
۱۳/۴۵	-/۱۹	۱۱/۴

آنچه مشاهده می‌شود ضریب a وابسته به شرایط امواج برخوردی به سازه (ارتفاع و پریود) است ولی برای ضریب b از میانگین ضرایب بدست آمده می توان استفاده نمود. بنابراین از رابطه زیر میتوان برای لحاظ نمودن اثرعرض سکوی بی‌بعد شده برعرض سکوی فرسایش یافته بی بعد شده استفاده نمود:

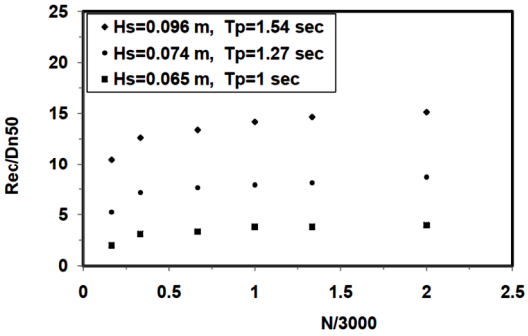
$$\frac{Rec}{D_{n50}} = a\left(\frac{B}{D_{n50}}\right)^{-0.19}$$
$$a == f(H_O\sqrt{T_O}) \qquad (۱۴)$$

۴-۴- تاثیر تعداد موج (مدت طوفان) بر پایداری و تغییر شکل سازه

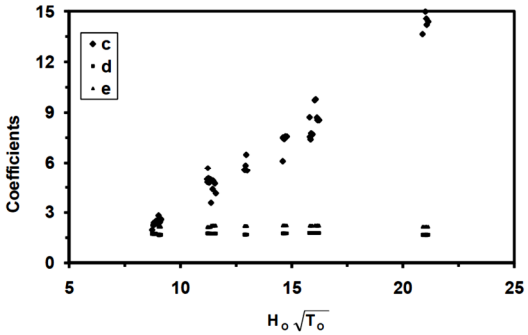
از دیگر پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر پایداری و میزان فرسایش موج شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، تعداد امواج برخوردی به سازه می‌باشد. جهت بررسی این پارامتر مهم و تعیین مدت زمان مورد نیاز برای به تعادل رسیدن مقطع موج‌شکن، برای هر دانه‌بندی، ۱۸ آزمایش تحت شرایط مختلف ارتفاعی پریودی انجام شده است که نتایج آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است. جهت بررسی نتایج این قسمت، امواج با گام‌های ۱۰۰۰ انتخاب گردید. مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج ترسیم شده نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرسایش عرض سکو در اوایل طوفان و در برخورد چند صد موج اول اتفاق می‌افتد امواج برخوردی به سازه میزان عرض فرسایش یافته زیاد می‌شود ولی با گذشت زمان از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

سرعت آن کاسته و در نهایت به یک تعادل نسبی می-رسد.



شکل ۱۴- مقایسه نیم رخ تغییر شکل یافته تحت اثر تعداد امواج(قطر سنگدانه ها ۰/۰۲۱ متر وارتفاع موج۹/۶۵ سانتی متر و پریود اوجی ۱/۵۴ ثانیه)



شکل ۱۵- ضرایب c ، d و e برای امواج مختلف

این بدان مفهوم است که هیچگاه نمی‌توان مدعی شد که نرخ این تغییرات به صفر می‌رسد و دیگر فرسایشی در سازه اتفاق نمی‌افتد و ملاکی که برای پایان زمان به تعادل رسیدن در نظر گرفته شده است، رسیدن به ۹۰ درصد تغییر شکل می‌باشد. روند تغییرات عرض فرسایش یافته سکو نسبت مدت طوفان به شکل تابع نمایی بصورت زیر در تمامی ترکیبات موج و سازه، روند مناسبی به نظر می‌رسد.

$$\frac{Re\,c}{D_{n50}} = c\left[\, d - exp\left(-e \times N/3000\right)\right] \qquad (۱۵)$$

روند تغییر عرض فرسایش یافته بدون بعد نسبت به تعداد امواج مشابه بوده و مقادیر ضرایب d و e بر اساس نمودار شکل ۱۵ در تمامی ترکیبات موج تقریبا ثابت می‌باشد که می‌توان از میانگین ضرایب بدست آمده استفاده نمود. مقدار ضرایب بترتیب d و e بترتیب در حدود ۱/۷۲ و ۲/۱۹ در نظر گرفته می‌شود. همانطور که از شکل پیداست مقدار ضریب c تابعی ازشرایط امواج (ترکیبارتفاع و پریود) می‌باشد. بنابراین از رابطه زیر می‌توان جهت لحاظ نمودن اثر تعداد امواج بر عرض سکوی فرسایش یافته بی‌بعد شده استفاده نمود:

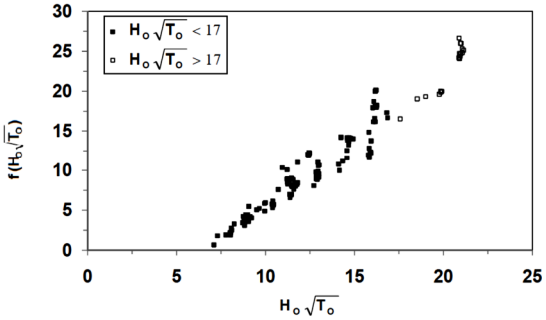
$$\begin{cases} \dfrac{Re\,c}{D_{n50}} = c\left[\, 1.72 - exp\left(-2.19 \times N/3000\right)\right] \\ c = f\left(H_0\sqrt{T_0}\right) \end{cases} \qquad (۱۶)$$

۴-۵- تخمین عرض فرسایش یافته سکو

برای بدست آوردن رابطه‌ای مناسب جهت تخمین عرض فرسایش یافته سکو بر حسب شرایط محیطی امواج و شرایط سازه‌ای موج‌شکن سکویی، از نتایج روابط (۱۴) و (۱۶) استفاده نموده و رابطه زیر را بصورت حاصلضرب توابع قسمت قبلی در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{Re\,c}{D_{n50}} = f\left(H_0\sqrt{T_0}\right)\left[\, 1.72 - exp\left(-2.19 \times N/3000\right)\right] \times \left(\frac{B}{D_{n50}}\right)^{-0.19} \qquad (۱۷)$$

با بیان ضریب $f\left(H_0\sqrt{T_0}\right)$ بر حسب ارتفاع و پریود امواج به صورت رابطه (۱۸)، عبارت سمت راست معادله بر حسب متغیر $H_0\sqrt{T_0}$ روی نمودار شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶- مقادیر $f\left(H_0\sqrt{T_0}\right)$ بر حسب پارامتر بی بعد $H_0\sqrt{T_0}$

همانطور که از شکل پیداست، روند تغییرات داده های آزمایشگاهی برای بازه‌های $H_0\sqrt{T_0} < 17$ و $H_0\sqrt{T_0} > 17$ متفاوت است. به منظور بدست آوردن توابع مناسب جهت تخمین $f\left(H_0\sqrt{T_0}\right)$ توابع مختلفی بررسی شدند که برای بازه اول تغییرات به صورت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

تقریبا خطی و برای بازه دوم تغییرات درجه دوم در نظر گرفته شد.

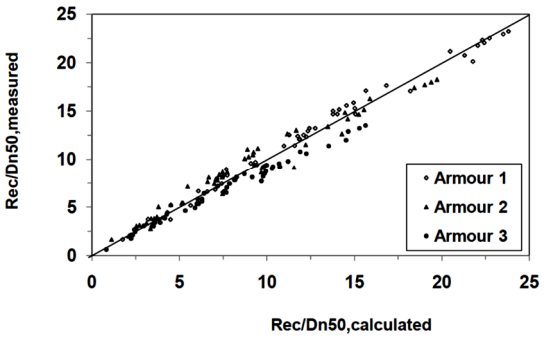
$$f(H_{\circ}\sqrt{T_{\circ}})=\frac{\mathrm{Re}\,c}{D_{n50}\left[1.72-\exp\left(-2.19\times N/3000\right)\right]\left(\frac{B}{D_{n50}}\right)^{-0.19}} \quad (18)$$

بنابراین رابطه (۱۹) برای تخمین عرض فرسایش یافته سکو با توجه به شرایط مختلف محیطی موج و سازه بدست می آید.

$$\begin{cases}\dfrac{Rec}{D_{n50}}=\left(1.66H_0\sqrt{T_0}-10.92\right).[1.72- \\ exp(-2.19\times N/3000)\ ]\times\left(\dfrac{B}{D_{n50}}\right)^{-0.19} & H_0\sqrt{T_0}<17 \\ \dfrac{Rec}{D_{n50}}=\left(0.73(H_0\sqrt{T_0})^2-25.9H_0\sqrt{T_0}+247\right)\times \\ \left[1.72-exp(-2.19\times N/3000)\right]\left(\dfrac{B}{D_{n50}}\right)^{-0.19} & H_0\sqrt{T_0}>17\end{cases} \quad (19)$$

استفاده از این رابطه با محدودیت‌های زیر توام می‌باشد:

$$\begin{cases}7.1<H_{\circ}\sqrt{T_{\circ}}<21.2 \\ 500<N<6000 \\ 12<B/D_{n50}<26.5\end{cases} \quad (20)$$



شکل ۱۷- نمودار تغییرات عرض فرسایش یافته بدون بعد رابطه (۱۹) در برابر داده های آزمایشگاهی حاضر.

نتایج عرض فرسایش یافته بدون بعد اندازه گیری شده بر حسب عرض فرسایش یافته بدون بعد تخمین زده شده از رابطه (۱۹) برای تمام داده های آزمایشگاهی حاضر در شکل ۱۷ نشان داده شده است که نشانگر مناسب بودن رابطه اخیر برای تخمین میزان فرسایش است.

۴-۶- ارزیابی رابطه تخمین فرسایش بدست آمده با نتایج سایرین

به منظور بررسی اعتبار رابطه بدست آمده در این تحقیق، نتایج بدست آمده از فرمول حاضر و فرمولهای ارائه شده توسط سایر محققین در برابر داده‌های آزمایشگاهی حاضر و مقیم مورد ارزیابی قرار گرفتند. دادههای در نظر گرفته شده از مجموع داده های مقیم برای آن دسته از آزمایشهایی بوده که در محدوده دامنه شرایط آزمایشگاهی حاضر قرار گیرند. به منظور ارزیابی عملکرد رابطه تحقیق حاضر، از شاخص های ارزیابی از جمله ضریب همبستگی (R)، میزان درصد خطای نسبی (E) و انحراف معیار (σ) استفاده می‌گردد که روابط آن به صورت زیر است.

$$R=\frac{N\sum XY-(\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N\sum X^2-(\sum X)^2][N\sum Y^2-(\sum Y)^2]}} \quad (21)$$

$$E=\frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{Y-X}{Y}\right| \quad (22)$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X-Y)^2} \quad (23)$$

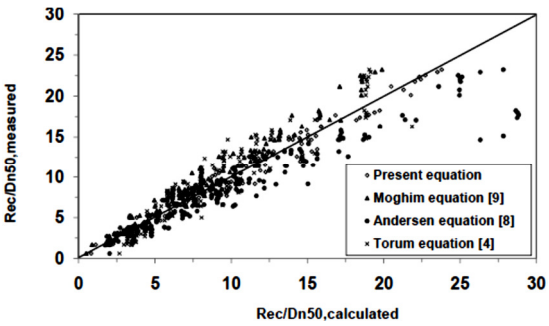
در این روابط X مقدار محاسبه شده از روابط،Y مقدارداده های آزمایشگاهی و N تعداد داده های آزمایشگاهی می‌باشد. جدول ۷ مقادیر شاخص های ارزیابی را برای نتایج بدست آمده از فرمولهای متفاوت محققین در برابر داده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان می دهد. مقدار ضریب همبستگی ۹۷/.، درصد خطای نسبی ۹/۲۱ و انحراف معیار ۹۲/. را برایداده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نسبت به رابطه(۱۹) نشان می دهد.

جدول ۷- شاخص های ارزیابی نتایج فرمولهای محققین مختلف در برابر داده های آزمایشگاهی حاضر

پارامتر	تحقیق حاضر	مقیم و همکاران [۹]	Lykke Andersen [۸]	Tørum [۴]
R^2	۰/۹۷	/۹۱	/۹۰	/۸۷
E (%)	۹/۲۱	۱۱/۸۱	۲۳/۹۵	۲۳/۴۲
σ	/۹۲	۱/۴۹	۳/۰۱	۲/۰۳

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

شکل ۱۸ مقایسه ای از نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی بدست آمده از روابط مختلف محققین در خصوص تخمین عرض فرسایش یافته سکو بصورت بی بعد، برای نتایج آزمایشگاهی مقیم نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست مقادیر بدست آمده از تحقیق حاضر نسبت به سایرین مناسب تر می‌باشد.



شکل ۱۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی برای داده های آزمایشگاهی مقیم.

جدول ۸ مقادیر شاخص های ارزیابی در خصوص نتایج روابط مختلف ارائه شده توسط محققین در برابر داده های آزمایشگاهی مقیم را نشان می دهد. همانطور که از جدول مشاهده می‌شود نتایج شاخص‌های ارزیابی تحقیق حاضر در مقایسه با سایرین از وضعیت مطلوبی برخوردار است.

جدول ۸- شاخص های ارزیابی نتایج فرمولهای محققین مختلف در برابر داده های آزمایشگاهی مقیم

پارامتر	تحقیق حاضر	مقیم و همکاران [۹]	Lykke Andersen [۸]	Tørum [۴]
R^2	۰/۹۴	/۹۲	/۷۸	/۶۲
E (%)	۱۲/۱	۱۳/۵	۳۴/۳	۲۷/۷۲
σ	۱/۸۷	۱/۳۷	۴/۳۵	۲/۸۲

۵- نتیجه گیری

مطالعه آزمایشگاهی حاضر با هدف بررسی فرسایش موج شکن های سکویی شکل پذیر تحت تاثیر شرایط مختلف امواج نامنظم بااستفاده از روش مدل آزمایشگاهی دوبعدی درفلوم موج و پارامترهای سازه انجام شده است.

نتایج بدست آمده در این تحقیق به شرح زیر است:

۱- در اثر افزایش ارتفاع و پریود موج با در نظر گرفتن قطر اسمی سنگدانه‌های مختلف، میزان عرض فرسایش یافته سکو افزایش می‌یابد که با افزایش قطر مشخصه سنگدانه‌های آرمور، میزان فرسایش عرض سکو در برابر افزایش ارتفاع امواج با نرخ کمتری افزایش می یابد که دلیل آن پایداری بیشتر سازه با قطر سنگدانه‌های بیشتر است.

۲- مشاهدات آزمایشگاهی نشان می دهد با افزایش تعداد امواج برخوردی به سازه میزان عرض فرسایش یافته زیاد می‌شود ولی با گذشت زمان از سرعت آن کاسته و در نهایت به یک تعادل نسبی می‌رسد که در آن نرخ تغییرات بسیار کم می‌شود. همچنین در شرایط مشابه برخورد موج، با افزایش قطر اسمی سنگدانه‌ها تعداد امواج مورد نیاز برای به تعادل رسیدن کاهش می‌یابد که این امر را می توان به پایداری بیشتر سازه نسبت داد.

۳- از جمله پارامترهای تاثیر گذار بر میزان فرسایش عرض اولیه سکوی موج شکن می باشد که در تحقیق انجام شده توسط مقیم اثر آن با یک دانه بندی مشخص ناچیز مشاهده شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش عرض سکوعرض فرسایش یافته سکو کاهش می یابد. همچنین با افزایش قطر اسمی سنگدانه‌ها، میزان عرض فرسایش یافته سکو کاهش می یابد.

۴- تخمین مناسبی جهت پیش بینی میزان عرض فرسایش یافته موج شکن‌های سکویی شکل پذیر با استفاده از رگرسیون غیر خطی انجام شده است که از دقت قابل قبولی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی حاضر و حتی داده‌های مقیم برخوردار است. رابطه حاضر این امکان را به طراح می دهد تا بتواند در خصوص انتخاب عرض اولیه سکو و قطر دانه بندی آرمور به نسبت میزان فرسایش عرض سکو تصمیم گیری نماید.

۶- مراجع

1-PIANC MarCom WG 40, (2003), State-of-the-art of designing and constructing berm breakwaters, PIANC, Brussels.
2-Tørum, A., (1998), On the stability of berm breakwaters in shallow and deep

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]

water, Proceeding of the 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, ASCE.
3-Hall, K. and KaoS., (1991), A study of the stability of dynamically stable breakwaters, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 18, p.916-925.
4-Tørum, A., Kuhnen F. and Menze A., (2003), On berm breakwaters. stability, scour, overtopping. Elsevier, Journal of Coastal Engineering Vol.49, Amsterdam, September Issue, p. 209-238.
5-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.
6-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.
7-Sigurdarson, S., Smarason, O.B. and Viggoson, G. (2000), Design considerations of berm breakwaters, Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering. Sidney, Australia, p.1610–1621.
8-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.
9-Moghim, M.N., Shafieefar, M., Tørum, A. and Chegini, V. (2011), A new formula for the sea state and structural parameters influencing the stability of homogeneous reshaping berm breakwaters, Coastal Engineering, Vol.58, p.706-721.
10-Moghim, M.N. (2009), Experimental Study of Hydraulic Stability of Reshaping Berm Breakwaters. PhD Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran. (In Persion)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.6.7]