

تأثیر شرایط امواج نامنظم بر عرض فرسایش یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر

محمدنوید مقیم^۱، مهدی شفیعی فر^۲، وحید چگینی^۳، پیمان آق‌تومان^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 اقیانوس‌شناسی
- 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، پیوند موج و مدت طوفان بر روی این پدیده مورد بررسی قرار گرفته است. مجموعاً ۶۰ آزمایش در این تحقیق انجام شده است. به منظور تحلیل و بررسی نتایج، ابتدا پارامتر بی‌بعد جدیدی برای در نظرگیری اثر همزمان ارتفاع و پیوند موج معرفی و سپس با استفاده از این پارامتر بی‌بعد، رابطه مناسبی برای عرض سکوی فرسایش یافته با در نظر گرفتن پارامترهای موج، ارائه 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. Moghim¹, M. Shafieefar², V. Chegini³, P. Aghtouman⁴

- 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

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

که در آن $T_o = T_m \times (g/D_{n50})^{1/2}$ (پارامتر بی بعد پرپود

۱- مقدمه

موج)، T_m : پرپود موج و g : شتاب ثقل می باشد. جدول (۱) حدود و مقادیر دو شاخص فوق را برای سه دسته از موج شکن های سکویی نشان می دهد. عدد پایداری برای موج شکن های سکویی شکل پذیر در محدوده $2.5 < H_0 < 4$ و $60 < H_0 T_o < 100$ قرار دارد. یکی از مهمترین پارامترهای حاکم در طراحی و اندازه گیری تغییر شکل موج شکن سکویی، میزان فرسایش سکوی آن (Rec) است، بطوریکه اگر این مقدار بزرگتر از عرض سکوی موج شکن باشد (Rec > B)، آسیب و احتمالاً ناپایداری موج شکن اتفاق می افتد [۳].

موج شکن سکویی نوعی موج شکن توده سنگی است، که با ایجاد سکویی بزرگ در تراز بالاتر و یا هم تراز سطح ایستایی (SWL) در سمت دریا ساخته می شود (شکل ۱). نیم رخ موج شکن سکویی پس از برخورد امواج به صورت نیم رخی به شکل حرف لاتین S خوابیده، تغییر شکل می دهد. ساخت موج شکن های سکویی با توجه به استفاده بهینه از مصالح معدن و ساخته شدن با وسایل و تجهیزات ساده تر نسبت به موج شکن های توده سنگی معمولی، ارزانه تر از موج شکن های نوع دوم است. بعلاوه در موج شکن های نوع سکویی از سنگهای سبکتری استفاده می شود و شیب وجه جلویی آنها تیزتر است [۱].

جدول ۱- تقسیم بندی انواع موج شکن های سکویی

برحسب عدد پایداری [۳]

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

به طور کلی موج شکن ها بر اساس عدد پایداری (H_o) طبقه بندی می شوند که به صورت زیر تعریف می شود [۲]:

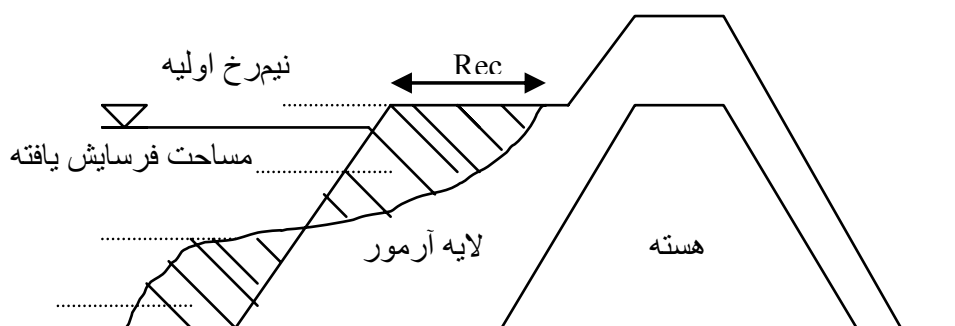
$$H_o = \frac{H_s}{\Delta \cdot D_{n,50}} \quad (1)$$

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 سنگدانه ها (m) است. البته بدلیل آنکه عدد پایداری ذکر شده در رابطه فوق اثر پرپود موج را در نظر نمی گیرد و با توجه به اینکه اثر پرپود در پایداری موج شکن های شکل پذیر (مقادیر بالای H_o) مهم است، Van der Meer پارامتر بی بعد شده $H_o T_o$ را که اثر میانگین پرپود موج را نیز در نظر می گیرد، به صورت زیر تعریف کرد [۲]:

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \times T_m \times (g/D_{n50})^{1/2} \quad (2)$$

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 [۱۱]، Van der Meer [۱۱]، Van der Meer و Norton [۱۲]، Van Gent [۱۳] و بهلولی [۱۴] تحقیقات متعددی بر روی پایداری موج شکن های سکویی شکل پذیر انجام داده اند. نتیجه برخی تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده به صورت روابط تجربی برای مقدار عرض فرسایش یافته سکو ارائه شد.



شکل ۱- موج شکن سکویی

می آید:

$$f_d = -0.16\left(\frac{d}{D_{n50}}\right) + 4.0 \quad (5)$$

که در آن d : عمق آب در پای موج شکن 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 موج شکن های 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].

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = \frac{(1+c_1).d - c_1.h_s}{d - h_B} \cdot f_N \cdot f_\beta \cdot f_{Ho} \cdot f_{grading} + \frac{\cot(\alpha_d) - 1.05}{2.D_{n50}} \cdot (h_B - d) \quad (6)$$

که در آن c_1 : ضریبی ثابت برابر $1/2$ ، 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)، دانه بندی لایه آرمور و عدد پایداری، توابعی به صورت زیر در نظر گرفته می شوند [۱]:

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]:

$$\frac{Rec}{D_{50}} = (-10.4 + 0.51.H_o^{2.5}) + 7.52(f_g) - 1.07(f_g)^2 + 6.12P_R \quad (3)$$

که در آن $f_g = \frac{D_{85}}{D_{15}}$: ضریب منحنی دانه بندی سنگهای بکار رفته و P_R : درصد سنگهای گرد گوشه در لایه آرمور می باشند. D_{85} و D_{15} به ترتیب عبارتند از قطری که ۸۵ و ۱۵ درصد سنگها، قطری کمتر از آن دارند. Tørum و همکاران (۲۰۰۳) فرمول ساده ای برای محاسبه عرض فرسایش یافته سکو و زمانی که موج به صورت عمود بر خط طولی موج شکن برخورد می کند، به دست آوردند. آنها در فرمول ارائه شده اثر ارتفاع موج، پیوند موج، دانه بندی سنگها و عمق آب را در نظر گرفتند [۷].

$$\frac{Rec}{D_{50}} = 0.0000027(H_o T_o)^3 + 0.000009(H_o T_o)^2 + 0.11(H_o T_o) - (9.9 f_g^2 + 23.9 f_g - 10.5) - f_d \quad (4)$$

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

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، به صورت 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 (Wave Synthesizer) WS و به وسیله نرم‌افزار 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.

$$\begin{cases} f_N = (N/3000)^{-0.046.H_o+0.3} & \text{for } H_o < 5 \\ f_N = (N/3000)^{0.07} & \text{for } H_o \geq 5 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_\beta = \cos(\beta) \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_{grading} = 1 & \text{for } f_g \leq 1.5 \\ f_{grading} = 0.43.f_g + 0.355 & \text{for } 1.5 < f_g \leq 2.5 \\ f_{grading} = 1.43 & \text{for } f_g > 2.5 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} f_{H_o} = 19.8 \cdot \exp\left(-\frac{7.08}{H_o}\right) \cdot s_{om}^{-0.5} & \text{for } T_o \geq T_o^* \\ f_{H_o} = 0.05 \cdot H_o T_o + 10.5 & \text{for } T_o < T_o^* \end{cases} \quad (10)$$

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

در رابطه فوق $s_{om} = \frac{H_s}{L_{om}}$: تیزی موج و L_{om} : طول موج

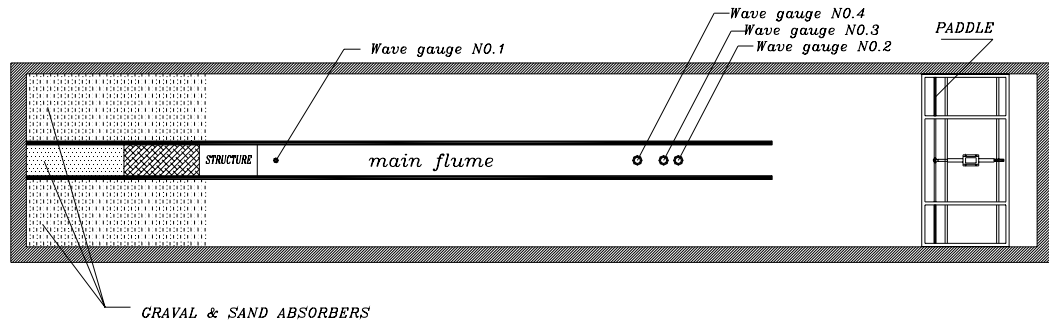
در آب عمیق بر حسب پریود میانگین می‌باشد.

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

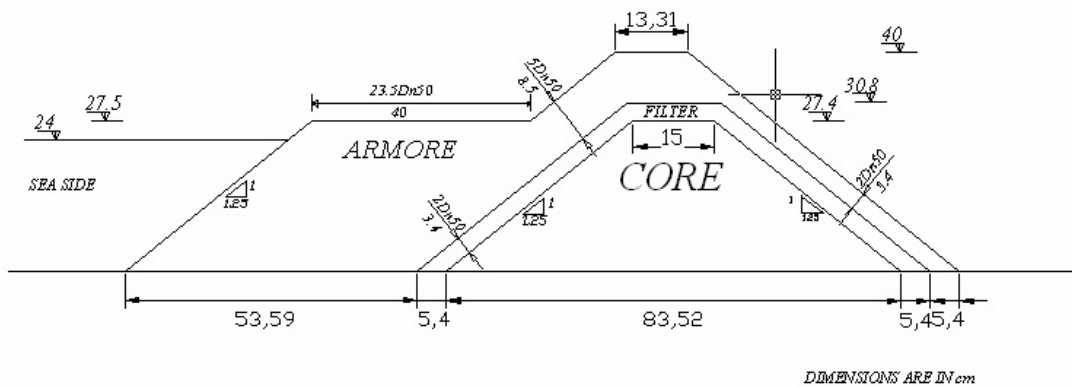
با توجه به آنکه نتایج بدست آمده از روابط پیشنهادی در این زمینه برای شرایط محیطی و سازه‌ای یکسان، نتایج متفاوتی نشان می‌دهند، در این تحقیق به مطالعه آزمایشگاهی موج‌شکن سکویی نوع ایرانی متشکل از سه لایه هسته، فیلتر و آرمور (برخلاف نوع غیر ایرانی متشکل از دو لایه هسته و آرمور) و همچنین تحلیل اثر شرایط متنوع 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 به صورت مدل دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.



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



شکل ۳- مقطع مدل موج شکن شکل پذیر با مقطع دوزنقه ای و موج شکن سکویی

جدول ۲- مشخصات مصالح سازنده موج شکن مورد مطالعه

هسته	لایه فیلتر	لایه آرمور	
۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۱۷	قطر اسمی سنگدانه ها (m)
	۰/۰۰۱۳	۰/۰۱۳	وزن مصالح (kg)
ماسه شسته شده	۱/۳۳	۱/۸۲	ضریب منحنی دانه بندی
۱۷۰۰	۲۶۰۰	۲۶۰۰	چگالی مصالح (kg/m ³)



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

۳- دامنه تغییرات پارامترهای محیطی و سازه‌ای

آزمایشهای انجام گرفته در این تحقیق، برای در نظر گرفتن اثر سه پارامتر ارتفاع موج، پریود موج و تعداد موج برخوردی به سازه انجام شد. دامنه تغییرات پارامترهای با بعد و بی‌بعد مورد نظر در این تحقیق به صورت جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. دامنه تغییرات ارتفاع موج به صورتی 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 $H_o T_o$) 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 محدوده رابطه زیر قرار گیرد [۲]:

$$Re = \frac{D_{n50} \times \sqrt{gH_s}}{\nu} > (1 \times 10^4 - 4 \times 10^4) \quad (11)$$

حداقل مقدار بدست آمده برای پارامترهای مذکور در این آزمایشها برابر با ($Re = 1.13 \times 10^4$) 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 خصوصیات برجسته این نوع شکست موج نسبت به سایر حالات شکست موج، اتلاف انرژی بالا و تمرکز شکست و استهلاك انرژی در نقطه شکست موج است. بنابراین هنگام بالاروی موج روی سازه با افزایش سریع سرعت جریان در هنگام بالاروی و همچنین آشفتگی به وجود آمده در اثر شکست موج، تنش برشی بالایی بر ذرات سنگی وارد شده و نیروی خود را صرف تکان دادن ذرات سنگی می‌نمایند. جریان به وجود 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 به وجود می‌آید. این امر منجر به تغییر شکل بیشتر سازه می‌شود.

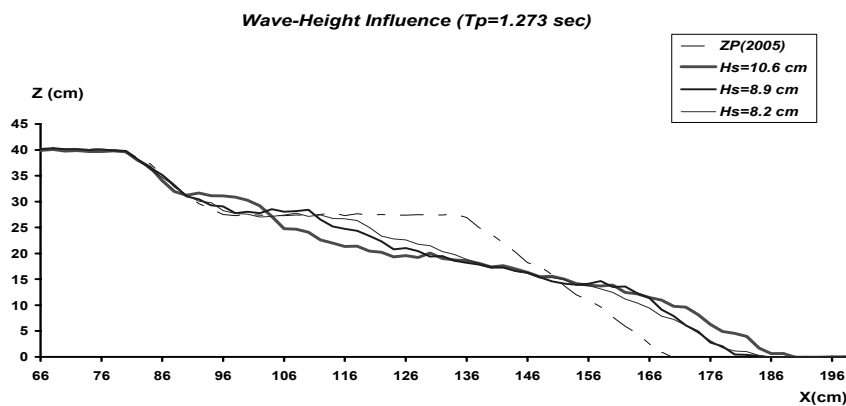
شکل (۶) نشان می‌دهد که در ارتفاع‌های بالای موج در هر پریود، با افزایش ارتفاع موج، نرخ افزایش عرض سکوی فرسایش یافته کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به این صورت بیان کرد که در اثر برخورد اولیه موج و ایجاد شیب ملایمی از مصالح در قسمت میانی سازه، اولاً، امواج با ارتفاع بیشتر، در اثر توسعه و پهن شدن سازه به طرف جلو، زودتر جلوی سازه می‌شکنند و انرژی موج برخوردی را کاهش می‌دهند و ثانیاً طول محیط متخلخل بیشتری برای استهلاك و جذب انرژی موج به وجود 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.

جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای موجود برای بررسی پایداری سازه

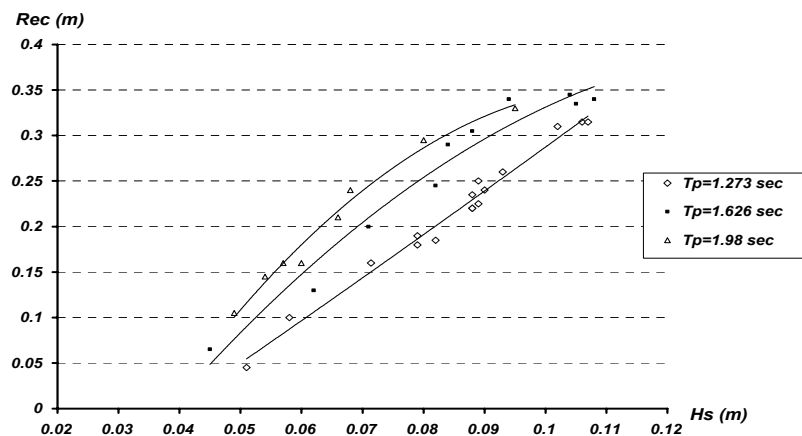
پارامتر مورد نظر	نماد	دامنه تغییرات
عرض سکوی موج شکن	B	۴۰ سانتیمتر
ارتفاع موج	H_s	۴/۵ تا ۱۰/۸ سانتیمتر
پریود اوجی موج	T_p	۱/۲۷۳، ۱/۶۲۶، ۱/۹۸ ثانیه
عمق آب پای سازه	d	۲۴ سانتیمتر
ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی	hb	۳/۵ سانتیمتر
شیب جلوی سازه	$cota$	۱/۲۵

جدول ۴- محدوده تغییرات پارامترهای بی بعد شده

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

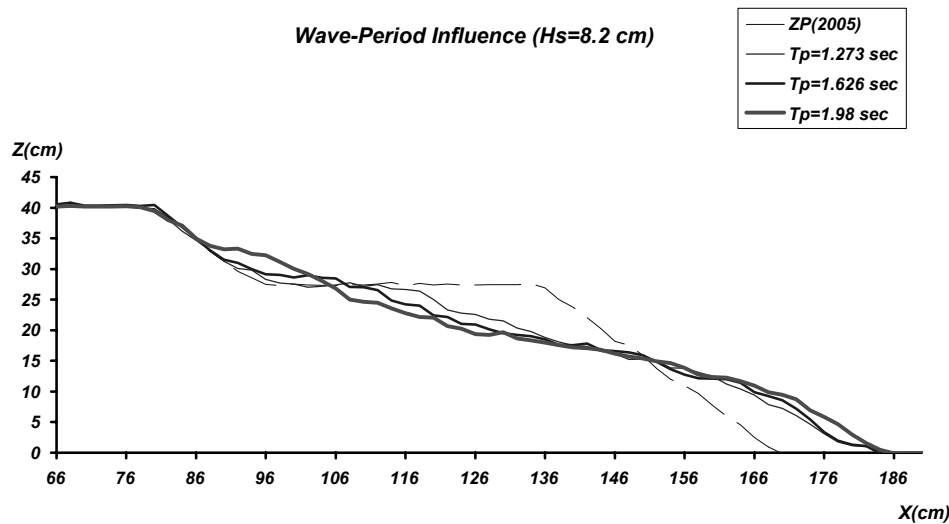


شکل ۵- اثر ارتفاع موج بر نیمرخ تغییر شکل یافته



شکل ۶- نمودار Rec بر حسب ارتفاع موج برای سه پریود موج متفاوت ($T_p = 1.273, 1.626, 1.98$ sec)، عمق آب ۲۴

سانتیمتر، عرض سکو ۴۰ سانتیمتر، ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی ۳/۵ سانتیمتر و $N=3000$



شکل ۷- اثر پریود موج بر نیمرخ تغییر شکل یافته

۴-۲- تأثیر پریود موج

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 بدون بعد برای ترکیب اثر ارتفاع و پریود موج بر روی سازه شکل‌پذیر

شکل (۸) مقدار عرض سکوی فرسایش یافته بی‌بعد شده (Rec/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 شکل‌پذیر 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 ($H_0 T_0$) می‌توان

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 $8/2$ 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 به سمت 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

با توجه به رابطه (۱۳) می توان بیان نمود که عرض فرسایش یافته بی بعد شده با پارامتر بی بعد جدید بصورت $H_o^2 T_o$ تناسب دارد، به عبارت دیگر:

$$Rec/D_{n50} \propto H_o^2 T_o \quad (14)$$

مقدار ضریب همبستگی برای مقادیر Rec/D_{n50} برحسب پارامتر جدید بی بعد شده $H_o^2 T_o$ ، برای داده های آزمایشگاهی برابر با $R^2 = 94\%$ است. شکل (۱۱) مقادیر $\sqrt{H_o^2 T_o}$ را در برابر عرض سکوی فرسایش یافته بی بعد شده نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که پراکندگی داده ها برای در نظر گرفتن اثر توأم ارتفاع و پرپود موج به مراتب کمتر از سایر پارامترهای بی بعد ذکر گردیده است و با توجه به ضریب همبستگی موجود می توان این پارامتر را به عنوان پارامتر بی بعد مناسب برای در نظرگیری اثر توأم ارتفاع و پرپود موج بر روی سازه شکل پذیر در نظر گرفت. با توجه به آنکه مقادیر بدست آمده از پارامتر بی بعد $H_o^2 T_o$ مقادیر بالایی می باشند، بدین منظور از جذر این پارامتر به عنوان پارامتر بی بعد شده ($\sqrt{H_o^2 T_o}$) استفاده می شود.

به منظور صحت سنجی پارامتر بی بعد بدست آمده، از نتایج کار آزمایشگاهی Andersen استفاده گردید [۱]. شایان ذکر است که آن دسته از داده های 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 شده اند. مقدار ضریب همبستگی برای داده های آزمایشگاهی Rec/D_{n50} برحسب پارامتر $\sqrt{H_o^2 T_o}$ ، برابر با $R^2 = 87\%$ است. در حالی که همین مقدار در مورد پارامتر $H_o T_o$ برای داده های Andersen برابر با $R^2 = 79\%$ می باشد.

۴-۴- اثر تعداد موج (مدت طوفان) بر پایداری موج شکن سکویی شکل پذیر

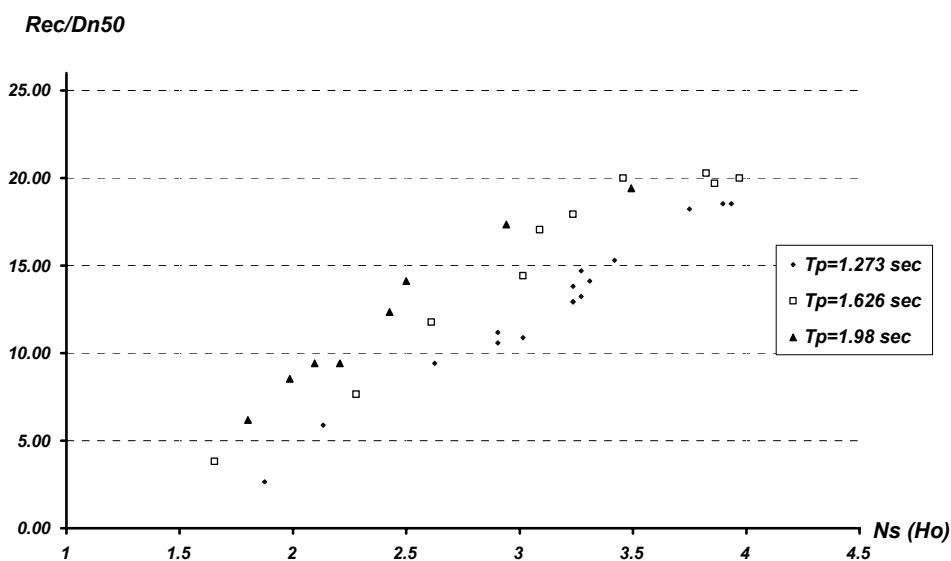
عامل مهمی که تأثیر زیادی بر پایداری و تغییر شکل موج شکن های سکویی شکل پذیر دارد، مدت طوفان است. این عامل به صورت پارامتر بی بعد تعداد امواج (N) مطرح می شود. اصولاً فلسفه طراحی یک موج شکن

استفاده کرد. پارامتر اخیر توسط Van der Meer با مفهوم اینکه اثر ارتفاع و پرپود موج روی سازه از یک مرتبه است، ارائه گردید [۲]. نمودارهای شکل (۹) و (۱۰) اثر تیزی موج و پارامتر $H_o T_o$ را بر عرض سکوی فرسایش یافته بی بعد شده نشان می دهند. نمودار شکل (۹) نشان می دهد که به دلیل پراکندگی زیاد داده ها پارامتر تیزی موج پارامتر خوبی برای توصیف عرض فرسایش یافته نیست. شکل (۱۰) اثر $H_o T_o$ را بر عرض سکوی فرسایش یافته بی بعد شده نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که اگر چه پراکندگی داده ها برای در نظر گرفتن اثر توأم ارتفاع و پرپود موج به مراتب کمتر از سایر پارامترهای بی بعد ذکر گردیده است، اما همچنان پراکندگی قابل توجهی بین داده ها موجود است، بطوریکه مقدار ضریب همبستگی برای مقادیر Rec/D_{n50} برحسب پارامتر بی بعد $H_o T_o$ برای داده های آزمایشگاهی برابر $R^2 = 80\%$ می باشد. نکته قابل توجه این است که برای آن دسته از ترکیبهای شرایط امواج با مقادیر ثابت $H_o T_o$ ، مقدار عرض فرسایش یافته بی بعد شده برای پرپودهای کمتر و در نتیجه ارتفاع موج بزرگتر، مقدار بیشتری را نشان می دهد. این مطلب نشان از هم مرتبه نبودن اثر ارتفاع و پرپود موج در تغییر شکل سازه دارد و با توجه به این موضوع می توان بیان نمود که مرتبه ارتفاع امواج در ترکیب توأم اثر ارتفاع و پرپود موج در تغییر شکل سازه، بیشتر از پرپود امواج است.

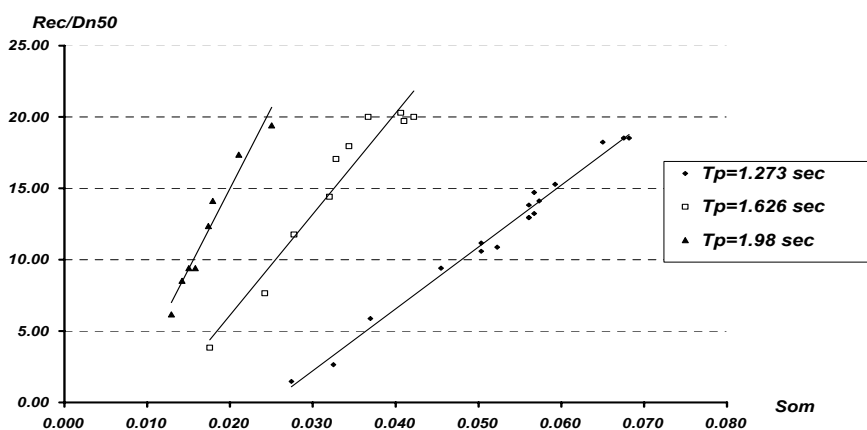
به منظور بدست آوردن پارامتر بی بعد مناسب که توسط آن اثر توأم ارتفاع و پرپود موج به طور مناسبی لحاظ گردند، شکل عمومی رابطه به صورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته شد و سپس برای بدست آوردن پارامتر بی بعد جدید و همچنین ضرایب مناسبی برای این رابطه، از روش رگرسیون چندگانه غیر خطی توسط نرم افزار آماری Systat استفاده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

$$Rec/D_{n50} = aH_o^b T_o^c \quad (12)$$

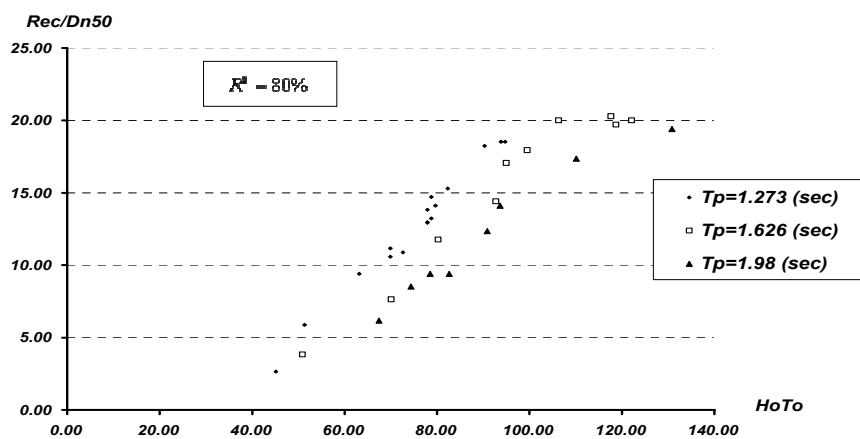
$$Rec/D_{n50} = 0.182(H_o^2 T_o)^{0.78} \quad (13)$$



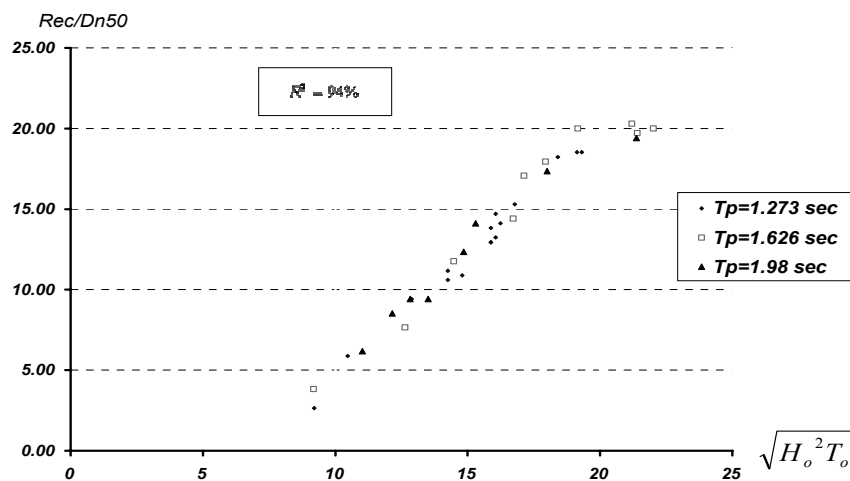
شکل ۸- نمودار بررسی پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده (Rec/D_{n50}) برحسب عدد پایداری (H_o)



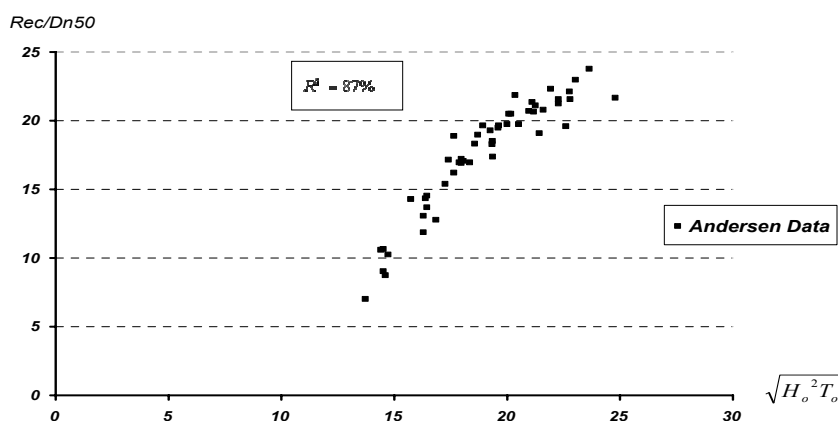
شکل ۹- نمودار بررسی پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده (Rec/D_{n50}) برحسب تیزی موج (S_{om})



شکل ۱۰- نمودار بررسی پارامتر عرض سکوی بدون بعد شده (Rec/D_{n50}) برحسب پارامتر $H_o T_o$



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



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

موج شکن، 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 Rec بر حسب تعداد موج (N)، به تفکیک پیرو در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر شکل موج شکن سکویی، برای ۵۰۰ موج برخوردی ابتدای شروع تغییر شکل بوده و برای تمامی ترکیبهای ارتفاع و پیرو موج، روند افزایش عرض فرسایش یافته

شکل پذیر، 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 موج شکن شکل پذیر 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

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 به ترتیب در حدود $1/61$ و $2/2$ در نظر گرفته می‌شود. مقدار ضریب a بدست آمده تابعی از شرایط امواج (ارتفاع و پرپود موج) می‌باشد. بنابراین می‌توان رابطه زیر را برای لحاظ نمودن اثر تعداد امواج بر عرض سکوی فرسایش یافته در نظر گرفت:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Re c}{D_{n50}} = a * \{1.61 - \exp[-2.2 * (N/3000)]\} \quad (16) \\ (a = f(H_s, T_m)) \end{array} \right.$$

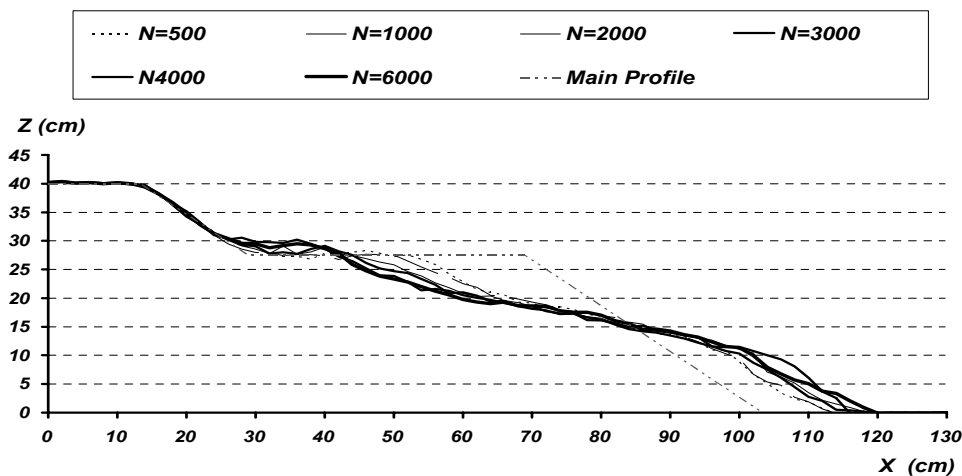
جدول ۵- مقادیر بدست آمده برای ضرایب a و b

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

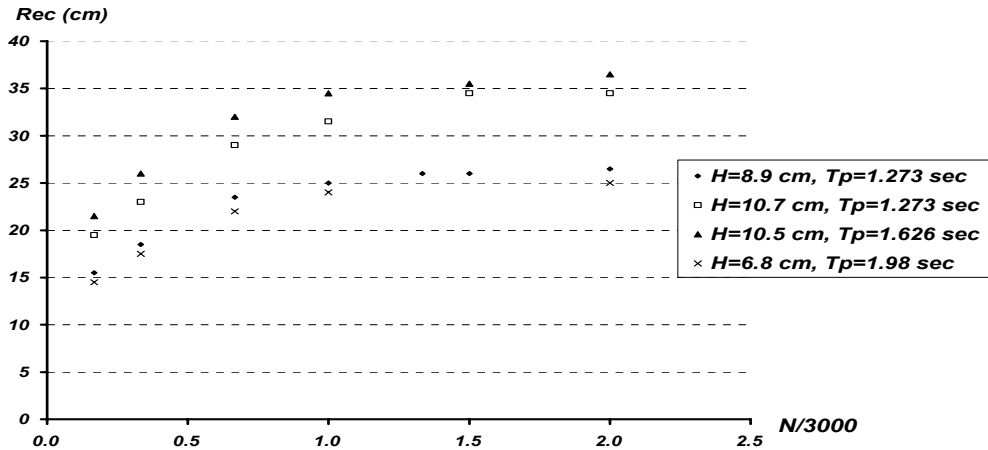
سکوی موج‌شکن روند مشابهی تا ۲۰۰۰ موج برخوردی خواهد داشت و از آن به بعد، این روند افزایشی عرض فرسایش یافته، کاهش پیدا کرده و در حدود ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ تعداد موج، فرسایش عرض سکوی موج‌شکن به مقدار تقریباً ثابتی میل خواهد نمود. بنابراین می‌توان تابع تغییرات عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن نسبت به تعداد امواج را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

$$Re c / D_{n50} = a \{b - \exp[-c * (N/3000)]\} \quad (15)$$

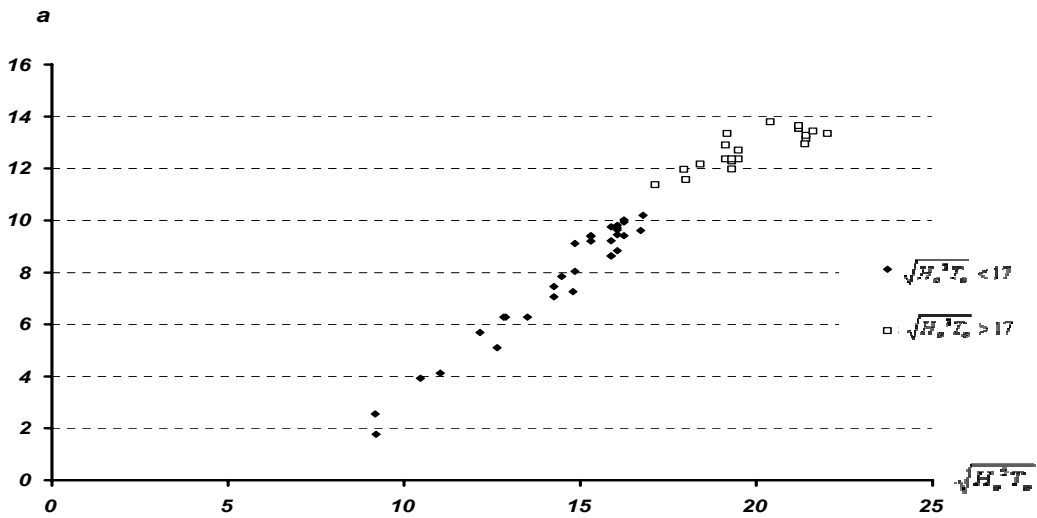
با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی حاضر، مطابق جدول (۴) ضرایب a ، b و c برای هر یک از شرایط امواج بدست آمده‌اند. بدلیل آنکه روند تغییرات عرض سکوی فرسایش یافته در برابر تعداد امواج مشابه یکدیگر می‌باشند و مقدار ضرایب b و c در معادله ذکر گردیده شکل و روند تغییر



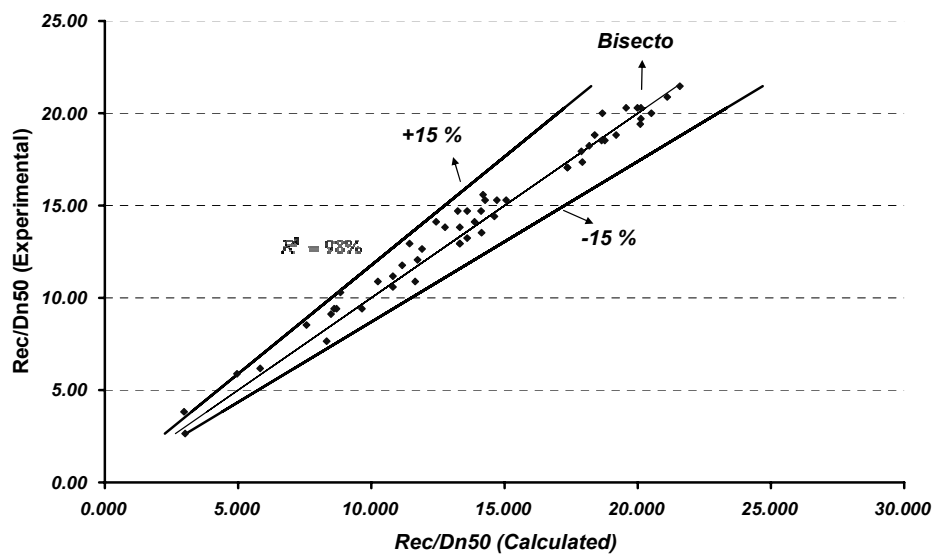
شکل ۱۳- مقایسه نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر تعداد امواج متفاوت
($T_p=1.273$ sec و $H_s=8.7$ cm)



شکل ۱۴- نمودار Rec بر حسب تعداد امواج، برای عمق آب ۲۴ سانتیمتر و عرض سکوی ۴۰ سانتیمتر



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



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

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 بی بعد 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) به صورت زیر در نظر گرفته و عبارت سمت راست معادله بر حسب متغیر بی بعد $\sqrt{H_o^2 T_o}$ روی نمودار شکل (۱۵) رسم گردیده است.

$$a = \frac{Rec}{D_{n50} * \{1.61 - \exp[-2.2 * (N/3000)]\}} \quad (17)$$

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 بی بعد مورد نظر تقریباً به صورت خطی است. بدین ترتیب رابطه (۱۸) برای تخمین عرض سکوی فرسایش یافته برای شرایط محیطی متفاوت بدست می‌آید.

$$\begin{cases} Rec/D_{n50} = (1.03\sqrt{H_o^2 T_o} - 7.47) * \{1.61 - \exp[-2.2 * (N/3000)]\} & \sqrt{H_o^2 T_o} < 17 \\ Rec/D_{n50} = (0.43\sqrt{H_o^2 T_o} + 4.22) * \{1.61 - \exp[-2.2 * (N/3000)]\} & \sqrt{H_o^2 T_o} > 17 \end{cases} \quad (18)$$

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

$$\begin{cases} 9 < \sqrt{H_o^2 T_o} < 22 \\ 500 < N < 6000 \end{cases} \quad (19)$$

شکل (۱۶)، نمودار عرض فرسایش یافته بدون بعد مشاهده‌ای، 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 به صورت زیر است:

$$R = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (20)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y - X)^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (21)$$

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

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

به منظور 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.

جدید مناسب تر از سایر روابط دیگر از جمله خود رابطه Andersen است. اکثر روابط موجود در این زمینه مقدار کمتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه می کنند. تنوع و تفاوت در شرایط آزمایشگاهی و طریقه انجام آزمایش، می تواند در این پدیده اثرگذار باشند.

۵- نتیجه گیری

تحقیق آزمایشگاهی حاضر به منظور بررسی اثر عرض فرسایش یافته موج شکن های سکویی شکل پذیر تحت شرایط مختلف امواج نامنظم با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی دو بعدی در فلوم موج، انجام گرفته است. نتایج این بررسی ها را می توان به صورت زیر بیان کرد:

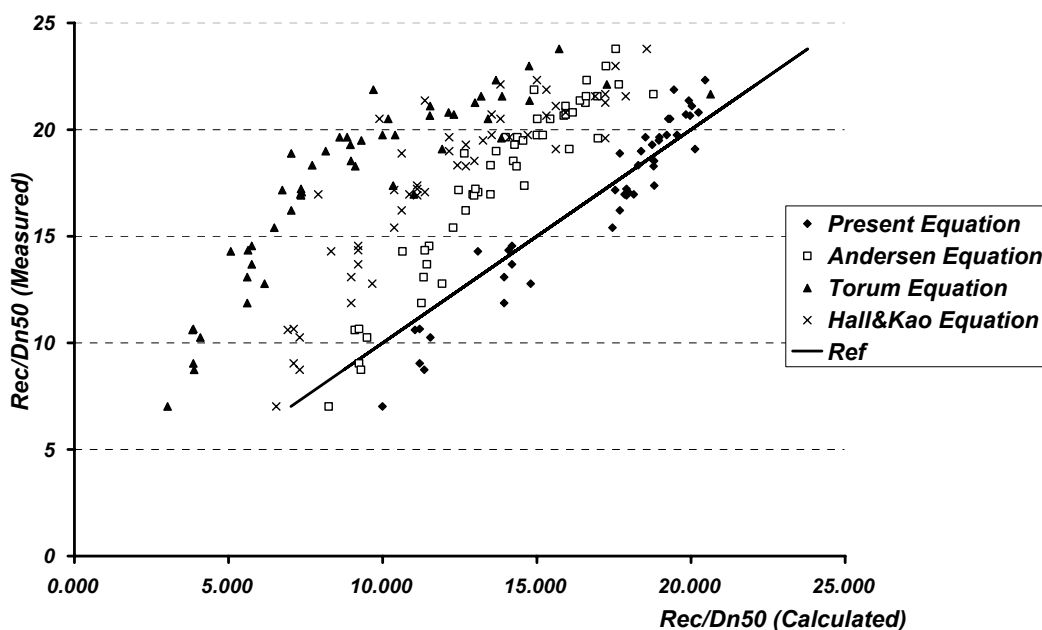
- ۱- ارتفاع و پریود موج و همچنین تعداد امواج برخوردی، پارامترهای بسیار مؤثری در پایداری و میزان تغییر شکل موج شکن سکویی محسوب می شوند، بطوریکه با افزایش این پارامترها، مقدار عرض سکوی فرسایش یافته بیشتر می شود. همچنین بیشترین تغییر شکل موج شکن شکل پذیر در اوایل طوفان و در طول برخورد چند صد موج اول به سازه، به وجود می آید.
- ۲- تابع تغییرات عرض سکوی فرسایش یافته بر حسب تعداد امواج برخوردی به صورت نمایی است.

جدول (۶) مقادیر شاخص های ارزیابی برای نتایج بدست آمده از فرمولها و روابط مختلف در برابر داده های آزمایشگاهی Andersen را نشان می دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می شود کلیه شاخص های ارزیابی برای نتایج بدست آمده توسط رابطه جدید مناسب تر از سایرین می باشد، بطوریکه درصد خطای نسبی برای نتایج رابطه جدید تقریباً ۱۴ درصد نسبت به نتایج فرمول Andersen که برای همین داده های آزمایشگاهی بدست آورده شده بهبود یافته است.

جدول ۶- مقادیر شاخص های ارزیابی برای نتایج بدست آمده از فرمولها در برابر داده های آزمایشگاهی Andersen

نام محقق	Hall & Kao	Torum	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 بی بعد شده موج شکن سکویی شکل پذیر در برابر داده های آزمایشگاهی Andersen را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود مقادیر بدست آمده از رابطه



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

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 Stability." 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.

۳- پارامتر بی‌بعد جدید ارائه شده $\sqrt{H_o^2 T_o}$ برای لحاظ کردن مناسب اثر توأم ارتفاع و پرپود موج در موج‌شکن توده‌سنگی شکل پذیر پیشنهاد می‌گردد، بطوریکه با بکارگیری این پارامتر جدید، ضریب همبستگی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی حاضر (۰/۹۴) و نتایج تحقیق Andersen (۰/۸۷) بدست می‌آید.

۴- رابطه مناسبی برای پیش‌بینی عرض سکوی فرسایش یافته از موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر به کمک رگرسیون چندگانه غیر خطی (رابطه 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 ۱۷-۰۳-۸۶ TMU 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 عبدالله 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

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 موج شکن های شکل پذیر." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده عمران.