

## مطالعه آزمایشگاهی تاثیر عرض اولیه سکو و قطر مشخصه سنگدانه های لایه آرمور در پایداری موج شکن های سکویی شکل پذیر

محمد رضا شکاری<sup>۱</sup>، مهدی شفیعی<sup>۲\*</sup>

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. در تحقیق حاضر، عرض فرسایش یافته این نوع از موج شکن ها تحت تاثیر پارامترهای مختلف امواج و سازه با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی دوبعدی در فلوم موج مورد بررسی قرار گرفته است. مجموعاً ۱۵۶ آزمایش در این تحقیق انجام شده است که امواج تابشی به مدل مقطع موج شکن از نوع امواج نامنظم با طیف انرژی JONSWAP بوده است. جهت بررسی تاثیر عرض اولیه سکو و قطر مشخصه سنگدانه ها بر میزان فرسایش، شرایط مختلف امواج از قبیل ارتفاع موج، پرپود 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<sup>1</sup>, M. Shafieefar<sup>2</sup>

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 been carried 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 مقاله shafiee@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

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 :

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta \cdot D_{n50}} \quad (1)$$

که در آن  $H_s$  ارتفاع عمده موج است و به وسیله میانگین یک سوم مرتفع ترین امواج یا  $\sqrt{4m_0}$  تعریف می شود، که  $m_0$  گشتاور مرتبه صفر طیف چگالی انرژی موج است.  $\Delta$  نیز چگالی شناوری نسبی قطعه آرمور است و با رابط  $\Delta = \rho_{ssd} / \rho_w$  بیان می شود که در آن  $\rho_{ssd}$  جرم مخصوص اشباع سنگ با سطح خشک و  $\rho_w$  جرم مخصوص آب است.  $D_{n50}$  نیز قطر اسمی سنگدانه ها است که به وسیله مقدار ۵۰ درصد در منحنی دانه بندی تعیین می شود.

از آنجاییکه عدد پایداری ذکر شده اثر پرپود 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 پرپود موج را به قطر اسمی مرتبط ساخته و یک متغیر ترکیبی ارتفاع-پرپود موج را نتیجه گرفت که توسط فرمول زیر تعیین می شود :

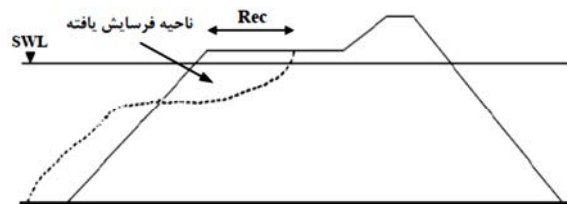
$$H_0 T_0 = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \times T_m \left( \frac{g}{D_{n50}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

که در آن  $T_0 = T_m (g / D_{n50})^{1/2}$  پارامتر بی بعد پرپود موج،  $T_m$  متوسط پرپود امواج و  $g$  شتاب ثقل می باشد. PIANC حدود و مقادیر دو پارامتر ذکر شده را برای انواع موج شکن های 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 تغییر شکل یافته، 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 می افتد.

موج شکن ها 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

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = \left[ \frac{(1+c_1)d - c_1 h_s}{h - h_b} f_\beta(\beta) \cdot f_N(N) \cdot f_{grading}(f_g) \times \right. \\ \left. f_{H_0}(H_0) - \frac{cot(\alpha_d) - 1.05}{2 \cdot D_{n50}} (h - h_b) \right] \quad (5)$$

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

$$f_\beta(\beta) = \cos(\beta) \quad (6)$$

$$f_N = \begin{cases} \left(\frac{N}{3000}\right)^{-0.046 H_0 + 0.3} & H_0 < 5 \\ \left(\frac{N}{3000}\right)^{0.07} & H_0 \geq 5 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_g = \begin{cases} 1 & f_g \leq 1.5 \\ 0.43 \cdot f_g + 0.355 & 1.5 < f_g < 2.5 \\ 1.43 & f_g > 2.5 \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{H_0} = \begin{cases} 19.8 \cdot \exp\left(-\frac{7.08}{H_0}\right) \cdot s_{om}^{-0.5} & T_0 \geq T_0^* \\ 0.05 \cdot H_0 T_0 + 10.5 & T_0 < T_0^* \end{cases} \quad (9)$$

$$T_0^* = \frac{19.8 \cdot \exp\left(-\frac{7.08}{H_0}\right) \cdot s_{om}^{-0.5} - 10.5}{0.05 \cdot H_0} \quad (10)$$

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  $\alpha_d$  زاویه شیب پایینی سکو می باشند. ارتفاع ترازپله ازسطح ایستابی نیز بصورت 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.

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = \begin{cases} (0.09(H_0 \sqrt{T_0})^{1.3} - 0.95) \left\{ 1.61 - \exp\left[-2.2 \frac{N}{3000}\right] \right\} \times \\ \left(\frac{h_b}{D_{50}}\right)^{-0.2} \left(\frac{d}{D_{50}}\right)^{0.56} & H_0 \sqrt{T_0} < 17 \\ (0.136 H_0 \sqrt{T_0} + 0.58) \left\{ 1.61 - \exp\left[-2.2 \frac{N}{3000}\right] \right\} \times \\ \left(\frac{h_b}{D_{50}}\right)^{-0.2} \left(\frac{d}{D_{50}}\right)^{0.56} & H_0 \sqrt{T_0} \geq 17 \end{cases} \quad (11)$$

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

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

$H_0 T_0$	$N_s = H_0$	نوع موج شکن
$< 20 - 40$	$< 1/5 - 2$	موج شکن سکویی غیر قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی
$40 - 70$	$1/5 - 2/7$	موج شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی
$> 70$	$> 2/7$	موج شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار دینامیکی

بنابراین تخمین عرض سکوی این نوع از موج شکن ها از اهمیت زیادی برخوردار است و طراحی باید به گونه ای صورت بگیرد که بعد از رسیدن به پروفیل پایدار از عرض سکوی موج شکن 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 نموده اند که می توان به تحقیقات Hall & Kao [۳]، Van der Meer و همکاران [۴]، Tørum و همکاران [۵]، Daskalov & Lissev [۶]، Sigurdson و همکاران [۷]، Andersen [۸] و مقیم [۹ و ۱۰]، 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 می کند، 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].

$$\frac{Rec}{D_{50}} = 0.000739(H_0 T_0)^2 + 0.0499(H_0 T_0) + 0.604 \quad (3)$$

$$\frac{Rec}{D_{50}} = 0.0000027(H_0 T_0)^3 + 0.000009(H_0 T_0)^2 + 0.11(H_0 T_0) - 0.8 \quad (4)$$

روابط فوق در محدوده  $H_0 T_0 > 20 - 30$  اعتبار دارد و با در نظر گرفتن عدد حدود 1.7 برای  $D_{85}/D_{15}$  ارائه شده است. Andersm (۲۰۰۶) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی رابطه نیمه تجربی زیر را ارائه نمود [۸]:

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 موردنظر برای لایه آرمور و فیلتر از سنگهای نوع رسوبی با جرم حجمی حدود  $2750$  کیلوگرم بر متر مکعب و برای هسته از ماسه شسته شده با جرم مخصوص حدود  $1800$  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 [5] استفاده شده است:

$$W_y = W_{50} \times \left( \frac{W_{85}}{W_{15}} \right)^{\left[ \frac{y-0.5}{0.7} \right]} \quad (12)$$

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 شکل ۴ 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 پررود امواج با لحاظ کردن محدودیت-های ناشی از فلوم موج ساز به گونه ای 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 می گیرد، به این منظور عدد رینولدز باید در محدوده  $1 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^4$  [5] قرار داشته باشد تا از اثرات نیروی لزجت صرف نظر شود. با توجه به آزمایشهای انجام شده، حداقل مقدار مذکور  $1.12 \times 10^4$  بدست آمده است که در محدوده مجاز توصیه شده قرار دارد.

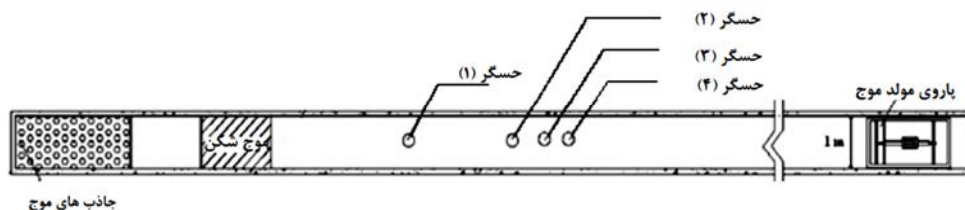
$$7.5 < H_0 \sqrt{T_0} < 22.5 \quad 0.88 < \frac{h_b}{D_{50}} < 4.4 \quad 11.5 < \frac{d}{D_{50}} < 17.2$$

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

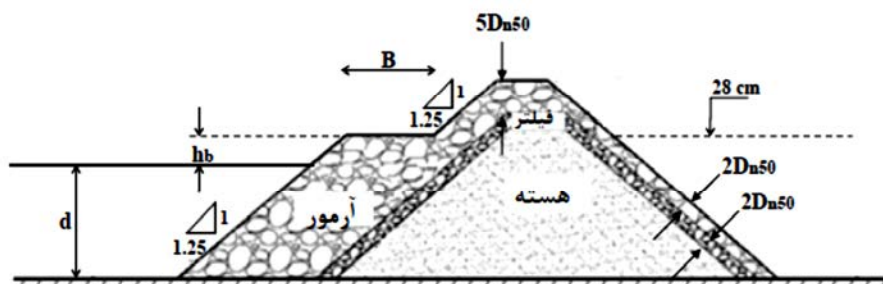
### ۲- شرح مدلسازی آزمایشگاهی مقطع

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 JONSWAP که ضریب  $\gamma$  در آن برابر با  $\frac{3}{3}$  است استفاده شده است. به منظور به حداقل رساندن بازتابش امواج به میزان کمتر از  $10\%$ ، در آزمایشات اولیه در انتهای کانال از یک جاذب توده سنگی با شیب  $1:9$  (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 [8] می باشد.

در تمامی 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 باشد. به منظور تهیه مصالح مورد نیاز برای ساخت مدل موج شکن، ابتدا محدوده دانه بندی مصالح لایه آرمور، لایه فیلتر و هسته بر اساس توصیه های موجود در CEM (2008) [10] مشخص گردیده و سپس برای



شکل ۲- شمایی از فلوام 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 سنگدانه ها	نماد	لایه آرمور ۱	لایه آرمور ۲	لایه آرمور ۳	لایه فیلتر	لایه هسته
قطر اسمی 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	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	۲۷۰۰	۲۷۵۰	۲۷۷۰	۲۸۰۰	۱۸۰۰

جدول ۴- محدوده تغییرات پارامترهای بی بعد

پارامتر	حدود تغییرات
$H_0$	۱/۵۷ تا ۳/۴۷
$T_0$	۱۹/۸ تا ۳۶/۹۹
$H_0 T_0$	۱۳/۳۹ تا ۳۳/۵۹
تیزی موج $S_{om}$	۰/۰۱ تا ۰/۰۷۵

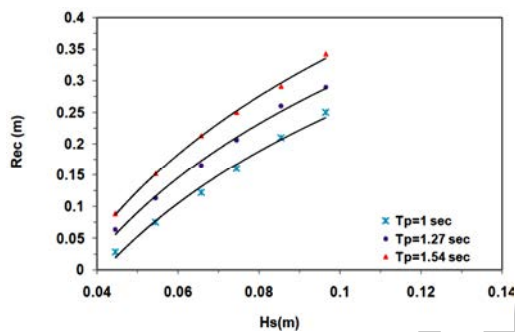
جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای محیطی (امواج) و سازه ای

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

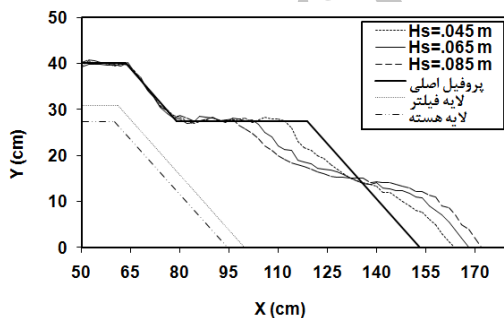
بر حسب عدد بدون بعد پایداری ( $H_0$ ) محاسبه شده بر اساس ارتفاع های متفاوت امواج و در پریودهای مختلف در شکل ۸ رسم شده است.

جدول ۵- آرایش آزمایشات انجام شده

پارامتر مورد مطالعه	تعداد آزمایشها
ارتفاع و پریود موج	۵۴
عرض اولیه سکو	۴۸
تعداد موج	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 ۱۷٪ متر، پریود اوجی موج ۱/۲۷ ثانیه و عرض سکو ۴۰ سانتی متر)

پراکندگی زیادی که بین داده های رسم شده وجود دارد اهمیت تاثیر پریود را در پایداری سازه نشان می دهد.

#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش ها

در این بخش به بررسی تاثیر هریک از پارامترهای امواج و سازه در پایداری و سپس معرفی رابطه ای 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 تغییر شکل سازه با دانه بندی های مختلف، آزمایشهای متعددی انجام شده است. نتایج نشان می دهد 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 دریای سازه بیشتر باشد توان موج با نسبت توان دوم ارتفاع موج افزایش می یابد. آنچه از شکل ۵ پیداست، در دانه بندی های 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 و انرژی موج برخوردی کاهش می یابد.

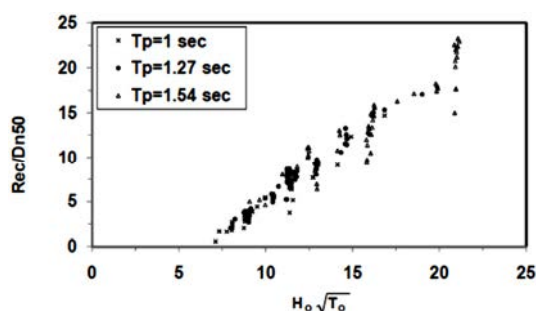
جهت بررسی تاثیر ارتفاع موج بر پروفیل تغییر شکل یافته و میزان فرسایش، شکل ۶ نشان داده شده است. مقایسه پروفیل ها نشان می دهد، با افزایش ارتفاع امواج میزان فرسایش و عرض فرسایش یافته سکو افزایش می یابد. جهت تخمین تاثیر پریود موج بر پایداری سازه، شکل ۷ نشان داده شده است. آنچه از نمودارهای ترسیم شده پیداست، با افزایش پریود موج در یک ارتفاع ثابت مقدار فرسایش و عرض فرسایش یافته سکو بیشتر می شود که 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

پارامتر بدون بعد دیگری که اخیرا توسط مقیم و همکارانش (۱۳۸۸) معرفی شده است، پارامتر  $(H_0 \sqrt{T_0})$  می باشد که اثر ارتفاع موج را یک مرتبه بیشتر از پریود موج لحاظ می کند.

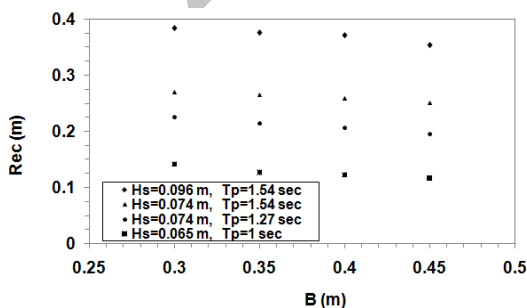
شکل ۱۰ اثر پارامتر  $H_0 \sqrt{T_0}$  بر عرض فرسایش یافته بدون بعد نشان می دهد. آنچه از شکل پیداست، پراکندگی داده ها با استفاده از این پارامتر بدون بعد به مراتب کمتر از سایر پارامترهای بدون بعد است. مقدار ضریب همبستگی نیز در این حالت برابر  $R^2=92\%$  می باشد.



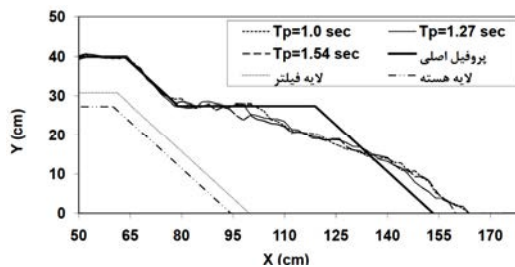
شکل ۱۰ - نمودار تغییرات عرض فرسایش یافته بدون بعد سکو بر حسب پارامتر  $H_0 \sqrt{T_0}$

#### ۴-۳- تاثیر عرض اولیه سکو بر پایداری

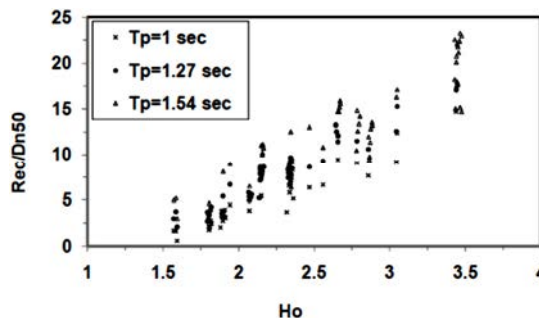
جهت بررسی تاثیر عرض اولیه سکو بر میزان فرسایش آزمایش های مختلفی انجام شده که نتایج آن در شکل ۱۱ برای چهار ترکیب موج و چهار عرض متفاوت سکو نشان داده شده است. جهت بررسی تاثیر عرض اولیه سکو بر پروفیل تغییر شکل یافته و میزان فرسایش، شکل ۱۲ نشان داده شده است.



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

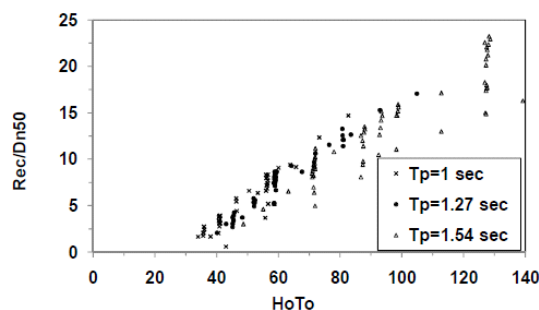


شکل ۷ - نیمرخ تغییر شکل یافته تحت اثر پریود امواج (قطر سنگدانه ها  $0.21$  متر و ارتفاع موج  $1.0/55$  سانتی-متر)



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 می گیرد، پارامتر  $(H_0 T_0)$  است [۸۵]. شکل ۹ اثر پارامتر  $H_0 T_0$  را بر عرض فرسایش یافته بدون بعد نشان می دهد. آنچه از این شکل پیداست پراکندگی داده ها 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  $H_0 T_0$  برای داده های آزمایشگاهی برابر  $R^2=88.5\%$  می باشد.



شکل ۹- نمودار تغییرات عرض فرسایش یافته بدون بعد سکو بر حسب پارامتر  $H_0 T_0$  .

$b$  تقریباً مقدار یکسانی را نشان می‌دهد، لذا مقدار این ضریب برای کلیه شرایط امواج ثابت بوده ولی مقداری پراکندگی ناشی از خطاهای آزمایشگاهی بخصوص اندازه‌گیری در مقادیر آن مشاهده می‌شود. برای لحاظ نمودن مقدار ثابت برای ضریب  $b$  از میانگین ضرایب بدست آمده استفاده نموده و مقداری در حدود  $0.19$  - برای آن در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۶- ضرایب  $a$  و  $b$  برای امواج مختلف

$a$	$b$	$H_0\sqrt{T_0}$
۳۹/۲۵	-۰/۱۸	۲۰/۹
۲۸/۶۱	-۰/۱۹	۱۶/۲
۲۰/۳۱	-۰/۲	۱۴/۶
۱۳/۴۵	-۰/۱۹	۱۱/۴

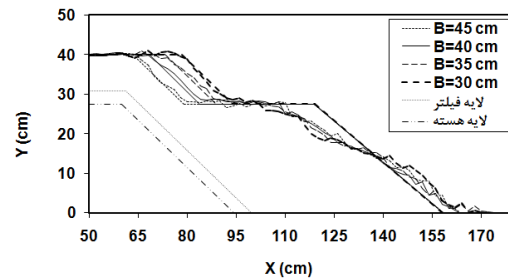
آنچه مشاهده می‌شود ضریب  $a$  وابسته به شرایط امواج برخوردی به سازه (ارتفاع و پرپود) است ولی برای ضریب  $b$  از میانگین ضرایب بدست آمده می‌توان استفاده نمود. بنابراین از رابطه زیر میتوان برای لحاظ نمودن اثر عرض سکوی بی بعد شده بر عرض سکوی فرسایش یافته بی بعد شده استفاده نمود:

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = a \left( \frac{B}{D_{n50}} \right)^{-0.19} \quad (14)$$

$$a = f(H_0\sqrt{T_0})$$

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

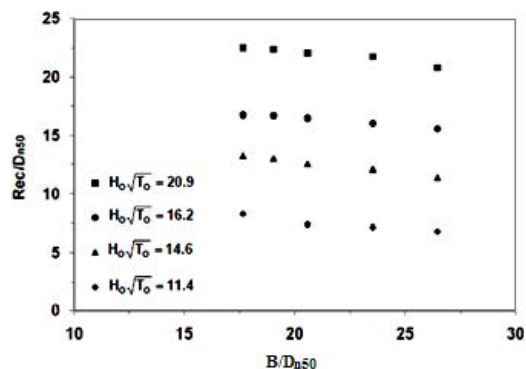
از دیگر پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر پایداری و میزان فرسایش موج شکن‌های سکویی شکل پذیر، تعداد امواج برخوردی به سازه می‌باشد. جهت بررسی این پارامتر مهم و تعیین مدت زمان مورد نیاز برای به تعادل رسیدن مقطع موج‌شکن، برای هر دانه‌بندی، ۱۸ آزمایش تحت شرایط مختلف ارتفاعی پرپودی انجام شده است که نتایج آن در 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 سکوی 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



شکل ۱۲- نمودار فرسایش بر حسب عرض اولیه سکوی برای ترکیبات مختلف ارتفاع و پرپود موج برای تعداد امواج برخوردی  $N=3000$ .

مقایسه پروفیل‌ها نشان می‌دهد، با افزایش عرض اولیه سکوی انرژی بیشتری از موج جذب شده و میزان فرسایش کاهش می‌یابد. شکل ۱۳ تاثیر 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 پرپود موج نشان می‌دهد. افزایش مقدار پارامتر  $B/D_{n50}$ ، کاهش  $Rec/D_{n50}$  را نشان می‌دهد. به منظور بررسی تاثیر عرض اولیه سکوی بر میزان فرسایش، فرم معادله توانی به شکل زیر توسط نرم افزار CurveExpert در نظر گرفته شد:

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = a \left( \frac{B}{D_{n50}} \right)^b \quad (13)$$



شکل ۱۳- تاثیر  $B/D_{n50}$  بر  $Rec/D_{n50}$

با استفاده از نرم افزار اخیر و مقادیر داده‌های آزمایشگاهی حاضر مطابق جدول ۶، مقادیر  $a$  و  $b$  برای شرایط مختلف موج بدست آمده‌اند. بدلیل آنکه روند تغییرات عرض فرسایش یافته سکوی در برابر تغییرات عرض سکوی روند مشابهی داشته و ضریب



حدود ۱/۷۲ و ۲/۱۹ در نظر گرفته می شود. همانطور که از شکل پیداست مقدار ضریب  $C$  تابعی از شرایط امواج (ترکیباترغاف و پریود) می باشد. بنابراین از رابطه زیر می توان جهت لحاظ نمودن اثر تعداد امواج بر عرض سکوی فرسایش یافته بی بعد شده استفاده نمود:

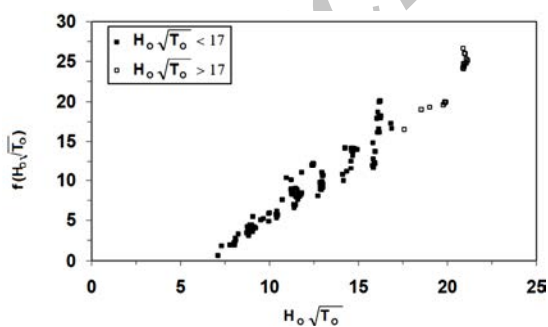
$$\begin{cases} \frac{Rec}{D_{n50}} = c \left[ 1.72 - \exp\left(-2.19 \times \frac{N}{3000}\right) \right] \\ c = f(H_0 \sqrt{T_0}) \end{cases} \quad (16)$$

#### ۴-۵- تخمین عرض فرسایش یافته سکو

برای بدست آوردن رابطه ای مناسب جهت تخمین عرض فرسایش یافته سکو بر حسب شرایط محیطی امواج و شرایط سازه ای موج شکن سکویی، از نتایج روابط (۱۴) و (۱۶) استفاده نموده و رابطه زیر را بصورت حاصلضرب توابع قسمت قبلی در نظر گرفته می شود:

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = f(H_0 \sqrt{T_0}) \left[ 1.72 - \exp\left(-2.19 \times \frac{N}{3000}\right) \right] \times \left(\frac{B}{D_{n50}}\right)^{-0.19} \quad (17)$$

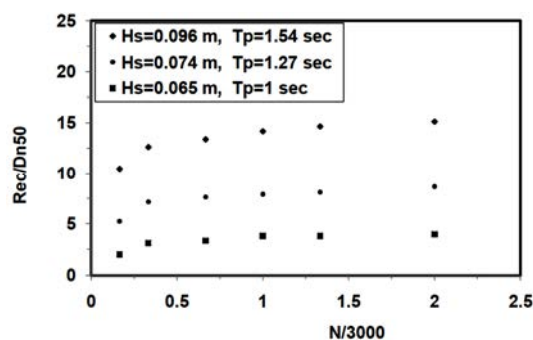
با بیان ضریب  $f(H_0 \sqrt{T_0})$  بر حسب ارتفاع و پریود امواج به صورت رابطه (۱۸)، عبارت سمت راست معادله بر حسب متغیر  $H_0 \sqrt{T_0}$  روی نمودار شکل ۱۶ نشان داده شده است.



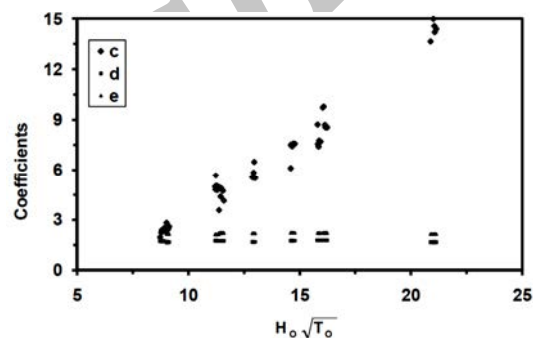
شکل ۱۶- مقادیر  $f(H_0 \sqrt{T_0})$  بر حسب پارامتر بی بعد  $H_0 \sqrt{T_0}$

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

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 ۰/۲۱ متر و ارتفاع موج ۹/۶۵ سانتی متر و پریود موجی ۱/۵۴ ثانیه)



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

این بدان مفهوم است که هیچگاه نمی توان مدعی شد که نرخ این تغییرات به صفر می رسد و دیگر فرسایشی در سازه اتفاق نمی افتد و ملاکی که برای پایان زمان به تعادل رسیدن در نظر گرفته شده است، رسیدن به ۹۰ درصد تغییر شکل می باشد. 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 می رسد.

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = c \left[ d - \exp\left(-e \times \frac{N}{3000}\right) \right] \quad (18)$$

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 تقریباً ثابت می باشد که می توان از میانگین ضرایب بدست آمده استفاده نمود. مقدار ضرایب بترتیب  $d$  و  $e$  بترتیب در

#### 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 داده‌های مقیم برای آن دسته از آزمایشهایی بوده که در محدوده دامنه شرایط آزمایشگاهی حاضر قرار گیرند. به منظور ارزیابی عملکرد رابطه تحقیق حاضر، از شاخص‌های 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، مقدار داده‌های آزمایشگاهی و N تعداد داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. جدول ۷ مقادیر شاخص‌های ارزیابی را برای نتایج بدست آمده از فرمولهای متفاوت محققین در برابر داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان می‌دهد. مقدار ضریب همبستگی ۰/۹۷، درصد خطای نسبی ۹/۲۱ و انحراف معیار ۰/۹۲ را برآیداده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نسبت به رابطه (۱۹) نشان می‌دهد.

جدول ۷- شاخص‌های ارزیابی نتایج فرمولهای محققین مختلف در برابر داده‌های آزمایشگاهی حاضر

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

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

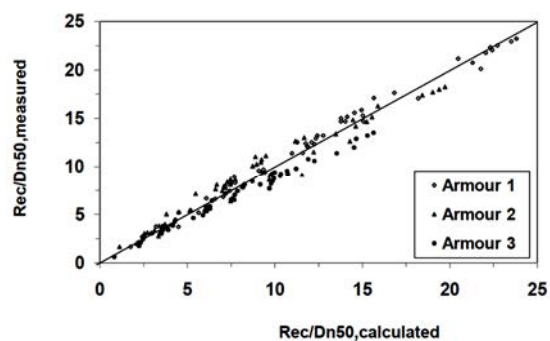
$$f(H_0\sqrt{T_0}) = \frac{Rec}{D_{n50}} = \frac{1.72 - \exp(-2.19 \times N/3000)}{D_{n50}} \left(\frac{B}{D_{n50}}\right)^{-0.19} \quad (18)$$

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

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

استفاده از این رابطه با محدودیت‌های زیر توأم می‌باشد:

$$\begin{cases} 7.1 < H_0\sqrt{T_0} < 21.2 \\ 500 < N < 6000 \\ 12 < B/D_{n50} < 26.5 \end{cases} \quad (20)$$



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

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

نتایج بدست آمده در این تحقیق به شرح زیر است:

۱- در اثر افزایش ارتفاع و پرپود 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 می‌یابد که دلیل آن پایداری بیشتر سازه با قطر سنگدانه‌های بیشتر است.

۲- مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد 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 می‌توان به پایداری بیشتر سازه نسبت داد.

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

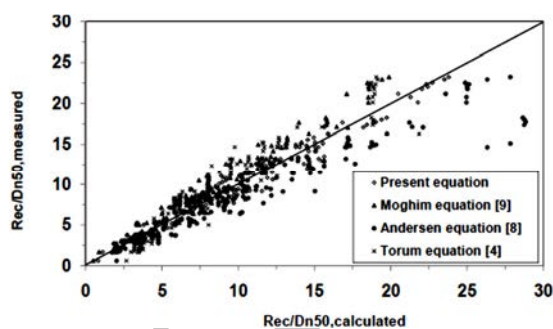
۴- تخمین مناسبی جهت پیش بینی میزان عرض فرسایش یافته موج شکن‌های سکویی شکل پذیر با استفاده از رگرسیون غیر خطی انجام شده است که از دقت قابل قبولی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی حاضر و حتی داده‌های مقیم برخوردار است. رابطه حاضر این امکان را به طراح می‌دهد تا بتواند در خصوص انتخاب عرض اولیه سکو و قطر دانه بندی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

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 می‌دهد. همانطور که از جدول مشاهده می‌شود نتایج شاخص های 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	۰/۹۲	۰/۷۸	۰/۶۲
$E$ (%)	۱۲/۱	۱۳/۵	۳۴/۳	۲۷/۷۲
$\sigma$	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 با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی دوبعدی در فلووم موج و پارامترهای سازه انجام شده است.

- 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 Persian)
- 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.