



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



ICOPMAS

## اثر عرض اولیه سکوی موج شکن های سکویی شکل پذیر بر نیمرخ تغییر شکل یافته و عرض فرسایش یافته سکو

محمد نوید مقیم      مهدی شفیعی فر      پیمان آق تومان      وحید چگینی  
دانشگاه تربیت مدرس      دانشگاه تربیت مدرس      مرکز تحقیقات حفاظت خاک و      مرکز ملی اقیانوس شناسی  
آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی

[vahid\\_chegini@yahoo.com](mailto:vahid_chegini@yahoo.com) [Peyman\\_7@yahoo.com](mailto:Peyman_7@yahoo.com) [shafiee@modares.ac.ir](mailto:shafiee@modares.ac.ir) [moghim@modares.ac.ir](mailto:moghim@modares.ac.ir)

### چکیده

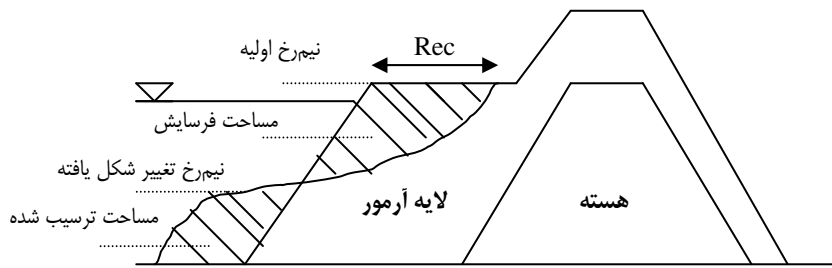
تخریب تعدادی از موج شکن های توده سنگی سنتی در سالهای اخیر منجر به بازنگری و ارزیابی دقیق تر فرآیند اندرکنش موج-سازه گردیده است و در این راستا ساخت سازه هایی که هماهنگ با طبیعت کار کنند، مدنظر قرار گرفته است. موج شکن های سکویی نوعی متداول از موج شکن های توده سنگی شکل پذیر می باشند که با مصالح سبکتر نسبت به موج شکن های سنتی، طراحی و اجرا می گردند. وجه جلوی این موج شکن ها دارای سکویی است که عموماً در بالای تراز سطح ایستایی قرار می گیرد. این موج شکن ها در برابر حمله موج طرح، اجازه تغییر شکل ندارند. جابجایی آرمورهای سنگی در نخستین مرحله عمر این سازه ها، امری طبیعی بوده و بنابراین پس از جابجایی سنگها و تشکیل نیمرخ، سازه تقریباً در حال تعادل استاتیکی و یا دینامیکی خواهد بود. در این تحقیق ابتدا چگونگی عملکرد موج شکن های سکویی شکل پذیر بر اساس مشاهده های آزمایشگاهی در فلوم موج بررسی شده است. سپس اثر عرض اولیه سکوی موج شکن بر نیمرخ تغییر شکل یافته جلویی سازه و همچنین مقدار عرض فرسایش یافته آن در اثر برخورد موج مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی این پدیده ها، تأثیر تغییرات مشخصات امواج از جمله ارتفاع موج و پرپود موج و همچنین پارامتر سازه ای عرض سکو مورد ارزیابی قرار گرفته اند. امواج تابیده شده به مدل مقطع موج شکن از نوع امواج نامنظم و طیف انرژی موج مورد استفاده، طیف موج JONSWAP می باشند. در مجموع بیش از ۳۰ آزمایش انجام شده است. نتایج نشان آن است که شکل نیمرخ تغییر شکل یافته آرمور به عرض اولیه سکوی موج شکن بستگی نداشته و با تغییر مشخصات موج برخوردی به سازه تغییر خواهد نمود.

**واژگان کلیدی:** موج شکن توده سنگی، سکویی، شکل پذیر، امواج نامنظم، عرض سکو و مدل آزمایشگاهی.

### ۱. مقدمه

موج شکن های شکل پذیر به دو صورت موج شکن های شکل پذیر با مقطع دوزنقه ای و دیگری نوع متداول موج شکن های سکویی شکل پذیر اجرا می شوند (شیریان، ۱۳۸۴). هر چند ایده موج شکن سکویی اساساً تا حدودی قدیمی است ولی در قدیم خیلی مورد استفاده قرار نمی گرفته است. در اوایل سال ۱۹۸۰ م. زمانی که نیاز به احداث یک لایه محافظ شیب برای توسعه باند فرودگاه به سمت دریا در جزیره آلاسکا مطرح شد، ساخت یک موج شکن با این ایده مطرح گردید. از آن زمان به بعد موج شکن های سکویی زیادی به خصوص در کشور ایسلند ساخته شده است (Andersen, 2006).

موج شکن سکویی نوعی از موج شکن های توده سنگی است، که با ایجاد یک سکوی بزرگ در تراز بالاتر از سطح ایستایی (SWL) در سمت دریا ساخته می شود (شکل ۱). در طول مدتی که امواج به موج شکن سکویی برخورد می کنند، موج شکن به نیمرخ تغییر شکل یافته S شکل، تغییر شکل می دهد. این موج شکن بجای اینکه از ابتدا به صورت نیمرخ تغییر شکل یافته ساخته شود، به صورت طبیعی با یک سکویی که به آن اجازه تغییر شکل داده می شود، ساخته می شود. از مزایای این موج شکن مجاز بودن تغییر شکل سازه در مواجهه با امواج طوفان طرح، عدم نیاز به مرمت پس از تغییر شکل، استفاده از مصالح ریزدانه تر با محدوده وسیع دانه بندی نسبت به سازه های پایدار ایستا با اوزان مصالح بیشتر و دانه بندی کم عرض و همچنین کم هزینه بودن ساخت سازه از لحاظ استحصال مصالح از قرضه و نیز عملیات اجرایی و ماشین آلات مورد نیاز می باشند (Sigurdarson et al, 1998).



شکل ۱: چگونگی تغییر شکل موج شکن سکویی

به دلیل تخلخل زیاد در سکوی موج شکن، سرعت پایین روی در این سازه بسیار کمتر از موج شکن های مرسوم بوده و در نتیجه این سازه بسیار پایدارتر می باشد. از طرف دیگر بخاطر جذب بالای انرژی امواج در اثر وجود سکوی نفوذپذیر و همچنین بدلیل شیره زدن امواج شکنا بر روی شیب، در اثر کاهش شیب نهایی نیمرخ سمت دریا، انرژی امواج بطور عمده ای مستهلک می گردند. بنابراین وزن سنگ ها به طور قابل ملاحظه ای، نسبت به حالت موج شکن مرسوم کاهش پیدا میکند. این موج شکن ها نه تنها به عنوان یک راه حل اقتصادی در جایی که سنگ های به اندازه کافی بزرگ در دسترس نیستند، مطرح می شوند، بلکه در زمان در دسترس بودن آنها نیز، به عنوان طرح اقتصادی تر مطرح می شوند (مقیم و همکاران، ۱۳۸۵).

موج شکن ها بر اساس عدد پایداری ( $H_o$ ) که به صورت زیر تعریف می شود، طبقه بندی می گردند:

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

که در آن  $H_{mo}$ : ارتفاع موج مشخصه بر اساس آنالیز فرکانسی،  $\Delta$ : چگالی شناوری نسبی قطعه آرمور ( $\Delta = \frac{\rho_a}{\rho} - 1$ )،  $\rho_a$ : جرم مخصوص سنگ،  $\rho$ : جرم مخصوص آب و  $D$ : قطر مشخصه سازه می باشند. بدلیل آنکه عدد پایداری ذکر شده در رابطه فوق اثر پیوند موج را در نظر نمی گیرد و با توجه به اینکه اثر پیوند در پایداری موج شکن های شکل پذیر (مقادیر بالای  $H_o$ ) مهم می باشد، بنابراین Van der Meer، پارامتری بعد شده  $H_o T_o$  را که اثر میانگین پیوند موج را نیز در نظر می گیرد، به صورت رابطه زیر تعریف نمود (Van der Meer, ۱۹۸۸):

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

جدول ۱ حدود و مقادیر دو شاخص فوق را برای سه دسته از موج شکن های سکویی نشان می دهد (PIANC, 2003).

جدول ۱: تقسیم بندی انواع موج شکن های سکویی برحسب عدد پایداری (PIANC, 2003)

$H_o T_o$	$N_s \equiv H_o$	نوع موج شکن
$< 20-40$	$< 1/5-2$	موج شکن سکویی غیر قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی ۱
$40-70$	$1/5-2/7$	موج شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی ۲
$> 70$	$> 2/7$	موج شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار دینامیکی ۳

با توجه به آنکه فرسایش شیب بالایی سکوی موج شکن که در ابتدا منجر به آسیب سازه و در ادامه می تواند منجر به تخریب آن گردد، در اثر فرسایش و پیشروی عرض سکوی موج شکن و رسیدن آن به شیب بالایی سکو می باشد، بنابراین بدست آوردن روش مناسب برای محاسبه پیشروی عرض سکو بسیار مهم است. کارهای متعددی توسط افراد گوناگون در این زمینه انجام گرفته است و روابطی نیز ارائه شده است.

<sup>1</sup> -Statically stable non reshaped berm breakwater

<sup>2</sup> -Statically stable reshaped berm breakwater

<sup>3</sup> -Dynamically stable berm breakwater

Hall & Kao 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 (Hall and Kao, 1991):

$$\frac{Rec}{D_{50}} = (-10.4 + 0.51.H_o^{2.5}) + 7.52\left(\frac{D_{85}}{D_{15}}\right) - 1.07\left(\frac{D_{85}}{D_{15}}\right)^2 + 6.12P_R \quad (3)$$

$D_{85}$  و  $D_{15}$ : برتیب قطری که ۱۵ و ۸۵ درصد سنگها، قطری کمتر از آن دارند و  $P_R$ : درصد سنگهای گرد گوشه در لایه آرمر است. Torum و همکاران در سال ۱۹۹۸ یک فرمول ساده برای محاسبه عرض فرسایش سکو، زمانی که موج به صورت عمود بر خط طولی موج شکن برخورد می کند، ارائه نمودند. بدین صورت که ابتدا منحنی درجه دوم و سپس در سال ۱۹۹۹ م. منحنی از درجه سوم از نقاط داده های موجود از سری آزمایشهای مختلف در یک آزمایشگاه و آزمایشگاههای مختلف برای موج شکن های سکویی همگن برآزش نمود (رابطه (۴)). قابل توجه اینکه پارامتر دانه بندی ( $f_g = \frac{D_{n85}}{D_{n15}}$ ) برای تمام این آزمایشها حدود ۱/۷ در نظر گرفته شد (Torum et al, 2003).

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

محدوده اعتبار فرمول فوق برای  $H_o T_o > 20 - 30$  است. در ادامه Menze و همکاران اثر دانه بندی سنگها و عمق آب را به فرمول قبلی اضافه نمودند. این فرمول به صورت زیر ارائه شد (Menze, 2000):

$$\frac{Rec}{D_{50}} = 0.0000027(H_o T_o)^3 + 0.000009(H_o T_o)^2 + 0.11(H_o T_o) - (9.9 f_g^2 + 23.9 f_g - 10.5) - f_d \quad (5)$$

$f_g$ : فاکتور دانه بندی و  $f_d$ : فاکتور عمق می باشد. فاکتور عمق برای دو حالت عمق بی بعد ( $\frac{d}{D_{n50}} = 12.5, 25$ ) تحلیل شده است و به عنوان یک تقریب اولیه از رابطه زیر بدست می آید:

$$f_d = -0.16\left(\frac{d}{D_{n50}}\right) + 4.0 \quad (6)$$

$d$ : عمق آب در پای موج شکن می باشد. محدوده اعتبار فرمول فوق برای بازه ( $1.3 < D_{n85}/D_{n15} < 1.8$ ) است. Andersen آزمایشات وسیعی به منظور بدست آوردن یک رابطه نیمه تجربی برای بدست آوردن عرض فرسایش یافته سکوی موج شکن توده سنگی سکویی همگن انجام داد. او در رابطه خود اثر پارامترهایی نظیر شرایط امواج، مدت طوفان (تعداد امواج برخوردی)، اثر دانه بندی لایه آرمر، فاصله تراز سکو از روی سطح ایستابی و عمق آب در پای سازه را بر عرض فرسایش یافته سکو در نظر گرفت. وی روابط زیر را برای محاسبه عرض فرسایش یافته سکو (Rec) پیشنهاد نمود (Andersen, 2006):

$$\frac{Rec}{D_{n,50}} = \frac{(1 + c_1).h - c_1.h_s}{h - h_B} \cdot f_N \cdot f_\beta \cdot f_{Ho} \cdot f_{grading} + \frac{\cot(\alpha_d) - 1.05}{2.D_{n,50}} \cdot (h_B - h) \quad (7)$$

$C_1$ : یک ضریب ثابت برابر ۱/۲،  $h$ : عمق آب در پای سازه،  $h_B$ : ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی،  $h_s$ : فاصله تراز سکو تا سطح ایستابی،  $\alpha_d$ : زاویه شیب پایینی سکو و سایر توابع به صورت زیر تعریف می شوند.

در رابطه فوق برای در نظر گرفتن اثر تعداد امواج برخوردی (مدت طوفان)، جهت موج برخوردی، دانه بندی لایه آرمر و عدد پایداری توابع بصورت زیر در نظر گرفته می شوند:

$$\begin{cases} f_N = (N/3000)^{-0.046.H_o+0.3} & \text{for } H_o < 5 \\ f_N = (N/3000)^{0.07} & \text{for } H_o \geq 5 \end{cases} \quad (8)$$

$$f_\beta = \cos(\beta) \quad (9)$$

$$\begin{cases} f_{grading} = 1 & \text{for } f_g \leq 1.5 \\ f_{grading} = 0.43.f_g + 0.355 & \text{for } 1.5 < f_g \leq 2.5 \\ f_{grading} = 1.43 & \text{for } f_g > 2.5 \end{cases} \quad (10)$$

9

$$\begin{cases} f_{Ho} = 19.8 \cdot \exp\left(-\frac{7.08}{H_o}\right) \cdot s_{om}^{-0.5} & \text{for } T_o \geq T_o^* \\ f_{Ho} = 0.05 \cdot H_o T_o + 10.5 & \text{for } T_o < T_o^* \end{cases} \quad (11)$$

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

Van der Meer نتیجه کارهای آزمایشگاهی خود را به صورت نرم افزاری به نام BREAKWAT برای تخمین نیمرخ تغییر شکل یافته ارائه نموده است (Van der Meer and Koster, 1988).

با توجه به آنکه نتایج بدست آمده از روابط پیشنهادی در این زمینه برای شرایط محیطی و سازه‌ای یکسان، نتایج متفاوتی نشان می‌دهند و همچنین اثر تمام پارامترها در آنها در نظر گرفته نشده‌اند، لزوم مطالعه آزمایشگاهی پایداری موج‌شکن‌های سکویی نوع ایرانی متشکل از سه لایه آرمور، فیلتر و هسته مطرح گردید. بدین منظور برای طراحی مقطع نهایی مدل آزمایشگاهی موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر به منظور انجام سری آزمایشهای مربوط به مطالعه پایداری هیدرولیکی این موج‌شکن‌ها، نیاز به یافتن عرض سکوی بهینه برای شرایط بحرانی مورد نظر در طرح آزمایشهای پایداری می‌باشد.

در این مقاله ضمن توضیح مختصر روش انجام آزمایشها، خلاصه‌ای از چگونگی عملکرد موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی ارائه می‌شود و در ادامه به تحلیل و نتیجه‌گیری حاصل از سری آزمایشهای مربوط به عرض سکوی موج‌شکن با دو هدف یکی بدست آوردن عرض سکوی بهینه برای شرایط محیطی و سازه‌ای بحرانی و دیگری چگونگی تأثیر عرض اولیه سازه بر شکل نیمرخ تغییر شکل یافته پرداخته می‌شود.

## ۲. نحوه مدلسازی آزمایشگاهی

در آزمایشهای مربوط به مدلسازی سازه‌های ساحلی نیروی غالب، نیروی وزن یا گرانش است. از اینرو معیار مناسب برای مدلسازی، معیار فرود است و نوع جریان نیز باید کاملاً آشفته در نظر گرفته شود تا بتوان از اثرات لزجت صرفنظر کرد. کنترل اثرات لزجت به وسیله کنترل معیار رینولدز ممکن می‌شود که براساس توصیه Van der Meer باید در محدوده رابطه زیر قرار گیرد (Van der Meer, 1988):

$$R_e = D_{n50} \sqrt{g H_s} / \nu > (1 \sim 4) \times 10^4 \quad (12)$$

$D_{n50}$ : قطر اسمی مصالح بوده که ۵۰ درصد از مصالح، قطری کمتر از آن را دارا می‌باشند. در این رابطه از مقادیر مورد استفاده در مدل استفاده می‌شود. برای ایجاد تشابه سینماتیکی و دینامیکی از نسبت عدد پایداری هادسون در پروتوتایپ و مدل استفاده شده، که نتیجه به صورت زیر بدست آمده است.

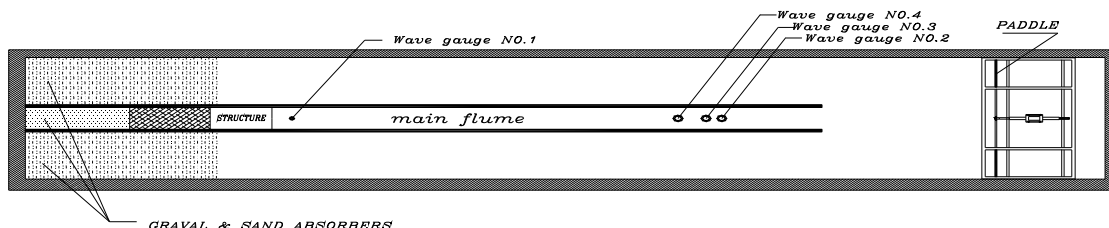
$$\frac{W_M}{W_P} = \frac{1}{\lambda^3} \times \frac{\rho_{am}}{\rho_{ap}} \times \frac{(\rho_{ssdp} / \rho_{wp} - 1)^3}{(\rho_{ssdm} / \rho_{wm} - 1)^3} \quad (13)$$

$\rho_{ssdp}$ : چگالی اشباع با سطح خشک واحد آرمور در نمونه واقعی،  $\rho_{ssdm}$ : چگالی اشباع با سطح خشک واحد آرمور در مدل،  $\rho_{wp}$ : چگالی آب در نمونه واقعی،  $\rho_{wm}$ : چگالی آب در مدل،  $\rho_{ap}$ : چگالی مصالح در نمونه واقعی و  $\rho_{am}$ : چگالی مصالح در مدل هستند. با رعایت این معیارها و قابل اغماض بودن اثرات مقیاس، مقیاس ۱:۵۰ ( $\lambda = 50$ ) برای آزمایشها انتخاب شده است.

آزمایشهای مدل بر روی مقطع موج شکن شکل‌پذیر، در فلوم موج مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی که دارای ۳۵ متر طول، ۵/۵ متر عرض (در سه قسمت) و ۱ متر ارتفاع می‌باشد، انجام شده است. امواج توسط پاروی مولد موج ساخت شرکت DHI به طول ۵/۵ متر و ارتفاع ۱ متر از نوع بیستونی قائم که در انتهای فلوم امواج قرار گرفته است به صورت نامنظم با طیف انرژی

JONSWAP تولید شده‌اند. برای انجام آزمایش‌ها از ۴ دستگاه ارتفاع سنج موج که در نقاط مختلف نصب می‌شدند، استفاده گردید. یک دستگاه ارتفاع سنج موج در جلوی سازه، برای اندازه‌گیری امواج تابشی ترکیب شده با امواج بازتابی و سه دستگاه ارتفاع سنج برای اندازه‌گیری مقدار بازتاب در وسط فلوم نصب شده‌اند. داده‌های برداشت شده از این حسگرها با استفاده از روش Mansard and Funke, (1980) و به وسیله نرم‌افزار (Wave synthesizer) Ws تحلیل شده و ضرایب بازتاب و ارتفاع موج تابشی در جلوی سازه محاسبه شده‌اند. حسگر شماره ۱ به صورت قائم در فاصله‌ای برابر یک چهارم طول موج ماکزیمم، در جلوی سازه و در وسط فلوم میانی نصب می‌گردید. شکل ۲ پلانی از فلوم موج و موقعیتهای حسگرهای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب را نشان می‌دهد.

در تمامی آزمایش‌ها بعد از اتمام هر آزمایش، نیم‌رخ تغییر شکل یافته توسط پوینت گیج قائم به صورت دستی در سه ردیف جداگانه خوانده می‌شد. یکی از ردیفهای خوانده شده، در قسمت میانی آن و دو تای دیگر در دو طرف کناری ردیف میانی با فاصله  $10D_{n50}$  نسبت به آن خوانده می‌شدند. میانگین سه نیم‌رخ خوانده شده به عنوان نیم‌رخ تغییر شکل یافته برای هر آزمایش در نظر گرفته شده است.

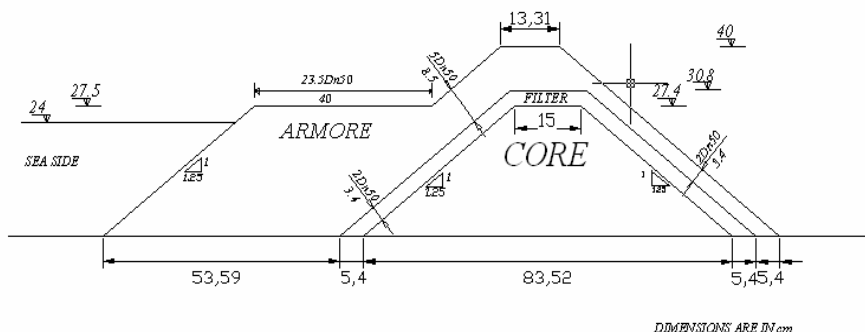


شکل ۲: پلانی از فلوم موج و موقعیتهای حسگرهای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب

نمونه‌ای از مقطع مدل موج‌شکن شامل هسته، لایه فیلتر و لایه آرمور در شکل ۳ نشان داده شده است. قطر اسمی سنگدانه‌های لایه آرمور بر اساس روابط پایداری دینامیکی برای شرایط موج طرح در نظر گرفته شده است. جدول ۲ مشخصات مصالح تشکیل دهنده موج‌شکن توده‌سنگی سکویی از جمله قطر اسمی، وزن، چگالی و عرض منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها برای سه لایه تشکیل دهنده مدل موج‌شکن سکویی موردنظر را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات مصالح سازنده موج‌شکن مورد مطالعه

هسته	لایه فیلتر	لایه آرمور	
۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۱۷	قطر اسمی سنگدانه‌ها (m)
	۰/۰۰۱۳	۰/۰۱۳	وزن مصالح (kg)
ماسه شسته شده	۱/۳۳	۱/۸۲	عرض منحنی دانه‌بندی
۱۷۰۰	۲۶۰۰	۲۶۰۰	چگالی مصالح ( $kg/m^3$ )



شکل ۳: مقطع مدل موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر

۳. دامنه تغییرات پارامترهای محیطی و سازه‌ای مورد نظر

در این تحقیق برای رسیدن به چگونگی اثر عرض سکوی موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر بر نیم‌رخ تغییر شکل یافته، پارامترهای متغیر محیطی شامل ارتفاع و پریود موج و پارامتر سازه‌ای عرض سکوی موج‌شکن مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است. پارامترهای متغیر طوری در نظر گرفته شده‌اند که اولاً بتوانند محدوده وسیعی از پارامترهای بی‌بعد معرفی شده را در برگیرند و ثانیاً بر اساس معیار کنترل رینولدز پیشنهادی توسط Van der Meer، خطای ناشی از اثر لزجت در آزمایشها در محدوده مجاز قرار گیرد. سایر پارامترهای ثابت محیطی و سازه‌ای موردنظر در این جدول نشان داده شده‌اند. در هر آزمایش برای رسیدن به نیم‌رخ تعادل تعداد امواج برخوردی برابر ۳۰۰۰ موج در نظر گرفته شدند (Van der Meer, 1988).

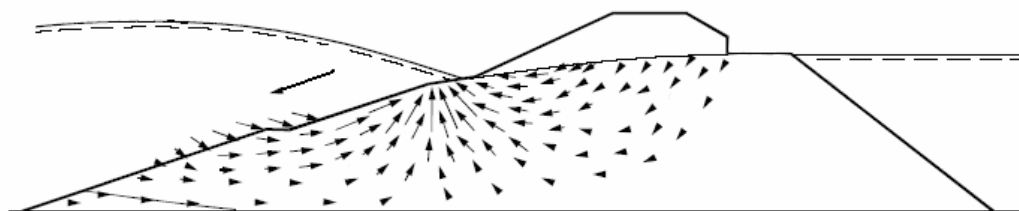
جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای موجود

پارامتر مورد نظر	نماد	دامنه تغییرات
عرض سکوی موج‌شکن	B	17, 20, 23 and 26Dn50
ارتفاع موج	Hs	۶/۸ تا ۱۰/۸ سانتیمتر
پریود اوجی موج	Tp	۱/۲۷۳، ۱/۶۲۶، ۱/۹۸ ثانیه
عمق آب پای سازه	d	14Dn50 و 16Dn50
ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی	hb	1Dn50 و 2Dn50
شیب جلوی سازه	cota	۱/۲۵

#### ۴. ارزیابی عملکرد موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر بر اساس مشاهددهای آزمایشگاهی

سازه موج‌شکن شکل‌پذیر را می‌توان به مثابه یک سازه توده‌سنگی توصیف نمود که معمولاً از محدوده وسیعی از اندازه‌های سنگ تشکیل شده است. این سازه در اثر برخورد امواج دچار تغییر شکل می‌گردد. دو فرآیند اصلی در شکل‌گیری نیم‌رخ نهایی سازه روی می‌دهد، ابتدا هندسه کلی سازه در مقابل بارهای هیدرودینامیکی وارده واکنش نشان داده، در نتیجه مصالح مرتب گردیده و در طول نیم‌رخ بصورتی توزیع می‌شوند که با تغییر سینماتیک میدان جریان بتوانند نیروی بوجود آمده را به حداقل ممکن برسانند. دوم اینکه در اثر واکنش نیم‌رخ در برابر برخورد امواج، سنگها به طور تصادفی حرکت نموده و در میان فضای خالی بین خود جای می‌گیرند، که این عمل منجر به تحکیم شدن، وزین شدن، افزایش پیوستگی سنگها و در نهایت افزایش مقاومت برشی توده‌سنگی در برابر حمله امواج می‌شود (Baird and Hall, 1984).

به‌منظور بررسی دقیق‌تر فرآیندهای ذکر گردیده بایستی به اندرکنش موج با سازه متخلخل توده‌سنگی اشاره نمود. تغییرات تراز آب بر روی دو جریان داخلی و خارجی سازه اثر می‌گذارند. در هر دو حالت ممتنم و یا اندازه حرکت در جهت افقی توسط اینرسی (شامل ممتنم جابجایی)، ثقل (شامل گرادیان فشار) و اصطکاک مطرح می‌گردد، که هر یک از این دو حالت با هم تفاوت‌هایی دارند. اصطکاک در جریان محیط متخلخل بسیار بزرگتر از اصطکاک در جریان خارجی می‌باشد، بنابراین جریان داخلی تحت اثر اصطکاک و ثقل و جریان خارجی تحت اثر ثقل و اینرسی می‌باشند. اصطکاک زیاد در جریان داخلی، سرعت جریان داخلی را بیشتر از سرعت خارجی محدود می‌کند. از آنجایی که حرکت سطح آب داخل محیط متخلخل بسیار محدودتر از حرکت سطح آب در خارج از آن می‌باشد، بنابراین اصطکاک منجر به محدود شدن سرعت بالا آمدن سطح آب در محیط داخلی در طول بالاروی و همچنین محدود شدن سرعت پایین‌آمدگی سطح تراز آب در محیط داخلی در طول پایین‌روی می‌گردد. بالا آمدن سطح آب داخل محیط متخلخل منجر به ایجاد فشار هیدرواستاتیک بالایی در حالت بیشترین پایین‌روی موج می‌گردد که در نتیجه قوی‌ترین جریان خروجی از موج‌شکن در ناحیه‌ای زیر سطح ایستابی بوجود می‌آید (شکل ۴).



الگوی جریان داخل سازه هنگام پایین روی موج روی سازه

شکل ۴: الگوی جریان داخل سازه هنگام پایین روی موج روی موج‌شکن توده‌سنگی

نکته مهم بر اساس مشاهد‌های آزمایشگاهی اینکه در تغییر شکل سازه‌های شکل‌پذیر، جابجایی سنگهای آرمور بر اثر بالاروی موج کم بوده و بیشترین جابجایی و تغییر شکل سازه مربوط به پایین‌روی امواج بر روی سازه می‌باشد. در اثر برخورد امواج در حال شکست بر روی سازه و همچنین ایجاد جریان بالارونده بر روی آن در حین بالاروی موج، چنانچه نیروهای محرک بوجود آمده بر قطعات آرمور به اندازه کافی زیاد باشند، قطعات سنگی یا به سمت بالای سازه غلتیده و یا در جای خود دچار لغزش می‌شوند و قفل شدگی آنها با قطعات مجاور کاهش می‌یابند. در لحظات بعدی چنانچه نیروهای محرک ایجاد شده بر ذرات سنگی شامل نیروی ناشی از جریان پایین‌رونده بر روی سازه، نیروی ثقل وارد بر دانه‌های آرمور و همچنین جریان خروجی از سازه به سمت بیرون بتوانند بر نیروهای مقاوم غلبه نمایند، سنگهای موجود در مسیر جریان پایین‌رونده و سنگهای لایه آرمور که در حین بالاروی در موقعیت پایدار بین سنگهای دیگر قرار نگرفته‌اند را با خود به سمت پایین سازه حرکت می‌دهند. از موارد فوق و نظر به مشاهد‌های آزمایشگاهی و همچنین با توجه به طبیعت نیروهای هیدرودینامیکی وارده یکسری خواص را می‌توان استنباط نمود، که این خواص باعث توسعه بیشتر کاربرد موج‌شکن‌های توده‌سنگی سکویی شکل‌پذیر می‌شود. خواص مورد نظر به صورت زیر مطرح می‌شوند.

- ۱- در موج‌شکن‌های شکل‌پذیر، شیبهای ملایم‌تر در نواحی که نیروهای هیدرودینامیکی مقدار بیشینه خود را دارا هستند بوجود می‌آیند، زیرا ملایم شدن شیب (تنظیم شیب)، بزرگی نیروها در این ناحیه را کاهش می‌دهد و در نتیجه پایداری، با استفاده از سنگهای کوچکتر بدست می‌آید. محل تأثیر این نیروها در محدوده تراز ایستایی تا کمترین تراز پایین‌آمدگی موج می‌باشد.
- ۲- زیر سطح آرام آب (ترازهای پایین سازه نزدیک کف)، تغییر و تنظیم نیم‌رخ حائز اهمیتی روی نمی‌دهد، که بیانگر آن سطحی است که نیروهای هیدرودینامیکی وارده به آن نسبتاً کوچک هستند و سنگهای با اندازه کوچکتر می‌توانند در این ناحیه استفاده شوند.
- ۳- بالای سطح ایستایی، نیروهای هیدرودینامیکی با افزایش ارتفاع سازه کاهش می‌یابند و بنابراین شیبهای تندتری را در این منطقه برای یک دانه‌بندی معین می‌توان در نظر گرفت. پس می‌توان نتیجه گرفت که یک موج‌شکن می‌تواند با استفاده از محدوده وسیعی از سنگها در لایه محافظ ساخته شود و بدلیل طبیعت پیچیده تداخل بین موج و سازه، شدت نیروهای وارده نسبت به موقعیت بر روی سازه تغییر می‌کند. ارزیابی عملکرد موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر در برابر تغییرات تدریجی ارتفاع امواج از ارتفاع کم به ارتفاع زیاد به صورت زیر قابل توصیف می‌باشد:
- ۱- وقتی ابتدا امواج با ارتفاع کم به سازه برخورد می‌کنند، تغییر خاصی در نیم‌رخ موج‌شکن ایجاد نمی‌شود و فقط حرکت کمی از سنگها مشاهده می‌شود که بیشتر بصورت حرکت درجای قطعات سنگی می‌باشد.
- ۲- با افزایش تدریجی ارتفاع امواج، فقط سنگهای خارجی در تراز افقی سکو بصورت محدودی می‌غلتند، زیرا سنگهایی که در ابتدا در موقعیت‌های ناپایدار قرار گرفته‌اند، در اثر حمله و در پی آن پایین‌روی امواج، به فاصله‌ای در پایین شیب می‌غلتند.
- ۳- با افزایش بیشتر ارتفاع امواج، سنگها حرکت شدیدی به سمت تراز پایین پیدا می‌کنند. از آنجایی که این سنگها از موقعیتشان به سمت بیرون غلتانده می‌شوند، بنابراین به دنبال یک مکان برای آشیانه کردن، متراکم شدن و در نتیجه بدست آوردن یک موقعیت پایدار در لایه خارجی آرمور پیش می‌روند.
- ۴- با افزایش ارتفاع امواج تا بیشترین مقدار آن، فرآیندی همانند فرآیند توضیح داده شده در مرحله قبل اتفاق افتاده و بتدریج حرکت سنگها به صورت حرکت درجا در می‌آید.
- ۵- در نهایت با کاهش تدریجی ارتفاع امواج، حرکت سنگها بسیار محدود می‌گردد. نکته قابل توجه اینکه زمانی که دوباره طوفان طرح به سازه برخورد می‌کند، سازه به سمت پایدارتر شدن پیش می‌رود و سنگها فقط مقدار کمی حرکت و جابجایی خواهند داشت.

## ۵. تجزیه و تحلیل داده‌ها

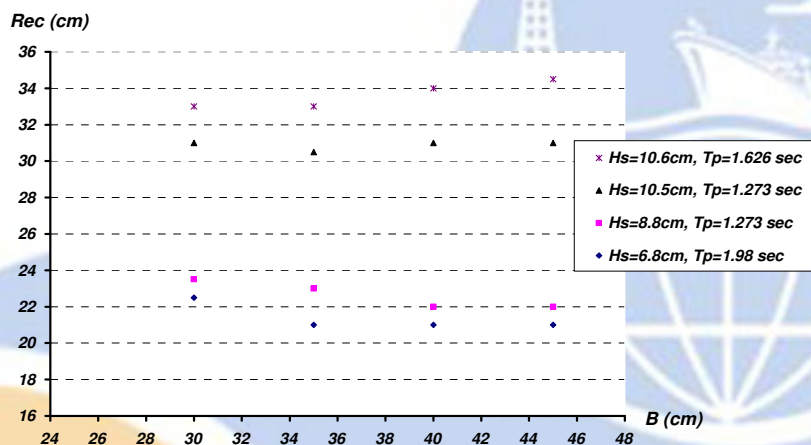
برای بررسی اثر عرض اولیه سکو در میزان فرسایش سکوی موج‌شکن و همچنین شکل نیم‌رخ تغییر شکل یافته، ۴ عرض سکوی متفاوت برای ترکیبهای متفاوت ارتفاع و پرپود موج در نظر گرفته شدند. در انتها برای بحرانی‌ترین حالت یعنی ماکزیمم عمق آب (15Dn50)، کمترین ارتفاع تراز سکو (1Dn50) و ماکزیمم ترکیب ارتفاع و پرپود موج ( $H_s = 10.4 \text{ cm}$  و  $T_p = 1.626 \text{ sec}$ ) آزمایش انجام گردید تا عرض بهینه یعنی کمترین عرض سکو بدون رسیدن عرض فرسایش یافته به شیب بالایی سکو بدست آید.

به‌منظور تعیین عرض سکوی مناسب موج‌شکن سکویی برای بحرانی‌ترین شرایط آزمایشگاهی مورد نظر، با استفاده از روابط موجود از جمله فرمول Hall, Torum, Andersen و نرم‌افزار BREAKWAT، مقادیر عرض فرسایش یافته، محاسبه گردیدند. مقادیر به‌دست آمده از چهار روش مورد نظر کاملاً با یکدیگر متفاوت بودند. با توجه به عدم کافی بودن اطلاعات در مورد پارامتر مذکور و پراکندگی نتایج بدست آمده،



از میان آنها مقدار عرض ماکزیمم به دست آمده انتخاب شد. در بررسی پایداری هیدرولیکی موج شکن های سکویی، پیشروی عرض سکوی موج شکن در اثر فرسایش نباید به شیب بالای سکوی سازه برسد و شیب بالایی سازه در شرایط عملکرد عادی مجاز به ریزش نمی باشد، بنابراین طبق توصیه تورام در بحرانی ترین شرایط محیطی و سازه ای بایستی حداقل طولی برابر  $2 D_{n50}$  از عرض سکوی باقی بماند. با توجه به مطالب ذکر گردیده به مقدار ماکزیمم محاسبه شده مقدار  $2 D_{n50}$  جمع گردیده و عرض اولیه 23Dn50 فرض می گردد.

در بررسی تأثیر مقدار عرض اولیه سکوی موج شکن سکویی بر نیمرخ تغییر شکل یافته، سطح فرسایش یافته و همچنین عرض فرسایش یافته سکو تحت اثر برخورد تعداد ۳۰۰۰ موج برای ترکیبهای متفاوت ارتفاع و پرپود موج، آزمایش های مربوطه انجام گردید. شکل ۵ مقدار عرض فرسایش یافته (Rec) بر حسب عرض اولیه سکو (B)، برای ترکیبهای مختلف ارتفاع و پرپود موج نشان می دهد. همانطور که در این نمودار دیده می شود، برای آن دسته از ترکیبهای ارتفاع و پرپود موج (در قسمت پایینی نمودار) که میزان عرض سکوی موج شکن به اندازه کافی بزرگ بوده بطوریکه برای کمترین عرض اولیه سکوی موجود، عرض فرسایش یافته به شیب بالایی سکوی موج شکن نرسد، با افزایش عرض سکوی موج شکن مقدار عرض سکوی فرسایش یافته روند کاهشی خواهد داشت. دلیل این امر اینست که با افزایش عرض سکوی موج شکن حجم مصالح و در نتیجه حجم محیط متخلخل در برابر موج برخوردی بیشتر گردیده و در نتیجه موج تابشی با یک توده و سطح متخلخل بزرگتر از مصالح دانه ای برخورد می کند و بدینوسیله با کاهش میدان سرعت در داخل موج شکن، نیروی عمل کننده بر روی هر یک از سنگها هم در حالت بالاروی و هم پایین روی کاهش یافته و در نتیجه عرض فرسایش یافته سکو برای عرض سکوهایی بزرگتر نسبت به عرض کمتر کاهش خواهد یافت.

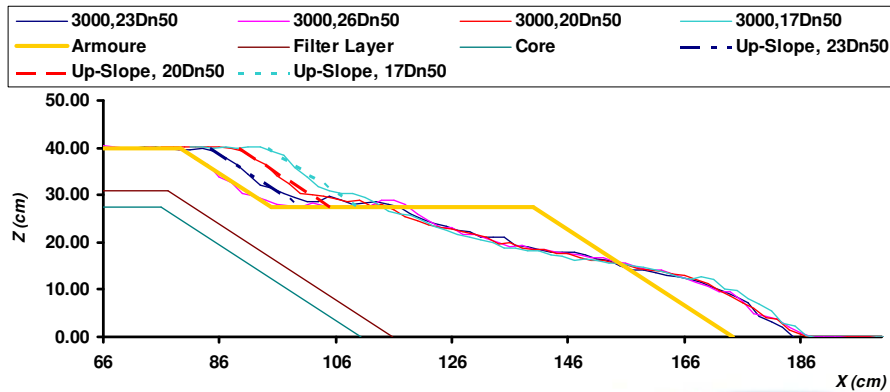


شکل ۵: نمودار Rec بر حسب عرض سکو (B) برای ترکیبهای مختلف ارتفاع و پرپود

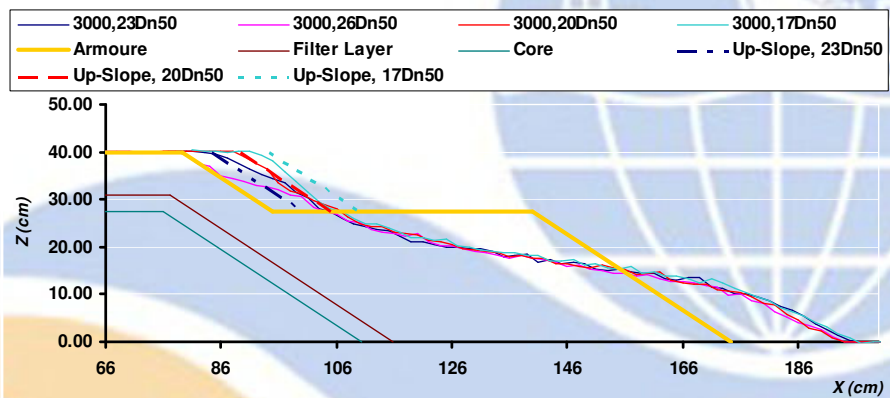
از طرف دیگر همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، دسته ای از ترکیبهای ارتفاع و پرپود موج در قسمت فوقانی نمودار روندی متفاوت نسبت به دسته قبلی نشان می دهند، یعنی در این دسته با افزایش عرض سکوی موج شکن، مقدار عرض فرسایش یافته سکو افزایش می یابد. این دسته مربوط به شرایطی هستند که میزان عرض سکوی موج شکن برای ترکیب ارتفاع و پرپود موج مورد نظر، به اندازه کافی بزرگ نبوده بطوریکه در حالت کمترین عرض سکوی موجود به منظور بدست آوردن طول حوضچه کافی روی سازه موج شکن تغییر شکل یافته برای استهلاک انرژی موج برخوردی، عرض فرسایش یافته به شیب بالایی سکوی موج شکن می رسد. با رسیدن عرض فرسایش یافته به شیب بالای سکوی موج شکن و فرسایش قسمت پایینی از این شیب سازه در این قسمت تندتر گردیده و با تندتر شدن شیب این قسمت از سازه، بالاروی موج روی آن برای امواج با ارتفاع و پرپود بالا، افزایش یافته تا حدی که منجر به پاشش (اسپلش) موج از روی سازه می گردد. به طور کلی سرریزی موج از روی سازه حتی از نوع پاششی موجب استهلاک مقداری از انرژی موج برخوردی گردیده و در نتیجه عرض فرسایش یافته سکو برای عرض های کمتر نسبت به عرض بیشتر کاهش خواهد یافت. لازم به ذکر است که برای ترکیب موج (Hs = 10.5 cm و Tp = 1.273 sec)، تفاوت بین حداقل و حداکثر عرض فرسایش کمتر از ترکیب موج (Hs = 10.6 cm و Tp = 1.626 sec) می باشد، که دلیل این امر مربوط به افزایش میزان سرریزی موج در اثر افزایش پرپود موج می باشد.

با توجه به آنکه ماکزیمم اختلاف نسبی برای عرض های فرسایش یافته سکو در بیشترین و کمترین عرض سکوی موج شکن در هر ترکیب ارتفاع و پرپود موج نسبت به کل عرض سکو حدود ۶ درصد و برای مساحت قسمت فرسایش یافته در حدود ۸ درصد می باشد، بنابراین می توان اثر عرض اولیه سکو بر تغییر شکل سازه را نادیده گرفت. شکل ۶ و ۷ این مطلب را به خوبی نشان می دهند. در این شکلها نیمرخ تغییر شکل یافته لایه آرمور برای چهار عرض متفاوت سکوی موج شکن سکویی که هر یک از حالت های عرض سکو توسط شیب بالایی سکوی موج شکن

مشخص شده‌اند، رسم گردیده‌اند. مشاهده می‌شود که شکل نیم‌رخ تغییر شکل یافته آرمور نیز به عرض اولیه سکوی موج‌شکن بستگی نداشته و با تغییر مشخصات موج برخوردی به سازه تغییر خواهد نمود.

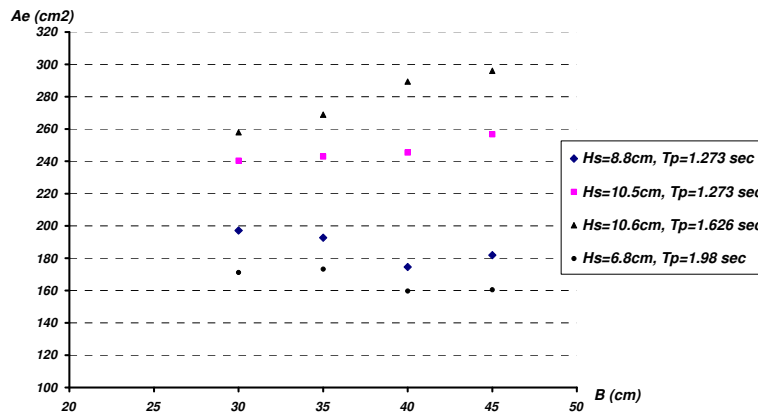


شکل ۶: مقایسه نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر ۳۰۰۰ موج برای عرض‌های متفاوت سکوی موج‌شکن ( $T_p=1.273$  sec و  $H_s=8.7$  cm)



شکل ۷: مقایسه نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر ۳۰۰۰ موج برای عرض‌های متفاوت سکوی موج‌شکن ( $T_p=1.626$  sec و  $H_s=10.5$  cm)

شکل ۸ نیز مقدار مساحت فرسایش یافته ( $A_e$ ) برحسب  $B$  را برای ترکیب‌های مختلف ارتفاع و پریود موج نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییر سطح فرسایش یافته بی‌بعد شده نیز همانند عرض فرسایش یافته بی‌بعد شده می‌باشد. در نهایت با توجه به اینکه در بحث پایداری موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر شرط پایداری و عدم آسیب آنها، عدم رسیدن نیم‌رخ تغییر شکل یافته در شیب پایینی به شیب بالایی موج‌شکن می‌باشد، می‌توان بیان نمود که عرض بهینه برای موج‌شکن سکویی، عرضی است که موج‌شکن دارای کمترین حجم ممکنه باشد، به شرط آنکه برای موج غالب، نیم‌رخ تغییر شکل یافته در شیب پایینی به شیب بالایی موج‌شکن نرسیده و به اندازه  $2Dn50$  از لبه انتهایی آن فاصله داشته باشد.



شکل ۷: نمودار  $A_e$  بر حسب  $B$  برای ترکیبهای مختلف ارتفاع و پرپود

آزمایشهای تکمیلی در این سری آزمایشها به منظور بدست آوردن عرض سکوی بهینه برای حالت بحرانی شرایط محیطی و سازه‌ای انجام گردیدند. خلاصه‌ای از این آزمایشها در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به آزمایشهای انجام شده در این قسمت هدف بدست آوردن عرضی از سکوی موج شکن می‌باشد که تحت حالت بحرانی یعنی بیشترین عمق آب موردنظر و همچنین بیشترین اثر ترکیبی ارتفاع و پرپود موج، عرض سکوی فرسایش یافته تا شیب بالایی حداقل  $2Dn50$  فاصله داشته باشد. بر اساس آزمایشهای انجام گرفته، عرض اولیه بهینه سکوی موج شکن برابر با ۴۰ سانتیمتر معادل  $23.5Dn50$  مناسب تشخیص داده شد.

جدول ۴: آزمایشهای مربوط به تعیین عرض بهینه سکوی برای حالت‌های بحرانی

عرض باقیمانده سکوی	عمق آب (d)	عرض سکوی (B)	پرپود موج (Tp)	ارتفاع موج (Hs)
$1.5Dn50$	14Dn50	20Dn50	۱/۹۸	۹/۹
تخریب	16Dn50	20Dn50	۱/۶۲۶	۱۰/۳
$3Dn50$	16Dn50	23Dn50	۱/۶۲۶	۱۰/۵

## ۶. جمع بندی و نتیجه گیری

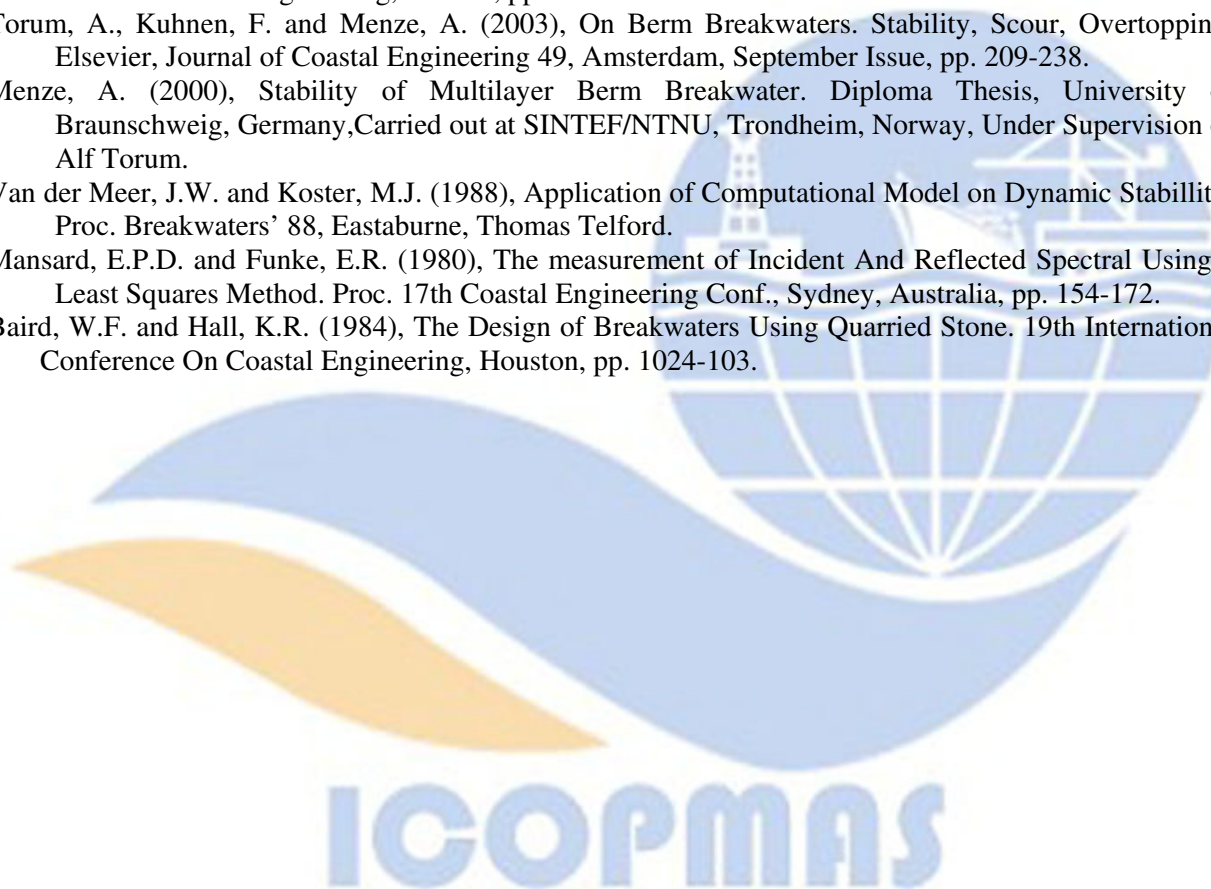
تحقیق آزمایشگاهی حاضر به منظور بررسی اثر عرض اولیه سکوی موج شکن‌های سکویی شکل پذیر بر نیمرخ تغییر شکل یافته و عرض فرسایش یافته سکو تحت شرایط مختلف امواج نامنظم با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی دو بعدی در فلوم موج، انجام گرفته است. نتایج این بررسی‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- از مشاهده‌های آزمایشگاهی نتیجه می‌شود که بیشترین جابجایی و تغییر شکل سازه بدلیل وجود نیروهای محرکی از جمله جریان برگشتی موج روی سازه، خروج جریان قوی از داخل سازه به سمت بیرون و همچنین نیروی وزن ذرات سنگی در حین پایین روی موج روی سازه مربوط به فاز پایین روی امواج می‌باشد.
- شکل نیمرخ تغییر شکل یافته آرمور و عرض فرسایش یافته سکوی موج شکن در اثر حمله موج برخوردی، به عرض اولیه سکوی موج شکن بستگی نداشته و شکل این نیمرخ با تغییر مشخصات موج برخوردی به سازه تغییر خواهد نمود.
- عرض بهینه برای موج شکن سکویی، عرضی است که موج شکن دارای کمترین حجم ممکنه باشد، به شرط آنکه برای موج غالب طرح، نیمرخ تغییر شکل یافته در شیب پایینی به شیب بالایی موج شکن نرسیده و حداقل به اندازه  $2Dn50$  از لبه انتهایی آن فاصله داشته باشد.

## ۷. تقدیر و تشکر

بدینوسیله از اداره کل مهندسی سواحل سازمان بنادر و کشتیرانی به‌خاطر حمایت مالی از این تحقیق و همچنین از مسؤولین محترم مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی برای فراهم آوردن امکان انجام این تحقیق در فلوم موج آن مرکز و به‌خصوص آقایان رحمت‌اله خلیلی، منصور پشوتنی و عبدالله عبدالهی برای همکاریهای شبانه‌روزی در آزمایشگاه و انجام آزمایشهای مدل آزمایشگاهی تقدیر و تشکر می‌شود.

- شیریان، ناصر. (۱۳۸۴) مطالعه آزمایشگاهی واکنشهای هیدرولیکی و پایداری موج شکن های شکل پذیر. پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- 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..
- Sigurdarson, S., Juhl, J., Sloth, P., Smarason, O.B. and Viggosson, G. (1998), Advances in Berm Breakwaters. Coastlines, Structures and Breakwaters Conference, London.
- مقیّم، محمد نوید، شفیعی فر، مهدی و آق تومان، پیمان. (۱۳۸۵) مروری بر پایداری و واکنشهای هیدرولیکی موج شکن های سکویی شکل پذیر. هفتمین همایش بین المللی مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، تهران.
- 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.
- PIANC MarCom WG 40. (2003), State of the art of the design and construction of berm breakwaters. PIANC, Brussels.
- 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.
- Torum, 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.
- Menze, A. (2000), Stability of Multilayer Berm Breakwater. Diploma Thesis, University of Braunschweig, Germany, Carried out at SINTEF/NTNU, Trondheim, Norway, Under Supervision of Alf Torum.
- Van der Meer, J.W. and Koster, M.J. (1988), Application of Computational Model on Dynamic Stability. Proc. Breakwaters' 88, Eastaburne, Thomas Telford.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R. (1980), The measurement of Incident And Reflected Spectral Using a Least Squares Method. Proc. 17th Coastal Engineering Conf., Sydney, Australia, pp. 154-172.
- Baird, W.F. and Hall, K.R. (1984), The Design of Breakwaters Using Quarried Stone. 19th International Conference On Coastal Engineering, Houston, pp. 1024-103.



## **The Effect of the Primary Width of Formable Platform Breakwaters on Deformed Profile and Eroded Width of Platform**

### **Abstract**

Destruction of a number of traditional rock mass breakwaters during the recent years led to a revision and more precise consideration of wave-interaction structure. The outcome was a decision to construct structures which are compatible to nature. Platform breakwaters are common types of formable rock mass breakwaters which are possible to be designed and constructed with lesser materials than conventional breakwaters. In the front part of these breakwaters, there is a platform which is commonly fixed upper than water static level. This research initially studies on the operation of formable platform breakwaters based on laboratory observations in wave flume. Then the primary effect of the platform on the profile changes in the front part of structure as well as the extent of eroded width of platform as a result of wave blows are considered. For the purpose of studying these events, the impact of alteration of wave specifications including wave height/period as well as platform width are estimated. The wave irradiated to breakwater surface is of irregular waves and the energy spectrum which has been used is of JONSWAP wave spectrum. In sum, over 30 tests are being conducted. Results indicate that the shape of altered profile of armor does not depend on initial width of breakwater platform and it likely to change with an alteration in the specification of blowing wave.

**Keywords:** *rock mass breakwater, platform, formable, irregular waves, platform width and experimental model.*