

بررسی تأثیر قطر اسمی سنگ در پایداری موج شکن های سکویی

مهدی شفیعی فر^{۱*}، علی مطلبی^۲

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵

shafiee@modares.ac.ir

چکیده- موج شکن های سکویی جزو موج شکن های شکل پذیر هستند که بر اثر برخورد امواج دچار تغییر شکل شده و در نهایت شکلی پایدار به خود می گیرند. معیار کنترل کننده پایداری این سازه ها عرض فرسایش یافته سکوی موج شکن است. اگر میزان فرسایش بیشتر از عرض اولیه سکو باشد، موج شکن دچار ناپایداری و تخریب خواهد شد. قطر اسمی سنگ دانه نیز یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر میزان فرسایش است. در این مقاله به منظور بررسی میزان اثرگذاری این پارامتر و نیز مقایسه تأثیر این پارامتر با سایر عوامل مؤثر، آزمایش هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. پژوهش حاضر با استفاده از امواج نامنظم و طیف *JONSWAP* و دوره تناوب $1/33$ تا $1/44$ ثانیه انجام شده است. برای اجرای لایه آرمور از سنگ هایی با محدوده دانه بندی $f_g = \frac{D_{85}}{D_{15}} = 1.82$ استفاده شده است. در این پژوهش سعی شده به تأثیر قطر اسمی سنگ دانه در مقایسه با سایر عوامل مؤثر، پرداخته شود. در مجموع ۱۲۰ آزمایش در شرایط مختلف سازه ای و محیطی انجام شد که نتایج نشان می دهد که در میان عوامل مؤثر بر فرسایش سکو، عمق آب اثر بیشتری در مقایسه با قطر اسمی سنگ داشته و عرض سکو نیز همان تأثیر قطر اسمی سنگ را دارد. از سوی دیگر با کاهش قطر اسمی سنگ دانه و در ازای آن افزایش عرض سکو یا کاهش عمق آب، همان درصد فرسایش از سازه انتظار می رود.

کلیدواژگان: موج شکن سکویی، قطر اسمی سنگدانه، مطالعه آزمایشگاهی، عرض فرسایش یافته سکو.

۱- مقدمه

موج شکن سازه ای است که با مقاومت کردن در برابر نیروهای هیدرولیکی ناشی از امواج، محیطی ایمن و آرام را به منظور پهلوگیری و باراندازی کشتی ها فراهم می سازد.

عملکرد موج شکن توده سنگی در برابر امواج بدین صورت است که قسمت اصلی انرژی امواج توسط شکست امواج بر روی شیب از بین می رود و مقدار باقیمانده نیز از طریق عبور جریان از محیط متخلخل

$$N_s^{**} = \frac{H_k}{C_k \Delta D_{n50}} \left(\frac{S_{mo}}{S_{mk}} \right)^{-1/5} (\cos \beta_o)^{2/5} \quad (4)$$

در این روابط:

H_s : ارتفاع موج مشخصه ($H_{1/3}$)

H_k : ارتفاع موج متناظر با $1/50$ برابر متوسط بلندترین امواج.

C_k : برای مناطق عمیق با توزیع رایلی برابر است با ۱.۵۵

D_{n50} : قطر اسمی سنگ‌دانه $(W_{50}/\rho_s)^{1/3}$

L_o : طول موج در آب عمیق بر اساس پریود متوسط امواج

S_{mo} : تیزی موج در آب عمیق

S_{mk} : مشخصه‌ای از تیزی موج که 0.03 در نظر گرفته می‌شود.

β_o : زاویه تابش امواج نسبت به موج‌شکن

ρ_w : چگالی آب

ρ_s : چگالی سنگ‌دانه

T_m : پریود متوسط امواج

Δ : پارامتری است که برابر است با $(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)$

پارامتر H_o که با رابطه (۱) داده می‌شود، پارامتری بی‌بعد به نام عدد پایداری است و برای توصیف پایداری موج‌شکن‌های توده سنگی به کار رفته و ارتفاع موج را با قطر اسمی سنگ‌دانه مرتبط می‌سازد.

در رابطه (۱) اثر دوره تناوب منظور نشده است، به همین دلیل پژوهشگران متعددی اثر دوره تناوب امواج را در نظر گرفته و روابط (۲) تا (۴) را برای توصیف معیار نیم‌رخ تغییر شکل یافته معرفی کرده‌اند (USACE, 2006). مقیم و همکاران (۱۳۸۸) نیز با مطالعه موج‌شکن‌های سکویی سه‌لایه، پارامتر بی‌بعد $H_o \sqrt{T_o}$ را برای توصیف تغییر شکل در موج‌شکن‌های شکل‌پذیر معرفی کرده‌اند.

برحسب اعداد بی‌بعد معرفی شده، Van der Meer (1988) و PIANC (2003) طبقه‌بندی‌هایی برای موج‌شکن‌ها انجام داده‌اند که طبقه بندی PIANC در جدول ۱ ارائه شده است.

موج‌شکن یا سرریزی و انعکاس امواج، مستهلک می‌شود. موج‌شکن‌های سنتی مقاطع دوزنقه‌ای داشته و در طراحی آن‌ها از رابطه Hudson (1958) یا Van der Meer (1988) استفاده می‌شود. این موج‌شکن‌ها اجازه تغییر شکل نداشته و سطح آسیب در آنها برابر صفر یا بسیار اندک است، به همین دلیل در ساخت آنها از سنگ‌هایی با ابعاد بزرگ یا از آرمورهای بتنی استفاده می‌شود.

پس از ظهور تفکر شکل‌پذیری در طراحی موج‌شکن‌ها، این سازه‌ها با ابعاد بزرگ‌تر و سنگ‌های کوچک‌تر و با دامنه قطر گسترده‌تری نسبت به انواع سنتی و به شکل دوزنقه‌ای طراحی شدند. اما با گذشت زمان قسمت فوقانی مقطع که بار زیادی به آن وارد نمی‌شد از نیم‌رخ حذف شد و یک سکو در سمت دریا به وجود آمد. این موجب اقتصادی شدن ساخت موج‌شکن‌های شکل‌پذیر شد و سبک جدیدی از موج‌شکن‌ها به نام سکویی به‌وجود آمد. در طول مدتی که امواج به این نوع از موج‌شکن‌ها برخورد می‌کند، موج‌شکن به صورت نیم‌رخ K تغییر شکل می‌دهد.

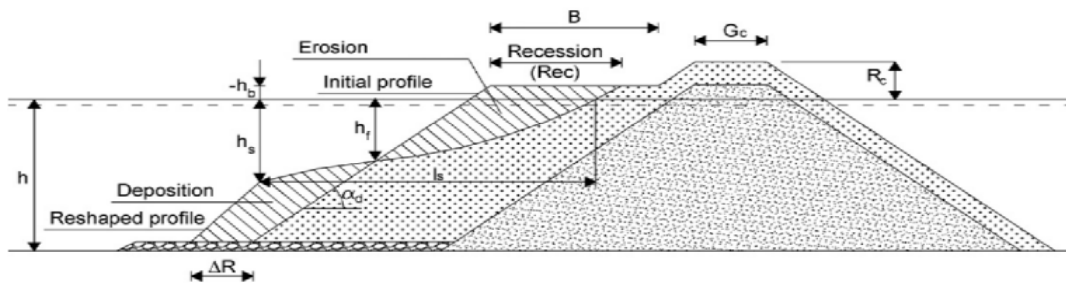
در شکل ۱ نمونه‌ای از موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر نشان داده شده است. این نوع از سازه‌ها در کنار پایداری بالایی که دارند از نظر ساخت ساده‌تر و ارزان‌تر بوده و تقریباً از کل مواد خروجی معادن در ساخت آنها استفاده می‌شود (Sigurdarson et al., 2001).

پارامترهای مختلفی برای توصیف پایداری موج‌شکن‌ها وجود دارد که برخی از این پارامترها در روابط (۱) تا (۴) معرفی می‌شوند (USACE, 2006).

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

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

$$N_s^* = \frac{(H_s^2 L_o)^{1/3}}{\Delta D_{n50}} \quad (3)$$



شکل ۱ نمایی از موج شکن سکویی

جدول ۱ طبقه‌بندی (2003) PIANC برای موج شکن‌ها

نوع موج شکن			
<3.4-5.4	<۲۰-۴۰	<۱/۵-۲	موج شکن سکویی غیر قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی
5.4-7.8	۴۰-۷۰	۱/۵-۲/۷	موج شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار استاتیکی
>7.8	> ۷۰	>۲/۷	موج شکن سکویی قابل تغییر شکل پایدار دینامیکی

تا $4D_{n50}$ باقی بماند و امواج به شیب بالایی سازه آسیب وارد نکنند (Tørum et al., 2003). با توجه به اهمیت سکو در این نوع موج شکن‌ها، محاسبه عرض مناسب و عوامل مؤثر بر آن اهمیت بالایی دارد، لذا پژوهشگران متعددی در زمینه عرض فرسایش یافته سکو و پارامترهای مؤثر بر آن تحقیق کرده‌اند، مانند Van der Meer and Veldman. (1992)، Lamberti and Tomasicchio (1997) و Van Gent (1996) و Lykke Andersen and Burcharth (2009).

بر طبق پژوهش‌ها، عرض فرسایش یافته سکو در این نوع موج شکن‌ها تابعی از پارامترها شامل: عمق آب در پای سازه (d)، ارتفاع سکو از تراز ایستایی آب (h_b)، تعداد امواج برخوردی (N)، دوره تناوب امواج (T)، توزیع دانه‌بندی ($\frac{D_{n85}}{D_{n15}}$)، جرم مخصوص سنگ (ρ_s)، جرم مخصوص آب (ρ_w)، لزجت سیال (ν)، شتاب ثقل (g)،

در موج شکن‌ها از متغیرهای متعددی برای توصیف رفتار سازه استفاده می‌شود. در این رابطه سازه‌های پایدار ایستا، با معیار آسیب بررسی می‌شوند. این معیار ممکن است مقدار سنگ جابه‌جا شده یا جابه‌جایی دیواره تاج باشد. این در حالی است که در سازه‌های پایدار دینامیکی، از معیارهایی مانند نیم‌رخ تغییر شکل یافته، عمق فرسایش یافته (h_f)، طول پنجه تغییر یافته (ΔR) یا عرض فرسایش یافته سکو (R_{ec}) برای توصیف رفتار سازه استفاده می‌شود. در این رابطه، پارامتر عرض فرسایش یافته مهمترین پارامتر برای توصیف پایداری سازه به‌شمار می‌رود، به طوری که اگر میزان فرسایش پدید آمده در سازه بزرگتر از عرض موجود باشد، تخریب در سازه اتفاق می‌افتد. بنابراین تخمین عرض فرسایش سکوی این نوع موج شکن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار بوده و طراحی باید به گونه‌ای صورت گیرد که پس از رسیدن به نیم‌رخ پایدار از عرض سکوی موج شکن به میزان $2D_{n50}$

به منظور تعیین قطر اسمی سنگ‌دانه از توصیه‌های موج‌شکن‌های سکویی دربارهٔ عدد پایداری H_0 استفاده شده و با فرض کردن $H_0 = 3.5$ و در نظر گرفتن $\rho_a = 2.35 \text{ gr/cm}^3$ و همچنین حداکثر ارتفاع موج برابر $d_{H_s} = 10 \text{ cm}$ مقدار قطر اسمی سنگ برابر $2/1 \text{ cm}$ برآورد شده است. در ادامه به منظور مشاهده اثر کاهشی و افزایشی قطر اسمی مصالح و تأثیر ناشی از آن، دو قطر اسمی $1/5 \text{ cm}$ و $2/5 \text{ cm}$ نیز مطالعه شده است.

در تعیین حدود دانه‌بندی به شرایط معادن کشور توجه شده و با توجه به مواد خروجی از معادن کشور - که اغلب در محدوده عریض قرار دارند - پارامتر f_g برای لایه آرمور برابر $1/82$ در نظر گرفته شده است. در اینجا $f_g = \left(\frac{D_{85}}{D_{15}}\right)$ پارامتر عرض دانه‌بندی یا حدود دانه‌بندی سنگ معادن است و D_{85} و D_{15} به ترتیب نشان‌دهندهٔ قطرهای متناظر با 85% و 15% منحنی دانه‌بندی سنگ‌ها است. هرچه محدودهٔ دانه‌بندی سنگ‌های مورد استفاده عریض‌تر باشد، استفاده از خروجی‌های یک معدن بیشتر شده و نتایج به حالت بهینه نزدیک‌تر خواهد بود. سنگ‌ها بر اساس f_g به سه دسته تقسیم می‌شوند:

$$1- \text{ دانه‌بندی کم عرض } f_g < 1.5$$

$$2- \text{ دانه‌بندی عریض } 1.5 \leq f_g \leq 2.5$$

$$3- \text{ دانه‌بندی بسیار عریض } f_g > 2.5$$

شیب سازه (α) ، زاویهٔ برخورد امواج با سازه (ψ) ، ارتفاع مشخصهٔ موج (H_s) و عرض اولیهٔ سکو (B) است. Hall and Kao. (1991) به بررسی اثر سنگ‌های گردگوشه در میزان فرسایش سکو در این نوع از سازه‌ها پرداخته و رابطهٔ (۵) را برای تخمین عرض فرسایش یافته در سکوی موج‌شکن پیشنهاد کرده‌اند که در آن P_r درصد سنگ‌های گردگوشه بوده و D_{n85} و D_{n15} به ترتیب مقادیر است که ۱۵ و ۸۵ درصد سنگ‌ها، قطری کمتر از آن دارند.

Tørum et al. (2003) با مطالعهٔ آزمایشگاهی موج‌شکن‌های سکویی همگن، عمق آب و ضریب دانه‌بندی را در تغییرشکل سازه مؤثر دانسته و رابطهٔ (۶) را براساس پارامتر بی‌بعد $H_0 T_0$ ارائه کرده است. در این رابطه $f_g = \frac{D_{n85}}{D_{n15}}$ توصیف‌کنندهٔ اثر دانه‌بندی سنگ و $f_d = -0.16 \left(\frac{d}{D_{n50}}\right) + 4$ توصیف‌کنندهٔ اثر عمق آب است.

مقیم و همکاران (۱۳۸۸) با مطالعهٔ موج‌شکن‌های سکویی سه‌لایه، تراز قرارگیری سکو، عمق آب و تعداد امواج تابشی به سازه را در میزان فرسایش عرض سکوی موج‌شکن مؤثر دانسته‌اند. آنها رابطه (۷) را برای محاسبهٔ عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن پیشنهاد کردند.

۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی

در مدل‌سازی‌ها سعی بر آن است که شرایط مدل، نزدیک به شرایط واقعی سازه باشد، لذا باید در انتخاب پارامترهای سازه‌ای و محیطی دقت خاصی در نظر گرفته شود.

$$\frac{R_{ec}}{D_{n50}} = (-10.4 + 0.5H_0^{2.5}) + 7.52 \left(\frac{D_{85}}{D_{15}}\right) - 1.07 \left(\frac{D_{85}}{D_{15}}\right)^2 + 6.12P_r \quad (5)$$

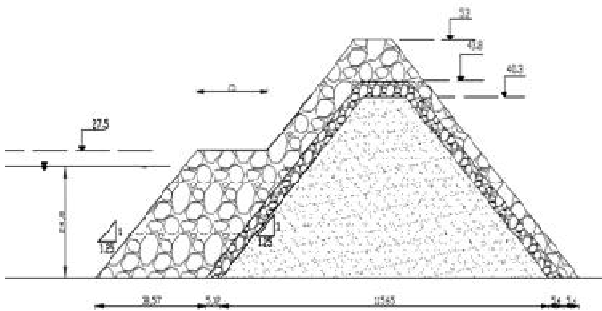
$$\frac{R_{ec}}{D_{n50}} = 0.0000027(H_0 T_0)^3 + 0.000009(H_0 T_0)^2 + 0.11(H_0 T_0) - 9.9f_g^2 + 23.9f_g - 10.5 - f_d \quad (6)$$

$$\frac{R_{ec}}{D_{n50}} = (0.095(H_0 \sqrt{T_0})^{1.3} - 1.15) \times \left\{ 1.61 - \exp \left[-2.2 \left(\frac{N}{3000} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{h_b}{D_{n50}} \right)^{-0.2} \times \left(\frac{d}{D_{n50}} \right)^{0.56} \quad H_0 \sqrt{T_0} < 17 \quad (7)$$

$$\frac{R_{ec}}{D_{n50}} = (0.135 \times (H_0 \sqrt{T_0}) + 0.59) \times \left\{ 1.61 - \exp \left[-2.2 \left(\frac{N}{3000} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{h_b}{D_{n50}} \right)^{-0.2} \times \left(\frac{d}{D_{n50}} \right)^{0.56} \quad H_0 \sqrt{T_0} \geq 17$$

جدول ۲ نیز محدوده تغییر پارامترهای محیطی و سازه‌ای ارائه شده است.

در مجموع ۱۲۰ آزمایش برای مقدار سه قطر اسمی انجام شد که برای هر قطر تعداد ۴۰ آزمایش برای شرایط مختلف سازه‌ای انجام شده است. این شرایط شامل سه عرض سکو، سه عمق آب و سه تراز سکو است.



شکل ۲ مقطع مدل‌سازی شده در آزمایشگاه

جدول ۲ حدود تغییر پارامترهای محیطی و سازه‌ای

متغیرهای سازه‌ای	حدود تغییرات
عرض سکو	۲۰، ۲۵، ۳۰ cm
ارتفاع امواج	۵/۷ تا ۹/۱ cm
عمق آب	۲۰، ۲۴، ۲۸ cm
فاصله سکو از سطح آب	۰، ۴/۳، ۷/۸ cm
قطر اسمی سنگ‌دانه	۱/۷، ۲/۱، ۲/۵ cm
وزن مخصوص آرمور	۲/۳۵ gr/cm ³
دوره تناوب امواج	۱/۲۶ تا ۱/۳۷ ثانیه
شیب وجه جلویی	۱/۲۵

فلوم مورد استفاده در آزمایشگاه طول ۱۶m و عرض و ارتفاع برابر یک متر دارد. سیستم موج‌ساز از نوع پیستونی بوده و توانایی تولید امواج منظم و نامنظم با طیف‌های مختلف را دارد. در آزمایش‌ها از طیف *JONSWAP* که

ضخامت لایه آرمور در وجه جلویی سازه و در قسمت بالای تراز سکو برابر $5D_{n50}$ در نظر گرفته شده است. در انتخاب مصالح لایه فیلتر و هسته به توصیه‌های *CEM* (USACE, 2006) توجه شده و در نتیجه لایه فیلتر با مصالحی با قطر اسمی $\frac{1}{10}$ قطر اسمی مصالح لایه آرمور ساخته شده و به منظور جلوگیری از خروج مصالح فیلتر به آرمور، پارامتر f_g برای این لایه به میزان $1/33$ در نظر گرفته شده است. همچنین ضخامت این لایه بر طبق توصیه‌ها برابر $2D_{n50}$ هم در وجه جلویی و هم در وجه پشتی سازه فرض شده است. لایه هسته نیز با استفاده از ماسه شسته شده با قطر اسمی $3mm$ و وزن مخصوص برابر 1700 کیلوگرم بر متر مکعب احداث شده است.

مدل‌سازی بر اساس عدد فرود انجام شده و به منظور کاهش اثر لزجت، عدد رینولدز در محدوده $1 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^4$ (Van der Meer, 1988) در نظر گرفته شده است.

عرض اولیه سکو با استفاده از رابطه‌های (۵) تا (۷) محاسبه و در نتیجه عرض $25cm$ برای سکو مناسب تشخیص داده شد. به منظور محاسبه ارتفاع تاج موج‌شکن از سطح ایستابی آب و در نتیجه محاسبه ارتفاع سازه، از رابطه‌ای که در De Waal et al. (1992) برای محاسبه سطح بالاروی آب برای موج‌شکن‌های سکویی پیشنهاد شده، استفاده شد. با استفاده از این رابطه بالاروی برابر $25cm$ برآورد می‌شود. با توجه به حداکثر عمق آب در پای سازه برابر $28cm$ و در شرایطی که در سازه هیچ‌گونه روگذری اتفاق نیفتد، ارتفاع موج‌شکن برابر $53cm$ به دست آمده است. همچنین در مدل ساخته شده عرض تاج برابر $13cm$ در نظر گرفته شده و شیب سازه نیز برابر $1:1/25$ فرض شده که این شیب تقریباً برابر با شیب قرارگیری مصالح در حالت طبیعی است. در شکل ۲ مقطع مدل‌سازی شده در آزمایشگاه نشان داده شده است. در

۳- نتایج آزمایشگاهی

در این بخش به تحلیل نتایج آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. در این آزمایش‌ها ابتدا باید تعداد امواج مورد نیاز برای تاباندن به سازه مشخص شود. سپس، از این تعداد امواج برای بررسی تغییر شکل نهایی سازه استفاده می‌شود.

۳-۱- تأثیر قطر اسمی سنگ‌دانه در زمان به

تبادل رسیدن مقطع

برای تعیین مدت زمان مورد نیاز برای به تعادل رسیدن مقطع موج‌شکن، برای هر سری از دانه‌بندی‌های موجود، پنج آزمایش در شرایط مختلف ارتفاع- تناوب انجام شده است. مشاهده شد که با افزایش تعداد امواج برخورد کننده به سازه، عرض فرسایش یافته زیاد می‌شود؛ اما با گذشت زمان از سرعت آن کاسته و در نهایت به یک تعادل نسبی می‌رسد که در آن نرخ تغییر بسیار کم است. با توجه به این که هیچگاه نمی‌توان مدعی شد که نرخ تغییر به صفر رسیده و تغییری در سازه اتفاق نمی‌افتد، ملاکی که در آن برای تعیین زمان به تعادل رسیدن در نظر گرفته شده، رسیدن به ۹۰ درصد تغییر شکل است. به این منظور سازه را تحت تابش امواجی با اختلاف گام‌های ۱۰۰۰ عدد قرار داده و پس از هر تابش، نیم‌رخ تغییر شکل یافته را ثبت کرده و این عمل تا زمانی که دو نیم‌رخ و دو عرض فرسایش یافته متوالی اختلاف ناچیزی داشته باشند ادامه می‌یابد. سپس با توجه به تغییر شکل و عرض فرسایش یافته نهایی تعداد امواجی که سبب ۹۰٪ فرسایش نهایی می‌شوند محاسبه می‌شود. شکل ۳ تأثیر تعداد امواج را بر درصد فرسایش سکو برای سه مقدار قطر اسمی نشان می‌دهد. در این شکل D_0 قطر اولیه سنگ‌دانه است که برابر $2/1\text{cm}$ برآورد شده بود و N و $\%$ به ترتیب بیانگر تعداد امواج تابیده شده به مقطع و درصد عرض فرسایش

ضریب γ در آن برابر $3/3$ است استفاده شده است. به‌منظور رساندن بازتابش امواج به کمتر از ۱۰٪، در آزمایش‌های اولیه در انتهای کانال از جاذب غیر فعال با شیب ۱:۹ (۱ قائم و ۹ افقی) متشکل از مصالح سنگی در دو لایه استفاده شده است.

در تحقیق حاضر با انجام تعدادی آزمایش‌های اولیه و اصلاح طیف، سری زمانی حرکت پارو برای ایجاد طیف‌های مورد نظر (بر اساس طیف *JONSWAP* و T_p و H_s مورد نظر) به‌دست آمد. با اعمال این سری‌های زمانی حرکت پارو، طیف‌های مورد نظر ایجاد می‌شد.

در طول فلوم آزمایش از شش ارتفاع‌سنج نوع مقاومتی استفاده شده که می‌توانند تغییر ارتفاع سطح آب را با فرکانس ۱۰ هرتز و دقت یک میلی‌متر ثبت کنند. این سنسورها توسط کابل به قسمت پردازشگر متصل بوده و با راه‌اندازی نرم‌افزار به‌طور پیوسته تغییر سطح آب را در محل هر سنسور در صفحه نمایش نشان می‌دهند. قبل از اجرای آزمایش‌ها حسگرها کالیبره می‌شود تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود.

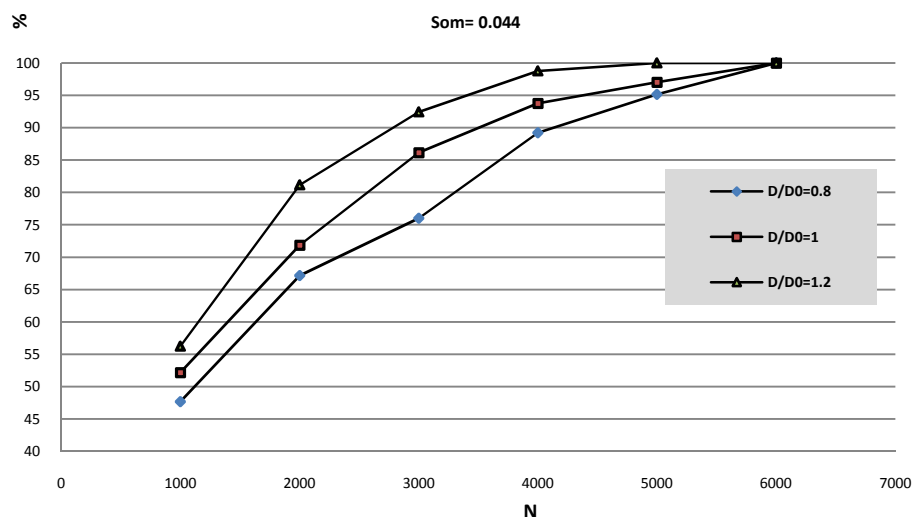
برای ثبت و برداشت نیم‌رخ سازه قبل و بعد از تابش امواج از ترازسنج در بالای فلوم استفاده شده است. برداشت نیم‌رخ در سه مقطع انجام شده که یکی از مقاطع در وسط و دو مقطع دیگر در دو سمت آن به فاصله 20cm از مقطع میانی قرار دارند. مقاطع کناری فاصله‌ای در حدود 30cm از دیوار فلوم دارند که این فاصله برای کاهش اثر دیوار فلوم در آزمایش‌ها قرار داده شده است. برداشت نیم‌رخ در هر مقطع در فواصل 2cm انجام شده تا بتوان حداکثر تغییر شکل و جابه‌جایی سنگ‌دانه‌ها را به‌خوبی برداشت کرد. در انتها نیم‌رخ تغییرشکل یافته از میانگین‌گیری این سه مقطع به‌دست می‌آید.

شکل ۴ نیز تأثیر شدت امواج را بر تغییر شکل سازه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش ارتفاع یا دوره تناوب امواج، درصد تغییر شکل پدید آمده روندی افزایشی می‌یابد و مقطع در مدت زمان کمتری به تعادل می‌رسد. بنابراین شدت توفان نیز یکی از عوامل تأثیرگذار بر تشکیل نیم‌رخ پایداری به‌شمار می‌رود.

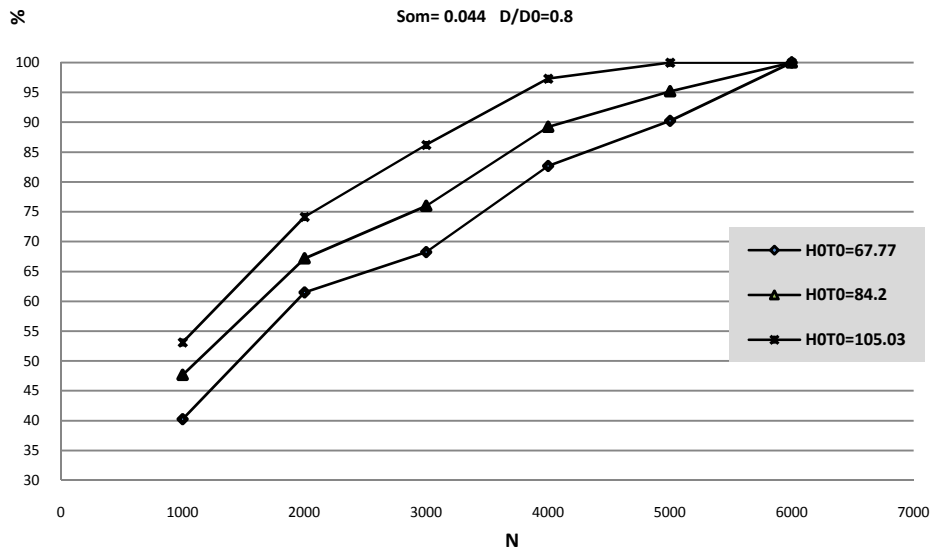
۳-۲- تأثیر قطر اسمی سنگ‌دانه برای مقادیر مختلف عرض‌های سکو

همان‌طور که گفته شد ابعاد سنگ یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر پایداری سازه به‌شمار می‌رود و این را می‌توان در شکل ۵ نیز مشاهده کرد. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش قطر اسمی سنگ‌دانه بر پایداری سازه افزوده شده و درصد عرض فرسایش یافته سکو روندی نزولی می‌یابد، زیرا قطر اسمی سنگ‌دانه با وزن سنگ ارتباطی مستقیم داشته و لذا با افزایش قطر اسمی سنگ‌دانه، نیروی مقاوم در برابر انرژی امواج بیشتر خواهد شد.

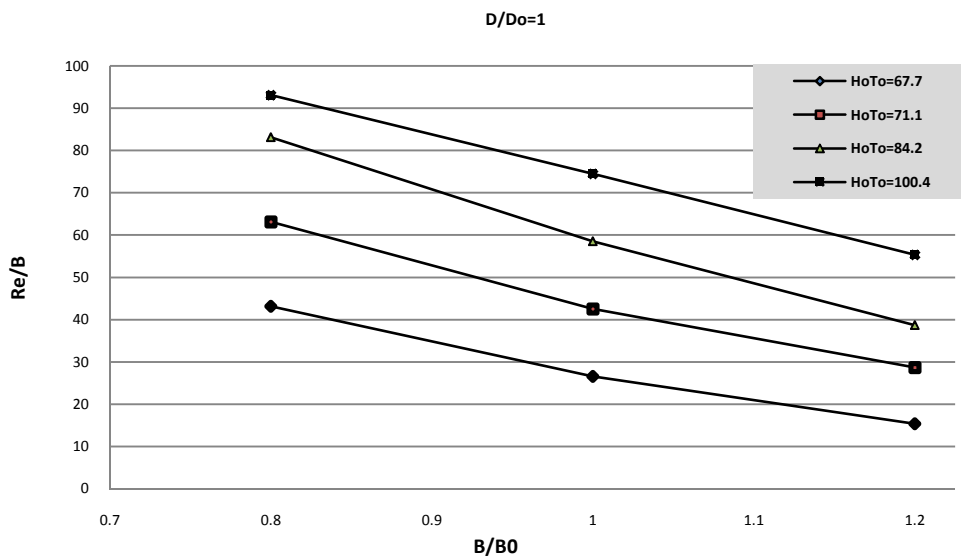
یافته است که درصد عرض فرسایش یافته براساس میزان فرسایش در هر گام زمانی تقسیم بر میزان فرسایش نهایی سازه محاسبه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود تعداد امواج تاییده شده به مقطع یکی از عوامل تأثیرگذار بر پایداری سازه به‌شمار می‌رود و بیانگر مدت تداوم توفان لازم، برای به تعادل رسیدن مقطع موج‌شکن است. مدت زمان رسیدن به نیم‌رخ تعادلی وابسته به قطر اسمی سنگ‌دانه است و همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش ۲۰٪ در قطر اسمی سنگ‌دانه، تعداد امواج مورد نیاز برای به تعادل رسیدن مقطع از ۳۵۰۰ موج به ۲۸۰۰ موج کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش ۲۰٪ در تعداد امواج است. این کاهش تعداد امواج، با توجه به دوره تناوب موج، با ۲ ساعت کاهش در زمان توفان طرح برابری می‌کند. بنابراین با افزایش قطر اسمی سنگ‌دانه، روند تشکیل نیم‌رخ تعادلی تسریع می‌شود که این را می‌توان به افزایش پایداری سازه مربوط دانست زیرا با افزایش وزن سنگ‌دانه‌ها احتمال جابه‌جایی و تغییر مکان در سنگ‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۳ تأثیر تعداد امواج بر درصد فرسایش برای مقادیر مختلف قطر



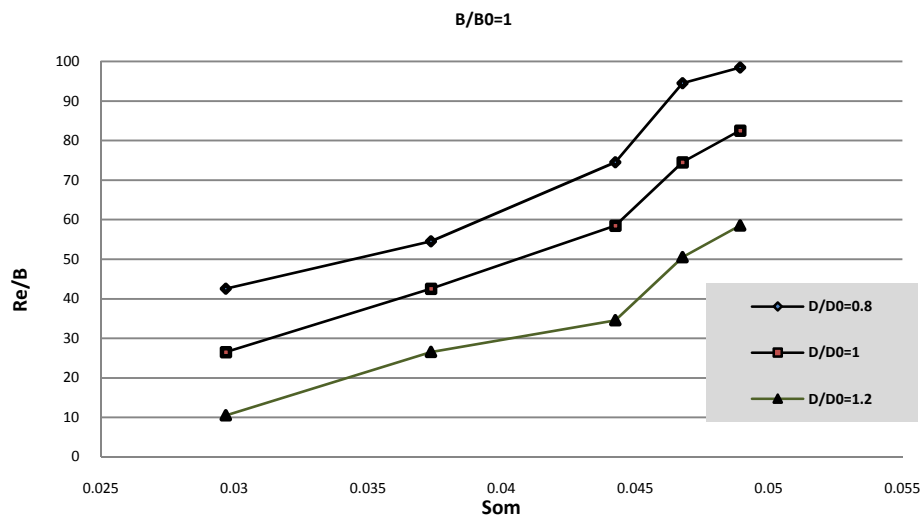
شکل ۴ تأثیر تعداد امواج بر درصد فرسایش برای مقادیر مختلف $HoTo$



شکل ۵ تغییر درصد عرض فرسایش یافته نسبت به Som برای سنگ‌دانه‌هایی با قطرهای مختلف

پارامتر بر درصد فرسایش سکو است. لذا باید مقایسه‌ای بین این دو پارامتر صورت گیرد و مشخص شود که کدام عامل تأثیر بیشتری دارد.

مشاهده شده است که افزایش ۲۰٪ در قطر اسمی سنگ‌دانه به‌طور متوسط، کاهش ۱۷ درصدی در عرض فرسایش یافته سکو را در پی داشته است. از سوی دیگر شکل ۶ نیز نشانگر اهمیت عرض سکو و تأثیر این



شکل ۶ تأثیر عرض سکو بر درصد عرض فرسایش یافته

ابعاد بزرگتر در دسترس باشد می‌توان به‌منظور کاهش هزینه‌های اجرایی، عرض سکو را کاهش داد.

۳-۳- تأثیر قطر اسمی سنگ‌دانه در شرایط مختلف عمق آب

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن، عمق آب در پای سازه است که با افزایش عمق آب، عرض فرسایش یافته سکو افزوده می‌شود که این روند در شکل ۸ نیز قابل مشاهده است. اما نکته قابل توجه در شکل ۸ این است که تغییر عمق در آب‌های کم عمق و نیمه‌عمیق تأثیرگذار است و با افزایش عمق آب و در شرایط عمیق، از اثرگذاری این پارامتر کاسته می‌شود و نمودارها به مقدار ثابتی میل می‌کنند.

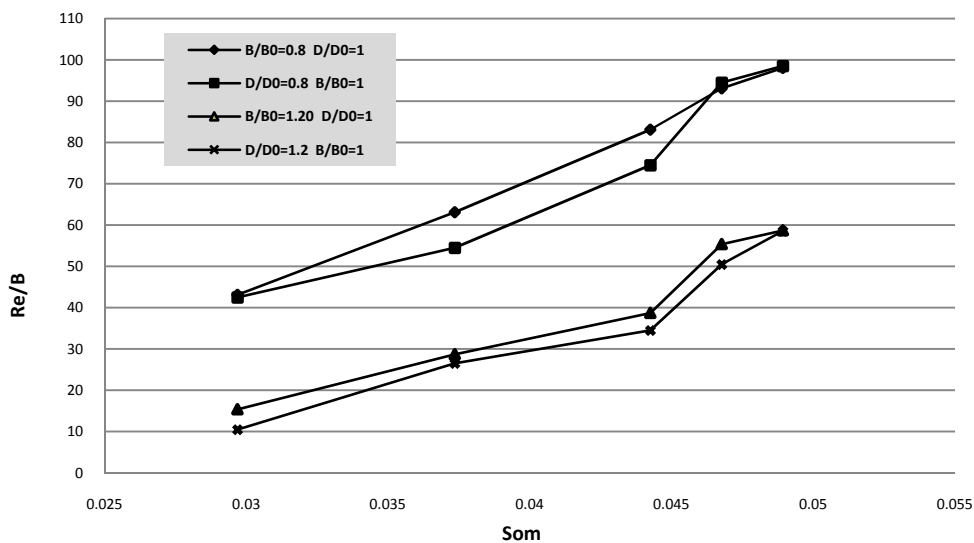
بر طبق مشاهدات، تأثیر عمق به‌مراتب بیشتر از تأثیر قطر اسمی سنگ‌دانه است و این را می‌توان از شکل ۹ برداشت کرد. همان‌طور که دیده می‌شود کاهش ۱۶٪ در عمق، تأثیر به‌مراتب بیشتری نسبت به افزایش ۲۰٪ در قطر اسمی سنگ‌دانه دارد. این از آن رو اهمیت دارد که موج‌شکن

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود افزایش عرض سکو سبب کاهش فرسایش به‌وجود آمده در سازه شده است، به طوری که افزایش ۲۰٪ در عرض سکو به‌طور متوسط، ۱۵٪ فرسایش را کاهش داده است. در این شکل B_0 عرض اولیه سکو است که برابر ۲۵cm برآورد شده بود. مشاهدات حاکی از آن است که هرچند افزایش قطر اسمی سنگ‌دانه نسبت به افزایش عرض سکو سبب کاهش بیشتری در عرض فرسایش یافته می‌شود اما درصد فرسایش به‌وجود آمده در هر دو، روندی یکسان را دنبال می‌کند. این مطلب در شکل ۷ نیز دیده می‌شود.

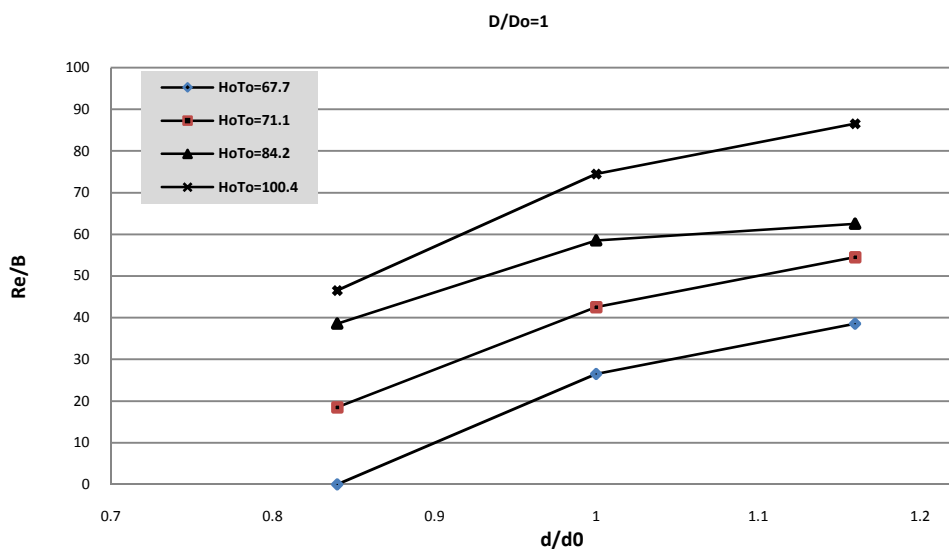
با توجه به شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که به خلاف نظر برخی پژوهشگران، عرض اولیه سکو یکی از عوامل تأثیرگذار بر فرسایش سکو به‌شمار می‌رود و تقریباً همان تأثیر قطر اسمی سنگ‌دانه را دارد. لذا در مناطقی که تأمین سنگ با ابعاد مورد نظر برای ساخت موج‌شکن با مشکل روبه‌رو است می‌توان با افزایش عرض سکو و با استفاده از سنگ‌هایی با ابعاد کوچک‌تر همان ویژگیها را برای سازه ایجاد کرد. از سوی دیگر در مناطقی که سنگ‌هایی با

نکته دیگری که از شکل ۹ برداشت می‌شود این است که افزایش عمق به اندازه ۱۶٪ تقریباً روندی را شبیه به کاهش ۲۰٪ قطر اسمی سنگ‌دانه ایجاد می‌کند و درصد فرسایش پدید آمده در این دو حالت تقریباً یکسان است.

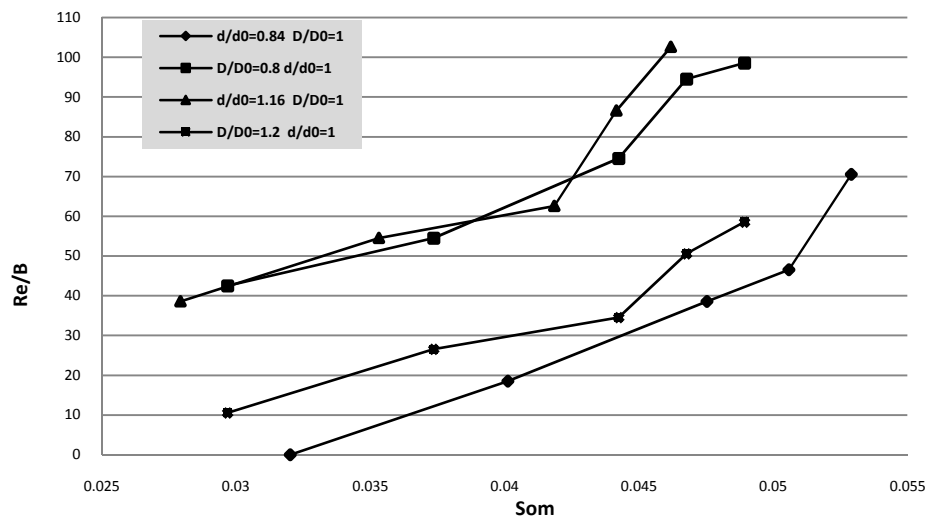
ممکن است در شرایط عمقی مختلفی قرار داشته باشد زیرا که در نزدیکی سواحل شرایط کم عمق و در نواحی دور از سواحل شرایط عمیق و نیمه عمیق حاکم است. در نتیجه می‌توان سازه موج‌شکن را در مناطق نزدیک به سواحل با سنگ‌دانه‌های به مراتب کوچک‌تری ایجاد کرد.



شکل ۷ تغییر درصد عرض فرسایش یافته نسبت به S_{om} به ازای تغییر قطر اسمی و عرض سکو



شکل ۸ تأثیر عمق آب بر درصد عرض فرسایش یافته



شکل ۹ تغییرات درصد عرض فرسایش یافته نسبت به S_{om} به ازای تغییر قطر اسمی و عمق آب

با توجه به شکل ۱۱ افزایش ۲۰٪ در قطر اسمی سنگ‌دانه تأثیری به مراتب بیشتر از افزایش ۸۰٪ در فاصله تراز سکو در پی خواهد داشت. لذا همان‌طور که گفته شد انتخاب گزینه افزایش قطر اسمی سنگ‌دانه نسبت به افزایش تراز سکو اولویت بیشتری دارد.

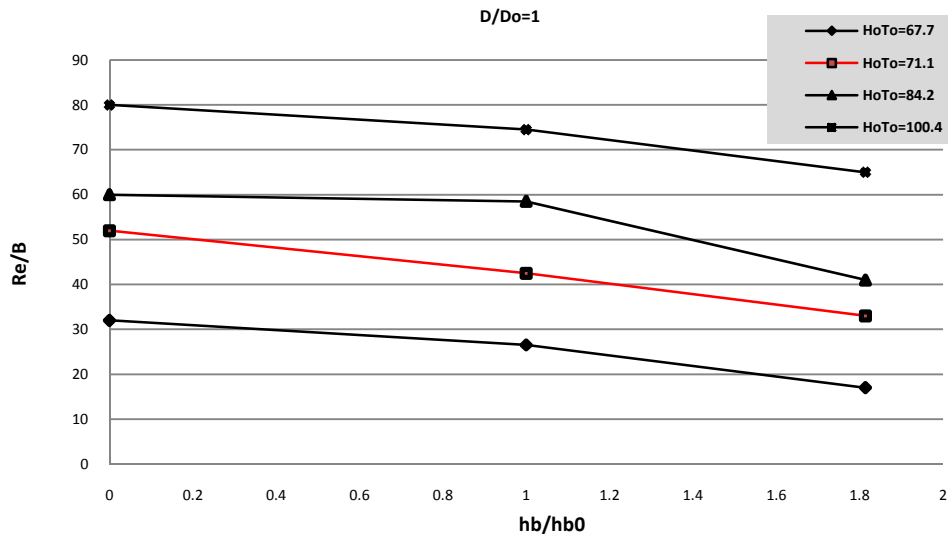
۴- مقایسه نتایج آزمایش‌ها با روابط پژوهشگران دیگر

در این بخش نتایج آزمایش‌ها با روابط ارائه شده توسط Torum (1998) و مقیم و همکاران (۱۳۸۸) - که به‌منظور تخمین عرض فرسایش‌یافته سکوی این نوع از موج‌شکن‌ها پیشنهاد شده - مقایسه می‌شوند. رابطه Torum (1998) برای موج‌شکن‌های همگن سکویی پیشنهاد شده، اما در میان پژوهشگران و طراحان بیشترین کاربرد را دارد. رابطه مقیم و همکاران (۱۳۸۸) نیز بر اساس مطالعه موج‌شکن‌های سکویی چندلایه حاصل شده و از دیدگاه مدل‌سازی آزمایشگاهی شباهت بسیاری با مدل موجود در این آزمایش‌ها داشته است.

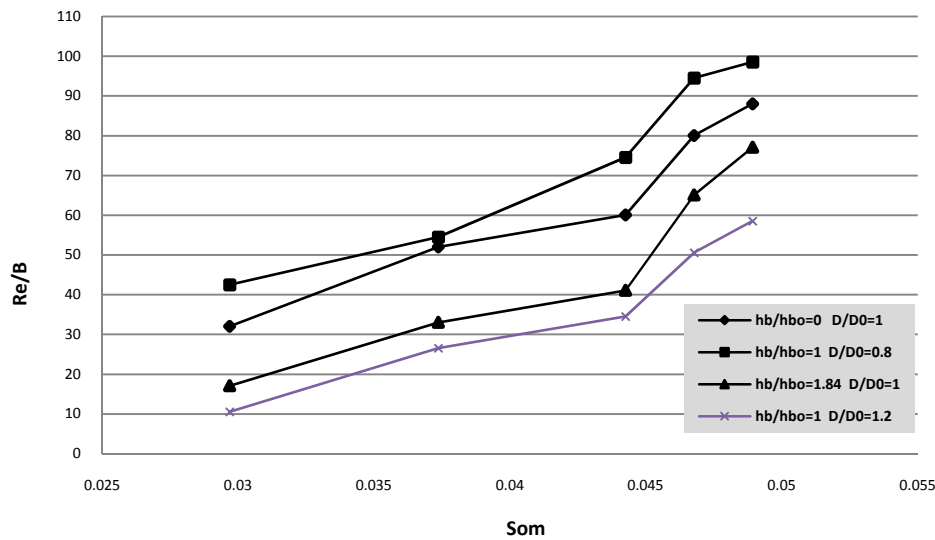
۳-۴- تأثیر قطر اسمی سنگ‌دانه بر تراز قرارگیری سکو

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر فرسایش سکوی موج‌شکن، فاصله تراز سکو از سطح ایستابی آب است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش این فاصله، در وضعیتی که سکو در بالای تراز ایستابی آب واقع شود، فرسایش روندی کاهشی می‌یابد و با کاهش فاصله، عرض فرسایش یافته روندی افزایشی می‌یابد. این در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

تراز سکو بیشتر در شرایط جزر و مد اهمیت خود را نشان می‌دهد؛ اگر توفان طراحی در زمان مد دریا روی دهد اثر تخریبی و فرسایشی آن به مراتب بیشتر خواهد بود و به ناچار به‌منظور کاهش تخریب، تراز سکو را باید بالاتر در نظر گرفت، که این با توجه به تأثیر اندک تراز بر فرسایش سکو، مستلزم استفاده از تراز بلندتری خواهد بود که سبب تحمیل هزینه‌های بیشتری بر پروژه می‌شود. لذا به‌عنوان راهکار، افزایش قطر اسمی سنگ را می‌توان مد نظر قرار داد.



شکل ۱۰ تأثیر فاصله تراز سکو بر درصد فرسایش سکو



شکل ۱۱ تغییر درصد عرض فرسایش یافته نسبت به Som به ازای تغییر قطر اسمی و تراز سکو

می‌شود قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود در بیشتر حالتها، آزمایش‌ها فرسایش بیشتری را در مقایسه با رابطه (۶) نشان می‌دهند و این بیان‌کننده آن است که این رابطه برای طراحی موج‌شکن، نمی‌تواند در جهت ایجاد اطمینان عمل کند.

شکل ۱۲ به مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها با رابطه (1998) Torum می‌پردازد. محور افقی نتایج حاصل از آزمایش‌ها و محور قائم نتایج حاصل از رابطه (۶) را نشان می‌دهد. اگر نتایج آزمایش‌ها به رابطه مذکور نزدیک باشد نقاط به‌دست آمده در نزدیکی خطی که در شکل دیده

سکو در موج شکن‌های شکل‌پذیر پرداخته شود. با توجه به مطالعات و آزمایش‌های شده نتایج زیر به دست آمد:

۱- مدت زمان توفان که اثر آن در آزمایش‌ها با پارامتر بی بعد تعداد امواج بیان شد، وابسته به قطر اسمی سنگ‌دانه‌ها بوده و با افزایش ۲۰٪ در قطر اسمی، زمان به تعادل رسیدن مقطع ۲۰٪ کاهش می‌یابد. از سوی دیگر مشاهده شد که بیشترین تغییر شکل در اوایل توفان و در طول برخورد چند صد موج اول به وجود می‌آید و با گذشت زمان فرسایش کاهش می‌یابد.

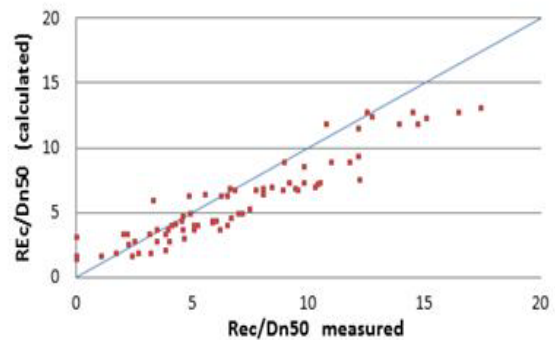
۲- به خلاف نظر برخی از پژوهشگران، عرض سکو یکی از عوامل تأثیرگذار بر فرسایش به‌شمار می‌رود و تقریباً همان اثر قطر اسمی سنگ‌دانه را داشته و می‌توان با کاهش ۲۰٪ در قطر اسمی و افزایش ۲۰٪ در عرض سکو همان درصد فرسایش را از سازه انتظار داشت.

۳- از نظر عملکردی، تغییر عمق تأثیر چشمگیرتری نسبت به عرض سکو و قطر اسمی سنگ‌دانه دارد. کاهش ۱۶٪ در عمق، درصد فرسایش را نسبت به افزایش ۲۰٪ در قطر اسمی بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. البته این پدیده در آب‌های کم‌عمق و نیمه‌عمیق صادق بوده و در آب‌های عمیق اثر تغییر عمق قابل ملاحظه نیست.

۴- تغییر تراز سکو نسبت به سطح ایستابی آب، در مقایسه با سایر پارامترهای مورد بررسی، اثر کمتری دارد.

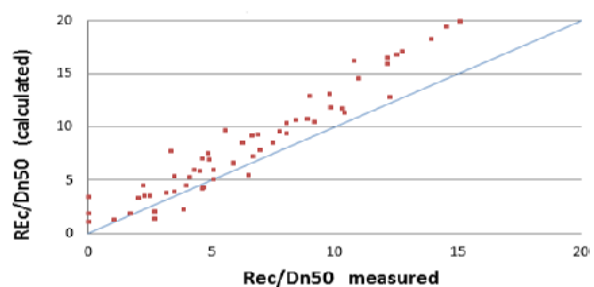
۶- فهرست علائم

B	عرض اولیه سکو
D	عمق آب در پای سازه
C_k	ضریب، برای مناطق عمیق با توزیع رایلی برابر با ۱/۵۵
D_{n50}	قطر اسمی سنگ‌دانه
h_b	ارتفاع سکو از تراز ایستابی آب
g	شتاب ثقل زمینی



شکل ۱۲ مقایسه نتایج آزمایش‌ها با رابطه (Torum (1998)

در شکل ۱۳ به مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها با رابطه مقیم و همکاران (۱۳۸۸) پرداخته شده است. مقیم و همکاران (۱۳۸۸) این رابطه را بر اساس مجموعه‌ای از کارهای آزمایشگاهی ارائه کردند که در آن از عدد بی‌بعد جدید ($H_0\sqrt{T_0}$) استفاده شده است. این رابطه برای بررسی ترازهای مختلف و همچنین عمق‌های مختلف در پای سازه قابل استفاده است. در شکل ۱۳ به مقایسه نتایج آزمایش‌ها با رابطه (۷) پرداخته شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج حاصل از رابطه (۷) نسبت به نتایج آزمایش‌ها در بیشتر حالات بزرگتر است.



شکل ۱۳ مقایسه نتایج آزمایش‌ها با رابطه مقیم و همکاران (۱۳۸۸)

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سعی شد با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی به بررسی برخی از پارامترهای تأثیرگذار در فرسایش

Lamberti, A., Tomasicchio G.R. (1997). "Stone mobility and longshore transport at reshaping breakwaters". Coastal Engineering 29, pp. 263-289.

Lykke Andersen, T., Burcharth, H.F. (2009). "A new formula for front slope recession of berm breakwaters". J. Coastal Engineering, Elsevier, No. 57, pp. 359-374.

PIANC Marcom WG 40. (2003). "State of the art of designing and constructing berm breakwaters", PIANC. Brussels,

Sigurdarson, S., Van der Meer, J.W., Burcharth, H.F., Sørensen, J.D. (2007). "Optimum safety levels and design rules for the icelandic type berm breakwater". Coastal Structures Conf., Venice.

Sigurdarson, S., Viggoson, G., Tørum, A. and Smarason, O.B. (2001). "Stable berm breakwaters". International Workshop on Advanced Design of Maritime Structures in the 21st Century. 5 - 7 March, Yokosuka, Japan

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, 22 - 26 June. ASCE.

Tørum, A., Kuhnen, F., Menze, A. (2003). "On berm breakwaters. Stability, scour, overtopping". J. Coastal Engineering, Elsevier, No.49, pp. 209-238.

USACE (20006), "Coastal engineering manual", Part VI, US Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

Van der Meer, J.W., Veldman, J.J. (1992). "Singular points at berm breakwaters: scale effects, rear, round head and longshore transport", Coastal Engineering, Vol. 17, Nos. 3,4, pp. 153-171.

Van der Meer, J.W. (1988). "Rock slopes and gravel beach under wave attack". Doctoral Thesis, Delft university of Technology, Delft Hydraulics Communication No. 396.

Van Gent, M.R.A. (1996). "Numerical modeling of wave interaction with dynamically stable structures". Proc. of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, Florida, USA, ASCE.

H_k ارتفاع موج متناظر با متوسط $1/50$ بلندترین امواج.

H_s ارتفاع موج مشخصه ($H_{1/3}$)

L_o طول موج در آب عمیق بر اساس پریود متوسط امواج

N تعداد امواج برخوردی

Rec پسرفت یا عرض فرسایش یافته سکو

S_{mk} مشخصه‌ای از تیزی موج که $0/03$ در نظر گرفته می‌شود.

S_{mo} تیزی موج در آب عمیق

T_m پریود متوسط امواج

β_o زاویه تابش امواج نسبت به موج شکن

ρ_s چگالی سنگ‌دانه

ρ_w چگالی آب

Δ چگالی نسبی $\Delta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)$

v لزجت سینماتیکی

۷- منابع

مقیم، م ن، شفیعی فر، م، چگینی، و، آق تومان، پ. (۱۳۸۸)

تأثیر شرایط امواج نامنظم بر عرض فرسایش یافته موج شکن های سکویی شکل پذیر، مهندسی دریا، سال پنجم شماره نهم، صفحات ۳۵-۶۱.

De Waal, J.P., Van der Meer, J. (1992). "Wave run up and overtopping on coastal structures". Proc. XXIII Int. Conf. On Coast. Eng. ASCE 2. pp.1758-1771.

Hall, K., Kao, S. (1991). "Study of the stability of dynamically stable breakwaters". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.18, pp. 916-925.

Hudson, R. Y. (1958). "Design of quarry stone cover layers for rubble mound breakwaters; hydraulic laboratory investigation". Research Report No. 2-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.