

بررسی دو بعدی آبشنستگی و پایداری پنجه موج شکن توده سنگی با استفاده از مدل سازی فیزیکی

مجید اسکافی^{۱*}، حسین مروتی^۲، کامران لاری^۳

- ۱- کارشناس ارشد فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
- ۲- استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
- ۳- استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

چکیده

در این پژوهش دو مقطع موج شکن در شرایط مختلف نوع و جنس بستر، موج و تراز آمورد مطالعه گرفت. مولد موج از نوع پیستونی و تولیدکننده امواج منظم بود. با داده برداری های انجام شده چنین به نظر می رسد که عمق آبشنستگی در جلوی پنجه موج شکن توده سنگی، رابطه مستقیمی با ارتفاع موج، شب سازه، تراز آب و دوره تناوب موج داشته، اما نتایج بیانگر اثر آشکار و ملموس پریود موج بر میزان عمق آبشنستگی نسبت به سایر موارد می باشد. به علاوه با بررسی های انجام شده بر روی پایداری پنجه موج شکن توده سنگی، پریود موج به عنوان یکی از پارامترهای اصلی و حاکم در آسیب پنجه می باشد، بطوری که امواج پریود بلند با انرژی بیشتر، می توانند یک تهدید برابر سازه محسوب شوند. همچنین نتایج در نمودار ها، جداول و شکلها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

کلمات کلیدی: موج شکن توده سنگی، آبشنستگی، پایداری پنجه، پریود موج.

TECHNICAL NOTE

2D ANALYSIS OF SCOUR AND STABILITY RUBBLE-MOUND BREAKWATER TOE BY PHYSICAL MODEL

M. Eskafi¹, H. Morovvati², K. Lari³

1-M.SC. Graduated, Faculty of ocean & marine science, physical oceanography group, Islamic Azad University, North Tehran branch.

2-Assistant Professor, physical oceanography group, Faculty of ocean & marine science, Islamic Azad University, North Tehran branch.

3-Assistant Professor, physical oceanography group, Faculty of ocean & marine science, Islamic Azad University, North Tehran branch.

Abstract

In this study two breakwater models with different conditions of bed, waves and water level are employed to analyze the toe stability and scour depth. The tests are conducted with regular waves. It is found that the scour depth in front of the rubble-mound breakwater depends on wave height, structure slope, water level and wave period, but the results reveal the effect of wave period toe is more than others. So that long period waves with more energy can be a threat

* نویسنده مسؤول مقاله m_eskafi@ymail.com

for rubble-mound breakwater. Also the results of the toe stability and scour depth are given in the form of diagrams.

Keywords: Rubble-mound breakwater, Toe stability, Scouring, Wave period.

۱- مقدمه

[۲]. در این فرمول G متوسط وزن سنگها می‌باشد و γ_s وزن مخصوص می‌باشد.

میزان جابه جایی سنگهای پنجه توسط دستگاه Point Gauge و میزان آبستنگی پنجه توسط Laser Bed Profiler محاسبه گردید. در آزمایشات مربوط به آبستنگی تمام عرض فلوم داده‌برداری می‌شد، اما نتایج حاصل از یک سوم میانی فلوم در مقایسات مد نظر قرار گرفت. ارتفاع موج و نوسانات سطحی آب توسط Wave Gauge اندازه‌گیری شد که این دستگاه در ابتدا در فاصله ۲۸ متری مولد موج در غیاب مدل برای حصول اطمینان از تولید ارتفاع مناسب قرار گرفت. همچنین در طی آزمایشات در پای سازه نیز ارتفاع موج برای کنترل بیشتر اندازه‌گیری شد. از دو عمق آب و دو نوع بستر ریز دانه با اندازه $d_{50} = 0.25$ mm و درشت دانه با $d_{50} = 6.30$ mm استفاده شد. مشخصات برخی از آزمایشات بر حسب T , H , h , L و w میزان آسیب و میزان آبستنگی در پای پنجه موج‌شکن در جدول ۱ آمده است.

۳- معادلات اساسی حاکم

پارامترهای کنترل کننده در انتقال رسوبات پارامتر

$$\text{شیلدز } \frac{U_{fm}^2}{g(s-1)d_{50}} = \theta \quad \text{و پارامتر سرعت سقوط}$$

w/U_{fm} می‌باشد. پارامتر شیلدز بدست آمده در این تحقیق برای بستر ریز دانه برابر 0.008 تا 0.002 می‌باشد که بیشتر از مقدار بحرانی آستانه حرکت مواد بستر بوده و برای بستر درشت دانه برابر 0.01 تا 0.02 می‌باشد که کمتر از مقدار بحرانی آستانه حرکت مواد بستر می‌باشد [۲]. در این رابطه s وزن مخصوص دانه‌های بستر، g شتاب جاذبه و U حداکثر سرعت مواد در بستر ناشی از اصطکاک می‌باشند. همچنین پارامتر سرعت سقوط w/U_{fm} در حالت بستر ریز دانه برابر $1/6$ تا $1/3$ می‌باشد که حاکی از این امر است که مواد بستر در هر دو نوع بستر معلق باقی

هنگامی که یک سازه در محیط دریایی ساخته می‌شود، الگوی جریان تحت تاثیر قرار می‌گیرد. تشکیل گردابه‌های نعل اسی در جلوی سازه، گردابه خیزابی در پشت سازه، انکسار و تفرق، شکست امواج، اختلاف فشار و معکوس شدن گرادیان هیدرولیکی می‌توانند موجب افزایش نرخ انتقال رسوبات از پای سازه و آبستنگی و خرابی بعدی سازه را به همراه داشته باشد. در دهه‌های اخیر مطالعاتی گوناگونی در این زمینه انجام شده است. هنگامی که موج در جهت مستقیم به سازه بورخورد می‌کند آبستنگی یک پدیده دوبعدی خواهد بود. نتایج حاصل از مطالعات دوبعدی آبستنگی و راهکارهای محافظت سازه نشان می‌دهد که بطور کلی عمق آبستنگی در امواج نامنظم کمتر از امواج منظم می‌باشد [۲]. نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیکی بر پایداری موج‌شکن توده سنگی نشان می‌دهد، امواج با تیزی زیاد تخریب بیشتری را به همراه دارند [۳]. همچنین عرض پنجه موج‌شکن اثری در پایداری سازه ندارد و نیز یک دسته بندی برای آسیب ارائه گردید [۴]. اگرچه اغلب دانسته‌ها بر پایه تجربیات می‌باشد اما شناخت و مطالعه هیدرودینامیک اطراف سازه برای دستیابی به یک طراحی و ساخت مناسب کاملاً ضروری می‌باشد. از این رو در این تحقیق سعی شده با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی پارامترها حاکم در طراحی موج‌شکن مورد بررسی قرار گیرد.

۲- روش تحقیق

آزمایش انجام شده در فلوم امواج با طول ۴۳ متر، عمق ۱.۲۰ متر و عرض ۱ متر انجام شد. مولد موج از نوع پیستونی و تولید کننده امواج منظم می‌باشد. مقطع موج شکن در فاصله ۳۸ متری از مولد موج قرار گرفت. مقطع موج‌شکن در تمامی عرض فلوم جانمایی شد. پنجه از سنگهایی با اندازه $D = 3$ cm ساخته شد. از فرمول $G = \gamma_s \pi D^3 / 6$ بدست آمده است

$$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

نکته‌ی کلیدی وجود جریانات یکنواخت^۲ در یک سطون آب، ناشی از امواج ایستا در جلوی موج شکن می‌باشد که باعث یک الگوی آبشنستگی و رسوبرگزاری در جلوی موج شکن به طور متناوب می‌شود [۳]. جریانات یکنواخت به کمیت‌های ارتفاع موج (H)، پریود موج (T)، عمق آب (h)، زبری و اندازه ذرات بستر (d)، چگالی آب (ρ)، لزجت آب (μ) بستگی دارد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، اگر اندازه مواد بستر کوچک باشد، مواد کف توسط اثر امواج بلند شده و تحت حرکت سلول بالای خود قرار گرفته و به صورت معلق به سمت بالا حرکت می‌کند. از آنجایی که سرعت حرکت ذره سیال در مدارهای بیضوی ریز سینه موج حداکثر بوده، آبشنستگی و فرسایش در زیر پادگره^۳ حاصل از موج پیشورون و موج برگشتی^۴ حاصل شود.

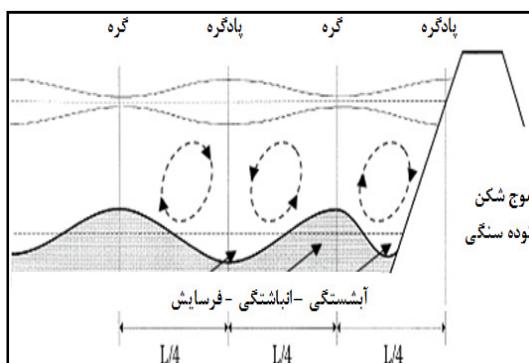
اساساً پایداری پنجه موج شکن توده سنگی بصورت تابعی از پایداری لایه آرمور می‌باشد. هنگامی که مقدار

$$\frac{h_t}{H_s} = 1.5 \text{ باشد، حداقل وزن قطعات پنجه}$$

حاصل از موج پیشورون و موج برگشتی^۴ حاصل شود.

$\frac{W}{10}$ باشد، وزن قطعات پنجه به میزان $\frac{h_t}{H_s} > 2$ تا

$\frac{W}{15}$ کاهش می‌یابد. که عمق آب در پای سازه و H_s موج شاخص می‌باشد [۴].



شکل ۲- اثر متقابل موج و سازه

نمی‌ماند [۶] و [۵]. این امر در حالتی که بستر ریز دانه است با تشکیل ناهمواری و حرکت مواد بستر بر روی یکدیگر در فیلم‌برداری‌های انجام شده و شکل ۱ کاملاً مشخص می‌باشد.



شکل ۱- بستر ریز دانه پس از انجام آزمایش

در آنالیز ابعادی، برای حالت انتقال بصورت غیر معلق، آبشنستگی با مولفه‌های زیر بیان می‌گردد :

(۱)

$$\frac{S}{H} = f\left(\frac{h}{L}, \alpha, \theta, \frac{L}{d_{50}}, \text{Re}\right) \quad (1)$$

که α زاویه شیب موج شکن، a دامنه $\text{Re} = \frac{aU_m}{v}$ حداکثر سرعت اوربیتالی ذرات آب و U_m حداکثر اوربیتالی در بستر می‌باشد. علاوه بر این در آبشنستگی برای بستر زنده، $(u > u_{cr})$ اثر u زیاد مهم نبوده و می‌توان از آن چشم پوشی کرد. فرمول تجربی ارائه شده [۳] برای حداکثر عمق آبشنستگی در پای موج شکن توده سنگی به صورت تابعی از f که وابسته به شیب موج شکن (α) می‌باشد بیان می‌گردد:

(۲)

$$\frac{S}{H} = \frac{f(\alpha)}{\left(\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right)^{1.35}} \quad (2)$$

(۳)

$$f(\alpha) = 0.3 - 1.77 \exp\left(-\frac{\alpha}{15}\right) \quad (3)$$

جدول ۱- مشخصات انجام آزمایش بر حسب T , L , h و میزان، آسیب و میزان آبشنستگی در پای پنجه موج شکن (علامت ستاره (*)) معروف ترین حاصل از پنجه در شرایط بستر درشت دانه می باشد)

شماره تست	عمق h (cm)	شیب	ارتفاع H (cm)	پریود T (s)	طول موج L (m)	تبیزی موج S	عمق به طول موج h/L	عمق آبشنستگی S (cm)	آبشنستگی به ارتفاع S/H	آسیب*پارامتر پایداری*عدد N%
R1	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۸	۲	۴.۱۸	۱.۹۱	۰.۱۲۹	۲.۳	۰.۲۸۷	۱.۹۷ ۱.۱۹
R2	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۸	۳	۶۶۲	۱.۲۱	۰.۰۸۱	۲.۴	۰.۳	۱.۹۷ ۱.۸۳
R3	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۸	۴	۸.۹۹	۰.۸۸	۰.۰۶۰	۲.۶	۰.۳۲۵	۱.۹۷ ۲.۱۲
R4	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۱۰	۲	۴.۱۸	۲.۳۹	۰.۱۲۹	۲.۳	۰.۲۳	۲.۴۷ ۱.۳۱
R5	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۱۰	۳	۶۶۲	۱.۵۱	۰.۰۸۱	۲.۵	۰.۲۵	۲.۴۷ ۲.۰۶
R6	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۱۰	۴	۸.۹۹	۱.۱۱	۰.۰۶۰	۲.۸	۰.۲۸	۲.۴۷ ۲.۳۲
R7	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۱۲	۲	۴.۱۸	۲.۸۷	۰.۱۲۹	۲.۴	۰.۲	۲.۹۶ ۲.۰۴
R8	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۱۲	۳	۶۶۲	۱.۸۱	۰.۰۸۱	۲.۸	۰.۲۳۳	۲.۹۶ ۲.۸۹
R9	۵۴	۱:۰۰.۶۶	۱۲	۴	۸.۹۹	۱.۳۳	۰.۰۶۰	۳.۳	۰.۲۷۵	۲.۹۶ ۳.۶۴
R10	۴۸	۱:۰۰.۶۶	۸	۲	۳.۹۸	۲.۰۱	۰.۱۲۰	۲.۳	۰.۲۸۷	۱.۹۷ ۱.۹۱
R11	۴۸	۱:۰۰.۶۶	۸	۳	۶.۲۷	۱.۲۷	۰.۰۷۶	۲.۵	۰.۳۱۲	۱.۹۷ ۲.۱۵
R12	۴۸	۱:۰۰.۶۶	۸	۴	۸.۵	۰.۹۴	۰.۰۵۶	۲.۷	۰.۳۳۷	۱.۹۷ ۲.۶۱
R13	۵۴	۱:۱.۲	۸	۲	۴.۱۸	۱.۹۱	۰.۱۲۹	۱	۰.۱۲۵	۱.۹۷ ۱
R14	۵۴	۱:۱.۲	۸	۳	۶۶۲	۱.۲۱	۰.۰۸۱	۱.۱	۰.۱۳۷	۱.۹۷ ۱.۲۱

اثرات لزجت برای امواج با ارتفاع بیش از ۰/۰۱ متر در مدل قابل صرف نظر کردن است.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایشات هنگامی که آزمایشات با امواج نامنظم انجام می گردد ارتفاع موج ریشه دوم میانگین (H_{rms}) خواهد بود که در این حالت با توجه به کاهش میزان ارتفاع موج ریشه دوم میانگین نسبت به ارتفاع موج منظم آبشنستگی و آسیب کمتری حاصل می گردد [۳].

۴-۱- اثر پریود موج
هنگامی که موج با پریود بلندتر (طول موج بلند) به سازه برخورد می کند، امواج پیشروندۀ اجازه عقب نشینی کامل را به امواج بازگشته از پای سازه می دهد که درست در این لحظه سطح آب پایین آمده و شرایط آسیب پذیری برای سازه فراهم می گردد. همانطور که در شکل ۳ دیده می شود در ارتفاع ثابت آبشنستگی بیشتر برای امواج با پریود بلندتر می باشد. همچنین امواج بلندتر با تولید یک جریان روی پنجه در ابتدا باعث ایجاد نیروی بلند کننده روی سنگها شده و سپس

انتخاب مقیاس مناسب جهت مدل هیدرولیکی مهمترین بخش از مطالعات مقدماتی مدل سازی فیزیکی است. عدد فرود^۷ در پژوهش حاضر می باشد مقدار یکسانی بین مدل و نمونه اصلی داشته باشد.

$$F_r = \frac{U^2}{gL} \quad (4)$$

که در این رابطه g شتاب جاذبه، L طول موج و U سرعت می باشد.

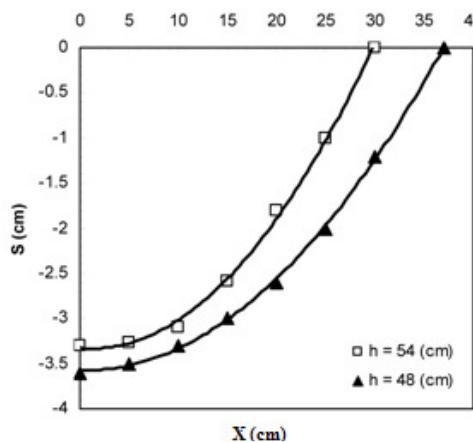
همچنین عدد رینولدز^۷ جهت حصول اطمینان از امکان نادیده گرفتن اثرات لزجت رابطه زیر برای مدل کنترل می شود [۶].

$$Re = \frac{\sqrt{gHs}Dn}{v} > 3 \times 10^4 \quad (5)$$

که در این رابطه Dn قطر اسمی، g شتاب جاذبه، v ویسکوزیته سینماتیکی آب می باشد. در صورت قرار دادن این مقادیر در رابطه فوق الذکر مشخص می شود

۲-۴- اثر عمق آب

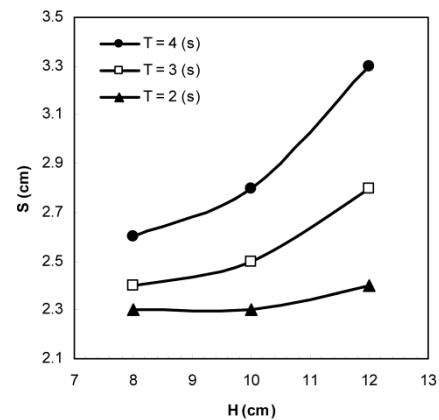
بستر جلوی سازه بطور مستقیم از عمق آب اثر پذیر است. هنگامی که عمق آب کاهش می‌یابد، نسبت $\frac{h_t}{h}$ زیاد شده و متقابلاً اثر موج بر بستر و پنجه نیز افزایش می‌یابد که باعث تلاطم بیشتر در پای سازه شده و آبشنستگی و آسیب را بر پنجه به همراه خواهد داشت. همانطور که در شکل ۵ مشخص می‌باشد میزان آبشنستگی و انتقال مواد بستر هنگامی که عمق آب کاهش می‌یابد، افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۵- میزان آبشنستگی پنجه موج شکن
($T = 4$ (s), $a = 1:0$, $h = 54$ (cm))

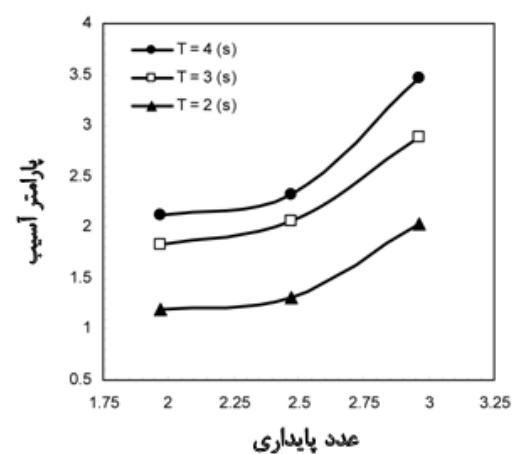
در شکل ۶ تغییرات پارامتر آسیب به عنوان تابعی از عدد پایداری برای نسبت $\frac{h_t}{h}$ بیان گردیده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود برای بستر درشت دانه در نسبت ثابت $\frac{h_t}{h}$ میزان پارامتر آسیب با عدد پایداری افزایش می‌یابد. علاوه بر کاهش سطح آب هنگامی که امواج برگشتی از سازه دور می‌شود سطح آب پایین آمده و موج پیشروندۀ جدید با حجم آب به روی سازه شکسته شده که این سیستم هیدرودینامیکی باعث حرکت سنگ‌های پنجه می‌گردد.

سنگها را به سمت بالا جایه جا می‌کند. در امواج کوتاه انرژی کم حاصله تنها قادر به ایجاد یک نیروی بلند کننده می‌باشد و توان جایه جایی سنگها را به سمت بالا ندارد و امواج سریعاً شروع به عقب‌نشینی کرده و سنگها با نیروی وزن خود به سمت پایین پنجه جایه جا می‌شوند. شکل ۴ بیانگر ارتباط بین پارامتر آسیب و عدد پایداری در پریود ثابت برای بستر درشت دانه می‌باشد.



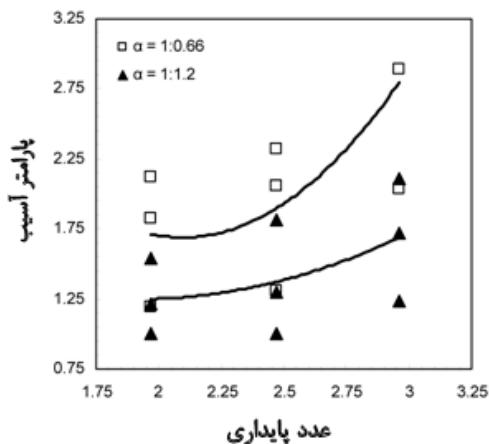
شکل ۳- میزان آبشنستگی پنجه موج شکن
($h = 54$ (cm), $a = 1:0$, $T = 4$ (s))

همانطور که در شکل نشان داده شده است در عدد پایداری ثابت میزان پارامتر آسیب با افزایش پریود موج زیاد می‌شود.



شکل ۴- میزان آسیب پنجه موج شکن
($h = 54$ (cm), $a = 1:0$)

بیشتر و در نتیجه بار تخریبی بیشتری را بر پنجه خواهیم داشت. همچنین شدت حرکت جریان روی سازه افزایش یافته که بلند شدن سنگ‌ها و در نتیجه تغییر شکل سازه را به همراه دارد. در شکل ۸ نتایج بیان می‌کند که در شبیه‌سازی با افزایش عدد پایداری پارامتر آسیب افزایش می‌یابد.



شکل ۸- میزان آسیب پنجه موج شکن ($h = 54$ cm)

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر بررسی دوبعدی آبستنگی و پایداری پنجه مقطع موج شکن توده سنگی آزمایشگاهی بررسی گردید که مهمترین نتایج آن در زیر خلاصه گردیده است :

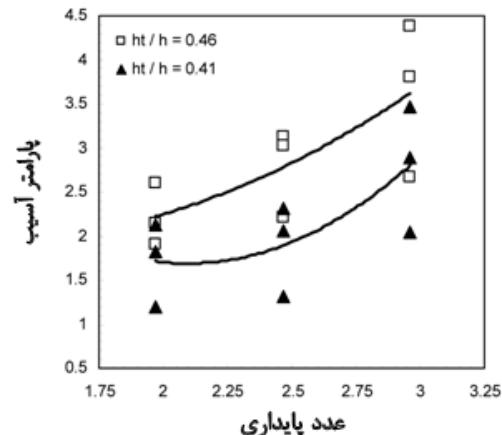
موثرترین پارامتر در پایداری موج شکن توده سنگی پریود موج می‌باشد.

با افزایش شبیه موج شکن توده سنگی میزان آبستنگی و آسیب پنجه بیشتر می‌شود.

کاهش عمق آب، افزایش میزان آسیب پنجه و آبستنگی پای پنجه موج شکن توده سنگی را به همراه دارد.

در بستر درشت دانه هر دو نوع موج با پریود کوتاه و پریود بلند باعث جایه جا شدن سنگهای پنجه به سمت پایین می‌شوند، اما امواج با پریود بلندتر قادر به جایه جایی سنگ‌ها به سمت بالای پنجه نیز می‌باشند.

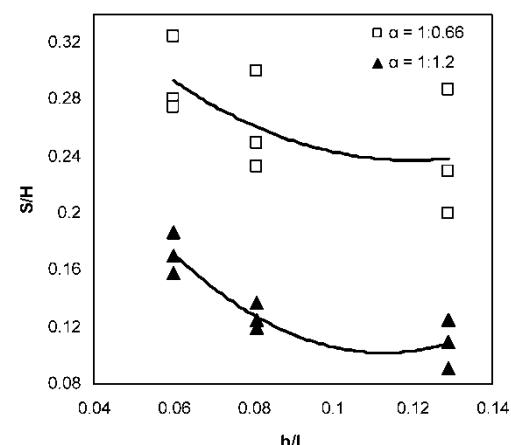
در تمامی آزمایشات میزان آبستنگی و آسیب پنجه در دو انتهای کناری فلوم بیشتر است. علت این امر را



شکل ۶- میزان آسیب پنجه موج شکن ($h = 54$ cm)

۴- اثر شبیه سازه

برخورد امواج به موج شکن توده سنگی فرایند پیچیده‌ای را روی سازه به همراه دارد. بخشی از انرژی امواج پیشرونده پس از برخورد به سازه پراکنده شده، بخش دیگر انرژی موج برگشت می‌شود و بخشی از سازه عبور می‌کند. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است هرچه شبیه سازه کمتر باشد میزان آبستنگی در پای سازه کمتر می‌باشد چرا که بازتاب امواج پیشرونده شدت کمتری داشته و در نتیجه جریانات برگشتی کاهش می‌یابد و میزان آبستنگی در پای موج شکن کاهش خواهد یافت.



شکل ۷- میزان آبستنگی پنجه موج شکن ($T = 10$ s, $h = 54$ cm)

همچنین در بستر درشت دانه با افزایش شبیه موج شکن اثر متقابل بازتاب موج و امواج پیشرونده

- Technology, Delft, The Netherlands, September,p 61.
- 4-Van der Meer, J.W, d'Angremond, K. and Gerding, E., (1995), Toe structure stability of rubble mound breakwaters, proceedings of ICE, London, p 308-321.
- 5-Bagnold, R.A, (1966),An approach to the sediment transport problem from general physics. Prof. Paper No. 422-I. US Geological Survey.US Government Printing Office, Washington, DC.
- 6-Batchelor, G.K., (1965),The motion of small particles in turbulent flow, Proc. 2nd Aust. Conf. Hydraul. FluidMech. University of Auckland, Auckland, Australia,p 019–041.

می توان تلاطم بیشتر و وجود جریانات برگشتی در این نواحی دانست.

میزان آسیب پنجه در بستر ریز دانه نسبت به بستر درشت دانه به مراتب کمتر است. پایداری پنجه موج شکن توده سنگی می تواند با پارامتر آسیب، عدد پایداری و عمق نسبی بررسی گردد و تیزی موج رفتار مشخصی را در مورد پایداری پنجه بیان نمی کند.

کلید واژگان

- 1-Live bed
- 2-Steady stream
- 2-Anti node
- 3-Incoming wave
- 4-Reflected wave
- 6-Froude Number
- 7-Reynolds Number

۶- مراجع

- 1-Morovvati, H. (1991), Study of Roughness Effect on Waves & Currents in distorted Scale Models. M. Sc. Thesis submitted to IHE, Delft, & Ho HAI University in China.
- 2-Summer, B.M. Fredsøe.J, (2000), Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater, Coastal Engineering, pp 40-59–87.
- 3-Xie, S.L., (1981), Scouring patterns in front of vertical breakwaters and their influence on the stability of the foundations of the breakwaters. Report. Department of Civil Engineering, Delft University of