

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

مجید اسکافی<sup>۱\*</sup>، حسین مروتی<sup>۲</sup>، کامران لاری<sup>۳</sup>

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 آب مورد مطالعه قرار گرفت. مولد موج از نوع پیستونی و تولیدکننده امواج منظم بود. با داده برداری‌های انجام شده چنین به نظر می‌رسد که عمق آبشستگی در جلوی پنجه موج شکن توده سنگی، رابطه مستقیمی با ارتفاع موج، شیب سازه، تراز آب و دوره تناوب موج داشته، اما نتایج بیانگر اثر آشکار و ملموس پرپود موج بر میزان عمق آبشستگی نسبت به سایر موارد می‌باشند. به علاوه با بررسی‌های انجام شده بر روی پایداری پنجه موج شکن توده سنگی، پرپود موج به عنوان یکی از پارامترهای اصلی و حاکم در آسیب پنجه می‌باشد، بطوری که امواج پرپود بلند با انرژی بیشتر، می‌توانند یک تهدید برای سازه محسوب شوند. همچنین نتایج در نمودارها، جداول و شکلها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

کلمات کلیدی: موج شکن توده سنگی، آبشستگی، پایداری پنجه، پرپود موج.

### TECHNICAL NOTE

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

M. Eskafi<sup>1</sup>, H. Morovati<sup>2</sup>, K. Lari<sup>3</sup>

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 مسوول مقاله m\_eskafi@gmail.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 می باشد و  $\gamma_s$  وزن مخصوص می باشد. میزان جابه جایی سنگهای پنجه توسط دستگاه Point Gauge و میزان آبشستگی پنجه توسط Laser Bed Profiler محاسبه گردید. در آزمایشات مربوط به آبشستگی تمام عرض فلوم داده برداری می شد، اما نتایج حاصل از یک سوم میانی فلوم در مقایسات مد نظر قرار گرفت. ارتفاع موج و نوسانات سطحی آب توسط Wave Gauge اندازه گیری 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 اندازه گیری 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  $H, h, L, T$  و میزان آسیب و میزان آبشستگی در پای پنجه موج شکن در جدول ۱ آمده است.

## ۳- معادلات اساسی حاکم

پارامترهای کنترل کننده در انتقال رسوبات پارامتر شیلدز  $\theta = \frac{U_{fm}^2}{g(s-1)d_{50}}$  و پارامتر سرعت سقوط  $w/U_{fm}$  می باشد. پارامتر شیلدز بدست آمده در این تحقیق برای بستر ریز دانه برابر ۰.۰۴ تا ۰.۰۸ می باشد که بیشتر از مقدار بحرانی آستانه حرکت مواد بستر بوده و برای بستر درشت دانه برابر ۰.۰۱ تا ۰.۰۲ می باشد که کمتر از مقدار بحرانی آستانه حرکت مواد بستر می باشد [۲]. در این رابطه  $s$  وزن مخصوص دانه های بستر،  $g$  شتاب جاذبه و  $U$  حداکثر سرعت مواد در بستر ناشی از اصطکاک می باشند. همچنین پارامتر سرعت سقوط  $w/U_{fm}$  در حالت بستر ریز دانه برابر  $1/3$  تا  $1/6$   $w/U_{fm}$  می باشد که حاکی از این امر است که مواد بستر در هر دو نوع بستر معلق باقی

هنگامی که یک سازه در محیط دریایی ساخته می شود، الگوی جریان تحت تاثیر قرار می گیرد. تشکیل گردابه های نعل اسبی در جلوی سازه، گردابه خیزایی در پشت سازه، انکسار و تفرق، شکست امواج، اختلاف فشار و معکوس شدن گرادیان هیدرولیکی می توانند موجب افزایش نرخ انتقال رسوبات از پای سازه و آبشستگی و خرابی بعدی سازه را به همراه داشته باشد. در دهه های اخیر مطالعاتی گوناگونی در این زمینه انجام شده است. هنگامی که موج در جهت مستقیم به سازه برخورد می کند آبشستگی یک پدیده دوبعدی خواهد بود. نتایج حاصل از مطالعات دوبعدی آبشستگی و راهکارهای محافظت سازه نشان می دهد که بطور کلی عمق آبشستگی در امواج نامنظم کمتر از امواج منظم می باشد [۲]. نتایج حاصل از مدل سازی فیزیکی بر پایداری موج شکن توده سنگی نشان می دهد، امواج با تیزی زیاد تخریب بیشتری را به همراه دارند [۳]. همچنین عرض پنجه موج شکن اثری در پایداری سازه ندارد و نیز یک دسته بندی برای آسیب ارائه گردید [۴]. اگرچه اغلب دانسته ها بر پایه تجربیات می باشد اما شناخت و مطالعه هیدرودینامیک اطراف سازه برای دستیابی به یک طراحی و ساخت مناسب کاملا ضروری می باشد. از این رو در این تحقیق سعی شده با استفاده از مدل سازی فیزیکی پارامترها حاکم در طراحی موج شکن 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 می باشد. مقطع موج شکن در فاصله ۳۸ متری از مولد موج قرار گرفت. مقطع موج شکن در تمامی عرض فلوم جانمایی شد. پنجه از سنگهایی با اندازه  $D = 3$  cm ساخته شد.  $D$  از فرمول  $G = \gamma_s \pi D^3 / 6$  بدست آمده است

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

نکته‌ی کلیدی وجود جریانات یکنواخت<sup>۲</sup> در یک ستون آب، ناشی از امواج ایستا در جلوی موج شکن می‌باشد که باعث یک الگوی آبشستگی و رسوب‌گذاری در جلوی موج شکن به طور متناوب می‌شود [۳]. جریانات یکنواخت به کمیت‌های ارتفاع موج (H)، پرپود 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 ستیغ موج حداکثر بوده، آبشستگی و فرسایش در زیر پادگره<sup>۳</sup> حاصل از موج پیشرو<sup>۴</sup> و موج برگشتی<sup>۵</sup> حاصل شود.

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

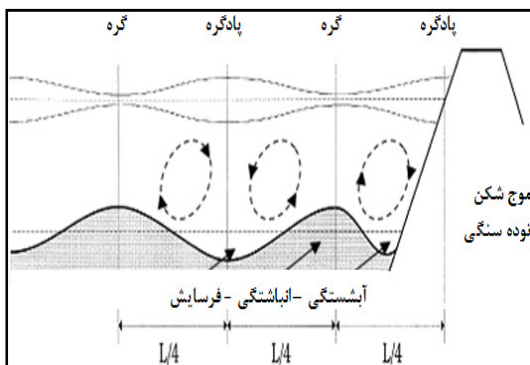
$$\frac{h_t}{H_s} = 1.5 \text{ باشد، حداقل وزن قطعات پنجه}$$

$$\frac{W}{2} \text{ (وزن آرمور) می‌باشد و هنگامی که مقدار}$$

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

$$\frac{W}{15} \text{ کاهش می‌یابد. که } h_t \text{ عمق آب در پای سازه و } H_s$$

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 فیلم برداری‌های 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، آبشستگی با مولفه‌های زیر بیان می‌گردد:

(۱)

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

که زاویه شیب موج شکن،  $Re = \frac{aU_m}{\nu}$ ،  $a$  دامنه حرکت اوربیتالی ذرات آب و  $U_m$  حداکثر سرعت اوربیتالی در بستر می‌باشد. علاوه بر این در آبشستگی برای بستر زنده<sup>۱</sup>، اثر  $u > u_{cr}$  زیاد مهم نبوده و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. فرمول تجربی ارائه شده [۳] برای حداکثر عمق آبشستگی در پای موج شکن توده سنگی به صورت تابعی از  $f$  که وابسته به شیب موج شکن ( $\alpha$ ) می‌باشد بیان می‌گردد:

(۲)

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

(۳)

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

جدول ۱- مشخصات انجام آزمایش بر حسب  $H, h, L, T$  و میزان آسیب و میزان آبستگي در پای پنجه موج شکن (علامت ستاره\*) معرف نتایج 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)	تیزی موج S	عمق به طول موج h/L	عمق آبستگي S (cm)	عمق آبستگي به ارتفاع S/H	پایداری* عدد	آسیب* پارامتر $N_{\%}$
R1	۵۴	۱:۰.۶۶	۸	۲	۴.۱۸	۱.۹۱	۰.۱۲۹	۲.۳	۰.۲۸۷	۱.۹۷	۱.۱۹
R2	۵۴	۱:۰.۶۶	۸	۳	۶.۶۲	۱.۲۱	۰.۰۸۱	۲.۴	۰.۳	۱.۹۷	۱.۸۳
R3	۵۴	۱:۰.۶۶	۸	۴	۸.۹۹	۰.۸۸	۰.۰۶۰	۲.۶	۰.۳۲۵	۱.۹۷	۲.۱۲
R4	۵۴	۱:۰.۶۶	۱۰	۲	۴.۱۸	۲.۳۹	۰.۱۲۹	۲.۳	۰.۲۳	۲.۴۷	۱.۳۱
R5	۵۴	۱:۰.۶۶	۱۰	۳	۶.۶۲	۱.۵۱	۰.۰۸۱	۲.۵	۰.۲۵	۲.۴۷	۲.۰۶
R6	۵۴	۱:۰.۶۶	۱۰	۴	۸.۹۹	۱.۱۱	۰.۰۶۰	۲.۸	۰.۲۸	۲.۴۷	۲.۳۲
R7	۵۴	۱:۰.۶۶	۱۲	۲	۴.۱۸	۲.۸۷	۰.۱۲۹	۲.۴	۰.۲	۲.۹۶	۲.۰۴
R8	۵۴	۱:۰.۶۶	۱۲	۳	۶.۶۲	۱.۸۱	۰.۰۸۱	۲.۸	۰.۲۳۳	۲.۹۶	۲.۸۹
R9	۵۴	۱:۰.۶۶	۱۲	۴	۸.۹۹	۱.۳۳	۰.۰۶۰	۳.۳	۰.۲۷۵	۲.۹۶	۳.۶۴
R10	۴۸	۱:۰.۶۶	۸	۲	۳.۹۸	۲.۰۱	۰.۱۲۰	۲.۳	۰.۲۸۷	۱.۹۷	۱.۹۱
R11	۴۸	۱:۰.۶۶	۸	۳	۶.۲۷	۱.۲۷	۰.۰۷۶	۲.۵	۰.۳۱۲	۱.۹۷	۲.۱۵
R12	۴۸	۱:۰.۶۶	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	۶.۶۲	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 نامظم 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 آبستگي 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 پیشرونده اجازه عقب نشینی کامل را به امواج بازگشتی 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 آبستگي 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<sup>۶</sup> در پژوهش حاضر می بایست مقدار یکسانی بین مدل و نمونه اصلی داشته باشد.

$$Fr = \frac{U^2}{gL} \quad (۴)$$

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

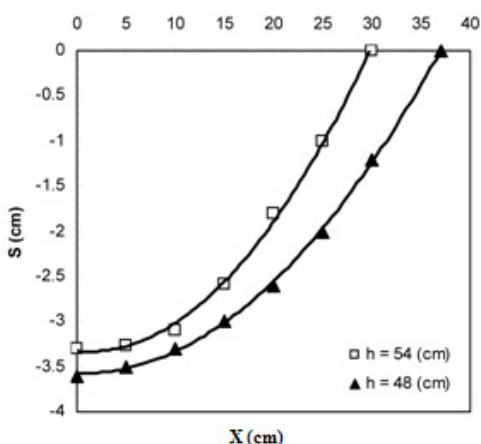
همچنین عدد رینولدز<sup>۷</sup> جهت حصول اطمینان از امکان نادیده گرفتن اثرات لزجت رابطه زیر برای مدل کنترل می شود [۶].

$$Re = \frac{\sqrt{gHs} \cdot D_n}{\nu} > 3 \times 10^4 \quad (۵)$$

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

۴-۲- اثر عمق آب

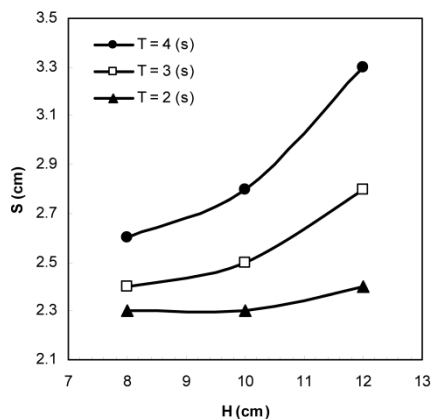
بستر جلوی سازه بطور مستقیم از عمق آب اثر پذیر است. هنگامی که عمق آب کاهش می یابد، نسبت  $\frac{h_t}{h}$  زیاد شده و متقابلا اثر موج بر بستر و پنجه نیز افزایش می یابد که باعث تلاطم بیشتر در پای سازه شده و آبشستگی و آسیب را بر پنجه به همراه خواهد داشت. همانطور که در شکل ۵ مشخص می باشد میزان آبشستگی و انتقال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



شکل ۵- میزان آبشستگی پنجه موج شکن  
( $T = 10$  (s),  $\alpha = 1:0$  + / $66$ )

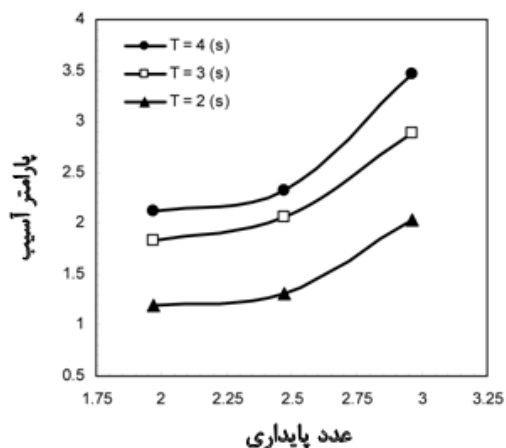
در شکل ۶ تغییرات پارامتر آسیب به عنوان تابعی از عدد پایداری برای نسبت  $\frac{h_t}{h}$  بیان گردیده است. همانطور که در شکل دیده می شود برای بستر درشت دانه در نسبت ثابت  $\frac{h_t}{h}$  میزان پارامتر آسیب با عدد پایداری افزایش می یابد. علاوه بر کاهش سطح آب هنگامی که امواج برگشتی از سازه دور می شود سطح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

سنگها را به سمت بالا جابه جا می کند. در امواج کوتاه انرژی کم حاصله تنها قادر به ایجاد یک نیروی بلند کننده می باشد و توان جابه جایی سنگها را به سمت بالا ندارد و امواج سریعاً شروع به عقب نشینی کرده و سنگها با نیروی وزن خود به سمت پایین پنجه جابه جا می شوند. شکل ۴ بیانگر ارتباط بین پارامتر آسیب و عدد پایداری در پرپود ثابت برای بستر درشت دانه می باشد.



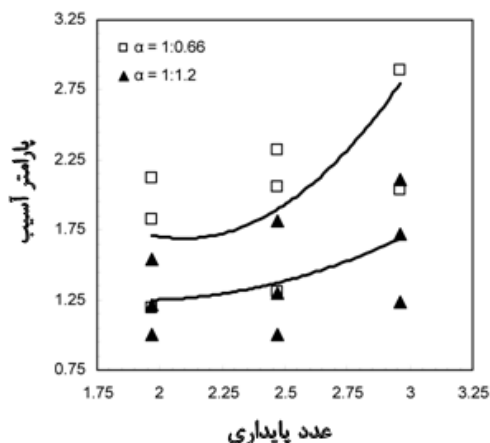
شکل ۳- میزان آبشستگی پنجه موج شکن  
( $h = 54$  (cm),  $\alpha = 1:0$  + / $66$ )

همانطور که در شکل نشان داده شده است در عدد پایداری ثابت میزان پارامتر آسیب با افزایش پرپود موج زیاد می شود.



شکل ۴- میزان آسیب پنجه موج شکن  
( $h = 54$  (cm),  $\alpha = 1:0$  + / $66$ )

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 شیب یکسان 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 آبستگي و پایداری پنجه مقطع موج شکن توده سنگی آزمایشگاهی بررسی گردید که مهمترین نتایج آن در زیر خلاصه گردیده است:

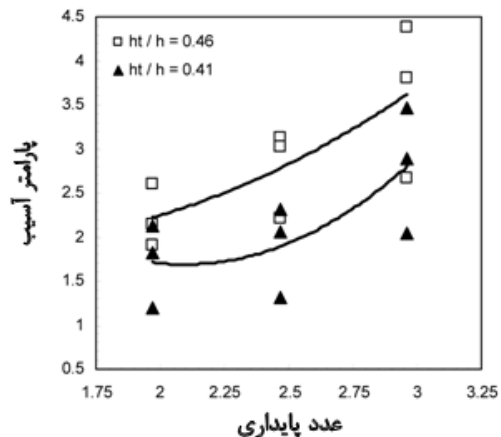
مؤثرترین پارامتر در پایداری موج شکن توده سنگی پرپود موج می‌باشد.

با افزایش شیب موج شکن توده سنگی میزان آبستگي و آسیب پنجه بیشتر می‌شود.

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

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

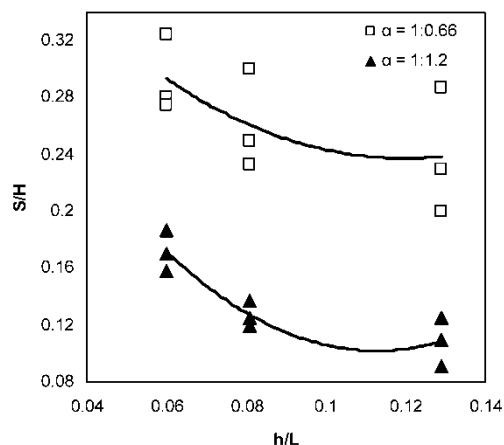
در تمامی آزمایشات میزان آبستگي و آسیب پنجه در دو انتهای کناری فلوم بیشتر است. علت این امر را



شکل ۶- میزان آسیب پنجه موج شکن ( $\alpha = 1.066$ )

#### ۴-۳- اثر شیب 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 شیب سازه کمتر باشد میزان آبستگي در پای سازه کمتر می‌باشد چرا که بازتاب امواج پیشرونده شدت کمتری داشته و در نتیجه جریان‌ات برگشتی کاهش می‌یابد و میزان آبستگي در پای موج شکن کاهش خواهد یافت.



شکل ۷- میزان آبستگي پنجه موج شکن

$$(T = 1.0 \cdot h = (s), 54 \text{ (cm)})$$

همچنین در بستر درشت دانه با افزایش شیب 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-Sommer, 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