یادداشت فنی

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

مجید اسکافی[1*]، حسین مروتی[2] ، کامران لاری[3]

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 آبمورد مطالعه قرار گرفت. مولد موج از نوع پیستونی و تولیدکننده امواج منظم بود. با داده‌برداری‌های 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 پریود موج بر میزان عمق آبشستگی نسبت به سایر موارد می باشند. 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 برای سازه محسوب شوند. همچنین نتایج در نمودار ها، جداول و شکلها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

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

TECHNICAL NOTE

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

M. Eskafi[1], H. Morovvati[2], K. Lari[3]

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@ymail.com

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.7.7]

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

هنگامی که یک سازه در محیط دریایی ساخته می‌شود، الگوی جریان تحت تاثیر قرار می‌گیرد. تشکیل گردابه‌های نعل اسبی 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 آبشستگی 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 برخورد می‌کند آبشستگی یک پدیده دوبعدی خواهد بود. نتایج حاصل از مطالعات دوبعدی آبشستگی و راهکارهای محافظت سازه نشان می‌دهد که بطور کلی عمق آبشستگی در امواج نامنظم کمتر از امواج منظم می باشد [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 کاملا 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. D از فرمول $G = \gamma_S \pi D^3 / 6$ بدست آمدهاست [۲]. در این فرمول G متوسط وزن سنگها می باشد و γ_S وزن مخصوص می‌باشد.

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 داده‌برداری 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 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 H, h, L, T و میزان آسیب و میزان آبشستگی در پای پنجه موج‌شکن 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} می‌باشد. پارامتر شیلدز بدست آمده در این تحقیق برای بستر ریز دانه برابر۰.۰۴ تا۰.۰۸ می‌باشد که بیشتر از مقدار بحرانی آستانه حرکت مواد بستر بوده و برای بستر درشت دانه برابر ۰.۰۱ تا ۰.۰۲ 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 ۱/۳ تا ۱/۶ = w/U_{fm} می‌باشد که حاکی از این امر است که مواد بستر در هر دو نوع بستر معلق باقی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.7.7]

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 کاملا مشخص می‌باشد.



شکل ۱- بستر ریز دانه پس از انجام آزمایش

در آنالیز ابعادی، برای حالت انتقال بصورت غیر معلق، آبشستگی با مولفه های زیر بیان می‌گردد :

(۱)

$$\frac{S}{H}=f\left(\frac{h}{L},\alpha,\theta,\frac{L}{d_{50}},\mathrm{Re}\right) \quad (۱)$$

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

(۲)

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

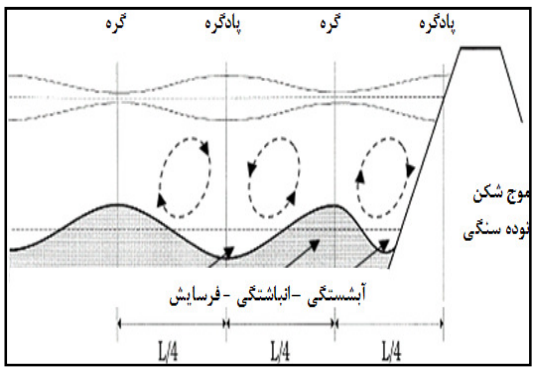
(۳)

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

$$30^\circ\le\alpha\le90^\circ$$

نکته‌ی کلیدی وجود جریانات یکنواخت[۲] در یک ستون آب، ناشی از امواج ایستا در جلوی موج‌شکن می‌باشد که باعث یک الگوی آبشستگی و رسوب‌گذاری در جلوی موج‌شکن به طور متناوب می‌شود [۳]. جریانات یکنواخت به کمیت های 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 ستیغ موج حداکثر بوده، آبشستگی و فرسایش در زیر پادگره[۳] حاصل از موج پیشرو[۴] و موج برگشتی[۵] حاصل شود.

اساسا پایداری پنجه موج‌شکن توده سنگی بصورت تابعی از پایداری لایه آرمور می باشد. هنگامی که مقدار $\frac{h_t}{H_s}=1.5$ باشد، حداقل وزن قطعات پنجه $\frac{W}{2}$(W وزن آرمور) می باشد و هنگامی که مقدار $\frac{h_t}{H_s}>2$ باشد، وزن قطعات پنجه به میزان $\frac{W}{10}$ تا $\frac{W}{15}$ کاهش می‌یابد. که h_t عمق آب در پای سازه و H_s موج شاخص می‌باشد [۴].



شکل ۲- اثر متقابل موج و سازه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.7.7]

جدول ۱- مشخصات انجام آزمایش بر حسب T، L، h، H و میزان، آسیب و میزان آبشستگی در پای پنجه موج‌شکن (علامت ستاره (*) معرف نتایج حاصل از پنجه در شرایط بستر درشت دانه می‌باشد)

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 آبشستگی S (cm)	عمق آبشستگی 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

انتخاب مقیاس مناسب جهت مدل هیدرولیکی مهمترین بخش از مطالعات مقدماتی مدل‌سازی فیزیکی است. عدد فرود[۶] در پژوهش حاضر می‌بایست مقدار یکسانی بین مدل و نمونه اصلی داشته باشد.

$$F_r = \frac{U^2}{gL} \qquad (۴)$$

که در این رابطه g شتاب جاذبه، L طول موج و Uسرعت می‌باشد.

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

$$\mathrm{Re} = \frac{\sqrt{gHs}.Dn}{\upsilon} > 3\times10^4 \qquad (۵)$$

که در این رابطه D_n قطر اسمی، g شتاب جاذبه، υ ویسکوزیته سینماتیکی آب می‌باشد. در صورت قرار دادن این مقادیر در رابطه فوق‌الذکر مشخص می‌شود 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

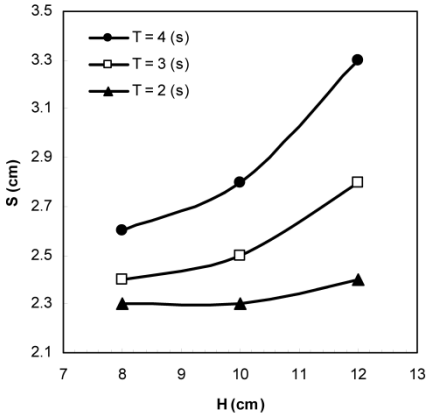
هنگامی که آزمایشات با امواج نامظم انجام می‌گردد ارتفاع موج ریشه دوم میانگین (H_{rms}) خواهد بود که در این حالت با توجه به کاهش میزان ارتفاع موج ریشه دوم میانگین نسبت به ارتفاع موج منظم آبشستگی و آسیب کمتری حاصل می‌گردد [۳].

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 می‌دهد که درست در این لحظه سطح آب پایین آمده و شرایط آسیب پذیری برای سازه فراهم می‌گردد. همانطور که در شکل ۳ دیده می شود در ارتفاع ثابت آبشستگی 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

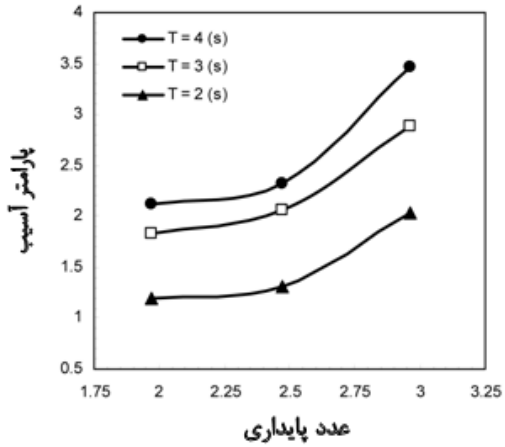
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.7.7]

سنگها را به سمت بالا جابه جا می‌کند. 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 سریعا شروع به عقب‌نشینی کرده و سنگها با نیروی وزن خود به سمت پایین پنجه جابه‌جا می‌شوند. شکل ۴ بیانگر ارتباط بین پارامتر آسیب و عدد پایداری در پریود ثابت برای بستر درشت دانه می‌باشد.



شکل ۳- میزان آبشستگی پنجه موج‌شکن
(h = ۵۴ (cm) ,α=۱:۰ ۰/۶۶)

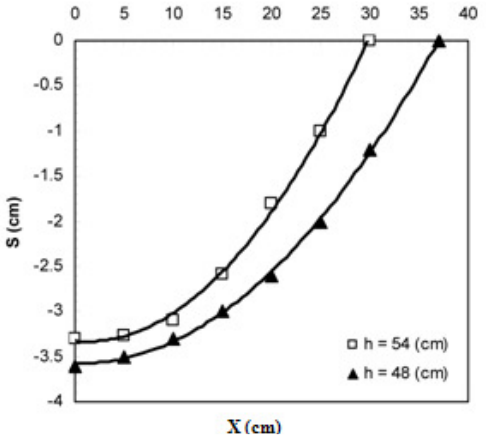
همانطور که در شکل نشان داده شده است در عدد پایداری ثابت میزان پارامتر آسیب با افزایش پریود موج زیاد می‌شود.



شکل ٤- میزان آسیب پنجه موج شکن
(h = ۵۴(cm) ,α=۱:۰ ۰/۶۶)

۴-۲- اثر عمق آب

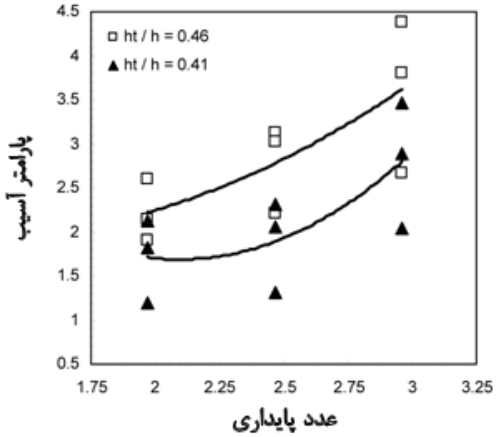
بستر جلوی سازه بطور مستقیم از عمق آب اثر پذیر است. هنگامی که عمق آب کاهش می یابد، نسبت $\frac{h_t}{h}$ زیاد شده و متقابلا اثر موج بر بستر و پنجه نیز افزایش می‌یابد که باعث تلاطم بیشتر در پای سازه شده و آبشستگی و آسیب را بر پنجه به همراه خواهد داشت. همانطور که در شکل ۵ مشخص می‌باشد میزان آبشستگی و انتقال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



شکل ۵- میزان آبشستگی پنجه موج شکن
(T = ۱۰ (s) ,α=۱:۰ ۰/۶۶)

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 می یابد. علاوه بر کاهش سطح آب هنگامی که امواج برگشتی از سازه دور می‌شود سطح آب پایین آمده و موج پیشرونده جدید با حجم آب به روی سازه شکسته شده که این سیستم هیدرودینامیکی باعث حرکت سنگ‌های پنجه می‌گردد.

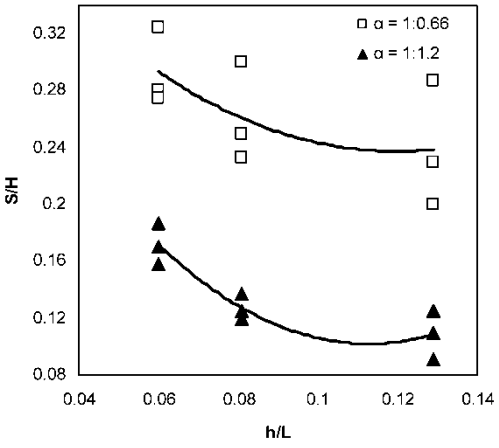
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.7.7]



شکل ٦- میزان آسیب پنجه موج شکن (α=۱:۰ ۰/۶۶)

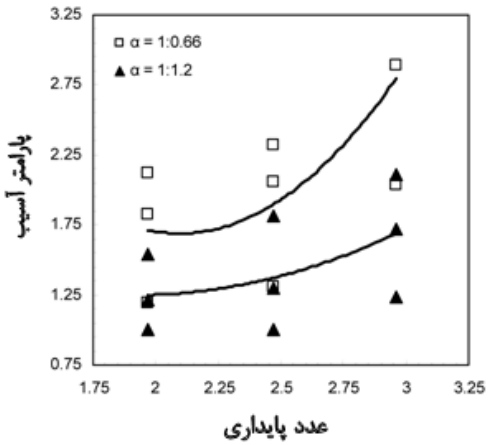
۴-۳- اثر شیب سازه

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 آبشستگی در پای سازه کمتر می‌باشد چرا که بازتاب امواج پیشرونده شدت کمتری داشته و در نتیجه جریانات برگشتی کاهش می‌یابد و میزان آبشستگی در پای موج‌شکن کاهش خواهد یافت.



شکل ۷- میزان آبشستگی پنجه موج شکن
(T = ۱۰h = (s) ,۵۴(cm))

همچنین در بستر درشت دانه با افزایش شیب موج شکن اثر متقابل بازتاب موج و امواج پیشرونده 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 = ٥٤ (cm)

۵- نتیجه‌گیری

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

موثرترین پارامتر در پایداری موج‌شکن توده سنگی پریود موج می‌باشد.

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

کاهش عمق آب، افزایش میزان آسیب پنجه و آبشستگی 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 جابه جا شدن سنگهای پنجه به سمت پایین می‌شوند، اما امواج با پریود بلندتر قادر به جابه‌جایی سنگ‌ها به سمت بالای پنجه نیز می‌باشند.

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.7.7]

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 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.7.7]