

شبیه‌سازی بالاروی موج از موج‌شکن سکویی با بهره‌وری از نرم‌افزار FLOW-3D

محمود ذاکری نیری^{۱*}، فرزاد میلانیان^۲، سعید گلپیان^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۲

چکیده

در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی به بررسی اثر عرض سکو (B)، بر بالاروی موج (R_u) روی موج‌شکن‌های سکویی پرداخته شده است. این شبیه‌سازی در محیط Flow-3D انجام شده است. Flow-3D تلفیقی از نرم‌افزارهای اتوکد (CAD) و پویایی سیالات محاسباتی (CFD) است. پویایی سیالات محاسباتی علمی است که به مطالعه‌ی عددی پدیده‌های موجود در زمینه‌ی سیالات می‌پردازد. نتایج عددی نشان داد، که روش شبیه‌سازی می‌تواند نتایج دقیقی را برای بالاروی موج از موج‌شکن‌های سکویی ارائه کند. متغیرهای اصلی در این شبیه‌سازی: عرض سکو، زاویه شیب جلویی موج‌شکن، دوره‌ی تناوب و ارتفاع موج برخوردی، و عمق سطح ایستابی می‌باشند. در کل ۳۵۰ شبیه‌سازی برای پوشش تاثیر این فراسنج‌ها انجام شده است. نشان داده شد که با افزایش ۴۵٪ عرض سکو، بالاروی موج از موج‌شکن سکویی ۳۶٪ کاهش می‌یابد؛ فراسنج سازه‌ای عرض سکو، در فراسنج‌های هیدرولیکی از جمله بالاروی موج، بسیار تاثیر گذار است؛ و با توجه به افزایش عرض سکو، بالاروی موج کاهش می‌یابد. همچنین، مقدار بالاروی موج از موج‌شکن سکویی با افزایش ۶۷٪ ارتفاع و ۵۳٪ پیروید موج، به ترتیب ۵۳٪ و ۳۶٪ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بالاروی موج، موج‌شکن سکویی، شبیه‌سازی عددی، Flow-3D.

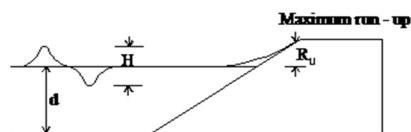
^۱ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران (Zakeri@iiu.ac.ir)

^۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، تهران، ایران

^۳ سعید گلپیان، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

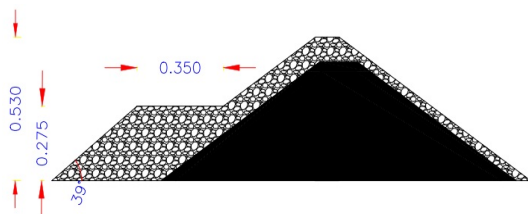
مقدمه

خاطر دشواری ایجاد شرایطی مشابه آنچه در طبیعت به وقوع می‌پیوندد، از روش‌های آزمایشگاهی کمتر استفاده



شکل ۱- فراسنج‌های هیدرولیکی بالاروی.

گردیده است. از این رو، روش‌های عددی به رغم پیچیدگی‌های آنها و به دلیل آنکه شرایط مختلف موج و اشکال مختلف سازه در آن با تغییرات اندک در برنامه قابل بررسی است، مورد اقبال عمومی محققین قرار گرفته‌اند، لذا در این تحقیق سعی بر آن است تا شبیه‌سازی عددی اثر سکو، با توجه به ارتفاع و دوره‌ی تناوب موج بر میزان بالاروی موج از موج‌شکن سکویی، محاسبه و مورد بحث و بررسی قرار گیرد. متغیرهای اصلی مسئله عبارتند از: عرض سکو، الگوی چینش قطعات زره، شیب موج‌شکن، ارتفاع، تیزی و دوره‌ی تناوب موج. در **Error! Unknown switch argument.** نمونه‌های از یک موج‌شکن سکویی را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲- مقطع موج‌شکن سکویی.

کارهای انجام شده در این زمینه را می‌توان به دو دسته‌ی مطالعات انجام شده آزمایشگاهی و عددی طبقه بندی کرد. تحقیقات بنیادی وسیعی با استفاده از نمونه‌های فیزیکی در مورد بالاروی، پایین‌روی، روگذری و انعکاس امواج از روی سازه‌های مختلف در دو دهه‌ی گذشته در موسسه‌ی هیدرولیک دلفت هلند، و همچنین سایر مراکز تحقیقاتی دنیا انجام گرفته‌اند.

وان در میبیر و د وال (۱۹۹۲) بر اساس آزمایش‌های خود به ارائه‌ی یک رابطه‌ی ساده برای بالاروی نسبی بر روی شیب هموار پرداختند. وان در میبیر (۱۹۹۳)، به کمک آزمایش‌های متعدد، برای سازه‌های با هسته‌ی نفوذپذیر و ناتراوا، مجموع روابط تجربی بالاروی را برحسب فراسنج تشابه شکست برای دوره‌ی تناوب متوسط ارائه

امروزه با توجه به گسترش علم و دانش و فن، و با ازدیاد روز افزون جمعیت در مناطق ساحلی، حفاظت از سواحل و بنادر از اهمیت خاصی برخوردار است. از این‌رو، با توجه به پر هزینه بودن ساخت سازه‌های حفاظت از سواحل، طراحی صحیح و بهینه‌ی این سازه‌ها، هم از نظر پایداری و کارایی و هم از نظر اقتصادی، کاملاً ضروری به نظر می‌رسد.

عمل موج بر روی یک سازه‌ی ساحلی موجب نوسان سطح آب پیرامون محدوده‌ی قائمی که معمولاً بزرگتر از ارتفاع موج تابشی است، می‌شود. سطح نهایی فوقانی و تحتانی که هر موج به آن‌ها می‌رسد، به ترتیب بالاروی و پایین‌روی موج نامیده می‌شود. یک طراحی مطمئن و توجیه پذیر از جنبه‌ی اقتصادی سازه‌ی ساحلی به میزان بالاروی موج وابسته است. به دلیل وابستگی میزان بالاروی به فراسنج‌های مختلف، و عدم قطعیت‌هایی در ماهیت پدیده، تخمین دقیق این فراسنج هنگام طراحی میسر نیست. از جمله فراسنج‌های عدم قطعیت می‌توان به تراز طراحی آب، و همچنین امواج طراحی اشاره کرد.

بالاروی موج به مقدار زیادی به نوع و نحوه‌ی چیدمان قطعات زره (لایه حفاظ) در شیب رو به دریای موج‌شکن بستگی دارد، که مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. به طور کلی، می‌توان گفت که بالاروی موج به عوامل مختلفی وابسته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

فراسنج‌های هندسی (شیب لایه زره، عمق آب، ارتفاع آزاد (...)

فراسنج‌های سازه‌ای (عرض سکو، تخلخل، نفوذپذیری، شکل سنگ یا قطعه‌ی زره و...)

فراسنج‌های هیدرولیکی (متوسط تراز آب، دوره‌ی تناوب موج، ارتفاع موج و...)

مقدار بالاروی (R_u) را می‌توان با استفاده از روابط ساده‌ی تجربی، که خود از نتایج آزمایش‌های نمونه‌ی فیزیکی حاصل شده‌اند، و یا نمونه‌های عددی برآورد نمود. شکل ۱ پارمترهای هیدرولیکی بالاروی را نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر به رغم قرابت بیشتر با طبیعت پدیده، به دلیل هزینه‌ی بالای تجهیز آزمایشگاه، و نیز به

ارزان‌تر با ایجاد سکو بیان نموده و پس از آزمایش دریافتند، که عرض سکو یک فراسنج مهم در تغییر شکل موج‌شکن سکویی است، به طوری که با افزایش آن، میزانیس رفت سکو کاهش می‌یابد.

در دوده‌ی اخیر، تلاش‌هایی به منظور ایجاد نمونه‌ی عددی بالا روی موج صورت گرفته است. نمونه‌ها ی اولیه عموماً به شبیه‌سازی پدیده‌ی بالا روی بدون در نظر گرفتن شکست موج می‌پرداختند. اولین تلاش‌های اساسی در این زمینه به وسیله‌ی کوبایاشی و وارجاننو (۱۹۸۹) صورت گرفت که به شبیه‌سازی عددی روگذری، و بالاروی موج از سازه‌ی ساحلی نفوذ ناپذیر شیب‌دار پرداختند. در ادامه، با افزایش قدرت محاسباتی رایانه‌ها، قابلیت شبیه‌سازی سه بعدی در شرایط امواج نامنظم نیز حاصل شد.

پژوهش حاضر بررسی بالاروی موج در موج‌شکن‌های سکویی پوشیده با قطعات زره می‌باشد. شبیه‌سازی برای محدوده‌ی گسترده‌ای از فراسنج‌های موثر از جمله عرض سکو، دوره‌ی تناوب و ارتفاع موج انجام گرفته است، بنابراین، اساس مدل‌سازی بررسی تاثیر عرض سکو بر میزان بالاروی می‌باشد. در ادامه، تاثیر ارتفاع و دوره‌ی تناوب موج نیز در مورد بالاروی موج از موج‌شکن سکویی با عرض ۳۵ سانتی‌متر بررسی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی عددی

مطالعه‌ی تجربی پدیده‌های موجود در زمینه‌ی سیالات، اطلاعات دقیق و با ارزشی را در مورد این آنها در اختیار محققین می‌گذارد، ولی به دلیل محدودیت در تجهیزات، زمان و هزینه، و همچنین عدم ایجاد تشابه کامل بین جریان در نمونه‌های فیزیکی و جریان طبیعی، این نوع مطالعه در اغلب موارد راه حل خوبی نیست. امروزه استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی در مطالعه‌ی محیط سیال رشد و توسعه یافته‌اند، و به دلیل تولید نتایج قابل اطمینان، توانسته‌اند جایگزین خوبی برای نمونه‌های فیزیکی باشند. این شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم افزار Flow-3D انجام گرفته است. نرم افزار Flow-3D یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه‌ی هیدرولیک و مهندسی عمران آب است که بر پایه روش‌های پویائی سیالات محاسباتی (CFD) کار می‌کند.

اعتبارسنجی نمونه‌ی اولیه

برای دستیابی به این هدف سه گروه شبیه‌سازی انجام شده

نمود. اهرنس و وارد (۱۹۹۱) با استفاده از نمونه‌ی آزمایشگاهی، بالاروی موج ناشی از وجود سکو را، به صورت تابع نمایی از هندسه‌ی سکو بیان کردند. آنها، به منظور تخمین بیشینه‌ی مقدار بالاروی موج روی شیب موج‌شکن توده‌ی سنگی با وجود سکو، رابطه‌ی تجربی را ارائه نمودند. جایاربتن و شانکار (۲۰۰۲) آزمایش‌هایی را در یک نهر پایه دار موج برای بررسی تاثیر متغیرهای ارتفاع، دوره-ی تناوب و تیزی موج، فراسنج تشابه شکست، زبری، ضخامت لایه‌ییزره و تخلخل در مورد بالاروی و سرریزی امواج انجام دادند.

وان جنت (۲۰۰۲) میزان بالاروی امواج را بر روی شیب سازه‌های ساحلی برای خطوط ساحلی کم عمق، مورد تحقیق قرار داده است. او در تحقیقات خود نتایج مربوط به اندازه‌گیری را بر روی سازه واقعی، نمونه‌ی فیزیکی و عددی تلفیق کرد، و رابطه‌ی کاربردی موثری را برای دو حالت شرایط آب عمیق در مجاورت سازه، و خطوط ساحلی کم عمق پیشنهاد نمود.

مقیم و همکاران (۱۳۷۸) تحقیقات آزمایشگاهی را با لحاظ نمودن شرایط موج‌شکن سکویی به سبک ایرانی انجام داده و نشان دادند، که بر خلاف نظر محققان قبلی، عرض فرسایش یافته‌ی بی‌بعد شده با H_0^2/T_0 متناسب بوده، و در نهایت، فراسنج بی‌بعد شده‌ی جدید را به صورت $H_0\sqrt{T_0}$ بیان نمودند.

نجفی جیلانی و منشی زاده (۲۰۱۰) به آزمایش میزان بالاروی و انتقال موج از روی موج‌شکن پوشیده شده با قطعات حفاظتی آنتی‌فر پرداختند. آنها از سه نوع الگوی مختلف چیدمان قطعات آنتی‌فر، شامل دو نوع متفاوت چینش نامنظم و یک نوع چینش منظم در آزمایش‌های خود استفاده کرده و به طور کمی نشان دادند که با افزایش بی‌نظمی در چینش قطعات آرمور، میزان بالا روی موج به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد.

شفیعی فر و مطلبی (۱۳۸۹) با استفاده از نمونه‌ی آزمایشگاهی به بررسی فاصله‌ی سطح آب تا تراز قرارگیری سکوی موج‌شکن به سبک ایرانی پرداخته‌اند. ایشان دریافتند که فراسنج مزبور در پایداری هیدرولیکی موج-شکن تاثیر گذار بوده، و مقدار آن بستگی نوع، محل و مقدار آسیب‌های وارده به سازه دارد.

شفیعی فر و شاکری (۲۰۱۳) اندیشه‌ی اصلی را در رابطه با طراحی موج‌شکن‌های سکویی با یک ساختار

حالت پایدار ایستائی موج شکن سکویی انجام شد، فقط ارتفاع موج ۰,۱۰۵ متر در حالت پایدار پویائی موج‌شکن سکویی بررسی شد. مقادیر فراسنج‌های ابعادی این مدل در جدول ۲، و فراسنج‌های بدون بعد در جدول ۳ مشخص شده‌اند. برای به حداقل رساندن اثر ابعاد جهت پایداری موج‌شکن سکویی، با توجه به تحقیقات وان در مییر (۱۹۸۸)، عدد رینولدز در رابطه‌ی ۴، باید بزرگتر از $1 \times 10^4 < R_e < 4 \times 10^4$ و کوچکتر از 4×10^4 باشد.

$$R_e = \frac{\sqrt{gH_s}}{\nu} \times D_{n50}(۴)$$

که در آن $\sqrt{gH_s}$ مشخصه‌ی سرعت، D_{n50} قطر اسمی متوسط سنگدانه و ν لزجت جنبشی ($\nu = 10^{-6}$) هستند. پایین‌ترین مقدار عدد رینولدز برای این شبیه‌سازی، با توجه به کمترین ارتفاع موج ۰,۰۷ متر، $۱,۷۴ \times 10^4$ و بالاترین مقدار آن، با توجه به بیشترین ارتفاع موج ۰,۱۰۵ متر، $۲,۱۳ \times 10^4$ است.

جدول ۲- محدوده‌ی فراسنج‌های ابعادی.

محدوده	نماد	فراسنج
۰,۳ - ۰,۵۵	B	عرض سکو (متر)
۰,۷۰ - ۰,۱۰۵	H _s	ارتفاع موج (متر)
۰,۸ - ۱,۵	T _s	دوره‌ی تناوب موج (ثانیه)
۰,۲۷۵	h _B	ارتفاع سکو از پنجه سازه (متر)
۰,۲۴	d	عمق آب (متر)

جدول ۳- محدوده‌ی فراسنج‌های بی‌بعد.

محدوده	فراسنج
۱,۹۶ - ۲,۹۴	H _o
۲۴,۸۶	T _o
۴۸,۷۲ - ۷۳,۰۸	H _o T _o
۱۴,۲۸ - ۲۶,۱۹	B/D _{n50}
۱۱,۴۳	d/D _{n50}
۳,۹۲ - ۲,۶۲	h _B /H _s
۱,۷۴*۱۰ ^۴ - ۲,۱۳*۱۰ ^۴	R _e

برای ارزیابی و بررسی این نمونه‌ی عددی از اطلاعات آزمایشهای صورت گرفته در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس، به وسیله‌ی شفیع‌فر و مطلبی (۱۳۸۹)، شفیع‌فر و شاکری (۲۰۱۳) استفاده می‌کنیم. این بررسی در نه‌ری پایدار به طول ۱۶ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱

است. در همه آزمایش‌ها طول هر مدل از دو قطعه‌ی مجزا با اندازه روزنه‌های متفاوت تشکیل شده است. ویژگی‌های مصالح به کار رفته در لایه‌های مختلف موج‌شکن سکویی در جدول ۱ مشخص شده‌اند. لایه‌های موج شکن شامل: هسته (core)، لایه فیلتر (filter) و لایه آرمور (armour) می‌باشند، که با توجه به قطر اسمی سنگدانه‌ها رسم و با تبدیل به پرونده STL شبیه‌سازی شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در شبیه‌سازی.

نوع لایه	جرم	قطر	لایه
استاندارد	۲۷۰۰	۰,۰۲۱	لایه‌ی زره
استاندارد	۲۸۰۰	۰,۰۰۷	لایه‌ی صافی
متخلخل	۲۶۰۰	۰,۰۰۳	هسته

در ادامه، به بررسی پایداری موج‌شکن سکویی، جهت مشخص نمودن ارتفاع و دوره‌ی تناوب موج و تاثیر فراسنج سازه‌ای عرض سکو و فراسنج‌های هیدرولیکی ارتفاع و دوره‌ی تناوب موج بر بالاروی موج از موج‌شکن سکویی پرداخته شده است.

پایداری موج‌شکن سکویی تحت تاثیر ارتفاع موج با رابطه‌ی ۱ بیان شده است:

$$H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}}(۱)$$

که در آن H_o عدد پایداری، H_s ارتفاع موج و D_{n50} قطر اسمی متوسط سنگدانه است. Δ از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید که ρ_a جرم مخصوص سنگ و ρ جرم مخصوص آب می‌باشند:

$$\Delta = \frac{\rho_a}{\rho} - 1(۲)$$

وان در مییر (۱۹۸۸) تاثیر دوره‌ی تناوب و ارتفاع موج را همزمان، در مورد پایداری موج‌شکن توده‌ی سنگی با پارامتر بی‌بعد $H_o T_o$ بیان نمود:

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \times T_m \times \sqrt{g/D_{n50}}(۳)$$

در رابطه‌ی ۳، T_m دوره‌ی تناوب متوسط امواج و g شتاب گرانش می‌باشند. پیانک (۲۰۰۳) موج‌شکن‌های سکویی را با توجه به فراسنج‌های بی‌بعد ارائه شده به موج‌شکن‌های سکویی پایدار ایستائی ($H_o < 2.7$) و پایدار پویائی ($H_o T_o < 70$) و پایدار پویائی تا ارتفاع موج ۰,۱ متر در تقسیم‌بندی نمود. تمام آزمایشها تا ارتفاع موج ۰,۱ متر در

روزنه‌شبه‌سازی شد. اندازه و تعداد سلول‌ها در جدول ۲ و جدول ۳ برای دو قطعه مجزایه دست آمده‌اند. جدول ۲- اندازه‌ی سلول‌ها در جهت‌های X, Y, Z در

قطعه‌های ۱ و ۲.

اندازه سلول‌ها			
Δz	Δy	Δx	
(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	
۱	۵	۵	قطعه ۱
۰,۶	۰,۶	۰,۶	
۰,۷	۰,۷	۰,۷	قطعه ۲
۰,۸	۰,۸	۰,۸	
۰,۹	۰,۹	۰,۹	

جدول ۳- تعداد کل سلول‌ها در جهت‌های X, Y, Z در

قطعه‌های ۱ و ۲.

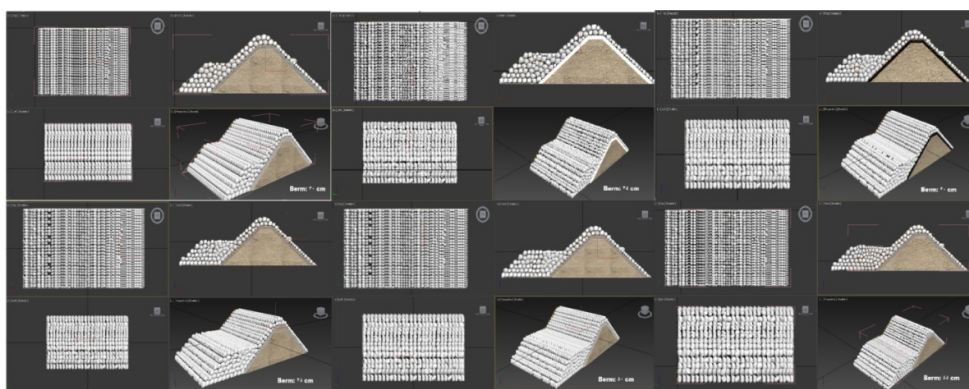
تعداد سلول‌ها			
Z جهت	Y جهت	X جهت	
۱۰۰	۲۰	۲۹۴	قطعه ۱
۱۶۷	۱۶۷	۲۵۰	
۱۴۳	۱۴۳	۲۱۵	قطعه ۲
۱۲۵	۱۲۵	۱۸۸	
۱۱۲	۱۱۲	۱۶۷	

متر صورت گرفته است. موج‌شکن‌ها با استفاده از شیب رو به دریا ۱:۰,۲۵ طراحی شده‌اند. ابتدا موج شکن بدون سکوی و سپس موج شکن‌های سکویی برای شش عرض مختلف سکوی ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ سانتی‌متر طراحی شده‌اند، ارتفاع موج (H_s) در محدوده‌ی ۷-۱۰,۵ سانتی‌متر، دوره‌ی تناوب موج (T_p) در محدوده‌ی ۰,۸-۱,۵ ثانیه و عمق متوسط آب (d)، ۲۴ سانتی‌متر می‌باشد. طیف موج در همه شبیه‌سازی‌ها خطی در نظر گرفته شده است.

شکل ۳ موج‌شکن سکویی را با عرض‌های متفاوت، در چهار نما نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی انجام گرفته، مجموع ارتفاع موج شکن سکویی ۵۳ سانتی‌متر، و ارتفاع هسته از کف ۲۷,۵ سانتی‌متر بوده، و هیچ‌گونه روگذری موج از روی موج‌شکن اتفاق نیفتاده است. در شبیه‌سازی انجام شده، میزان بالاروی موج از شیب جلویی موج‌شکن سکویی با توجه به عرض‌های مختلف سکوی اندازه گرفته شده است. جزئیات بررسی در مورد داده‌های اندازه‌گیری شده در بخش‌های زیر آمده‌اند.

محاسبه تعداد سلول در شبیه‌سازی

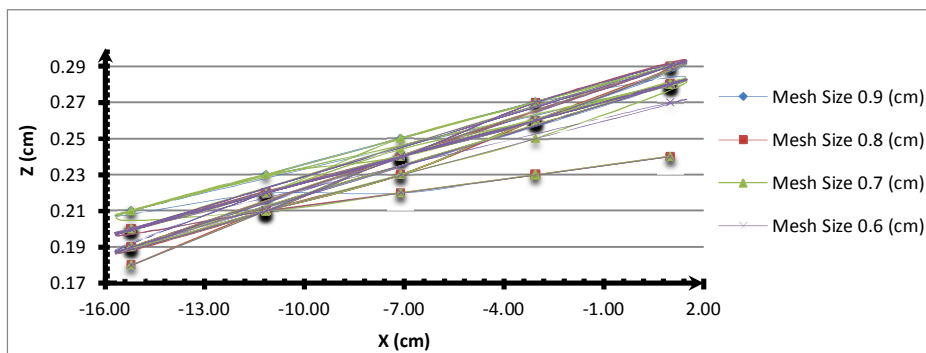
جهت به دست آوردن نتایج دقیق در حداقل زمان و تعداد سلول مناسب، باید قبل از شبیه‌سازی بهترین اندازه و تعداد روزنه محاسبه گردد. از این رو ۴ آزمون با ابعاد متفاوت



شکل ۳- نیم رخ و چگونگی توزیع سنگ‌های موج‌شکن سکویی با عرض سکوی ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ سانتی‌متر.

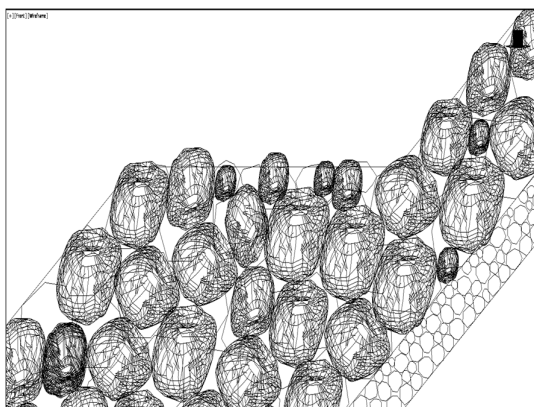
است. بنابراین در شبیه‌سازی مزبور اندازه روزنه ۰,۹ سانتی-متر توصیه می‌گردد. برای بهینه‌سازی زمان طراحی، نهر پایه دار در شبیه‌سازی به دو بخش مجزا تقسیم شد. شبکه-ی یک از ۵۸۸۰۰۰ سلول، ($\Delta z = \Delta x = \Delta y = 5\text{cm}$) و شبکه‌ی دو از روزنه‌های بزرگتر به تعداد ۲۰۹۴۸۴۸ (1cm،

اثر اندازه‌ی سلول بر نیم‌رخ سطح آب بر موج‌شکن سکویی با عرض ۳۰ سانتی‌متر در شکل ۴ نشان داده شده است. تفاوت ناچیز نتایج نیم‌رخ سطح آب در اندازه‌های روزنه ۰,۶، ۰,۷، ۰,۸ و ۰,۹ سانتی‌متر در شکل قابل رویت



شکل ۴- تاثیر اندازه سلول‌ها بر نیم‌رخ سطح آب بر موج‌شکن سکویی با عرض سکوی ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع موج ۱۰ سانتی-متر، دوره‌ی تناوب موج ۱،۲۷ ثانیه و عمق آب ۲۴ سانتی‌متر.

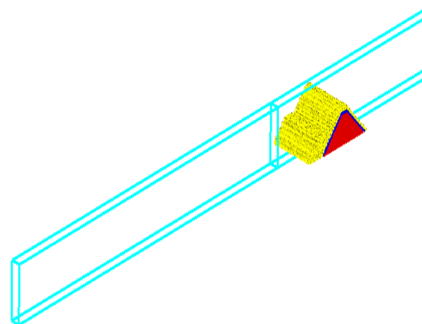
زره در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۷ نمودار شبیه-سازی عددی بالاروی موج از موج‌شکن توده‌ی سنگی بدون سکو را نشان می‌دهد. عدد ۰،۴۱۶ متر بیان‌کننده‌ی میزان بالاروی موج، روی موج‌شکن توده‌ی سنگی است که بیشترین مقدار را نسبت به بالاروی موج از موج‌شکن سکویی با عرض ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ دارد. در شکل ۸ می‌توان اثر عرض سکوی بی‌بعد را با کاهش میزان بالاروی موج از موج‌شکن سکویی با قطعات زره تحت الگوی چینش نامنظم مشاهده نمود. در این شکل، میزان بالاروی موج با ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر، و دو دوره‌ی تناوب موج مختلف ۱،۲۷ و ۱،۴ ثانیه به صورت مجزا نشان داده شده‌اند.



شکل ۶- چینش نامنظم قطعات زره در موج‌شکن سکویی.

مشاهده می‌گردد که با ایجاد سکو و با افزایش عرض آن، میزان بالاروی موج کاهش می‌یابد. ضریب کاهش بالاروی موج از موج‌شکن سکویی، با فرمول $\Gamma_B = \frac{R_B}{R_U}$ ارائه شده توسط پیلازیک (۱۹۹۰) قابل محاسبه است که در آن R_B بالاروی از شیب سازه‌ی دارای سکو، و R_U بالاروی روی شیب هموار و یکنواخت (بدون سکو) است.

سلول، $(\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.9 \text{ cm})$ تشکیل شده است. شکل ۵ قطعه‌های انفرادی جهت شبیه‌سازی بالاروی موج از موج‌شکن سکویی با عرض ۳۰ سانتی‌متر را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- قطعه‌های انفرادی جهت بهینه‌سازی اندازه‌ی روزنه بر روی موج‌شکن سکویی با عرض سکوی ۳۰ سانتی‌متر.

نتایج و بحث

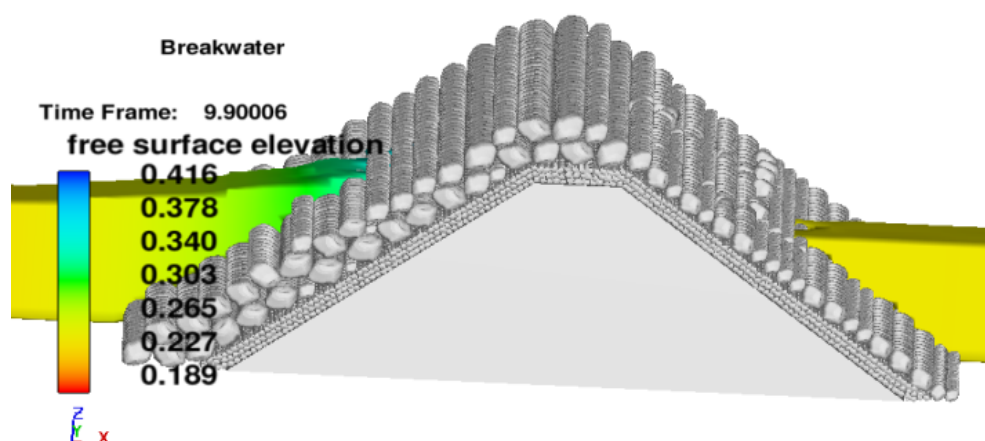
اثر عرض سکو (B) بر بالاروی موج (R_U) از موج‌شکن سکویی

هدف اصلی از انجام این شبیه‌سازی اندازه‌گیری بالاروی موج و بررسی اثر سکوی موج‌شکن بر میزان بالاروی بوده است.

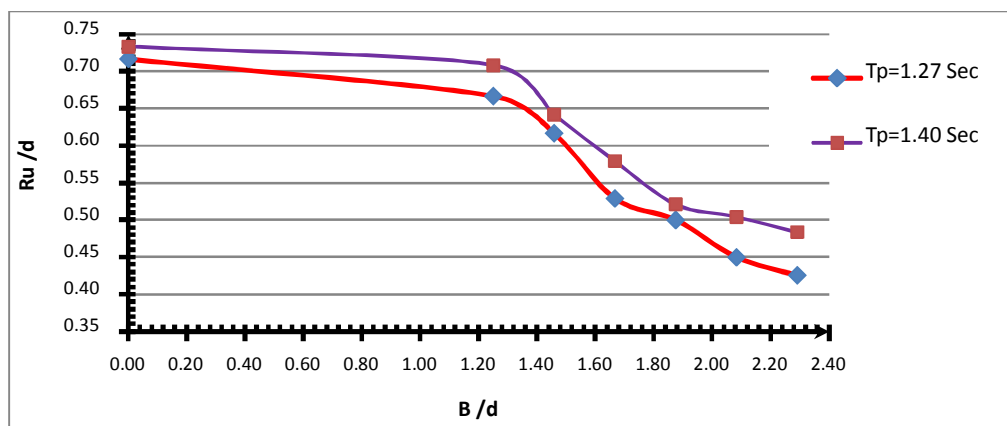
جدول ۴ نشان‌دهنده‌ی تفاوت میزان بالاروی در موج‌شکن سکویی با عرض‌های متفاوت سکو می‌باشد. در این جدول، داده‌ها نشان‌دهنده‌ی بالاروی موج از یک موج-شکن توده سنگی بدون سکو، و شش موج‌شکن سکویی با عرض‌های مختلف می‌باشد. الگوی چینش قطعات نامنظم

جدول ۴- تاثیر تغییر عرض سکو (B) بر بالاروی موج (Ru) در موج شکن سکویی تحت عرض‌های مختلف سکو، با موج خطی، ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر، شیب وجه جلو موج شکن ۳۹ درجه، و عمق آب ۲۴ سانتی‌متر.

دوره‌ی تناوب موج ۱,۴ ثانیه			دوره‌ی تناوب موج ۱,۲۷ ثانیه		
بالاروی موج (سانتی‌متر)	ارتفاع سطح آزاد (سانتی‌متر)	عرض سکو (سانتی‌متر)	بالاروی موج (سانتی‌متر)	ارتفاع سطح آزاد (سانتی‌متر)	عرض سکو (سانتی‌متر)
۱۷,۶۰	۴۱,۶۰	۰	۱۷,۲۰	۴۱,۲۰	۰
۱۷,۰۰	۴۱,۰۰	۳۰	۱۶,۰۰	۴۰,۰۰	۳۰
۱۵,۴۰	۳۹,۴۰	۳۵	۱۴,۸۰	۳۸,۸۰	۳۵
۱۳,۹۰	۳۷,۹۰	۴۰	۱۲,۷۰	۳۶,۷۰	۴۰
۱۲,۵۰	۳۶,۵۰	۴۵	۱۲,۰۰	۳۶,۰۰	۴۵
۱۲,۱۰	۳۶,۱۰	۵۰	۱۰,۸۰	۳۴,۸۰	۵۰
۱۱,۶۰	۳۵,۶۰	۵۵	۱۰,۲۰	۳۴,۲۰	۵۵



شکل ۷- شبیه‌سازی بالاروی موج از موج شکن بدون سکو با دوره‌ی تناوب موج ۱,۴ ثانیه.



شکل ۸- تاثیر عرض سکو بی‌بعد بر بالاروی موج در موج شکن سکویی با قطعات زره با الگوی چینش نامنظم و با عرض‌های مختلف سکوی، ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر.

سکویی با عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر در جدول ۶ بیان شده است.

جدول ۶- تاثیر تغییر ارتفاع موج (H_s) بر بالاروی موج (R_U) در موج‌شکن سکویی تحت ارتفاع‌های مختلف موج، با موج خطی، عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر، دوره‌ی تناوب موج ۱،۳ ثانیه، شیب وجه جلو موج‌شکن ۳۹ درجه، و عمق آب ۲۴ سانتی‌متر.

ارتفاع موج (سانتی‌متر)	ارتفاع سطح آزاد (سانتی‌متر)	بالاروی موج (سانتی‌متر)
۱۰،۵۰	۳۹،۹۰	۱۵،۹۰
۱۰،۰۰	۳۵،۲۰	۱۱،۲۰
۹،۵۰	۳۴،۵۰	۱۰،۵۰
۹،۰۰	۳۴،۰۰	۱۰،۰۰
۸،۵۰	۳۳،۸۰	۹،۸۰
۸،۰۰	۳۳،۵۰	۹،۵۰
۷،۵۰	۳۲،۹۰	۸،۹۰
۷،۰۰	۳۲،۵۰	۸،۵۰

شکل ۹ نمودار سه بعدی سطح آب را برای تحلیل نتایج اثر ارتفاع موج بر بالاروی موج روی موج‌شکن سکویی با عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ می‌توان اثر ارتفاع موج را، با افزایش میزان بالاروی موج از موج‌شکن سکویی مشاهده نمود.

شکل ۱۱ مقادیر بالاروی موج را در گام زمانی ۱۰ ثانیه از شبیه‌سازی، برای موج‌شکن سکویی با عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر با ارتفاع‌های متفاوت موج، نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، که در نهایت با بررسی میزان بالاروی موج در **Error! Unknown switch** **argument**، با افزایش ارتفاع موج به مقدار ۶۷ درصد، میزان بالاروی موج از شیب جلویی موج‌شکن سکویی با عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر، ۵۳ درصد افزایش می‌یابد. به وضوح می‌توان مشاهده نمود که با افزایش ارتفاع موج، میزان بالاروی موج افزایش می‌یابد، که این افزایش به علت آن است که کارمایه موج با توان دوم ارتفاع آن نسبت مستقیم دارد.

جدول ۵ ضریب کاهش بالاروی را برای عرض‌های مختلف سکو بیان می‌کند.

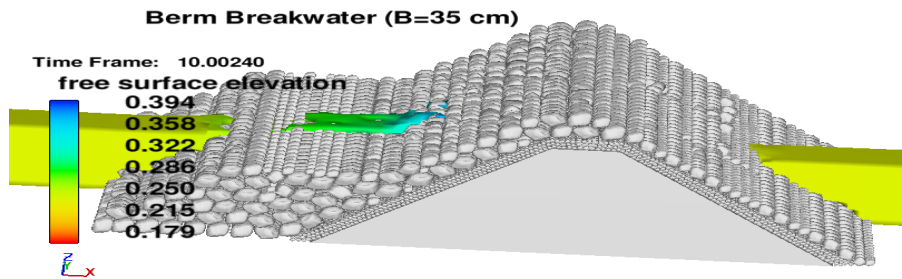
جدول ۵- ضریب کاهش بالاروی موج در موج‌شکن سکویی تحت عرض‌های مختلف سکو با ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر، و دوره‌ی تناوب موج ۱،۲۷ ثانیه.

عرض سکو (سانتی‌متر)		۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵
ضریب کاهش بالاروی موج (/.)	۷	۱۴	۲۶	۳۰	۳۷	۴۰	۴۰

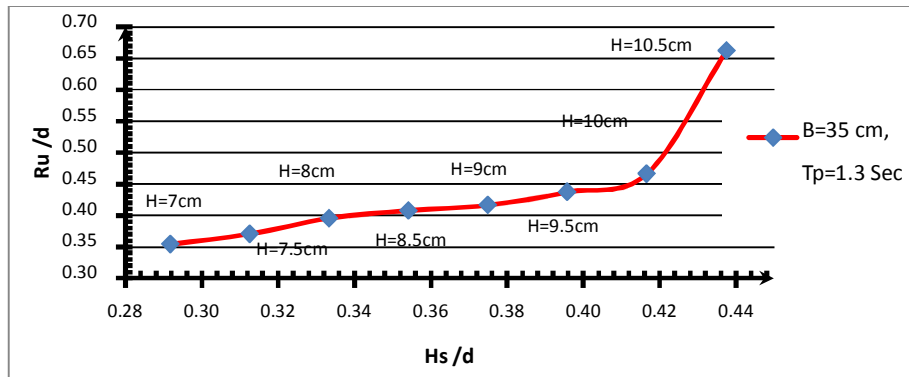
نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عرض سکو موج-شکن به میزان ۴۵ درصد، اندازه‌ی بالاروی موج از شیب جلویی موج‌شکن سکویی، ۳۶ درصد کاهش می‌یابد. به وضوح می‌توان مشاهده نمود که با افزایش عرض سکو، میزان بالاروی موج از موج‌شکن سکویی کاهش می‌یابد که کاهش مزبور به علت این است که بخشی از کارمایه موج با طی کردن سکو تلف شده، و وقتی موج به شیب اصلی برخورد می‌کند، انرژی کمتری برخوردار است.

اثر ارتفاع موج (H_s) بر بالاروی موج (R_U) از موج-شکن سکویی

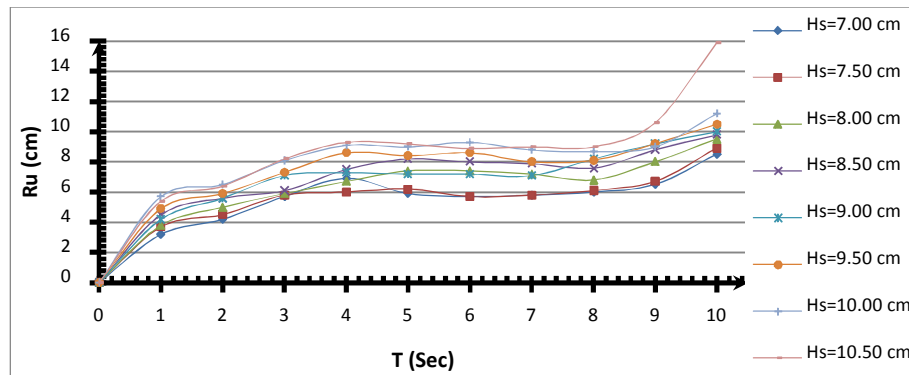
اصلی‌ترین عامل در بین متغیرهای هیدرولیکی که بر سازه تاثیر مستقیم می‌گذارد، و افزایش آن همواره تاثیر مستقیم بر افزایش بالاروی و آسیب وارد بر سازه دارد، ارتفاع موج است. کارمایه موج، معرف قدرت و توانایی موج به منظور جابه‌جائی سنگ‌دانه‌ها، و همچنین تخریب موج-شکن است، از آن‌جا که کارمایه موج با توان دوم ارتفاع موج متناسب است، بنابراین، ارتفاع موج عامل بسیار مهمی در تعیین پایداری و بالاروی موج از سکو می‌باشد. در این تحقیق با افزایش ارتفاع موج از ۷،۰ تا ۱۰،۵ سانتی‌متر، میزان بالاروی موج از موج‌شکن سکویی افزایش می‌یابد. میزان بالاروی بیشینه ($R_{U_{MAX}}$) در بیشترین ارتفاع موج یعنی ۱۰،۵ سانتی‌متر رخ می‌دهد. در مجموع، افزایش ارتفاع موج باعث افزایش بالاروی آن از موج‌شکن سکویی می‌گردد. اثر ارتفاع موج در میزان بالاروی موج بر موج‌شکن



شکل ۹- شبیه‌سازی بالاروی موج از موج‌شکن سکویی با عرض سکوی ۳۵ سانتی‌متر با دوره‌ی تناوب موج ۱٫۴ ثانیه.



شکل ۱۰- تاثیر ارتفاع موج بر بالا روی موج از موج‌شکن سکویی تحت ارتفاع‌های مختلف موج، عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر، دوره‌ی تناوب موج ۱٫۳ ثانیه.



شکل ۱۱- مقادیر اندازه‌گیری شده بالاروی موج (R_u) در گام‌های زمانی مختلف برای ارتفاع‌های متفاوت موج، عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر، دوره‌ی تناوب موج ۱٫۳ ثانیه.

بالاروی موج از موج‌شکن سکویی افزایش منظم و محسوسی را داشته، و بیشینه‌ی بالاروی در گام‌های زمانی ۱٫۶ تا ۴٫۳ ثانیه رخ می‌دهد. از دوره‌ی تناوب موج ۱٫۲، ثانیه با افزایش دوره‌ی تناوب، میزان بالاروی بیشینه (R_{uMAX}) در گام زمانی انتهایی قابل مشاهده است. در مجموع، افزایش دوره‌ی تناوب موج (T_p) باعث افزایش بالاروی موج از موج‌شکن سکویی می‌گردد.

اثر دوره‌ی تناوب موج (T_p) بر بالاروی موج (R_u) از موج‌شکن سکویی

عامل دیگری که نقش بسیار تعیین کننده، و حتی پیچیده‌ای را در تعیین پایداری و بالاروی موج از موج‌شکن سکویی داشته، و حتی مستقیم یا معکوس بودن تاثیر آن باید با دقت تفسیر شود، دوره‌ی تناوب آن است. در این پژوهش، با افزایش دوره‌ی تناوب موج تا ۱٫۲ ثانیه، میزان

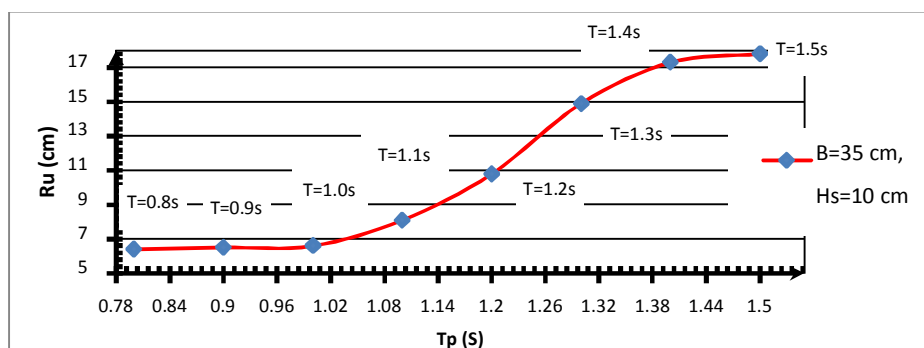
جدول ۷- تاثیر تغییر دوره‌ی تناوب موج (T_p) روی بالاروی موج (R_U) در موج‌شکن سکویی تحت دوره‌های تناوب مختلف موج، با موج‌خطی، عرض سکوی ۳۵ سانتی‌متر، ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر، شیب وجه جلو موج‌شکن ۳۹ درجه، و عمق آب ۲۴ سانتی‌متر.

دوره‌ی تناوب موج (ثانیه)	ارتفاع سطح آزاد (سانتی‌متر)	بالاروی موج (سانتی‌متر)
۱,۵۰	۴۱,۸۰	۱۷,۸۰
۱,۴۰	۴۱,۳۰	۱۷,۳۰
۱,۳۰	۳۸,۹۰	۱۴,۹۰
۱,۲۰	۳۴,۸۰	۱۰,۸۰
۱,۱۰	۳۲,۱۰	۸,۱۰
۱,۰۰	۳۰,۶۰	۶,۶۰
۰,۹۰	۳۰,۵۰	۶,۵۰
۰,۸۰	۳۰,۴۰	۶,۴۰

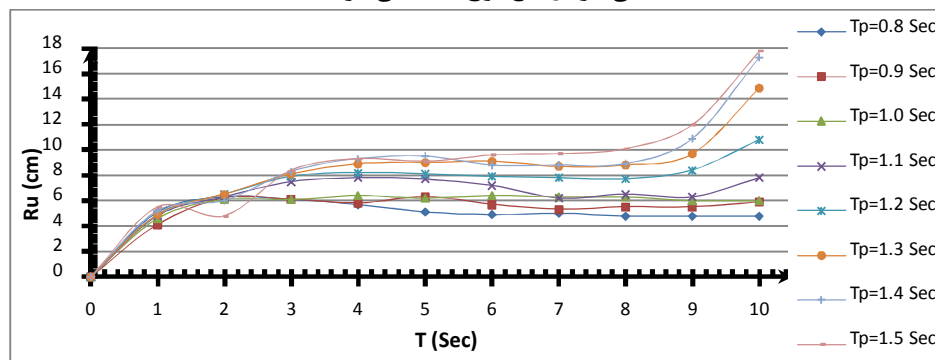
اثر دوره‌ی تناوب موج در میزان بالاروی موج بر موج‌شکن سکویی با عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر در جدول ۷ بیان شده است.

شکل ۱۲، اثر دوره‌ی تناوب موج را با افزایش میزان بالاروی موج از موج‌شکن سکویی نشان می‌دهد. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهند که با افزایش دوره‌ی تناوب موج به مقدار ۵۳ درصد، میزان بالاروی آن از شیب جلویی موج‌شکن سکویی با عرض ۳۵ سانتی‌متر، ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. به وضوح می‌توان مشاهده نمود که با افزایش دوره‌ی تناوب موج، میزان بالاروی آن افزایش می‌یابد، به نحوی که در دوره‌ی تناوب ۱,۲ ثانیه (دوره‌های تناوب بالاتر)، دوره‌های تناوب موج به دوره‌ی تناوب ارتعاش طبیعی سازه‌ی موج‌شکن و ساختار شیب موج‌شکن نزدیک‌تر است، و این اثر بالاروی موج را مضاعف افزایش می‌دهد.

شکل ۱۳ میزان بالاروی موج را در گام زمانی ۱۰ ثانیه از شبیه‌سازی، برای موج‌شکن سکویی با عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر با دوره‌های تناوب متفاوت نمایش می‌دهد.



شکل ۱۲- تاثیر دوره‌ی تناوب موج بر بالاروی موج از موج‌شکن سکویی تحت دوره‌های تناوب مختلف موج، عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر، ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر.



شکل ۱۳- مقادیر اندازه‌گیری شده بالا روی موج (R_U) در گام‌های زمانی مختلف برای دوره‌های تناوب متفاوت موج، عرض سکو ۳۵ سانتی‌متر، ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

با توجه به اینکه مطالعات آزمایشگاهی شفیع‌فر و شاکری (۲۰۱۳) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس بر تغییر شکل و پسرفت سکو انجام شده است، نه بالاروی موج از موج‌شکن سکویی، لذا داده‌های جدول ۱۰ مقایسه و میزان خطا محاسبه گردید.

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی صورت پذیرفته از دو روش ضریب همبستگی و فراسنج انحراف معیار استفاده می‌کنیم. در روش ضریب همبستگی، بالاروی تجربی با استفاده از رابطه پاهرنس و وارد (۱۹۹۱) از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد:

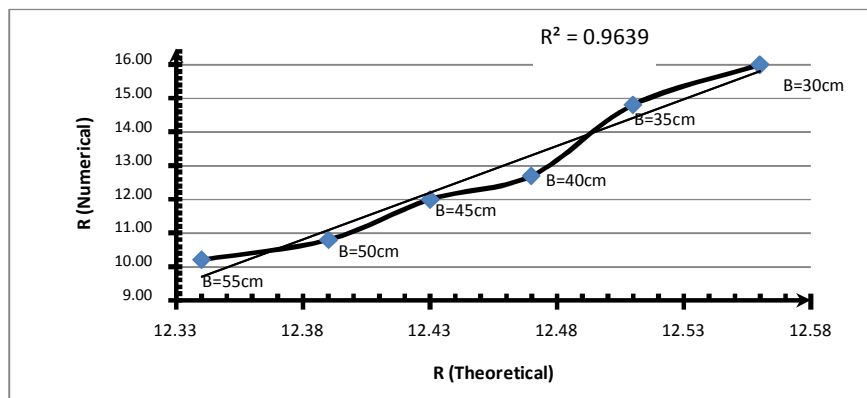
$$\frac{R_U^T}{H_s} = \exp(0.695 - 11.269 \frac{H_s}{L_o} - 0.158 B_*) \quad (5)$$

که در آن R_U^T بیشینه‌ی مقدار بالاروی، L_o طول موج، H_s ارتفاع موج B_* عرض سکوی بدون بعد بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B_* = \frac{B}{\sqrt{H_o L_o}} \frac{h_B}{d} \quad (6)$$

جدول ۱۰- محاسبه‌ی درصد خطا با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی و عددی.

بالاروی عددی موج (سانتی‌متر)	بالاروی آزمایشگاهی موج (سانتی‌متر)	درصد خطا	درصد خطای مجاز
17,20	18,73	8,17	15,00
17,60	19,37	9,13	15,00



شکل ۱۴- مقایسه‌ی نتایج بالاروی موج بین اندازه‌گیری‌های عددی و نظریاً عرض سکوها ۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ سانتی‌متر و محاسبه ضریب همبستگی R^2 با ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر و دوره‌ی تناوب موج ۱،۲۷ ثانیه.

در روش دوم صحت‌سنجی، با استفاده از رابطه‌ی پارامتر بی بعد انحراف معیار محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (R_U^T - R_U^m)(R_U^N - R_U^{m(N)})}{(\sum_{i=1}^N (R_U^T - R_U^m)^2)^{0.5} * (\sum_{i=1}^N (R_U^N - R_U^{m(N)})^2)^{0.5}} \quad (7)$$

در رابطه‌ی ۷، R_U^m متوسط نتایج بالاروی تجربی، $R_U^{m(N)}$ متوسط نتایج بالاروی عددی می‌باشند.

آزمایشگاه‌ها از نمونه‌ی یک موج‌شکن هیدرولیک‌بندر پتروشیمی پارس به وسیله‌ی نجفی جیلانی و منشی-زاده (۲۰۱۰) برای واسنجی نمونه‌ی عددی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر آزمایشگاهی بالاروی موج از شیب جلوی موج‌شکن با مقادیر عددی بالاروی موج از موج‌شکن توده‌ی سنگی در

در رابطه‌ی ۶، عرض سکو، H_o عدد پایداری، h_B ارتفاع سکو در پای موج‌شکن و d عمق آب در پای موج-شکن می‌باشند.

نتایج بالاروی تجربی و بالاروی عددی موج از موج-شکن سکویی با دوره‌ی تناوب موج ۱،۲۷ ثانیه در شکل ۱۴ مقایسه، و ضریب همبستگی R محاسبه شده است. ضریب همبستگی از رابطه‌ی ۷، ۹۸٪ به دست آمد، که نشان می‌دهد Flow-3D، حرکت جریان داخل محیط متخلخل را به خوبی شبیه‌سازی کرده، و بالاروی محاسبه شده قابل قبول است.

۲) شیریان، ن. ۱۳۸۴، مطالعه آزمایشگاهی واکنش‌های هیدرولیکی و پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر، رساله‌ی دوره-ی دکترای مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس.

۳) مقیم، م. ن.م. شفیع‌فر، و. چگینی، و پ. آق‌تومان، ۱۳۸۷، تاثیر شرایط امواج نامنظم بر عرض فرسایش یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، مهندسی دریا، ۵(۹): ۳۵-۶۱.

4) Ahrens, J. P. and D. L. Ward, 1991, Performance of bermed breakwaters. J. Waterway, Port, Coastal & Ocean Eng., ASCE, Vol. 117, No 5.

5) De Wall, J.P. and J. W. Van der Meer, 1992, Wave run-up and overtopping at coastal structures, ASCE Proc, 23rd ICCE, Venice, Italy, 1758- 1771.

6) Kobayashi, N. and A. Wurjanto, 1989, Numerical model for design of impermeable coastal structures, Research Report No. CE-89-75, University of Delaware, USA.

7) Moghim, M.N. M. Shafieefar, A. Torum, and V. Chegini, 2011, A new formula for the sea state and structural parameters influencing the stability of homogeneous reshaping berm breakwaters, Coastal Engineering, 58: 706- 21.

8) Najafi-Jilani, A. and M. Monshizadeh, ۲۰۱۰, Laboratory investigations on wave run-up an transmission over breakwaters covered by antifer units, Scientia Iranica, 17(6): 457- 470.

9) PIANC, 2003, State of the art of designing and constructing berm breakwaters, Brussels.

10) Pilarczyk, K. W. 1990, Design of seawalls and dikes-Including overview of the revetments. Coastal Protection, Balkema, Rotterdam.

11) Shafieefar, M. and M. R. Shakeri, ۲۰۱۳, An experimental study on the reshaping of berm breakwaters under irregular wave attacks, Applied ocean research, 42: 16- 23.

12) Shankar, N. J. and M. P. R. Jayaratne, 2002, Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures, Elsevier, Journal of coastal engineering, 30, Amsterdam, Jan, PP. 221-238.

13) Van der Meer, J. W. 1988, Rock slope and gravel beaches under random wave attack, PhD thesis, Delft University of technology.

14) Van der Meer, J.W. 1993, Conceptual design of rubble mound breakwaters, Delft hydraulics, Report No. 483.

15) Van Gent, M. R. A., 2002, Wave run-up on dikes with shallow foreshores, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, Vol. 127, No. 5, Sep/ Oct.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{R_{U_i}^N - R_{U_i}^T}{D_{n50}} \right)^2} \quad (\lambda)$$

با توجه به نتایج بالاروی تجربی و بالاروی عددی موج از موج‌شکن سکویی، و قطر اسمی متوسط سنگدانه‌ها، مقدار انحراف معیار ۰,۹۶ به دست می‌آید. نزدیکی فراسنج بی‌بعد انحراف معیار به صفر را نشان می‌دهد که شبیه‌سازی مزبور صحیح، و بالاروی محاسبه شده قابل قبول است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر بیش از ۳۵۰ شبیه‌سازی عددی به منظور ارزیابی و بررسی واکنش هیدرولیکی بالاروی موج از موج‌شکن سکویی پوشیده با قطعات زره سنگ تحت شرایط امواج خطی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شد. متغیرهای اصلی که مورد آزمون قرار گرفتند: عرض سکو، ارتفاع و پیوند موج بودند. با توجه به اینکه مطالعات آزمایشگاهی در مورد موج‌شکن سکویی نادر می‌باشند، و اکثر محققین در مورد پس‌رفت سکو کار کرده‌اند نه بالاروی موج، لذا پس از مقایسه نتایج عددی با روابط نظری، ضریب همبستگی ۰,۹۸ حاصل شد که نشان دادرش‌های عددی، به دلیل آن که شرایط مختلف موج و اشکال مختلف سازه در آنها با تغییرات اندک در برنامه قابل بررسی است، نسبت به روش‌های آزمایشگاهی از لحاظ توجیه‌پذیری اقتصادی، وحتى ایمنی، با صرفه‌ترمی‌باشند. بر اساس اندازه‌گیری‌های نمونه، با ایجاد و افزایش عرض سکو به مقدار ۰,۴۵ در وجه جلویی موج‌شکن، میزان بالاروی موج تا ۰,۳۶ کاهش یافته، و عرض سکو در کاهش بالاروی موج از موج‌شکن سکویی بسیار موثر می‌باشد. همچنین، مقدار بالاروی موج از موج-شکن سکویی با افزایش ۰,۶۷ ارتفاع موج، ۰,۵۳ افزایش و با افزایش ۰,۵۳ دوره‌ی تناوب موج، ۰,۳۶ افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد ارتفاع موج، در اندازه‌ی فراسنج هیدرولیکی بالاروی تاثیر بیشتری را دارد. طراحان می‌توانند با استفاده از این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن پایداری و محاسبه‌ی عدد رینولدز، موج‌شکن‌های سکویی با ابعاد واقعی طراحی نمایند.

منابع

۱) شفیع‌فر، م. و ع. مطلبی، ۱۳۸۹، بررسی تاثیر تراز قرارگیری سکو در پایداری موج‌شکن سکویی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.