

بررسی عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار

گلناز پرتوی^۱ و زهرا قدم‌پور^{۲*}

چکیده

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که برای حفاظت از سواحل و کاهش انرژی ناشی از امواج احداث شده‌اند و با توجه به استفاده فراوان از آن‌ها، تحلیل جریان در اطراف این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش مدل‌سازی موج‌شکن صلب روی بستر با شیب ترکیبی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار و کد SPHysics انجام شد. تأثیر پارامترهای مختلف از جمله تغییر در عمق آب، زمان تناوب موج، تیزی موج، شیب بدنه و نوع ساختار بدنه موج‌شکن روی بالاروی موج که از پارامترهای اصلی در طراحی موج‌شکن‌ها است، بررسی شده است. نتایج بیان‌کننده این واقعیت است که با افزایش زمان تناوب، عمق و شیب بدنه موج‌شکن میزان بالاروی موج افزایش می‌یابد، همچنین صحت‌سنجی نتایج با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی ارزیابی شد. نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسب روش عددی و آزمایشگاهی بود. علاوه بر این، به‌منظور بررسی تغییرات میزان بالاروی موج در موج‌شکن‌های صلب نسبت به مدل مشابه توده سنگی، نتایج حاصل از کار عددی انجام شده با مطالعات آزمایشگاهی انجام شده روی موج‌شکن‌های توده سنگی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از بالاروی موج در موج‌شکن نفوذپذیرناپذیر (صلب) و موج‌شکن نفوذپذیر با سطح زبر (موج‌شکن توده سنگی) بیان‌کننده افزایش بالاروی در حدود ۴۰ درصد در حالت موج‌شکن صلب دارد.

واژه‌های کلیدی: بالاروی موج، روش هیدرودینامیک ذرات هموار، موج‌شکن توده سنگی، موج‌شکن صلب.

ارجاع: پرتوی گ. و قدم‌پور ز. ۱۳۹۷. بررسی عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار. مجله پژوهش آب ایران. ۳۰: ۳۹-۵۰.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.

۲- استادیار گروه عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.

* نویسنده مسئول: zahra_ghadampour@yahoo.com

تاریخ پذیرش: 1395/12/01

تاریخ دریافت: 1394/10/19

مقدمه

با یک لایه مش) روی یک مدل آزمایشگاهی بررسی کردند و آنالیز مقایسه‌ای جامعی را با برخی تئوری‌های ارائه شده انجام دادند.

در سال‌های اخیر، با توجه به پیشرفت‌های کامپیوتری، از روش‌های عددی به‌عنوان یکی دیگر از گزینه‌های مطرح در تحلیل جریان در اطراف موج‌شکن‌ها استفاده شده است. این روش‌ها خود به دو دسته از روش‌های با المان و بدون المان تقسیم می‌شوند که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارند (قدمپور و همکاران، ۲۰۱۳). روش‌های با المان به‌عنوان روش‌های کاربردی، در حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی از گذشته تاکنون استفاده شده است. در این زمینه می‌توان به کارهای انجام شده توسط هیگوارا و همکاران (۲۰۱۳) در زمینه طراحی موج‌شکن‌ها اشاره کرد؛ با وجود این، این روش‌ها نیز دارای محدودیت‌ها و مشکلاتی در مدل کردن مرزهای قابل تغییر، مرزهای متحرک و تعیین دقیق سطح آزاد سیال هستند (لی‌یو، ۲۰۰۵) و (لی‌یو و لی‌یو، ۲۰۰۳). برای غلبه بر این مشکلات، روش‌های بدون المان به‌عنوان نسل جدید روش‌های عددی به وجود آمدند که از بین آن‌ها، روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۵ در مدل‌سازی جریان‌های سطح آزاد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

به طور کلی روش هیدرودینامیک ذرات هموار از روش‌های بدون المان بر مبنای دیدگاه لاگرانژی است. توانایی این روش در مدل‌سازی تغییر شکل‌های زیاد باعث شد که در تحلیل جریان‌های سطح آزاد، (بدون نیاز به استفاده از روش خاصی برای تعیین سطح آزاد) به‌کار گرفته شود. اولین کاربرد روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای حل این‌گونه مسائل را موناگان (۱۹۹۴)، برای شبیه‌سازی مسأله شکست امواج به کار برد. در دهه اخیر پژوهشگرانی چون دالریمل و راجرز (۲۰۰۶)، کرسپو و همکاران (۲۰۰۸)، باریرو و همکاران (۲۰۱۳) توانایی روش هیدرودینامیک ذرات هموار را در تحلیل جریان‌های ناشی از امواج کوتاه و بلند روی سازه‌های ساحلی و بررسی انواع شکست موج روی بسترهای شیب‌دار نیز ارزیابی کرده‌اند. همچنین به تازگی نیز آلتومارو و همکاران (۲۰۱۴)، مدل‌سازی کاملی از موج‌شکن با لایه آرمور از بلوک ساحلی را همراه انواع چیدمان بلوک‌های ساحلی با کمک

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که برای حفاظت و ایجاد آرامش در بندرگاه‌ها، برای ورود مطمئن کشتی‌ها به آبراه‌ها، بندرها و کاهش انرژی ناشی از امواج احداث می‌شوند. با توجه به استفاده فراوان از موج‌شکن‌ها در نزدیک ساحل، تحلیل جریان در اطراف این سازه‌ها برای طراحی اهمیت ویژه‌ای دارد (غلامی، ۱۳۸۷). موج‌شکن‌ها در انواع گوناگونی از جمله توده سنگی و صلب هستند که نوع دوم، معمولاً به‌صورت نفوذناپذیر و هموار با شیب‌های گوناگون بدنه است. پارامترهای سازه‌ای^۱ (نوع ساختار سازه، شیب سازه)، پارامترهای محیطی^۲ (وابسته به موج؛ ارتفاع موج، زمان تناوب موج، تعداد موج، تراز سطح آب، نوع طیف موج) و پارامترهای هیدرولیکی^۳ (بالاروی، پایین‌آمدگی، انعکاس (بازتاب)، سرریزی و انتقال) از پارامترهای اصلی حاکم در طراحی موج‌شکن‌ها هستند (ون در میبر، ۱۹۹۳). از میان کمیت‌های مطرح شده، تعیین تراز بالاروی، از جمله پارامترهای مهمی است که به واسطه آن می‌توان مواردی چون تراز تاج سازه، میزان دبی سرریزی موج و محدوده حفاظت را مشخص کرد. ساویل (۱۹۵۶) از جمله پژوهشگران آغازگر بررسی پارامتر بالاروی در موج‌شکن‌ها است. هانت (۱۹۵۹) و چو (۱۹۸۰)، پارامتر بالاروی و تشابه شکست (ξ) را بررسی کردند و روابطی را در مورد میزان بالاروی اطراف موج‌شکن‌های با شیب صاف غیر قابل نفوذ (صلب) ارائه دادند. مرکز تحقیقات مهندسی سواحل ارتش آمریکا^۴ نیز پس از پژوهش‌های گسترده، نتایج آزمایشگاهی خود را در رابطه با بالاروی امواج روی موج‌شکن‌های صلب، به‌صورت گراف‌ها و جدول‌های کاربردی ارائه داد (ارتش آمریکا، ۱۹۸۴). از دیگر پژوهش‌های ارائه شده در این زمینه، می‌توان به بررسی بالاروی روی شیب‌های متفاوت (شیب صاف، شیب نفوذپذیر صاف و ناصاف) در برابر پارامتر تشابه شکست توسط اهرنس و تیتوس (۱۹۸۵)، وندر و استام (۱۹۹۲) و انگرموند و ونرود (۲۰۰۱) اشاره کرد. شانکار و جایاراتنه (۲۰۰۳) بالاروی و روگذری موج با توجه به انواع متفاوت ساختار بدنه موج‌شکن را (سطح غیرقابل نفوذ صاف، سطح پوشیده شده با لایه آرمور، سطح پوشیده شده

1- Structural Parameters

2- Wave Parameters

3- Hydraulic Parameters

4- US Army Of Coastal Engineering Research Center

5- Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH)

۱. تعیین تراز تاج سازه یا سایر اجزای سازه‌ای که در بالاترین تراز باید مورد حفاظت قرار گیرند.

۲. به‌عنوان شاخصی برای بررسی امکان سرریزی یا عبور موج

در این پژوهش بالاروی در برابر پارامترهای دیگری چون پارامتر تشابه شکست^۲ (ξ)؛ تیزی موج (S_{om}) با روابط ذیل بررسی قرار می‌شود (چگینی، ۱۳۷۷):

$$S_{om} = \frac{2pH}{gT^2} \quad (۱)$$

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{(S_{om})^{\frac{1}{2}}} \quad (۲)$$

با توجه به این روابط و تغییر پارامترهایی چون H_s (ارتفاع موج ورودی)، T (زمان تناوب موج)، di (عمق آب)، نسبت di/H_s و همچنین پارامتر مجزای دیگر $\cot \alpha$ (شیب بدنه موج‌شکن)، می‌توان Ru را بررسی کرد و به نتایج کاربردی برای طراحی موج‌شکن‌ها دست یافت. با توجه به مطالعات انجام شده در گذشته، در زمینه کارهای عددی، مشاهده می‌شود که برای سازه‌های دریایی چون موج‌شکن‌ها، به‌دلیل عدم قطعیت مشخصات موجی که به پای موج‌شکن می‌رسد، امکان تخمین دقیق تأثیر پارامترهای عددی مؤثر در طراحی وجود نداشته است. در این پژوهش برخی از این پارامترها با کمک روش هیدرودینامیک ذرات هموار دو بعدی بررسی شده است.

معادلات حاکم

معادلات حاکم اصلی مورد استفاده در این پژوهش، برای جریان سطح آزاد بر پایه قوانین بقا جرم و مومنتم در دیدگاه لاگرانژی است.

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{r} \nabla P + g, \frac{dr}{dt} = V \frac{d\mathbf{r}}{dt} = -\mathbf{r} \nabla V \quad (۳)$$

که در این روابط، v سرعت، ρ چگالی، p فشار، r فاصله و g شتاب ثقل هستند (امیدوار، ۲۰۱۰).

تئوری روش هیدرودینامیک ذرات هموار

روش بدون المان هیدرودینامیک ذرات هموار، یکی از کارآمدترین روش‌ها در دیدگاه لاگرانژی برای شبیه‌سازی

روش هیدرودینامیک ذرات هموار دو فازی روی بستر با یک شیب بررسی کرده‌اند. علی‌رغم پژوهش‌های وسیع و بررسی‌های فراوان که در اقصی نقاط دنیا در دست انجام است، به نظر می‌رسد که به‌دلیل پیچیدگی موضوع و نداشتن یک تئوری دقیق برای مدل‌سازی خصوصیات ذرات موج، هنوز تا رسیدن به درک کاملی از فیزیک موج‌شکن‌ها راه درازی باقی است (غلامی، ۱۳۸۷).

با توجه به مطالعات اندکی که در رابطه با وضعیت بالاروی موج و تأثیرات پارامترهای مختلف روی بستر با شیب ترکیبی انجام شده، در این جستار با بکارگیری روش هیدرودینامیک ذرات هموار و با استفاده از دو مدل آزمایشگاهی موجود، عملکرد موج‌شکن صلب روی بستر با شیب ترکیبی با کمک کد SPHysics و تغییر در هندسه این کد محاسباتی ارزیابی شده است. اثر برخی پارامترهای سازه‌ای چون سطح صاف نفوذناپذیر، شیب بدنه موج‌شکن و همچنین برخی پارامترهای هیدرولیکی چون تغییر در عمق آب، زمان تناوب موج، تیزی موج و پارامتر تشابه شکست روی پارامتر هیدرولیکی کلیدی بالاروی موج بررسی شده و صحت‌سنجی نتایج با مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه موج‌شکن‌های صلب نیز انجام شده است. علاوه بر این، به‌منظور مقایسه میزان بالاروی موج در موج‌شکن‌های صلب نسبت به مدل مشابه توده سنگی، نتایج عددی شبیه‌سازی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار با مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه موج‌شکن‌های توده سنگی مقایسه شده و در نهایت این صحت‌سنجی، تغییرات لحاظ شده در کد SPHysics در این پژوهش را که منجر به طراحی موج‌شکن صلب روی بستر با شیب ترکیبی کرده است، نیز تأیید می‌کند.

مواد و روش‌ها

پارامترهای حاکم

فعالیت موج روی یک سازه ساحلی موجب نوسان تراز سطح آب در محدوده‌ای قائم و معمولاً بزرگ‌تر از ارتفاع موج تابشی می‌شود. ترازهای حدی حاصل در برخورد موج، متغیرهای طراحی مهمی را تشکیل می‌دهند که یکی از این ترازها، بالاروی^۱ موج است و نسبت به سطح ایستایی تعریف می‌شود. از مزایای تعیین این پارامتر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مدل‌های آزمایشگاهی موج و هندسه موج‌شکن

مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش با توجه به اشکال ۱ و ۲، مشتمل بر دو مدل به شکل زیر هستند:

مدل آزمایش اول: امواجی با زمان تناوب‌های (۱/۹۷۹s، ۱/۶۲۶s، ۱/۲۷۳s) و اعماق (۰/۵۴ m، ۰/۵۱ m، ۰/۴۸m) با یک پاروی مولد موج از نوع پیستونی برای بررسی تأثیر آن بر بالاروی موج ایجاد شده است. شیب متغیر بدنه موج‌شکن (۲/۵، ۲، ۱/۲۵ = cotα) و شیب بستر دریا (۱:۵۰، ۱:۱۵۰) بررسی شده است (شکل ۱)، (شیریان، ۱۳۸۴).

مدل آزمایش دوم: یک موج با زمان تناوب‌های (۱/۲ s، ۱/۱ s) و عمق (۰/۵ m)، با یک پاروی مولد موج از نوع پیستونی ایجاد شده است. شیب بدنه موج‌شکن (cotα = ۲) و تفاوت بارز این مدل با مدل اول، یک شیب بودن شیب بستر دریاست که با توجه به مدل (۱:۱۰) لحاظ شده است (شکل ۲)، (شانکار و جاباراتنه، ۲۰۰۳).

حرکت سیال با سطح آزاد است. در این روش میدان جریان به صورت تعدادی ذره شبیه‌سازی شده و برای هر ذره سیال، کمیت‌های جرم m_i ، چگالی ρ_i و فشار p_i و سرعت v_i با استفاده از یک انتگرال درون‌یابی شده از یک تابع $\Phi(r)$ در دامنه Ω به فرم زیر تقریب زده می‌شود.

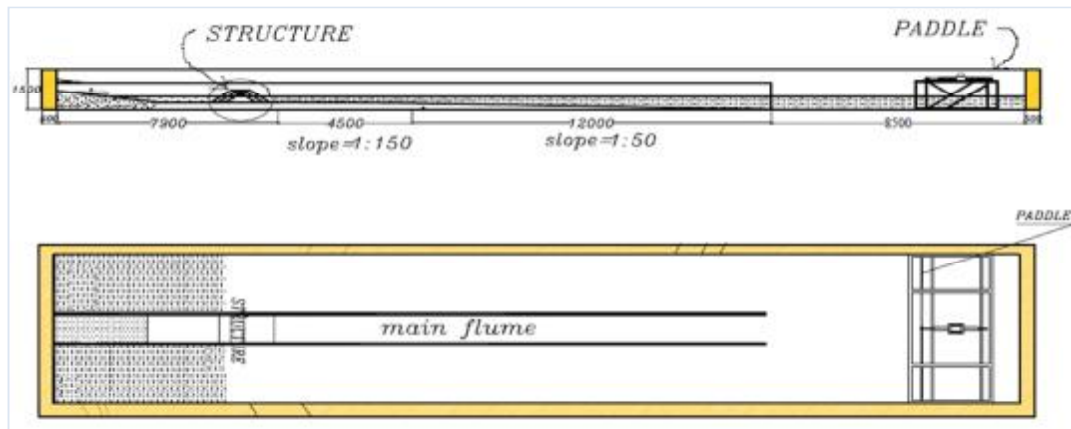
$$\Phi(r) \approx \mathbf{p} \Phi(r) \mathbf{f} \int_{\Omega} \Phi(r') w(r-r') dr' \quad (۴)$$

در این معادله، w تابع هموار، r' طول هموار است (موناگان، ۲۰۰۵).

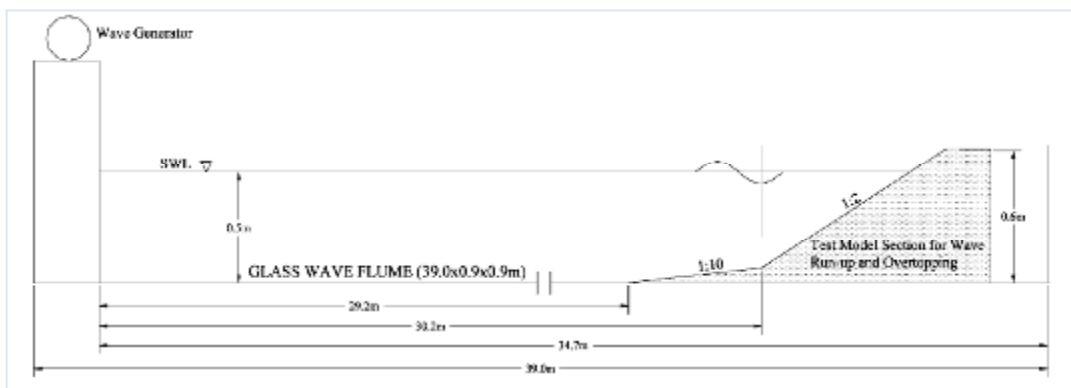
در نهایت معادله حاکم (۳) بر اساس روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر به شکل زیر نوشته می‌شود (گینگلد و موناگان، ۱۹۸۲):

$$\frac{dr_i}{dt} = \sum_j m_j v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (۵)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} \right) \cdot \nabla_i W_{ij} + g \quad (۶)$$



شکل ۱- هندسه موج شکل در آزمایش اول (شیریان، ۱۳۸۴)

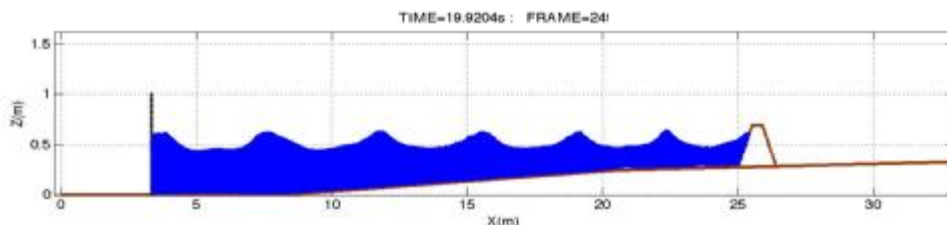


شکل ۲- هندسه موج‌شکن در آزمایش دوم (شانکار و جاباراتنه، ۲۰۰۳)

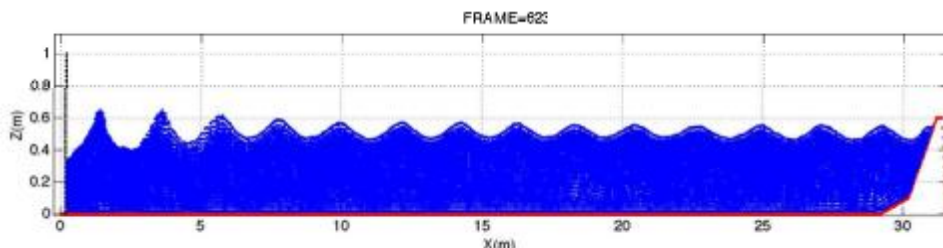
معرفی کد SPHysics

برنامه SPHysics بر پایه تئوری هیدرودینامیک ذرات هموار است که روش عددی متفاوتی را برای حل معادلات حاکم به کار می‌بندد؛ به عبارتی دیگر، SPHysics یک پلت فرم از هیدرودینامیک ذرات هموار است و برنامه‌ای نوشته شده به وسیله زبان فرترن شامل یک یا چند قسمت برنامه نویسی است که از تعداد زیادی خط دستور تشکیل شده و معمولاً شامل دستورهای تعریف متغیر و دستورهای اجرایی است. کدهای SPH را با الهام از فرمول موناگان (۱۹۹۲) به طور مشترک پژوهشگران در دانشگاه جانز هاپ کینز (ایالات متحده آمریکا)، دانشگاه ویگو (ایتالیا)، دانشگاه منچستر (انگلستان) و لاساپینزا (ایتالیا) توسعه داده‌اند. SPHysics برای مشکلات مختلف مانند شکست موج (دالریمل و راجرز، ۲۰۰۶)، رفتار شکست سد

(کرسپو و همکاران، ۲۰۰۸) تعامل با سازه‌های ساحلی یا حرکت موج‌شکن‌ها (راجرز و همکاران، ۲۰۱۰) تأیید شده است (سایت SPHysics). ذکر این نکته حائز اهمیت است که درکد نوشته شده SPHysics تعریف بستر دریا فقط به صورت تخت است؛ بنابراین در این پژوهش با توجه به شیب‌های تعریف شده در هر دو مدل، تغییراتی در هندسه این کد محاسباتی داده و همچنین پارامترهای دیگری چون پارامتر تشابه شکست بررسی شده است. در این پژوهش، هندسه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده، با به‌کارگیری نسخه اصلاح شده برای کد SPHysics برای مدل‌سازی موج در مدل عددی هیدرودینامیک ذرات هموار آماده‌سازی شده است که به صورت اشکال ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳- هندسه مدل‌سازی شده در محیط SPHysics از مدل اول



شکل ۴- هندسه مدل‌سازی شده در محیط SPHysics از مدل دوم

تناوب موج و شیب بدنه موج‌شکن نیز در هر قسمت بیان شده است.

مدل اول: تغییرات زمان تناوب (T) با میزان بالاروی موج (Ru)

تغییرات بالاروی به ازای زمان تناوبهای مختلف موج با استفاده از نتایج مدل‌سازی و با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار در شکل ۵a و ۵b نمایش داده شده است. برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده با استفاده از این روش، تغییرات میزان بالاروی موج با زمان تناوب آن در شیب‌های ۲/۵ و ۲ و $\cot\alpha=1/2.5$ با کارهای

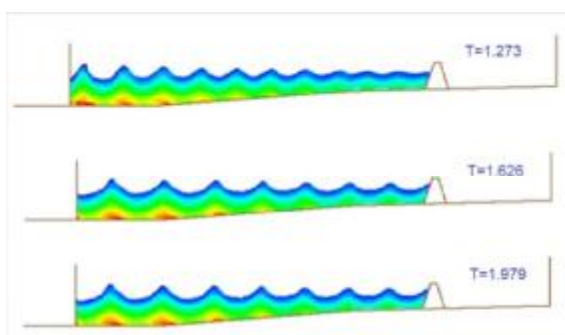
نتایج و بحث

مدل‌سازی بالاروی موج، با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای موج‌شکن‌های مطرح شده با دو شیب مختلف کف انجام شد؛ که در این باره برخی پارامترهای تعریف شده در مدل‌سازی عبارتست از:

(Kernel function: Cubic, Time- Steping algorithm: Symplectic, Equation of State: Tait's equation, Boundary Conditions: Repulsive Force, Paddle-Type: Piston)

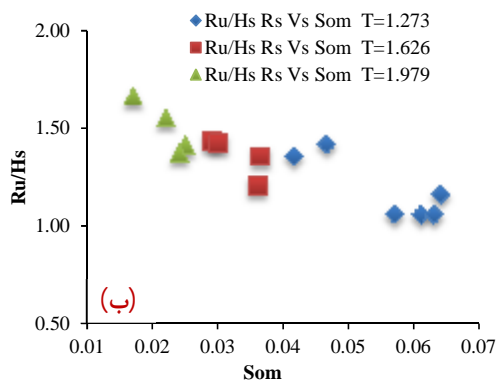
که نتایج در دو قسمت مربوط به مدل‌های هندسی یک و دو بیان می‌شود. واکنش هیدرولیکی بالاروی از طرف موج‌شکن با تغییر در پارامترهایی چون ارتفاع موج، زمان

است، ارتباط بین بالاروی؛ تیزی و زمان تناوب موج مشابه موج‌شکن صلب است، با این تفاوت که میزان بالاروی موج در یک تیزی موج و زمان تناوب مشخص در موج‌شکن با لایه آرمور کمتر از مقدار مشابه آن در موج‌شکن صلب (حدود ۴۰ درصد) است. همچنین نتایج آزمون دانکن مربوط به آن در شکل ۷ آمده است.

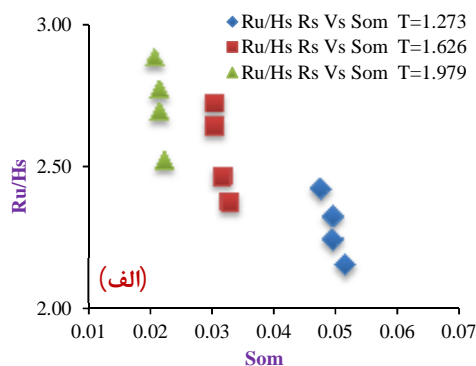


شکل ۵a- بالاروی موج در زمان تناوبهای مختلف (۱/۲۷۳s و ۱/۶۲۶s و ۱/۹۷۹s) با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار

آزمایشگاهی ارائه شده توسط اداره مهندسی ارتش آمریکا که در شکل ۶ نشان داده شده، مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، نتایج به‌دست آمده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار (به‌صورت نقاط) تطابق مناسبی با کارهای آزمایشگاهی ارائه شده توسط اداره مهندسی ارتش آمریکا (به‌صورت خط ممتد) و این نشان از توانایی این مدل عددی در شبیه‌سازی جریان در اطراف موج‌شکن‌ها دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از میزان بالاروی موج محاسبه شده با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار، تغییرات بالاروی موج بر حسب تیزی آن در شکل ۵b- الف برای موج‌شکن صلب نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، میزان بالاروی موج با تیزی موج رابطه معکوس و با زمان تناوب موج رابطه مستقیم دارد. میزان بالاروی موج در زمان تناوبهای کمتر، حساسیت کمتری نسبت به تیزی موج برخوردار دارد. شکل ۵b- ب رابطه تغییرات بالاروی موج بر حسب تیزی موج در زمان تناوبهای مختلف را در موج‌شکن با لایه آرمور با استفاده از نتایج آزمایشگاهی شیریان نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص



شکل ۵b- میزان بالاروی موج محاسبه شده بر حسب تیزی موج برای زمان تناوبهای مختلف الف) موج‌شکن صلب (روش هیدرودینامیک ذرات هموار) و ب) موج‌شکن با لایه آرمور (شیریان، ۱۳۸۴)

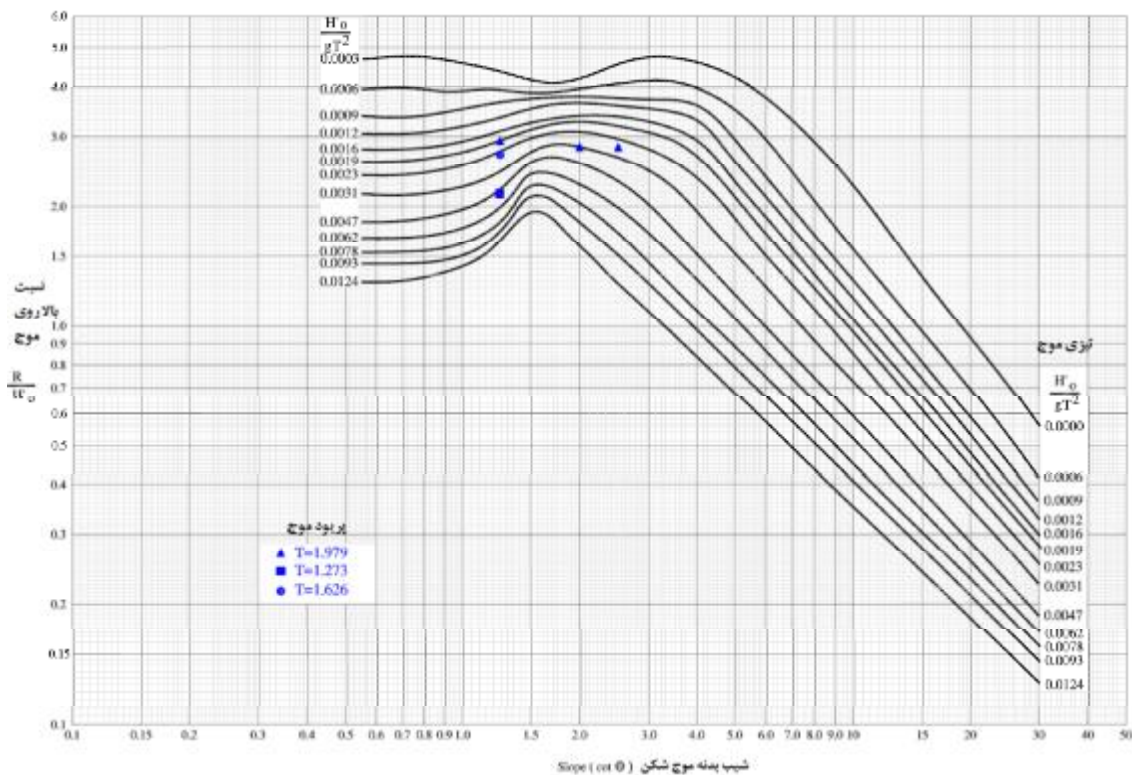


می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین دو موج‌شکن صلب و لایه آرمور در زمان تناوبهای ۱/۲۷۳s، ۱/۶۲۶s و ۱/۹۷۹s تفاوت معنی‌داری وجود دارد. با توجه به میانگین بالاروی موج‌شکن صلب می‌توان گفت که در زمان تناوبهای یکسان میزان بالاروی موج شکل صلب بیشتر از موج‌شکن با لایه آرمور است.

اما از نظر آماری جدول ۱ مقایسه میانگین دو موج‌شکن صلب و موج‌شکن با لایه آرمور در زمان تناوبهای متفاوت را نشان می‌دهد. سطح معنی‌داری، تفاوت بین دو موج‌شکن را تأیید یا رد می‌کند. اگر سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ باشد به معنی وجود تفاوت معنی‌دار و در غیر این صورت تفاوتی بین دو نمونه وجود ندارد. سطح معنی‌داری بر اساس نمره t و درجه آزادی محاسبه

زمان تناوب ۱/۶۲ ثانیه از نظر میزان بالاروی در موج شکن با لایه آرمور تفاوتی مشاهده نشد. علاوه بر این، بررسی همبستگی بین بالاروی با زمان تناوب نشان داد که برای موج شکن صلب یک همبستگی با ضریب ۰/۹۸۲ وجود دارد که مثبت بودن و میزان ضریب همبستگی مشخص می کند که هرچه زمان تناوب بالا برود، میزان بالاروی موج نیز افزایش می یابد. همچنین برای موج شکن لایه آرمور بین زمان تناوب و بالاروی موج رابطه مثبت و معنی دار مشاهده شد که این رابطه با ضریب همبستگی ۰/۹۵۱ به معنی افزایش میزان بالاروی موج به ازای افزایش زمان تناوب است.

همچنین مقایسه زمان تناوب های متفاوت در هر یک از دو موج شکن صلب و لایه آرمور، مشخص کرد که در موج شکن صلب بین زمان تناوب های متفاوت تفاوت معنی داری وجود دارد؛ به صورتی که زمان تناوب ۱/۹۷ ثانیه بیشترین میزان بالاروی موج را و با زمان تناوب ۱/۲۷ ثانیه تفاوت معنی داری دارد؛ ولی با زمان تناوب ۱/۶۲ ثانیه از نظر آماری تفاوتی ندارد. برای موج شکن با لایه آرمور نیز بین سه زمان تناوب تفاوت معنی داری مشاهده شد که برای این موج شکن نیز بیشترین میزان بالاروی برای زمان تناوب ۱/۹۷ ثانیه است که زمان تناوب ۱/۶۲ ثانیه تفاوتی ندارد؛ ولی با زمان تناوب ۱/۲۷ ثانیه تفاوت معنی دار دارد. همچنین بین زمان تناوب ۱/۲۷ ثانیه و

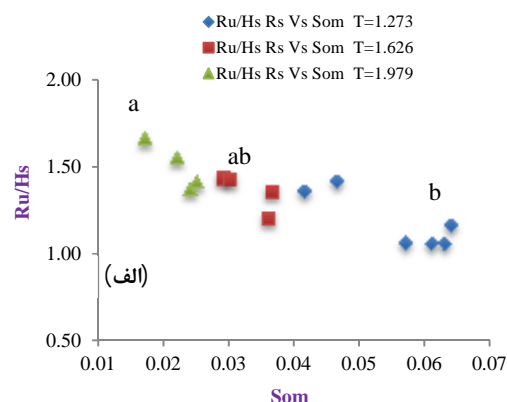
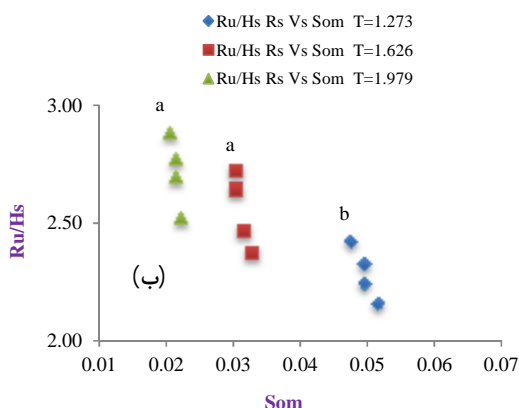


شکل ۶- مقایسه میزان بالاروی بر حسب زمان تناوب، تیزی و شیب پدنه موج شکن با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده (خط ممتد) توسط اداره مهندسی ارتش آمریکا (ارتش آمریکا، ۱۹۸۴)

جدول ۱- نتایج مقایسه میانگین میزان بالاروی دو موج شکن صلب و موج شکن با لایه آرمور بر اساس زمان تناوب

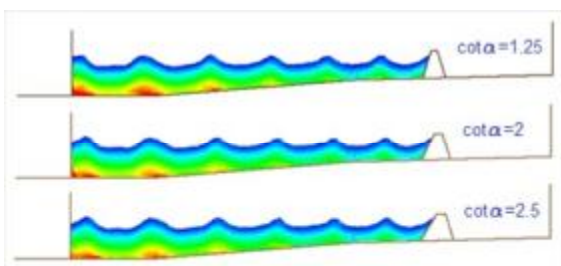
زمان تناوب	میانگین	انحراف معیار	نمره t	سطح معنی داری
۱/۲۷۳	۲/۲۸	۰/۱۱	۱۱/۷۱	۰/۰۰۱
	۱/۱۸	۰/۱۶		
۱/۶۲	۲/۵۴	۰/۱۶	۱۴/۱۵	۰/۰۰۱
	۱/۳۴	۰/۰۹		

۱/۹۷	موج شکل صلب	۲/۷۱	۰/۱۵	۱۳/۲۶	۰/۰۰۱
	موج شکن لایه آرمور	۱/۴۷	۰/۱۳		



شکل ۷- الف) نتایج آزمون دانکن و میزان بالاروی موج محاسبه شده بر حسب تیزی موج برای زمان تناوب‌های مختلف موج‌شکن با لایه آرمور و ب) نتایج آزمون دانکن و میزان بالاروی موج محاسبه شده بر حسب تیزی موج برای زمان تناوب‌های مختلف موج‌شکن صلب

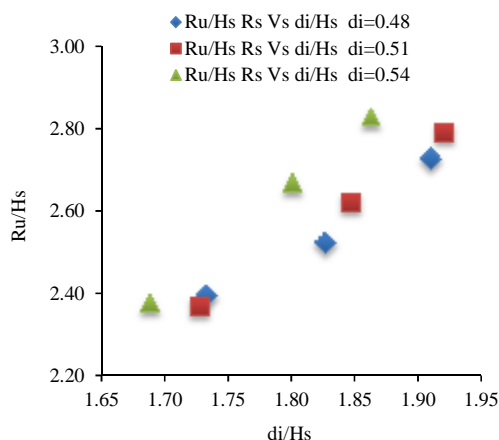
هموار، تغییرات بالاروی بر حسب تیزی موج به ازای شیب‌های مختلف بدنه شیب‌شکن، در شکل ۱۰- الف نشان داده شده است. روند تغییرات بالاروی موج با اعمال تغییرات در شیب بدنه موج‌شکن مشابه روند تغییرات زمان تناوب موج است؛ با وجود این، حساسیت پارامتر بالاروی موج نسبت به شیب بدنه زیاد بوده که میزان بالاروی موج را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل ۱۰- ب، تغییرات میزان بالاروی موج با تیزی آن را به ازای شیب‌های بدنه مختلف در یک شیب‌شکن با لایه آرمور نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، میزان بالاروی در موج‌شکن توده سنگی نسبت به مقدار مشابه در شیب‌شکن صلب برای یک تیزی موج مشخص کمتر بوده و میزان بالاروی موج حساسیت کمتری نسبت به شیب بدنه دارد.



شکل ۹- نمایش بالاروی موج در حالت شیب‌های مختلف بدنه موج‌شکن (۲/۵ و ۲ و ۱/۲۵) (روش SPH)

تغییرات عمق آب (d_i) با میزان بالاروی موج

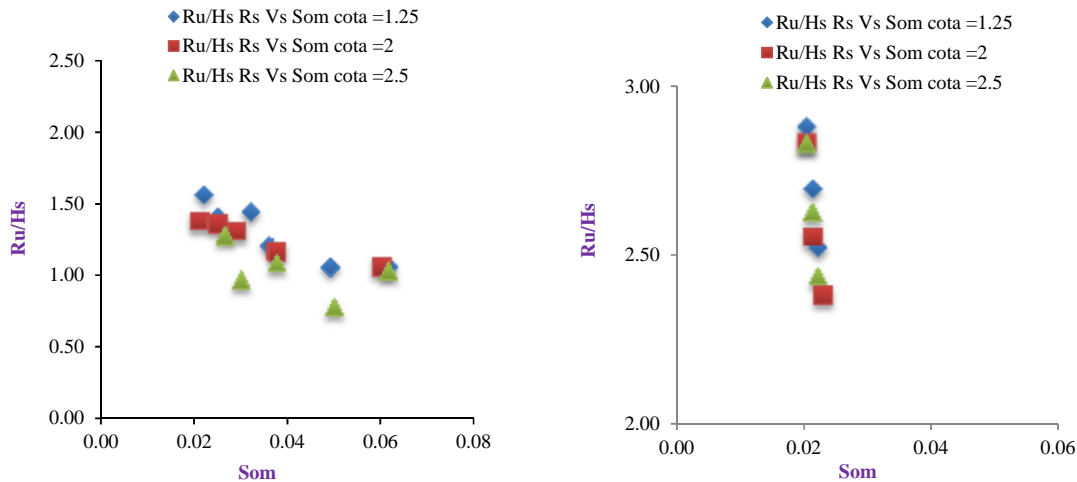
بالاروی موج بر حسب تغییرات عمق در این قسمت بررسی شده است. همان‌گونه که از شکل ۸ مشخص است، با افزایش عمق ($d_i=0/48$ m, $0/51$ m, $0/54$ m) و به تبع آن نسبت d_i/H_s ، میزان بالاروی موج افزایش می‌یابد.



شکل ۸- میزان بالاروی بر حسب تغییرات عمق (روش هیدرودینامیک ذرات هموار)

تغییرات شیب بدنه موج‌شکن ($cota$) با میزان بالاروی

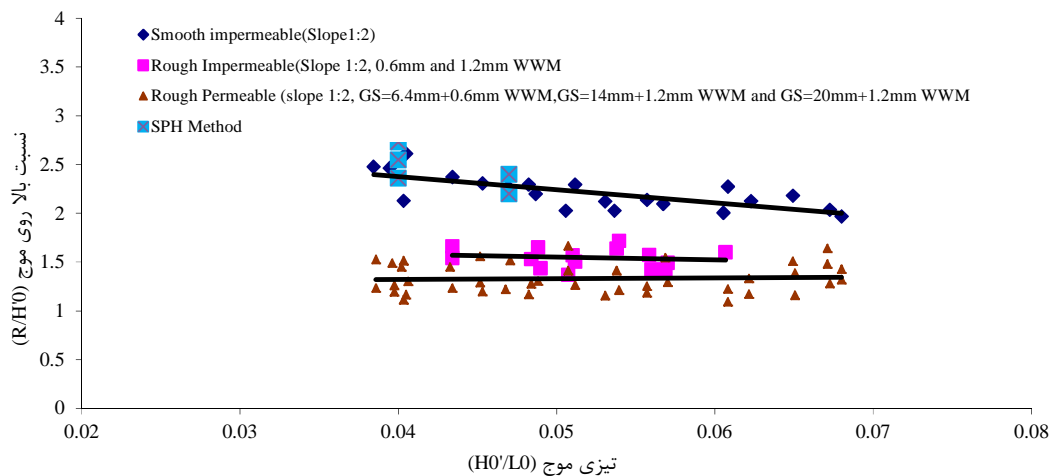
تغییرات بالاروی بر حسب تیزی موج به ازای تغییرات شیب بدنه موج‌شکن در سه حالت $cota=2/5$ و ۲ و $cota=1/25$ در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات



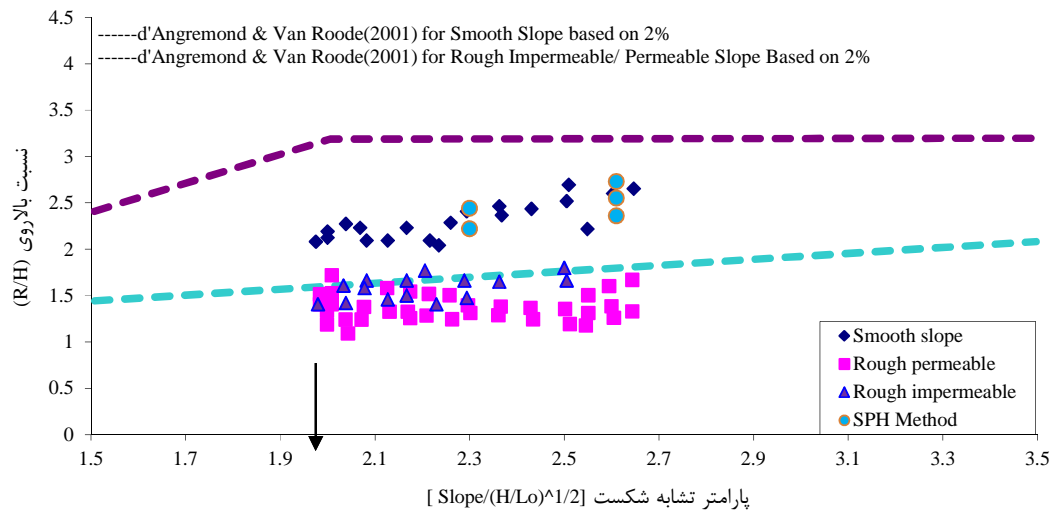
شکل ۱۰- الف) میزان بالاروی بر حسب تیزی موج به ازای تغییرات شیب بدنه موج شکن الف) موج شکن صلب (روش هیدرودینامیک ذرات هموار) و ب) موج شکن با لایه آرمور (شیریان، ۱۳۸۴)

حاصل از مدل سازی در شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که از این شکل های مشخص است، میزان بالاروی بر حسب تیزی موج و پارامتر تشابه شکست بر اساس روش هیدرودینامیک ذرات هموار، همخوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. علاوه بر این، مقایسه نتایج آزمایشگاهی مرکز تحقیقات مهندسی سواحل ارتش امریکا در رابطه با تغییرات بالاروی موج بر حسب شیب بدنه با نتایج عددی هندسه مورد مطالعه در شکل ۱۳ نیز حاکی از انطباق مناسب این دو روش در مدل سازی موج شکن های هموار نفوذناپذیر است.

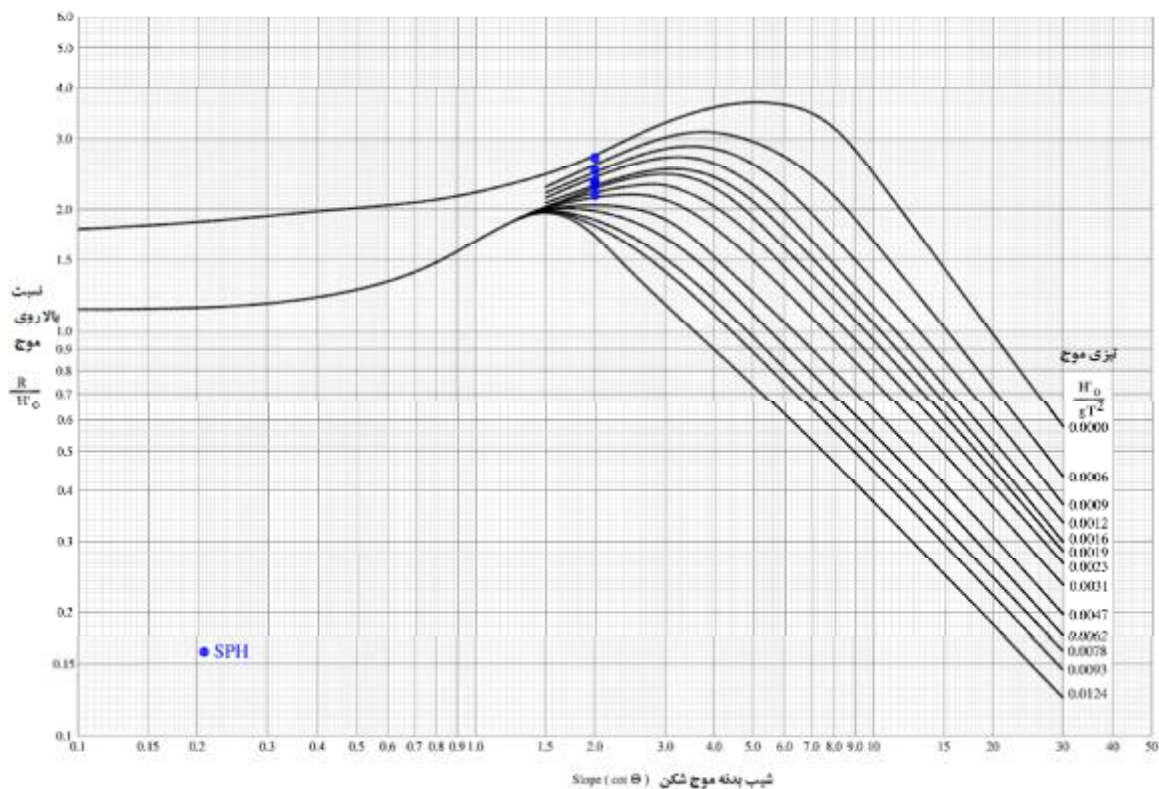
مدل دوم: میزان بالاروی موج برای موج شکن هموار (صلب) با روش هیدرودینامیک ذرات هموار
بر اساس مدل آزمایشگاهی شانکار و جایاراتنه (۲۰۰۳)، همان طور که در شکل ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است، بالاروی موج با توجه به انواع متفاوت ساختار بدنه موج شکن (سطح نفوذپذیر غیرهموار، سطح نفوذناپذیر غیرهموار و سطح نفوذناپذیر هموار) بر حسب پارامترهایی چون تیزی موج و پارامتر تشابه شکست بررسی شده است. در پژوهش حاضر، بر اساس این مدل آزمایشگاهی مدل سازی بالاروی در اطراف موج شکن هموار (صلب) به روش هیدرودینامیک ذرات هموار انجام گرفته و نتایج



شکل ۱۱- مقایسه میزان بالاروی موج بر حسب تیزی موج برای مدل های موج شکن هموار (صلب) بر اساس دو روش آزمایشگاهی و SPH (شانکار و جایاراتنه، ۲۰۰۳)



شکل ۱۲- مقایسه میزان بالاروی موج بر حسب پارامتر تشابه شکست برای مدل‌های موج‌شکن هموار (صلب) بر اساس دو روش آزمایشگاهی و SPH (شانکار و جایاراتنه، ۲۰۰۳)



شکل ۱۳- مقایسه میزان بالاروی با توجه به رابطه تیزی موج و شیب بدنه موج شکن با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار در مدل دوم و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط اداره مهندسی ارتش آمریکا (ارتش آمریکا، ۱۹۸۴)

نتیجه‌گیری

استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار و با بهره‌گیری از ایجاد تغییرات اساسی مورد نیاز در کد SPHysics و رفع ایرادهای به وجود آمده به سبب تغییر

در این پژوهش، هدف اصلی، مدل‌سازی موج‌شکن با شیب بستر ترکیبی و جریان اطراف آن در دو هندسه مختلف، با

۳. غلامی م. ۱۳۸۷. موج‌شکن‌های توده سنگی. انتشارات فدک ایستاتیس. ۱۹۲ ص.
4. Ahrens J. P. and Titus M. F. 1985. Wave run-up formulas for smooth slopes. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers. III (I): 128-133.
 5. Altomare C. Crespo A. J. C. Rogers B. D. Dominguez J. M. Gironella X. and Gómez-Gesteira M. 2014. Numerical modelling of armour block sea breakwater with smoothed particle hydrodynamics, *Applied Ocean Research*. 34: 34-45.
 6. Army US. 1984. Shore protection manual. US: Washington. 222 p.
 7. Barreiro A. Crespo A. J. C. Domínguez J. M. and Gómez-Gesteira M. 2013. Smoothed particle hydrodynamics for coastal engineering problems. *Compute Structure*. 120: 96-106.
 8. Chue S. H. 1980. Wave run-up formula of universal applicability. 69: 1035-1041.
 9. Crespo A. J. C. Gómez-Gesteira M. and Dalrymple R. A. 2008. Modeling dam break behavior over a wet bed by a SPH technique. *J Waterway, Port, Coast Ocean Engineering*. 134(6): 313-20.
 10. Dalrymple R. A. and Rogers B. D. 2006. Numerical modeling of water waves with the SPH method *Coastal Engineering*. 53: 141-147.
 11. d'Angremond K. and Van Roode F.C. 2001. Breakwaters and closure dams. First edition. Delft University Press. *Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE. 118(5): 534-550.
 12. Ghadampour Z. Hashemi M. R. taleb beydokhti N. and Hossein Nikseresht A. 2013. Comparison of two projection methods in SPH for modeling flow under a gate, *Numerical Methods in Engineering*, No2, 31.
 13. Gingold R. A. and Monaghan J. J. 1982. Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics, *Journal Computational Physics*. 46: 429-453.
 14. Higuera P. Lara J. L. and Losada I. J. 2013. Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM. *Coastal Engineering*. 71: 119-134.
 15. Hunt I. A. 1959. Design of seawalls and breakwaters. *Journal. Waterways and Harbors Division*. ASCE. 123-152.
 16. Liu G. R. and GU Y. T. 2005. An Introduction to Meshfree Methods and Their Programming. 309 p.
 17. Liu, G. R. and Liu M. B. 2003. Smoothed particle hydrodynamics – a meshfree particle method. *World Scientific*. 472 p.

در کد بود. در نهایت برای صحت‌سنجی این روش، کار با نتایج به‌دست آمده از دو مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. در هندسه اول، پس از انجام مدل‌سازی و تطابق مناسب نتایج حاصل‌شده با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط شیریان و ارتش آمریکا، تغییرات برخی پارامترهای تأثیرگذار از جمله عمق آب، زمان تناوب موج، تیزی موج و شیب بدنه موج‌شکن و تأثیر آن بر میزان بالاروی موج بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده این واقعیت بود که با افزایش زمان تناوب، عمق و شیب بدنه موج‌شکن میزان بالاروی موج افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج این پژوهش برای موج‌شکن صلب به طور کلی با نتایج حاصل از میزان بالاروی موج برای موج‌شکن با لایه آرمور که به شکل آزمایشگاهی انجام شده بود، نشان داد که تغییرات میزان بالاروی موج در هر دو نوع موج‌شکن به ازای زمان تناوب و شیب بدنه‌های مختلف، در یک راستای شبیه به هم بوده؛ هرچند این تغییرات در نوع صلب بیشتر است (حدود ۴۰ درصد). مدل دوم بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مقایسه جامع در رابطه با میزان بالاروی موج در سه نوع متفاوت ساختار بدنه موج‌شکن (سطح نفوذپذیر غیرهموار، سطح نفوذناپذیر غیرهموار و سطح نفوذناپذیر هموار) بر حسب پارامترهایی چون تیزی موج و پارامتر تشابه شکست انجام شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار در موج‌شکن با سطح نفوذناپذیر هموار (صلب) تطابق مناسبی با کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته توسط شانکار و جایاراتنه (۲۰۰۳) و علاوه بر آن با نتایج آزمایشگاهی ارتش آمریکا داشت. در این حالت نیز مقایسه نتایج حاصل از بالاروی موج در موج‌شکن صلب و موج‌شکن نفوذپذیر با سطح زبر (موج‌شکن توده سنگی) بیان‌کننده افزایش بالاروی در حدود ۴۰ درصدی در حالت موج‌شکن صلب بود.

منابع

۱. چگینی و. ۱۳۷۷. راهنمای طرح موج‌شکن‌ها جلد اول، شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری.
۲. شیریان ن. ۱۳۸۴. مطالعه آزمایشگاهی واکنش‌های هیدرولیکی و پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر. رساله دوره دکتری مهندسی عمران. دانشگاه تهران. ۲۵۹ ص.

18. Monaghan J. J. 1992. Smoothed particle hydrodynamics. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 30: 543-574.
19. Monaghan J. J. 1994. Simulating free surface flows with SPH". Journal of Computational Physics 110: 399-406.
20. Monaghan J. J. 2005. Smoothed particle hydrodynamics, Reports on progress in physics. 68: 1703-1759.
21. Omidvar P. 2010. Wave loading on bodies in the free surface using smoothed particle hydrodynamics (SPH). Ph.D. Thesis, University of Manchester. 203 p.
22. Rogers B. D. Dalrymple R. A. and Stansby P. K. 2010. Simulation of caisson breakwater movement using 2-D SPH. Journal of Hydraulic Research. 48: 135-141.
23. Saville Jr. T. 1956. Wave Runup on shore structures. Journal. Waterways and Harbors Division, Proc. Of the American Society of Civil Engineers. 2(WW2, 925): 1-15.
24. Shankar N. J. and Jayaratne M. P. R. 2003. Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures, Ocean Engineering. 30: 221-238.
25. SPHysics, open-source SPH free-surface flow solver, SPHysics URL: http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/Main_Page
26. Van der Meer J. W. and Stam C. M. 1992. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures. 118: 534-550.
27. Van der Meer J. W. 1993. Conceptual design of rubble mound breakwaters. Delft Hydraulics, No 483.