

## بررسی بالاروی امواج تنها در برخورد به شیب‌های غیرخطی ساحلی به روش هیدرودینامیک ذرات هموار

سیروس ارشادی<sup>۱\*</sup>، امین فتحی<sup>۲</sup>، سیدامیررضا سادات شریفی<sup>۳</sup>، اسماعیل جعفرزاده<sup>۴</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: cyrusershadil@yahoo.co.uk

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پست الکترونیکی: aminfathi.1369@gmail.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: amirreza.sadatsharifi@gmail.com

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: esmaiel.jafarzadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۱۶

\* نویسنده مسوول

تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۲۵

### چکیده

در این مقاله به منظور استخراج یک فرمول تجربی برای تعیین دامنه بیشینه امواج تنها در محل خط ساحلی برای سواحل با شیب غیرخطی (پروفیل توانی) از مدل‌سازی عددی امواج استفاده شد. در این راستا، برای مدل‌سازی تأثیر غیرخطی بودن شیب سواحل در مقایسه با حالت خطی آن بر بالاروی امواج تنها از روش عددی SPH استفاده گردید. همچنین خصوصیات هیدرودینامیکی موج، در زمان‌های قبل و هنگام برخورد موج تنها به ساحل و لحظه بیشترین ارتفاع (بالاروی) موج بررسی شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی بالاروی امواج تنها بر شیب خطی ثابت نشان داد که درصد خطای روش حاضر نسبت به داده‌های آزمایشگاهی موجود حدود ۳/۵ درصد است. بنابراین روش عددی SPH ارایه شده برای شبیه‌سازی بالاروی امواج تنها از سطوح شیبدار مناسب است. همچنین نتایج نشان داد که نسبت بالاروی امواج تنها از سواحل با شیب غیرخطی به شیب خطی، با افزایش توان انحنای شیب، به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. در نهایت یک فرمول جدید برای تعیین بالاروی امواج تنها از شیب‌های غیرخطی نسبت به شیب‌های خطی ساحلی ارایه گردید.

کلمات کلیدی: بالاروی، سواحل غیرخطی، امواج تنها، روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار.

### ۱. مقدمه

می‌توانند در اثر عوامل مختلفی مانند باد، زلزله و زمین لغزش در دریا به وجود آیند و به سمت ساحل حرکت کنند. یکی از اتفاقاتی که زمان نزدیک شدن امواج به ساحل رخ می‌دهد، افزایش ارتفاع امواج در اثر برخورد با ساحل کم عمق و به تبع آن افزایش انرژی مخرب آنها است؛ این مسئله در متون علمی تحت عنوان بالاروی مطرح شده است. برای نواحی کم عمق ساحلی با استفاده از پدیده‌های امواج بلند مانند بالاروی را می‌توان به خوبی

ضرورت حفاظت از سواحل و نواحی شهری و صنعتی واقع در آنها در مقابل امواج به لحاظ خساراتی که ممکن است پس از حمله امواج سهمگین به ساحل به بار آید، مسئله‌ای نیست که بر کسی پوشیده باشد. لازمه حفاظت از سواحل در مقابل امواج، دانستن ارتفاع امواجی است که به ساحل می‌رسند. این امواج

توسط Wei و همکاران (۲۰۱۰) پیشنهاد شد. نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج حاصل از این روش در مقایسه با روش‌های دیگر از دقت بالایی برخوردار بود. بالاروی امواج تنها بر شیب‌های خطی مختلف (شیب‌های ۱۵، ۲۰ و ۴۵ درجه) به صورت آزمایشگاهی توسط Cho (2011) انجام شد و یک فرمول برای محاسبه بالاروی این شیب‌ها پیشنهاد شد. در این تحقیق برای بالاروی امواج تنها بر هریک از شیب‌های خطی ۱۵، ۲۰ و ۴۵ درجه، فرمولی جدا پیشنهاد شد و توصیه شد برای سایر شیب‌ها از درون‌یابی استفاده گردد. بالاروی امواج غیرخطی روی سواحل با شیب‌های تند با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر (ISPH) توسط Memarzadeh و Hejazi (۲۰۱۲) محاسبه شد. این محققین، ابتدا نتایج مدل عددی را با مدل آزمایشگاهی Hall و Watts (۱۹۵۳) مقایسه و اعتبارسنجی نمودند و سپس تاثیر تغییرات شیب ساحل و همچنین تغییر نسبت ارتفاع موج تنها به عمق آب را بررسی کردند. در مطالعه آزمایشگاهی، بالاروی موج تنها روی شیب‌های مسطح مختلف توسط Han و همکاران (۲۰۱۵) محاسبه شد و نتایج با فرمول‌های Cho (2011) مقایسه گردید. این محققین روابطی برای بالاروی امواج تنها از شیب‌های ۱۵، ۲۰ و ۴۵ ارائه نمودند و نتایج را با مدل Hall و Watts (۱۹۵۳) مقایسه کردند. همچنین Jiana و همکاران (۲۰۱۵) از روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای محاسبه بالاروی امواج تنها روی سواحل با شیب خطی استفاده نمودند. این محققین تاثیر تغییر شیب ساحل در طول خط ساحلی را بررسی نمودند، اما همچنان شیب ساحل خطی فرض شد.

همان‌گونه که در پیشینه تحقیق مشاهده شد تا کنون در اکثر تحقیق‌هایی که در مورد بالاروی امواج تنها از سواحل انجام گرفته و یا در تمامی تئوری‌هایی که موجود است شیب ساحل به صورت خطی و یکنواخت فرض شده است. در صورتی که شیب سواحل الزاما به صورت خطی نیست و در مسیر پیش‌روی موج شیب تغییر می‌کند. در این تحقیق از روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای بررسی بالاروی امواج تنها از شیب‌های غیرخطی (توانی) استفاده شد.

روش SPH برای اولین بار توسط Gingold و Monaghan (۱۹۷۷) برای حل مسائل اخت‌فیزیکی ارائه شد. پس از آن Monaghan (1992) نشان داد که از این روش می‌توان برای مسائل سطح آزاد استفاده نمود.

با امواج تنها پیش‌بینی نمود. موج تنها، موج انتقالی است. برخلاف موج نوسانی متناوب نبوده و دارای یک قله است. با افزایش طول موج در ناحیه ساحلی، امواج به موج تنها نزدیک می‌شوند. در نتیجه نیم‌رخ سطح آب در ناحیه ساحلی به حالت موج تنها نزدیک می‌شود. بنابراین برای شبیه‌سازی بالاروی در ناحیه ساحلی می‌توان از تئوری امواج تنها استفاده نمود.

هر چند فرآیند تولید امواج و انتشار آنها در دریاها امروزه کاملا واضح و مشخص است، اما فرآیند بالاروی و بازتاب امواج این‌گونه نیست. البته با گذر زمان و استفاده از پیشرفت‌های ساینرین در مسئله بالاروی، به تدریج درک این مسئله افزوده شده است. مسئله بالاروی امواج تنها در حالات مختلف و به روش‌های گوناگون عددی، تحلیلی و تجربی حل شده است. بیشتر تحقیقات با انتشار امواج ابتدا در عمق ثابت و سپس در برخورد با ساحل شیب دار انجام شده است. در حالی که توپوگرافی کف اقیانوس بر انتشار امواج و توپوگرافی ساحل بر بالاروی امواج تاثیر می‌گذارد به نحوی که بسته به نوع توپوگرافی، بعضی از توپوگرافی‌های ساحلی تشدید کننده ارتفاع امواج و بعضی دیگر کاهش دهنده ارتفاع امواج هستند.

موج تنها یا منفرد اولین بار توسط Scott Russell (1844) معرفی شد که توسط سیستمی از معادلات دیفرانسیل بیان می‌شود. معادلات دیفرانسیل حاکم بر بالاروی موج تنها از معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر حرکت سیال بدست می‌آیند. نخستین فردی که با صرف‌نظر از ترم لزجت در معادلات ناویر-استوکس، معادله‌ای برای سطح آزاد موج تنها در آب‌های کم عمق ارائه داد Boussinesq (1972) بود که به معادله بوزینسک مشهور شد. در این معادله پتانسیل سرعت تابعی از عمق است.

برای محاسبه بالاروی امواج دامنه بلند، حل معادلات دیفرانسیل جزئی با روش تحلیلی توسط Madsen و Fahrman (۲۰۰۸) انجام شد. نتایج به دست آمده با استفاده از این روش به نتایج مدل بوسینسک خیلی نزدیک بود.

برای شبیه‌سازی بالاروی امواج تنها از شیب‌های قائم و خطی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) توسط Nam و Haeng (۲۰۰۸) ارائه شد. آن‌ها همچنین منحنی سطح آزاد موج را روی شیب ساحل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند و اعتبارسنجی کردند. یک روش بر مبنای شبکه مصنوعی برای محاسبه بالاروی امواج تنها از سواحل با شیب‌های خطی

در این رابطه  $q = \frac{r}{h}$ ،  $r$  فاصله بین ذره  $a$  و ذرات همسایه است.

۱-۱-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم در روش هیدرودینامیک ذرات هموار معادلات بقای جرم و مومنتوم و معادله حالت است که به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

• معادله بقای جرم و مومنتوم

معادلات بقای جرم و مومنتوم به صورت معادله‌های ۴ و ۵ تعریف می‌شوند.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot u = 0 \quad \text{معادله ۴}$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + u_0 \nabla^2 u + \frac{1}{\rho} \nabla \tau \quad \text{معادله ۵}$$

در این روابط  $\rho$  دانسیته،  $u$  سرعت،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $P$  فشار،  $v_0 = 10^{-6} m^2/s$  ویسکوزیته سینماتیکی جریان و  $\tau$  تنسور تنش sps است (Rogers and Dalrymple, 2004). فرم گسسته شده معادلات بالا به صورت معادله‌های ۶ و ۷ است.

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \rho_a \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} u_{ab} \cdot \nabla W_{ab} \quad \text{معادله ۶}$$

$$\text{معادله ۷}$$

$$\frac{du_a}{dt} = g + \sum_b m_b \left( \frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{\tau_a}{\rho_a^2} + \frac{\tau_b}{\rho_b^2} + \sum_b m_b \frac{4u_0 r V_a W_{ab}}{(r_a + r_b)(|r_{ab}|^2 + \eta^2)} \right)$$

در این روابط  $m$  جرم ذرات و  $g$  شتاب گرانش زمین برابر با  $9.807 m/s^2$  است.

۱-۲-۲- معادله حالت

در WCSPH سیال کمی تراکم پذیر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای به دست آوردن فشار می‌توان از معادله حالت استفاده نمود. برای محاسبه تغییرات فشار مورد استفاده در روش WCSPH از معادله EOS<sup>۱</sup> استفاده شد که توسط Batchelor (1967) ارائه گردید (معادله‌های ۸ و ۹).

<sup>1</sup> Equation Of State

روش هیدرودینامیک ذرات هموار یک روش کاملاً لاگرانژی و بدون نیاز به مش‌بندی است که در علوم مهندسی استفاده می‌شود. مدل‌سازی سطوح پیچیده با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار نسبت به روش‌های برمبنای شبکه (مانند روش‌های المان محدود و تفاضل محدود) ساده تر هستند. همچنین روش هیدرودینامیک ذرات هموار حرکت سطح آزاد سیال را به خوبی مدل می‌کند. از این رو این روش برای شبیه‌سازی پدیده‌هایی مانند شکست موج و بالاروی امواج مناسب است. بنابراین در این تحقیق از روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای شبیه‌سازی بالاروی حاصل از امواج تنها از سواحل با شیب غیر خطی استفاده می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲-۱- مبانی روش هیدرودینامیک ذرات هموار

روش هیدرودینامیک ذرات هموار بر پایه معادله ۱ است که هر تابع  $A(r)$  را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$A(r) = \int A(r') W(r-r', h) dr' \quad \text{معادله ۱}$$

در این رابطه  $r$  مکان،  $W$  تابع وزن یا کرنل و  $h$  طول هموارساز است که بر اساس آن دامنه تاثیر ذرات دایره‌ای که به شعاع  $2h$  است، مشخص می‌شود. معادله ۱ به صورت معادله ۲ گسسته سازی شد.

$$A_a = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \quad \text{معادله ۲}$$

در این رابطه زیرنویس  $b$  نشان‌دهنده ذرات همسایه‌ای است که در ناحیه تاثیر قرار دارند و  $W_{ab} = W(r_a - r_b, h)$  تابع کرنل است. در واقع تابع کرنل تابعی است که برای درونیابی ذرات از آن استفاده می‌شود. توابع متعددی برای تابع کرنل استفاده می‌شوند که در این تحقیق از تابع درجه ۳ اسپیلاین استفاده شد که به صورت معادله ۳ تعریف می‌شود (Monaghan and Lattanzio, 1985).

$$W(r, h) = \frac{10}{7\pi h^2} \left( 1 - \frac{3}{2} q^2 - \frac{3}{4} q^3 \right) \quad 0 < q < 1$$

$$W(r, h) = \frac{10}{28\pi h^2} (2 - q)^3 \quad 1 < q < 2$$

$$W(r, h) = 0 \quad q > 2$$

معادله ۳

غیرخطی سواحل با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار انجام گردید.

$$P = B \left[ \left( \frac{P}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad \text{معادله ۸}$$

۲-۲ تولید موج تنها

$$B = \frac{C_0 \rho_0}{\gamma} \quad \text{معادله ۹}$$

شکل موج تنها به صورت تحلیلی و بر اساس تابعی از مکان  $x$  و زمان  $t$  به صورت معادله‌های ۱۱ و ۱۲ تعریف شد.

در این روابط  $B$  پارامتر ثابتی است که به مدول حجمی مربوط است،  $\gamma = 7$  ثابت پلی‌تروپیک است و  $C_0$  سرعت صوت در چگالی مرجع است.

$$\eta(x, t) = H_0 \sec h^2 \left[ \sqrt{\frac{3H_0}{4d_0}} (x - ct) \right] \quad \text{معادله ۱۱}$$

۳-۱-۲ روش XSPH

$$c = \sqrt{g(H_0 + d_0)} \quad \text{معادله ۱۲}$$

حرکت ذرات در روش SPH توسط Monaghan (1989) بر اساس معادله ۱۰ اصلاح گردید.

$$\frac{\partial r_a}{\partial t} = V_a + \varepsilon \sum_b \frac{m_b}{\rho_{ab}} V_{ab} W_{ab} \quad \text{معادله ۱۰}$$

در این روابط  $c$  سرعت موج تنها،  $H_0$  ارتفاع موج،  $g$  شتاب گرانش زمین و  $d_0$  عمق اولیه آب است. برای تولید موج در آب کم عمق از موج ساز پیستونی استفاده شد. در روش هیدرودینامیک ذرات هموار موج ساز به صورت ذرات مرزی متحرک مدل گردید. برای تولید موج باید مشخصات حرکت این ذرات متحرک (مکان و سرعت در واحد زمان) مشخص شود. در این تحقیق برای تولید موج تنها از رابطه ارائه شده توسط Guizien و Barthelem (۲۰۰۲) استفاده شد (معادله‌های ۱۳ و ۱۴).

که در این معادله  $V_{ab}$ ،  $\rho_{ab}$  و به ترتیب چگالی و سرعت میانگین بین ذرات  $a$  و  $b$  است. همچنین در معادله فوق  $\varepsilon$  یک ضریب ثابت است که بین ۱ و ۰ است.

معادله XSPH از تداخل ذرات، در هنگام شبیه‌سازی جریان‌های سیال که در تماس با یکدیگر هستند، جلوگیری می‌کند. علاوه بر آن با استفاده از این معادله سرعت ذرات اصلاح می‌شود به گونه‌ای که سرعت هر ذره نزدیک به سرعت میانگین ذرات همسایه‌اش است.

۴-۱-۲ شرایط مرزی

$$x(t) = \frac{2H}{d_0 \beta} \frac{d_0 \tanh\left(\frac{\beta c(t-t_0)}{2}\right)}{d_0 + d_0 \left(1 - \tanh^2\left(\frac{\beta c(t-t_0)}{2}\right)\right)} \quad \text{معادله ۱۳}$$

در این تحقیق از شرایط مرزی Monaghan استفاده شد. این روش توسط Monaghan (1994) برای اطمینان از این‌که ذرات از مرزها عبور نمی‌کنند ابداع گردید. در این روش ذرات تشکیل دهنده مرزها، نیرویی را در راستای عمود بر ذرات مرزی، به ذرات سیالی که در فاصله شعاع تاثیر ذرات مرزی قرار دارند، وارد می‌کنند. این موضوع باعث می‌شود که از نفوذ ذرات در مرزها جلوگیری شود. این روش توسط Monaghan و Kos (۱۹۹۹) به‌وسیله به حداقل رساندن فاصله تاثیر ذرات مرزی با نیروی دافعه دیوار اصلاح شد.

$$\beta = 2 \sqrt{\frac{3H}{4d_0^2(H + d_0)}} \quad \text{معادله ۱۴}$$

در این روابط،  $x$  موقعیت موج ساز پیستونی در زمان‌های مختلف و  $\beta$  ضریب تاخیر مرزی است.

۱-۲-۲ شبیه سازی موج تنها در عمق ثابت

در این بخش موج تنهای منتشر شده در عمق ثابت با استفاده از مدل تحلیلی بوسینسک (معادله ۱۱) و مدل آزمایشگاهی Han و همکاران (۲۰۱۵) درستی سنجی شد. فلوم استفاده شده در مدل

در کد SPHysics امکان شبیه‌سازی اجسام پیچیده و غیرخطی وجود ندارد. در این تحقیق با اضافه کردن سابروتین به کد SPHysics امکان شبیه‌سازی اجسام پیچیده مانند شیب‌های

محاسبه بالاروی امواج تنها از شیب‌های ۱۵، ۲۰ و ۴۵ درجه به طور جداگانه ارائه شدند.

در این قسمت، بالاروی حاصل از برخورد امواج تنها با ارتفاع ۴ و ۴/۵ سانتی‌متر به شیب‌های خطی ۱۵ و ۴۵ درجه با استفاده از روش SPH محاسبه شدند و با مدل آزمایشگاهی آن مقایسه گردیدند. بر اساس شرایط آزمایشگاهی ذکر شده، مدل عددی به روش هیدرودینامیک ذرات هموار، شبیه‌سازی شد. پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی مدل عددی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در مدل عددی

متغیرها	ورودی	متغیر	ورودی
شرایط مرزی	Monaghan	معادله حالت	تایم
کرنل	کیوبیک اسپیلاین	ابعاد ساحل	۱۰ و ۰/۵
الگوریتم زمانی	پیش‌بینی تصحیح	فاصله ذرات	۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۵
فیلتر چگالی	شپارد	عدد CFL	۰/۲
لزجت جریان	آشفته	ضریب سرعت صوت معادل	۲۰

نتایج شبیه‌سازی در جدول ۲ با نمونه آزمایشگاهی و عددی مقایسه شدند. با استفاده از این جدول، میانگین خطای روش هیدرودینامیک ذرات هموار ارائه شد. در محاسبه بالاروی از شیب‌های مختلف، درصد خطای روش SPH حدود ۳/۱۱ درصد محاسبه می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار برای محاسبه بالاروی حاصل از برخورد امواج تنها به سواحل مناسب است.

جدول ۲: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و روش SPH در محاسبه بالاروی امواج تنها

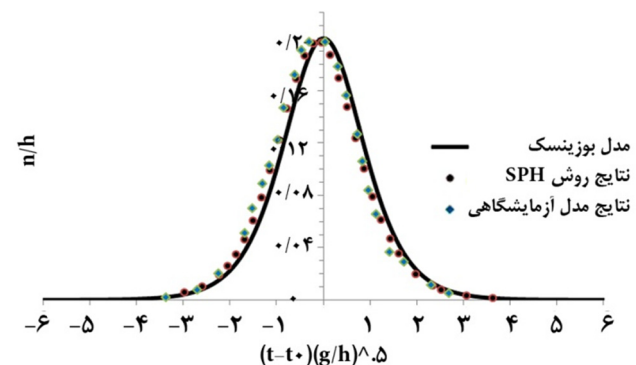
خطا (درصد)	بالاروی (متر) (مدل SPH)	بالاروی (متر) کار آزمایشگاهی	شیب بستر ساحل (درجه)	ارتفاع موج (سانتی‌متر)	عمق آب (متر)
۴/۳۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۶	۱۵	۰/۰۴	۰/۲۵
۱/۹۲	۰/۱۰۲	۰/۱۰۴	۴۵	۰/۰۴۵	۰/۲۵

در ادامه تاثیر فاصله بین ذرات در دقت نتایج بررسی شد. برای بررسی تاثیر فاصله بین ذرات بر دقت نتایج روش SPH در محاسبه بالاروی، از سه مقدار ۰/۰۱، ۰/۰۰۷۵ و ۰/۰۰۵ متر به عنوان فاصله بین ذرات در راستای طول و عرض استفاده گردید. تاثیر فاصله بین ذرات در دقت شبیه‌سازی بالاروی به روش SPH در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با کاهش فاصله بین ذرات، دقت نتایج افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله بین ذرات، هزینه محاسباتی مقدار زیادی افزایش می‌یابد. بنابراین انتخاب مقدار مناسب برای فاصله ذرات از اهمیت بالایی برخوردار است.

آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی موج تنها دارای طول ۱۵ متر، عمق آب ۰/۲۵ متر و دامنه موج تنها ۰/۰۵ متر بود.

نتایج شبیه‌سازی منحنی سطح آزاد موج تنها در عمق ثابت با استفاده از روش SPH، با مدل بوزینسک و نتایج آزمایشگاهی Han و همکاران (۲۰۱۵) در شکل ۱ مقایسه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است روش SPH دارای دقت بالایی در شبیه‌سازی امواج تنها است.

سرعت انتشار موج تنها بر اساس تئوری بوسینسک از رابطه ۱۲ و در روش SPH بر اساس رابطه  $C = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  (C سرعت موج تنها،  $\Delta x$  جابجای تاج موج در مدت زمان  $\Delta t$ ) بدست آمد. بر این اساس سرعت موج تنها در مدل بوسینسک ۱/۷۱۵ متر بر ثانیه و در روش SPH، ۱/۶۹۱ متر بر ثانیه محاسبه شد (بنابراین خطای ۱/۴۲ درصد برای این مورد است) که از این نظر نیز روش SPH با تئوری بوسینسک تطابق خوبی دارد.



شکل ۱: مقایسه موج تنهای منتشر شده در عمق ثابت با تئوری بوسینسک و مدل آزمایشگاهی در فاصله ۴ متر از موج‌ساز

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱- درستی سنجی

برای درستی سنجی از مدل آزمایشگاهی Han و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد که در آن بالاروی روی شیب‌های خطی به‌دست آمده است. این آزمایش در یک فلوم با ابعاد ۳۲/۵ متر طول، ۰/۵ متر عرض و ۱/۱ متر ارتفاع انجام شد. همچنین از موج‌ساز پیستونی برای تولید امواج تنها استفاده شد. در این آزمایش بالاروی حاصل از برخورد امواج تنها به شیب‌های خطی ۱۵، ۲۰ و ۴۵ درجه، عمق آب ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع موج ۳ تا ۵ سانتی‌متر بررسی شدند. در نهایت در این تحقیق فرمول‌هایی برای

شیب‌هایی با انحنای غیرخطی و یا ترکیب این انحناها هستند. در این بخش تاثیر شیب غیرخطی نسبت به حالت خطی آن بررسی شد. منحنی‌های  $y=x^{0.5}$ ،  $y=x^{0.7}$ ،  $y=x^2$  و  $y=x^3$  نسبت به حالت خطی آن بررسی شدند (شکل ۳).

جدول ۳: تاثیر فاصله بین ذرات در دقت نتایج

مدل آزمایشگاهی	۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۷۵ و ۰/۰۱	فاصله بین ذرات (متر)
۱۰/۴	۱۰/۲	۹/۸۹	مقدار بالاروی (سانتی‌متر)
۱/۹۲	۴/۹۰	۸/۴۶	خطا (درصد)

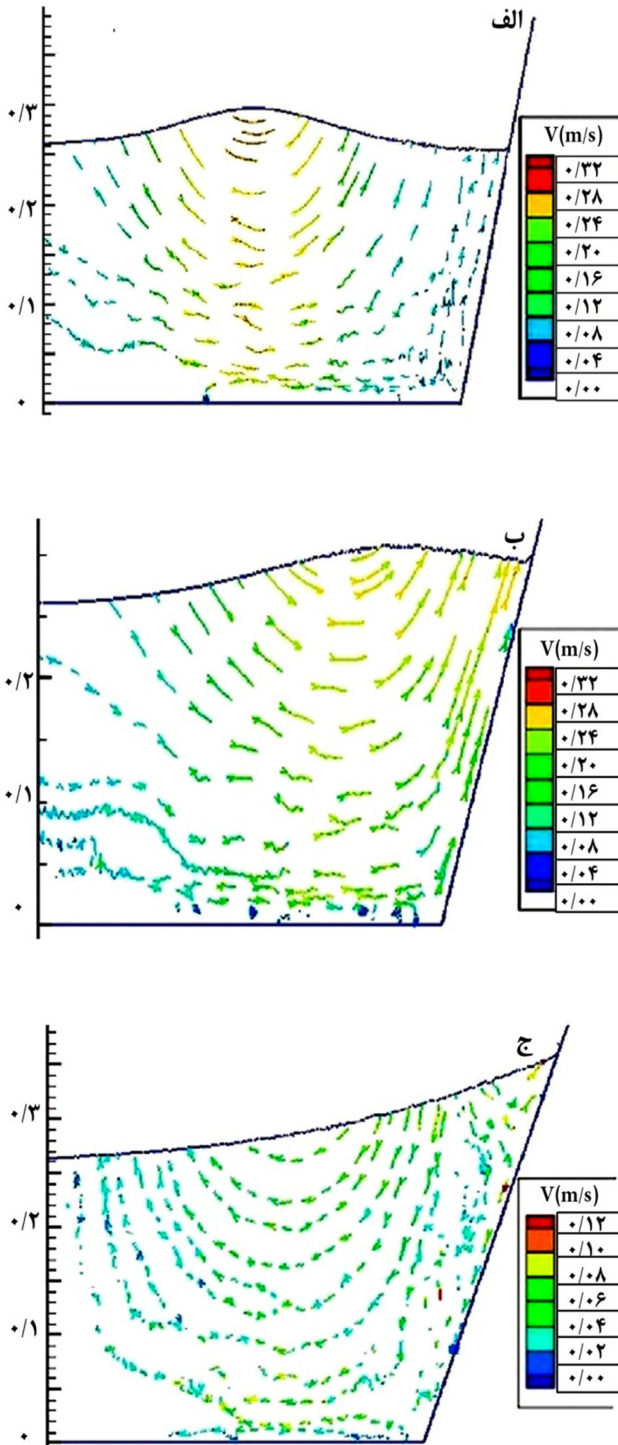
### ۳-۲ ویژگی‌های هیدرولیکی موج تولید شده در هنگام برخورد به ساحل

ویژگی‌های هیدرولیکی موج مانند خطوط جریان و سرعت-های مداری ذرات موج برای تعیین نحوه حرکت ذرات موج اهمیت بالایی برخوردار هستند. در شکل ۲ خطوط جریان موج تنهایی با ارتفاع موج ۴٫۵ سانتی‌متر، عمق آب ۲۵ سانتی‌متر و شیب ساحل ۴۵ درجه، در زمان‌های قبل از برخورد به ساحل، هنگام برخورد به ساحل و در لحظه بیشترین بالاروی با هم مقایسه شدند. در این شکل  $V = \sqrt{u^2 + v^2}$  است که در این رابطه  $u$  سرعت مداری در راستای  $x$  و  $v$  سرعت مداری در راستای  $y$  است. همچنین در شکل ۲ جهت فلش‌ها نشان‌دهنده جهت حرکت ذرات موج در مکان‌های مختلف است. با توجه به تئوری بوسینسک مربوط به انتشار امواج تنها در آب‌های کم-عمق، در تاج موج تنها سرعت‌های مداری در راستای  $x$  بیشترین مقدار و در راستای  $y$  مقدار صفر را دارند. همچنین در پشت و جلو موج، مقدار سرعت مداری در راستای  $x$  مقدار صفر و در راستای  $y$  بیشترین مقدار را دارا هستند. موارد گفته شده در مورد تئوری بوسینسک در شکل ۲ مشاهده می‌شود. بنابراین شبیه‌سازی امواج تنها با دقت بالایی انجام شد. همان‌گونه که در شکل ۲ ج مشاهده می‌شود سرعت‌های مداری موج در هنگام بالاروی از ساحل مقدار زیادی کاهش می‌یابند و به صفر نزدیک می‌شوند.

در هنگام برخورد موج (شکل ۲ ب) در قسمت پایین ساحل جریان آشفته و گردابی تولید می‌شود که این پدیده می‌تواند موجب آب‌شستگی و فرسایش ساحل شود. هر چه شیب ساحل بیشتر باشد این جریان گردابی بزرگ‌تر و در نتیجه میزان آب-شستگی یا فرسایش نیز افزایش می‌یابد.

### ۳-۳ اثر غیرخطی بودن شیب ساحل

همان‌گونه که در قسمت مقدمه بیان شد در واقعیت معمولاً شیب سواحل به صورت خطی تغییر نمی‌کنند و گاهی دارای

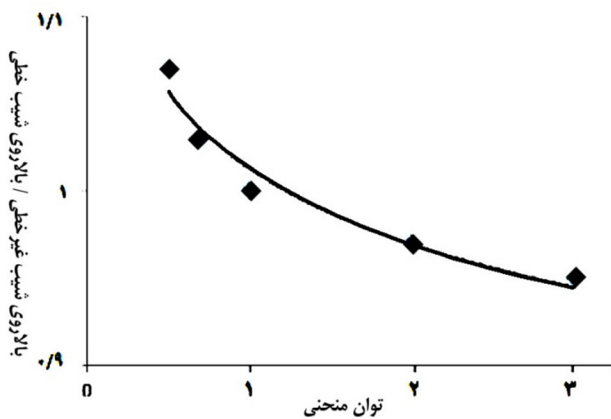


شکل ۲: مقایسه خطوط جریان موج تنها، الف) قبل از برخورد به ساحل، ب) هنگام برخورد به ساحل ج) در لحظه بیشترین بالاروی با هم

رابطه ۱۵  $y = 1.0125x^{-0.063}$

در این رابطه،  $x$  توان شیب غیرخطی ساحل و  $y$  نسبت بالاروی شیب غیرخطی به خطی است. این رابطه فقط برای شیب‌های بین  $y=x^{0.5}$  تا  $y=x^3$  کاربرد دارد.

برای بررسی میزان دقت فرمول ارائه شده، نسبت بالاروی امواج تنها از شیب غیرخطی به شیب خطی برای شیب‌های  $y=x^{0.8}$  و  $y=x^{1.5}$  محاسبه شدند. دقت رابطه ۱۵ برای توان‌های ۰/۸ و ۱/۵ در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که فرمول ارائه شده در این بخش دارای دقت مناسبی برای شبیه‌سازی بالاروی امواج تنها از شیب‌های غیرخطی نسبت به شیب‌های خطی ساحلی است.



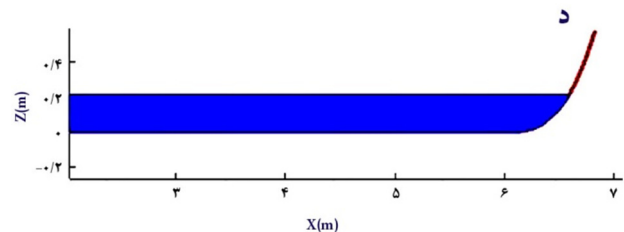
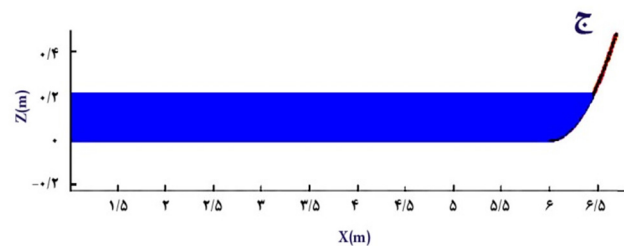
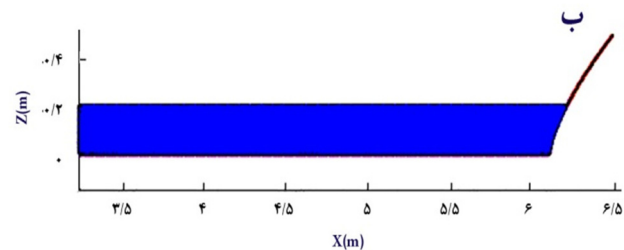
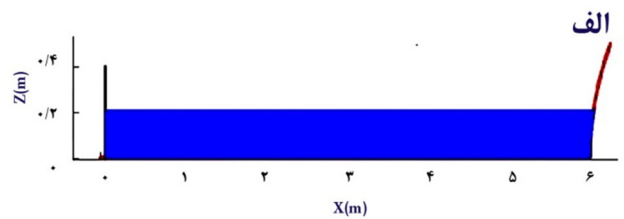
شکل ۴: تاثیر غیرخطی بودن شیب ساحل در مقایسه با حالت خطی آن

جدول ۴: مقایسه نسبت بالاروی از شیب غیرخطی به خطی با روش SPH با معادله ارائه شده

توان منحنی (x)	نسبت بالاروی از شیب غیرخطی به خطی با روش SPH	نسبت بالاروی از شیب غیرخطی به خطی با استفاده معادله ۱۵	خطا (درصد)
۰/۸	۱/۰۱۲۷	۱/۰۲۶۸	۱/۳۷۳
۱/۵	۰/۹۶۲	۰/۹۸۷	۲/۵۳

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا امواج تنها با استفاده از روش SPH شبیه‌سازی شدند و با نتایج تئوری بوسینسک و نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. سپس کارایی روش SPH برای محاسبه بالاروی حاصل از برخورد امواج به سواحل با استفاده



شکل ۳: منحنی‌های غیرخطی مورد بررسی، الف)  $y=x^{0.5}$  ب)  $y=x^{0.7}$  ج)  $x^2$  د)  $y=x^3$

تاثیر غیرخطی بودن شیب ساحل در مقایسه با حالت خطی آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد در صورتی که شیب دارای شیب غیرخطی باشد، بالاروی امواج تنها نسبت به حالت شیب خطی آن، به صورت غیرخطی کاهش می‌یابند.

دلیل کاهش بالاروی با افزایش توان منحنی خط ساحل نسبت به حالت خطی آن تفاوت شیب در ناحیه مربوط به بالاروی امواج است. در واقع هرچه توان منحنی خط ساحلی افزایش یابد، شیب در قسمت پایانی ساحل نسبت به حالت خطی آن افزایش می‌یابد که این افزایش موجب کاهش بالاروی می‌گردد. تغییر بالاروی نسبت به توان منحنی خط ساحل به صورت رابطه ۱۵ تغییر می‌یابد.

- wave generation by a piston wave maker. Journal of Hydrodynamic Research, 40(3): 321-331.
- Hall, J.V. J.; Watts, J.W., 1953. Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes. Washington, D. C.: Army Coastal Engineering Research Center, 14P.
- Han, H.; Ha, T.; Cho, Y., 2015. Laboratory experiments on run-up and force of solitary waves. Journal of Hydro-environment Research, 9: 582-591.
- Jiana, W.; Sim, S.Y.; Huang, Z.; Lo, E.Y, 2015. Modeling of solitary wave run-up on an onshore coastal cliff by smoothed particle hydrodynamics method. Procedia Engineering, 116: 88-96.
- Memarzadeh, R.; Hejazi, K., 2012. ISPH numerical modeling of nonlinear wave run-up on steep slopes. Journal of the Persian Gulf, 3(10): 17-26.
- Monaghan, J.J., 1994. Simulating free surface flows with SPH. Journal of Computational Physics, 110: 399-406.
- Monaghan, J.J., 1992. Smoothed particle hydrodynamics, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 30(1): 543-574.
- Monaghan J.J., 1989. On the problem of penetration in particle methods. Journal of Computational Physics, 82: 1-15.
- Monaghan, J.J.; Kos, A., 1999. Solitary waves on a Cretan beach. Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering, 125(3): 145-154.
- Monaghan, J.; Lattanzio, J., 1985. A refined particle method for astrophysical problems. Astronomy and Astrophysics, 149: 135-143.
- Nam, H.K.; Haeng, S.K., 2008. Numerical simulation on solitary wave propagation and run-up by SPH method. KSCE Journal of Civil Engineering, 12(4): 221-226.
- Rogers, B.D.; Dalrymple, R.A., 2004. SPH modeling of breaking waves. Coastal Engineering, 415-427P.
- Scott Russell, J., 1844. Report on waves. Report of the 14th Meeting of the British Association for the
- از مدل آزمایشگاهی Han و همکاران (۲۰۱۵) درستی‌سنجی شد. نتایج صحت‌سنجی، دقت روش هیدرودینامیک ذرات هموار را نشان داد. سپس تاثیر تغییر شیب‌های خطی و غیرخطی در طول ساحل روی بالاروی امواج تنها بررسی شدند و نتایج با قانون بالاروی مقایسه شدند. مهم‌ترین نتایج این تحقیق در زیر آمده است.
- (۱) در این تحقیق یک فرمول جدید برای تعیین بالاروی امواج تنها از شیب‌های غیرخطی نسبت به شیب‌های خطی ساحلی ارائه شد (رابطه ۱۵).
- (۲) نتایج نشان داد که در بررسی تغییر شیب خطی سواحل، با افزایش شیب ساحل پارامتر بی‌بعد بالاروی امواج تنها  $(R/d_0)$  کاهش می‌یابد.
- (۳) نتایج نشان داد در صورتی‌که شیب ساحل دارای شیب غیرخطی باشد، بالاروی امواج تنها نسبت به حالت شیب خطی آن، به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد.

#### منابع

- Batchelor, G.K., 1967. Introduction to fluid dynamics, Cambridge University Press, NewYork, NY, 615P.
- Boussinesq, J., 1872. Theory of waves and eddies that propagate along a horizontal rectangular channel, communicating to the liquid contained in this channel substantially similar speeds of the surface at the bottom. Journal of Pure and Applied Mathematics, 55-108.
- Cho, Y.S., 2011. Effects of an impermeable submerged structure on a rubble mound breakwater. Journal of Coastal Research, 27(2): 378-383.
- Fahrman, D.R.; Madsen, P.A., 2008. Simulation of nonlinear wave run-up with a high-order Boussinesq model. Coastal Engineering, 55: 139-154.
- Gingold, R.; Monaghan, J., 1977. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181: 375-389.
- Guizien, K.; Barthelme, E., 2002. Accuracy of solitary



neural network to calculation of solitary wave run-up.

Water Science and Engineering, 3(3): 304-312.

Advancement of Science, York, 311-390P.

Wei, Y.; Wang, D.; Liu, Q., 2010. Application of artificial