شبیه‌سازی عددی شکست موج تنها بر روی ساحل شیب‌دار به روش هیدرودینامیک ذرات هموار نسبتاً تراکم‌پذیر

محمد جواد کتابداری[1*] ، امین نعمتی روزبهانی[2]

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله از یک مدل عددی بدون شبکه بنام هیدرودینامیک ذرات هموار نسبتاً تراکم‌پذیر (WCSPH) برای شبیه‌سازی روند شکست موج تنها بر روی ساحل شیب‌دار استفاده شده است. این مدل دو بعدی بوده و سیال را به‌صورت کمی تراکم‌پذیر درنظر می‌گیرد و علاوه بر حل معادلات حاکم بر سیال لزج برای به‌دست آوردن میدان سرعت و چگالی، از حل معادله حالت برای به‌دست آوردن فشار استفاده می‌کند. این مسئله باعث کاهش حجم محاسبات نسبت به روش پایه مدل هیدرودینامیک ذرات هموار می‌شود. برای شبیه‌سازی آشفتگی سیال در روند شکست موج از مدل آشفتگی SPS که به‌وسیله تئوری شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) به‌دست آمده، استفاده شده است. در تحقیق حاضر، برای بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی سطح آزاد ابتدا مدلسازی شکست سد انجام شد و نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی Martin و Moyce (۱۹۵۲) مقایسه شد. سپس برای معتبرسازی مدل آشفتگی، نتایج پدیده شکست سد توسط مدل با نتایج آزمایشگاهی Issa (۲۰۰۵) مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه‌ها نشان داد که مدل تهیه شده ابزاری قوی جهت شبیه‌سازی رفتار جریان سیال آشفته است. در انتها تغییرات یک موج تنها در حال شکست بر روی ساحل شیب دار مدل‌سازی شده و نتایج مورد بحث قرار گرفت.

کلمات کلیدی: موج تنها، شکست موج، هیدرودینامیک ذرات هموار نسبتاً تراکم‌پذیر، ساحل شیب‌دار

Numerical Simulation of Breaking Solitary Wave on the Sloping Beach Using WCSPH Method

M. J. Ketabdari[1], A. Nemati Roozbahani[2]

1-Associate Professor, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology
2-M.Sc. student, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology

Abstract

In this article, a numerical meshless method called Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamic (WCSPH) is used to simulate the solitary wave breaking process on the beach. The present model is a two dimensional model that considers the fluid weakly compressibility. This model solves the viscous fluid equations to obtain velocity field and density and solves the equation of state to obtain the pressure field. This leads to computational efficiency of the model in comparison with basic SPH model. To simulate the fluid turbulence in wave breaking process, the Sub Particle Scale (SPS) model that is obtained from Large Eddy Simulation (LES) theory of turbulence is used. In this research to consider the accuracy of free surface simulation, first a dam break test is performed to compare the model results with experimental data of Martin and Moyce (1952). Afterwards to verify the turbulence model, a comparison between

* نویسنده مسئول مقاله: ketabdar@aut.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

model results of dam break phenomenon and experimental results of Issa (2005) is carried out. These comparisons showed that the developed model is a powerful tool for simulation of the turbulent flow behavior. Finally, the transform of a breaking solitary wave on the sloping beach is modeled and the results were discussed.
Keywords: Solitary Wave, Wave Breaking, Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamic, Slopped Beach

۱- مقدمه

شکست موج در نزدیکی ساحل، یک مسئله تحقیقاتی مهم در مهندسی دریا و سواحل است. خاصیت قوی غیرخطی شکست موج باعث حرکت پیچیده ذرات آب شده و از این رو شبیه‌سازی عددی روند شکست موج بر روی ساحل را بسیار پیچیده می‌کند. میدان سرعت در هنگام شکست موج طبیعتی تصادفی و متغیر داشته و از سویی دیگر با ورود حباب‌های هوا به همراه جت شیرجه‌ای، پیچیدگی‌های دیگری در اندازه گیری سرعت بوجود می‌آید. اندازه‌گیری موج در حال شکست در آزمایشگاه و طبیعت نیاز به هزینه بالا و دستگاه‌های خاص دارد. از طرفی پیشرفت تکنیک‌های عددی و ماشین‌های محاسبه‌گر در چند دهه اخیر باعث شده که مدل‌سازی عددی شکست موج مورد توجه زیادی قرار بگیرد. در گذشته به‌خاطر محدودیت در اندازه شبکه‌ها، استفاده از روش‌های برپایه شبکه باعث کاهش دقت حل این مسئله می شد. به همین دلیل امروزه روش‌های بدون شبکه برای شبیه‌سازی رفتار سیال بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

روش‌های عددی کمی برای رهگیری سطح آزاد آب هنگامی که موج به سمت ساحل حرکت می‌کند، وجود دارد. تعدادی از این روش‌ها عبارتند از MAC [۱] و VOF [۲]. اگرچه این روش‌ها به‌طور موفقیت آمیزی برای شبیه‌سازی امواج به‌کار رفتند ([۳] و [۴]) ولی استفاده از شبکه بندی اویلری، باعث ایجاد مشکلات زیادی در شبیه‌سازی شکست امواج و تغییرات ناگهانی سطح آزاد آب مانند پخش عددی[۱] به‌دلیل وجود ترم انتقال[۲] در معادلات ناویر-استوکس[۳] و یا استفاده از تعداد بسیار زیاد المان‌ها برای شبیه‌سازی شکست موج می‌شود. اخیرا روش‌های بدون شبکه بر پایه روش لاگرانژی[۴] به‌منظور غلبه بر این مشکلات توسعه پیدا کرده‌اند. از میان این روش‌ها، هیدرودینامیک ذرات هموار[۵]، به عنوان یک روش قدرتمند جای خود را در میان دیگر روش‌های عددی باز نموده است. در این روش ذرات در مختصات لاگرانژی حرکت می‌کنند و ترم انتقال در معادلات ناویر-استوکس به‌طور مستقیم به‌وسیله حرکت ذرات محاسبه شده بدون اینکه مشکل پخش عددی وجود داشته باشد. هیدرودینامیک ذرات هموار ابتدا برای مدل‌سازی‌های فضایی توسط لوسی[۶] [۵] و همچنین توسط گینگولد و موناگان[۷] در سال ۱۹۷۷ ابداع گردید[۶]. سپس در زمینه‌های مختلف سیالاتی مثل مدل‌سازی‌های جریان سیال با فرض کردن سیال به‌صورت کمی تراکم‌پذیر و استفاده از معادله حالت برای به‌دست آوردن فشار به نام "هیدرودینامیک ذرات هموار نسبتاً تراکم‌پذیر"[۸] گسترش یافت [۷و۸]. همچنین این روش برای بسیاری از شبیه‌سازی‌ها از جمله شکست سد[۹]، پیشروی موج [۹]، شکست موج بر روی سازه [۱۰] و شکست موج تنها[۱۰] بر روی ساحل با شیب کم [۱۱] گسترش داده شد به‌طوری که اکنون برای بسیاری از مسائل پیچیده سطح آزاد آب به‌کار می‌رود [۱۲].

در این مقاله به‌منظور درک رفتار سلسلهٔ امواجی که تک تک بر روی ساحل می‌شکنند، شبیه‌سازی تولید یک موج تنها به‌وسیله موجساز پیستونی و سپس شکست آن بر روی ساحل به‌وسیله روش بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار نسبتاً تراکم‌پذیر صورت گرفته است.

۲- معادلات اساسی حاکم بر سیال لزج

معادلات حاکم بر حرکت سیال، معادلات بقاء جـرم و ممنتوم[۱۱] بوده و به فرم لاگرانژی به‌صورت روابط زیـر نوشته می‌شوند:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

$$\frac{1}{\rho}\frac{D\rho}{Dt}+\nabla.\vec{u}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt}=-\frac{1}{\rho}\nabla P+\vec{g}+\Theta \qquad (۲)$$

در روابط بالا، ρ چگالی، $\vec{u}$ بردار شتاب ثقل، t زمان و Θ نیز ترم انتقال معادله حرکت می‌باشند.

۲-۱- گسسته سازی معادلات

در این مقاله از دو نوع ترم انتقال استفاده شده است. ابتدا از لزجت مصنوعی[۱۲] برای معتبرسازی اولیه مدل و سپس از لزجت لایه‌ای به‌همراه یک نوع تنش آشفتگی برای معتبرسازی مدل آشفتگی با انجام آزمایش شکست سد و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی استفاده گردید. با اعمال لزجت مصنوعی به‌عنوان ترم انتقال معادله حرکت، $\Theta=\Pi$ که Π لزجت مصنوعی است و با توجه به روابط روش WCSPH، معادلات بقاء جرم و حرکت به فرم روابط زیر گسسته‌سازی می‌شوند:

$$(\frac{D\rho}{Dt})_a=\sum_b m_b(\vec{u}_a-\vec{u}_b).\vec{\nabla}_a W_{ab} \qquad (۳)$$

$$(\frac{D\vec{u}}{Dt})_a= -\sum_b m_b(\frac{P_a}{\rho_a{}^2}+\frac{P_b}{\rho_b{}^2}+\Pi_{ab}).\vec{\nabla}_a W_{ab}+\vec{g} \qquad (۴)$$

در روابط بالا، W تابع درونیاب (کرنل[۱۳]) و اندیس b مربوط به ذرات مجاور ذره a است و سری‌های فوق بر روی تمامی ذرات همسایه ذره a جمع زده می‌شوند. Π_{ab} یک نمونه لزجت مصنوعی است که برای جلوگیری از نفوذ ذرات در یکدیگر و همچنین کاهش پخش عددی در ترم انتقال معادله حرکت به‌کار می‌رود و به‌صورت روابط ذیل تعریف می‌شود:

$$\Pi_{ab}=\begin{cases}-\alpha\bar{c}_{ab}\dfrac{\mu_{ab}}{\bar{\rho}_{ab}} & if\ \ v_{ab}.r_{ab}<0\\ 0 & otherwise\end{cases} \qquad (۵)$$

$$\mu_{ab}=hu_{ab}.\frac{r_{ab}}{r_{ab}{}^2+\eta^2} \qquad (۶)$$

در روابط بالا، h طول هموار[۱۴] تابع درونیاب است که شعاع تاثیر یک ذره نسبت به ذره مجاورش می‌باشد[۷]. همچنین $\bar{c}_{ab}=(c_a+c_b)/2$، $\bar{\rho}_{ab}=(\rho_a+\rho_b)/2$، $r_{ab}=r_a-r_b$ و $u_{ab}=u_a-u_b$ که به‌ترتیب $\bar{c}_{ab}$ سرعت متوسط صوت، $\bar{\rho}_{ab}$ چگالی متوسط، r_{ab} فاصله بین ذرات و u_{ab} سرعت ذره a نسبت به ذره b است. η جهت جلوگیری از صفر شدن مخرج به‌کار می‌رود و داریم $\eta^2=۰/۰۱h^2$ و α نیز ضریب ثابتی است که در این مقاله برای آن مقدار ۰/۳ انتخاب شده است.

۲-۲- تابع درونیاب

اساس روش WCSPH بر پایه تئوری درونیابی بنا نهاده شده است. در این تحقیق از یک نوع تابع درونیاب به نام "مارپیچ درجه ۳"[۱۵] که توسط موناگان و لاتانزیو[۱۶] ارائه گردید، استفاده شده است [۱۳]:

$$W(r,h)=\begin{cases}\dfrac{10}{7\pi h^2}(1-\frac{3}{2}q^2+\frac{3}{4}q^3) & q<1\\ \dfrac{10}{28\pi h^2}(2-q)^3 & 1<q<2\\ 0 & q>2\end{cases} \qquad (۷)$$

در رابطه بالا، $q=r/h$ پارامتر بدون بعد طول است.

۲-۳- معادله حالت

در روش WCSPH، سیال تراکم‌پذیر عمل می‌کند که به همین خاطر می‌توان از معادله حالت نوع تیت[۱۷] برای به‌دست آوردن فشار استفاده کرد [۱۴]:

$$P=B\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma}-1\right],\ B=\rho_0 c_s^2/\gamma \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، B پارامتر ثابتی است که به مدول حجمی الاستیسیته مربوط است. γ عدد ثابتی بین ۱ و ۷ است که در این مقاله برای آن مقدار ثابت ۷ در نظر گرفته شده، P فشار نسبی، ρ_0 دانسیته در فشار اتمسفر، v *(۴۰ تا ۱۰) = c_s که c_s سرعت صوت و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

v سرعت بیشینه ذرات سیال در طول محاسبات است که در این تحقیق، $c_s = 10\,v$ درنظر گرفته شده است. همچنین $v = \sqrt{g(d+h)}$ که در آن h ارتفاع موج و d عمق آب است.

۲-۴- تکنیک حرکت ذرات

حرکت ذرات توسط تکنیک "هیدرودینامیک ذرات هموار-ایکس"[۱۸] طبق رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$\frac{dr_a}{dt} = u_a + \varepsilon \sum_b \frac{m_b}{\bar{\rho}_{ab}} u_{ab} W_{ab} \qquad (۹)$$

در رابطه بالا، ε مقداری ثابت است که در اینجا برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این روش، به ذرات اجازه داده می‌شود که به‌خوبی سازماندهی شوند و در سرعتهای زیاد سیال، از نفوذ ذرات در یکدیگر جلوگیری می‌شود [۱۵].

۲-۵- الگوریتم حل زمانی معادلات

برای حل معادلات حاکم، از الگوریتم زمانی پیش‌بینی-تصحیح[۱۹] استفاده شده است [۱۵]. روابط (۳) ، (۴) و (۹) را می‌توان به فرم خلاصه زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} (\dfrac{D\rho}{Dt})_a = D_a \\ (\dfrac{Du}{Dt})_a = F_a \\ (\dfrac{Dr}{Dt})_a = U_a \end{cases} \qquad (۱۰)$$

چنانچه روند حل از گام زمانی n آغاز گردد، در گام زمانی n+۰/۵ خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \rho_a{}^{n+1/2} = \rho_a{}^{n} + \dfrac{\Delta t}{2} D_a{}^{n} \\ u_a{}^{n+1/2} = u_a{}^{n} + \dfrac{\Delta t}{2} F_a{}^{n} \\ r_a{}^{n+1/2} = r_a{}^{n} + \dfrac{\Delta t}{2} U_a{}^{n} \end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$P_a{}^{n+1/2} = B\left[\left(\frac{\rho_a{}^{n+1/2}}{\rho_0}\right)^{\gamma} - 1\right] \qquad (۱۲)$$

با استفاده از مقادیر به‌دست آمده در این مرحله، مقادیر سرعت، چگالی و مکان ذره a به‌صورت رابطه زیر اصلاح می‌گردند:

$$\begin{cases} \rho_a{}^{n+1/2} = \rho_a{}^{n} + \dfrac{\Delta t}{2} D_a{}^{n+1/2} \\ u_a{}^{n+1/2} = u_a{}^{n} + \dfrac{\Delta t}{2} F_a{}^{n+1/2} \\ r_a{}^{n+1/2} = r_a{}^{n} + \dfrac{\Delta t}{2} U_a{}^{n+1/2} \end{cases} \qquad (۱۳)$$

در نهایت پس از طی زمان Δt و در پایان گام زمانی $n+1$ ام و استفاده از مقادیر اصلاحی، طبق روابط زیر خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \rho_a{}^{n+1} = 2\rho_a{}^{n+1/2} - \rho_a{}^{n} \\ u_a{}^{n+1} = 2u_a{}^{n+1/2} - u_a{}^{n} \\ r_a{}^{n+1} = 2r_a{}^{n+1/2} - r_a{}^{n} \end{cases} \qquad (۱۴)$$

$$P_a{}^{n+1} = B\left[\left(\frac{\rho_a{}^{n+1}}{\rho_0}\right)^{\gamma} - 1\right] \qquad (۱۵)$$

برای تعیین مقادیر گام زمانی بهینه از شرط کورانت[۲۰] طبق رابطه زیر، استفاده می‌شود:

$$\Delta t \le C \frac{dx}{V_{\max}} \qquad (۱۶)$$

در رابطه بالا، C عدد کورانت بوده و معمولا ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. dx فاصله اولیه بین ذرات و $V_{\max}$ نیز سرعت حداکثر ذرات سیال در هر گام زمانی است [۱۶].

۲-۶- فیلتر چگالی

شبیه‌سازی دینامیکی در این روش منجر به تغییرات زیادی در میدان فشار ذرات سیال می‌شود. تلاش‌هایی به منظور غلبه بر این مشکل صورت گرفته است که یکی از آنها طراحی فیلتر مناسبی برای چگالی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

یا دوباره مقداردهی چگالی برای ذرات است. برای این منظور، از اصلاح درجه یک ام-ال-اس[۲۱]، استفاده می‌گردد. این ترم در هر ۳۰ گام زمانی به فرم رابطه (۱۷) یکبار بر روی میدان چگالی ذرات اعمال می‌شود [۱۷]:

$$W_{ab}^{MLS} = [\beta_0(r_a)+\beta_{1x}(r_a).(x_a-x_b)+\beta_{1z}(r_a).(z_a-z_b)]W_{ab}$$

$$\beta(r_a)=\begin{pmatrix}\beta_0\\ \beta_{1x}\\ \beta_{1z}\end{pmatrix}=A^{-1}\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix}$$

$$A=\sum_b W_b(r_a)\frac{m_b}{\rho_b}\tilde{A}$$

$$\tilde{A}=\begin{bmatrix}1 & (x_a-x_b) & (z_a-z_b)\\ (x_a-x_b) & (x_a-x_b)^2 & (z_a-z_b)(x_a-x_b)\\ (z_a-z_b) & (z_a-z_b)(x_a-x_b) & (z_a-z_b)^2\end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

۲-۷- مدل آشفتگی

در این تحقیق از دو نوع ترم انتقال در معادله حرکت استفاده شده است. اولین آن لزجت مصنوعی بود که درروابط (۵) و (۶) توضیح داده شد. دومین آن استفاده از لزجت لایه ای به‌همراه یک نوع تنش آشفتگی است و با این ترتیب رابطه (۲) به رابطه (۱۸) تبدیل می‌شود:

$$\frac{D\vec{u}}{Dt}=-\frac{1}{\rho}\nabla P+\vec{g}+\nu_0\nabla^2\vec{u}+\frac{1}{\rho}\nabla\bar{\tau}_{ij} \quad (۱۸)$$

که ν_0 لزجت سینماتیکی آب و $\bar{\tau}_{ij}$ نیز تنسور تنش اس-پی-اس[۲۲] است و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho}=2\nu_t S_{ij}-\frac{2}{3}k\delta_{ij}-\frac{2}{3}C_I\Delta l^2\delta_{ij}|S_{ij}|^2 \quad (۱۹)$$

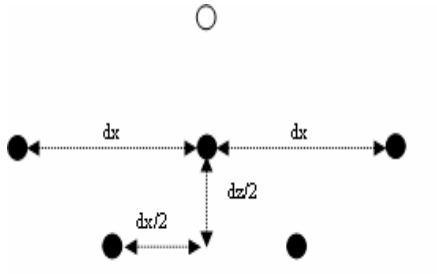
بطوریکه در آن $\nu_t=[\min(C_S,\Delta l)]^2.|S|$ لزجت آشفتگی، $C_S=۰/۱۲$ ، Δl فاصله اولیه بین ذرات، k انرژی جنبشی آشفتگی، $C_I=۰/۰۰۶۶$، δ_{ij} تابع دلتا[۲۳] و $|S|=(2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$ که S_{ij} المان تنسور کرنش[۲۴] مدل است. در انتها رابطه (۱۸) به‌صورت گسسته زیر ساده می‌شود:

$$(\frac{D\vec{u}}{Dt})_a=-\sum_b m_b(\frac{P_a}{\rho_a^2}+\frac{P_b}{\rho_b^2}+\frac{\tau_a}{\rho_a^2}+\frac{\tau_b}{\rho_b^2}).\vec{\nabla}_a W_{ab}$$
$$+\sum_b m_b\left(\frac{4\nu_0 r_{ab}\nabla_a W_{ab}}{(\rho_a+\rho_b)|r_{ab}|^2}\right)\vec{u}_{ab}+\vec{g} \quad (۲۰)$$

در ترم اول رابطه بالا، تنش‌های آشفتگی و در ترم دوم لزجت لایه‌ای به‌چشم می‌خورد. استفاده از مدل آشفتگی برای نشان دادن رفتار جریان سیال در حالت آشفتگی است که این مدل بوسیله تئوری "شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ"[۲۵] به‌دست آمده است [۱۸].

۲-۸- شرایط مرزی

در بیشتر مسائل هیدرودینامیکی، تعیین شرایط مرزی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله از شرط مرزی دینامیکی استفاده شده است [۱۹]. در این روش، ذرات مرزی همانند ذرات سیال، معادله بقاء جرم، ممنتوم و حالت را ارضاء می‌کنند. ولی این ذرات دیگر طبق رابطه (۹) حرکت نمی‌کنند بلکه در مکان اولیه خودشان ثابت نگه داشته می‌شوند. اگر این ذرات مثل موجساز متحرک باشند، مختصات حرکت و سرعت آنها باید به برنامه داده شود. نحوه اعمال ذرات مرزی در روش شرط مرزی دینامیکی در شکل ۱ نمایش داده شده است



شکل ۱- نحوه قرارگیری ذرات مرزی در شرط مرزی دینامیکی(دوایر توخالی و توپر، به‌ترتیب نمایانگر ذره سیال و ذرات مرزی می‌باشند).

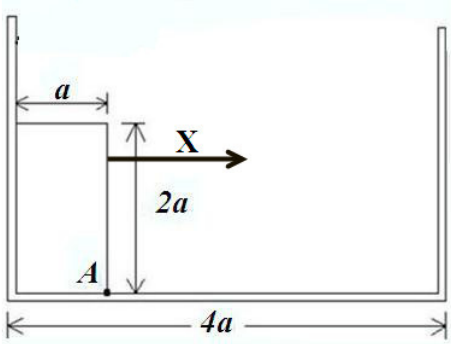
هنگامی‌که ذرات سیال به نزدیکی مرزها می‌رسند، چگالی آنها در نزدیکی مرز افزایش یافته و طبق رابطه (۱۵) باعث افزایش فشار می‌شود. علاوه بر این، نیروهای اعمالی بر روی ذرات سیال به‌خاطر وجود ترم فشار در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

معادله گسسته ممنتوم (روابط (۴) و (۱۸)) افزایش پیدا می‌کند.

۳- معتبرسازی مدل

در این قسمت جهت معتبرسازی مدل از آزمایش‌های شکست سد استفاده گردیده است. آزمایش شکست سد به‌صورت رها شدن لحظه‌ای حجمی از آب و حرکت سریع آن در کانال مستطیلی شکل تعریف می‌شود. مطابق شکل ۲ ستونی از آب به‌طول a و ارتفاع $2a$ در کانال بسته‌ای به‌طول $4a$ (که در اینجا $a = 5/7$ cm است) به‌یکباره رها می‌شود. هدف، اندازه‌گیری مکان قرارگیری نقطه A در طول مسیر بر حسب زمان تا موقعی است که این نقطه به لبه دیواره سمت راست نزدیک شود. لازم به ذکر است که در این آزمایش برای ترم انتقال معادله حرکت سیال از لزجت مصنوعی مطابق رابطه (۴) استفاده شده است. در شکل ۲، X نمایانگر جهت اندازه گیری ذره A برحسب زمان در طول کانال است. کمیت‌های مهم در روش عددی برای آزمایش شکست سد، در جدول ۱ نشان داده شده است.

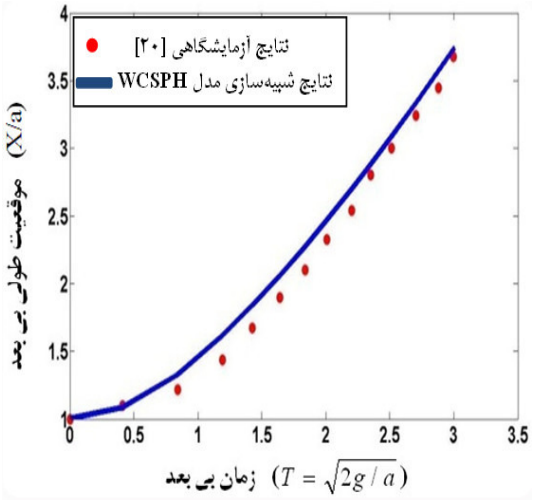


شکل ۲- دامنه محاسباتی آزمایش شکست سد

جدول ۱- کمیت‌های مدل (آزمایش شکست سد)

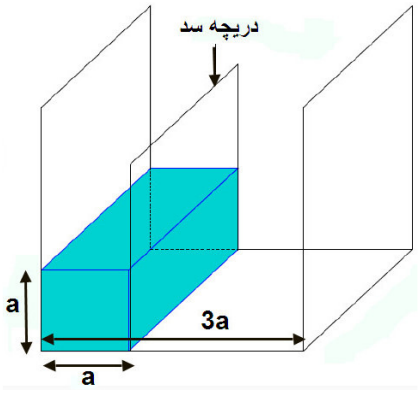
کمیت	مقدار
dx [سانتیمتر]	۰/۱۱۴
dz [سانتیمتر]	۰/۱۱۴
dt [ثانیه]	۰/۰۰۱
n_p [ذره]	۱۱۱۰۳
n_{bp} [ذره]	۱۲۰۳
h [سانتیمتر]	۰/۱۴۸

در جدول بالا، dx و dz به‌ترتیب فاصله اولیه بین ذرات در جهات افقی و عمودی، dt گام زمانی اولیه، n_p تعداد کل ذرات در محاسبات، n_{bp} تعداد ذرات مرزی و h نیز طول هموار می‌باشد. نتایج مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی مارتین و مویس[۲۶] [۲۰] در شکل ۳ مقایسه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج مدل WCSPH خطای کمی نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقایسه نتایج پیشروی پنجه ستون آب (ذره A) نسبت به زمان بی بعد در آزمایش شکست سد

به‌منظور معتبرسازی مدل آشفتگی که تئوری آن طبق روابط (۱۸) و (۱۹) بیان شد، آزمایش شکست سد با نتایج آزمایشگاهی [۲۱] مقایسه شد. ابعاد این آزمایش در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴- آزمایش شکست سد عیسی [۲۱]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

در این آزمایش طول و ارتفاع ستون آب با هم مساوی و برابر $a = ۳۰\text{cm}$ و طول کانال بسته معادل $۳a = ۹۰\text{cm}$ است. هدف از این آزمایش، مقایسه روند پیشروی ستون آب و تغییر شکل‌های آن در اثر برخورد با دیواره برحسب زمان است. کمیت‌های مهم در روش عددی مدل آشفتگی برای آزمایش شکست سد در جدول ۲ نشان داده شده است همچنین مقایسه نتایج عددی مدل آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی عیسی در شکل ۵ آمده است. با توجه به نزدیکی نتایج در این مقایسه تصویری، اعتبار مدل آشفتگی برای استفاده در پدیده‌هایی که آشفتگی در آنها مهم است تضمین می‌گردد.

به‌منظور مشخص کردن دقت موجساز در تولید امواج، ابتدا به‌وسیله موجساز لولایی امواج سینوسی تولید می‌شود سپس ارتفاع آنها ثبت می‌گردد در انتها نیز پروفیل امواج تولید شده با پروفیل تئوری مقایسه می‌شود. امواج خطی سینوسی در عمق ثابت طبق معادلات زیر برای موجساز لولایی تولید می‌گردد[۲۲]:

(۲۱)

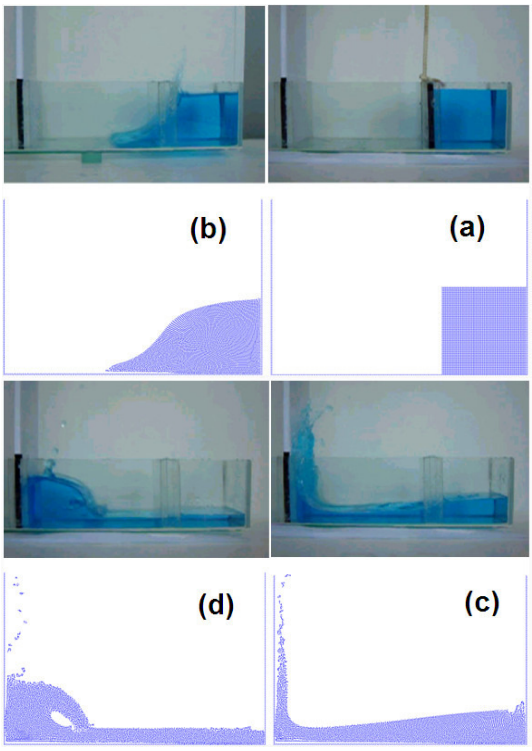
$$\eta(x,t) = S/2\,\sin(k\,x - \omega t)$$

$$\frac{H}{S} = 4\left(\frac{\sinh(kd)}{kd}\right)\frac{kd\times\sinh(kd)-\cosh(kd)+1}{\sinh(2kd)+2kd}$$

در رابطه بالا، η پروفیل حرکت موجساز، $\omega = ۲\pi/\mathrm{T}$ فرکانس زاویه‌ای موج، T پریود، $k = ۲\pi/\mathrm{L}$ عدد موج، H ارتفاع موج و S نیز طول جابجایی موجساز می‌باشد. همچنین پارامترهای مهم دیگر برای تولید موج سینوسی در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۲- کمیت‌های مدل (آزمایش شکست سد)

کمیت	مقدار
dx [سانتیمتر]	۰/۵
dz [سانتیمتر]	۰/۵
dt [ثانیه]	۰/۰۰۰۰۱
n_p [ذره]	۷۹۸۳
n_{bp} [ذره]	۸۴۳
h [سانتیمتر]	۰/۶۵



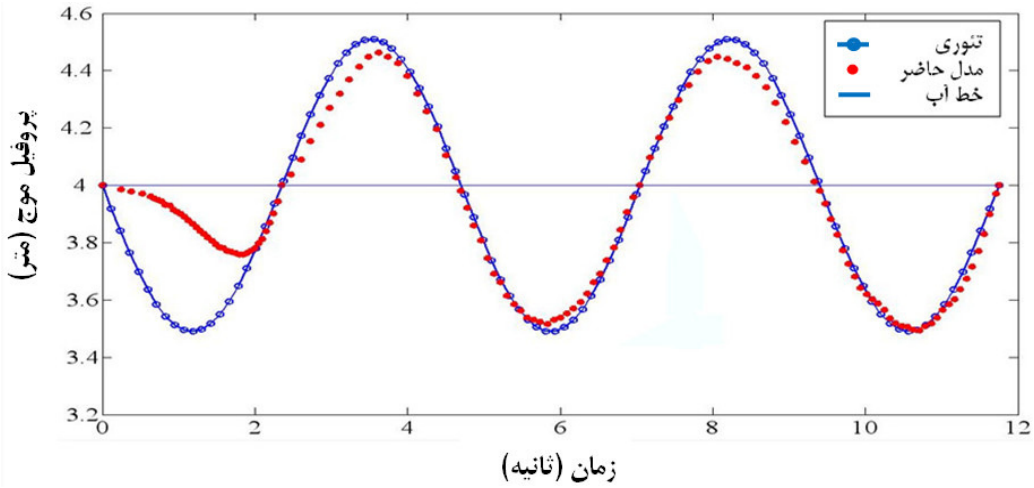
شکل ۵- مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی عیسی آزمایش شکست سد ، در زمان‌های: a) t=۰/۰ b) t=۰/۱۶ c) t=۰/۴۸۵ و d) t=۰/۸۹ ثانیه

جدول ۳- کمیت‌های مدل برای تولید موج سینوسی

کمیت	مقدار
H [متر]	۱/۰۲
L [متر]	۲۷/۳
T [ثانیه]	۴/۷
d [متر]	۴
S [متر]	۲/۱۱

در شکل ۶ نتایج ارتفاع موج در فاصله یک طول موج از موجساز ثبت شده و با نتایج تئوری مقایسه گردیده است. در این شکل، اولین موج تولیدی ($t = 0 - T$) تطابق خوبی با نتایج تئوری در نیم پریود اول به‌خاطر شروع حرکت پیستون ندارد اما در پریود دوم این تطابق به‌صورت نسبتا خوبی برقرار می‌گردد و در نیم پریود بعدی نیز تکرار می‌شود به‌طوریکه در پریود دوم بیشترین اختلاف ارتفاع موج با نتایج تئوری حدودا ۸٪ می‌باشد.

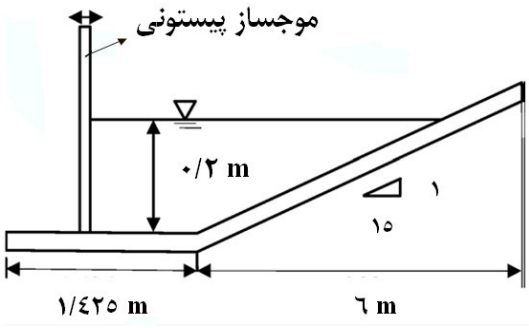
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]



شکل ۶- مقایسه پروفیل امواج سینوسی شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی WCSPH (نقاط گسسته) و نتایج تئوری (نقاط پیوسته)

۴- ایجاد موج تنها و انتشار آن بر روی ساحل شیب‌دار

در این آزمایش ابتدا یک موج تنها به‌وسیله یک موجساز پیستونی تولید شده سپس بر روی یک ساحل شیب‌دار با شیب ۱۵ افقی به ۱ قائم و ابعادی که در شکل ۷ مشخص است، می‌شکند. روند شکست این موج در مدل عددی حاضر با استفاده از مدل آشفتگی شبیه‌سازی شده است.



شکل ۷- دامنه محاسباتی آزمایش تولید و شکست موج تنها بر روی ساحل شیب‌دار

پروفیل موج تنها به‌صورت تحلیلی بر اساس تابعی از مکان x و زمان t به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$\eta(x,t) = H_0 \sec h^2\left[n(x - Ct)\right] \qquad (۲۲)$$

در رابطه بالا، C سرعت و H_0 ارتفاع اولیه موج تنها است. n و C مطابق رابطه زیر تعریف می‌شوند:

$$n = \sqrt{\frac{3H_0}{4h_0^2(h_0 + H_0)}} \ , \ C = \sqrt{g(H_0 + h_0)} \qquad (۲۳)$$

در روابط بالا، h_0 عمق آب قبل از شیب ساحلی یا همان عمق متوسط آب می‌باشد که در این تحقیق مطابق شکل ۷ معادل $h_0 = ۰/۲$ m منظور شده است.

۴-۱- تولید موج تنها به‌وسیله موجساز پیستونی

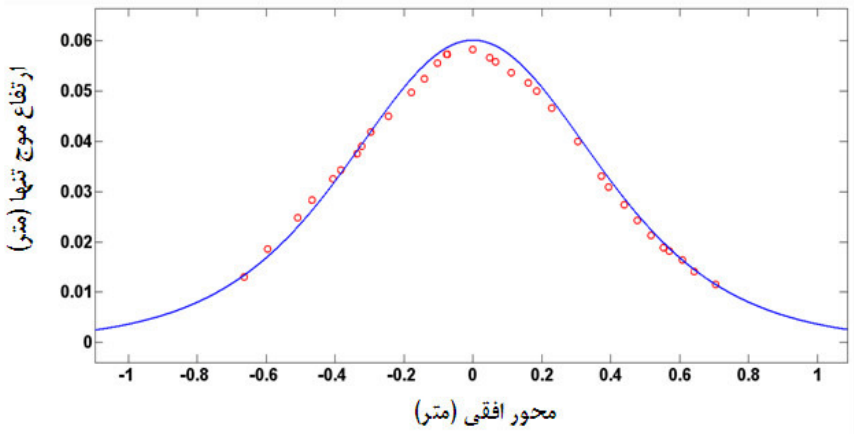
موجساز پیستونی شامل تعدادی ذره مرزی متحرک است که برای تولید موج بایستی مشخصات حرکتی آن ذرات از قبیل مکان و سرعت را در زمان‌های مختلف به آنها داد. برای تولید موج تنها به‌وسیله موجساز پیستونی از روابط زیر استفاده می‌شود [۲۴]:

$$X(t) = \frac{2H_0}{h_0\beta}\frac{h_0 \tanh(\beta Ct/2)}{h_0 + H_0\left[1 - \tanh^2(\beta Ct/2)\right]} \qquad (۲۴)$$

$$\beta = 2\sqrt{\frac{3H_0}{4h_0^2(H_0 + h_0)}} \qquad (۲۵)$$

در روابط بالا، $X(t)$ نمایانگر موقعیت پیستون در زمان‌های مختلف و β ضریب تاخیر مرزی[۲۷] است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]



شکل ۸– مقایسه پروفیل موج تنهای شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی WCSPH (نقاط توخالی) و نتایج تئوری (خط پیوسته)

بعد از به‌دست آوردن موقعیت ذرات موجساز پیستونی در زمان‌های مختلف، می توان سرعت نسبی را در هر زمان برای این ذرات به‌دست آورد و از این طریق به‌وسیله موجساز پیستونی یک موج تنها ایجاد کرد. مقایسه بین پروفیل موج تنهای تولید شده به‌وسیله شبیه‌سازی عددی و نتایج تحلیلی با نسبت ارتفاع موج اولیه به عمق متوسط $H_0/h_0 = ۰/۲۸۵$ در شکل ۸ نمایش داده شده است. این شکل تطابق خوبی بین مدل تحلیلی و نتایج عددی مدل را نشان می‌دهد.

۴-۲- شکست موج تنها بر روی ساحل

یک موج تنها با نسبت ارتفاع موج اولیه به عمق متوسط $H_0/h_0 = ۰/۴$ به‌وسیله موجساز پیستونی تولید شده و بر روی ساحل شیب‌دار مشخص شده در شکل ۷ می‌شکند. کمیت‌های مورد استفاده در مدل عددی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴– کمیت‌های مدل (آزمایش شکست موج تنها)

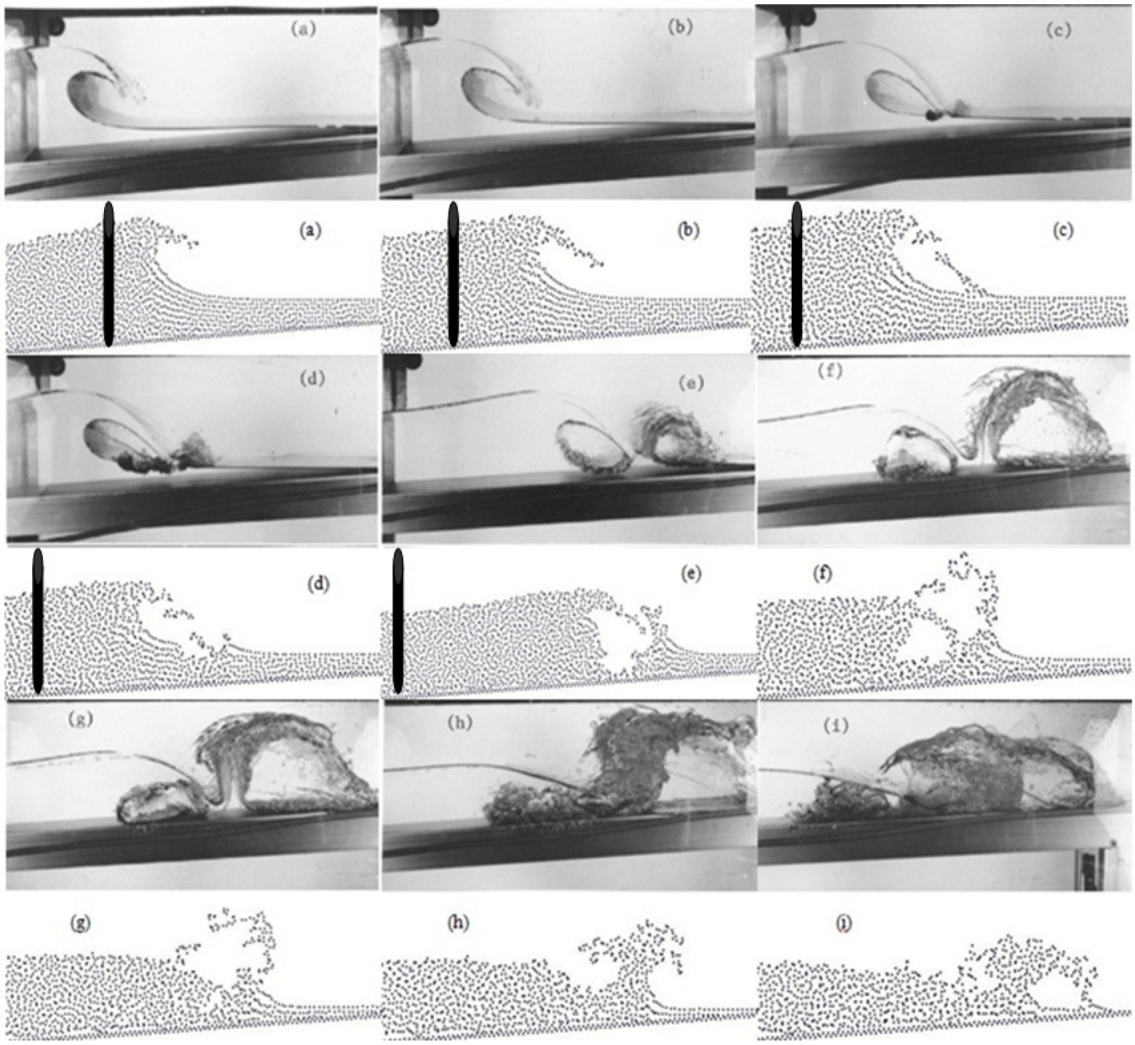
کمیت	مقدار
dx [سانتیمتر]	۰/۵
dz [سانتیمتر]	۰/۵
dt [ثانیه]	۰/۰۰۰۱
n_p [ذره]	۱۸۹۵۷
n_{bp} [ذره]	۲۸۰۰
h [سانتیمتر]	۰/۳۲۵

مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی لی و ریچلن[۲۸] (۲۰۰۳) [۲۵] در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در این شکل، مراحل شکست تاج موج و تشکیل جت شیرجه‌ای مشهود است و مدل آشفتگی می‌تواند به شکل مناسبی این روند را نشان دهد. لازم به ذکر است که هرچه تعداد ذرات در ناحیه محاسباتی بیشتر شود، نتایج شبیه‌سازی به واقعیت نزدیکتر می‌شوند ولی در عوض زمان محاسباتی افزایش می‌یابد.

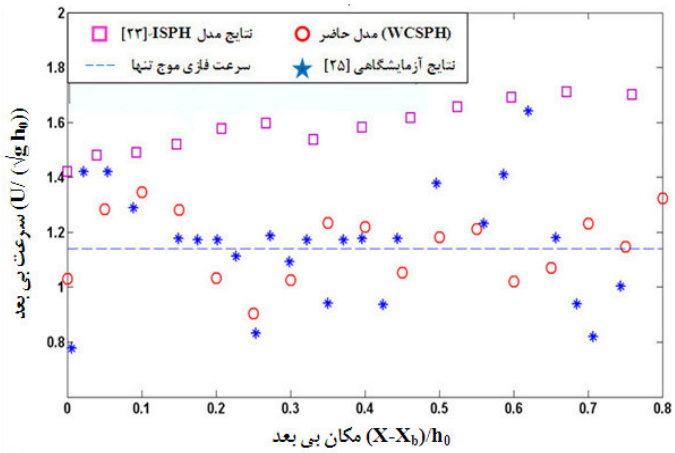
به‌منظور توصیف بهتر جت شیرجه‌ای[۲۹] تولید شده از شکست موج تنها، سرعت افقی ذره جلویی جت شیرجه‌ای موج در مدل بر حسب فاصله از مکان اولیه شکست موج x_b برای نسبت ارتفاع موج اولیه به عمق متوسط $H_0/h_0 = ۰/۳$ به‌دست آمده است. این سرعت با نتایج آزمایشگاهی لی و ریچلن [۲۵] و یکی از نتایج عددی مدل ISPH[۳۰] [۲۳] مطابق شکل ۱۰ مقایسه گردیده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت افقی ذره جلویی جت شیرجه‌ای موج در روش WCSPH از هنگام شکست تا بعد از برخورد جت موج به سطح آب نشان داده شده است.

در انتها به کمک مدل موجود، تغییر ارتفاع موج تنها از نقطه شروع شیب ساحلی x_S تا بعد از شکست موج، بین سه نسبت متفاوت ارتفاع موج اولیه به عمق متوسط H_0/h_0 محاسبه گردیده است. شکل ۱۱ این تغییرات را نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

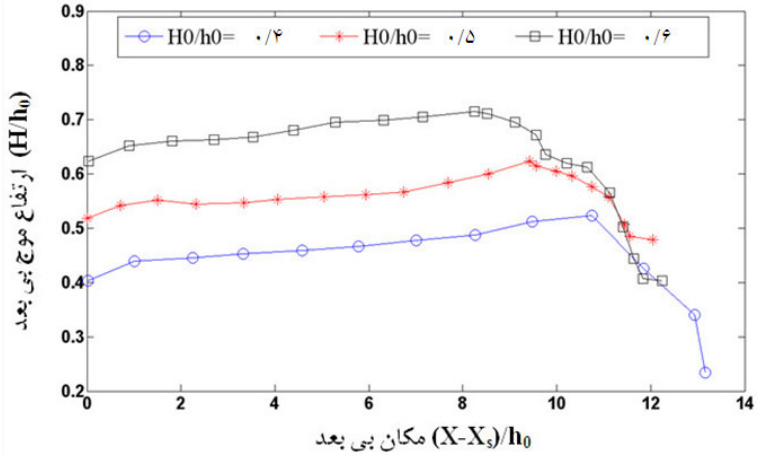


شکل ۹- مقایسه بین نتایج مدل عددی حاضر و نتایج آزمایشگاهی لی و ریچلن [۲۵] برای شکست موج تنها بر روی ساحل شیب‌دار (در ۵ شکل اول (a) تا (e) خط سیاه نشان دهنده ستون موجود در عکس است و تنها برای مقایسه بهتر به‌صورت تقریبی بر روی نتایج رسم شده است).



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات سرعت افقی ذره جلویی جت شیرجه‌ای موج تنها بعد از شکست موج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]



شکل ۱۱– مقایسه تغییر ارتفاع موج تنها در طول شیب ساحلی برای سه ارتفاع مختلف بی بعد موج

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا یک مدل عددی دو بعدی برپایه روش WCSPH ساخته شد. سپس به‌ترتیب بدون و با داشتن مدل آشفتگی، به‌وسیله آزمایش شکست سد مورد معتبرسازی قرار گرفت. در آزمایش اول، نتایج شکست سد به کمک مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی مارتین و مویس (۱۹۵۲) مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد که روش WCSPH خطای کمی نسبت به نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد. همچنین در آزمایش بعدی برای ارزیابی دقت مدل آشفتگی، نتایج شکست سد به کمک مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی عیسی (۲۰۰۵) مقایسه شد. این مقایسه دقت مدل آشفتگی را نشان داد. در مجموع این آزمایش‌ها نشان داد که روش WCSPH، قابلیت و انعطاف پذیری بالایی در شبیه‌سازی تغییر شکل‌های پیچیده جریان سیال آشفته دارد. به‌منظور درک بیشتر رفتار موج هنگام شکست و تغییر شکل‌های سیال ناشی از شکست موج بر روی ساحل شبیه‌سازی‌های دیگری انجام شد. در این شبیه‌سازی‌ها، شکست موج تنهای تولید شده به‌وسیله موجساز پیستونی مدل گردید. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی لی و ریچلن (۲۰۰۳) مجددا دقت مدل تهیه شده را تایید نمود. همچنین تغییرات سرعت افقی ذره جلویی جت شیرجه‌ای موج در روش WCSPH از هنگام شکست تا بعد از برخورد جت موج به سطح آب با روش ISPH مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل حاضر در این زمینه نیز از دقت بهتری برخوردار است.

در انتها بر اساس این شبیه‌سازی‌ها تغییرات ارتفاع موج تنهای در حال شکست بر روی ساحل شیب‌دار برای ارتفاع امواج مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی نشان داد هر چه ارتفاع اولیه موج تنها بیشتر باشد، شکست موج در مکان دورتری نسبت به ساحل رخ می‌دهد.

کلید واژگان

1-Numerical diffusion
2-Advection term
3-Navier Stokes
4-Lagrangian
5-Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH)
6-Lucy; 1977
7-Gingold & Monaghan; 1977
8-Weakly compressible Smoothed Particle Hydrodynamic (WCSPH)
9-Dam break
10-Solitary wave
11-Momentum
12-Artificial viscosity
13-Kernel
14-Smoothing length
15-Cubic spline
16-Monaghan & Lattanzio; 1985
17-Tait equation
18-XSPH
19-Predictor-Corrector
20-Courant Condition
21-Moving Least Square (MLS)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

22-Sub Particle Scale(SPS)
23-Delta Function
24-Strain tensor
25-Large Eddy Simulation (LES)
26-Martin and Moyce
27-Outskirt decay coefficient
28-Li and Raichlen
29-Plunging jet tip
30-Incompressible SPH

۶- مراجع

1-Harlow, F. and Welch, E., (1965), Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, Physics of Fluids, Vol.8 (12), p.2182-2189.
2-Hirt, C. W. and Nichols, B. D., (1981), Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics, Vol. 39 (1), p.201-225.
3-Chan, R. K. C. and Street, R. L., (1970), A computer study of finite-amplitude water waves, Journal of Computational Physics, Vol. 6 (1), p. 68-94.
4-Lin, P. and Liu, P. L. F., (1998), A numerical study of breaking waves in the surf zone, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 359 (1), p. 239-264.
5-Lucy, L., (1977), A numerical approach to testing the fission hypothesis, The Astronomical Journal, Vol. 82 (12), p.1013-1024.
6-Gingold, R.A. and Monaghan, J.J., (1977), Smoothed particle hydrodynamics-theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.181, p.375-389
7-Monaghan, J.J., (1992), Smoothed particle hydrodynamics, Annual review of astronomy and astrophysics, Vol. 30, p.543-574.
8-Morris, J.P., Fox, P.J. and Zhu Y., (1977), Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH, Journal of computational physics, Vol.136 (1), p.214-226.
9-Monaghan, J.J. and Kos, A., (1999), Solitary waves on a Cretan beach, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 125 (3), p.145-154.
10-Colagrossi, A. and Landrini, M., (2003), Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics, Journal of Computational Physics, Vol.191 (2), p.448-475.
11-Shao, S. and Gotoh, H., (2005), Turbulence particle models for tracking free surfaces, Journal of hydraulic research, Vol.43 (3), p.276-289.
12-Monaghan, J. J., (2005), Smoothed particle hydrodynamics, Reports on Progress in Physics, Vol.68, 1703-1759.
13-Monaghan, J.J. and Lattanzio, J.C., (1985), A refined method for astrophysical problems, astronomy and astrophysics, Vol.149, p.135-143.
14-Batchelor, G. K., (1967), Introduction to fluid dynamics, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
15-Monaghan, J. J., (1989), On the problem of penetration in particle methods, Journal of Computational Physics, Vol.82 (1), p.1-15.
16-Shao, S., Ji, C., Graham, D.I., Reeve, D.E., James, P.W. and Chadwick, A.J., (2006), Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model, Coastal Engineering Vol.53 (9), p.723-735.
17-Colagrossi, A. and Landrini, M., (2003), Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics, Journal of Computational Physics, Vol.191 (2), p.448-475.
18-Dalrymple R.A. and Rogers, B.D., (2006), Numerical modeling of water waves with the SPH method, Coastal Engineering, Vol.53 (2-3), p.141-147.
19-Martin, J.C. and Moyce, W.J., (1952), Part IV. an experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol.244 (882), p.312-324.
20-Issa, R., (2005), Numerical assessment of the smoothed particle hydrodynamics gridless method for incompressible flows and its extension to turbulent flows, University of Manchester Institute of Science and Technology.
21-Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., (1991), Water wave mechanics for engineers and

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]

scientists, Vol.2, World Scientific Pub Co Inc.
22-Khayyer A., Gotoh H. and Shao S.D., (2008), Corrected Incompressible SPH method for accurate water-surface tracking in breaking waves, Coastal Engineering, vol.55.3, p.236-250.
23-Guizien, K. and Barthelemy, E., (2002), Accuracy of solitary wave generation by a piston wave maker, International Journal of Hydraulic Research, Vol. 40.3, p.321-331.
24-Li, Y. And Raichlen, F., (2003), Energy Balance Model for Breaking Solitary Wave Runu, Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, Vol 129.2. p. 47-59.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.3.4]