



کاربرد و مقایسه روش‌های اصلاح فشار و سرعت و شرایط مرزی در روش هیدرودینامیک ذرات هموار (WCSPH) در مدل‌سازی عددی سه بعدی جریان سیال غیرلزج

محمدهادی شعبانی^۱ و محمود رستمی ورنوسفادرائی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۲ استادیار، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

چکیده

در این مقاله از روش هیدرودینامیک ذرات هموار نسبتاً تراکم پذیر (WCSPH) برای شبیه‌سازی سه بعدی جریان شکست سد در حضور مانع پایین دست استفاده شده است. معادلات اویلر که حاکم بر جریان سیال غیر لزج است، مورد استفاده قرار گرفته است. نوسانات شدید و غیرواقعی در میدان فشار و سرعت، یکی از مشکلات عمده در این روش است. در مطالعه حاضر، این نوسانات با استفاده از فیلتر چگالی و یک حلگر ریمن پایستار کنترل شده و نتایج حاصل از بکارگیری این دو روش با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. علاوه از آنجایی استفاده از لزجت مصنوعی در روش هیدرودینامیک ذرات هموار متداول است، لذا نتایج فوق با در نظر گرفتن لزجت مصنوعی در معادلات ممنوم و بدون در نظر گرفتن فیلتر چگالی مقایسه گردیده است. مقایسه این نتایج نشان داد که حلگر ریمن پایستار عملکرد خوبی در کنترل نوسانات میدان فشار و سرعت داشته و در محاسبه صحیح فشار موفق عمل کرده است. در نهایت عملکرد دو شرط مرزی دینامیک و دفع کننده در این مقاله بررسی شده است.

کلمات کلیدی: هیدرودینامیک ذرات هموار؛ جریان غیرلزج؛ لزجت مصنوعی؛ اصلاح فشار و سرعت؛ مدل‌سازی سه بعدی.

Application and Comparison of Pressure and Velocity Correction Methods and Boundary Conditions in Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics (WCSPH) Method for numerical modelling of 3D Inviscid Fluid Flow

M. Hadi Shabani¹, M. Rostami V.F.^{2,*}

¹ M.Sc., Marine Eng., Malek-Ashtar Univ. Tech., Shahin-Shahr, Isfahan, Iran

² Assis. Prof., Marine Eng. Depart., Faculty of Mechanics, Malek-Ashtar Univ. Tech., Shahin-Shahr, Isfahan, Iran.

Abstract

In this paper, Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics (WCSPH) method was used to numerically simulate the three dimensional dam-break with obstacle in front of the flow. Euler equations as governing equations of inviscid fluid flow were used. Large and unphysical oscillations in pressure and velocity field are one of the most important problems in this method. In present study these oscillations were controlled by using density filter and conservative Riemann solvers, and results of these two methods were compared with experimental data. Furthermore due to common using of artificial viscosity in WCSPH method, the simulation was implemented using artificial viscosity in momentum equations without density filtering and compared with last two methods. This comparison showed that the conservative Riemann solvers could well control the oscillations in pressure and velocity field and gives correct pressure results in WCSPH method. Finally two boundary conditions called dynamic and Repulsive forces were investigated in this paper.

Keywords: WCSPH; Inviscid Fluid; Artificial Viscosity; Pressure Correction and Velocity Correction; 3D Modeling.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۱۴۵۹۱۴۴۴۶

آدرس پست الکترونیک: rostamivf@aut.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی دقیق‌تر، اثر اعمال فیلتر چگالی و استفاده از حلگر ریمن با هم مقایسه شده‌اند. درعین حال اثر بکارگیری لزجت مصنوعی در معادلات ممنتوم بدون بکارگیری فیلتر چگالی و حلگر ریمن بررسی می‌شود؛ زیرا نه تنها استفاده از لزجت مصنوعی برای اولین بار [۴] در روش هیدرودینامیک ذرات هموار استفاده شده، بلکه استفاده از آن برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های سطح آزاد بسیار رایج است. در انتها اثرات استفاده از دو شرط مرزی، دینامیک و نیروهای دفع کننده در شبیه‌سازی بررسی می‌شود؛ بنابراین در این مقاله روش هیدرودینامیک ذرات هموار با پنج حالت مختلف عددی برای محاسبه نیرو و سرعت جریان سیال تراکم ناپذیر و غیرلزج در مساله شکست سد سه بعدی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم پذیر و لزج، معادلات پیوستگی و بقای ممنتوم هستند که به صورت رابطه (۱-۲) بیان می‌شوند:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \Theta \quad (2)$$

که در معادلات فوق t نمایانگر زمان، ρ چگالی سیال، \mathbf{u} بردار سرعت، P فشار، \mathbf{g} بردار شتاب گرانشی و Θ مربوط به جمله دیفیوژن است.

۳- روش هیدرودینامیک ذرات هموار

روش SPH توسط لوسی^۷ [۱۶] و گینگولد^۸ و موناگان [۱۷] برای حل مسائل اختریفیزیک ابداع شد و توسط موناگان برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد توسعه یافت [۴]. در این روش هر کمیت $A(\mathbf{r})$ و گرادیان‌های آن برای هر ذره a به صورت زیر تخمین زده می‌شوند:

شبیه‌سازی تغییر شکل‌های سطح آزاد جریان و بررسی اندرکنش سیال و سازه، مورد علاقه‌ی بسیاری از دانشمندان است. این مطالعات برای طراحی سازه‌های ساحلی و فراساحلی ضروری است. مسئله شکست سد، یک مسئله معروف و شناخته شده در علم سیالات است؛ چرا که پدیده‌های مختلف و پیچیده‌ای در این مسئله اتفاق می‌افتد و علاوه بر این بسیار شبیه به برخی از مسائل مهندسی مثل خیسی عرشه کشتی و موج حاصل از وقوع سونامی [۱-۳] است. برای شبیه‌سازی این پدیده پیچیده، حل معادلات ناوبر-استوکس با روش‌های لاگرانژی کارآمد و در عین حال بدون نیاز به روش‌هایی همچون حجم سیال در روش‌هایی اوپلری است.

WCSPH^۱ یک روش کاملا لاگرانژی است که توسط موناگان^۲ [۴] معرفی شد. در این روش سیال نسبتا تراکم-پذیر در نظر گرفته می‌شود و فشار از معادله حالت به دست می‌آید. این روش به طور گسترده در مدل‌سازی شکست سد روی بستر خیس [۵]، انتشار موج [۶ و ۷]، اندرکنش موج با سازه [۸] و شکست موج تنها [۹] استفاده شده است. در روش WCSPH نوسانات زیادی در میدان فشار وجود دارد. این نوسانات می‌تواند با استفاده از فیلترهای چگالی شپارد [۶] و MLS^۳ [۱۰] تصحیح شود. از طرف دیگر، نوسانات میدان سرعت نیز باید کنترل شود. از اینرو موناگان روش XSPH را معرفی کرد [۱۱]؛ اما در صورت استفاده از این روش، قانون بقا انرژی ارضا نمی‌شود و مشکل دیگری به وجود می‌آید [۱۲]؛ بنابراین حلگرهای ریمن^۴ برای استفاده در این روش معرفی شدند [۱۳ و ۱۴]. با استفاده از حلگر ریمن، میدان فشار و سرعت به صورت همزمان تصحیح شده و ضرورت استفاده از فیلتر چگالی و روش XSPH حذف می‌گردد. در این مقاله جریان حاصل از شکست سد روی مانع با استفاده از کد SPHysics شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی^۵ به^۵ و پتروف^۶ [۱۵] مقایسه می‌شوند. برای

¹ Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics

² Monaghan

³ Moving Least Squares

⁴ Riemann solver

⁵ Yeh

⁶ Petroff

⁷ Lucy

⁸ Gingold

که مقادیر $\bar{\rho}_{ab} = 0.5(\rho_a + \rho_b)$ ، $\bar{c}_{ab} = 0.5(c_a + c_b)$ و $\mu_{ab} = h\mathbf{u}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} / (r_{ab}^2 + \eta^2)$ ، $\mathbf{u}_{ab} = \mathbf{u}_a + \mathbf{u}_b$ و $\eta^2 = 0.01h^2$ هستند. α ضریب تجربی است که در این مطالعه طبق مرجع [۶]، 0.1 در نظر گرفته شده است. در صورتی که $\alpha = 0$ باشد، معادله (۷) به معادله‌ی اوایلر تبدیل می‌شود، که معادله ممنتوم برای سیال غیرلزج است.

۳-۲- الگوریتم حل زمانی

برای حل معادلات حاکم، از الگوریتم پیش‌بینی-تصحیح استفاده شده است [۱۱]. در این الگوریتم، متغیرهای میدان ابتدا در نیمه گام زمانی محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} \rho_a^{n+1/2} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^n \\ \mathbf{u}_a^{n+1/2} = \mathbf{u}_a^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{F}_a^n \\ \mathbf{r}_a^{n+1/2} = \mathbf{r}_a^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{U}_a^n \end{cases} \quad (9)$$

که Δt گام زمانی، $D_a = \frac{d\rho_a}{dt}$ ، $\mathbf{F}_a = \frac{d\mathbf{u}_a}{dt}$ و $\mathbf{U}_a = \frac{d\mathbf{r}_a}{dt}$ به صورت هستند. فشار از معادله حالت (۵) به صورت $p_a^{n+1/2} = f(\rho_a^{n+1/2})$ به دست می‌آید. سپس مقادیر چگالی، سرعت و مکان با استفاده از مقادیر مرحله‌ی قبل اصلاح می‌شوند:

$$\begin{cases} \rho_a^{n+1} = \rho_a^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} D_a^{n+1/2} \\ \mathbf{u}_a^{n+1} = \mathbf{u}_a^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{F}_a^{n+1/2} \\ \mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{U}_a^{n+1/2} \end{cases} \quad (10)$$

مقادیر فوق در پایان گام زمانی برابرند با:

$$\begin{cases} \rho_a^{n+1} = 2\rho_a^{n+1/2} - \rho_a^n \\ \mathbf{u}_a^{n+1} = 2\mathbf{u}_a^{n+1/2} - \mathbf{u}_a^n \\ \mathbf{r}_a^{n+1} = 2\mathbf{r}_a^{n+1/2} - \mathbf{r}_a^n \end{cases} \quad (11)$$

فشار در انتهای گام زمانی با استفاده از مقدار چگالی در $n+1$ مطابق رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho_a^{n+1}}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (12)$$

گام زمانی با استفاده از شرط کورانت و شرط لزجت به صورت رابطه (۱۳) کنترل می‌شود [۹]:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho_a^{n+1}}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (13)$$

$$\begin{cases} A(\mathbf{r}_a) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \\ (\nabla A)_a = \rho_a \sum_b m_b \left(\frac{A_a}{\rho_a^2} + \frac{A_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab} \end{cases} \quad (3)$$

که m_b و ρ_b به ترتیب جرم و چگالی ذرات مجاور ذره a هستند. $W_{ab} = W(|r_a - r_b|, h)$ تابع کرنل و h شعاع هموارسازی است. در این مقاله از تابع اسپلاین مرتبه ۳ [۱۸] استفاده شده است.

$$W(r, h) = \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{2}q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

که $q = r/h$ و α_D در مسائل سه بعدی $1/(\pi h^3)$ است. در روش WCSPH، فشار هر ذره از معادله حالت محاسبه می‌شود:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (5)$$

که در رابطه فوق $\rho_0/\gamma = C_0^2$ ، $B = C_0^2 \rho_0/\gamma$ و $\gamma = 7$ ، C_0 سرعت صوت در چگالی مرجع ($\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$) است. مقدار C_0 در این مطالعه ۱۳ برابر بیشترین سرعت سیال در نظر گرفته شده است تا هم مسئله با گام زمانی منطقی‌تری شبیه‌سازی شود و هم تغییرات چگالی سیال کمتر از یک درصد باشد.

۳-۱- گسسته‌سازی معادلات

فرم گسسته معادلات پیوستگی (۱) و بقا ممنتوم (۲) به صورت زیر هستند:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b (\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_b) \cdot \vec{\nabla}_a W_{ab} \quad (6)$$

$$\frac{d\mathbf{u}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} - \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \cdot \vec{\nabla}_a W_{ab} + \mathbf{g} \quad (7)$$

در رابطه فوق Π_{ab} لزجت مصنوعی است. این جمله توسط موناگان [۱۹] برای از بین بردن دیفیوژن عددی و پایداری در محاسبات به معادله ممنتوم اضافه شد و برابر است با:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} -\alpha \bar{c}_{ab} \frac{\mu_{ab}}{\bar{\rho}_{ab}} & \mathbf{u}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0 \\ 0 & \mathbf{u}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}(\omega_i \rho_i \mathbf{v}_i) + \omega_i \sum_{j \in P} \omega_j 2 [p_s + \rho_s \mathbf{v}_{s,ij} \otimes (\mathbf{v}_{s,ij}^0 - \mathbf{v}^0(x_{ij}, t))] \cdot \nabla_i W_{ij} = \omega_i \mathbf{g}_i \quad (18)$$

۳-۵- شرایط مرزی

در این مطالعه دو نوع شرط مرزی دینامیک [۲۰] و دفع‌کننده [۴] برای شبیه‌سازی جریان حاصل از شکست سد روی مانع پایین دست استفاده شده است.

شرط مرزی دینامیک: در این روش، ذرات مرزی مثل ذرات سیال معادلات پیوستگی، بقا ممنتوم و حالت را ارضا می‌کنند؛ اما حرکت نمی‌کنند. زمانی که ذره سیال به دیواره‌ها می‌رسند، چگالی ذره مرزی زیاد شده و در نتیجه فشار آن افزایش می‌یابد؛ بنابراین به علت وجود جمله فشار P/ρ در معادله ممنتوم، نیروی وارده بر ذره سیال افزایش می‌یابد.

شرط مرزی دفع‌کننده: در این روش وقتی ذره سیال به دیواره می‌رسد، نیرویی توسط ذرات تشکیل دهنده مرزها به آن وارد می‌شود که برابراست با:

$$\mathbf{f} = \mathbf{n}R(y)P(x)\varepsilon(z, u_{\perp}) \quad (19)$$

که \mathbf{n} بردار نرمال دیواره، $R(y)$ تابع دفع، $P(x)$ تابع کنترل کننده نیروی دافعه ذرات مرزی روی ذرات سیال و $\varepsilon(z, u_{\perp})$ تابع تنظیم بزرگی نیروی دفع کننده براساس عمق محلی آب و سرعت ذره سیال است [۲۱].

۴- مدل‌سازی عددی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی به و پتروف [۱۵] مقایسه شده‌اند. این آزمایش در یک مخزن به طول ۱/۶ متر، عرض ۰/۶۱ متر و ارتفاع ۰/۷۵ متر انجام شد. دیگر جزئیات این آزمایش، در شکل ۱ نشان داده شده است.

از آنجایی که خشک کردن کامل ناحیه پایین دست در پیچه در حین آزمایش میسر نبود، یک لایه نازک آب به عمق ۰/۰۵-۰/۰۱ متر در این ناحیه در نظر گرفته شد

۳-۳- فیلتر چگالی

نوسانات غیرفیزیکی زیادی در میدان فشار حاصل از شبیه‌سازی به روش WCSPH وجود دارد که یکی از راه‌های کنترل این نوسانات، استفاده از فیلتر چگالی است. برای این منظور از فیلتر چگالی MLS [۱۰] استفاده شده است که در هر ۳۰ گام زمانی روی میدان چگالی ذرات اعمال می‌شود. فیلتر چگالی MLS به صورت زیر است:

$$W_{ab}^{MLS} = [\beta_0(\vec{r}_a) + \beta_{1x}(\vec{r}_a)(x_a - x_b) + \beta_{1y}(\vec{r}_a)(y_a - y_b) + \beta_{1z}(\vec{r}_a)(z_a - z_b)]W_{ab} \quad (14)$$

که در آن:

$$\beta_0(\vec{r}_a) = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{1x} \\ \beta_{1y} \\ \beta_{1z} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \sum_b W_b(r_a) \tilde{\mathbf{A}} \omega_b$$

$$\tilde{\mathbf{A}} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & (x_a - x_b) & (y_a - y_b) & (z_a - z_b) \\ (x_a - x_b) & (x_a - x_b)^2 & (x_a - x_b)(y_a - y_b) & (x_a - x_b)(z_a - z_b) \\ (y_a - y_b) & (x_a - x_b)(y_a - y_b) & (y_a - y_b)^2 & (y_a - y_b)(z_a - z_b) \\ (z_a - z_b) & (x_a - x_b)(z_a - z_b) & (y_a - y_b)(z_a - z_b) & (z_a - z_b)^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

۳-۴- حلگر ریمن

راه دیگر کنترل نوسانات فشار، استفاده از حلگر ریمن است. علاوه بر این، نوسانات میدان سرعت نیز به صورت همزمان کنترل می‌شود. در این روش دیگر نیازی به استفاده از جمله لزجت مصنوعی نیست و با معادلات ناویر-استوکس غیرلزج سروکار داریم. به این ترتیب معادلات حاکم در فرم SPH به صورت زیر در می‌آیند [۱۳]:

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{V}(\mathbf{x}, t) \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt}(\omega_i \rho_i) + \omega_i \sum_{j \in P} \omega_j 2 \rho_s (\mathbf{v}_{s,ij} - \mathbf{v}^0(x_{ij}, t)) \cdot \nabla_i W_{ij} = 0 \quad (17)$$

¹ Repulsive

۴-۱- مقایسه نتایج نیرو و سرعت

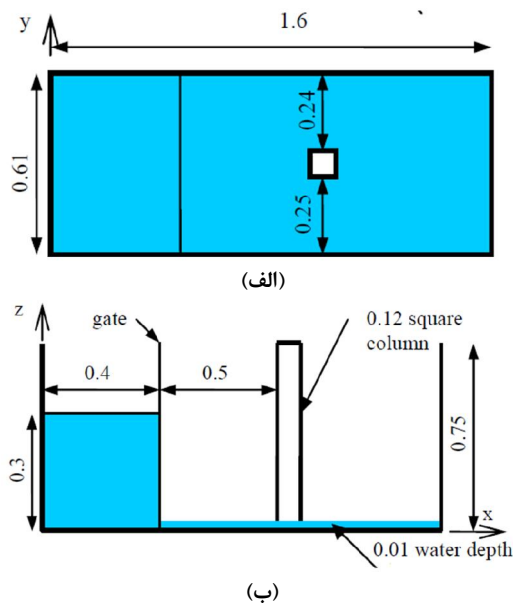
روند تغییرات جریان سیال در شکل ۲ نمایش داده شده است. لحظه صفر ثانیه وضعیت اولیه مسئله را نشان می‌دهد. پس از مدت بسیار کوتاهی موج حاصل از شکست سد روی کف مخزن حرکت کرده و در لحظه‌ی ۰/۳۶ ثانیه به مانع برخورد می‌کند. ارتفاع موج برخوردی در لحظه‌ی ۰/۷ ثانیه به بیشترین مقدار خود ۰/۱۷۴ متر می‌رسد و بر اثر نیروی گرانرش فرو می‌ریزد. با گذشت زمان جریان سیال به دیواره انتهایی مخزن می‌رسد و موج منعکس شده باعث وقوع ضربه دوم روی مانع در لحظه ۱/۶۰ ثانیه می‌شود.

در شکل ۳ بررسی تعداد ذرات بر میزان نیرو مشاهده می‌شود. با تنظیم فاصله‌ی اولیه ذرات از هم $dx = dy = dz = 0.0225 \text{ m}$ تعداد ۲۴۱۶۶ ذره استفاده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار نیرو با استفاده از این تعداد ذره بسیار نزدیک به میزان نیرو با دو برابر کردن ذرات است. پس در نهایت برای محاسبه نیرو از تعداد ۲۴۱۶۶ استفاده می‌شود.

نتایج عددی و آزمایشگاهی نیروی وارد بر مانع در شکل ۴ مقایسه شده‌اند. در زمان ۰/۳۵ ثانیه، جریان سیال هنوز به مانع نرسیده است و هیچ نیرویی به ستون وارد نمی‌شود. پس از برخورد موج حاصل از شکست سد، نیروی شدیدی به ستون وارد می‌شود. این پدیده در یک زمان یکسان برای همه‌ی روش‌ها اتفاق نمی‌افتد. این اختلاف زمانی ناشی از استفاده از شرایط مرزی متفاوت و لایه نازک آب پایین‌دست است.

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، در شرط مرزی دفع-کننده لایه یک سانتیمتری در پایین دست دریچه مدل نشده است. در این شرایط جریان سیال سریع‌تر حرکت کرده [۲۲] و زودتر با مانع برخورد می‌کند. علاوه بر این، اندازه ضربه اولیه نیز بزرگتر است [۲۳]. پس از این اتفاق، نیروی وارد بر ستون کاهش می‌یابد. این کاهش تا زمانی ادامه می‌یابد که موج منعکس شده از دیواره پایین‌دست مخزن، در لحظه‌ی ۱/۶۰ ثانیه به ستون برخورد کند. به لطف استفاده از حلگر ریمن، این پدیده در مدل ۵ (جدول ۱) به درستی شبیه‌سازی شده است. در نهایت حرکت جریان سیال میرا شده و نیروی حاصل از آن به نزدیکی صفر می‌رسد.

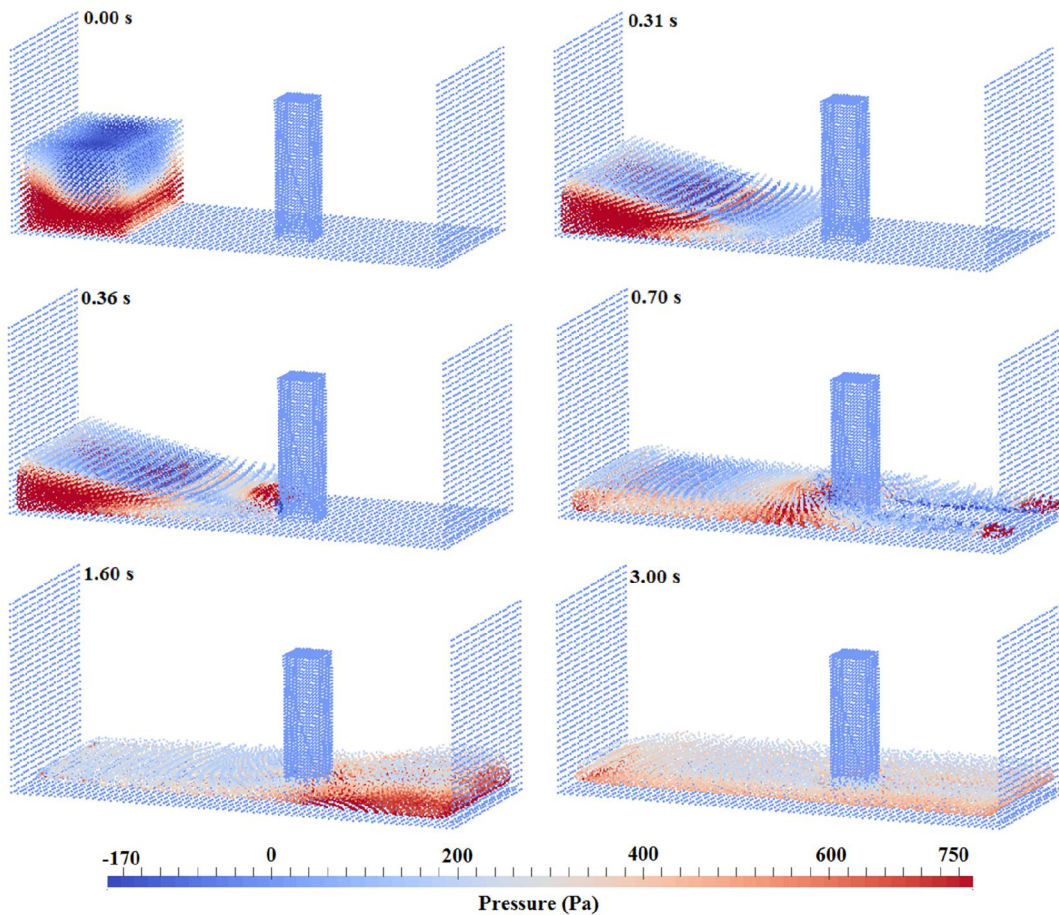
[۱۵]. شبیه‌سازی این لایه در شرط مرزی دفع‌کننده ممکن نیست؛ چرا که ذرات آب این لایه نازک، توسط نیروی دفع‌کننده f به بالا پرتاب می‌شوند؛ بنابراین از مدل‌سازی این لایه در شرط مرزی دفع‌کننده صرف‌نظر شده است. خلاصه تمام روش‌های عددی استفاده شده در این مقاله در جدول ۱ آمده است.



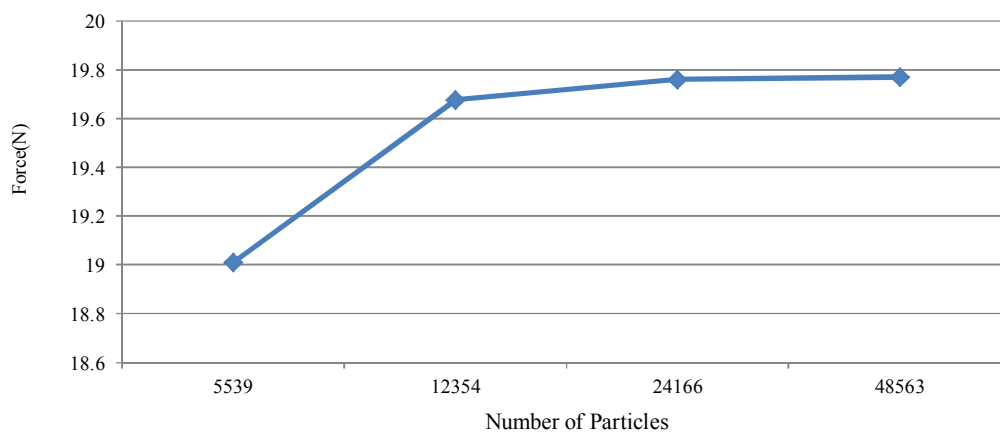
شکل ۱- الف) نمای از بالا و ب) نمای از کنار آزمایش به و پتروف [۱۳]

جدول ۱- شرایط مدل‌های عددی به کار رفته در این مقاله

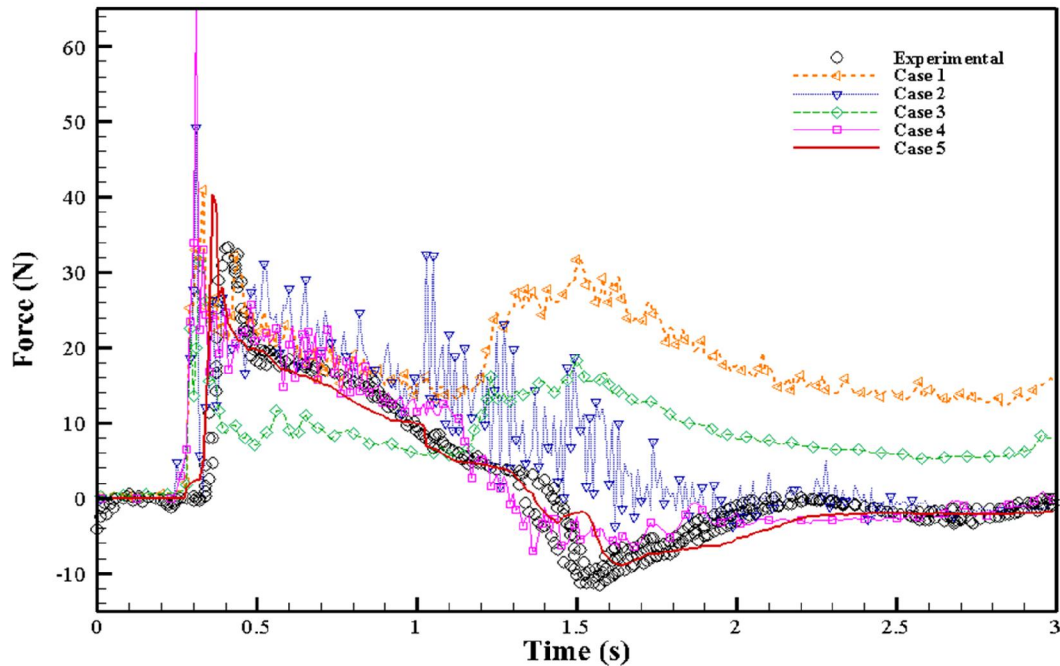
مدل عددی	شرایط مرزی	لزجت	فیلتر چگالی	حلگر ریمن
مدل ۱	دینامیک	مصنوعی	خیر	خیر
مدل ۲	دفع‌کننده	مصنوعی	خیر	خیر
مدل ۳	دینامیک	مصنوعی	MLS	خیر
مدل ۴	دفع‌کننده	مصنوعی	MLS	خیر
مدل ۵	دفع‌کننده	خیر	خیر	بلی



شکل ۲- برخورد جریان سیال ناشی از شکست سد با مانع



شکل ۳- بررسی استقلال از تعداد ذرات برای مدل عددی توسعه یافته در لحظه ۰/۴۸ ثانیه



شکل ۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای نیروی وارد بر ستون

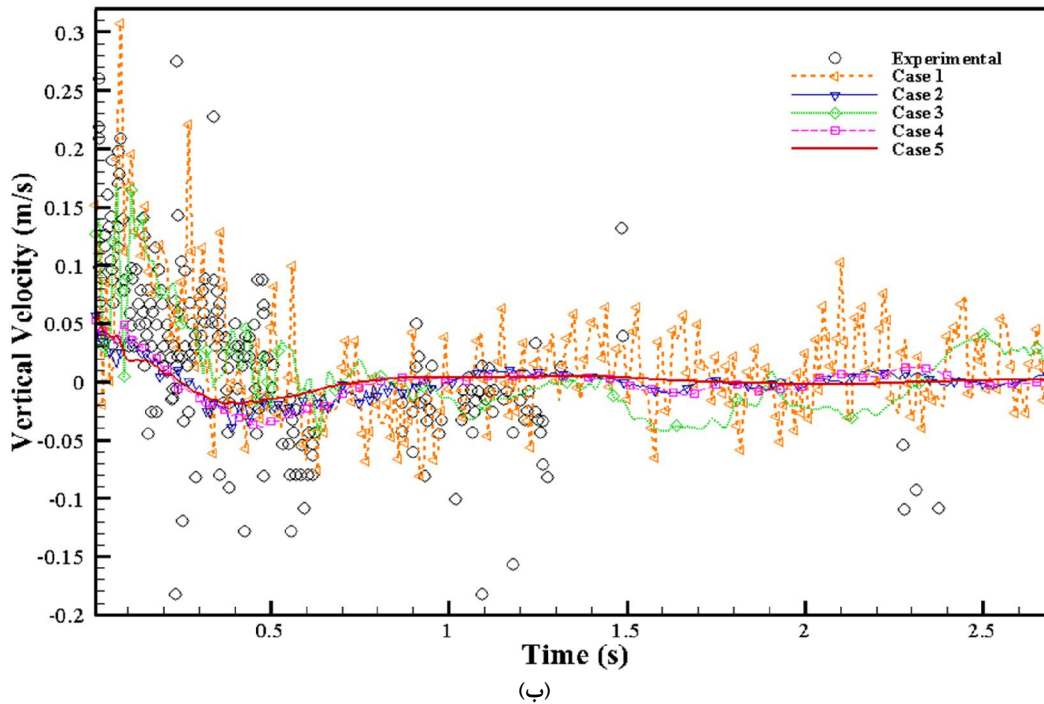
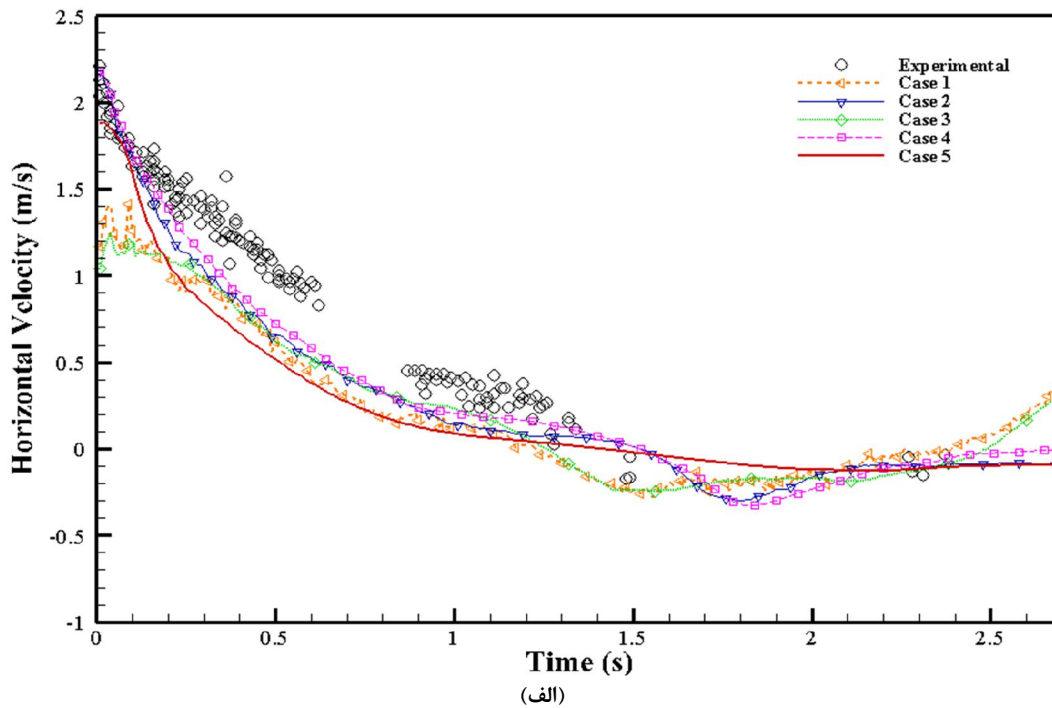
۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، جریان سه بعدی شکست سد روی یک مانع با هدف اصلاح فشار و سرعت با روش WCSPH شبیه‌سازی شده است. برای رفع مشکل نوسانات میدان فشار از فیلتر چگالی و حلگر ریمن استفاده شد؛ همچنین مدل‌سازی این مسئله با دو شرط مرزی دینامیک و دفع‌کننده انجام شد. با در نظر گرفتن موارد فوق، پنج مدل برای شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شده است؛ در روش اول و دوم فقط از لزجت مصنوعی استفاده شده، اما هر یک دارای شرایط مرزی متفاوتی هستند؛ در روش سوم و چهارم از لزجت مصنوعی با فیلتر چگالی استفاده شده و هر یک دارای شرایط مرزی متفاوتی هستند؛ در نهایت، در روش پنجم از حلگرهای ریمن پایستار بدون هیچ لزج‌تی استفاده شده است. مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که روش WCSPH با حلگر ریمن و شرط مرزی دفع‌کننده، نوسانات فشار را اصلاح کرده و نیروی وارد بر مانع را بهتر محاسبه کرده است. در نهایت کارایی شرط مرزی دفع‌کننده برای استفاده در مسائل اندرکنش سیال و سازه، به علت کنترل میدان فشار و جلوگیری از نفوذ ذرات پرسرعت و پرفشار نشان داده شده است.

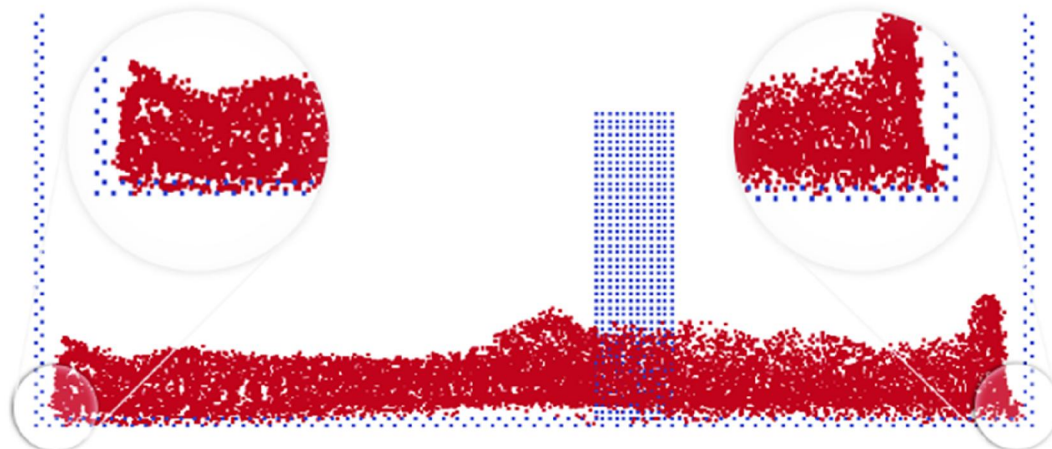
همچنین با استفاده از روش‌های تشریح شده در جدول ۱، مولفه افقی و عمودی سرعت جریان در نقطه‌ی به طول ۰/۷۵۴ متر، عرض ۰/۳۱ متر و ارتفاع ۰/۰۲۶ متر محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند (شکل ۵). تغییرات سرعت در مدل ۵ (جدول ۱) تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد و برخلاف دیگر روش‌ها، نوسانات میدان سرعت حذف شده است.

۴-۲- مقایسه شرایط مرزی

نتایج عددی نیروی وارد بر مانع با شرط مرزی دینامیک تفاوت زیادی با نتایج آزمایشگاهی داشت (شکل ۴). نخستین دلیل این تفاوت، نحوه‌ی تعامل این ذرات مرزی با ذرات سیال در این شرط مرزی است. دومین علت آن هم نفوذ ذرات سیال کف به داخل مرزها و ریزش آن‌ها بر اثر فشار هیدرواستاتیک (در ابتدای مخزن) و نفوذ ذرات پرسرعت سیال (در انتهای مخزن) است (شکل ۶)؛ اما این مشکلات در شرط مرزی دفع‌کننده وجود ندارد.



شکل ۵- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای مولفه‌های افقی و عمودی سرعت



شکل ۶- نفوذ و ریزش ذرات آب بر اثر فشار هیدرواستاتیک (سمت چپ) و بر اثر ذرات پرسرعت آب (سمت راست) (ذرات آبی و قرمز به ترتیب نمایانگر ذرات مرزها و سیال هستند)

۶- فهرست علائم

بردار سرعت در حلگر ریمن، m/s	V		
چگالی آب، kg/m^3		ρ	
حجم ذره، m^3	ω		
بردار نرمال	n	زمان، s	t
عمق محلی آب، m	z	بردار سرعت، m/s	u
		فشار، kg/m^2	P
		بردار شتاب گرانشی، m/s^2	g
		جرم، kg	m
		شعاع هموارسازی، m	h
		فاصله ذرات، m	r
		سرعت صوت، m/s	C_0
		ضریب لزجت مصنوعی	α
		لزجت دینامیکی، $Pa.s$	μ
		بردار تصحیح میدان چگالی	β

۷- مراجع

- [1] Chanson H (2006) Tsunami surges on dry coastal plains: application of dam break equations. *Coast Eng J* 48(4): 355-370.
- [2] Deng X, Liu H, Lu S (2018) Analytical study of dam-break wave tip region. *J Hydraul Eng* 144(5): 04018015.
- [3] P. Jančík and T. Hyhlik, "Pressure evaluation during dam break using weakly compressible SPH," in *Experimental Fluid Mechanics 2018*, edited by P. Dančová and J. Novosád (Technická univerzita Liberec, Liberec, 2018), pp. 219-224
- [4] Monaghan JJ (1994) Simulating free surface flows with SPH. *J Comput Phys* (110): 399-406.
- [5] Crespo A, Gomez-Gesteira M, Dalrymple RA (2008) Modeling dam break behavior over a wet bed by a SPH technique. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 134(6): 313-320.
- [6] Dalrymple RA, Rogers BD (2006) Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coast Eng* 2-3(53): 141-147.

- http://cfd.mace.manchester.ac.uk/spH/TestCasesSPH_Test1.html.
- [16] Lucy LB (1977) A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astro J* (84): 1013-1024.
- [17] Gingold RA, Monaghan JJ (1977) Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars. *Mon Not R Astron Soc* (181): 375-389.
- [18] Monaghan JJ, Lattanzio JC (1985) A refined method for astrophysical problems. *Astron Astrophys* (149): 135-143.
- [19] Monaghan JJ (1992) Smoothed particle hydrodynamics. *Annu Rev Astron Astrophys* (30): 543-574.
- [20] Dalrymple RA, Knio O (2001) SPH modeling of water waves. ASCE.
- [21] Rogers BD, Dalrymple RA (2008) SPH modeling of tsunami waves. in *Advances in Coastal and Ocean Engineering, Advanced Numerical Models for tsunami waves and runup* edition, vol. 10, World Scientific.
- [22] Ramsden JD (1993) Tsunamis: Forces on a vertical wall caused by long waves, bores, and surges on a dry bed. PhD Thesis, California Institute of Technology.
- [23] Al-Faesly T, Palermo D, Nistor I, Cornett A (2012) Experimental modeling of extreme hydrodynamic forces on structural models. *Int J Prot Struct* 3(4): 477-505.
- [7] Rostami Varnousfaaderani M, Ketabdari MJ (2015) Numerical simulation of plunging wave breaker impact by a modified Turbulent WCSPH method. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 37(2): 507-523.
- [8] Gomez-Gesteira M, Dalrymple RA (2004) Using a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method for wave impact on a tall structure. *J Waterw Port C-ASCE* 130: 63-69.
- [9] Monaghan JJ, Kos A (1999) Solitary waves on a cretan beach. *J Waterw Port C-ASCE* 3(125): 145-155.
- [10] Colagrossi A, Landrini M (2003) Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics. *J Comput Phys* (191): 448-475.
- [11] Monaghan JJ (1989) On the problem of penetration in particle methods. *J Comput Phys* (82): 1-15.
- [12] Monaghan JJ (2005) Smoothed particle hydrodynamics. *Rep Prog Phys* (68): 1703-1759.
- [13] Vila JP (1999) On particle weighted methods and Smooth Particle Hydrodynamics. *Math Models Meth Appl Sci* 9(2): 161-209.
- [14] Rogers BD, Dalrymple RA, Stansby PK (2010) Simulation of caisson breakwater movement using 2-D SPH. *J Hydraul Res* 48: 135-141.
- [15] Gómez-Gesteira M (2006) Spheric SPH benchmark test cases: Test 1 - Force exerted by a schematic 3D dam break on a square cylinder. [Online]. Available: