



مدل سازی شکست سد با استفاده از روش بدون شبکه مبنا ذره ای SPH

هادی لشکر بلوک¹، محمدرضا چمنی²، احمد رضا پیشه‌ور³، امیر مهدی حلبیان⁴

1- کارشناس ارشد عمران - h.lashkarbolouk@gmail.com

2- هیأت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان - mchamani@cc.iut.ac.ir

3- هیأت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان - mahdi@cc.iut.ac.ir

4- هیأت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان - apishe@cc.iut.ac.ir

h.lashkarbolouk@gmail.com

خلاصه

در بررسی بسیاری از پدیده‌های طبیعی با معادلاتی مواجه هستیم که با حل این معادلات می‌توان به پیش‌بینی و شبیه‌سازی از روند این پدیده‌ها در حالت‌های گوناگون پرداخت. از جمله این معادلات می‌توان به معادله‌ی ناویر-استوکس اشاره کرد که این معادلات توسط روش‌های عددی به صورت تقریبی حل می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش SPH اشاره کرد که روش عددی بدون شبکه‌بندی مبنا ذره‌ای می‌باشد. در این روش فضای پیوسته حل به یکسری نقاط مشخص گسسته می‌گردد که هیچ ارتباطی با یکدیگر ندارند و براحتی می‌توانند در کل فضای مسأله حرکت کنند. از جمله مسائلی که دارای جریان با سطح آزاد، تغییر مکان‌های زیاد سیال می‌باشد و معادله ناویر استوکس بر حرکت سیال آن حاکم است، مسأله شکست سد است. در مقاله‌ی حاضر حرکت آب در مسأله‌ی شکست سد با استفاده از روش عددی SPH مدل‌سازی گردید. پس از مدل‌سازی و برای تعیین دقت و صحت مدل‌سازی، نتایج خروجی از مدل‌سازی‌ها از قبیل موقعیت پیشانی موج و پروفیل سطح آب با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد و از درستی و صحت مدل‌سازی‌ها اطمینان حاصل گردید. نتایج حل عددی نشان می‌دهد که روش SPH، روشی کارآمد و نسبتاً دقیق در مدل‌سازی جریان با سطح آزاد و تغییر مکان‌های زیاد است. در ادامه نتایجی که برآورد آنها در آزمایشگاه به آسانی امکان‌پذیر نمی‌باشد، مانند دبی خروجی از دریچه، ارتفاع سطح آب در دیواره‌ی بالادست و سرعت پیشانی موج، به‌منظور شناخت بهتر مسأله‌ی شکست سد ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی، روش عددی SPH، شکست سد، موقعیت پیشانی موج، پروفیل سطح آب.

1. مقدمه

معادله‌ی ناویر-استوکس بر بسیاری از پدیده‌های سیالاتی حاکم است و با حل آن می‌توان پارامترهایی مانند سرعت، فشار، سطح آب و تغییرات چگالی را در پدیده‌ی مورد نظر بدست آورد. این معادله علیرغم خطی بودن، جز در پدیده‌های ساده در بسیاری از پدیده‌ها حل دقیقی ندارد و باید با استفاده از روش‌های عددی حل گردد. روش‌های عددی بسته به نوع گسسته‌سازی فضای حل دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول روش‌هایی هستند که در آن‌ها نقاط در طول مدت زمان حل مکان ثابتی دارند و حرکت نمی‌کنند و همچنین بین نقاط با یکدیگر ارتباط مشخص و از پیش تعیین شده‌ای وجود دارد که به این دسته از روش‌ها، روش‌های عددی بر پایه‌ی شبکه‌بندی گفته می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش اجزا محدود¹، روش المان محدود² و روش احجام محدود³ اشاره کرد. گروه دیگری از روش‌ها، روش‌هایی هستند که در آن‌ها نقاط محاسباتی هیچ ارتباط مشخص و از پیش تعیین شده‌ای با نقاط کناری ندارند و می‌توانند به‌راحتی در کل فضای مسأله حرکت کنند که تحت عنوان روش‌های بدون شبکه شناخته می‌شوند. در این گونه روش‌ها، فضای پیوسته مسأله به مجموعه‌ای از نقاط گسسته می‌شوند که این نقاط می‌توانند دارای جرم، حجم، چگالی و سرعت باشند.

¹ Finite difference method

² Finite element method

³ Finite volume method



روش‌های بدون شبکه قادر هستند تا مسایل جریان با سطح آزاد و همراه با تغییر مکان‌های زیاد، مرزهای متحرک و هندسه‌های پیچیده که تولید شبکه در آنها پیچیده می‌باشند را به‌خوبی مدل‌سازی کنند. از جمله روش‌های عددی بدون شبکه می‌توان به روش گالرکین بدون شبکه $(EFG)^1$ ، روش پتروف-گالرکین بدون شبکه $(MLPG)^2$ و روش SPH^3 اشاره کرد.

از جمله پدیده‌هایی که معادله‌ی ناویر-استوکس بر آن حاکم است، مسأله شکست سد می‌باشد. در این مسأله فرض می‌شود دریچه‌ای که در مقابل جریان قرار دارد در یک لحظه برداشته می‌شود و آب شروع به حرکت می‌کند. با توجه به آنکه در این حالت تغییر مکان‌ها زیاد و جریان با سطح آزاد است، به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های شبکه‌بندی برای شبیه‌سازی مسأله مناسب نباشد و روش‌های بدون شبکه که در نقاط محاسباتی می‌توانند حرکت کنند جواب‌های بهتر و دقیق‌تری داشته باشد. در این مقاله سعی شده تا با استفاده از روش بدون شبکه مبنا ذره‌ای SPH معادله‌ی ناویر-استوکس در دیدگاه لاگرانژی برای مسأله‌ی شکست سد مدل‌سازی گردد.

2. معادلات حاکم

معادله‌ی ناویر-استوکس بر اساس قانون دوم نیوتن به‌دست می‌آید و و شکل لاگرانژین معادله‌ی ناویر-استوکس به‌صورت زیر است [1]:

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (-p\delta_{ij} + \tau_{ij}) + F_i \quad (1-2)$$

که در آن v بردار سرعت در راستای مورد بررسی، ρ چگالی ذرات، i و j جهت مورد نظر، p تنش فشاری، τ تنش برشی و δ تابع دلتای دیراک است که مقدار آن در راستای i و j به‌صورت زیر است:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (2-2)$$

تنش برشی (τ) برای سیال نیوتنی متناسب با نرخ کرنش سیال (ε) است که به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\tau_{ij} = \mu \varepsilon_{ij} \quad (3-2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v) \delta_{ij} \quad (4-2)$$

علاوه بر معادله‌ی ناویر-استوکس، باید رابطه پیوستگی نیز ارضا شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho (\nabla \cdot v) \quad (5-2)$$

3. فرمول‌بندی روش شبکه‌ی بی‌ساختار SPH

از نقطه نظر ریاضی، در روش SPH گسسته‌سازی را می‌توان به دو بخش مهم نمایش انتگرالی از تابع بر روی فضای پیوسته و تقریب نقطه‌ای از تابع انتگرالی روی فضای گسسته تقسیم‌بندی کرد. به‌طور کلی، تابع $A(r)$ را می‌توان به‌شکل انتگرالی زیر نشان داد:

$$A(r) = \int A(r') \delta(r - r') dr' \quad (1-3)$$

که در آن $\delta(r - r')$ تابع دلتای دیراک می‌باشد که مقدار آن در $r = r'$ برابر واحد و در باقی نقاط صفر خواهد بود. این شکل انتگرالی در محیط‌های گسسته کارایی خوبی ندارد. بنابراین، به‌جای تابع دلتای دیراک از تابع کرنل $W(r - r', h)$ به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$A_I(r) = \int A(r') W(r - r', h) dr' \quad (2-3)$$

که در آن $A_I(r)$ تقریبی از تابع $A(r)$ و h طول تأثیر⁴ تابع کرنل است. طول تأثیر دامنه‌ی تأثیر تابع کرنل را نشان می‌دهد. همچنین، مشتق تابع $A(r)$ بر روی فضای گسسته‌ی حل به‌صورت زیر درمی‌آید [1]:

¹ Element Free Galerkin Method

² Meshless Local Petrov Galerkin Method

³ Smoothed Particle Hydrodynamic

⁴ Smoothing length

$$\nabla A_I(r) = - \int A(r') \nabla W(r-r', h) dr' \quad (3-3)$$

1-3- تقریب نقطه‌ای

اگر کل دامنه‌ی پیوسته انتگرال‌گیری به وسیله ذرات مجزا از هم جایگزین شود، انتگرال‌های عنوان شده در بالا را می‌توان به وسیله‌ی مجموع مقدار متغیرهای ذرات واقع در شعاع همسایگی ذره‌ی مورد نظر تقریب زد. در این حالت، مقدار تابع و مشتق آن بر اساس مکان ذرات همسایگی آن به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$A_S(r_a) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W(r_a - r_b, h) \quad (4-3)$$

که در آن A_S تقریب تابع A_I و $dr' = m_b/\rho_b$ است. به طور مشابه برای مشتق تابع A_I خواهیم داشت [1]:

$$\nabla_a A_S(r_a) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} \nabla_a W(r_a - r_b, h) \quad (5-3)$$

2-3- گسسته‌سازی معادله‌ی پیوستگی

شکل SPH معادله‌ی پیوستگی را می‌توان با استفاده از تعریف مشتق تابع برای جمله‌ی مشتق سرعت به صورت زیر نوشت [2]:

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (6-3)$$

که در آن $v_{ij} = v_i + v_j$ و $\partial W_{ij} / \partial x_i^\beta$ مشتق تابع وزنی در جهت‌های x و y است.

3-3- گسسته‌سازی معادله‌ی مومنتوم

با بهره‌گیری از گسسته‌سازی SPH برای معادله‌ی دیفرانسیلی مومنتوم، معادله‌ی جبری زیر را برای متغیر سرعت خواهیم داشت [2]:

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \frac{P_i + P_j}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\mu_i \varepsilon_i^{\alpha\beta} + \mu_j \varepsilon_j^{\alpha\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} + F \quad (7-3)$$

که در آن m جرم ذرات، $\partial W_{ij} / \partial x_i^\alpha$ مشتق تابع وزنی در جهت‌های x و y ، μ لزجت دینامیک، ε نرخ کرنش برشی، اندیس i مربوط به ذره‌ای مورد نظر، اندیس j مربوط به ذراتی است که در داخل شعاع تأثیر ذره i قرار می‌گیرند، اندیس‌های α و β مربوط به جهت‌های x و y است و N تعداد کل ذراتی است که در شعاع تأثیر ذره i قرار دارند. نرخ کرنش برشی (ε) نیز با استفاده از تعاریف SPH به صورت زیر گسسته می‌گردد [2]:

$$\varepsilon_i^{\alpha\beta} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} + \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij}^\alpha \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} - \left(\frac{2}{3} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \right) \delta^{\alpha\beta} \quad (8-3)$$

4. مدل‌سازی مسأله‌ی شکست سد

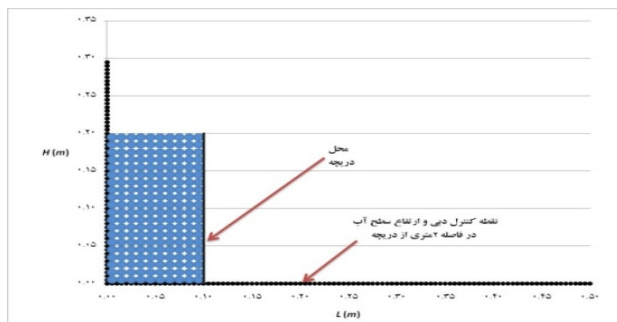
مسأله‌ی شکست سد که سیال مورد بررسی در آن آب است، مسأله‌ای معمول در بررسی مدل‌سازی‌های صورت گرفته توسط روش‌های عددی گوناگون است. شرایط فیزیکی مسأله بدین صورت می‌باشد که ستونی از آب به ارتفاع 0/2 متر ($H = 0/2 \text{ m}$) و طول 0/1 متر ($L = 0/1 \text{ m}$) در نظر گرفته می‌شود [شکل (1)]. فرض بر این است که دیواره‌ی سمت راست در یک لحظه برداشته می‌شود و آب تحت اثر وزن خود شروع به حرکت به سمت راست می‌کند. پس از برداشتن دریچه، نحوه‌ی حرکت آب شبیه‌سازی گردیده و با نتایج واقعی مقایسه می‌گردد تا صحت حل بررسی شود [3].

به منظور شبیه‌سازی جریان با استفاده از تکنیک SPH، ستون آب به تعداد 10×20 ذره گسسته می‌شود که در نتیجه‌ی این گسسته‌سازی، فاصله‌ی ذرات 0/005 متر و جرم هر کدام از آنها 0/025 کیلوگرم است. سرعت اولیه‌ی تمام ذرات صفر است، زیرا در لحظه‌ی اولیه، ستون آب ساکن است. چگالی ذرات برابر 1000 کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. مرز سمت چپ که در شکل (2) نشان داده شده است، به ارتفاع 0/3 متر با تعداد 60 ذره مرزی و مرز پایین که طول آن 0/5 متر در نظر گرفته شده است، با 100 ذره‌ی مرزی مدل گردیده است. برای شبیه‌سازی حرکت آب فرض شده که دیواره در یک لحظه برداشته می‌شود و آب تحت اثر وزن شروع به حرکت می‌کند. در شکل (2) شکل ستون آب پس از برداشتن دیواره مشاهده می‌گردد. در شکل (2) مقایسه‌ی بین نتایج حل توسط روش SPH و نتایج هیرت¹ و نیکولز² (1981) که از روش VOF¹ (مدل اولپری)

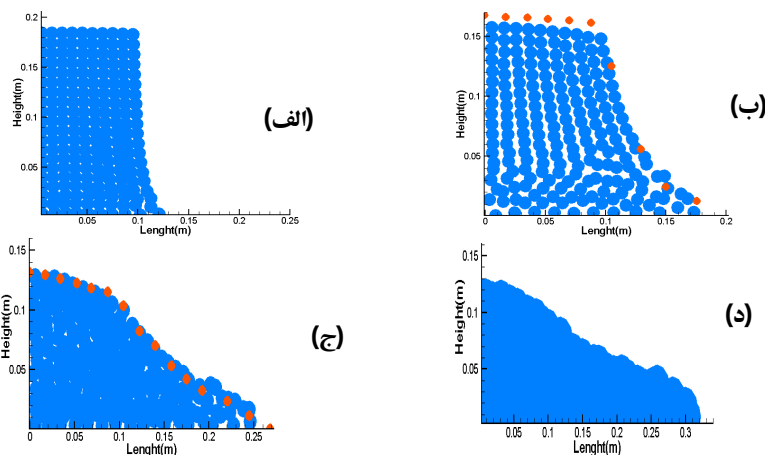
¹ Hirt

² Nichols

برای شبیه سازی این مسأله استفاده شده است مشاهده می گردد و نشان از تطابق نتایج این دو روش با یکدیگر دارد [3].



شکل 1: مشخصات مدل مسأله ی شکست سد سیال نیوتنی.

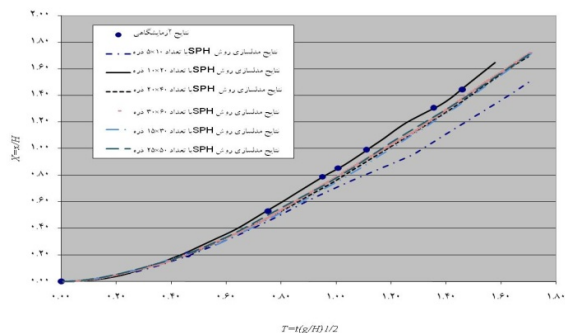


شکل 2: نحوه ی حرکت ذرات و ستون آب بعد از برداشتن دریاچه در زمان های متفاوت. نقاط آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده ی موقعیت ذرات آب با استفاده از روش SPH و روش VOF است؛ الف) 0/05 ثانیه، ب) 0/1 ثانیه، ج) 0/15 ثانیه، د) 0/18 ثانیه.

به منظور صحت شبیه سازی، داده های آزمایشگاهی از موقعیت پیشانی موج با نتایج حل توسط روش SPH برای مسأله ی طرح شده مقایسه می شود. برای انجام این موضوع، موقعیت ذره ای که در محور مختصات دارای بیشترین مقدار طول است را از طول اولیه جریان یعنی 0/1 متر کم کرده تا مکان پیشانی موج نسبت به محل دریاچه به دست آید. برای بی بعدسازی محور عمودی که زمان t است، از پارامتر $T = t(g/H)^{1/2}$ و محور افقی که موقعیت پیشانی موج L است، از پارامتر $X = L/H$ استفاده شده که g شتاب ثقل است. نحوه ی محاسبه ی سرعت پیشانی موج بدین صورت است که ابتدا موقعیت ذره ای که دارای بیشترین مقدار طول است، به دست می آید. ناحیه ای در بالادست این ذره در نظر گرفته شده و میانگین سرعت ذراتی که در این ناحیه قرار می گیرند، به عنوان سرعت پیشانی موج در نظر گرفته می شود. انتخاب ناحیه ی مورد نظر به ابعاد مدل بستگی دارد. برای مثال، در مدل بالا این ناحیه به اندازه ی 0/025 متر از موقعیت ذره ای که دارای بیشترین مقدار طول است، به عنوان ناحیه ی پیشانی موج در نظر گرفته شده است. روند افزایش تعداد ذرات تا حدی ادامه می یابد که نتایج شبیه سازی ها به یکدیگر همگرا گردیده و برای تعداد ذرات بیشتر از آن نتایج تغییر چندانی نکند. نتایج حاصل از حل عددی موقعیت پیشانی موج با داده های آزمایشگاهی در شکل (3) نشان داده شده است. شکل (3) نشان می دهد که نتایج شبیه سازی موقعیت پیشانی موج با تعداد 15×30 ، 20×40 ، 25×50 و 30×60 بر هم منطبق است و برای تعداد ذرات 15×30 و بیشتر از آن نتایج شبیه سازی تغییر چندانی نمی کند. نتایج شبیه سازی با تعداد 10×20 ذره بهتر از نتایج شبیه سازی با تعداد ذرات بیشتر است، اما نتایج این تعداد ذره به دلیل همگرا نبودن با نتایج تعداد ذرات بیشتر نمی تواند نشان گر حل درست مسأله باشد و ممکن است به طور اتفاقی شبیه سازی با تعداد 10×20 ذره، موقعیت پیشانی موج را

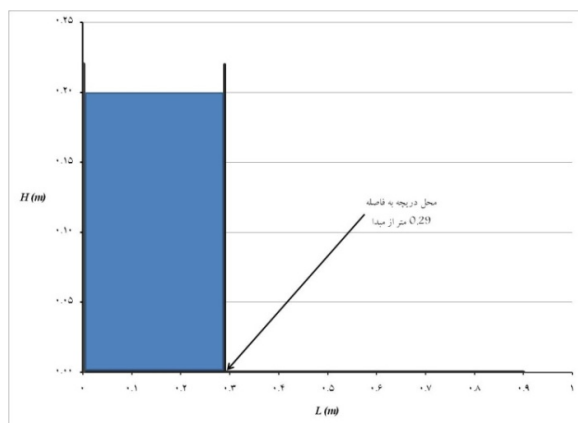
¹ Volume of Fluid

برآورد کند. لذا، مسأله‌ی مورد نظر به تعداد 20×40 ذره گسسته‌سازی می‌شود. دلیل انتخاب این تعداد ذره به‌جای استفاده از تعداد 15×30 ذره، دقیق‌تر شدن شبیه‌سازی، کمتر شدن نوسان در محاسبه‌ی پروفیل سطح، ارتفاع آب، دبی و دیگر پارامترهای مورد نظر است (هزینه‌ی محاسباتی اجرای برنامه با 20×40 ذره نسبت به تعداد 15×30 ذره زیاد نمی‌باشد). مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با تعداد 20×40 ذره و داده‌های آزمایشگاهی از موقعیت پیشانی موج در شکل (3) نشان از همگرایی خوب بین حل عددی و نتایج آزمایشگاهی دارد [3].

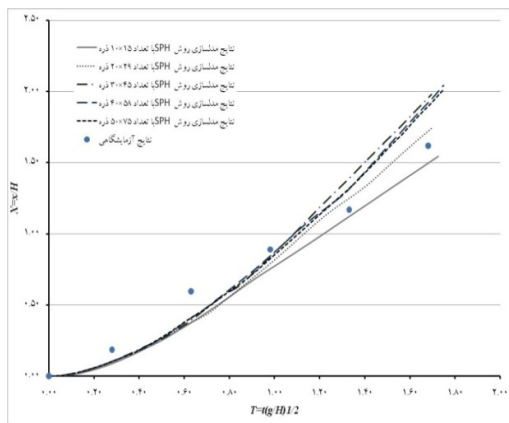


شکل 3: مقایسه‌ی موقعیت پیشانی موج برای تعداد ذرات مختلف با داده‌های آزمایشگاهی.

مدل دوم برای صحت‌سنجی، مدل آزمایشگاهی دانشگاه گزنل¹ است که در آن $H = 0/2 \text{ m}$ و $L = 0/29 \text{ m}$ است [شکل (4)]، [4]. تمام خصوصیات آب مانند مسأله‌ی اول در نظر گرفته شده است. مدل به تعداد 10×15 ، 20×29 ، 30×45 ، 40×58 و 50×75 گسسته گردید که نتایج حل عددی از موقعیت پیشانی موج در شکل (5) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (5) مشاهده می‌گردد، برای تعداد ذرات بیشتر از 40×58 ذره حل همگرا می‌گردد و می‌توان تعداد ذرات مناسب جهت گسسته‌سازی حل در نظر گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای موقعیت پیشانی موج با نتایج آزمایشگاهی در شکل (5) تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد و خطای ایجاد شده در شبیه‌سازی به دلیل در نظر گرفتن بازشدگی ناگهانی دریچه است که در واقعیت چنین اتفاقی نمی‌افتد [4].



شکل 4: مدل آزمایشگاهی دانشگاه گزنل.



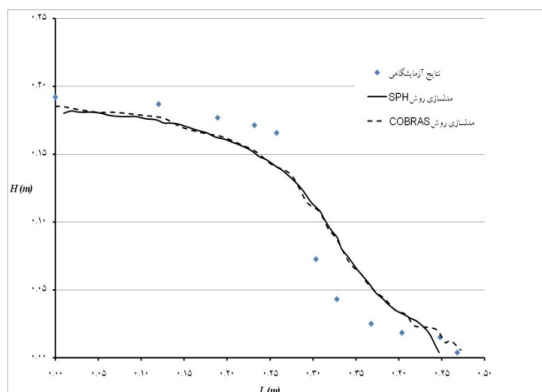
شکل 5: موقعیت پیشانی موج با تعداد ذرات مختلف.

در شکل (6) نتایج آزمایشگاهی پروفیل سطح آب در زمان‌های $0/14$ ، $0/19$ ، $0/24$ و $0/29$ ثانیه از باز شدن دریچه و نتایج شبیه‌سازی نشان شده است [4]. همان‌طور که در شکل (6) مشاهده می‌گردد، شبیه‌سازی‌ها دارای دقت مناسبی در تعیین پرفیل سطح آب است و موقعیت پیشانی موج به‌خوبی تعیین گردیده است. در شکل (4-6) نتایج عددی حاصل از تحقیق شی‌گی‌ماتسو و همکاران² (2004) با استفاده از روش COBRAS (در این روش معادلات ناویر-استوکس در دیدگاه اویلری حل می‌شود) نیز ارایه شده است [4]. همان‌طور که در شکل (6) مشاهده می‌شود، نتایج دو روش

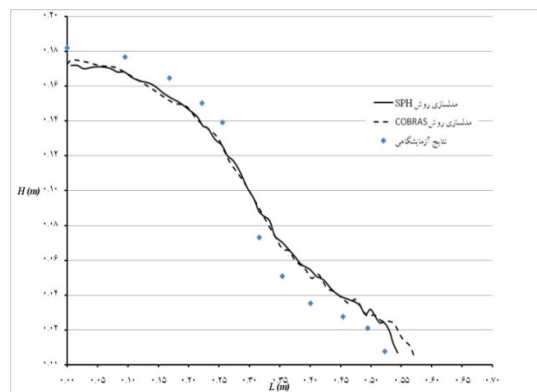
¹ Cornell university

² Shigematsu et al.

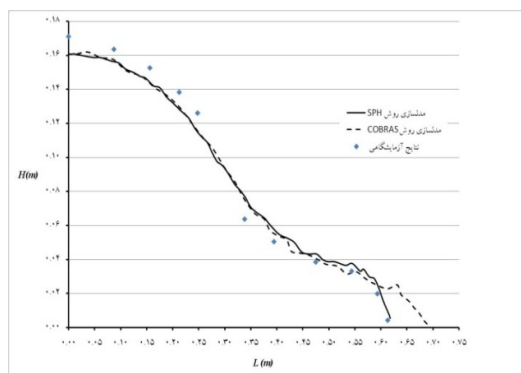
SPH و COBRAS تا حدود زیادی منطبق بر یکدیگر می‌باشند. در روش SPH، موقعیت پیشانی موج بهتر از روش COBRAS محاسبه شده است و همچنین در هر دو شبیه‌سازی با گذشت زمان، نتایج حل به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌شود. دلیل دقت کمتر شبیه‌سازی در زمان‌های 0/14 و 0/19 ثانیه نسبت به زمان‌های 0/24 و 0/29 ثانیه اثر دریچه بر روی جریان آب است. در شبیه‌سازی‌ها فرض بر آن بوده که دریچه در یک لحظه برداشته می‌شود، در صورتی که در واقعیت باید زمان و سرعت بالا آمدن مد نظر قرار گیرد. با گذشت زمان، شتاب گرفتن جریان و همچنین باز شدن کامل دریچه، نتایج حل‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی به یکدیگر نزدیک می‌شوند.



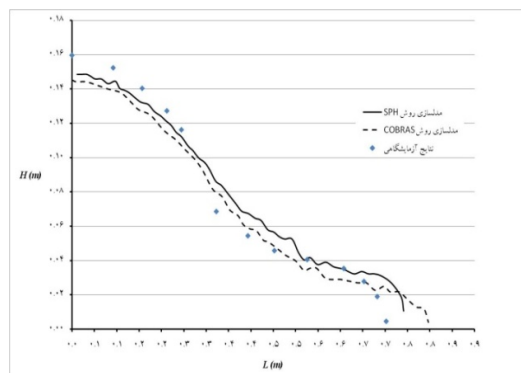
(الف)



(ب)



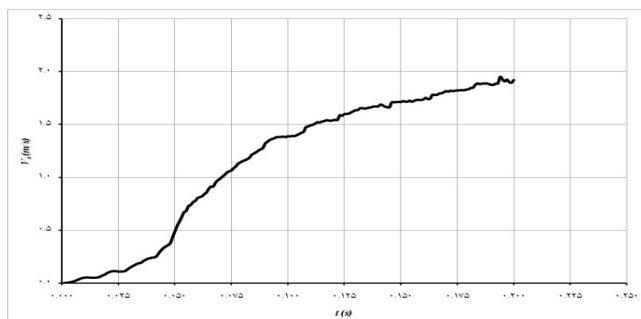
(پ)



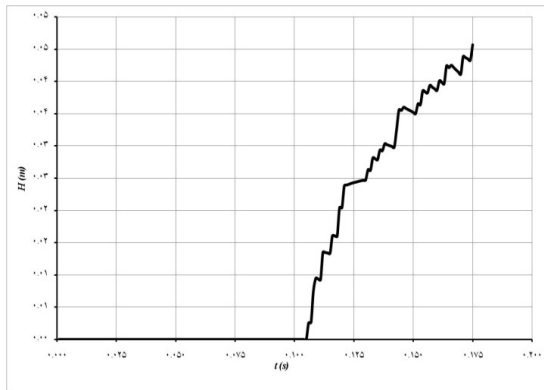
(ت)

شکل 6: نتایج شبیه‌سازی برای پروفیل سطح آب و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی؛ (الف) 0/14 ثانیه پس از باز شدن دریچه، (ب) 0/19 ثانیه پس از باز شدن دریچه، (پ) 0/24 ثانیه پس از باز شدن دریچه، (ت) 0/29 ثانیه پس از باز شدن دریچه.

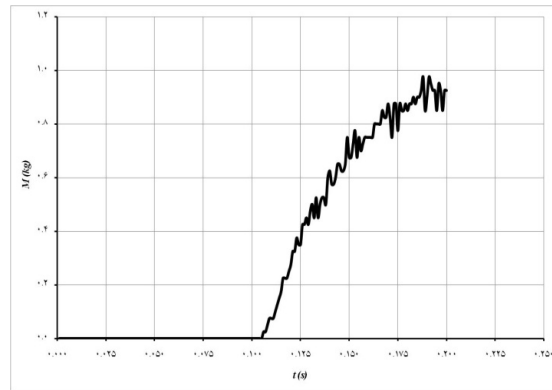
با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها صحیح است و می‌توان توسط این روش به نتایج دیگری نظیر سرعت پیشانی موج [شکل (7)]، ارتفاع سطح آب، H [شکل (8)]، و جرم، M ، از مقطع خاصی [شکل (9)] دست یافت (نتایج برای مدل اول با $L = 0/1 \text{ m}$ و $H = 0/2 \text{ m}$ است).



شکل 7: سرعت پیشانی موج پس از 0/2 ثانیه از باز شدن دریچه.

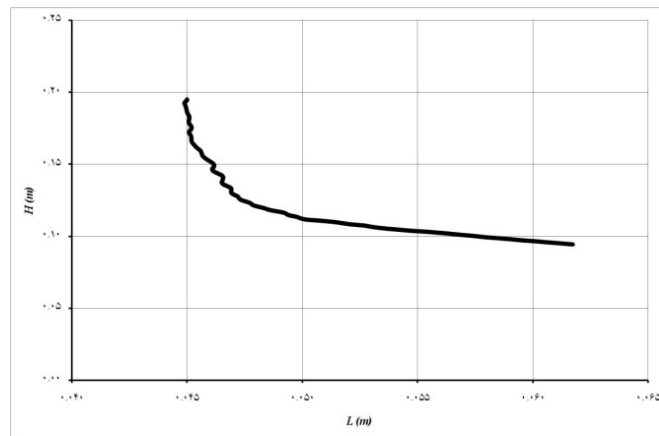


شکل 8: ارتفاع آب به فاصله $L = 0/1 \text{ m}$ از دریچه نسبت به زمان.



شکل 9: جرم در مقطع مورد نظر به فاصله $L = 0/1 \text{ m}$ از دریچه

یکی از مزایای روش SPH که از دیدگاه لاگرانژی به بررسی پدیده‌های سیالاتی می‌پردازد، ردگیری حرکت و تغییرات در ذره‌ای خاص است. بدین منظور، ذره‌ای که طول از مبدأ آن $0/045$ متر و ارتفاعش $0/195$ متر است در نظر گرفته شده است و مسیر حرکت این ذره طی $0/2$ ثانیه از شروع باز شدن دریچه در شکل (10) نشان داده شده است.



شکل 10: مسیر حرکت ذره‌ای با ارتفاع $0/195$ متر و طول از مبدأ $0/045$ متر در شروع حل طی $0/2$ ثانیه از برداشته شدن دریچه.

5. نتیجه‌گیری

با بررسی مسأله شکست سد با استفاده از روش SPH نشان داده شد که روش SPH روشی کارآمد در مدل‌سازی مسایل جریان با سطح آزاد و همراه با تغییر مکان‌های زیاد است. نتایج مدل‌سازی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و از صحت حل و دقت مدل‌سازی‌ها اطمینان حاصل گردید. برای اطمینان از صحت و دقت حل، مدل‌سازی برای دو نمونه‌ی آزمایشگاهی انجام شد و برای تعیین صحت و دقت مدل‌سازی‌ها نتایج حاصل از موقعیت پیشانی موج و پروفیل سطح آب با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید که همگرایی خوب نتایج مدل‌سازی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی، نشان از مناسب بودن روش SPH در حل معادله ناویر-استوکس دارد. همچنین با توجه به صحت‌سنجی‌های انجام شده و اطمینان از دقت حل، می‌توان نتایج دیگری را از مدل‌سازی‌ها استخراج نمود که به شناخت بهتر ما از مسأله‌ی شکست سد کمک می‌کند. از جمله نتایج به‌دست آمده می‌توان به ارتفاع سطح آب در مقطعی مشخص از دریچه و سرعت پیشانی موج اشاره کرد که در شکل‌های (4) و (6) نشان داده شده است. باتوجه به لاگرانژی بودن روش SPH می‌توان نتایج حجم خاصی از سیال را در هر لحظه ثبت کرد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه‌ی آن با نتایج دو نمونه آزمایشگاهی نشان داد که می‌توان از روش SPH در حل مسایل سیالاتی که در آن‌ها جریان همراه با تغییر مکان‌های زیاد و جریان با سطح آزاد می‌باشد، بهره گرفت.



6. مراجع

1. Liu, J. R. and Liu, M. B., (2003), "Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method," World Scientific, Singapore.
2. Monaghan, J. J., (2005), "Smoothed particle hydrodynamics", *Rep. Prog. Phys.*, 68, 1703-1759.
3. Shao, S. and Lo, E. Y. M., (2003), "Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface", *Adv. Wat. Res.*, 26, 787-800.
4. Shigematsu, Takaaki. and Liu, P. L. F. and Oda, Kazuki., (2004), "Numerical modeling of the initial stage of dam-break waves", *J. Hydra. Res.*, 42(2), 183-195.