

Research Paper

Numerical Study on the Effect of Protective Structures on Scouring due to Dam Break Using a Two-phase Lagrangian Model

Ali Parizadeh¹, Hasan Akbari^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Department of Marine Structures, Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Marine Structures, Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2019/02/09

Revised: 2019/07/03

Accepted: 2021/05/28

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2021.16792.1985

Keywords:

Smoothed particle, hydrodynamics, dam break, scouring, sediment, two-phases

Abstract

Introduction: Scouring depth due to dam break flows as one of the important engineering problems can be investigated numerically by means of an appropriate multiphase model. Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) model is a Lagrangian Mesh-free based method that has been introduced to solve such complicated flows.

Methods: A Multiphase version of this model is modified in this study to predict scouring depth after dam break flows. At first, the introduced model is validated via comparing the results with experimental data and it is confirmed that the model can well predict turbulent multiphase flows. Then, the performance of a scour protection structure with different length and heights is simulated against dam break flow to find an optimum geometry for this structure.

Findings: Based on the results, it is concluded that the effect of structure height on scour reduction is more sensible than the effect of structure length. In contrast to the structure length, a small edge at the end of the protective structure can efficiently decrease the final scoured depth. However, there exists an optimum height with the best performance. A too high scour protection structure can even result in a higher scouring depth than an unprotected case. Therefore, it is necessary to use a protection structure with an appropriate height and the introduced model can be utilized as a helpful tool to check the required performance of this structure.

Citation: Parizadeh A, Akbari H. Numerical Study on the Effect of Protective Structures on Scouring due to Dam Break Using a Two-phase Lagrangian Model. Water Resources Engineering Journal. 2022; 15(53): 85- 96.

***Corresponding author:** Hasan Akbari

Address: Marine Structures Department, Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Tell: +989126840036

Email: akbari.h@modares.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Dam break flow may generate destructive floods and cause many casualties. Free surface boundary and its interaction with the generated turbulent flow leads to complex two (or multi-) phases flows with strong nonlinearly. Dam break flows on impermeable and fixed beds have been investigated by many researchers. However, few studies have been done for such flows on moving beds (due to scouring) and more investigations are required accordingly. The fluid-solid interaction is a common problem in hydraulic engineering, especially in erosion caused by flow. Other examples include port hydrodynamics, scour caused by ship motion, wave breaking in coastal area, and scour around structures.

Dam break flow creates a shear force on the surface of sediments and ultimately leads to the movement of sediments and the formation of suspended particles. Modeling this phenomenon with Eulerian methods is difficult due to the complexity of boundary conditions and nonlinear deformations (between fluid and sediment and at the free surface boundary), as well as the continuous movement of these boundaries. Therefore, the Lagrangian approach Smooth Particle Hydrodynamics has been developed in the last two decades by Monaghan and Gingold (1977) and Monaghan (1994) as a mesh-less method for such applications

Materials and Methods

The computational cost of multiphase SPH models may be increased significantly due to the number of simulated particles. In recent years, parallel graphics processing units (GPUs) have been used as a reliable method to speed up the simulation in problems with huge number of particles, such as some industrial problems. The Lagrangian nature of SPH has made this method not only capable of simulating flows with large nonlinear deformation at the boundary of two phases, but also the possibility of implementing parallel processing in GPU to decrease computational cost. In this research, by modifying the open source

model, SPHysics, the solid-liquid two-phase problem has been solved.

The purpose of this research is to investigate the effect of the length of protected rigid floor and the barrier on it on the downstream scouring due to dam break flow. In addition, the effect of the distance of the barrier to the dam on the scouring has been investigated. For this purpose, at first the model has been validated and then a base case with a length of 3 meters has been modeled. The depth of the scouring layer is considered equal to 0.1 meter to provide the enough depth for possible scouring. Also, the water height is considered 35 cm, and these dimensions have been considered constant in all the simulations.

Since a rapid flow occurs after a dam break or after sudden release of reservoir valve, a protected surface is usually provided in front of the dam to prevent bed erosion. Many parameters affect the performance of such protected surface such as its length. Therefore, 3 conditions have been considered for this parameter (lengths of 25, 50 and 75 cm immediately after the dam). On the other hand, in order to dissipate the flow energy, a cube-shaped barrier is installed at the end of the protected floor. To investigate the effect of this barrier on the scouring depth, it is located at different distances from the dam, i.e. 25, 50 and 75 cm. In all cases, the length of the barrier in the flow direction is chosen to be 10 cm. In addition, 4 different water depths (2.5, 5, 7.5 and 10 cm) have been provided in each case to study the energy dissipations at different conditions. It should be noted that initial particle spacing is considered 0.005 cm according to the performed sensitivity analysis.

Findings

The running time of each model was chosen to be 2 seconds and the amount of scouring was detected along the entire duration. According to the obtained results, the maximum amount of scouring occurs in almost 1.2 seconds in all different cases. In order to avoid the effect of fluid return on the results, the erosion pattern is displayed at the moment of 1.8 seconds.

Discussion

The amounts of erosion after the protected rigid floors with different lengths have been recorded and compared with each other. In addition, the bed scouring in the case of using no barrier has also been investigated. In the case with a protected length of 25 cm, the case without the barrier and the case with a barrier with a height of 2.5 cm have more favorable conditions than the others. Among the above two cases, because if there is no barrier, scouring will occur immediately after the protected bottom, the case with a barrier is a more suitable option. In the cases with the protected length of 50 cm, as in the previous cases, the barrier with a height of 2.5 cm had less scouring depth. Relatively the lowest scouring depth among other heights is related to the state with a barrier with a height of 2.5 cm.

For the simultaneous comparison between different cases, the maximum scouring depth was measured in each model under three different lengths of protected bed. Then, the maximum scouring depth was compared for different heights of barriers. At the barrier heights of zero and 2.5 cm, the model with a protected length of 50 cm, has the least erosion of the sediment, but at the barrier heights of 5, 7.5 and 10 cm, the model with a protected length of 75 cm has shown the least erosion than the other lengths. Although the effect of the protected length of the barrier on the scouring depth is not significant, it can be seen that with the increase in the barrier height, the length of the protected bed and actually the distance of the barrier from the dam must increase to have a more suitable condition. Based on the simulated cases, the least scouring depth occurs for the case with the protected length as 50 cm and the barrier height as 2.5 cm. By reducing the height of the barrier, the depth of erosion increases, and on the other hand, its excessive increase can increase the erosion too. Therefore, it is important to find an optimal barrier height independent of the length of the protected bed. Based on the investigated cases in this research, the optimal barrier height is estimated to be around 2.5 cm. Considering that the best length of the protected bed among the simulated cases is 50 cm, it can be concluded

that for the studied conditions (i.e., water column with a length of 1.0 m and a height of 35 cm); The optimal ratio of the length of the protected bed to the barrier height is 200.

Conclusion

-Not providing a barrier at the end of the protected rigid floor causes scouring just at the end of the protected floor and eventually leads to erosion in front and beneath the rigid floor. This is important in terms of stability and the maintenance of the constructed (or naturally existing) rigid floor. Therefore, the use of a protected bed alone is not recommended at all.

- Providing a barrier even with a low height can also be effective in reducing erosion. However, there is an optimal height that leads to the maximum scour reduction.

- Increasing the barrier height too much causes the formation of jet flow over the barrier and ultimately increases the scouring depth. Therefore, providing an optimal height is one of the important factors in proper design because increasing the height does not necessarily lead to a better performance.

- Compared to the barrier height, the effect of the length of the protective floor on the amount of erosion is insignificant, and although an optimal geometry can be calculated for each flood volume, it is recommended to determine the barrier height accurately.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Ali Parizadeh.
Methodology and data analysis: Ali Parizadeh, Hasan Akbari.

Supervision and final writing: Hasan Akbari.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی عددی تاثیر سازه حفاظتی در آبشستگی ناشی از شکست سد با استفاده از مدل لاگرانژی دو فازي

علی پریزاده^۱، حسن اکبری^{۲*}

۱. دانشجوی دوره دکتری سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. دانشیار سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: جریان های سریع بعد از شکست سد و آبشستگی متناظر با آن از مسائل مهمی است که برای شبیه سازی مناسب آن باید از مدل های چند فازي استفاده کرد. در سالهای اخیر روش جدید لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار بعنوان روش بدون شبکه ایده آل برای این کاربرد معرفی شده است.

روش: در مقاله حاضر با استفاده از این روش عددی و اصلاح آن برای جریانات چندفازی، آبشستگی رسوب کف بعد از شکست سد مدل سازی شده است. در ابتدا، نتایج روش عددی حاضر با مطالعات آزمایشگاهی مرتبط مقایسه و صحت سنجی شده و سپس تاثیر شرایط هندسی سازه محافظ در میزان آبشستگی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، چندین مدلسازی برای شرایط مختلف طول کف صلب و همچنین ارتفاع مانع انتهایی به عنوان پارامترهای اصلی، انجام شد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج به دست آمده، مدل مورد استفاده توانمندی مدل سازی شرایط پیچیده آبشستگی ناشی از جریانات متلاطم را دارد و به عنوان نتیجه کاربردی، مشاهده گردید که تاثیر افزایش طول سازه حفاظتی، کم تر از تاثیر افزایش ارتفاع آن است. همچنین ارتفاع بهینه ای برای عملکرد مطلوب سازه حفاظتی وجود دارد بگونه ای که افزایش بیش از حد ارتفاع حتی می تواند منجر به افزایش آبشستگی نسبت به شرایط اولیه گردد.

نتیجه گیری: اگرچه استفاده از سازه حفاظتی می تواند علاوه بر جلوگیری از خوردگی پای کف صلب، عمق آبشستگی را نیز کاهش دهد، تعیین ارتفاع بهینه آن اهمیت شایانی در عملکرد مطلوب این نوع سازه ها دارد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۰

تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۷

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI: 10.30495/wej.2021.16792.1985

واژه‌های کلیدی:

هیدرودینامیک ذرات هموار، شکست سد، آبشستگی، رسوب، دوفازه.

* نویسنده مسئول: حسن اکبری

نشانی: گروه سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تلفن: ۰۹۱۲۶۸۴۰۰۳۶

پست الکترونیکی: akbari.h@modares.ac.ir

مقدمه

جریان‌های سریع ناشی از شکست سد منجر به ایجاد سیلاب‌های مخرب و تلفات زیادی می‌شود. جریان‌های دارای دو یا چند فاز شدیداً به طور غیر خطی تغییر شکل می‌دهند و وجود سطح آزاد در مسائل در هیدرودینامیک به پیچیدگی آن می‌افزاید. شکست سد روی بستر ثابت نفوذ ناپذیر بطور گسترده کار شده است. اما جریان‌های بدین شکل بر روی لایه‌های قابل حرکت به بررسی بیشتری نیاز دارند. اندرکنش دو فاز جامد و سیال یک مساله متداول در هیدرولیک و بطور خاص در فرسایش ناشی از جریان است. دیگر مثال‌ها شامل هیدرودینامیک بندر، آبشستگی ناشی از حرکت کشتی، شکست موج در کاربردهای ساحلی و آبشستگی اطراف سازه‌ها در مهندسی عمران و محیط زیست هستند.

پدیده آبشستگی رسوبات زیر آب که در نتیجه جریان‌های سریع اتفاق می‌افتد و نیروی برشی در سطح رسوبات ایجاد می‌کند که باعث می‌شود، یک لایه برشی از ذرات معلق در مرز ایجاد شود و در نهایت رسوب در سیال معلق شود. رفتار اخیر با روش سنتی براساس المان با رویکرد اولبری بخاطر خط اتصال سیال و رسوب، تغییر شکل‌های غیر خطی زیاد، تکه تکه شدن خط اتصال و حضور سطح آزاد باعث می‌شود تا ذرات سیال توسط فاز مایع جذب شوند. این چالش‌ها روش شبیه سازی جدیدی می‌طلبد. در دو دهه گذشته روش لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار توسط (SPH) موناگان (۱۹۹۴) و موناگان و گینگلد (۱۹۷۷) بعنوان روش بدون شبکه برای این کاربرد ایده آل ظاهر شد (۱،۲). این الگو برای مسائل مختلف مثل جریان‌های سطح آزاد، گومز و همکاران (۲۰۱۰)؛ شبیه‌سازی سیلاب، واکندو و همکاران (۲۰۱۲)؛ جریان‌های ساحلی دالریچر و روگرس (۲۰۰۶) و مسائل ژئوتکنیکی، بویی و همکاران (۲۰۰۷) بکار گرفته شده است (۳،۴،۵،۶).

با کاربردهای گسترده در صنعت مهندسی؛ علاقه زیادی به جریان‌های چند فازی غیرنیوتنی وجود دارد. حسینی و همکاران (۲۰۰۷) مدل‌های مختلف مانند بینگهام، قانون قدرت و مدل غیر نیوتنی را برای بررسی جریان غیر نیوتنی مورد آزمایش قرار داده است (۷). ران و همکاران (۲۰۱۵) از یک غلظت براساس ویسکوزیته برای فاز رسوب شبیه به تحقیق شکیبایی نیا و جین (۲۰۱۱) برای جابجایی ذرات طرح شبه ضمنی (MPS) استفاده کرده است (۸،۹). با این وجود مدل ذکر شده بیشتر جنبه رئولوژیک جریان غیر نیوتنی را مورد بررسی قرار می‌دهند. مانلتی و همکاران (۲۰۱۲) روش شبه نیوتنی مور-کلمپ فالابی و همکاران (۲۰۰۸) را با معیار شیلدز برای کاربرد آزمایشگاهی مشابه مقایسه کردند (۱۰). یولریچ و همکاران (۲۰۱۳) یک روش مشابه برای آبشستگی در اثر کشتی نزدیک بندر توسعه داده است (۱۱).

شبیه سازی چند فازی SPH بطور طبیعی با درگیر کردن ذرات بیشتر تقاضای و هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد. در سالهای اخیر واحدهای پردازش گرافیکی موازی (GPUs) بعنوان روش قلیل اعتماد جهت سرعت دادن شبیه‌سازی مورد نیاز در کاربردهایی که تعداد زیاد ذرات همچون مسائلی که در صنعت وجود دارد؛ به شکل گسترده مورد

استفاده قرار می‌گیرد. طبیعت لاگرانژی SPH سبب شده است تا روش نه تنها توانایی شبیه‌سازی برای جریان‌های دارای تغییر شکل زیاد غیرخطی و زنجیره‌ای از تکه تکه شدن در دو سطح فاز را دارد بلکه برای موازی سازی در GPU ها مناسب است. در این پژوهش، با اصلاح و تکمیل مدل کدباز SPHysics برای حل مساله دو فازی جامد-مایع استفاده شد. لازم به توضیح است که مدل مورد استفاده بر مبنای روش تراکم پذیر جزیی استوار بوده و با بکارگیری قابلیت پردازش موازی و ابزارهای پیش پردازش و پس پردازش مناسب، قادر به انجام شبیه سازی میلیون‌ها ذره در مسائل واقعی مهندسی شامل رفتار غیر خطی، تکه تکه شدن و جریان‌های سطح آزاد می‌باشد (۱۲). در ادامه ابتدا مبانی پایه در روش SPH و روابط حللت دو فازی بیان می‌شود. سپس مدل مورد تحلیل توضیح داده می‌شود و نتایج مدل ساده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. بعد از آن، نتایج حالت‌های مختلف مدل سازی و تجزیه و تحلیل مشاهدات و در نهایت جمع بندی نهایی بیان شده است.

مواد و روش‌ها

روش لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) از جمله روش‌های در حال توسعه است که به صورت بدون شبکه بندی محیط با تغییر شکل زیاد در حل مسائل مختلف مورد استفاده می‌شود. در ادامه به معادلات و روابط حاکم بر آن پرداخته می‌شود.

کلیات روابط SPH

اصول پایه در رابطه های SPH یک تابع f که یک متغیر فیزیکی یا عددی است را در بازه Ω در نقطه x بیان می‌کند. انتگرال یا تخمین تابع کرنل به صورت زیر بیان می‌شود (۱۲).

$$f(x) \approx \int_{\Omega} f(x')W(x-x',h)dx' \quad (1)$$

که h طول هموار شده که اندازه بازه تابع کرنل یا تابع وزن را پوشش می‌دهد. تابع کرنل طوری انتخاب می‌شود که هموار و همگن باشد و یک طول شعاع متر اکم را در بگیرد. در این مقاله از تابع کرنل مرتبه پنجم و نلدنند با محدوده پوشش $2h$ استفاده شده است.

$$W(R,h) = a_d \left(1 - \frac{R}{2}\right)^4 (2R+1) \quad (2)$$

که در فضای یک، دو بعدی و سه بعدی a_d به ترتیب $3/4$ و $7/4$ و $21/16$ هستند.

در دامنه گسسته معادله (۱) با استفاده از جمع SPH به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$f(x) = \sum_j^N f(x_j)W(x-x_j,h)V_j \quad (3)$$

که V حجمی ذرات است که با نسبت جرم به چگالی بیان می‌شود و N تعداد ذرات است. در تمام این مقاله پایین نویس i به ذره‌ای که محاسبات روی آن انجام می‌شود اطلاق شده و j مربوط به ذرات

کنترل در مجاورت سطح آزاد استفاده می گردد که روشی معمول برای این روش عددی است.

برای افزایش دقت روش SPH، روش های مختلفی پیشنهاد شده است که دلتای δ -SPH در این مطالعه به طور مستقل برای فاز سیال و فاز رسوب استفاده می گردد. مقادیر این پارامتر برای اتلاف ویسکوزیته توده ای در فشار میانگین با استفاده از ترم اتلاف برای معادله پیوستگی مشابه شرایط استوکس بکار برده می شود. این روش براساس یک اتلاف انرژی مصنوعی تجربی بوده و شبیه ویسکوزیته مصنوعی موناگان به ویسکوزیته توده ای ارتباط ندارد. به عبارتی از آنجایی که معادلات پیوستگی در روش تراکم پذیر جزئی، دقت کامل حوزه سرعت را تضمین نمی کند، از پارامتر δ -SPH برای گسسته سازی معادلات به صورت زیر استفاده می گردد.

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j^N m_j (u_i^\alpha - u_j^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} + D_{\delta\text{-SPH},i}, \quad (13)$$

$$D_{\delta\text{-SPH}} = \delta_d h c_{s0} \sum_j^N \frac{m_j}{\rho_j} \psi_{ij}^\alpha \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha}, \quad (14)$$

$$\psi_{ij}^\alpha = 2(\rho_j - \rho_i) \frac{x_{ij}^\alpha}{|x_{ij}^\alpha|^2 + 0.1h^2}, \quad (15)$$

δ_d پارامتری است که برابر 0.1 فرض می شود. قسمت اول سمت راست معادله (18) دیورژانس سرعت و قسمت دوم، اتلاف δ -SPH برای معادله پیوستگی است. شرح مفصلی از انجام آن را می توان در تحقیق کرسپو و همکاران (2015) مشاهده نمود (13).

مدل رفتاری سیال و رسوب

سیال ویسکوز نیوتنی

برای یک رابطه سازی استوارتر چند فاز می توان قضیه استوکس را برای سیال معمولی و بر مبنای فشار هیدرودینامیک و تانسور تنش مازاد مطابق زیر نوشت (12):

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + f(D^{\alpha\beta}), \quad (16)$$

که $\delta^{\alpha\beta}$ دلتای کرونر است. این قضیه فرض می کند تفاوت بین تنش در تغییر شکل سیال و تنش استاتیکی معادل با تابع f که بوسیله نسبت تغییر شکل D تخمین زده می شود، بدست می آید. وقتی f برای یک ماده ایزوتروپ مثل آب خطی است؛ سیال نیوتنی نامیده می شود و معادله مرکب می تواند به شکل زیر نوشته شود.

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + 2\mu_d \varepsilon^{\alpha\beta} \quad (17)$$

که $\varepsilon^{\alpha\beta}$ نسبت کرنش تانسور را نشان می دهد. برای سیال تراکم ناپذیر که $D^{\alpha\beta} = \varepsilon^{\alpha\beta}$ چون $D^{\gamma\gamma}$ با استفاده از معادله پیوستگی صفر است. در رابطه سازی WGSPPH معادله (14) می تواند برای بدست آوردن تمام تنش در معادله ممتنم مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین برای محاسبه نسبت کرنش در معادله (17) می توان از رابطه زیر استفاده نمود.

$$\varepsilon^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial u^\beta}{\partial x^\alpha} \right] - \frac{1}{3} \left[\frac{\partial u^\gamma}{\partial x^\gamma} \right] \delta^{\alpha\beta} \quad (18)$$

موجود در همسایگی هستند. مقدار قابل محاسبه برای مقدار تابع در نقطه i به صورت زیر خواهد بود:

$$f(x_i) = \sum_j^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j W_{ij} \quad (4)$$

که $f_j = f(x_j)$ و $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$ هستند. برای مطالعه جزئیات بیشتر در باره روش SPH به منبع (2) رجوع شود.

معادلات حاکم و مدل عددی

معادلات اصلی حاکم، معادلات ناویر استوکس شامل معادلات پیوستگی و ممتنم است که در شکل لاگرانژی به صورت زیر خواهد بود (12):

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u^\alpha}{\partial x^\alpha} = 0, \quad (5)$$

$$\text{and} \quad \frac{du^\alpha}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} + g^\alpha \quad (6)$$

بالا نویس α, β جهت مختصات را در روش جمع انیشتن را نشان می دهند. همچنین t زمان، ρ چگالی سیال، u سرعت ذرات، g شتاب جاذبه و σ تانسور تنش است که در مدل سیالاتی بعنوان فشار ایزوتروپیک و ویسکوزیته τ بیان شود.

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (7)$$

در رابطه SPH معادلات ناویر استوکس به صورت زیر نوشته می شوند.

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_j^N \frac{m_j}{\rho_j} (u_i^\alpha - u_j^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha}, \quad (8)$$

$$\text{and} \quad \frac{du_i^\alpha}{dt} = \sum_j^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta} + \sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_i \rho_j} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + g_i^\alpha \quad (9)$$

برای تخمین فشار در روش تراکم پذیر جزئی، از معادله حالت استفاده می گردد. با استفاده از این معادله، مقدار فشار به چگالی مرتبط و به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$p = \beta \left[\left(\frac{\rho}{\rho_b} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (10)$$

ρ_0 چگالی اولیه، γ برابر γ انتخاب می شود و پارامتر β از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\beta = \frac{\rho_0 c_s^2}{\gamma} \quad (11)$$

که c_s سرعت صوت است و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$c_{s0} \geq 10u_{\max} \quad (12)$$

u_{\max} بیشترین مقدار سرعتی است که در دامنه می تواند اتفاق افتد. برای کسب توضیحات بیشتر در این زمینه به مرجع (1) مراجعه نمایید. نکته دیگر در شبیه سازی، شرایط مرزی شامل مرز دیواره و مرز سطح آزاد است. شرایط مرزی دیوار شرایط مرزی دینامیک است که ذرات دیوار به صورت مثلی جابجا شده چیده شده و معادلات ذرات سیال را ارضا می کند. برتری شرایط مرزی دینامیکی شامل اجرای مستقیم محاسبات و عمل در هندسه های دلخواه پیچیده است. همچنین برای تشخیص سطح آزاد از توانمندی روش SPH و مشخصه قطع تابع

که μ_B و τ_B به ترتیب ضریب لزجت و تنش تسلیم بینگهام می‌باشند که بسته به نوع رسوبات می‌توانند متفاوت باشند. شاو و لو در این نوع سیالات غیرنیوتنی، لزجت مؤثر (μ_{eff}) برابر است با:

$$\mu_{eff} = \mu_B + \frac{\tau_B}{\dot{\gamma}} \quad (22)$$

که در حالت دو بعدی، نرخ برش، یعنی $\dot{\gamma}$ به صورت زیر بدست می‌آید (۱۶)،

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \quad (23)$$

یکی از مدل‌های مورد استفاده در سیالات غیرنیوتنی از نوع شبه پلاستیک، مدل کراس است که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است و دارای چهار پارامتر رئولوژیکی می‌باشد:

$$\frac{\mu_0 - \mu_{eff}}{\mu_{eff} - \mu_\infty} = (K\dot{\gamma})^m \quad (24)$$

m و K پارامترهای ثابت و μ_0 و μ_∞ نیز به ترتیب نشان دهنده لزجت در نرخ‌های برشی بسیار کم و بسیار زیاد می‌باشند. دو پارامتر K و μ_∞ به صورت زیر تعریف می‌شوند.

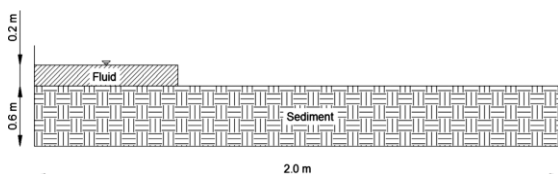
$$K = \frac{\mu_0}{\tau_B} \quad (25)$$

$$\mu_\infty = \mu_B \quad (26)$$

در محاسبات عددی، مقادیر بالای μ_{eff} باعث واگرایی عددی می‌شود. بنابراین وقتی در محاسبات عددی از مدل بینگهام استفاده می‌شود، برای اطمینان از همگرایی μ_{eff} در یک مقدار بالا ثابت نگه داشته می‌شود. برای جلوگیری از ناپایداری عددی μ_0 برای مدل کراس در مقدار $1000\mu_\infty$ ثابت نگه داشته می‌شود. مقدار m برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. مزیت مدل کراس به مدل بینگهام در این است که لزجت مؤثر یک متغیر پیوسته است و ناپایداری عددی از بین می‌رود. مقدار μ_{eff} با ترکیب معادله بینگهام و کراس و استفاده از مقادیر فوق به‌جای پارامترهای رئولوژیکی، بدست می‌آید (۱۵).

صحت سنجی مدل

برای صحت سنجی مدل مورد استفاده، مدلی مشابه آزمایش فراکارولو و کاپارت (۲۰۰۲) شبیه سازی شد. آنها انتقال رسوب را در اثر جریان حاصل از شکست سد را بوسیله مدلی با طول ۲ متر بررسی کرده اند (۱۳). در آزمایش مورد نظر ارتفاع حجم آب ۰/۲ متر و طول آن ۰/۵ متر بوده است. ابعاد و ویژگی‌های مدل استفاده شده برای بررسی صحت روش در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- نمایش مدل استفاده شده جهت صحت سنجی

روش مدل سازی.

با توجه به رابطه کرنش با تنش ویسکوز در معادله مرکب نیوتن، تانسور تنش برشی را مطابق زیر نوشت.

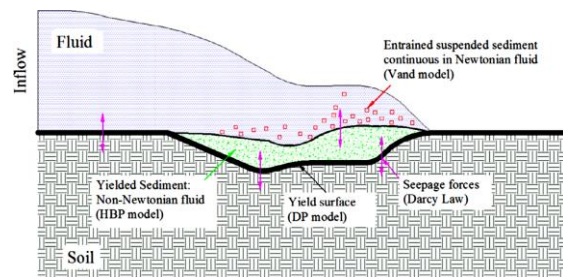
$$\tau^{\alpha\beta} = 2\mu\epsilon^{\alpha\beta} \quad (19)$$

ویسکوزیته μ در معادله (۱۹) از مجموع ویسکوزیته دینامیکی و ویسکوزیته آشفستگی با استفاده از مدل اسمالگرینسکی بدست می‌آید:

$$\mu = \mu_d + \mu_\tau \quad (20)$$

مدل رسوب

در شکل (۱) تصویری از محدوده فیزیکی و روندی که در این بخش در گسسته سازی SPH بیان می‌شود، آورده شده است. این محدوده شامل یک خاک اشباع در معرض حرکت سیال است که ناحیه‌ی محل برخورد سیال غیر نیوتنی دچار آبشستگی می‌شود. در SPH، ویژگی رئولوژیکی این محدوده در شکل لاگرانژی با معادلات ناور استوکس در شرایط جریان دو فازی معرفی می‌شود.

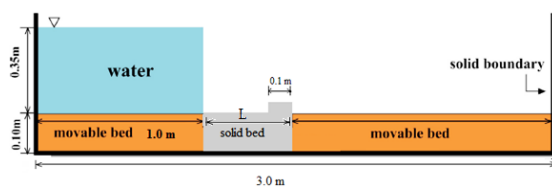


شکل ۱- نمای شماتیک از نواحی مختلف یک مدل رسوب (۱۲).

سیالات غیرنیوتنی نقش بسیار مهمی در کاربردهای مختلف مهندسی ایفا می‌کنند. انواع مختلفی از سیالات غیر نیوتنی وجود دارد که هر کدام از آنها بر اساس مدل رئولوژی مناسب بررسی می‌شوند. یکی از گروه‌های مهم سیالات غیرنیوتنی، سیالات ویسکوپلاستیک می‌باشد. این سیالات در مقابل تغییر شکل اولیه مقاومت می‌کنند و فقط زمانی تغییر شکل می‌دهند یا جریان می‌یابند که مقدار تنش بیشتر از مقدار تنش بحرانی باشد که به آن تنش تسلیم گفته می‌شود. بنابراین در سیالات ویسکوپلاستیک زمانیکه تنش برشی وارده کمتر از تنش تسلیم آنها باشد، مانند جامدات رفتار می‌کنند. در مواد دانه‌ای نیز رفتاری مشابه آنچه گفته شد، وجود دارد. بطوریکه یکی از ویژگی‌های این مواد این است که در برابر تنش برشی ابتدا مانند یک جسم جامد عمل می‌کنند و تغییر شکل نمی‌دهند، اما با افزایش تنش برشی به حالت شبه سیال درآمده و جاری می‌شوند. به عبارت دیگر ماسه به عنوان یک سیال غیرنیوتنی در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی این گروه از سیالات غیرنیوتنی وجود دارد که مهمترین این مدل‌ها، مدل پلاستیک بینگهام است که به صورت زیر می‌باشد (۱۴):

$$\begin{cases} \tau = \mu_B \dot{\gamma} + \tau_B & \tau \geq \tau_B \\ \dot{\gamma} = 0 & \tau \leq \tau_B \end{cases} \quad (21)$$

از آنجاییکه بعد از شکست سد یا باز شدن دریچه یک مخزن به طور ناگهانی یک جریان سریع در ابتدای رخداد چنین اتفاقی بوجود می‌آید؛ پیش بینی یک سطح صلب در جلوی مخزن برای جلوگیری از حمل کف قابل حرکت می‌تواند موثر باشد. یکی از پارامترهای موثر در این امر طول بخش صلب است. از اینرو ۳ حالت برای بستر صلب در نظر گرفته شده است. بسترهای صلب با طول ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی متر بلافاصله بعد از مخزن آب در مدل تعبیه شده است. از طرفی برای استهلاک انرژی ناشی از حجم آب یک مانع مکعب شکل در قسمت انتهایی کف صلب تعبیه شده است. بدین صورت مانع نیز در هر حالت دارای فاصله‌های مختلف ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی متر از محل مخزن خواهند داشت. یکی از عوامل مهم در کاهش انرژی ناشی از سد شکسته شده، ارتفاع مانع مورد نظر است. برای بررسی تاثیر ارتفاع، ۴ حالت پیش‌بینی شده است. در هر یک از کف صلب با طول‌های مختلف، ارتفاع مانع ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی متر از بالای تراز کف ایجاد شده است. لازم به ذکر است که طول مانع در جهت جریان همگی حالتها ۱۰ سانتی متر انتخاب شده است. ابعاد مدل، محل قرار گیری مانع صلب و هندسه مدل شبیه سازی شده‌ی آن در شکل (۴) ارائه شده است. همچنین با توجه به حساسیت سنجی انجام شده، مقدار فاصله بین ذرات در تحلیل ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است.



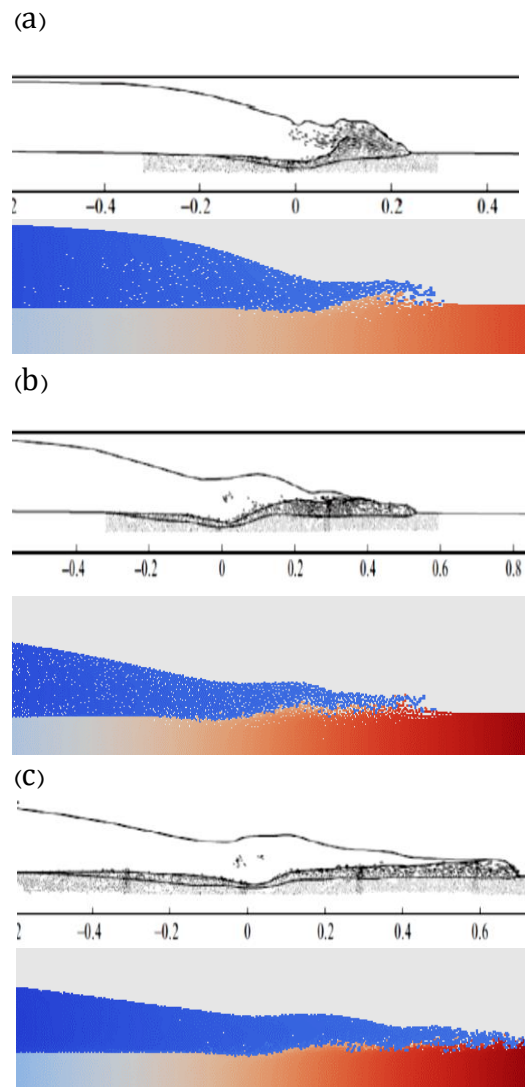
شکل ۴- نمای شماتیک مدل شبیه سازی شده برای بررسی اثر کف صلب و مانع استهلاک کننده انرژی.

با توجه به توضیحات ارائه شده برای هر یک از حالات با طول مختلف کف صلب، چهار حالت با ارتفاع مانع مختلف در نظر گرفته می‌شود و علاوه بر آن برای هر کدام از طول‌ها وضعیت بدون مانع نیز شبیه‌سازی شده است. در مجموع ۱۵ وضعیت مختلف مدل‌سازی وجود خواهد داشت.

نتایج مدل سازی

در زیر نتایج حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند. مدت اجرای مدل ایجاد شده ۲ ثانیه انتخاب شد. بعد از اجرای مدل تغییرات جابجایی رسوب در تمام مدت ۲ ثانیه بررسی شد. تقریباً در لحظه ۱/۲ ثانیه بیشترین میزان جابجایی رسوب در حالات مختلف مشاهده شد. برای بررسی نتایج پس از اتمام جریان و جلوگیری از اثر بازگشت سیال در جابجایی رسوب تغییرات در لحظه ۱/۸ ثانیه نمایش داده شده است. ابتدا مقدار انتقال رسوب برای حالتی که فقط کف صلب وجود دارد، در هر سه طول در لحظه های ۱/۲ و ۱/۸ ثانیه در شکل (۵) ارائه شده است. در شکل (۶) تغییرات سطح آب و جابجایی رسوب برای حالات ۱۲گانه در لحظه ۱/۸ ثانیه ارائه شده است. در این شکل‌ها مقدار L طول بستر صلب است.

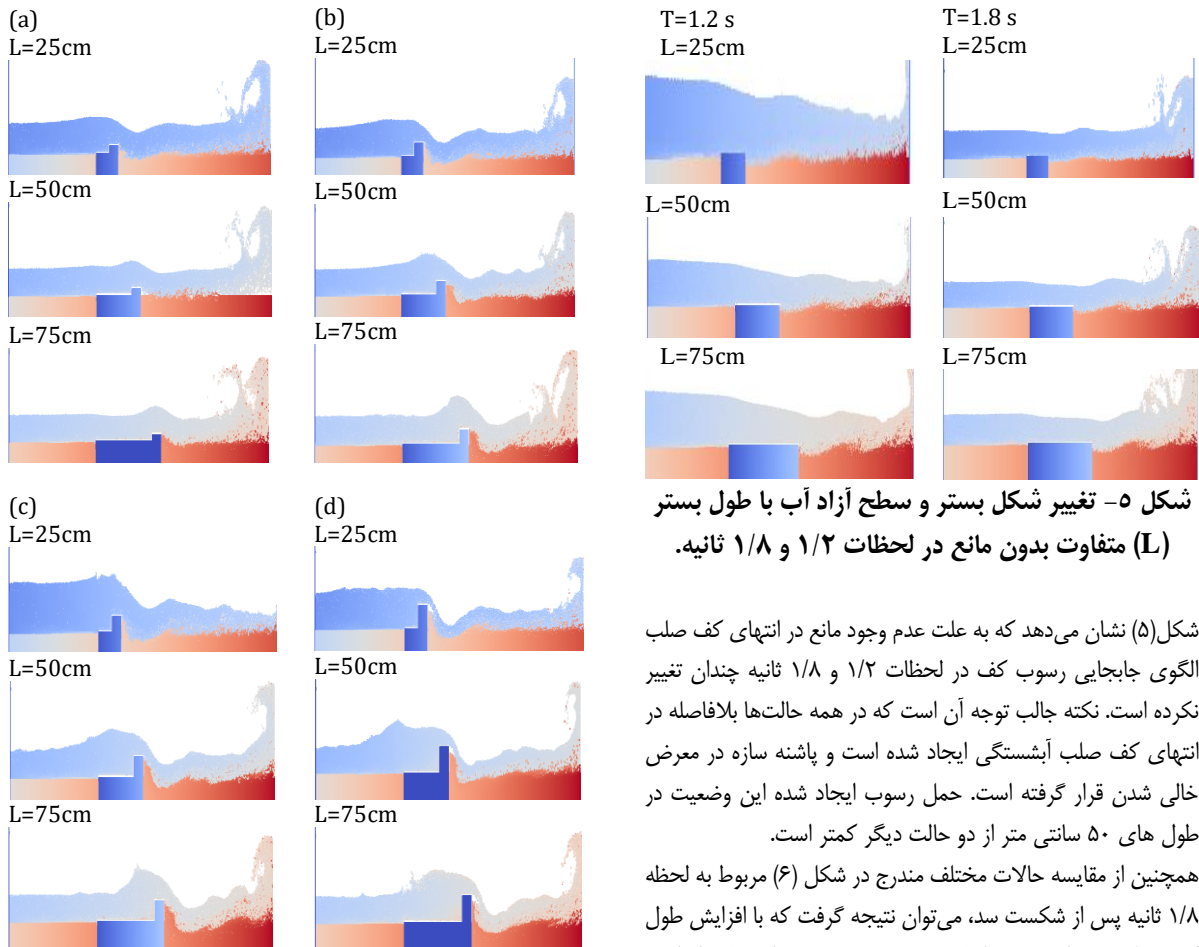
در شکل (۳) تغییرات سطح آب و رسوب جایجا شده در سه زمان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ ثانیه مطابق زمان‌های ارائه شده در نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده اند. نتایج مقایسه حاکی از آن است مدل SPH نتایج قابل قبولی را در شبیه سازی سطح آزاد آب و رسوب حمل شده در کف دارد.



شکل ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی فراکارولو و کاپارت (۲۰۰۲) با مدل سازی اخیر (a) در زمان ۰/۲۵ ثانیه، (b) در زمان ۰/۵ ثانیه و (c) در زمان ۰/۷۵ ثانیه (۱۲).

هندسه مورد مطالعه

در تحقیق حاضر هدف بررسی اثر وجود طول کف صلب و مانع روی آن در آبشستگی کف بخاطر شکست سد و تاثیر ابعاد هر کدام و فاصله مانع از محل شکست سد است. این کار با استفاده از روش مدل‌سازی صحت سنجی شده در مرحله قبل انجام شده است. طول کل مدل ۳ متر و ارتفاع کف قابل حرکت در آن ۰/۱ متر لحاظ شده است تا عمق کافی برای آبشستگی احتمالی در عمق تامین شود. ارتفاع آب برابر ۳۵ سانتی متر و طول آن یک متر است. این ابعاد در همه حالت‌های شبیه‌سازی ثابت بوده اند.



شکل ۵- تغییر شکل بستر و سطح آزاد آب با طول بستر (L) متفاوت بدون مانع در لحظات ۱/۸ و ۱/۲ ثانیه.

شکل (۵) نشان می‌دهد که به علت عدم وجود مانع در انتهای کف صلب الگوی جابجایی رسوب کف در لحظات ۱/۸ و ۱/۲ ثانیه چندان تغییر نکرده است. نکته جالب توجه آن است که در همه حالت‌ها بلافاصله در انتهای کف صلب آبشستگی ایجاد شده است و پاشنه سازه در معرض خالی شدن قرار گرفته است. حمل رسوب ایجاد شده این وضعیت در طول های ۵۰ سانتی متر از دو حالت دیگر کمتر است.

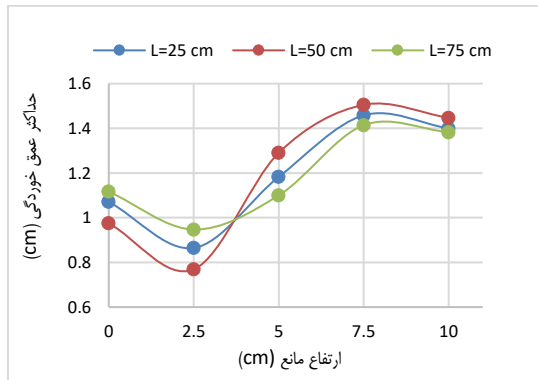
همچنین از مقایسه حالات مختلف مندرج در شکل (۶) مربوط به لحظه ۱/۸ ثانیه پس از شکست سد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول کف صلب، مقدار رسوب انباشته شده در پشت دیواره مانع افزایش می‌یابد. مشاهدات نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع مانع بالاروی آب را پشت مانع را زیاد کرده و در نتیجه موجب ایجاد عمق بیشتری در هنگام سقوط می‌شوند. از طرفی، هرچه ارتفاع مانع بیشتر می‌شود، ممتنم آب در لحظه برخورد به کف افزایش یافته و عمق جابجایی رسوب افزایش می‌یابد ولی پیش‌روی رسوبات در جهت جریان کمتر می‌شود.

شکل ۶- تغییر شکل بستر و سطح آزاد آب در لحظه ۱/۸ ثانیه با طول بستر (L) متفاوت؛ (a) حالت مانع با ارتفاع ۲/۵ سانتی متر، (b) مانع با ارتفاع ۵ سانتی متر، (c) مانع با ارتفاع ۷/۵ سانتی متر و (d) مانع با ارتفاع ۱۰ سانتی متر.

تحلیل نتایج

در این قسمت، مقدار تغییر شکل کف قابل حرکت بعد از کف صلب در لحظه انتهایی، در شکل (۷) ارائه و به ازای هر یک از طول‌های مدل‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شده اند. همچنین در این شکل تغییرات بستر در حالت بدون مانع نیز نمایش داده شده است. خط افقی، تراز اولیه رسوبات قبل از شکست سد است و خطوط رنگی در هر شکل متناظر با تراز نهایی بعد از آبشستگی و مرتبط با ارتفاعی خاص از مانع انتهایی می‌باشد. همانطور که در شکل (۷-a) مشاهده می‌گردد، در حالت با طول ۲۵ سانتی متر، حالت بدون مانع و دارای مانع با ارتفاع ۲/۵ سانتی متر شرایط مطلوب‌تری نسبت به بقیه دارند. در بین دو حالت فوق چون در صورت عدم وجود مانع بلافاصله بعد از کف صلب رسوب جابجا می‌شود. حالت دارای مانع با ارتفاع ۲/۵ سانتی متر گزینه مناسبی است. مطابق شکل (۷-b) در طول ۵۰ سانتی متر نیز مانند حالت قبل مانع با ارتفاع ۲/۵ سانتی متر آبشستگی کمتری داشته است. در قسمت آخر شکل که مربوط به طول کف صلب ۷۵ سانتی متر است؛ کمترین

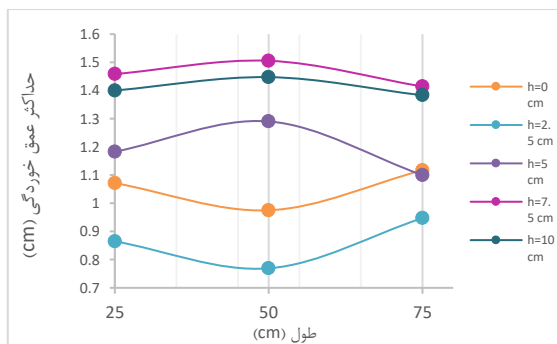
سد بیشتر شود. همانطور که در شکل (۸) مشهود است؛ در شرایط مساله حاضر طول کف صلب ۵۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲/۵ سانتی متر کمترین عمق آبستگي را دارد.



شکل ۸- حداکثر عمق خوردگی رسوب بعد از شکست سد.

نکته حائز اهمیت در شکل (۸)، وجود ارتفاع بهینه‌ای است (در این مساله ۲/۵ سانتی متر) که مستقل از طول سازه حفاظتی بوده و از طرفی افزایش بیش از حد می‌تواند حتی منجر به آبستگي بیش از حد اولیه گردد. برای مساله حل شده، این امر در حدود ارتفاع ۲/۵ سانتی متر اتفاق افتاده است. لازم به توضیح است که افزایش ارتفاع مانع موجب می‌شود تا حجم آب قبل از سقوط اوج گرفته و با ممتوم بیشتر به بستر برخورد کند و در نهایت، عمق خوردگی را افزایش دهد. همانطور که در شکل (۶) ارائه شد، الگوی جریانات شکل گرفته روی سازه حفاظتی به خوبی این پدیده را نشان می‌دهد.

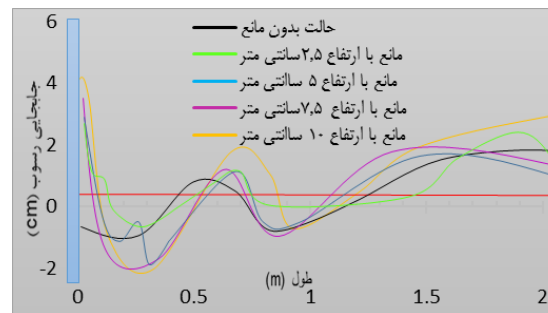
در شکل (۹) حداکثر عمق خوردگی را برای ارتفاع موانع مختلف به ازای تغییر طول کف صلب رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که حالتی که دارای ارتفاع اندک ۲/۵ سانتیمتر مانع هستند؛ کمترین مقدار بیشینه خوردگی را داشته‌اند. از طرفی، مشاهده می‌گردد که به ازای یک ارتفاع مشخص، تاثیر طول سازه حفاظتی در کاهش آبستگي ناچیز بوده در صورتی که ارتفاع این سازه اهمیت قابل توجهی دارد. با توجه به اینکه بهترین حالت طول کف صلب ۵۰ سانتی متر انتخاب شد؛ می‌توان نتیجه گرفت که برای حجم آب این مسئله که جمعی به طول یک متر و ارتفاع ۳۵ سانتی متر است؛ نسبت بهینه طول کف صلب به ارتفاع مانع برابر ۲۰۰ خواهد بود.



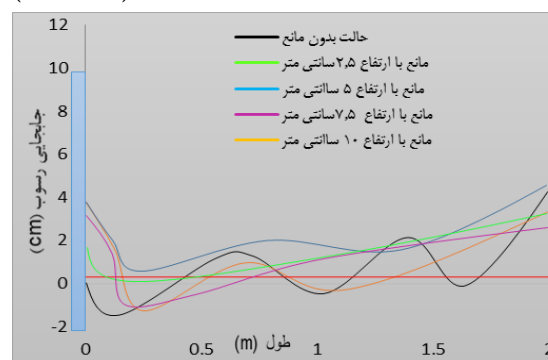
شکل ۹- حداکثر عمق خوردگی رسوب برای ارتفاع های مانع مختلف.

عمق آبستگي به طور نسبی در بین دیگر ارتفاعات مربوط به حالت دارای مانع با ارتفاع ۲/۵ سانتی متر است.

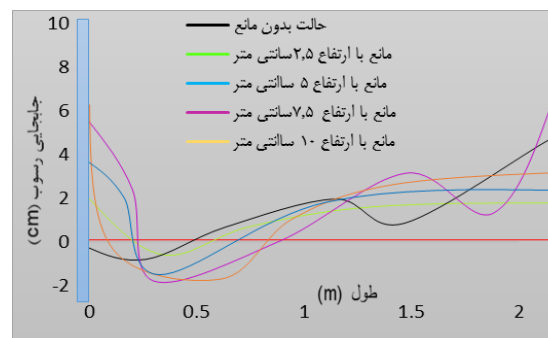
(L=25cm)



(L=50cm)



(L=75cm)



شکل ۷- تغییر شکل بستر در لحظه ۱/۸ ثانیه با طول بسترهای (L) متفاوت.

برای مقایسه همزمان بین وضعیت‌های مختلف مدل شده، بیشترین عمق آبستگي برای هر مدل اندازه‌گیری شد و برای سه طول مختلف، حداکثر عمق خوردگی به ازای ارتفاع موانع مختلف در شکل (۸) رسم گردیده است. با توجه به نمودار مذکور در ارتفاع‌های صفر و ۲/۵ سانتی متر، مدل با طول ۵۰ سانتی متر کف صلب کمترین خوردگی رسوب را داراست اما در ارتفاع موانع ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی متر طول ۷۵ سانتی متر آبستگي کمتری نسبت به طول‌های دیگر داشته است. همانطور که در شکل نمایش داده شده است، میزان تاثیر طول مانع در مقدار آبستگي قابل توجه نیست، لیکن مشاهده می‌گردد که با افزایش ارتفاع مانع باید طول کف و در واقع فاصله مانع از نقطه شروع شکست

جمع بندی

در مقایسه با ارتفاع مانع، تاثیر طول سازه حفاظتی در مقدار آبشستگی ناچیز بوده و اگرچه می توان طول بهینه ای برای هر حجم سیلاب محاسبه نمود، همچنان تعیین مناسب ارتفاع سازه حفاظتی اهمیت بیشتری دارد.

لازم به توضیح است که در این مطالعه، شکل هندسی لبه مانع یکسان انتخاب شده است. لیکن به نظر می رسد که تغییر در هندسه مانع مانند ایجاد لبه های گرد و زاویه دار می تواند با تغییر در الگوی جریانات پس از برخورد با مانع، منجر به تغییر الگوی آبشستگی گردد. علی ایحال، می توان نتیجه گرفت که برای هر مساله، ارتفاع بهینه ای برای سازه حفاظتی وجود دارد که با توجه به قابلیت مدل عددی مورد استفاده، می توان از آن در شناخت رفتار رسوبی و تخمین آبشستگی و در نهایت یافتن هندسه مناسب بهره برد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی: علی پریزاده؛
روش شناسی و تحلیل داده ها: علی پریزاده، حسن اکبری؛
نظارت و نگارش نهایی: حسن اکبری.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Monaghan JJ. 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *J. Comput. Phys.* 110 (2): 399-406.
2. Monaghan JJ and RA Gingold .1997. Smoothed particle hydrodynamic: theory and application to non-spherical stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 181: 375-389.
3. Gomez-Gesteira M, Rogers BD, Dalrymple RA, Crespo AJ. 2010. State-of-the-art of classical SPH for free-surface flows. *J. Hydraulic Res.* 48 (S1): 6-27.
4. Vacondio R, Rogers BD, Stansby PK, Mignosa P. 2012. SPH modeling of shallow flow with open boundaries for

جریان های سریع و اثرات آنها در پایین دست از مسائل مهم و کاهش پیامدهای مخرب ناشی از آن هدف مهندسان و محققان می باشد. بدین منظور تاثیر کف صلب و مانع بر روی آبشستگی رسوبات در اثر جریان ناشی از شکست سد مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه سازی شکست سد و رسوب از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) استفاده شد. در ابتدا، مدل مورد استفاده با مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی ثبت شده برای آبشستگی صحت سنجی شد و نتایج نشان داد که انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل ایجاد شده و مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد. در ادامه شرایط هندسی مختلف برای سازه حفاظتی مدنظر قرار گرفت. در این راستا، سه حالت با طول صلب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی متر جلوی توده آب مدل شد و همچنین در هر یک از این حالتها، مانعی با طول ۱۰ سانتی متر و چهار ارتفاع ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی متر نیز در انتهای قسمت صلب قرار داده شد. ابعاد مدل شبیه سازی شده ۳ متر بود که یک متر از آن به حجم آب اختصاص داشته و ارتفاع مخزن آب ۳۵ سانتی متر است. پس از تحلیل نتایج، اهم دستاوردهای این پژوهش مطابق زیر جمع بندی می گردد:

عدم استفاده از مانع در انتهای کف صلب موجب آبشستگی در پاشنه کف و در نهایت منجر به خالی شدن مصالح از جلوی آن می شود. این امر از جنبه استحکام و نگهداری کف صلب ایجاد شده یا بستر صلب که به طور طبیعی وجود دارد، حائز اهمیت است. لذا، استفاده از کف صلب به تنهایی به هیچ عنوان توصیه نمی گردد. احداث مانعی با ارتفاع حداقل نیز در کاهش آبشستگی موثر است. علی ایحال ارتفاع بهینه ای وجود دارد که منجر به کاهش حداکثری آبشستگی می گردد.

افزایش بیش از حد ارتفاع باعث شکل گیری جت جریان روی مانع شده و در نهایت افزایش عمق رسوب جایجا شده را به همراه دارد. لذا، تامین ارتفاع بهینه یکی از عوامل مهم در طرح سازه مناسب است و لزوماً افزایش ارتفاع منجر به عملکرد مطلوب نمی گردد.

- practical flood simulation. *J. Hydraulic Eng.-Asce.* 138 (6): 530-541.
5. Dalrymple RA, Rogers BD. 2006. Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Eng.* 53 (2-3): 141-147.
6. Bui HH, Sako K, Fukagawa R. 2007. Numerical simulation of soil-water interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. *J. Terramech.* 44 (5), 339-346.
7. Hosseini S, Manzari M, Hannani S. 2007. A fully explicit three-step SPH algorithm for simulation of non-Newtonian fluid flow. *Int. J. Numer. Meth. Heat Flu. Flo.* 17 (7): 715-735.

8. Ran Q, Tong J, Shao S, Fu X, Xu Y. 2015. Incompressible SPH scour model for movable bed dam break flows. *Adv. Water Res.* 82: 39–50.
9. Shakibaeinia A, Jin YC. 2011. A mesh-free particle model for simulation of mobile-bed dam break. *Adv. Water Res.* 34 (6): 794–807.
10. Manenti S, Sibilla S, Gallati M, Agate G, Guandalini R. 2012. SPH simulation of sediment flushing induced by a rapid water flow. *J. Hydraul. Eng.* 138 (3): 272–284.
11. Ulrich C, Leonardi M, Rung T. 2013. Multi-physics SPH simulation of complex marine-engineering hydrodynamic problems. *Ocean Eng.* 64 (0): 109–121.
12. Fourtakas G, Rogers BD. 2016. Modelling multi-phase liquid-sediment scour and resuspension induced by rapid flows using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) accelerated with a Graphics Processing Unit (GPU). *Adv. in Water Res.* 92: 186–199.
13. Crespo AJC, Dominguez JM, Barreiro A, Gómez-Gesteira M, and Rogers BD. 2015. DualSPHysics: open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Comput. Phys. Commun.* 187: 204–216.
14. Razavi Tousi SL, Ayubzadeh SA, Walizadeh A. 2014. Two-dimensional simulation of water flow and sediment in dam failure phenomenon using smooth particle hydrodynamic method (SPH). *Omran Modares.* 2(15):23-35. [In Persian].
15. Shao S, Lo EYM. 2003. Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface resources. *Adv. in water.* 26:787-800