

Experimental and Numerical Evaluation of the Effects of Dam Reservoir Sediments on Sediment Transfer Mechanism Due to Dam Failure

Amin Maldar¹, Abbas Hosseini^{2*}, Babak Fazli Malidareh³, Mohammad Fazli⁴

1- PhD candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Islamic Azad University, Babol branch, Babol.

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

Received: 18 February 2023

Accepted: 17 July 2023

Discussion: 21 June 2024



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Due to the volume of water stored in the reservoir of dams and sometimes their proximity to residential areas, the failure of dams can lead to a lot of human and financial losses, which can be prevented by having sufficient information and proper forecasts of dam failure. The flow resulting from the dam failure is turbulent, mainly a mixture of fluid and sediment particles. Therefore, after the dam's failure, sediment transport leads to significant morphological changes downstream. Consequently, the analysis and evaluation of the instantaneous failure of the dam have been one of the main challenges of the profession of engineers and activists in this field. By examining the research background, it is clear that the studies focused on fluid flow in non-erodible bed conditions, and a small part of numerical and laboratory research has been focused on the evaluation of changes in the morphology of the bed sediment layer. In addition, one of the effective parameters in the mechanism of sediment transfer and the pattern of morphological changes of the bed is the sediments of the dam reservoir, which has received less attention from researchers. We have evaluated and experimental-numerically modeled the phenomenon of sediment transport due to the sudden failure of the dam, taking into account the sediment layer in the dam reservoir.

Methodology: In this study, two variables (1- the type of sediment particles (fine sand and coarse sand) and 2- the thickness of the sediment layer in the reservoir and downstream of the dam) have been considered as the main parameters in the evaluation of the sediment transport mechanism (changes in bed morphology). Therefore, scenarios have been defined for laboratory and numerical modeling. In this research, to evaluate the phenomenon of bed sediment transfer based on the phenomenon of instantaneous dam failure, four different tests have been defined and implemented in the hydraulic laboratory flume of Babol University. This flume is 10 meters long, 50 cm wide, and 50 cm high and is equipped with an ultrasonic level gauge and a digital pressure gauge. In these experiments, two parameters of the type of bed sediment materials (A, B) and also the thickness of the sediment layer

downstream of the dam and the reservoir of the dam have been considered as modeling variables. Type A materials are gravel particles with an average diameter of 20 mm, and type B materials are sand particles with an average diameter of 3 mm.

In this research, numerical modeling has been implemented using the Ansys Software and the Fluent model, and the characteristics and specifications of numerical models have been created based on laboratory models.

Results and Discussion: According to the research variables, four scenarios for laboratory modeling and six scenarios for numerical modeling of the phenomenon of sediment transfer have been defined under instantaneous dam failure conditions. The results of the numerical modeling showed that the numerical model of the research had acceptable accuracy in simulating the phenomenon of sediment transfer due to dam failure, so the modeling error for two-dimensional numerical models (the first four models based on Table 2) is respectively equal to 2.75%, 4.31%, 2.59%, 5.52% compared to laboratory tests.

The results showed that in the models of type B sediment materials, the amount of reduction in the thickness of the sediment layer is greater than in the models with type A sediment materials. Therefore, the decrease in the diameter of the sediment particles has caused an increase in the thickness of the sediment layer (bed morphology) due to the failure of the instantaneous dam. In addition, by examining the results obtained from laboratory and numerical models, it was determined that the reservoir sediment layer of the dam is an effective parameter in the rate of sediment transfer and the occurrence of changes in the morphology of the bed based on the dam failure currents, in such a way that with the increase in the thickness of the sediment layer of the reservoir compared to the downstream sediment layer of the dam, the changes in the thickness of the bed layer have increased by about 10%, as well as the rate of sediment transfer in these conditions.

It is clear that the thickness of the sediment layer in the 3D_DB1_NB1 model with type B materials has decreased more compared to the 3D_DB1_NA1 model with type A materials. In addition, according to the contour of the changes in the thickness of the bed layer, it is clear that the type of material of the sediment particles (diameter of the sediment particles) was an effective factor in evaluating the phenomenon of sediment transport in the 3D modeling space. In both 3D models, the thickness of the sediment layer in the area of the dam valve (failure area) has decreased and increased in the range of 1.8 to 2 meters and decreased from 2.2 to 3 meters.

Conclusion: The main goal is to evaluate the mechanism of sediment transfer due to the sudden failure of the dam, focusing on the effect of the sediment layer in the dam reservoir, which has been implemented in the form of laboratory and numerical modeling.

It is clear that the numerical model created in both two-dimensional and three-dimensional spaces has an acceptable accuracy in simulating the phenomenon of sediment transfer due to dam failure. The model created in the Ansys (Fluent) software can be widely used as a reference model for simulating and evaluating the phenomenon of sediment transfer.

Keywords: Dam break, Bed morphology, Dam reservoir, Sediment diameter, Experimental modeling, Numerical model.



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of
the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی و عددی تاثیر رسوب‌های مخزن سد بر سازوکار انتقال رسوب بر اثر شکست سد

امین مالدار بادلی^۱، سید عباس حسینی^{۲*}، بابک فضلی مالیدره^۳، میثم فاضلی^۴


۱- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده عمران هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه عمران، واحد بابل، دانشگاه آزاد اسلامی، بابل، ایران.

۴- استادیار، دانشکده عمران هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

* abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: هدف اصلی در این پژوهش ارزیابی آزمایشگاهی و عددی پدیده انتقال رسوب بر اثر شکست سد با در نظر گرفتن تاثیر رسوب‌های مخزن می‌باشد. در این راستا سه فراسنجه نوع مصالح رسوب، ضخامت لایه رسوب در مخزن سد و در پایین دست محور سد، به عنوان متغیرهای اصلی بررسی و ارزیابی شده است. مدل آزمایشگاهی در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض و ارتفاع ۰.۵ متر و شبیه‌سازی عددی در بستر مدل فلونت در فضای دوبعدی و سه‌بعدی انجام و عملکرد مدل عددی بر مبنای مدل آزمایشگاهی، اعتبارسنجی شده است. نتایج بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی در شبیه‌سازی پدیده انتقال رسوب بر اثر شکست سد بوده، به گونه‌ای که میانگین خطای مدل‌سازی عددی کمتر از ۵٪ بوده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش قطر ذرات رسوب از ۲۰ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر باعث افزایش تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب (ریخت‌شناسی بستر) بر اثر شکست سد شده است. افزون بر این نتایج نشان داد که لایه رسوب مخزن سد به عنوان یک فراسنجه موثر در نرخ انتقال رسوب و رخداد تغییرپذیریها در ریخت‌شناسی بستر بر مبنای جریان‌های شکست سد بوده است، به گونه‌ای که با افزایش ضخامت لایه رسوب‌های مخزن سد نسبت به لایه رسوب پایین دست، میزان تغییرهای ضخامت لایه بستر حدوداً ۱۰٪ افزایش یافته که بیانگر افزایش نرخ انتقال رسوب در این شرایط بوده است. براساس نتایج مدل عددی ایجاد شده در هر دو فضای دو بعدی و سه بعدی دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی پدیده انتقال رسوب بر اثر شکست سد داشته است و می‌تواند به عنوان یک مدل مرجع برای شبیه‌سازی و ارزیابی پدیده انتقال رسوب به‌ویژه در فضای سه‌بعدی به کارگیری شود.

کلیدواژه‌گان: شکست سد، ریخت‌شناسی بستر، لایه رسوب‌های مخزن سد، قطر ذرات رسوب، مدل آزمایشگاهی، مدل عددی.

۱- مقدمه

رخداد این پدیده جلوگیری و یا آسیب و زیان‌های ناشی از آن را کاهش داد. سدهای زیادی در بالادست شهرها برای تامین نیازهای آب آشامیدنی شهری، کشاورزی و برق‌آبی ساخته شده‌اند. شکسته شدن این سدها می‌تواند آسیب و زیان‌های هنگفتی اعم از مالی و جانی به پایین دست (منطقه‌های شهری) وارد کند. برای نمونه می‌توان به شکست سد بانکیائو چین در سال ۱۹۷۵ اشاره کرد که به موجب آن ۲۶۰۰۰۰ نفر به صورت مستقیم و ۲۳۰۰۰۰۰ نفر در نتیجه قحطی و بیماری‌های واگیردار ناشی از شکست

سدها از جمله مهم‌ترین تاسیسات زیربنایی یک کشور به‌شمار آمده که از طریق ذخیره‌سازی، تنظیم آب و همچنین تولید انرژی نقش بسیار مهمی در شکوفایی اقتصادی ایفا می‌کنند. با توجه به حجم آب ذخیره شده در مخزن این سدها و گاهی نزدیکی آنها به منطقه‌های مسکونی، شکست سدها می‌تواند منجر به آسیب و زیان‌های جانی و مالی زیادی شود، که با داشتن اطلاعات کافی و پیش‌بینی‌های مناسب از شکست سد می‌توان از

ضعف و قوت مختلفی می‌باشند، روش‌های مدل‌سازی عددی با بهره‌گیری از نرم‌افزارهایی همچون: انسیس-فلوئنت^۱ و فلوتریدی^۲ به داده‌های فراوانی نیاز دارند، عملکرد آنها می‌تواند دشوار باشد و فرایند واسنجی زمان‌بر است. بیشتر مدل‌ها برای شرایط بستر ثابت توسعه یافته‌اند و نه توان بالقوه فرسایش قوی جریان گذرا و نه تغییرپذیری‌های ریخت‌شناختی مرتبط در بستر آبراهه را در نظر نمی‌گیرند (Cao et al., 2014). برای اساس مدل‌های عددی برای ارتقای عملکرد و مدلسازی فعل‌وانفعال‌های بین سیال و لایه رسوب نیازمند توسعه مدل و صحت‌سنجی عملکرد بوده‌اند و این امر فرایند مدل‌سازی را بیش از پیش دشوار می‌سازد. راه‌حل‌های تحلیلی برای ارزیابی انتقال رسوب حاصل از شکست سد دارای گستره عملکرد محدودی بوده‌است (Pritchard and Hogg, 2002; Stoker, 1957). برهمکنش بین جریان، رسوب و ریخت‌شناسی بستر در حال تغییر به‌طور معمول در مدل‌ها نادیده گرفته می‌شوند (Cao et al., 2014). لازم به یادآوری است که تغییر و دگرگونی‌های اخیر امکان در نظر گرفتن تعاملات بین این فراسنجه‌ها را فراهم کرده‌است (Razavitoosi et al., 2014; Soares-Frazaõ et al., 2012)، اما به دلیل ناکافی بودن داده‌ها و اطلاعات اندک در مورد رسوب‌ها و جریان‌های بسیار گذرا، بررسی‌های محدودی با بهره‌گیری از روش‌های تحلیلی در این راستا صورت گرفته است (Qian et al., 2017).

بررسی‌های آزمایشگاهی شکست سد و ارزیابی پدیده انتقال رسوب به عنوان یک رویکرد مناسب نسبت به روش‌های عددی با دقت بالاتر و صحت بیشتر مطرح بوده است. اگرچه مدلسازی فیزیکی هم دارای ضعف‌هایی همچون هزینه بالای آزمایش‌ها، نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی، زمان‌بر بودن آزمایش‌ها، محدودیت در تکرار هر آزمایش و ... بوده‌است. مدل‌سازی فیزیکی شبیه به اندازه‌گیری تجربی میدانی است که هر دو به مشاهده‌های تجربی دقیق رویدادها و فرآیندهای واقعی نیاز دارند. با این حال، مدلسازی‌های آزمایشگاهی آسان‌تر کنترل می‌شوند و

سد، جان خود را از دست‌دادند (Graham, 1999). بر مبنای گزارش‌های ارائه شده از تخریب و شکست ۱۰۰ سد در سطح جهانی مشخص شد که بیش از نیمی از شکست‌های ایجاد شده در ۵ سال اول احداث سازه سد و بر مبنای ضعف در طراحی و کاستی‌های موجود در ساخت سدها رخ داده است. بر مبنای بررسی و ارزیابی‌های آماری انجام شده بر روی شکست سدها که در بازه سال‌های ۱۸۰۰ تا ۱۹۸۰ میلادی صورت گرفت، مشخص شد که نوع سد یکی از فراسنجه‌های موثر در تخریب و شکست سدها در این مطالعات بوده است، به گونه‌ای که احتمال شکست سدهای خاکی ۴ برابر بیشتر از سدهای بتنی بوده‌است. نکته با اهمیت دیگر در این بررسی میزان آسیب و زیان‌ها و تلفات جانی بوده، که بر مبنای این بررسی‌ها میزان تلفات جانی در شکست سدهای بتنی ۲ برابر سدهای خاکی و سنگریزه‌ای بوده است (ICLD, 1995).

جریان حاصل از شکست سد، جریانی آشفته بوده که به‌طور عمده مخلوطی از سیال و ذرات رسوب می‌باشد. بنابراین پس از رخداد شکست سد، پدیده انتقال رسوب منجر به تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی قابل توجهی در پایین‌دست سد می‌شود و در برخی موارد ریخت‌شناسی رودخانه و پیرامون آن را به طور کامل تغییر می‌دهد. بر این مبنای تحلیل و ارزیابی شکست آبی سد به عنوان یکی از چالش‌های اصلی پیش‌روی مهندسان و فعالان این عرصه بوده‌است. همچنین بررسی حجم و توزیع رسوب‌های منتقل شده به دنبال شکست سد بسیار ضروری است (Goutiere et al., 2011). افزون بر موارد یادشده به‌طور عمده در مخزن سد لایه رسوب‌ها در بستر ایجاد می‌گردد که در پدیده شکست سد و مکانیزم انتقال رسوب‌ها بسیار حائز اهمیت بوده‌است. غالب بررسی‌های صورت گرفته بر ارزیابی شکست سد و پدیده انتقال رسوب با بهره‌گیری از دو روش مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی تعریف و پیاده‌سازی شده است. مشخص است که بررسی‌های میدانی در مقیاس واقعی دشوار و پرهزینه بوده و دارای عدم قطعیت‌های فراوان می‌باشد (Khosravi et al., 2020). روش‌های مختلف بررسی‌های شکست سد و انتقال رسوب دارای نقطه‌های

1 Ansys_Fluent
2 Flow3D

آزمایش‌هایی از جریان‌های دوبعدی سد بر روی بستر یکنواخت ماسه انجام دادند. نتایج بدست‌آمده از این بررسی‌ها نشان داد که آبشستگی شدید (کاهش ضخامت لایه رسوب) در نزدیکی محل شکست سد و رسوب گذاری در پایین دست رخ داده است. (Wu et al., 2018) به ارزیابی تاثیر جریان شکست سد بر نرخ انتقال رسوب با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی عددی پرداختند، در این پژوهش برای مدل‌سازی از روش عددی حجم محدود و برای مش‌بندی فضای حل شبکه مستطیلی نایکنواخت مورد بررسی شد. نتایج بدست‌آمده از این بررسی‌ها نشان داد که مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی عمق جریان، سرعت و پیش‌بینی جریان بستر عملکرد قابل قبولی داشته است. (Issakhov and Zhandaulet, 2020) اثرگذاری‌های جریان شکست سد بر بسترهای متحرک را با استفاده از روش حجم سیال^۱ بررسی کردند و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل آنان به خوبی متعادل و قابل اعتماد است. (Khosravi et al., 2020) به بررسی رابطه‌های بین ساختار و تغییر شکل بستر رودخانه (تغییرپذیری‌های ریخت‌شناختی) در سیلاب‌های شکست سد پرداختند. در این پژوهش از یک فلوم برای شبیه‌سازی سیلاب‌های شکست سد با تغییرپذیری‌های سطح آب اولیه بالادست و همچنین نوع ذرات رسوب متغیر (از یکنواخت تا درجه‌بندی شده) استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که آبشستگی شدید بی‌درنگ در پایین دست محل شکست سد در هر دو نوع رسوب‌های یکنواخت و درجه بندی شده رخ داده است. افزون بر این الگوی تغییرپذیری‌های ریخت‌شناختی بستر تحت جریان‌های شکست سد بررسی شد.

یکی از چالش‌های اصلی در بررسی‌های انجام شده، مدل‌سازی و ارزیابی تغییرپذیری‌های لایه رسوب تحت جریان‌های شکست سد در فضای مدل‌سازی دوبعدی بوده است، در این راستا (Liu et al., 2022) در پژوهشی به ارزیابی تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی بستر تحت جریان دوبعدی ناشی از شکست سد پرداختند. در این مطالعات، آزمایش‌ها در فلوم شیشه‌ای با ابعاد (۱/۶*۱/۰*۲۸ متر)

بنابراین نتایج واقعی‌تر و قابل اعتمادتری ارائه می‌دهند (Qian et al., 2017).

تا به امروز بررسی‌های به‌نسبت جامعی با بهره‌گیری از روش‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی بر ارزیابی شکست سد توسط محققان مختلف انجام شده است. بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته به بررسی شکست سد بر بستر با ذرات ثابت (فرسایش‌ناپذیر) معطوف بوده است (Wang et al., 2019; Wang et al., 2020; Garoosi et al., 2022; Khoshkonesh et al., 2022; Zhang et al., 2022; Ai et al., 2022). اگرچه بررسی‌های انجام شده منجر به نتایج ارزشمندی همچون: شناسایی، ارزیابی و طبقه‌بندی فراسنجه‌های موثر در جریان‌های حاصل از شکست سد شده است، ولی در عمل واقعیت چنین امری محقق نمی‌شود و همواره پدیده شکست سد همراه با انتقال رسوب‌های بستر بوده و سیلاب‌های حاصل از شکست سد تمایل به القای الگوهای مختلف انتقال رسوب و تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی در رودخانه‌ها و پایین‌دست سد داشته اند که باید مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گیرند. در این راستا نخستین بررسی‌ها توسط (Capart, 1998) and Young با ارزیابی پدیده شکست سد در یک بستر فرسایش‌پذیر رسوبی حاوی ذرات رسوب ریزدانه در یک فلوم آزمایشگاهی انجام شد. پس از آن آزمایش‌های مشابه دیگری توسط (Fraccarollo and Capart, 2002) و (McMullin, 2015) با ترکیب‌های مختلف لایه رسوب بستر و سطح‌های مختلف آب بالادست و پایین دست انجام شد. (Goutiere et al., 2011) ارزیابی‌های خود را بر بررسی جریان‌های شکست سد و تغییرپذیری‌های ریخت‌شناختی بستر با ذرات درشت‌دانه، ریزدانه و یکنواخت تعریف و پیاده سازی کرد. در این آزمایش‌ها از فلومی با مقطع عرضی نایکنواخت که دارای افزایش ناگهانی مقطع در بخشی از فلوم بوده، استفاده شد. همچنین برای جلوگیری از تأثیرگذاری بر فرآیندهای انتقال رسوب در آزمایش، تنها از فن‌های نامستقیم برای اندازه‌گیری سطح‌های آب، سطح‌های بستر و سرعت استفاده شد. این آزمایش‌ها نشان داد که آبشستگی شدید در گوشه‌های بخش توسعه یافته مقطع آبراهه رخ داده است. در پژوهشی دیگر (Soares-Frazão et al., 2012)

مدل محاسبه‌شدنی با استفاده از داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد و نتایج نشان داد که مدل دارای دقت بالایی در پیش‌بینی تکامل سطح آزاد، پرش هیدرولیکی متحرک، سرعت جریان و رژیم جریان برخوردار است. با بررسی نتایج بررسی‌های انجام شده پیرامون پدیده انتقال رسوب بر اثر شکست سد، مشخص می‌شود که اغلب بررسی‌ها متمرکز بر جریان سیال در شرایط بستر فرسایش ناپذیر بوده و بخش اندکی از پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی به ارزیابی تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی لایه رسوب‌های بستر معطوف بوده است. افزون بر این یکی از فراسنجه‌های موثر در سازوکار انتقال رسوب و الگوی تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی بستر، رسوب‌های مخزن سد بوده که کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. براین مبنا در این پژوهش به ارزیابی و مدلسازی آزمایشگاهی و عددی پدیده انتقال رسوب در نتیجه شکست آبی سد با در نظر گرفتن لایه رسوب در مخزن سد پرداخته شد. در این بررسی دو متغیر (۱- نوع ذرات رسوب (ریزدانه و درشت دانه) و ۲- ضخامت لایه رسوب در مخزن و پایین دست سد) به عنوان فراسنجه‌های اصلی در ارزیابی سازوکار انتقال رسوب (تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی بستر) بررسی شده است و بر همین مبنا پیش‌فرض‌هایی برای مدلسازی آزمایشگاهی و عددی تعریف شده است.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

۲-۱- معادله‌های حاکم

برای شبیه‌سازی جریان شکست سد بر روی بستر ثابت به‌طور عمده از معادله‌های دو بعدی آب کم عمق، که با انتگرال‌گیری معادلات نویر-استوکس در عمق با فرض فشار هیدرواستاتیک استفاده می‌شود. با این حال، انتقال رسوب و تغییرپذیری‌های سریع بستر، که می‌تواند اثر قابل توجهی بر جریان آب ایجاد کند، در طول جریان شکست سد بر روی بسترهای متحرک رخ می‌دهد. بنابراین، معادله‌های تعمیم‌یافته آب کم عمق شامل تبادل جرم و مومنتوم بین حالت سیال و حالت رسوب برای توصیف هیدرودینامیک جریان شکست سد بر روی بستر

انجام شد. بررسی‌ها بر مبنای دو پیش‌فرض ۱- عدم جریان ورودی، ۲- سطح تاحدودی ثابت آب (پیش‌فرض در مخزن بالادست انجام شد. در طول آزمایش، سطح آب توسط حسگرهای فشار که در زیر لایه رسوب مدفون شده بودند، اندازه‌گیری شد و ریخت‌شناسی بستر توسط یک سامانه محدوده فراصوتی بررسی شد. نتایج نشان داد: (۱) در پیش‌فرض اول، دامنه و عمق گودال آبشستگی همچنان افزایش می‌یابد، اما مکان عمیق‌ترین نقطه آبشستگی تغییر معنی‌داری نداشته است. (۲) در پیش‌فرض دوم، عمق و دامنه آبشستگی پس از شکستن سد افزایش یافت، اما سرعت رشد پس از گذشت زمان کاهش یافته است، نتایج بدست‌آمده از این پژوهش را می‌توان برای درک تکامل ریخت‌شناسی بستر تحت جریان شکست سد، اعتبارسنجی روش‌های عددی و آزمایش مدل‌های سیلابی استفاده کرد. در راستای سیر تکامل بررسی‌های انجام شده، پژوهش‌های ارزشمندی برای پیاده‌سازی فرایند مدلسازی عددی پدیده شکست سد صورت گرفته است. Garoosi et al. (2022) جریان شکست سد بر روی بسترهای خشک و مرطوب را با بهره‌گیری از روش مدلسازی عددی و آزمایشگاهی با هدف ارائه مجموعه داده‌های به‌روز و بینش عمیق‌تر به ریخت‌شناسی و هیدرودینامیک شکست سد بررسی و ارزیابی کردند. در این بررسی‌ها دو روش عددی مختلف: (۱) حجم محدود و (۲) ذرات متحرک نیمه‌ضمنی^۱ نیز برای تأیید تکرارپذیری اندازه‌گیری‌های تجربی به‌کارگیری شده‌اند. نتایج بدست‌آمده و مقایسه‌های انجام شده توافق رضایت بخشی را بین هر دو مدل عددی و آزمایش‌ها نشان داد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که مدل لاگرانژی ذرات متحرک نیمه‌ضمنی عملکرد بهتری نسبت به حجم محدود داشته است.

Khoshkonesh et al. (2022) در ارزیابی‌های خود به بررسی اثرگذاری‌های ناهمواری آبراهه در فرایند مدلسازی شکست سد با بهره‌گیری از روش مدلسازی عددی پرداختند. در این بررسی‌ها که در بستر نرم‌افزار فلوتریدی پیاده‌سازی شد شرایط مختلف ناهمواری بستر و تاثیرگذاری آن بر جریان ناشی از شکست سد ارزیابی شد.

نامتعادل^۱ بوده است. فراسنجه L یک فاصله مشخصه برای تغییر شرایط رسوب از حالت نامتعادل به حالت متعادل است که توسط بسیاری از محققان بررسی شده است (Greimann et al., 2008; Wu, 2004). طول انطباق نامتعادل L را می توان بر مبنای (رابطه ۶) تعیین کرد (Wu and Wang, 2007):

$$L = \max\{L_b, \frac{\sqrt{u^2 + v^2} h}{\alpha w_s}\} \quad (6)$$

در رابطه ۶، فراسنجه α بیانگر ضریب انطباق بار معلق بوده که میزان آن بیشتر بین ۰/۲۵ تا ۰/۵ بوده که معمولاً با واسنجی بر مبنای داده‌های تجربی تعیین می‌شود. فراسنجه w_s سرعت سقوط ذرات رسوب بوده که عبارت است از: $w_s = w_{s0}(1 - Ct)^m$ ، فراسنجه m توان در برابر داده‌های تجربی که نشان دهنده تأثیر جلوگیری از غلظت بالای رسوب بر سرعت ته نشینی می‌باشد. فراسنجه w_{s0} بیانگر سرعت سقوط ذره رسوب در آب ساکن بوده که بنابر (رابطه ۷) محاسبه می‌شود:

$$w_{s0} = \sqrt{(13.95 \frac{v}{d})^2 + 1.09 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) gd} - 13.95 \frac{v}{d} \quad (7)$$

در رابطه ۷، فراسنجه d قطر ذرات رسوب و v گرانشی جنبشی آب بوده است. بر مبنای رابطه‌های ارائه شده، رابطه‌های اصلی برای محاسبه نرخ انتقال رسوب‌های بستر (رسوب‌های بستر q_b و ذرات معلق q_s) به شرح (رابطه‌های ۸ و ۹) ارائه شده است:

$$q_b = 0.0053 \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) gd^3} \left[\frac{\tau_{be}}{\tau_{cr}} - 1\right]^{2.2} \quad (8)$$

$$q_s = 0.0000262 \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) gd^3} \left[\left(\frac{\tau_{be}}{\tau_{cr}} - 1\right) \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{w_s}\right]^{1.74} \quad (9)$$

در رابطه‌های ۸ و ۹ فراسنجه τ_{be} بیانگر تنش برشی موثر بستر بوده که عبارت است از: $\tau_{be} = (\dot{n}/n)^{3/2} \tau_b$

متحرک مورد نیاز است که به شرح (رابطه‌های ۱ تا ۳) ارائه شده است (Wu, 2007).

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u}{\partial x} + \frac{\partial \rho h v}{\partial y} = -\rho_b \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho \left(h u^2 + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial \rho h u v}{\partial y} \\ = -\rho g h \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{2} g h^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ - \rho g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{3/2}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h v}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \rho \left(h v^2 + \frac{1}{2} g h^2 \right) \\ = -\rho g h \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{2} g h^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \\ - \rho g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{3/2}} \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه‌های ۱ تا ۳ فراسنجه t بیانگر زمان، x و y مختصات فضای دوبعدی، h عمق جریان، u و v سرعت جریان در راستای x و y به ترتیب، z_b ارتفاع بستر، g شتاب جاذبه، ρ چگالی مخلوط آب و رسوب، Ct غلظت حجمی رسوب، ρ_w و ρ_s به ترتیب چگالی رسوب و آب، ρ_b چگالی مخلوط آب و رسوب در بستر که عبارت است از: $\rho_b = \rho_w p + \rho_s(1 - p)$ ، p تخلخل ذرات رسوب، n ضریب مانینگ برای بستر آبراهه بوده است.

شبیه‌سازی فرآیندهای انتقال رسوب ناشی از جریان شکست سد را می توان با محاسبه مستقیم بار کل وارد بر بستر متحرک به دست آورد (Wu, 2007). بنابراین، معادله‌های انتقال رسوب و تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی بستر به شرح زیر آورده شده است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC_t)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_t)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_t)}{\partial y} \\ = -\frac{1}{L}(\sqrt{u^2 + v^2} hC_t - q_t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$(1 - p) \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{L}(\sqrt{u^2 + v^2} hC_t - q_t) \quad (5)$$

در (رابطه‌های ۴ و ۵) فراسنجه q_t بیانگر ظرفیت انتقال رسوب بر مبنای بار کل بستر بوده که عبارت است از: $q_t = q_b + q_s$ ، q_b و q_s به ترتیب بار بستر معادل و نرخ انتقال رسوب معلق و فراسنجه L طول انطباق

1 non-equilibrium adaption length



Fig.1 Laboratory Open Channel-Hydraulic Research Center, Islamic Azad University, Babol Branch

شکل ۱ آبراهه باز آزمایشگاهی-مرکز تحقیقات هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد بابل

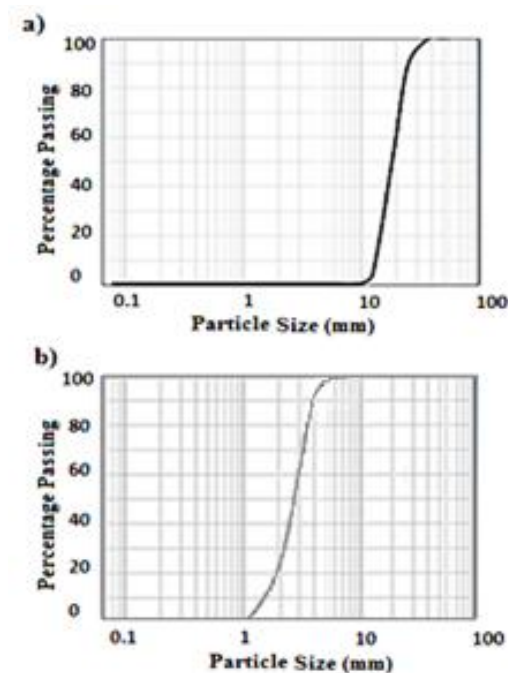


Fig.2 sieve-analysis curve of sediment layer materials, a) Type A, b) Type B

شکل ۲ منحنی دانه‌بندی مصالح لایه رسوب، (a) مصالح نوع A، (b) مصالح نوع B

جدول ۱ پیش‌فرض‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی

Water depth	Thickness of sediment (reservoir)	Thickness of sediment (downstream)	Type of sediment particles	Test Code
37 cm	8 cm	8 cm	A	A1
30 cm	15 cm	5 cm	A	A2
37 cm	8 cm	8 cm	B	B1
30 cm	15 cm	5 cm	B	B2

ضریب مانینگ مربوط به زبری دانه، τ_b تنش برشی بستر بوده است، تنش برشی بحرانی بستر برای حرکت اولیه رسوب با استفاده از (رابطه ۱۰) محاسبه می‌شود (Wu et al., 2000).

$$\tau_c = 0.03(\rho_s - \rho_w)gd \quad (10)$$

۲-۲- ویژگی‌های مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش به جهت ارزیابی پدیده انتقال رسوب‌های بستر بر مبنای پدیده شکست آبی سد، ۴ آزمایش در شرایط مختلف تعریف و در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بابل پیاده‌سازی شده است. این فلوم به طول ۱۰ متر با عرض و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر مجهز به سطح سنج فراصوتی و فشار سنج دیجیتال بوده است. در شکل ۱ نمایی از جزئیات آزمایشگاه، فلوم و تجهیزات آن ارائه شده است.

در این آزمایش‌ها دو فراسنجه نوع مصالح رسوب‌های بستر (مصالح نوع A، مصالح نوع B) و همچنین ضخامت لایه رسوب در پایین دست سد و مخزن سد به عنوان متغیرهای مدل‌سازی مدنظر بوده است. در جدول ۱ پیش‌فرض‌های مدل‌های آزمایشگاهی به همراه جزئیات هر یک از مدل‌ها ارائه شده است. در ارزیابی پدیده انتقال رسوب یکی از اصلی‌ترین فراسنجه‌های موثر در انتقال رسوب‌ها و رسوب گذاری قطر ذرات رسوب می‌باشد، بر این مبنا در این پژوهش دو نوع مصالح که قطر نسبی ذرات آنها دارای اختلاف ملموسی بوده انتخاب شده است. مصالح نوع A ذرات درشت‌دانه با قطر میانگین ۲۰ میلی‌متر ($d_{50} = 20mm$) و مصالح نوع B ذرات ریزدانه با قطر میانگین ۳ میلی‌متر ($d_{50} = 3mm$) بوده است. در (شکل ۲-ا) منحنی دانه بندی مصالح نوع A و در (شکل ۲-ب) منحنی دانه بندی مصالح نوع B ارائه شده است.

در این پژوهش چهار آزمون آزمایشگاهی بر مبنای فراسنجه‌های ارائه شده در جدول ۱ تعریف و انجام شده اند، در (شکل ۳) نمایی از برپاسازی مدل آزمایشگاهی در شرایط اولیه برای هر یک از آزمایش‌ها نمایش داده شده است.

(شکل ۴-ا) در راستای بعد سوم به اندازه ۰/۵۰ متر (معادل با ابعاد فلوم آزمایشگاهی) توسعه یافته و هندسه کلی مدل‌های ۳ بعدی تعریف شده است. در شکل (۴-ب) هندسه کلی مدل شکست سد در فضای ۳ بعدی نمایش داده شده است.

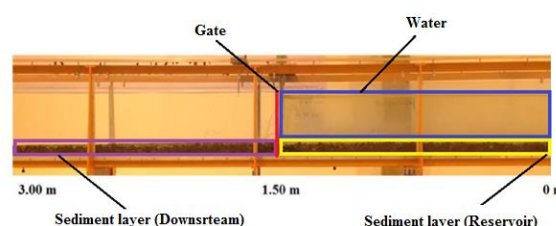


Fig.3 initial conditions of the laboratory model
شکل ۳ نمایی از برپاسازی شرایط اولیه مدل آزمایشگاهی

۲-۴- نظریه علمی حاکم بر مدلسازی عددی

فرایند مدلسازی عددی در آغاز با تعریف فضای مدلسازی که متشکل از ۳ ماده هوا، آب و لایه رسوب می‌اشد تعریف می‌شود. به جهت تعریف شرایط سیال‌های موجود در مدل فلوئنت و شبیه سازی برهمکنش بین حالت‌های مختلف، از مدل چند حالتی اوپلرین استفاده شده است، در این مدل سیال هوا به عنوان حالت اصلی محیط مدلسازی و دو حالت مایع و لایه رسوب به عنوان حالت‌های دوم و سوم محیط مدلسازی مدنظر بوده است. حالت مایع با اختصاص دادن سیال آب زلال در شرایط مایع تعریف می‌شود. برای تعریف حالت ذرات رسوب با تعریف ویژگی‌های مصالح رسوبی و اختصاص دادن ویژگی‌های مرتبط به این حالت، از نوع Granular پیاده‌سازی می‌شود. در فرایند مدلسازی عددی انتقال رسوب تعیین فراسنجه‌های اصلی حالت رسوب و همچنین برهمکنش بین حالت مایع و رسوب دارای اهمیت بوده است. بر این مبنا در آغاز در تعریف حالت رسوب ویژگی‌های این حالت و معادلات و رابطه‌های حاکم بر حرکت ذرات رسوب تعریف شده است. در تعریف حالت رسوب اولین فراسنجه موثر قطر ذرات رسوب بوده است که بر مبنای نوع مصالح به کارگیری شده در مدل‌های آزمایشگاهی از دو نوع A (ذرات درشت‌دانه) و نوع B (ذرات ریزدانه) با توجه به شرایط مدلسازی تعریف می‌شود. افزون بر این فراسنجه‌های اصلی در تعریف حالت رسوبها (اعم از: لزوجت، لزوجت ظاهری، فشار اصطکاک، زاویه داخلی ذرات رسوب و ...) که به عنوان اصلی‌ترین متغیرها در شبیه سازی پدیده انتقال رسوب در مدل فلوئنت به‌شمار می‌آید، برای مدل تعریف شده است. با توجه به ناشی از شکست سد که از نوع جریان آشفته می‌باشد، در مدل عددی باید رویه مدلسازی آشفتگی جریان هم تعریف شود، بر این مبنا با توجه به نتایج

۲-۳- آماده‌سازی مدل عددی

در این پژوهش مدلسازی عددی با بهره‌گیری از نرم‌افزار انسیس و مدل فلوئنت پیاده‌سازی و ویژگی‌ها و اجزاء مدل‌های عددی بر مبنای مدل‌های آزمایشگاهی ایجاد شده است. بر این اساس هندسه کلی مدل‌های عددی در فضای دو بعدی دارای طولی معادل با ۳ متر (۱.۵ متر مخزن سد، ۱.۵ متر پایین دست سد) و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر برای شکست آبی سد بوده است. افزون بر این با توجه به کلیت مدل شکست سد و همچنین به جهت مدلسازی پدیده انتقال رسوب‌های، فضای مدلسازی از ۳ ماده مختلف (۱- هوا، ۲- آب، ۳- ذرات رسوب) تشکیل شده است. در (شکل ۴-ا) هندسه کلی مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی شکست آبی سد در فضای ۲ بعدی نمایش داده شده است. با توجه به توضیح‌های ارائه شده در تصویر موقعیت اولیه هریک از سه ماده هوا، آب و لایه رسوب‌های بستر نمایش داده شده است. افزون بر این برای پیاده سازی مدل‌های عددی در فضای سه بعدی، مدل‌های دو بعدی ارائه شده

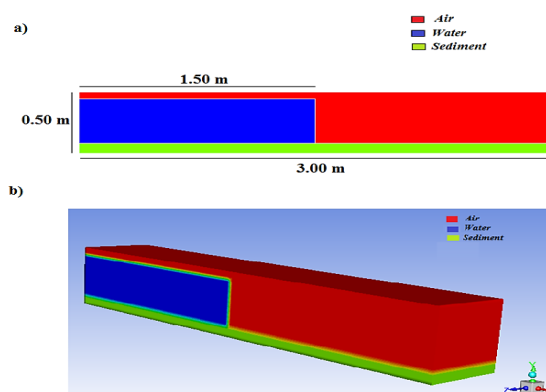


Fig.4 Geometry of numerical models, a) 2D model, b) 3D model

شکل ۴ نمایی از هندسه مدل‌های عددی پژوهش، (a) مدل دوبعدی، (b) مدل سه بعدی

در رابطه‌های ۱۱ تا ۱۴ فراسنجه μ بیانگر لزوجت سیال، چگالی سیال، ρ_p قطر ذرات رسوب، C_D ضریب دراگ، m_p تبادل جرم ذرات، k انرژی جنبشی آشفتگی جریان، ν لزوجت جنبشی سیال، Δt گام زمانی، Re عدد رینولدز و $d_{ik}d_{ij}d_{ki}$ مولفه‌های تانسور برش ذرات بوده‌است.

۲-۵- شرایط مرزی مدل‌سازی عددی

بر مبنای ماهیت مسئله مدل‌سازی شرایط مرزی برای برپاسازی مدل عددی تعریف شده است. بر این مبنای مدل عددی ایجاد شده دارای شرایط مرزی به شرح زیر بوده است. در شکل ۵ شرایط مرزی مدل عددی در فضای دو بعدی به صورت نمای کلی نمایش داده شده است. کف آبراهه دارای شرایط مرزی دیوار ثابت نفوذ ناپذیر بوده که بدون لغزش برای هریک از سه حالت ماده موجود در مسئله در نظر گرفته شده است. جداره پشت سد (مرز سمت چپ مدل) هم دارای شرایط مرزی دیوار ثابت نفوذ ناپذیر بوده که بدون لغزش برای هریک از سه حالت ماده موجود در مساله در نظر گرفته شده است. قسمت بالای مدل (مرز بالای مدل عددی) دارای شرایط مرزی سطح آزاد بوده است. مرز سمت راست مدل از نوع مرز خروجی در نظر گرفته شده است و شرط مدنظر عدم بازگشت جریان برگشتی برای هریک از حالت‌ها تعریف شده است.

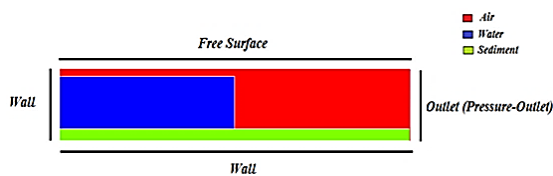


Fig.5 Boundary conditions in numerical models
شکل ۵ شرایط مرزی در مدل‌های عددی پژوهش

۲-۶- شرایط اولیه و پیش‌فرض‌های مدل‌سازی

در فرایند مدل‌سازی عددی پدیده انتقال رسوب بر مبنای شکست سد، شرایط اولیه مدل‌سازی بر مبنای ویژگی‌های اصلی مدل از جمله ارتفاع آب پشت سد، نوع مصالح رسوب‌ها، ضخامت لایه رسوب و ... تعیین می‌شود. بر این مبنای در این بخش در آغاز پیش‌فرض‌های مختلف مدل‌سازی عددی بررسی شده است. به جهت واسنجی مدل‌های عددی در آغاز مدل آزمایشگاهی A1 با بهره‌گیری از مدل

کارآمد مدل آشفتگی دو جمله‌ای (k-ε) در مدل‌سازی جریان‌های شکست سد (Kocaman et al., Rodi (2017)). دو مدل آشفتگی (k-ε/Standard) و (k-ε/RNG) برای حل ترم آشفتگی معادله مومنتوم در مدل عددی به کارگیری شده و حساسیت‌سنجی نسبت به عملکرد مدل بر مبنای این دو مدل آشفتگی انجام شده است. پس از تعریف سه مرحله اصلی مدل‌سازی و همچنین تعیین ویژگی‌های هر مرحله نیاز است تا برهمکنش بین حالت‌های مختلف و مدل‌های محاسبه‌شدنی مناسب و کارآمد در مدل فلونت تعیین شود، در این راستا تعیین ۳ فراسنجه اصلی (۱- مدل محاسبه‌شدنی Drag، ۲- مدل محاسبه‌شدنی Lift، ۳- مدل محاسبه‌شدنی Surface Tention) به مدل معرفی شده است.

در مدل فلونت با جداسازی حالت‌های سیال و رسوب فرآیند شبیه‌سازی فعل‌وانفعال‌های بین ذرات سیال و ذرات جامد رسوب با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی می‌شود. در مدل فلونت معادله‌های حاکم بر این فعل‌وانفعال‌ها که منجر به شبیه‌سازی پدیده انتقال رسوب‌ها می‌شود به شرح زیر فرمول‌بندی می‌شود (Selim et al., 2022):
محاسبه نیروی دراگ ذرات رسوب:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، Re عبارت است از:

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (12)$$

محاسبه نیروی لیفت:

$$\vec{F} = \frac{2kv^{1/2}\rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ik}d_{ki})^{1/2}} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (13)$$

بر مبنای رابطه‌های ۱۱ و ۱۳ (محاسبه نیروهای درگ و لیفت ذرات سیال) مبادله مومنتوم بین حالت سیال و رسوب بر مبنای رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{24d_p^2 \rho_p} (u_p - u) + F_{other} \right) m_p \Delta t \quad (14)$$

آزمایشگاهی (A1, A2, B1, B2) تحت مدلسازی شده‌اند و پس از بررسی نتایج و دستیابی به اطمینان از عملکرد قابل قبول مدل عددی مدلسازی در فضای سه بعدی تعریف شده است، به بیان دیگر به جهت ارزیابی و مدلسازی عددی پدیده شکست سد و به تبع آن انتقال رسوب‌های بستر ۲ مدل در فضای سه بعدی با در نظر گرفتن دو نوع مصالح رسوب‌های مدلسازی شده است. سناریوهای مختلف مدلسازی عددی در جدول ۲ ارائه شده است.

فلوئنت مدل‌سازی عددی شده و نتایج بدست آمده نسبت به دو فراسنجه حل عددی (۱-اندازه عنصر-مش‌بندی، ۲-مدل آشفتگی) حساسیت‌سنجی شده‌است. در این مرحله با در نظر گرفتن سه اندازه مختلف (۰/۵، ۱ و ۲ سانتی‌متر) برای مش‌بندی و همچنین در نظر گرفتن دو مدل آشفتگی شبیه‌سازی عددی انجام شده‌است. در جمع پنج مدل برای واسنجی و دستیابی به میزان‌های بهینه فراسنجه‌های مذکور تعریف شده‌است. پس از واسنجی مدل عددی به جهت ارزیابی عملکرد مدل در آغاز ۴ مدل

جدول ۲ پیش‌فرض‌های مدل‌سازی عددی (ویژگی‌های مدل)

Table 2 Numerical modeling scenarios (specifications)

Description	Water depth	S. Thickness (reservoir)	S. Thickness (downstream)	Sediment particles	Test Code
Mesh size: 0.5 cm	37 cm	8 cm	8 cm	A	CA0
Mesh size: 1 cm	37 cm	8 cm	8 cm	A	CA1
Mesh size: 2 cm	37 cm	8 cm	8 cm	A	CA2
Turbulence Model: k- ϵ /Standard	37 cm	8 cm	8 cm	A	CA3
Turbulence Model: k- ϵ /RNG	37 cm	8 cm	8 cm	A	CA4
According to A1	37 cm	8 cm	8 cm	A	DB1_NA1
According to B1	37 cm	8 cm	8 cm	B	DB1_NB1
According to A2	30 cm	5 cm	15 cm	A	DB1_NA2
According to B2	30 cm	5 cm	15 cm	B	DB1_NB2
According to A1 (3D)	37 cm	8 cm	8 cm	A	3D_DB1_NA1
According to B1 (3D)	37 cm	8 cm	8 cm	B	3D_DB1_NA2

ثانیه رخ داده‌است و در عمل با افزایش زمان آزمایش برای میزان‌های بیشتر از ۲ ثانیه تغییرپذیری‌های قابل توجهی در ضخامت لایه رسوب ایجاد نشده است. همچنین بنا بر نتایج به‌دست آمده مشخص می‌شود که تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب در عمل در فاصله طولی ۱/۵ متر پشت دریچه سد و ۱/۵ متر از دریچه سد به سمت پایین دست رخ داده است. نیمرخ طولی و موقعیت‌دهی آبراهه آزمایشگاه در شکل ۳ ارائه شده است. به جهت ارزیابی دقیق نتایج و همچنین کمی‌سازی میزان‌های تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب در آزمایش‌های مختلف، نیمرخ تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب در فاصله طولی ۳ متر (۱/۵ متر در مخزن سد و ۱/۵ متر در پایین دست) برای چهار مدل آزمایشگاهی ارزیابی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی

مدل‌های آزمایشگاهی بر مبنای پیش‌فرض‌های تعریف شده در جدول ۱ پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل که بیانگر تغییرپذیری‌های نیمرخ سطح آب و نیمرخ تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب‌های بستر بوده استخراج گردیده است. در شکل ۶ روند تغییرپذیری‌های سطح آزاد آب و ضخامت لایه رسوب‌های بستر در بازه زمانی (t=0, 2.5 s) در گام‌های زمانی ۰/۵ ثانیه برای مدل آزمایشگاهی A1 به عنوان نمونه نمایش داده شده است. بنا بر نتایج بدست آمده از مدل‌های آزمایشگاهی (A1, A2, B1, B2) مشخص شد که بیشترین میزان تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب‌های بستر در بازه زمانی صفر تا ۲

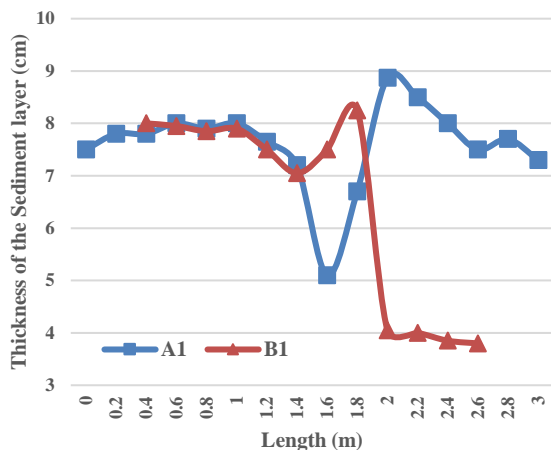


Fig.7 Comparison of the results of two experimental runs A1, B1 (changes in sediment layer profile)

شکل ۷ مقایسه نتایج به دست آمده از دو مدل آزمایشگاهی A1, B1 (تغییر پذیری‌های نیم‌رخ لایه رسوب)

در مدل B1 در محدوده ۱/۴ تا ۱.۸ متر (محدوده دریچه سد) میزان کاهش لایه رسوب کمتر از مدل A1 بوده و همچنین میزان رسوب گذاری دارای میزان ناچیزی نسبت به ضخامت اولیه لایه رسوب بوده است. با ارزیابی نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که در منطقه شکست سد (پیرامون موقعیت دریچه باز شو (تراز ۱/۵ متر طولی) در هر دو مدل در آغاز کاهش لایه رسوب و بعد از آن افزایش لایه رسوب رخ داده است. همچنین به روشنی مشخص می‌شود که در مدل A1 میزان کاهش و افزایش ضخامت لایه رسوب پیرامون منطقه شکست دارای میزان‌های بیشتری نسبت به مدل B1 بوده است که با توجه به نوع مصالح نوع A که دارای ذرات با قطر نسبی بزرگتر نسبت به مصالح نوع B بوده عامل موثر می‌باشد. با ارزیابی نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که کاهش ضخامت لایه رسوب در پایین دست سد (پروفیل طولی ۱/۸ تا ۲/۶ متر) در مدل B1 دارای میزان‌های بیشتری نسبت به مدل آزمایشگاهی A1 بوده است. علت این مساله را به واسطه تغییر در نوع مصالح و تنش برشی بحرانی کمتر برای لایه رسوب در مدل B1 می‌توان مرتبط نمود که جریان ناشی از شکست سد باعث فرسایش و جابجایی ذرات رسوبی در پایین دست شده است. در شکل ۸ مقایسه تغییر پذیری‌های نیم‌رخ لایه رسوب در دو مدل آزمایشگاهی A2, B2 ارائه شده است، در هر دو مدل

شده است.

در آزمایش‌های A1 و B1 همه شرایط انجام آزمایش شکست سد اعم از ارتفاع آب پشت سد، ضخامت لایه رسوب در پایین دست، ضخامت لایه رسوب در مخزن سد به کلی یکسان بوده و تنها متغیر موجود بین دو مدل آزمایشگاهی نوع مصالح رسوب می‌باشد که در آزمایش A1 ذرات رسوب از مصالح نوع A (ذرات درشت‌دانه) و در مدل آزمایشگاهی B1 ذرات رسوب از مصالح نوع B (ذرات ریزدانه) تشکیل شده است. به جهت ارزیابی دقیق و انجام مقایسه‌ها بین نتایج بدست آمده از دو مدل آزمایشگاهی پروفیل لایه رسوب‌های بستر در دو مدل آزمایشگاهی A1, B1 در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می‌شود (شکل ۷)، که میزان تغییر پذیری‌های ضخامت لایه رسوب‌های مخزن سد تا نیم‌رخ طولی ۱/۴ متر در دو مدل آزمایشگاهی تاحدودی یکسان بوده است، در مدل A1 از نیم‌رخ طولی ۱/۴ متر تا ۱/۸ متر (محدوده دریچه باز شو سد) شاهد کاهش چشم گیر لایه رسوب و از پروفیل طولی ۲ تا ۲/۴ متر شاهد افزایش لایه رسوب نسبت به ضخامت اولیه لایه (۸ سانتی متر) بوده ایم.

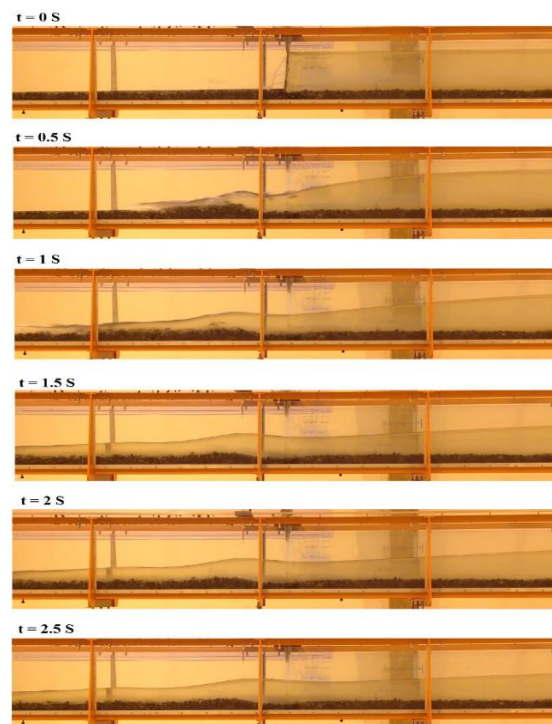


Fig.6 Results of the laboratory model A1
شکل ۶ نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی A1

اولیه لایه رسوب کاهش یافته و از تراز ۱/۶ متر (محل شکست سد) تا تراز ۲ متر شاهد رسوب گذاری و افزایش ضخامت لایه رسوب نسبت به ضخامت اولیه (۵ سانتی متر) بوده‌ایم. در هر دو مدل برای موقعیت‌های طولی پس از تراز ۲ متر روند کاهشی ضخامت لایه رسوب‌های بستر مشاهده شده است.

۲-۳- نتایج مدل سازی عددی

به جهت صحت‌سنجی مدل‌های عددی در این پژوهش، با در نظر گرفتن مدل آزمایشگاهی A1 بررسی‌هایی بر مبنای ارزیابی حساسیت مدل‌های عددی به دو پارامتر اساسی حل عددی: ۱- اندازه مش‌بندی، ۲- مدل آشفتگی تعریف شده است. برای مینا مدل عددی بر پایه ویژگی‌های مدل آزمایشگاهی A1 برپاسازی شده است و نتایج به دست آمده از پنج مدل سازی و اسنجی (بر مبنای (جدول ۲) مدل‌های CA0, CA1, CA2, CA3, CA4) با نتایج به دست آمده از آزمون آزمایشگاهی مقایسه و ارزیابی شده است. برای ارزیابی اندازه مش‌بندی محیط حل، مدل آزمایشگاهی A1 بر مبنای سه اندازه مش‌بندی (۰/۵، ۱ و ۲ سانتی متر) ایجاد و نتایج حاصل از مدل سازی عددی با نتایج آزمون آزمایشگاهی مقایسه و اعتبار سنجی شده است.

در (جدول ۳) میزان ضخامت لایه رسوب در موقعیت‌های طولی مختلف ($x = 0-3 \text{ m}$) برای سه مدل عددی (CA0, CA1, CA2) و همچنین میزان تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب در مدل آزمایشگاهی A1 ارائه شده است. افزون بر این میزان درصد خطای مدل سازی عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی بررسی شده است. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که مدل CA0 با اندازه مش ۰/۵ سانتی متر دارای میانگین خطای ۲/۰۷ درصد، مدل CA1 با اندازه مش ۱ سانتی متر دارای میانگین خطای ۲/۴۱ درصد و مدل CA2 با اندازه مش ۲ سانتی متر دارای میانگین خطای ۸/۴۷ درصد بوده است. با بررسی نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که با کاهش اندازه مش بندی از ۲ سانتی متر (مدل CA2) به ۱ سانتی متر (مدل CA1) میزان میانگین خطای مدل سازی حدوداً ۶ درصد کاهش یافته است. همچنین با مقایسه نتایج بین دو مدل CA0 و

ضخامت لایه رسوب در مخزن ۱۵ سانتی متر و در پایین دست ۵ سانتی متر بوده و تنها فراسنجه متغیر نوع مصالح در دو آزمایش می‌باشد.

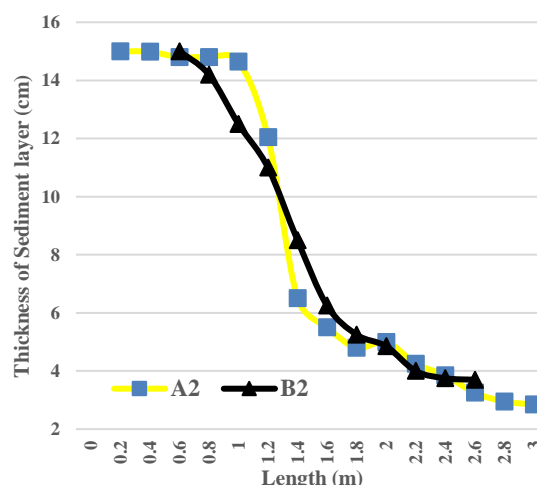


Fig.8 Comparison of the results of two experimental runs A2, B2 (changes in sediment layer profile)

شکل ۸ مقایسه نتایج به دست آمده از دو مدل آزمایشگاهی A2, B2 (تغییرپذیری‌های نیمرخ لایه رسوب)

با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته بین نتایج به دست آمده از دو مدل آزمایشگاهی A2, B2 (شکل ۸)، مشخص می‌گردد که روند تغییرپذیری‌های نیمرخ رسوب‌های بستر در هر دو مدل همانند بوده است اما در مدل آزمایشگاهی B2 از پروفیل طولی ۰/۸ متر کاهش ضخامت لایه رسوب (نسبت به ضخامت اولیه لایه رسوب‌های مخزن که معادل با ۱۵ سانتی متر بوده) آغاز شده و از تراز ۱/۶ تا ۲ متر افزایش ضخامت لایه رسوب نسبت به ضخامت اولیه که معادل با ۵ سانتی متر است، مشاهده می‌شود. در مدل آزمایشگاهی A2 ضخامت لایه رسوب تا تراز ۱ متر تا حدودی ثابت و بدون تغییرپذیری‌های چشم گیر نسبت به ضخامت اولیه لایه رسوب (۱۵ سانتی متر) بوده است و از نیمرخ طولی ۱ متر تا ۱/۵ متر (ناحیه دریچه سد) کاهش ضخامت لایه رسوب مشاهده شده است.

با بررسی نتایج به دست آمده از دو مدل آزمایشگاهی مشخص شد که روند تغییرپذیری‌های نیمرخ بستر در ناحیه پیش از دریچه سد (از نیمرخ طولی ۰/۶ متر در مدل B2 و از تراز ۱ متر در مدل A2) نسبت به ضخامت

جدول ۴ اعتبارسنجی نتایج مدل‌های عددی CA3, CA4

X	A1	CA3	Err Model	CA4	Err
		k-e Standard	CA3 %	k-e RNG	Model CA4 %
0	7.5	7.2	4.00	7.2	4.00
0.2	7.8	7.75	0.64	7.75	0.64
0.4	7.8	7.85	0.64	7.85	0.64
0.6	8	7.9	1.25	7.85	1.88
0.8	7.9	7.8	1.27	7.7	2.53
1	8	8	0.00	7.85	1.88
1.2	7.65	7.8	1.96	7.85	2.61
1.4	7.2	7.6	5.56	7.7	6.94
1.6	5.1	6.25	22.55	7	37.25
1.8	6.7	7	4.48	7	4.48
2	8.87	8.8	0.79	8.1	8.68
2.2	8.5	8.5	0.00	8.25	2.94
2.4	8	8	0.00	7.8	2.50
2.6	7.5	7.45	0.67	7.1	5.33
2.8	7.7	7.68	0.26	7	9.09
3	7.3	7.3	0.00	6.5	10.96
Average Error %			2.75	6.40	

است.

پس از واسنجی مدل عددی، شبیه‌سازی بر مبنای پیش‌فرض‌های مدل‌سازی ارائه شده در جدول ۲ پیاده‌سازی و اجرا شده‌است. چهار مدل عددی (DB1_NA1, DB1_NB1, DB1_NA2, DB1_NB2) شبیه‌سازی ۴ مدل آزمایشگاهی بوده که به جهت ارزیابی عملکرد و دقت مدل‌سازی عددی نتایج حاصل مقایسه و ارزیابی شده است. در شکل ۹ نیمرخ تغییرپذیری‌های تراز آب و همچنین تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب برای مدل عددی DB1_NA1 به عنوان نمونه در گام‌های زمانی ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ ثانیه ارائه شده است. در راستای ارزیابی و بررسی دقیق عملکرد مدل عددی نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی، میزان تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج به‌دست‌آمده از ۴ مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب و میزان دقت مدل‌سازی عددی نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص

CA1 مشخص می‌شود که در عمل با کاهش اندازه مش‌بندی از ۱ سانتی‌متر به ۰/۵ سانتی‌متر میانگین خطای مدل‌سازی کاهش چشم‌گیری نیافته و میانگین خطای مدل‌سازی در محدوده ۲ درصد بوده‌است. بر این مبنای مدل عددی CA1 با اندازه مش یک سانتی‌متری دارای دقت قابل‌قبولی برای مدل‌سازی تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی بستر تحت شکست سد بوده‌است.

جدول ۳ اعتبارسنجی نتایج (نیمرخ تغییرپذیری‌های بستر

رسوبی) به‌دست‌آمده از مدل‌های عددی CA0, CA1, CA2

X	A1	CA0	CA1	CA2
0	7.5	7.6	7.6	8.1
0.2	7.8	7.75	7.7	7.9
0.4	7.8	7.85	7.85	7.95
0.6	8	7.78	7.9	7.8
0.8	7.9	7.81	7.8	8
1	8	7.88	7.85	7.8
1.2	7.65	7.55	7.5	7.2
1.4	7.2	7.12	7.1	6.85
1.6	5.1	5.75	6	8
1.8	6.7	6.75	6.8	8.1
2	8.87	8.78	8.8	7.9
2.2	8.5	8.35	8.35	8.1
2.4	8	8.15	8.1	8.15
2.6	7.5	7.65	7.6	8
2.8	7.7	7.55	7.5	7.9
3	7.3	7.34	7.35	7.5
Average Error		2.07%	2.41%	8.47%

به‌جهت ارزیابی و واسنجی مدل عددی نسبت به مدل آشفتگی جریان در این بخش دو مدل آشفتگی دو جمله‌ای (k-ε/Standard, k-ε/RNG) برای حل ترم آشفتگی معادله مومنتوم ارزیابی قرار شده‌است. بر این مبنای مدل آزمایشگاهی A1 با بهره‌گیری از مدل آشفتگی k-ε/Standard (مدل CA3) و مدل آشفتگی k-ε/RNG (مدل CA4) در نرم افزار فلوئنت شبیه‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های CA3, CA4 با نتایج تست آزمایشگاهی (مدل A1) بررسی شده‌است (جدول ۴).

با توجه به نتایج ارائه شده در (جدول ۴) به‌وضوح مشخص می‌شود که مدل عددی CA3 که از مدل دو جمله‌ای k-ε/Standard برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده می‌شود دارای دقت بالاتری نسبت به مدل k-ε/RNG بوده

می‌باشند، انجام شده‌است. برای مبنای مقایسه‌ای بین دو مدل (DB1_NA1 vs DB1_NB1) و (DB1_NA2 vs DB1_NB2) صورت گرفته و نیمرخ تغییرپذیری‌های لایه رسوب‌ها در شکل ۱۱ ارائه شده است. افزون بر این به جهت ارزیابی کمی تاثیر فراسنجه نوع مصالح رسوب در پدیده انتقال رسوب در جدول ۵ مقادیر میانگین‌های ضخامت لایه رسوب و همچنین درصد کاهش ضخامت لایه رسوب برای هریک از مقایسه‌ها انجام شده ارائه شده است.

می‌شود که میزان میانگین خطای مدل‌سازی در مدل عددی نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی در هر ۴ مدل، حدوداً ۵٪ بوده، که بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی ایجادشده در شبیه‌سازی انتقال رسوب لایه بستر تحت جریان سیال از شکست سد بوده‌است. به جهت بررسی تاثیر نوع مصالح ذرات رسوب و همچنین ارزیابی تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب در مخزن و پایین دست محور سد مقایسه‌ای بین مدل‌هایی که از نظر ویژگی‌ها و جزییات مدل‌سازی همچون ضخامت لایه رسوب به کلی یکسان بوده اند و تنها در نوع ذرات رسوب متفاوت

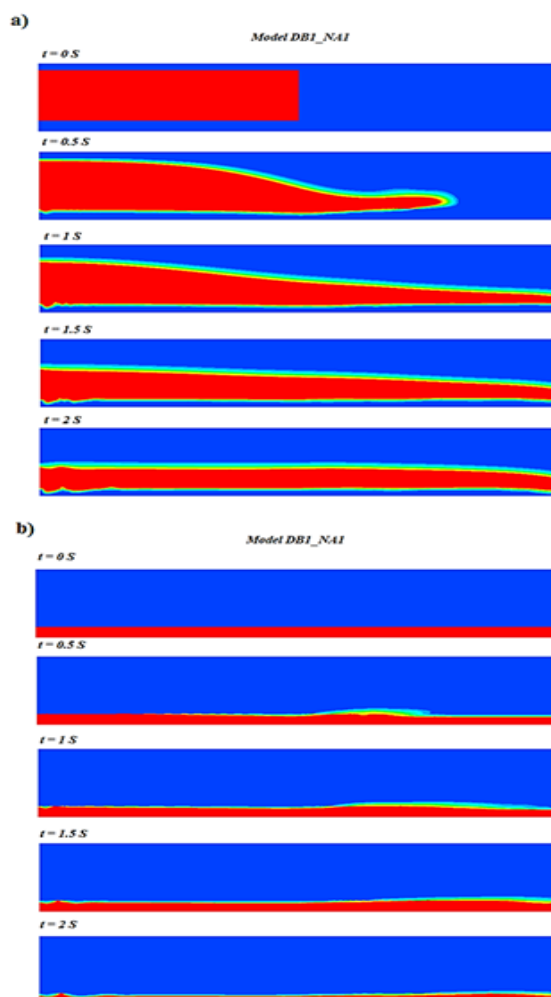


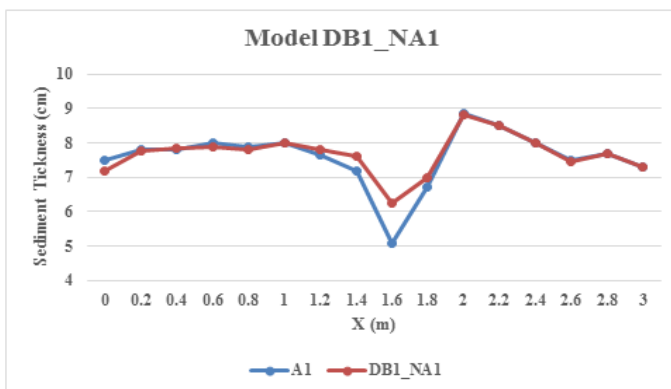
Fig. 9 Results of the DB1_NA1 model, a) water level profile, b) sediment layer

شکل ۹ نتایج به دست آمده از مدل DB1_NA1، (a) تغییرپذیری‌های نیمرخ سطح آب، (b) تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب

که دارای مصالح رسوب با نوع A (ذرات درشت‌دانه) بوده‌اند، بیشتر می‌باشد، به بیان دیگر میزان کاهش ضخامت لایه رسوب در نوع مصالح B بیشتر از نوع مصالح

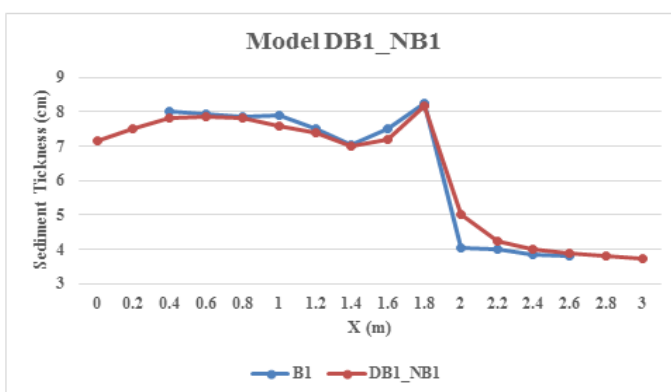
با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌شود، در مدل‌هایی که دارای مصالح رسوب از نوع B (ذرات ریزدانه) بوده میزان کاهش ضخامت لایه رسوب نسبت به مدل‌هایی

a)



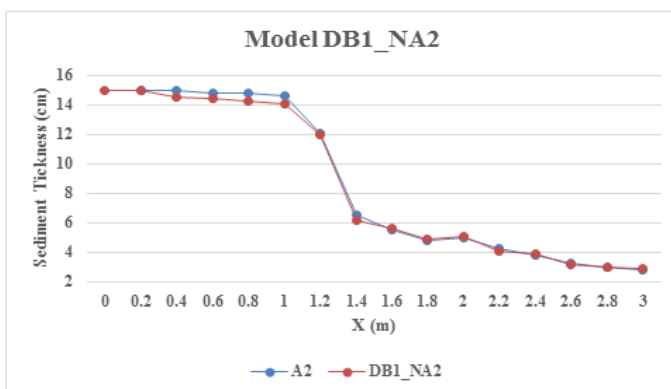
X	A1	DB1_NA1	Error %
0	7.5	7.2	4.00
0.2	7.8	7.75	0.64
0.4	7.8	7.85	0.64
0.6	8	7.9	1.25
0.8	7.9	7.8	1.27
1	8	8	0.00
1.2	7.65	7.8	1.96
1.4	7.2	7.6	5.56
1.6	5.1	6.25	22.55
1.8	6.7	7	4.48
2	8.87	8.8	0.79
2.2	8.5	8.5	0.00
2.4	8	8	0.00
2.6	7.5	7.45	0.67
2.8	7.7	7.68	0.26
3	7.3	7.3	0.00
Average Error %			2.75 %

b)



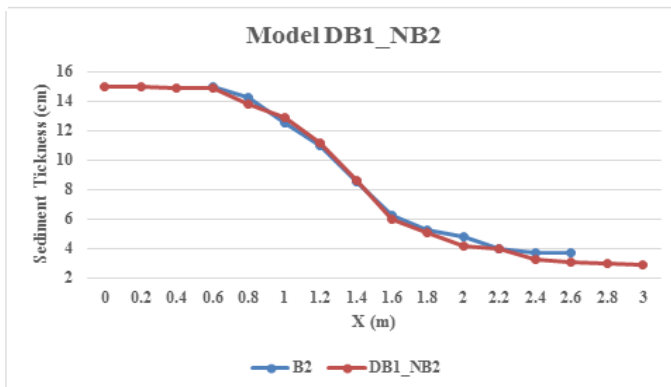
X	B1	DB1_NB1	Error %
0	-	7.15	-
0.2	-	7.5	-
0.4	8	7.8	2.50
0.6	7.95	7.85	1.26
0.8	7.85	7.8	0.64
1	7.9	7.6	3.80
1.2	7.5	7.4	1.33
1.4	7.05	7	0.71
1.6	7.5	7.2	4.00
1.8	8.25	8.15	1.21
2	4.05	5	23.46
2.2	4	4.25	6.25
2.4	3.85	4	3.90
2.6	3.8	3.9	2.63
2.8	-	3.8	-
3	-	3.75	-
Average Error %			4.31 %

c)



X	A2	DB1_NA2	Error %
0	-	15	-
0.2	15	15	-
0.4	15	15	2.50
0.6	15	15	1.26
0.8	15	14	0.64
1	15	14	3.80
1.2	12	12	1.33
1.4	6.5	6.2	0.71
1.6	5.5	5.6	4.00
1.8	4.8	4.9	1.21
2	5	5.1	23.46
2.2	4.3	4.1	6.25
2.4	3.9	3.9	3.90
2.6	3.3	3.2	2.63
2.8	3	3	-
3	2.9	2.9	-
Average Error %			2.59 %

d)



X	B2	DB1_NB2	Error %
0	-	15	-
0.2	-	14.95	-
0.4	-	14.9	-
0.6	15	14.85	1.00
0.8	14.2	13.75	3.17
1	12.5	12.9	3.20
1.2	11	11.2	1.82
1.4	8.5	8.6	1.18
1.6	6.25	6	4.00
1.8	5.25	5.1	2.86
2	4.85	4.2	13.40
2.2	4	3.98	0.50
2.4	3.75	3.25	13.33
2.6	3.7	3.1	16.22
2.8	-	3	-
3	-	2.9	-
Average Error %			5.52 %

Fig. 10 Results of the performance of the numerical model

شکل ۱۰ نتایج به دست آمده از عملکرد مدل عددی انتقال رسوب در نتیجه شکست سد

میزان کاهش ضخامت لایه رسوب در نوع مصالح B (ذرات ریزدانه) بیشتر از نوع مصالح A (ذرات درشت‌دانه) بوده است. با توجه به ویژگی‌های مصالح نوع A, B روشن است که مصالح نوع B دارای قطر ذرات کوچکتری نسبت به مصالح نوع A بوده است. بنابراین کاهش قطر ذرات رسوب و کاهش تنش برشی بحرانی، باعث افزایش نرخ انتقال رسوب در نتیجه شکست سد شده است. پس از اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل عددی ایجاد شده، دو مدل شکست سد در فضای سه بعدی (3D_DB1_NA1, 3D_DB1_NB1) بر مبنای ویژگی‌های ارائه شده در جدول ۲ پیاده‌سازی و اجرا شده است. در این دو مدل ضخامت لایه رسوب در مخزن و پایین دست سد معادل با ۸ سانتی متر در نظر گرفته شده و عمق آب پشت سد پیش از شکست ۳۷ سانتی متر بوده است.

در شکل ۱۲ نیم‌رخ تغییرپذیری‌های سطح آب و تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب در بازه زمانی صفر تا ۲ ثانیه برای مدل 3D_DB1_NB1 ارائه شده است. به جهت ارزیابی چگونگی شکل‌گیری ناهمواری بستر، بردارهای سرعت جریان سیال در پلان برای 3D_DB1_NA1 در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

به جهت مقایسه و ارزیابی تاثیر نوع مصالح تشکیل دهنده لایه رسوب‌ها در الگوی انتقال رسوب‌ها و تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی بستر، در شکل ۱۴ هم‌ترازی تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب برای دو مدل (3D_DB1_NB1, 3D_DB1_NA1) نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود که میزان ضخامت لایه رسوب در مدل 3D_DB1_NB1 با مصالح نوع B، نسبت به مدل 3D_DB1_NA1 با مصالح نوع A، کاهش بیشتری یافته است که با توجه به قطر ذرات مصالح نوع B که دارای قطری کوچکتر نسبت به ذرات مصالح نوع A بوده، توجیه پذیر بوده است. افزون بر این با توجه به هم‌تراز تغییرپذیری‌های ضخامت لایه بستر (شکل ۱۳) مشخص می‌گردد که در مدل 3D_DB1_NA1 میزان افزایش ضخامت لایه رسوب در ترازهای ۱.۸ تا ۲ متر میزان‌های بیشتری نسبت به مدل 3D_DB1_NB1 یافته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود

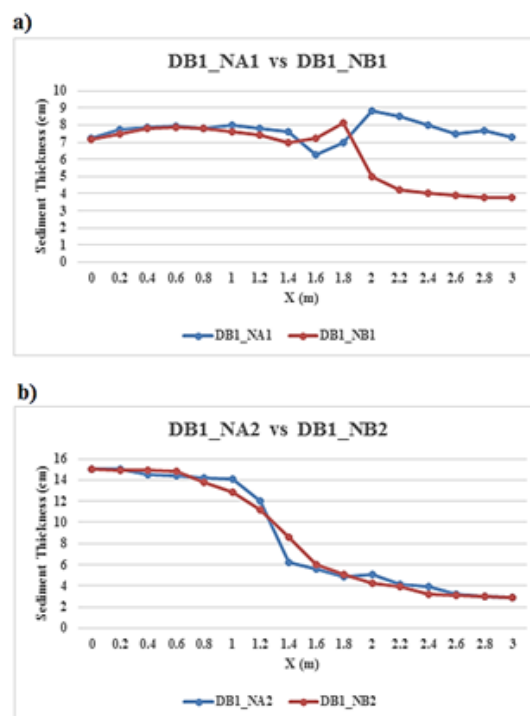


Fig.11 The results of numerical modeling (evaluation of sediment layer material parameter)

شکل ۱۱ نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی (ارزیابی فراسنجه مصالح لایه رسوب)

جدول ۵ ارزیابی میزان تاثیر نوع مصالح رسوب

Table 5 Evaluation of the impact of sediment material

Percentage reduction in thickness	Average thickness of sediment layer (cm)	Numerical model	Comparative models
18.50 %	7.68	DB1_NA1	DB1_NA1 vs DB1_NB1
	6.26	DB1_NB1	
16.58 %	8.63	B1_NA2	DB1_NA2 vs DB1_NB2
	7.20	DB1_NB2	

A بوده است. با توجه به ویژگی‌های مصالح نوع A, B روشن است که مصالح نوع B دارای قطر ذرات کوچکتری نسبت به مصالح نوع A بوده است. بنابراین کاهش قطر ذرات رسوب باعث افزایش نرخ انتقال رسوب در نتیجه شکست سد بواسطه تنش برشی بحرانی کمتر، شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود، در مدل‌هایی که دارای مصالح رسوب از نوع B بوده میزان کاهش ضخامت لایه رسوب نسبت به مدل‌هایی که دارای مصالح رسوب با نوع A بوده، بیشتر می‌باشد. به بیان دیگر

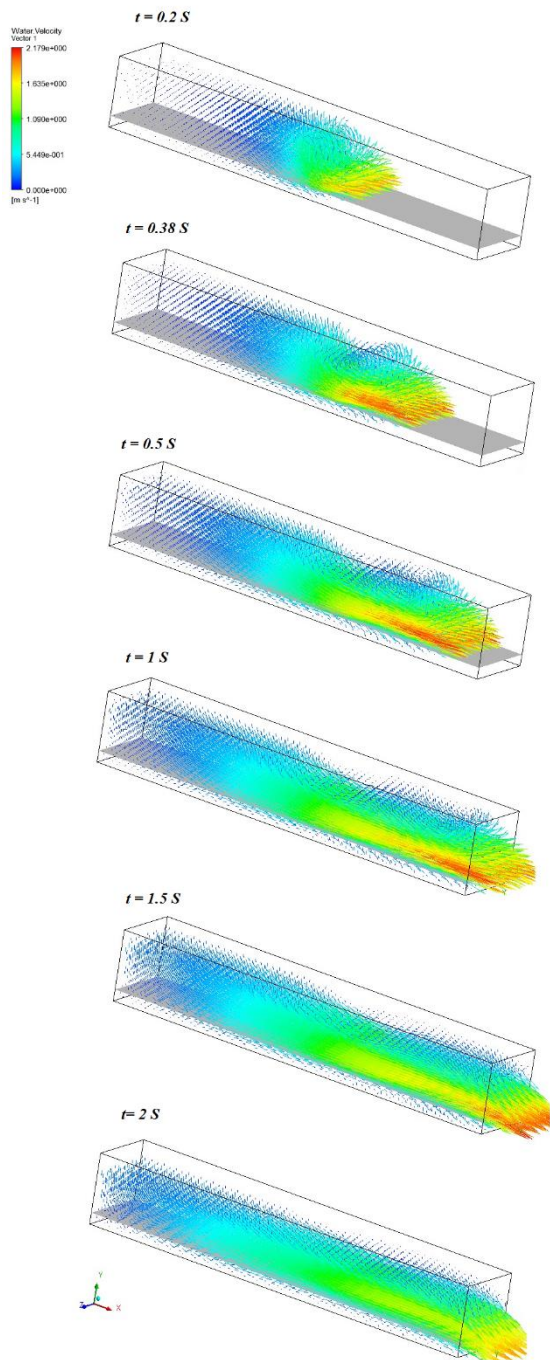


Fig.13 Flow velocity vectors in 3D modeling

شکل ۱۳ تغییرپذیری‌های سرعت برداری جریان در مدل‌سازی در فضای ۳ بعدی

که نوع مصالح ذرات رسوب یا به بیان دیگر قطر ذرات رسوب به عنوان عامل موثر در ارزیابی پدیده انتقال رسوب در فضای مدل‌سازی سه بعدی بوده است. در هر دو مدل ضخامت لایه رسوب در محدوده درپچه سد (ناحیه شکست) روند کاهشی داشته و در محدوده ۱.۸ تا ۲ متر افزایش و از ۲.۲ تا ۳ متر کاهش یافته است.

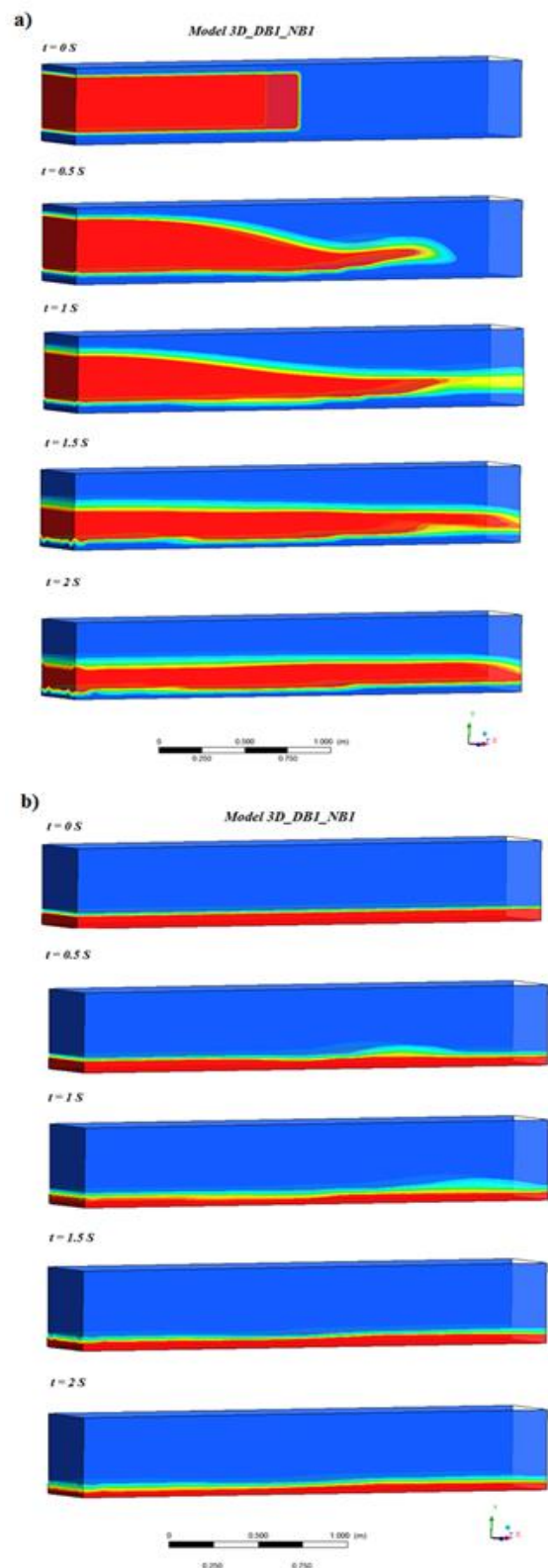


Fig.12 The results of the 3D_DB1_NB1 model, a) water surface profile, b) thickness of the sediment layer

شکل ۱۲ نتایج به دست آمده از مدل 3D_DB1_NB1 (a) تغییرپذیری‌های نیمرخ سطح آب، (b) تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب

پدیده انتقال رسوب در نتیجه شکست سد بوده است، به گونه‌ای که خطای مدل‌سازی برای مدل‌های عددی دوبعدی (۴ مدل اول بر اساس جدول ۲) به ترتیب برابر با ۲/۷۵٪، ۴/۳۱٪، ۲/۵۹٪، ۵/۵۲٪ نسبت به تست‌های آزمایشگاهی بوده است.

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که در مدل‌های دارای مصالح رسوب از نوع B میزان کاهش ضخامت لایه رسوب نسبت به مدل‌های دارای مصالح رسوب با نوع A بیشتر می‌باشد، به بیان دیگر میزان کاهش ضخامت لایه رسوب در نوع مصالح B بیشتر از نوع مصالح A بوده است. بنابراین کاهش قطر ذرات رسوب باعث افزایش تغییرپذیری‌های ضخامت لایه رسوب (ریخت‌شناسی بستر) در نتیجه شکست آنی سد شده است. افزون بر این با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مشخص شد که لایه رسوب مخزن سد به عنوان یک فراسنجه موثر در نرخ انتقال رسوب و رخداد تغییرپذیری‌ها در ریخت‌شناسی بستر بر مبنای جریان‌های شکست سد بوده، به گونه‌ای که با افزایش ضخامت لایه رسوب‌های مخزن سد نسبت به لایه رسوب پایین‌دست، مقادیر تغییرپذیری‌های ضخامت لایه بستر در حدود ۱۰٪ و همچنین نرخ انتقال رسوب‌ها در این شرایط افزایش یافته است.

با ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی شکست سد در فضای سه بعدی مشخص می‌شود که میزان ضخامت لایه رسوب در مدل 3D_DB1_NB1 با مصالح نوع B، نسبت به مدل 3D_DB1_NA1 با مصالح نوع A، کاهش بیشتری یافته است که با توجه به قطر ذرات مصالح تیپ B که دارای قطری کوچکتر نسبت به ذرات مصالح A بوده، توجیه‌پذیر بوده است. افزون بر این با توجه به کانتور تغییرپذیری‌های ضخامت لایه بستر مشخص می‌شود که نوع مصالح ذرات رسوب یا به بیان دیگر قطر ذرات رسوب به عنوان عامل موثر در ارزیابی پدیده انتقال رسوب در فضای مدل‌سازی سه بعدی بوده است. در هر دو مدل ضخامت لایه رسوب در محدوده دریچه سد (ناحیه شکست) روند کاهشی داشته و در محدوده ۱/۸ تا ۲ متر افزایش و از ۲/۲ تا ۳ متر کاهش یافته است.

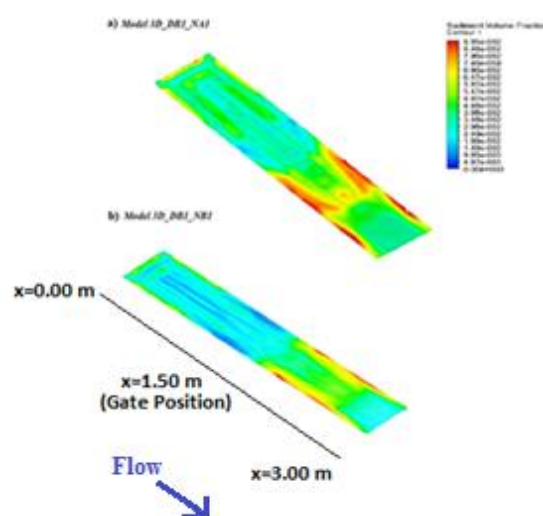


Fig.14 Comparison between bed sediment contours in 3D space modeling

شکل ۱۴ مقایسه بین هم‌تراز تغییرپذیری‌های رسوب‌های بستر در مدل‌سازی در فضای ۳ بعدی

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش هدف اصلی ارزیابی سازوکار انتقال رسوب در نتیجه شکست آنی سد با تمرکز بر تاثیر لایه رسوب‌ها در مخزن سد بوده که در قالب مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی پیاده‌سازی شده است. همچنین تاثیر سه فراسنجه نوع ذرات رسوب و ضخامت لایه رسوب در مخزن و پایین دست محور سد مطالعه شده است.

با توجه به متغیرهای پژوهش، ۴ پیش‌فرض برای مدل‌سازی آزمایشگاهی و ۶ پیش‌فرض (۴ مدل دوبعدی، ۲ مدل سه‌بعدی) برای مدل‌سازی عددی پدیده انتقال رسوب بر مبنای شکست آنی سد تعریف شده است (جدول‌های ۱، ۲). در فرایند مدل‌سازی عددی با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و صحت سنجی-اعتبارسنجی عملکرد مدل عددی نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی در فضای دو بعدی، مدل انتقال رسوب‌های بستر در فضای سه بعدی تعریف و پیاده‌سازی گردیده است. برای این منظور با توجه به ابعاد هندسی فلوم آزمایشگاهی، هندسه و ژئومتری مدل دو بعدی در بعد سوم توسعه یافته و دو مدل عددی سه بعدی برای ارزیابی پدیده انتقال رسوب بر اساس شکست آنی سد پیاده‌سازی شده است.

نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی نشان داد که مدل عددی پژوهش دارای دقت قابل قبول در شبیه‌سازی

Dam failures statistical analysis. Bulletin 99, Paris, France.

Issakhov, A. & Zhandalet, Y. (2020). Numerical Study of Dam Break Waves on Movable Beds for Complex Terrain by Volume of Fluid Method. *Water Resources Management*, 34(2), 463-480.

Khoshkonesh, A., Daliri, M., Riaz, K., Dehrashid, F.A., Bahmanpouri, F. & Di Francesco, S. (2022). Dam-break flow dynamics over a stepped channel with vegetation. *Journal of Hydrology*, 613, 128395, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128395>.

Khosravi, K., Habibnejad, M., Shahedi, K., Chegini, A. & Tiefenbacher, J.P. (2020). Experimental investigation of bed evolution resulting from dam break. *Journal of Hydraulic Structures*, 6(2), 23-33.

Kocaman, S., Evangelista, S., Guzel, H., Dal, K., Yilmaz, A. & Viccione, G. (2021). Experimental and numerical investigation of 3d dam-break wave propagation in an enclosed domain with dry and wet bottom. *Applied Sciences*, 11(12), 5638, <https://doi.org/10.3390/app11125638>.

Liu, Y., Yang, C. & Chen, X. (2022). Experimental study of bed morphology evolution under two-dimensional dam-break flow. *Journal of Hydraulic Research*, 60(3), 496-503.

McMullin, N. (2015). Numerical and experimental modeling of dam break interaction with a sediment bed, PhD thesis, University of Nottingham.

Pritchard, D. & Hogg, A. (2002). On sediment transport under dam break flow. *J. Fluid Mech.*, 473, 265-274.

Qian H., Cao Zh., Liu H. & Pender G. (2017). New experimental dataset for partial dam break floods over mobile beds. *J. Hydraul Res.*, 56(1), <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1289264>.

Razavitoosi, S.L., Ayyoubzadeh, S.A. & Valizadeh, A. (2014). Two-phase SPH modelling of waves caused by dam break over a movable bed. *International Journal of Sediment Research*, 29(3), 344-356.

Rodi, W. (2017). Turbulence modeling and simulation in hydraulics: A historical review. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(5), 03117001, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001288)

Selim, T., Hesham, M. & Elkiki, M. (2022). Effect of sediment transport on flow characteristics in

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش و ارزیابی و مقایسه‌های انجام شده بین مدل‌های عددی و مدل آزمایشگاهی، مشخص می‌شود که مدل عددی ایجاد شده در هر دو فضای دو بعدی و سه بعدی دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی پدیده انتقال رسوب در نتیجه شکست سد داشته است و مدل ایجاد شده در بستر نرم افزار انسیس (فلوئنت) می‌تواند به عنوان یک مدل مرجع برای شبیه‌سازی و ارزیابی پدیده انتقال رسوب به صورت گسترده مورد استفاده فعالان این عرصه قرار گیرد.

۵- منابع‌ها

Ai, C., Ma, Y., Ding, W., Xie, Z. & Dong, G. (2022). Three-dimensional non-hydrostatic model for dam-break flows. *Physics of Fluids*, 34(2), 022105, <https://doi.org/10.1063/5.0081094>.

Cao, Z., Pender, G., Wallis, S. & Carling, P. (2014). Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible Sediment Bed. *J. Hydraul. Eng.*, 130, 689-703.

Capart H. & Young D.L. (1998). Formation of a jump by the dam-break wave over a granular bed. *J. Fluid. Mech*, 372, 165-187.

Fraccarollo, L. & Capart, H. (2002). Riemann wave description of erosional dam-break flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 461, 183-228.

Garoosi, F., Mellado-Cusichua, A.N., Shademani, M. & Shakibaenia, A. (2022). Experimental and numerical investigations of dam break flow over dry and wet beds. *International Journal of Mechanical Sciences*, 215, 106946, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106946>.

Graham, W.J. (1999). A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office Denver, Colorado, USA.

Greimann, B., Lai, Y. & Huang, J. (2008). Two-dimensional total sediment load model equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(8), 1142-1146.

Goutiere L., Soares-Frazaõ S. & Zec, Y. (2011). Dam-break flow on mobile bed in abruptly widening channel: Experimental data. *J. Hydraul. Res.*, 49(3), 367-371.

International Commission on Large Dams (1995).

non-prismatic compound channels. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(6), 101771, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101771>.

Soares-Frazão S., Canelas R., Cao Z., Cea L., Chaudhry H.M., Moran A.D. & Zech, Y. (2012). Dam-break flows over mobile beds: Experiments and benchmark tests for numerical models. *J. Hydraul. Res.*, 50(4), 364–375.

Stoker, J.J. (1957). *Water waves*, Wiley-Interscience, New York.

Wang, B., Liu, W., Wang, W., Zhang, J., Chen, Y., Peng, Y., Liu, X. & Yang, S. (2020). Experimental and numerical investigations of similarity for dam-break flows on wet bed. *Journal of Hydrology*, 583, 124598, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124598>.

Wang, B., Zhang, J., Chen, Y., Peng, Y., Liu, X. & Liu, W. (2019). Comparison of measured dam-break flood waves in triangular and rectangular channels. *Journal of Hydrology*, 575, 690-703.

Wu, G., Yang, Z., Zhang, K., Dong, P. & Lin, Y.-T. (2018). A Non-Equilibrium Sediment Transport Model for Dam Break Flow Over Moveable Bed Based on Non-Uniform Rectangular Mesh. *Water*, 10(5), 616, <https://doi.org/10.3390/w10050616>.

Wu, W. (2007). *Computational river dynamics*. Crc Press.

Wu, W. & Wang, S.S. (2007). One-dimensional modeling of dam-break flow over movable beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 48-58.

Wu, W. (2004). Depth-averaged two-dimensional numerical modeling of unsteady flow and nonuniform sediment transport in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), 1013-1024.

Zhang, Y., Li, Z., Wang, J., Ge, W. & Chen, X. (2022). Environmental impact assessment of dam-break floods considering multiple influencing factors. *Science of The Total Environment*, 837, 155853, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155853>.