

مقاله پژوهشی

ارزیابی آزمایشگاهی و عددی تأثیر شکست آنی و تدریجی سد بر تغییرات بستر رسوبی

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

چکیده

شکست سدها با توجه به حجم آب ذخیره شده در مخزن آنها و بعضاً نزدیکی به مناطق مسکونی، می تواند منجر به خسارات جانی و مالی زیادی شود. جریان های حاصل از شکست سد عمدتاً موجب انتقال رسوبات بستر و تغییرات مورفولوژی پایین دست سد می شود. در این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر نوع شکست سد و خصوصیات ذرات رسوب بر مکانیسم انتقال رسوبات بستر، مطالعاتی در قالب مدل سازی آزمایشگاهی و عددی پیاده سازی شده است. مدل آزمایشگاهی در فلومی به ابعاد (۱۰×۵×۵m) و مدل سازی عددی با بهره گیری از مدل فلوئنت برای شبیه سازی هر دو نوع شکست سد آنی و تدریجی انجام شد. دو پارامتر اندازه مش بندی و مدل آشفتگی جریان در مدل عددی حساسیت سنجی شد. نتایج حاصل از حساسیت سنجی مدل عددی نسبت به دو مدل آشفتگی ($k-\epsilon/\text{Standard}$ و $k-\epsilon/\text{RNG}$) نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد دارای خطای مدل سازی ۲/۷۵ درصد بوده است. با بررسی نتایج حاصل از مدل سازی عددی مشخص شد که میانگین خطای مدل سازی کمتر از ۵ درصد بوده که بیانگر دقت بالای مدل عددی و توانایی این مدل در شبیه سازی انتقال رسوبات بستر بر اثر شکست سد بوده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که میزان انتقال رسوبات بستر (تغییرات ضخامت لایه رسوب) در شکست تدریجی سد دارای مقادیر بیشتری نسبت به شکست آنی تحت شرایط مدل سازی یکسان بوده است. همچنین میزان تغییرات ضخامت لایه رسوب با ذرات شن (ذرات درشت دانه $d_{50}=20\text{ mm}$) در شرایط شکست تدریجی ۷/۴۷ درصد بیشتر از شکست آنی بوده، در حالی که این میزان برای ذرات رسوب از نوع مصالح ماسه ای (ذرات ریزدانه $d_{50}=4\text{ mm}$) ۹/۳۵ درصد بوده است.

واژه های کلیدی: انتقال رسوب، بستر رسوب ماسه ای، بستر رسوب شنی، مدل آشفتگی، $k-\epsilon/\text{Standard}$ ، $k-\epsilon/\text{RNG}$.

ارجاع: مالدار بادلی ا. حسینی ع. فضلی مالیدره ب. و فاضلی م. ۱۴۰۲. ارزیابی آزمایشگاهی و عددی تأثیر شکست آنی و تدریجی سد بر تغییرات بستر رسوبی. مجله پژوهش آب ایران. ۵۰: ۴۶-۳۱
<https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2023.14211.2488>

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

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

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

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

* نویسنده مسئول: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶

مقدمه

سدها یکی از زیرساخت‌های بنیادی در هر کشور بوده، که برای اهدافی همچون ذخیره‌سازی آب، جلوگیری از سیلاب، تولید انرژی در کل دنیا مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. همواره در طراحی و احداث سدهای بزرگ ضرایب اطمینان مختلفی براساس آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها اعمال می‌شود، تا میزان خطر شکست سد و پیامدهای جانی و مالی ناشی از آن را کاهش دهد؛ اما سدها همواره در معرض وقوع شکست قرار دارند و نمی‌توان احتمال پدیده شکست سد را تنها با در نظر گرفتن این ضرایب به صفر رساند. شکست سد می‌تواند براساس عوامل مختلفی از جمله نشت آب، ایجاد حفره‌گی (فرسایش داخلی)، روگذری در اثر ناکافی بودن ظرفیت سرریز و روانگرایی ناشی از زلزله نشأت گیرد. براساس گزارش مرکز هیدرولوژی مهندسی ارتش آمریکا (USACE, 2010)، محتمل‌ترین موارد شکست سد عبارت‌اند از: زلزله، رانش زمین، توفان شدید، ایجاد حفرگی، نقص در تجهیزات سد، آسیب ساختاری سد، گسیختگی پی سد و عوامل انسانی (ایجاد خرابکاری در سد). وقوع شکست سد همواره با بروز آسیب‌ها و خسارات جانی و مالی برای انسان‌ها و تخریب گسترده محیط‌زیست همراه بوده است؛ برای مثال: شکست سد واجونت (Vajont) در ایتالیا در سال ۱۹۶۳ باعث مرگ ۲۶۰۰ نفر شد، شکست سد گوهو (Gouhou) در کشور چین در سال ۱۹۹۳ با ۳۰۰ کشته و شکست سد تتون (Teton) در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۶ منجر به کشته‌شدن ۱۱ نفر و ایجاد خسارت اقتصادی بیش از ۱ میلیارد دلار شد (یو و همکاران، ۲۰۱۲). با ارزیابی سدهای شکسته‌شده در طول تاریخ سدسازی و تجزیه‌تحلیل آماری داده‌ها از ۵۳۴ شکست سد در ۴۳ کشور، مشخص شد که بیشترین شکست‌ها در سدهای خاکی رخ داده است؛ علاوه‌براین نتایج حاصل از ارزیابی علت و نوع شکست این سدها نشان داد که نیمی از شکست‌ها به علت سرریز شدن سد (۴۹ درصد)، ۲۸ درصد از شکست‌ها به دلیل نشت و تراوش از بدنه سد و ۲۹ درصد از شکست‌ها به دلیل نشست در فونداسیون رخ داده است (یو و همکاران، ۲۰۱۲). نکته حائز اهمیت دیگر در این بررسی، میزان خسارات و تلفات جانی بوده است. براساس آمار ارائه‌شده میزان تلفات جانی در شکست سدهای بتنی

(شکست آبی سد) دوبرابر سدهای خاکی و سنگریزه‌ای (شکست تدریجی) بوده است (بولتن آیکولد، ۱۹۹۸). علت اصلی این موضوع، ماهیت و مکانیسم متفاوت شکست سد براساس نوع آن بوده است. شکست سد بتنی ماهیت انفجاری و ناگهانی داشته و شکست سد خاکی ماهیت تدریجی؛ از این رو در بررسی پدیده شکست سد، نوع شکست به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در ارزیابی نتایج به‌ویژه مطالعه پدیده انتقال رسوبات بستر بوده است.

برای بررسی تئوریک و پیش‌بینی پارامترهای مختلف از جمله انتقال رسوبات در پدیده شکست سد از دو روش کلی مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی می‌توان بهره برد. با توجه به ویژگی‌ها و مزیت‌های مختلف مدل‌سازی عددی و دقت قابل قبول نتایج به‌دست‌آمده از این نوع مدل‌سازی، این روش برای بررسی پدیده شکست سد مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. با استفاده از مدل‌سازی ریاضی می‌توان یک تخمین بسیار مناسب از میزان دبی پیک و تراز آب رودخانه در نواحی مختلف پایین‌دست سد به‌ازای سناریوهای مختلف مانند شکست آبی یا تدریجی سد با صرف کمترین هزینه به‌دست آورد. جریان حاصل از شکست سد به دلیل ماهیت غیرمماندار و آشفتگی خود می‌بایست براساس مدل‌های آشفتگی مورد ارزیابی قرار گیرد. معادلات حاکم برای شبیه‌سازی عددی جریان سیال لزج تراکم‌ناپذیر با سطح آزاد، معادلات پایستگی جرم و اندازه حرکت بوده است. یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی عددی، پدیده شکست سد و ارزیابی انتقال رسوب، مدل‌سازی دقیق فعل‌وانفعالات بین سیال و لایه رسوبات بستر در شرایط شکست آبی و تدریجی سد بوده که با توجه به جریان چندفازی و آشفتگی، فرایند مدل‌سازی عددی را بیش از پیش پیچیده می‌کند.

پدیده شکست سد تا امروز مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته و مطالعات گسترده‌ای با هدف ارزیابی و ارائه پارامترهای مؤثر بر شکست سد، خصوصیات جریان سیال، الگوهای جریان‌های حاصل از شکست، تأثیر خصوصیات بستر پایین‌دست سد و ... با بهره‌گیری از روش‌های آزمایشگاهی و عددی انجام شده است (کاپارت و یونگ، ۱۹۹۸؛ ونگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ ونگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ بهمن‌پور و همکاران، ۲۰۲۱؛ گاروسی و همکاران، ۲۰۲۲). بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده به بررسی و ارزیابی پدیده

سد و مدت زمان شکست و ارائه یک مبنای علمی یا راهکارهایی برای طراحی بهینه سد کمک کرد. نجار و گول (۲۰۲۲) در مطالعاتی که به روش عددی و با بهره‌گیری از مدل دوتبعی HEC-RAS انجام شد، به ارزیابی پارامترهای مؤثر و بررسی هندسه شکست تدریجی سد پرداختند، در این پژوهش با در نظر گرفتن دو پارامتر هندسه شکست سد (شکاف بدنه سد) و مدت زمان توسعه کامل شکاف مطالعات موردی بر سد اورکمز در کشور ترکیه پیاده‌سازی شد، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد فروهلیش (۲۰۰۸) معقول‌ترین روش برای تخمین پارامترهای شکست تدریجی سد بوده که نتایج حاصل در مطالعه (لی و همکاران، ۲۰۲۱) اعتبارسنجی شده است. با بررسی مطالعات صورت گرفته پیرامون نوع شکست سد، مشخص می‌شود که این پژوهش‌ها عمدتاً بر تعیین ویژگی‌های جریان در زمان شکست، مکانیسم فروپاشی و انتشار موج سیلاب متمرکز بوده و مطالعاتی که به ارزیابی تأثیر نوع شکست (آنی، تدریجی) بر پدیده انتقال رسوبات بستر پردازد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در راستای ارزیابی شکست آنی سد، کاپارت و یانگ (۱۹۹۸) با بررسی پدیده شکست سد در یک بستر متحرک رسوبی حاوی ذرات رسوب ریزدانه در یک فلوام آزمایشگاهی انجام شد. پس از آن آزمایشات مشابه دیگری توسط فراکارولو و کاپارات (۲۰۰۲) و مک‌مولین (۲۰۱۵) با ترکیب‌های مختلف لایه رسوب بستر و سطوح مختلف آب بالادست و پایین‌دست انجام شد. در پژوهشی دیگر سوارز-فرازو و همکاران (۲۰۱۲) آزمایش‌هایی از جریان‌های دوتبعی سد بر بستر یکنواخت ماسه انجام دادند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که آبشستگی شدید (کاهش ضخامت لایه رسوب) در نزدیکی محل شکست سد و رسوب‌گذاری در پایین‌دست رخ داده است. وو و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی اثر 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 غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی عمق جریان، سرعت و پیش‌بینی شار بستر عملکرد قابل‌قبولی داشته است. ایساگو و ژاندالیت

شکست سد با در نظر گرفتن بستر ثابت (فرسایش‌ناپذیر) معطوف بوده و کمتر مطالعاتی در راستای ارزیابی پدیده انتقال رسوبات لایه بستر انجام شده است؛ علاوه بر این، عمدتاً در پژوهش‌های پیشین، شکست سد از نوع آنی مورد مطالعه قرار گرفته که یکی از علت‌های اصلی آن، فرایند پیچیده مدل‌سازی عددی شکست تدریجی سد و چالش‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی (هزینه بالا، محدودیت‌های محیط آزمایشگاه و زمان‌بر بودن مدل‌سازی آزمایشگاهی) بوده است.

مطالعاتی با بهره‌گیری از روش‌های آماری برای تخمین و ارزیابی پارامترهای مؤثر در شکست تدریجی سد انجام شده است. فروهلیش (۲۰۰۸) با استفاده از داده‌های گردآوری شده از ۷۴ مورد شکست سد خاکی (شکست تدریجی) مطالعاتی را برای ارزیابی پارامترهای مؤثر و ارائه روابط بین آن‌ها انجام داد و علاوه بر داده‌های آماری، از مدل‌های تجربی نیز برای بررسی بازشدگی شکاف در شکست تدریجی سد استفاده کرد. نتایج حاصل بیان‌گر خصوصیات هندسه شکاف در شکست تدریجی سد و پارامترهای مؤثر بر آن بود. یینگ و همکاران (۲۰۰۹) یک مدل شکست سد براساس روش حجم محدود با استفاده از یک شبکه مثلثی نامنظم ایجاد کردند، در این پژوهش برای ساده‌سازی محاسبات عددی معادلات آب کم‌عمق به کارگیری شد، نتایج نشان داد که مدل توسعه یافته دارای عملکرد قابل‌قبولی و ظرفیت لازم برای مدل‌سازی جریان‌های حاصل از شکست سد در شرایط مختلف جریان (جریان‌های زیر بحرانی، جریان‌های فوق بحرانی یا جریان‌های فرابحرانی) بوده است. مورامارکو و همکاران (۲۰۱۴) مطالعاتی را پیرامون شکست تدریجی سد انجام دادند، در این پژوهش با استفاده از هیدروگراف‌های تخلیه سد، تخمینی بر پارامترهای مؤثر بر وقوع شکست تدریجی انجام شد، علاوه بر این زمان توسعه شکاف در بدنه سد با استفاده از روش بهینه‌سازی به دست آمد. لی و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به ارزیابی شکست تدریجی سد پرداختند، در این پژوهش فرایند گسترش شکاف سد به‌طور جامع مورد ارزیابی قرار گرفت و با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی همچون: خواص مصالح سد و توپوگرافی مقطعی سد، مدل ریاضی شکست سد برای تجزیه تحلیل و حساسیت‌سنجی پارامترهای مؤثر ارائه شد، نتایج تحقیق به درک مکانیسم رابطه بین سیلاب حاصل از شکستگی

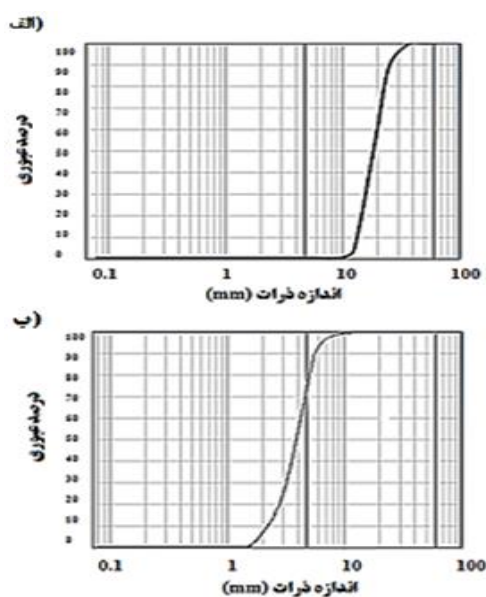
(۲۰۲۰) اثرات جریان شکست سد بر بسترهای متحرک را با استفاده از روش حجم سیال (VOF) بررسی کردند و نتایج حاصل نشان داد که مدل ارائه شده عملکرد قابل قبولی داشته و قابل اعتماد است. خسروی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی روابط بین ساختار و تغییر شکل بستر رودخانه (تغییرات مورفولوژیک) تحت سیلاب های شکست سد پرداختند. در این پژوهش از یک فلوم برای شبیه سازی سیلاب های شکست سد با تغییرات سطح آب اولیه بالادست و همچنین نوع ذرات رسوب متغیر (از یکنواخت تا درجه بندی شده) استفاده شد، نتایج حاصل نشان داد که آب شستگی شدید بلافاصله در پایین دست محل شکست سد در هر دو نوع رسوب یکنواخت و درجه بندی شده رخ داده است؛ علاوه بر این الگوی تغییرات مورفولوژیک بستر تحت جریان های شکست سد مورد بررسی قرار گرفت. یکی از چالش های اصلی در مطالعات انجام شده، مدل سازی و ارزیابی تغییرات لایه رسوب تحت جریان های شکست سد در فضای مدل سازی دو بُعدی بوده است. در این راستا لیوو و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به ارزیابی تغییرات مورفولوژی بستر تحت جریان دو بُعدی حاصل از شکست سد پرداختند، نتایج حاصل از این پژوهش را می توان برای درک تکامل مورفولوژی بستر تحت جریان شکست سد، اعتبارسنجی روش های عددی و آزمایش مدل های سیلابی استفاده کرد. در راستای سیر تکامل مطالعات انجام شده، پژوهش های ارزشمندی برای پیاده سازی فرایند مدل سازی عددی پدیده شکست سد صورت گرفته است. گروسی و همکاران (۲۰۲۲) جریان شکست سد بر بسترهای خشک و مرطوب را با بهره گیری از روش مدل سازی عددی و آزمایشگاهی با هدف ارائه مجموعه داده های به روز و بینش عمیق تر به مورفولوژی و هیدرودینامیک شکست سد مورد مطالعه قرار دادند. خوش کنش و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعاتی به بررسی اثرات ناهمواری کانال در فرایند مدل سازی شکست سد با بهره گیری از روش مدل سازی عددی پرداختند. در این مطالعات که در بستر نرم افزار Flow3D پیاده سازی شد، شرایط مختلف ناهمواری بستر و تأثیرگذاری آن بر جریان حاصل از شکست سد مورد ارزیابی قرار گرفت، مدل محاسباتی با استفاده از داده های تجربی اعتبارسنجی شد و نتایج نشان داد که مدل از دقت بالایی در پیش بینی تکامل سطح آزاد، پرش هیدرولیکی متحرک، سرعت

جریان و رژیم جریان برخوردار است؛ علاوه بر این یکی دیگر از چالش های اصلی مدل سازی عددی پدیده شکست سد و انتقال رسوبات تحت جریان های شکست سد، مدل سازی آشفتگی جریان بوده است که در این راستا مطالعاتی توسط رودی (۲۰۱۷) و کوکامن و همکاران، (۲۰۲۱) پیرامون کارایی مدل های مختلف آشفتگی در فرایند مدل سازی عددی شکست سد انجام شده است. با بررسی سیر تکامل مطالعات انجام شده پیرامون شکست سد و ارزیابی پدیده انتقال رسوب مشخص می شود که قالب پژوهش های انجام شده به بررسی پدیده شکست سد در شرایط بستر ثابت معطوف بوده، علاوه بر این، در این مطالعات غالباً شکست سد به صورت آنی مورد ارزیابی قرار گرفته و فقدان پژوهشی که به صورت جامع تأثیرات نوع شکست سد بر مکانیسم انتقال رسوبات بستر را مورد بررسی قرار دهد، ملموس است. بر این اساس در این پژوهش مطالعاتی با بهره گیری از روش مدل سازی آزمایشگاهی و عددی برای بررسی و ارزیابی پدیده انتقال رسوب بستر تحت جریان های حاصل از دو نوع شکست سد آنی و تدریجی انجام شده است. نوآوری اصلی این مقاله ارزیابی و تأثیر نوع شکست سد (آنی، تدریجی) بر پدیده انتقال رسوبات بستر و همچنین ارزیابی خصوصیات ذرات رسوب (بستر رسوبی شنی، بستر رسوبی ماسه ای) و تأثیر مدل آشفتگی جریان در تغییرات مورفولوژی بستر بوده است.

مواد و روش ها

در این پژوهش مدل آزمایشگاهی در فلوم مرکز تحقیقات هیدرولیک دانشگاه بابل پیاده سازی و شکست آنی سد با در نظر گرفتن لایه رسوبات در مخزن سد و پایین دست محور سد مدل سازی شده است. همچنین در این آزمایشات دو نوع تیپ مصالح رسوب به عنوان متغیرهای مؤثر در تغییرات مورفولوژی بستر مطالعه شده است. مدل سازی عددی در بستر نرم افزار ANSYS و با بهره گیری از مدل فلوئنت (Fluent) اجرا شده است. در فرایند مدل سازی عددی ابتدا مدل های آزمایشگاهی شبیه سازی و دو متغیر اندازه مش بندی و مدل آشفتگی جریان مطالعه شد. پس از حساسیت سنجی مدل عددی و کالیبراسیون مدل، عملکرد مدل عددی بررسی شده و میزان خطای مدل عددی نسبت به نتایج مدل

20mm) و مصالح تیپ B ذرات ریزدانه و از نوع ماسه‌ای بوده که دارای ذرات با قطر میانگین ($d_{50} = 3mm$) بوده است. در جدول ۱، سناریوهای مدل‌های آزمایشگاهی به‌همراه جزئیات هریک از مدل‌ها ارائه شده است. در ارزیابی پدیده انتقال رسوب یکی از اصلی‌ترین پارامترهای مؤثر در انتقال رسوب و رسوب‌گذاری، قطر ذرات رسوب است. بر این اساس در این پژوهش دو نوع مصالح که قطر نسبی ذرات آن‌ها دارای اختلاف ملموسی بوده انتخاب شده است. در شکل ۲، منحنی دانه‌بندی مصالح تیپ A و B ارائه شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح لایه رسوب، الف) مصالح تیپ A (شن)، ب) مصالح تیپ B (ماسه)

آزمایشگاهی ارزیابی شده است. در نهایت سناریوهایی برای مدل‌سازی پدیده انتقال رسوب تحت جریان‌های شکست آبی و شکست تدریجی سد تعریف شد. برای ارزیابی پدیده انتقال رسوب بستر براساس پدیده شکست آبی سد، دو آزمایش در شرایط مختلف تعریف و در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بابل اجرا شد. این فلوم به طول ۱۰ متر با عرض و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر مجهز به سطح‌سنج التراسونیک و فشارسنج دیجیتال بود. در شکل ۱، نمایی از جزئیات آزمایشگاه، فلوم و تجهیزات آن ارائه شده است. در آزمایشات انجام‌شده برای اندازه‌گیری پروفیل تغییرات لایه رسوبات بستر از دستگاه دیجیتالی (LBP Laser Bed Profiler) که در آکس عرض کانال قرار گرفته و در طول کانال حرکت می‌کند، استفاده شده است. این دستگاه قادر به برداشت تغییرات بستر با دقت ۱ میلی‌متر است.

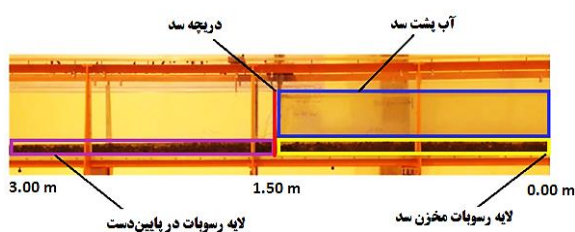


شکل ۱- فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مرکز تحقیقات هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد بابل

در این آزمایشات پارامتر نوع مصالح رسوبات بستر (مصالح تیپ A، مصالح تیپ B) به‌عنوان متغیرهای مدل‌سازی مدنظر بوده است. مصالح تیپ A ذرات درشت‌دانه و از نوع شنی بوده که دارای ذرات با قطر میانگین ($d_{50} =$

جدول ۱- سناریوهای مدل‌سازی آزمایشگاهی

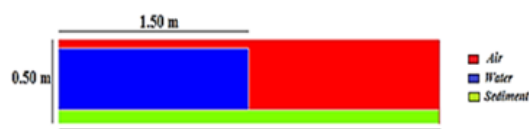
کد	نوع مصالح	ضخامت رسوب پایین‌دست (cm)	ضخامت رسوب مخزن (cm)	عمق آب (cm)	نوع شکست
A1	A	۸	۸	۳۷	ناگهانی
B1	B	۸	۸	۳۷	ناگهانی



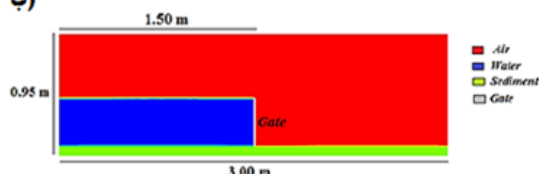
شکل ۳- نمایی از برپاسازی-شرایط اولیه مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش دو تست آزمایشگاهی براساس پارامترهای ارائه‌شده در جدول ۱ تعریف و انجام شده است. در شکل ۳ نمایی از برپاسازی مدل‌های آزمایشگاهی در شرایط اولیه نمایش داده شده است.

(الف)



(ب)



شکل ۴- هندسه مدل‌های عددی پژوهش، (الف) مدل عددی شکست آنی سد، (ب) مدل عددی شکست تدریجی سد

تئوری‌های علمی حاکم بر مدل‌سازی عددی

فرایند مدل‌سازی عددی در ابتدا با تعریف فضای مدل‌سازی که متشکل از ۳ سیال هوا، آب و لایه رسوب است، تعریف می‌شود، برای تعریف شرایط سیالات موجود در مدل فلوئنت و شبیه‌سازی اندرکنش بین فازهای مختلف، از مدل چند فاز اوپلرین استفاده شده‌است، در این مدل سیال هوا به‌عنوان فاز اصلی محیط مدل‌سازی و دو فاز آب و لایه رسوب به‌عنوان فازهای دوم و سوم محیط مدل‌سازی مدنظر بوده است. فاز آب با اختصاص‌دادن خصوصیات آب زلال در شرایط مایع تعریف می‌شود. برای تعریف فاز ذرات رسوب با تعریف خصوصیات متریال رسوب و اختصاص‌دادن ویژگی‌های متریال به این فاز، از نوع دانه‌ای (Granular) پیاده‌سازی می‌شود. در فرایند مدل‌سازی عددی انتقال رسوبات تعیین پارامترهای اصلی فاز رسوب و همچنین اندرکنش بین فاز آب و رسوب از اهمیت بالایی برخوردار است، براین‌اساس ابتدا در تعریف فاز رسوب خصوصیات این فاز و معادلات و روابط حاکم بر حرکت ذرات رسوب تعریف شده‌است.

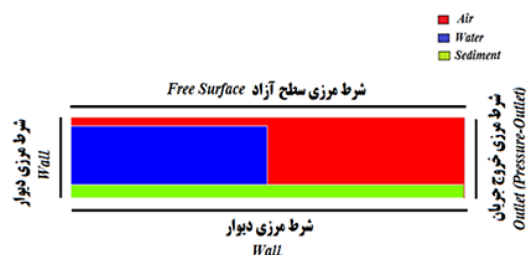
در تعریف فاز رسوب، اولین پارامتر مؤثر، قطر ذرات رسوب است که براساس تیپ مصالح به‌کارگیری‌شده در مدل‌های آزمایشگاهی از دو نوع تیپ A و B با توجه به شرایط مدل‌سازی تعریف می‌شود. علاوه‌براین پارامترهای اصلی در تعریف فاز رسوبات (اعم از: اصطکاک، زاویه داخلی ذرات رسوب و...) که به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرها در شبیه‌سازی پدیده انتقال رسوب در مدل فلوئنت محسوب می‌شود، برای مدل تعریف شده است. با توجه به جریان حاصل از شکست سد که از نوع جریان آشفته است، در

مشخصات مدل عددی

در این پژوهش مدل‌سازی عددی با بهره‌گیری از نرم‌افزار ANSYS و مدل Fluent انجام شده است. خصوصیات و مشخصات مدل‌های عددی براساس مدل‌های آزمایشگاهی ایجاد شده است. براین‌اساس هندسه کلی مدل‌های عددی در فضای دو بُعدی دارای طولی معادل با ۳ متر (۱/۵ متر مخزن سد، ۱/۵ متر پایین‌دست سد) و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر برای شکست آنی سد بوده است؛ علاوه‌براین با توجه به کلیت مدل شکست سد و همچنین برای مدل‌سازی پدیده انتقال رسوب، فضای مدل‌سازی از ۳ سیال مختلف (۱- هوا، ۲- آب، ۳- ذرات رسوب) تشکیل شده است. در شکل ۴-الف، هندسه کلی مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی شکست آنی سد در فضای دو بُعدی نمایش داده شده است. برای پیاده‌سازی مدل‌های عددی شکست تدریجی سد، فرایند مدل‌سازی براساس حرکت تدریجی دریچه سد اجرا شد. با توجه به مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام‌شده توسط محققان پیشین (واسکین و همکاران، ۲۰۰۴؛ دیهمان و پاترا، ۲۰۲۰؛ نجار و گول، ۲۰۲۲) برای مدل‌سازی شکست تدریجی می‌توان با درنظرگرفتن میزان دبی تخلیه آب، با حرکت مقید به زمان دریچه سد فرایند شکست تدریجی را مدل‌سازی کرد. در این شرایط دریچه دارای شرط مرزی دیوار نفوذناپذیر بوده و تنها قادر به حرکت در راستای قائم است که براساس حرکت تدریجی دریچه رو به بالا فرایند شکست شبیه‌سازی می‌شود. در مدل‌های شکست تدریجی، برای اینکه فرایند حرکت دریچه رو به بالا قابلیت پیاده‌سازی داشته باشد، ارتفاع مدل اصلی معادل با ۰/۹۵ متر تعریف شد. در شکل ۴-ب، هندسه کلی مدل‌های عددی شکست تدریجی سد نمایش داده شده است. هدف از ارائه مدل عددی شکست تدریجی، تخلیه آب مخزن سد در مدت زمان ایجاد شکاف تا بازشدگی نهایی در شرایط واقعی بوده که براساس رویکرد عددی مذکور پیاده‌سازی شده است. در عمل فرایند شکست تدریجی سد براساس بازشدگی سد (ایجاد شکاف) تا تخریب کل سد صورت می‌گیرد که در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی برای شبیه‌سازی این پدیده با توجه به میزان دبی تخلیه آب از فرایند حرکت مقید به زمان دریچه سد استفاده می‌شود (نجار و گول، ۲۰۲۲).

اصلی مدل از جمله ارتفاع آب پشت سد، نوع مصالح رسوب، ضخامت لایه رسوب و... تعیین می‌شود. براین اساس در این بخش ابتدا سناریوهای مختلف مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای کالیبراسیون مدل‌های عددی، ابتدا مدل آزمایشگاهی A1 با بهره‌گیری از مدل فلوئنت مدل‌سازی عددی شده و نتایج حاصل نسبت به دو پارامتر حل عددی (۱- اندازه المان-مشبندی، ۲- مدل آشفتگی) حساسیت‌سنجی شده است. در این مرحله با در نظر گرفتن سه اندازه مختلف (۵/۰، ۱ و ۲ سانتی‌متر) برای مشبندی و همچنین در نظر گرفتن دو مدل آشفتگی شبیه‌سازی عددی انجام شده است. جمعاً پنج مدل برای کالیبراسیون و دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای مذکور تعریف شده است. پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی، دو آزمایش A1 و B1 تحت دو شرط مختلف شکست آبی و تدریجی سد شبیه‌سازی شده است؛ علاوه بر این برای ارزیابی دقیق تأثیر خصوصیات ذرات رسوب، شرایط آزمایش A1 و B1 با در نظر گرفتن ذرات رسوب با قطر متوسط $d_{50}=10\text{mm}$ (مصالح رسوب نوع C) که دارای قطر ذرات میانه بین مصالح ریزدانه (مصالح ماسه‌ای نوع B با $d_{50}=3\text{mm}$) و درشت‌دانه (مصالح شنی نوع A با $d_{50}=20\text{mm}$) بوده، مدل‌سازی عددی شده است. سناریوهای مختلف مدل‌سازی عددی در جدول ۲ ارائه شده است.

مدل‌سازی عددی با بهره‌گیری از مدل فلوئنت انجام شده. سیستم سخت‌افزاری به کارگیری شده دارای ۱۲ هسته پردازشگر و حافظه لحظه‌ای (RAM) ۸ گیگابایت بوده که میانگین زمان شبیه‌سازی براساس سیستم کامپیوتری مذکور و با توجه به شرایط مدل عددی (اندازه مشبندی و پارامترهای اولیه حل عددی) برای هر مدل‌سازی بین ۱/۳ تا ۲/۴ ساعت بود.



شکل ۵- شرایط مرزی در مدل‌های عددی پژوهش

مدل عددی باید رویه مدل‌سازی آشفتگی جریان نیز تعریف شود، براین اساس با توجه به نتایج کارآمد مدل آشفتگی دوجمله‌ای ($k-\epsilon$) در مدل‌سازی جریان‌های شکست سد (رودی، ۲۰۱۷؛ کوکامن و همکاران، ۲۰۲۱) دو مدل آشفتگی $k-\epsilon/\text{Standard}$ و $k-\epsilon/\text{RNG}$ برای حل ترم آشفتگی معادله مومنوم در مدل عددی به کارگیری و حساسیت‌سنجی نسبت به عملکرد مدل براساس این دو مدل آشفتگی انجام شد.

شرایط مرزی مدل‌سازی عددی

براساس ماهیت مسئله مدل‌سازی شرایط مرزی برای برپاسازی مدل عددی تعریف شده است. کف کانال دارای شرایط مرزی دیوار ثابت نفوذناپذیر بوده که بدون لغزش برای هریک از سه فاز سیال موجود در مسئله در نظر گرفته شده است. جداره پشت سد (مرز سمت چپ مدل) نیز دارای شرایط مرزی دیوار ثابت نفوذناپذیر بوده که بدون لغزش برای هریک از سه فاز سیال موجود در مسئله 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 عدم بازگشت جریان برای هریک از فازها تعریف شده است. برای شبیه‌سازی پدیده شکست تدریجی سد در مدل فلوئنت از دریچه متحرک استفاده شده است، برای این منظور دریچه متحرک که دارای شرط مرزی دیوار نفوذناپذیر بوده، در مقابل توده آب سد قرار گرفته و براساس گذشت زمان با حرکت رو به بالا منجر به تخلیه تدریجی آب پشت سد می‌شود. در مدل فلوئنت برای پیاده‌سازی حرکت دریچه از تکنیک مش متحرک استفاده شده است. برای تعریف حرکت دریچه با توجه به مدت زمان مدل‌سازی و همچنین ارزیابی دبی تخلیه، سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده که براساس ایجاد فایل پروفیل سرعت که با دو متغیر گام زمانی و سرعت حرکت دریچه تعریف می‌شود، پیاده‌سازی شده است. در شکل ۵ شرایط مرزی مدل عددی در فضای دوبعدی به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

سناریوهای مدل‌سازی عددی

در فرایند مدل‌سازی عددی، پدیده انتقال رسوب براساس شکست سد، شرایط اولیه مدل‌سازی براساس خصوصیات

جدول ۲- مشخصات و سناریوهای مدل سازی عددی

توضیحات	عمق آب (cm)	رسوب پایین دست (cm)	رسوب مخزن (cm)	مضام رسوب	نوع شکست	کد مدل
تست کالیبراسیون مدل عددی (مش 0.5 cm)	۳۷	۸	۸	A	آبی	CA0
تست کالیبراسیون مدل عددی (اندازه مش 1 cm)	۳۷	۸	۸	A	آبی	CA1
تست کالیبراسیون مدل عددی (اندازه مش 2 cm)	۳۷	۸	۸	A	آبی	CA2
تست کالیبراسیون مدل عددی (K-ε / Standard)	۳۷	۸	۸	A	آبی	CA3
تست کالیبراسیون مدل عددی (K-ε / RNG)	۳۷	۸	۸	A	آبی	CA4
منطبق بر مدل آزمایشگاهی A1	۳۷	۸	۸	A	آبی	DB1_NA1
منطبق بر مدل آزمایشگاهی A1 متفاوت در نوع شکست	۳۷	۸	۸	A	تدریجی	DB2_NA1
منطبق بر مدل آزمایشگاهی B1	۳۷	۸	۸	B	آبی	DB1_NB1
منطبق بر مدل آزمایشگاهی B1 متفاوت در نوع شکست	۳۷	۸	۸	B	تدریجی	DB2_NB1
ذرات رسوب با قطر متوسط $d_{50} = 10mm$ (مضام رسوب نوع C) - شکست آبی	۳۷	۸	۸	C	آبی	DB1_NC1
ذرات رسوب با قطر متوسط $d_{50} = 10mm$ (مضام رسوب نوع C) - شکست تدریجی	۳۷	۸	۸	C	تدریجی	DB2_NC1

نتایج و بحث

نتایج مدل سازی آزمایشگاهی

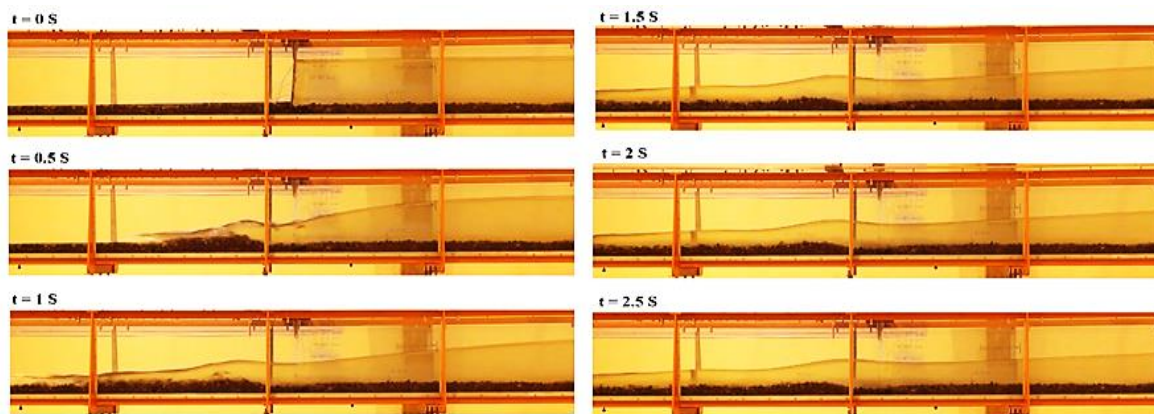
مدل های آزمایشگاهی براساس سناریوهای تعریف شده در جدول ۱ اجرا و نتایج حاصل که بیانگر تغییرات پروفیل سطح آب و پروفیل تغییرات ضخامت لایه رسوبات بستر بوده، استخراج شده است. در شکل ۶ روند تغییرات سطح آزاد آب و ضخامت لایه رسوبات بستر در بازه زمانی صفر تا ۲/۵ ثانیه در گام های زمانی ۰/۵ ثانیه برای مدل آزمایشگاهی A1 به عنوان نمونه نمایش داده شده است. براساس نتایج حاصل از مدل های آزمایشگاهی (A1, B1) مشخص شد که بیشترین میزان تغییرات ضخامت لایه رسوبات بستر در بازه زمانی صفر تا ۲ ثانیه رخ داده است و عملاً با افزایش زمان آزمایش برای مقادیر بیشتر از ۲ ثانیه تغییرات قابل توجهی در ضخامت لایه رسوب ایجاد نشده است. همچنین براساس نتایج به دست آمده مشخص شد که تغییرات ضخامت لایه رسوب عملاً در فاصله طولی ۱/۵ متر قبل و بعد از دریچه سد رخ داده است. تراز طولی و موقعیت دهی کانال آزمایشگاه در شکل ۳ ارائه شده است. برای ارزیابی دقیق نتایج و همچنین کمی سازی مقادیر تغییرات ضخامت لایه رسوب در آزمایشات مختلف،

پروفیل تغییرات ضخامت لایه رسوب در فاصله طولی ۳ متر (۱/۵ متر در مخزن سد و ۱/۵ متر در پایین دست) برای دو مدل آزمایشگاهی در شکل ۷ نمایش داده شده است.

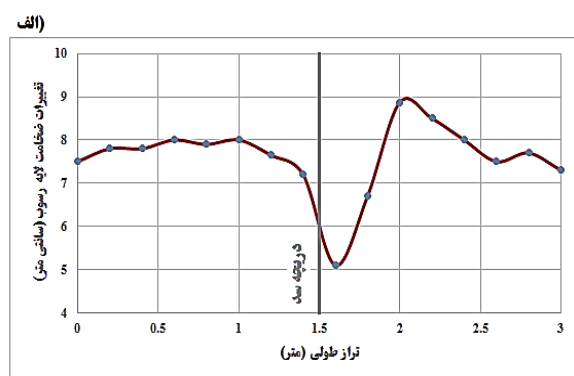
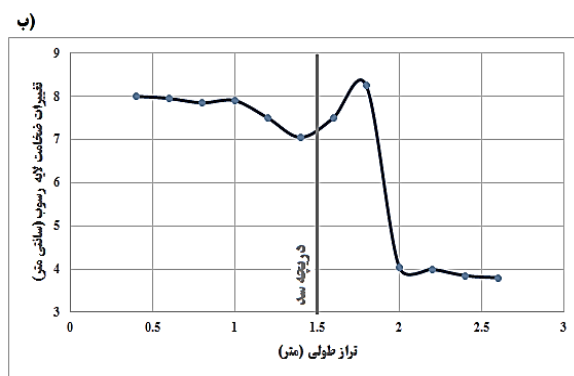
با توجه به نتایج حاصل (شکل ۷) مشخص می شود که میزان تغییرات ضخامت لایه رسوبات مخزن سد تا تراز طولی ۱/۴ متر در دو مدل آزمایشگاهی تقریباً یکسان بوده است. در مدل A1 از تراز طولی ۱/۴ متر تا ۱/۸ متر (محدوده دریچه باز شو سد) شاهد کاهش چشم گیر لایه رسوب و از تراز طولی ۲ تا ۲/۴ متر شاهد افزایش لایه رسوب نسبت به ضخامت اولیه لایه (۸ سانتی متر) بوده ایم. 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 مقادیر ناچیزی نسبت به ضخامت اولیه لایه رسوب بوده است. با ارزیابی نتایج حاصل مشخص می شود که در منطقه شکست سد (پیرامون موقعیت دریچه باز شو (تراز ۱/۵ متر طولی)) در هر دو مدل ابتدا کاهش لایه رسوب و بعد از آن افزایش لایه رسوب رخ داده است. همچنین به وضوح مشخص می شود که در مدل A1 میزان کاهش و افزایش ضخامت

مورفولوژی بستر تحت پدیده شکست سد بوده به گونه‌ای که میانگین تغییرات ضخامت لایه رسوب در مدل A1 با بستر رسوبی شنی (قطر متوسط ذرات ۲۰ میلی‌متر) ۱۸/۶ درصد بیشتر از میانگین تغییرات ضخامت لایه رسوب در مدل B1 با بستر رسوبی ماسه‌ای (قطر متوسط ذرات ۳ میلی‌متر) بوده است.

لایه رسوب پیرامون منطقه شکست دارای مقادیر بیشتری نسبت به مدل B1 بوده است که با توجه به نوع مصالح تیپ A که دارای ذرات با قطر نسبی بزرگتر نسبت به مصالح تیپ B بوده، عامل مؤثر است. با مقایسه نتایج به دست آمده از دو مدل آزمایشگاهی A1 و B1 مشخص می‌شود که نوع مصالح ذرات رسوب به عنوان یک پارامتر مؤثر در تغییرات



شکل ۶- نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی A1



شکل ۷- پروفیل تغییرات ضخامت لایه بستر، (الف) مدل آزمایشگاهی A1، (ب) مدل آزمایشگاهی B1

مدل‌سازی عددی با نتایج تست آزمایشگاهی مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفته است. برای بررسی دقیق و ارزیابی میزان خطای نتایج به دست آمده از مدل عددی، مقایسه‌ای با نتایج مدل آزمایشگاهی A1 به شرح جدول ۳ انجام 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 تغییرات ضخامت لایه رسوب در مدل آزمایشگاهی A1 ارائه شده است. علاوه بر این میزان درصد خطای مدل‌سازی عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه

نتایج مدل‌سازی عددی

در این پژوهش کالیبراسیون مدل عددی براساس حساسیت‌سنجی نسبت به دو پارامتر: ۱- اندازه مش‌بندی، ۲- مدل آشفتگی جریان انجام شده است. براین اساس مدل عددی بر پایه خصوصیات مدل آزمایشگاهی A1 برپاسازی شده است و نتایج حاصل از پنج مدل‌سازی کالیبراسیون (براساس جدول ۲ مدل‌های CA0, CA1, CA2, CA3, CA4) با نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. برای ارزیابی اندازه مش‌بندی محیط حل، مدل آزمایشگاهی A1 براساس سه اندازه مش‌بندی (۰/۵، ۱ و ۲ سانتی‌متر) ایجاد و نتایج حاصل از

نسبت به مدل آشفتگی جریان در این بخش دو مدل آشفتگی دوجمله‌ای ($k-\epsilon/\text{Standard}$, $k-\epsilon/\text{RNG}$) برای حل ترم آشفتگی معادله مومنتوم مورد ارزیابی قرار گرفته است. براین اساس مدل آزمایشگاهی A1 با بهره‌گیری از مدل آشفتگی $k-\epsilon/\text{Standard}$ (مدل CA3) و مدل آشفتگی $k-\epsilon/\text{RNG}$ (مدل CA4) در نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از مدل‌های CA3, CA4 با نتایج تست آزمایشگاهی (مدل A1) مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۴).

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، به‌وضوح مشخص می‌شود که مدل عددی CA3 که از مدل دوجمله‌ای $k-\epsilon/\text{Standard}$ برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده می‌کند، دارای دقت بالاتری نسبت به مدل $k-\epsilon/\text{RNG}$ بوده است. براساس نتایج حاصل، در مدل‌های عددی پژوهش برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان از مدل دوجمله‌ای $k-\epsilon/\text{Standard}$ که دارای دقت قابل‌قبولی در مدل‌سازی پدیده انتقال رسوب براساس شکست سد بوده، استفاده شده است. در شکل ۸ پروفیل تغییرات ضخامت لایه رسوب برای هر دو مدل عددی CA3, CA4 و مدل آزمایشگاهی A1 ارائه شده است.

به نتایج مشخص می‌شود که مدل CA0 با اندازه مش ۰/۵ سانتی‌متر دارای میانگین خطای ۲/۰۷ درصد، مدل CA1 با اندازه مش ۱ سانتی‌متر دارای میانگین خطای ۲/۴۱ درصد و مدل CA2 با اندازه مش ۲ سانتی‌متر دارای میانگین خطای ۸/۴۷ درصد بوده است. با بررسی نتایج حاصل مشخص می‌شود که با کاهش اندازه مش‌بندی از ۲ سانتی‌متر (مدل CA2) به ۱ سانتی‌متر (مدل CA1) میزان میانگین خطای مدل‌سازی حدوداً ۶ درصد کاهش یافته است. همچنین با مقایسه نتایج بین دو مدل CA0 و CA1 مشخص می‌شود که عملاً 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 بوده است. محدوده قابل‌قبول خطای مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی تغییرات مورفولوژی بستر براساس مطالعات مختلف (سوارز و همکاران، ۲۰۱۲؛ مک‌مولین، ۲۰۱۵؛ وو و همکاران، ۲۰۱۸) کمتر از ۵ تا ۱۰ درصد ذکر شده است. براین اساس مدل عددی CA1 با اندازه مش یک سانتی‌متری دارای دقت قابل‌قبولی برای مدل‌سازی تغییرات مورفولوژی بستر تحت شکست سد بوده است. برای ارزیابی و کالیبراسیون مدل عددی

جدول ۳- اعتبارسنجی نتایج (پروفیل تغییرات بستر رسوبی) حاصل از مدل‌های عددی CA0, CA1, CA2

Err Model CA2 %	CA2	Err Model CA1 %	CA1	Err Model CA0 %	CA0	A1	X
۸/۰	۸/۱	۱/۳۳	۷/۶	۱/۳۳	۷/۶	۷/۵	۰
۱/۲۸	۷/۹	۱/۲۸	۷/۷	۰/۶۴	۷/۷۵	۷/۸	۰/۲
۱/۹۲	۷/۹۵	۰/۶۴	۷/۸۵	۰/۶۴	۷/۸۵	۷/۸	۰/۴
۲/۵	۷/۸	۱/۲۵	۷/۹	۲/۷۵	۷/۷۸	۸/۰	۰/۶
۱/۲۷	۸/۰	۱/۲۷	۷/۸	۱/۱۴	۷/۸۱	۷/۹	۰/۸
۲/۵	۷/۸	۱/۸۸	۷/۸۵	۱/۵	۷/۸۸	۸/۰	۱/۰
۵/۸۸	۷/۲	۱/۹۶	۷/۵	۱/۳۱	۷/۵۵	۷/۶۵	۱/۲
۴/۸۶	۶/۸۵	۱/۳۹	۷/۱	۱/۱۱	۷/۱۲	۷/۲	۱/۴
۵۶/۸۶	۸/۰	۱۷/۶۵	۶/۰	۱۲/۷۵	۵/۷۵	۵/۱	۱/۶
۲۰/۹۰	۸/۱	۱/۴۹	۶/۸	۰/۷۵	۶/۷۵	۶/۷	۱/۸
۱۰/۹۴	۷/۹	۰/۷۹	۸/۸	۱/۰۱	۸/۷۸	۸/۸۷	۲/۰
۴/۷۱	۸/۱	۱/۷۶	۸/۳۵	۱/۷۶	۸/۳۵	۸/۵	۲/۲
۱/۸۸	۸/۱۵	۱/۲۵	۸/۱	۱/۸۸	۸/۱۵	۸/۰	۲/۴
۶/۶۷	۸/۰	۱/۳۳	۷/۶	۲/۰	۷/۶۵	۷/۵	۲/۶
۲/۶	۷/۹	۲/۶	۷/۵	۱/۹۵	۷/۵۵	۷/۷	۲/۸
۲/۷۴	۷/۵	۰/۶۸	۷/۳۵	۰/۵۵	۷/۳۴	۷/۳	۳/۰
۸/۴۷ %		۲/۴۱ %		۲/۰۷ %		Average Error %	

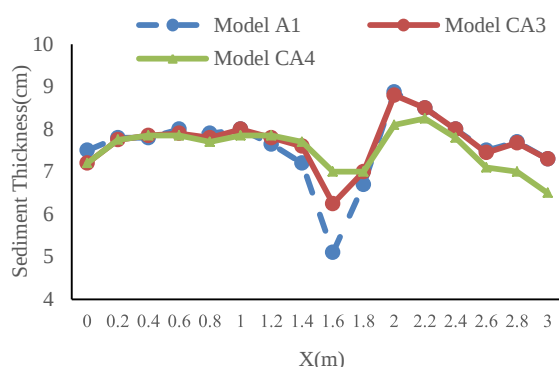
جدول ۴- اعتبارسنجی نتایج مدل‌های عددی CA3, CA4

Err Model CA4 %	CA4 k-e RNG	Err Model CA3 %	CA3 k-e Standard	A1	X
۴/۰	۷/۲	۴/۰	۷/۲	۷/۵	۰/۰
۰/۶۴	۷/۷۵	۰/۶۴	۷/۷۵	۷/۸	۰/۲
۰/۶۴	۷/۸۵	۰/۶۴	۷/۸۵	۷/۸	۰/۴
۱/۸۸	۷/۸۵	۱/۲۵	۷/۹	۸/۰	۰/۶
۲/۵۳	۷/۷	۱/۲۷	۷/۸	۷/۹	۰/۸
۱/۸۸	۷/۸۵	۰/۰	۸/۰	۸/۰	۱/۰
۲/۶۱	۷/۸۵	۱/۹۶	۷/۸	۷/۶۵	۱/۲
۶/۹۴	۷/۷	۵/۵۶	۷/۶	۷/۲	۱/۴
۳۷/۲۵	۷/۰	۲۲/۵۵	۶/۲۵	۵/۱	۱/۶
۴/۴۸	۷/۰	۴/۴۸	۷/۰	۶/۷	۱/۸
۸/۶۸	۸/۱	۰/۷۹	۸/۸	۸/۸۷	۲/۰
۲/۹۴	۸/۲۵	۰/۰	۸/۵	۸/۵	۲/۲
۲/۵	۷/۸	۰/۰	۸/۰	۸/۰	۲/۴
۵/۳۳	۷/۱	۰/۶۷	۷/۴۵	۷/۵	۲/۶
۹/۰۹	۷/۰	۰/۲۶	۷/۶۸	۷/۷	۲/۸
۱۰/۹۶	۶/۵	۰/۰	۷/۳	۷/۳	۳/۰
۶/۴۰		۲/۷۵	Average Error %		

آزمایشگاهی در هر دو مدل، کمتر از ۵ درصد (خطای مدل‌سازی مدل DB1_NA1 معادل با ۲/۷۵ درصد و خطای مدل‌سازی مدل DB1_NB1 معادل با ۴/۳۱ درصد) بوده که بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی ایجادشده در شبیه‌سازی انتقال رسوب لایه بستر تحت جریان شکست سد بوده است.

نتایج مدل‌سازی عددی شکست تدریجی سد

در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پدیده شکست تدریجی سد برای سه مدل (DB2_NA1, DB2_NC1, DB2_NB1) ارائه شده است. در این سه مدل، ضخامت لایه رسوب در مخزن و پایین دست سد معادل با ۸ سانتی‌متر بوده و ارتفاع آب پشت سد ۳۷ سانتی‌متر است. همچنین مصالح رسوب از تیپ A, B, C به ترتیب در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۱۰ کانتور تغییرات تراز سطح آب و کانتور تغییرات ضخامت لایه رسوبات بستر برای مدل DB2_NA1 در بازه زمانی صفر تا ۲ ثانیه با گام‌های زمانی ۰/۵ ثانیه برای نمونه ارائه شده است. برای بررسی کمی میزان تغییرات ضخامت لایه رسوبات بستر، پروفیل رسوبات بستر پس از اتمام مدل‌سازی برای هر سه مدل شکست تدریجی (DB2_NA1, DB2_NB1, DB2_NC1) در شکل ۱۱



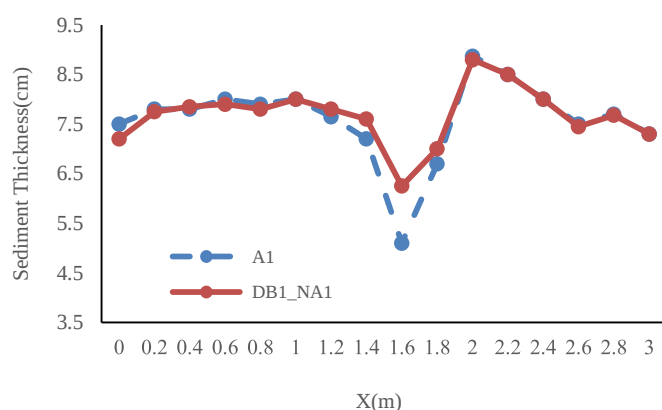
شکل ۸- تغییرات پروفیل لایه رسوب در مدل‌های CA3, CA4 و مدل آزمایشگاهی A1

نتایج مدل‌سازی عددی شکست سد آبی

براساس سناریوهای مدل‌سازی ارائه شده در جدول ۲ مدل‌سازی عددی انجام شده است. مدل‌های عددی (DB1_NA1, DB1_NB1) شبیه‌سازی دو آزمایشگاهی (A1, B1) بوده که برای ارزیابی عملکرد و دقت مدل‌سازی عددی نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۹ تغییرات ضخامت لایه رسوب و میزان دقت مدل‌سازی عددی نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل (شکل ۹) مشخص می‌شود که میزان میانگین خطای مدل‌سازی در مدل عددی نسبت به نتایج مدل

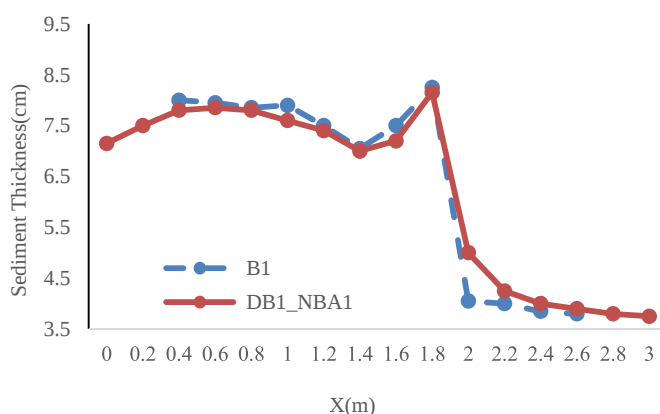
است. براین اساس نتایج حاصل از سه مدل (DB1_NA1 vs DB2_NA1, DB1_NB1 vs DB2_NB1) و (DB1_NC1 vs DB2_NC1) مقایسه و ارزیابی شده است.

ارائه شده است. به منظور ارزیابی تأثیر نوع شکست سد در مکانیسم انتقال رسوبات لایه بستر، مدل‌هایی که از نظر خصوصیات و جزئیات مدل‌سازی همچون ضخامت لایه رسوب و نوع مصالح ذرات رسوب کاملاً یکسان بوده‌اند و تنها در نوع شکست سد متفاوت هستند، بررسی شده



Error%	DB1_NA1	A1	X
۴/۰	۷/۲	۷/۵	۰
۰/۶۴	۷/۷۵	۷/۸	۰/۲
۰/۶۴	۷/۸۵	۷/۸	۰/۴
۱/۲۵	۷/۹	۸/۰	۰/۶
۱/۲۷	۷/۸	۷/۹	۰/۸
۰/۰	۸	۸/۰	۱/۰
۱/۹۶	۷/۸	۷/۶۵	۱/۲
۵/۵۶	۷/۶	۷/۲	۱/۴
۲۲/۵۵	۶/۲۵	۵/۱	۱/۶
۴/۴۸	۷/۰	۶/۷	۱/۸
۰/۷۹	۸/۸	۸/۸۷	۲/۰
۰/۰	۸/۵	۸/۵	۲/۲
۰/۰	۸/۰	۸/۰	۲/۴
۰/۶۷	۷/۴۵	۷/۵	۲/۶
۰/۲۶	۷/۶۸	۷/۷	۲/۸
۰/۰	۷/۳	۷/۳	۳/۰

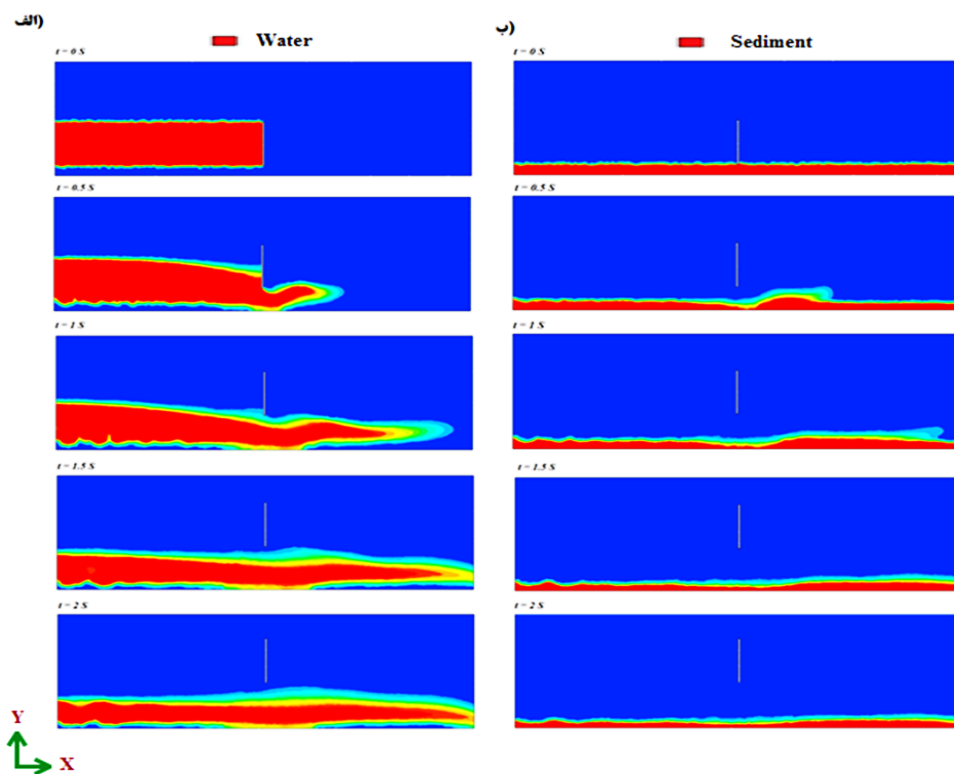
Average Error % ۲/۷۵



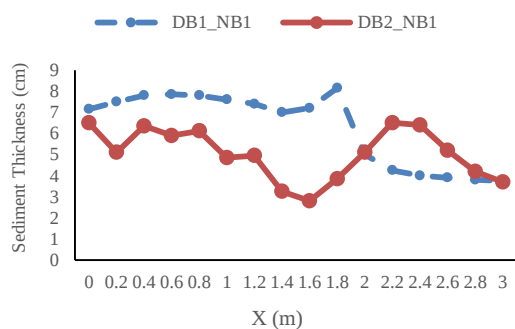
Error%	DB1_NB1	B1	X
-	۷/۱۵	-	۰
-	۷/۵	-	۰/۲
۲/۵	۷/۸	۸/۰	۰/۴
۱/۲۶	۷/۸۵	۷/۹۵	۰/۶
۰/۶۴	۷/۸	۷/۸۵	۰/۸
۳/۸	۷/۶	۷/۹	۱/۰
۱/۳۳	۷/۴	۷/۵	۱/۲
۰/۷۱	۷/۰	۷/۰۵	۱/۴
۴/۰	۷/۲	۷/۵	۱/۶
۱/۲۱	۸/۱۵	۸/۲۵	۱/۸
۲۳/۴۶	۵/۰	۴/۰۵	۲/۰
۶/۲۵	۴/۲۵	۴/۰	۲/۲
۳/۹	۴/۰	۳/۸۵	۲/۴
۲/۶۳	۳/۹	۳/۸	۲/۶
-	۳/۸	-	۲/۸
-	۳/۷۵	-	۳/۰

Average Error % ۴/۳۱

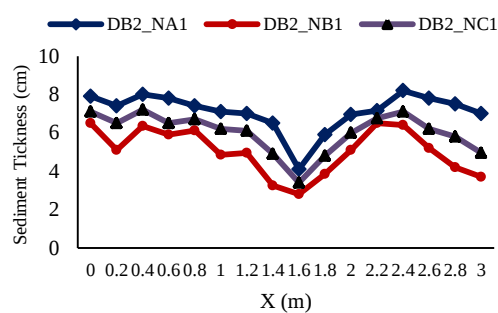
شکل ۹- نتایج حاصل از عملکرد مدل عددی انتقال رسوب بر اثر شکست سد، الف) تغییرات لایه رسوب بین مدل آزمایشگاهی A1 و مدل عددی DB1_NA1، ب) مقایسه نتایج (تغییرات لایه رسوب) بین مدل آزمایشگاهی B1 و مدل عددی DB1_NB1



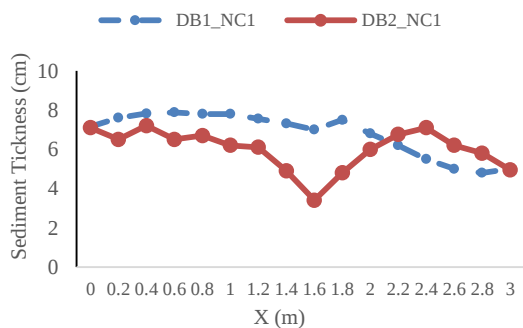
شکل ۱۰- نتایج حاصل از مدل DB2_NA1، الف) تغییرات پروفیل سطح آب، ب) تغییرات ضخامت لایه رسوب



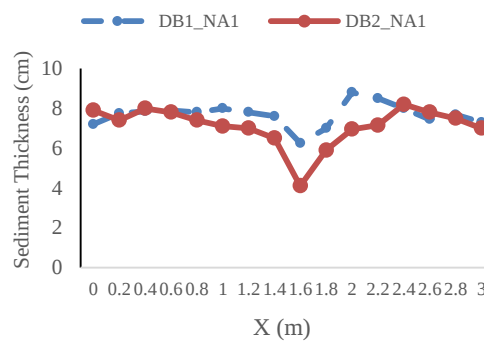
شکل ۱۳- ارزیابی تأثیر نوع شکست سد در دو مدل عددی DB1_NB1 vs DB2_NB1



شکل ۱۱- پروفیل تغییرات ضخامت لایه بستر در مدل‌های شکست تدریجی



شکل ۱۴- ارزیابی تأثیر نوع شکست سد در دو مدل عددی DB1_NC1 vs DB2_NC1



شکل ۱۲- ارزیابی تأثیر نوع شکست سد در دو مدل عددی DB1_NA1 vs DB2_NA1

در اشکال ۱۲ تا ۱۴، پروفیل تغییرات بستر رسوبی براساس مدل‌های عددی مشابه که تنها در نوع شکست سد (آنی/ تدریجی) متفاوت بوده، ارائه شده‌است. با توجه به نتایج حاصل، مشخص می‌شود که میزان انتقال رسوبات بستر و به تبع آن کاهش ضخامت لایه رسوب در همه مقایسه‌های صورت گرفته، در شکست تدریجی سد دارای مقادیر بیشتری نسبت به شکست آنی سد بوده است. به بیان دیگر، ضخامت لایه رسوب در شرایط مدل‌سازی یکسان در شکست از نوع تدریجی کاهش بیشتری نسبت به شکست آنی یافته است، به گونه‌ای که درصد تغییرات لایه رسوبات در شرایط شکست آنی نسبت به شکست تدریجی برای مصالح درشت‌دانه شنی (مصلح A)

معادل با ۷/۴۷ درصد، برای مصالح ریزدانه ماسه‌ای (مصلح نوع B) معادل با ۱۹/۳۵ درصد و برای مصالح میانی (مصلح نوع C) معادل با ۱۱/۵۲ درصد بوده است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل مشخص شد که در شرایط مدل‌سازی شکست تدریجی سد با حرکت دریچه سد به صورت تدریجی با گذشت زمان، مدل‌سازی شده است؛ بنابراین مدت زمان تخلیه آب و همچنین فعل و انفعالات بین آب و رسوب بیشتر از شکست آنی بوده و از طرفی به علت تخلیه آب از دریچه متحرک میزان نوسانات فشار بیشتری بر بستر اعمال شده که موجب افزایش انتقال رسوبات بستر و کاهش ضخامت لایه رسوب نسبت به شکست آنی شده است.

جدول ۵- ارزیابی میزان تأثیر نوع شکست بر پدیده انتقال رسوب بر اثر شکست سد

ارزیابی مدل‌های مقایسه‌ای	مدل عددی	میانگین ضخامت رسوب (cm)	درصد کاهش ضخامت لایه رسوب
DB1_NA1 vs DB2_NA1	DB1_NA1	۷/۶۸	۷/۴۷
	DB2_NA1	۷/۱۰	
DB1_NC1 vs DB2_NC1	DB1_NC1	۶/۷۹	۱۱/۵۲
	DB2_NC1	۶/۰۱	
DB1_NB1 vs DB2_NB1	DB1_NB1	۶/۲۵	۱۹/۳۵
	DB2_NB1	۵/۰۴	

برای ارزیابی کمی از تأثیر پارامتر نوع شکست سد در پدیده انتقال رسوب، در جدول ۵، مقادیر میانگین ضخامت لایه رسوب در مدل‌های مورد مقایسه ارائه شده است. همچنین درصد کاهش ضخامت لایه رسوب برای هریک از مقایسه‌های انجام شده، ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این پژوهش، ارزیابی تأثیر نوع شکست سد بر تغییرات مورفولوژی بستر رسوبی بوده که در قالب مطالعات آزمایشگاهی و عددی پیاده‌سازی شده است. در این مطالعات نوع شکست سد (آنی و تدریجی) و نوع مصالح لایه رسوب (رسوبات شنی، ماسه‌ای و میانه) به عنوان متغیرهای اصلی ارزیابی شده است. همچنین تأثیر لایه رسوبات مخزن سد بر تغییرات مورفولوژی بستر در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مدنظر قرار گرفته است. مدل‌سازی آزمایشگاهی براساس دو مدل شکست آنی سد (مدل‌های A1, B1) با ضخامت لایه رسوب یکسان و با تیپ مصالح رسوب متفاوت (تیپ A, B) انجام شده است.

نتایج نشان داد که در منطقه شکست سد (پیرامون موقعیت دریچه بازشو (تراز ۱/۵ متر طولی)) در هر دو مدل ابتدا کاهش لایه رسوب و بعد از آن افزایش لایه رسوب رخ داده است. میزان کاهش و افزایش ضخامت لایه رسوب پیرامون منطقه شکست در مدل A1 نسبت به مدل B1 دارای مقادیر بیشتری بوده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌های آزمایشگاهی مشخص می‌شود که نوع مصالح ذرات رسوب به عنوان یک پارامتر مؤثر در تغییرات مورفولوژی بستر تحت پدیده شکست سد بوده، به گونه‌ای که میانگین تغییرات ضخامت لایه رسوب در مدل A1 با بستر رسوبی شنی (قطر متوسط ذرات ۲۰ میلی‌متر) ۱۸/۶ درصد بیشتر از میانگین تغییرات ضخامت لایه رسوب در مدل B1 با بستر رسوبی ماسه‌ای (قطر متوسط ذرات ۳ میلی‌متر) بوده است. براساس نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی مدل عددی نسبت به اندازه مشخص شد که مش‌بندی با اندازه ۱ سانتی‌متر (مدل CA1) دارای خطای مدل‌سازی ۲/۴۱ درصد نسبت به مدل آزمایشگاهی بوده و نسبت به

با ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های عددی مشخص شد که اندازه ذرات رسوب (نوع مصالح رسوب) در هر دو نوع شکست آبی و تدریجی سد به‌عنوان پارامتر مؤثر در تغییرات مورفولوژی بستر بوده است. درصد تغییرات لایه رسوبات در شرایط شکست آبی نسبت به شکست تدریجی برای مصالح درشت‌دانه شنی (مصالح A) معادل با ۷/۴۷ درصد، برای مصالح ریزدانه ماسه‌ای (مصالح نوع B) معادل با ۱۹/۳۵ درصد و برای مصالح میانی (مصالح نوع C) معادل با ۱۱/۵۲ درصد بوده است.

منابع

1. Bahmanpouri F. Daliri M. Khoshkonesh A. Namin M. M. and Buccino M. 2021. Bed compaction effect on dam break flow over erodible bed; experimental and numerical modeling. *Journal of Hydrology*. 594, p.125645.
2. Capart H. and Young D.L. 1998. Formation of a jump by the dam-break wave over a granular bed. *Journal of Fluid Mechanics*. 372: 65-187.
3. Dhiman S. and Patra K. C. 2020. Experimental study of embankment breach based on its soil properties. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 26(3): 247-257.
4. Fraccarollo L. and Capart H. 2002. Riemann wave description of erosional dam-break flows. *Journal of Fluid Mechanics*. 461: 183-228.
5. Froehlich D. C. 2008. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134(12): 1708-1721.
6. Garoosi F. Mellado-Cusichua A. N. Shademani M. and Shakibaeinia A. 2022. Experimental and numerical investigations of dam break flow over dry and wet beds. *International Journal of Mechanical Sciences*. 215: 106946.
7. ICOLD Bulletin 111, 1998. Dam-break flood analysis.
8. Issakhov A. and Zhandaulet Y. 2020. Numerical study of dam break waves on movable beds for complex terrain by volume of fluid method. *Water Resources Management*. 34: 463-480.
9. Khoshkonesh A. Daliri M. Riaz K. Dehrashid F. A. Bahmanpouri F. and Di Francesco S. 2022. Dam-break flow dynamics over a stepped channel with vegetation. *Journal of Hydrology*. 613: 128395.
10. Khosravi K. Habibnejad M. Shahedi K. Chegini A. and Tiefenbacher J.P. 2020.

مدل‌های عددی دیگر (مدل CA0 با اندازه مش ۰/۵ و مدل CA2 با اندازه مش ۲ سانتی‌متر) دارای دقت قابل‌قبولی در مدل‌سازی عددی تغییرات مورفولوژی بستر براساس جریان شکست سد بوده است. همچنین نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی مدل عددی نسبت به دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ /Standard و $k-\epsilon$ / RNG نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ /Standard دارای خطای مدل‌سازی ۲/۷۵ درصد بوده که نسبت به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ /RNG با خطای مدل‌سازی ۶/۴ درصد عملکرد بهتری داشته است.

با بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی دو مدل آزمایشگاهی مشخص شد که میانگین خطای مدل‌سازی کمتر از ۵ درصد (مدل DB1_NA1 دارای خطای ۲/۷۵ درصد، مدل DB1_NB1 دارای خطای مدل‌سازی ۴/۷۱ درصد) بوده که بیانگر دقت بالای مدل عددی و توانایی این مدل در شبیه‌سازی انتقال رسوبات بستر بر اثر شکست سد بوده است.

برای مدل‌سازی عددی شکست تدریجی سد در مدل فلوئنت از دریچه متحرک استفاده شده است. برای این منظور دریچه متحرک که دارای شرط مرزی دیوار نفوذناپذیر بوده، در مقابل توده آب سد قرار گرفته و براساس گذشت زمان با حرکت رو به بالا منجر به تخلیه تدریجی آب پشت سد می‌شود. در مدل فلوئنت برای پیاده‌سازی حرکت دریچه از تکنیک مش متحرک استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که میزان انتقال رسوبات بستر و به تبع آن کاهش ضخامت لایه رسوب، در شکست تدریجی سد دارای مقادیر بیشتری نسبت به شکست آبی تحت شرایط مدل‌سازی یکسان بوده است. به بیان دیگر ضخامت لایه رسوب در شرایط مدل‌سازی یکسان در شکست از نوع تدریجی کاهش بیشتری نسبت به شکست آبی یافته است. شکست تدریجی سد با حرکت دریچه سد به‌صورت تدریجی با گذشت زمان، شبیه‌سازی انجام شده است؛ بنابراین مدت زمان تخلیه آب و همچنین فعل‌وانفعالات بین آب و ذرات رسوب بیشتر از شکست آبی بوده و از طرفی به دلیل تخلیه آب از دریچه متحرک میزان نوسانات فشار بیشتری بر بستر اعمال شده که موجب افزایش انتقال رسوبات بستر و کاهش ضخامت لایه رسوب نسبت به شکست آبی شده است.

22. Wang B. Zhang J. Chen Y. Peng Y. Liu X. and Liu W. 2019. Comparison of measured dam-break flood waves in triangular and rectangular channels. *Journal of Hydrology*. 575: 690-703.
23. Wu G. Yang Z. Zhang K. Dong P. and 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.
24. Ying X. Jorgeson J. and Wang S.S. 2009. Modeling dam-break flows using finite volume method on unstructured grid. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 3(2): 184-194.
25. You L. Li C. Min X. and Xiaolei T. 2012. Review of dam-break research of earth-rock dam combining with dam safety management. *Procedia Engineering*. 28: 382-388.
- Experimental investigation of bed evolution resulting from dam break. *Journal of Hydraulic Structures*. 6(2): 23-33.
11. Kocaman S. Evangelista S. Guzel H. Dal K. Yilmaz A. and 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.
12. Li C. Gao H. Xu Z. and Huang Y. 2021. Sensitivity Analysis of Rock-Fill Dam Break Flood on Different Dam Break Durations. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 11(3): 89-103.
13. Liu Y. Yang C. and Chen X. 2022. Experimental study of bed morphology evolution under two-dimensional dam-break flow. *Journal of Hydraulic Research*. 60(3): 496-503.
14. McMullin N. 2015. Numerical and experimental modelling of dam break interaction with a sediment bed (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
15. Moramarco T. Barbetta S. Pandolfo C. Tarpanelli A. Berni N. and Morbidelli R. 2014. Spillway collapse of the Montedoglio Dam on the Tiber River, Central Italy: Data collection and event analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*. 19(6): 1264-1270.
16. Najar M. and Ali G.Ü.L. 2022. Investigating the influence of dam-breach parameters on dam-break connected flood hydrograph. *Teknik Dergi*. 33(5).
17. Rodi W. 2017. Turbulence modeling and simulation in hydraulics: A historical review. *Journal of Hydraulic Engineering*. 143(5): 03117001.
18. Soares-Fraza S. Canelas R. Cao Z. Cea L. Chaudhry H. M. Die Moran A. El Kadi K. Ferreira R. Cadórniga I. F. Gonzalez-Ramirez N. and Greco M. 2012. Dam-break flows over mobile beds: experiments and benchmark tests for numerical models. *Journal of Hydraulic Research*. 50(4): 364-375.
19. USACE. 2010. US Army Corps of Engineers., Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS, River Analysis System. Hydraulic Reference manual, version 4.1.
20. Vaskinn K. A. Løvoll A. Höeg K. Morris M. A. R. K. Hanson G. and Hassan M. A. A. M. 2004. Physical modeling of breach formation: large scale field tests. *Proceedings of Dam Safety*. pp.1-16.
21. Wang B. Liu W. Wang W. Zhang J. Chen Y. Peng Y. Liu X. and Yang S. 2020. Experimental and numerical investigations of similarity for dam-break flows on wet bed. *Journal of Hydrology*. 583: 124598.