

# Numerical Modeling of Bed Morphology Downstream of Flushing Channels in Diversion Dams under Various Gate Openings and Slopes

Hessam Vatandoust<sup>1\*</sup>, Ali Mahdi Abhari<sup>2</sup>

1- Department of Civil Engineering, Pa.C., Islamic Azad University, Parand, Iran.

2- M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

\*[Hessam.vatandoust@iaua.ac.ir](mailto:Hessam.vatandoust@iaua.ac.ir)

Received: 15 August 2025

Revised: 27 October 2025

Accepted: 31 October 2025

Discussion: 22 June 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: [www.jhyd.iaha.ir](http://www.jhyd.iaha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Sediment flushing is a significant phenomenon in hydraulic engineering, influencing both river morphology and environmental stability downstream of diversion dams. Experimental studies in this domain are often costly and time-consuming. Consequently, numerical modeling has emerged as a practical and efficient approach for analyzing sediment transport processes. This study focuses on modeling the impact of varying channel slopes and gate openings on sediment bed evolution in sediment-slucing canals of diversion dams using Flow-3D software.

**Methodology:** The study utilized experimental data from a laboratory flume at the University of Tehran to calibrate the numerical model. The flume, measuring 2.5 m in length, 0.16 m in width, and 0.35 m in height, featured a centrally located vertical sluice gate. Sediment material consisted of uniform sand particles with a mean diameter of 3.5 mm. Simulations were performed using the Volume of Fluid (VOF) method in Flow-3D, applying different gate openings (25%, 50%, 100%) and channel slopes (5%, 10%, 15%). Three turbulence models (RNG,  $k-\epsilon$ , and LES) were evaluated, and the RNG model was selected due to its better agreement with experimental results.

**Results and Discussion:** Simulation results revealed that reduced gate openings led to increased scour depth and more pronounced sediment mounds formation downstream. The sediment bed profile exhibited minimal variation beyond 70% gate opening. Moreover, increasing channel slope resulted in greater scour depth near the gate and sequential sediment mound formation further downstream. The RNG turbulence model achieved a calibration error of only 3.4%, outperforming the other models. Temporal analysis indicated that sediment transport and profile formation occurred rapidly after gate opening, but profile changes were less significant beyond 0.6 seconds, suggesting that time was a secondary factor compared to channel slope and gate opening.

**Conclusion:** The study demonstrates that numerical modeling using Flow-3D with the RNG turbulence model provides a reliable framework for simulating sediment bed evolution downstream of sediment flushing structures. Gate opening and channel slope significantly influence the depth and pattern of sediment scour. For gate openings exceeding 70%, further increases have negligible effects. These findings can inform the design of sediment-flushing systems and support the development of optimized hydraulic structures for irrigation and water distribution networks.

**Keywords:** Sediment slice, Flow-3D, Turbulence models, bed profile, Gate opening percentage, Numerical simulation.

**Conflict of Interest:** The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

**Funding:** The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Data Availability Statements:** All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

**Authors' contribution:**

**First Author:** Mutual Collaboration.

**Second Author:** Mutual Collaboration.

# مدل سازی عددی بستر رسوبی پایین دست مجاری شست و شوی بند های انحرافی برای باز شدگی ها و شیب های متفاوت

حسام وطن دوست<sup>۱\*</sup>، علی مهدی ابهری<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

\*Hessam.vatandoust@iaui.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

**چکیده:** یکی از مباحث مورد توجه در مهندسی هیدرولیک، پدیده رسوبشویی و اثرات مخرب آن بر مورفولوژی و زیست محیط رودخانه در پایین دست آن است. در بررسی این پدیده پیش بینی تغییرات تراز بستر رسوبی ناشی از رسوبشویی ضروری است. از آنجایی که انجام تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی در زمینه این پدیده معمولاً پرهزینه و زمان بر است، چنانچه بتوان به راهکاری برای بررسی آن به طور گسترده تر و کم هزینه تر رسید، می توان در کنترل هزینه ها و همچنین افزایش سرعت تحقیقات گام مهمی برداشت. در این پژوهش به بررسی اثرگذاری فاکتورهای شیب، میزان بازگشایی دریاچه و زمان بر تغییرات بستر رسوبی در مجاری رسوبشویی پرداخته شده است. با مقایسه صورت گرفته بر روی مدل فیزیکی و آزمایشگاهی مشخص گردید مدل آشفتگی RNG با میزان خطای ۴/۳ درصد نسبت به دو مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  و  $Les$  در شبیه سازی بستر فرسایش پذیر مناسب تر بوده و جهت ادامه مطالعات انتخاب گردید. پس از مشخص شدن میزان خطا با تعریف آزمون های مختلف مشخص گردید با کاهش میزان باز شدگی دریاچه از ۱۰۰ به ۵۰ و ۲۵ درصد عمق آبستنگی در مجاورت دریاچه حدود ۳۵ و ۶۰ درصد و طول ناحیه فرسایش یافته نیز در پایین دست تا ۱/۴ برابر افزایش می یابد. بررسی ها نشان داد با افزایش شیب مجرای رسوبشویی از ۵ به ۱۵ درصد عمق آبستنگی در مجاورت دریاچه تا ۴۵ درصد افزایش می یابد و حجم رسوبات منتقل شده به پایین دست با افزایش حدود ۵۰ درصدی مواجه می گردد. همچنین مشخص گردید فاکتور زمان در شکل گیری پروفیل بستر نسبت به شیب مجرا و باز شدگی دریاچه تاثیر کمتری را دارد.

**کلیدواژگان:** مجرای رسوبشویی، Flow-3D، مدل های آشفتگی، تغییرات تراز سطح بستر، درصد باز شدگی دریاچه.

## ۱- مقدمه

تخلیه رسوبها برای شستشو و خروج این رسوبها استفاده می شود. در این راستا بررسی و شناخت فرایند تغییرپذیری های ریخت شناسی بستر رودخانه پس از رسوب شویی امری ضروری و مهم به نظر می رسد که این مهم می بایست از طریق مدلسازی فیزیکی و یا عددی صورت پذیرد. از آنجایی که ساخت مدل فیزیکی هزینه بر و زمانبر

بند های انحرافی سازه هایی هستند که به منظور بهره برداری از توان بالقوه آب های جاری و هدایت جریان در رودخانه ها در مقابل جریان آب ساخته شده و سطح آب را برای ایجاد بار لازم بالا می آورد. از آنجایی که جلوگیری از ورود رسوبها به آبراهه های آبیاری از مهم ترین مسئله ها است، از مجرای

گویای آن است که انتخاب مدل مناسب و اعمال اصلاح‌های لازم در معادله‌های، نقش کلیدی در بهبود دقت شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی و رسوبی دارد (Lai et al., 2024). نتایج بررسی‌های صورت گرفته در سال ۲۰۲۳ در زمینه‌ی هیدرولیک و رسوب نشان داد مدل RNG-K- $\epsilon$  در پیش‌بینی نیمرخ‌های آبشستگی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های LES و استاندارد K- $\epsilon$  دارد. نتایج پژوهشی دیگر در همین سال نشان داد که بررسی آبشستگی در پایین دست نیازمند معادله‌های جدیدی برای دبی و سرعت انتقال رسوب است. نتایج بررسی‌های صورت گرفته نیز نشان دادند که طول و ارتفاع دیواره‌های جداکننده جریان نقش مهمی در افزایش بازده شستشوی رسوب‌ها دارند (Yan et al., 2023; Zaffar et al., 2023). نتایج بررسی‌های سال ۲۰۲۲ بر بهینه‌سازی صفحه‌های مستغرق هدایت کننده جریان تمرکز داشت و نشان داد زاویه ۱۵ درجه با ایجاد تعادل بین بازده شستشو (۰/۸۰) و کاهش خطر آبشستگی موضعی، بهترین گزینه است (Xie et al., 2022). در نتایج بررسی‌های صورت گرفته در سال ۲۰۲۰ مشخص شد که میزان بازشدگی دریچه‌های رسوب شویی باید طوری در نظر گرفته شود که بزرگترین ذرات رسوبی به راحتی از آن عبور کنند. همچنین پژوهشی دیگر نشان داد که جانمایی دریچه تأثیر قابل توجهی بر شرایط آبراهه پایین دست دارد، به طوری که هرچه به محل دریچه نزدیک‌تر باشیم، میزان این تأثیرگذاری‌ها بیشتر می‌شود. نتایج بررسی‌ها نیز نشان داد رسوب‌ها عمدتاً در یک کانال بالادست ۱۰ کیلومتری پایین دست تجمع می‌کنند که این پدیده منجر به افزایش سطح سیلاب، کاهش سطح آب و کاهش عمق آبراهه می‌شود. از سوی دیگر، نتایج بررسی‌ها همچنین نشان داد که به‌رغم طراحی متقارن دریچه‌های مرکزی، الگوی جریان در پایین دست به شدت نامتقارن بوده و پدیده‌هایی مانند پرش هیدرولیکی، انحراف جریان اصلی و تشکیل منطقه‌ها با گردابه‌های گسترده مشاهده می‌شود. این نامتقارنی با افزایش نسبت انبساط تشدید می‌شود. یافته‌های این پژوهش‌ها می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای بررسی

است، لذا در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عددی رواج یافته است. در بین روش‌های عددی در سال‌های اخیر روش حجم محدود<sup>۱</sup> توسط بسیاری از دانشمندان استفاده شده است که این روش دارای قابلیت‌هایی از جمله توانمندی در مدل‌سازی به گونه‌ای که فرآیندهای ریخت‌شناسی، انتقال رسوب و هیدرودینامیکی را لحاظ کند، است. از جمله این مدل‌های عددی می‌توان به نرم افزارهای هیدرودینامیکی گوناگونی از جمله Flow-3D، Fluent و Ansys CFX برای شبیه‌سازی جریان‌های هیدرولیکی اشاره نمود. در این تحقیق با توجه به اهمیت موضوع، از نرم‌افزار Flow-3D که از دقت بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های سه بعدی و رسوب‌ها در روش حجم محدود برخوردار است، برای شبیه‌سازی جریان‌های رسوبی در بستر استفاده شده است.

نتایج بررسی‌های صورت گرفته در سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ به مقایسه سه مدل آشفستگی LES،  $k-\epsilon$  و RNG برای پیش‌بینی عمق آبشستگی پرداختند. نتایج نشان داد مدل LES عمق آبشستگی را بیش از حد برآورد می‌کند، در حالی که مدل‌های  $k-\epsilon$  و RNG با خطای حدود ۵ درصد، همخوانی بهتری با داده‌های تجربی داشتند. همچنین مشخص شد که افزایش ضریب بار بستر در نزدیکی آبشکن، عمق آبشستگی را افزایش می‌دهد (Gupta et al., 2025; Zerihun, 2024). نتایج بررسی‌های صورت گرفته در سال ۲۰۲۴ نشان داد محدوده عدد فرود ۰/۱۶ تا ۰/۳ بهترین شرایط را برای رسوبشویی فراهم می‌کند، ضمن اینکه افزایش عرض مجرای شستشو باعث کاهش دامنه مؤثر آن شده و عرض مجرای شستشو به عنوان عاملی کلیدی در کارایی رسوبشویی شناسایی شد (Asadi et al., 2024). مدل‌های مختلف هیدرولیک فلاشینگ (۱ بعدی، ۲ بعدی و ۳ بعدی CFD) بررسی و کارهایی برای انتخاب مدل مناسب بر مبنای ویژگی‌های مخزن و روش شستشو ارائه شد. این بررسی‌ها همچنین نشان داد که مدل‌های پیشنهادی در پیش‌بینی تکامل بستر و سطح آزاد آب به نسبت موفق بوده‌اند، اما اثرگذاری‌های جریان سه بعدی می‌تواند بر دقت نتایج تأثیر بگذارد. به‌طور کلی، یافته‌ها

رسوب جابه‌جا شده دارد. همچنین در سال ۲۰۱۳ اثر تراز بستر بر جریان شکست سد روی بستر فرسایش پذیر بررسی و ارزیابی شد و حالت‌های مختلف تراز بستر و نیز مقایسه بین بستر سخت و فرسایش پذیر انجام گرفت که نتایج این تحقیق نشان داد اختلاف تراز بستر و نوع بستر فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان شکست و مقدار رسوب منتقل شده را به طور معناداری تغییر می‌دهد (Bahmanpour et al., 2012, 2013).

باتوجه به آنچه تاکنون انجام شده، باوجود پژوهش‌های پرشماری که در زمینه مدل‌سازی عددی جریان و انتقال رسوب در سازه‌های آبی انجام شده است، هنوز میزان اثرگذاری عامل‌هایی مانند بازشدگی‌های مختلف دریچه، شیب کف مجرا و زمان بر تغییرپذیری‌های بستر رسوبی در مجراهای رسوب‌شویی بندهای انحرافی به صورت جامع بررسی نشده است. از این رو، انجام این پژوهش که با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D که بتواند دقت مدل‌های آشفتگی را در شرایط واقعی ارزیابی کرده و نقش فراسنجه‌های یاد شده را در تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی بستر روشن سازد، ضروری به نظر می‌رسد. در واقع هدف نهایی این تحقیق، افزون بر مشخص شدن انتخاب مدل آشفتگی مناسب، مشخص نمودن عامل اصلی تعیین‌کننده مابین عامل‌های یاد شده بر میزان تغییرپذیری‌های تراز بستر رسوبی پایین دست بندهای انحرافی و ارائه نتایج به دست آمده از آن به بهره‌برداران است.

## ۲- مواد و روش‌ها

برای انجام بررسی اثرگذاری‌های بازگشایی دریچه، شیب بستر و زمان بر روی تغییرپذیری‌های بستر رسوبی در مجراهای رسوب‌شویی بندهای انحرافی از نرم‌افزار FLOW-3D که یک مدل مناسب برای مسئله‌های پیچیده سیال‌ها که دارای بازه کاربرد وسیعی است، استفاده شد. این برنامه برای جریان‌های سه بعدی نا ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند کاربرد دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم استفاده می‌شود. به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادله‌های گسسته شده مورد استفاده مانند

الگوهای پیچیده جریان و طراحی سازه‌های حفاظتی در برابر فرسایش باشد (Chen et al., 2020; Zhang et al., 2020). بررسی‌های صورت گرفته در سال ۲۰۱۹ نشان داد سازوکار ورود رسوب به آبگیر جانبی به طور مستقیم به نسبت دبی انحرافی بستگی دارد. در دبی‌های پایین، رسوب تنها از لبه بالادست وارد می‌شود، اما با افزایش دبی، ترکیبی از ورود پیوسته از پایین دست و دوره‌ای از بالادست مشاهده می‌شود. بهترین حالت برای کمترین رسوب ورودی، زاویه ۱۲۰ درجه با انحراف ۵۰ درجه است. نتایج بررسی‌های دیگر، با ارایه‌ی مدلی برای پیش‌بینی دقیق تر رسوب انحرافی نشان داد افزایش عدد فرود موجب کاهش ۵۳٪ رسوب انحرافی می‌شود و وجود صفحه‌های مستغرق با زاویه‌ی ۳۰ درجه برای انتقال رسوب و ۶۰ درجه برای مهار جریان مؤثر می‌باشد (Aminian et al., 2019; Hemmati & Daraby, 2019; Tavakoli et al., 2019). نتایج بررسی‌های بهره برداری از مخزن در سال ۲۰۱۸ نشان داد که ذخیره‌سازی رسوب در بالادست به عامل‌هایی مانند دبی جریان، اندازه دانه‌ها و ارتفاع سد بستگی دارد. جریان‌های قوی باعث آبشستگی و جریان‌های ضعیف تر موجب تجمع رسوب می‌شوند. همچنین، مدل‌سازی عددی با Flow3D تأیید کرد که این روش برای پیش‌بینی آبشستگی در سدهای بزرگ دقیق است. نتایج بررسی‌ها روی سد ساکوما نیز نشان داد که ترکیب فراسنجه‌های هیدرولیکی مانند ضریب زبری مانینگ و سرعت سقوط رسوب، بهترین پیش‌بینی را از رسوب‌گذاری ارائه می‌دهد، اما رابطه مستقیمی بین ضریب زبری و میزان رسوب یافت نشد و تأثیر دما بر رسوب‌دهی نیز ناچیز می‌باشد (Hanmaiahgari et al., 2018; Movahedi et al., 2018; Queen, 2018).

در سال ۲۰۱۲ یک پژوهش آزمایشگاهی به بررسی جریان ناشی از شکست سد بر روی بستر فرسایش پذیر پرداخت که در آن با استفاده از فلوم مدل رفتار موج شکست سد بر روی بسترهای مختلف (مسطح و پله‌ای) بررسی و تغییرپذیری‌های سطح آب، نیمرخ بستر و حجم رسوب منتقل شده اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد نوع و شکل بستر پایین دست تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و میزان

همان دانه بندی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی در کل آزمون های بعدی (که در ادامه به آن پرداخته می شود) استفاده شده است. برای انجام محاسبه ها در آغاز از یک شبکه منظم مستطیلی با سلول های مکعبی به ضلع  $0.1$  متر و به شمار  $360000$  سلول محاسبه شدنی استفاده شد. برای آماده سازی مدل، شرایط مرزی دیواره های آغازین، انتها و همچنین کف فلوم همخوان با شرایط آزمایشگاهی، از نوع دیواره (Wall) و نیز برای سقف فلوم به دلیل حضور اتمسفر، شرط مرزی متقارن (Symmetry) تعریف شد. بر مبنای شرایط آزمایشگاهی مدل، اختلاف ارتفاع آب بین بالادست و پایین دست دریاچه،  $0.35$  متر - همانند شرایط مدل آزمایشگاهی که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تهران (شکل ۱) انجام گرفته بود - انتخاب شد که پس از مقایسه و مشخص شدن میزان خطای مدل، آزمون های مختلف در مدل (شیب های متفاوت، در صد بازگشایی متفاوت و زمان) شبیه سازی و نتایج استخراج شد.

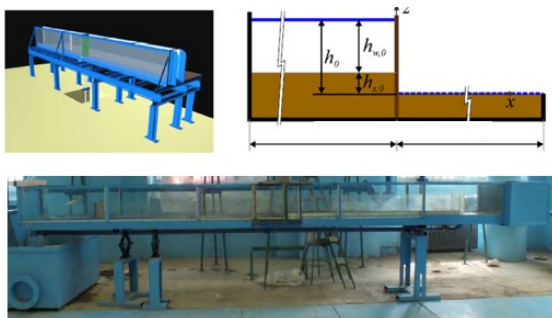


Fig. 1 The view of the Flume  
شکل ۱ فلوم آزمایشگاهی

همچنین، هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله اعمال تغییرپذیری ها به مدل برای آزمون ها (که در ادامه به هر دو مورد پرداخته خواهد شد) برای جلوگیری از اثرگذاری های دیواره بر روی رفتار جریان، نتایج در قسمت میانی فلوم برداشته شده است و از بررسی در قسمت های کناری و نزدیک به دیواره صرف نظر شده است و همان طور که پیشتر اشاره شد، باتوجه به برتری های نرم افزار Flow-3D برای مشخص شدن مرز دیوارها و اثرگذاری های آن از شرایط مرزی «Wall» نیز استفاده شد (شکل ۲).

لازم به یادآوری است باتوجه به مشخص شدن خطای  $4/3$  درصدی مدل در مرحله واسنجی (که در ادامه به آن

معادله های گسسته شده در روش تفاضل محدود می باشند. بر این مبنا FLOW-3D از روش های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادله ها بهره می برد. همچنین در نرم افزار FLOW-3D از دو روش فنی عددی برای شبیه سازی هندسی استفاده شده است. روش اول، روش حجم سیال (VOF) که این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می شود و روش دوم، روش کسر مساحت حجم مانع (FAVOR) که برای شبیه سازی سطح ها و حجم های سخت مانند مرزهای هندسی کاربرد دارد.

### ۳- واسنجی مدل

برای این منظور از اطلاعات به دست آمده از آزمایش های صورت گرفته در مدل آزمایشگاهی مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی دانشگاه تهران به طول  $5/2$  عرض  $0.16$  و ارتفاع  $0.35$  متر، استفاده شد که شیب کف آبراهه صفر بوده و از یک دریاچه کشویی که در وسط طول فلوم تعبیه می شود استفاده شده است (Bahmanpour et al., 2012, 2013). این دریاچه، از جنس پلاستیک بوده و دارای ضخامت  $8$  میلی متر و عرض  $16$  سانتی متر است که در شرایط اولیه آزمایش دریاچه روی بستر رسوبی قرار گرفته است. کف فلوم از جنس آهن گالوانیزه بوده که بر روی آن یک لایه رسوبی قرار می گیرد. مصالح بستر از ماسه با دانه بندی یکنواخت و قطر میانگین ذرات به تقریب  $3/5$  میلی متر است. وزن مخصوص اشباع و خشک مصالح بستر رسوبی ماسه ای، به ترتیب برابر با  $1820$  و  $1650$  کیلوگرم بر متر مکعب و زاویه اصطکاک درونی آن برابر با  $32$  درجه است. رطوبت بهینه برای ماسه حدود  $10/2$  درصد و نسبت تخلخل مصالح بستر  $60\%$  است. لازم به یادآوری است که در این تحقیق برای اطمینان از نتایج به دست آمده با استفاده از نتایج تحقیقی همانند که در یک فلوم آزمایشگاهی در دانشگاه تهران صورت گرفته بود به واسنجی مدل عددی پرداخته شد و به عینه ویژگی های مصالح فوق وارد نرم افزار شد. همچنین از آنجایی که در این پژوهش تمرکز بر ارزیابی اثر درصد بازگشایی دریاچه، شیب و زمان بر تغییرپذیری های بستر رسوبی می باشد و بررسی تاثیر دانه بندی و رطوبت دانه ها در این ارزیابی جزو زمینه های تحقیق نبوده، لذا از

شدنی با ابعاد سلول‌های گوناگون (ریز تا به نسبت درشت) انتخاب، و در نهایت با بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، شبکه‌ای از سلول‌های محاسبه شدنی انتخاب خواهند شد که نتایج دقیق‌تری را در سطح تراز رسوب‌های بستر در ثانیه ۰/۷۵ (یکی از گام‌های زمانی که در آن نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی برای تغییرپذیری‌های تراز بستر رسوب‌های کف ارائه شده بود) نشان دهد. البته باید مدت زمان شبیه‌سازی نیز در حد قابل قبولی قرار گیرد، زیرا هدف اصلی استفاده از نرم افزارهای تجاری دو جنبه اصلی صرفه جویی در زمان و هزینه‌ها می‌باشد. در این مرحله از واسنجی، سه گروه از مش بندی مطابق جدول ۱ بررسی شد.

پس از اجرای مدل مشخص شد که شبیه‌سازی صورت گرفته در تراز بستر رسوبی در مش بندی اول ۵ درصد در مش بندی دوم ۱۲۵ درصد و مش بندی سوم ۳۵ درصد خطا داشته و مش بندی اول دقت بیشتری داشته و شرایط نزدیک‌تری را به نتایج آزمایشگاهی دارد که در شکل ۳ نمایش داده شده است.

پرداخته خواهد شد) میزان درصد خطای احتمالی نتایج آزمون‌ها و حاشیه اطمینان و میزان قابلیت اعتماد به نتایج مشخص شد.

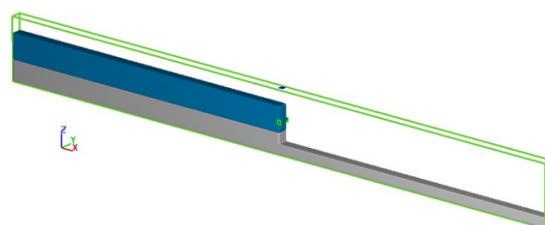


Fig. 2 Graphical view of the simulation

شکل ۲ نمایش نگاره‌ای شبیه‌سازی

برای بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، شبکه‌ای از سلول‌های محاسبه شدنی انتخاب خواهند شد که بهترین حالت را ارائه دهند. منظور از بهترین حالت انتخاب شبکه‌ای از سلول‌های محاسبه شدنی است که در همخوانی مناسب با نتایج آزمایشگاهی، دارای کمترین زمان موردنیاز برای شبیه‌سازی است. برای انجام این مرحله چند نوع شبکه سلول‌های محاسبه

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی شبکه سلول‌های محاسبه شدنی و خطای آن‌ها در مرحله واسنجی

Row	Cell Dimensions (cm) (X × Y × Z)	Number of Computational Cells in X Direction	Number of Computational Cells in Y Direction	Number of Computational Cells in Z Direction	Total Number of Computational Cells
Mesh 1	1*1*1	600	10	60	360000
Mesh 2	2*2*2	300	5	25	37500
Mesh 3	0.8*0.77*0.75 Max 0.8*0.77*1.25	700	13	75	682500

یکنواخت و با ابعاد ثابت ۱\*۱\*۱ سانتی‌متر به ترتیب در سه راستای X، Y و Z تنظیم شده است، استفاده شد (شکل ۴).

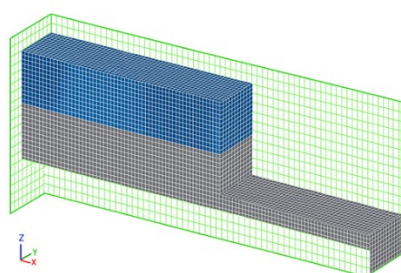


Fig. 4 Selected Mesh grid

شکل ۴ نمای کلی مش انتخابی

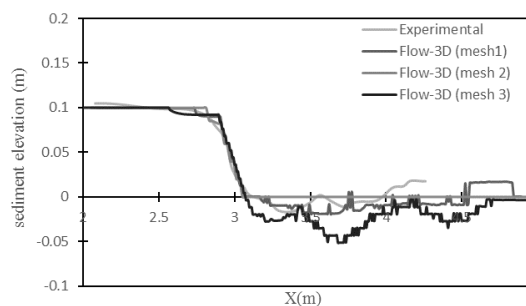


Fig. 3 The difference between three different meshes.

شکل ۳ اختلاف بین سه مش مختلف

در نتیجه برای ادامه تحقیق از سلول‌های محاسبه شدنی

۵۰۰ است (Shafai Bejestan, 2005). لذا باتوجه به سرعت‌های به وجود آمده (خط ترازهای سرعت) شکل ۶ در بازه‌های زمانی مختلف این تحقیق و عمق و گرانیوی آب وضعیت جریان در محدوده جریان ورقه‌ای قرار نمی‌گیرد.

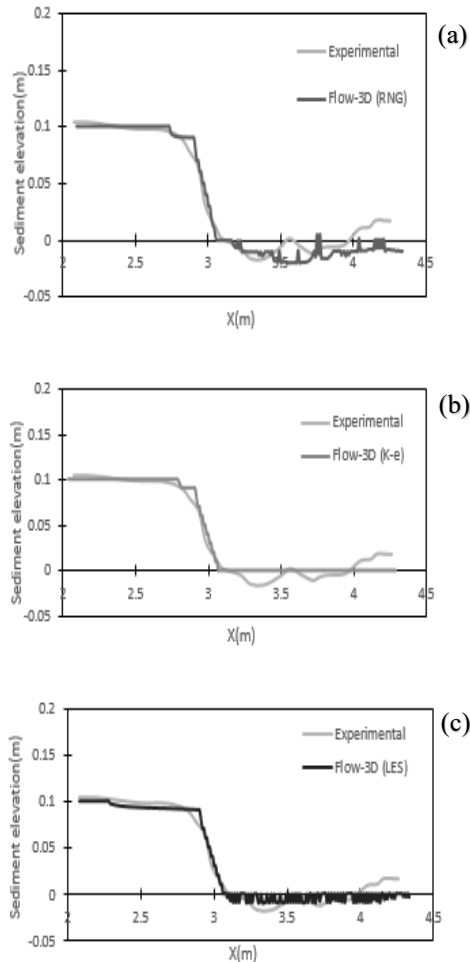


Fig. 5 Changes in the sediment bed level for three turbulence models: RNG, k-ε, and LES.

شکل ۵ تغییرپذیری‌های تراز بستر رسوبی را به ازای سه مدل آشفتگی RNG،  $k - \epsilon$  و LES

#### ۴- بحث و بررسی

برای بررسی جامع پدیده رسوب‌شویی در مجراهای رسوب‌شویی بندهای انحرافی شبیه‌سازی این پدیده در پنج آزمون برای تغییرپذیری‌های تراز بستر رسوبی انجام شده است. هدف از آزمون اول بررسی تأثیر میزان بازشدگی درپچه بر تغییرپذیری‌های بستر رسوبی است. آزمون دوم بررسی تأثیر استفاده از شیب در مجراهای رسوب‌شویی بر تغییرپذیری‌های بستر رسوبی را نشان می‌دهد. جدول ۲

در ادامه برای یافتن همخوان‌ترین مدل آشفتگی، مدل هندسی فلوم ساخته شده در نرم‌افزار، با مدل‌های RNG،  $k - \epsilon$  و LES موجود در نرم‌افزار Flow-3D اجرا و نتایج به دست آمده از آن برای گام زمانی ۰/۷۵ ثانیه با نتایج مستخرج در همین گام زمانی از مدل فیزیکی مقایسه شد. لازم به یادآوری است گام زمانی یاد شده دارای نتایج مستخرج در نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی برای تغییرپذیری‌های تراز بستر رسوب‌های کف می‌باشد. شکل ۵-ا الی ۵-ج به ترتیب تغییرپذیری‌های تراز بستر رسوبی را به ازای سه مدل آشفتگی RNG،  $k - \epsilon$  و LES نمایش می‌دهد.

بیشینه خطای ایجاد شده بین مدل شبیه‌سازی شده و مقدارهای آزمایشگاهی برای سه مدل آشفتگی RNG،  $k - \epsilon$  و LES به ترتیب برابر با ۴/۳، ۵/۵ و ۳/۸ درصد است. نتایج اولیه نشان داد مدل آشفتگی RNG، دقت مناسبی در شبیه‌سازی تراز سطح بستر رسوبی داشته و اندکی دقت آن بیشتر از مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  است. دقت شبیه‌سازی مدل آشفتگی LES در برآورد سطح تراز آب در بیشتر طول مسیر فلوم بسیار دقیق بوده اما ایراد جدی وارد بر آن سرعت کمتر موج مثبت به سمت پایین دست است، به گونه‌ای که در گام زمانی مورد نظر در ۰/۷۵ ثانیه، در انتهای نمودار در مقطع طولی  $X=4/5$  متر و پس از آن آب وارد فلوم نشده است، درحالی که در مدل آزمایشگاهی مورد تحقیق جریان از این مقطع گذر کرده است.

لازم به یادآوری است باتوجه به اینکه سدهای انحرافی هیچ‌گونه ذخیره‌ای ندارند و به طور معمول رودخانه در پایین‌دست در حالت عادی با عمق‌های کم حدود ۱۰ سانتی متر جاری‌ست و با توجه به نشریه ضوابط طراحی بندهای انحرافی (Ministry of Energy, 1999) که ارتفاع بندهای انحرافی به طور میانگین تا ۱۰ متر یاد شده کرده، لذا برای شبیه‌سازی این وضعیت در مدل در پایین‌دست ۳ میلی‌متر آب در نظر گرفته شد. همچنین از آنجایی که در جریان ورقه‌ای حرکت آب به صورت یک‌لایه کم‌عمق در بستر هموار و مستقیم و در سرعت‌های کم شکل می‌گیرد، لذا امکان ایجاد این پدیده در فرایندهای مدل‌سازی محتمل است. اما از آنجایی که معیار ایجاد این جریان عدد رینولدز کمتر از

جدول ۲ آزمون‌های اثرگذاری‌های درصد بازشدگی و شیب کف

Table 2 Tests of the effects of opening percentage and bed slope

Opening percentage	U/S slope (deg)	Test
25	0	Test 1
50		
100		
100	5	Test 2
	10	
	15	

جدول ۳ آزمون‌های اثرگذاری‌های زمان

Table 3 Tests of the effects of time

Opening percentage	U/S slope (deg)	Time (s)	Test
100	5	0.4	Test 3
		0.6	
		0.8	
	10	0.4	
		0.6	
		0.8	
	15	0.4	
		0.6	
		0.8	
Opening percentage	U/S slope (deg)	Time (s)	Test
50	5	0.4	Test 4
		0.6	
		0.8	
	10	0.4	
		0.6	
		0.8	
	15	0.4	
		0.6	
		0.8	
Opening percentage	U/S slope (deg)	Time (s)	Test
25	10	0.4	Test 5
		0.6	
		0.8	
	15	0.4	
		0.6	
		0.8	

آزمون‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. همچنین برای بررسی اثرگذاری‌های عامل زمان بر تغییرپذیری‌های هیدرولیکی و ریخت‌سناسی رودخانه در اثر پدیده رسوب‌شویی آزمون‌های سوم تا پنجم صورت گرفته است که در جدول ۳ قابل مشاهده است. لازم به یادآوری است در بازشدگی ۷۵ درصد بی‌درنگ پس از بازشدگی جریان از زیر دریچه عبور می‌نماید و در عمل بازشدگی ۷۵ درصد تغییری محسوس در نتایج با حالت ۱۰۰ درصد ایجاد نمی‌کند (شکل ۷). در این شکل محور افقی بیانگر طول فلوم و محور عمودی تراز بستر رسوبی در دو نسبت بازشدگی ۱۰۰ و ۷۵ درصد می‌باشد.

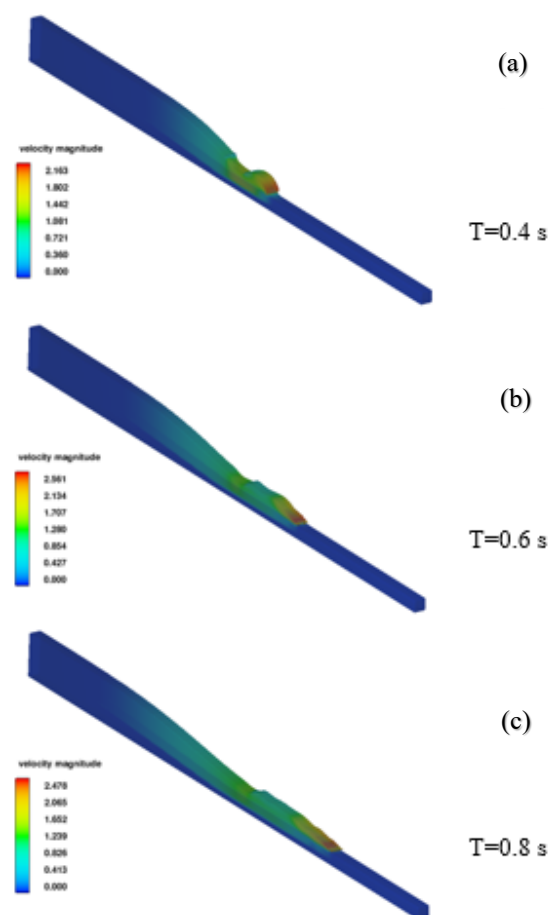
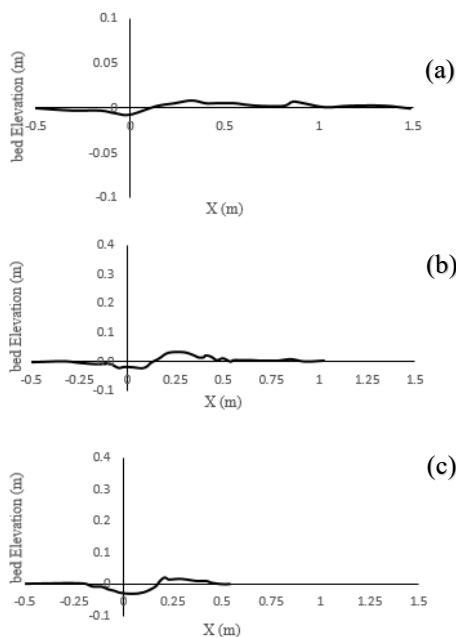


Fig. 6 The speed of flow contour  
شکل ۶ خط تراز سرعت جریان

می تواند ناشی از شدیدتر شدن پرش هیدرولیکی در پای دریاچه و در نتیجه افزایش میزان فرسایش باشد.

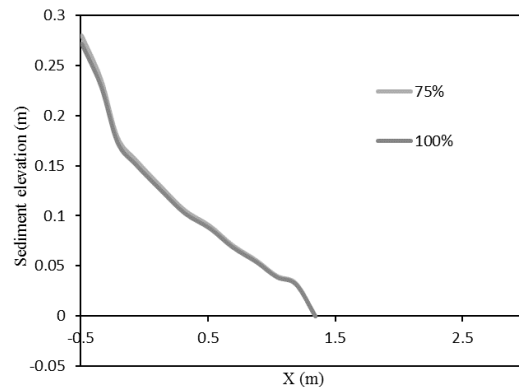


**Fig. 8** Changes in sediment bed level for zero upstream slope at opening percentages of (a) 100%, (b) 50%, and (c) 25%

شکل ۸ تغییر پذیری های تراز سطح بستر رسوبی برای شیب بالادست صفر در بازشدگی های (a) ۱۰۰٪، (b) ۵۰٪ و (c) ۲۵٪.

#### ۴-۲- آزمون دوم: اثرگذاری شیب های مختلف با بازشدگی ثابت بر تغییر پذیری های تراز بستر رسوبی

این آزمون به بررسی تأثیر شیب های ۱۰، ۵ و ۱۵ درصد بر روی تغییر پذیری های بستر در صورت ثابت بودن فراسنجه بازشدگی دریاچه (به میزان ۱۰۰ درصد) می پردازد. در شکل ۹ (a) الی (c) تغییر پذیری های تراز سطح بستر رسوبی برای شرایط بازشدگی کامل برای شیب های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ارائه شده که نشان می دهد با افزایش شیب بالادست عمق آبستگي در مجاورت دریاچه افزایش می یابد. همچنین تپه های شکل گرفته در پایین دست به صورت متوالی در این حالت شکل خواهند گرفت. در این نمودار محور افقی بیانگر طول فلوم و محور قائم نشان دهنده تغییر پذیری های تراز بستر رسوبی است.



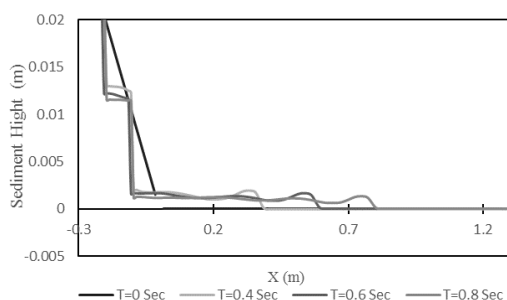
**Fig. 7** The difference between a 75% gate opening and a 100% gate opening.

شکل ۷ تفاوت میان باز شدگی دریاچه ۷۵ درصد و ۱۰۰ درصد.

#### ۴-۱- آزمون اول: تأثیر بازشدگی های مختلف با شیب ثابت صفر بر تغییر پذیری های بستر رسوبی

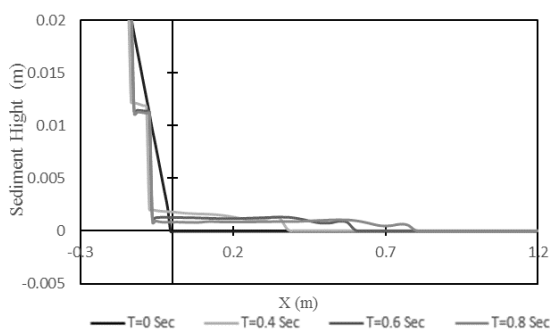
در این بخش در آغاز به بررسی نتایج تحقیق در صورت ثابت بودن فراسنجه شیب و تأثیر بازشدگی دریاچه بر روی تغییر پذیری های میزان آبستگي بستر پرداخته خواهد شد. همان گونه که در قسمت پیش اشاره شد، در این شرایط شیب بالادست صفر درصد (شیب صفر درجه) است و میزان بازشدگی دریاچه ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد بوده و از بازشدگی ۷۵ درصد به دلیل نداشتن تغییر محسوس نتایج استخراج شده در شکل ۸ (a) تا (c) ارائه شده اند. در این شکل محور افقی بیانگر طول فلوم و محور عمودی تراز بستر رسوبی است. این نمودار نشان دهنده تغییر پذیری های متفاوت تراز سطح بستر در شرایط بدون شیب بالادست در بازشدگی های مختلف است به طوری که در بازشدگی ۱۰۰ درصد نیمرخ تغییر پذیری های سطح بستر نسبت به سایر بازشدگی ها کمتر است و شکل گیری نیمرخ های بستر در این مدل ها به نسبت برابر هستند. در بازشدگی ۵۰٪ دریاچه چاله های آبستگي ایجاد شده در مجاورت دریاچه بسیار شدید است و انباشتی از رسوب ها با ارتفاع زیاد در پایین دست شکل گرفته است. در حالت بازشدگی ۲۵٪ درصد به علت افزایش سرعت خروجی جریان آبستگي بسیار شدید است و نیمرخ بستر شکل گرفته نیز در طول بیشتری نسبت به بازشدگی ۵۰٪ پخش شده است. این امر

می‌شود که در شیب ۱۵ درصد وضعیت تغییر تراز بستر



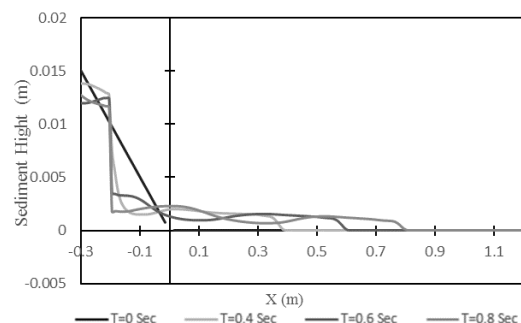
**Fig. 10** Changes in bed elevation at times  $T=0.4$  s,  $T=0.6$  s, and  $T=0.8$  s for a 5% slope and 100% gate opening.

شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های تراز سطح بستر به ازای زمان‌های  $T=0.4$  s،  $T=0.6$  s و  $T=0.8$  s برای شیب ۵٪ و بازشدگی ۱۰۰ درصد دریچه.



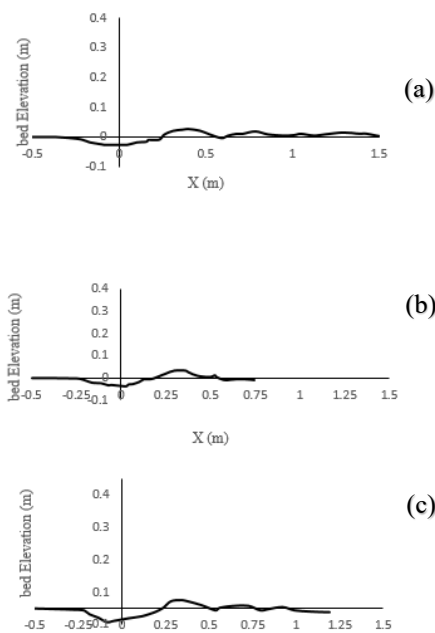
**Fig. 11** Temporal variations of bed elevation at  $T=0.4$  s,  $T=0.6$  s, and  $T=0.8$  s for a 10% slope with 100% gate opening.

شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های تراز سطح بستر به ازای زمان‌های  $T=0.4$  s،  $T=0.6$  s و  $T=0.8$  s برای شیب ۱۰٪ و بازشدگی ۱۰۰ درصد دریچه.



**Fig. 12** Temporal evolution of bed elevation profiles at  $T = \{0.4, 0.6, 0.8\}$  s under 15% slope with full gate opening (100%).

شکل ۱۲ تغییرپذیری‌های تراز سطح بستر به ازای زمان‌های  $T=0.4$  s،  $T=0.6$  s و  $T=0.8$  s برای شیب ۱۵٪ و بازشدگی ۱۰۰ درصد دریچه.



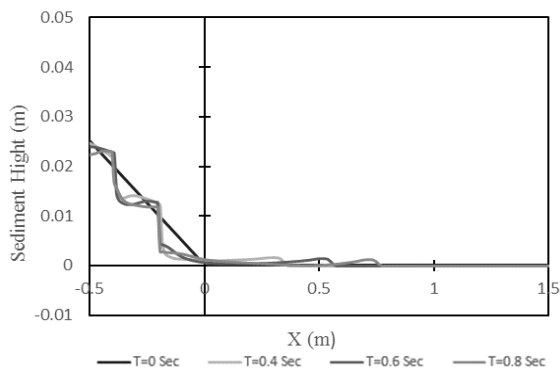
**Fig. 9** Changes in sediment bed elevation for a 100% opening condition at slopes of (a) 5%, (b) 10%, and (c) 15%

شکل ۹ تغییرپذیری‌های تراز بستر رسوب‌ها برای شرایط بازشدگی ۱۰۰٪ برای شیب‌های (الف) ۵٪، (ب) ۱۰٪ و (ج) ۱۵٪ درصد.

### ۳-۴- آزمون سوم الی پنجم: تغییرپذیری‌های بستر رسوبی به ازای زمان در انواع شیب و بازشدگی دریچه

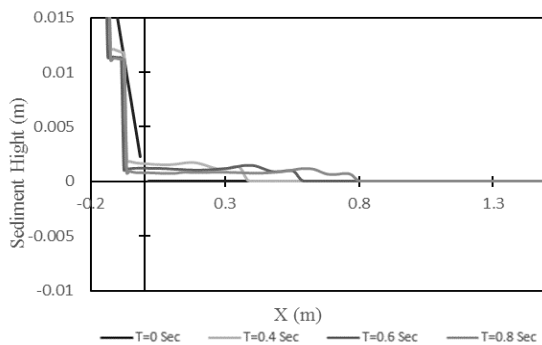
شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ تغییرپذیری‌های تراز سطح بستر رسوبی را در ناحیه بالادست و پایین‌دست به ترتیب به ازای زمان‌های ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ ثانیه و شیب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در بازشدگی ۱۰۰ درصد نمایش می‌دهد. در این شکل‌ها محور افقی بیانگر طول فلوم و محور عمودی تراز سطح بستر رسوبی است.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشاهده می‌شود با بازشدگی ۱۰۰ درصد دریچه مصالح بستر با توجه به وجود شیب در بالادست فرسایش یافته و به محل پایین دست انتقال می‌یابد. پس از بازشدگی دریچه به صورت کامل ۱۰۰ درصد حجمی از رسوب‌های فرسایش یافته به سرعت به ناحیه پایین دست انتقال می‌یابد. با گذشت زمان از میزان فرسایش کاسته می‌شود و نیم‌رخ در ناحیه طولانی‌تری توسعه می‌یابد. با توجه به شکل ۱۲ مشخص



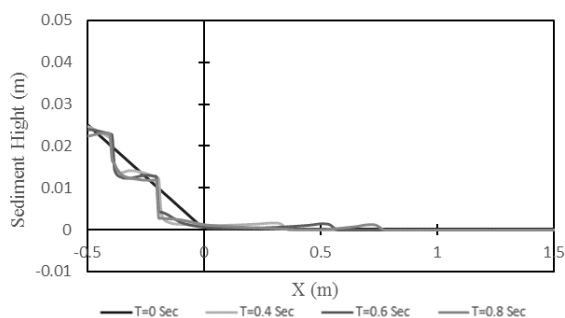
**Fig. 14** Time-series bed morphology development (0.4-0.8 s) under 10% inclined flow with 50% gate restriction.

شکل ۱۴ تغییرپذیری های تراز سطح بستر به ازای زمان های  $T=0.4$  s،  $T=0.6$  s و  $T=0.8$  s برای شیب ۱۰٪ و بازشدگی ۵۰ درصد دریچه.



**Fig. 15** Bed profile development (0.4-0.8 s) under 15% slope with semi-open gate (50%)

شکل ۱۵ تغییرپذیری های تراز سطح بستر به ازای زمان های  $T=0.4$  s،  $T=0.6$  s و  $T=0.8$  s برای شیب ۱۵٪ و بازشدگی ۵۰ درصد دریچه.



**Fig. 16** Temporal development of bed morphology at 0.4, 0.6, and 0.8 s under 5% slope with restricted gate opening (25%).

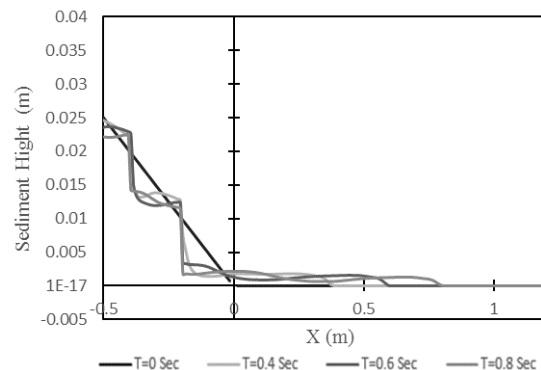
شکل ۱۶ تغییرپذیری های تراز سطح بستر به ازای زمان های  $T=0.4$  s،  $T=0.6$  s و  $T=0.8$  s برای شیب ۵٪ و بازشدگی ۲۵ درصد دریچه.

در زمان های ۰/۶ و ۰/۸ تفاوت چندانی نداشته که نشان دهنده تاثیر کمتر عامل زمان در شکل گیری نیمرخ بستر در شیب های زیاد است.

شکل های ۱۳ الی ۱۵ بیانگر تغییرپذیری های تراز سطح بستر رسوبی در بازشدگی ۵۰٪ دریچه است. در این شکل ها محور افقی بیانگر طول فلوم و محور عمودی تراز بستر رسوبی است.

تغییرپذیری های تراز بستر رسوبی در شکل های ۱۳ تا ۱۵ نشان می دهد که با بازشدگی ۵۰ درصد دریچه، مصالح بستر با توجه به وجود شیب در بالادست فرسایش یافته و به محل پایین دست انتقال می یابد. در بازشدگی دریچه به صورت ۵۰ درصد برای شیب ۵٪ درصد شکل گیری نیمرخ بستر با ارتفاع کمتری مشاهده می شود که به علت افزایش سرعت جریان در این ناحیه و نداشتن اجازه ته نشینی مصالح است. برای شیب های ۱۰ و ۱۵ درصد در بالادست نیز شرایط به تقریب همانندی شکل گرفته و نیمرخ بستر مصالح در این ناحیه با ابعاد کوچکتری نسبت به بازشدگی ۱۰۰٪ شکل گرفته اند.

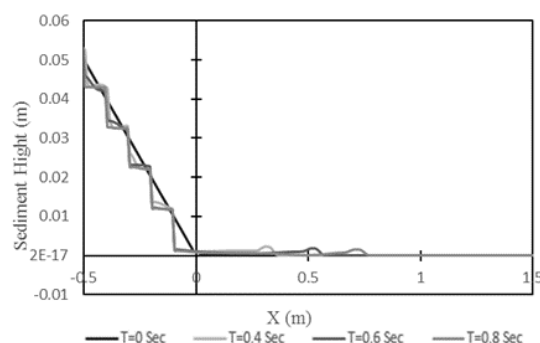
شکل های ۱۶ الی ۱۸ تغییرپذیری های تراز سطح بستر رسوبی را در ناحیه بالادست و پایین دست به ترتیب به ازای زمان های ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ ثانیه نمایش می دهد. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود با بازشدگی ۲۵ درصد دریچه مصالح بستر با توجه به وجود شیب در بالادست فرسایش یافته و به پایین دست انتقال می یابد. در بازشدگی دریچه به صورت ۲۵ درصد برای شیب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نیمرخ بستر مصالح با ارتفاع



**Fig. 13** Bed elevation dynamics at 0.4, 0.6, and 0.8 s under 5% slope with half-open (50%) gate configuration.

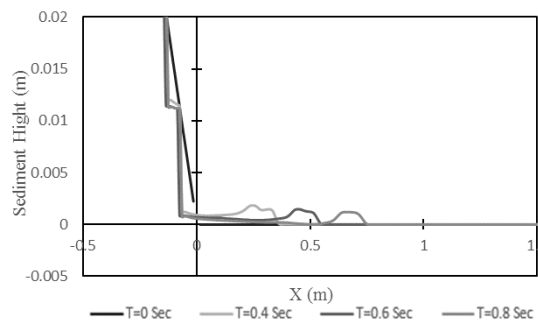
شکل ۱۳ تغییرپذیری های تراز سطح بستر به ازای زمان های  $T=0.4$  s،  $T=0.6$  s و  $T=0.8$  s برای شیب ۵٪ و بازشدگی ۵۰ درصد دریچه.

آشفته‌گی مناسب برای شبیه‌سازی اقدام شد و پس از آن به بررسی اثرگذاری عامل‌های شیب، درصد بازشدگی دریاچه و زمان بر تغییرپذیری‌های بستر رسوبی پرداخته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد مدل آشفته‌گی RNG مدل مناسبی برای بررسی پدیده آبستنگی پایین‌دست دریاچه‌ها می‌باشد. مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد این مدل می‌تواند این پدیده را با خطای معادل ۴/۳ درصد شبیه‌سازی کند. در بررسی اثرگذاری میزان بازشدگی دریاچه مشخص شد با کاهش میزان بازشدگی دریاچه از بازشدگی کامل به ۵۰ درصد بازشدگی، عمق آبستنگی در مجاورت دریاچه حدود ۳۵ درصد نسبت به حالت بازشدگی کامل افزایش و طول ناحیه فرسایش‌یافته نیز در پایین‌دست تا ۱/۴ برابر افزایش می‌یابد. این وضعیت در زمینه بازشدگی ۲۵ درصدی دریاچه نسبت به حالت ۱۰۰ درصد، تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. یادآوری این نکته ضروری است که با افزایش میزان بازشدگی دریاچه به حدود ۷۰ درصد، در نتایج میزان آبستنگی و شکل‌گیری نیم‌رخ بستر رسوبی تفاوت معنی‌داری با بازگشایی ۱۰۰ درصدی ایجاد نشده و به‌طورکلی می‌توان گفت بازگشایی دریاچه بیش از هفتاد درصد اثرگذاری‌هایی همانند با بازگشایی کامل دریاچه بر روی میزان آبستنگی دارد؛ لذا پیشنهاد می‌شود بهره‌برداران بندهای انحرافی برای کاهش اثرگذاری‌های ریخت‌شناسی و زیست‌محیطی پدیده رسوب‌شویی از بازگشایی‌های دریاچه بالای ۷۰ درصد استفاده شده و از بازگشایی‌های کمتر خودداری شود. همچنین نتایج نشان داد با افزایش شیب مجرای رسوب‌شویی عمق آبستنگی در مجاورت دریاچه افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در بازشدگی کامل دریاچه، افزایش شیب کف از ۵ به ۱۵ درصد سبب افزایش ۴۵ درصدی بیشینه عمق آبستنگی در مجاورت دریاچه می‌شود و حجم رسوب‌های منتقل‌شده به پایین‌دست با افزایش حدود ۵۰ درصدی و در نتیجه تغییرپذیری‌های تراز بستر در پایین‌دست تشدید شده که می‌تواند سبب آسیب‌های زیست‌محیطی و تغییر در وضعیت ریخت‌شناسی رودخانه پس از هر رسوب‌شویی شود. با بررسی اثر زمان بر شکل‌گیری بستر رسوبی مشخص شد که در آغاز فرایند، رسوب‌های فرسایش‌یافته به‌سرعت به



**Fig. 17** Time-dependent bed elevation dynamics at 0.4, 0.6, and 0.8 s for 10% slope with minimal gate opening (25%).

شکل ۱۷ تغییرپذیری‌های تراز سطح بستر به ازای زمان‌های  $T=0.8\text{ s}$  و  $T=0.6\text{ s}$ ،  $T=0.4\text{ s}$  برای شیب ۱۰٪ و بازشدگی ۲۵ درصد دریاچه.



**Fig. 18** Temporal bed profile evolution at 0.4, 0.6, and 0.8 s under steep (15%) slope with severely restricted gate opening (25%).

شکل ۱۸ تغییرپذیری‌های تراز سطح بستر به ازای زمان‌های  $T=0.8\text{ s}$  و  $T=0.6\text{ s}$ ،  $T=0.4\text{ s}$  برای شیب ۱۵٪ و بازشدگی ۲۵ درصد دریاچه

کمتری نسبت به بازشدگی ۵۰ و ۱۰۰ درصدی مشاهده می‌شود که افزایش سرعت جریان در این ناحیه و جلوگیری از ته‌نشینی مصالح می‌تواند علت این پدیده باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

بندهای انحرافی از جمله پرکاربردترین سازه‌های مورد استفاده در سامانه‌های آبیاری و آبرسانی هستند. از آنجایی که تخلیه رسوب‌های مجراهای رسوب‌شویی، تأثیر بر ریخت‌شناسی و زیست محیط رودخانه در پایین‌دست مجرا می‌گذارد، لذا ارزیابی تأثیر این پدیده ضروری است. در این پژوهش با مدل‌سازی در آغاز به بررسی و انتخاب مدل

## ۶- منابع ها

Aminian, P., Ahmadi, A. & Emamgholizadeh, S. (2019). Experimental investigation on the deviated sediment and flow to sediment bypass tunnels (SBTs) using submerged plates. *Journal of Hydraulic Structures*, 5(2), 18–31.

Asadi, M., Monaem, M. & Samani, J., (2024). Evaluation of the effect of the channel width and the opening ratio to the gate width on the sedimentation transport of diversion dam. *Engineering Research of Irrigation and Irrigation Systems*, 25, 183-206. (In Persian)

Bahmanpouri, F., Montazeri Namin, M. & Omidnaeyini, S.T. (2012). Dam-break flow over erodible bed: An experimental study. In: Proceedings of the 9th International Seminar on River Engineering, Ahvaz, 1–9, <https://civilica.com/doc/186589>. (In Persian)

Bahmanpour, F., Moeini, M.R., Montazeri Namin, M. & Omidnaeyini, S.T. (2013). Effect of bed level on dam-break flow over erodible bed: experimental study. In: 12th Iranian Hydraulic Conference, University of Tehran. (In Persian)

Beiramipour, S., Qaderi, K., Rahimpour, M., Ahmadi, M.M. & Kantoush, S.A. (2021). Effect of submerged vanes in front of circular reservoir intake on sediment flushing cone. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 174(5), 252-266.

Chen, Y., Yang, J., Yu, J., Fu, Z. & Chen, Q. (2020). Flow expansion and deflection downstream of a symmetric multi-gate sluice structure. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 24, 471–482.

Fields, J., Renshaw, C., Magilligan, F., Dethier, E. & Rossi, R. (2021). A mechanistic understanding of channel evolution following dam removal. *Geomorphology*, 395, 107971, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107971>.

Gupta, L.K., Pandey, M. & Raj, P.A. (2025). Numerical modeling of scour and erosion processes around spur dike. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 53(3), 2300135, <https://doi.org/10.1002/clen.202300135>.

Hanmaiahgari, P.R., Gompa, N.R., Pal, D. & Pu, J.H. (2018). Numerical modeling of the Sakuma Dam reservoir sedimentation. *Natural Hazards*, 91(3), 1075–1096.

Hemmati, M. & Daraby, P. (2019). Erosion and sedimentation patterns associated with restoration structures of bendway weirs. *Journal of Hydro-Environment Research*, 22, 19–28.

ناحیه پایین دست انتقال می یابد به طوری که در ۰/۳ ثانیه اول پس از بازشدگی دریاچه، بیشترین تغییرپذیری ها در نیمرخ بستر رخ داده و با گذشت زمان نیمرخ یاد شده در ناحیه طولانی تری توسعه می یابد. به طور کلی می توان گفت تغییر تراز بستر در زمان های پس از ۰/۶ ثانیه کوچک تر از ۵ درصد بوده و نشان دهنده شکل گیری و ثبات نسبی تراز بستر پس از این زمان می باشد که موید تأثیر کمتر عامل زمان در شکل گیری نیمرخ بستر نسبت به عامل شیب مجرا و بازشدگی دریاچه می باشد؛ لذا پیشنهاد و تأکید می شود بهره برداران در فرایند رسوب شویی عامل کمبود زمان برای حفظ اقدام های ایمنی در برابر تغییرپذیری های شدید نیمرخ بستر را پس از بازگشایی دریاچه در نظر بگیرند. به طور کلی می توان گفت در عامل های مؤثر پدیده شکل گیری بستر در پایین دست مجراهای رسوب شویی، عامل زمان نقش ثانویه ای نسبت به شیب و بازشدگی دریاچه را دارد.

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

## منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

## دسترسی به داده ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

## مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مشارکت مشترک در همه بخش ها.

نویسنده دوم: مشارکت مشترک در همه بخش ها.

- sediment transport in a U-shaped channel with lateral intake: Effects of intake position and diversion angle. *International Journal of Modern Physics C*, 30(9), 1950071, <https://doi.org/10.1142/S0129183119500712>.
- Xie, Q., Yang, J., Lundström, T.S. & Chen, J. (2022). Hybrid modeling for solutions of sediment deposition in a low-land reservoir with multi gate sluice structure. *Applied Sciences*, 12(18), 9144, <https://doi.org/10.3390/app12189144>.
- Yan, X., Wang, Y., Fan, B., Mohammadian, A., Liu, J. & Zhu, Z. (2023). Data-driven modeling of sluice gate flows using a convolutional neural network. *Journal of Hydro Informatics*, 25(5), 1629-1647.
- Zaffar, M.W., Hassan, I., Latif, U., Jahan, S. & Ullah, Z. (2023). Numerical investigation of scour downstream of diversion barrage for different stilling basins at flood discharge. *Sustainability*, 15(14), 11032, <https://doi.org/10.3390/su151411032>.
- Zerihun, Y.T. (2024). Numerical modeling of sediment transport and bed evolution in nonuniform open-channel flows. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 71(1), 1–26, <https://doi.org/10.2478/heem-2024-0001>
- Zhang, X., Jiao, J., Dou, X., Zhao, X. & Xia, W. (2020). Mathematical model research of the siltation downstream estuary floodgate under the effect of float mud. In: *Estuaries and Coastal Zones in Times of Global Change*, Singapore.
- Issakhov, A. & Zhandaulet, Y. (2021). Numerical study of dam-break fluid flow using volume of fluid (VOF) methods for different angles of inclined planes. *Simulation*, 97(11), 717–737.
- Lai, Y.G., Huang, J. & Greimann, B.P. (2024). Hydraulic flushing of sediment in reservoirs: Best practices of numerical modeling. *Fluids*, 9(2), 38, <https://doi.org/10.3390/fluids9020038>.
- Ministry of Energy (1999). Structural design provisions for diversion weirs, Publication No. 198, Office of Technical Affairs, Organization of Planning and Budget, Tehran, Iran.
- Movahedi, A., Kavianpour, M.R. & Aminoroayaie Yamini, O. (2018). Evaluation and modeling scouring and sedimentation around downstream of large dams. *Environmental Earth Sciences*, 77(8), 320, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7487-2>.
- Queen, R.W. (2018). Morphodynamic modeling of flow and sediment transport over low-head, run-of-river dams. PhD Thesis, Colorado State University.
- Shafai Bejestan, M. (2005). Hydraulic sediment, Shahid Chamran University Publisher, Ahvaz, Iran.
- Słowik, M., Kiss, K., Czigány, S., Gradwohl-Valkay, A., Dezső, J., Halmi, Á., ... Pirkhoffer, E. (2021). The influence of changes in flow regime caused by dam closure on channel planform evolution: Insights from flume experiments. *Environmental Earth Sciences*, 80(4), 165. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09437-5>
- Tavakoli, K., Montaseri, H., Omidvar, P. & Evangelista, S. (2019). Numerical simulation of



© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.