

Research Article**Experimental and numerical investigation of the effect of blockage progression on scour downstream of box culvert****Reza Bavandpoori Gilan¹, Rasool Ghobadian^{✉2}, Ali Arman³**

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran.

2. Water Engineering Department, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran.

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah.

(✉ Corresponding Author: r_ghobadian@razi.ac.ir)

ARTICLE INFO**Received:** 2 May 2025**Revised:** 20 May 2025**Accepted:** 30 May 2025**Available Online:** 28 June 2025**HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Ghobadian, R., & Arman, A., & Bavandpoori Gilan, R., (2025) .Experimental and numerical investigation of the effect of blockage progression on scour downstream of box culvert. (In Persian with English abstract). Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research. V.26, No.98, P: <https://doi.org/10.22092/idser.2025.369299.1617>

Introduction

Blockage in the culvert is a major factor in reducing its efficiency. The effect of culvert blockage intensifies by progress in the barrel. This study investigated the effect of blockage progression on scour downstream of box culvert using experimental tests, which hasn't been investigated in previous research. In order to more accurately identify the flow pattern, especially along the culvert channel and the interaction of flow and sediment downstream, numerical simulations were performed with FLOW-3D software. The findings can aid engineers in considering the effects of scour and blockage in the design of more efficient culverts.

Methodology

Using the modeling of natural phenomena in a laboratory environment, we can understand the behavior of a phenomenon in a real environment. The planned experiments were conducted in the Hydraulic Laboratory of the Water Sciences and Engineering Department at Razi University. The width, depth, and length of the flume are 0.50 m, 0.60 m, and 5.40 m, respectively. The culvert, with a length of 30 cm and a rectangular cross-section measuring 10 cm in width and 7.50 cm in height, is made of glass with a thickness of 8 mm. To ensure developed flow upon entering the culvert, it is positioned 3.60 m from the beginning of the flume. At the inlet and outlet of the culvert, a type 2 USBR transition with equal angles of convergence and divergence of 26.50 degrees is used. To control the downstream water level at the desired level, a sharp-crested weir with variable height is installed downstream of the culvert. the floor of the flume upstream of the structure is uniformly covered with concrete, and the downstream section is filled by uniform sediment with diameter of 0.85 mm and thickness of 20 cm. A total of 36 experiment were conducted with three flow rate of 2.95, 5.38 and 8.03 L/s, four downstream depth of 4.5, 10.3, 16.3 and 23 cm with three blockage scenarios 0, 0.2L and 0.32L where L is the barrel length. After reaching equilibrium in each experiment, the height of the installed weir was increased to prevent a rapid drop in water level, then the pump was turned off. After complete drainage, bed changes were recorded using a 3D scanner equipped with a Kinect camera, which had an accuracy of ± 0.2 mm. The data extracted from the camera was then prepared for plotting the necessary graphs. Finally, the bed surface was carefully leveled for the next experiment.

Results and Discussion

Based on the comparison of experimental and numerical results, it was determined that the numerical model has sufficient ability to simulate the water surface and its results are reliable. Regarding sedimentary

results, comparison of the results test Q_2 y_{13} α_{32} β_{32} by both experimental and numerical methods showed the formation of a scour hole immediately after the end of the outlet transition and the creation of a sedimentation mound after the hole. Investigation of the effect of relative tailwater depth on scour depth in unblocked conditions showed that at a fixed relative tailwater depth, the dimensionless maximum scour depth increases with the increasing flow intensity parameter. Specifically, as the flow intensity increases from 0.45 to 1.24 at a constant tailwater depth, the flow velocity inside the culvert barrel increases, and consequently, water exits the culvert downstream with greater velocity. This increase in velocity at a fixed tailwater depth leads to higher shear stress on the bed and enhanced flow power in sediment transport and bed erosion. Regarding the effect of the progression of blockage in the culvert barrel on scour at the outlet, it can be said that when the inlet section of the culvert is blocked, the maximum scour depth downstream of the culvert decreases. The reason for this is that, in the case of fixed blockage, an eddy flow with a horizontal axis is created just behind the obstruction, causing the streamlines separate and resulting in intense turbulence in the channel, in such a way that the flow hits the culvert roof several times and then dives back toward the channel floor. This process leads to significant energy loss in the flow, reducing the flow's potential for downstream scour compared to the unblocked condition.

Conclusions

progression of the blockage in the culvert barrel can affect the flow hydraulic within it and has notable impacts on the scour of the downstream bed. Due to the impossibility of measuring some parameters, such as the Maximum scour hole depth at desired times in the laboratory environment due to high flow turbulence, the powerful FLOW-3D numerical model was used after its calibration. The results indicated that in both conditions, with and without blockage, the maximum scour depth significantly affected by the changes in flow intensity and tailwater depth. An increase in flow intensity leads to an increase in scour depth. In unblocked conditions, there is a critical relative tailwater depth for each specified flow intensity, below which scour depth decreases with increasing tailwater depth, and above which it increases. The laboratory results showed that for a fixed tailwater depth, with an increase in flow intensity, the location of maximum scour depth moved closer to the end of the culvert outlet. The blockage at the inlet section on culvert conduit, with blockage percentages of 20% and 32%, significantly affected the erosion and turbulence of the flow downstream. Compared to the unblocked condition, the presence of the blockage created turbulence in the flow, resulting in a significant drop in flow energy, which decreased the scour depth. However, as the tailwater depth increases, the impact of blockage on scour diminishes due to reduced turbulence in the channel. Given the great importance of water structures, especially culverts, in conveying flood, it is necessary for the designer to pay special attention to the issue of downstream scour when designing the culvert, because the poor performance of the culvert in conveying water during a flood can directly target the health of human communities living downstream and the efficiency of communication infrastructure.

Acknowledgment

We would like to thank the respected professors of the Department of Water Science and Engineering, Razi University, who prepared the necessary laboratory equipment for this research.

Keywords: Scour, Inlet blockage, Laboratory investigation, Culvert, Numerical Model



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369299.1617>

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پیشروی انسداد بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه‌ای

رضا باوندپوری گیلان^۱، رسول قبادیان^{۲*}، علی آرمان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

چکیده

کالورت‌ها سازه‌های هیدرولیکی هستند که در تقاطع مجرای آب با جاده و موانع به کار می‌روند. انسداد کالورت از عوامل مهم کاهش کارایی و تخریب آن است. تاثیر انسداد با پیشروی در مجرای اصلی کالورت تشدید می‌یابد. پیشروی انسداد موجب ایجاد تغییرات اساسی در هیدرولیک جریان و به دنبال آن تغییر در آبشستگی پایین دست نسبت به حالت بدون انسداد می‌شود. در این تحقیق، تاثیر پیشروی انسداد بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه‌ای به صورت آزمایشگاهی بررسی شد، موضوعی که در تحقیقات پیشین بررسی نشده است. به منظور شناسایی دقیق تر الگوی جریان، به‌ویژه در طول مجرای کالورت و اندرکنش جریان و رسوب در پایین دست، شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار FLOW-3D به‌انجام رسید. آزمایش‌ها در سه شدت دبی ۰/۴۵، ۰/۸۳ و ۱/۲۴؛ چهار عمق پایاب نسبی ۰/۴۷، ۱/۳۷، ۲/۱۷ و ۳/۰۷ و سه پیشروی انسداد صفر، ۰/۳۲L و ۰/۵L به اجرا درآمدند که در آن L طول مجرای کالورت است. نتایج موید وابستگی عمق آبشستگی به پیشروی انسداد، شدت دبی و عمق پایاب می‌باشد. در غیاب انسداد، وجود یک عمق پایاب نسبی بحرانی، ابتدا باعث کاهش و سپس افزایش عمق آبشستگی در پایین دست می‌شود. بررسی نتایج در حالت انسداد ۳۲ درصد سطح مقطع ورودی در دو پیشروی ۳۲ و ۵۰ درصد انسداد در مجرای کالورت نشان داد که با افزایش عمق پایاب تاثیر پیشروی انسداد بر عمق آبشستگی ناچیز می‌شود، به طوری که در عمق پایاب نسبی ۳/۰۷، مقدار حداکثر عمق آبشستگی پایین دست در سه حالت بدون انسداد و انسداد با پیشروی‌های ۳۲ و ۵۰ درصد، تفاوت چندانی ندارند. یافته‌های تحقیق حاضر می‌تواند راهکارهای مناسبی برای کنترل آبشستگی در پایین دست کالورت در برابر انسداد و پیشروی آن به طراحان ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی انتهایی، انسداد بالادست، مدل آزمایشگاهی، کالورت، نرم‌افزار عددی

مقدمه

باید به‌عنوان یکی از تمهیدات عمده در طراحی، ساخت و بازسازی سیستم بزرگراه‌های سراسری هر کشور اندیشیده شود (Abt et al., 1985). انسداد سازه‌های زهکشی متقاطع با زیرساخت، به‌ویژه در مناطق شهری که با افزایش تولید زباله مواجه هستند، موضوعی مهم در پروژه‌های مهندسی عمران است. هنگام سیل، زباله‌ها روی هم انباشته می‌شوند و با کاهش ظرفیت انتقال سازه، پتانسیل تخریب و ایجاد

کالورت از سازه‌های هیدرولیکی است که برای انتقال جریان آب از زیر جاده، کانال و دیگر موانع طراحی و اجرا می‌شود (شکل ۱-الف). کالورت سازه هیدرولیکی ساده‌ای است که برای کنترل جریان و سرعت آن در جریان روباز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Günal et al., 2019). اجرای کالورت‌هایی با طراحی مناسب به‌منظور عبور ایمن سیلاب

^۱ دانشجوی دکترای گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. (نویسنده مسئول: Email: r_ghobadian@razi.ac.ir)^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

اثرهای نامطلوب سیل افزایش می یابد (Iqbal & Riaz, 2024). کارایی کالورت می تواند با انسداد مقطع بالادست به چالش کشیده شود. تجمع زباله، حرکت اجسام مانند تنه درختان، رسوبات و ... به دهانه کالورت از مهمترین عوامل ایجاد انسداد آن هستند و می توانند کارایی سازه را کاهش دهند (شکل ۱-ب).



شکل ۱- الف): کالورت در تقاطع با جاده ب): انسداد ورودی کالورت (اقبال و ریاض، ۲۰۲۴)

Fig 1- A: Culvert at the intersection with a road. B: Blockage at the inlet of the culvert (Iqbal & Riaz, 2024)

در محل کالورت به دلیل انقباض جریان، سرعت متوسط در مجرای کالورت بیشتر از مجرای بالادست خواهد بود. در صورت ترکیب انقباض جریان و انسداد مقطع بالادست کالورت، افزایش سرعت جریان تشدید می شود و در مقایسه با حالت بدون انسداد، باعث تغییر در آبشستگی بستر پایین دست خواهد شد. آبشستگی، فرسایش جدار آبراهه در اثر فرسایش بستر یا جریان آب در پایین دست سازه های هیدرولیکی است (Nohani & Heidarnajad, 2014). بی توجه بودن به آبشستگی می تواند منجر به وارد شدن آسیب بیش از حد به ساختار کالورت و تخریب آن شود (Abt et al., 1996; Mendoza et al., 1983). کالورت ها در زمان زهکشی آب مازاد، تحت تاثیر خطر آبشستگی موضعی قرار می گیرند (Galán & González, 2020). با این اوصاف، با توجه به تعداد زیاد کالورت ها، بسیاری از کالورت های کوچک و متوسط بدون اقدامات حفاظتی در برابر آبشستگی اجرا می شوند (Day et al., 2001).

شبکه های حمل و نقل بر الگوی طبیعی زهکشی سطحی حوزه های آبخیز تاثیر می گذارند و روانایی با غلظت غیرطبیعی را به سمت سازه های زهکشی به ویژه کالورت

گسیل می کنند (Galán & González, 2020). بسیاری از محققان مانند امامی و شلیس (Emami & Schleiss, 2006)، سروریان و همکاران (Sorourian et al., 2014)، امینی و سلیمانی (Amini & Solaimani, 2018)، گالان و گونزالز (Galán & González, 2020)، عثمان و همکاران (Othman et al., 2021)، عثمان و همکاران (Othman et al., 2023)، عثمان و همکاران (Othman et al., 2024) و ... با اشاره به اهمیت طراحی صحیح کالورت برای جلوگیری از تخریب آن، هدررفت سرمایه و نیز تحمیل هزینه های تعمیر و نگهداری، برآورد دقیق عمق آبشستگی و مکان آن در پایین دست کالورت را ضروری دانسته اند. اوپی (Opie, 1967) ایجاد انرژی جنبشی اضافی در خروجی را که به دنبال تغییر در جریان ایجاد می شود، عامل بروز آبشستگی در کالورت دانسته است. بر اساس تحقیق مودی و همکاران (Moody et al., 2005)، فرسایش زمانی رخ می دهد که جریان روی مرزهای جامد بیش از یک مقدار آستانه، که عمدتاً به دما و نوع خاک بستگی دارد، تنش برشی وارد کند.

عمق آبشستگی پایین دست سازه های هیدرولیکی به دبی، مدت زمان سیلاب و تغییر در مقادیر پارامترهای

هیدرولیکی و هندسی بستگی دارد (Elsebaie, 2013). بوهان (Bohan, 1970) آبشستگی در خروجی کالورت را با استفاده از مدل فیزیکی مقیاس شده بررسی کرد و افزون بر ارائه یک معادله به منظور تخمین حداکثر عمق آبشستگی بر اساس عدد فرود و مدت زمان آزمایش، نشان داد که شکل مقطع کالورت تاثیر چندانی بر ابعاد چاله ندارد. چن و همکاران (Chen et al., 1970) و ایت و همکاران (Abt et al., 1987) نشان دادند که در یک دبی یکسان، کالورت جعبه‌ای با ارتفاعی معادل با قطر کالورت دایره‌ای حداکثر عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. راف و همکاران (Ruff et al., 1982) با هدف مدیریت فرسایش در امتداد طولی سواحل، آبشستگی در خروجی کالورت دایره‌ای را در بسترهای رسوبی چسبنده و غیرچسبنده بررسی کردند و چند رابطه تجربی را برای تخمین ابعاد چاله آبشستگی وابسته به قطر کالورت و دبی ارائه دادند. مندوزا و همکاران (Mendoza et al., 1983) تاثیر دیوار عمودی بر آبشستگی پایین دست کالورت را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، ۵۸ درصد از حداکثر ابعاد چاله پس از ۱۵ دقیقه و ۹۵ درصد آن پس از ۵۰۰ دقیقه از لحظه شروع شکل می‌گیرد و جریان در نبود دیواره عمودی، مصالح بستر رسوبی را تا ۱۵ درصد بیشتر دچار فرسایش می‌کند. ایت و همکاران (Abt et al., 1985)، تاثیر شکل و شیب کف کالورت (صفر، ۲ و ۵ درصد) را بر آبشستگی در خروجی بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، در یک دبی ثابت با افزایش شیب از ۲ به ۵ درصد، آبشستگی افزایش یافته ولی تغییر شیب از صفر به ۲ تاثیر چندانی بر آبشستگی نداشته است. آبی‌دا و تانسن (Abida & Townsend, 1991) آبشستگی در بستر ماسه‌ای پایین دست کالورت جعبه‌ای را با فرض دبی، عرض کالورت، عمق پایاب، عرض کانال پایین دست و ویژگی‌های مصالح بستر به عنوان پارامترهای موثر بررسی و رابطه‌ای تجربی را که در تخمین عمق فرسایش در بستر سنگی مناسب بوده است به منظور استفاده در بسترهای ماسه‌ای اصلاح کرده‌اند. ایت و همکاران (Abt

et al., 1996) روش‌های تخمین حداکثر عمق آبشستگی در خروجی کالورت را به کمک آزمایش‌های تجربی توسعه دادند و یک رابطه وابسته به دبی، شعاع هیدرولیکی، زمان، پارامترهای هندسی و مصالح بستر ارائه کردند. دی و همکاران (Day et al., 2001) ضمن بررسی تاثیر عمق پایاب و مقیاس مدل بر عمق آبشستگی پایین دست کالورت در بسترهای ماسه‌ای، یک مدل جدید پیش‌بینی عمق آبشستگی با الحاق یک تابع اصلاحی برای اعمال تاثیر عمق پایاب ارائه دادند. لیریانو و همکاران (Liriano et al., 2002) با مطالعه روی آبشستگی در خروجی کالورت در جریان آشفته نشان دادند که حداکثر عمق آبشستگی و حداکثر شدت آشفته‌گی در یک چاله کاملاً توسعه یافته در یک مکان یکسان رخ می‌دهد. ریگی و بارتلمس (Rigby & Barthelmess, 2011) مکانیسم‌های انسداد کالورت و تاثیر آن بر رفتار سیل را بررسی کردند و نشان دادند یکی از پیامدهای انسداد کالورت انحراف جریان در هنگام سیلاب است و به طور قابل توجهی رفتار سیلاب را دستخوش تغییر می‌کند. سروریان و همکاران (Sorourian et al., 2014) با تاکید بر اهمیت تاثیر انسداد به عنوان یک فاکتور مهم، تاثیر انسداد بخشی از مقطع ورودی را بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه‌ای در جریان غیرماندگار بررسی کردند. نتایج نشان داده است که ۸۸ تا ۹۸ درصد از حداکثر عمق آبشستگی در شاخه بالارونده هیدروگراف رخ می‌دهد. سروریان و همکاران (Sorourian et al., 2015) ارتباط آبشستگی با درصد انسداد و ویژگی‌های جریان ماندگار را در پایین دست کالورت جعبه‌ای مطالعه کردند و نشان دادند حداکثر عمق و مساحت ناحیه آبشستگی بستر در حالت وجود انسداد مقطع، بیشتر از حالت غیرمسدود است. نجف‌زاده (Najafzadeh, 2015) و نجف‌زاده و کارگر (Najafzadeh & Kargar, 2019) از روش شبکه عصبی، الگوریتم زنبور و برنامه‌نویسی بیان ژن برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست کالورت استفاده کردند. گالان و گونزالز (Galán & González, 2020) آبشستگی

غیرماندگار است. برخلاف نظر برخی محققان که بروز انسداد را بر عملکرد کالورت در حین سیلاب بی تاثیر دانسته اند نتایج تحقیقات علمی اهمیت آن را در مناطق خاص تایید می کنند. گروه باران و رواناب جامعه مهندسين آب استرالیا (ARR) اهمیت مطالعه انسداد در کالورت را به رسمیت شناخته و دستورالعمل هایی برای در نظر قرار گرفتن در زمان طراحی آن تدوین کرده است. اخیراً رویکرد استفاده از اطلاعات بصری برای تفسیر انسداد به عنوان بعد جدید مسئله در نظر گرفته می شود (Iqbal & Riaz, 2024). این محققان ضمن مطالعه پیشرفت ها، چالش ها و فرصت ها در مطالعه انسداد سازه های هیدرولیکی، بر نیاز به رویکردهای داده محور و همچنین همکاری بین رشته ای تاکید می کنند.

بروز انسداد در کالورت از طریق کاهش سطح مقطع عبور جریان موجب ایجاد اختلال در نقش اساسی آن خواهد شد. اگر حرکت عامل انسداد به ورودی کالورت محدود نشود و در مجرا هم پیشروی کند، تاثیر آن بر مسئله برجسته می شود. پیشروی انسداد باعث ایجاد تغییرات اساسی در هیدرولیک مسئله و آبشستگی در خروجی نسبت به حالت بدون انسداد می شود. افزایش پیشروی انسداد، کاهش بیشتر سطح مقطع عبور جریان و افزایش مقاومت عامل انسداد در برابر حرکت را به همراه خواهد داشت، در این حالت، کارایی کالورت به شدت تحت تاثیر قرار می گیرد و پایداری سازه و شبکه ارتباطی متقاطع با آن دچار چالش جدی خواهد شد. این موضوع می تواند به تخریب کامل سازه و تحت تاثیر قرار گرفتن زندگی ساکنان مناطق پایین دست منجر شود. علی رغم آمار قابل توجه تحقیق در زمینه مطالعه تاثیر انسداد بر آبشستگی در خروجی کالورت، تمرکز منابع فقط به بررسی اثر انسداد ثابت معطوف است و تاثیر طول پیشروی انسداد بررسی نشده است. نقص موجود، لزوم مطالعه دقیق تاثیر پیشروی انسداد را بر آبشستگی در خروجی کالورت به منظور ایمن سازی سازه، حفاظت از جوامع بشری ساکن در پایین دست و نیز جلوگیری از تضعیف منابع مالی تایید

پایین دست کالورت را یک فرآیند پیچیده و تحت تاثیر فاکتورهای متعدد توصیف کردند و هدف اصلی از اجرای تحقیق مذکور را تشخیص موثرترین پارامترها بر ابعاد چاله آبشستگی دانستند. بر اساس نتایج به دست آمده، تاثیر دیواره های بال شکل^۱، انسداد ورودی، عمق پایاب و شکل کالورت بر چاله آبشستگی تایید شده است. ژانگ و وو (Zhang & Wu, 2019) با اشاره به نبود رابطه ای واحد به منظور پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی در مراجع، آبشستگی بیش از حد در خروجی کالورت را یکی از دلایل اصلی تخریب آن دانسته اند و یک رابطه تجربی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی با لحاظ پارامترهای هندسی مقطع ارائه دادند. طاه و همکاران (Taha et al., 2020) تاثیر انسداد بر سطح آب و ابعاد چاله آبشستگی پایین دست کالورت جعبه ای را با استفاده از مدل FLOW-3D بررسی کردند و یک رابطه برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه دادند. نتایج تحقیق نشان داده است که انسداد کالورت در ورودی به میزان ۷۰ درصد، باعث افزایش ۲/۳ برابر در عمق آب بالادست و ۳ برابر در سرعت میانگین نسبت به حالت شاهد شده است.

عثمان و همکاران (Othman et al., 2023) عملکرد مدل عددی FLOW-3D و مدل های جایگزین را با به کارگیری روش Box-Behnken در پیش بینی عمق آبشستگی و موقعیت آن در پایین دست کالورت جعبه ای با هدف بهینه سازی طراحی آن مطالعه کردند. مقادیر بهینه پارامترهای مورد مطالعه در تحقیق را می توان به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی ایمن کالورت در برابر آبشستگی استفاده کرد. عثمان و همکاران (Othman et al., 2024) کارایی مدل عددی FLOW-3D را در پیش بینی عمق آبشستگی و موقعیت ایجاد آن پایین دست کالورت های دایره ای در جریان ماندگار و غیرماندگار ارزیابی کردند. مقایسه نتایج نشان می دهد که پیش بینی های مدل عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی در هر دو حالت جریان ماندگار و

¹ Wing Walls

می‌کند. بنابراین، با توجه به اهمیت موضوع و نبود منابع کافی، هدف از این پژوهش بررسی تاثیر پیشروی انسداد بر آبشستگی در پایین دست کالورت به کمک شبیه‌سازی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی خواهد بود.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

برای بررسی مسئله مورد بحث در این تحقیق از مدل‌سازی آزمایشگاهی استفاده گردید. آزمایش‌های طرح شده در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه رازی به اجرا در آمدند. عرض، عمق و طول فلوم به ترتیب ۵۰/۰، ۶۰/۰ و ۴۰/۵ متر است. به منظور آرام کردن جریان ورودی، در ابتدای فلوم یک مخزن فلزی مجهز به صفحات آرام کننده جریان قرار داده شد. کالورت با مقطع مستطیل و با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۰، ۱۰ و ۷۵ سانتیمتر از جنس شیشه به ضخامت ۸ میلیمتر ساخته شد. به منظور حصول اطمینان از توسعه یافتگی جریان هنگام ورود به سازه، کالورت در فاصله ۳۰/۶ متر از ابتدای فلوم جانمایی شد. در ورودی و خروجی کالورت از تبدیل تیپ USBR۲ با زاویه همگرایی و واگرایی یکسان برابر با ۲۶/۵ درجه استفاده شد. آب سیستم با استفاده از یک پمپ گریز از مرکز ۱۶ کیلووات تامین شد که روی مخزن زمینی با حجم ۱۲ مترمکعب قرار دارد. برای کنترل سطح آب پایین دست در تراز دلخواه، یک سرریز لبه تیز با ارتفاع متغیر در انتهای پایین دست نصب شد. با توجه به اینکه هدف از پژوهش، بررسی آبشستگی پایین دست در اثر پیشروی انسداد به مجرای کالورت است، کف فلوم در بالادست سازه به صورت یکنواخت با بتن پوشش و پایین دست سازه نیز با رسوب یکنواخت به قطر ۰/۸۵ میلیمتر و ضخامت ۲۰ سانتیمتر بالا آورده شد. در مجموع، ۳۶ آزمایش با سه دبی ۵/۳۸، ۲/۹۵ و ۸/۰۳ لیتر بر ثانیه و چهار عمق پایاب ۴/۵، ۱۰/۳، ۱۶/۳ و

۲۳ سانتی‌متر اجرا گردید. در تمامی آزمایش‌ها زمان کافی برای حصول اطمینان از برقراری تعادل بستر لحاظ شد. با توجه به اینکه استقرار انسداد در طبیعت به دهانه ورودی کالورت محدود نمی‌شود، از این رو انسدادهایی با پیشروی ۰/۳۲L و ۰/۵L در شرایط مختلف هیدرولیکی طراحی و نتایج بررسی شد. مشخصات آزمایش‌های اجرا شده به صورت خلاصه در جدول (۱) ارائه شده است که در آن h ارتفاع مقطع کالورت، y_t عمق پایاب و اندیس‌های i و z در α_i و β_z به ترتیب نسبت ارتفاع انسداد به ارتفاع مقطع و نسبت طول پیشروی انسداد به طول مجرای کالورت هستند. لازم است گفته شود با توجه به مقدار حداکثر دبی در دسترس، فضای ارتفاعی فلوم، قطر رسوب مورد استفاده و ...، معیار انتخاب مقادیر پارامترهای y_t ، α و β و تشکیل ترکیب‌های مختلف از آنها، ایجاد اطمینان از بروز آبشستگی در پایین دست است. در این خصوص ابتدا چند آزمایش محدود با استفاده از مدل عددی FLOW-3D به مدت زمان محدود اجرا و پس از آن به صورت عملی در محیط آزمایشگاه اجرا گردید.

در هر آزمایش، دبی ورودی به فلوم با استفاده از دبی‌سنج التراسونیک با حداکثر خطای ± 1 درصد اندازه‌گیری و به کمک سرریز مثلی لبه تیز با زاویه راس ۵۳ درجه، که روی مخزن خروجی در پایین دست فلوم قرار دارد، صحت‌سنجی شد. عمق جریان به کمک عمق‌سنج متحرکی که روی لبه فلوم نصب شده است، با خطای ± 1 درصد اندازه‌گیری شد. پس از به تعادل رسیدن هر آزمایش ارتفاع سرریز تعبیه شده به منظور جلوگیری از افت سریع سطح آب افزایش داده شد و سپس پمپ خاموش شد. پس از زهکشی کامل تغییرات بستر به کمک پوشگر سه بعدی مجهز به دوربین Kinect که دقت آن ± 1 درصد است برداشت شد. داده‌های استخراج شده از دوربین برای رسم کردن نمودارهای لازم آماده‌سازی شد. سطح بستر نیز برای آزمایش بعدی به دقت تسطیح گردید.

جدول ۱- مشخصات آزمایش های اجرا شده

Table 1- characteristics of the performed tests

ردیف	نماد	شدت دبی	y _t /h	ردیف	نماد	شدت دبی	y _t /h
Row	Test	DI		Row	Test	DI	
۱	Q ₁ y _{t1} α ₀ β ₀	۰/۴۶	۰/۶	۱۹	Q ₂ y _{t3} α ₂₀ β ₃₂	۰/۸۴	۲/۱۷
۲	Q ₁ y _{t2} α ₀ β ₀	۰/۴۶	۱/۳۷	۲۰	Q ₂ y _{t4} α ₂₀ β ₃₂	۰/۸۴	۳/۰۷
۳	Q ₁ y _{t3} α ₀ β ₀	۰/۴۶	۲/۱۷	۲۱	Q ₂ y _{t1} α ₂₀ β ₅₀	۰/۸۴	۰/۶
۴	Q ₁ y _{t4} α ₀ β ₀	۰/۴۶	۳/۰۷	۲۲	Q ₂ y _{t2} α ₂₀ β ₅₀	۰/۸۴	۱/۳۷
۵	Q ₂ y _{t1} α ₀ β ₀	۰/۸۴	۰/۶	۲۳	Q ₂ y _{t3} α ₂₀ β ₅₀	۰/۸۴	۲/۱۷
۶	Q ₂ y _{t2} α ₀ β ₀	۰/۸۴	۱/۳۷	۲۴	Q ₂ y _{t4} α ₂₀ β ₅₀	۰/۸۴	۳/۰۷
۷	Q ₂ y _{t3} α ₀ β ₀	۰/۸۴	۲/۱۷	۲۵	Q ₂ y _{t1} α ₃₂ β ₀	۰/۸۴	۰/۶
۸	Q ₂ y _{t4} α ₀ β ₀	۰/۸۴	۳/۰۷	۲۶	Q ₂ y _{t2} α ₃₂ β ₀	۰/۸۴	۱/۳۷
۹	Q ₃ y _{t1} α ₀ β ₀	۱/۲۵	۰/۶	۲۷	Q ₂ y _{t3} α ₃₂ β ₀	۰/۸۴	۲/۱۷
۱۰	Q ₃ y _{t2} α ₀ β ₀	۱/۲۵	۱/۳۷	۲۸	Q ₂ y _{t4} α ₃₂ β ₀	۰/۸۴	۳/۰۷
۱۱	Q ₃ y _{t3} α ₀ β ₀	۱/۲۵	۲/۱۷	۲۹	Q ₂ y _{t1} α ₃₂ β ₃₂	۰/۸۴	۰/۶
۱۲	Q ₃ y _{t4} α ₀ β ₀	۱/۲۵	۳/۰۷	۳۰	Q ₂ y _{t2} α ₃₂ β ₃₂	۰/۸۴	۱/۳۷
۱۳	Q ₂ y _{t1} α ₂₀ β ₀	۰/۸۴	۰/۶	۳۱	Q ₂ y _{t3} α ₃₂ β ₃₂	۰/۸۴	۲/۱۷
۱۴	Q ₂ y _{t2} α ₂₀ β ₀	۰/۸۴	۱/۳۷	۳۲	Q ₂ y _{t4} α ₃₂ β ₃₂	۰/۸۴	۳/۰۷
۱۵	Q ₂ y _{t3} α ₂₀ β ₀	۰/۸۴	۲/۱۷	۳۳	Q ₂ y _{t1} α ₃₂ β ₅₀	۰/۸۴	۰/۶
۱۶	Q ₂ y _{t4} α ₂₀ β ₀	۰/۸۴	۳/۰۷	۳۴	Q ₂ y _{t2} α ₃₂ β ₅₀	۰/۸۴	۱/۳۷
۱۷	Q ₂ y _{t1} α ₂₀ β ₃₂	۰/۸۴	۰/۶	۳۵	Q ₂ y _{t3} α ₃₂ β ₅₀	۰/۸۴	۲/۱۷
۱۸	Q ₂ y _{t2} α ₂₀ β ₃₂	۰/۸۴	۱/۳۷	۳۶	Q ₂ y _{t4} α ₃₂ β ₅₀	۰/۸۴	۳/۰۷

آنالیز ابعادی

بر پدیده فیزیکی معین منجر می شود. پارامترهای تاثیرگذار بر عمق آبشستگی پایین دست کالورت در شرایط وجود انسداد را می توان با رابطه ۱ معرفی کرد:

تحلیل ابعادی^۱ یکی از مهم ترین ابزارهای مطالعه جریان سیال است و به کمک نوعی روش فشرده کردن، به رفع پیچیدگی و کاستن از تعداد متغیرهای تجربی موثر

$$d_{s,max} = \psi(B, S_0, L, S_{oc}, b, h, \alpha, \beta, y_u, v_u, y_t, d_{50}, G_s, \sigma_g, \phi, p, S_{fd}, \rho, \mu, g) \quad (1)$$

ضریب شکل ذرات رسوب، ρ جرم حجمی سیال، μ لزوجت دینامیکی سیال و g شتاب ثقل است. با توجه به اینکه تنها از یک کالورت با مشخصات ثابت و یک ذره رسوب یکنواخت ($\sigma_g \leq 1/3$) استفاده می شود، بررسی تاثیر پارامترهای مرتبط با این عوامل حذف می شود. با توجه به روباز بودن جریان و ترکیب پارامترهای عرض کف، شتاب ثقل، عمق و سرعت جریان در بالادست با استفاده از اصل

در این رابطه: $d_{s,max}$ حداکثر عمق آبشستگی، B عرض کف فلوم، S_{oc} شیب کف فلوم، L طول کالورت، S_{fd} شیب کف کالورت، b عرض مجرای کالورت و h ارتفاع آن، α درصد انسداد مقطع، β درصد پیشروی انسداد در مجرا، y_u و v_u عمق و سرعت جریان در بالادست، y_t عمق جریان در پایاب، d_{50} متوسط قطر ذره رسوب، G_s چگالی ویژه ذرات رسوبی، σ_g انحراف معیار مصالح کف، ϕ زاویه اصطکاک داخلی مصالح کف، p تخلخل مصالح کف، S_{fd}

¹ dimensional analysis

استخراج برخی پارامترهایی که در محیط آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری نیستند از مدل عددی FLOW-3D پس از واسنجی آن با نتایج آزمایشگاهی استفاده شد. در رابطه‌های ۳ تا ۸، معادلات ریاضی حاکم بر مسئله ارائه شده است (Valizadeh et al., 2024).

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}\right) = 0 \quad (3)$$

که در آن ρ چگالی سیال، t زمان و $\bar{u}$ ، $\bar{v}$ و $\bar{w}$ سرعت جریان به ترتیب در راستای محورهای x ، y و z هستند. در سیال تراکم‌ناپذیر، معادله پیوستگی جریان به صورت رابطه ۴ بازنویسی می‌شود.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right) = F_x - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu\Delta\bar{u} - \rho\left(\frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z}\right) \quad (5\text{-الف})$$

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right) = F_y - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu\Delta\bar{v} - \rho\left(\frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z}\right) \quad (5\text{-ب})$$

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{w}}{\partial z}\right) = F_z - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu\Delta\bar{w} - \rho\left(\frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{w}}{\partial z}\right) \quad (5\text{-ج})$$

$$\bar{u}_i\bar{u}_j = \nu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (7)$$

$$\tau_{i,j} = \rho\bar{u}_i\bar{u}_j = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (8)$$

در این رابطه‌ها: μ_t و ν_t به ترتیب لزوجت‌های گردابی دینامیکی و سینماتیکی هستند و طبق رابطه $\mu_t = \rho\nu_t$ به یکدیگر ارتباط داده می‌شوند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی عددی از مدل FLOW-3D استفاده شد، بدین منظور ابتدا هندسه فلوم و کالورت در نرم‌افزار AutoCAD ایجاد و در مدل عددی فراخوانی شد. شرایط استفاده شده در مرزهای موجود در مدل مذکور در جدول (۲) و تصویرهای مربوط و هندسه ایجاد شده در شکل (۳) ارائه شده است.

پی-باکینگهام، گروه‌های بدون بعد را می‌توان به شکل رابطه ۲ بازنویسی کرد:

$$\frac{d_{s,max}}{h} = \psi(\alpha, \beta, \frac{y_t}{h}, DI) \quad (2)$$

که در آن DI شدت دبی است و به صورت $DI = \frac{Q}{b\sqrt{gh^3}}$ تعریف می‌گردد.

مدل عددی

نرم‌افزارهای مختلفی در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی توسعه یافته‌اند. صرفه‌جویی در زمان، هزینه‌های عملیاتی کم، سهولت بیشتر و دستیابی به عملکرد آزمایشی از مهمترین مزایای شبیه‌سازی عددی نسبت به رویکرد تجربی است (Bui et al., 2020). در این تحقیق، به منظور

رابطه‌های (۵-الف) تا (۵-ج) به ترتیب معادلات ناویر-استوکس در جهت‌های x ، y و z هستند. بخش آخر در رابطه‌های مذکور تنش‌های رینولدزی هستند که به صورت رابطه ۶ بیان می‌شوند:

$$\rho\frac{d\bar{u}_i}{dt} = F_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu\Delta\bar{u}_i - \rho\left(\frac{\partial \bar{u}_i\bar{u}_j}{\partial x_j}\right) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، u_i و u_j به ترتیب معرف سرعت جریان در جهت‌های x_i و x_j ، $\bar{P}$ فشار و μ لزوجت دینامیکی سیال است. برای حل آشفتگی جریان معمولاً از فرضیه بوزینسک استفاده می‌شود که گرادیان‌های سرعت را به کمک ویسکوزیته گردابی به تنش‌های رینولدزی مرتبط می‌سازد (رابطه‌های ۷ و ۸).

جدول ۲- شرایط مرزی استفاده شده در مرزهای مدل عددی FLOW-3D

Table 2- Boundary conditions used in the boundaries of the FLOW-3D numerical model

مرز	X _{min}	X _{max}	Y _{min}	Y _{max}	Z _{min}	Z _{max}
سطح آزاد	دیوار	دیوار	دیوار	تراز سطح آب	دبی ورودی	شرط مرزی

تحلیل حساسیت مدل عددی
برای حصول اطمینان از نبود وابستگی نتایج مدل های عددی به پارامترهای کلیدی مانند ابعاد شبکه محاسباتی ایجاد شده و مدل حل آشفتگی لازم است حساسیت نتایج به این موارد تحلیل شود. بدین منظور حساسیت مدل

FLOW-3D به شبکه بندی فضای محاسباتی و مدل آشفتگی بررسی و نتایج در قالب جدول (۳) ارائه گردید و شاخص های آماری جذر میانگین مربعات خطا^۱ و میانگین خطای مطلق^۲ برای انتخاب گزینه برتر استفاده شد.

جدول ۳- حساسیت نتایج نرم افزار عددی به مدل حل آشفتگی و اندازه شبکه محاسباتی

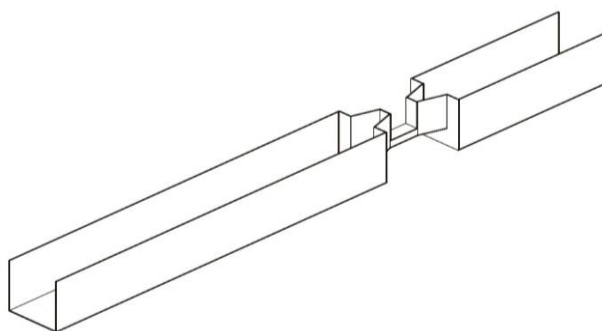
Table 3- sensitivity of numerical software results to the turbulence solution model and computational grid size

بررسی حساسیت نتایج به مدل آشفتگی			
مدل آشفتگی	مدت زمان شبیه سازی		شاخص های آماری
	(ثانیه)		
MAE	RMSE		
۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۱۵۱۲۰۰	RNG
۰/۰۲۹	۰/۰۲۳	۱۸۷۲۰۰	K-ε

بررسی حساسیت نتایج به اندازه شبکه محاسباتی			
اندازه شبکه (میلی متر)	مدت زمان شبیه سازی		شاخص های آماری
	(ثانیه)		
MAE	RMSE		
کوچک (۴)	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۲	۳۴۵۶۰۰
متوسط (۶)	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۱۸	۱۵۱۲۰۰
بزرگ (۸)	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۵	۱۲۶۰۰۰

با توجه به نتایج مربوط به تحلیل حساسیت نتایج مدل عددی به ابعاد شبکه محاسباتی و مدل آشفتگی و دقت در شاخص های آماری محاسبه شده که در جدول (۳) ارائه شد، شبکه محاسباتی و مدل آشفتگی به ترتیب ۶ میلیمتر و RNG انتخاب گردید. نمای کلی فلوم و کالورت در مدل آزمایشگاهی و عددی، شرایط مرزی و شبکه بندی فضای محاسباتی در شکل (۲) نمایش داده شده است.

برای اطمینان یافتن از کافی بودن زمان شبیه سازی در مدل عددی مورد استفاده، منحنی تعادل فرسایش و رسوب گذاری مربوط به تست $Q_{21} y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$ در شکل (۳) نمایش داده شده است.



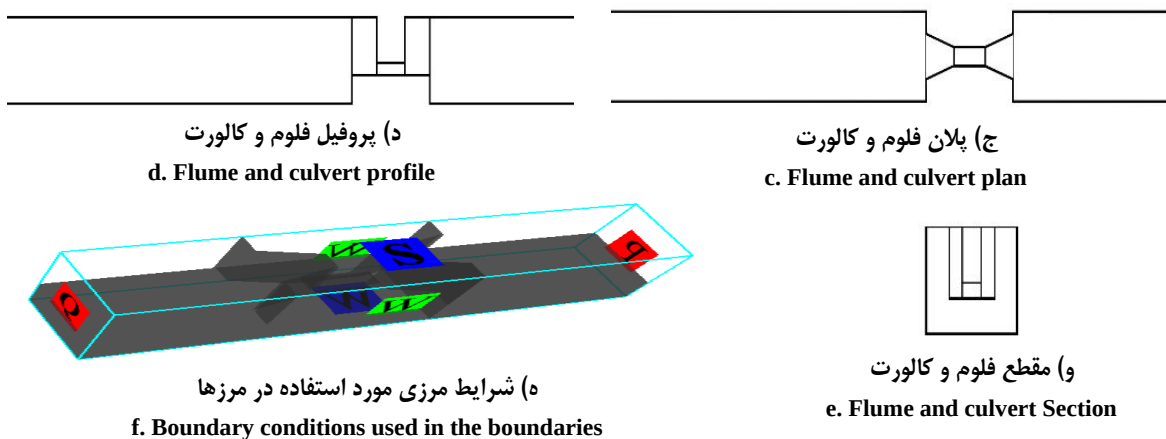
ب) نمای سه بعدی فلوم و سازه
b. 3D view of flume and structure



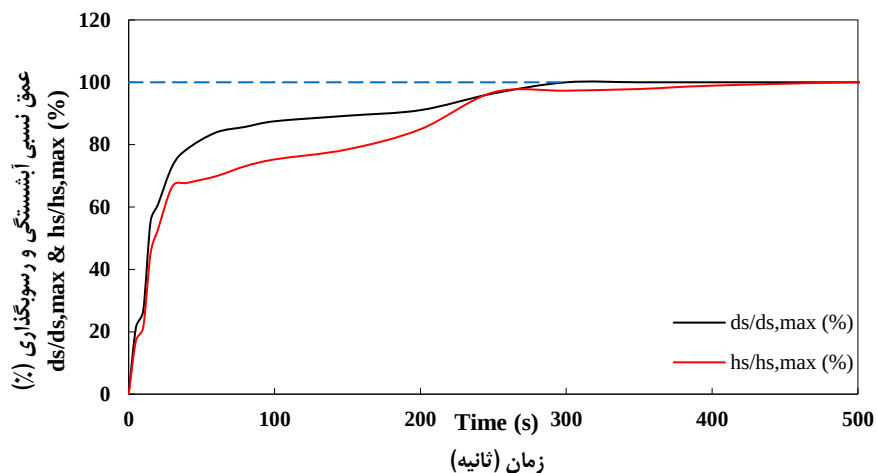
الف) نمای کلی فلوم آزمایشگاهی
a. Overview of the laboratory flume

¹ Root Mean Square Error, RMSE

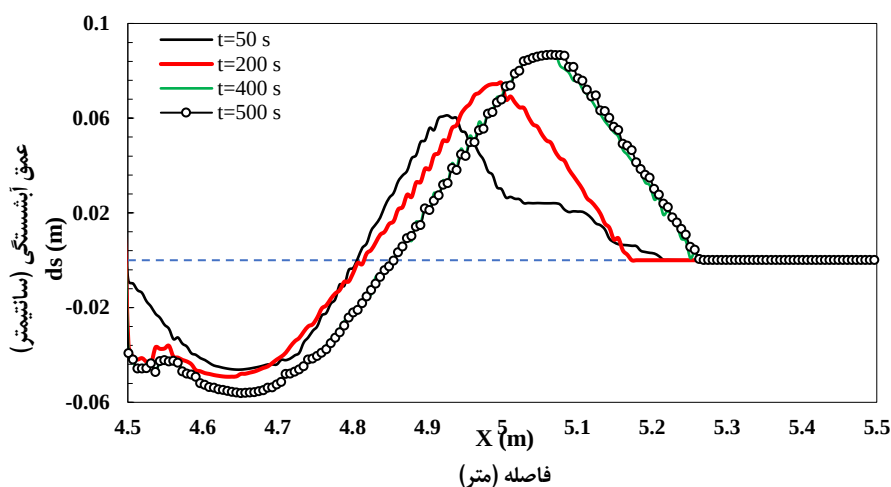
² Mean Absolute Error, MAE



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی و هندسه مدل عددی به همراه شرایط مرزی
Fig. 2- View of the laboratory flume and geometry of the numerical model with the boundary conditions



شکل ۳- تغییرات عمق آبشستگی و رسوبگذاری مربوط به تست $Q_2 y_{12} a_{22} \beta_{22}$
Fig. 3- Changes in scour depth and sedimentation related to test $Q_2 y_{12} a_{22} \beta_{22}$



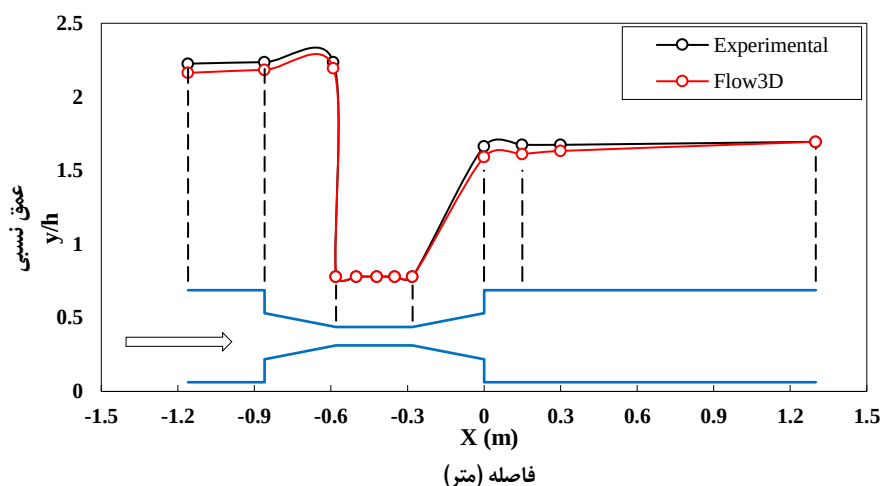
شکل ۴- تغییرات فرسایش و رسوبگذاری بستر وابسته به زمان در خروجی کالورت در تست $Q_2 y_{12} a_{22} \beta_{22}$
Fig. 4- Time-dependent changes in bed erosion and sedimentation in culvert outlet in the test $Q_2 y_{12} a_{22} \beta_{22}$

همانطور که در شکل (۳) دیده می شود، بیش از ۹۰ درصد از فرسایش و رسوبگذاری تا زمان ۳۰۰ ثانیه رخ داده است ولی روند شبیه سازی به منظور حصول اطمینان از به تعادل رسیدن تا ۵۰۰ ثانیه ادامه داده شد. میزان فرسایش و رسوبگذاری در زمان ۴۰۰ ثانیه پس از آغاز مدلسازی در نرم افزار FLOW-3D به ترتیب $0/00007$ و $0/00011$ متر در ثانیه محاسبه شد که مقدار ناچیز آن نشان می دهد این فرآیندها به تعادل رسیده اند. به منظور بررسی دقیق تر نیمرخ طولی چاله فرسایش و تپه رسوبگذاری در امتداد خط مرکزی فلووم در شکل (۴) رسم شده است. همان گونه که مشاهده

نتایج و بحث

واسنجی مدل عددی

برای واسنجی مدل عددی، از نتایج آزمایشگاهی مربوط به تست $(Q_2 y_{13} \alpha_{32} \beta_{32})$ استفاده شد. در شکل (۵)، نیمرخ طولی سطح آب محاسبه شده و اندازه گیری شده در محور کانال به منظور مقایسه نشان داده شده است.

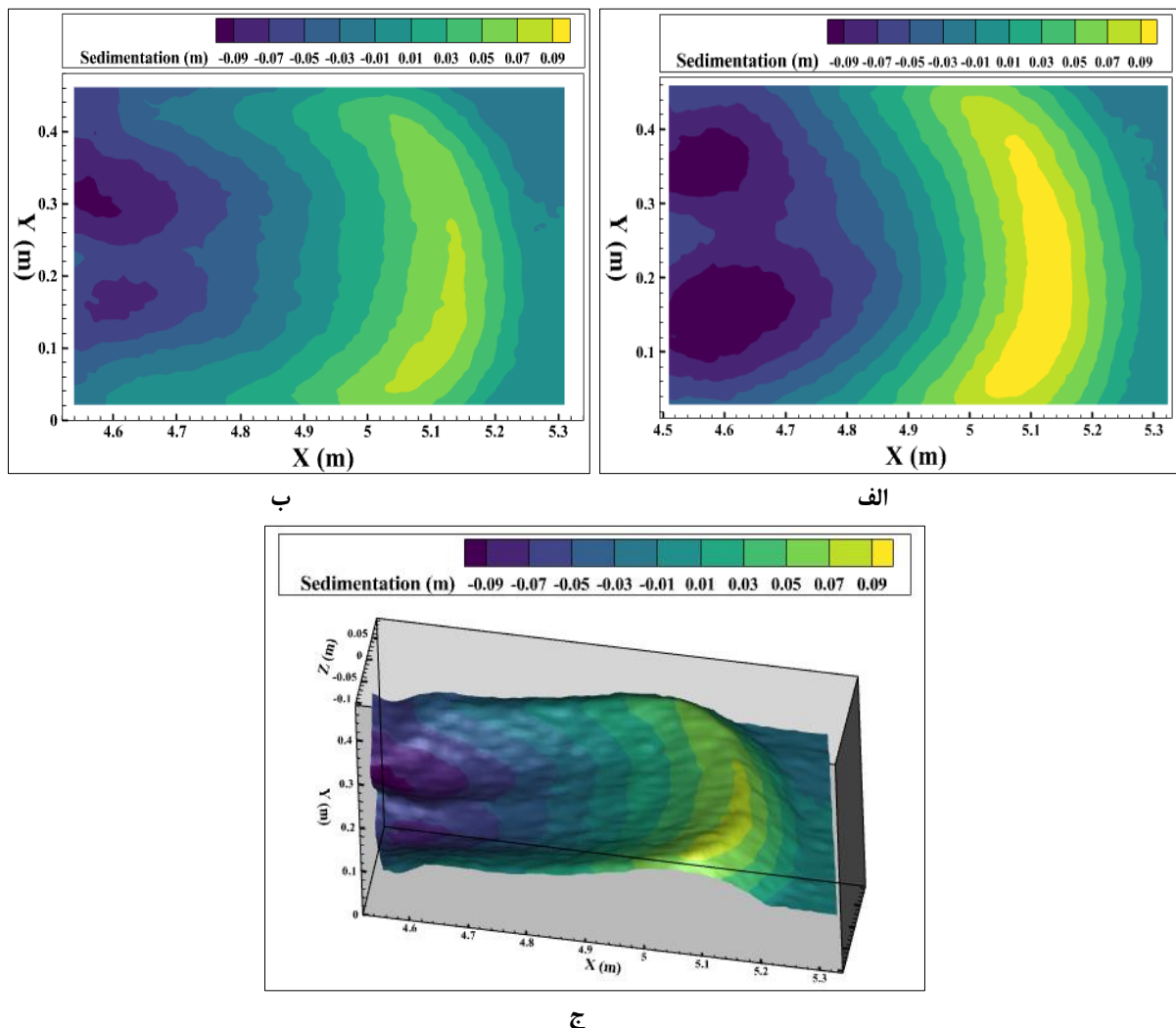


شکل ۵- نیمرخ طولی سطح آب اندازه گیری شده و محاسبه شده در تست $Q_2 y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$

Fig. 5- Longitudinal profile of the water surface measured and simulated in the test $Q_2 y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$

می شود که محاسبات عددی نیز این موضوع را تایید می کند. در طول تبدیل خروجی به دلیل افزایش سطح مقطع و کاهش سرعت جریان، تراز سطح آب مشاهداتی و عددی روند افزایشی را نشان می دهند. در انتهای تبدیل خروجی تراز سطح آب مشاهداتی و عددی روند صعودی دارند که می تواند ناشی از رژیم جریان بالایی و جریان فوق بحرانی در این محل باشد. در شکل (۶)، الگوی فرسایش حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در تست $Q_2 y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$ نشان داده شده است.

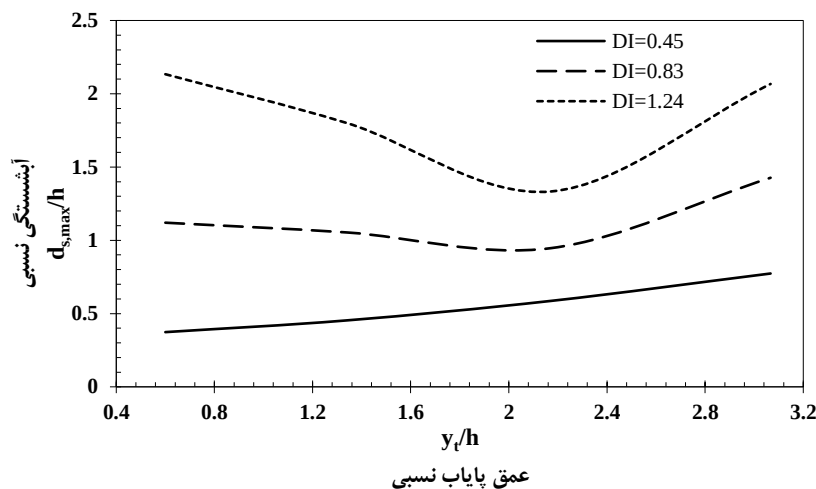
همانطور که شکل (۵) نشان می دهد، مدل FLOW-3D توانایی کافی در شبیه سازی سطح آب در فلووم و کالورت را دارد و می توان به دقت نتایج آن اعتماد کرد. حداکثر اختلاف رقوم سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در آزمایش موردنظر $1/9$ سانتی متر است که کمتر از ۱۰ درصد عمق جریان است و نشان از دقت مدل عددی و واسنجی صحیح آن دارد. بلافاصله بالادست ورودی کالورت مشاهدات آزمایشگاهی و سطح آب مدلسازی شده پس زدگی سطح آب را نشان می دهند. بعد از ورودی کالورت سطح آب مقداری منقبض



شکل ۶- الگوی فرسایش و رسوب گذاری در تست $Q_2, Y_{t3}, \alpha_{32}, \beta_{32}$ ، الف) آزمایشگاهی ب) مدل عددی ج) نمای سه بعدی
Fig. 6- Erosion and sedimentation pattern for the test $Q_2, Y_{t3}, \alpha_{32}, \beta_{32}$, a: Laboratory, b: numerical model, c: 3D

همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می شود، در انتهای تبدیل خروجی یک چاله رسوبی تشکیل شده است. ذرات رسوب شسته شده از این چاله یک تپه رسوب گذاری را بلافاصله بعد از آن تشکیل می دهد. در این آزمایش حداکثر ارتفاع تپه رسوب گذاری و عمق چاله فرسایش برای نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی به ترتیب ۹ و ۹ سانتی متر و ۷ و ۸ سانتی متر از سطح اولیه بستر است. موقعیت تپه رسوب گذاری و چاله فرسایشی آزمایشگاهی و مدل عددی تقریباً بر هم منطبق هستند. صحت سنجی نشان از توانایی مدل عددی در شبیه سازی الگوی جریان و فرسایش در انتهای سازه کالورت مورد بررسی دارد.

آبشستگی پایین دست در حالت بدون انسداد نمودار تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبی اندازه گیری شده در حالت بدون انسداد به ازای عمق های پایاب نسبی و شدت دبی مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. لازم است گفته شود مقادیر پارامتر DI برابر با ۰/۴۵، ۰/۸۳ و ۱/۲۴ به ترتیب متناظر با دبی های ۲/۹۵، ۵/۳۸ و ۸/۰۳ لیتر بر ثانیه است.



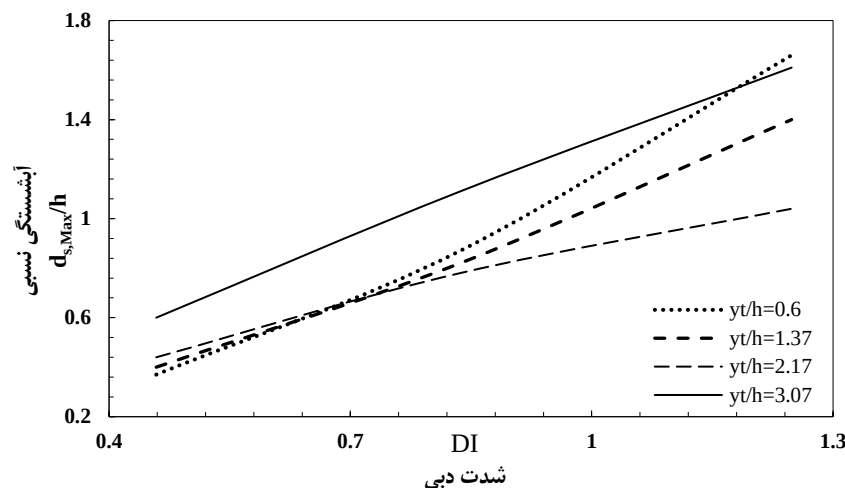
شکل ۷- تغییرات عمق آبشستگی در برابر عمق پایاب در حالت بدون انسداد
Fig. 7- Variation of scour depth against tailwater depth in the unblock condition

مشاهدات آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی در این شدت دبی نشان داد در ابتدا با افزایش عمق پایاب، عمق جریان در محدوده تبدیل خروجی نیز افزایش می یابد و خروجی کالورت به سمت مستغرق شدن هدایت می شود. در این حالت، جریان خروجی از کالورت مانند جت ورودی به مخزن پر عمل می کند که سرعت آن کاهش می یابد، در نتیجه مقدار فرسایش تا حدودی کاهش می یابد. در عمق های پایاب نسبی بیشتر از ۲/۱۷ جریان خروجی از کالورت به شدت مستغرق شده است، سطح مقطع موثر جریان خروجی از کالورت کاهش یافته است و بردارهای سرعت جریان خروجی در اثر فشار آب لایه های بالایی بیشتر به سمت کف حرکت می کند و بستر را بیشتر مورد هجوم و فرسایش قرار می دهند. این عملکرد مانند جریان پایین دست دریاچه کشویی با درجه استغراق بالاست که در آن انقباض خطوط جریان، کاهش سطح مقطع موثر جت خروجی و انحراف بیشتر بردارهای سرعت به سمت کف رخ می دهد. در واقع کاهش سطح مقطع جریان در محل کالورت باعث افزایش ناگهانی سرعت و ایجاد جریان مشابه جت افقی شده است. جریان خروجی از کالورت با سرعت زیاد و تداخل آن با جریان برگشتی موجب ایجاد جریان ثانویه و تغییر در اندرکنش آن با ذرات رسوبی پایین دست می شود. این تغییر، گردابه های قابل توجهی در

همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است در عمق پایاب نسبی ثابت، با افزایش پارامتر شدت دبی مقدار حداکثر عمق آبشستگی نسبی بیشتر می شود. در واقع با افزایش شدت دبی از ۰/۴۵ تا ۱/۲۴ در یک عمق پایاب نسبی ثابت سرعت جریان داخل مجرای کالورت بیشتر می شود و به تبع آن جریان با سرعت بیشتر از مجرای کالورت به سمت پایین دست خارج می شود. افزایش سرعت در عمق پایاب ثابت، افزایش مقدار تنش برشی بستر و افزایش قدرت جریان در انتقال ذرات رسوب و فرسایش بستر را به همراه دارد. نتایج مدل سازی عددی نشان می دهد به ازای $y_t/h=1/37$ مقدار تنش برشی اعمال شده به بستر در شروع شبیه سازی برای $DI=0/46$ برابر با ۱/۲ نیوتن بر مترمربع و به ازای $DI=0/84$ برابر با ۲/۲ نیوتن بر مترمربع است. افزایش تنش برشی عامل اصلی فرسایش بیشتر بستر بلافاصله بعد از تبدیل خروجی سازه کالورت است.

در منحنی های نشان داده شده در شکل (۷)، یک نقطه عطف در دو مقدار شدت دبی ۰/۸۳ و ۱/۲۴ به وضوح دیده می شود. به عبارتی، با افزایش مقدار شدت دبی، تقعر در نمودار و نقطه عطف آن نمایان تر می شود. برای مثال، در شدت دبی ۱/۲۴ به ازای افزایش عمق پایاب نسبی از ۰/۸ تا ۲ عمق آبشستگی نسبی ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

مسیر جریان تشکیل می‌دهد و افزایش آبشستگی و افزایش تنش برشی وارد بر ذرات بستر و برخاستن ذرات را به همراه دارد. معلق شدن ذرات بستر به دلیل گردابه‌های ایجاد شده موجب حمل آنها به سمت پایین دست و تشکیل حفره آبشستگی و به دنبال آن تپه رسوب گذاری شده است. در شکل (۸)، نمودار تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در برابر شدت دبی در حالت بدون انسداد به ازای مقادیر مختلف عمق پایاب نسبی نمایش داده شده است.



شکل ۸- تغییرات عمق آبشستگی در برابر شدت دبی در حالت بدون انسداد

Fig. 8- Variation of scour depth against flow intensity in the unblocked condition

است. به ازای $y_t/h=2/17$ که تقریباً متناظر با نقطه تقعر نمودارهای نشان داده شده در شکل است، تغییرات شدت دبی کمترین تاثیر را در آبشستگی پایین دست دارد. به عبارتی، اگر در عمل عمق پایاب نسبی در این محدوده کنترل شود، تغییرات دبی سیلاب تاثیر چندانی بر تغییر فرسایش پایین دست کالورت نمی‌گذارد.

علاوه بر پارامتر حداکثر عمق آبشستگی، فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش از سازه نیز مهم است، زیرا اگر حداکثر عمق آبشستگی در نزدیکی سازه رخ دهد، تخریب آن محتمل تر است (Galán & González, 2020). بنابر نتایج آزمایشگاهی در یک عمق پایاب ثابت با افزایش دبی جریان، نقطه وقوع حداکثر عمق آبشستگی به انتهای تبدیل خروجی نزدیک تر می‌شود. فاصله طولی نقطه مذکور از انتهای تبدیل خروجی در آزمایش‌های بدون انسداد مجرای کالورت در جدول ۴ ارائه شده است.

همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در حالت کلی به ازای یک عمق پایاب نسبی ثابت با افزایش پارامتر شدت دبی به دلیل افزایش دبی جریان و افزایش اختلاف عمق جریان بالادست و پایین دست کالورت، سرعت جریان خروجی از کالورت افزایش و به تبع آن مقدار حداکثر عمق فرسایش در پایین دست نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نمودارها نشان می‌دهند که بیشترین مقدار فرسایش در شدت دبی $1/24$ و به ازای اعماق نسبی حداکثر $3/07$ رخ می‌دهد. در عمق نسبی $0/6$ خروجی کالورت به صورت آزاد عمل می‌کند و به دلیل کم بودن سطح مقطع جریان، سرعت جریان افزایش می‌یابد و حداکثر فرسایش مشاهده می‌شود. از طرفی، به ازای $y_t/h=3/07$ همان گونه که پیش تر نیز اشاره شد، پایین دست کالورت به شدت مستغرق شده است و فشار آب لایه‌های بالایی بردارهای سرعت را به سمت بستر بیشتر منحرف کرده و در نتیجه فرسایش بیشتری قابل مشاهده

جدول ۴ - فاصله محل حداکثر عمق آبشستگی از انتهای تبدیل خروجی (حالت بدون انسداد)

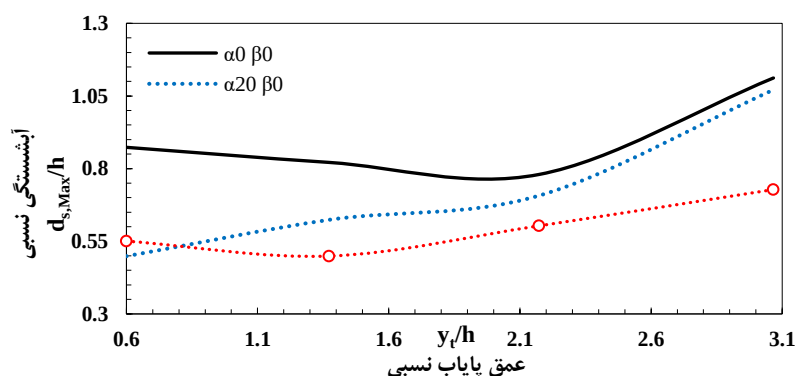
Table 4 - Location of the point with maximum scour depth in unblocked Tests

ردیف	نماد آزمایش	$X_{s,max}$ (m)	ردیف	نماد آزمایش	$X_{s,max}$ (m)
Row	Test		Row	Test	
۱	$Q_1 y_{t1} \alpha_0 \beta_0$	۰/۱۸	۷	$Q_2 y_{t3} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۸
۲	$Q_1 y_{t2} \alpha_0 \beta_0$	۰/۱۵	۸	$Q_2 y_{t4} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۱
۳	$Q_1 y_{t3} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۷	۹	$Q_3 y_{t1} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۷
۴	$Q_1 y_{t4} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۳	۱۰	$Q_3 y_{t2} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۵
۵	$Q_2 y_{t1} \alpha_0 \beta_0$	۰/۱۶	۱۱	$Q_3 y_{t3} \alpha_0 \beta_0$	۰
۶	$Q_2 y_{t2} \alpha_0 \beta_0$	۰/۱۲	۱۲	$Q_3 y_{t4} \alpha_0 \beta_0$	۰

تأثیر انسداد بر عمق آبشستگی در خروجی

به منظور بررسی دقیق تر، ابتدا نتایج مربوط به انسداد مقطع ورودی در حالت بدون پیشروی انسداد ($\beta=0$) و تأثیر آن بر آبشستگی پایین دست ارائه و پس از آن تأثیر پیشروی انسداد در طول مجرای کالورت به مقدار ۳۲ درصد ($\beta=32\%$) و $\alpha=32\%$ تجزیه و تحلیل گردید. در هر دو مورد به منظور مقایسه نتایج حالت بدون انسداد نیز در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است. در شکل (۹)، تغییرات عمق فرسایش نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی برای دو درصد انسداد مقطع ۲۰ و ۳۲ درصد نشان داده شده است.

دلیل تشکیل نقطه مذکور در فاصله طولی کمتر بر اساس مشاهدات عینی آن است که با افزایش دبی جریان در ابتدا با عمق کم و سرعت زیاد در امتداد خط مرکزی فلولم به ذرات رسوب برخورد می کند و باعث حرکت آن و توسعه چاله می شود، پس از گذشت زمان کافی و افزایش عمق جریان، چاله در همان شکل اولیه خود توسعه می یابد و موقعیت نقطه حداکثر عمق آبشستگی تغییر نمی کند. این موضوع لزوم افزایش دقت در زمان طراحی کالورت و توجه ویژه به پدیده آبشستگی برای حفاظت موثر از سازه و عملکرد صحیح آن به خصوص در مواقع سیلاب را دوچندان می کند.



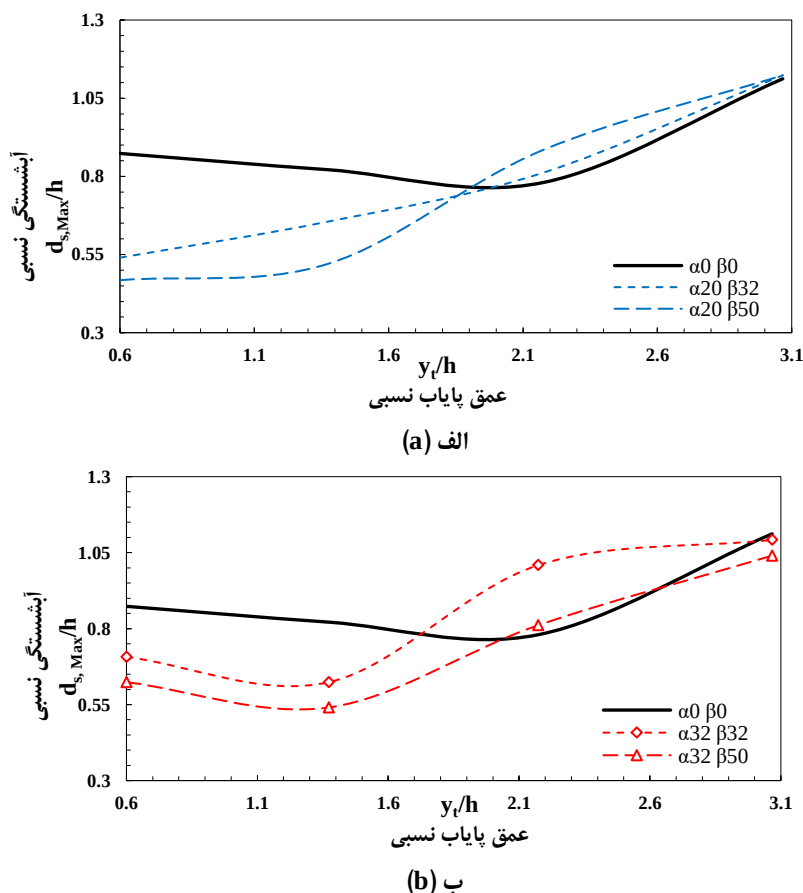
شکل ۹- تغییرات حداکثر عمق فرسایش نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی به ازای انسداد مقطع ورودی کالورت ۲۰ و ۳۲ درصد

Fig. 9- Changes in Maximum Relative Scour Depth versus Relative Tailwater Depth for Inlet Blockage Percentages $\alpha=20$ and 32%

همانگونه که در شکل (۹) مشاهده می شود در حالتی که مقطع ورودی کالورت دچار انسداد شود مقدار حداکثر فرسایش در پایین دست کالورت کاهش یافته است. دلیل این امر آن است که در حالت انسداد ثابت، دقیقاً در وجه پشت عامل انسداد، جریان گردابی با محور افقی ایجاد می شود که باعث جداشدگی خطوط جریان و تلاطم شدید جریان در مجرا می گردد، به گونه ای که چندین مرتبه جریان به سقف مجرای کالورت برخورد و مجدداً به سمت کف مجرا حرکت می کند. این روند باعث افت شدید انرژی و کاهش پتانسیل جریان خروجی در فرسایش پایین دست در مقایسه با حالت

بدون انسداد می‌شود. با افزایش عمق پایاب و مستغرق شدن مجرای کالورت، تلاطم جریان در مجرا کاهش می‌یابد و مقدار فرسایش در حالت با انسداد و بدون انسداد به هم نزدیک می‌شود. شکل (۹) همچنین نشان می‌دهد وقتی افزایش عمق پایاب پایین دست، مجرای کالورت را از حالت جریان آزاد خارج می‌کند ($y_t/h > 1/37$)، با افزایش درصد انسداد مقطع ورودی مقدار فرسایش پایین دست دچار کاهش بیشتری می‌شود، در حالی که در شرایط جریان آزاد در خروجی مجرای کالورت ($y_t/h = 0/6$) افزایش انسداد باعث

افزایش عمق فرسایش پایین دست شده است. مقایسه کلی نتایج به دست آمده با نتایج تحقیق طاها و همکاران (Taha et al., 2020) اجرا شده روی بررسی تاثیر انسداد بر سطح آب و ابعاد چاله آبشستگی پایین دست کالورت جعبه‌ای با استفاده از مدل FLOW-3D، نشان می‌دهد در هر دو تحقیق بروز انسداد ثابت در برخی موارد باعث کاهش و در تعدادی از تست‌ها باعث افزایش مقدار آبشستگی نسبت به حالت بدون انسداد شده است. در شکل (۱۰)، تاثیر پیشروی انسداد در مجرای کالورت نشان داده شده است.



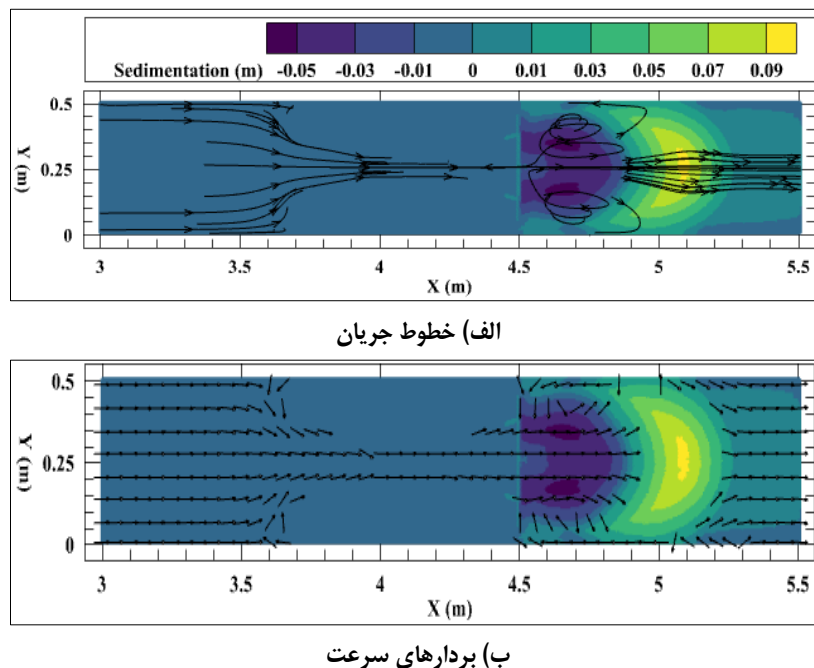
شکل ۱۰- الف: تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی به ازای $\alpha = 20\%$ ؛ ب: تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی به ازای $\alpha = 32\%$

Fig 10- a: Changes in Maximum Relative Scour Depth versus Relative Tailwater Depth for Blockage Progress of 32% and 50% at $\alpha=20\%$ b: Changes in Maximum Relative Scour Depth versus Relative Tailwater Depth for Blockage Progress of 32% and 50% at $\alpha=32\%$

همانگونه که در شکل ۱۰-الف مشخص است تاثیر نفوذ انسداد در مجرای کالورت بر عمق آبشستگی پایین دست به موقعیت تراز سطح آب در پایاب بستگی دارد. عمق پایاب نسبی کمتر از حدود ۲ پیشروی انسداد منجر به کاهش عمق

آبشستگی در پایین دست و بیشتر از آن مقدار آبشستگی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، با افزایش عمق پایاب تاثیر پیشروی انسداد بر عمق آبشستگی ناچیز می‌شود به گونه‌ای که به ازای $y_t/h = 3/07$ مقدار حداکثر عمق آبشستگی

پایین دست در سه حالت بدون انسداد و انسداد با پیشروی های ۳۲ و ۵۰ درصد تفاوت چندانی ندارند. با توجه به نمودارهای شکل ۹-ب که مربوط به پیشروی ۳۲ و ۵۰ درصدی عامل انسداد در حالت انسداد ۳۲ درصدی مقطع است دیده می شود که روندی همانند حالت قبل حاکم است، با این تفاوت که عمق آبشستگی مربوط به پیشروی انسداد



شکل ۱۱- خطوط جریان و بردارهای سرعت در تست $Q_2 y_{13} a_{32} \beta_{32}$

Fig. 11: Streamlines and velocity vectors in test $Q_2 y_{13} a_{32} \beta_{32}$

شکل (۱۱) نشان می دهد که با افزایش پیشروی عامل انسداد در مجرای کالورت وضعیت بردارهای سرعت به طور قابل توجهی دستخوش تغییر شده است و هجوم آنها به سمت پایین دست خروجی شدت بیشتری می یابد، به طوری که موجب افزایش آبشستگی و رسوبگذاری در بستر رسوبی شده است.

نتیجه گیری

انسداد مجرای کالورت یکی از مهمترین چالش هایی است که موجب کاهش کارایی و افزایش احتمال تخریب آن می شود. پیشروی انسداد در مجرای کالورت می تواند هیدرولیک جریان را تحت تأثیر قرار دهد و بر آبشستگی بستر پایین دست کالورت اثر قابل توجهی بگذارد. تمرکز

محققان پیشین در خصوص تأثیر انسداد بر آبشستگی در پایین دست کالورت روی بررسی اثر انسداد ثابت بوده و اثر پیشروی انسداد در مجرای کالورت بررسی نشده است که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت. در تحقیق حاضر با اجرای ۳۶ آزمایش تجربی در آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه رازی، اثر پیشروی انسداد به میزان ۳۲ و ۵۰ درصد بر آبشستگی در خروجی کالورت بررسی شد و شبیه سازی عددی مسئله نیز تجزیه و تحلیل گردید. نتایج تحقیق نشان داد در هر دو حالت با انسداد و بدون انسداد، حداکثر عمق آبشستگی در اثر تغییرات شدت جریان و عمق پایاب به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می گیرد. افزایش شدت جریان، افزایش عمق آبشستگی را به همراه دارد. در شرایط بدون انسداد، به ازای هر شدت جریان مشخص یک عمق پایاب

پتانسیل جریان خروجی در فرسایش بستر شد، با این حال با افزایش عمق پایاب به دلیل کاهش اغتشاش در مجرای کالورت تأثیر انسداد بر آبشستگی کاهش یافت. تأثیر پیشروی انسداد بر عمق آبشستگی با افزایش عمق پایاب نسبی ناچیز شد، به گونه‌ای که در $y/h=3/1$ در حداکثر عمق آبشستگی پایین دست در حالت بدون انسداد و پیشروی انسداد به مقدار ۳۲ و ۵۰ درصد تفاوت چندانی ایجاد نشد. با توجه به اهمیت موضوع آبشستگی و اثرهای نامطلوب آن بر پایداری سازه‌های هیدرولیکی، به طور خاص کالورت، و ایجاد چالش جدی در مواقع بروز سیلاب، استفاده از برخی سازه‌های تثبیت کننده بستر مانند کفبند حفاظت کننده و سرریز بالدار می‌تواند در مدیریت، کاهش یا انتقال چاله آبشستگی به مکانی دورتر از تکیه‌گاه کالورت بسیار موثر باشد.

نسبی بحرانی وجود دارد که تا قبل از آن، عمق آبشستگی پایین دست با افزایش عمق پایاب کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. این عمق پایاب نسبی بحرانی برای شدت جریان $DI=1/24$ تقریباً $2/17$ است $(y/h=2/17)$. نتایج آزمایشگاهی همچنین نشان داد به ازای یک عمق پایاب نسبی ثابت با افزایش شدت جریان، محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی به انتهای تبدیل خروجی نزدیک‌تر می‌شود، این موضوع به دلیل تأثیر مستقیم بر پایداری سازه به خصوص در زمان سیلاب، اهمیت طراحی صحیح کالورت و توجه ویژه به آبشستگی در پایین دست آن را برجسته می‌سازد. انسداد ۲۰ و ۳۲ درصد سطح مقطع ورودی کالورت بر میزان تلاطم جریان و فرسایش در پایین دست تأثیر قابل توجهی نشان داد. در مقایسه با حالت بدون انسداد، وجود انسداد به دلیل ایجاد اغتشاش باعث افت شدید انرژی جریان و کاهش

سپاسگزاری

از استادان محترم گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه رازی که تجهیزات آزمایشگاهی لازم را برای اجرای این پژوهش آماده‌سازی کردند سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- Abt, S. R., Ruff, J. F. & Doehring, F. K. (1985). Culvert Slope Effects on Outlet Scour. J. Hydraul. Eng. 111, 1363-1367.
- Abt, S. R., Ruff, J. F., Doehring, F. K. & Donnell, C. A. (1987). Influence of Culvert Shape on Outlet Scour. J. Hydraul. Eng. 113, 393-400.
- Abt, S. R., Thompson, P. L. & Lewis, T. M. (1996). Enhancement of the Culvert Outlet Scour Estimation Equations. Journal of the Transportation Research Board. 1523(1), 178-185.
- Abida, H. & Townsend, R. (1991). Local scour downstream of box-culvert outlets, Journal of Irrigation and Drainage Engineering 118(6): 1001-1003.
- Amini, A. & Solaimani, N. (2018). The Effects of Uniform and Nonuniform Pile Spacing Variations on Local Scour at Pile Groups. Marine Georesources and Geotechnology 36(7): 861-866.
- Ahmed, K. O., Amini, A., Bahrami, J., Kavianpour, M. R. & Hawez, D. M. (2021). Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 12(4), 04021040.
- Ahmed, K. O., Nariman, N., Hawez, D. M., Kisi, O. & Amini, A. (2023). Predicting and Optimizing the Influenced Parameters for Culvert Outlet Scouring Utilizing Coupled FLOW 3D-Surrogate Modeling. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 47(3), 1763-1776.
- Ahmed, K. O., Kavianpour, M. R., Amini, A. & Aminpour, Y. (2024). Numerical modelling of downstream scour in circular culverts: Impact of inlet blockages and variable flow conditions. PLoS ONE 19(10): e0312501.

- Bohan, J. (1970). Erosion and Riprap Requeriments at Culvert and Storm-Drain Outlets, Technical Report, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Chen, Y. H. (1970). Scour at Outlets of Box Culverts, Master's thesis, Colorado State University.
- Day, R., Liriano, S. L. & White, W. R. (2001). Effect of tailwater depth and model scale on scour at culvert outlets, in: Proceedings of the ICE - Water and Maritime Engineering 148(3): 189-198.
- Emami, S. & Schleiss, A. J. (2006). Design of erosion protection at diversion tunnel outlets with concrete prisms, Canadian Journal of Civil Engineering 33: 81-92.
- Elsebaie, H. I. (2013). an experimental study of local scour around circular bridge pier in sand soil. Int. J. Civ. Environ. Eng.13, 23–28.
- Galán, Á. & González, J. (2022). Effects of shape, inlet blockage and wing walls on local scour at the outlet of non-submerged culverts: undermining of the embankment. Environ Earth Sci 79, 25.
- Günel, M., Günel, A.Y. & Osman, K. (2019). Simulation of blockage effects on scouring downstream of box culverts under unsteady flow conditions. International Journal of Environmental Science and Technology. 16, 5305–5310.
- Iqbal U. & Riaz, M. Z. B. (2024). Blockage at cross-drainage hydraulic structures - Advances, challenges and opportunities. Heliyon. 10(16): e35786.
- Liriano, S. L., Day, R. & Rodney, W. (2002). Scour at culvert outlets as influenced by the turbulent flow structure, J. Hydraul. 40(3): 367–376.
- Mendoza, C., Abt, S. R. & Ruff, J. F. (1983). Headwall inuence on scour at culvert outlets, Journal of Hydraulic Engineering 109(7): 1056-1060.
- Moody, J. A., Smith, J. D. & Ragan, B. W. (2005). Critical shear stress for erosion of cohesive soils subjected to temperatures typical of wildfires, J. Geophys. Res.-Earth, 110, F01004, <https://doi.org/10.1029/2004JF000141>, 2005.
- Najafzadeh, M. (2015). Neurofuzzy-Based GMDH-PSO to Predict Maximum Scour Depth at Equilibrium at Culvert Outlets. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 7(1), 2016.
- Najafzadeh, M. & Kargar, A. R. (2019). Gene-expression programming, evolutionary polynomial regression, and model tree to evaluate local scour depth at culvert outlets. J Pipeline Syst Eng Pract 10(3): 04019013
- Nohani, E. & Heidarnajad, M. (2014). Experimental Investigation of the Effect of Flow Angle of Attack on the Rate of Scour around the Slotted Bridge Pier at Different Levels of River Bend. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET), 2(12).
- Opie, T. R. (1967). Scour at Culvert Outlets, Ph.D. thesis, Colorado State University.
- Rigby, E. H. & Barthelmess, A. J. (2011). Culvert Blockage Mechanisms and Their Impact on Flood Behaviour: Are All Blockages Created Equal,” in 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering, Engineers Australia, Brisbane, Australia. 380-387.
- Ruff, J. F., Abt, S. R., Mendoza, C., Shaikh, A. & Klobardanz, R. (1982). Scour at Culvert Outlets in Mixed Bed Materials, Technical Report, U.S. Department of Trans portation. Federal Highway Administration.
- Sorourian, S., Keshavarzi, A., Ball, J. & Samali, B. (2014). Blockage effects on scouring downstream of box culverts under unsteady flow. Australasian Journal of Water Resources, 18(2): 180-190.
- Sorourian, S., Keshavarzi, A. & Ball, J. E. (2015). Scour at partially blocked box-culverts under steady flow. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 169(6): 247-259.
- Taha, N., El-Feky, M. M., El-Saiad, A. A. & Fathy, I. (2020). Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. Alex Eng J 59:3503–3513.
- Tien Bui, D., Shirzadi, A., Amini, A., Shahabi, H., Al-Ansari, N., Hamidi, S., Singh, S.K., Thai Pham, B., Ahmad, B.B. & Ghazvinei, P. T. (2020). A Hybrid Intelligence Approach to Enhance the Prediction Accuracy of Local Scour Depth at Complex Bridge Piers. Sustainability. 12(3): 1063.
- Valizadeh, R., Arman, A. & Ghobadian, R. (2024). Controlling the local scouring of the bottom of the protective inclined apron in a 90- degree mild bend using a numerical model, DOI:10.1016/j.oceaneng.2024.118177.
- Zhang, R. & Wu, P. (2019). The investigation of shape factors in determining scour depth at culvert outlets, ISH Journal of Hydraulic Engineering, DOI: 10.1080/09715010.2019.1611492.