

Experimental and Numerical Investigation of Blockage Effects on Flows in a Culvert


Somayeh Karimpour ¹, Saied Gohari ², Mehdi Yasi ^{3*}

1- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, University of Bou Ali Sina, Hamadan, Iran.

2. Assistant Professor of Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, University of Bou Ali Sina, Hamadan, Iran.

3. Associate Professor of River Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj Campus, Iran.

* m.yasi@ut.ac.ir

Received: 13 December 2019, Accepted: 28 May 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Culverts are common structures for runoff drainage system in the design and construction of roads and railways, in both urban and rural areas. Due to the nature of runoff flow, large amount of sediments, foliage, urban waste and debris materials may accumulate in the entrance of culverts, particularly in flood events.

Blockage in the culvert's entrance can result in a significant increase in flood risk, through elevated flood levels and diverted flow paths through the urban or rural areas (Rigby et al., 2002). Sudden blockage in a runoff system is also one of the common problems. The study of culvert's blockage would be useful in the prediction and prevention of flood hazard in the vicinity of drainage systems. Current study deals with this problem in box culverts. Blockage effects on the upstream water level were investigated using both experimental and numerical modeling. The FLOW-3D model was chosen, because the sufficiency of this model for such flow conditions was already reported by several studies such as Abad et al. (2008), Salamat Ravandi (2011) and Gunal et al. (2019).

Methodology: Experimental tests were conducted in Hydraulic Laboratory of Water Engineering Department in Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran. The box culvert models made of glass and smooth water pipes used as circular culvert models. The experimental setup includes a glass wall flume with 10m length, 0.5m width and 0.6m deep. Rectangular plates in different sizes were used in order to make sudden blockage into the culverts. An extensive experiment tests was conducted under different flow condition and blockage scenarios, and 21 experimental data sets were provided.

The FLOW-3D model, Version 11.3, was performed on the main server of Water Institute at the University of Tehran, and adapted to the experimental data sets from this study. The stability and sensitivity of this model have been tested according to: mesh cell size, simulation time step, turbulent model, and culvert hydraulic characteristics such as wall roughness. The simulation convergence was achieved with an efficient simulation time step of 80 seconds. Three different mesh blocks were used for pre-simulation cases, and a block in block with 1.0 cm and 0.5 cm mesh cell sizes were chosen as the best meshing scenario. The RNG was found to be an appropriate turbulence model. The slope of culvert barrel was changed from horizontal

to 0.005 in the flow direction, and the roughness coefficient modified from 0.00085 m to 0.001 m in the culvert barrel. The relative error of simulated water levels and discharge for calibrated model were to be in the order of acceptance ranges, and the simulation FLOW-3D model was adjusted as an efficient and reliable tool.

The FLOW-3D model was then calibrated and verified using the experimental data sets, and was used to simulate different flow conditions into the culverts, under different entrance-blockage scenarios.

Results and discussion: Effect of the inlet blockage on upstream water level was tested for three flow rates (the design discharge of 27.5 lit/s, and two lower discharges of 10.5 lit/s and 16.5 lit/s), in four different sizes of inlet blockage (B). Simulation results showed a good agreement in upstream backwater level in all cases. In the case of flow with 16.5 lit/s, upstream water level raised from 28.5 cm in non-blocked inlet to 31.4, 34.2 and 38.5 cm in presence of 20% ,40% and 60% blocked inlet area, respectively. The rate of the upstream water level increase (DH_u) against the reduced inlet area (1-B) represents a higher rate for discharges smaller than the culvert-design discharge. The evaluated equations for upstream water level enhancement were :

$$DH_u = -0.48(1-B) + 45.089 \quad (1)$$

$$DH_u = -0.82(1-B) + 75.663 \quad (2)$$

in which, Eq. (1) is for design discharge and Eq. (2) for the smaller discharges. Blockage has been affected flow in the barrel and in the downstream of the culvert. Investigation of turbulent characteristics and shear velocity values in both the barrel and downstream indicated the impact of blocked inlet. Turbulent energy of flow in the 60% blocked-inlet area was 5 times greater than that of non-blocked inlet for the design discharge. Also shear velocity in the same blockage situation increased by 2 times in downstream which results in a greater scouring power of the flow downstream. Sorourian et al. (2015) reported this phenomenon with even higher scour downstream of blocked culverts. Maximum value of shear velocity increased with the increase level of blockage in the all flow condition, however in the design discharge it seems to be constant for blockages greater than 40%.

Conclusion: The FLOW-3D model was calibrated and validated to simulate the flow into the culverts. Influence of inlet obstruction on the upstream water level and flow characteristics into the barrel and downstream of the culvert was investigated. The results show a linear increase in the upstream water level by decreasing the percentage of culvert inlet. The upstream water level for the design discharge was lower than the other tested discharges. Changes in turbulent flow properties and shear velocity inside the barrel and downstream were also investigated in the presence of obstruction. Shear velocity increased 3 times in the presence of 80% blockage for 10.5 lit/s. and for the design discharge (27.5 lit/s) with 60% inlet blockage increased 2 times. The turbulence energy for the design discharge has also increased by about 5 times. The present results confirm the previous studies on the effect of the culvert inlet obstruction on the geometry of the scour hole downstream of culverts.

Keywords: Culvert, Blockage, Backwater, FLOW-3D.



© 2020 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ارزیابی تجربی و عددی تأثیر انسداد ورودی بر جریان در آبگذر

سمیه کریم پور^۱، سعید گوهری^۲، مهدی یاسی^{۳*}

- ۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
 ۲- استادیار سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
 ۳- دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران.

* m.yasi@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: آبگذرها (کالورت‌ها) یکی از جمله سازه‌های اصلی سامانه‌های زهکشی در راه‌ها و خطوط ریلی، و گزینه رقیب پل‌ها هستند. پدیده انسداد در آبگذرها، به دلیل جریان آب همراه با انتقال رسوب‌ها و مواد زائد و شناور، به ویژه در سیلاب یک مشکل مبنایی است. در این تحقیق اثر درصدهای مختلف انسداد در ورودی آبگذرها در ۲۱ ارزیابی آزمایشگاهی بررسی شده است. برای تکمیل آزمون‌ها، از مدل شبیه‌ساز FLOW-3D استفاده شده و نتایج آن با نتایج نظیر از مدل فیزیکی واسنجی و تأیید شده است. پایداری و حساسیت مدل به پنج عامل: ۱- اندازه شبکه محاسبات، ۲- گام زمانی، ۳- مدل تلاطمی ۴- زبری و ۵- شیب آبگذر مورد آزمون قرار گرفت. مدل تلاطمی RNG، شبکه بهینه تو در تو با اندازه ۱/۰ و ۰/۵ سانتی‌متر (برای بلوک بیرونی و درونی)، و زمان شبیه‌سازی ۸۰ ثانیه انتخاب شد. میانگین خطای برآورد برای سرعت میانگین، عمق آب و بده جریان به ترتیب ۳، ۱ و ۳ درصد است. چهار پیش فرض انسداد (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که انسداد ورودی آبگذر با افزایش تراز آب بالادست باعث تغییر الگوی جریان در درون آبگذر و پایین دست سازه خواهد شد. این تغییر در تنش برشی و تلاطم جریان نیز موثر است. در شرایط کمترین و بیشترین انسداد (۲۰ و ۸۰ درصد) افزایش تراز آب بالادست به ترتیب برابر با ۱۲ و ۵۲ درصد بود. تأثیر انسداد ورودی آبگذر برای بده طراحی، کمترین میزان بوده است. در بده‌های کمتر، شدت افزایش تراز بالادست با افزایش انسداد، بیشتر (تا حدود ۲ برابر) می‌گردد. نتایج نشان‌دهنده افزایش توان جریان در پایانه آبگذر و خطر خرابی سازه در نتیجه آبستگي ناشی از انسداد ورودی است.

کلید واژگان: آبگذر، انسداد، برگشت آب، FLOW-3D.

۱- مقدمه

کیفیت مواد پرکننده اطراف محیط مجرا می‌باشند ولی هزینه نگهداری آبگذرها بیشتر از پل‌ها می‌باشد (Norman et al, 2001). انتخاب سازه مورد نظر با بررسی همه شرایط صورت می‌گیرد تا رواناب سطحی بدون ایجاد مشکل در حمل و نقل انتقال بیابد. اما به دلیل طبیعت رواناب که همواره دارای مواد زائد و رسوب می‌باشد، به ویژه در مورد جریان‌هایی که سیلاب‌های بزرگ ایجاد می‌کنند و توان حمل مواد بزرگتر (با وزن چند تن) را نیز دارند، مشکل انسداد در این سازه‌ها پیش می‌آید. انسداد می‌تواند به صورت تدریجی و با جاگذاری مواد در طول ماه‌ها و یا حتی سال‌ها در ورودی و درون مجرای آبگذر رخ دهد و یا به صورت ناگهانی در نتیجه جریان سیلابی رخ دهد که امکان

هدف اصلی از ساخت سامانه‌های زهکشی در بزرگراه‌ها، جاده‌ها و خطوط ریلی، انتقال آب سطحی از زیر این گذرگاه‌ها و جلوگیری از تجمع آب سطحی روی خطوط ارتباطی و منطقه‌های بالادست است. آبگذرها (کالورت‌ها) از جمله سازه‌های اصلی سامانه‌های زهکشی هستند که انتخاب آنها در برابر پل‌ها به شرایط اقتصادی، هیدرولیکی، ویژگی‌های سازه‌ای و امکانات نگهداری مورد نیاز بستگی دارد. هزینه اولیه ساخت آبگذر در مقایسه با پل به میزان قابل توجهی کمتر است و در مورد طراحی هیدرولیکی هر دو سازه به دقت بالا و تعیین دقیق میزان افت‌ها نیاز دارند. از لحاظ سازه‌ای و ساخت، استحکام آبگذرها بسیار وابسته به

رخداد این حالت در ورودی آبگذر بیشتر است. طراحی آبگذر بر مبنای بده جریان سیلاب با دوره بازگشت مشخص صورت می‌گیرد که با توجه به ویژگی‌های منطقه‌ای و اقلیمی متفاوت خواهد بود. طراحی اولیه و بهینه این سازه به صورت ورودی مستغرق با مجرای تاحدودی پر صورت می‌گیرد. به طوری که در عبور جریان به صورت فوق بحرانی و مجرای آبگذر در بیشترین ظرفیت خود عمل می‌کند (May, 1999). در واقع مهم‌ترین وظیفه این سازه عبور جریان سیلاب طرح و جلوگیری از سیل‌گیری منطقه‌های بالادستی است که بودن انسداد باعث اختلال در عملکرد آبگذر به عنوان بخشی از سامانه زهکش رواناب سطحی خواهد بود. انسداد یا گرفتگی آبگذر هنگامی رخ می‌دهد که خار و خاشاک و مواد سطح حوضه در طول سیلاب، در ورودی آبگذر تجمع یابند. انسداد ورودی آبگذر، سطح آب بالادست، ساختار جریان در درون مجرا و خروجی آبگذر را تحت تأثیر قرار می‌دهد و ممکن است سبب خرابی آبگذر شود. مکانیسم انسداد به ترکیب شرایط و فراسنجه‌های چندی چون: نوع انسداد (شناوری، نا شناوری و انسداد متخلخل)، محل انسداد (ورودی، مجرا، خروجی و نرده‌های حفاظتی)، میزان تخلخل انسداد و زمان شکل‌گیری انسداد وابسته است (Weeks et al., 2009).

بررسی و ارزیابی تأثیر انسداد در تغییر هیدرولیک و عملکرد آبگذر زمینه ساز اقدام‌های میسر در مدیریت این مشکل خواهد بود. ارائه دستورالعمل اجرایی برای عملکرد بهینه سازه‌های در معرض انسداد مستلزم بررسی‌های آزمایشگاهی و گردآوری داده‌های میدانی در این زمینه است.

در زمینه تأثیر وجود انسداد در عملکرد سازه‌های هیدرولیکی، می‌توان به بررسی‌های برای گردآوری داده‌های میدانی در این زمینه و برخی تحقیقات آزمایشگاهی برای مشاهده تأثیر انسداد بر سازه از جنبه‌های مختلف هیدرولیکی اشاره کرد. از جمله Rigby et al. در سال ۲۰۰۲ به بررسی تعیین میزان تأثیر انسداد روی آبشستگی پایین دست برای پل‌ها و آبگذرها درسیلی که در Wollongang استرالیا رخداد پرداختند و گزارشی در این مورد ارائه کردند (Rigby et al., 2002).

Rigby and Barthelmeß در سال ۲۰۱۱ بررسی‌هایی در

این زمینه انجام دادند و وابستگی میزان انسداد آبگذرها و پل‌ها را به میزان مواد معلق موجود در سطح سیل‌گیر و همچنین تغییر رفتار جریان سیل در نتیجه انسداد مجرا را نشان دادند (Rigby and Barthelmeß, 2011). Ho در سال ۲۰۱۰ نتایج بررسی‌های میدانی در شهر Iowa آمریکا برای بررسی میزان انسداد در آبگذرها ارائه کرد. نتیجه این تحقیق نشان می‌داد که ۲۵ درصد آبگذرها مشکل رسوبگذاری و ۲۶ درصد آنها با مشکل تجمع مواد زاید رو به رو هستند که در ۷۶ درصد موارد راه حلی برای رفع مشکل رسوبگذاری نبود (Ho, 2010). Ho et al. در سال ۲۰۱۳ بر مبنای داده‌های میدانی که توسط Ho در سال ۲۰۱۰ ارائه شده بود، برای حل مشکل رسوبگذاری در آبگذر اقدام به طراحی ویژه ای برای آبگذر کردند. این طراحی ویژه این امکان را به آبگذر می‌دهد که ویژگی خود شوینده داشته باشد و از رسوبگذاری درون مجرا و ورودی تا حد امکان جلوگیری کند (Ho et al., 2013). سروریان و همکاران در سال ۲۰۱۵ نتایج بررسی‌های آبشستگی پایین دست آبگذر با درجه گرفتگی‌های متفاوت در شرایط جریان ماندگار و نا ماندگار را ارائه کردند و میزان گرفتگی دهانه آبگذر را در شکل و بیشترین عمق آبشستگی پایین دست، تعیین کننده عنوان کردند و میزان شدت تلاطم جریان در آبگذر با انسداد ۵۰ درصدی در مقطع ورودی به حالت جریان در مقطع بدون انسداد را ۳ برابر بزرگتر گزارش کردند (Sorouian et al., 2015). در این زمینه Galan and Gonzalez در سال ۲۰۲۰ تأثیر شکل مقطع، تبدیل‌های ورودی و خروجی و انسداد ورودی را بر آبشستگی پایین دست آبگذر بررسی کردند. آنان با انجام ۸۰ آزمون آزمایشگاهی برای بررسی تغییر پذیری‌های گودال آبشستگی دریافتند، که پدیده انسداد ورودی از عامل‌های تشدید کننده آبشستگی پایین دست به ویژه در نزدیکی دیواره‌ها می‌باشد (Galan and Gonzalez, 2020). French and Jones (2016) با بحث بر نتایج تحقیق Sorourian et al. (2015) تأثیر اصلی انسداد را در افزایش سیل‌گیری بالادست عنوان کردند و میزان تأثیرگذاری انسداد در آبشستگی پایین دست را ناچیز دانستند و با اشاره به نتایج بررسی‌های میدانی پیشین اهمیت ارزیابی تأثیر انسداد در

این تحقیق عبارت اند از : ۱- بررسی میزان تاثیر انسداد صلب ناگهانی با اندازه‌ی مختلف در هیدرولیک جریان آبگذر، ۲- مدل‌سازی جریان آبگذر با مدل شبیه‌ساز FLOW-3D و واسنجی مدل با استفاده از داده‌های مدل فیزیکی. ۳- استفاده از مدل واسنجی شده برای پیش‌بینی برگشت آب در بالادست و استخراج داده‌هایی که به دلایل نبود امکانات لازم، اندازه‌گیری مستقیم آنها در طی آزمایش‌های هیدرولیکی مقدور نیست.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی مورد بررسی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه بوعلی سینا در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر و شیب ثابت ۰/۰۰۱ نسبت به سطح افق با بدنه فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای انجام شد. برای افزایش ظرفیت ذخیره بالادست آبگذر، عرض فلوم در بالادست مقطع قرارگیری آبگذر به ۱ متر افزایش داده شد و بده‌های متفاوت از طریق تنظیم دور موتورهای مختلف در اینورتر صورت گرفت.

مقطع آبگذر با توجه به ملاحظات طراحی Bodhaine (1968) بر مبنای رژیم جریان در آبگذر انجام شد. به دلیل اینکه هدف، بررسی انسداد در ورودی آبگذر بود از این رو آبگذر به صورت کنترل در ورودی طراحی شد. بیشترین بده با توجه به توان پمپ و مخزن آزمایشگاه برابر ۳۰ لیتر در ثانیه در نظر گرفته شد. شرایط جریان بر مبنای جریان نوع اول ارائه شده توسط بودهین تعیین شد (رابطه ۱ و شکل ۱). سطح مقطع نیز بر مبنای بده بیشترین تعیین شد.

$$Q = CA \sqrt{2g(h_1 - z - d_c - h_{f1,2} + \alpha \frac{V_1^2}{2g})} \quad (1)$$

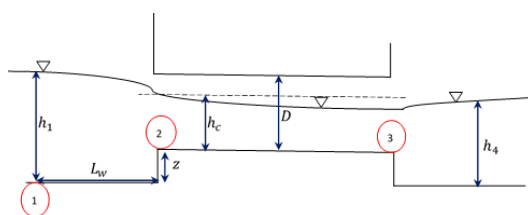


Fig. 1 Flow condition for design discharge (Bodhaine, 1968)

شکل ۱ شرایط جریان برای طراحی آبگذر (Bodhaine, 1988)

افزایش سیل‌گیری بالادست در این سازه را کلیدی توصیف کردند.

با توجه به نتایج و بررسی‌های پیشین در زمینه انسداد ورودی آبگذر و کمبود منابع در زمینه ارزیابی آزمایشگاهی و عددی تاثیر انسداد بر هیدرولیک جریان در آبگذر این بررسی به میزان تاثیرگذاری انسداد بر هیدرولیک جریان و تغییر پذیری‌های ناشی از آن در جریان آبگذر در بالادست، مجرا و پایین دست آن می‌پردازد.

مدل FLOW-3D برای مدل‌سازی جریان هیدرولیکی در سازه‌های مختلف و هندسه‌های پیچیده به کار برده شده و نتایج به دست آمده نشان‌دهنده قابلیت بالای این مدل ریاضی برای مدل‌سازی جریان سیال تک فاز و جریان‌های چند فاز مانند جریان آب و رسوب است.

مدل‌سازی جریان حول آبشکن توسط Ettema and Muste در سال ۲۰۰۴ برای بررسی تاثیر طول آبشکن بر منطقه جریان چرخشی با استفاده از مدل FLOW-3D انجام شد. در این تحقیقات قابلیت این مدل در شبکه بندی‌های ریز و درشت سنجیده شد و نتایج رضایت بخشی به دست آمد. اما در شبکه بندی درشت دقت شبیه‌سازی به ویژه در محدوده جریان‌های چرخشی حول آبشکن و در طول جهش هیدرولیکی به نسبت کمتر گزارش شد (Ettema and Muste, 2004). از قابلیت‌های بسیار خوب این شبیه‌ساز قابلیت استفاده از مدل‌های تلاطم مختلف است که توانایی شبیه‌سازی در شرایط مختلف را با مدل‌های تلاطمی چون RNG و k-ε و k-w فراهم می‌کند. Sabagh Yazdi et al. در سال ۲۰۰۷ میزان ورود هوا به درون جهش هیدرولیکی را با استفاده از مدل‌های تلاطم مختلف در FLOW-3D بررسی و نتایج مدل دو معادله‌ای k-ε را به نتایج داده‌های آزمایشگاهی منطبق‌تر توصیف کردند

(Gunal. et al. (2019) با استفاده از مدل FLOW-3D تاثیر انسداد در آبشستگی پایین دست آبگذر مستطیلی در شرایط جریان ناماندگار با استفاده از داده‌های تجربی Sorouian et al. (2015) را مورد بررسی کردند. نتایج مدل‌سازی آنان در شبیه‌سازی آبشستگی با داده‌های تجربی همخوانی خوبی نشان داد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده و نتایج پیشین اهداف

۲-۲- تجزیه و تحلیل ابعادی

تراز سطح آب بالادست در شرایط جریان معین آبگذرها تابعی از توانایی انتقال آبگذر و شرایط پایین دست می باشد. در مورد آبگذرهایی که به صورت کنترل در ورودی طراحی می شوند، زبری و طول مجرا و شرایط پایین دست کمترین تاثیر را در ظرفیت انتقال آبگذر دارد (Norman et al., 2001). در این حالت نوع ورودی (زاویه انحراف جریان ورودی به آبگذر)، ارتفاع ورودی آبگذر، شیب مجرا و سطح مقطع ورودی بیشترین تاثیر را در ظرفیت انتقال آبگذر و تراز سطح آب بالادست دارد. فراسنجه های موثر در تراز سطح آب بالادست به صورت زیر بدست می آید:

$$H_u = \varphi(Q, D, A, S, \theta, g) \quad (2)$$

H_u تراز سطح آب بالادست، Q بده جریان، D ارتفاع آبگذر، A سطح ورودی آبگذر، S شیب مجرای آبگذر، θ زاویه تبدیل ورودی آبگذر و g شتاب گرانش می باشد.

با توجه به اینکه نوع ورودی در همه مدل های مورد ارزیابی یکسان و دارای زاویه ورودی ۳۰ درجه بود این فراسنجه حذف شد. شیب مجرای آبگذر نیز به دلیل یکسان بودن در همه مدل ها حذف شد. در بودن انسداد ورودی، بخشی از سطح مقطع که به وسیله انسداد پوشانده شده نیز به فراسنجه ها اضافه می شود. به این ترتیب فراسنجه های موثر بر تراز سطح آب بالادست به صورت زیر خواهد بود:

$$H_u = \psi(Q, D, A, A_B, g) \quad (3)$$

با استفاده از اصل بی بعدسازی به روش π فراسنجه های بی بعد موثر در برگشت آب بالادست به صورت زیر به دست می آید:

$$DH_u = \frac{H_u}{D}, B = \frac{D_B}{D}, F_r \quad (4)$$

۲-۳- شبیه ساز FLOW-3D

برای شبیه سازی جریان آبگذر با انسداد ورودی، از مدل عددی FLOW-3D استفاده شد. این مدل توسط شرکت Flow Science در سال ۱۹۹۸ توسعه پیدا کرده است. برای مدل کردن هندسه مرزهای جامد جریان از روش سطح بندی FAVOR و برای شبیه سازی جریان با سطح آزاد از روش حجم سیال VOF استفاده می شود. این مدل

به طوری که $h_{f1,2}$ افت بین نقطه های ۱ و ۲ و طول L_w برابر $1.5D$ و C ضریب بده که بر مبنای نوع تبدیل ورودی تعیین می شود که با توجه به ابعاد آبگذر و مجرای بالادست برابر 0.195 تعیین شد. ابعاد آبگذر مستطیلی تک مجرا در نهایت پس از چند سعی و خطا برابر 30×20 سانتی متر مربع و شیب مجرای آبگذر برابر 0.005 و طول مجرای 90 سانتی متر از جنس شیشه تعیین شد (شکل ۲). بده طراحی پس از تعیین اندازه آبگذر و واسنجی کردن مدل آزمایشگاهی برابر $27/5$ لیتر در ثانیه تعیین شد.

محل قرارگیری آبگذر در فلوم با توجه به شرایط لازم جریان توسعه یافته (تامین شرایط لازم برای جریان به کلی آشفته) در فاصله 5 متری از دریچه پایین دست فلوم تعیین شد. اندازه گیری سطح آب با عمق سنج نقطه ای در محل های تعیین شده در بالا دست، درون مجرا و پایین دست در طول آزمایش با 3 تکرار انجام شد. شرایط جریان با توجه به عمق پایاب مورد نیاز برای هر جریان با استفاده از دریچه پایین دست و تنظیم دور موتور کنترل شد. ویژگی های کلی آزمایش ها در جدول (۱) آمده است. در این جدول F_r عدد فرود جریان در ورودی آبگذر، H_u و H_d به ترتیب تراز بالادست و پایین دست آبگذر می باشد. نام گذاری آزمایش ها متشکل از اسم مقطع، شمار مجرا؛ میزان بده جریان و وضعیت انسداد می باشد.

برای انتخاب مدل انسداد مناسب، از نتایج گزارش هایی که در مورد نوع انسدادها پس از سیلاب های بزرگ ارائه شده بودند، همچون گزارش Rigby et al. (2002) و Ho (2013) استفاده شد. بیشترین نوع انسداد مشاهده شده در ورودی، انسدادهای ناگهانی صلب (بیش از 70 درصد موارد گزارش شده) با گستره ای برابر 20 تا 90 درصد گستره ورودی آبگذر بود. آزمایش ها با به کارگیری 4 انسداد صلب متفاوت انجام شدند. همه ی انسدادهای مورد استفاده عرض برابر با مقطع ورودی آبگذر داشتند و ارتفاع آنها متغیر بود. برای شبیه سازی شرایط انسداد ناگهانی بر مبنای توصیه Sorourian et al. (2015) و Kramer et al. (2016) همه انسدادها با فاصله 1 سانتی متری از کف آبگذر قرار گرفت تا جریان از زیر انسداد نیز عبور کند (شکل ۲).

گرفت (پیش فرض اول سه بلوک با اندازه یکنواخت سلول در هر بلوک برابر ۳، ۲ و ۳ سانتی متر به ترتیب در بالادست، مجرا و پایین دست آبگذر، پیش فرض دوم با شرایط مشابه اما اندازه سلول ۲، ۱ و ۲ سانتی متر، پیش فرض سوم یک بلوک یکنواخت با اندازه سلول ۱ سانتی متر و پیش فرض چهارم به صورت دو بلوک تو در تو با اندازه سلول های یکنواخت ۱ و ۰.۵ سانتی متری). نتایج مربوط به عمق آب، و بده در مقطع های بالادست، درون مجرا و پایین دست آبگذر مورد بررسی قرار گرفت. برای دو شبکه بزرگ تر ۳ و ۲ سانتی متری، خطای نسبی محاسباتی بین ۵ تا ۹ درصد برای تراز سطح آب و ۶.۵ درصد برای بده جریان بود. برای سه شبکه ریزتر، خطای محاسبه بده جریان بر مبنای عمق و سرعت شبیه سازی در خطای محاسبه بده جریان بر مبنای عمق و سرعت شبیه سازی در نقطه های نقطه های تعیین شده، بر مبنای معیار خطا RMSE و خطای محاسبه بده

به صورت همزمان، معادله های سه بعدی پیوستگی و ناویر استوکس را (به صورت زیر) حل می کند:

$$\frac{\partial}{\partial x}(u_i A_i) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad (6)$$

که در آن، u_i سرعت جریان در جهت های x ، y و z یا مختصات کارتزین (x, y, z) ؛ A_i کسری از سطح برای جریان که در جهت های x ، y و z باز هستند؛ P فشار؛ G_i شتاب حجمی؛ f_i نشانده لزوجت؛ و V_f نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان است.

برای مدل سازی عددی از نسخه ۱۱.۳ نصب شده روی سرور تحت ویندوز ۱۰ موسسه تحقیقات آب دانشگاه تهران با ۳۴ پردازنده استفاده شد.

برای تهیه هندسه مرزهای جامد جریان، از نرم افزار Solidworks استفاده شده است (شکل ۳). برای شبیه سازی سطح ها و حجم های صلب مانند مرزهای هندسی آبراهه و آبگذر و برای شبکه بندی محاسباتی جریان از روش FAVOR استفاده شد. در این روش؛ هندسه جریان با محاسبه ی کسر گستره وجوه و کسر حجم هر عنصر شبکه که به وسیله باز دانه های محصور شده اند، تعریف می شود. برای مشخص کردن حدود شبکه بندی، بلوک هایی مشخص می شود که همه اندازه های سازه مورد نظر و فضای آزاد در درون آن، تعریف می شود. در این بررسی مرزهای هندسه جامد جریان شامل کانال، تبدیل های ورودی و خروجی و مجرای آبگذر می باشد. برای شرط مرزی ورودی، بده ثابت؛ برای شرط مرزی خروجی، فشار ثابت؛ برای سطح آزاد آب، شرط فشار ثابت و دیواره ها، شرط دیوار در نظر گرفته شد. مدل FLOW-3D بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمون های تجربی جریان در آبگذر، برای شرایط بدون و با انسداد، و با سه جریان که شامل بده طراحی آبگذر و دو بده کمتر از بده طراحی واسنجی و تنظیم شد.

۲-۳-۱- حساسیت سنجی و تنظیم های مدل

به منظور بررسی تأثیر شبکه محاسبات عددی بر روی نتایج، چهار پیش فرض مختلف شبکه بندی مورد آزمون قرار

جدول ۱ ویژگی های هیدرولیکی آزمایش ها

Table 1 Hydraulic characteristics of experimental tests

Test	Fr	H _u (cm)	H _a (cm)
R1Q10.5B0	2.78	25.40	7.90
R1Q10.5B20	4.52	28.50	7.90
R1Q10.5B40	5.26	31.60	8.80
R1Q10.5B80	4.86	40.50	9.00
R1Q16.5B0	2.96	28.40	11.00
R1Q16.5B20	4.71	31.40	9.80
R1Q16.5B40	5.39	34.30	9.00
R1Q16.5B60	5.93	38.50	11.50
R1Q27.5B0	3.38	34.80	15.50
R1Q27.5B20	3.38	36.50	15.50
R1Q27.5B40	3.17	38.80	16.90
R1Q27.5B60	3.17	39.40	17.20
R2Q10.5B0	2.78	25.50	8.00
R2Q10.5B20	4.32	28.50	7.60
R2Q10.5B80	4.63	39.30	8.00
R2Q16.5B0	2.88	28.60	10.30
R2Q16.5B20	4.23	31.40	11.00
R2Q16.5B60	5.93	38.00	11.50
R2Q27.5B0	3.13	34.80	17.00
R2Q27.5B20	3.17	36.50	17.00
R2Q27.5B60	3.17	40.50	17.00

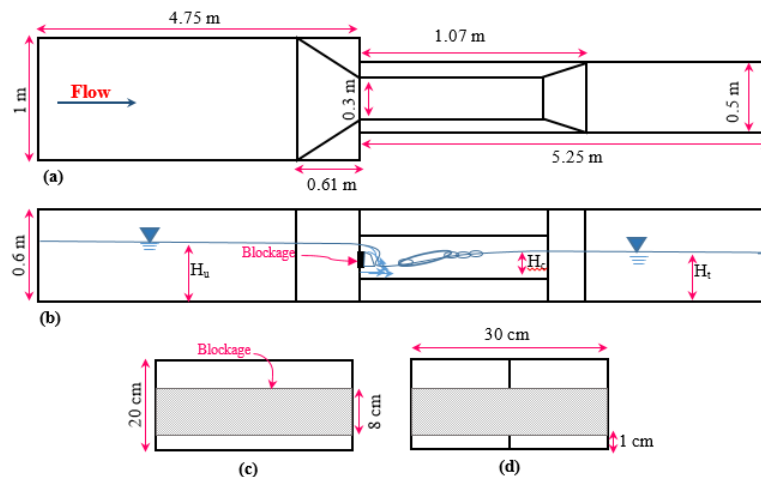


Fig. 2 Culver model: (a) Plan view of flume and culvert, (b) Longitudinal profile, (c) One barrel culvert inlet with 40% blockage and (d) Two barrel culvert inlet with 40% blockage.

شکل ۲ نمای مدل آبگذر: (a) پلان فلوم آبگذر، (b) نیمرخ طولی، (c) مقطع ورودی آبگذر تک مجرای با انسداد ۴۰ درصد و (d) مقطع ورودی آبگذر دو مجرا با انسداد ۴۰ درصد.

تو ۱ و ۰/۵ سانتیمتر) به حدود ۷۵ ساعت افزایش می‌یافت. پایداری و استحکام شبکه عددی با استفاده از معیار نسبت طول به عرض سلول (بیشترین میزان مجاز برابر ۳) و نسبت سلول‌های مجاور (بیشترین میزان مجاز برابر ۱/۲۵) کنترل شد که به ترتیب برابر ۱/۷۵ و ۰/۸ بودند و هر دو معیار در محدوده مش پایدار قرار داشت. همچنین میزان سازگاری بلوک‌ها و میزان کمترینی خطای انتقالی بین بلوک‌ها از معیار نسبت بلوک‌های درونی استفاده شد که در محدوده مجاز کمتر از ۲ و برابر ۱/۱ بود.

از مدل‌های تلاطم ارائه شده در FLOW-3D در این بررسی، سه مدل $k-\epsilon$ ، $k-w$ و RNG برای مدل‌سازی استفاده شد. نتایج مربوط به بررسی مدل‌های تلاطم نشان داد که دو مدل تلاطم $k-\epsilon$ و $k-w$ نتایج به تقریب یکسانی در شبیه‌سازی تراز سطح آب دارند (شکل ۴). میزان فراسنجه‌های اندازه‌گیری شده در بررسی‌های آزمایشگاهی با میزان‌های شبیه‌سازی شده برای هر مدل در آزمون‌های واسنجی به صورت میانگین میزان‌های شبیه‌سازی شده نسبت به میزان‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی مقایسه شد. مدل RNG نتایج بهتری به خصوص در جریان درون مجرا آبگذر نشان داد.

این مدل توسط محققین مختلف به‌عنوان بهترین مدل تلاطمی در شبیه‌سازی جریان در منطقه‌هایی با تغییر هندسه و زمینه‌ی جریان معرفی شده است. راهنمای

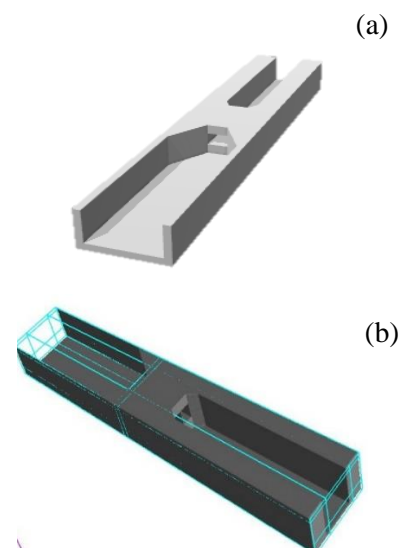


Fig. 3 Solid boundaries and numerical meshing geometry, (a) Solid boundaries and (b) Meshing structure along flume.

شکل ۳ هندسه مرزهای جامد و شبکه‌بندی مدل عددی. (a) مرزهای جامد، (b) ساختار شبکه‌بندی فلوم

جریان بر مبنای عمق و سرعت شبیه‌سازی در نقطه‌های نقطه‌های تعیین شده، بر مبنای معیار خطا RMSE و MAE نسبت به داده‌های تجربی در جدول ۲ مقایسه شده است. مدت زمان محاسبات مدل به‌اندازه شبکه محاسباتی حساسیت زیادی نشان داد چنانکه با کوچک‌تر کردن اندازه شبکه (۰/۷ سانتی‌متر شبکه بیرونی و ۰/۳۵ سانتی‌متر شبکه درونی)، نتایج مدل‌سازی تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشت، ولی زمان اجرای مدل از ۱۰ ساعت (برای شبکه با بلوک تو در

بنابراین در این بررسی از مدل تلاطم RNG استفاده شد. برای تأیید مدل واسنجی شده از ۵ آزمون دیگر استفاده شد. برای افزایش دقت مدل واسنجی شده، تغییرهایی در ارتفاع زبری مجرا آنگذر ایجاد شد. در آغاز ارتفاع معادل زبری بستر برابر با ۰/۰۰۰۸۵ متر (ارتفاع زبری شیشه) قرار داده شد. راهنمای مدل تغییر در میزان زبری جداره را به عنوان گزینه‌ای برای بهبود عملکرد مدل در مسئله‌هایی که ریز کردن ساختار شبکه بندی از لحاظ زمان مقرون به صرفه نیست، معرفی می‌کند حتی اگر این میزان از لحاظ فیزیکی واقعی قابل توصیف نباشد (FLOW SCIENCE, 2017).

نرم‌افزار نیز این مدل را به‌عنوان پیش‌فرض و برترین مدل معرفی کرده است.

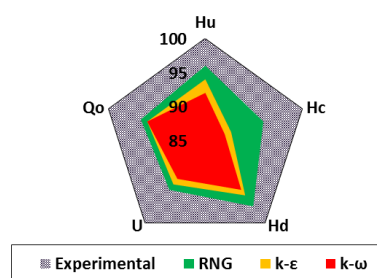


Fig. 4 Comparing results of different turbulence models in simulations.

شکل ۴ مقایسه نتایج استفاده از مدل‌های تلاطم متفاوت در شبیه‌سازی‌ها.

جدول ۲ معیارهای خطا MAE و RMSE برای بده جریان و تراز سطح آب محاسباتی در اندازه شبکه‌های متفاوت

Table 2 MAE and RMSE error scale of calculated discharge and water level in different cell sizes

Mesh cell size	H _t		H _c		H _u		Q	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
3 blocks with 3, 2 and 3 cm cell size	0.01	0.009	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.008
3 blocks with 2, 1 and 2 cm cell size	0.008	0.008	0.009	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
1 Block with 1 cm cell size	0.006	0.005	0.005	0.005	0.007	0.006	0.006	0.006

ورودی انجام شد. میزان انسداد در بده‌های مختلف متفاوت بودند و در هیچ یک از آزمون‌های تجربی جریان روگذری در آنگذر رخ نداد. واسنجی مدل با استفاده از مدل آنگذر تک مجرای صورت گرفت و در مجموع شمار ۲۱ آزمون با مدل FLOW-3D انجام شد. مدت‌زمان اجرای هر یک از آزمون‌های مدل روی رایانه به طور میانگین برابر ۱۰ تا ۱۷ ساعت بود. زمان خالص انجام آزمون‌های شبیه‌سازی معادل ۳۷ روز؛ و زمان کل (شامل اجرای آزمون‌های مدل در مرحله‌های واسنجی، تأیید صحت سنجی، تنظیم مدل، و نیز آزمون‌های نهایی) معادل ۶۷ روز بود.

۳- نتایج و بحث

داده‌های آزمایشگاهی مورد اندازه‌گیری شامل تراز سطح آب و میزان بده بود. برای مقایسه نتایج مدل‌سازی ریاضی و تجربی از داده‌های عمق سطح آب در بالادست، پایین‌دست و درون مجرای آنگذر و همچنین میزان بده که از راه خروجی سرعت میانگین و عمق به دست آید، استفاده شد. همچنین میزان بده در چهار نقطه مختلف از مقطع طولی با تعریف سطح مقطع کنترل به صورت مستقیم قابل

در نهایت مدل زبری ۰/۰۰۱ متر در نظر گرفته شد. برای درستی داده‌های خروجی مدل عددی، اطمینان از شرایط پایدار در جریان برای انتخاب زمان اجرای مدل ضروری می‌باشد. با بررسی نمودارهای میانگین انرژی جنبشی نسبت به زمان، زمان مناسب برای اجرای مدل آغاز ۲۵۰ ثانیه در نظر گرفته شد که در نهایت با توجه به همگرایی نتایج آزمون‌ها زمان ۸۰ ثانیه انتخاب شد. مدل FLOW-3D قابلیت نمایش نتایج شبیه‌سازی را به‌صورت نگاره ای ۱، ۲ و ۳ بعدی و به‌صورت فایل متنی در نقطه‌های مشخص دارد. برای به دست آوردن اطلاعات موردنیاز عمق (d) و سرعت (V) در نقطه‌های مختلف هر یک از مقطع‌های عرضی، و تحلیل نتایج به‌صورت سرعت میانگین عمقی (Vd) و بده جریان (Q) در هر مقطع، مختصات نقطه‌های مورد نظر در فایلی به نرم‌افزار معرفی شد؛ و نتایج به‌صورت فایل عددی بررسی شد.

در این بررسی، الگوی جریان در آنگذر، با و بدون انسداد برای سه بده جریان شاهد کم (۱۰/۵ لیتر بر ثانیه)، میانگین (۱۶/۵ لیتر بر ثانیه) و بده طراحی آنگذر (۲۷/۵ لیتر بر ثانیه)؛ با انسداد ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد سطح مقطع

و میزان‌های به دست آمده از مدل‌سازی در شکل ۷ نشان می‌دهد که مدل میزان برگشت آب را با برآورد خوبی شبیه‌سازی کرده‌است.

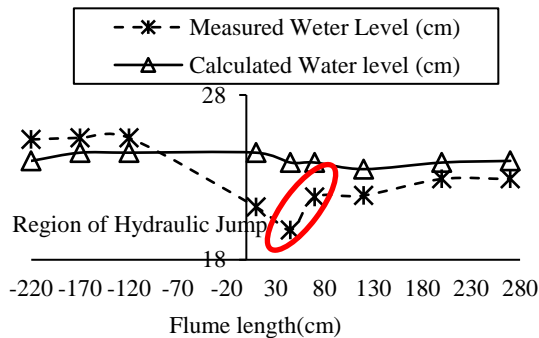


Fig. 5 Comparison of calculated and measured water level of $Q=10.5$ lit/s, $B=40\%$ with one block with 1cm cell size.

شکل ۵ مقایسه تراز سطح آب تجربی و مدل‌سازی شده برای بده ۱۰ لیتر در ثانیه و حالت انسداد ۴۰ درصد در ورودی آبگذر برای تک سلول محاسباتی ۱ سانتی‌متر.

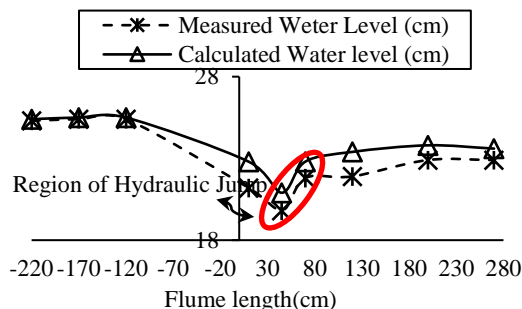


Fig. 6 Comparison of calculated and measured water level of $Q=10.5$ lit/s, $B=40\%$ with block in block mesh cells with 1cm and 0.5 cm cell sizes.

شکل ۶ مقایسه تراز سطح آب تجربی و مدل‌سازی شده برای بده ۱۰ لیتر در ثانیه و حالت انسداد ۴۰ درصد در ورودی آبگذر با شبکه سلول‌های محاسباتی تو در تو با اندازه ۱ و ۰/۵ سانتی‌متر.

توجه به میزان‌های افزایش یافته سطح تراز آب بالادست به خوبی بیانگر تأثیر انسداد در افزایش ناگهانی سطح تراز آب است. میزان تراز سطح آب در حالت بدون انسداد در بده ۱۶/۵ لیتر بر ثانیه در حالت بدون انسداد برابر ۲۸/۴ سانتی‌متر است که با بوندن انسداد ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متری در ورودی این میزان به ترتیب برابر ۳۱/۴، ۳۴/۲ و ۳۸/۵ می‌رسد.

میزان افزایش سطح آب بالادست برای سه بده مورد آزمایش

استخراج است. در تکرار آزمون‌های واسنجی داده‌های مربوط به بده از این راه برداشت شد. میزان خطا در مدل سازی تراز سطح آب و بده در جدول ۲ نشان داده شده است. بیشترین میزان خطا در محاسبات تراز سطح آب جریان در درون مجرای آبگذر می‌باشد. برای بهبود نتایج مدل‌سازی از اعمال شیب در هندسه آبگذر استفاده شد و تا حدود زیادی از میزان خطا کاسته شد. اما همچنان ویژگی‌های ظاهری جریان از جمله محل رخداد جهش هیدرولیکی در درون آبگذر اختلاف زیادی با مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌داد. برای بهبود مدل‌سازی جریان در درون مجرای آبگذر به ویژه در بودن انسداد، که دارای ضخامت ۱ سانتی‌متر در امتداد جریان بود، یک بلوک محاسباتی درونی به اندازه ۰/۰۵ متر در درون بلوک محاسباتی ۰/۱ متری ایجاد شد و همچنین مدل تلاطم RNG برای مدل‌سازی در گام بعدی انتخاب شد. شکل ۵ تفاوت تراز سطح آب برای بده ۱۰/۵ لیتر در ثانیه و با انسداد ۴۰ درصد در ورودی را نشان می‌دهد که جهش هیدرولیکی در جریان مدل‌سازی شده تشکیل نشده و همین باعث بیشترین میزان دامنه خطا نسبی در میزان تراز سطح آب مدل‌سازی به میزان ۲۱ درصد شده است. با تغییرپذیری‌های ایجاد شده در هندسه مدل و همچنین شبکه محاسبات، دامنه خطا به میزان ۳ درصد کاهش یافته‌است. شکل ۶ تراز سطح آب را برای این حالت نشان می‌دهد.

۱-۳- بررسی میزان تأثیر انسداد در ورودی، بر سطح آب بالادست با استفاده از مدل عددی

بنا بر مبنای نتایج بررسی‌های پیشین در زمینه مدل‌سازی جریان در آبگذر، میزان نسبت عرض آبگذر به عرض آبراهه برای مدل‌سازی جریان در آبگذر برای شبیه‌سازی جریان آب کمترین برابر ۰/۳ تا ۰/۵ و بیشترین برابر ۲ تا ۲/۹ می‌باشد (Barnard et al, 2015). برای مدل مورد بررسی در این بررسی نسبت عرض آبگذر به طول آبگذر برابر ۰/۳ و میزان عرض آبراهه به طول آبراهه برابر ۰/۲ می‌باشد. طول آبراهه به طور معمول بیش از ۱۰ برابر عرض آبگذر می‌باشد. که در این شبیه‌سازی این نسبت برابر ۱۶/۵ بود. مقایسه میزان‌های تجربی اندازه‌گیری شده تراز سطح آب بالادست

تغییرپذیری هایی که در ساختار جریان پایین دست تحت تاثیر نبودن انسداد ایجاد می شود، با استفاده از نتایج مدل سازی با FLOW-3D تغییرپذیری های خروجی های مربوط به تلاطم و سرعت برشی و تنش برشی بررسی شد.

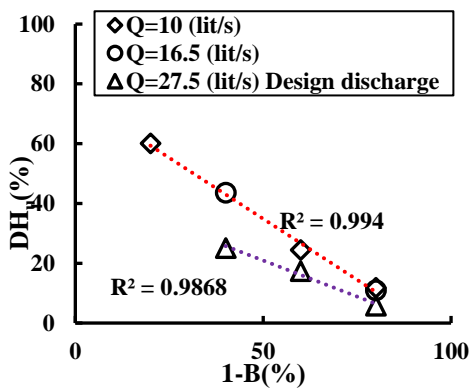


Fig. 8 Increased upstream water level against decreased inlet area.

شکل ۸ افزایش سطح آب بالادست با کاهش مقطع ورودی آبگذر.

شکل ۹ تغییرپذیری سرعت برشی برای بده ۱۰ لیتر در ثانیه و ورودی با انسداد ۲۰ درصد را نشان می دهد. توزیع سرعت برشی به کلی متفاوت است، میزان تنش بیشینه در محدوده بزرگتری گسترش یافته است. شکل ۸ تغییرپذیری های انرژی تلاطم و تنش برشی موثر را برای بده طراحی مورد آزمایش در شرایط با و بدون انسداد نشان می دهد. افزایش انرژی تلاطم در بودن انسداد در ورودی به وضوح دیده می شود. نکته بارز جز افزایش میزان تلاطم، الگوی توزیع متفاوت تلاطم است. میزان سرعت برشی موثر در درون مجرا و پایین دست آبگذر در بودن انسداد افزایش نشان می دهد.

به ویژه در همسایگی دیواره های تبدیل خروجی این افزایش نسبت به حالت بدون انسداد مشهود است. افزایش میزان انرژی تلاطم و تنش برشی جریان می تواند میزان آبشستگی را در این منطقه ها به مراتب افزایش دهد. میزان تنش برشی موثر و انرژی تلاطم در مجرا آبگذر و پایین دست با بودن انسداد ۶۰ درصدی در ورودی آبگذر به ترتیب به میزان ۳ و ۵ برابر بیشتر شده است. میزان افزایش تنش برشی و انرژی تلاطم با تغییر میزان انسداد، متغیر خواهد

در شکل ۸ نشان دهنده افزایش خطی تراز سطح آب بالادست (DH_u) با شیبی برابر ۰/۸ در برابر کاهش سطح مقطع ورودی (1-B) است و به تقریب برای بده های کمتر از بده طراحی آبگذر این میزان ثابت است.

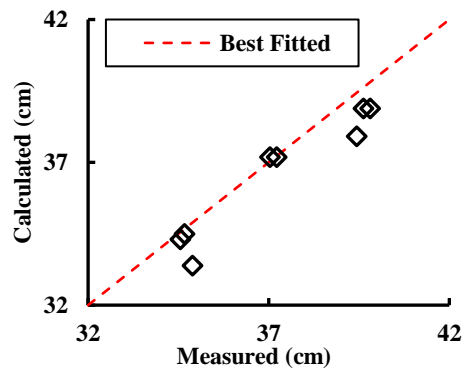


Fig. 7 Comparison of measured and calculated upstream water level.

شکل ۷ مقایسه میزان های سطح آب بالادست اندازه گیری شده و شبیه سازی شده.

اما برای میزان بده طراحی که در مورد مدل آبگذر آزمایشگاهی مورد بررسی برابر ۲۷/۵ لیتر بر ثانیه بود، شیب افزایش سطح آب بالادست کاهش می یابد.

رابطه خطی افزایش سطح آب بالادست در برابر کاهش سطح ورودی جریان برای آبگذر مستطیلی مورد بررسی با نسبت عرض به ارتفاع (W/D) برابر ۱/۵ به صورت زیر است:

$$DH_u = -0.82(1-B) + 75.663 \quad (7)$$

$$DH_u = -0.48(1-B) + 45.089 \quad (8)$$

DH_u درصد افزایش سطح آب بالادست به ازای کاهش سطح مقطع ورودی به میزان (1-B)*100 است که B نسبت گستره انسداد به گستره ورودی آبگذر است. رابطه (۷) برای بده های کمتر از بده طراحی آبگذر و رابطه (۸) برای بده طراحی آبگذر بدست آمد. دو رابطه (۷) و (۸) به روشنی نشان می دهد که افزایش سطح آب بالادست به ازای انسداد برابر در بده های کمتر، از بده طراحی بیشتر خواهد بود.

۳-۲- تاثیر انسداد بر ویژگی های جریان پایین دست

در همه آزمایش ها برای میزان بده مشخص، تراز سطح آب پایین دست ثابت نگه داشته شد تا تاثیر بودن بودن انسداد در هر آزمون به خوبی مشخص شود. برای مشاهده

برشی به سرعت برشی بحرانی در پایین دست مهم ترین عامل افزایش میزان آبشستگی پایین دست آبگذر می باشد. با توجه به شکل های (a) و (b) ۱۰ افزایش سرعت برشی در بودن انسداد ورودی و همین طور (c) و (d) ۱۰ افزایش انرژی تلاطمی در بودن انسداد کاملاً مشهود است. شکل ۱۱ تغییرپذیری های سرعت برشی برای بده های مختلف در بودن درصد متفاوت انسداد را نشان می دهد.

بود. با توجه به نتایج Sorourian et al. (2015) در بررسی تأثیر انسداد در آبشستگی پایین دست آبگذر با انسداد در ورودی، نتایج شبیه سازی مورد تأیید می باشد. با مقایسه میزان های خطا شبیه سازی با نتایج و بررسی های پیشین (جدول ۳)، نتایج شبیه سازی برای میزان های سرعت میانگین عمقی، عمق و بده جریان مورد تأیید می باشند. Breusers and Raudkivi (1991) در نتایج و بررسی های آبشستگی در پایین دست آبگذر اعلام کردند نسبت سرعت

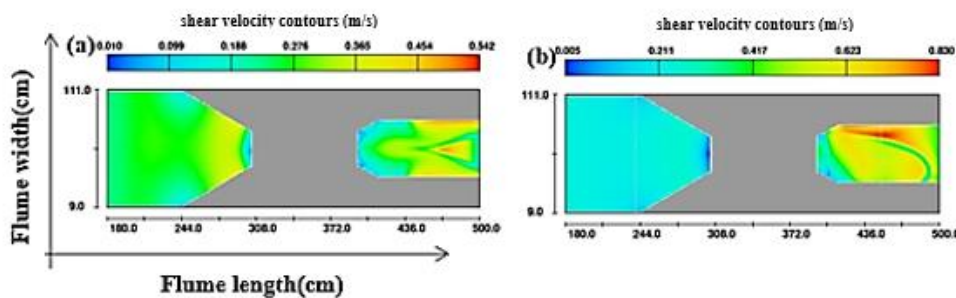


Fig. 9 Shear velocity for Q=10 lit/s, (a) B=0 and (b) B=40%
 شکل ۹ سرعت برشی برای بده ۱۰ لیتر در ثانیه. (a) B=40% (b) B=0

جدول ۳ مقایسه درصد میانگین خطای شبیه سازی با نتایج و بررسی های پیشین

Table 3 Comparison of mean modeling error with previous studies.

Mean modelling error(%)	Discharge	Water depth	Depth averaged velocity
Gulan et al. (2019)	2.9	0.8	3.1
Salamat Ravandi (2010)	5.1	1.1	4.8
Abad et al. (2008)	2.6	0.85	2.2
Current study	3.2	0.95	3.1

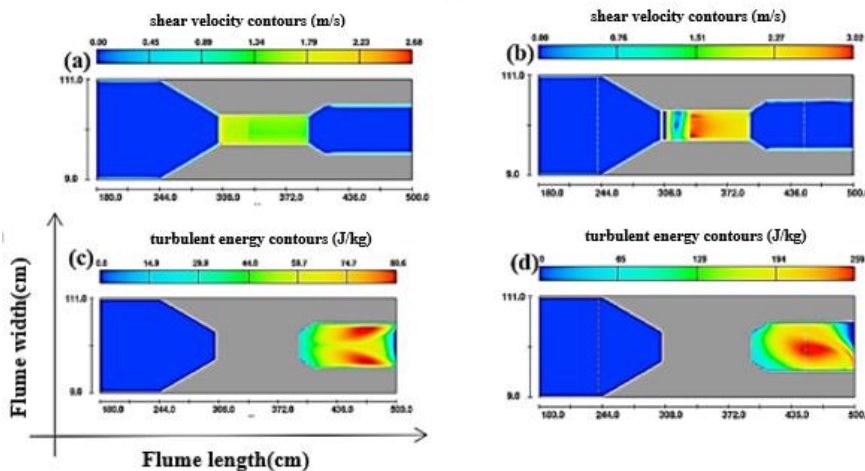


Fig. 10 Shear velocity for Q=27.5 lit/s, (a) B=0, (b) B=60%, Turbulent energy contours for Q=27.5 lit/s (c) B=0 and (d) B=60%
 شکل ۱۰ سرعت برشی مجرای آبگذر برای بده ۲۷/۵ لیتر در ثانیه، (a) بدون انسداد، (b) با انسداد ۶۰٪؛ انرژی تلاطم برای بده ۲۷/۵ لیتر در ثانیه (c) بدون انسداد، (d) با انسداد ۶۰٪.

و مجرای آبگذر بنا بر نتایج بررسی های Sorourian et al. (2015) و Galan and Gunal et al. (2019) و Gonzales(2020) می باشد اما میزان برگشت آب در بالادست رشد چشمگیری نشان داد که صحت ادعای French and Malcom (2016) را در خطرپذیری بالاتر افزایش سیل گیری نسبت به خرابی ناشی از آبشستگی در نتیجه انسداد ورودی آبگذر را نشان می دهد.

۵- فهرست نشانه ها

A_i	کسر سطح جریان در جهت های مختصات کارترین
B	نسبت گستره انسداد به گستره ورودی (%).
$l-B$	گستره ورودی کاهش یافته (%).
D	ارتفاع آبگذر
d	عمق آب
DH_u	افزایش سطح آب بالادست
f_i	نشانه های لزجت
G_i	نشانه های شتاب گرانش در جهت های مختصات کارترین
H_c	عمق آب در خروجی آبگذر
H_t	عمق آب در پایین دست آبگذر
H_u	عمق آب در بالادست آبگذر
P	نشانه فشار
U_i	نشانه های سرعت در جهت های مختصات کارترین
Q	بده جریان
V	سرعت جریان
V_d	سرعت میانگین عمقی
V_f	نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان
W	عرض آبگذر

۶- منبع ها

Abad, D. Bruce, L. Günerlap, I. and García, H. (2008). Flow structure at different stages in meander-bend with bendway weirs. *J. Hydraulic Eng.* 134(8), 1052-1063.

Barnard, R.J., Yokers, S., Nagygyor, A. and Quinn, T. (2015). An evaluation of the stream simulation culvert design method in Washington State. *River Research and Applications*, 31(10), 1376-1387.

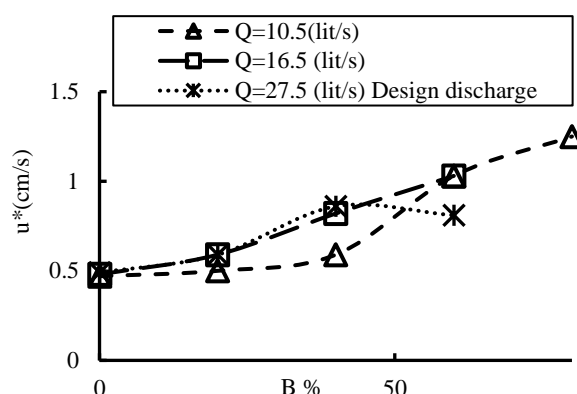


Fig. 11 Shear velocity changes in culvert downstream against blockage changes.

شکل ۱۱ تغییرپذیری های سرعت برشی پایین دست آبگذر نسبت به تغییر درصد انسداد.

میزان سرعت برشی در هر سه بده، با افزایش انسداد افزایش یافته است. اما در بده طراحی به ازای افزایش سطح انسداد به بیش از ۶۰ درصد سطح ورودی میزان سرعت برشی به نسبت ثابت شده است. انسداد ۶۰ درصد بیشینه میزان انسداد ورودی برای بده طراحی بود، و با افزایش انسداد جریان روگذری رخ می دهد.

۴- نتیجه گیری

مدل FLOW-3D برای شبیه سازی جریان در آبگذر صحت سنجی و واسنجی شد. تاثیر انسداد ورودی در میزان برگشت آب بالادست و تغییرات جریان درون مجرای آبگذر و پایین دست بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده افزایش تراز بالادست با کاهش درصد ورودی آبگذر به صورت خطی است. میزان افزایش تراز بالادست برای بده طراحی کمتر از دیگر بده های مورد آزمایش بود. تغییرپذیری های ویژگی های تلاطمی جریان و سرعت برشی در درون مجرا و پایین دست نیز در بودن انسداد بررسی شد. سرعت برشی در بودن انسداد ۸۰٪ برای بده ۱۰/۵ لیتر در ثانیه به میزان ۳ برابر افزایش یافت. برای بده ۱۶/۵ لیتر در ثانیه با ۶۰٪ انسداد به میزان ۲ برابر و بده طراحی (۲۷/۵ لیتر در ثانیه) حدود ۲ برابر افزایش یافته است. همچنین انرژی تلاطمی برای بده طراحی در حدود ۵ برابر افزایش یافته است. نتایج نشان دهنده تائید تاثیر انسداد ورودی آبگذر بر هندسه آبشستگی پایین دست

- Rigby, E.H. and Barthelmeß, A.J. (2011). Culvert blockage mechanisms and their impact on flood behaviour-are all blockages created equal?. In Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering, Brisbane, Australia. 380–387.
- Sabbagh-Yazdi, S. R., Rostami, F. and Mastorakis, N.E. (2007). Turbulent modeling effects on finite volume solution of three dimensional aerated hydraulic jumps using volume of fluid. In Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Applied Mathematics. Stevens Point, Wisconsin, USA. 168-174.
- Salamat Ravandi, N. (2011) Modeling of flow on weir in channel turn using FLOW- 3D. MSc Thesis, University of Urmia, Urmia, Iran. (In Persian)
- Sorourian, S., Keshavarzi, A.R. and Ball, J. (2015). Scour at partially blocked box-culverts under steady flow. Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manage. 15(19), 1-13.
- Publication 321. (2004). Hydraulic design guid of siphones and culverts. Iran water resource management company, Ministry of power, Iran. (In Persian)
- Weeks, W., Barthelmeß, A., Rigby, E. and Witheridge, G. (2009). Australian Rainfall and Runoff Revision, Project 11: Blockage of Hydraulic Structures. Engineers Australia.
- Brethour, J. and Burnham, J. (2010). Modeling sediment erosion and deposition with the FLOW-3D sedimentation & scour model. Flow Science Technical Note, FSI-10-TN85, 1-22.
- Bodhaine, G.L. (1968) Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods. US Government Printing Office.
- Ettema, R. and Muste, M. (2004). Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel. J. Hydraulic Eng., 130(7), 35-646.
- Flowsience (2017). Project work flow guide.
- French, R. and Jones, M., (2015). Discussion on “Blockage effects on scouring downstream of box culverts under unsteady flow” by S Sorourian, A Keshavarzi, J Ball and B Samali. Australas. J. Water Resour, 19(2), 153-155.
- Ho, H.C. (2010). Investigation of unsteady and non-uniform flow and sediment transport characteristics at culvert sites. Ph.D. Thesis, University Of Iowa, Iowa, US.
- Ho, H.C., Muste, M. and Ettema, R. (2013). Sediment self-cleaning multi-box culverts. J. Hydraul. Res. IAHR, 51(1), 92-101.
- 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(9), 5305-5310.
- Galán, Á. and González, J. (2020). Effects of shape, inlet blockage and wing walls on local scour at the outlet of non-submerged culverts: undermining of the embankment. Environmental Earth Sciences, 79(1), 25.
- May, L.W. (1999). Hydraulic Design Handbook. McGraw-Hill.
- Norman, J.M., Houghtalen, R.J. and Johnston, W.J. (2001). Hydraulic design of highway culverts. Hydraulic design series No. 5 (HDS-5), Federal Highway Administration. FHWA, Washington, D.C.
- Rigby, E. H., Boyd, M. J., Roso, S., Silveri, P. and Davis, A. (2002). Causes and Effects of Culvert Blockage during Large Storms. Proc. 9th Int. Conf. on Urban Drainage, Portland, Oregon, USA, September 8-13.