

Research Paper

Investigation of the Effect of Contraction Radius on the Accuracy of Portable SMBF Flumes under Free Flow Conditions

Bahare Rastipishe¹,Ali Salajegheh^{2*},Younes Aminpour³,Amir Hossein Parsamehr⁴

¹ M.Sc. Student, Department of Arid and Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: rastipishe.bahar@ut.ac.ir

² Professor, Department of Arid and Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: salajegh@ut.ac.ir

³ Assistant Professor, Hydraulic and Aquatic Environment Engineering Research Institute, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: aminipoor@ut.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management (Nature Engineering), Faculty of Agriculture, Fasa University, Fasa, Iran. Email: amir84@gmail.com



10.22125/iwe.2026.552836.1900

Received:
October 12, 2025
Accepted:
December 31, 2025
Available online:
June 25, 2026

Keywords:
Discharge Flow, Free Flow, Open Channel, SMBF

Abstract

Accurate discharge measurement in open channels is essential for effective water resources management and the proper operation of irrigation and drainage systems. This study evaluated the hydraulic performance of portable SMBF flumes under free-flow conditions using laboratory experiments and numerical simulations conducted in FLOW-3D with the RNG $k-\epsilon$ turbulence model. Four contraction ratios ($r = 0.342, 0.464, 0.561, \text{ and } 0.726$) were examined to assess their influence on discharge prediction accuracy. Model performance was evaluated using statistical indices including ME, MAE, RMSE, NSE, AI, and KGE. The results showed strong agreement between numerical and experimental data, particularly for the mild contraction ratio of $r = 0.342$, where the relative error was approximately 3% and KGE reached 0.93. Increasing the contraction ratio intensified turbulence and flow separation, leading to higher prediction errors of up to 16.5% at $r = 0.726$. Overall, the FLOW-3D model performed reliably under mild contraction conditions ($r < 0.5$). A contraction ratio of $r = 0.342$ was identified as optimal, providing an appropriate balance between hydraulic stability and measurement accuracy. Accordingly, mild contraction ratios in the range of 0.342–0.464 are recommended for practical SMBF flume applications.

1. Introduction

Accurate flow measurement in open channels is fundamental for watershed management, flood control, and the efficient operation of irrigation and conveyance systems (Mohammadi & Vatankhah, 2020).

* **Corresponding Author:** Ali Salajegheh

Address: Department of Arid and Mountainous Region Reclamation, University of Tehran, Karaj, Iran.

Email: salajegh@ut.ac.ir
Tel: 09123842664

Flumes are commonly used for discharge measurement due to their simplicity, low cost, and acceptable accuracy (Aminpour et al., 2018). The Simple Measurement Broad-Crested Flume (SMBF) employs two semi-cylindrical lateral contractions to accelerate the flow and induce critical depth, enabling reliable discharge estimation. Its applicability under free-flow conditions has been confirmed by several studies, which have proposed corresponding stage–discharge relationships (Samani et al., 2000; Carollo et al., 2016; Vatankhah et al., 2017).

In this study, FLOW-3D simulations were combined with laboratory experiments to evaluate the discharge accuracy of portable SMBF flumes under free-flow conditions and to identify optimal contraction ratios.

2. Methodology

Laboratory Laboratory experiments were conducted in a rectangular Plexiglas flume measuring 5m in length, 0.346m in width, and 0.6m in height at the Water Research Institute, University of Tehran. A portable SMBF-flume with two semi-circular side contractions was tested under four contraction ratios ($r = 0.342, 0.464, 0.561, \text{ and } 0.726$). Discharge was measured using a calibrated electromagnetic flowmeter ($\pm 0.5\%$ accuracy), and flow depths were recorded with point gauges ($\pm 0.1\text{mm}$). Each test was repeated three times under free-flow conditions, and average values were used in the analysis.

Numerical simulations were performed using FLOW-3D based on the finite-volume method. Turbulence was modeled using the RNG $k-\epsilon$ model, and the free surface was captured with the Volume of Fluid (VOF) method.

3. Discussion and Conclusion

Comparison A comparison of experimental discharge values (Q_{exp}) and numerical predictions (Q_{cal}) indicated strong agreement across all contraction ratios. The highest accuracy was observed for $r=0.342$, where data closely followed the 1:1 line, yielding an RMSE of 0.0014 cms and a relative error of about 3%. At $r = 0.464$, the model maintained good performance (RMSE = 0.0020cms), while higher contraction ratios ($r=0.561$ and 0.726) resulted in increased data scatter and underestimation due to intensified flow separation and vortex formation.

Statistical indices supported these findings, with NSE and AI values exceeding 0.94 and 0.95 for all cases. The highest performance occurred at $r=0.342$ (NSE=0.998, AI=0.998, KGE=0.93), whereas KGE decreased to approximately 0.70 for stronger contractions. Sensitivity analysis showed that baffle angle had the greatest influence on model accuracy, followed by flow depth near critical conditions ($Fr \approx 1$). Mesh refinement produced a modest improvement, reducing RMSE to 0.0015cms.

4. Results

FLOW-3D simulations successfully reproduced the hydraulic behavior of portable SMBF flumes under free-flow conditions. Increasing the contraction ratio reduced prediction accuracy due to enhanced turbulence and flow separation. The most reliable performance was obtained for mild contractions, particularly $r=0.342$, which provided high hydraulic stability and measurement precision. In contrast, stronger contractions led to reduced model accuracy. These results confirm that mild contraction ratios ($r < 0.5$) are preferable for SMBF flume design and operation.

5. Six important references

- 1) Carollo, F. G., Di Stefano, C., Ferro, V., and Pampalone, V. (2016). New Stage-Discharge Equation for the SMBF Flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5), 04016005.
- 2) Samani, Z., and Magallanez, H. (1993). Measuring water in trapezoidal canals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 119(1), 181-186.
- 3) Samani, Z., Jorat, S., and Yousaf, M. (1991). Hydraulic characteristics of circular flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), 558-566.
- 4) Sun, B., Yang, L., Zhu, S., Zhang, H., Zhang, C., & Zhang, J. (2020). Experimental and numerical investigation of flow measurement mechanism and hydraulic performance of portable pillar-shaped flumes in trapezoid channels. *Shock and Vibration*, 2020, 8815957.
- 5) Vatankhah, A. R. (2017), Discussion of “New StageDischarge Equation for the SMBF Flume,” by Francesco Giuseppe Carollo, Costanza Di Stefano, Vito Ferro, and Vincenzo Pampalone. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8): 07017011.
- 6) Mohammadi, A., & Vatankhah, A. R. (2020). Stage–discharge equation for simple flumes with semi-cylinder contractions. *SN Applied Sciences*, 2, 1–13.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

بررسی اثر شعاع تنگ‌شدگی بر دقت عملکرد فلوم‌های قابل حمل SMBF در جریان آزاد

بهاره راستی‌پیشه^۱، علی سلاجقه^{۲*}، یونس امین‌پور^۳، امیرحسین پارسامهر^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

مقاله پژوهشی

چکیده

در این پژوهش، به منظور ارزیابی عملکرد فلوم‌های قابل حمل SMBF در شرایط جریان آزاد، آزمایش‌های هیدرولیکی کنترل شده در یک فلوم آزمایشگاهی با چهار نسبت مختلف تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲، ۰/۴۶۴، ۰/۵۶۱، ۰/۷۲۶ انجام شد. به طور هم‌زمان، مدل‌سازی عددی جریان در نرم‌افزار FLOW-3D با استفاده از مدل آشفتگی RNG صورت گرفت تا امکان مقایسه دقیق بین نتایج عددی و داده‌های تجربی فراهم گردد. برای سنجش دقت مدل عددی، معیارهای ارزیابی خطای میانگین (ME)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، نش-ساتکلیف (NSE)، شاخص توافق (AI) و شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل عددی توانسته است رفتار هیدرولیکی جریان را با دقت بالایی بازتولید کند. بیشترین میزان همخوانی میان نتایج عددی و آزمایشگاهی در نسبت تنگ‌شدگی $r=0/342$ به دست آمد، به طوری که مقدار خطای نسبی برابر با ۳ درصد و شاخص KGE برابر با ۰/۹۳ بوده است. در نسبت‌های بالاتر، به ویژه در $r=0/726$ ، افزایش تنگ‌شدگی موجب تشدید جدایش جریان و افزایش خطا تا حدود ۱۶/۵ درصد گردید. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی در تنگ‌شدگی‌های ملایم ($r < 0/5$) از پایداری و دقت بیشتری برخوردار است. در نهایت، نسبت $r=0/342$ به عنوان شرایط بهینه عملکرد فلوم‌های SMBF معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: فلوم‌های SMBF، اندازه‌گیری دبی، مدل‌سازی عددی، جریان آزاد، Flow-3D

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

rastipishe.bahar@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: salajegh@ut.ac.ir

۳. استادیار، پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: aminipoor@ut.ac.ir

۴. استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری (مهندسی طبیعت)، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران. رایانامه: amir84@gmail.com

مقدمه

اندازه‌گیری دقیق جریان در کانال‌های باز یکی از نیازهای اساسی در شبکه‌های هیدروگرافی، از جمله رودخانه‌ها و کانال‌های روباز به شمار می‌آید و نقش کلیدی در مدیریت حوزه‌های آبخیز، سیلاب‌ها، پخش سیلاب، بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های انتقال و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند (Mohammadi & Vatankhah, 2020). اندازه‌گیری دقیق دبی جریان در این کانال‌ها برای جلوگیری از هدررفت آب، طراحی کارآمد سازه‌های هیدرولیکی و کاهش مشکلات زیست‌محیطی ضروری است. فلوم‌ها، به‌عنوان سازه‌های هیدرولیکی پیشرفته، با ایجاد شرایط هیدرولیکی کنترل‌شده، امکان محاسبه دقیق دبی را فراهم می‌سازند و به دلیل سادگی، هزینه پایین و قابلیت اطمینان، کاربرد گسترده‌ای در پروژه‌های مهندسی آب دارند (امین‌پور و همکاران، ۱۳۹۷). محققان متعددی فلوم‌های متنوعی را مورد مطالعه قرار داده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به فلوم‌های با گلوگاه طولانی^۱، فلوم‌های با گلوگاه کوتاه^۲ (معروف به فلوم‌های گلوبریده^۳)، ونتوری‌ها^۴، پارشال فلوم‌ها^۵ سایر انواع فلوم‌ها اشاره کرد (Samani et al, 1991). این فلوم‌ها با ایجاد انقباض در عرض کانال، جریان را به حالت بحرانی هدایت کرده و امکان محاسبه دبی را با استفاده از روابط هیدرولیکی میسر می‌سازند (Samani et al, 2002). این تنوع در طراحی فلوم‌ها، امکان تحلیل و بهبود عملکرد آن‌ها را در کاربردهای مختلف فراهم کرده است. فلوم‌های SMBF^۶ با استفاده از دو نیم‌استوانه در دیواره‌های جانبی، تنگ‌شدگی عرضی ایجاد کرده که سرعت جریان را افزایش داده و شرایط تشکیل عمق بحرانی را برای اندازه‌گیری دقیق دبی فراهم می‌سازند (شکل ۱). این

طراحی، اثرات هیدرولیکی نامطلوب را کاهش داده و دقت اندازه‌گیری را بهبود می‌بخشد. تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که این فلوم‌ها در شرایط جریان آزاد^۷ که دبی، مستقل از عمق آب پایین‌دست^۸ (پایاب) است، عملکرد قابل اعتمادی داشته و روابط دبی-اشل متعددی برای آن‌ها توسعه یافته است (Samani et al., 2000). به‌عنوان مثال، Carollo et al., 2016 با بهره‌گیری از اصل برنولی، رابطه‌ای برای دبی جریان آزاد ارائه کردند که اثرات انقباض را در نظر می‌گیرد (Carollo et al., 2016)، در حالی که وطن‌خواه رابطه‌ای تجربی با دقت بالا در محدوده دبی‌های آزمایش‌شده پیشنهاد کرد (Vatankhah et al., 2017). با این حال، در شرایط جریان مستغرق که عمق پایاب بر جریان بالادست تأثیر می‌گذارد، اطلاعات تجربی و روابط هیدرولیکی محدودی در دسترس است (Samani et al, 1993). آستانه استغراق، به‌عنوان نسبت عمق آب پایین‌دست به عمق جریان بالادست، پارامتری کلیدی در تحلیل رفتار هیدرولیکی این فلوم‌هاست و مطالعات نشان داده‌اند که این نسبت می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر دبی جریان تأثیر بگذارد (Baiaomonte et al, 2007).

برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که تحلیل جریان را به یک نسبت تنگ‌شدگی محدود کرده یا صرفاً به مدل‌سازی عددی بسنده کرده‌اند، در این تحقیق رفتار جریان در چهار نسبت مختلف تنگ‌شدگی و در بازه‌ای از شرایط جریانی به‌صورت نظام‌مند تحلیل شده است. همچنین، دقت مدل عددی در پیش‌بینی دبی و سطح آزاد جریان به‌عنوان تابعی از شدت تنگ‌شدگی ارزیابی شده و نقش پدیده‌هایی نظیر جدایش جریان، ساختارهای گردابه‌ای و افت‌های موضعی در افزایش خطای پیش‌بینی

¹ Long-throat Flumes

² Short throat

³ Cut-throat Flumes

⁴ Ventory Flumes

⁵ Parshall Flumes

⁶ Samani- Magallanez- Baiaomonte- Ferro

⁷ Free Flow

⁸ Tailwater

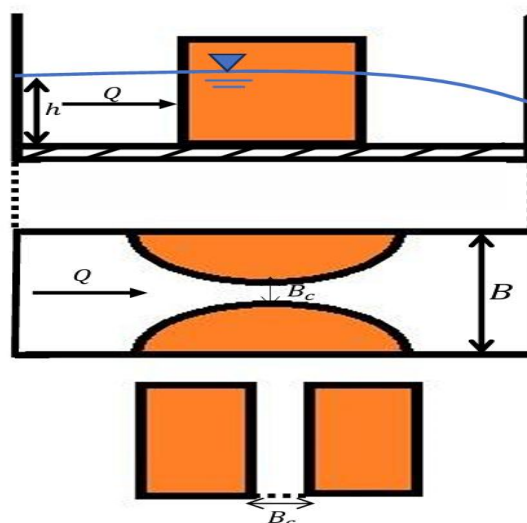
شناخته شده است. مطالعات پیشین، از جمله پژوهش Heyrani et al., 2021، نشان داده‌اند که انتخاب مناسب مدل تلاطم و اعمال صحیح شرایط مرزی در شبیه‌سازی، می‌تواند نقش مؤثری در افزایش دقت پیش‌بینی دبی و توزیع سرعت در فلوم‌های SMBF داشته باشد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل و ارزیابی دقیق عملکرد فلوم‌های قابل حمل SMBF در شرایط جریان آزاد طراحی شده است. در این مطالعه، از یک رویکرد ترکیبی شامل آزمایش‌های فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D بهره گرفته شد تا تأثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی از جمله دبی و هندسه فلوم بر دقت اندازه‌گیری بررسی شود. با مقایسه نتایج مدل عددی و داده‌های تجربی، تلاش شد تا میزان دقت و قابلیت اطمینان این نوع فلوم‌ها در شرایط واقعی مورد سنجش قرار گرفته و معیارهایی برای بهبود طراحی و بهینه‌سازی آن‌ها پیشنهاد شود. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در ارتقاء کاربرد فلوم‌های SMBF در پروژه‌های مدیریت منابع آب نقش مؤثری ایفا کند.

مواد و روش‌ها

بخش آزمایشگاهی

در این پژوهش، به‌منظور بررسی تجربی عملکرد هیدرولیکی فلوم قابل حمل SMBF در شرایط جریان آزاد، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی واقع در مؤسسه تحقیقات آب (وزارت نیرو) زیر نظر گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران طراحی و اجرا گردید. فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده شامل یک کانال مستطیلی به طول ۵ متر، عرض ۳/۴۶ سانتی‌متر و ارتفاع دیواره ۶۰ سانتی‌متر بود. بدنه فلوم از جنس پلکسی‌گلس شفاف و غیرمتخلخل ساخته شد تا علاوه بر کاهش تلفات ناشی از اصطکاک، امکان مشاهده‌ی دقیق جریان و ارزیابی کیفی

مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج این پژوهش ضمن ارائه درک فیزیکی دقیق‌تر از رفتار جریان در فلوم SMBF، می‌تواند مبنایی علمی برای بهبود طراحی و کاربرد این نوع فلوم در اندازه‌گیری دبی جریان‌های کانال باز فراهم آورد.

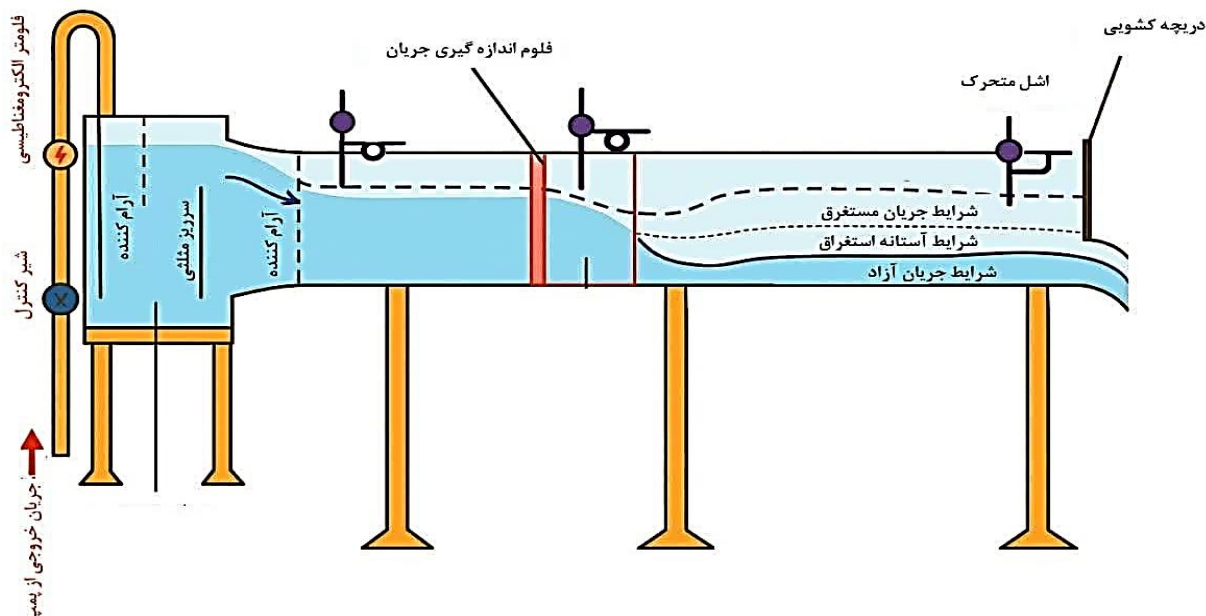


شکل (۱) نمای فلوم SMBF با تنگ‌شدگی مستطیلی ایجاد شده توسط دو نیم‌استوانه، الف) مقطع طولی-ب) پلان و دید از جلو علی‌رغم مزایای چشمگیر فلوم‌های قابل حمل SMBF نظیر سادگی نصب، دقت بالا در شرایط جریان آزاد و قابلیت استفاده در پروژه‌های میدانی، عملکرد این فلوم‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد که نیاز به بررسی دقیق را ایجاد می‌کند. الگوهای پیچیده جریان در ناحیه گلوگاه، حساسیت نسبت به تغییرات پارامترهایی نظیر شیب بستر، زبری دیواره‌ها، ابعاد فلوم و سرعت جریان، می‌تواند منجر به انحراف در تخمین دبی شود. همچنین، این فلوم‌ها در برابر رسوب‌گذاری در ناحیه انقباض و تغییرات هندسی ناشی از خطای ساخت یا نصب، نیازمند واسنجی^۱ دقیق و بررسی پایداری عملکرد هستند. در این میان، مدل‌سازی عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۲) به‌عنوان ابزاری توانمند برای تحلیل رفتار هیدرولیکی این سازه‌ها

^۱ Calibration

^۲ Computational Fluid Dynamics

الگوهای جریان تشکیل شده در هنگام آزمایش فراهم گردد (شکل ۲).



شکل (۲): نمای کلی مدل مفهومی به کاررفته در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب-گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران



شکل (۳) چهار هندسه متفاوت از نسبت انقباض در فلوم SMBF

در انتهای پایین دست کانال، یک دریچه‌ی متحرک با قابلیت تنظیم دقیق ارتفاع تعبیه شد تا شرایط جریان آزاد تثبیت گردد و اثر پس زدگی حذف شود. هدف از انجام این آزمایش‌ها، تحلیل رفتار هیدرولیکی فلوم SMBF در

فلوم SMBF نصب شده در میانه‌ی کانال بر پایه‌ی طراحی ارائه شده *Carollo et al., 2016* و *Samani et al., 2000* ساخته شد. چهار نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲، ۰/۴۶۴، ۰/۵۶۱ و ۰/۷۲۶ بر اساس ترکیبی از ملاحظات هیدرولیکی، مطالعات پیشین و محدودیت‌های اجرایی با هدف بررسی رفتار جریان در دامنه‌ای از تنگ‌شدگی‌های ملایم تا شدید انتخاب شدند. نسبت‌های پایین‌تر نمایانگر شرایط پایدار و بهینه عملکرد فلوم SMBF بوده و نسبت‌های بالاتر با هدف تحلیل اثر افزایش انقباض بر آشفتگی، جدایش جریان و دقت پیش‌بینی دبی مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۳).

نسبت تنگ‌شدگی (τ) به صورت نسبت عرض مؤثر گلوگاه (b_e) به عرض کانال در بالادست (b) تعریف شده است. عرض مؤثر گلوگاه برابر با فاصله بین دو نیم‌استوانه متقارن در مقطع گلوگاه است که تنگ‌شدگی عرضی جریان را ایجاد می‌کنند.

داده‌ها به صورت بلادرنگ به رایانه منتقل و جهت پایش و بررسی اولیه ذخیره شدند. در این پژوهش، آزمایش‌ها برای چهار نسبت تنگ‌شدگی مختلف انجام شد و برای هر نسبت، پنج دبی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. هر سناریوی آزمایشی سه مرتبه تکرار گردید و مقادیر میانگین عمق و دبی به عنوان داده نهایی جهت تحلیل و مقایسه با نتایج عددی مورد استفاده قرار گرفت تا قابلیت اطمینان نتایج افزایش یابد. در طول آزمایش‌ها، تمامی تجهیزات به‌طور منظم بازبینی و کالیبره شدند و فلوم نیز برای حذف رسوبات و انسدادها به صورت دوره‌ای تمیز گردید. همچنین، با کنترل شرایط پایاب اطمینان حاصل شد که جریان در تمامی سناریوها آزاد و بدون تأثیر مرزی توسعه یابد. از آن‌جا که برای هر نسبت تنگ‌شدگی، آزمایش‌ها در چند دبی مختلف انجام شده است، مشخصات هیدرولیکی جریان بالادست شامل دبی، عمق، سرعت میانگین و عدد فرود به صورت بازه (حداقل-حداکثر) در جدول ۱ ارائه شده‌اند. این بازه‌ها نمایانگر دامنه تغییرات رژیم جریان در آزمایش‌ها هستند.

شرایط پایدار و استخراج داده‌های معتبر برای مدل‌سازی عددی و توسعه روابط تجربی دبی بود.

برای اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی، از تجهیزات دقیق و کالیبره شده استفاده شد. یک فلومتر الکترومغناطیسی با دقتی در بازه ± 0.2 تا ± 0.5 درصد در بخش ورودی نصب گردید تا نرخ دبی عبوری (Q) را با دقت بالا ثبت نماید. همچنین، برای سنجش عمق جریان، گیج‌های نقطه‌ای^۱ با دقت ± 0.1 میلی‌متر در مقاطع بالادست، گلوگاه و پایین‌دست به کار گرفته شدند. عمق جریان در هر مقطع عرضی با برداشت از پنج نقطه‌ی افقی (چپ، راست، مرکز و بینابین) اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شد تا خطای ناشی از تغییرات موضعی کاهش یابد. جریان مورد نیاز از مخزنی با سطح آب ثابت تأمین گردید تا شرایط یکنواخت و بدون تلاطم در ورودی برقرار شود. پیش از آغاز ثبت داده‌ها، به جریان فرصت داده شد تا به مدت ۱۰ دقیقه پایدار گردد. سپس برداشت داده‌ها آغاز و در بازه‌های زمانی مشخص با استفاده از دیتالاگر^۲ دیجیتال ثبت شد. تمامی

جدول ۱) مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها برای نسبت‌های مختلف تنگ‌شدگی فلوم SMBF

نسبت تنگ‌شدگی (r)	دبی (m ³ /s) Q	عمق جریان بالادست (m) hu	سرعت میانگین بالادست (m/s) Vu	عدد فرود (Fr)
۰/۳۴۲	(۰/۰۰۶۲-۰/۰۵۲۱)	(۰/۰۸۸-۰/۲۷۱)	(۰/۱۷۱-۰/۳۷۹)	(۰/۱۶۹-۰/۲۳۸)
۰/۴۶۴	(۰/۰۰۶۱-۰/۰۵۸۱)	(۰/۰۷۴-۰/۲۵۹)	(۰/۲۱-۰/۴۷۲)	(۰/۲۱۸-۰/۲۷۹)
۰/۵۶۱	(۰/۰۰۶۴-۰/۰۵۴۶)	(۰/۰۵۶۹-۰/۱۹۸)	(۰/۲۳۸-۰/۵۱)	(۰/۳۲۵-۰/۳۷)
۰/۷۲۶	(۰/۰۰۹۳-۰/۰۵۶۹)	(۰/۰۵۷-۰/۱۶)	(۰/۳۱-۰/۶)	(۰/۴۲-۰/۴۹)

مبتنی بر روش حجم محدود برای حل معادلات ناویر-استوکس و شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد است. در تنظیمات اولیه مدل، پروژه جدید ایجاد شد و سیال

مدل‌سازی عددی با نرم افزار Flow-3D

به‌منظور تحلیل عددی جریان در فلوم قابل حمل SMBF، از نرم‌افزار Flow-3D استفاده شد که

¹ Point gauges

² Data Logger



نظر گرفته شد و ماندگاری جریان با پایش همزمان تثبیت پروفیل سطح آزاد، تعادل جرم (برابری دبی ورودی و خروجی) و کاهش نوسانات انرژی جنبشی آشفتگی و متغیرهای هیدرودینامیکی کنترل گردید. جریان زمانی ماندگار^۳ تلقی شد که تغییرات زمانی سطح آزاد، سرعت و فشار در نواحی بحرانی ناچیز شده و پسماندهای عددی به مقدار پایدار کاهش یابند. همگرایی حل عددی با بررسی پارامترهای حجم سیال، سطح آزاد و انرژی جنبشی بررسی شد و کاهش پسماندها^۴ در تمامی متغیرها پایش گردید. در طول فرآیند شبیه‌سازی، وضعیت پایداری حل عددی و تعادل جرم^۵ به صورت گرافیکی کنترل و تأیید شد. پس از تثبیت جریان، خروجی‌های مدل شامل توزیع سرعت، فشار، پروفیل سطح آب و دبی عبوری از گلوگاه استخراج گردید. این نتایج به صورت نمودارها، جداول و فایل‌های متنی ذخیره شد و مبنای مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی قرار گرفتند. ورودی‌های اصلی مدل شامل نرخ دبی و ارتفاع جریان بودند که از داده‌های تجربی استخراج شده و به‌عنوان پارامترهای مرجع در تحلیل استفاده شدند.

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی جریان در فلوام SMBF، از شاخص‌های آماری مانند RMSE، ME، MAE، NSE، AI و KGE استفاده شد. مقادیر AI و NSE نزدیک به ۱، نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل هستند. RMSE و MAE کمتر، دقت بالاتر شبیه‌سازی را نشان می‌دهند و ME مثبت یا منفی بیانگر به ترتیب بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل است. معیار KGE نیز با در نظر گرفتن همبستگی، بایاس و تغییرپذیری جریان، عملکرد کلی مدل را ارزیابی می‌کند. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) اختلاف متوسط بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده را نشان می‌دهد. مقدار آن از صفر تا بی‌نهایت متغیر است و هر چه به صفر نزدیک‌تر

به‌صورت آب نیوتنی غیرقابل تراکم با $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ ، $\mu = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ و $g = -9.81 \text{ m/s}^2$ تعریف گردید. هندسه فلوام SMBF با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD طراحی و به‌صورت فایل STL در محیط Flow-3D وارد شد. موانع داخلی و دیواره‌های نیم‌استوانه‌ای در موقعیت مناسب قرار گرفتند تا فرم هندسی واقعی فلوام بازسازی گردد. دامنه محاسباتی شامل بخش‌هایی از بالادست و پایین‌دست فلوام بود تا از اثرات مرزهای مصنوعی بر نتایج جلوگیری شود. برای شبیه‌سازی جریان آشفته، از مدل تلاطم RNG^۱ استفاده شد که در بسیاری از مطالعات هیدرولیکی بازده مناسبی دارد. شبکه‌بندی دامنه به‌صورت غیریکنواخت انجام شد؛ به‌طوری‌که در نواحی حساس مانند گلوگاه و مجاورت دیواره‌های نیم‌استوانه‌ای، اندازه سلول‌ها ریزتر در نظر گرفته شد. به‌منظور بررسی تأثیر اندازه شبکه بر نتایج شبیه‌سازی، تحلیل استقلال از شبکه انجام شد. بدین منظور، سه شبکه با اندازه سلول‌های درشت، متوسط و ریز مورد استفاده قرار گرفتند. معیار ارزیابی شامل دبی عبوری از گلوگاه و تغییرات سطح آزاد جریان بود. نتایج نشان داد که با ریزتر شدن شبکه از حالت متوسط به مش ریز ۰.۰۱ سانتی‌متر، تغییرات نتایج ناچیز بوده و همگرایی مناسبی حاصل شده است. مقایسه نتایج نشان داد که استفاده از مش ریز با اندازه ۰.۰۱ سانتی‌متر منجر به تغییرات ناچیز در دبی محاسبه‌شده و پروفیل سطح آزاد شده و اختلاف نتایج کمتر از ۱۰ درصد است. بر این اساس، مش ۰.۰۱ سانتی‌متر به‌عنوان اندازه بهینه شبکه با در نظر گرفتن دقت عددی و هزینه محاسباتی انتخاب شد. شرایط مرزی شامل دبی ورودی ثابت، فشار هیدرواستاتیک در مرز بالادست، فشار در مرز خروجی و Wall برای دیواره‌ها و کف کانال بود و سطح آزاد آب با روش VOF^2 و ارتفاع اولیه مطابق آزمایشگاه مدل‌سازی شد. مدت زمان شبیه‌سازی عددی ۱۰۰ ثانیه در

¹ Renormalization Group

² Volume of Fluid

³ Steady-State

⁴ Residuals

⁵ Mass Balance Error

ترکیب سه مؤلفه همبستگی (r)، نسبت تغییرپذیری (α) و نسبت میانگین (β) تعریف می‌شود (Gupta et al., 2009):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (۶)$$

این شاخص نیز بدون بعد است. مقدار آن بین $-\infty$ تا ۱ است که در آن α و β نسبت تغییر پذیری و نسبت میانگین بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده هستند. مقدار KGE نزدیک به ۱ نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در بازتولید رفتار جریان می‌باشد.

نتایج و بحث

ارزیابی دبی در مدل‌های عددی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی

در این بخش، نتایج مقایسه بین مقادیر دبی تجربی (Q_{exp}) و مقادیر محاسبه‌شده عددی (Q_{cal}) برای چهار حالت مختلف مدل‌سازی فلوام‌های قابل‌حمل SMBF ارائه شده است (شکل‌های ۴ تا ۷).

شکل ۴ پراکندگی داده‌ها برای نسبت تنگ‌شدگی $r = 0.342$ را نشان می‌دهد که همخوانی قابل توجهی میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. بخش عمده‌ای از نقاط داده در مجاورت خط ایده‌آل یک به یک قرار گرفته‌اند که این امر دقت مناسب مدل عددی در بازتولید رفتار جریان را تأیید می‌کند. هرچند در ناحیه دبی‌های بالاتر از $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ پراکندگی بیشتری مشاهده می‌شود، این انحرافات می‌تواند ناشی از افزایش اثرات توربولانسی و حساسیت مدل به شرایط مرزی باشد. خط روند رگرسیونی با شیبی نزدیک به واحد و تمرکز بیش از ۸۵ درصد از داده‌ها در محدوده $\pm 10\%$ درصد، کارایی بالای مدل را برجسته می‌سازد. شاخص‌های آماری نیز این یافته‌ها را پشتیبانی می‌کنند؛ به طوری که خطای میانگین (ME) برابر با -0.067 درصد، خطای مطلق میانگین (MAE) برابر با 0.089 درصد و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با 0.14 m^3/s به دست آمده است. این نتایج بیانگر همخوانی بسیار مطلوب میان مدل عددی و داده‌های تجربی

باشد، خطای پیش‌بینی کمتر و دقت مدل بالاتر است. که واحد آن مشابه دبی، (m^3/s) است و به صورت زیر بیان می‌شود: (Willmott & Matsuura, 2005)

$$RMSE = \sum_{i=1}^n \sqrt{(S_i - O_i)^2} \quad (۱)$$

خطای میانگین (ME) که شاخصی برای سنجش بایاس مدل است، می‌تواند مثبت یا منفی باشد؛ مقدار نزدیک به صفر نشان‌دهنده کمترین بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل است. این معیار از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (Moriassi et al., 2007):

$$ME = \sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \quad (۲)$$

میانگین قدرمطلق خطا (MAE) با بی‌توجهی به علامت خطا، مقدار میانگین اختلافات را نشان می‌دهد که از صفر تا بی‌نهایت متغیر است و مقادیر کمتر نشان‌دهنده خطای کلی پیش‌بینی کمتر و دقت بالاتر است. (Willmott & Matsuura, 2005)

$$MAE = \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (۳)$$

برای ارزیابی کارایی مدل در بازتولید روند داده‌های مشاهده‌ای، ضریب نش-ساتکلیف (NSE) به کار رفت که به صورت زیر تعریف می‌شود: (Nash & Sutcliffe, 1970)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۴)$$

این شاخص نیز بدون بعد بوده و مقدار آن بین $-\infty$ تا ۱ متغیر است. مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل هستند، در حالی که مقادیر منفی بیانگر عملکرد ضعیف‌تر از میانگین مشاهدات می‌باشند.

شاخص توافق (AI) نیز برای سنجش درجه توافق کلی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌شده استفاده شد. این شاخص بدون بعد است و مقادیری بین صفر (بدون توافق) تا ۱ (توافق کامل) دارد فرمول آن به صورت زیر است (Willmott, 1981; Willmott et al., 2012):

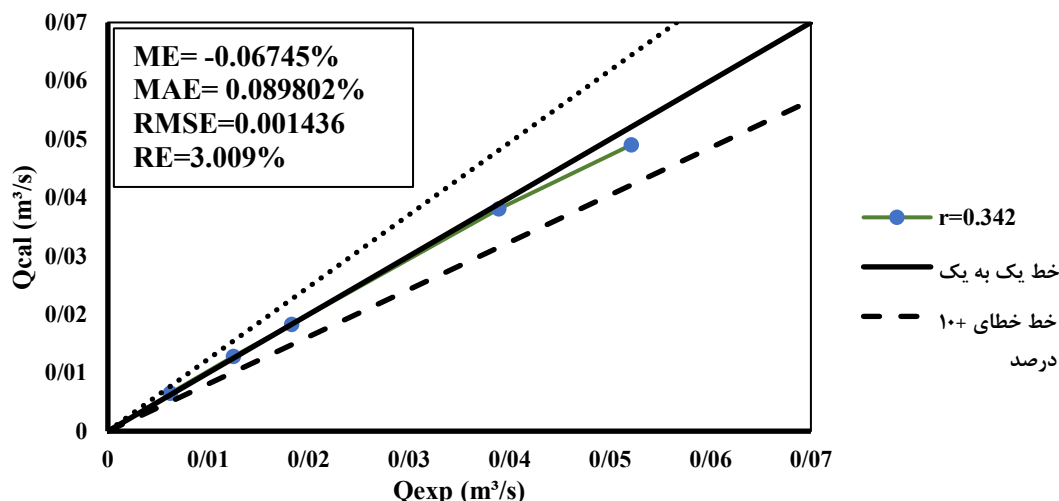
$$AI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}| + |S_i - \bar{S}|)^2} \quad (۵)$$

در نهایت، معیار کلینگ-گوپتا (KGE) به منظور ارائه ارزیابی جامع‌تر مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص با

در تنگ‌شدگی‌های ملایم و کاهش دقت در شرایط شدید را نشان می‌دهند.

است و صحت روش عددی در شرایط تنگ‌شدگی ملایم را تأیید می‌نماید.

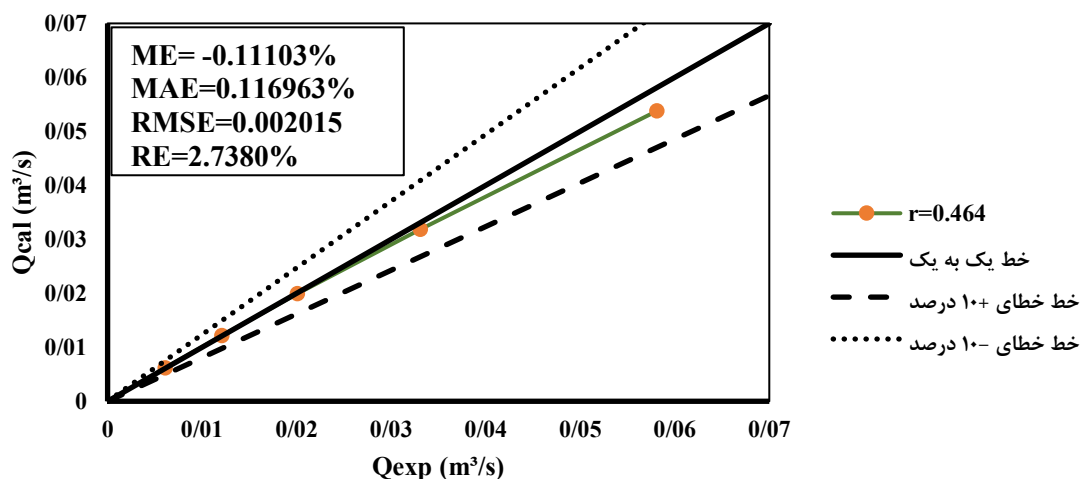
یافته‌های این پژوهش با نتایج Adžić et al., 2020 هم‌سو است، که هر دو مطالعه عملکرد دقیق مدل عددی



شکل (۴): ارزیابی دبی در مدل‌های عددی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی با نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲

با ۰/۱۱۷ درصد و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۰/۰۲۰ m³/s است. این مقادیر بیانگر آن است که عملکرد کلی مدل همچنان مطلوب و قابل اعتماد باقی مانده است. نتایج به دست آمده با مطالعات مشابه در زمینه جریان‌های تنگ‌شده هم‌خوانی دارد و کارایی مدل عددی در شبیه‌سازی رژیم‌های جریان با تنگ‌شدگی متوسط را تأیید می‌کند. همچنین، این یافته‌ها با پژوهش Shakibaenia et al., 2011 هم‌راستا است؛ آن‌ها در مطالعه خود بر روی شبیه‌سازی جریان‌های فوق‌بحرانی در کانال‌های تنگ‌شده با استفاده از مدل FLOW-3D گزارش کردند که با افزایش نسبت تنگ‌شدگی، دقت مدل اندکی کاهش می‌یابد، اما همبستگی کلی بین نتایج عددی و تجربی همچنان بالا باقی می‌ماند و عملکرد مدل در محدوده تنگ‌شدگی‌های متوسط قابل قبول است.

شکل ۵ پراکندگی دبی‌های عددی (Q_{cal}) در برابر دبی‌های تجربی (Q_{exp}) برای نسبت تنگ‌شدگی ۰/۴۶۴ = را نشان می‌دهد که همخوانی مناسبی میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی برقرار است. توزیع نقاط داده حاکی از آن است که بیشتر مقادیر در نزدیکی خط ایده‌آل یک به یک قرار دارند، هرچند در محدوده دبی‌های متوسط (۰/۰۲ تا ۰/۰۵ m³/s) پراکندگی بیشتری نسبت به حالت تنگ‌شدگی کمتر دیده می‌شود. این رفتار می‌تواند به دلیل افزایش اثرات جدایش جریان و آشفتگی در تنگ‌شدگی‌های متوسط باشد. خط روند رگرسیونی با شیبی نزدیک به واحد و تمرکز حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد داده‌ها در محدوده ± 1 درصد، پایداری نسبی مدل را تأیید می‌کند. شاخص‌های آماری محاسبه‌شده نیز دقت مناسب مدل عددی را نشان می‌دهند؛ به طوری که خطای میانگین (ME) برابر با ۰/۱۱۱- درصد، خطای مطلق میانگین (MAE) برابر

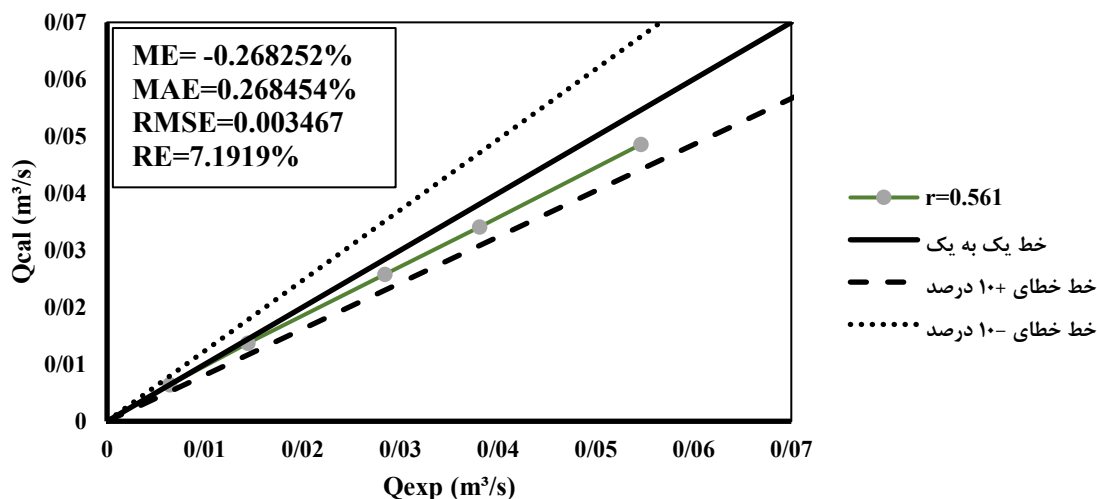


شکل (۵): ارزیابی دبی در مدل‌های عددی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی با نسبت تنگ‌شدگی ۰/۴۶۴

را تأیید می‌کنند؛ به طوری که مقادیر ME برابر با ۰/۲۶۸- درصد، MAE برابر با ۰/۲۶۸ درصد و RMSE برابر با ۰/۰۰۳۴ m³/s به دست آمد. این مقادیر کاهش نسبی دقت مدل در شرایط تنگ‌شدگی بالاتر را نشان می‌دهند، با این حال عملکرد مدل همچنان در محدوده قابل قبول برای تحلیل‌های مهندسی

قرار دارد. نتایج بیانگر آن است که مدل عددی در تنگ‌شدگی‌های ملایم ($r < 0.5$) دقت بالاتری دارد، در حالی که در نسبت‌های بالاتر، اثرات توربولانسی و ناپایداری جریان موجب افزایش خطا می‌شوند؛ روندی که با یافته‌های پژوهش‌های پیشین در حوزه شبیه‌سازی CFD جریان‌های تنگ‌شده هم‌خوانی دارد.

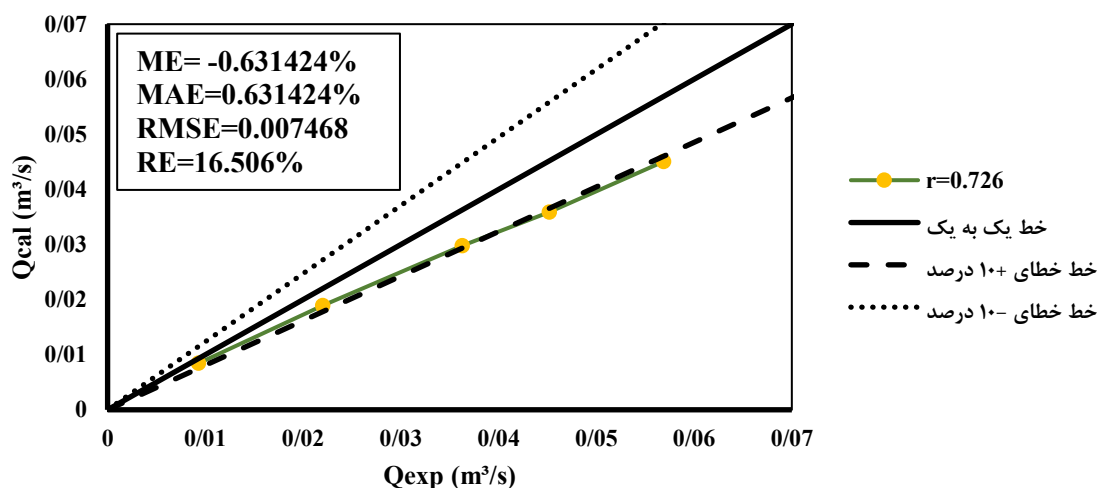
در شکل ۶، پراکندگی دبی‌های محاسبه‌شده عددی (Q_{cal}) در برابر دبی‌های تجربی (Q_{exp}) برای نسبت تنگ‌شدگی $r = 0.561$ نشان‌دهنده افزایش پراکندگی داده‌ها نسبت به حالت‌های قبلی است. هرچند بیشتر نقاط همچنان در مجاورت خط ایده‌آل یک به یک قرار دارند، توزیع داده‌ها به‌ویژه در محدوده دبی‌های متوسط تا بالا (۰/۰۳ تا ۰/۰۶ m³/s) گسترده‌تر شده است. این رفتار ناشی از افزایش شدت آشفتگی، جدایش جریان و تشکیل گردابه‌های ثانویه در ناحیه تنگ‌شده‌تر است. بر اساس ارزیابی بصری، حدود ۷۰ تا ۷۵ درصد داده‌ها در محدوده ± 1 درصد قرار دارند و انحرافات عمدتاً در سمت منفی (کم‌تخمینی) مشاهده می‌شوند. شاخص‌های آماری این الگو



شکل (۶): ارزیابی دبی در مدل‌های عددی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی با نسبت تنگ‌شدگی ۰/۵۶۱

افزایش عدد فرود موضعی و تشکیل جریان‌های ثانویه نسبت داد. این پدیده‌ها موجب ناپایداری جریان، افزایش آشفتگی غیرخطی و حساسیت بالاتر نتایج عددی به شرایط مرزی می‌شوند و در نهایت دقت پیش‌بینی دبی را کاهش می‌دهند. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که مدل عددی در تنگ‌شدگی‌های شدید کارایی محدودی دارد و برای بهبود عملکرد در این رژیم‌ها، بازنگری در مدل توربولانس، ریزترسازي شبکه عددی و اصلاح شرایط مرزی ضروری به نظر می‌رسد. تحلیل میدان سرعت و خطوط جریان در مدل عددی نشان داد که در نسبت‌های تنگ‌شدگی بالا، به‌ویژه ۰/۵۶۱ و ۰/۷۲۶، گردابه‌های ثانویه و نواحی بازچرخش جریان در مجاورت دیواره‌ها و پایین‌دست گلوگاه تشکیل می‌شوند. این گردابه‌ها ناشی از جدایش جریان و گرادیان شدید فشار بوده و در مطالعات پیشین نظیر Zhang et al., 2018 و Shakibaenia et al., 2011 نیز گزارش شده‌اند. این هم‌خوانی نشان می‌دهد که افت کارایی مدل در نسبت‌های تنگ‌شدگی بالا، رفتاری شناخته‌شده و قابل انتظار در شبیه‌سازی‌های CFD دارد.

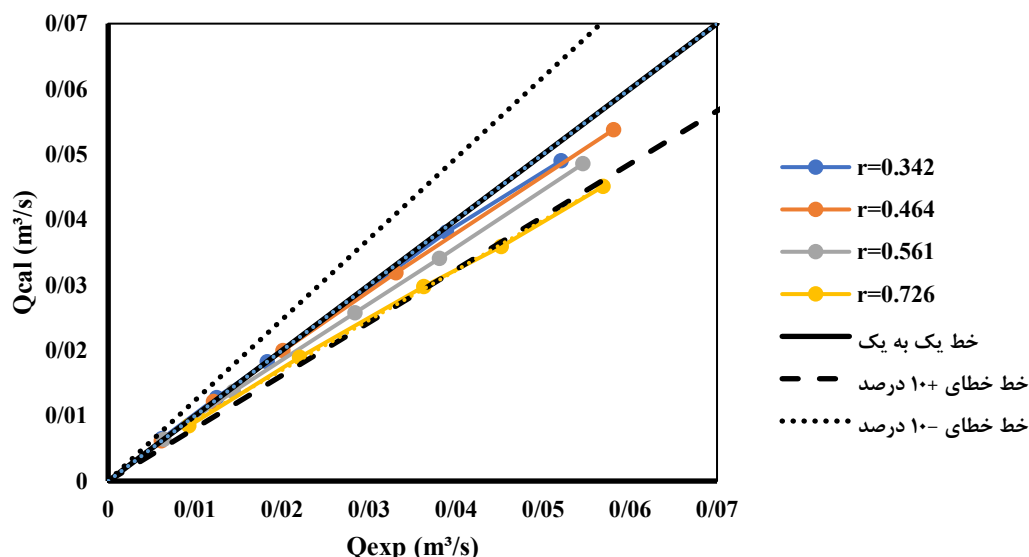
شکل ۷ پراکندگی دبی‌های عددی (Q_{cal}) در برابر دبی‌های تجربی (Q_{exp}) برای نسبت تنگ‌شدگی $r = 0.561$ را نشان می‌دهد که افزایش تنگ‌شدگی منجر به کاهش قابل توجه هم‌خوانی میان نتایج عددی و آزمایشگاهی شده است. پراکندگی نقاط داده در مقایسه با نسبت‌های کمتر به مراتب بیشتر است و به‌ویژه در محدوده دبی‌های متوسط تا بالا (۰/۰۲ تا ۰/۰۶ m^3/s) انحرافات آشکاری از خط ایده‌آل یک به یک مشاهده می‌شود. حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد داده‌ها در محدوده ± 1 درصد قرار دارند، در حالی که بخش قابل توجهی از نقاط در ناحیه کم‌تخمینی مدل متمرکز است. این روند می‌تواند ناشی از اثرات توربولانسی شدید، جدایش جریان و افزایش افت فشار در نواحی تنگ‌شده باشد. شاخص‌های آماری نیز افت دقت مدل در این شرایط را بیان می‌کنند؛ به‌طوری‌که ME برابر با ۰/۶۳۱- درصد، MAE برابر با ۰/۶۳۱ درصد و RMSE برابر با ۰/۰۷۴ m^3/s به‌دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده افزایش چشمگیر خطا و کاهش همگرایی مدل در تنگ‌شدگی‌های بالا است. این افزایش خطا را می‌توان به افت فشار موضعی شدید، جدایش جریان از دیواره‌ها،



شکل (۷) ارزیابی دبی در مدل‌های عددی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی با نسبت تنگ‌شدگی ۰/۷۲۶

نهایت، در بیشترین میزان تنگ‌شدگی $r=0/726$ ، خطا افزایش قابل توجهی داشت. این تغییر بیانگر آن است که در تنگ‌شدگی‌های زیاد، جریان به شدت آشفته شده و اثر خطاهای آزمایشگاهی، اغتشاشات موضعی و محدودیت‌های مدل عددی (مانند مدل‌سازی ناکافی ویسکوزیته) در نتایج پررنگ‌تر می‌شود. این الگو با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین مانند Yarahmadi et al., 2021 همخوانی دارد و نشان می‌دهد که شرایط تنگ‌شدگی ملایم معمولاً بهترین کارایی هیدرولیکی را فراهم می‌آورند. به طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که نسبت‌های تنگ‌شدگی ملایم، به‌ویژه $r=0/342$ ، بیشترین دقت و همخوانی بین شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی را ایجاد می‌کنند. از این رو، این شرایط می‌تواند به‌عنوان مبنای طراحی بهینه فلوم‌های قابل‌حمل SMBF در کاربردهای مهندسی منابع آب پیشنهاد شود. همچنین نتایج به‌دست‌آمده اعتبار مدل Flow-3D را در شبیه‌سازی جریان‌های آزاد در کانال‌های باز تأیید می‌نماید.

در شکل ۸، بررسی چهار نسبت تنگ‌شدگی نشان داد که دقت مدل عددی در بازتولید نتایج آزمایشگاهی به شکل معناداری تحت تأثیر میزان انقباض جریان قرار دارد و با افزایش نسبت تنگ‌شدگی (r)، دارای همخوانی کلی و به تدریج کاهش می‌یابد. در نخستین حالت با $r=0/342$ ، مدل عددی عملکردی استثنایی از خود نشان داد و سطحی بسیار پایینی از خطا را به نمایش گذاشت که نشان‌دهنده همخوانی عالی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی است. الگوی پراکندگی داده‌ها در نمودار تطبیقی نیز بیانگر حداقل ناپایداری‌های موضعی است، جایی که مدل با دقت بالا تغییرات محلی جریان (مانند اثرات توربولانسی ملایم) را مدیریت کرده است. با افزایش تنگ‌شدگی $r=0/464$ وضعیت مدل همچنان مناسب باقی ماند. در حالت سوم با $r=0/561$ ، همخوانی بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی کاهش یافت و این تغییرات حاکی از افزایش پراکندگی داده‌ها و چالش‌های مدل در مدیریت اثرات جدایش جریان در تنگ‌شدگی متوسط است. در



شکل (۸): نمودار پراکندگی کلی دبی محاسبه شده عددی (Q_{cal}) در برابر دبی اندازه گیری شده آزمایشگاهی (Q_{exp})

برای همه نسبت های تنگ شدگی، جهت ارزیابی کلی دقت مدل Flow-3D

ترتیب ۰/۹۹۷ و ۰/۹۸۶ قرار می گیرند. هرچند مقدار NSE در نمونه های بعدی اندکی پایین تر از بیشینه مشاهده شده است، ولی همچنان در محدوده ایده آل و نزدیک به عدد یک قرار دارد و تفاوت چندانی با بهترین حالت ندارد. شاخص AI نیز که درجه توافق کلی داده های عددی و آزمایشگاهی را می سنجد، در همه ی نمونه ها بالاتر از ۰/۹۹ است و بالاترین مقدار آن در نمونه اول ۰/۹۹۸ مشاهده می شود که این موضوع بار دیگر بیانگر دقت بالای مدل سازی عددی است. با این حال، انتخاب نسبت تنگ شدگی مناسب در طراحی فلولم SMBF صرفاً بر مبنای بزرگ ترین مقدار شاخص های آماری انجام نمی شود و عوامل هیدرولیکی و اجرایی نیز اهمیت دارند. نسبت ۰/۳۴۲ علاوه بر آن که از دیدگاه آماری در سطحی بسیار مطلوب قرار دارد، می تواند مزایایی از قبیل پایداری هیدرولیکی بهتر، تشکیل جریان بحرانی پایدارتر، کاهش احتمال رسوب گذاری در ناحیه گلوگاه و سهولت اجرا و نصب را نیز فراهم آورد. بنابراین اگرچه از نظر شاخص NSE نمونه اول به طور واضح بالاتر است، با در نظر گرفتن مزایای عملی و اجرایی نیز می توان نسبت تنگ شدگی ۰/۳۴۲ را به عنوان گزینه ای بهینه معرفی کرد؛ چرا که هم از دقت آماری قابل قبولی برخوردار است

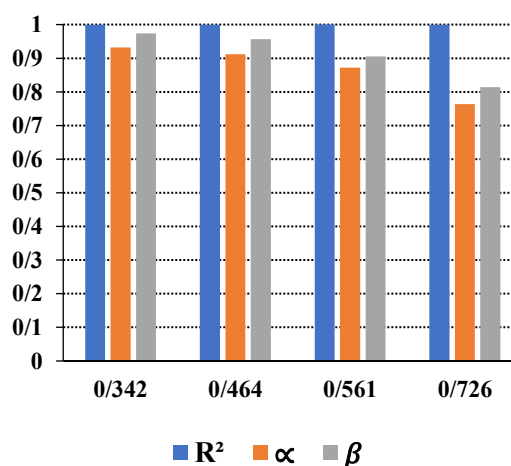
ارزیابی دقت مدل عددی با استفاده از معیارهای

ارزیابی NSE، AI و KGE

برای ارزیابی دقت شبیه سازی عددی در بازتولید رفتار هیدرولیکی فلولم قابل حمل SMBF، معیارهای ارزیابی NSE، AI و KGE به همراه مؤلفه های آن شامل ضریب همبستگی r ، نسبت انحراف معیار α و نسبت میانگین β برای چهار هندسه با نسبت های مختلف تنگ شدگی محاسبه گردید. نتایج این تحلیل که در شکل ۹ نشان داده شده است، بیانگر مقادیر بسیار بالای این شاخص ها در تمامی نسبت های تنگ شدگی است؛ به گونه ای که کمترین مقدار NSE حدود ۰/۹۴ و کمترین مقدار AI حدود ۰/۹۵ به دست آمده است. این اعداد حاکی از آن است که شبیه سازی عددی، در تمام نسبت های تنگ شدگی مورد بررسی، توانسته است با دقتی بسیار مطلوب نتایج آزمایشگاهی را بازتولید نماید و اختلاف میان مدل عددی و داده های واقعی بسیار ناچیز است. بر اساس شاخص NSE که یکی از معتبرترین معیارها برای سنجش همخوانی داده های شبیه سازی شده با داده های مشاهداتی است، بالاترین مقدار به نمونه اول با نسبت تنگ شدگی ۰/۳۴۲ تعلق دارد (۰/۹۹۸) و پس از آن نمونه های دوم و سوم با مقادیر به

$r=0.83$ به حدود $r=0.726$ کاهش یافت و در $r=0.70$ رسید که نشان‌دهنده افت قابل توجه دقت مدل در شرایط تنگ‌شدگی متوسط تا زیاد است. اگرچه مقادیر KGE در نسبت‌های بالاتر کمی پایین‌تر هستند، اما شرایط ملایم $r=0.342$ از منظر تعادل عملکردی در همه شاخص‌ها برتری دارد. به عبارت دیگر، نسبت‌های 0.464 و بالاتر بیشتر به دلیل مقادیر پایین‌تر α و β امتیاز کمتری در KGE کسب کرده‌اند، اما در بازنمایی دقیق پراکندگی داده‌ها و همبستگی کلی به اندازه حالت $r=0.342$ موفق نبوده‌اند. از سوی دیگر، نسبت $r=0.726$ به دلیل افزایش اغتشاشات جریان و حساسیت بالا به شرایط مرزی، عملکرد ضعیف‌تری داشته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شرایط ملایم به‌ویژه $r=0.342$ بهترین توازن را میان شاخص‌های مختلف فراهم می‌آورد. تحلیل شاخص‌های NSE، AI و KGE نشان داد که اگرچه در نسبت‌های بالاتر، مدل عملکرد قابل قبولی داشته است، اما نسبت ملایم $r=0.342$ توانسته شرایط پایدارتر و متعادل‌تری ایجاد کند. این نسبت علاوه بر انطباق کامل با داده‌های آزمایشگاهی ($r \approx 1$)، در بازنمایی تغییرپذیری جریان و برآورد میانگین دبی نیز عملکرد قابل قبولی ارائه داده است (شکل ۱۰). از این رو، می‌توان نسبت $r=0.342$ را به‌عنوان شرایط بهینه عملکرد مدلهایی در طراحی و بهره‌برداری از فلوم‌های قابل حمل SMBF معرفی کرد. نتایج این پژوهش با یافته‌های Daneshfaraz et al., 2016 در زمینه ارزیابی عملکرد مدل‌های عددی فلوم‌های قابل حمل همخوانی دارد.

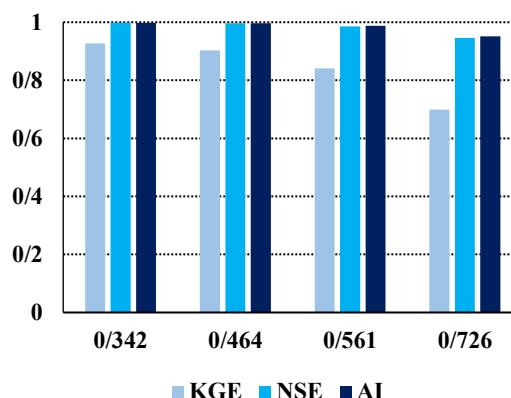
و هم از نظر عملکرد هیدرولیکی و شرایط بهره‌برداری می‌تواند پاسخگوی نیازهای مهندسی باشد. این امر نشان می‌دهد که انتخاب نهایی هندسه فلوم باید بر پایه‌ی ترکیبی از معیارهای آماری، ملاحظات هیدرولیکی و مسائل اجرایی صورت گیرد تا بهترین کارایی در شرایط واقعی حاصل شود. استفاده از شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) نیز اهمیت بالایی در ارزیابی کارایی مدل‌های عددی در بازتولید شرایط جریان دارد. در این پژوهش، مقادیر KGE برای چهار نسبت تنگ‌شدگی مختلف محاسبه شد و نتایج در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل (۹): نمودار شاخص کلینگ-گوپتا و اجزای آن در چهار نسبت تنگ‌شدگی

مقدار KGE در نسبت $r=0.342$ حدود 0.93 به دست آمد که بیانگر عملکرد مناسب مدل در این شرایط است. در حالت $r=0.464$ مقدار KGE به 0.90 رسید؛ هرچند این مقدار کمی کمتر از حالت ابتدایی است، اما باید توجه داشت که شاخص KGE میانگین سه مؤلفه r ، α و β را در قالب یک معیار ترکیبی نشان می‌دهد. در واقع، نسبت $r=0.342$ تعادل مناسبی میان سه مؤلفه برقرار کرده است؛ به‌گونه‌ای که همبستگی بسیار بالا، تغییرپذیری قابل قبول و برآورد نسبتاً دقیق میانگین جریان را به صورت همزمان تضمین می‌کند. در مقابل، مقدار KGE در حالت 0.561

بیشترین تأثیر را بر شاخص‌های خطا داشته و تغییر آن موجب افزایش خطای نسبی تا حدود ۱۲ درصد شده است. این موضوع بیانگر حساسیت بالای جریان به هندسه فلوم و توزیع فشار ناشی از تغییر زاویه بافل‌هاست. در رتبه دوم، عمق جریان قرار دارد که به‌ویژه در شرایط نزدیک به حالت بحرانی (عدد فرود=۱) باعث افزایش خطا می‌شود. در مقابل، مش‌بندی عددی اثر کمتری داشته اما استفاده از مش ریزتر توانسته RMSE را به میزان $0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$ کاهش دهد و پایداری مدل را در شرایط تنگ‌شدگی بالا بهبود بخشد. به‌طور کلی، آنالیز حساسیت نشان داد که بهینه‌سازی هندسه بافل‌ها و مدیریت شرایط هیدرولیکی جریان نقش اصلی در افزایش دقت مدل ایفا می‌کنند، در حالی که اصلاحات عددی مانند مش‌بندی ریزتر بیشتر به بهبود پایداری محاسبات کمک می‌کند. بنابراین، در طراحی و کالیبراسیون فلوم‌های پرتابل SMBF، بیشترین توجه باید به هندسه بافل‌ها و مدیریت عمق جریان معطوف شود، در حالی که مش‌بندی ریزتر بیشتر به‌عنوان یک ابزار پشتیبان برای افزایش دقت عددی توصیه می‌شود.



شکل (۱۰): ارزیابی شاخص‌های کلینگ-گوپتا، نش-ساتکلیف، توافق آنالیز حساسیت مدل

برای ارزیابی اثر پارامترهای اصلی بر دقت مدل عددی فلوم پرتابل SMBF، یک آنالیز حساسیت انجام شد. سه پارامتر کلیدی شامل زاویه بافل‌ها، عمق جریان و مش‌بندی عددی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، زاویه بافل‌ها

جدول (۲): ارزیابی اثر پارامترهای زاویه بافل‌ها، عمق جریان و مش‌بندی عددی

پارامتر	اثر بر RE (%)	اثر بر RMSE (m^3/s)
زاویه بافل	۱۲	۰/۰۰۴۰
عمق جریان	۸	۰/۰۰۳۰
مش‌بندی	۴	۰/۰۰۱۵

اصلی، تحلیل تأثیر میزان تنگ‌شدگی بر دقت پیش‌بینی دبی جریان و مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی بود تا قابلیت مدل در بازتولید رفتار واقعی جریان ارزیابی شود. بررسی‌های انجام‌شده به روشنی نشان داد که افزایش نسبت تنگ‌شدگی تأثیر مستقیمی بر کاهش دقت مدل دارد و رفتار جریان در نواحی با تنگ‌شدگی بالا به مراتب پیچیده‌تر و غیرخطی‌تر می‌شود. در میان نسبت‌های بررسی‌شده، حالت $\Gamma = 0.342$ بهترین تطابق میان نتایج

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل‌سازی عددی با استفاده از Flow-3D توانسته است رفتار هیدرولیکی فلوم‌های قابل‌حمل SMBF را با دقت و پایداری بالایی بازتولید نماید. در این پژوهش، با هدف ارزیابی عملکرد مدل عددی FLOW-3D در شبیه‌سازی جریان آزاد در فلوم قابل‌حمل SMBF، چهار نسبت تنگ‌شدگی 0.342 ، 0.464 ، 0.561 ، 0.726 مورد بررسی قرار گرفت. هدف

درصد در رتبه دوم قرار گرفت. در مقابل، تغییرات اندازه شبکه عددی اثر کمتری بر نتایج داشت، اما مش بندی ریزتر توانست RMSE را تا حدود $0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$ کاهش دهد و پایداری مدل را به ویژه در شرایط تنگ شدگی بالا بهبود بخشد.

در جمع بندی نهایی می توان گفت که:

۱. عملکرد مدل عددی در تنگ شدگی های ملایم ($r < 0.5$) بسیار دقیق و قابل اعتماد است.
۲. با افزایش تنگ شدگی، خطاهای آماری رشد کرده و مدل تمایل به کم تخمینی دبی ها پیدا می کند.
۳. معیارهای ارزیابی NSE، AI، KGE همگی نشان دهنده کاهش تدریجی دقت با افزایش نسبت تنگ شدگی هستند.
۴. بهبود مدل توربولانس و اصلاح شرایط مرزی برای دقت بخشی به شبیه سازی در تنگ شدگی های بالا ضروری است.

در نهایت، بر اساس نتایج تحلیلی و شاخص های آماری، نسبت تنگ شدگی $r = 0.342$ به عنوان نسبت بهینه طراحی فلوم قابل حمل SMBF پیشنهاد می شود. این نسبت علاوه بر تأمین پایداری هیدرولیکی و یکنواختی جریان، موجب حفظ دقت بالای مدل عددی و کاهش خطاهای محاسباتی می گردد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که انتخاب مناسب نسبت تنگ شدگی نه تنها نقش تعیین کننده ای در کیفیت شبیه سازی عددی دارد، بلکه در طراحی و بهینه سازی فلوم های قابل حمل و سامانه های آزمایشگاهی جریان های آزاد نیز از اهمیت عملی و کاربردی بسیار بالایی برخوردار است.

با توجه به نتایج به دست آمده، انجام مطالعات آتی می تواند در چند محور توسعه یابد. بررسی عملکرد فلوم SMBF در رژیم های جریان متنوع تر، به ویژه در شرایط جریان های با عدد فرود بالاتر، می تواند درک جامع تری از محدودیت های کاربردی این فلوم ارائه دهد. همچنین، استفاده از مدل های آشفتگی پیشرفته تر و شبیه سازی های سه بعدی می تواند به

عددی و تجربی را نشان داد. در این حالت، پراکندگی نقاط حداقل بوده و بیش از ۸۵ تا ۹۰ درصد داده ها در محدوده $\pm 10\%$ درصد از خط ایده آل یک به یک قرار گرفتند. شاخص های آماری نیز بیانگر دقت بسیار بالا بودند؛ به گونه ای که خطای میانگین ME حدود 0.067 درصد، خطای مطلق میانگین MAE 0.890 درصد، ریشه میانگین مربعات خطا $0.143 \text{ m}^3/\text{s}$ RMSE شاخص های دقیق بین داده های عددی و تجربی دارند. این سطح از دقت نشان می دهد که در شرایط تنگ شدگی ملایم، مدل عددی توانایی بسیار مطلوبی در باز تولید ویژگی های جریان از جمله جدایش های موضعی و اثرات توربولانسی دارد و می تواند رفتار هیدرولیکی فلوم را به درستی پیش بینی کند. با افزایش نسبت تنگ شدگی، روند تغییرات شاخص ها بیانگر کاهش تدریجی دقت مدل است. در حالت $r = 0.464$ همچنان همخوانی مناسبی میان دو مجموعه داده برقرار بود، اما از نسبت $r = 0.561$ به بعد، پراکندگی نقاط و میزان انحراف از خط ایده آل به شکل محسوس افزایش یافت. در نهایت، در نسبت $r = 0.726$ ، مدل عددی دچار بیشترین افت دقت شد؛ و الگوی کم تخمینی در دبی های بالا به وضوح مشاهده گردید. این رفتار را می توان ناشی از افزایش شدت آشفتگی، جدایش های جریان، افت فشار و محدودیت های مدل توربولانس در شرایط تنگ شدگی زیاد دانست. تحلیل معیارهای تکمیلی نظیر NSE، AI و KGE نیز برتری حالت $r = 0.342$ را به وضوح تأیید می کند. شاخص $0.93 \approx KGE$ در این نسبت بیانگر توازن مناسب میان همبستگی بالا، باز تولید صحیح تغییرات و برآورد دقیق میانگین جریان است. در مقابل، با افزایش تنگ شدگی، مقادیر KGE به ترتیب به 0.90 ، 0.83 و 0.70 کاهش یافته اند که نشانه افت محسوس کارایی مدل در شرایط پدینامیکی تر جریان است. نتایج تحلیل حساسیت مدل نیز نشان داد که زاویه بافل ها بیشترین تأثیر را بر شاخص های خطا دارد. پس از آن، عمق جریان با تأثیری نزدیک به ۸



بهینه‌سازی بیشتر طراحی فلوم SMBF برای افزایش دقت اندازه‌گیری دبی در شرایط مختلف عملیاتی باشد.

تحلیل دقیق‌تر ساختار گردابه‌ها، جدایش جریان و جریان‌های ثانویه در نواحی تنگ‌شده کمک کند. از سوی دیگر، بررسی تأثیر تغییر شکل هندسی نیم‌استوانه‌ها و ترکیب تنگ‌شدگی‌های عرضی و طولی می‌تواند زمینه‌ساز

منابع

- امین‌پور، ی.، فرهودی، ج.، و وطن‌خواه، ع. (۱۳۹۷). بررسی دقت روابط ارائه‌شده جهت تخمین دبی جریان با استفاده از فلوم SMBF. هفدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران. دانشگاه تهران. ۷ صفحه. شناسه ملی: IHC17.
- Adžić, F., I. Nikolić and M. Čosić. 2022. Large-eddy simulation of supercritical free-surface flow in an open-channel contraction. *Journal of Hydraulic Research*, 60(5): 753–768.
- Aminpour, Y., A.R. Vatankhah and J. Farhoudi. 2020. Experimental modeling of flumes with two semi-cylinder contractions (free and submerged flows). *Flow Measurement and Instrumentation*, 76: 101844.
- Baiamonte, G. and V. Ferro. 2007. Simple flume for flow measurement in sloping open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133: 71–78.
- Carollo, F.G., C. Di Stefano, V. Ferro and V. Pampalona. 2016. New Stage-Discharge Equation for the SMBF Flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5): 04016005.
- Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz and G.F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377: 80–91.
- Heyrani, M., A. Mohammadian and I. Nistor. 2021. Numerical Simulation of Flow in Parshall Flume Using Selected Nonlinear Turbulence Models. *Hydrology*, 8(4): 151.
- Mohammadi, A. and A.R. Vatankhah. 2020. Stage–discharge equation for simple flumes with semi-cylinder contractions. *SN Applied Sciences*, 2: 1–13.
- Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885–900.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282–290.
- Neter, J., M.H. Kutner, C.J. Nachtsheim and W. Wasserman. 1996. *Applied Linear Statistical Models*. 4th ed. McGraw–Hill.
- Samani, Z., S. Jorat and M. Yousaf. 1991. Hydraulic characteristics of circular flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4): 558–566.
- Samani, Z. and H. Magallanez. 1993. Measuring water in trapezoidal canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(1): 181–186.
- Samani, Z. and H. Magallanez. 2000. Simple flume for flow measurement in open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(2): 127–129.
- Samani, Z. and H. Magallanez. 2002. Challenges in accurate depth measurement in SMBF flumes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Shakibaenia, A. and Y.C. Jin. 2011. Numerical simulation of supercritical open-channel flow using FLOW-3D. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6): 774–781.
- Sun, B., L. Yang, S. Zhu, H. Zhang, C. Zhang and J. Zhang. 2020. Experimental and numerical investigation of flow measurement mechanism and hydraulic performance of portable pillar-shaped flumes in trapezoid channels. *Shock and Vibration*, 2020: 8815957.



Vatankhah, A.R. 2017. Discussion of “New Stage-Discharge Equation for the SMBF Flume,” by Francesco Giuseppe Carollo, Costanza Di Stefano, Vito Ferro, and Vincenzo Pampalone. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8): 07017011.

Willmott, C.J. and K. Matsuura. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30: 79–82.

Yarahmadi, N. and A.R. Vatankhah. 2021. Experimental study on rectangular cut-throated flume: Effects of flume wall slopes and channel longitudinal slope. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79: 101919.

Zhang, Q., J. Zhou and K. Yang. 2018. Numerical simulation of supercritical flow characteristics in sudden contractions of open channels. *Advances in Water Resources*, 116: 153–164.