

Laboratory and Numerical Investigation of Flow Rate in SMBF Flumes Using Flow3D and Comparison with Energy Equations

Mahdi Majedi Asl^{1*} , Mohammad Rasoul Momeni¹, Saman Nikmehr², Tohid Omidpour Alavian¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

²Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran.

Article Info	ABSTRACT
Article type	Objective: Accurately measuring flow rates in open channels is one of the fundamental challenges in hydraulic engineering, playing a crucial role in water resource management and the design of hydraulic structures. This study aims to develop an accurate hydraulic model for estimating flow rates in Simple Modified Baffle Flumes (SMBF) by combining laboratory experiments and numerical simulations with Flow3D.
Research Article	
Article history:	Material and Methods: Experiments were conducted in a rectangular channel with 27 different flow rates (ranging from 5 to 50 liters per second) and four contraction ratios (0.342, 0.467, 0.561, and 0.726). Numerical simulations were performed using the RNG turbulence model and the Volume of Fluid (VOF) method in the Flow3D software. The numerical model was calibrated with experimental data, and its accuracy was evaluated using the Mean Absolute Relative Error (MARE) criterion.
Received 18 April 2024	
Revised 16 July 2024	
Accepted 20 July 2024	
Published online 29 March 2026	
Keywords:	Results and Discussion: The findings indicated that by applying calibrated energy correction coefficients (K ranging from 0.95 to 1.05), the MARE was reduced to 4.85%, which represents a 2.47% improvement over previous methods. Increasing the contraction ratio from 0.342 to 0.726 led to a 32.5% increase in the Froude number and a 20% increase in turbulent kinetic energy.
SMBF Flume	
Flow Rate	
Hydraulics	
Numerical Simulation	
Flow3D	
Turbulence	
Critical Depth	
Energy Equation	Conclusions: This study presents an accurate numerical model and novel correction coefficients, providing an efficient and sustainable approach for optimizing the design of SMBF flumes and enhancing the accuracy of flow rate estimation. The study recommends that future studies investigate the effects of submerged flow and environmental parameters.

*Corresponding author, Email: majedi@Maragheh.ac.ir

Cite this article: Majedi Asl, Mahdi; Momeni, Mohamad Rasoul; Nikmehr, Saman; Omidpour Alavian, Tohid; Sohrabi, Fazel. (2026). Laboratory and Numerical Investigation of Flow Rate in SMBF Flumes Using Flow3D and Comparison with Energy Equations

Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment, 5(1), 1-20. <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.517806.1152>



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.517806.1152>



بررسی آزمایشگاهی و عددی دبی جریان در فلوم‌های SMBF با استفاده از Flow3D و مقایسه با روابط انرژی

مهدی ماجدی اصل^{۱*}، محمد رسول مومنی^۱، سامان نیک‌مهر^۲، توحید امیدپور علویان^۱

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

^۲ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، استان کردستان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	هدف: اندازه‌گیری دقیق دبی جریان در کانال‌های روباز یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی هیدرولیک است که نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی ایفا می‌کند. این پژوهش با هدف توسعه یک مدل هیدرولیکی دقیق برای تخمین دبی جریان در فلوم‌های SMBF (Simple Modified Baffle Flume) از طریق ترکیب آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Flow3D انجام شد.
مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹	
کلیدواژه‌ها:	روش‌ها: آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی با ۲۷ دبی مختلف (۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه) و چهار نسبت تنگ‌شدگی (۰/۳۴۲، ۰/۴۶۷، ۰/۵۶۱ و ۰/۷۲۶) اجرا شد. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل آشفتگی (RNG) و روش حجم سیال (VOF) در نرم‌افزار Flow3D انجام گرفت. مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی کالیبره شد و دقت آن با معیار میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) ارزیابی گردید.
فلوم SMBF	
دبی جریان	نتایج و بحث: نتایج نشان داد که با اعمال ضرایب تصحیح انرژی کالیبره‌شده (K بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵)، MARE به ۴/۸۵ درصد کاهش یافت، که بیانگر بهبود ۲/۴۷ درصد نسبت به روش‌های پیشین است. افزایش نسبت تنگ‌شدگی از ۰/۳۴۲ به ۰/۷۲۶، عدد فرود را تا ۳۲/۵ درصد و انرژی جنبشی آشفتگی را تا ۲۰ درصد افزایش داد.
هیدرولیک	
شبیه‌سازی عددی	نتیجه‌گیری: این پژوهش با ارائه یک مدل عددی دقیق و ضرایب تصحیح نوین، رویکردی کارآمد و پایدار برای بهینه‌سازی طراحی فلوم‌های SMBF و افزایش دقت تخمین دبی ارائه داد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، اثرات جریان مستغرق و پارامترهای محیطی بررسی شود.
Flow3D	
تلاطم، عمق بحرانی	
رابطه انرژی	

*نویسنده مسئول: Email: mehdi.majedi@gmail.com

استناد: ماجدی اصل، مهدی؛ مومنی، محمد رسول؛ نیک‌مهر، سامان؛ امیدپور علویان، توحید؛ سهرابی، فاضل (۱۴۰۵). بررسی آزمایشگاهی و عددی دبی

جریان در فلوم‌های SMBF با استفاده از Flow3D و مقایسه با روابط انرژی.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2025.517806.1152>



مقدمه

اندازه‌گیری دقیق دبی جریان در کانال‌های روباز از چالش‌های اصلی مهندسی هیدرولیک محسوب می‌شود و نقش مهمی در طراحی سازه‌های هیدرولیکی، مدیریت بهینه منابع آب و پیشگیری از سیلاب دارد. فلوم‌ها به‌عنوان ابزاری مؤثر برای اندازه‌گیری دبی، به دلیل توانایی ایجاد شرایط هیدرولیکی مشخص نظیر عمق بحرانی در گلوگاه، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. پیشینه تحقیقات در این حوزه به دهه‌های ابتدایی قرن بیستم بازمی‌گردد. Cone (۱۹۱۷) با معرفی ونتوری فلوم، پایه‌ای برای توسعه فلوم‌های اندازه‌گیری دبی فراهم کرد. Parshall و Rohwer (۱۹۲۱) با اصلاح ونتوری فلوم، پارشال فلوم را معرفی نمودند که به‌دلیل ایجاد عمق بحرانی در گلوگاه، دقت بالایی در اندازه‌گیری دبی داشت. Parshall (۱۹۲۶) با بهبود طراحی و ارائه جداول استاندارد ابعاد، کاربرد آن را گسترش داد. Skogerboe و همکاران (۱۹۶۷) با حذف ناحیه گلوگاه، فلوم‌های گلوبریده (Cutthroat) را معرفی کردند تا نصب آن‌ها در شرایط میدانی آسان‌تر شود. Bos (۱۹۷۶) با ارائه جداول جامع ابعاد، استانداردسازی طراحی پارشال فلوم‌ها را بهبود بخشید. Ackers و Harrison (۱۹۶۳) با بررسی فلوم‌های با عمق بحرانی، روابط جدیدی برای اندازه‌گیری دبی در کانال‌های باز پیشنهاد کردند. Davis و Deutsch (۱۹۸۰) با استفاده از روش‌های عددی-آزمایشگاهی، رفتار هیدرولیکی پارشال فلوم‌ها را تحلیل نمودند. Keller (۱۹۸۴) ویژگی‌های فلوم‌های گلوبریده را بررسی و دقت آن‌ها را در شرایط جریان آزاد تأیید کرد. Ohtsu و همکاران (۱۹۹۰) پرش هیدرولیکی و جریان مستغرق در کانال‌های مستطیلی را مطالعه و تأثیر آن بر اندازه‌گیری دبی را تحلیل کردند. Genoves و همکاران (۱۹۹۳) و Abt و همکاران (۱۹۹۵) روش‌های تصحیح برای پارشال فلوم‌های مستغرق ارائه نمودند. Abt و همکاران (۱۹۹۷) با بررسی ۱۴۹ پارشال فلوم میدانی در کلرادو گزارش کردند که در ۲۷/۵ درصد موارد، عمق بالادست به‌درستی اندازه‌گیری نشده است. Abt و Skowron (۲۰۰۱) روش‌های تصحیح برای فلوم‌های گلوبریده را بهبود بخشیدند. Baiamonte و Ferro (۲۰۰۷) فلوم‌های ساده را برای کانال‌های شیب‌دار معرفی کردند. Di Stefano و همکاران (۲۰۰۸) فلوم‌های SMBF را در شرایط میدانی آزمایش و کارایی بالای آن‌ها را تأیید نمودند. $MARE = 3.8$ ٪ در جریان آزاد و $MARE = 5.2$ ٪ در جریان مستغرق با $R^2 = 0.96$ و Barfuss (۲۰۱۱) تأثیر محل نصب اشل و پیکربندی دیواره‌های ورودی بر دقت پارشال فلوم‌ها را بررسی کردند. Cox و همکاران (۲۰۱۳) اندازه‌گیری جریان فوق‌بحرانی را با پارشال فلوم‌های بزرگ تحلیل نمودند. Carollo و همکاران (۲۰۱۶) رابطه جدیدی برای دبی-اشل در فلوم‌های SMBF ارائه کردند که میانگین قدرمطلق خطای نسبی (MARE) آن ۴/۵ درصد بود؛ درحالی‌که روش‌های پیشین $MARE = 7.67$ درصد داشتند (بهبود ۳/۱۷ درصدی). با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، پیچیدگی‌های هیدرولیکی نظیر آشفتگی جریان، پس‌زدگی و تأثیر تنگ‌شدگی همچنان دقت تخمین دبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. وطن خواه و همکاران (۲۰۱۷) نسبت به تحلیل آبدگری فلوم‌های SMBF در شرایط جریان آزاد و مستغرق، مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۵۷۵ سری داده از دو کانال با ابعاد مختلف و هشت نمونه فلوم SMBF در محدوده وسیع دبی، عمق بالادست و نسبت تنگ‌شدگی عرضی اقدام نمودند. بر اساس توزیع سرعت در مقطع گلوگاه و غیریکنواختی جریان دوبعدی، روابط جدیدی برای شرایط آزاد (با ضرایب تصحیح انرژی) و مستغرق (تابع عمق بالادست و عرض گلوگاه) استخراج شد. میانگین قدر مطلق خطای نسبی دبی تخمینی در شرایط آزاد ۱/۵۲ تا ۳/۱۹ درصد و در مستغرق ۵/۵۱ درصد گزارش گردید، که نشان‌دهنده کارایی SMBF به‌عنوان ابزار قابل حمل اندازه‌گیری دبی در کانال‌های روباز است و می‌تواند در بهینه‌سازی روابط تصحیحی تحقیق حاضر مفید باشد.

شاهی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۳) نسبت به شبیه‌سازی و تخمین دبی جریان در فلوم‌های SMBF تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین شامل ماشین بردار پشتیبان (SVM)، رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپلاین (MARS) و شبکه عصبی مصنوعی چندلایه (MLPNN) اقدام نمودند. نتایج نشان دادند که در مرحله صحت‌سنجی، مدل MARS در حالت جریان آزاد با $MAPE = 0.08$ و $RMSE = 0.08$ درصد و در حالت مستغرق با $MAPE = 0.18$ و $RMSE = 0.18$ درصد و $R^2 = 0.978$ بهترین عملکرد را دارد. این نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای روش‌های نرم‌محاسباتی در پیش‌بینی دقیق دبی جریان در فلوم‌های SMBF بدون نیاز به روابط تجربی پیچیده است و می‌تواند به‌عنوان مکملی برای شبیه‌سازی‌های عددی CFD مورد استفاده قرار گیرد. در تحقیقات اخیر داخلی، خیبر و همکاران (۱۴۰۳) ضریب دبی و راندمان سرریزهای جانبی لولایی با آستانه را در زوایای

بازشدگی مختلف بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش زاویه بازشدگی، ضریب دبی تا ۶۰ درصد و راندمان تا ۴۵ درصد افزایش می‌یابد ($R^2=0/72$, $NRMSE=0/6$). این یافته‌ها می‌تواند در بهبود دقت فلوم‌های SMBF برای کنترل جریان در کانال‌های روباز با ساختارهای جانبی کاربرد داشته باشد، به‌ویژه در کاهش خطای اندازه‌گیری دبی ناشی از تغییرات هندسه تنگ‌شدگی در گلوگاه SMBF. حشمت‌پور و سجادی (۱۴۰۳) با استفاده از مدل فازی، تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب کشاورزی در رودخانه گرگان‌رود را تحلیل کردند و مدل پیشنهادی را با ۱۶ کلاس فازی برای پیش‌بینی آلودگی آب ارزیابی نمودند (درجه فازی بین [۰,۱]). این رویکرد به مدیریت کیفیت آب در کانال‌های روباز کمک می‌کند و در فلوم‌های SMBF می‌تواند با اندازه‌گیری دقیق دبی، تأثیر کیفیت بر دقت هیدرولیکی (مانند رسوب‌گذاری و آشفتگی جریان) را کاهش دهد، که در شرایط مستغرق SMBF حیاتی است. حاج سید علی خانی و سعیدیان (۱۴۰۳) نقش عمق آبرفت و رسوبات را در مکانی‌یابی سدهای زیرزمینی حوزه آبخیز کشت استان کرمان بررسی کردند و عمق آبرفت ۲ تا ۷ متری را برای انتقال جریان زیرقشری مناسب دانستند، هرچند ظرفیت ذخیره‌سازی محدود است. این نتایج در فلوم‌های SMBF برای اندازه‌گیری دقیق دبی در مناطق کویری مفید است، زیرا رسوبات می‌تواند بر عمق بحرانی و دقت تخمین دبی تأثیرگذار باشد. با وجود این پیشرفت‌ها، محدودیت‌هایی در روش‌های موجود همچنان پابرجاست؛ بسیاری از روابط به هندسه خاص وابسته‌اند و اثرات پیچیده هیدرولیکی مانند پس‌زدگی و آشفتگی را به‌طور کامل پوشش نمی‌دهند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، محدودیت‌هایی در روش‌های موجود برای تخمین دبی جریان وجود دارد. بسیاری از روابط ارائه‌شده، مختص ابعاد و هندسه خاصی از فلوم هستند و در شرایط متفاوت، خطای قابل توجهی ایجاد می‌کنند. همچنین، اکثر این روابط بر اساس روش‌های رگرسیونی توسعه یافته‌اند و اثرات هیدرولیکی پیچیده نظیر پس‌زدگی جریان و آشفتگی را به‌طور کامل در نظر نمی‌گیرند. این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار Flow3D و شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، به تحلیل دقیق رفتار هیدرولیکی جریان در فلوم‌های SMBF می‌پردازد. این پژوهش رویکردی نوین در ارائه ضرایب تصحیح انرژی کالیبره‌شده برای فلوم‌های SMBF ارائه می‌دهد که از ترکیب داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار Flow3D استخراج شده‌اند. استفاده هدفمند از مدل آشفتگی RNG در کنار روش حجم سیال (VOF) امکان شبیه‌سازی دقیق جریان‌های با تنگ‌شدگی بالا را فراهم کرده است، که به‌طور خاص اثرات آشفتگی و تغییرات سطح آزاد را به‌صورت همزمان مدل‌سازی می‌کند. این مطالعه با توسعه یک مدل عددی کالیبره‌شده و ارائه ضرایب تصحیح انرژی، راهکاری کارآمد برای بهینه‌سازی طراحی فلوم‌های SMBF و کاهش وابستگی به آزمایش‌های فیزیکی پرهزینه ارائه می‌دهد، که می‌تواند به مدیریت پایدار منابع آب کمک کند.

مواد و روش‌ها

فلوم‌های SMBF به‌دلیل ساختار هندسی ساده و توانایی در ایجاد جریان آزاد پایدار، نسبت به فلوم‌هایی نظیر پارشال‌فلوم که در شرایط پیچیده‌تری مانند جریان مستغرق به اصلاحات بیشتری نیاز دارند، عملکرد دقیق‌تری در تخمین دبی ارائه می‌دهند (Carollo و همکاران (۱۹۹۵)). در این پژوهش، به‌منظور تحلیل دقیق رفتار هیدرولیکی فلوم SMBF، از رویکردی ترکیبی شامل آزمایش‌های فیزیکی و مدل‌سازی عددی استفاده شد. در گام نخست، مجموعه‌ای از ۲۷ آزمایش فیزیکی در یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع دیواره ۰/۶ متر انجام گرفت. این آزمایش‌ها شامل چهار نسبت تنگ‌شدگی (۰/۳۴۲، ۰/۴۶۷، ۰/۵۶۱ و ۰/۷۲۶) و دبی‌هایی در بازه ۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه بودند. در ادامه، مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D با هدف شبیه‌سازی توزیع سرعت، فشار و سطح آزاد جریان انجام شد. در این مدل، از مدل آشفتگی RNG و روش حجم سیال (VOF) برای شبیه‌سازی رفتار جریان در هندسه فلوم استفاده گردید. به‌منظور ارزیابی دقت مدل عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد و مدل با استفاده از داده‌های ثبت‌شده کالیبره گردید. برای ارزیابی خطای مدل، از شاخص‌های آماری شامل خطای نسبی (RE) و میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) استفاده شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که این رویکرد ترکیبی امکان بررسی دقیق پارامترهای هیدرولیکی را فراهم می‌سازد و علاوه بر کاهش نیاز به آزمایش‌های فیزیکی پرهزینه، می‌تواند ابزاری کارآمد برای طراحی بهینه فلوم‌های SMBF ارائه دهد.

محدوده داده‌های آزمایشگاهی

به منظور ارائه داده‌های شفاف و قابل مقایسه، دبی آزمایشگاهی (Q_{exp}) حاصل از آزمایش‌ها در فلوم SMBF برای تنگ‌شدگی‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. این داده‌ها با هدف بررسی رفتار هیدرولیکی جریان تحت شرایط تنگ‌شدگی‌های متفاوت (مانند نسبت‌های تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲ تا ۰/۷۲۶) جمع‌آوری شده‌اند و به عنوان پایه‌ای برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی، از جمله FLOW-3D، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱. مقادیر دبی آزمایشگاهی (Q_{exp}) برای نسبت‌های تنگ‌شدگی مختلف

	نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲	نسبت تنگ‌شدگی ۰/۴۶۷	نسبت تنگ‌شدگی ۰/۵۶۱	نسبت تنگ‌شدگی ۰/۷۲۶
NO	Q_{exp} (cms)	Q_{exp} (cms)	Q_{exp} (cms)	Q_{exp} (cms)
۱	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۸
۲	۰/۰۰۸۲	۰/۰۱۳۸	۰/۰۰۹۱	۰/۰۱۸
۳	۰/۰۱۲۵	۰/۰۲۰۱	۰/۰۱۳۷	۰/۰۲۹
۴	۰/۰۱۵۸	۰/۰۳۱۱	۰/۰۲۱۸	۰/۰۴۲
۵	۰/۰۲۱۲	۰/۰۴۲۹	۰/۰۲۷۱	۰/۰۵۵
۶	۰/۰۲۶۹	۰/۰۶۲	۰/۰۴۸۴	
۷	۰/۰۳۸۹			
۸	۰/۰۴۳۱			
۹	۰/۰۴۴۷			
۱۰	۰/۰۵۲۱			

معرفی نمونه آزمایشگاهی

آزمایش‌های آزمایشگاهی

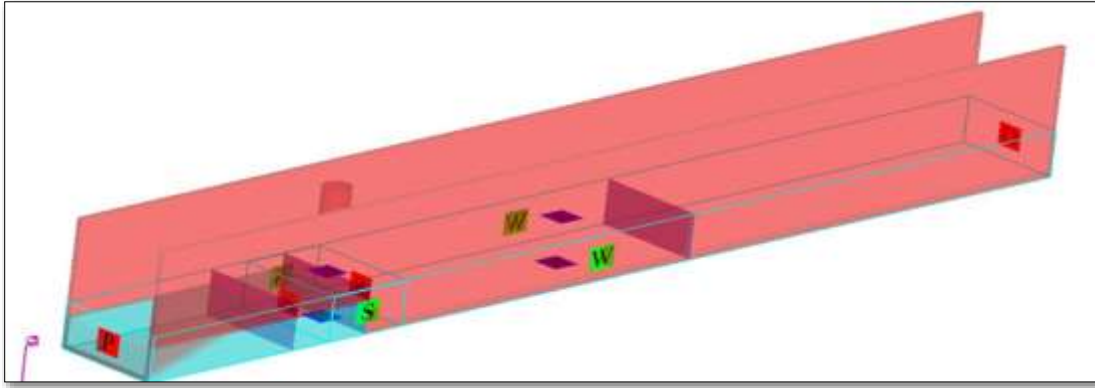
آزمایش‌های فیزیکی این پژوهش در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. دیواره‌های کانال از پلکسی‌گلاس شفاف با ضریب زبری ۰/۰۱ ساخته شدند تا شرایط جریان یکنواخت و قابل مشاهده فراهم گردد. در مرکز کانال، فلوم SMBF نصب گردید که شامل یک استوانه مرکزی به منظور ایجاد تنگ‌شدگی جریان بود Di Stefano و همکاران، (۲۰۰۸). تأمین آب از طریق یک مخزن ذخیره با ابعاد $۵ \times ۱ \times ۱/۱$ متر و ظرفیت ۵/۵ مترمکعب انجام شد. جریان توسط یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت $\pm ۰/۵$ درصد اندازه‌گیری گردید. در مجموع ۲۷ آزمون برای چهار نسبت تنگ‌شدگی (۰/۳۴۲، ۰/۴۶۷، ۰/۵۶۱ و ۰/۷۲۶) و در دبی‌هایی بین ۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. برای هر نسبت تنگ‌شدگی، بین ۶ تا ۷ مقدار دبی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین عمق جریان در بالادست و پایین‌دست فلوم با استفاده از عمق‌سنج دیجیتالی با دقت $\pm ۰/۱$ میلی‌متر ثبت شد. هدف از این آزمایش‌ها، تحلیل تأثیر تنگ‌شدگی و تغییرات دبی بر رفتار هیدرولیکی جریان در شرایط جریان آزاد بود. شکل ۱، نمای کلی سیستم انتقال و تأمین آب، فلوم نصب‌شده، و محیط آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد که برای انجام این پژوهش از آن استفاده شد.



شکل ۱- سیستم انتقال و آبرسانی و محیط آزمایشگاهی

مدل سازی عددی با نرم افزار FLOW-3D

در این پژوهش، برای تحلیل دقیق رفتار هیدرولیکی جریان در فلوم‌های SMBF از نرم افزار FLOW-3D® استفاده شد که یکی از ابزارهای معتبر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در شبیه سازی جریان‌های سطح آزاد محسوب می‌شود (Flow Science, 2023). انتخاب این نرم افزار به دلیل قابلیت آن در حل معادلات کامل ناویر-استوکس و بهره گیری از مدل‌های پیشرفته آشفتگی صورت گرفت. با توجه به ویژگی‌های خاص جریان در محدوده تنگ‌شدگی فلوم SMBF، مانند افزایش ناگهانی سرعت، آشفتگی شدید و تغییرات قابل توجه در سطح آزاد، مدل آشفتگی RNG به عنوان گزینه مناسب انتخاب گردید؛ زیرا این مدل توانایی بیشتری در شبیه سازی جریان‌های با گرادیان بالا نسبت به مدل‌های کلاسیک مانند $k-\epsilon$ دارد (Yakhot و همکاران، ۱۹۸۶). همچنین برای ردیابی دقیق سطح آزاد جریان، از روش حجم سیال (VOF) استفاده شد که دقت زیادی در تعیین موقعیت سطح مشترک سیال و هوا دارد (Hirt و همکاران، ۱۹۸۱). هندسه سه بعدی فلوم در محیط FLOW-3D ترسیم شد و برای ایجاد توازن میان دقت و زمان محاسبات، مش بندی ساخت یافته با اندازه یکنواخت سلول ۵ میلی متر انتخاب گردید. شرایط مرزی شامل ورودی با سرعت یکنواخت (مطابق دبی اندازه گیری شده در آزمایشگاه)، خروجی با فشار اتمسفری و دیواره‌های بدون لغزش با زبری $0/01$ تعریف شد. شکل ۲ نمای شماتیک شرایط مرزی اعمال شده در وجوه مختلف فلوم را نشان می‌دهد. علاوه بر این، تنظیمات حل گر عددی به گونه ای انتخاب گردید که پایداری و همگرایی حل تضمین شود. برای دستیابی به نتایج پایدار، شبیه سازی‌ها تا زمانی ادامه یافت که معیار خطای همگرایی به مقدار کمتر از $0/001$ رسید. از آن جا که رفتار جریان در فلوم SMBF به شدت تحت تأثیر هندسه موضعی، انرژی جنبشی آشفتگی و نحوه پراکندگی فشار در ناحیه تنگ شده است، استفاده از این مدل عددی نه تنها انتخابی ساده، بلکه ضرورتی علمی برای دستیابی به تحلیل دقیق محسوب می‌شود. طراحی این بخش از پژوهش بر پایه ویژگی‌های خاص پروژه، مطالعات مشابه قبلی (مانند Carollo و همکاران، ۲۰۱۶؛ Di Stefano و همکاران، ۲۰۰۸) و هدف اصلی تحقیق یعنی کاهش خطای تخمین دبی صورت گرفته است.



شکل ۲- شرایط مرزی به کاررفته در وجه‌های فلوم

بهبینه‌سازی و اعتبارسنجی مدل عددی

برای اعتبارسنجی مدل عددی، دبی‌های شبیه‌سازی شده (Q_{sim}) با مقادیر آزمایشگاهی (Q_{exp}) در سه مقطع کانال مقایسه شدند. سه شاخص آماری معیارهای آماری خطای نسبی (RE)، میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) و حداکثر خطا (ME) به صورت زیر محاسبه شدند:

$$\% RE = \left(\frac{Q_{exp} - Q_{cal}}{Q_{exp}} \right) * 100 \quad (1)$$

$$\% MARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{exp(i)} - Q_{cal(i)}}{Q_{exp(i)}} \right| \quad (2)$$

$$\% ME = \left(\text{MAX} \left| \frac{Q_{exp(i)} - Q_{cal(i)}}{Q_{exp(i)}} \right| \right) * 10 \quad (3)$$

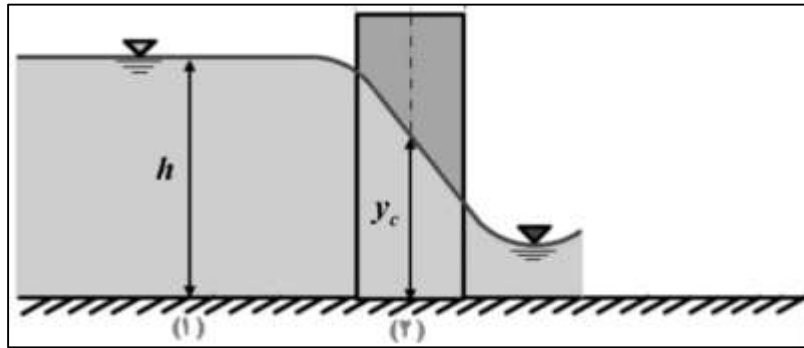
در این پژوهش، برای اطمینان از دقت مدل عددی در FLOW-3D، فرایندهای واسنجی و صحت‌سنجی با دقت اجرا شدند و پارامترهای اصلی هیدرولیکی و عددی بهینه‌سازی گردیدند. در واسنجی، دبی جریان (Q)، عمق بحرانی (y_c)، ضریب انرژی (α) و ضریب عمق (k) با داده‌های آزمایشگاهی (دبی ۵-۵۰ لیتر بر ثانیه، نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲-۰/۷۲۶) تنظیم شدند. ضریب α (1.0-1.2) و k بهینه شد تا تطابق با داده‌های تجربی maxim شود. اندازه‌مش‌بندی (۰/۰۰۸ متر) با تحلیل حساسیت درشت‌تر MARE 6.2%؛ ریزتر MARE 4.72% بهینه شد. در صحت‌سنجی، دقت مدل با مقایسه Q_{exp} و Q_{sim} در ۲۷ سناریو (نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲-۰/۷۲۶) ارزیابی شد. شاخص‌های آماری RE، MARE، ME محاسبه شدند؛ MARE (1.10-4.85%) و ME (2.13-6.32%) دقت مدل را تأیید کرد. هدف، کاهش خطای دبی به زیر ۵ درصد بود که در بهبود عملکرد مدل مؤثر بود.

تعیین حجم سلول مش در مش‌بندی کلی طول کانال ۰/۰۰۸ متر تنظیم شد. برای مش‌بندی محدوده تنگ‌شدگی، به دلیل نیاز به دقت بیشتر، حجم سلول به ۰/۰۰۵ متر کاهش یافت تا اهداف موردنظر بهتر برآورده شود. مدل با FLOW-3D و مدل RNG کالیبره و اعتبارسنجی شد. اندازه‌مش (۰/۰۰۵ متر یکنواخت) با تحلیل حساسیت (درشت‌تر: MARE 6.2%؛ ریزتر: MARE 4.72%) بهینه شد. اعتبارسنجی با ۲۷ دبی (۵-۵۰ لیتر بر ثانیه) و نسبت‌های تنگ‌شدگی (۰/۳۴۲-۰/۷۲۶) انجام شد؛ MARE (1.10-4.85%) و ME (2.13-6.32%) دقت را تأیید کرد.

بررسی دبی جریان در کانال تحت جریان آزاد بر طبق معادله انرژی

برای تحلیل هیدرولیکی گلوگاه فلوم SMBF، فرض شد که جریان بحرانی در مقطع تنگ‌شده (گلوگاه) برقرار است. مقطع گلوگاه به صورت مستطیلی با عرض (B_c عرض گلوگاه) در نظر گرفته شد. نمای کلی جانمایی استوانه مرکزی کانال و وضعیت سطح آب در

کانال در شکل ۳ نشان داده شده است. برای برآورد فرمولی بهینه تخمین دبی جریان در فلوم موردنظر در وضعیت جریان آزاد با بهره‌گیری از رابطه انرژی تحت شرایطی که اگر نقطه بحرانی جریان در مقطع تنگ شده کانال رخ دهد تعیین خواهد شد:



شکل ۳- نمای کلی جانمایی استوانه مرکزی کانال و وضعیت سطح آب در کانال

نمایی از مقاطع عرضی و طولی کانال در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌طور کلی انرژی مخصوص در یک آبراهه به‌صورت رابطه ۴ ارائه می‌شود:

$$H = Z + h \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

که در رابطه فوق در صورتی که مقطع مورد قیاس در دونقطه کانال در کف در نظر بگیریم ($Z = 0$) خواهد شد و همچنین اگر زاویه کف کانال $\theta \leq 6^\circ$ باشد و ضریب تصحیح انرژی را $\alpha = 1$ در نظر بگیریم در آن صورت خواهیم داشت:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

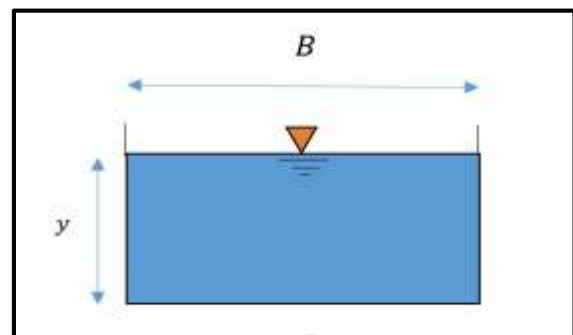
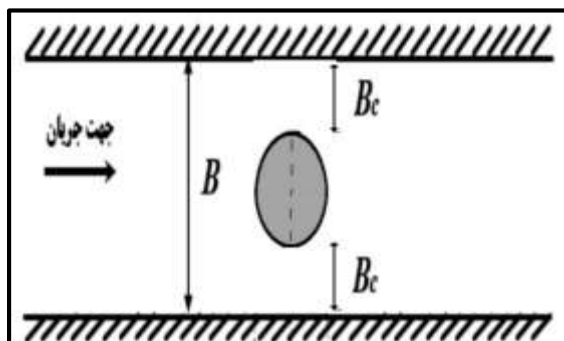
و از آنجاکه:

$$Q = VA \rightarrow E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (6)$$

و برای سطح مورد بررسی خود در حالتی که جریان بحرانی باشد می‌توانیم رابطه $Fr = 1$ و $y = y_c$ را در نظر بگیریم:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gB_c^2 y_c^2} \quad (7)$$

هدف از روابط فوق ایجاد رابطه‌ای برای رسیدن به حل معادله‌ای در راستای تخمین دبی بر طبق رابطه‌ای انرژی است بر این اساس با اکتفا به رابطه $E_1 = E_2 = E_c$ و برای مقطع مستطیلی از فلوم خواهیم داشت:



شکل ۴- نمایی از مقاطع عرضی و طولی کانال

برای مقطع مستطیلی $A = B * y$ و $T = B$ بوده و به‌صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{Q^2}{gB^2 y_c^3} = 1 \quad (8)$$

برای دبی واحد عرض ($q = \frac{Q}{B}$) رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (9)$$

و رابطه انرژی مخصوص برای مقطع مستطیلی در حالت بحرانی خواهیم داشت:

$$E_c = y_c + \frac{V_c^2}{2g} \rightarrow E_c = y_c + \frac{q^2}{2gy_c^2} \rightarrow E_c = \frac{3}{2}y_c \quad (10)$$

سپس با فرض عامل‌های $r = \frac{B_c}{B}$ و $\lambda = \frac{h}{y_c}$ به ترتیب با استفاده از روابط فوق مطرح شده خواهیم داشت:

$$\lambda^3 - \left(\frac{3}{2}\right)\lambda^2 + \frac{r^2}{2} \quad (11)$$

و اگر $p = 1.5$ و $q = \frac{r^2}{2}$ را در نظر بگیریم در نهایت خواهیم داشت :

$$\lambda^3 - P\lambda^2 + q = 0 \quad (12)$$

با حل معادله به دست آمده از رابطه انرژی فوق به ریشه قابل قبولی برای به دست آوردن دبی جریان خواهیم رسید.

$$Q = \frac{B_c g^{0.5} h^{1.5}}{\left[\left(\frac{1}{2}\right)(1+2\cos\left\{\frac{1}{3}\arccos(1-2r^2)\right\}\right)]^{1.5}} \quad (13)$$

که در آن Q دبی جریان، g شتاب گرانش، B_c عرض گلوگاه، α ضریب تصحیح انرژی و K ضریب تصحیح عمق هستند. بازه منطقی برای K بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ فرض شد. مقدار دقیق این ضرایب در بخش نتایج از طریق تطابق با داده‌های عددی و آزمایشگاهی تعیین شده است.

نتایج و بحث

بهبودسازی مدل عددی

به منظور ارزیابی دقت مدل عددی توسعه داده شده در نرم افزار FLOW-3D، نتایج شبیه سازی با داده‌های آزمایشگاهی برای ۲۷ سناریوی مختلف دبی و چهار نسبت تنگ‌شدگی مقایسه شد. بررسی‌ها نشان داد که مدل عددی توانسته است روند تغییرات دبی را با دقت قابل قبولی بازسازی کند. در نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲، میانگین خطای نسبی (RE) کمتر از ۲ درصد گزارش شد که نشان‌دهنده هم‌خوانی بسیار زیاد نتایج عددی با داده‌های تجربی است. با افزایش تنگ‌شدگی به ۰/۴۶۷ و سپس ۰/۵۶۱، مقدار RE به ترتیب به حدود ۱/۹۹ درصد و ۲/۶۳ درصد افزایش یافت. در نهایت، برای نسبت تنگ‌شدگی ۰/۷۲۶، بیشترین میانگین خطای نسبی با مقدار ۴/۸۵ درصد ثبت شد. این افزایش خطا در تنگ‌شدگی‌های بالاتر را می‌توان به افزایش شدت آشفتگی، نوسانات سرعت موضعی و افزایش انرژی جنبشی جریان نسبت داد. جدول ۲ نتایج مقایسه دبی عددی و آزمایشگاهی را برای تمامی نسبت‌های تنگ‌شدگی ارائه می‌دهد.

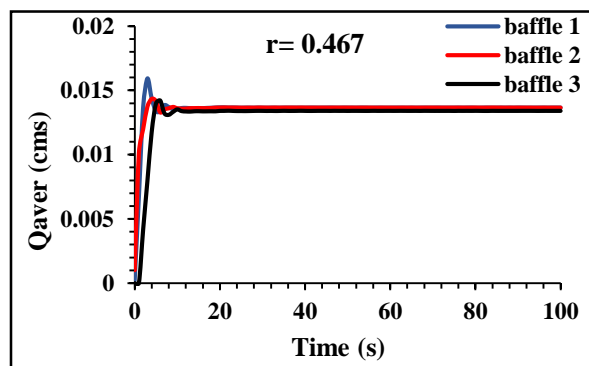
جدول ۲- مقادیر دبی شبیه‌سازی شده ($Q_{aver sim}$) و دبی آزمایشگاهی (Q_{exp}) را برای نسبت‌های تنگ‌شدگی مختلف

NO	نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲			نسبت تنگ‌شدگی ۰/۴۶۷			نسبت تنگ‌شدگی ۰/۵۶۱			نسبت تنگ‌شدگی ۰/۷۲۶		
	%RE	Q_{exp}	$Q_{aver sim}$	%RE	Q_{exp}	$Q_{aver sim}$	%RE	Q_{exp}	$Q_{aver sim}$	%RE	Q_{exp}	$Q_{aver sim}$
		(cms)	(cms)		(cms)	(cms)		(cms)	(cms)		(cms)	(cms)
۱	۰/۱۶	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۶۳۱	۱/۱۱	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۴۴	۱/۳۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳۹۴	۲/۸۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹
۲	۰/۷۳	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۱۴	۱/۵۹	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۳۰۶	۱/۸۸	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۸۹۲	۳/۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷
۳	۱/۸۴	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۲۷۳	۱/۹۹	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۰۵	۲/۱۹	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۴۰	۵/۱۹	۰/۰۲۹	۰/۰۲۷

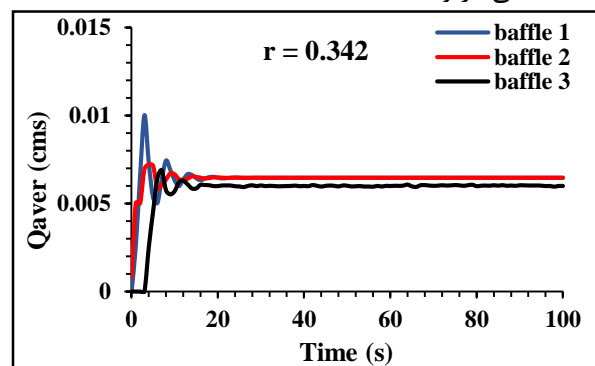
۴	۱/۲	۰/۰۱۵۸	۰/۰۱۶	۲/۰۹	۰/۰۳۱۱	۰/۰۳۰۴	۳/۲۴	۰/۰۲۱۸	۰/۰۲۱۱	۶/۰۲	۰/۰۴۲	۰/۰۳۹
۵	۰/۲۳	۰/۰۲۱۲	۰/۰۲۱۱۵	۲/۱۹	۰/۰۴۲۹	۰/۰۴۱۹	۳/۸۴	۰/۰۲۷۱	۰/۰۲۸۱	۶/۳۳	۰/۰۵۵	۰/۰۵۲
۶	۰/۵۹	۰/۰۲۶۹	۰/۰۲۶۷۴	۲/۹	۰/۰۶۲	۰/۰۶۸۳	۳/۳	۰/۰۴۸۴	۰/۰۴۹۹			
۷	۲/۱۳	۰/۰۳۸۹	۰/۰۳۸۰۷									
۸	۰/۶	۰/۰۴۳۱	۰/۰۴۲۸۴									
۹	۱/۰۵	۰/۰۴۴۷	۰/۰۴۴۲۳									
۱۰	۱/۵	۰/۰۵۲۱	۰/۰۵۲۹									

تحلیل اثر تنگ‌شدگی بر الگوی جریان و آشفتگی

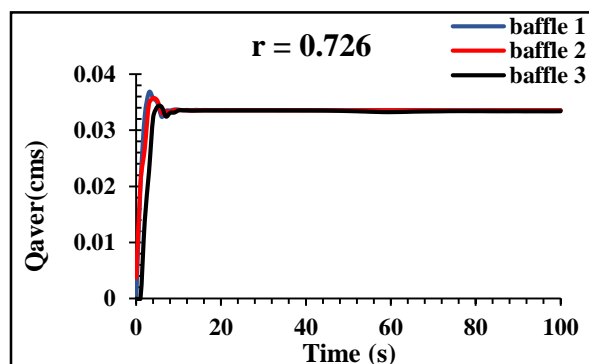
به‌منظور درک بهتر رفتار جریان در فلوم‌های SMBF تحت شرایط مختلف تنگ‌شدگی، توزیع دبی شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر آزمایشگاهی و همچنین تغییرات پارامترهای هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵-الف نمودار پراکندگی دبی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی را برای نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲ نشان می‌دهد. هم‌خوانی داده‌ها با خط ۱:۱ و انحراف کمتر از ۲ درصد، تطابق دقیق مدل عددی با نتایج تجربی را تأیید می‌کند. در ادامه، با افزایش نسبت تنگ‌شدگی به ۰/۴۶۷، شکل ۵-ب نشان می‌دهد که هرچند تطابق همچنان مناسب باقی می‌ماند، اما آشفتگی جریان و انرژی جنبشی موضعی افزایش می‌یابد و این امر موجب بالا رفتن خطای نسبی تا حدود ۱/۹۹ درصد می‌شود. در نسبت تنگ‌شدگی ۰/۵۶۱، اثرات تنگ‌شدگی بر سطح آزاد جریان و شدت تلاطم چشمگیرتر می‌شود. شکل ۵-ج نشان می‌دهد که با اعمال ضرایب تصحیح انرژی، مقدار MARE از ۹/۵۱ درصد به ۴/۸۵ درصد کاهش یافته است که نشان‌دهنده نقش اصلاحات انرژی در بهبود عملکرد مدل است. در نهایت، در شکل ۵-د عملکرد مدل عددی Flow3D در مقایسه با روابط موجود از جمله Carollo و همکاران (۲۰۱۶)، Vatankhah (۲۰۱۷)، Baiamonte و Ferro (۲۰۰۷) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که مدل عددی توسعه‌داده‌شده، با دستیابی به MARE کمتر از ۵ درصد، عملکرد دقیق‌تری در برآورد دبی دارد. به‌طور کلی، افزایش نسبت تنگ‌شدگی موجب تشدید گرادیان‌های سرعت، افزایش عدد فرود، و گسترش ناحیه‌های با انرژی جنبشی بالا در مقطع گلوگاه می‌شود که اگر به‌درستی در مدل لحاظ نشوند، می‌توانند منجر به افزایش خطا شوند. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی با در نظرگیری اصلاحات مناسب، می‌تواند اثرات غیرخطی هندسی و آشفتگی جریان را با دقت بالایی بازتولید کند.



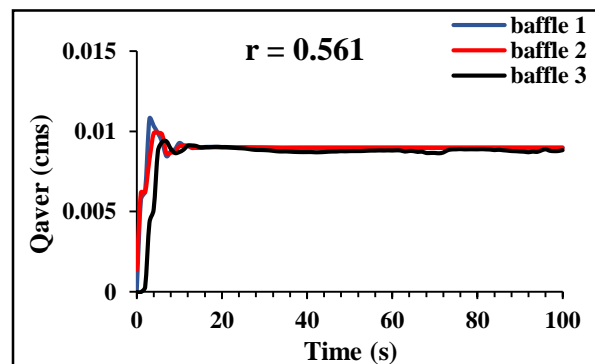
(ب)



(الف)



۶۷



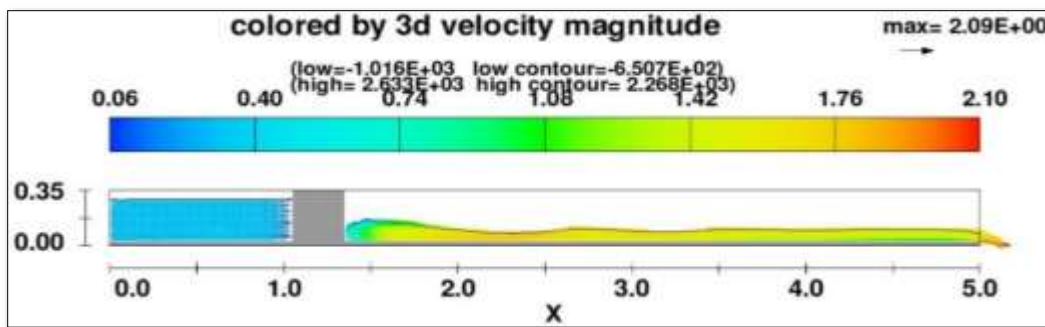
(د)

(ج)

شکل ۵- تحلیل هیدرولیکی و مقایسه دبی (الف): مقایسه دبی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی (نسبت تنگ‌شدگی ۰/۲۴۲)، (ب): تغییرات دبی با افزایش تنگ‌شدگی (نسبت تنگ‌شدگی ۰/۴۶۷)، (ج): اثر ضرایب تصحیح انرژی (نسبت تنگ‌شدگی ۰/۵۶۱)، (د): مقایسه با روابط موجود (نسبت تنگ‌شدگی ۰/۷۲۶)

تحلیل تغییرات سرعت جریان در طول کانال

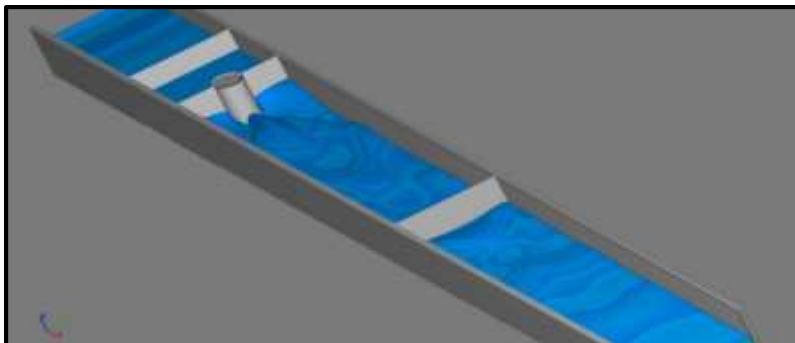
به منظور بررسی دقیق‌تر توزیع سرعت جریان در فلووم SMBF، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار FLOW-3D مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۶ نحوه توزیع سرعت جریان سیال در امتداد محور X طول کانال را نشان می‌دهد. این نمودار، تغییرات شدت جریان را در بازه ۰ تا ۵ متر نمایش می‌دهد که مقیاس رنگ‌ها بیانگر مقدار سرعت (بر حسب متر بر ثانیه) در نقاط مختلف مقطع عرضی جریان است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سرعت جریان در ناحیه ابتدایی کانال نسبتاً یکنواخت بوده، اما در نزدیکی گلوگاه فلووم (در حدود $X=1$ متر)، به دلیل تنگ‌شدگی مقطع، به حداکثر مقدار خود می‌رسد. پس از عبور از گلوگاه، به دلیل گسترش مجدد سطح مقطع و انتشار انرژی، سرعت جریان کاهش یافته و به حالت پایدارتری می‌رسد. این رفتار به خوبی نشان می‌دهد که طراحی هندسی فلووم SMBF موجب تمرکز سرعت در ناحیه گلوگاه شده و پتانسیل ایجاد جریان بحرانی را فراهم می‌سازد. همچنین، این توزیع سرعت نشان‌دهنده اثر مستقیم تنگ‌شدگی مقطع بر تشدید گرادپان‌های سرعت و افزایش آشفتگی در محدوده عبور جریان است. بنابراین، استفاده از شبیه‌سازی عددی نه تنها امکان تخمین دقیق دبی را فراهم می‌سازد، بلکه اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار دینامیکی سیال در کانال ارائه می‌دهد که دستیابی به آن‌ها در آزمایش‌های فیزیکی بسیار دشوارتر است.



شکل ۶- خطوط جریان در طول کانال نسبت به شدت سرعت سیال در طول مسیر کانال

هدف از انجام آزمایش‌ها در پژوهش‌ها، جمع‌آوری داده‌ها و دستیابی به نتایج مطلوب است. در هر آزمایش، نقاط کلیدی در نواحی خاصی وجود دارند که برداشت داده‌ها در این نقاط از اهمیت بیشتری برخوردار است. در آزمایش‌های هیدرولیکی، اهداف معمولاً شامل اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر دبی، فشار، عمق و غیره است. در شرایط آزمایش فیزیکی، از ابزارهای اندازه‌گیری برای ثبت این پارامترها استفاده می‌شود، اما در شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D، این فرآیند از طریق تعریف صفحات اندازه‌گیری (Baffle) انجام می‌شود. نرم‌افزار Flow-3D با عبور جریان سیال از صفحات Baffle، وضعیت هیدرولیکی سیال را ثبت و نمایش می‌دهد. بسته به هدف پژوهش، می‌توان میزان جریان عبوری از Baffle را تنظیم کرد. در شبیه‌سازی حاضر، جریان عبوری از این صفحات به صورت ۱۰۰ درصد دبی جریان تعریف شده است. در این پژوهش، سه صفحه Baffle در نقاط مشخصی قرار داده شدند:

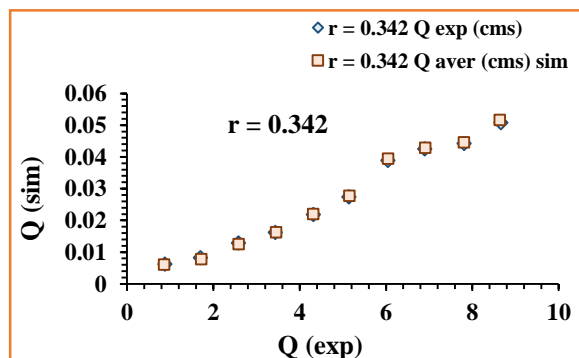
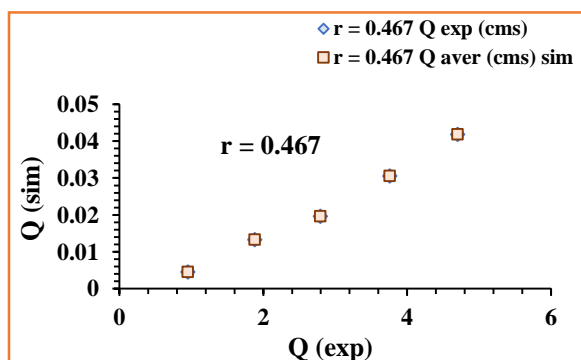
ابتدا در ابتدای جریان، سپس در مقطع تنگ‌شدگی، و در نهایت در مرکز تنگ‌شدگی (فاصله ۱/۲ متری) و پس از مقطع تنگ‌شدگی. نحوه قرارگیری و نتایج حاصل از اعمال این مقادیر در شکل ۷ نشان داده شده است.

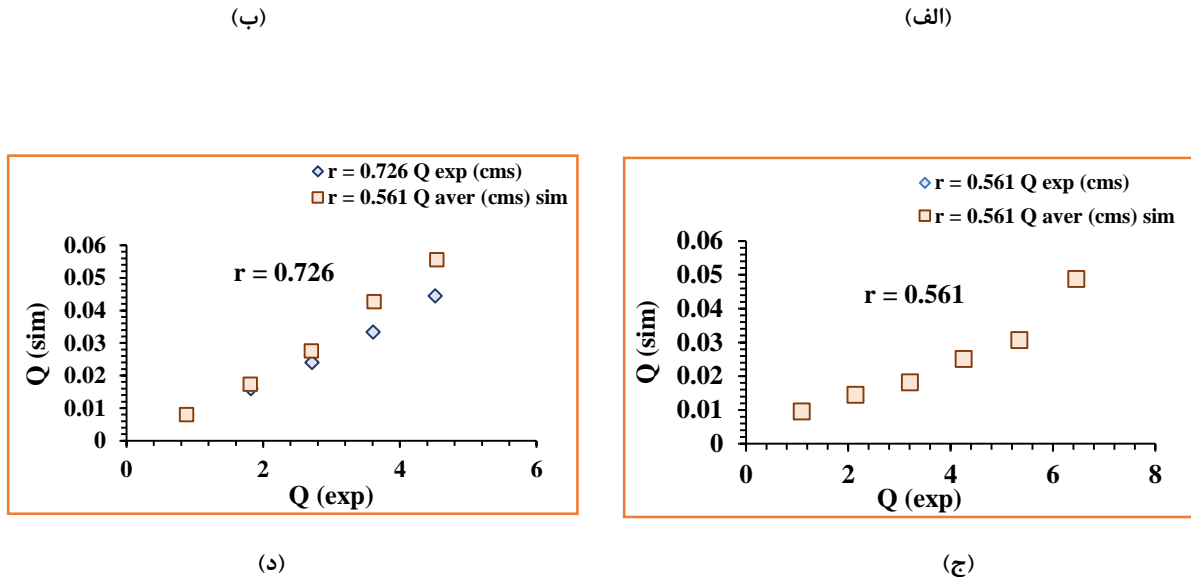


شکل ۷- نمای کلی از فلوم شبیه‌سازی شده

مقایسه دبی جریان در نسبت‌های مختلف تنگ‌شدگی

در ادامه تحلیل، دبی‌های شبیه‌سازی شده در چهار نسبت مختلف تنگ‌شدگی (B/B_0) (0.342، 0.467، 0.561 و 0.726) با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شدند تا تأثیر هندسه گلوگاه بر دقت تخمین جریان ارزیابی گردد. همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، در نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲ دبی شبیه‌سازی شده تطابق بسیار خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد و مقادیر در اطراف خط ۱:۱ پراکنده‌اند. با افزایش تنگ‌شدگی به ۰/۴۶۷ (شکل ۸-ب)، دقت مدل حفظ می‌شود، اما پراکندگی داده‌ها اندکی افزایش می‌یابد که ناشی از افت موضعی انرژی و تغییر الگوی جریان در گلوگاه است. در نسبت تنگ‌شدگی ۰/۵۶۱ (شکل ۸-ج)، افزایش محسوس در آشفتگی جریان، موجب افزایش خطای نسبی به حدود ۲/۶۳ درصد شده که همچنان در محدوده قابل قبول برای مدل‌های عددی در شرایط جریان آزاد است. در تنگ‌شدگی حداکثری ۰/۷۲۶ (شکل ۸-د)، انحراف نتایج شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر تجربی به حداکثر مقدار خود یعنی ۴/۸۵ درصد می‌رسد. این اختلاف عمدتاً به تأثیرات شدید فشار، انقباض جریان، و احتمال وقوع ناپایداری‌های موضعی در جریان بازمی‌گردد که بازتولید آن‌ها در مدل عددی چالش‌برانگیزتر است. به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که با وجود افزایش پیچیدگی جریان در تنگ‌شدگی‌های بیشتر، مدل عددی FLOW-3D قادر است دبی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند و تغییرات عملکرد فلوم SMBF را به‌خوبی بازتاب دهد. چنین تطابقی بیانگر آن است که هندسه ساده این فلوم در کنار اصلاحات عددی مناسب، می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر در اندازه‌گیری دبی در شرایط میدانی استفاده شود.





شکل ۸-مقایسه دبی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در نسبت‌های تنگ‌شدگی مختلف الف: نسبت تنگ‌شدگی (۰/۳۴۲) r، ب: نسبت تنگ‌شدگی (۰/۴۶۷) r، ج: نسبت تنگ‌شدگی (۰/۵۶۱) r، د: نسبت تنگ‌شدگی (۰/۷۲۶) r

بهبود تخمین دبی با روابط پیشنهادی

در پایه مدل ریاضی توسعه‌یافته در بخش بررسی دبی جریان در کانال تحت جریان آزاد بر طبق معادله انرژی و با هدف ارتقای دقت تخمین دبی در شرایط تنگ‌شدگی موضعی فلوم SMBF، ضرایب بی‌بعد جدیدی تعریف گردیدند که رفتار جریان و هندسه مقطع را بهتر توصیف می‌کنند. این ضرایب شامل ضریب اصلاح‌شده انرژی P و ضریب هندسی q هستند که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P = \left(\frac{2+K}{2}\right) \quad \text{و} \quad q = \left(\frac{K^3 r^2}{2}\right) \quad (14)$$

که در آن K ضریب تصحیح عمق (۰/۹۵ تا ۱/۰۵) و r نسبت تنگ‌شدگی گلوگاه است که از تقسیم عرض گلوگاه B_c بر عرض کانال اصلی B به‌دست می‌آید.

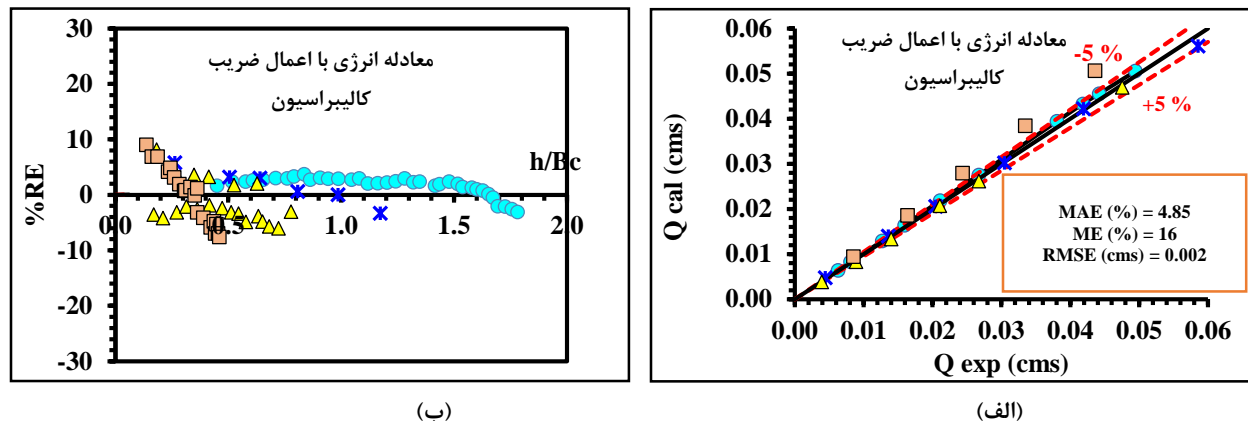
با استفاده از این ضرایب، رابطه‌ای بهینه برای تخمین دبی جریان در شرایط جریان آزاد با اعمال تنگ‌شدگی موضعی توسعه داده شد. این رابطه که مبتنی بر معادله انرژی تصحیح‌شده است، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q = \frac{B_c g^{0.5} h^{1.5}}{\left[\left(\frac{2+K}{6K}\right)\left(1+2\cos\left\{\frac{1}{3}\arccos\left(1-\frac{54K^3 r^2}{(2+K)^3}\right)\right\}\right)\right]^{1.5}} \quad (15)$$

که در آن h عمق جریان در بالادست، B_c عرض گلوگاه و g شتاب گرانش است.

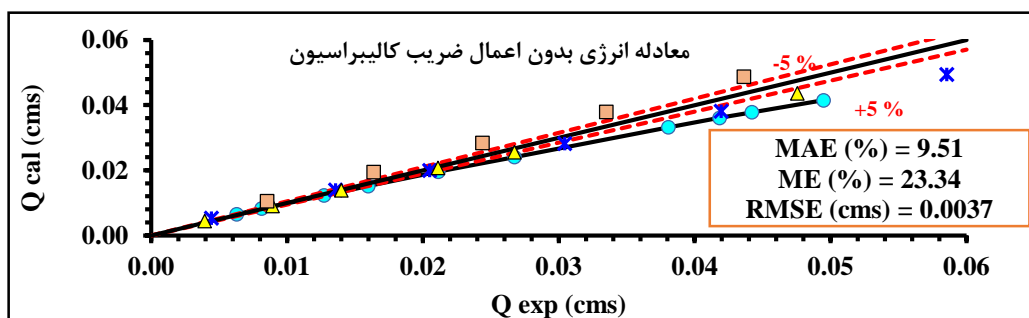
تحلیل نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از این رابطه موجب کاهش چشم‌گیر خطای نسبی در تخمین دبی می‌شود. در مقایسه با مدل‌های موجود مانند (Carollo et al. 2016 و Vatankhah 2017)، مدل پیشنهادی دقت بیشتری در بازه وسیعی از نسبت‌های تنگ‌شدگی ارائه داد و قادر بود رفتار غیرخطی جریان در ناحیه گلوگاه را به‌درستی بازسازی کند. بنابراین، رابطه پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک مدل نیمه‌تجربی کاربردی برای طراحی و کالیبراسیون فلوم‌های SMBF مورد استفاده قرار گیرد.

به منظور بررسی تأثیر اعمال ضرایب تصحیح بر دقت محاسبه دبی، روابط انرژی برای جریان آزاد در فلوم SMBF در دو حالت با و بدون اعمال ضریب تصحیح بررسی شدند. شکل ۹ این مقایسه را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. در شکل ۹-الف، دبی جریان با استفاده از رابطه انرژی، بدون اعمال ضریب تصحیح عمق محاسبه شده است. نتایج حاکی از آن است که پراکندگی زیاد نقاط، به ویژه در نسبت‌های تنگ‌شدگی کمتر، منجر به خطای نسبی بالا در تخمین دبی شده است. در مقابل، شکل ۹-ب نتایج حاصل از اعمال ضریب کالیبراسیون در رابطه انرژی را نشان می‌دهد که در آن، میزان انحراف بین دبی محاسبه شده و آزمایشگاهی به طور چشم‌گیری کاهش یافته است. در نسبت تنگ‌شدگی ۰/۷۲۶، خطای نسبی به حداقل مقدار خود یعنی ۴/۸۵ درصد رسید که نشان‌دهنده بهبود ۲/۴۷ درصد در مقایسه با حالت بدون تصحیح است.

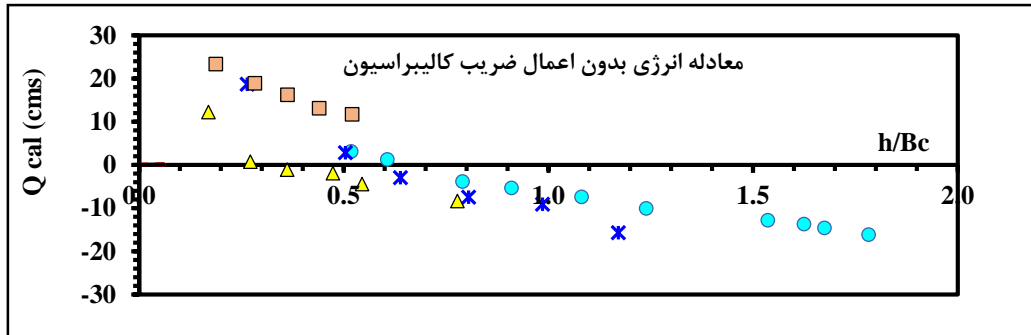


شکل ۹- مقایسه شرایط جریان و دبی محاسبه شده از رابطه انرژی در دو حالت (الف) بدون اعمال ضریب تصحیح، (ب) با اعمال ضریب تصحیح کالیبره شده

به منظور تحلیل دقیق‌تر خطا، شاخص‌های آماری در هر دو حالت بررسی شدند. شکل ۱۰-الف پراکندگی دبی محاسبه شده بدون ضریب تصحیح (Q_{cal}) را در برابر دبی آزمایشگاهی (Q_{exp}) نشان می‌دهد. در این حالت، خطای میانگین مطلق نسبی (MAE) برابر با ۹/۵۱ درصد، بیشینه خطا (ME) معادل ۲۳/۳۴ درصد و ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) برابر ۰/۰۳۷ cm/s گزارش شد. خطوط ± 5 درصد انحراف نیز در این شکل نمایش داده شده‌اند که نشان‌دهنده انحراف گسترده داده‌ها است. شکل ۱۰-ب نیز تغییرات دبی محاسبه شده را بر حسب نسبت h_c/B نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که با افزایش این نسبت، به ویژه در تنگ‌شدگی‌های بالاتر h_c/B انحراف از دبی واقعی افزایش می‌یابد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که عدم اعمال ضریب تصحیح در روابط انرژی منجر به خطاهای قابل توجه در تخمین دبی می‌شود و دقت مدل را به میزان ۲/۴۷ درصد کاهش می‌دهد. زیرا توزیع غیریکنواخت سرعت و عمق جریان در گلوگاه به درستی لحاظ نمی‌گردد. بنابراین، استفاده از ضرایب کالیبراسیون برای ارتقاء دقت مدل به ویژه در طراحی میدانی، ضرورت دارد.



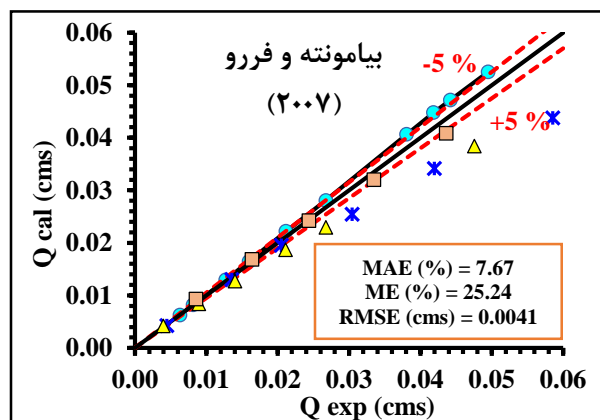
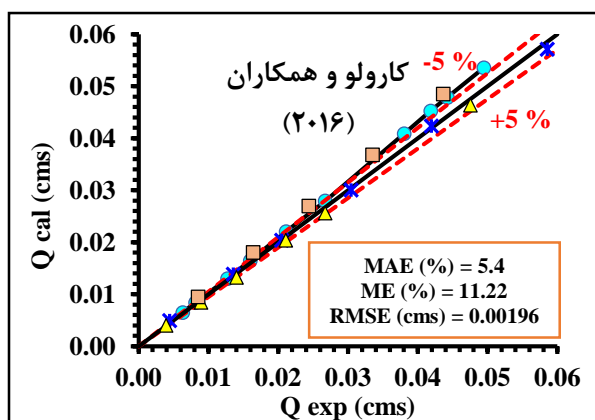
(الف)

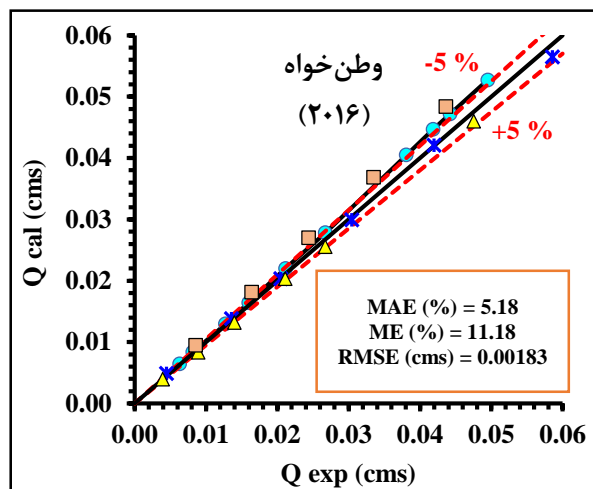


شکل ۱۰- تحلیل خطا و رفتار هیدرولیکی جریان بدون اعمال ضریب تصحیح، (الف): پراکندگی دبی محاسبه شده و آزمایشگاهی با خطوط $\pm 5\%$ انحراف (MAE = 9/51%, ME = 23/34%, RMSE = 0/0037 cm/s). (ب): تغییرات دبی محاسبه شده بر حسب نسبت (h/Bc)

نتایج این تحلیل نشان داد که عدم اعمال ضریب تصحیح عمق جریان در گلوگاه، دقت مدل را به میزان ۲/۴۷ درصد کاهش می دهد. این کاهش دقت به دلیل نادیده گرفتن اثرات هیدرولیکی نظیر توزیع غیر یکنواخت سرعت و عمق جریان در ناحیه تنگ شدگی رخ می دهد. بنابراین، ضرورت کالیبراسیون دقیق مدل های عددی با در نظر گیری ویژگی های هندسی و هیدرولیکی هر فلوم به وضوح مشهود است و استفاده از ضرایب اصلاحی برای بهبود دقت تخمین دبی تأکید می شود.

شکل ۱۱ مقایسه ای بین عملکرد روابط انرژی محققان مختلف در شرایط مشابه را ارائه می دهد. Baiamonte و Ferro (2007) رابطه ای مبتنی بر اصل انرژی بدون اعمال اثر پس زدگی توسعه دادند که میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) آن برابر با ۷/۶۷ درصد بود. Carollo و همکاران (۲۰۱۶) با اعمال اصلاحات هندسی و انرژی، دقت مدل را به ۴/۵ درصد رساندند. در مطالعه ای بعدی، Vatankhah (2017) نشان داد که روابط پیشین اثر پس زدگی (افزایش عمق بالادست ناشی از مقاومت جریان پایین دست) را لحاظ نکرده اند و با اصلاح آن، مدلی با MARE برابر ۵/۱۸ درصد پیشنهاد داد. شایان ذکر است که این مدل بر اساس داده های آزمایشگاهی Baiamonte و Ferro ارزیابی شده است. مقایسه این مدل ها در شکل ۱۱ نشان می دهد که مدل Carollo و همکاران (۲۰۱۶) دقت بالاتری نسبت به مدل های دیگر داشته و عملکرد بهتری در شرایط مشابه با پژوهش حاضر ارائه می دهد. این مقایسه اهمیت توسعه مدل های نیمه تجربی دقیق بر پایه داده های واقعی و اصلاحات عددی را برجسته می سازد.





شکل ۱۱- اعمال شرایط جریان آزمایشگاهی در روابط انرژی با اعمال ضریب کالیبراسیون

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار Flow-3D، رفتار هیدرولیکی جریان در فلوم‌های پرتابل SMBF را با نسبت‌های تنگ‌شدگی مختلف (۰/۳۴۲ تا ۰/۷۲۶) بررسی کرد و نتایج ارزشمندی در حوزه شبیه‌سازی عددی ارائه کرد. تحلیل‌ها نشان داد که افزایش نسبت تنگ‌شدگی به دلیل تشدید آشفتگی جریان و رشد گرادیان سرعت در گلوگاه، خطای نسبی تخمین دبی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. به‌طور خاص، خطای نسبی در نسبت تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲ معادل ۱/۹۹ درصد بود که با افزایش این نسبت به ۰/۷۲۶، به ۴/۸۵ درصد رسید؛ یعنی افزایشی مطلق به میزان ۲/۸۶ درصد. این یافته بر ضرورت کالیبراسیون دقیق مدل‌های عددی در شرایط هیدرولیکی پیچیده تأکید دارد. یکی از دستاوردهای نوآورانه این مطالعه، بررسی تأثیر ضرایب تصحیح انرژی بر ارتقای دقت تخمین دبی بود. نتایج نشان داد که اعمال این ضرایب، میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) را از ۹/۵۱ درصد (بدون تصحیح) به ۴/۸۵ درصد کاهش داد که بهبود مطلق ۴/۶۶ درصدی را نشان می‌دهد. این پیشرفت به‌ویژه در نسبت‌های تنگ‌شدگی بالاتر (مانند ۰/۷۲۶) آشکار بود، جایی که انحراف دبی محاسبه‌شده از مقادیر آزمایشگاهی با میانگین خطای نسبی ۴/۸۵ درصد به‌طور قابل‌توجهی کم شد. این امر اهمیت در نظر گرفتن اثرات هیدرولیکی، نظیر توزیع غیریکنواخت سرعت و عمق جریان در گلوگاه، را برجسته می‌کند. از دیدگاه هیدرولیکی، افزایش نسبت تنگ‌شدگی منجر به رشد ۳۲/۵ درصدی عدد فرود جریان در گلوگاه شد که جریان فوق‌بحرانی را تشدید کرد و الگوی آشفتگی را تقویت نمود. همچنین، انرژی جنبشی ناشی از آشفتگی در این شرایط تا ۲۰ درصد افزایش یافت، که تأثیر مستقیمی بر دقت مدل‌های عددی داشت. نرم‌افزار Flow-3D با قابلیت شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان و لحاظ کردن اثرات آشفتگی، دقت زیادی در بازسازی این شرایط از خود نشان داد و خطای نسبی را در تمامی حالات زیر ۵ درصد حفظ کرد. این عملکرد، Flow-3D را به ابزاری مؤثر برای تحلیل جریان‌های پیچیده تبدیل می‌کند. از منظر کاربردی، این پژوهش راهکارهای نوینی برای طراحی فلوم‌های پرتابل ارائه داد. به عنوان مثال، با استفاده از ضرایب تصحیح پیشنهادی، دبی جریان با خطای نسبی کمتر از ۵ درصد قابل تخمین است که این سطح از دقت در مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی نقش مهمی ایفا می‌کند. شبیه‌سازی جریان در فلوم‌های SMBF با نسبت‌های تنگ‌شدگی ۰/۳۴۲ تا ۰/۷۲۶، امکان پیش‌بینی دقیق رفتار

هیدرولیکی را فراهم کرد. با وجود تمرکز بر جریان آزاد، مدل پیشنهادی با خطای نسبی کمتر از ۵ درصد، پتانسیل تعمیم به شرایط پیچیده‌تر را دارد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، اثرات جریان مستغرق و پارامترهای محیطی نیز مورد بررسی قرار گیرند.

منابع

- امین پور، ی.، وطن خواه، ع.ر.، فرهودی، ج. ۱۳۹۸. تحلیل آبگذری فلوم‌های نوع SMBF در شرایط جریان آزاد و مستغرق. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۷): ۱۶۳۵-۱۶۴۹.
- شاهی نژاد بابک، پارسایی عباس، یونسی حجت الله، شمسی زهرا، ارشیا آزاده. ۱۴۰۱. شبیه‌سازی و تخمین دبی جریان در فلوم‌های SMBF به کمک مدل‌های محاسبات نرم. علوم آب و خاک، ۲۶(۴): ۹۱-۱۰۴.
- خیبر، ه.، سجادی، س.م.، احدیان، ج.، قمشی، م. ۱۴۰۳. بررسی ضریب دبی و راندمان سرریزهای جانبی لولایی با آستانه. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۳(۲): ۷۲-۸۸.
- حشمت پور، ع. و سجادی، س.ج. ۱۴۰۳. بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب کشاورزی در رودخانه گرگان‌رود با استفاده از قوانین فازی. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۳(۲): ۳۸-۵۶.
- حاج سید علی خانی، ن.، سعیدیان، ح. ۱۴۰۳. نقش عمق آبرفت و رسوبات در مکانی‌یابی سدهای زیرزمینی جهت تأمین پایدار منابع آبی مناطق کویری (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کشیت استان کرمان). رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۳(۲): ۱-۱۶.
- Abt, S.R., Florentin, C.B., Genovez, A., Ruth, B.C. 1995. Settlement and submergence adjustments for Parshall flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(5): 317-321.
- Abt, S.R., Ruth, B.C., Mitchell, C.M., Lipscomb, C.M. 1997. Condition assessment of Parshall flumes in Colorado, part 2. *Water Operation and Maintenance Bulletin*, No. 180, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Abt, S.R., Skowron, E.M. 2001. Revising the cutthroat flume settlement rating adjustment procedure. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127(1): 54-58.
- Ackers, P., Harrison, A.J.M. 1963. Critical-depth flumes for flow measurements in open channels. *Hydraulics Research Paper No. 5*, Hydraulics Research Station, Wallingford, Berkshire, England.
- Aminpour, Y., Vatankhah, A.R., Farhoudi, J. 2019. Discharge Analysis of SMBF Flumes in Free and Submerged Flow Conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7): 1635-1649. (In Persian).
- Baiamonte, G., Ferro, V. 2007. Simple flume for flow measurement in sloping open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(1): 71-78.
- Bos, M.G. 1976. Discharge measurement structures. *International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI)*, Wageningen.
- Carollo, F.G., Di Stefano, C., Ferro, V., Pampalone, V. 2016. New stage-discharge equation for the SMBF flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5): 04016005.
- Cone, V., 1917. *The venturi flume*. U.S. Government Printing Office.
- Cox, A.L., Thornton, C., Abt, S. 2013. Supercritical flow measurement using a large Parshall flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(8): 655-662.
- Davis, R.W., Deutsch, S. 1980. A numerical-experimental study of Parshall flumes. *Journal of Hydraulic Research*, 18(2): 135-151.
- Di Stefano, C., Ferro, V., Carollo, F.G. 2008. Field testing of a simple flume (SMBF) for flow measurement in open channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2): 235-240.
- Flow Science. 2023. *FLOW-3D user manual (Version 12.0)*. Flow Science Inc., Santa Fe, NM.
- Genoves, A., Abt, S., Florentin, B., Garton, A. 1993. Correction for settlement in a Parshall flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(6): 1081-1091.
- Haj Seyed Ali Khani, N., Saeidian, H. 2025. The role of alluvial and sediments depth in locating underground dams for sustainable supply of water resources in desert areas (Case study: Keshit watershed in Kerman province). *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(2): 1-16. (In Persian).
- Heiner, B.J., Barfuss, S.L. 2011. Parshall flume discharge corrections: Wall staff gauge and centerline measurements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(12): 779-792.
- Heshmatpour, A., Sajjadi, S.J. 2024. Investigation of temporal and spatial changes in agricultural water quality in the Gorganrood River using fuzzy rules. *Approaches in Water and Environmental Engineering*, 3(2): 23-39.

- Heshmatpour, A., Sajjadi, S.J. 2025. A survey on spatial and temporal variations of Agricultural water quality in Gorganrood River using fuzzy rules. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(2): 38–56. (In Persian).
- Hirt, C.W., Nichols, B.D. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1): 201–225.
- Keller, R.J. 1984. Cut-throat flume characteristics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9): 1248–1263.
- Kheybar, H., Sajjadi, S.M., Ahadiyan, J., Ghomeshi, M. 2025. Investigating the Discharge Coefficient and Efficiency of the Pivot Side Weirs with Threshold. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(2): 72–88. (In Persian).
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., Awazu, S. 1990. Free and submerged hydraulic jumps in rectangular channels. Report 35, Institute of Science and Technology, Nihon University, Japan.
- Parshall, R.L. 1926. The improved Venturi flume. *Transactions of the ASCE*, 89: 841–851.
- Parshall, R.L., Rohwer, C. 1921. The Venturi flume for measuring irrigation water. *Colorado Agricultural Experiment Station Bulletin*, 265: 1–24.
- Shahi Nezhad, B., Parsaei, A., Younesi, H.A., Shamsi, Z., Arshia, A. 2022. Modeling and Estimating Flow Rate in SMBF Flumes using Soft Computation Models. *Journal of Water and Soil Science*, 26(4): 91–104. (In Persian).
- Skogerboe, G.V., Bennett, R.S., Walker, W.R. 1967. Development of the cutthroat flume for flow measurement. Utah State University, Logan, UT.
- Yakhot, V., Orszag, S.A. 1986. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, 1(1): 3–51.