

Numerical Modeling of the Performance of a Rotating Semi-Circular Gate in a Trapezoidal Canal under Free Flow Conditions

Samira Yousefi¹, Hojjat Allah Yonesi^{2*}, Babak Shahinejad³, Amirhamzeh Haghiabi⁴, Rasoul Daneshfaraz⁵

1- Ph.D. Candidate in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

4- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

5- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

* yonesi.h@lu.ac.ir

Received: 29 May 2025

Revised: 30 June 2026

Accepted: 12 July 2026

Discussion: 22 December 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: With population growth and the decline in available water resources, optimal management of water resources, enhancement of hydraulic performance, and improvement of water distribution efficiency have become essential. Semi-circular radial gates require less operating force due to their rotational movement around a vertical axis. On the other hand, trapezoidal canals are the most common canal type used in irrigation and drainage networks due to their hydraulic and structural stability. Since Experimental studies are costly and time-consuming, numerical simulation is widely used to obtain reliable results for evaluating hydraulic behavior. Thus, the present study aims to numerically investigate the performance of a semi-circular rotating gate in a trapezoidal canal under free flow conditions using Flow-3D software. The main objectives include evaluating turbulence models, analyzing stage-discharge relationships, identifying the inflection angle, and assessing energy losses for different wall slopes, transition lengths, and gate opening angles. The results of the numerical model were validated by comparing the simulation results with experimental data. Following successful validation, this numerical approach can be used as a reliable alternative to costly experimental investigations.

Methodology: Using galvanized steel sheets inside a rectangular flume, trapezoidal canals with bottom

widths of 0.2, 0.3, and 0.4 m and corresponding side slopes of 0.44, 0.31, and 0.20 were constructed. To connect the canal to the semi-circular rotating gate, three gradual transition lengths of 0.6, 0.9, and 1.2 m were used. In the laboratory, flow depth was measured using a point gauge with an accuracy of 0.1 mm, discharge was measured with an electromagnetic flowmeter accurate to 0.01 lit/sec, and velocity measurements were conducted using a velocity profiler. Numerical modeling was performed using Flow-3D software. Gate opening angles ranged from 50° to 80° at 5° increments, and discharge rates ranged from 0.024 to 0.036 m³/s at increments of 0.002m³/s. Mesh size was determined through a mesh convergence analysis. Using three turbulence models-standard k- ϵ , RNG, and LES-the water surface profile along the canal and the vertical velocity profile at the 2 m section were computed, and the most appropriate model for the simulation was selected. Finally, using the numerical model results, the effects of the investigated parameters on water surface profiles, transverse profile variations, stage-discharge relationships, and energy loss were investigated and compared with experimental data.

Results and Discussion: Comparison of the numerical and experimental results showed that all three turbulence models (standard k- ϵ , RNG k- ϵ , and LES) systematically underpredicted water depth and overpredicted velocity. This error arises from the isotropic Reynolds stress assumption in RANS models, which is inconsistent with the highly anisotropic flow in the jet impingement zone. For the steeper side slope (0.44), the flow converges toward the canal centerline, reducing jet anisotropy. For the milder side slope (0.20), the jets spread more freely, creating a stronger impingement zone and greater anisotropy. LES, by directly resolving the three-dimensional flow structure, better represent this anisotropy and provide superior predictions of velocity profiles. However, RNG performs better for water surface profiles and energy losses due to its correction term in the dissipation rate equation.

Downstream of the gate, impingement of flows from both sides creates turbulence and a hydraulic jump (hump), whose location depends on the gate opening angle. As the opening angle increases, the upstream-downstream depth difference decreases, and turbulence reduces. The side-wall slope significantly affects the flow field; as the slope decreases from 0.44 to 0.20, the cross-sectional area increases, the flow becomes less concentrated, and impingement intensifies, thereby increasing turbulence.

The canal slope dominates the effect of transition length. With longer transitions, flow becomes more uniform and fully developed, reducing downstream turbulence. For the steeper side slope (0.44),, increasing the transition length has little effect. Maximum energy loss occurs at L=0.6 m.

As the bottom width increases (slope decreases), flow capacity decreases, and the slope of the stage-discharge curve increases, meaning that relatively small discharge changes cause significant depth changes. At small opening angles, the gate acts like an orifice with very low flow efficiency. As the opening angle increases, the effective outlet area and flow capacity increases. The results indicate a change in flow hydraulic behavior within the gate-opening-angle range of 60°–65°.

Conclusion: Comparison of the numerical and experimental results showed that no single turbulence model is superior in all aspects. The appropriate model should be selected based on the output required. Flow behavior strongly depends on the side slope. In the mild slope (0.20), jets impinge with maximum energy, creating a highly turbulent zone with non-uniform Reynolds stress distribution. As the gate opening angle increases, the stage-discharge curve slope decreases. At small angles, the gate acts as an orifice. Numerical model predictions showed good agreement with experimental data.

Keywords: Rotating Semi-Circular Gate, trapezoidal canal, Turbulence model, stage-discharge curve, energy loss.

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

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

Data Availability Statements: The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Conducting the experiments, data analysis, and writing the initial draft of the manuscript.

Second Author: Proposing the idea, supervising the experiments, reviewing and analyzing the results, and final editing of the manuscript.

Third Author: Reviewing and analyzing the results, contributing to the final editing of the manuscript.

Fourth Author: Reviewing and analyzing the results.

Fifth Author: Reviewing and analyzing the results.

مدل سازی عددی عملکرد دریاچه نیم دایره ای دوار در کانال دوزنقه ای با شرایط جریان آزاد

سمیرا یوسفی^۱، حجت الله یونسی^{۲*}، بابک شاهی نژاد^۳، امیر حمزه حق آبی^۴، رسول دانشفراز^۵

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

۵- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

* yonesi.h@lu.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱

چکیده: با توجه به کاربرد گسترده کانال های دوزنقه ای در شبکه های انتقال و توزیع آب، هدف این پژوهش بررسی عملکرد هیدرولیکی دریاچه نیم دایره ای دوار نصب شده در یک کانال دوزنقه ای با استفاده از نرم افزار FLOW-3D است. مدل سازی عددی بر اساس داده های آزمایشگاهی برای کانالی با سه شیب دیواره جانبی و سه طول تبدیل تدریجی در محل اتصال کانال به دریاچه انجام شد. در این مطالعه، اثر زاویه بازشدگی دریاچه، طول تبدیل تدریجی، شیب دیواره جانبی و دبی جریان بر پروفیل سطح آب، منحنی دبی-اشل و افت کل انرژی بررسی شد. مقایسه مدل های آشفتگی نشان داد که مدل RNG در مقایسه با مدل های LES و K-ε، با خطایی کمتر از ۱۰ درصد، دقت بیشتری در پیش بینی پروفیل سطح آب دارد. نتایج همچنین نشان داد که شیب دیواره جانبی مهم ترین پارامتر مؤثر بر رفتار هیدرولیکی جریان است و میزان تأثیر طول تبدیل تدریجی به شیب دیواره جانبی وابسته است؛ به گونه ای که در کانال هایی با شیب جانبی بیشتر، افزایش طول تبدیل تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای هیدرولیکی ندارد. منحنی دبی-اشل نیز بیانگر تغییر رفتار هیدرولیکی جریان در محدوده زاویه بازشدگی ۶۰ تا ۶۵ درجه است. علاوه بر این، نتایج تحلیل آماری نشان داد که مدل عددی توانسته است منحنی دبی-اشل و افت کل انرژی را با دقتی بیش از ۹۰ درصد شبیه سازی کند.

کلیدواژگان: دریاچه نیم دایره ای، کانال دوزنقه ای، مدل آشفتگی، افت انرژی، منحنی دبی-اشل.

۱- مقدمه

آبیاری و زهکشی برای اندازه گیری جریان و کنترل سطح آب از سازه های مختلفی مانند سرریزها، پارشال فلوم ها، فلوم ها، روزنه ها، دریاچه ها و ... استفاده می شود. تا کنون بررسی های فراوانی بر روی رفتار جریان تحت تأثیر دریاچه های کشویی، قطاعی و سالونی انجام شده است. Kim (2007) برای تعیین ویژگی های جریان عبوری از دریاچه کشویی شامل ضریب فشردگی، ضریب دبی و توزیع

با افزایش جمعیت و کاهش منابع آبی نیاز به مدیریت بهینه منابع آب، افزایش عملکرد هیدرولیکی و بالا بردن راندمان توزیع آب در شبکه های آبیاری در ایران ضروری می باشد. با توجه به سیستم حقایبه ای و رعایت توزیع عادلانه در شبکه های آبیاری و زهکشی، افزایش دقت در اندازه گیری دبی و نظارت سطح آب امری ضروری است. در نظام های

استهلاک انرژی، طول پرش و نسبت عمق های مزدوج با استفاده از مدل FLOW-3D مورد بررسی قرار دادند. آنان نشان دادند: با افزایش شیب جانبی میزان تنش برشی و نسبت عمق های مزدوج افزایش و میزان هدررفت انرژی و طول پرش هیدرولیکی کاهش می یابد.

Moghtaderi and Valizadegan (2020) ویژگی های هیدرولیکی دریاچه های آویزان در انتهای کانال های دوزنقه ای را مورد ارزیابی قرار داده و با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی و بنا بر آزمایش های متعدد، معادله هایی برای تخمین دبی جریان برای هر شیب جانبی توسعه و با استفاده از پنج فرم رابطه دبی - اشل رابطه های جداگانه ای، برای هر شیب جانبی ارائه نمودند.

Guo et al. (2021) به بررسی و ارزیابی و واسنجی دبی جریان دریاچه های شعاعی در شرایط مستغرق پرداختند و معیاری جدید بر مبنای عدد فرود جت و سازوکار استهلاک انرژی ارائه کردند. این معیار جریان مستغرق را به دو دسته نیمه مستغرق و به طور کامل مستغرق تفکیک می کند آنان به ترتیب سه معادله مجزای دبی - اشل برای جریان آزاد، نیمه مستغرق و به طور کامل مستغرق توسعه دادند. اعتبارسنجی این روش شناسایی جریان، با استفاده از داده های آزمایشگاهی انجام شده است.

Daneshfaraz et al. (2022) نیز در پژوهشی آزمایشگاهی، تأثیر آستانه غیر هم عرض و با هندسه متفاوت را بر الگوی جریان و ضریب دبی دریاچه کشویی بررسی کردند. نتایج ارزیابی آنان نشان داد که الگوی جریان عبوری از دریاچه کشویی تابع شکل هندسی آستانه و عرض آن می باشد. همچنین ضریب دبی در آستانه نیم استوانه نسبت به آستانه استوانه ای، هرمی و مکعب مستطیلی بیشترین مقدار را دارد. آنان یک رابطه چند جمله ای که تابع شکل هندسی و عرض آستانه است را برای برآورد ضریب دبی ارائه کردند.

karamdokht Behbahani et al. (2024) به بررسی هیدرولیک جریان عبوری از دریاچه های سالونی مستطیلی چنگانه در حالت جریان آزاد و مستغرق با استفاده از نرم افزار Flow3D پرداختند. آنان فراسنجه های هیدرولیکی جریان مانند سرعت، استهلاک انرژی و گردابه های جریان

فشار روی دریاچه از مدل عددی FLOW-3D استفاده کرد. ایشان محدوده شبیه سازی جریان را تابعی از میزان بازشدگی دریاچه در نظر گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش بازشدگی نسبی دریاچه، ضریب فشردگی کاهش پیدا می کند، به شرطی که بازشدگی نسبی کمتر از ۰/۴ باشد و اگر این نسبت بیشتر از ۰/۴ باشد، ضریب فشردگی افزایش می یابد. ایشان علت این تغییرپذیری ها را هدررفت انرژی ناشی از اصطکاک و نوسان های سطح آب در بالادست دریاچه، در بازشدگی های بالا دانست.

Cassan and Belaud (2012) با استفاده از معادله های ناویر - استوکس یک مدل عددی دو بعدی برای بررسی جریان عبوری از دریاچه کشویی در حالت مستغرق پیشنهاد کردند. مقایسه بین نتایج مدل و روش انرژی - ممنت نشان داد که در هر دو روش باید ضریب فشردگی در جریان مستغرق با جریان آزاد متفاوت باشد. همچنین با استفاده از نتایج آنها که از نرم افزار فلونت به دست آمده است، پروفیل سرعت بالادست دریاچه کشویی در جریان های آزاد و مستغرق با درستی مناسبی برآورد می شود.

Bijankhan et al. (2013) با استفاده از فرضیه خودمانایی ناقص و فرضیه باکینگهام رابطه ای برای دریاچه قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه کردند. رابطه پیشنهادی آنان نه تنها از رابطه ارائه شده Ferro (2001) که دبی جریان مستغرق را تنها تابعی از اختلاف عمق آب بالادست و پایین دست دریاچه در نظر می گیرد، از دقت بیشتری برخوردار است بلکه به طور پیوسته می تواند دبی عبوری را در گستره کاملی از جریان آزاد تا مستغرق و حتی در شرایط انتقالی به درستی برآورد کند.

Heidari et al (2020) تأثیر شکل، ارتفاع و موقعیت آستانه بر جریان عبوری از دریاچه قطاعی در شرایط جریان آزاد را در محیط نرم افزار Flow3D مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان می دهد که احداث آستانه سبب افزایش ضریب دبی می شود. ارتفاع و شکل آستانه تأثیر بیشتری بر این ضریب داشته است.

Ebrahimian et al. (2019) در کلنال دوزنقه ای در شرایط جریان آزاد و بازشدگی ثابت دریاچه، تأثیر شیب جانبی کانال را بر تنش بستر و ویژگی های پرش هیدرولیکی از جمله

تجربی، عملکرد مدل پیشنهادی را ارزیابی کرده و نشان دادند که این مدل با خطایی کمتر از ۴/۵۱ درصد، دارای دقت بالایی در پیش بینی دبی است.

(Marashi (2019) سازه ای جدید با عنوان دریاچه نیم دایره ای دوار را برای نظارت و اندازه گیری جریان در کنال هایی با مقطع نیم دایره ای معرفی کرد. این دریاچه به گونه ای طراحی شده است که شکل آن با مقطع کانال همخوانی داشته باشد و از این طریق عملکرد هیدرولیکی مناسب تری فراهم کند. در این پژوهش، اثر گذاری دبی جریان و زاویه بازشدگی دریاچه بر عمق جریان و عملکرد هیدرولیکی دریاچه در یک کانال نیم دایره ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، نمودار دبی-اشل مشابه نمودار هنری برای این دریاچه ارائه شد که امکان تعیین دبی جریان بر پایه عمق آب و میزان بازشدگی دریاچه را فراهم می کند. همچنین، روش هایی برای محاسبه دبی عبوری از دریاچه بر پایه رابطه های دبی-اشل و معادله های جریان در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه شد. در ادامه، تغییرپذیری ضریب دبی در حالت استفاده از معادله های جریان زیرگذر و روگذر، همچنین میزان استهلاک انرژی در زاویه های مختلف بازشدگی دریاچه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که رفتار هیدرولیکی دریاچه در زاویه های بازشدگی کمتر از ۶۰ درجه با رفتار آن در زاویه های بیش از ۶۰ درجه تفاوت شایانی دارد. در شکل ۱ نمایی از دریاچه دوار به کار رفته در آزمایش های ایشان نشان داده شده است.

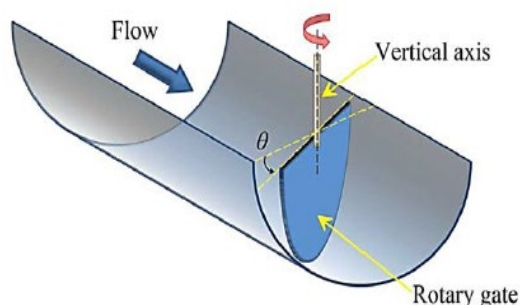


Fig. 1 Rotary gate in a circular canal (Marashi et al., 2021a)

شکل ۱ دریاچه دوار در کانال نیم دایره (Marashi et al., 2021a)

در سازه ذکر شده را در حالت جریان با استغراق ۷۰ درصد، در سه زاویه بازشدگی و سه دبی متفاوت با جریان آزاد با استفاده از نرم افزار شبیه سازی و مقایسه کردند. نتایج بررسی نشان می دهد که در حالت استغراق مقدار سرعت و استهلاک انرژی نسبت به حالت آزاد کمتر است. همچنین با افزایش زاویه بازشدگی و کاهش دبی این مقادارها کاهش خواهند داشت. در حالت جریان آزاد نسبت به مستغرق گردابه هایی با قدرت بالا و میدان گسترده تر در کنال وجود دارد که در حالت مستغرق قدرت آن کاهش می یابد. (Hashem et al. (2024) نیز در یک بررسی تجربی، عملکرد هیدرولیکی دریاچه های کشویی با مقطع مثلثی را به صورت منفرد و در آرایش زیگزاگی بررسی کردند. آنان با انجام ۲۰۰ آزمایش بر روی دریاچه هایی با زاویه رأس ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه و ارتفاع های مختلف بازشدگی در شرایط جریان آزاد، نشان دادند که دریاچه های با زاویه رأس کوچک تر و آرایش تک چرخه، عملکرد بهتری از نظر ظرفیت عبور جریان دارند. همچنین، رابطه ای تجربی برای برآورد ضریب دبی ارائه کردند که دارای میانگین خطای ۵/۹۵ درصد بود.

(Seyedzadeh et al. (2024) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی، جریان عبوری از دریاچه های کشویی موازی نصب شده بر روی سرریز تاج پهن را بررسی کردند. آنان رابطه هایی را برای تعیین ضریب دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق برای این سازه مرکب سرریز-دریاچه ارائه کردند. نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که رابطه های پیشنهادی آن ها ضریب دبی را با میانگین خطایی بین ۳/۸ تا ۴/۵ درصد برآورد می کند.

(Liu et al. (2025) با بهره گیری از معادله های انرژی و مومنوم، مدل جدیدی برای برآورد دبی عبوری از دریاچه های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه کردند. در این مدل، اثر عامل های موثری مانند: انقباض مقطع جریان، ضریب تصحیح انرژی، ضریب تصحیح مومنوم و هدررفت انرژی لحاظ شد. سپس با استفاده از شبیه سازی عددی، رابطه های مستقلی برای برآورد ضریب انقباض، ضریب کوریولیس، ضریب بوسینسک و هدررفت انرژی استخراج کردند. در نهایت، با انجام آزمایش های

عملکرد دریچه به صورت کمی تحلیل شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی، بهره‌برداری و واسنجی دریچه‌های نیم‌دایره‌ای دوار در کانال‌های دوزنقه‌ای فراهم آورد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی عددی جریان سه‌بعدی با سطح آزاد در هندسه پیچیده کانال دوزنقه‌ای مجهز به دریچه نیم‌دایره‌ای دوار، از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شد. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از روش حجم محدود، معادله‌های حاکم بر جریان شامل معادله‌های پیوستگی و ناویر-استوکس را به صورت عددی حل می‌کند. این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد، از VOF استفاده می‌کند که امکان ردیابی دقیق سطح آزاد را فراهم می‌سازد. همچنین، به منظور مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده و نمایش دقیق مرزهای غیرقابل تغییر بر روی شبکه کارترین، از روش FAVOR بهره گرفته می‌شود. ترکیب این دو روش، شبیه‌سازی هم‌زمان جریان با سطح آزاد و هندسه‌های پیچیده را با دقت مناسب امکان‌پذیر می‌کند. معادله‌های حاکم بر جریان، شامل معادله پیوستگی و معادله‌های ناویر-استوکس، در رابطه‌های زیر ارائه شده‌است:

$$\nabla \cdot (U A) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (U \cdot \nabla) (A U) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + G + f \quad (2)$$

در این معادله‌های U مولفه سرعت در راستای x, y, z و V_F کسر حجمی سیال در دسترس، A کسر سطحی قابل دسترس برای جریان در همه جهات، ρ چگالی سیال، P فشار، G شتاب گرانش، f عبارت‌های گرانشی شامل تنش‌های لزج و تنش‌های آشفتگی هستند. معادله‌های ناویر استوکس میانگین‌گیری شده زمانی، بیانگر حرکت میانگین جریان آشفته هستند. برای شبیه‌سازی آشفتگی در این تحقیق از سه روش مختلف استفاده شد: مدل دو معادله K- ϵ استاندارد (با فرض یکسان بودن تنش‌های رینولدز در همه جهات‌های معروف به فرض بوسینسک)، مدل RNG (نسخه اصلاح شده K- ϵ با اضافه شدن عبارت

Kheiraie et al. (2026) دریچه نیم‌دایره‌ای دوار را در کانال مستطیلی که با سه طول تبدیل تدریجی متفاوت متصل شدند استفاده شده و عملکرد دریچه را در زاویه‌های مختلف بازشدگی، با دبی‌های متفاوت در شرایط جریان مستغرق ارزیابی شد. نتایج ایشان نشان داده است که ضریب دبی جریان با افزایش زاویه بازشدگی دریچه افزایش و با افزایش طول تبدیل کاهش می‌یابد. همچنین عامل کاهش دبی با افزایش نسبت استغراق کاهش داشته است. نتایج آنان نشان داد که هدررفت انرژی تابعی از زاویه بازشدگی دریچه و نسبت استغراق است و نسبت طول تبدیل، تاثیر چندانی بر مقدار هدررفت انرژی ندارد.

با توجه به کاربرد گسترده کانال‌های دوزنقه‌ای در شبکه‌های آبیاری و زهکشی و ضرورت کنترل و اندازه‌گیری جریان در این کانال‌ها، استفاده از دریچه‌ها به عنوان سازه‌های تنظیم و اندازه‌گیری جریان دارای اهمیت ویژه‌ای است. دریچه نیم‌دایره‌ای دوار به دلیل چرخش حول محور قائم، برای باز و بسته شدن به نیروی کمتری نیاز دارد و در مقایسه با بسیاری از دریچه‌های متداول، بهره‌برداری آسان‌تر و کارآمدتری را فراهم می‌کند. با این حال، به دلیل تطابق نداشتن مقطع نیم‌دایره‌ای دریچه با مقطع دوزنقه‌ای کانال، به کارگیری تبدیل‌های تدریجی در بالادست و پایین‌دست دریچه برای تغییر تدریجی مقطع جریان از دوزنقه به نیم‌دایره اجتناب‌ناپذیر است. با وجود اهمیت این موضوع، تاکنون پژوهش جامعی درباره تأثیر هم‌زمان هندسه کانال و ویژگی‌های تبدیل تدریجی بر عملکرد هیدرولیکی دریچه نیم‌دایره‌ای دوار در کانال‌های دوزنقه‌ای گزارش نشده است.

بر این مبنای، پژوهش انجام شده با هدف بررسی عملکرد هیدرولیکی دریچه نیم‌دایره‌ای دوار در یک کانال دوزنقه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شد. در این تحقیق، شیب جانبی دیواره کانال، طول تبدیل تدریجی بالادست و زاویه بازشدگی دریچه به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند و تاثیر آن‌ها بر پروفیل سطح آب، توزیع سرعت، رابطه دبی-اشار و هدررفت کل انرژی ارزیابی شد. در ادامه، نتایج ناشی از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد تا ضمن ارزیابی دقت مدل عددی، تأثیر فراسنجه‌های هندسی بر رفتار هیدرولیکی جریان و

تصحیحی در معادله اتلاف برای تعدیل گردابه در ناحیه های با نرخ کرنش میانگین) و مدل LES (با حل مستقیم گردابه های بزرگ و مدل سازی اثر گردابه های کوچک). آزمایش های این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقات آب گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان و با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی شیب پذیر با بدنه ای از جنس پلکسی گلاس انجام شد. این فلوم دارای طول ۱۲ متر، عرض ۰/۶ متر، عمق ۰/۵ متر و شیب طولی ثابت ۰/۰۰۸۸ بود. به منظور بررسی تاثیر هندسه کانال، کانال های دوزنقه ای با استفاده از ورق گالوانیزه و با سه عرض کف ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ متر ساخته شدند. همچنین، برای این کانال ها سه مقدار ضریب شیب جانبی (Z) برابر با ۰/۲۰، ۰/۳۱ و ۰/۴۴ در نظر گرفته شد.

به منظور اتصال کانال دوزنقه ای به دریاچه نیم دایره ای، از تبدیل های تدریجی با طول های ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر در بالادست دریاچه استفاده شد، در حالی که طول تبدیل پایین دست در همه آزمایش ها برابر با ۰/۹ متر و ثابت بود. دریاچه دوار از یک صفحه نیم دایره ای با شعاع ۰/۳ متر ساخته شد که در مرکز کانال نصب شده و قابلیت دوران حول محور قائم و تنظیم زاویه بازشدگی با گام های ۵ درجه را داشت.

برای کاهش آشفتگی ناشی از ورود جریان به فلوم، یک جعبه توربینی و سه ردیف توری مشبک در ابتدای کانال نصب شد تا جریان پس از عبور از آن ها به صورت یکنواخت وارد محدوده آزمایش شود. عمق جریان با استفاده از خط کش مدرج اندازه گیری با دقت ۰/۱ میلی متر و دبی جریان توسط دبی سنج الکترومغناطیسی با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه اندازه گیری شد. همچنین، اندازه گیری پروفیل سرعت جریان با استفاده از دستگاه Velocity Profiler

انجام گرفت. اندازه گیری سرعت از فاصله ۷ سانتی متری کف کانال آغاز و با فاصله های ۳ سانتی متری تا سطح آزاد آب ادامه یافت. در نقطه هایی که به دلیل محدودیت های هندسی یا محدودیت عملکرد دستگاه امکان اندازه گیری وجود نداشت، از مولینه برای اندازه گیری سرعت جریان استفاده شد.

در انتهای فلوم، یک دریاچه لولایی تعبیه شد که با تنظیم تراز آب پایین دست، اثر شرایط مرزی پایین دست بر پروفیل سطح آب در محدوده آزمایش را به کمترین مقدار خود می رساند. نمای کلی فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات اندازه گیری عمق جریان در شکل (۲) ارائه شده است. همچنین، شکل (۳) نمای کلی از هندسه کانال، دریاچه نیم دایره ای دوار و چگونگی اتصال آن به کانال دوزنقه ای را نشان می دهد.

اندازه گیری جریان در بازه ۷ متری میانی کانال (بازه ۴ متر بالاتر و ۳ متر پایین تر از دریاچه) به دلیل نبود مشاهده نوسان های سطحی، نداشتن تاثیر شرط مرزی پایین دست و اطمینان از وجود جریان توسعه یافته انجام شد. در بازه های نزدیک به تبدیل و دریاچه، اندازه گیری ها با فاصله های نزدیکتر صورت پذیرفت. در شکل ۴ نقاط اندازه گیری به صورت گره نشان داده شده است.

به منظور ایجاد انسجام در ارائه نتایج و آسان شدن مقایسه و تحلیل داده ها، برای هر ترکیب آزمایشگاهی یک شناسه اختصاری تعریف شد که در همه شکل ها و نمودارهای این پژوهش به کار گرفته شده است.

RG-Z-LT- θ -Q که به ترتیب RG دریاچه دوار، Z ضریب شیب جانبی کانال، L_T طول تبدیل تدریجی بالادست، θ زاویه بازشدگی دریاچه و Q دبی ورودی هستند. فراسنجه های موثر هندسی، ایستایی و جنبشی موثر در



Fig. 2 A view of the laboratory and measuring instruments

شکل ۲ نمای کلی از آزمایشگاه و ابزار اندازه گیری

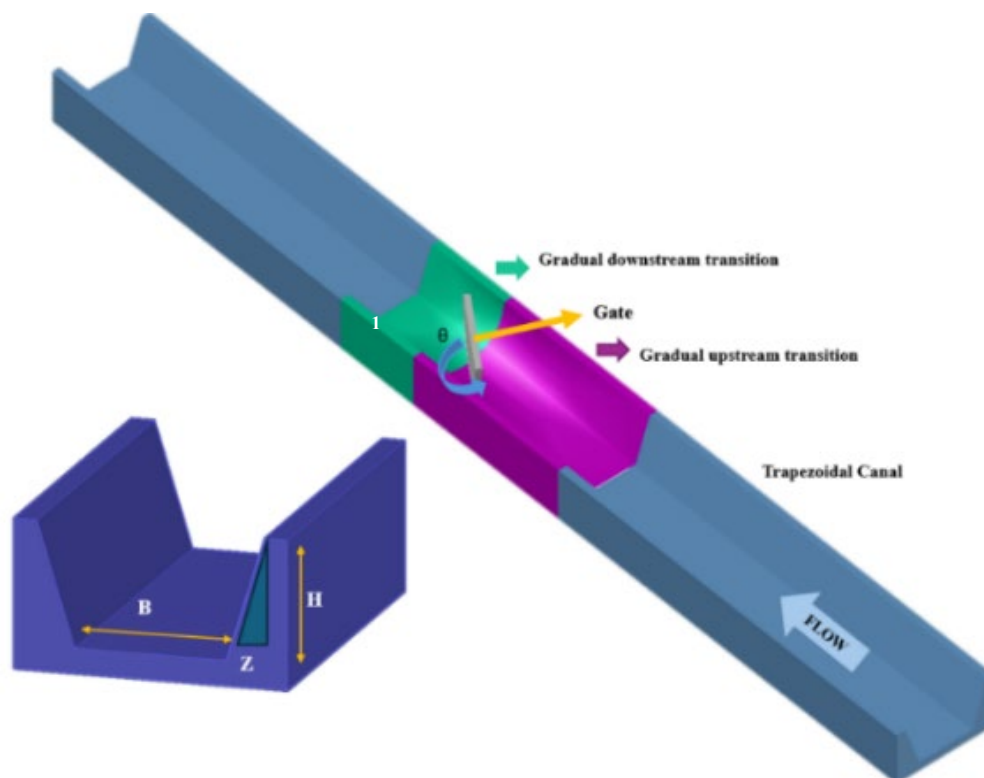


Fig. 3 Schematic view of the canal geometry, rotary semi-circular gate, and gradual transition

شکل ۳ نمای کلی از هندسه کانال، دریچه نیم‌دایره‌ای دوار و تبدیل‌های تدریجی

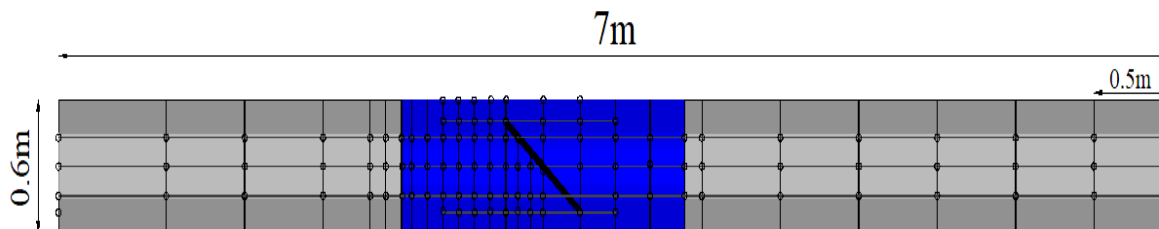


Fig. 4 Measuring points along the canal

شکل ۴ نقطه‌های اندازه‌گیری در طول کانال

در رابطه بالا Q_h ، دبی نسبی، W_h بازشدگی نسبی، نامیده می‌شود. با توجه به آشفته بودن جریان و نیز وجود عمق و عرض کافی برای جریان هم در کف کانال و هم در سطح آزاد آب و ناچیز بودن کشش سطحی، از تأثیر عدد رینولدز Re و عدد وبر We صرف نظر می‌شود.

برای شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی ابتدا کانال‌ها در محیط نرم افزار Civil-3D مدل شد. هندسه مدل با فرمت Stl* ذخیره و به نرم افزار Flow-3D معرفی شد. در شکل ۵ آزمایش‌های مدل شده نشان داده شده است.

جریان آزاد برای یک شیب معین: Q ، h_1 تراز سطح آب در بالادست دریچه، L_T طول تبدیل بالادست، w مجموع عرض سطح جریان خروجی در دوجبه بازشدگی دریچه، ρ چگالی سیال، g شتاب ثقل، μ گرانیوی ایستایی، σ کشش سطحی، θ و R شعاع دریچه هستند. با فرض فراسنجه‌های Q و h به عنوان متغیرهای تکراری، فراسنجه‌های بی‌بعد زیر به دست آمد.

$$\pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{gh^5}} = Q_h, \pi_2 = \frac{\sigma h^3}{\rho Q^2} = W_e, \pi_3 = \frac{w}{h}, \quad (3)$$

$$\pi_4 = \frac{\mu h}{\rho Q} = \frac{\mu}{\rho V h} = R_e, \pi_5 = \frac{\theta}{90}, \pi_6 = \frac{L}{R}, \pi_7 = z$$

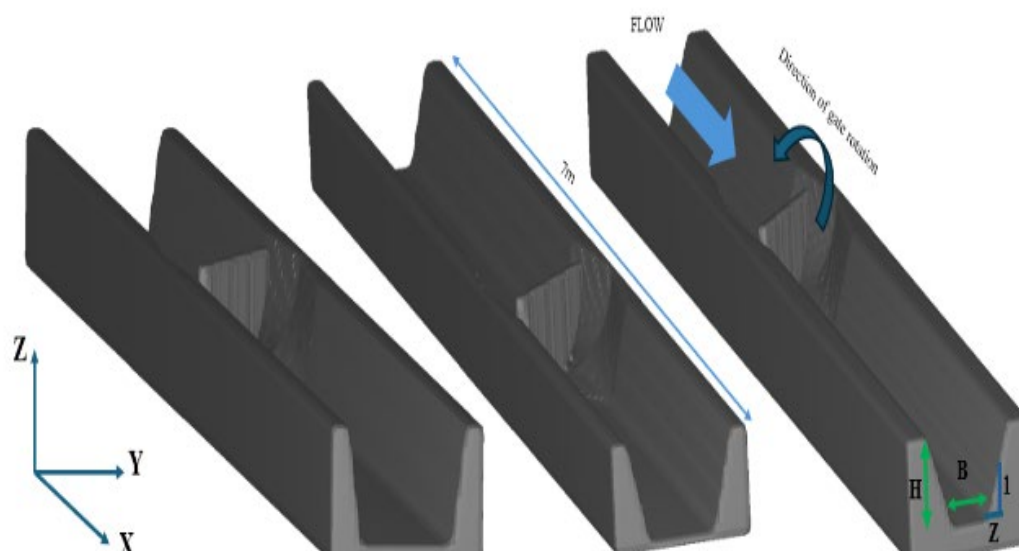


Fig. 5 Simulated Section in Flow-3D

شکل ۵ مقطع های شبیه سازی شده در نرم افزار Flow-3D

در همه شبیه سازی ها، دبی ورودی در محدوده ۰/۲۴ تا ۰/۳۶ مترمکعب بر ثانیه به عنوان شرط مرزی بالادست و شرط مرزی خروجی دبی در پایین دست اعمال شد. دیوارهای جانبی و کف کانال با شرط مرزی Wall، سطح آزاد جریان با شرط مرزی Pressure و صفحه های تقارن با شرط مرزی Symmetry مدل سازی شدند. شرایط مرزی اعمال شده در مدل عددی در شکل (۶) ارائه شده است.

در هر شبیه سازی عددی، اطمینان از استقلال نتایج نسبت به شبکه محاسبه ای و دستیابی به دقت مناسب از الزام های اصلی است. از این رو، دامنه محاسبه ای در راستای طول کانال به سه بلوک مجزا تقسیم و شبکه بندی شد. همچنین، به منظور افزایش دقت محاسبات در ناحیه پیرامون دریچه، که گرادیان های جریان در آن شایان توجه است، از شبکه ای با ابعاد ریزتر استفاده شد.

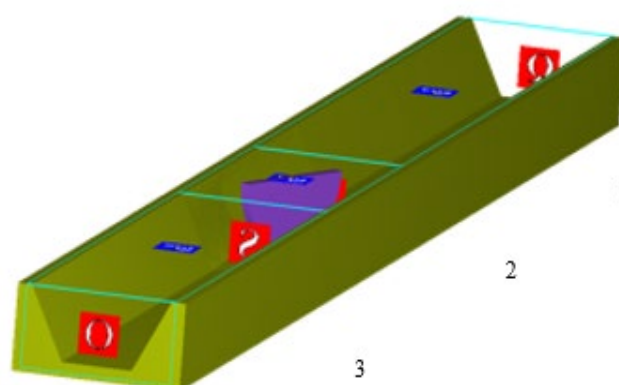


Fig. 6 Canal geometry and applied boundary condition

شکل ۶ هندسه و شرایط مرزی کانال

یک پردازنده هفت هسته ای با بسامد ۳/۶ گیگاهرتز و حافظه اصلی ۱۶ گیگابایت اندازه گیری شده است. بررسی نشان می دهد که کاهش ابعاد سلول های شبکه، اگرچه موجب افزایش شایان توجه زمان محاسبه ای شده است، اما تأثیر

جزئیات مربوط به آزمون حساسیت شبکه و فرآیند انتخاب شبکه محاسبه ای بهینه در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول، زمان محاسبه بیانگر مدت زمان لازم برای رسیدن هر شبیه سازی به همگرایی است که با استفاده از

محسوسی بر دقت و همگرایی نتایج نداشته است. از این رو، با در نظر گرفتن تعادل میان دقت محاسبات و هزینه زمانی، شبکه دوم به عنوان شبکه بهینه برای انجام شبیه سازی های

عددی انتخاب شد. در شکل ۷، روند همگرایی مدل عددی برای شبکه بندی های مختلف ارائه شده است.

جدول ۱ جزئیات شبکه بندی مدل عددی

Table 1 Details of the Numerical Model Mesh

Sample	Mesh size (x)	Mesh size (y)	Mesh size (z)	Total cells	Time (min)
1	0.023	0.018	0.023	142200	53
2	0.025	0.02	0.025	109136	30
3	0.027	0.022	0.027	82304	25

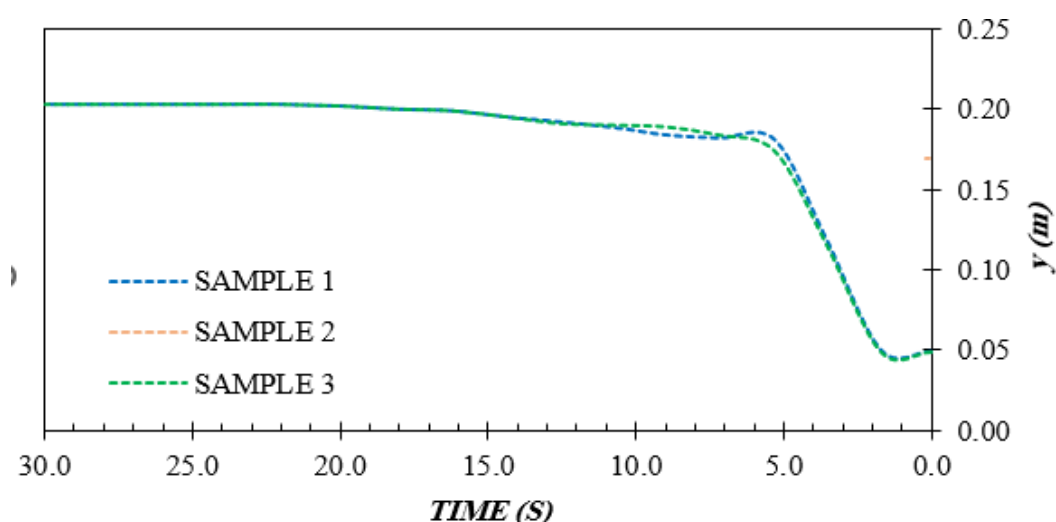


Fig. 7 Effect of Different Meshes on the Convergence of the Numerical Model

شکل ۷ نمای اثرگذاری شبکه بندی های متفاوت بر روی همگرایی مدل عددی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت سنجی پروفیل سرعت

مقایسه پروفیل سرعت در این پژوهش، به مقطع ۲ متری از بالادست دریچه محدود شده است (شکل ۸). دلایل انتخاب این مقطع عبارتند از: پایداری و توسعه یافتگی جریان در این مقطع، قابلیت اطمینان بالای داده های آزمایشگاهی به دلیل نبود نوسان های شدید سطح آب، وجود عمق کافی و امکان تکرار اندازه گیری آزمایشگاهی. بنابراین شبیه سازی پروفیل سرعت در بالادست دریچه با استفاده از سه مدل آشفتگی برای هر سه شیب دیواره کانال در طول تبدیل ۰/۶ انجام و مقایسه شدند. در این نمودارها، H عمق آب و U_{max} بیشینه سرعت می باشد. نتایج نشان می دهد که با ملایم شدن شیب دیواره (کاهش ضریب شیب جانبی از ۰/۴۴ به ۰/۲) به دلیل افزایش

سطح مقطع عبوری جریان مقدار سرعت کاهش می یابد. همچنین با کاهش شیب، جریان در عرض کانال آزادانه تر حرکت می کند و فرض همسانی تنش های رینولدزی در مدل های RNG و K- ϵ ، به دلیل نامتقارن بودن جریان خروجی که وابسته به هندسه دریچه بوده و عرض دهانه خروجی برای هر عمق و هر مقطع متفاوت است، سبب ایجاد خطا در پیش بینی مقدار سرعت شده است. به عبارتی توزیع عرضی وابسته به عمق، یک میدان جریان پیچیده و ناهمسان در بالادست ایجاد می کند. مدل LES با حل مستقیم ساختار سه بعدی جریان، قادر به شبیه سازی این ناهمسانی بوده و عملکرد بهتری دارد. در z برابر ۰/۴۴ اثر توزیع عمقی به دلیل متمرکز شدن و هدایت جریان در مرکز کانال بر جریان کمتر است. در همه شیب ها مدل آشفتگی LES توانسته است پروفیل عمقی

سرعت را با بسیار نزدیک به مدل آزمایشگاهی پیش بینی کند. در جدول (۲) مقدار خطای میانگین برای هر سه مدل آشفتگی ارائه شده است. برای بررسی و محاسبه مقدار خطای پیش بینی مدل عددی از شاخص میانگین خطای نسبی (Error) بر مبنای رابطه زیر استفاده شده

است.

$$Error = \frac{\sum \left| \frac{E_o - E_c}{E_o} \right|}{N} \times 100 \quad (4)$$

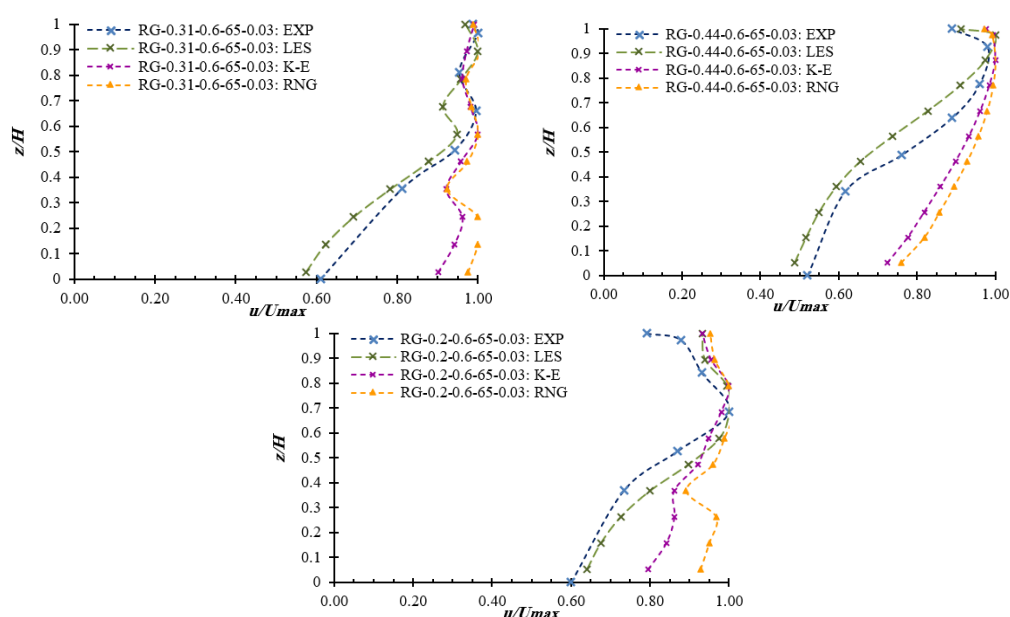


Fig. 8 Comparison of velocity profiles from various turbulence model with experimental data

شکل ۸ مقایسه پروفیل سرعت برای مدل های مختلف آشفتگی و مدل آزمایشگاهی

جدول ۲ خطای میانگین مدل های آشفتگی در پیش بینی مقدار سرعت در بازه های مختلف

Table 2 Mean Error of Turbulence Models in Predicting Velocity in Different Ranges

Turbulence model	K-ε	RNG	LES
RG-0.6-0.44	12.6	14.08	6.7
RG-0.6-0.31	20.09	17.5	6.67
RG-0.6-0.20	25.1	19.5	4.1

پیش بینی هر سه مدل آشفتگی با اختلاف بسیار اندکی با داده های آزمایشگاهی همخوانی دارد. با کاهش ضریب شیب جانبی و ملایم تر شدن شیب دیواره ها، اختلاف بین نتایج پیش بینی شده توسط مدل های آشفتگی و داده های آزمایشگاهی به تدریج افزایش می یابد.

به عبارت دیگر، در شیب جانبی $z = 0.44$ به دلیل همگرایی بیشتر جریان به سمت مرکز کانال، میزان ناهمسانی بین دو جت خروجی از دو طرف دریچه کاهش یافته و الگوی جریان یکنواخت تر است. با کاهش شیب جانبی به $z = 0.20$ ، جت ها با آزادی بیشتری گسترش

۳-۲- صحت سنجی پروفیل سطح آب

به منظور انتخاب مناسب ترین مدل آشفتگی، پروفیل سطح آزاد جریان شبیه سازی شده با استفاده از سه مدل آشفتگی K-ε، RNG و LES با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. به منظور نمایش و مقایسه بهتر پروفیل های سطح آزاد، در این پژوهش محور افقی به صورت نسبت فاصله طولی اندازه گیری شده به بیشترین طول اندازه گیری و محور عمودی به صورت نسبت عمق آب اندازه گیری شده به ارتفاع دریچه (شعاع دریچه) بی بعد شد. همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می شود، در ضریب شیب جانبی 0.44 ،

مومنتم، هدررفت انرژی و توزیع سرعت با خطا همراه شده و دقت پیش‌بینی پروفیل سطح آب کاهش می‌یابد. با کاهش مقدار z و افزایش پیچیدگی میدان جریان، مدل RNG به دلیل بهره‌گیری از جمله اصلاحی در معادله نرخ هدررفت انرژی و توانایی بیشتر در شبیه‌سازی جریان‌های دارای کرنش و انحنای بالا، پروفیل سطح آب را با دقت بیشتری و نزدیک‌تر به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده است.

یافته و برخورد آن‌ها در پایین‌دست با شدت بیشتری رخ می‌دهد؛ در نتیجه، ناهمسانی جریان و پیچیدگی ساختار آشفتگی افزایش می‌یابد در مدل‌های آشفتگی مبتنی بر فرض بوزینسک، از جمله مدل‌های $K-\epsilon$ و RNG تنش‌های رینولدز به صورت همسانگرد فرض می‌شوند. این فرض در ناحیه‌هایی با آشفتگی شدید، جدایش جریان و برخورد جت‌ها، که آشفتگی ماهیتی ناهمسانگرد دارد، با رفتار واقعی جریان سازگار نیست. در نتیجه، برآورد انتقال

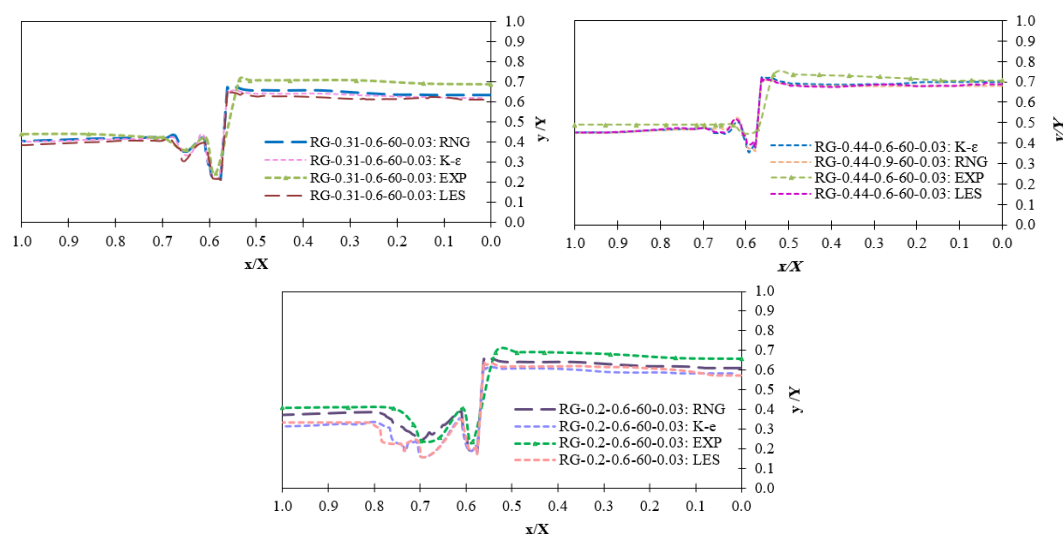


Fig. 9 Comparison of Turbulence Model Results with Experimental Data for the Water Surface Profile at the Canal Centerline

شکل ۹ مقایسه نتایج مدل‌های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی در پروفیل سطح آب در مرکز کانال

۱۰ درصد داشته و نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. از این‌رو، در ادامه این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی پروفیل سطح آب و بررسی تأثیر متغیرهای آزمایش بر آن، از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است.

جدول زیر خطای نسبی مدل‌های آشفتگی را در پیش‌بینی پروفیل سطح آب برای سه ضریب شیب جانبی ۰/۴۴، ۰/۳۱ و ۰/۲۰ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل آشفتگی RNG در همه حالات، میانگین خطایی کمتر از

جدول ۳ خطای میانگین مدل‌های آشفتگی در پیش‌بینی پروفیل سطح آب برای بازه‌های مختلف

Table 3 Mean Error of Turbulence Models in Predicting Water Surface Profiles over Different Ranges

Turbulence model	K-ε	RNG	LES
RG-0.6-0.44	5.3	5.7	5.8
RG-0.6-0.31	7.8	6.1	8.8
RG-0.6-0.20	15.1	9.2	17.8

۱۰ تأثیر درجه را بر پروفیل سطح آب در ناحیه‌های چپ و راست کانال، برای کانالی با ضریب شیب جانبی ۰/۳۱ و طول تبدیل ۰/۶۰ متر، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، وجود درجه موجب تغییر توزیع سطح

۳-۳- تغییرپذیری عرضی پروفیل سطح آب

با توجه به عملکرد بهتر مدل آشفتگی RNG در مقایسه با دیگر مدل‌ها، در ادامه این پژوهش از این مدل برای شبیه‌سازی پروفیل سطح آب استفاده شده است. شکل

تشکیل این برآمدگی به زاویه بازشدگی دریاچه وابسته است. با افزایش زاویه بازشدگی، سهم جریان عبوری از سمت راست کاهش یافته و سهم جریان عبوری از سمت چپ افزایش می یابد. در نتیجه، اختلاف عمق آب در دو سوی دریاچه کاهش پدیدرفته، شدت برخورد جت ها و آشفته گی جریان کمتر شده و برآمدگی ایجاد شده در سطح آب نیز تضعیف می شود. همان گونه که نتایج شکل ۱۰ نشان می دهد، مدل عددی RNG توانسته است اثرگذاری دریاچه بر تغییرات پروفیل سطح آب در ناحیه های چپ و راست کانال را با دقت قابل قبولی شبیه سازی کند و همخوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

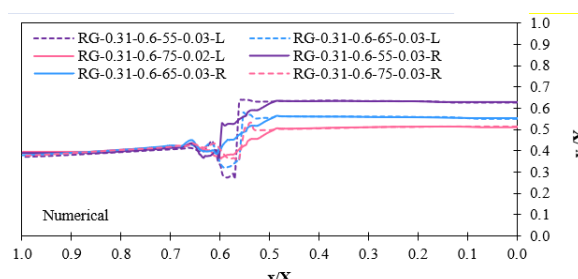
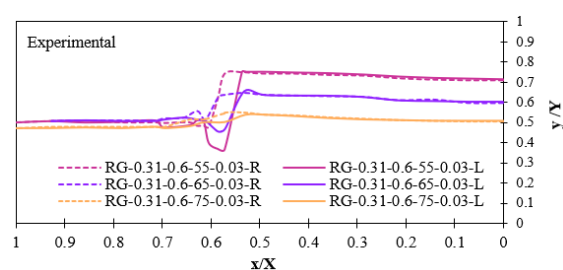


Fig. 10 Comparison of turbulence models with experimental results for right and left profiles

شکل ۱۰ مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای پروفیل چپ و راست

نشان می دهد که مدل عددی توانسته است پروفیل سطح آب را با میانگین خطایی کمتر از ۱۰ درصد پیش بینی کند. بیشترین میزان خطا در محدوده بی بعد (x/X) ۰/۵ تا ۰/۷۵ مشاهده می شود که علت آن تشکیل ناحیه پرش هیدرولیکی، آشفته گی شدید و تغییرپذیری سریع سطح آب در این بخش از جریان است.

در شکل ۱۲، تأثیر ضریب شیب جانبی بر پروفیل سطح آزاد جریان نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، شیب دیواره ها تأثیر شایان توجهی بر الگوی جریان و تغییرات پروفیل سطح آب دارد و مدل عددی توانسته است این رفتار فیزیکی را با دقت مناسبی شبیه سازی کند. با کاهش ضریب شیب جانبی از ۰/۴۴ به ۰/۲۰، به دلیل افزایش سطح مقطع عبوری، جریان از حالت متمرکز خارج شده و اختلاف عمق و سرعت بین دو جت عبوری از دو طرف دریاچه افزایش می یابد. در نتیجه، شدت برخورد جت ها، میزان آشفته گی و اختلاط جریان در پایین دست دریاچه بیشتر می شود.

جدول ۴ خطای میانگین مدل عددی در پیش بینی پروفیل

چپ و راست کانال

Table 4 Mean Error of the Numerical Model in Predicting the Left and Right Water Surface Profiles of the Canal

x/X	LEFT	RIGHT
0-0.5	5.5	5.3
0.5-0.75	7.75	7.8
0.75-1	4.2	4.2

۳-۴- تأثیر دبی بر روی پروفیل سطح جریان

در شکل ۱۱، تأثیر تغییر دبی بر پروفیل سطح آب برای کانال هایی با ضریب شیب جانبی ثابت بررسی شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش دبی، عمق جریان در بالادست دریاچه افزایش یافته و شدت آشفته گی در پایین دست نیز بیشتر می شود. همچنین، با کاهش شیب جانبی به ۰/۲۰، به دلیل افزایش سطح مقطع جریان، عمق آب در طول کانال کاهش می یابد.

مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با داده های آزمایشگاهی

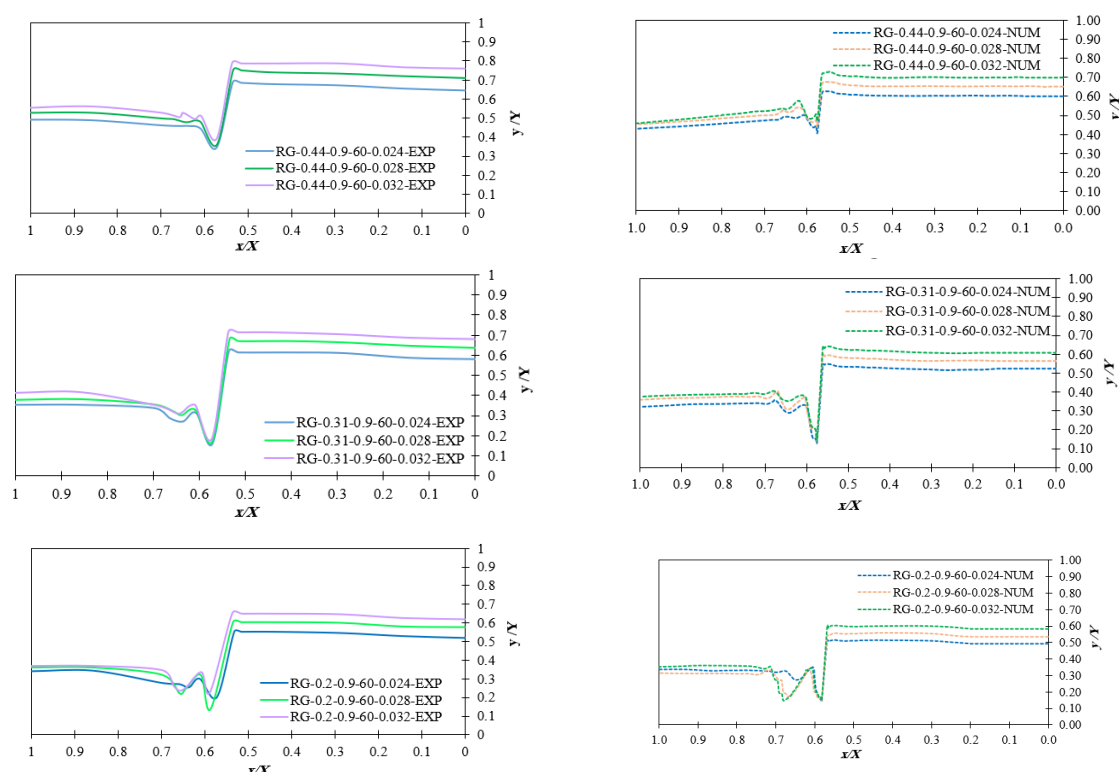


Fig. 11 Effect of discharge on the water surface profile

شکل ۱۱ تاثیر دبی بر روی پروفیل سطح آب

جدول ۵ خطای میانگین مدل عددی در پیش بینی پروفیل سطح برای دبی‌های مختلف

Table 5 Mean Error of the Numerical Model in Predicting Water Surface Profiles for Different Discharges

SET	x/X	Q=0.024	Q=0.028	Q=0.032
RG-0.44-0.6	0-0.5	6.3	6.41	6.55
	0.5-0.75	7.32	7.54	7.81
	0.75-1	5.2	5.22	5.27
RG-0.31-0.6	0-0.5	6.7	7.15	7.31
	0.5-0.75	7.8	8.32	8.25
	0.75-1	5.58	8.13	8.16
RG-0.20-0.6	0-0.5	7.08	7.75	8.03
	0.5-0.75	8.4	8.45	8.41
	0.75-1	8.12	8.18	8.22

۳-۵- تاثیر طول تبدیل بر روی پروفیل سطح جریان در شکل ۱۳، با ثابت نگه داشتن دبی و زاویه بازشدگی دریچه، پروفیل سطح آب برای طول‌های تبدیل ۰/۶۰، ۰/۹۰ و ۱/۲۰ متر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر شیب جانبی کانال بر پروفیل سطح آب از اثر طول تبدیل بیشتر است. با افزایش طول تبدیل، جریان فرصت بیشتری برای توسعه و یکنواخت شدن پیدا کرده و در نتیجه، برخورد جت‌های خروجی از دوطرف دریچه با شدت کمتری رخ

مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی در کانال با شیب جانبی بیشتر با میانگین خطایی در حدود ۵ درصد، از دقت بالایی در پیش‌بینی پروفیل سطح آب برخوردار است. با کاهش شیب جانبی و افزایش پیچیدگی میدان جریان، میزان خطای اندکی افزایش می‌یابد، اما همچنان نتایج شبیه‌سازی از تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار هستند.

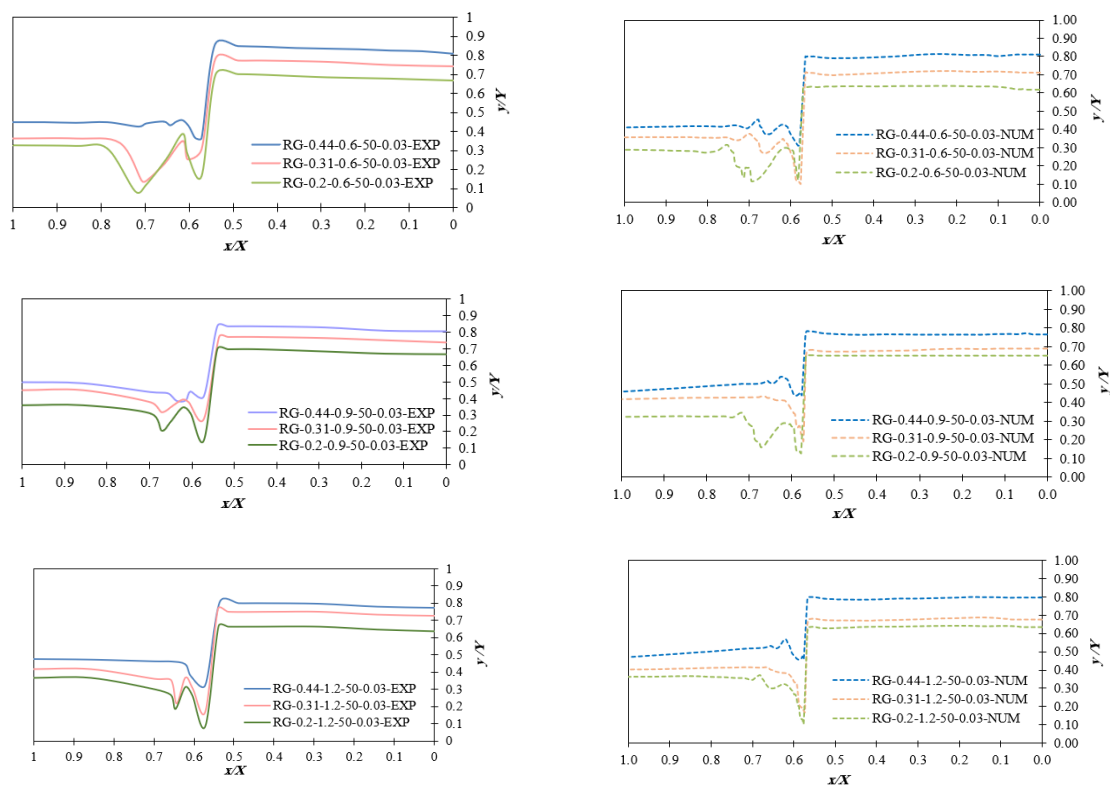


Fig. 12 Effect of sidewall slope on water surface profile

شکل ۱۲ تاثیر شیب دیواره بر روی پروفیل سطح آب

جدول ۶ خطای میانگین مدل عددی در پیش بینی پروفیل سطح برای شیب های مختلف

Table 6 Mean Error of the Numerical Model in Predicting Water Surface Profiles for Different Side Slopes

SET	x/X	L/R=2	L/R=3	L/R=4
RG-0.44-L-0.03	0-0.5	4.1	4.35	4.75
	0.5-0.75	4.88	5.15	4.97
	0.75-1	5.02	4.79	5.1
RG-0.31-L-0.03	0-0.5	5.23	5.37	5.45
	0.5-0.75	8.45	9.1	8.67
	0.75-1	6.02	5.99	6.17
RG-0.20-L-0.03	0-0.5	6.38	6.42	6.18
	0.5-0.75	9.17	9.73	9.39
	0.75-1	5.35	6.09	5.78

۳-۶- رابطه دبی-اشل

شکل ۱۴ منحنی های دبی-اشل را برای سه شیب جانبی ۰/۴۴، ۰/۳۳ و ۰/۲۰ زاویه های مختلف بازشدگی دریاچه، در مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی، مقایسه می کند. در همه حالات های، مدل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی منحنی با شیب بیشتری ارائه می دهد؛ به این معنا که برای یک دبی مشخص، عمق آب کمتری را پیش بینی می کند. همچنین، با افزایش شیب جانبی،

می دهد؛ بنابراین، آشفستگی پایین دست کاهش یافته و عمق پایاب افزایش می یابد. با این حال، در کانال های با شیب جانبی بیشتر، به دلیل متمرکز بودن جریان، افزایش طول تبدیل تأثیر محسوسی بر پروفیل سطح آب و شدت آشفستگی ندارد. همچنین، نتایج شکل ۱۳ و جدول ۶ نشان می دهد که مدل عددی توانسته است اثر طول تبدیل بر پروفیل سطح آب را با دقت مناسبی پیش بینی کند.

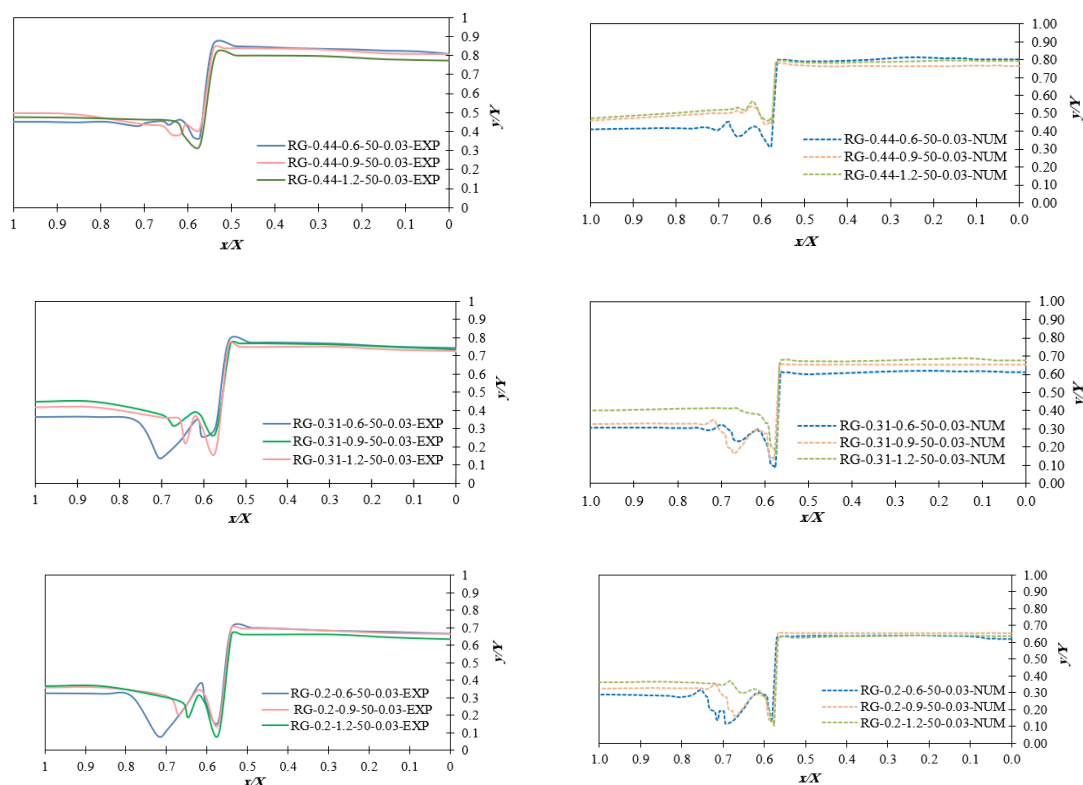


Fig. 13 Effect of transition length on water surface profile

شکل ۱۳ تاثیر طول تبدیل بر روی پروفیل سطح آب

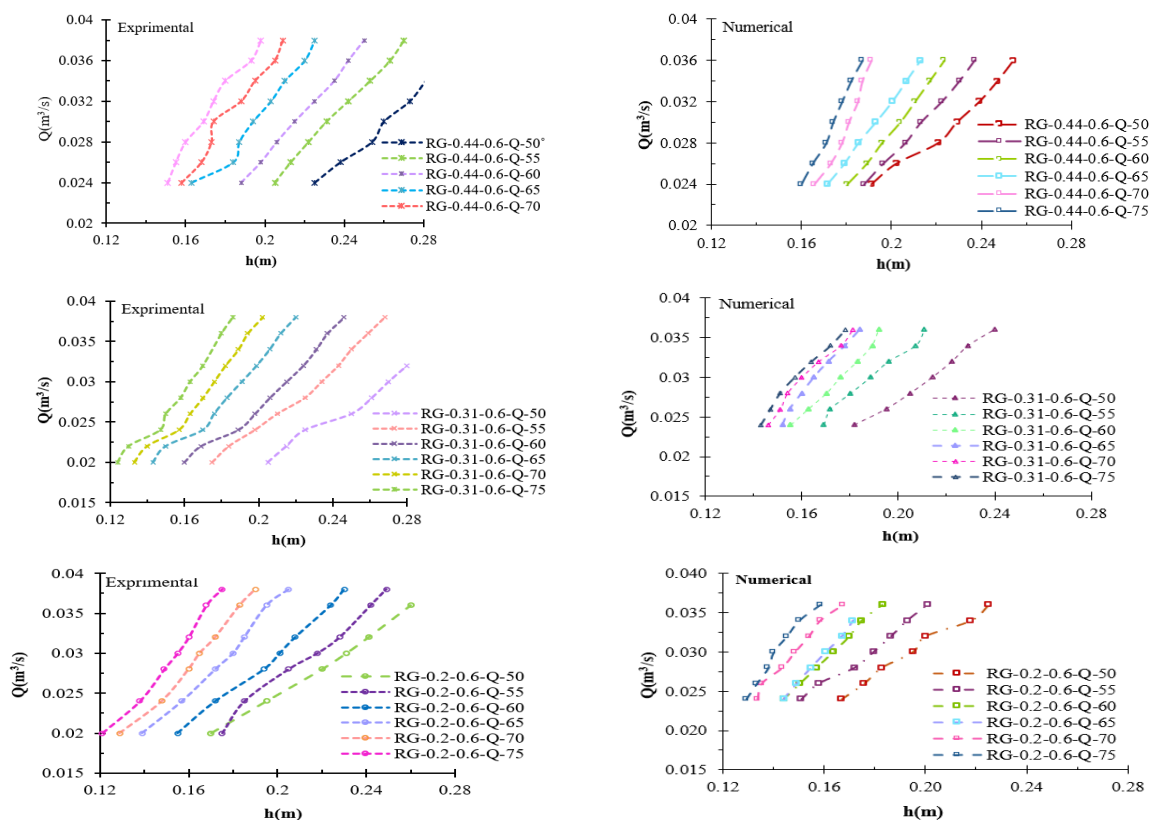


Fig. 14 stage- discharge relationships in numerical and experimental model

شکل ۱۴ رابطه دبی- اشل در مدل عددی و آزمایشگاهی

در شکل ۱۵ مقادارهای دبی اشل مدل عددی در برابر مدل آزمایشگاهی ترسیم شده است. برای بررسی و محاسبه مقدار خطای پیش بینی مدل عددی افزون برلین از فراسنجه میانگین خطای نسبی (Error) از شاخص های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE) و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) نیز استفاده شد. در این معادله های E_o مقادارهای فراسنجه اندازه گیری شده و E_c مقادارهای فراسنجه محاسبه شده با استفاده از مدل عددی هستند.

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(E_o - E_c)^2}{N - 1}} \quad (4)$$

$$SE = \frac{RMSE}{\mu E_o} \times 100 \quad (5)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{E_{O Max} - E_{O Min}} \times 100 \quad (6)$$

ظرفیت عبور جریان کاهش یافته و شیب منحنی دبی-اشل افزایش می یابد، به طوری که تغییر اندک دبی موجب تغییر بیشتری در عمق جریان می شود.

در زاویه های بازشدگی کم، دریاچه مشابه یک روزنه عمل کرده و به دلیل محدود بودن سطح عبور، ظرفیت انتقال جریان پایین است. با افزایش زاویه بازشدگی، سطح عبور جریان افزایش یافته و ظرفیت انتقال نیز بیشتر می شود. نتایج عددی و آزمایشگاهی هر دو نشان می دهند که در محدوده ۶۰ تا ۶۵ درجه، یک نقطه عطف در منحنی های دبی-اشل وجود دارد که بیانگر تغییر رفتار هیدرولیکی جریان است. در این محدوده، الگوی جریان از یک جت متمرکز به ناحیه ای با برخورد گسترده تر جت ها تغییر کرده و دریاچه به طور هم زمان نقش کنترل و انتقال جریان را با بیشترین کارایی ایفا می کند. با وجود اختلاف جزئی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، مدل عددی توانسته است این نقطه عطف و تغییرپذیری های رفتار جریان را با دقت مناسبی شبیه سازی کند.

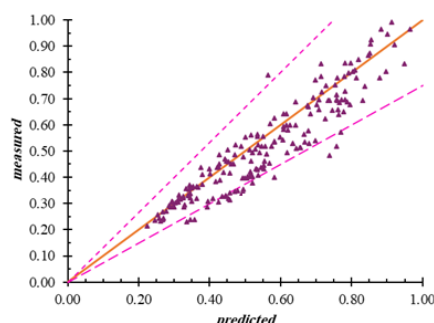


Fig.15 Comparison of stage- discharge relationships between numerical and experimental model

شکل ۱۵ مقایسه رابطه دبی-اشل مدل عددی و آزمایشگاهی

رابطه دبی-اشل دارد.

فراسنجه های تاثیرگذار بر رابطه دبی-اشل به صورت زیر در نظر گرفته شدند.

$$Q_h = f(w_h, \theta, \frac{L}{R}, z) \quad (7)$$

در شکل ۱۶ مقدار دبی نسبی در برابر بازشدگی نسبی برای همه آزمایش ها ترسیم شد. با افزایش زاویه بازشدگی، سطح مقطع عبوری جریان افزایش یافته و در نتیجه سبب افزایش عرض نسبی و دبی نسبی خواهد شد. در زاویه های بازشدگی

جدول ۷ نتایج تجزیه و تحلیل آماری رابطه دبی-اشل

Table 7 Statistical Analysis of the Stage-Discharge Relationship

Parameter	R ²	Error %	RMS E	SE %	NRMSE %
Value	0.88	9.01	0.075	14.1	8.57

در جدول (۷) نتایج تجزیه و تحلیل آماری مقایسه رابطه دبی-اشل ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد مدل عددی با خطای ۹ درصد، دقت قابل قبولی در برآورد

کم، جریان جریان خروجی بسیار محدود بوده و درپچه شبیه به روزنه عمل کرده و بازده انتقال جریان بسیار پایین است و تغییرات عرض نسبی تاثیر زیادی بر روی دبی نسبی ندارد. با کاهش مقدار شیب دیواره به ۰/۲، شیب نمودار دبی

نسبی به عرض نسبی افزایش پیدا کرده و کنترل جریان توسط درپچه ضعیفتر شده است. شیب ۰/۴۴ نسبت به دو شیب دیگر در کنترل دبی نسبی و پایداری آن عملکرد بهتری داشته است.

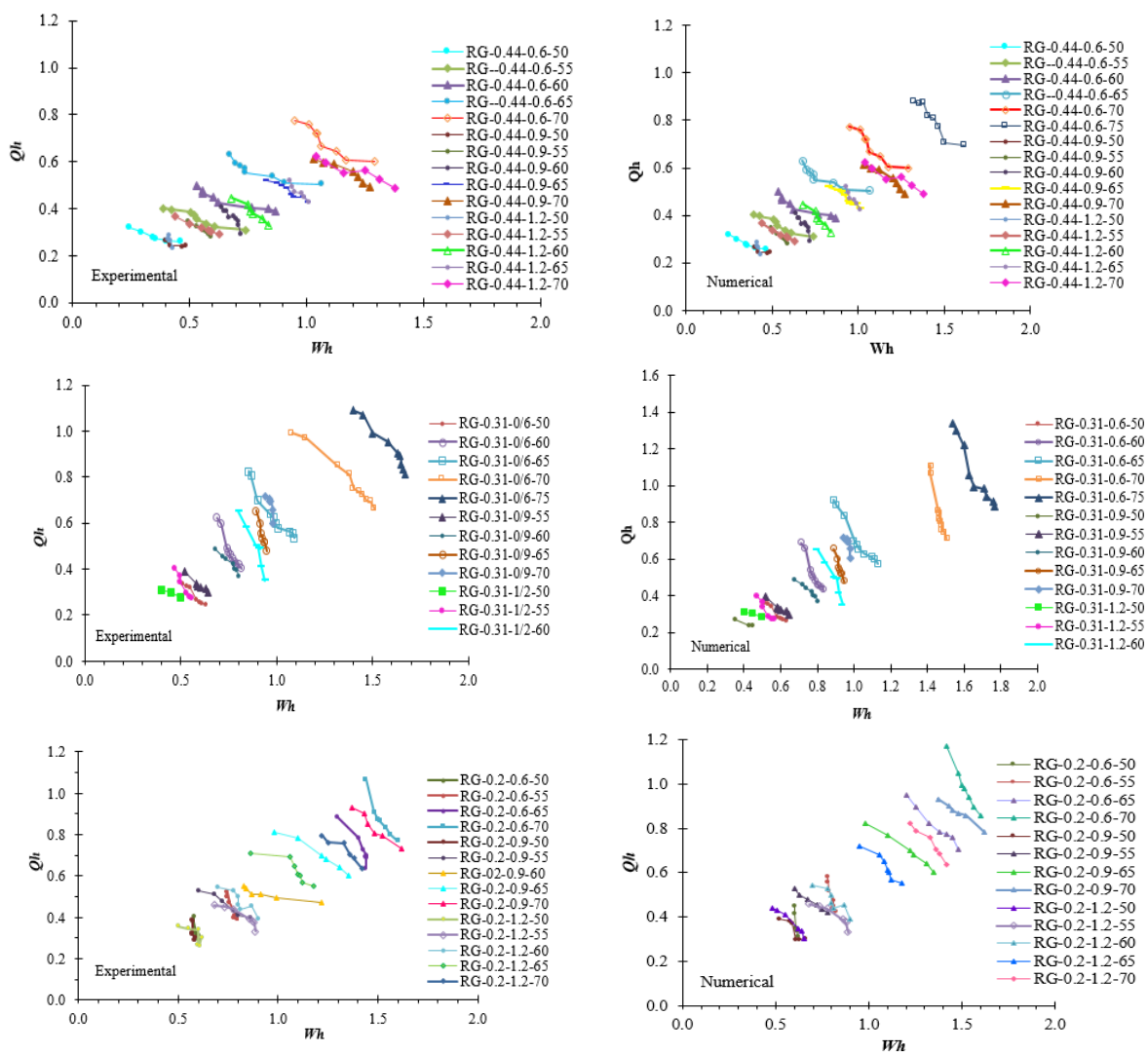


Fig.16 Comparison Dimensionless Discharge vs. Relative Opening between numerical and experimental model

شکل ۱۶ مقایسه رابطه دبی نسبی - بازشدگی نسبی بین مدل عددی و آزمایشگاهی

در جدول (۸) نتایج آنالیز آماری مقایسه دبی نسبی - بازشدگی نسبی مدل عددی در برابر مدل آزمایشگاهی

ارائه شده است. همان طور که نتایج نشان می دهد مدل عددی با خطای حدود ۱۰ درصد، دقت قابل قبولی دارد.

جدول ۸ نتایج آنالیز آماری رابطه دبی - اشل بی بعد

Table 2 Statistical Analysis of the Stage-Discharge Relationship

Parameter	R ²	Error%	RMSE	SE%	NRMSE%
Value	0.81	9.21	0.082	13.7	8.43

۳-۷- هدررفت انرژی کل

عملکرد کل سامانه، ترکیبی از اثر تبدیل های استفاده شده در بالادست و پایین دست، دریاچه نیم دایره ای و پرش هیدرولیکی می باشد. بنابراین محاسبه مقدار هدررفت انرژی در طول کل سازه اهمیت دارد. جهت محاسبه هدررفت، مقدار انرژی در بالادست (مقطع ۱) و پایین دست سازه پس از پرش و تبدیل (مقطع ۲) با استفاده از معادله (۸) تعیین شد.

$$\Delta E = (y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}) - (y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}) \quad (8)$$

در شکل ۱۷، تأثیر طول تبدیل بر هدررفت انرژی برای هر سه ضریب شیب جانبی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش طول تبدیل تأثیر محدودی بر هدررفت انرژی دارد. در شیب جانبی ۰/۴۴، به دلیل متمرکز بودن جریان و آشفتگی کمتر در پایین دست دریاچه، اثر طول

تبدیل بر هدررفت انرژی ناچیزتر از شیب جانبی ۰/۲۰ است. با افزایش طول تبدیل، جریان فرصت بیشتری برای توسعه و یکنواخت شدن پیدا کرده و جت های خروجی از طرفین دریاچه با شدت کمتری با یکدیگر برخورد می کنند؛ در نتیجه، آشفتگی پایین دست کاهش یافته و عمق پایاب افزایش می یابد. از این رو، بیشترین هدررفت انرژی در طول تبدیل ۰/۶۰ متر مشاهده می شود.

در مقابل، شیب جانبی کانال تأثیر قابل توجهی بر هدررفت انرژی دارد. با کاهش ضریب شیب جانبی، اگرچه عمق آب در بالادست کاهش می یابد، اما به دلیل افزایش شدت برخورد جت ها، آشفتگی و تلاطم در ناحیه پرش هیدرولیکی، هدررفت کل انرژی افزایش می یابد. در همه شرایط مورد بررسی، مدل عددی هدررفت انرژی را کمتر از مقدارهای آزمایشگاهی پیش بینی کرده است. این کم برآوردی را می توان به محدودیت مدل آشفتگی در

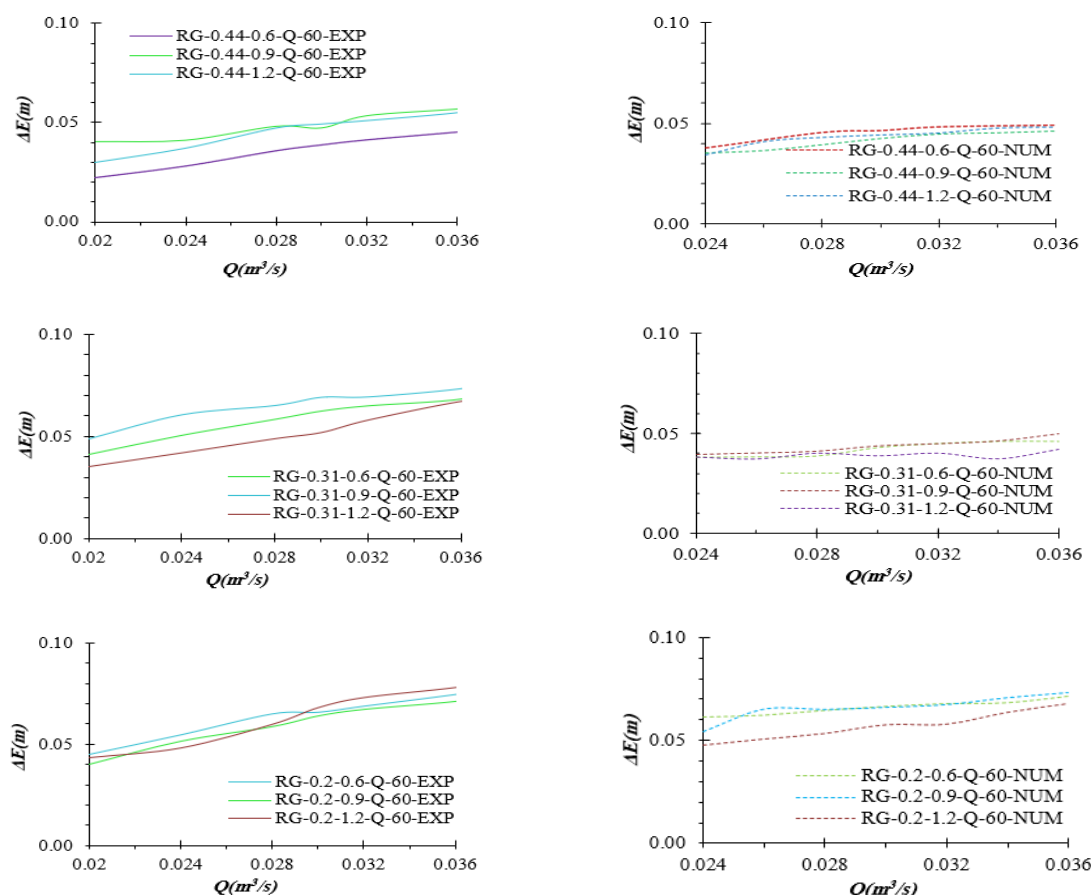


Fig. 17 Total Energy Loss Over the Canal Length in numerical and experimental model

شکل ۱۷ هدررفت کل انرژی در کانال برای مدل عددی و آزمایشگاهی

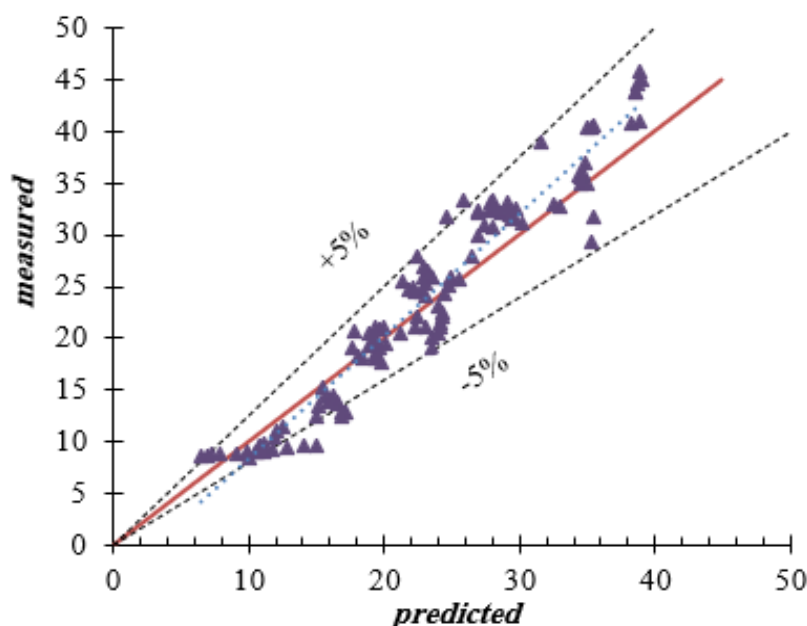


Fig. 18 Comparison of Total Energy Loss between numerical and experimental model
 شکل ۱۸ مقایسه هدررفت انرژی کل بین مدل عددی و آزمایشگاهی

جدول ۹ نتایج آنالیز آماری هدررفت انرژی

Table 9 Statistical Analysis of Total Energy Loss

Parameter	R ²	Error%	RMSE	SE%	NRMSE%
Value	0.88	7.57	0.03	13.2	9.7

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f\left(Q_h, \theta, \frac{L}{R}, z\right) \quad (9)$$

در شکل ۱۹ مقدار درصد هدررفت انرژی در برابر دبی نسبی ترسیم شده است. روند تغییرپذیری‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دبی نسبی در اثر بازشدگی بیشتر دریچه، مقدار درصد تلفات انرژی کاهش یافته است. همچنین با توجه به این نمودارهای ترسیم شده، مشخص است که با افزایش بازشدگی دریچه به دلیل کاهش اختلاف تراز آب دو طرف دریچه و کاهش سرعت برخورد جت‌های خروجی، مقدار هدررفت انرژی کاهش می‌یابد.

شبیه‌سازی دقیق ناهمسانگردی تنش‌های رینولدز نسبت داد که منجر به پیش‌بینی عمق کمتر و سرعت بیشتر نسبت به نتایج آزمایشگاهی شده است.

در شکل ۱۸ مقدار هدررفت انرژی مدل عددی در برابر مدل آزمایشگاهی ترسیم شده است. در جدول ۹ نتایج تجزیه و تحلیل آماری این مقایسه ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده، مدل عددی دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی مقدار هدررفت انرژی است. برای استفاده از تئوری باکینگهام، فراسنجه‌های تاثیرگذار زیر در نظر گرفته شدند.

جدول ۱۰ نتایج تجزیه و تحلیل آماری هدررفت انرژی- دبی نسبی بین مدل عددی و آزمایشگاهی

Table 10 Statistical Analysis of Total Energy Loss percentage vs. Dimensionless Relative Discharge between numerical and experimental models

Parameter	R ²	Error%	RMSE	SE%	NRMSE%
Value	0.81	9.91	0.051	12.9	7.6

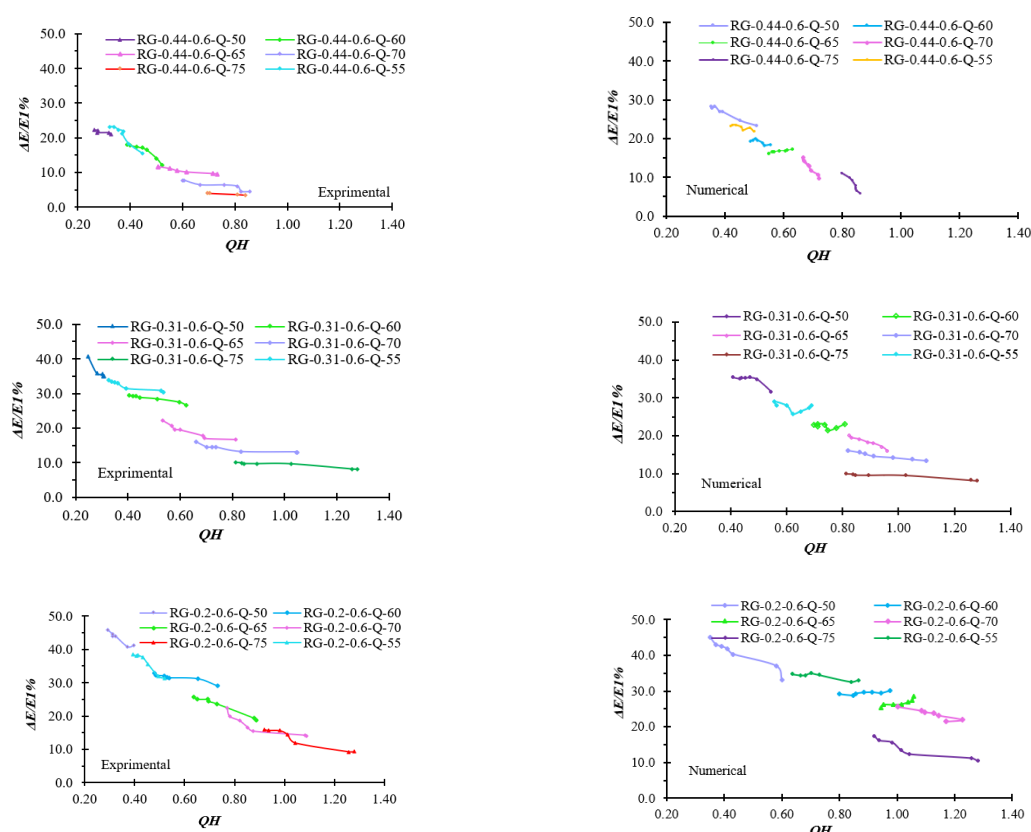


Fig. 19 Variation of Energy Loss Percentage vs. the Dimensionless Relative Discharge at a Constant Transition Length

شکل ۱۹ تغییرات میزان درصد هدررفت انرژی در برابر فراسنجه بدون بعد دبی در طول ثابت تبدیل

مدل LES در پیش‌بینی میدان سرعت و مدل RNG در پیش‌بینی پروفیل سطح آب عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

نتایج همچنین نشان می‌دهد که رفتار هیدرولیکی جریان به شدت تحت تأثیر شیب جانبی کانال است.

در $Z=0/20$ به دلیل افزایش سطح مقطع جریان و کاهش تمرکز آن، جت‌های خروجی با شدت بیشتری با یکدیگر برخورد کرده و ناحیه‌ای با آشفتگی شدید و توزیع ناهمسانگرد تنش‌های رینولدز ایجاد می‌کنند. از این رو، با وجود کاهش عمق جریان، هدررفت کل انرژی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، ظرفیت عبور جریان افزایش یافته و شیب منحنی دبی-اشل کاهش می‌یابد. در زاویه‌های بازشدگی کم، دریچه رفتاری مشابه روزنه دارد، در حالی که نتایج نشان می‌دهد در محدوده ۶۰ تا ۶۵ درجه، رفتار هیدرولیکی جریان تغییر کرده و منحنی دبی-اشل دارای یک نقطه عطف می‌شود. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، همراه با

۴- نتیجه گیری

نتایج مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی در پیش‌بینی پروفیل سرعت و پروفیل سطح آب نشان می‌دهد که هیچ‌یک از مدل‌های آشفتگی $K-\epsilon$ ، RNG و LES در همه شاخص‌ها برتری مطلق ندارند. مدل LES در پیش‌بینی پروفیل سرعت، در همه شرایط آزمایش، کمترین میانگین خطا را داشته است، اما در پیش‌بینی پروفیل سطح آب میانگین خطایی بیش از ۱۰ درصد نشان می‌دهد. در مقابل، مدل RNG در پیش‌بینی پروفیل سطح آب دقیق‌تر عمل کرده، در حالی که دقت آن در برآورد میدان سرعت نسبت به مدل LES کمتر است. بنابراین، انتخاب مدل آشفتگی باید متناسب با هدف شبیه‌سازی انجام شود. همچنین، در کانال‌هایی با ضریب شیب جانبی بزرگ‌تر، به دلیل همگرایی و تمرکز جریان در مرکز کانال، اختلاف عملکرد سه مدل آشفتگی ناچیز است. با کاهش ضریب شیب جانبی، به دلیل گسترش جانبی جریان، افزایش شدت برخورد جت‌های خروجی و تقویت ناهمسانگردی آشفتگی،

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

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام آزمایش‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها و نوشتن متن اولیه مقاله.

نویسنده دوم: ارائه ایده، نظارت بر انجام آزمایش‌ها، بررسی نتایج و تحلیل آنها، ویرایش نهایی متن مقاله.

نویسنده سوم: بررسی نتایج و تحلیل آنها، مشارکت در ویرایش متن نهایی مقاله.

نویسنده چهارم: بررسی نتایج و تحلیل آنها.

نویسنده پنجم: بررسی نتایج و تحلیل آنها.

۶- منابع

Bijankhan, M., Ferro, V. & Kouchakzadeh, E. (2013). New stage-discharge relationships for radial gates. *J Hydraul Eng.*, 139(5), 378–387.

Cassan, L. & Belaud, G. (2012). Experimental and numerical investigation of flow under sluice gates. *J Hydraul Eng.*, 138(4), 367–373.

Ebrahimian, S., Hajikandi, H., Shafaei Bajestaj, M., Jamali, S. & Asadi, E. (2019). Investigation of the effect of trapezoidal canal side slope on bed shear stress and hydraulic jump characteristics using Flow-3D model. *Iran Water Res. J.*, 13(4), 103-112. (In Persian)

Ferro, V. (2001). Simultaneous flow over and under a gate- Closure. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 127(5), 326-328.

Hashem, T., Mohammed, A.Y. & Alfatlawi, T.J. (2024). Hydraulic characteristics of labyrinth sluice gate. *Flow Measurement and Instrumentation*, 96, 102556. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102556>.

Heidari, M.M., Karami, S. & Adib Rad, M.H. (2020). Investigation of Free Flow under the Radial Gate with the Sill. *J. Civ. Env. Eng.*, 50(3), 9-19. (In

تحلیل‌های آماری، نشان می‌دهد که مدل عددی توانسته است رابطه دبی-اشل و هدررفت انرژی را با دقتی بیش از ۹۰ درصد بازتولید کرده و روند فیزیکی حاکم بر جریان را به‌خوبی شبیه‌سازی کند.

۵- فهرست علائم

u_j	سرعت (ms^{-1})
f	عبارت گرانروی
VF	کسر حجمی سیال دسترس پذیر
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
A	کسر سطحی دسترس پذیر برای جریان
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
ρ	چگالی (kg.m^{-3})
Q	دبی جریان (m^3s^{-1})
y_1	عمق آب بالادست (m)
y_2	عمق آب پایین دست (m)
A_1	مساحت جریان بالادست (m^2)
A_2	مساحت جریان پایین دست (m^2)
ΔE	هدررفت کل انرژی (m)
E_o	مقدارهای فراسنجه اندازه گیری (m)
Q_h	دبی نسبی
W_h	عرض نسبی
E_c	مقدارهای فراسنجه محاسبه‌ای (m)
L	طول تبدیل تدریجی
R	شعاع دریچه
θ	زاویه بازشدگی دریچه
N	شمار داده‌ها
μ	میانگین داده‌ها

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

- Marashi, A. (2019). Hydraulics of butterfly gates: Specifications and criteria for open canal applications, PhD Thesis, University of Lorestan. (In Persian)
- Moghtaderi, A. & Valizadegan, E. (2021). Investigation of the hydraulic characteristics of flap gates at the end of trapezoidal canals. *J Water Soil Sci.*, 25(2), 107–118. (In Persian)
- Seyedzadeh, A., Yasi, M. & Farhoudi, J. (2024). Investigating the flow through parallel sluice gates on a broad-crested weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 99, 102679, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102679>.
- Guo, X., Guo, Y., Wang, T., Fu, H. & Li, J. (2021). Study and application of discharge calibration for submerged radial gates. *Flow Measurement and Instrumentation*, 78, 101912, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101912>.
- Persian)
- Kheiraie, M., Yonesi, H.A., Shahinejad, B., Torabipodeh, H. & Marashi, A. (2026). Laboratory Study of the Application of Semi-circular Rotary Gates in Rectangular Canals under Submerged Flow Conditions. *Water Supply*, 26(6), 486-503.
- karamdokht Behbahani, M., Sajjadi, S.M. & Ahadiyan, J. (2024). Hydraulic Investigation of The Flow Through Multiple Rectangular Lopac Gate Valves In Free Flow And Submerged Mode By Flow3D Software. *Iranian. J. Irrig. Water Eng.*, 56(4), 19-32. (In Persian)
- Kim, D.G. (2007). Numerical Analysis of Free Flow Past a Sluice Gate, *J Civil Eng.*, 11(2), 127-132.
- Liu, Y., Hao, C., Zhang X., Yu, H., Sun, Y., Yin, Z., & Li, X. (2025). Sluice gate flow model considering section contraction, velocity uniformity, and energy loss. *J Hydrology*, 656, 133020, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133020>.



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