

Numerical and Experimental Hydraulic Modeling of Flow under the Influence of a Central Baffle Structure in Open Channels Using OpenFOAM Software

Mohammad Khosravi-Hamole¹, Elham Ghanbari-Adivi^{1*}, Ali Raeisi¹, Gholamreza Shams-Ghahfarokhi², Nariman Mehranfar³

1- Department of Water Engineering, Shahrakord University, Shahrakord, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3- Department of Civil, Mining and Geology, Faculty of Polytechnique, Montreal University, Quebec, Canada.

* ghanbariadivi@sku.ac.ir

Received: 26 April 2026

Revised: 6 June 2026

Accepted: 20 June 2026

Discussion: 22 December 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: This study investigates the hydraulic behavior of open-channel flows containing a central baffle in simple and compound rectangular channels. It compares the effects of channel geometry and the baffle on key flow parameters, including velocity, shear stress, drag and lift forces, energy dissipation, and flow-depth profiles. Particular attention is given to turbulence, vortex formation, and free-surface disturbances around the obstruction. The results aim to improve understanding of how channel geometry and baffle configuration influence hydraulic performance, with applications to the design of open-channel systems, erosion and sediment control, and structural stability.

Methodology: The methodological framework of this research is strategically designed as a robust hybrid approach, integrating advanced numerical modeling techniques with rigorous experimental validation. For the numerical simulations, the widely recognized and powerful OpenFOAM software suite was employed. Specifically, the two-phase flow solver, commonly known as interFOAM, was selected for its proven efficacy in handling free surface flows and air-water interfaces. Complementing this approach, the $k-\omega$ SST turbulence model was adopted. This model offers a superior balance between accuracy and computational efficiency, particularly in predicting flow separation and adverse pressure gradients, which are characteristic of flows around bluff bodies like baffles. The geometric configurations under scrutiny comprised two distinct channel designs: a standard, simple rectangular channel and a more complex channel featuring a composite rectangular cross-section. In both channel types, a centrally positioned baffle structure was incorporated. Standard hydraulic boundary conditions were applied, including a specified inflow discharge rate at the channel inlet and an atmospheric pressure condition at the outlet to simulate open channel flow. After the computational fluid dynamics (CFD) simulations were executed and transient flow fields were established, the obtained numerical results—encompassing velocity profiles, flow depth variations, and shear stress distributions—were subjected to a stringent comparison against meticulously collected experimental data. The accuracy and reliability of the numerical model were quantitatively assessed using established statistical metrics such as absolute error, normalized mean squared error (NRMSE), and the correlation coefficient R^2 , thereby ensuring the fidelity of the simulation in representing the real-world hydraulic phenomena.

Results and Discussion: The simulations revealed distinct hydraulic responses between the simple and composite channels. In the simple rectangular channel, the central baffle generated strong turbulence, unstable downstream vortices, greater energy losses, fluctuating drag and lift forces, and relatively high and non-uniform shear stresses. In contrast, the composite channel reduced the drag-force range from 1.198–12.702 to 4.99–6.53 and substantially decreased bed shear stress, although lift-force oscillations increased, ranging from -9.035 to +10.316.

Energy dissipation was considerably higher in the composite channel, reaching approximately 75% of the incoming flow energy compared with about 33% in the simple channel, indicating stronger energy attenuation associated with the interaction between channel geometry and the baffle. Numerical results were successfully validated against experimental data, with mean errors of 3.81% and 2.35%, NRMSE values of 0.076 and 0.083, and a correlation coefficient of 0.99 for the simple and composite channels, respectively. These results demonstrate the model's reliability in reproducing the main hydraulic characteristics of both configurations.

Conclusion: This comprehensive study successfully elucidated the distinct hydraulic impacts of channel geometry (simple versus composite rectangular) when integrated with a central baffle structure in open channels. The composite channel configuration demonstrated a superior capacity for flow management, characterized by a significant reduction in drag forces and a more controlled dissipation of energy, albeit with increased oscillatory lift forces compared to the simple channel. The high fidelity of the OpenFOAM numerical model, validated against experimental data, underscores its utility for simulating such complex flows. These findings collectively highlight the significant potential of employing composite channel geometries in conjunction with appropriate flow-control structures like baffles to optimize the design and operational efficiency of hydraulic systems.

Keywords: Blockage Effect, Energy dissipation, Central Baffle Structure, Open Channels, Hydraulic flow, OpenFOAM software.

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

Funding: The financial support of this research has been provided by Grant number GRD1M44174 and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from Shahrekord University. for their support.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution:

First Author: Conducting experiments, results, writing the article.

Second Author: Defining and conducting experiments, modeling, reviewing results, revising the article.

Third Author: Supervising.

Fourth Author: Supervising.

Fifth Author: Preparing the model and the results.

Acknowledgment: The authors would like to sincerely thank Shahrekord University for providing the necessary facilities and environment to conduct the experiments of this research.

مدل سازی عددی و آزمایشگاهی هیدرولیک جریان تحت تاثیر سازه بافل مرکزی در مجاری روباز با استفاده از نرم افزار OpenFOAM

محمد خسروی حموله^۱، الهام قنبری عدیوی^{۱*}، علی رئیسی^۱، غلامرضا شمس قهفرخی^۲، نریمان مهرانفر^۳

۱- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شهرکرد.

۳- گروه عمران، معدن و زمین شناسی، دانشکده پلی تکنیک، دانشگاه مونترال، کانادا.

* ghanbariadi@sku.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱

چکیده: در این پژوهش، اثر انسداد ناشی از بافل مرکزی بر رفتار هیدرولیکی جریان در دو نوع کانال روباز با مقطع مستطیلی ساده و مرکب به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. نوآوری این مطالعه در تحلیل همزمان اثر هندسه مرکب کانال و حضور بافل مرکزی بر الگوی توزیع تنش برشی، هیدرولیک جریان و استهلاك انرژی، با استفاده از مدل سازی سه بعدی در نرم افزار OpenFOAM با استفاده از حلگر interFOAM و مدل آشفتگی $k-\omega$ SST است. نتایج نشان داد که ترکیب هندسه مرکب و بافل مرکزی موجب کاهش نیروی درگ و افزایش نرخ استهلاك انرژی نسبت به کانال ساده می شود. نرخ استهلاك انرژی در کانال مرکب حدود ۷۵ درصد و در کانال ساده حدود ۳۳ درصد برآورد شد که ناشی از هم افزایی هندسه مرکب و بافل در تولید گردابه های بزرگ و تغییرات ناگهانی سرعت و فشار است. تحلیل پروفیل عمق و سرعت نشان داد که عمق اولیه در کانال مرکب حدود ۰/۱۴ متر و در کانال ساده حدود ۰/۱۳ متر است و سازه بافل موجب ایجاد اتلاف هدفمند انرژی در ناحیه پس از خود می شود. همچنین در کانال مرکب، بازتوزیع تنش برشی و شکل گیری نواحی جریان کم سرعت در پایین دست سازه مشاهده شد که بیانگر کارایی بیشتر این آرایش در کنترل انرژی جریان است. مقایسه نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی نشان داد که مدل RANS به کاررفته توانایی بالایی در بازتولید مشخصات جریان دارد. یافته های این پژوهش می تواند در طراحی سازه های کنترل انرژی، حفاظت بستر و بهینه سازی مقاطع مرکب در کانال های روباز مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: اثر انسداد، استهلاك انرژی، سازه بافل مرکزی، مجاری روباز، هیدرولیک جریان، نرم افزار OpenFOAM.

۱- مقدمه

پایین دست می شوند. از این رو، استفاده از سازوکارهای مؤثر برای استهلاك انرژی در کوتاه ترین فاصله و با کمترین هزینه اجرایی، از اولویتهای مهندسی هیدرولیک است (Melan et al., 2019). به واسطه این عملکرد، بافل ها بخش مهمی از جمله سامانه های حفاظت و مهار جریان در مهندسی هیدرولیک به شمار می آیند و نقشی کلیدی در افزایش ایمنی پایین دست سازه ها ایفا می کنند. کاربرد

استهلاك انرژی از جمله مسئله های بنیادی در طراحی و بهره برداری سازه های هیدرولیکی است. جریان های پرسرعت پس از عبور از سرریزها و سازه های تنظیم جریان، بخش عمده ای از انرژی پتانسیل را به انرژی جنبشی تبدیل کرده و در صورت نبود نظارت، موجب فرسایش بستر، ناپایداری سازه و تغییرپذیری های ریخت شناسی در

بافل ها تنها به کاهش سرعت جریان محدود نمی شود؛ بلکه این سازه ها می توانند با تغییر ساختار جریان، ایجاد آشفته گی های هدفمند، افزایش عمق موضعی جریان و اصلاح توزیع عرضی و عمقی سرعت، الگوی کلی جریان را متحول کنند. ارزیابی های آزمایشگاهی نشان داده اند که چیدمان یک یا دو ردیف بافل، فاصله قرارگیری آن ها، ابعاد هندسی و شرایط هیدرولیکی ورودی به طور مستقیم بر افت انرژی، افزایش عمق جریان، تغییرپذیری الگوی گردابه ها و تغییرپذیری های رخ نمای سرعت تأثیر می گذارند (Ubing et al., 2017). همچنین نتایج پژوهش ها تأیید می کند که افزایش تعداد بافل ها یا بهینه سازی فاصله آن ها می تواند نسبت استهلاک انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد (Abbas et al., 2018). در کاربردهای واقعی، این سازه ها در حوضچه های آرامش، سرریزها، سازه های حفاظت سیلاب، آبراهه های انتقال آب و حتی در مدیریت انرژی موج های ساحلی مورد استفاده قرار می گیرند و با کاهش قدرت تخریبی جریان های دانه دار و پرسرعت، نقش مهمی در حفاظت از زیرساخت ها و بوم سامانه های آبی دارند (Zhang and Huang, 2022). از منظر عملکرد هیدرولیکی نیز بافل ها می توانند با ایجاد جریان های ثانویه، جلوگیری از شکل گیری گردابه های مخرب، توزیع یکنواخت جریان و کاهش رسوب ها و آلودگی، کارایی مجرا را بهبود دهند (Aydin and Ulu, 2026; Gajusingh et al., 2010). در این پژوهش، انسداد به نسبت سطح مقطع مسدود شده توسط بافل به سطح کل مقطع جریان اطلاق می شود که نقش تعیین کننده ای در تغییر میدان سرعت و فشار دارد. همچنین، آبراهه مرکب به آبراهه ای گفته می شود که شامل یک بخش اصلی و دشت سیلابی جانبی بوده و توزیع سرعت در آن ناهمگن و وابسته به برهمکنش بین این دو ناحیه است. در ادامه به برخی از پژوهش های انجام شده در این موضوع پرداخته می شود:

Kim (2013) با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی مبتنی بر معادله های RANS، رفتار هیدرولیکی فلو و نتوری مجهز به مخروط دایره ای را به عنوان بافل تحلیل کرد. این سازه توانست دبی را در بازه ای از جریان های کم تا زیاد با دقت بالا اندازه گیری کند و به ویژه در دبی های کم عملکرد

دقیق تری نشان داد. نتایج عددی نیز الگوهای جریان مشاهده شده در آزمایش هیدرولیکی را تأیید کرد و همخوانی مطلوب مدل و داده های تجربی را نشان داد. Chaichanasiri and Suvanjumrat (2013) حاکم بر جریان های دو فازی را با استفاده از مدل آشفته گی $k-\epsilon$ در نرم افزار OpenFOAM شبیه سازی کردند. آنان همچنین سطح آب را با روش حجم سیال و الگوریتم PISO برای حل مسئله هماهنگ سازی فشار-سرعت در جریان های دو فازی مدل سازی کردند. نتایج نشان داد که میانگین خطای رخ نماهای سطح در دوره های زمانی گذرا و ثابت به ترتیب $8/94$ و $8/06$ درصد بوده که نشان دهنده عملکرد مناسب نرم افزار در پیش بینی رفتار جریان است.

Naik et al. (2018) با استفاده از مدل CFD سه بعدی و نرم افزار ANSYS-Fluent، به تحلیل عددی و پیش بینی توزیع سرعت میانگین عمقی در آبراهه های مرکب با دشت های سیلابی همگرا پرداختند. نتایج شبیه سازی با اندازه گیری های دقیق آزمایشگاهی مقایسه شده و آن گاه یک شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از روش فنی انتشار برگشتی برای پیش بینی سرعت میانگین عمق در مقطع های مختلف آموزش داده شد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی توانایی این مدل ها در پیش بینی صحیح پدیده های پیچیده جریان در آبراهه های مرکب بود. Ran et al. (2018) با استفاده از روش CFD و مدل آشفته گی $k-\epsilon$ -RNG، میدان های جریان سه بعدی در فلو م های برش خورده دوزنقه شکل را برای تعیین عملکرد هیدرولیکی شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد که عدد فرود و سرعت میانگین طولی در طول مقطع همگرایی افزایش و در مقطع واگرا کاهش یافته است. مقایسه نتایج مدل با داده های آزمایشگاهی، دقت شایان پذیرش مدل را برای بررسی عملکرد این نوع فلو م ها تأیید کرد.

از سویی بر پایه بررسی و ارزیابی های Bahman et al. (2020)، نرم افزار متن باز OpenFOAM (با استفاده از حل گر interFoam و روش VOF) در شبیه سازی عددی جریان های دو فازی و سطح آزاد هیدرولیکی عملکردی بسیار دقیق و شایان دارد. نتایج اعتبارسنجی نشان می دهد که این نرم افزار در ترکیب با مدل آشفته گی $k-\omega$ SST تراز

بلوک‌های بافل T شکل به دلیل افزایش سطح تماس جریان و برخورد با بلوک‌ها، برای جذب انرژی انتخاب شدند. نتایج نشان داد که بلوک‌های تک‌ردیفی جذب انرژی بیشتری را فراهم می‌کنند و این مطالعه پایه مهمی در تعیین برهمکنش‌های جریان و بافل، که اندازه‌گیری تجربی آن‌ها دشوار است، فراهم می‌آورد. (Nair et al. (2024) آبراهه دوزنقه‌ای با انسداد مرکزی مخروطی (فلوم بافل مرکزی مخروطی) را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند تا محل دقیق مقطع بحرانی را تعیین کنند. آزمایش‌ها در آبراهه دوزنقه‌ای با انسداد مخروطی انجام شد و از فلوم برای اندازه‌گیری دبی استفاده گردید؛ هدف، بررسی محل رخداد جریان بحرانی و ارائه روشی برای پیش‌بینی دبی بود. مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی دبی، خطای نسبی $\pm 1/42$ درصد و بیشینه خطای $3/5$ درصد داشت و بررسی‌ها نشان داد مقطع بحرانی در گلوگاه، کمترین تخلیه را دارد و باعث انسداد جریان می‌شود.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه عملکرد هیدرولیکی بافل‌ها و اثرگذاری‌های آن‌ها بر جریان، هنوز شناخت جامعی از تأثیر انسداد ناشی از بافل مرکزی بر الگوی جریان در مجاری روباز با مقاطع ساده و مرکب به صورت هم‌زمان وجود ندارد (KhosraviHamouleh and Ghanbari- (Adivi, 2026).

با وجود پژوهش‌های چندی، خلأهایی در ادبیات شایان مشاهده است به‌طوری که تمرکز بیشتر پژوهش‌ها بر استهلاك انرژی یا پیش‌بینی دبی بوده است نه تحلیل ساختار کامل میدان جریان، نبود بررسی هم‌زمان آبراهه ساده و آبراهه مرکب تحت تأثیر انسداد مرکزی، نداشتن تحلیل تفصیلی تغییرپذیری‌های فشار و ناحیه‌های جدایش و ساختار گردابه‌ای در گلوگاه ناشی از کاهش شدید سطح مقطع و محدود بودن بررسی و ارزیابی‌های مبتنی بر OpenFOAM در این زمینه خاص. این پدیده به‌طور شایان توجهی به ویژگی‌های هندسی و شرایط جریان وابسته بوده و پیش‌بینی آن بدون مدل‌سازی عددی دقیق دشوار است. نوآوری این پژوهش در تحلیل هم‌زمان اثر هندسه آبراهه ساده و مرکب با حضور بافل مرکزی بر الگوی توزیع تنش برشی، هیدرولیک جریان و استهلاك انرژی، با استفاده از

سطح آب، رخ‌نمای سرعت و توزیع فشار را با همخوانی بسیار بالایی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند.

(Heyrani, (2022) در پژوهشی با کمک روش‌های فنی CFD مدل‌های آشفتگی مانند $k-\omega$ SST، $k-\omega$ RNG $k-\epsilon$ و $k-\epsilon$ Smagorinsky، برای شبیه‌سازی تنظیم‌های هندسی مختلف برای اندازه‌های مختلف پارشال فلوم‌ها استفاده کرد. نتایج ناشی از دسته‌بندی‌های مختلف مدل‌های آشفتگی، شامل مدل رینولدز میانگین ناویر استوکس (RANS)، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) و شبیه‌سازی گردابی جدا شده (DES)، که در این پژوهش استفاده شده‌اند، مقدارهای امیدوارکننده‌ای با حاشیه‌های خطا شایان پذیرش ارائه کردند که در همه موارد به جز یک مورد میزان خطا کمتر از ۳ درصد بود. (Cizkova, (2023) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و نرم‌افزار Flow-3D، یک مطالعه شبیه‌سازی سه‌بعدی بر روی فلوم بافل مرکزی مخروطی (CCBF) انجام داد تا الگوهای جریان را تحلیل کند. مدل CFD توسعه‌یافته با تکرار شرایط آزمایشگاهی و مقایسه سطح آب با نتایج تجربی، اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی با بیشینه خطای نسبی مطلق $6/02$ درصد و میانگین خطای مطلق $3/30$ درصد در پیش‌بینی دبی، عمق جریان را به‌طور دقیق پیش‌بینی می‌کند و CFD را به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شناسایی الگوهای جریان در این نوع فلوم‌ها تأیید کرد. (Momeni Heravi et al., (2023) با شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، عملکرد ماژول‌های بافل را در دبی‌های بالا بررسی و پس از تعیین ویژگی‌های شبکه و مدل آشفتگی از طریق آزمایش‌های اولیه، مدل را با داده‌های تجربی معتبرسازی کردند. آن‌گاه، عملکرد این ماژول‌ها در دبی‌های بالا با عملکرد ماژول‌های نیرپیک در شرایط مشابه مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای ماژول‌های بافل برای کاربرد در دبی‌های بالا و همچنین کاهش نیاز به آزمایش‌های تجربی گوناگون از طریق شبیه‌سازی عددی بود.

(Aydoğdu (2024) با استفاده از نرم‌افزار Ansys-Fluent، تأثیر آرایش بلوک‌های بافل تک‌ردیفی و دو ردیفی با هندسه بلوک T شکل را در یک محیط عددی برای کاهش سرعت‌های فوق‌بحرانی به زیربحرانی بررسی و ارزیابی کرد.

هندسی مشخص در یک آبراهه با مقطع مرکب مستطیلی: آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شده است. آزمایش‌ها با بر مبنای تشابه فرودی و با مقیاس ۱:۵۰ در فلوم (آبراهه) با طول ۲۰ متر، عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر انجام شد. برای هر دبی، فراسنجه‌های کلیدی جریان ثبت شد تا توزیع آن‌ها در طول آبراهه و اثرگذاری بافل بر الگوی جریان ارزیابی شود. اندازه‌گیری فراسنجه‌ها پس از استقرار کامل جریان و بر مبنای زمان‌بندی مشخص به‌طور مستقل انجام شد. برداشت داده‌های جریان شامل ارتفاع جریان، دبی و سرعت، با دستگاه‌های اندازه‌گیری و هم از طریق ضبط ویدئویی انجام شد. مقدارهای دبی جریان با فلومتر فراصوتی ثبت شد و سرعت‌ها با دستگاه ADV با دقت ۰/۵ درصد تعیین شد. مطالعه آزمایشگاهی این پژوهش شامل بررسی رفتار جریان پیرامون سازه بافل با ویژگی‌های هندسی مشخص در یک آبراهه با مقطع مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی است که شکل نمای کلی آن در شکل ۱، معرفی ابعاد هندسی در جدول ۱ و مشخصات جریان در جدول ۲ آمده است. ابعاد و شکل مقطع مرکب مورد نظر در این پژوهش بر مبنای ابعاد مقطع ساده که در دسترس بود (Lotfi Kolavani et al., 2019) به شکل یک مقطع مرکب انتخاب شد تا امکان مقایسه نتایج مشابه با مقطع ساده وجود داشته باشد. همچنین ابعاد سازه بافل یاد شده در جدول ۱ برای هر دو مقطع ساده و مرکب یکسان می‌باشد. در شکل ۲ نمایی از مدل آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه و الگوی جریان تولید شده در پیرامون سازه بافل در مقطع مرکب نشان داده شده است.

مدل سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار OpenFOAM و مدل آشفتگی $k-\omega$ SST است. بر این مبنای، این پژوهش با هدف بررسی اثر انسداد ناشی از بافل مرکزی بر سرعت، فشار، الگوی گردابه‌ای و توزیع انرژی در دو نوع آبراهه طراحی شده است. روش تحقیق شامل مدل سازی آزمایشگاهی و عددی هم‌زمان با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM است تا ارزیابی دقیق رفتار واقعی جریان و همخوانی آن با پیش‌بینی‌های عددی انجام گیرد. در پایان، داده‌های عددی و آزمایشگاهی با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه می‌شوند تا دقت مدل و کارایی هندسی بافل‌ها در بهبود الگوی جریان بررسی شود.

۲- مواد و روش

۲-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

الف) استفاده از نتایج پژوهش محققان پیشین Lotfi Kolavani et al. (2019): بخشی از داده‌های مد نظر برای استفاده برای صحت سنجی مدل عددی از پژوهش محققان پیشین (Lotfi Kolavani et al., 2019) استخراج می‌شود. این داده‌ها از نتایج آزمایش‌های انجام شده در یک فلوم پلکسی‌گلس با عرض ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و طول ۱۲ متر استخراج شده‌اند. در این آزمایش‌ها جریان آب توسط یک پمپ سانتریفیوژ تأمین شد و دبی آن با استفاده از یک فلومتر الکترومغناطیسی با دقت بالا اندازه‌گیری شد. در این پژوهش تأثیر فراسنجه‌های هندسی مختلف مانند طول بافل، نسبت انسداد و طول دیواره‌های آبراهه بر رفتار جریان عبوری بررسی شده است. ب) طراحی و آزمایش مدل تجربی سازه بافل با ویژگی‌های

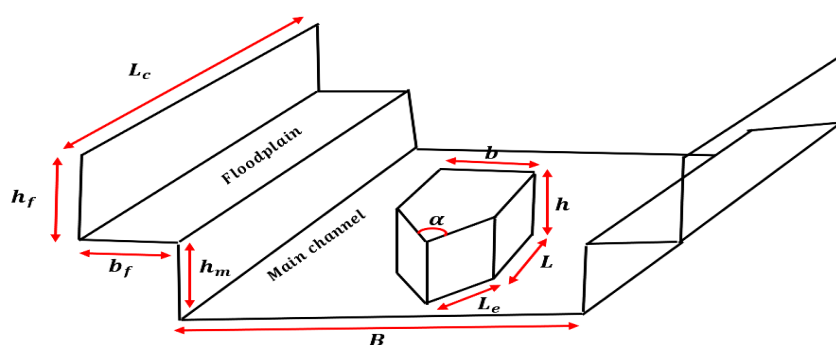


Fig.1 Schematic view of the proposed physical model: Rectangular composite channel with a central baffle structure

شکل ۱ نمای کلی از مدل فیزیکی مورد نظر پژوهش: آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی

جدول ۱ ویژگی‌های آبراهه مرکب بررسی شده در پژوهش

Table 1 Specifications of the composite channel studied in the research

Baffle Structure	Description	Value	Composite Channel	Description	Value
L	Baffle Length	30 cm	B	Main Channel Width	50 cm
Le	Guide Wall Length	24 cm	Hm	Main Channel Height	20 cm
b	Baffle Width	20 cm	Hf	Floodplain Width	5 cm
h	Baffle Height	30 cm	Bf	Floodplain Height	5 cm
α	Baffle Apex Angle	45°	Lc	Channel Length	100 cm



Fig. 2 Overview of the experimental setup and flow pattern visualization in a rectangular compound channel with a central baffle

شکل ۲ نمای کلی مدل آزمایشگاهی ساخته شده و نمایی از الگوی جریان آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی

که P_i داده‌ی آزمایشگاهی، O_i داده‌ی عددی، N تعداد داده‌ها، $\bar{O}_m$ مقدار میانگین داده‌های عددی و $\bar{P}_m$ مقدار میانگین داده‌های آزمایشگاهی، $O_{\max}$ بیشترین مقدار داده‌های عددی و $O_{\min}$ کمترین مقدار داده‌های عددی است.

۲-۲- معادله‌های حاکم

۲-۲-۱- معادله‌های جریان

الف) معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

که در آن t زمان، ρ چگالی، u میدان سرعت سه‌بعدی است. در صورتی که سیال تراکم ناپذیر ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) و جریان سه‌بعدی باشد رابطه بالا به شکل رابطه شماره (۵) تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

u ، v و w به ترتیب مولفه‌های سرعت در سه بعد x ، y و z می‌باشند.

جدول ۲ ویژگی‌های جریان در مدل آزمایشگاهی

Table 2 Current characteristics in the laboratory model

Channel	Parameter	Value
Simple channel	$Q(m^3/s)$	0.02601
	$h1(m)$	0.132
Compound Channel	$Q(m^3/s)$	0.025496
	$h1(m)$	0.145

تجزیه و تحلیل آماری

برای صحت سنجی و ارزیابی نتایج عددی به‌دست‌آمده، به مقایسه‌ی آن‌ها با مقدارهای آزمایشگاهی با استفاده از معیارهای آماری، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، نرمال‌سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) و ضریب همبستگی (R)، با کمک رابطه‌های زیر (۱ تا ۳) پرداخته خواهد شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{\max} - O_{\min}} \quad (2)$$

$$R = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)(P_i - \bar{P}_m)}{(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_m)^2)^{0.5}} \right) \quad (3)$$

۲-۲-۲- معادله های آشفتگی

روش RANS از جمله رویکردهای معتبر در مدل سازی عددی جریان های آشفته، با میانگین گیری زمانی معادله های ناویر- استوکس و مدل سازی ترم های آشفتگی، رفتار اغتشاش را تقریب می زند. در میان مدل های مختلف، مدل $k-\omega$ که توسط ویلکاکس ارائه شد، با استفاده از دو معادله انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ استهلاك ویژه (ω)، برای جریان های با رینولدز پایین و شرایط حساس به تنش برشی عملکرد مطلوبی دارد؛ هرچند نسبت به شرایط مرزی ω بسیار حساس است. برای رفع این ضعف، منتر مدل $k-\omega$ SST را معرفی کرد که با ترکیب تطبیقی مدل های $k-\omega$ و $k-\epsilon$ ، دقت نزدیک دیواره و پایداری در ناحیه های دور از آن را به طور همزمان فراهم می کند. در این ساختار، مدل $k-\omega$ در لایه مرزی و مدل $k-\epsilon$ در جریان آزاد فعال شده و بدین ترتیب دامنه کاربری مدل افزایش می یابد. این مدل همچون مدل پایه، بر حل دو معادله انتقال برای k و ω استوار بوده و به معادله های اصلی جریان افزوده می شود (Mehranfar, and Ghanbari-Adivi, 2022; Bahman et al., 2020). در این پژوهش، برای مدل سازی آشفتگی از مدل SST $k-\omega$ در چارچوب معادله های میانگین گیری شده رینولدز (RANS) استفاده شد. در این رویکرد، معادله های مومنتوم جریان به صورت همزمان با دو معادله انتقال برای انرژی آشفتگی k و نرخ استهلاك ویژه ω حل می شوند. اثرگذاری آشفتگی از طریق گرانیوی اغتشاشی ν_t در تنش های رینولدز وارد معادلات مومنتوم شده و به صورت تکراری در هر گام زمانی/تکراری به روزرسانی می گردد. در نتیجه، هماهنگ سازی بین معادله های جریان و مدل آشفتگی به صورت عددی و در چارچوب حل همزمان میدان های سرعت، فشار، k و ω برقرار می شود.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\gamma}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (13)$$

که در آن:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (14)$$

$$\omega = \frac{\epsilon}{k \beta^*} \quad (15)$$

(ب) معادله اندازه حرکت (مومنتم)

بنابر قانون دوم نیوتن، برای یک ذره سیال، نرخ افزایش مومنتم برابر با مجموع نیروهای وارد بر آن ذره است. معادله مومنتم به صورت رابطه شماره (۶) نوشته می شود:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot T \quad (6)$$

که در آن g شتاب ثقل، T فشار بیش از حد تنش (برشی، محوری، کشش سطحی) است. رابطه مومنتم را می توان به صورت رابطه (۷) بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + F \quad (7)$$

که P فشار، τ فشار بیش از حد تنش و F نشان دهنده مومنتم مربوط به نیروی کشش سطحی است. برای ساده شدن تعریف فشار در مرزها اثرگذاری های فشار هیدرواستاتیک $\rho g x$ از فشار P کم می شود و فشار تعدیل شده P^* با عنوان $P - \rho g h$ در نرم افزار OpenFOAM به صورت معادله (۸) تعریف می شود:

$$\vec{\nabla} P^* = \vec{\nabla} P - \vec{\nabla}(\rho \vec{g} \cdot \vec{x}) = \vec{\nabla} P - \rho \vec{g} - \vec{g} \cdot \vec{x} \vec{\nabla} \rho \quad (8)$$

(ج) معادله انرژی

معادله انرژی کل در هر نقطه به صورت زیر (رابطه ۹) تعریف می شود:

$$E = z + y + \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

به این ترتیب می توان معادله انرژی را بین بالادست (نقطه ۱: ابتدای بافل) و پایین دست (نقطه ۲: انتهای بافل) جریان در آبراهه باز به صورت زیر (رابطه ۱۰) بیان کرد:

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_l \quad (10)$$

که در آن: z ارتفاع سطح آزاد نسبت به نقطه مرجع، y عمق جریان، v سرعت جریان، g شتاب گرانش و h_l افت انرژی می باشد. اگر ارتفاع نسبت به کف آبراهه محاسبه شود، مقدار z برابر صفر خواهد بود و انرژی مکانیکی کل برای این سیال، مساوی با مجموع بارهای جنبشی و فشار خواهد بود. مجموع بار فشار و بار جنبشی جریان در آبراهه باز با نماد E_s نشان داده می شود که همان انرژی مخصوص است. بنابراین، انرژی مخصوص به صورت رابطه ۱۱ تعریف می شود که برای تحلیل نتایج استفاده می شود:

$$E_s = y + \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

شده و حلگر به طور خودکار آن را تنظیم می کند تا پایداری و دقت شبیه سازی تضمین شود. مقدار گام زمانی به گونه ای انتخاب شد که عدد کورانت در کل دامنه در محدوده پایدار و توصیه شده برای حلگر interFOAM باقی بماند. همچنین از تنظیم تطبیقی گام زمانی برای کنترل پایداری سطح آزاد و کاهش نوسان های عددی استفاده شد.

پژوهش به شمار می رود. شرط پایداری حل، لزوم کمتر بودن عدد کورانت از یک است، زیرا عبور ذره در کمتر از یک گام زمانی از سلول، منجر به ناپایداری می شود. در این پژوهش، عدد کورانت جریان ۰/۸۵ و برای جریان همراه با VOF برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. مقدار اولیه گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه تعیین

جدول ۵ شرایط مرزی به کار رفته در مدل سازی عددی

Table 5 Boundary conditions used in numerical modeling

Boundary	alpha.water	Kinetic Energy Dissipation (ϵ)	Specific Dissipation (ω)	Turbulent Kinetic Energy (K)	Pressure (P-rgh)	Velocity (U)
Inlet	Height-dependent flow rate	Zero gradient	Zero gradient	Zero gradient	Fixed flux pressure	Inlet velocity with height-dependent flow rate
Outlet	Height-dependent flow rate	Zero gradient	Zero gradient	Zero gradient	Fixed flux pressure	Inlet velocity with height-dependent flow rate
Walls & Bed	Zero gradient	Epsilon wall function	Omega wall function	k-Q-R wall function	Fixed flux pressure	No-slip
Baffle	Zero gradient	Epsilon wall function	Omega wall function	k-Q-R wall function	Fixed flux pressure	No-slip
Atmosphere	Inlet-Outlet	Inlet-Outlet	Inlet-Outlet	Inlet-Outlet	Total pressure	Pressure-inlet-outlet-velocity
Initial condition	$\alpha = 1$ below initial water depth, $\alpha = 0$ above	Uniform value: 10222.025	Uniform value: 145121.769	Uniform value: 384	Uniform value: zero	Uniform value: zero

یک طرفه می باشد و از بیرون وارد میدان نمی شود. (۵) شرط مرزی تابع دیواره کا کیو آر^۵، تابع دیواره اپسیلون^۶ و تابع دیواره امگا^۷: برای محاسبه ی هریک از فراسنجه های k ، q ، R ، ϵ و ω از فراسنجه های ω^+ ، ϵ^+ ، R^+ ، q^+ ، k^+ که برای جریان آرام تا آشفته مقدار مشخصی دارند استفاده شده و معادله مربوط به آن را تعیین می کند. (۶) شرط مرزی گرادیان صفر^۸: گرادیان عمود بر میدان در مرز، صفر در نظر گرفته می شود.

(۱) شرط مرزی نبود لغزش^۱: مقدار فراسنجه در مرز به طور یکنواخت صفر می باشد. (۲) شرط مرزی فشار شار ثابت^۲: با شرط گرادیان صفر یکسان است و برای میدان اسکالر فشار به کار برده می شود، اثرگذاری ها را اندازه گیری و آن گاه و سرعت را بر مبنای آن تنظیم می کند. (۳) شرط مرزی فشار کل^۳: معادله های سرعت طوری تنظیم می شوند که فشار کل با مقدار وارد شده برای آن برابر باشد. (۴) شرط مرزی ورودی خروجی^۴: جریان به صورت

5. kqRWallFunction
6. epsilonWallFunction
7. omegaWallFunction
8. zeroGradient

1. noSlip
2. fixedFluxPressure
3. totalPressure
4. inletOutlet

آب بالادست، Q ظرفیت جریان، B عرض آبراهه، B_C عرض سودمند عبور جریان: $B_C = B - b$ ، L طول بافل، b عرض بافل، L_e فاصله طولی دیواره راهنمای بافل و ρ چگالی آب است. شایان یادآوری است در اینجا زاویه بافل (α) ثابت و معادل ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است بنابراین جزو متغیرهای مسئله نیست. پس از انتخاب B_C ، μ ، g به عنوان متغیر تکراری و با کمک قضیه باکینگهام رابطه (۲۶) بدست می آید:

$$\frac{Q}{B_C^{2.5} g^{0.5}} = f\left(\frac{h}{Y}, r \frac{B_C}{B}, \frac{L}{X}, \frac{L_e}{b}, \frac{V}{V_0}, \frac{\rho Q}{\mu B}\right) \quad (26)$$

از آنجا که در مدل و نمونه اصلی عدد رینولدز در محدوده آشفته قرار دارد، ساختار کلی جریان بیشتر توسط نیروهای لختی و گرانشی نظارت و مهار می شود و اثرگذاریهای گرانیوی بیشتر به ناحیه های نزدیک دیواره محدود است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی و تحلیل رخنمهای سرعت جریان و رخنمهای توزیع فشار بر روی بدنه در نقطه های مختلف

(۷) نرخ جریان وابسته به ارتفاع^۱: شرط مرزی است که دبی جریان را بر مبنای ارتفاع لحظه ای سطح سیال تنظیم می کند تا جریان ورودی یا خروجی متناسب با تغییرپذیری سطح آب باشد.

(۸) سرعت ورودی با نرخ جریان وابسته به ارتفاع^۲: شرط مرزی سرعت ورودی که مقدار آن طوری محاسبه می شود که دبی حجمی ورودی تابعی از ارتفاع سطح آزاد سیال باشد.

۲-۴- تحلیل ابعادی

در رویکرد تحلیل ابعادی، با استخراج فراسنجه های بی بُعد حاکم و برقراری رابطه مناسب بین آنها، و با در اختیار داشتن نتایج آزمایشگاهی، می توان به یک رابطه مشخص برای تعیین فراسنجه های مورد نظر دست یافت. به طور کلی دستگاه حاکم به صورت زیر بیان می شود:

$$f(h, Q, B_C, B, L, L_e, g, \mu, \rho) = 0 \quad (25)$$

که در اینجا g : شتاب گرانش زمین، μ گرانیوی آب، h عمق

الف) آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی

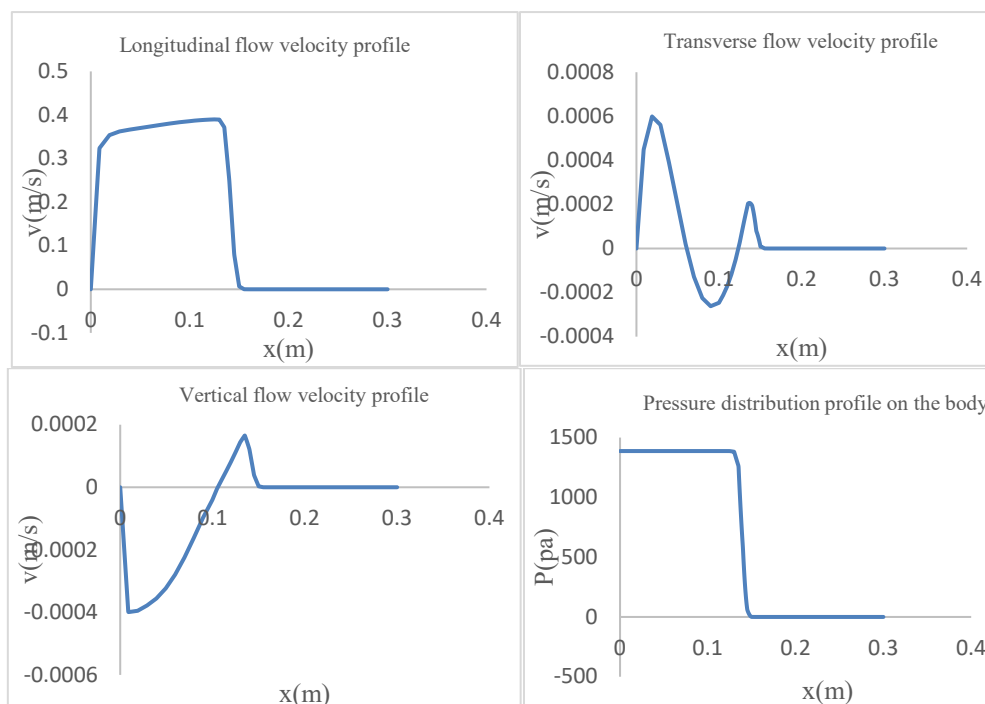


Fig. 3 Longitudinal, transverse, and depth velocity profiles, and upstream pressure profile at the baffle along the channel at a distance of 0.4 meters from the beginning.

شکل ۳ نمودارهای رخنمای سرعت طولی، عرضی و عمقی و رخنمای فشار در بالادست بافل در طول آبراهه در فاصله ۰/۴ متر از ابتدا

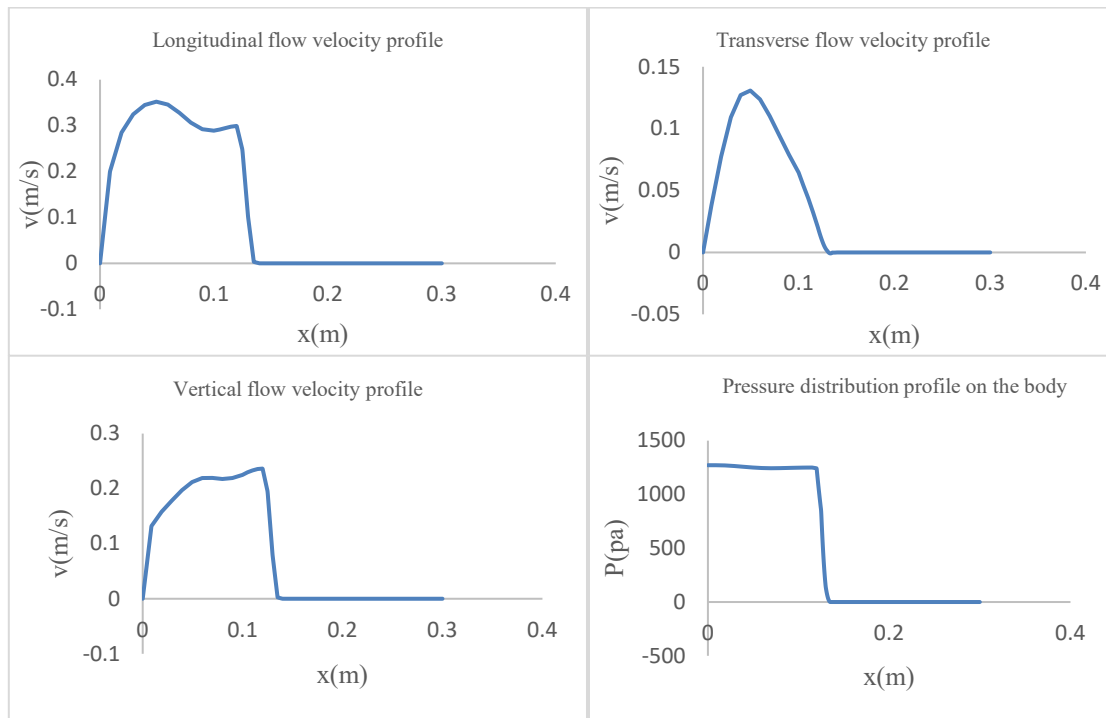


Fig. 4 Longitudinal, transverse, and depth velocity profiles, and downstream pressure profile at the baffle along the channel at a distance of 0.4 meters from the end.

شکل ۴ نمودارهای رخ‌نمای سرعت طولی، عرضی و عمقی و رخ‌نمای فشار در پایین‌دست بافل در طول آبراهه در فاصله ۰/۴ متر از انتها

ب) آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی

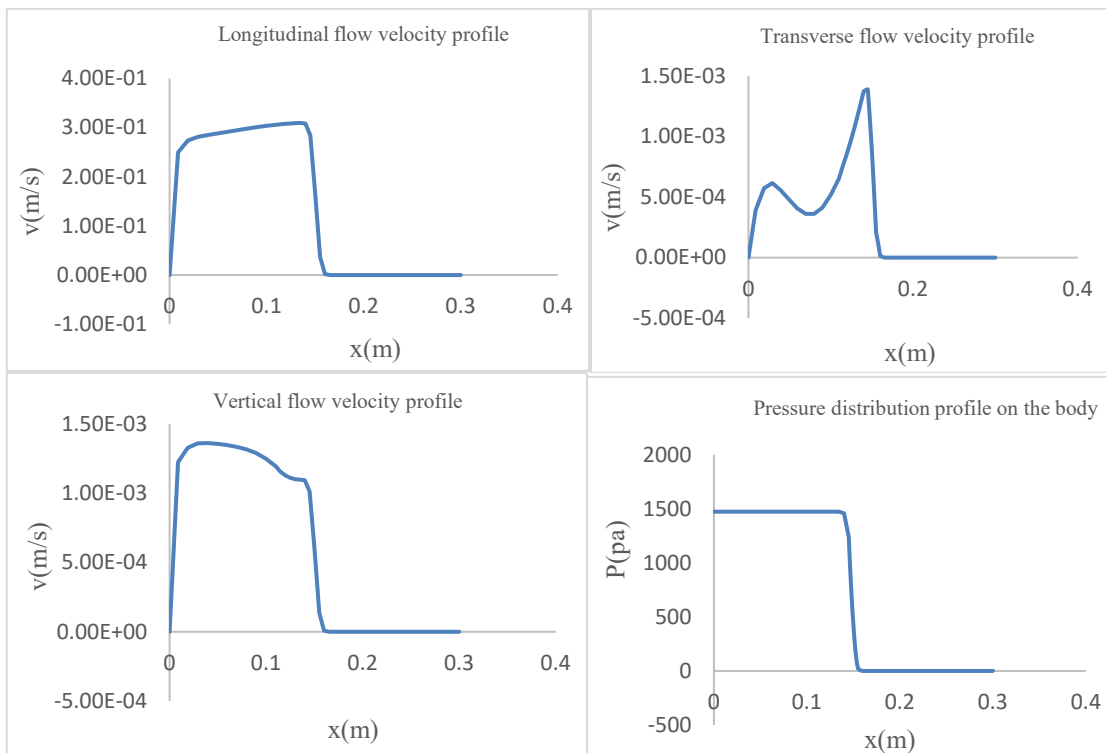


Fig. 5 Longitudinal, transverse, and depth velocity profiles, and upstream pressure profile at the baffle along the channel at a distance of 0.4 meters from the beginning.

شکل ۵ نمودارهای رخ‌نمای سرعت طولی، عرضی و عمقی و رخ‌نمای فشار در بالادست بافل در طول آبراهه در فاصله ۰/۴ متر از ابتدا

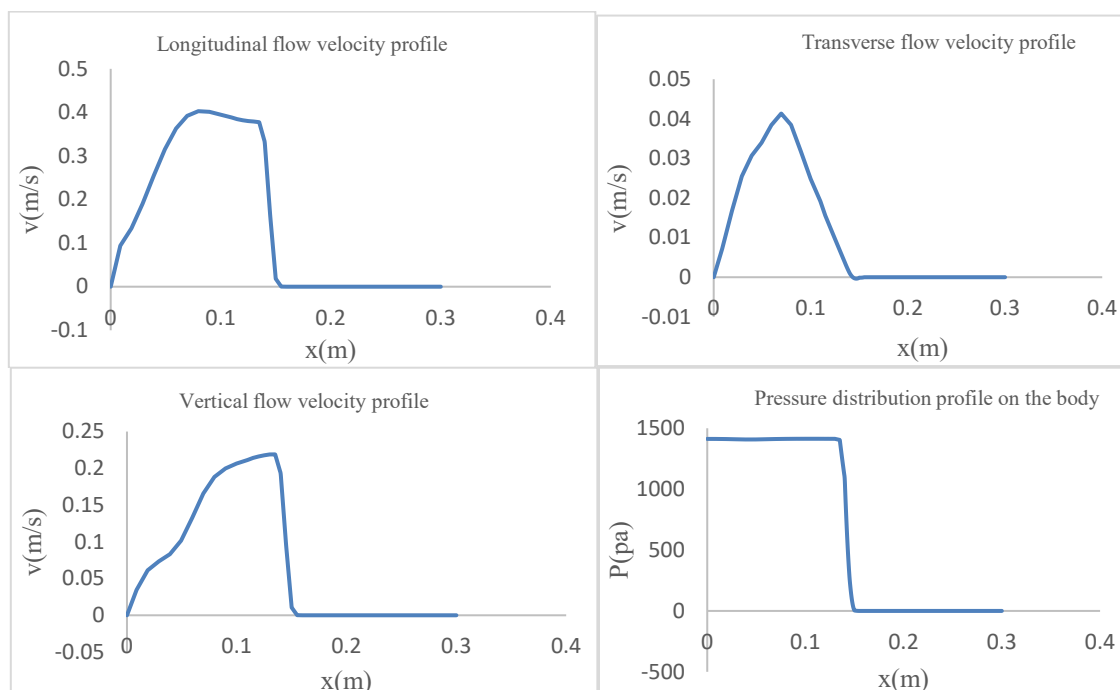


Fig. 6 Longitudinal, transverse, and depth velocity profiles, and downstream pressure profile at the baffle along the channel at a distance of 0.4 meters from the end.

شکل ۶ نمودارهای رخ‌نمای سرعت طولی، عرضی و عمقی و رخ‌نمای فشار در پایین‌دست بافل در طول آبراهه در فاصله ۰/۴ متر از انتها

گلوگاه به‌طور شایان توجهی تا ۲/۱۶۷ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این پدیده نتیجه مستقیم قانون پایستگی جرم و حجم در سیال‌های تراکم‌ناپذیر است. هنگامی که مساحت کاهش می‌یابد، برای حفظ دبی ثابت، سرعت باید افزایش یابد. مقدارهای سرعت در آبراهه ساده از حدود ۰/۳۲۵ متر بر ثانیه در بزرگ‌ترین مقطع تا بیش از ۲/۱۶۷ متر بر ثانیه در کوچک‌ترین مقطع افزایش می‌یابد. شکل ۷ نشان می‌دهد مدل عددی، این روند افزایشی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. به‌طور کلی، آبراهه ساده، بستری برای افزایش پویایی انرژی جنبشی جریان فراهم می‌کند که ممکن است در برخی کاربردها مطلوب باشد، اما توان بالقوه ایجاد جریان‌های فوق بحرانی و ناپایداری را نیز افزایش می‌دهد. هندسه آبراهه مرکب مستطیلی دارای بافل، به‌دلیل ایجاد ناحیه‌های گردابی و الگوهای پیچیده جریان، رفتار متفاوتی از آبراهه ساده نشان می‌دهد و اگرچه با کاهش مساحت، سرعت افزایش می‌یابد، دامنه این افزایش محدودتر است. بر مبنای شکل ۸ سرعت از حدود ۰/۲۹ متر بر ثانیه در بزرگ‌ترین مقطع به حدود ۲/۱۲۴ متر بر ثانیه در کوچک‌ترین مقطع می‌رسد. نتایج عددی و آزمایشگاهی همخوانی بسیار بالایی دارند و بیشترین اختلاف تنها حدود ۶/۹ درصد است. این همخوانی بالا نشان‌دهنده عملکرد قوی مدل عددی در

آبراهه مرکب با حضور بافل موجب تغییرپذیری‌های چشمگیر در الگوهای جریان، به‌ویژه در رخ‌نماهای عرضی و عمودی سرعت، در مقایسه با آبراهه ساده می‌شود. تنوع جهت و شدت جریان در ناحیه‌های پیرامون بافل نشان‌دهنده شکل‌گیری گردابه‌های پیچیده، بازتوزیع انرژی سیال و تغییرپذیری الگوهای عمقی جریان است. افزایش فشار دینامیکی در همه‌ی نقطه‌های آبراهه مرکب بیانگر اثرات دینامیکی قوی‌تر و استهلاک انرژی بیشتر در این پیکربندی است. این ویژگی می‌تواند موجب بهبود هدایت جریان و ایجاد شرایط مناسب‌تر برای کاربردهایی مانند افزایش اختلاط شود. در شکل ۳ تا ۶ نمودارهای رخ‌نمای سرعت طولی، عرضی و عمقی و رخ‌نمای فشار در بالادست بافل و پایین‌دست سازه بافل در دو آبراهه ساده و مرکب آمده است. رخ‌نماهای یاد شده در مقطع بالادست و پایین‌دست بافل در طول آبراهه در فاصله ۰/۴ متر از ابتدا و انتهای بافل به‌دست آمده‌اند.

۳-۲- مقایسه رخ‌نمای سرعت جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی

در آبراهه ساده مستطیلی، مشاهده می‌شود سرعت جریان در

بافل، عمدتاً ناشی از دو عامل هیدرولیکی کلیدی است:

- ۱- کاهش فشار موضعی: با عبور جریان از پیرامون بافل، سرعت سیال در این ناحیه‌ها افزایش می‌یابد. بر مبنای اصل برنولی، افزایش سرعت سیال منجر به کاهش فشار موضعی آن ناحیه می‌شود. این کاهش فشار در سطح آزاد آب باعث می‌شود که فشار هوا سپهری، آب را به سمت ناحیه کم‌فشار (یعنی پیرامون و انتهای بافل) سوق دهد، که نتیجه‌ی آن فرونشست یا کاهش عمق آب در این منطقه است. این پدیده در پیرامون بازدارنده‌های در جریان سیال، امری شناخته شده است.
- ۲- ایجاد گرداب و استهلاک انرژی: بافل به‌عنوان یک بازدارنده، باعث شکستن جریان یکنواخت و ایجاد گرداب‌هایی در پشت و پیرامون خود می‌شود. این گرداب‌ها، انرژی جنبشی جریان را مصرف کرده و منجر به استهلاک انرژی می‌شوند. این استهلاک انرژی به‌صورت کاهش ارتفاع کلی انرژی هیدرولیکی (که با عمق آب در تعادل است) خود را نشان می‌دهد. افزون بر این، اختلاط شدید سیال ناشی از این گرداب‌ها، رخ‌نمای سرعت را پیچیده‌تر کرده و می‌تواند به‌طور موضعی بر توزیع فشار و در نتیجه عمق آب تأثیر بگذارد.

بنابراین، کاهش عمق آب مشاهده شده در انتهای بافل، نه تنها نشان‌دهنده استهلاک انرژی است، بلکه نتیجه‌ی مستقیم تغییرپذیری‌های دینامیکی شدید در میدان جریان، از جمله افزایش سرعت موضعی و ایجاد گرداب‌هایی است که اثرگذاری‌های پیچیده‌ای بر سطح آزاد سیال اعمال می‌کنند.

شبیه‌سازی جریان مهار شده توسط هندسه پیچیده‌تر بافل‌ها است. در شکل ۹ مقایسه سرعت آزمایشگاهی و مدل عددی در دو آبراهه ساده و مرکب آمده است.

۳-۳- مقایسه رخ‌نمای عمق جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی

عمق اولیه آب در آبراهه مرکب (شکل ۱۱- حدود ۰/۱۴ متر) کمی بیشتر از آبراهه ساده (شکل ۱۰- حدود ۰/۱۳ متر) است. این موضوع به‌دلیل طراحی متفاوت آبراهه مرکب باشد که برای دبی مشابه، عمق بیشتری را حفظ می‌کند. اگرچه روند کلی افت عمق در هر دو آبراهه مشابه است (کاهش پس از از بافل)، اما شدت و جزئیات این افت در دو آبراهه متفاوت است. در آبراهه مرکب، بافل اثرگذاری‌های پویایی و قوی‌تری را القا می‌کند که منجر به رخ‌نماهای پیچیده‌تر در ناحیه پس از بافل می‌شود. سازه بافل مرکزی عامل اصلی کاهش عمق آب در انتهای خود است که نشان‌دهنده استهلاک انرژی و تغییرپذیری‌های دینامیکی در جریان است. هندسه مرکب آبراهه، رخ‌نمای سطح آب را نسبت به آبراهه ساده تغییر داده و دینامیک پیچیده‌تری را در ناحیه پس از بافل ایجاد می‌کند.

همانطور که اشاره شد، حضور بافل در آبراهه مرکب، اثرات دینامیکی شایان توجهی را بر جریان اعمال می‌کند. پدیده‌ی مشاهده شده مبنی بر کاهش عمق آب در انتهای

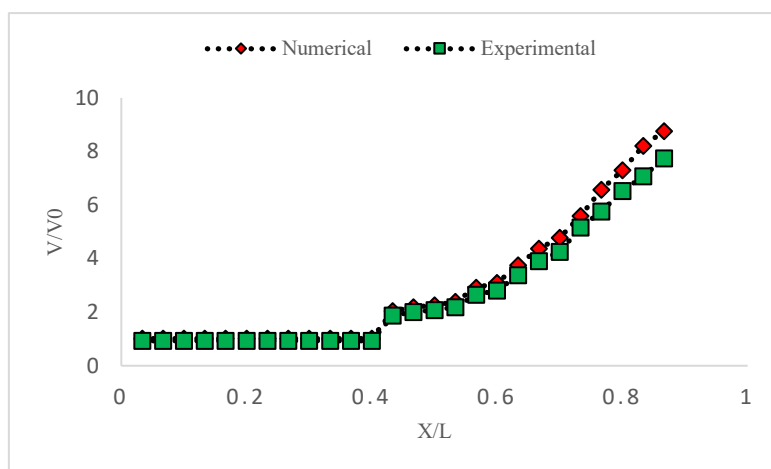


Fig. 7 Comparison of dimensionless velocity profiles in the numerical model (this study) and experimental (Lotfi Kolavani et al., 2019) in a simple rectangular channel with a central baffle structure along the channel.

شکل ۷ مقایسه رخ‌نمای سرعت بی‌بعد در مدل عددی (این پژوهش) و آزمایشگاهی (Lotfi Kolavani et al., 2019) در آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی در طول آبراهه

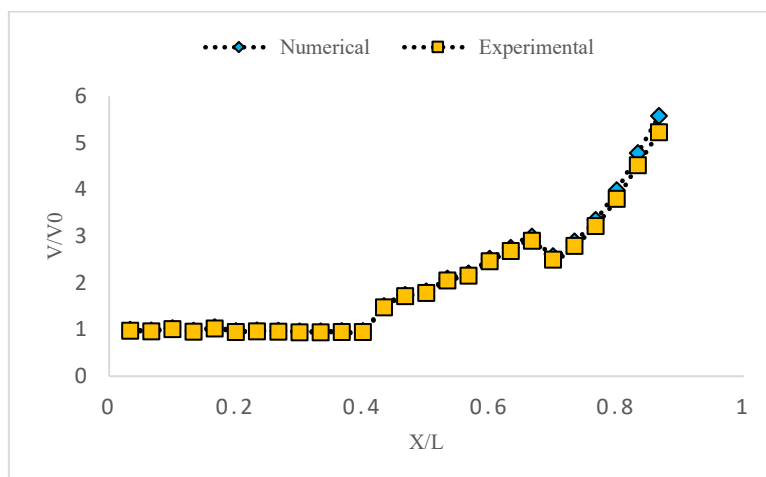


Fig. 8 Comparison of dimensionless velocity profiles in the numerical model (this study) and experimental (this study) in a composite rectangular channel with a central baffle structure along the channel.

شکل ۸ مقایسه رخ‌نمای سرعت بی‌بعد در مدل عددی (این پژوهش) و آزمایشگاهی (این پژوهش) در آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی در طول آبراهه

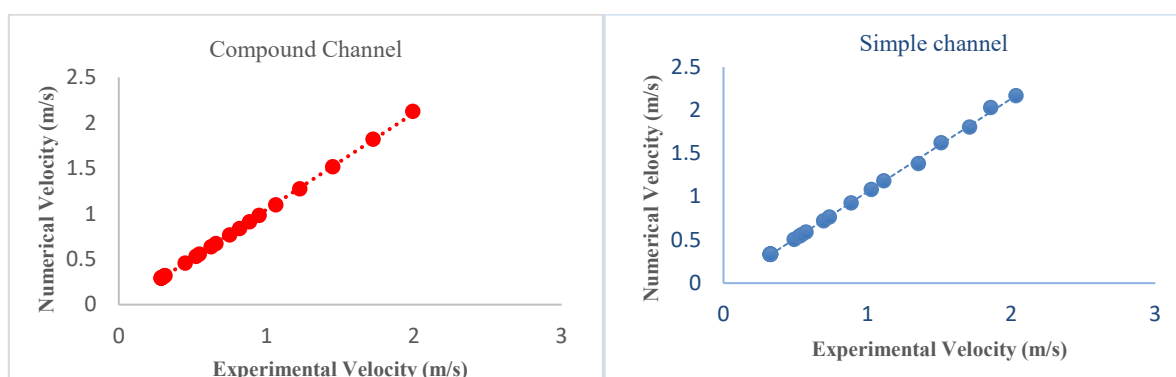


Fig. 9 Comparison of experimental and numerical velocity results in simple and compound channels

شکل ۹ نمای کلی مقایسه سرعت آزمایشگاهی و مدل عددی در دو آبراهه ساده و مرکب

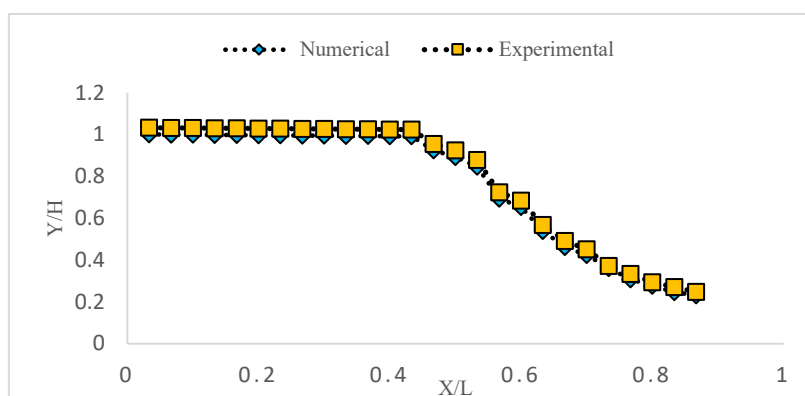


Fig. 10 Comparison of flow dimensionless depth profiles in the numerical model (this study) and experimental (Lotfi Kolavani et al., 2019) in a simple rectangular channel with a central baffle structure along the channel.

شکل ۱۰ نمای کلی مقایسه رخ‌نمای عمق جریان بی‌بعد در مدل عددی (این پژوهش) و آزمایشگاهی (Lotfi Kolavani et al., 2019) در آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی در طول آبراهه

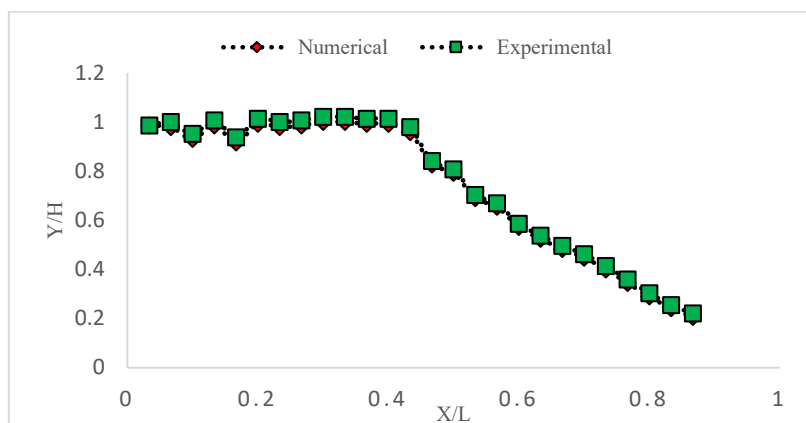


Fig. 11 Comparison of flow dimensionless depth profiles in the numerical model (this study) and experimental (this study) in a composite rectangular channel with a central baffle structure along the channel.

شکل ۱۱ مقایسه رخنمای عمق جریان بی بعد در مدل عددی (این پژوهش) و آزمایشگاهی (پژوهش حاضر) در آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی در طول آبراهه

پشت خود می شود. این اختلاف فشار، همراه با ناپایداری های دینامیکی ذاتی جریان سیال، منجر به جدایش جریان و تشکیل گردابه های ناپایدار می شود. این گردابه ها انرژی جنبشی جریان را مصرف کرده و باعث استهلاک انرژی و آشفتگی می شوند. در هندسه مرکب، دیواره های جانبی آبراهه نقش کلیدی در مهار و هدایت جریان ایفا می کنند. این دیواره ها از گسترش جانبی گردابه ها جلوگیری کرده و جریان را بیشتر به سمت بافل هدایت می کنند. این امر باعث می شود تا بافل اثرگذاری های دینامیکی قوی تری اعمال کند. از سوی دیگر، کاهش مقطع موثر آبراهه در آبراهه مرکب، باعث افزایش سرعت کلی جریان در پیرامون بافل شده و چگالی انرژی جنبشی را افزایش می دهد. این افزایش انرژی می تواند منجر به تشکیل گردابه های کوچکتر و منظم تر یا تسریع فرآیند بازترکیب جریان پس از بافل شود.

۳-۵- بررسی و تحلیل نیروهای درگ و لیفت

در این پژوهش نیروهای لیف و درگ به منظور بررسی اثر متقابل جریان و بافل مرکزی بر رفتار هیدرودینامیکی سامانه گزارش می شوند. این نیروها شاخصی از شدت برهمکنش جریان با سازه، ناپایداری موضعی، تشکیل گردابه ها و توسعه ناحیه پسا بافل می باشند. بنابراین تحلیل تغییرپذیری های و نوسان های آن ها می تواند نشان دهد که چگونه هندسه آبراهه و حضور بافل موجب تغییر در الگوی

۳-۴- مقایسه استهلاک انرژی در مدل عددی و آزمایشگاهی

برای صحت سنجی نتایج بعد از بررسی مقدارهای استهلاک انرژی محاسبه شده در نرم افزار OpenFOAM به مقایسه آن ها با مقدارهای استهلاک انرژی آزمایشگاهی با استفاده از داده های آزمایشگاهی پژوهش Lotfi Kolavani et al. (2019) برای آبراهه مستطیلی ساده و داده های آزمایشگاهی این پژوهش برای آبراهه مرکب مستطیلی پرداخته شده است. ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۵ است که بیانگر میزان خطای بسیار کمی است. شکل های ۱۲ و ۱۳ نمای کلی مقایسه استهلاک انرژی عددی و آزمایشگاهی در مقابل دبی را نشان می دهند. همچنین در جدول ۶ که برای دو مدل عددی (آبراهه ساده و مرکب) آزمایش و مدل عددی انجام شده است به بررسی دیگر شاخص های آماری که بیانگر همخوانی شایان پذیرش مدل عددی با مدل آزمایشگاهی است، ارائه شده است. تفاوت های مشاهده شده بین مدل عددی و آزمایشگاهی در نرخ استهلاک انرژی، بیشتر به دلیل فرض های مدل آشفتگی $k-\omega$ SST در شبیه سازی ناحیه های با گرداب های شدید (ناحیه پس از بافل) و اثرگذاری های شبکه بندی و همچنین تقریب های گسسته سازی در مدل عددی است. تشکیل گردابه ها در پشت بافل مرکزی، یک پدیده شناخته شده در جریان های روباز با بازدارنده ها است. در آبراهه ساده، بافل باعث افزایش ناگهانی عدد رینولدز موضعی و تشکیل ناحیه کم فشار در

جدایش، اختلاط و استهلاك انرژی می‌شود. از این‌رو، ارائه این فراسنجه‌ها در راستای تبیین مکانیزم عملکرد بافل در نظارت و مهار جریان و افزایش استهلاك انرژی انجام شده است.

الف) آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی

آبراهه ساده با بافل، نوسان‌های شدید و نامنظم در نیروی درگ دارد (از حدود $1/2$ تا $12/9$). مقدارهای نیروی لیفت در بازه زمانی مورد بررسی از حدود $2/285$ تا $1/0525$ متغیر است. این نوسان‌های شدید و تغییر جهت مکرر لیفت، بیانگر ماهیت پیچیده و پویایی جریان در پیرامون بافل است که منجر به ایجاد نیروهای عمود بر جهت جریان می‌شود. پایداری جریان و نیروهای وارد بر سازه تحت تاثیر این نوسان‌های لیفت قرار می‌گیرد. در شکل ۱۴ و ۱۵ نمای کلی نمودار تغییرپذیری‌های نیروی درگ و لیفت در مدل عددی آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی آمده است.

ب) آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی

آبراهه مرکب با بافل، نیروی درگ کمتری (حدود $4/99$ تا $6/53$) و نوسان‌های منظم‌تر و با دامنه پایین‌تر را نشان می‌دهد. مقدارهای لیفت از حدود $9/035$ تا $10/316$ متغیر است. این نشان می‌دهد که جریان در این آبراهه، نیروهای عمود بر جهت جریان قوی‌تری را تولید می‌کند. روند لیفت در طول زمان نشان‌دهنده تغییرپذیری‌های پیوسته در جهت و شدت نیروی عمود بر جریان است. در شکل ۱۶ و ۱۷ نمای کلی نمودار تغییرپذیری‌های نیروی درگ و لیفت در مدل عددی آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی آمده است.

کاهش نیروی درگ در آبراهه مرکب نسبت به آبراهه ساده، بیشتر ناشی از تغییرپذیری الگوی کلی جریان و کاهش استهلاك انرژی در مقیاس بزرگ است. در آبراهه ساده، گردابه‌های بزرگ و ناپایدار پشت بافل، استهلاك انرژی شایان توجهی را سبب می‌شوند که این استهلاك به‌صورت نیروی درگ در مقیاس بزرگ‌تر نمود پیدا می‌کند. در آبراهه مرکب، همان‌طور که توضیح داده شد، دیواره‌های جانبی با کاهش مقطع و هدایت جریان، باعث افزایش

سرعت و هموار شدن خطوط جریان می‌شوند. این امر کاهش مقیاس آشفتگی‌ها و بازترکیب سریع‌تر جریان را به همراه دارد. در نتیجه، استهلاك انرژی در پشت بافل مستهلک می‌شود و نیروی درگ کلی کاهش می‌یابد. این پدیده، تأیید کننده اثرگذاری‌های مثبت هندسه مرکب در کاهش تلفات انرژی هیدرولیکی است.

۳-۶- بررسی و تحلیل الگوی جریان تحت تاثیر سازه بافل مرکزی

ساختار مرکب جدایی جریان را به تأخیر انداخته یا میزان آن را کاهش می‌دهد. خطوط جریان چسبیدگی بیشتری به سطح‌ها دارند و گرداب‌های بزرگ و ناپایدار کمتری در منطقه پشت بافل تشکیل شود. در ساختار مرکب (شکل ۱۸) در مقایسه با آبراهه ساده (شکل ۱۹) توزیع هموارتر و یکنواخت سرعت و فشار در مقطع‌های مختلف صورت می‌گیرد.

گردابه‌ها در پشت بافل مرکزی، بیشتر نتیجه جدایش جریان است که در اثر افزایش موضعی سرعت و کاهش فشار با کاهش ناگهانی مقطع رخ می‌دهد. این پدیده با افزایش عدد رینولدز تقویت شده و منجر به تشکیل ناحیه‌های با گردش معکوس می‌شود. بافل با ایجاد یک مانع، ساز و کار اصلی جدایش و تشکیل گردابه را فراهم می‌آورد. هندسه مرکب، با محدود کردن جریان در جهت‌های جانبی، از گسترش این گردابه‌ها جلوگیری کرده و آن‌ها را فشرده‌تر و پایدارتر (در مقایسه با آبراهه ساده) می‌سازد. این محدودیت همچنین باعث افزایش سرعت میانگین جریان و انرژی جنبشی در پیرامون بافل شده که می‌تواند بر شکل و شدت گردابه‌ها تأثیر بگذارد.

۳-۶-۱- ساز و کار تشکیل گردابه‌ها و جدایش جریان

تشکیل گردابه‌ها در پشت بافل مرکزی، یک پدیده شناخته شده در جریان‌های روباز با موانع است. در آبراهه ساده، بافل باعث افزایش ناگهانی عدد رینولدز موضعی و تشکیل ناحیه کم‌فشار در پشت خود می‌شود. این اختلاف فشار، همراه با ناپایداری‌های پویایی ذاتی جریان سیال، منجر به جدایش جریان و تشکیل گردابه‌های ناپایدار می‌شود. این گردابه‌ها

جدول ۶ مقایسه نرخ استهلاک انرژی در مدل عددی (این پژوهش) و آزمایشگاهی (این پژوهش و پژوهش Lotfi Kolavani et al., 2019) در آبراهه ساده و مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی

Table 6 Comparison of energy dissipation rate in the numerical model (current research) and experimental model (current research and Lotfi Kolavani et al., 2019 study) in rectangular simple and composite channels with a central baffle structure.

Channel	Parameter	Experimental	Numerical	RMSE	NRMSE	R
Simple channel	Q(m ³ /s)	0.02601	0.02601	3.16	0.076	0.99
	h1(m)	0.132	0.13			
	h2(m)	0.05	0.045			
	E1(m)	0.137497	0.135668			
	E2(m)	0.088312	0.092299			
	E1-E2/E1	35.77%	31.96%			
CompoundChannel	Q(m ³ /s)	0.025496	0.025496	3.45	0.083	0.99
	h1(m)	0.145	0.15			
	h2(m)	0.03	0.035			
	E1(m)	0.149377	0.15409			
	E2(m)	0.034377	0.03909			
	E1-E2/E1	76.98%	74.63%			

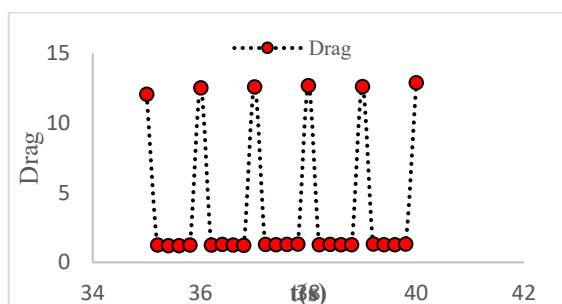


Fig.14 Diagram of drag force variations in the numerical model of a simple rectangular channel with a central baffle structure

شکل ۱۴ نمودار تغییرپذیری های نیروی درگ در مدل عددی آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی

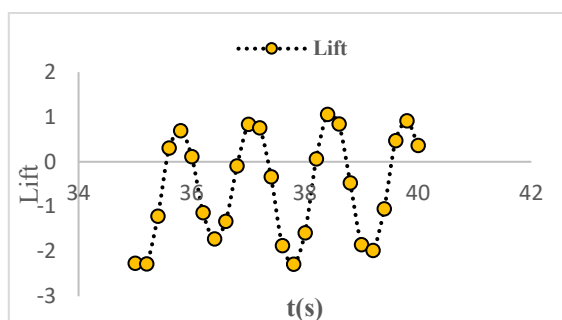


Fig. 15 Diagram of lift force variations in the numerical model of a simple rectangular channel with a central baffle structure

شکل ۱۵ نمودار تغییرپذیری های نیروی لیفت در مدل عددی آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی

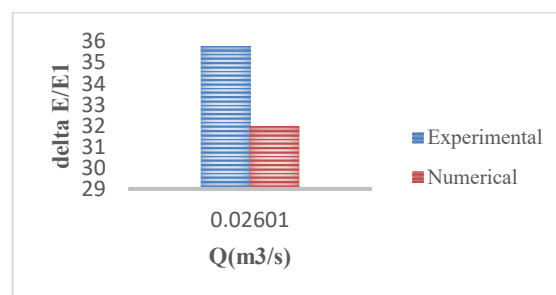


Fig. 12 Comparison of energy dissipation rate in the numerical model (this study) and experimental (Lotfi Kolavani et al, 2019) in a simple rectangular channel with a central baffle structure

شکل ۱۲ نمای کلی مقایسه نرخ استهلاک انرژی در مدل عددی (این پژوهش) و آزمایشگاهی (Lotfi Kolavani et al, 2019) در آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی

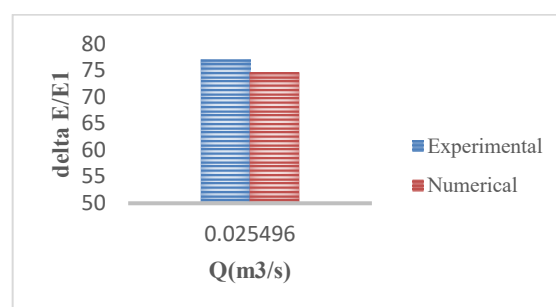


Fig. 13 Comparison of energy dissipation rate in the numerical model (this study) and experimental (this study) in a composite rectangular channel with a central baffle structure

شکل ۱۳ نمای کلی مقایسه نرخ استهلاک انرژی در مدل عددی (این پژوهش) و آزمایشگاهی (پژوهش حاضر) در آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی

رویاریابی با یک بازدارنده ناگهانی و افزایش گرادیان فشار منفی در سطح بافل، لایه مرزی انرژی جنبشی خود را از دست داده و قادر به ادامه حرکت در امتداد سطح نیست. این پدیده منجر به جدایش جریان از سطح بافل می‌شود. در نتیجه، ناحیه‌ای از گردش معکوس در پشت بافل شکل می‌گیرد که به‌عنوان ناحیه جدایش جریان شناخته می‌شود. مشاهده شده است که در شرایط جریان با عدد رینولدز بالاتر ناحیه جدایش در آبراهه ساده، گسترده‌تر بوده و گردابه‌های تشکیل شده در آن ناپایدارتر و با دامنه بزرگتر هستند. این ناپایداری‌ها منجر به استهلاک شایان توجه انرژی جنبشی در این ناحیه و در نهایت افزایش نیروی درگ کلی می‌شود.

در پیکربندی آبراهه مرکب، هندسه مرکب آبراهه، تاثیر شایان ملاحظه‌ای بر ساز و کار جدایش جریان ایفا می‌کند. در این پیکربندی، دیواره‌های جانبی آبراهه باعث محدود شدن جریان در جهت‌های عرضی شده و سرعت کلی جریان در پیرامون بافل را افزایش می‌دهند. این افزایش سرعت، انرژی جنبشی لایه مرزی را تقویت کرده و آن را قادر می‌سازد تا در برابر گرادیان فشار منفی مقاومت بیشتری از خود نشان دهد. در نتیجه، نقطه جدایش جریان به سمت عقب‌تر (نزدیک‌تر به انتهای بافل) جابجا شده و طول ناحیه جدایش کاهش می‌یابد. همچنین، گردابه‌های تشکیل شده در ناحیه جدایش، منظم‌تر بوده و دامنه نوسان‌های کمتری دارند. این امر نشان‌دهنده کاهش استهلاک انرژی در مقیاس بزرگ در ناحیه پشت بافل است.

به طور کلی، در مقایسه با آبراهه ساده، هندسه مرکب منجر به فشرده‌تر شدن ناحیه جدایش و کاهش ناپایداری‌های جریان در پشت بافل می‌شود. این تغییرپذیری در الگوی جریان، دلیل اصلی کاهش نیروی درگ کلی و بهبود بازده هیدرولیکی در آبراهه مرکب نسبت به آبراهه ساده است. مشاهده این پدیده، اهمیت طراحی هندسه آبراهه در نظارت، مهار و بهینه‌سازی رفتار جریان را برجسته می‌سازد.

۳-۷- بررسی تنش برشی

تنش برشی بستر در این پژوهش در امتداد محور طولی

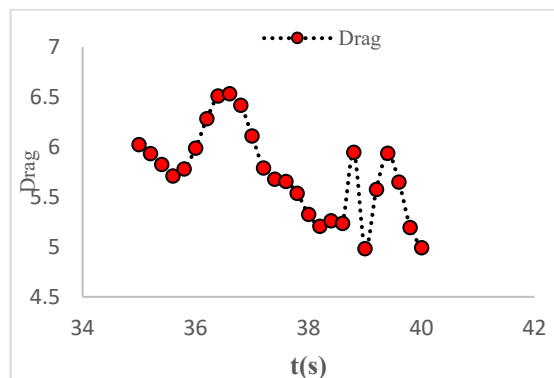


Fig. 16 Diagram of drag force variations in the numerical model of a composite rectangular channel with a central baffle structure

شکل ۱۶ نمودار تغییرپذیری‌های نیروی درگ در مدل عددی آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی

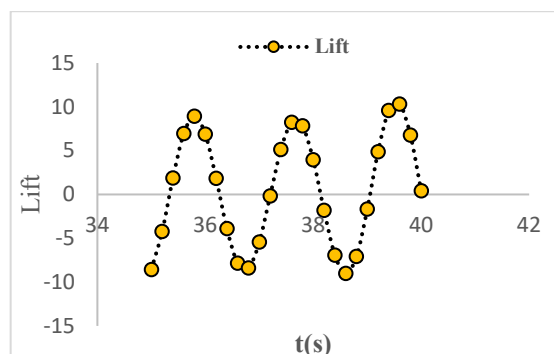


Fig. 17 Diagram of lift force variations in the numerical model of a composite rectangular channel with a central baffle structure

شکل ۱۷ نمودار تغییرپذیری‌های نیروی لیفت در مدل عددی آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی

انرژی جنبشی جریان را مصرف کرده و باعث اتلاف انرژی و آشفته‌گی می‌شوند. در هندسه مرکب، دیواره‌های جانبی آبراهه نقش کلیدی در مهار و هدایت جریان ایفا می‌کنند. این دیواره‌ها از گسترش جانبی گردابه‌ها جلوگیری کرده و جریان را بیشتر به سمت بافل هدایت می‌کنند. این امر باعث می‌شود تا بافل اثرگذاری‌های دینامیکی قوی‌تری اعمال کند. از سوی دیگر، کاهش مقطع موثر آبراهه در آبراهه مرکب، باعث افزایش سرعت کلی جریان در پیرامون بافل شده و چگالی انرژی جنبشی را افزایش می‌دهد. این افزایش انرژی می‌تواند منجر به تشکیل گردابه‌های کوچک‌تر و منظم‌تر یا تسریع فرآیند بازترکیب جریان پس از بافل شود.

در آبراهه ساده، زمانی که جریان به بافل می‌رسد، به‌دلیل

مجاور بافل به دلیل تغییرپذیری مسیر جریان و جدایش آن، به شدت افزایش می یابد. اثرگذاری دیواره ها در آبراهه مرکب به دلیل ایجاد ناحیه انتقال جریان بین دشت سیلابی و مجرای اصلی، باعث تمرکز تنش برشی در کناره ها شده که این پدیده نقش کلیدی در استهلاک انرژی مکانیکی جریان ایفا می کند.

آبراهه و همچنین در مقطع های ابتدا تا انتهای بافل استخراج شده است تا تأثیر هندسه بافل بر توزیع اصطکاک بستر بررسی شود. تحلیل نتایج نشان می دهد که در آبراهه ساده، توزیع تنش برشی تا حد زیادی تحت تأثیر اصطکاک دیواره های جانبی است. با این حال، در آبراهه مرکب و با حضور بافل، یک تغییر ناگهانی در توزیع تنش برشی مشاهده می شود؛ به طوری که گرادیان سرعت در لایه مرزی

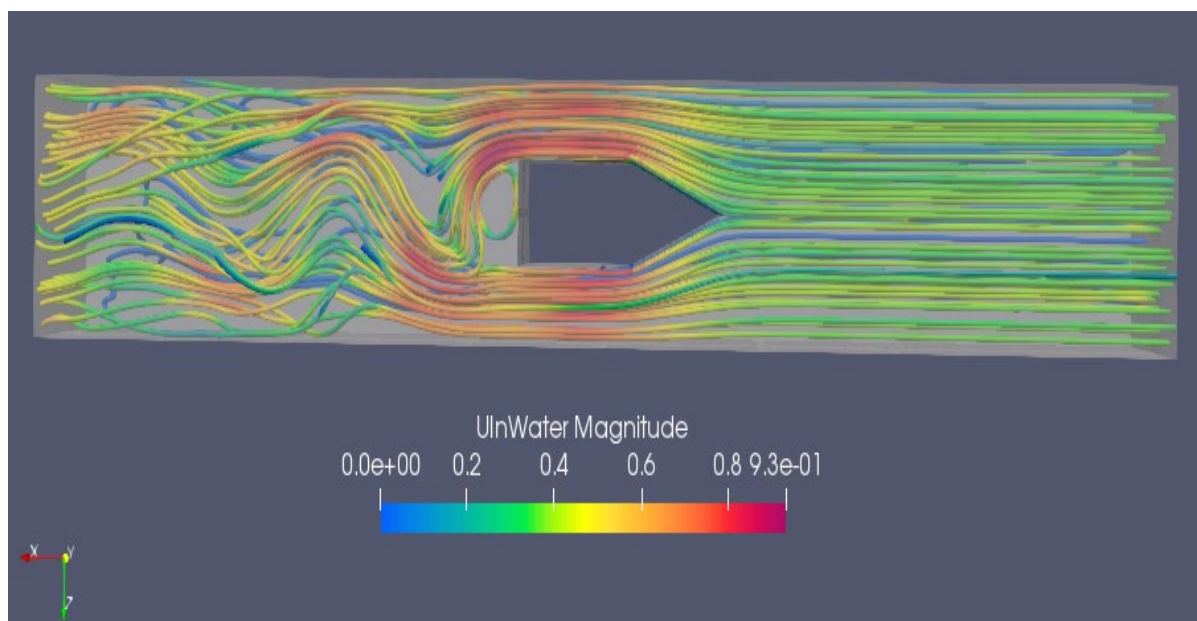


Fig.18 Flow pattern lines under the influence of the baffle structure in a simple rectangular channel in the numerical model

شکل ۱۸ تغییرپذیری های خطوط الگوی جریان تحت تأثیر سازه بافل در آبراهه مستطیلی ساده در مدل عددی

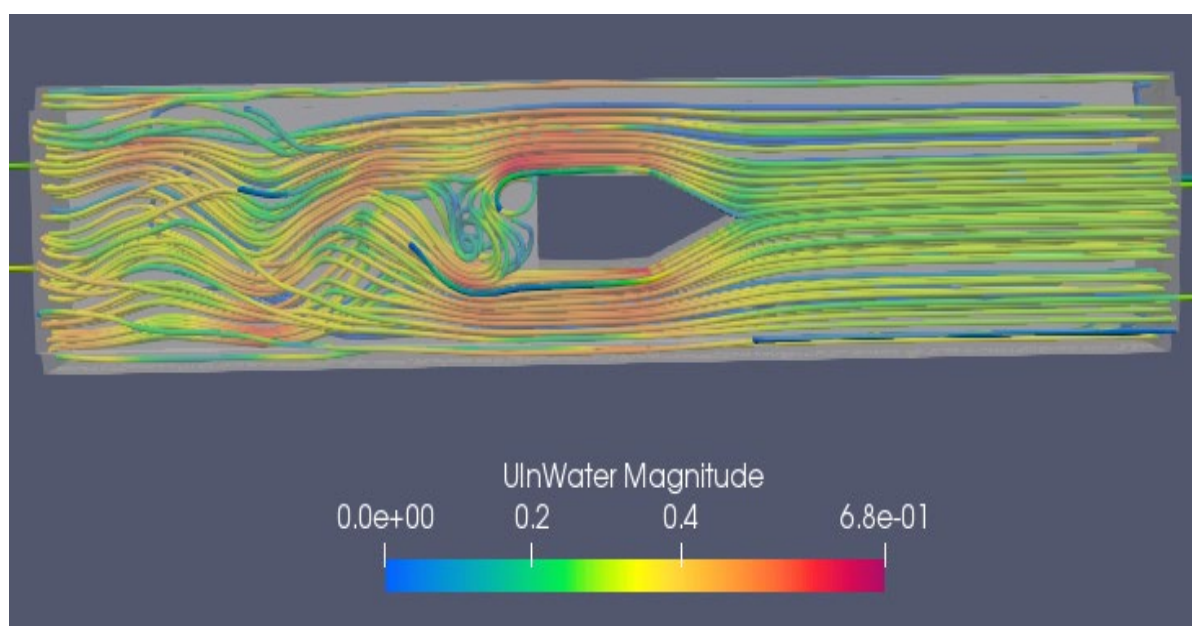


Fig.19 Flow pattern lines under the influence of the baffle structure in a composite rectangular channel in the numerical model

شکل ۱۹ تغییرپذیری های خطوط الگوی جریان تحت تأثیر سازه بافل در آبراهه مرکب مستطیلی در مدل عددی

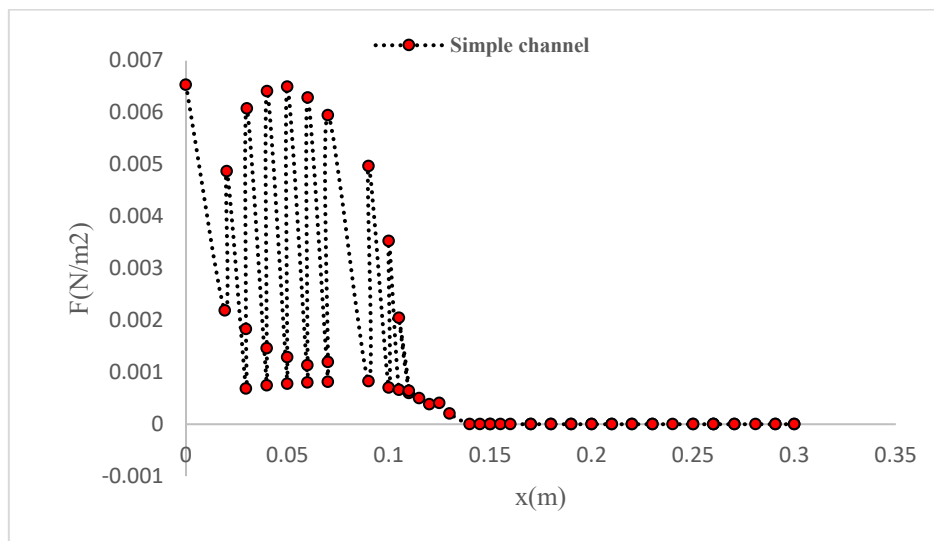


Fig. 20 Diagram of shear stress variations on the baffle and channel walls in the numerical model of a simple rectangular channel with a central baffle structure from the beginning to the end of the baffle.

شکل ۲۰ نمودار تغییرپذیری‌های تنش برشی وارد بر جداره بافل و آبراهه در مدل عددی در آبراهه مستطیلی ساده با سازه بافل مرکزی از ابتدا تا انتهای بافل

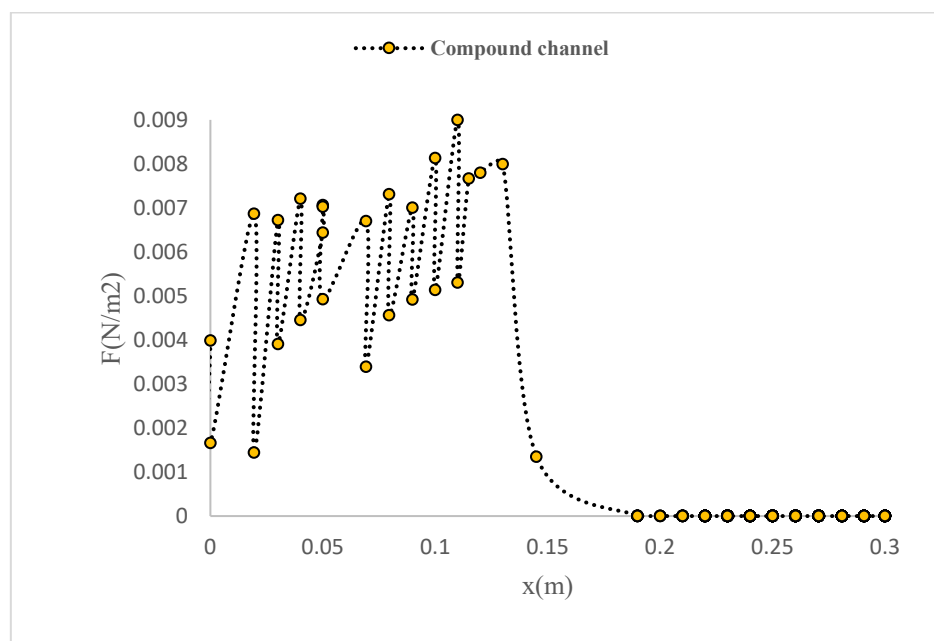


Fig. 21 Diagram of shear stress variations on the baffle and channel walls in the numerical model of a composite rectangular channel with a central baffle structure from the beginning to the end of the baffle.

شکل ۲۱ نمودار تغییرپذیری‌های تنش برشی وارد بر جداره بافل و آبراهه در مدل عددی در آبراهه مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی از ابتدا تا انتهای بافل

عظیمی از داده‌ها را تشکیل می‌دهند و نشان‌دهنده ناحیه‌های با تنش برشی بسیار ناچیز هستند. این می‌تواند ناشی از تشکیل گردابه‌های بزرگ، ناحیه‌های جداشدگی جریان یا مناطق با سرعت بسیار پایین باشد. برخلاف آبراهه ساده که روند کلی به سمت کاهش تنش بود، در آبراهه

مقایسه آبراهه مرکب با آبراهه ساده، تفاوت‌های چشمگیری را آشکار می‌کند که داده‌ها را به دو دسته تقسیم می‌کند: گروه اول: مقدارهای به نسبت بالا و متغیر که احتمالاً مربوط به ناحیه‌های نزدیک به بافل یا بخش‌های پر انرژی جریان است. گروه دوم: مقدارهای فوق‌العاده پایین که بخش

مرکب، پس از مقدارهای اولیه بالا، شاهد سقوط ناگهانی به مقدارهای بسیار کم، آن گاه دوباره به تدریج افزایش یافته و در انتها به مقدارها در حد نزدیک به صفر می رسند. این الگو بسیار متفاوت است و نشان دهنده پویایی به طور کامل متفاوتی در آبراهه مرکب است. در شکل ۲۱ و ۲۰ نمودار تغییرپذیری های تنش برشی در آبراهه ساده و مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی آمده است.

۴- نتیجه گیری

این پژوهش با ترکیب آزمایش های آزمایشگاهی و مدل سازی عددی با نرم افزار OpenFOAM به بررسی تاثیر سازه های بافل در مجاری روباز پرداخته است. در آبراهه مستطیلی ساده، وجود بافل جریان آشفته، گرداب های ناپایدار و استهلاك انرژی حدود ۳۳ درصد را به همراه دارد. در مقابل، استفاده از ساختار آبراهه مرکب، ضمن کاهش شایان توجه نیروی درگ (که مقدارهای آن بین ۴/۹۹ تا ۶/۵۳ مشاهده شد، در مقایسه با ۱/۱۹۸ تا ۱۲/۷۰۲ در آبراهه ساده)، نرخ استهلاك انرژی را به طور چشمگیری تا حدود ۷۵٪ افزایش می دهد.

در آبراهه مرکب، توزیع تنش برشی به مقدارهای بسیار ناچیز نزدیک به صفر کاهش یافته و ناحیه های جریان ضعیف یا جداسازی جریان ایجاد می شود. نیروهای لیفت در آبراهه مرکب بسیار قوی تر و نوسانی تر هستند. تحلیل فیزیکی جریان نشان می دهد که تغییر رفتار هیدرولیکی، نتیجه مستقیم «تغییر ساختار گردابه ای» و «برهمکنش بافل-دیواره» است. در آبراهه ساده، بافل تنها به عنوان یک بازدارنده موضعی عمل کرده و جدایش جریان محدود به پشت بافل است. اما در آبراهه مرکب، ترکیب هندسه آبراهه و بافل، موجب تشدید نرخ تبادل مومنوم عرضی می شود. این امر نه تنها باعث افزایش نوسان های شدید در نیروهای لیفت و درگ (به دلیل ناپایداری های ناماندگار جریان) می شود، بلکه با ایجاد گرادیان های فشار شدید، تنش برشی بستر را در ناحیه های جانبی توزیع کرده و از تمرکز تنش در هسته اصلی جریان می کاهد. در واقع، افزایش استهلاك انرژی در آبراهه مرکب، ناشی از «شکستن پیوستگی جریان» و «تولید گردابه های بزرگ مقیاس» است که بخشی از انرژی

جنبشی را به انرژی گرمایی تبدیل می کنند. در بررسی تغییرپذیری های عمق، مشخص شد که با وجود ثابت بودن دبی ورودی، تغییر در هندسه آبراهه (از ساده به مرکب) منجر به تغییرپذیری های مشهود در سطح آزاد آب می شود. برخلاف تصور اولیه، افزایش اندک عمق در آبراهه مرکب (۰/۱۴ متر در برابر ۰/۱۳ متر) ناشی از پس زدگی جریان به دلیل مقاومت هیدرولیکی بیشتر سازه بافل در آبراهه مرکب است. این سازه با ایجاد انسداد در ناحیه مرکزی، جریان را ناچار به هماهنگ شدن دوباره کرده و باعث ایجاد تغییر در رخ نمای سطح آب در پایین دست می شود که این خود تبیین کننده پویایی متفاوت جریان در دو هندسه مورد بررسی است.

مدل سازی عددی با OpenFOAM و حلگر interFOAM با مدل SST k- ω ، دقت و قابلیت اطمینان بالایی را نشان داد. خطای اندک (۳/۸۱ درصد برای آبراهه ساده و ۲/۳۸ درصد برای آبراهه مرکب)، مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۰/۰۷۶ (آبراهه ساده) و ۰/۰۸۳ (آبراهه مرکب)، و ضریب همبستگی بالای ۰/۹۹، دقت بالای مدل را در پیش بینی رفتار جریان تأیید می کند. در مجموع، نتایج اجرایی این پژوهش نشان می دهد سازه بافل مرکزی، به ویژه در آبراهه های با هندسه پیچیده، ابزاری مؤثر برای سامان دهی جریان، افزایش چشمگیر استهلاك انرژی (تا حدود ۷۵ درصد)، و کنترل مشخصات هیدرولیکی است. نتایج بدست آمده از این تحقیق می تواند مبنای طراحی های مهندسی آینده برای سازه های نظارت و مهار جریان باشد و اهمیت طراحی دقیق هندسه آبراهه و بازدارنده ها برای نظارت و مهار ویژگی های جریان و بهینه سازی عملکرد سامانه را برجسته می سازد.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند از دانشگاه شهرکرد بابت فراهم آوردن امکانات و بستر لازم جهت انجام آزمایش های این پژوهش، صمیمانه قدردانی نمایند.

۶- فهرست نشانه ها

ρ

چگالی (kg/m^3)

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

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه GRD1M4417. صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهرکرد تقدیر می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: اجرای آزمایش‌ها، استخراج نتایج، نگارش مقاله.

نویسنده دوم: تعریف و اجرای آزمایش‌ها، آماده سازی مدل، بررسی نتایج، اصلاح مقاله.

نویسنده سوم: نظارت.

نویسنده چهارم: نظارت.

نویسنده پنجم: آماده سازی مدل و استخراج نتایج.

۷- منابع

Abbas, A., Alwash, H. & Mahmood, A. (2018). Effect of baffle block configurations on characteristics of hydraulic jump in adverse stilling basins. *MATEC Web of Conferences*, 162, 03005, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201816203005>.

Aydin, M.C. & Ulu, A.E. (2026). Hydraulic performance of a wall-guided Tesla valve installed on an open-channel bottom. *Flow Measurement and Instrumentation*, 103374. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2026.103374>.

Aydoğdu, M. (2024). The role of baffles in hydraulic systems: Effects on flow dynamics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 150(1), 10-22.

Bahman, E., Kabiri-Samani, A. & Moghim, M.N. (2020). Hydraulic characteristics of flow over the asymmetric hydrofoil weirs. *Journal of Hydraulics*, 14(4), 123-136.

U	میدان سرعت سه‌بعدی (m/s)
u, v, w	مؤلفه‌های سرعت در راستای x, y, z (m/s)
T	فشار بیش از حد تنش (Pa)
F	مومنتوم ناشی از نیروی کشش سطحی (N)
P	فشار (Pa)
Z	ارتفاع سطح آزاد نسبت به مرجع (m)
Y	عمق جریان (m)
V	سرعت جریان (m/s)
G	شتاب گرانش (m/s ²)
h ₁	افت انرژی (m یا J/kg)
K	انرژی جنبشی آشفتگی (m ² /s ²)
Ω	نرخ تلفات ویژه آشفتگی (s ⁻¹)
E	استهلاک انرژی جنبشی (m ² /s ³)
σ _{k1} , σ _{k2} , σ _{ω1} , σ _{ω2}	ضریب‌های مدل (بدون بعد)
γ ₁ , γ ₂	ضریب‌های مدل (بدون بعد)
β ₁ , β ₂	ضریب‌های مدل (بدون بعد)
F _i	تابع ترکیبی (بدون بعد)
u' _i	مؤلفه‌های نوسانی سرعت (m/s)
δ _{ij}	دلتای کروئکر (بدون بعد)
v _T	گرانروی توربولانسی (m ² /s)
β*	ثابت مدل آشفتگی (بدون بعد)
U	اندازه سرعت درون سلول (m/s)
Δt	گام زمانی (s)
Δx	اندازه سلول (m)
L	طول بافل (m)
L _e	طول دیواره راهنما (m)
b	عرض بافل (m)
h	ارتفاع بافل (m)
α	زاویه راس بافل (درجه)
B	عرض آبراهه اصلی (m)
h _m	ارتفاع آبراهه اصلی (m)
h _f	عرض سلاب دشت (m)
b _f	ارتفاع سیلاب دشت (m)
L _c	طول آبراهه (m)

- of Sciences, Institute of Hydro-Engineering, 27-43, <https://doi.org/10.2478/heem-2022-0003>.
- Melan, A., Syamsir, A. & Zawawi, M.H. (2019). Enhancement of Energy Dissipation by Using Different Shape of Baffle Block - A Review, In: Mohd Sidek, L., Salih, G., Boosroh, M. (eds) ICDSME 2019. ICDSME 2019. Water Resources Development and Management. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1971-0_55.
- Momeni Heravi, A., Kouchakzadeh, S. & Bijankhan, M. (2023). Water delivery performance of Baffle modules using 3D simulation. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 29(2), 154-164.
- Naik, B., Khatua, K.K., Wright, N., Sleight, A. & Singh, P. (2018). Numerical modeling of converging compound channel flow. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(3), 285-297.
- Nair, P.S., Ghare, A.D. & Kapoor, A. (2024). An approach to hydraulic design of Conical Central Baffle Flumes. *Flow Measurement and Instrumentation*, 97, 102573. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102573>.
- Ran, D., Wang, W. & Hu, X. (2018). Three-dimensional numerical simulation of flow in trapezoidal cutthroat flumes based on FLOW-3D. *Front. Agric. Sci. Eng.*, 5(2), 168-176.
- Ubing, C., Ettema, R. & Thornton, C.I. (2017). Flume experiments on baffle-posts for retarding open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, 55(3), 430-437.
- Zhang, B. & Huang, Y. (2022). Impact Model for Baffle Design Resisting Granular-Flow Disasters. *International Journal of Geomechanics*, 22(12), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002555](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002555).
- Chaichanasiri, E. & Suvanjumrat, C. (2013). The k- ϵ turbulence model to simulate the two-phase flows of fluids in flumes using C++ Open Source Code computational fluid dynamic software. *Agriculture and Natural Resources*, 47(3), 460-477.
- Cizkova, K. (2023). Modeling of Conical Central Baffle Flumes Using CFD. In: Lecture notes in civil engineering, 127-137.
- Heyrani, M. (2022). Numerical Modeling of Flow in Parshall Flume Using Various Turbulence Models, Doctoral dissertation, University of Ottawa.
- Gajusingh, S.T., Shaikh, N. & Siddiqui, K. (2010). Influence of a rectangular baffle on the downstream flow structure. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(5), 590-602.
- Khosravi-Hamouleh, M. & Ghanbari Adivi, E. (2026). Baffle Structure in Water Engineering: A Review of Applications, Challenges, and Innovative Methods in Flow Control and Flood Management. (e238472). *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(3), 37-72. (In Persian)
- Kim, D.G. (2013). Hydraulic characteristics in the movable venturi flume with circular cone. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 27(2), 177-184.
- Lotfi Kolavani, F., Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V. & Mahdavi Mazdeh, A. (2019). Experimental study of central baffle flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(3), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001370](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001370).
- Mehranfar, N. & Ghanbari-Adivi, E. (2022). Numerical Modeling of Compound Channels for Determining Kinetic Energy and Momentum Correction Coefficients Using the OpenFOAM Software. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 69(1), Polish Academy

© 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.

