



Three-dimensional numerical simulation of flow in converging non-prismatic compound channels with emphasis on geometry and hydraulic parameters effects

Soran Ezati¹, Ziaedin Aidi², Seyed Hossein Mohajeri^{*3}

1 Environmental Engineering Division, Civil & Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2 River Engineering Department, Regional Water Company of Alborz, , Karaj, Iran.

3 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Corresponding Author email: hossein.mohajeri@gmail.com

© The Author (s) 2025

Received: 16 Jun 2025

Revised: 13 Aug 2025

Accepted: 14 Sept 2025

Published: 08 Oct 2025

Extended Abstract

Introduction

Compound channels, consisting of a main channel and adjacent floodplains, play a crucial role in river engineering. Their hydraulic behavior involves complex interactions between fast main channel flows and slower floodplain flows, creating velocity differentials that generate shear layers and momentum exchange. While previous studies have mainly examined prismatic channels using simplified models, non-prismatic geometries with converging floodplains remain underexplored. These configurations are particularly important in practical applications like bridge crossings and natural river systems. This study utilizes advanced CFD to investigate flow in symmetrically converging compound channels, aiming to: 1) validate and compare Flow-3D and ANSYS Fluent against experimental data; 2) evaluate mesh type impacts (Cartesian vs. Curvilinear); and 3) analyze how convergence angle, relative depth, and discharge affect flow behavior.

Materials and Methods

The research employed experimental data from Bousmar et al. (2004), using a 10-meter flume with a width of 1.20 m, bed slope of 0.99×10^{-3} , and Manning's coefficient of 0.0107. Two symmetric converging configurations were tested: Cv2 (2m length, 11.3° angle) and Cv6 (6m length, 3.8° angle). The simulations applied RANS equations with RNG k- ϵ turbulence model and VOF method for free surface tracking. Flow-3D used a structured Cartesian grid (0.01 m cells), while ANSYS Fluent employed a body-fitted Curvilinear grid. Various hydraulic conditions were simulated, incorporating different convergence angles, relative depths ($H^* = 0.2-0.5$), and discharges ($Q = 10-20$ L/s). Model accuracy was evaluated using R^2 , RMSE, and relative error metrics, comparing numerical results with experimental data for water surface profiles, velocity distributions, and discharge ratios. A theoretical sensitivity analysis based on momentum balance equations complemented the assessment.

Results and Discussion

Model Validation and Flow Analysis

The 3D models, particularly Flow-3D, showed high accuracy in replicating experiments, with $R^2 > 0.96$ and relative errors $< 2\%$ for water surface profiles. The drawdown effect was significantly more pronounced in the Cv2 case (0.00475 m/m) than in Cv6 (0.00237 m/m), highlighting the dominant influence of the convergence angle. The distribution of discharge between the channel and floodplain was captured with $< 5\%$ error. Momentum balance analysis



for the Cv6 case confirmed the physical consistency of the model, showing a positive convective term, a negative pressure term, and a negligible momentum transfer term, with the overall balance closing with minimal error.

Sensitivity Analysis

A theoretical analysis quantitatively ranked key parameters:

Convergence Angle (θ): The most influential parameter. The sharper angle (11.3°) produced approximately double the drawdown rate of the milder angle (3.8°).

Relative Depth (H^*): An increase from 0.3 to 0.5 enhanced the drawdown rate by a factor of 1.42.

Discharge (Q): An increase from 10 L/s to 12 L/s resulted in a 23% increase in drawdown.

Comparative Performance of Flow-3D and Fluent

Both models predicted general flow behavior successfully. However, Flow-3D's Cartesian grid demonstrated superior accuracy in critical regions with high-velocity gradients (e.g., the channel-floodplain interface), reproducing sharp transitions with high fidelity. In contrast, ANSYS Fluent's Curvilinear grid showed acceptable overall agreement ($R^2 > 0.89$) but larger deviations (up to 8% error) at the edges, indicating the Cartesian grid provided a more precise resolution of complex 3D flow structures.

Conclusion

This study successfully demonstrated the capability of three-dimensional numerical models to simulate the complex hydrodynamics of non-prismatic compound channels with converging floodplains. The key findings are:

1. The Flow-3D model, utilizing a Cartesian grid, exhibited marginally higher accuracy than the ANSYS Fluent model with a Curvilinear grid, especially in resolving interfacial shear layers and boundary velocity gradients.
2. The convergence angle is the paramount geometric parameter controlling water surface drawdown, followed by relative depth and discharge, which predominantly influence momentum transfer and flow velocity, respectively.
3. The mid-section and convergence zone of the channel are the most sensitive areas, where geometric and hydraulic changes have the most significant impact.

The research underscores the necessity of employing high-fidelity 3D numerical models for the accurate design and analysis of complex channel geometries. The insights gained are directly applicable to improving the design of hydraulic structures, flood risk assessment, and sustainable river management practices. Future work should investigate the effects of asymmetric convergence, transient flow conditions, and the presence of vegetation or other roughness elements.

Keywords: Numerical model, Compound channel, Experimental data, Flow3D, Fluent

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Author Contributions

Soran Ezati: Analysis, Writing – Review & Editing, Data Curation; **Ziaedin Aidi:** Writing, Methodology, Data Collection, Software; **Seyed Hossein Mohajeri:** Supervision, Investigation, Writing.

Citation: Ezati, S., Aidi, Z., & Mohajeri, S.H. (2025). Three-dimensional numerical simulation of flow in converging non-prismatic compound channels with emphasis on geometry and hydraulic parameters effects. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(2), 133-150. <https://doi.org/10.82185/TSWS.2025.1214155>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



شبیه سازی عددی سه بعدی جریان در کانال‌های مرکب غیر منشوری همگرا با تأکید بر تأثیر هندسه و پارامترهای هیدرولیکی

سوران عزتی^۱، ضیال‌الدین ایدی^۲، سیدحسین مهاجری^{۳*}

۱. دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دفتر مهندسی رودخانه، شرکت آب منطقه ای البرز، کرج، ایران.

۳. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: hossein.mohajeri@gmail.com

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

چکیده

پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری محاسبات عددی، امکان انجام تحلیل‌های عددی جریان در کانال‌های باز را با جزئیات بیشتر در حالت سه بعدی فراهم کرده و امروزه بسیاری از مسائل مرتبط با این کانال‌ها از طریق مدل‌های شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی به صورت مؤثر قابل حل هستند. مقاطع هیدرولیکی مرکب، که از ترکیب کانال اصلی و سیلاب‌دشت تشکیل شده‌اند، به دلیل پیچیدگی‌های ناشی از خصوصیات جریان در این گونه کانال‌ها و تعاملات پویای هیدرولیکی بین این دو بخش، نیازمند استفاده از مدل‌های عددی سه بعدی برای تحلیل جامع رفتار جریان هستند. در این مطالعه، تمرکز اصلی بر مدل عددی سه بعدی Flow3D با شبکه‌بندی کارتزین بوده که برای شبیه‌سازی جریان در کانال‌های مرکب غیر منشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا به کار گرفته شده است؛ همچنین مقایسه‌ای با مدل Fluent با شبکه‌بندی منحنی خطی انجام شده است. برای ارزیابی دقت مدل‌ها، مقادیر ضریب تعیین (R^2) بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شد که در تمامی حالات برای هر دو مدل بالای ۰/۹۶ به دست آمد؛ نتایج این مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی معتبر، حاصل از تحقیقات در دانشگاه کاتولیک لوون بلژیک، مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند. نحوه شبکه‌بندی کناره‌های اریب کانال در Flow3D با مش‌بندی کارتزین، دقت بالایی در بازسازی پروفیل سطح آب، توزیع سرعت میانگین‌گیری‌شده در عمق، و میدان سرعت نشان داد، اگرچه تأثیر نوع مش‌بندی بر پروفیل سطح آب و توزیع سرعت میانگین‌گیری‌شده محدود بود، اما در شبیه‌سازی میدان سرعت، به ویژه در نواحی مرزی، برتری قابل توجهی نسبت به روش منحنی خطی داشت. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که زاویه همگرایی بیشترین اثر را بر کاهش سطح آب داشته، در حالی که عمق نسبی و دبی، به ترتیب نقش کلیدی در انتقال مومنتوم و سرعت جریان ایفا می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: مدل عددی، کانال مرکب، داده‌های آزمایشگاهی، Flow3D، Fluent

استناد: عزتی، س.، ایدی، ض.، و مهاجری، س.ح. (۱۴۰۴). شبیه سازی عددی سه بعدی جریان در کانال‌های مرکب غیر منشوری همگرا با تأکید بر تأثیر هندسه و پارامترهای هیدرولیکی. راهبردهای فنی در سامانه های آبی، ۳(۲): ۱۳۳-۱۵۰.

<https://doi.org/10.82185/TSWS.2025.1214155>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

کانال های مرکب مقاطع هیدرولیکی هستند که از دو بخش کانال اصلی و سیلاب دشت تشکیل یافته اند. کانال اصلی بخشی است که تراز کف آن پایین تر است و عموماً دارای مقطع کلی نزدیک به مستطیل یا دوزنقه است. این بخش کانال، رواناب های معمول و دبی پایه را که در اکثر مواقع در رودخانه جریان دارد منتقل می کند. وجود سیلاب دشت ها در کانال های مرکب باعث می شود که جریان به محض خروج از کانال اصلی با پیرامون مرطوب گسترده ای مواجه شود و نیروی برشی قابل توجهی را به جریان وارد نماید. این نیروی برشی موجب کاهش قابل توجه سرعت جریان در سیلاب دشت ها نسبت به کانال اصلی می شود (Hoseini et al., 2007). این اختلاف سرعت بین سیلاب دشت و کانال اصلی باعث به وجود آمدن یک ناحیه اندرکنشی می شود که باعث به وجود آمدن یک جریان پیچیده در کانال مرکب می شود (Mohammadzadeh et al., 2014). علاوه بر این در این شرایط ساختار جریان از جنبه مومنتوم انتقالی بین سیلاب دشت و بستر اصلی به دلیل عدم شباهت سرعت جریان در این زیر ناحیه ها دارای پیچیدگی های دیگری نیز است (Seckin et al., 2009). کانال های مرکب از جنبه های زیادی از جمله محیط زیستی، اکولوژی و مباحث طراحی دارای اهمیت فراوان هستند؛ بنابراین، شناخت مکانیزم های جریان رودخانه ها در هر دو قسمت کانال اصلی و سیلاب دشت این گونه کانال ها دارای مزایای فراوان است.

سیلاب دشت ها برای محدوده وسیعی از فعالیت های انسانی مثل کشاورزی، اسکان و صنعت مورد استفاده قرار می گیرند و در صورت تغییر در مورفولوژی در اثر شرایط جریان بسیار آسیب پذیر هستند. مطالعه خصوصیات سیلاب دشت ها در علم مهندسی رودخانه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (Ghoshal et al., 2010). برای پیش بینی مناسب نحوه توزیع سرعت و عمق آب در این مقاطع بر اساس نوع کاربرد، یک رویکرد سه بعدی مورد نیاز است. علاوه بر این، مدیریت سیلاب نیازمند مدل های شبیه سازی عددی برای پیش بینی دقیق تراز آب در طول سیلاب است (Tang & Knight, 2006).

جریان در کانال های مرکب معمولاً به وسیله انتقال مومنتوم بین کانال اصلی و سیلاب دشت ها تعریف می شود. این انتقال مومنتوم روی مجموع دبی انتقالی از کانال اثر می گذارد و باید در مطالعات مدیریت و مهندسی سیلاب در نظر گرفته شود. بر اساس شکل (۱) می توان دو فرایند انتقال مومنتوم در این گونه کانال ها تعریف نمود، ۱: یک نوع تبادل آشفتگی (Turbulent Exchange) که در لایه برشی گسترش یافته بین کانال اصلی و سیلاب دشت قرار دارد؛ و ۲: انتقال هندسی (Geometrical Transfer) که مربوط به تبادل جرم و جریان بین اجزاء کانال مرکب است (Chlebek et al., 2010).

شکل ۱- شماتیک تبادل جریان و انتقال مومنتوم در ناحیه تماس بین کانال اصلی و سیلاب دشت در کانال مرکب

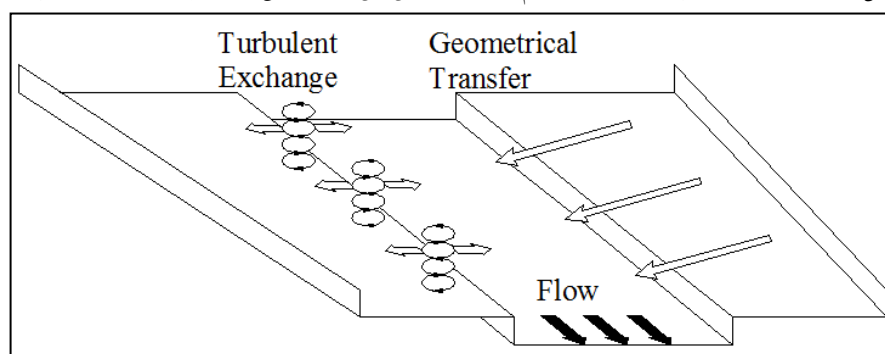


Fig 1. Schematic of flow exchange and momentum transfer at the interface between the main channel and floodplain in a compound channel

مجموع انتقال های جریان با استفاده از مومنتوم باعث افت های اضافی در مسیر جریان شده، ظرفیت انتقالی کل کانال را کاهش داده و روی نحوه توزیع دبی در مقطع و در طول کانال اثر می گذارد. پیچیدگی چنین جریان هایی از تغییرات افت هد اضافی بر اساس هندسه مقطع، دبی کل و عمق جریان نسبی (نسبت بین عمق جریان در سیلاب دشت ها و کانال اصلی) منتج شده است (Proust et al., 2007).

2009). در گذشته به دلیل کمبود داده و اطلاعات، چنین جریان‌هایی بخصوص زمانی که شاخه‌های طولیل رودخانه مورد مطالعه قرار می‌گرفتند معمولاً با استفاده از رویکرد یک‌بعدی مدل‌سازی می‌شدند. اما مدل‌های کلاسیک یک‌بعدی به‌درستی پیچیدگی‌های جریان روی سیلاب‌دشت‌ها را شبیه‌سازی نمی‌کنند (Bousmar et al., 2004). علاوه بر مدل‌های سه‌بعدی مانند Flow3D و Fluent، اخیراً مدل‌های ساده‌تر هیدرولیکی نیز برای شبیه‌سازی کانال‌های مرکب همگرا به‌کار گرفته شده‌اند. (Kaushik et al., 2024) با استفاده از مدل HEC-RAS رفتار هیدرولیکی کانال‌های غیرمنشوری همگرا را در زوایای مختلف بررسی کرده و نشان دادند که این مدل توانایی بازتولید روند تغییرات پروفیل سرعت و تنش برشی را با خطای کمتر از ۱۰ درصد دارد. نتایج آن‌ها توصیه می‌کند که در کانال‌های همگرا از مقادیر کمتر ضریب زبری برای افزایش دقت استفاده شود. تاکنون مطالعات زیادی روی کانال‌های مرکب منشوری انجام شده است اما روی تغییر هندسه مقطع کانال از منشوری به غیرمنشوری بررسی‌های زیادی صورت نگرفته است. کانال‌های مرکب غیرمنشوری می‌توانند دارای هندسه همگرا، واگرا و اریب باشند و از آنجاکه این تغییر هندسه طرح‌های مورد مطالعه در سیلاب‌دشت‌ها را مورد تأثیر قرار می‌دهد هم برای محققان و هم مهندسان دارای اهمیت است (Chlebek et al., 2010). فرایند جریان انتقالی توسط مومتوم ابتدا در سال ۱۹۶۴ توسط Sellin مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن مطالعاتی روی فرایند انتقال مومتوم انجام شد. تعدادی از محققان پدیده انتقال مومتوم جریان روی کانال‌های مرکب مستقیم را بررسی کردند و برخی روش‌های یک بعدی را برای برآورد ظرفیت کانال‌های مرکب بکار بردند (Mamak, 2008).

Bousmar & Zech (1999) یک مدل نظری یک بعدی را به نام روش دبی تبادل شده یا EDM (Exchanged Discharge Method) برای محاسبه ظرفیت عبور دبی در کانال‌های مرکب ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که مدل EDM در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. در کنار مدل‌های عددی سه‌بعدی، رویکردهای داده‌محور نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، (Kaushik & Kumar, 2024) با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM)، توزیع تنش برشی در کانال‌های مرکب همگرا را پیش‌بینی کرده‌اند. نتایج نشان داد که مدل ANN دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد و می‌تواند ابزاری کارآمد برای برآورد سهم نیروهای برشی در سیلاب‌دشت‌ها باشد. بررسی‌های آزمایشگاهی روی کانال‌های مرکب منشوری بیشتر روی انتقال مومتوم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها بود که باعث کاهش ظرفیت کلی دبی کانال می‌شد. همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی بیشتری نیز روی هندسه‌های پیچیده‌تر در کانال‌های مرکب دارای پیچ‌وخم در طول مسیر و روی خصوصیت‌های انتقال جرم و مومتوم انجام گردید. جدیداً محققان مطالعاتی روی شرایط بینابینی شامل هندسه غیرمنشوری یا وجود موانع در مسیر جریان در هندسه منشوری کانال‌های مرکب با تمرکز بر اثرات انتقال جرم بدون وجود انحنا یا پیچ‌وخم در مسیر کانال انجام داده‌اند (Bousmar et al., 2005). اولین مطالعات آزمایشگاهی روی کانال‌های مرکب مخروطی شکل با سیلاب‌دشت‌های همگرای متقارن توسط Bousmar et al. (2004) انجام شد. این آزمایش‌ها روی نحوه انتقال مومتوم و افت هد اضافی جریان مربوط به آن متمرکز شده‌اند. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های جدیدتری نیز به بررسی رفتار هیدرولیکی کانال‌های مرکب همگرا پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه، (Awasthi et al., 2024) با استفاده از آزمایش‌های فلومی نشان دادند که با افزایش زاویه همگرایی، سرعت متوسط جریان در کانال اصلی افزایش یافته و حضور پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر در سیلاب‌دشت‌ها باعث کاهش محسوس سرعت و در عین حال افزایش تنش برشی مرزی می‌شود. این نتایج اهمیت ترکیب شرایط هندسی و زیست‌محیطی در تحلیل جریان کانال‌های مرکب را نشان می‌دهد. (Bousmar et al., 2006) خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب واگرا با هندسه عریض شونده متقارن در سیلاب‌دشت‌ها را بررسی کردند. به‌طور خلاصه، مطالعات پیشین عمدتاً با استفاده از رویکردهای یک‌بعدی (مانند روش دبی تبادل شده یا EDM پیشنهاد شده توسط Bousmar & Zech, 1999) و مدل‌های نظری یا آزمایشگاهی بر روی کانال‌های مرکب منشوری انجام شده است. در برخی تحقیقات نیز مدل‌های دوبعدی برای برآورد ظرفیت انتقال جریان به‌کار رفته‌اند. این روش‌ها علی‌رغم ارائه نتایج قابل قبول در مقیاس‌های خاص، قادر به بازنمایی دقیق

اندرکنش های سه بعدی جریان بین کانال اصلی و سیلاب دشت به ویژه در هندسه های غیر منشوری همگرا نبوده اند. در ایران نیز تحقیقات به روزی در زمینه کانال های مرکب صورت گرفته است. برای نمونه، Mohseni & Naseri (2024) با استفاده از مدل SKM¹ و الگوریتم ژنتیک، ضرایب جریان ثانویه در کانال های مرکب دارای پوشش گیاهی را بهینه سازی کردند. نتایج آن ها نشان داد که عمق نسبی و نسبت عرض کانال به طور معناداری بر مقدار ضریب جریان ثانویه اثرگذار است و روش پیشنهادی حدود ۱۰ درصد خطای مدل را نسبت به روش های پیشین کاهش می دهد.

نوآوری تحقیق حاضر در بهره گیری از مدل های عددی سه بعدی Flow3D و Fluent برای شبیه سازی جریان در کانال های مرکب غیر منشوری با سیلاب دشت های همگرا است. این رویکرد امکان تحلیل جزئیات بیشتری از میدان سرعت، پروفیل سطح آب و تبادل مومنتوم را فراهم کرده و دقت بالاتری در مقایسه با روش های کلاسیک یک بعدی و دوبعدی دارد. علاوه بر این، مقایسه ی مستقیم عملکرد دو نوع شبکه بندی کارتزین و منحنی خطی، چشم انداز جدیدی در بررسی اثرات مش بندی بر پیش بینی رفتار هیدرولیکی چنین کانال هایی ارائه می دهد. در این مقاله به بررسی و مقایسه نتایج مدل های عددی ۳- بعدی شامل مدل های Flow3D و Fluent با نتایج آزمایشگاهی پرداخته خواهد شد. محاسبات روی کانال مرکب غیر منشوری متقارن با کناره های همگرا انجام شده است. صحت نتایج مدل عددی با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی باکیفیت از مطالعات انجام شده توسط Bousmar et al. (2004) در دانشگاه کاتولیک لوون² بلژیک مورد بررسی قرار گرفت. مدل آزمایشگاهی شامل یک فلوم به طول ۱۰ متر و پهنای ۱/۲ متر می باشد. مدل های عددی مورد استفاده شامل Flow3D و Fluent در شرایط یکسان از نظر مدل آشفتگی RNG k-ε و با ابعاد شبکه بندی متوسط حدود ۰/۰۱ متر در اجرا شدند. تفاوت این دو مدل عددی در نحوه توزیع سلول ها در ناحیه همگرای کانال است که از دو حالت Cartesian (عمود بر هم) در مدل Flow3D و Curve Linear (موازی با سطح اریب) در مدل Fluent استفاده شده است. در این دو حالت مشخصات جریان شامل پروفیل سطح آب، توزیع سرعت متوسط گیری شده در عمق و میدان سرعت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. این مدل های عددی از یک روش حجم محدود (FVM) برای حل معادلات میانگین گیری شده رینولدز ناویر - استوکس (RANS) و تکنیک های حجم سیال (VOF) برای حل سطح آزاد جریان استفاده می کنند.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان و مدل عددی

معادلات حاکم بر حرکت یک سیال تراکم ناپذیر لزج در حالت آشفته، توسط معادلات ناویر - استوکس متوسط گیری شده، موسوم به رینولدز (RANS) بیان می شوند. معادلات پیوستگی (بقای جرم) و حرکت (بقای اندازه حرکت) به صورت روابط (۱) و (۲) هستند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad (2)$$

در معادلات فوق u_i : مؤلفه سرعت در جهت، P : فشار کل، ρ : چگالی سیال، g_i : شتاب ثقل در جهت و τ_{ij} : تانسور تنش بوده که در حالت جریان آشفته به صورت رابطه (۳) بیان می شود.

¹ Shiono and Knight Model

² Catholique de Louvain

$$\tau_{ij} = \left[\rho(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[\frac{2}{3} \rho(k + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right] \quad (۳)$$

در جریان‌های آشفته، تنش برشی شامل دو ترم بوده و علاوه بر تنش برشی ناشی از مؤلفه متوسط جریان، تنش برشی دیگری ناشی از مؤلفه‌های نوسانی سرعت ایجاد می‌شود که به تنش‌های رینولدز معروف بوده و به صورت معادله (۴) نشان داده می‌شود.

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (۴)$$

در معادلات فوق ρk لزجت گردابه‌ای یا لزجت آشفتگی است. در تعیین سطح آزاد به روش VOF از یک تابع به نام F استفاده می‌شود که جز حجم سیال (Volume of Fraction) نامیده می‌شود. شکل این تابع دیفرانسیلی در حالت دوبعدی در رابطه (۵) آمده است:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (۵)$$

۲-۲- هندسه مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

طرح آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه، برگرفته از آزمایش‌های دقیق انجام‌شده در دانشگاه کاتولیک لوون بلژیک است که جزئیات کامل آن در مطالعه Bousmar et al. (2004) مستند شده است. فلوام مورد استفاده دارای طول ۱۰ متر، عرض ۱/۲۰ متر، شیب بستر $So = 0.99 \times 10^{-3}$ و ضریب زبری Manning برابر با $n = 0.0107$ بوده است. مدل‌سازی عددی در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Flow3D انجام شد و تلاش شد تا شرایط هندسی و هیدرولیکی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی تطابق کامل داشته باشد. برای بررسی رفتار جریان، دو نوع سیلاب‌دشت همگرا در یک کانال مرکب غیرمنشوری و متقارن مدل‌سازی شده‌اند. این سیلاب‌دشت‌ها به ترتیب در طول‌های ۶ متر و ۲ متر از عرض ۴۰۰ میلی‌متر به صفر همگرا شده‌اند که مطابق با زوایای همگرایی ۳/۸ درجه (سری Cv6) و ۱۱/۳ درجه (سری Cv2) هستند. نمای دقیق هندسه این دو حالت در شکل (۲) ارائه شده است.

در شبیه‌سازی با Flow3D، از شبکه کارتزین (Cartesian) استفاده شده است که با ساختار منظم و سلول‌های عمود بر هم، امکان پیاده‌سازی دقیق شرایط مرزی و بازنمایی صحیح تغییرات میدان جریان را فراهم می‌کند. این نوع شبکه‌بندی به دلیل سادگی هندسی و همپوشانی کامل با راستای جریان، در کاهش خطاهای عددی و افزایش پایداری محاسبات مؤثر بوده و توانسته است پروفیل سطح آب و توزیع سرعت را با دقت بالایی بازتولید نماید. در شبیه‌سازی با Fluent، مش منحنی خطی (Curvilinear) به منظور انطباق بهتر با دیواره‌های مایل و بازنمایی دقیق‌تر نواحی همگرا به کار گرفته شد. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در نواحی همگرای کانال برای دبی‌ها و عمق‌های مختلف انجام شده است. برای هر مقدار دبی، شرایط خروجی طوری تنظیم گردید که پروفیل سطح آب برگشتی در مقطع مرکزی x برابر ۵ متر، به یک عمق هدف برسد؛ جایی که عرض سیلاب‌دشت به ۲۰۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در این مطالعه، از مفهوم عمق نسبی جریان با نماد H^* استفاده شده که طبق شکل (۳) تعریف می‌شود. عمق نسبی جریان (H^*) نسبت ارتفاع بخش جریان بالاتر از تراز سیلاب‌دشت به عمق کل جریان در کانال اصلی است. در این تعریف، H عمق کل جریان در کانال اصلی و hf عمق پرشدگی کامل سیلاب‌دشت است. این پارامتر بیانگر نسبت بخش مازاد عمق جریان بالاتر از تراز سیلاب‌دشت به عمق کل جریان در کانال اصلی بوده و نشان‌دهنده شرایط هیدرولیکی حاکم بر انتقال مومنتوم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌هاست. در این تحقیق سه مقدار H^* برابر با ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ برای تحلیل انتخاب شده‌اند که امکان مقایسه نتایج برای دبی‌های مختلف و شرایط انتقال مومنتوم متغیر را فراهم می‌کنند. در مدل Flow3D، مرزهای ورودی و خروجی مطابق با شرایط آزمایشگاهی تعریف شده‌اند و شبکه‌بندی بادقت بالا در ناحیه همگرای کانال پیاده‌سازی گردیده است. شبیه‌سازی‌ها تا رسیدن به جریان پایدار و همگرا ادامه یافتند و پایداری

نتایج با کنترل مداوم نرخ همگرایی و بررسی پایداری پروفیل سطح آب در طول کانال اطمینان حاصل شد. برای محاسبه تفکیک دبی، میدان سرعت خروجی مدل عددی به صورت سلولی استخراج شد و جریان عبوری از مقاطع کانال اصلی و سیلاب دشت به طور جداگانه انتگرال گیری شد. این روش امکان محاسبه دقیق سهم نسبی دبی در هر ناحیه را فراهم کرد. برای مقایسه و صحت سنجی نتایج، مدل Fluent نیز در بخش های خاصی از تحلیل اجرا شده است تا امکان بررسی تأثیر مش منحنی خطی در کنار مش کارتیزین فراهم شود. شرایط مرزی مدل های عددی با توجه به نتایج آزمایشگاهی تعیین گردید و مدل تهیه شده تا رسیدن به حالت جریان ماندگار اجرا شد.

شکل ۲- نمای سه بعدی، پلان و مقطع عرضی کانال مرکب غیرمنشوری مدل سازی شده

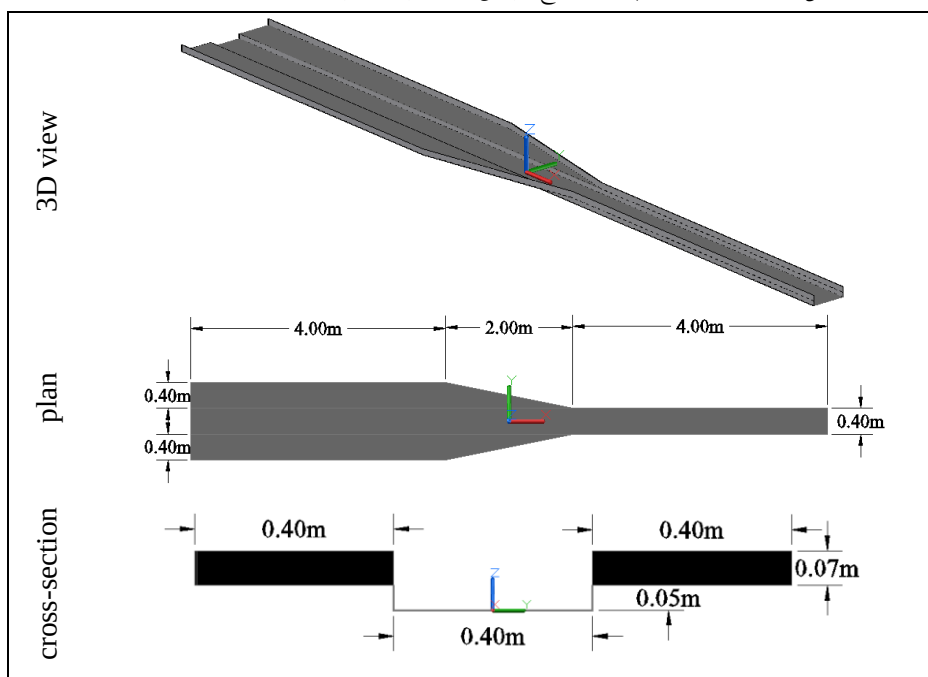


Fig 2. 3D view, plan, and cross-section of the modeled non-prismatic compound channel

شکل ۳- مقطع عرضی کانال مرکب و نحوه تعریف عمق نسبی

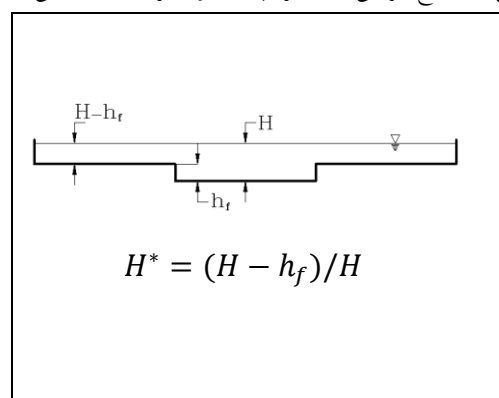


Fig 3. Cross-section of the compound channel and definition of relative depth (H^*)

جدول (۱) مشخصات حالت های مختلف مورد بررسی در شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی را به صورت خلاصه ارائه می دهد.

۳-۲- تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولیکی

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی هیدرولیکی بر رفتار جریان در کانال های مرکب غیرمنشوری با سیلاب دشت های همگرا، تحلیل حساسیت بر پایه نتایج مدل عددی و داده های آزمایشگاهی صورت گرفت. سه پارامتر اصلی شامل

زاویه همگرایی سیلاب‌دشت، عمق نسبی جریان و دبی انتخاب شدند و نقش هرکدام در تغییرات تراز سطح آب بررسی شد. برای این منظور، از خروجی‌های مدل Flow3D در چهار سناریوی عددی با ترکیب‌های مختلف این پارامترها استفاده شد و کاهش تراز سطح آب در ناحیه همگرایی کانال به صورت نرخ تغییر ارتفاع بر حسب طول ($\Delta h/\Delta x$) محاسبه گردید. این شاخص، به عنوان معیار اصلی در ارزیابی واکنش جریان به تغییرات هندسی و هیدرولیکی در نظر گرفته شد. به منظور درک مکانیزم‌های مؤثر، ترم‌های معادله مومنوم شامل همرفت، فشار و انتقال مومنوم نیز از خروجی‌های عددی استخراج و مقایسه گردید. این پارامترها با استفاده از روش دبی مبادله‌ای (EDM) تحلیل شدند تا نقش فیزیکی هر عامل در کاهش سطح آب مشخص گردد.

جدول ۱- مشخصات حالت‌های مختلف مورد بررسی در شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی

Table 1. Specifications of different cases studied in numerical simulation and experimental tests

حالت	زاویه همگرایی (°)	طول سیلاب‌دشت (m)	H*	Q (L/s)	نوع شبکه بندی	ابعاد شبکه‌بندی (m)	مدل آشفتگی
Cv2 H=0.2 Q=10	11.3	2	0.2	10	Cartesian	0.01	RNG k-ε
Cv2 H=0.3 Q=12	11.3	2	0.3	12	Cartesian/Curvilinear	0.01	RNG k-ε
Cv6 H=0.3 Q=12	3.8	6	0.3	12	Cartesian	0.01	RNG k-ε
Cv6 H=0.5 Q=20	3.8	6	0.5	20	Cartesian	0.01	RNG k-ε

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه نتایج تجربی و عددی

هندسه‌های کانال همگرایی Cv2 و Cv6 به طور دقیق توسط Bousmar (2002) و Bousmar et al. (2004) بررسی شده‌اند. در این بخش، برخی از نتایج تجربی و عددی این کانال‌ها از جمله پروفیل سطح آب، توزیع سرعت میانگین عمقی و نسبت دبی ارائه و مقایسه می‌شوند.

۳-۱-۱- پروفیل‌های سطح آب

در این بخش، پروفیل‌های سطح آب در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا بررسی شده است. اشکال (۴ تا ۷) به مقایسه نتایج مدل عددی سه‌بعدی (Flow3D با شبکه‌بندی کارتزین) با داده‌های آزمایشگاهی اختصاص دارند که تغییرات ارتفاع سطح آب را در امتداد کانال (از ۰ تا ۱۰ متر) شامل بخش‌های منشوری و ناحیه همگرا نشان می‌دهند. این پروفیل‌ها برای شرایط مختلف هیدرولیکی، شامل ترکیب‌های متفاوت زاویه همگرایی (Cv2 با ۱۱/۳ درجه و Cv6 با ۳/۸ درجه)، عمق نسبی (H^*) برابر با ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵ و دبی (۱۰، ۱۲، ۲۰ لیتر بر ثانیه)، تحلیل شده‌اند. شکل (۴) مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی با مدل Flow3D با شبکه‌بندی کارتزین را برای حالت Cv2 شامل یک کانال مرکب همگرا با زاویه همگرایی ۱۱/۳ درجه، در شرایط عمق نسبی H^* برابر ۰/۲ و دبی Q برابر ۱۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. در این شکل، داده‌های آزمایشگاهی با نشانگرهای مثلثی آبی و نتایج مدل عددی با خطوط پیوسته قرمز ترسیم شده‌اند که تطابق قابل توجهی میان آن‌ها مشاهده می‌شود. در بخش منشوری بالادست، ارتفاع سطح آب تقریباً ثابت بوده و با ورود جریان به ناحیه همگرایی، کاهش تدریجی ارتفاع سطح آب به دلیل شتاب‌گیری ناشی از تنگ‌شدگی مقطع رخ می‌دهد. این روند کاهشی تا انتهای ناحیه همگرایی ادامه یافته و در بخش منشوری پایین‌دست، پروفیل سطح آب به شرایط پایدار نزدیک می‌شود که بیانگر توانایی مدل Flow3D با شبکه‌بندی کارتزین در بازتولید دقیق رفتار هیدرولیکی جریان در کانال‌های مرکب غیرمنشوری است.

شکل ۴- مقایسه تراز سطح آب مدل عددی و داده های آزمایشگاهی در شرایط $\theta=11.3^\circ$, $H^*=0.2$, $Q=10$ L/s (مقطع Cv2)

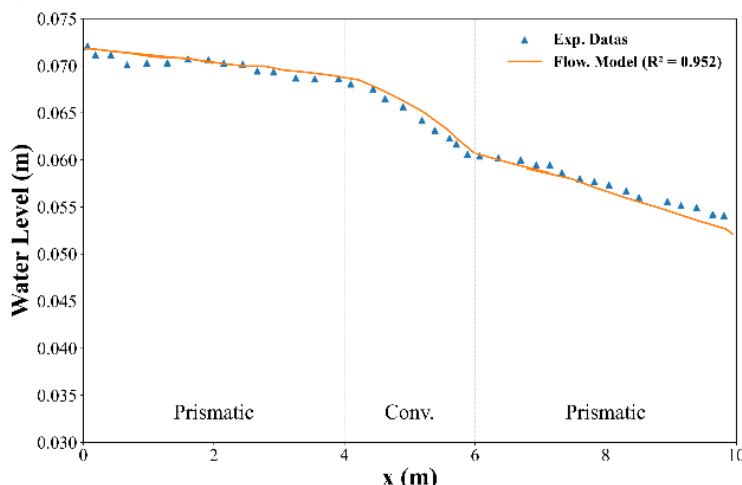


Fig 4. Comparison of water surface profiles between the numerical model and experimental data under conditions of $\theta=11.3^\circ$, $H^*=0.2$, $Q=10$ L/s (Cv2 cross-section)

شکل (۵) در این مطالعه به مقایسه پروفیل های سطح آب بین داده های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی برای حالت Cv2 (کانال مرکب همگرا با زاویه همگرایی $11/3^\circ$ درجه) با عمق نسبی $H^*=0.3$ و دبی $Q=12$ لیتر بر ثانیه می پردازد. این شکل تغییرات ارتفاع سطح آب را در طول کانال (از $x=0$ تا $x=10$ متر) نشان می دهد که شامل بخش های منشوری (Prismatic) در بالادست و پایین دست و ناحیه همگرا (Conv.) در میانه است. در مقایسه با شکل (۵) (حالت Cv2 با $H^*=0.2$ و $Q=10$ لیتر بر ثانیه) که سطح آب با کاهش ملایم تری در ناحیه همگرا مواجه بود، شکل (۶) نشان دهنده کاهش شدیدتر و سریع تر سطح آب در ناحیه همگرا است که به دلیل افزایش دبی (از ۱۰ به ۱۲ لیتر بر ثانیه) و عمق نسبی (از $0/2$ به $0/3$) رخ می دهد. این تغییر نشان دهنده تأثیر مستقیم دبی و عمق نسبی بر شتاب جریان و فروروندگی در ناحیه تنگ شدگی است. در بخش منشوری اولیه، سطح آب همچنان نسبتاً ثابت باقی می ماند، اما کاهش آن در ناحیه همگرا تا انتهای این بخش ادامه می یابد و در بخش منشوری پایین دست به سطح پایدارتری می رسد.

شکل ۵- مقایسه تراز سطح آب مدل عددی و داده های آزمایشگاهی در شرایط $\theta=11.3^\circ$, $H^*=0.3$, $Q=12$ L/s (مقطع Cv2)

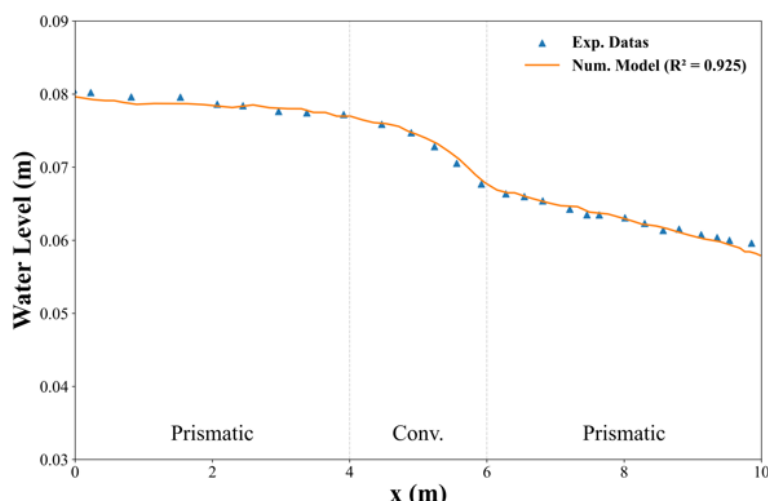


Fig 5. Comparison of water surface profiles between the numerical model and experimental data under conditions of $\theta=11.3^\circ$, $H^*=0.3$, $Q=12$ L/s (Cv2 cross-section)

شکل (۶) به مقایسه پروفیل های سطح آب برای حالت Cv6 (کانال همگرا با زاویه $3/8^\circ$ درجه) با $H^*=0.3$ و $Q=12$ لیتر بر ثانیه می پردازد که تغییرات ارتفاع آب را در طول کانال (x برابر صفر تا ۱۰ متر) شامل بخش های منشوری و ناحیه همگرا نشان می دهد.

در مقایسه با شکل (۴) ($Q=10$ لیتر/ثانیه) و شکل (۵) ($Q=12$ لیتر/ثانیه)، کاهش سطح آب در ناحیه همگرا ملایم‌تر است که به دلیل زاویه همگرایی کمتر ($3/8$ درجه در مقابل $11/3$ درجه) رخ می‌دهد. با این حال، دبی و عمق نسبی مشابه شکل (۵) باعث شتاب‌گیری جریان و فروروندگی قابل توجهی می‌شود.

شکل ۶- مقایسه تراز سطح آب مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط $Q=12$ L/s, $H^*=0.3$, $\theta=3.8^\circ$ (مقطع Cv6)

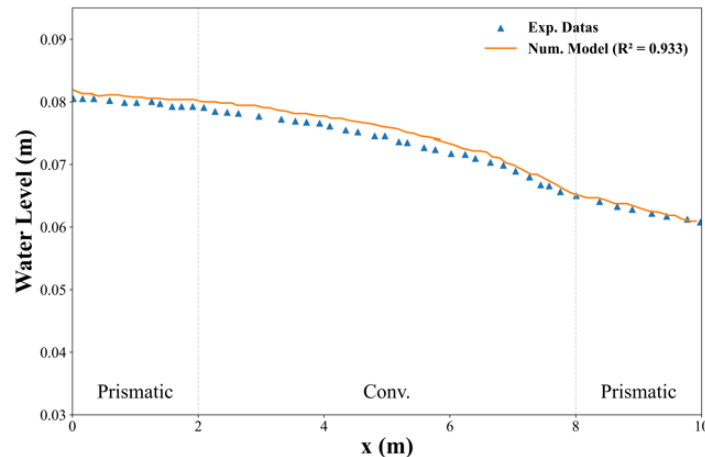


Fig 6. Comparison of water surface profiles between the numerical model and experimental data under conditions of $\theta=3.8^\circ$, $H^*=0.3$, and $Q=12$ L/s (Cv6 cross-section)

شکل (۷) به مقایسه پروفیل‌های سطح آب برای حالت Cv6 (کانال همگرا با زاویه $3/8$ درجه) با $H^*=0.5$ و $Q=20$ لیتر بر ثانیه می‌پردازد که تغییرات ارتفاع آب را در طول کانال (x برابر صفر تا ۱۰ متر) شامل بخش‌های منشوری و ناحیه همگرا نشان می‌دهد. در مقایسه با شکل (۶) ($Q=12$ لیتر/ثانیه)، افزایش عمق نسبی (از $0/3$ به $0/5$) و دبی (از ۱۲ به ۲۰ لیتر بر ثانیه) منجر به سطح آب اولیه بالاتر و کاهش شدیدتر در ناحیه همگرا شده است، که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر شتاب جریان و فروروندگی است. با این حال، زاویه همگرایی کم ($3/8$ درجه) همچنان کاهش ملایم‌تری نسبت به شکل (۵) ($Cv2$ با زاویه $11/3$ درجه) ایجاد می‌کند.

شکل ۷- مقایسه تراز سطح آب مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط $Q=20$ L/s, $H^*=0.5$, $\theta=3.8^\circ$ (مقطع Cv6)

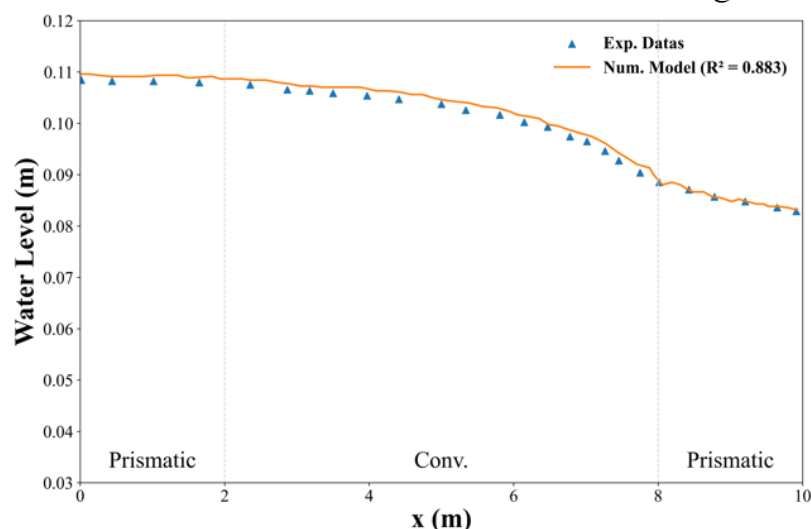


Fig 7. Comparison of water surface profiles between the numerical model and experimental data under conditions of $\theta=3.8^\circ$, $H^*=0.5$, and $Q=20$ L/s (Cv6 cross-section)

۳-۱-۲- ارزیابی آماری دقت مدل عددی مبتنی بر مدل سازی Flow3D با شبکه بندی کارتیزین در بازسازی پروفیل سطح آب برای اعتبارسنجی دقت مدل عددی در بازسازی تراز سطح آب، مقادیر شاخص های آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای نسبی درصدی، و ضریب تعیین (R^2) در چهار سناریوی مختلف با ترکیب های متنوعی از زاویه همگرایی (θ)، عمق نسبی جریان (H^*) و دبی (Q) محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده اند. نتایج نشان می دهد که در تمامی حالت ها، مقدار R^2 بیش از ۰/۹۶ بوده که بیانگر همبستگی قوی میان نتایج شبیه سازی شده و داده های تجربی است. همچنین مقدار RMSE در محدوده بسیار پایین (کمتر از ۲) و خطای نسبی در تمامی سناریوها کمتر از ۲ درصد گزارش شده است که این موضوع بر دقت بالای مدل در بازسازی پروفیل سطح آب در کانال مرکب غیر منشوری تأکید دارد. علاوه بر این، کاهش زاویه همگرایی از ۱۱/۳ درجه به ۳/۸ درجه سبب افزایش RMSE و کاهش R^2 شده است که نشان دهنده حساسیت مدل به تغییرات هندسی در نواحی با تمرکز گرادیان های جریان است.

جدول ۲- شاخص های آماری ارزیابی دقت مدل عددی Flow3D با شبکه بندی کارتیزین در بازسازی پروفیل سطح آب در چهار سناریوی مختلف

Table 2. Statistical indicators for evaluating the accuracy of the Flow-3D numerical model with Cartesian mesh in reconstructing water surface profiles under four different scenarios

شماره شکل	θ, H^*, Q (L/s)	RMSE	Relative Error (%)	R^2
۴	۰/۲، ۱۰ ۱۱/۳°،	۰/۰۰۰۹۳	۱/۵۱	۰/۹۷۹
۵	۰/۳، ۱۲ ۱۱/۳°،	۰/۰۰۱۲۳	۱/۶۵	۰/۹۷۸
۶	۰/۳، ۱۲ ۳/۸°،	۰/۰۰۱۳۷	۱/۷۷	۰/۹۶۵
۷	۰/۵، ۲۰ ۳/۸°،	۰/۰۰۱۵۴	۱/۵۳	۰/۹۷۴

۳-۱-۳- نسبت دبی

انتقال جرم بین سیلاب دشت ها و کانال اصلی نقش اساسی در ایجاد جریان های ثانویه و انتقال مومنتوم ایفا می کند که می توان آن را از طریق توزیع دبی در طول کانال به خوبی ارزیابی کرد (Bousmar et al. 2006). شکل (۸) تغییرات درصد دبی سیلاب دشت نسبت به دبی کل را برای حالت $Cv6$ با عمق نسبی $H^*=0.3$ و دبی $Q=12$ لیتر بر ثانیه در امتداد کانال (از x برابر صفر تا ۱۰ متر) شامل بخش های منشوری و ناحیه همگرا نشان می دهد. نتایج مدل عددی Flow3D با شبکه بندی کارتیزین با داده های آزمایشگاهی تطابق مطلوبی دارد، با اختلاف تقریبی ۵ درصد که در محدوده قابل قبول قرار دارد. این مقایسه با شکل (۶)، که پروفیل سطح آب را برای همان شرایط هیدرولیکی ($Cv6, H^*=0.3, Q=12$ لیتر بر ثانیه) ارائه می دهد، انجام شده است؛ زیرا هر دو شکل به بررسی رفتار هیدرولیکی یکسان در این کانال می پردازند. این ارتباط نشان می دهد که سطح آب در بالادست با تغییر دبی کل در ناحیه میانی تفاوت قابل توجهی ندارد، که ثبات نسبی مساحت مقاطع عرضی سیلاب دشت و کانال اصلی را تأیید می کند. در نتیجه، توزیع دبی در کانال همگرا عمدتاً تحت تأثیر هندسه کانال است، که این موضوع اهمیت طراحی هندسی را در مدیریت جریان برجسته می کند.

۳-۱-۴- تحلیل مومنتوم

اشکال (۹) و (۱۰) به بررسی رفتار مومنتوم در کانال $Cv6$ با $H^*=0.3$ و $Q=12$ لیتر بر ثانیه در امتداد طول کانال (از x برابر ۰ تا ۱۰ متر) شامل بخش های منشوری و ناحیه همگرا می پردازند، که توسط مدل عددی Flow3D با شبکه بندی کارتیزین محاسبه شده است. شکل (۹) تغییرات پیوسته گرادیان های مومنتوم را نشان می دهد، که بر اساس معادله (۶) (روش دبی مبادله ای EDM)

محاسبه شده‌اند و شامل ترم‌های همرفت $d(pAU^2)/dx$ ، فشار $pgAdH/dx$ ، و انتقال مومنتوم pqu_l است. که A مساحت مقطع جریان؛ U سرعت متوسط جریان در کانال اصلی؛ H عمق جریان در کانال اصلی؛ q دبی تبدیلی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت؛ ρ چگالی سیال؛ g شتاب گرانش می‌باشند.

$$0 = \frac{\rho g AdH}{dx} + pqu_l + \frac{\rho AU^2}{dx} + \rho g As_0 - \rho g As_f \quad (6)$$

ترم‌های همرفت به دلیل شتاب جریان در ناحیه همگرا مثبت و ترم فشار به علت کاهش سطح آب (drawdown) منفی است، که با افزایش شیب سطح آزاد در شکل (۶) سازگار است، در حالی که ترم انتقال مومنتوم ناچیز گزارش شده است. شکل (۱۰) میانگین گرادیان‌های مومنتوم را به صورت ستونی ارائه می‌دهد، جایی که ترم فشار $(pgAdH/dx)$ با مقدار $0/6$ نیوتن بر متر بیشترین تأثیر مثبت را دارد، در حالی که شیب بستر $(pgAs_0)$ با $-0/4$ و شیب اصطکاکی $(pgAs_f)$ با $0/2$ نیوتن بر متر اثر کاهشی دارند و ترم pqu_l نزدیک به صفر است. از دیدگاه فیزیکی، ترم همرفت به دلیل شتاب‌گیری جریان در ناحیه همگرا مثبت است. ترم فشار نیز به علت کاهش سطح آب (drawdown) و ایجاد گرادیان فشار هیدرواستاتیک در راستای جریان نقش محرک مثبت دارد و به افزایش مومنتوم کمک می‌کند. در مقابل، ترم شیب بستر نشان‌دهنده اثر مؤلفه وزن سیال در امتداد کانال است که بخشی از انرژی پتانسیل صرف غلبه بر تلفات می‌شود و بنابراین منفی ظاهر می‌گردد. به همین ترتیب، ترم شیب اصطکاکی ناشی از تنش‌های برشی بستر و دیواره‌هاست که موجب اتلاف انرژی و کاهش مومنتوم می‌شود و آن نیز منفی است. در این مطالعه، ترم انتقال مومنتوم به دلیل تقارن کانال و همگرایی متقارن سیلاب‌دشت‌ها ناچیز گزارش گردید، هرچند در شرایط نامتقارن می‌تواند نقش مهم‌تری ایفا نماید. به طور کلی، تعادل با خطای اندک ($-0/04$ نیوتن بر متر) برقرار است، که دقت بالای مدل در شبیه‌سازی پیچیدگی‌های جریان و تعادل مومنتوم را تأیید می‌کند. این دو شکل با تمرکز بر تغییرات لحظه‌ای (شکل ۹) و میانگین کلی (شکل ۱۰)، تصویر جامعی از رفتار هیدرولیکی کانال ارائه می‌دهند.

۳-۲- تحلیل حساسیت نظری پارامترهای هیدرولیکی

برای بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی بر رفتار جریان در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا، تحلیل حساسیت نظری زاویه همگرایی (θ)، عمق نسبی (H^*)، و دبی (Q) بر پروفیل سطح آب انجام شد. این تحلیل با استفاده از داده‌های تجربی و عددی استخراج‌شده از شکل‌های (۴) تا (۷) و معادلات حاکم ناویر-استوکس میانگین‌گیری‌شده (RANS، معادلات ۱ تا ۴) انجام شده و بینش‌هایی برای طراحی و مدیریت کانال‌های غیرمنشوری ارائه می‌دهد. زاویه همگرایی (θ) مقایسه شکل‌های (۵) ($\theta = 11.3^\circ$) و (۶) ($Q = 12 \text{ L/s}$, $H^* = 0.3$, $\theta = 3.8^\circ$) نشان می‌دهد که کاهش سطح آب در واحد طول ($\Delta h/\Delta x$) در ناحیه همگرا برای $\theta = 11.3^\circ$ ($0/00475$ متر بر متر) حدود ۲ برابر بیشتر از $\theta = 3.8^\circ$ ($0/00237$ متر بر متر) است. این رفتار به افزایش ترم همرفت $(d(pAU^2)/dx)$ در معادله مومنتوم (معادله ۱) ناشی از تنگ‌شدگی سریع‌تر مقطع نسبت داده می‌شود، که گرادیان فشار $(pgAdH/dx)$ را تقویت کرده و کاهش سطح آب را تشدید می‌کند. زوایای همگرایی بزرگ‌تر همچنین جریان‌های ثانویه را در لایه مرزی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت تقویت می‌کنند، که می‌تواند بر توزیع سرعت اثر بگذارد. مقایسه عمق نسبی (H^*) شکل‌های (۶) ($Q = 12 \text{ L/s}$, $\theta = 3.8^\circ$, $H^* = 0.3$) و (۷) ($Q = 20 \text{ L/s}$, $\theta = 3.8^\circ$, $H^* = 0.5$) نشان می‌دهد که کاهش سطح آب در واحد طول در $H^* = 0.5$ حدود $1/42$ برابر بیشتر از $H^* = 0.3$ است. افزایش H^* پرشدگی سیلاب‌دشت را افزایش داده و تبادل مومنتوم (pqu_l) را در معادله مومنتوم تقویت می‌کند، که گرادیان‌های سرعت و تنش‌های رینولدز (معادله ۴) را در لایه مرزی افزایش می‌دهد. این حساسیت در طراحی کانال‌هایی با سیلاب‌دشت‌های عمیق‌تر، مانند سیستم‌های زهکشی کشاورزی، اهمیت دارد. دبی (Q) مقایسه شکل‌های (۴) ($Q = 10 \text{ L/s}$, $\theta = 11.3^\circ$, $H^* = 0.2$) و (۵) ($Q =$

12 L/s، $\theta = 11.3^\circ$ ، $H^* = 0.3$ نشان می دهد که کاهش سطح آب در واحد طول در $Q = 12$ L/s حدود $1/23$ برابر بیشتر از $Q = 10$ L/s است. افزایش دبی سرعت جریان را بالا برده و ترم همرفت $(d(pAU^2)/dx)$ را تقویت می کند، که کاهش شدیدتر سطح آب را در ناحیه همگرا به دنبال دارد. این رفتار در مدیریت سیلاب های با دبی بالا حیاتی است. نتیجه تحلیل حساسیت نشان داد که زاویه همگرایی (θ) بیشترین تأثیر را بر کاهش سطح آب در ناحیه همگرا دارد، در حالی که عمق نسبی (H^*) و دبی (Q) به ترتیب بر انتقال مومنتوم و سرعت جریان اثر می گذارند. این نتایج با داده های شکل های (۴) تا (۷) و جدول (۱) سازگار بوده و دقت مدل عددی را تأیید می کنند. این تحلیل اهمیت طراحی دقیق هندسه کانال را در کاربردهایی مانند مدیریت سیلاب و طراحی کانال های زهکشی برجسته می کند. مطالعات آینده می توانند تأثیر این پارامترها را در شرایط جریان غیرمماندگار یا با حضور موانع مانند پوشش گیاهی بررسی کنند.

شکل ۸- مقایسه نسبت دبی سیلاب دشت به دبی کل بین داده های عددی و آزمایشگاهی در شرایط $\theta = 3.8^\circ$ ، $H^* = 0.3$ ، $Q = 12$ L/s (مقطع Cv6)

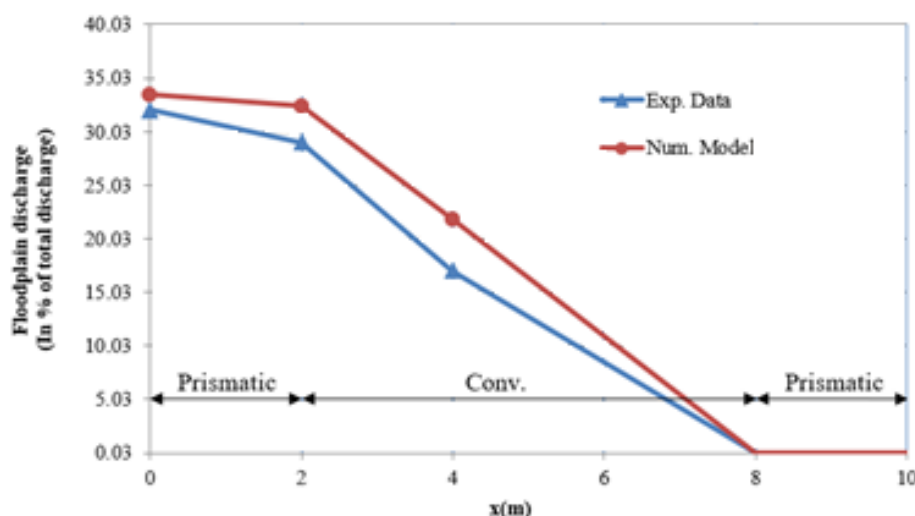


Fig 8. Comparison of floodplain-to-total discharge ratio between numerical and experimental data under conditions of $\theta = 3.8^\circ$ ، $H^* = 0.3$ ، and $Q = 12$ L/s (Cv6 cross-section)

شکل ۹- تغییرات ترم های مومنتوم بر اساس معادله (۱) در طول کانال برای شرایط $\theta = 3.8^\circ$ ، $H^* = 0.3$ ، $Q = 12$ L/s (مقطع Cv6)

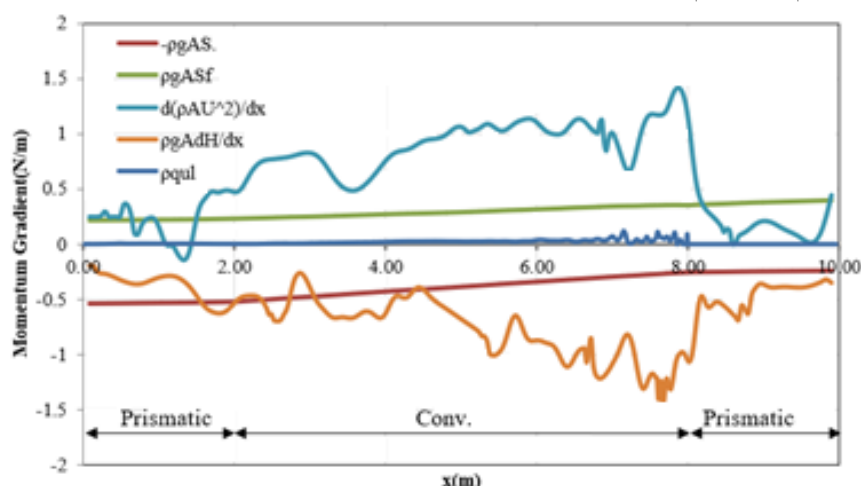


Fig 9. Variations of momentum terms according to Equation (1) along the channel for cross-section Cv6 under conditions of $\theta = 3.8^\circ$ ، $H^* = 0.3$ ، and $Q = 12$ L/s

۳-۳- مقایسه مدل عددی ۳- بعدی Flow3D و Fluent با شرایط مش بندی متفاوت Cartesian و Curve Linear

برای ارزیابی دقت مدل Fluent در بازسازی پروفیل سرعت میانگین‌گیری شده در عمق، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار RMSE برابر با ۰/۰۱۸ متر بر ثانیه بوده که بیانگر همخوانی قابل قبول مدل با اندازه‌گیری‌های تجربی است. با این حال، بررسی جزئیات اختلاف‌ها نشان می‌دهد که بیشترین انحراف‌ها در نواحی مرزی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت رخ داده‌اند؛ جایی که گرادیان سرعت بالا و پیچیدگی‌های جریان باعث کاهش دقت پیش‌بینی می‌شود. در مرکز کانال، مدل Fluent توانسته است اوج سرعت را با خطای کمتر از ۳ درصد بازسازی کند، اما در لبه‌ها این خطا به حدود ۸ درصد افزایش یافته است. این موضوع بیانگر آن است که شبکه‌بندی منحنی‌خطی مورد استفاده در Fluent، به‌رغم انطباق کلی با دیواره‌های همگرا، در باز تولید دقیق جریان‌های مرزی به اندازه شبکه کارتزین در Flow3D موفق عمل نکرده است (شکل ۱۱).

شکل ۱۰- تعادل مومنتوم بر اساس معادله (۱) در طول کانال برای شرایط $Q=12 \text{ L/s}$, $H^*=0.3$, $\theta=3.8^\circ$ (مقطع Cv6)

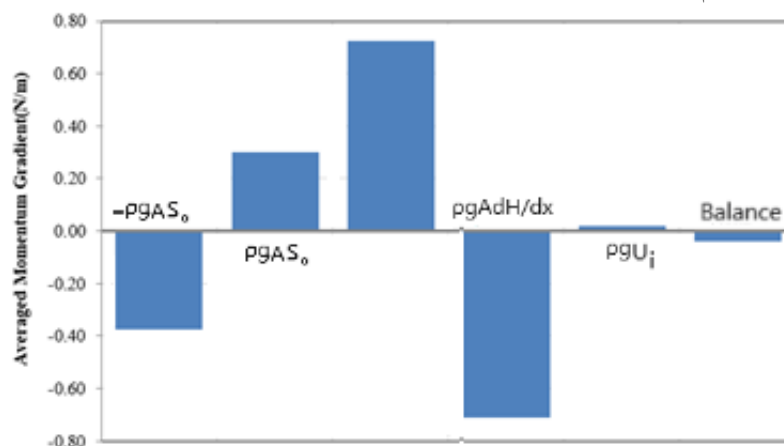


Fig 10. Momentum balance according to Eq. 1 for the Cv6/ $H^*=0.3$ / $Q=12 \text{ lit/s}$ case in $x=0-10 \text{ m}$

شکل ۱۱- مقایسه پروفیل سرعت میانگین‌گیری شده در عمق بین مدل‌های عددی Flow3D و Fluent در شرایط $Q=12 \text{ L/s}$, $H^*=0.3$, $\theta=11.3^\circ$ (مقطع Cv2)

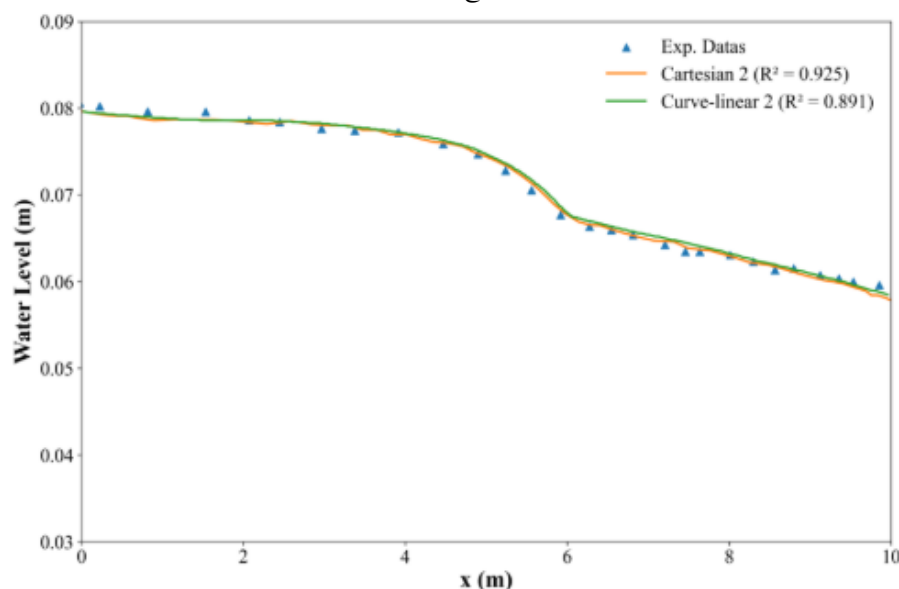


Fig 11. Comparison of depth-averaged velocity profiles between Fluent and Flow3D numerical models in Cv2/ $\theta=11.3^\circ$, $H=0.3$, $Q=12 \text{ L/s}$ case

در این بخش، عملکرد دو مدل عددی سه بعدی Flow3D و Fluent در بازتولید توزیع سرعت طولی میانگین گیری شده در عمق در کانال مرکب همگرا مورد بررسی قرار گرفته است. هدف، ارزیابی تأثیر نوع شبکه بندی (منحنی خطی در Fluent و کارتیزین در Flow3D) بر دقت پیش بینی رفتار جریان در نواحی همگرای کانال است. هر دو مدل با شرایط هیدرولیکی یکسان، مدل آشفتگی مشابه و چگالی شبکه نزدیک به هم اجرا شده اند.

در شکل (۱۲)، نتایج مدل Flow3D با مش منحنی خطی برای هندسه Cv2، در عمق نسبی $H^* = 0.3$ و دبی $Q = 12$ لیتر بر ثانیه، در سه مقطع x برابر با ۴، ۵ و ۶ متر ارائه شده است. نتایج مدل Flow3D نشان دهنده تطابق مناسب با داده های تجربی در کل مقاطع هستند. به ویژه در نواحی مرزی بین کانال اصلی و سیلاب دشت، کاهش ناگهانی سرعت و گرادیان های موجود به خوبی بازسازی شده اند. این دقت بالا را می توان به ساختار شبکه منحنی خطی نسبت داد که به خوبی با جداره های اریب و هندسه همگرای کانال هم راستا شده و انتقال مومنتوم را واقع گرایانه تر مدل می کند. در نتیجه، تغییرات سرعت هم در مرکز و هم در لبه های مقاطع به خوبی با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد.

شکل ۱۲- مقایسه توزیع سرعت میانگین گیری شده در عمق بین مدل عددی Flow3D و داده های آزمایشگاهی برای مقاطع x برابر با ۴، ۵ و ۶ متر در در شرایط $Q=12 \text{ L/s}$, $H^*=0.3$, $\theta=11.3^\circ$ (مقطع Cv2)

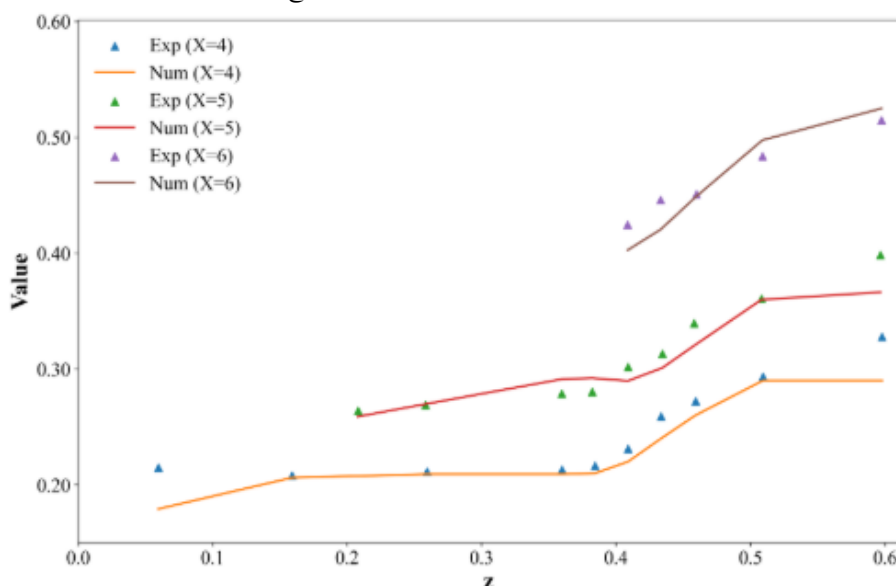


Fig 12. Comparison of depth-averaged velocity distributions between the Flow3D numerical model and experimental data at cross-sections $x=4, 5$, and 6 meters for Cv2 configuration under conditions of $\theta=11.3^\circ$, $H^*=0.3$, and $Q=12 \text{ L/s}$

شکل (۱۳) توزیع پروفیل های سرعت میانگین گیری شده در عمق را برای مدل Fluent در شرایط هندسی مشابه Cv2، با $H^* = 0.3$ و $Q = 12$ لیتر بر ثانیه، و در مقاطع x برابر با ۴، ۵ و ۶ متر نشان می دهد. در این شکل نیز، نتایج مدل عددی تطابق کلی مناسبی با داده های آزمایشگاهی دارند، اما در نواحی مرزی مقطع، به ویژه بین کانال اصلی و سیلاب دشت، اختلافات قابل توجهی مشاهده می شود. مش منحنی خطی به دلیل ساختار سخت افزاری خود، توانایی کمتری در دنبال کردن هندسه منحنی و شیب دار دیواره های کانال دارد. این موضوع باعث می شود بازنمایی لایه های مرزی جریان، به ویژه در نواحی همگرای بالادست، دچار افت دقت گردد. همچنین در مرکز مقطع، کمی اختلاف در مقدار اوج سرعت با نتایج تجربی مشاهده می شود.

مقایسه شکل های (۱۲) و (۱۳) نشان می دهد که مدل Flow3D با مش کارتیزین توانایی بالاتری در بازسازی جزئیات دقیق میدان سرعت به ویژه در نواحی مرزی و در انتقال مومنتوم بین کانال اصلی و سیلاب دشت دارد. این برتری به طراحی شبکه منحنی خطی مرتبط است که منطبق با جداره های شیب دار عمل می کند و نواحی بحرانی را دقیق تر مدل سازی می نماید. در مقابل، مدل Fluent با

مش منحنی خطی علی‌رغم ساده‌تر بودن ساختار مش، در بازتولید کلی روند جریان عملکرد مناسبی دارد، اما در بازسازی دقیق گرادبان‌ها و تغییرات موضعی میدان سرعت در مقایسه با Flow3D با محدودیت‌هایی روبه‌رو است.

شکل ۱۳- مقایسه توزیع سرعت میانگین‌گیری شده در عمق بین مدل عددی Fluent و داده‌های آزمایشگاهی برای مقاطع x برابر با ۴، ۵ و ۶ متر در شرایط $\theta=11.3^\circ$, $H^*=0.3$, $Q=12$ L/s (مقطع Cv2)

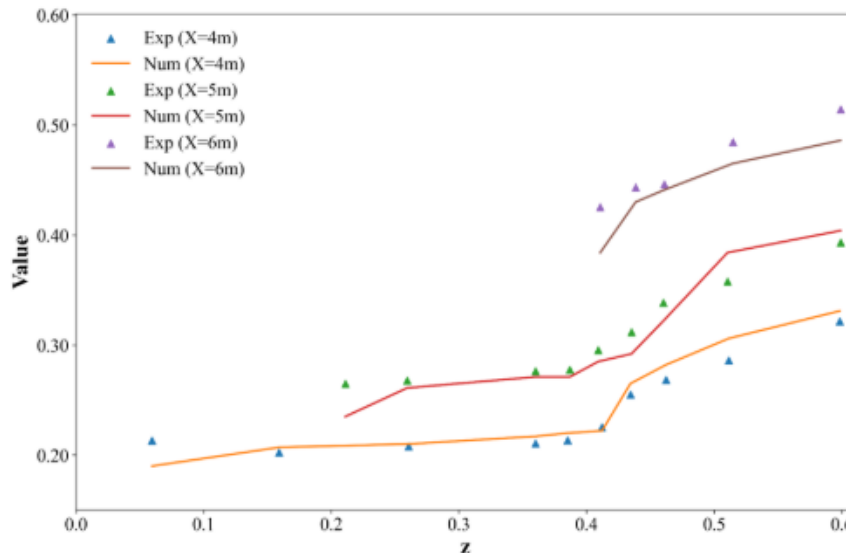


Fig 13. Comparison of depth-averaged velocity distributions between the Fluent numerical model and experimental data at cross-sections $x=4, 5$, and 6 meters for Cv2 configuration under conditions of $\theta=11.3^\circ$, $H^*=0.3$, and $Q=12$ L/s

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی جریان در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا با استفاده از دو مدل Flow3D و Fluent انجام شد. نتایج نشان داد که مدل‌ها توانستند توزیع سطح آب، میدان سرعت و انتقال مومنتوم را با دقت قابل قبول بازسازی کنند. مقدار ضریب تعیین (R^2) برای مدل Flow3D در تمامی شرایط بیش از ۰/۹۶ و برای مدل Fluent بالاتر از ۰/۸۹ به دست آمد و خطای نسبی در بازسازی سطح آب و سرعت کمتر از ۷ درصد بود که نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی است. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که زاویه همگرایی (θ) مؤثرترین پارامتر بر کاهش تراز سطح آب در ناحیه همگرا است، در حالی که عمق نسبی (H^*) و دبی جریان (Q) به ترتیب بیشترین تأثیر را بر انتقال مومنتوم و توزیع سرعت دارند. همچنین مشخص شد که بخش میانی کانال و محل تنگ‌شدگی از لحاظ تمرکز گرادبان‌های هیدرولیکی و تغییرات ناگهانی پروفیل جریان حساس‌ترین ناحیه به تغییرات هندسی و هیدرولیکی است. این یافته‌ها بر ضرورت استفاده از مدل‌های عددی دقیق و انتخاب مناسب هندسه در طراحی و مدیریت جریان در سازه‌های هیدرولیکی تأکید دارند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

سوران عزتی: تحلیل، بازبینی و ویرایش نگارش، پالایش داده‌ها. ضیاءالدین ایدی: نگارش، روش‌شناسی، گردآوری داده‌ها، نرم‌افزار.

سید حسین مهاجری: نظارت، پژوهش، نگارش.

منابع

- Awasthi, S., Kumar, V., & Tiwari, H. L. (2024). Impact of flexible vegetation on hydraulic characteristics in compound channels with converging floodplains. *Water Supply*, 24(8), 2720–2736. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.172>
- Bousmar, D. (2002). Flow modeling in compound channels, momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains. Thesis presented for the degree of Doctor in Applied Sciences, Université catholique de Louvain.
- Bousmar, D., & Zech, Y. (1999). Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(7), 696–706. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:7\(696\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:7(696))
- Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, J. H., & Zech, Y. (2004). Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(4), 305–312. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:4\(305\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:4(305))
- Bousmar, D., Rivière, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R., & Zech, Y. (2005). Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 131(5), 408–412. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:5\(408\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:5(408))
- Bousmar, D., Proust, S., & Zech, Y. (2006). Experiments on the flow in a enlarging compound channel. *Proceedings of River Flow Conference*, Lisbon, Portugal, Vol. 1, pp. 323–332.
- Chlebek, J., Bousmar, D., Knight, D. W., & Sterling, M. (2010). A comparison of overbank flow conditions in skewed and converging/diverging channels. In *River Flow 2010 – Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Braunschweig, Germany, Vol. I, pp. 503–511.
- Ghoshal, S., James, L. A., Singer, M. B., & Aalto, R. (2010). Channel and floodplain change analysis over a 100-year period: Lower Yuba River, California. *Remote Sensing*, 2(7), 1797–1825. <https://doi.org/10.3390/rs2071797>
- Hoseini, S. M., Saghi, H., Mirsalehi, M., & Sharifi, M. B. (2007). Theoretical and experimental study of water surface profiles in compound channels. *Research Project Report*, Ferdowsi University of Mashhad, Ministry of Energy. (In Persian)
- Kaushik, N., & Kumar, V. (2024). Prediction of shear stress distribution in compound channel with smooth converging floodplains. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(2), 170–184. <https://doi.org/10.2478/johh-2024-0004>
- Kaushik, N., Kumar, V., & Kumar, R. (2024). Numerical simulation of flow characteristics in non-prismatic compound channels. *Water Practice & Technology*, 19(4), 1349–1362. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.153>
- Mamak, M. (2008). A comparison of conveyance methods for compound channels. *Kuwait Journal of Science and Engineering*, 35(1A), 19–38.
- Mohammadzadeh, P., Javan, M., Eghbalzadeh, A., & Shahin, H. (2014). Numerical study of flow pattern in converging compound channels. *13th Iranian Hydraulic Conference*, University of Tabriz. (In Persian)
- Mohseni, S., & Naseri, M. (2024). Optimal estimation of secondary flow coefficient in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulics*, 18(4), 1–15. <https://doi.org/10.24200/jhydraul.2024.13645>
- Proust, S., Bousmar, D., Rivière, N., Paquier, A., & Zech, Y. (2009). Non-uniform flow in compound channel: A 1-D method for assessing water level and discharge distribution. *Water Resources Research*, 45(11). <https://doi.org/10.1029/2009WR008202>
- Seckin, G., Mamak, M., Atabaya, S., & Omran, M. (2009). Discharge estimation in compound channels with fixed and mobile bed. *Proceedings – Indian Academy of Sciences (Earth and Planetary Sciences)*, 34(6), 923–945. <https://doi.org/10.1007/s12046-009-0056-3>
- Tang, X., & Knight, D. W. (2006). Sediment transport in river models with overbank flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 132(1), 77–86. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:1\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:1(77))