

Research Article



Experimental and numerical modeling of velocity distribution pattern in meandering river with and without boulder

Mehrdad Kashkoolipour, Zahra Ghadampour*, Reza Mohammadpour Ghalati

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, Iran.

Corresponding Author email: Zahra_ghadampour@yahoo.com

© The Author (s) 2025

Received: 12 Aug 2025

Revised: 01 Sep 2025

Accepted: 18 Nov 2025

Published: 21 Dec 2025

Extended Abstract

Introduction

Flow behavior in meandering rivers is fundamental to predicting sediment transport, bank erosion, and morphological changes. Curvature-induced secondary currents and pressure gradients create complex flow patterns, further complicated by natural irregularities such as boulders. In particular, boulders attached to the outer bend alter flow resistance, induce localized constriction, and modify velocity distribution. Despite their significance, the specific hydraulic effects of such isolated outer-bank boulders remain inadequately studied, with most research focusing on bed roughness or clustered boulders. Numerical models like HEC-RAS 2D are widely used for river engineering applications due to their computational efficiency, but their ability to capture the highly three-dimensional flows generated by discrete boulder obstructions is uncertain. This study addresses this gap by integrating laboratory experiments and numerical modeling to investigate velocity distribution in a meandering channel with and without an outer-bank boulder. The objectives are to:

- (1) characterize the boulder's influence on flow patterns,
- (2) evaluate the accuracy of HEC-RAS 2D in simulating this scenario, and
- (3) identify the limitations of depth-averaged modeling under such complex hydraulic conditions.

Materials and Methods

Experiments were conducted in a laboratory flume consisting of two straight reaches upstream and downstream of a standard meander segment. The channel geometry was designed to replicate typical conditions observed in natural meandering rivers while maintaining experimental control. Flow velocities were measured using a 16 MHz Micro Acoustic Doppler Velocimeter (Micro ADV), providing high-resolution three-dimensional velocity data. Measurements were taken at 24 cross-sections, each sampled at three vertical levels, to adequately capture the vertical and lateral variability of the flow field.

Three steady discharges—30, 40, and 50 liters per second—were tested to evaluate the sensitivity of flow behavior and model accuracy under increasing discharge and turbulence intensity. The quality of velocity data was ensured through rigorous filtering based on Signal-to-Noise Ratio (SNR) thresholds, removing unreliable measurements and preserving valid flow structures.

Numerical simulations were performed using HEC-RAS 2D, employing a detailed reconstruction of the flume geometry. The model solves the depth-averaged shallow-water equations using a finite-volume scheme. Boundary conditions were defined to match the experimental setup, and mesh resolution was refined near the bend and around the boulder to improve model sensitivity to localized hydraulic variations. Model accuracy was assessed using Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE), comparing depth-averaged numerical velocities with corresponding depth-averaged experimental measurements.

Two hydraulic scenarios were evaluated:

Baseline Scenario: Flow through the meander without any obstruction.

Boulder Scenario: Flow with a large boulder attached to the outer bank, creating partial lateral constriction of the cross-section and inducing strong hydrodynamic disturbance.

Results and Discussion

Baseline Flow (No Boulder)

In the unobstructed case, HEC-RAS 2D successfully reproduced the overall pattern of velocity distribution characteristic of meandering flows. The model captured the concentration of high velocities along the inner bank of the upstream bend, the deflection of this high-velocity core toward the outer bank downstream, and the gradual redistribution of flow in the exit reach. The numerical results aligned well with measurements, with error values ranging from $RMSE = 0.023\text{--}0.074$ m/s and $MAPE = 4.9\text{--}9.5\%$ across the tested discharges.

However, discrepancies emerged at specific locations—particularly in sections experiencing strong helical motion. Differences were most pronounced near the mid-bend area, where the combined effects of curvature and secondary circulation produce vertical motions and shear layers that cannot be fully resolved by depth-averaged models. These deviations highlight the inherent limitations of SWE-based numerical tools when simulating flow fields dominated by pronounced three-dimensional effects.

Obstructed Flow (With Outer-Bank Boulder)

The installation of the boulder dramatically modified the flow structure. The obstacle imposed lateral constriction, accelerating the flow around its upstream face, creating a low-pressure zone downstream, and producing a distinct separation and recirculation region. These effects altered the velocity profile both laterally and vertically, intensifying secondary currents and generating localized turbulence with strong three-dimensional characteristics.

The numerical model exhibited reduced accuracy under this scenario. HEC-RAS 2D was unable to capture the strength and geometry of the separation zone, misrepresented the redistribution of velocities in the contraction area, and underestimated vertical accelerations and localized vortices generated by the boulder. As a result, model errors increased significantly in the vicinity of the obstacle, reflecting the limitations of depth-averaged formulations in simulating obstacle-induced turbulence and vortex shedding.

Conclusion

This study demonstrates that while HEC-RAS 2D is reasonably effective in simulating general velocity patterns in meander bends under unobstructed conditions, its performance deteriorates considerably in the presence of a large bank-attached boulder. Such obstacles generate intense three-dimensional flow structures—including separation zones, vortex shedding, and strong secondary currents—that exceed the representational capacity of depth-averaged shallow-water models.

Key conclusions include:

Outer-bank boulders significantly alter flow structure, creating complex turbulence patterns and localized distortions in velocity distribution.

Depth-averaged numerical models struggle to capture the detailed hydraulics of obstacle-induced flow, leading to increased prediction errors.

Higher discharge intensifies turbulence and further degrades the accuracy of 2D simulations.

These findings suggest that applications involving meander–obstacle interactions require advanced three-dimensional CFD models (e.g., RANS or LES) or enhanced parameterizations within 2D models to account for three-dimensional turbulence effects. Laboratory measurements remain essential for validating and improving numerical tools used in morphodynamic and hydraulic engineering analyses.

Keywords: Meandering river, HEC-RAS2D, Boulder, Experimental model

Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this article.

Data Availability Statement

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

Author Contribution

Mehrdad Kashkoolipour: Writing, Methodology, Investigation and Data Curation, and Software. All authors: Analysis, Guidance and Supervision, Text Editing, Completion and Data Collection.

Citation: Kashkoolipour, M., Ghadampour, Z., & Mohammadpour, R. (2025). Experimental and numerical modeling of velocity distribution pattern in meandering river with and without boulder, *Technical Strategies in Water Systems*, 3(3), 231-246. <https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1220868>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



مدل سازی آزمایشگاهی و عددی الگوی توزیع سرعت در رودخانه‌های پیچانرودی با و بدون قلوه سنگ موضعی

مهرداد کشکولی پور، زهرا قدم پور*، رضا محمدپور قلاتی

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد استهبان، استهبان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: Zahra_ghadampour@yahoo.com

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

چکیده

رودخانه‌های پیچانرودی از پیچیده‌ترین سامانه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شوند که یکی از مهمترین پارامترهای هیدرولیکی در آنها، سرعت و الگوی توزیع آن است. علاوه بر پیچیدگی ذاتی این رودخانه‌ها، وجود یا عدم وجود قلوه سنگ‌های بزرگ (Boulder) در بستر یا دیواره، بررسی و تعیین الگوی توزیع سرعت را پیچیده‌تر می‌کند. در این مطالعه، الگوی توزیع سرعت در شرایط با و بدون قلوه سنگ‌های موضعی در دیواره قوس رودخانه مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر قرارگیری قلوه سنگ در دیواره قوس خارجی بر میدان جریان و تغییرات سرعت، با استفاده از مدل عددی و روش آزمایشگاهی بررسی شده است. برای استخراج میدان جریان و سایر پارامترهای هیدرولیکی، اندازه‌گیری سرعت توسط یک سرعت‌سنج دقیق (MicroADV) در یک شبکه از پیش تعیین شده انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که مدل عددی HEC-RAS در حالت عدم وجود قلوه سنگ در دیواره، قادر است توزیع سرعت را در رودخانه به خوبی شبیه‌سازی و مقادیر سرعت را با دقت مناسبی برآورد کند. اما حضور قلوه سنگ‌های بزرگ در دیواره قوس‌ها، دقت مدل را تا حد زیادی کاهش داده و برآورد دقیقی از سرعت، به‌ویژه در مقطع تنگ‌شده، ارائه نمی‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه پیچانرودی، هک‌رس، قلوه سنگ موضعی، مدل آزمایشگاهی

استناد: کشکولی پور، م.، قدم پور، ز. و محمدپور، ر. (۱۴۰۴). مدل سازی آزمایشگاهی و عددی الگوی توزیع سرعت در رودخانه‌های پیچانرودی با و بدون قلوه سنگ موضعی. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۳): ۲۴۶-۲۳۱. <https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1220868>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

از نظر تأثیر مواد بستر بر ویژگی‌های جریان، رودخانه‌های دارای بستر شنی^۱، قلوه‌سنگی^۲ یا تخته‌سنگی^۳ از مهم‌ترین انواع محسوب می‌شوند. به‌طور کلی، بخش‌های مرتفع در رودخانه‌های کوهستانی با کانال‌هایی پرشیب و مواد بستری دارای دامنه گسترده‌ای از اندازه دانه‌ها مشخص می‌شوند (Yager et al., 2007) و معمولاً در رده رودخانه‌های با بستر شنی یا تخته‌سنگی طبقه‌بندی می‌گردند. جریان آشفته و فرایندهای مرتبط با آن از پیچیدگی بالایی برخوردار است، به‌گونه‌ای که بسیاری از مسائل آن تاکنون به‌طور صریح حل نشده و برای برآورد اثرات آن، مانند عمق فرسایش، تنها روابط تجربی ارائه شده است. با افزودن مسئله ریخت‌شناسی و روابط پیچیده پیچانرودها به این معادله، درک دقیق رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ها و برهمکنش آب و بستر دشوارتر نیز می‌شود. علاوه بر ماهیت پیچیده این رفتار هیدرولیکی، مشکل دیگری نیز وجود دارد: بسیاری از این رودخانه‌ها جریان دائمی ندارند و اندازه‌گیری میدانی سرعت جریان در زمان سیلاب، همواره با خطرات و دشواری‌های قابل توجهی همراه بوده و هزینه‌های بسیار بالایی را نیز به‌دنبال دارد. در چنین شرایطی، بسیاری از دستگاه‌های اندازه‌گیری نوسانات سرعت قابل استفاده نیستند یا انجام اندازه‌گیری اساساً غیرممکن می‌شود. اگرچه تحقیقات میدانی محدودی برای بررسی تأثیر تخته‌سنگ‌ها بر ویژگی‌های جریان انجام شده است (Afzalimehr et al., 2016; al., 2011; Ferro, 1999; Gob et al., 2010; MacMahan et al., 2012; Maddahi et al., 2016) اما عمده پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه رودخانه‌های تخته‌سنگی، عموماً بر بستر متمرکز بوده و تأثیر تخته‌سنگ‌های دیواره بر جریان آب کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

به‌طور خاص، هنگامی که این تخته‌سنگ‌ها در قوس‌ها و بر دیواره رودخانه قرار می‌گیرند، تأثیر بسیار قابل توجهی بر جریان‌های گردابی و همچنین میدان جریان در قوس رودخانه می‌گذارند. (Atsuyuki (1992 اولین بار تأثیر عناصر زبری بزرگ‌مقیاس را در دیواره خارجی خمیدگی‌های رودخانه بررسی کرد. او از بلوک‌های کوچک چیده‌شده روی یک شبکه، سازه‌ای موسوم به نوار نردبانی (Ladder strip) و یک نوار مورب (که نوعی روبان شیب‌دار بود) استفاده نمود و مشاهده کرد که حداکثر مقاومت در برابر جریان زمانی حاصل می‌شود که عمق زبری حدود ۱۰ برابر فاصله بین عناصر باشد. (Gairola (1996 جریان عبوری از روی موانع مستطیلی با نسبت‌های ابعادی مختلف را که بر روی یک بستر صاف قرار داده شده بودند، مورد مطالعه قرار داد. او دریافت که منطقه جدایش در پشت این اجسام، در مسیری مستقیم، حدود ۱۲ برابر اندازه آنهاست. برای درک بهتر جریان و فرسایش در کانال‌های خمیده با بستر شنی و همچنین تأثیر عناصر زبری بزرگ‌مقیاس دیواره، یک تحقیق تجربی نظام‌مند بر روی یک خمیدگی استاندارد ۹۰ درجه انجام شد (Hersberger et al., 2016).

در یک بررسی کلی می‌توان گفت تخته‌سنگ‌ها عموماً باعث افزایش تلاطم و آشفتگی جریان می‌شوند. این وضعیت به‌ویژه در مکان‌هایی که تخته‌سنگ‌های بزرگ در دیواره قرار دارند، مشهودتر است؛ چرا که این سنگ‌ها موانع طبیعی ایجاد می‌کنند که به تشکیل جریان‌های گردابی و تشدید فرسایش منجر می‌شوند. معمولاً این تخته‌سنگ‌ها در درازمدت به داخل رودخانه سقوط کرده و در بستر و با فاصله‌ای از دیواره قرار می‌گیرند. این فاصله، بسته به میزان آن، تغییرات قابل توجهی در الگوی خطوط جریان و ایجاد گردابه‌ها در ناحیه بستر و دیواره به وجود می‌آورد. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه در فلوم‌های آزمایشگاهی صورت گرفته و در مدل‌های شبیه‌سازی بستر کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Papanicolaou et al., 2007).

از سوی دیگر، مدل‌سازی عددی جریان در قوس‌ها مورد توجه بیشتری بوده است. به عنوان مثال، (Schreiner et al., 2023) به بررسی جریان گردابی در قوس‌ها و همچنین گردابه‌های آنی با استفاده از روش عددی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES^۴) پرداخته‌اند.

^۱ Gravel-Bed^۲ Cobble-Bed^۳ Boulder-Bed^۴ Large Eddy Simulation

اگرچه تحقیقات مربوط به سنگ‌های دیواره کمتر انجام شده است، اما سازه‌های آبشکن دارای ساختار و تأثیرات مشابهی بر جریان هستند. اثرات آبشکن‌ها به عنوان موانع عرضی به صورت گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند که برخی از جدیدترین مطالعات در این زمینه در ادامه آورده شده‌اند.

Divya et al. (2025) اثر آبشکن‌ها بر دینامیک جریان را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق که به روش عددی انجام شده، نقش آبشکن‌ها به صورت مستغرق و غیرمستغرق بر شکل‌گیری جریان‌های گردابی و تأثیر آنها بر جریان طولی رودخانه مورد تحلیل قرار گرفته است. بر اساس نتایج، به دلیل کاهش سطح مقطع جریان در محل آبشکن، سرعت جریان طولی افزایش یافته و گردابه‌های قوی در پشت آبشکن ایجاد می‌شود.

Mehraein et al. (2023) تأثیر احداث آبشکن در قوس داخلی را مطالعه کردند. نتایج این پژوهش آزمایشگاهی نشان داد که محل قرارگیری آبشکن تأثیر قابل توجهی بر جریان‌های ثانویه در بالادست و جریان‌های نعل‌اسبی در پایین‌دست دارد. همچنین، افزایش یا کاهش تنش برشی بستر نیز ارتباط مستقیمی با موقعیت آبشکن دارد.

در سال‌های اخیر، مدل‌های عددی پیشرفت و توسعه قابل ملاحظه‌ای در زمینه شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌ها داشته‌اند. سیستم تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژی (HEC-RAS¹) نرم‌افزاری است که برای مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی به کار می‌رود. اگرچه معادلات ناویر-استوکس جریان سیال را در سه بعد توصیف می‌کنند، اما در مهندسی آب و برای مدل‌سازی رودخانه‌ها و جریان‌های سیلابی و به منظور کاهش حجم محاسبات، ساده‌سازی‌هایی بر این معادلات اعمال می‌شود که یکی از آنها استفاده از معادلات جریان‌های کم‌عمق (SWE²) است. در حل این معادلات، جریان تراکم‌ناپذیر، چگالی یکنواخت و فشار هیدرواستاتیک فرض شده و همچنین مقیاس طول عمودی بسیار کوچک‌تر از مقیاس طول افقی در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه مدل نرم‌افزاری HEC-RAS یک مدل رایگان با قدرت محاسباتی بالا و سرعت قابل قبول است و استفاده از آن در مدل‌سازی رودخانه‌ها رواج دارد، می‌تواند ابزار مناسبی برای این منظور باشد. با این حال، شرایط خاص بستر مانند وجود تخته‌سنگ‌ها در قوس رودخانه، جریان ثانویه را پیچیده‌تر می‌کند و بنابراین لازم است قابلیت این نرم‌افزار در شبیه‌سازی چنین مواردی با مدل‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد که یکی از ضرورت‌های پژوهشی حاضر محسوب می‌شود. در تحقیق پیش‌رو، تأثیر قرارگیری قلوه‌سنگ در دیواره رودخانه و در قوس خارجی بر میدان جریان و تغییرات الگوی توزیع سرعت با استفاده از مدل عددی و روش آزمایشگاهی بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور بررسی میدان جریان و تأثیر قلوه‌سنگ موجود در دیواره رودخانه بر تغییرات سرعت، از یک مدل آزمایشگاهی و یک مدل عددی استفاده شد که در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شوند.

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک بخش مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان انجام شد. طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی در شکل (۱) ارائه شده است.

¹ Hydrologic Engineering Center - River Analysis System

² Shallow-Water Equations

شکل ۱- طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی

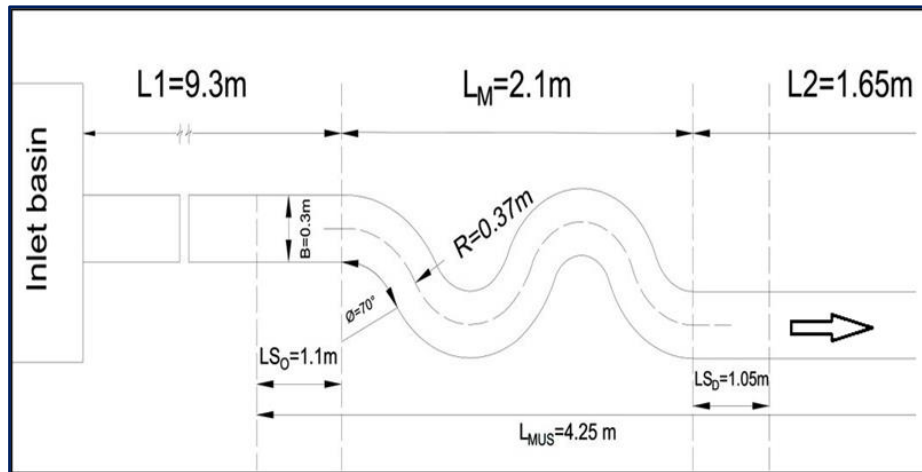


Fig 1. Schematic design of laboratory flume

آزمایش ها در یک فلوم با دو بخش مستقیم در ابتدا و انتها و یک بخش میانی به صورت متناظر متشکل از قوس های متوالی انجام شده است. طول بخش مستقیم ابتدایی ۹٫۳ متر ($L_1 = 9.3 \text{ m}$)، طول بخش میانی ۱٫۲ متر ($L_m = 1.2 \text{ m}$) و طول بخش مستقیم انتهایی ۱٫۶۵ متر ($L_2 = 1.65 \text{ m}$) است. محدوده اندازه گیری و شبکه بندی به طول کلی ۴٫۲۵ متر ($L_{mus} = 4.25 \text{ m}$) شامل بخش بالادست مستقیم به طول ۱٫۱ متر ($L_{s0} = 1.1 \text{ m}$)، بخش متناظر به طول ۱٫۲ متر ($L_m = 1.2 \text{ m}$) و بخش پایین دست مستقیم به طول ۱٫۰۵ متر ($L_{s0} = 1.05 \text{ m}$) می باشد. عرض فلوم ۰٫۳ متر و ارتفاع آن ۰٫۵ متر است (شکل ۱).

با توجه به نسبت Rc/B کمتر از ۳، این متناظر دارای خمیدگی شدید محسوب می شود (Lu & Willmarth, 1973). همچنین طول واقعی متناظر ۲٫۷ متر و طول مستقیم آن ۱٫۲ متر است که درجه سینوسی آن را ۱٫۲۸ محاسبه می کند. برای اندازه گیری دبی از یک دبی سنج الکتریکی و برای تنظیم سطح آب از یک دریچه کشویی مستقیم استفاده شد.

در این تحقیق، اندازه گیری سرعت با استفاده از یک سرعت سنج دقیق ($MicroADV^1$) انجام شده است. دستگاه SonTek – Model 16-MHz MicroADV یکی از پیشرفته ترین ابزارهای اندازه گیری سرعت جریان آب است که با بهره گیری از فناوری آکوستیک داپلر طراحی شده و به ویژه در مطالعات علمی و مهندسی که نیاز به داده های با دقت بالا و جزئیات دقیق سرعت دارند مانند جریان های آب کم عمق کاربرد دارد. برای ثبت داده های سرعت از یک رایانه و نرم افزار WinADV استفاده شد. آزمایش ها برای سه دبی مختلف انجام شده اند که مقادیر دبی و مشخصات هیدرولیکی جریان در جدول (۱) ارائه شده است.

به منظور استخراج میدان جریان و سایر پارامترهای هیدرولیکی، اندازه گیری در یک شبکه از پیش تعیین شده انجام و سرعت در ۲۴ مقطع عرضی مورد بررسی قرار گرفت که در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان در کانال

Table 1. Hydraulic Flow Characteristics in the Channel

Run index	Q (l/s)	B (m)	S (%)	Normal depth (cm)	Average (cm/s)	Fr	Re
Q30	30	0.3	0.005	0.16	0.64	0.51	49548
Q40	40	0.3	0.005	0.19	0.68	0.50	57000
Q50	50	0.3	0.005	0.23	0.72	0.48	65368

¹ Acoustic Doppler Velocimetry

در هر نقطه از شبکه، اندازه‌گیری در سه عمق انجام شد و میانگین مقادیر سرعت به‌عنوان سرعت در آن نقطه در نظر گرفته شد. دستگاه ADV سرعت را در سه مؤلفه ثبت می‌کند و در نتیجه سرعت متوسط در هر نقطه را نیز محاسبه می‌نماید. نرخ نمونه‌برداری برای این آزمایش‌ها ۵۰ هرتز تعیین شد. مدت‌زمان اندازه‌گیری برای هر نقطه ۳۰۰ ثانیه بود که منجر به ثبت ۱۵۰۰۰ داده سرعت لحظه‌ای برای هر نقطه گردید. از آنجایی که حجم نمونه‌برداری در فاصله ۵ سانتی‌متری زیر پروب دستگاه قرار دارد، داده‌ها دچار آشفتگی و تغییرات مصنوعی ناشی از حضور جسم خارجی نمی‌شوند. همچنین، دستگاه بر روی یک نقاله فلزی نصب شده است که امکان جابه‌جایی آسان در راستای طولی و عرضی فلوم را فراهم می‌کند.

برای ارزیابی کیفیت داده‌های اندازه‌گیری‌شده از نسبت سیگنال به نویز (SNR) استفاده شد. این نسبت که به‌صورت خلاصه‌شده SNR^1 نامیده می‌شود، یکی از معیارهای اصلی سنجش کیفیت داده‌های خروجی دستگاه ADV است. SNR میزان قدرت سیگنال دریافتی از ذرات معلق در آب را نسبت به نویز محیطی می‌سنجد و معمولاً بر حسب دسی‌بل (dB) بیان می‌گردد. هرچه مقدار SNR بیشتر باشد، دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها افزایش می‌یابد. مقادیر قابل قبول SNR معمولاً بالاتر از ۱۵ دسی‌بل است و رسیدن این مقدار به ۲۰ دسی‌بل نشان‌دهنده کیفیت عالی داده‌ها می‌باشد (Sontek, 1997).

شکل ۲- شبکه اندازه‌گیری سرعت و توپوگرافی به همراه شماره مقاطع

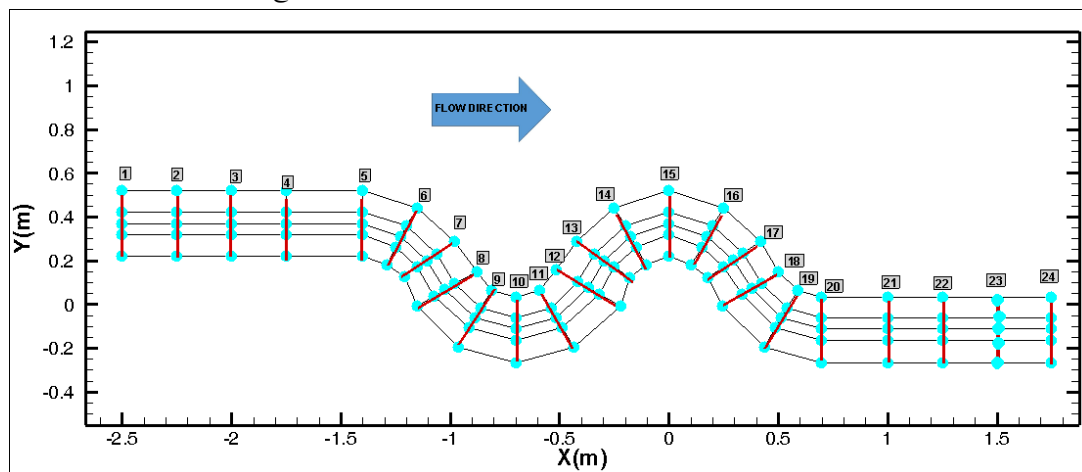


Fig 2. Velocity Measurement Grid and Topography with Cross-Section Numbers

۲-۲- مدل عددی

مدل عددی مورد استفاده در این مطالعه، مدل هیدرولیکی HEC-RAS دو بعدی است. این نرم‌افزار قابلیت محاسبه جریان ماندگار یک‌بعدی، جریان ناپایدار دو بعدی، انتقال رسوب در بستر متحرک و همچنین مدل‌سازی دمای آب و کیفیت آب را دارد. اجزای تحلیلی سیستم HEC-RAS شامل محاسبه پروفیل سطح آب جریان ماندگار یک‌بعدی، شبیه‌سازی جریان ناپایدار یک‌بعدی و دو بعدی، محاسبات جریان شبه‌ناپایدار یا کاملاً ناپایدار یک‌بعدی و دو بعدی برای انتقال رسوب با مرز متحرک و تحلیل کیفیت آب یک‌بعدی است. نکته حائز اهمیت آن است که هندسه، الگوریتم‌های محاسبات هیدرولیکی و قالب داده‌های هندسی در هر چهار بخش یکسان هستند (Dorin et al., 2022).

در این نرم‌افزار و در مدل دو بعدی، از معادلات آب‌های کم عمق^۲ (SWE) یا معادله موج دیفیوژن (DWE) استفاده می‌شود که در این پژوهش از معادلات آب کم عمق برای مدل‌سازی استفاده شده است. این معادلات مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی هستند که برای شبیه‌سازی جریان سیالات با عمق کم (مانند رودخانه‌ها، دشت‌های سیلابی و امواج ساحلی) به کار می‌روند و در مدل‌سازی

¹ Signal-to-Noise Ratio

² SWE (Shallow-Water Equations)

هیدرولیکی، به ویژه در نرم افزارهایی نظیر HEC-RAS 2D، برای تحلیل جریان های دو بعدی مورد استفاده قرار می گیرند. در ادامه، جزئیات این معادلات و فرم ریاضی آنها ارائه می شود.

معادلات آب کم عمق، تقریبی از معادلات ناویر-استوکس برای جریان هایی هستند که در آنها عمق آب (h) نسبت به ابعاد طولی (X) و عرضی (Y) کوچک است. این معادلات بر پایه این فرضیات: تغییرات فشار، هیدرواستاتیک است، مؤلفه سرعت در جهت قائم (Z) ناچیز است و توزیع سرعت در عمق تقریباً یکنواخت در نظر گرفته می شود؛ استوارند.

این معادلات شامل معادله پیوستگی (حفظ جرم) و معادلات مومنوم (حفظ تکانه) در راستای های x و y هستند که به صورت روابط ۱ تا ۳ بیان می شوند:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (۱): \text{معادله پیوستگی}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z}{\partial x} - gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (۲): \text{معادله مومنوم در جهت } x$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = -gh \frac{\partial z}{\partial y} - gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (۳): \text{معادله مومنوم در جهت } y$$

که در آن: h عمق آب، u سرعت در جهت جریان، v سرعت عمود بر جریان، g شتاب جاذبه، n ضریب مانینگ، z ارتفاع بستر، τ_{bx} و τ_{by} تنش برشی بستر در راستای های x و y ، ρ چگالی آب.

برای مدل سازی در نرم افزار HEC-RAS، ابتدا مدل هندسی مورد نظر بر اساس نقشه های رقومی ارتفاعی (DEM) ساخته شده و سپس تحلیل هیدرولیکی روی آن انجام می گیرد. شکل (۳) مدل رقومی ارتفاعی و شبکه بندی مورد استفاده را نشان می دهد.

شکل ۳- شبکه بندی و ژئومتری مدل هیدرولیکی



Fig 3. Meshing and geometry of the hydraulic model

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه پهنه سرعت و میدان جریان بدون وجود تخته سنگ دیواره (Boulder)

در ابتدا، مقادیر و پهنه های سرعت در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل های ۴-الف و ب مشاهده می شود، توزیع سرعت و پهنه های سرعت در هر دو روش شباهت قابل توجهی به یکدیگر دارند. مطابق انتظار، توزیع سرعت متوسط به گونه ای است که بیشترین مقدار سرعت ابتدا در قوس داخلی و سپس در امتداد مرکز کانال رخ می دهد. در ابتدای کانال سرعت یکنواخت است؛ اما پس از ورود به قوس و تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز، سرعت در بخش مرکزی کانال

افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی جریان در قوس‌ها نیز همخوانی دارد (Naghavi et al., 2020; Niknam et al., 2017).

شکل ۴- توزیع مکانی سرعت مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی - آزمایش Q30

ب- مقادیر مدل‌سازی

الف- مقادیر اندازه‌گیری شده

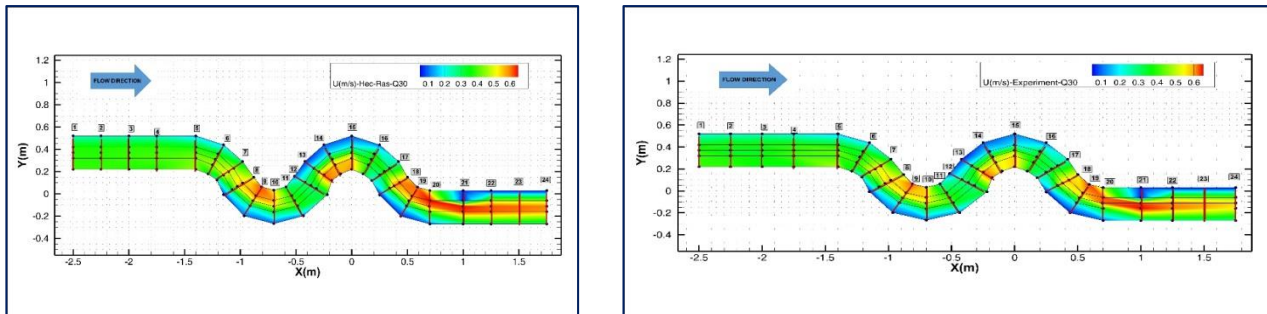


Fig 4. Spatial distribution of velocity - modeling and measured values - Q30 test

در ادامه، مقادیر سرعت در هر دو روش برای دبی‌های مختلف در شکل‌های ۵ و ۶ مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، با افزایش دبی، توزیع مکانی سرعت در مدل عددی و مقادیر اندازه‌گیری‌شده تغییراتی را نشان می‌دهد و در برخی مقاطع، همخوانی مناسبی بین نتایج مدل هیدرولیکی و داده‌های اندازه‌گیری‌شده مشاهده نمی‌شود. بر اساس مقادیر اندازه‌گیری‌شده، با افزایش دبی، پهنه‌های با سرعت بالا از قوس اول به سمت قوس دوم منتقل می‌شوند؛ در حالی که در مدل‌سازی عددی، کماکان پهنه‌هایی با سرعت بالا در محدوده قوس اول قابل مشاهده است.

در جدول (۲) نتایج به‌دست آمده از مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه در مقاطع ۲۴ گانه و همچنین در تمامی نقاط به صورت کلی مقایسه شد تا دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت آشکار گردد. برای این منظور از دو روش آماری برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد. دو روش عبارتند از جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و درصد خطای مطلق (MAPE). در این معادلات Q_0 مقدار مشاهداتی و Q_e مقدار محاسباتی مدل می‌باشد (روابط ۴ و ۵).

$$R.M.S.E = \sqrt{\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_e)^2 \right|} \quad (4)$$

$$M.A.P.E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_0 - Q_e}{Q_e} \right| * 100 \quad (5)$$

جدول ۲- مقادیر خطای اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی

Table 2. Error Values of Measured and Modeled Data

MAPE (%)	RMES	نمایه آزمایش
۴/۹	۰/۰۲۳	Q۳۰
۹/۸	۰/۰۷۱	Q۴۰
۹/۵	۰/۰۷۴	Q۵۰

شکل ۵- توزیع مکانی سرعت مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل سازی - آزمایش Q40

ب- مقادیر مدل سازی

الف- مقادیر اندازه‌گیری شده

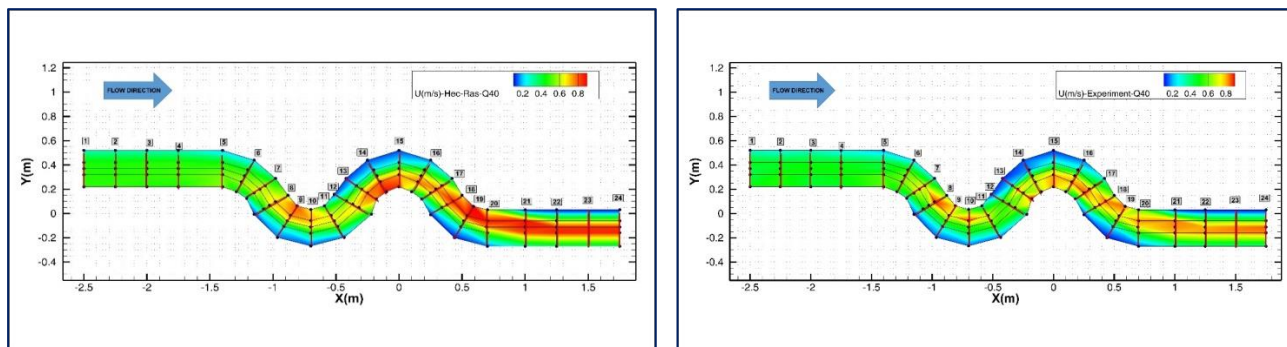


Fig 5. Spatial distribution of velocity - modeling and measured values - Q40 test

شکل ۶- توزیع مکانی سرعت مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل سازی - آزمایش Q50

ب- مقادیر مدل سازی

الف- مقادیر اندازه‌گیری شده

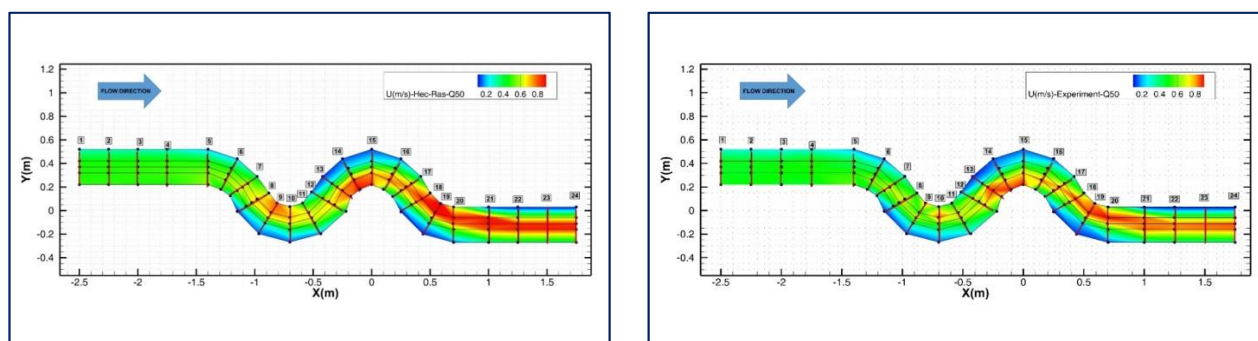


Fig 6. Spatial distribution of velocity - modeling and measured values - Q50 test

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در یک بررسی کلی با افزایش دبی، میزان خطای مدل‌سازی عددی افزایش یافته است؛ به‌گونه‌ای که در آزمایش Q50 میزان خطا حدود دو برابر آزمایش Q30 است. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه دبی بر دقت نتایج مدل‌سازی می‌باشد که بررسی‌های تکمیلی در این زمینه در مطالعات آتی توصیه می‌شود.

در ادامه، دقت نتایج مدل‌سازی در مقاطع مختلف و برای سه آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. جدول‌های (۳) تا (۵) به ترتیب مقادیر خطای محاسباتی را برای آزمایش‌های Q30، Q40 و Q50 در ۲۴ مقطع عرضی نشان می‌دهند. همان‌طور که در این جدول‌ها مشاهده می‌شود، به طور کلی نتایج در بخش مستقیم کانال از دقت بیشتری برخوردار بوده و بیشترین مقادیر خطا در مقاطع ۱۰ و ۱۵ واقع در قوس کانال رخ داده است. دلیل این امر را می‌توان پیچیدگی جریان در قوس‌های رودخانه به‌واسطه وجود جریان‌های ثانویه و توزیع فشار غیرهیدرواستاتیک دانست. همان‌طور که در بخش قبلی اشاره شد، معادلات حاکم بر نرم‌افزار HEC-RAS به دلیل ساده‌سازی‌های اعمال‌شده، موجب بروز چنین خطاهایی در مدل‌سازی قوس‌های رودخانه می‌شوند. اصلی‌ترین دلیل این خطاها، عدم در نظر گرفتن جریان ثانویه عمودی (جریان مارپیچی - Helical Flow) است که از مهم‌ترین چالش‌های مدل‌های دو بعدی به شمار می‌رود. این جریان در قوس‌ها موجب جابجایی ذرات آب و تغییر توزیع تنش برشی بستر می‌گردد. علاوه بر این، خطای ناشی از توزیع سرعت در عمق نیز در این مدل‌ها وجود دارد، زیرا در عمل، تغییرات سرعت در راستای قائم نادیده گرفته می‌شود. با این حال، در مطالعه حاضر و از آنجا که اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نیز بر اساس میانگین سرعت در عمق انجام شده‌اند، این مسئله تأثیر کمتری داشته و در نتیجه الگوی جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی شباهت قابل قبولی یافته است.

جدول ۳ - مقادیر خطای اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی در مقاطع مختلف - آزمایش Q30
Table 3. Measured and modeling error values at different sections – Test Q30

شماره مقطع	اندازه‌گیری شده	سرعت متوسط مقطع (m/s)		درصد خطا
		مدل هیدرولیکی	RMSE	
۱	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۰۱۸	۴/۴۵
۲	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۰۲۸	۶/۰۴
۳	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۰۲۱	۴/۱۹
۴	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۰۱۲	۳/۵۵
۵	۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۰۲۴	۴/۶۸
۶	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۰۴۵	۹/۰۷
۷	۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۰۳۰	۵/۹۲
۸	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۰۱۹	۵/۸۳
۹	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۰۱۴	۲/۶۳
۱۰	۰/۴۳	۰/۴۰	۰/۰۳۱	۸/۳۹
۱۱	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۰۲۲	۵/۱۳
۱۲	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۰۰۸	۳/۰۰
۱۳	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۰۲۵	۵/۸۷
۱۴	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۰۲۶	۴/۹۱
۱۵	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۰۲۵	۱۱/۸۰
۱۶	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۰۰۶	۲/۲۹
۱۷	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۰۱۵	۵/۳۴
۱۸	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۰۱۳	۱/۹۴
۱۹	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۰۲۹	۳/۹۲
۲۰	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۰۲۹	۵/۸۶
۲۱	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۰۳۳	۳/۳۸
۲۲	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۰۰۷	۱/۵۰
۲۳	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۰۲۲	۳/۶۶
۲۴	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۰۲۱	۳/۵۲

در ادامه، توزیع سرعت در شرایطی که تخته‌سنگ در دیواره کانال قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. تصویر شبکه‌بندی و هندسه مدل هیدرولیکی در شکل (۷) ارائه شده است.

شکل ۷ - شبکه‌بندی و ژئومتری مدل هیدرولیکی با تخته‌سنگ دیواره

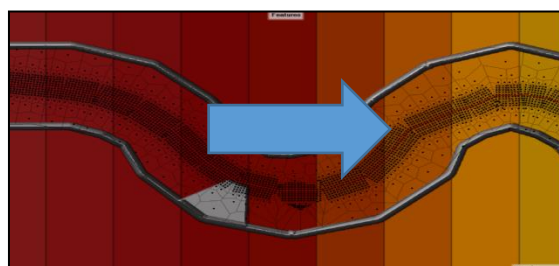


Fig 7. Meshing and geometry of the hydraulic model with a rock wall

جدول ۴ - مقادیر خطای اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی در مقاطع مختلف

- آزمون Q₄₀Table 4. Measured and modeling error values at different sections – Test Q₄₀

شماره مقطع	سرعت متوسط مقطع (m/s)				درصد خطا	
	اندازه‌گیری شده	مدل	RMSE	MAPE (%)		
هیدرولیکی						
۱	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۰۲۸	۵/۴۷		
۲	۰/۴۶	۰/۴۴	۰/۰۲۸	۵/۰۲		
۳	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۰۱۷	۳/۸۹		
۴	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۰۱۰	۲/۲۴		
۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۰۳۵	۴/۵۴		
۶	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۰۶۰	۱۳/۲۴		
۷	۰/۵۳	۰/۴۹	۰/۰۷۷	۱۵/۰۴		
۸	۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۱۱۷	۱۲/۷۱		
۹	۰/۵۰	۰/۵۲	۰/۰۴۲	۹/۳۵		
۱۰	۰/۵۱	۰/۵۰	۰/۱۱۵	۲۳/۱۵		
۱۱	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۰۳۲	۳/۸۸		
۱۲	۰/۴۳	۰/۴۷	۰/۰۵۸	۱۱/۴۱		
۱۳	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۱۶۱	۲۰/۸۰		
۱۴	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۱۱۳	۱۹/۰۴		
۱۵	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۰۵۰	۱۲/۵۳		
۱۶	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۰۸۰	۱۴/۱۸		
۱۷	۰/۵۷	۰/۵۳	۰/۱۱۶	۱۲/۰۴		
۱۸	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۰۸۰	۱۸/۷۰		
۱۹	۰/۵۰	۰/۵۳	۰/۰۶۴	۹/۶۰		
۲۰	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۰۱۳	۳/۰۷		
۲۱	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۰۰۸	۱/۲۶		
۲۲	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۰۱۴	۲/۳۹		
۲۳	۰/۵۴	۰/۵۳	۰/۰۲۴	۲/۸۰		
۲۴	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۰۲۲	۲/۶۹		

جدول ۵ - مقادیر خطای اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی در مقاطع مختلف

- آزمون Q₅₀Table 5. Measured and modeling error values at different sections – Test Q₅₀

شماره مقطع	سرعت متوسط مقطع (m/s)				درصد خطا	
	اندازه‌گیری شده	مدل	RMSE	MAPE (%)		
هیدرولیکی						
۱	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۰۱۲	۱/۷۲		
۲	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۰۱۱	۲/۲۳		
۳	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۰۱۵	۳/۴۴		
۴	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۰۲۱	۳/۲۹		
۵	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۰۳۴	۴/۲۳		
۶	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۰۴۸	۱۰/۶۱		
۷	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۰۴۳	۷/۷۷		
۸	۰/۴۸	۰/۴۵	۰/۰۵۴	۸/۵۱		
۹	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۱۱۸	۱۶/۷۹		
۱۰	۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۰۹۴	۱۵/۰۷		
۱۱	۰/۴۷	۰/۵۰	۰/۰۶۳	۱۷/۹۰		
۱۲	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۱۰۴	۱۴/۸۴		
۱۳	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۱۸۲	۲۳/۷۶		
۱۴	۰/۵۱	۰/۵۹	۰/۱۰۶	۱۰/۳۱		
۱۵	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۰۶۳	۱۲/۴۷		
۱۶	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۱۰۶	۱۳/۵۶		
۱۷	۰/۵۳	۰/۵۰	۰/۰۶۷	۱۳/۵۵		
۱۸	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۱۰۵	۱۵/۲۰		
۱۹	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۰۳۹	۱۱/۰۱		
۲۰	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۰۵۰	۷/۲۰		
۲۱	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۰۲۵	۳/۱۰		
۲۲	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۰۰۸	۱/۱۳		
۲۳	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۰۲۲	۱/۱۳		
۲۴	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۰۲۲	۱/۱۳		

۳-۲- مقایسه مقادیر سرعت در شرایط حضور تخته‌سنگ در دیواره

همان‌طور که در مقدمه پژوهش اشاره شد، وجود تخته‌سنگ در دیواره رودخانه‌ها منجر به تغییر در الگوی توزیع سرعت و ایجاد جریان‌های ثانویه در اطراف آن می‌گردد. در این بخش نیز در مدل فیزیکی و هیدرولیکی، مانعی در بخشی از دیواره کانال تعبیه شده تا

تأثیر آن بر میدان جریان و نیز بر دقت مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گیرد. در شکل‌های ۸ تا ۱۰، مقادیر اندازه‌گیری‌شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی برای دبی‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ لیتر بر ثانیه ارائه شده است. همانند بخش پیشین، ابتدا به مقایسه میدان جریان و پهنه‌بندی سرعت در اطراف مانع پرداخته می‌شود. همان‌طور که در این تصاویر مشاهده می‌شود، توزیع مکانی سرعت در اطراف سنگ دیواره در مدل‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده تفاوت محسوسی دارد. مقایسه کمی مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مدل‌سازی‌شده برای سه آزمایش در جدول (۶) ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، مقادیر خطای محاسباتی در این حالت نسبت به حالت بدون مانع افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند ناشی از تغییرات شدید سرعت، جهت جریان و تشکیل جریان‌های گردابی در اطراف تخته‌سنگ دیواره باشد.

جدول ۶ - مقادیر خطای اندازه‌گیری‌شده و مدل‌سازی

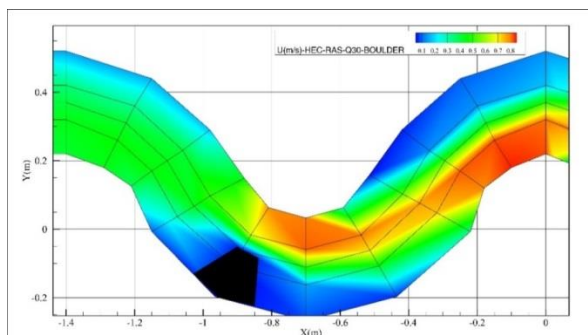
Table 6. Error Values of Measured and Modeled Data

نمایه آزمایش	RMES	MAPE (%)
Q30	۰/۰۳۵	۶/۷
Q40	۰/۰۸۱	۱۰/۷
Q50	۰/۰۸۵	۱۱/۵

همان‌طور که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود، توزیع سرعت در مدل هیدرولیکی و مقادیر اندازه‌گیری‌شده در محدوده تخته‌سنگ دیواره رودخانه تفاوت چشمگیری دارد و مدل هیدرولیکی نتوانسته است جریان در این ناحیه را به خوبی شبیه‌سازی کند. مقادیر خطای کلی در هر سه آزمایش، نسبت به حالت بدون مانع، افزایش یافته است.

شکل ۸- توزیع مکانی سرعت مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مدل‌سازی - آزمایش Q30

ب- مقادیر مدل‌سازی



الف- مقادیر اندازه‌گیری‌شده

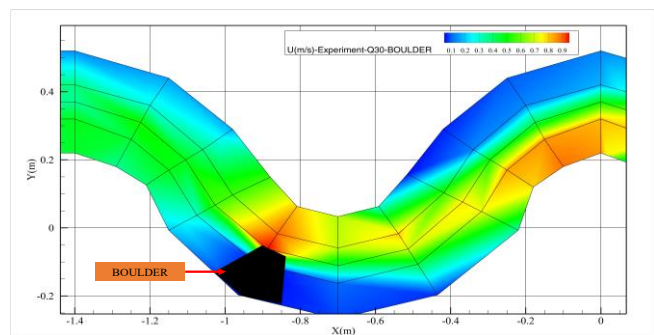
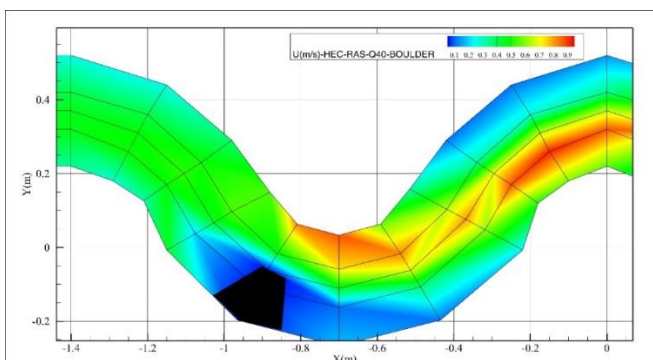


Fig 8. Spatial distribution of velocity - modeling and measured values- Q30 test

شکل ۹- توزیع مکانی سرعت مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مدل‌سازی - آزمایش Q40

ب- مقادیر مدل‌سازی



الف- مقادیر اندازه‌گیری‌شده

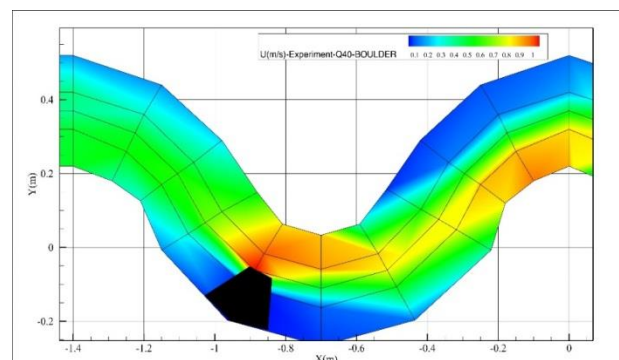
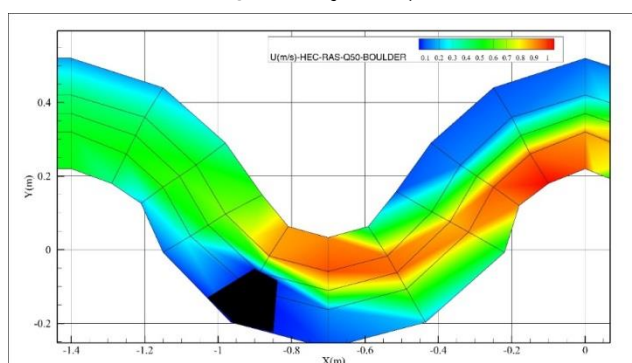


Fig 9. Spatial distribution of velocity - modeling and measured values- Q40 test

شکل ۱۰- اتوزیع مکانی سرعت مقادیر اندازه گیری شده و مدل سازی- آزمایش Q50

ب- مقادیر مدل سازی



الف- مقادیر اندازه گیری شده

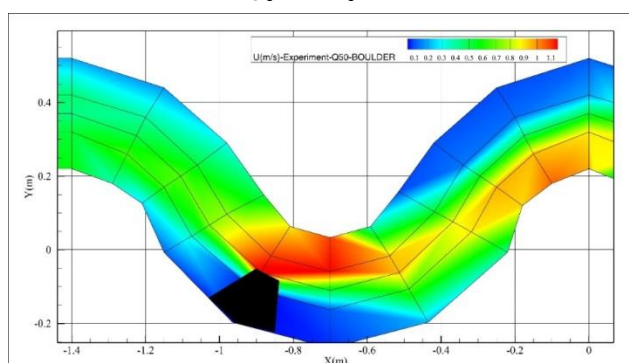
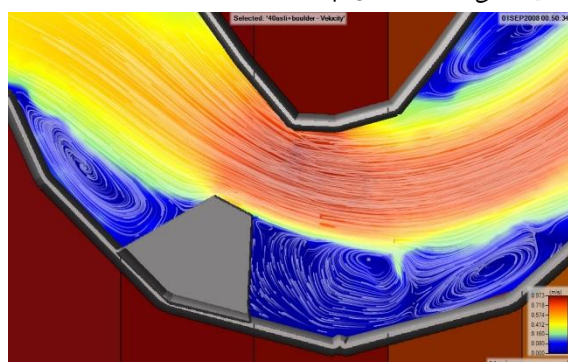


Fig 10. Spatial distribution of velocity - modeling and measured values- Q50 test

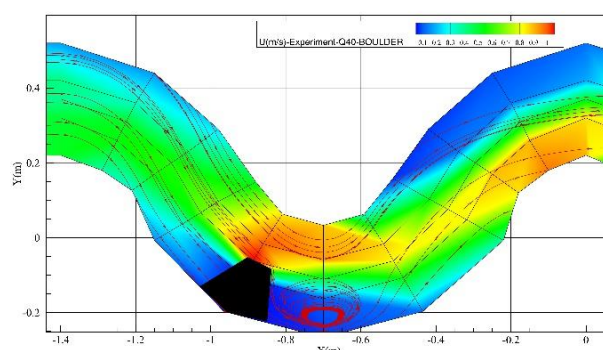
۳-۳- بررسی گردابه ها و جریان های ثانویه

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در رودخانه که در اثر حضور موانعی مانند تخته سنگ ها ایجاد می شود، جریان های گردابی است. این جریان ها معمولاً منجر به فرسایش و نشست دیواره رودخانه و در نهایت سقوط سنگ به درون رودخانه می شوند. اگرچه نرم افزار HEC-RAS به طور مستقیم گردابه ها را محاسبه نمی کند، ولی موقعیت و نحوه تشکیل آن ها را با دقت قابل قبولی شبیه سازی می نماید. در این پژوهش نیز جریان های گردابی تشکیل شده در اطراف تخته سنگ دیواره، هم از طریق اندازه گیری سرعت و هم با استفاده از مدل هیدرولیکی، ترسیم و تحلیل شده اند. شکل (۱۱) جریان گردابی اندازه گیری شده در آزمایش Q40 و جریان گردابی شبیه سازی شده در نرم افزار را نشان می دهد.

شکل ۱۱- جریان گردابی تشکیل شده در مدل آزمایشگاهی (الف) و عددی (ب)



ب



الف

Fig 11. Vortex flow formed in the experimental model (a) and numerical model (b)

همان طور که در (۱۱) مشاهده می شود، نرم افزار موقعیت جریان گردابی اصلی را به خوبی شناسایی کرده است؛ هرچند در بالادست نیز گردابه ای را نشان می دهد که در داده های اندازه گیری شده سرعت، حضور آن تأیید نمی شود. همان طور که پیش تر اشاره شد، پارامترهای مؤثری مانند شدت تلاطم یا تنش برشی مرتبط با گردابه ها در صورت مجزا محاسبه نمی شوند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، میدان سرعت در یک مدل پیچانرودی در دو حالت بدون تخته سنگ دیواره و با تخته سنگ دیواره به طور آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. مقادیر سرعت از طریق مدل سازی در نرم افزار HEC-RAS استخراج و با داده های اندازه گیری شده توسط دستگاه ADV در آزمایشگاه مقایسه گردید. با توجه به استفاده نرم افزار از معادلات آب های کم عمق، در مدل آزمایشگاهی نیز اندازه گیری در سه عمق انجام و میانگین سرعت محاسبه شد.

نتایج حاصل از مرحله اول (بدون مانع) حاکی از همخوانی و دقت مناسب مدل عددی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی بود. اگرچه در برخی نقاط، به‌ویژه در محدوده قوس‌ها، تفاوت‌هایی بین مقادیر سرعت اندازه‌گیری‌شده و مدل مشاهده شد، اما در مجموع با توجه به قدرت محاسباتی بالا، سرعت اجرا و رایگان بودن نرم‌افزار، استفاده از آن برای مدل‌سازی رودخانه‌های پیچانرودی توصیه می‌شود. در حالت مدل‌سازی با وجود تخته‌سنگ دیواره، مقادیر سرعت اندازه‌گیری‌شده و نتایج مدل هیدرولیکی به‌ویژه در اطراف تخته‌سنگ همخوانی مناسبی نداشت. موقعیت بیشینه سرعت و تغییرات میدان جریان در مدل عددی به خوبی انعکاس نیافته و این موضوع به‌ویژه در بررسی مواردی مانند عمق آبستگي یا تأثیر سازه‌های مشابه در رودخانه نیازمند دقت و بررسی بیشتری است. با این حال، نرم‌افزار توانسته است جریان‌های گردابی اطراف سنگ را به شکل قابل‌قبولی شبیه‌سازی کند که به عنوان یک نقطه قوت آن محسوب می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منفعی 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

مهرداد کشکولی‌پور: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها و نرم‌افزار. تمامی نویسندگان: تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Afzalimehr, H., Gallichand, J., Sui, J., & Bagheri, E. (2011). Field investigation on friction factor in mountainous cobble-bed and boulder-bed rivers. *International Journal of Sediment Research*, 26(2), 210-221. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60087-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60087-5)
- Atsuyuki, D. (1992). Control of local scour in bend channel by roughness on embankment. In *5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany* (pp. 61-70).
- Dorin, G., Pricop, C., Stă Tescu, F., Hră Niciuc, T. A. & Toma, D. (2022). Mathematical modelling and numerical analysis of hydraulic system behavior. A case study with application in HEC-RAS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1256(1), 012027.
- Ferro, V. (1999). Friction factor for gravel-bed channel with high boulder concentration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 771-778. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:7\(771\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:7(771))
- Gairola, A. (1996). Finite element solutions of fluid flow with heat transfer past obstructions. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Roorkee, India. 212
- Gob, F., Bravard, J. P., & Petit, F. (2010). The influence of sediment size, relative grain size and channel slope on initiation of sediment motion in boulder bed rivers. Alichen metric study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1535-1547. <https://doi.org/10.1002/esp.1994>
- Hersberger, D. S., Franca, M. J., & Schleiss, A. J. (2016). Wall-roughness effects on flow and scouring in curved channels with gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 04015032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001039](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001039)
- Lu, S. S., & Willmarth, W. W. (1973). Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 60(3), 481-511. <https://doi.org/10.1017/S0022112073000315>
- MacMahan, J., Reniers, A., Ashley, W., & Thornton, E. (2012). Frequency wave number velocity spectra, Taylor's hypothesis and length scales in a natural gravel bed river. *Water Resources Research*, 48, W09548. <https://doi.org/10.1029/2011WR011709>
- Maddahi, M. R., Afzalimehr, H., & Rowinski, P. M. (2016). Flow characteristics over a gravel bedform: Kaj River case study. *Acta Geophysica*, 64(5), 1779-1796. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0079>

- Mehraein, M., Anton J Schleiss., Marjan Goodarzi. (2023). The effects of a spur dike location in a 90° sharp channel bend on flow field: Focus on anisotropy degree and anisotropy nature, *Journal of Hydro-Environment Research*, 48, 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2023.05.001>.
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2020). Turbulence intensity and boundary shear stress in meandering compound channel under the influence of sinusoidal changes. *Journal of Modeling in Engineering*, 18(60), 53-69. <https://doi.org/10.22075/JME.2019.18692.1776>. (In Persian)
- Niknam, A., Khosrvi, GH., Nohegar, A. (2017). Simulating the flow pattern in a natural meander section using the CCHE2D hydrodynamic model (Case study: meanders upstream of the Dorudzan Dam). *Journal of Watershed Management Research*. JR_JWMR-8-16_007. (In Persian)
- Sontek ADV. (1997). Operation manual, firmware version 4.0. Sontek, San Diego.
- Divya, T., Law, A. W. K., Chong, T. H., & Kuiry, S. N. (2025). Effect of floodplain submergence and riparian vegetation on flow dynamics and mass transport near a spur dike. *Physics of Fluids*, 37(7): 076647. <https://doi.org/10.1063/5.0277309>
- Yager, E. M., Kirchner, J. W., & Dietrich W. E. (2007), Calculating bed load transport in steep boulder bed channels, *Water Resource. Research.*, 43, W07418. <https://doi.org/10.1029/2006WR005432>.
- Papanicolaou, A. N., Elhakeem, M., & Hilldale, R. (2007). Secondary current effects on cohesive river bank erosion. *Water Resources Research*, 43(12). <https://doi.org/10.1029/2006WR005763>.
- Schreiner, H. K., Rennie, C. D., & Mohammadian, A. (2023). Insights into secondary flow structure from clusters of instantaneous vortices. *Environmental Fluid Mechanics*. 23. 1-13. <http://doi.org/10.1007/s10652-022-09907-9>