


Numerical Investigation of Flow Field in the Skewed Compound Channel

Mostafa Dolati Mahtaj¹, Bahram Rezaei^{2*}

1- M.Sc. of Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

* b.rezaei@basu.ac.ir

Received: 14 September 2021, Accepted: 17 October 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: A compound channel consists of one main channel with a deeper flow in the middle and one or two floodplains around the main channel with lower flow depth. The difference between velocity in the main channel and on the floodplains in compound channels creates a strong shear layer at the interface between the main channel and floodplains. Also, because of the three-dimensional (3D) structure of flow, the investigation of flow characteristics in compound channels is completely complicated. In non-prismatic compound channels, due to the mass exchange between subsections, the study of flow is more complex. Therefore, the prediction of flow behavior in the non-prismatic compound channel is an important subject for river and hydraulic engineers. The skewed compound channel is one kind of non-prismatic compound channels. In compound channel with skewed floodplains, one of the floodplains is divergent and the other is convergent. The flow patterns in skewed compound channels have been studied experimentally by many researchers (James and Brown, 1977; Jasem, 1990; Elliott, 1990; Ervine and Jasem, 1995; Chlebek, 2009; Bousmar et al., 2012). However, numerical studies on flow characteristics in skewed compound channels were rarely performed. In this research, the velocity, boundary shear stress distributions, secondary current circulation, and water surface profile in a compound channel with skewed floodplains have been numerically investigated using the Computational Fluid Dynamics (CFD) and two turbulence models of the RNG and LES.

Methodology: In the present research, modeled compound channel is similar to the experimental channel used by Chlebek (2009) at the hydraulic laboratory of Birmingham University, Department of Civil Engineering. The experimental studies were performed in a straight flume of 17 m long, 1.198 m wide, 0.4 m deep, and with an average bed slope of 2.003×10^{-3} . The PVC material was used to make compound cross-section. A rectangular main channel of 0.398 m wide and 0.05 m deep in the middle, and two floodplains with 0.4 m wide around the main channel (Fig. 2). The skewed compound channel was made by isolated floodplains using L-shaped aluminum profiles. Experiments were conducted at the skew angle of 3.81° and four relative depths of 0.205, 0.313, 0.415, and 0.514. The lateral distributions of depth-averaged velocity and boundary shear stress were measured at six sections along the skewed part of the flume (see Fig. 3), using a Novar Nixon miniature propeller current meter and Preston tube of 4.77 mm diameter, respectively.

For numerical simulations of the flow field in the skewed compound channel, the FLOW-3D computational software was used. Also, the renormalization group (RNG) and Large Eddy

Simulation (LES) turbulence models were selected as turbulence closure. Two mesh blocks were utilized for gridding, mesh block 1 by coarser mesh size at the upstream of the skewed portion of the channel, and mesh block 2 by smaller mesh size for skewed part (Fig. 5). The flow field is numerically simulated by three computational meshes (fine, medium, and coarse mesh size). Details of gridding for different computational meshes are summarized in Table 2. Finally, the medium mesh by 1653498 cells was selected. For boundary conditions, using volume flow rate condition for inlet, outflow condition for the outlet, symmetry condition for water surface area and the interface of two mesh blocks, and wall condition for lateral boundaries and floor (see Fig. 8 and Table 3).

Results and Discussion: The results of the numerical simulations show that the RNG turbulence model, can predict the depth-averaged velocity and boundary shear stress distributions in the skewed compound channel fairly well (Figs. 9 and 10). In addition, in the skewed compound channel, the mean velocity and boundary shear stress on the diverging floodplain is more than converging floodplain at the same section. The longitudinal discharge distribution on floodplains of the skewed compound channel is linear, and the numerical modeling can compute those values very well (Figs. 11 and 12). By moving along the skewed part of the flume, the regions with higher velocity move toward the diverging floodplain. Also, the position of the maximum velocity, instead of the main channel centerline, move to the interface between the main channel and diverging floodplain (see Figs. 13 and 14). The lateral flow that leaves the converging floodplain, plunging into the main channel flow, creates a secondary flow circulation in the main channel and near the converging floodplain. Also, as moving along the flume and get close to the end of the skewed portion, this secondary flow becomes stronger (Figs. 15 and 16). Regarding the water surface profile in the skewed compound channel, two turbulence models can predict the water depth along the channel fairly well, especially the RNG turbulence model (Fig. 17). In addition, the error analysis by using experimental data and numerical results are investigated. For error analysis, Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Root Mean Square Error (RMSE), and the coefficient of determination (R^2) were calculated by using the equations of (12) to (15), respectively. The computational errors between the results of numerical simulation and experimental data are presented in Table 5 and are showed in Figs. 18 and 19.

Conclusion: In this research, the flow field in a compound channel with skewed floodplains has been numerically simulated. The FLOW-3D software and two turbulence models of the RNG and the LES were used to model the depth-averaged velocity, boundary shear stress distributions, and discharge distribution at different sections along the skewed compound channel. The results of simulations indicated that compared to the LES turbulence model, the RNG turbulence model are able to predict the velocity and bed shear stress distributions quite well especially at the first half of the skewed portion. Also, by increasing the flow depth, the accuracy of numerical modeling for prediction of the velocity and bed shear stress increase, while for the water surface profile decreases (see Fig. 18).

Keywords: Numerical Simulation, Velocity Distribution, Boundary Shear Stress, Secondary Currents, RNG Turbulence Model, LES Turbulence Model, Non-prismatic Compound Channel with Skewed Floodplains.

© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی عددی میدان جریان در کانال مرکب مورب

مصطفی دولتی مهتاج^۱، بهرام رضایی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

* b.rezaei@basu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: پیش‌بینی رفتار جریان در رودخانه‌ها به ویژه در مواقع سیلابی و در هنگام ایجاد مقاطع مرکب بسیار مهم است. در پژوهش حاضر تلاش شده است با استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) میدان جریان شامل توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق، تنش برشی مرزی، نمودارهای منحنی‌های هم‌سرعت، جریان‌های ثانویه و نیمرخ سطح آب در یک کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه به صورت عددی شبیه‌سازی شود. برای این منظور از نرم‌افزار محاسباتی FLOW-3D و مدل‌های آشفتگی گروه‌های دوباره نرمال شده (RNG) و شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES) استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی در شش مقطع در طول کانال مرکب مورب با نتایج مطالعات آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج حاصله بیانگر آن است که مدل آشفتگی RNG عملکرد بهتری نسبت به مدل آشفتگی LES در تخمین ویژگی‌های مختلف جریان در کانال مرکب مورب داشته است. به نحوی که میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE) بین نتایج مدل آشفتگی RNG و داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی در این پژوهش، برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق برابر ۶/۵۳ درصد، تنش برشی مرزی برابر ۱۲/۰۷ درصد، توزیع دبی برابر ۴/۵۹ درصد و نیمرخ سطح آب برابر ۱/۹۷ درصد بوده است.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی عددی، توزیع سرعت، تنش برشی مرزی، جریان‌های ثانویه، مدل آشفتگی RNG، مدل آشفتگی LES، کانال مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشتهای مورب

۱- مقدمه

اختلاف سرعت جریان بین مقطع اصلی آبراهه و سیلاب‌دشتهای است (Sellin, 1964; Shiono and Knight, 1991; Tominaga and Nezu, 1991; Bousmar, 2002). با توجه به تغییرپذیری‌های شکل مقطع عرضی در طول رودخانه‌ها، در هنگام سیلاب آبراهه مرکب منشوری به ندرت در طبیعت مشاهده شده و اغلب رودخانه‌ها در این زمان‌ها به شکل آبراهه مرکب غیرمنشوری در می‌آیند. یکی از انواع آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری، آبراهه‌های مرکب مورب می‌باشند (James and Brown 1977). نخستین بررسی‌های آزمایشگاهی را بر روی آبراهه مرکب با مقطع اصلی مورب انجام دادند (Jasem 1990) و Ervine and Jasem (1995) با انجام آزمایش‌هایی بر روی آبراهه مرکب با مقطع اصلی مورب بیان نمودند که جریان

بررسی و پیش‌بینی ویژگی‌های جریان در آبراهه‌های مرکب با توجه به رفتار به‌کل سه‌بعدی جریان در این مقطع‌ها، بسیار پیچیده بوده و از دیرباز مورد توجه محققان مختلف بوده است. با افزایش تراز سطح آب در رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی به هنگام سیلاب، جریان مازاد آب وارد سیلاب‌دشتهای شده و آبراهه‌ای با مقطع مرکب تشکیل می‌دهد. آبراهه مرکب اغلب از یک مقطع اصلی با عمق جریان بیشتر در وسط و یک یا دو سیلاب‌دشت با عمق جریان کمتر در پیرامون آن تشکیل شده است. در آبراهه‌های مرکب جریان‌های ثانویه مارپیچی در جهت جریان و نیز گردابه‌هایی در جهت قائم ایجاد می‌شوند که دلیل ایجاد آن‌ها لایه برشی ناشی از

مرکب کردند و دریافتند که این مدل آشفتگی توانایی مناسبی در شبیه‌سازی ویژگی‌های مختلف به ویژه جریان‌های ثانویه ایجاد شده در این آبراهه‌ها را دارد. Naik et al. (2018) و Rezaei and Amiri (2018) میدان جریان در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا را به صورت عددی بررسی کردند. Seif and Rezaei (2019) تاثیر زاویه اریب سیلاب‌دشت‌ها بر اندرکنش جریان بین مقطع اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در آبراهه‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب را بررسی و برای صحت‌سنجی بررسی عددی خود از نتایج آزمایش‌های Elliott and Sellin (1990) بهره بردند. آنان دریافتند که با افزایش زاویه اریب سیلاب‌دشت‌ها، دقت شبیه‌سازی عددی کاهش می‌یابد. از جمله بررسی‌ها عددی انجام شده به کمک نرم‌افزار محاسبه‌ای FLOW-3D بر روی مسئله‌های هیدرولیکی مختلف، می‌توان به بررسی‌های (2019) Biabani, Rahmani Firozjaei et al.، (2020) Karimpour et al. و Ghaderi et al. (2021) اشاره کرد. در همه‌ی این پژوهش‌ها مدل آشفتگی گروه‌های دوباره نرمال شده (RNG) برای شبیه‌سازی جریان توصیه شده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده تاکنون بررسی‌های محدودی به صورت عددی بر روی آبراهه‌های مرکب مورب انجام شده است. در این پژوهش هدف اصلی بررسی عددی میدان جریان شامل پراکنش سرعت، تنش برشی مرزی، پراکنش دبی، جریان‌های ثانویه و نیمرخ سطح آب در آبراهه مرکب مورب است. برای این منظور از نرم‌افزار شبیه‌سازی FLOW-3D استفاده شده است. همچنین با توجه به بررسی‌های انجام شده و توصیه‌های ارائه شده توسط محققان پیشین، دو مدل آشفتگی گروه‌های دوباره نرمال شده (RNG) و شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES) برای مدل‌سازی جریان در آبراهه مرکب مورب استفاده شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و دقت هر یک از این مدل‌های آشفتگی برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف جریان بررسی شده است.

سیلابی عبوری از آبراهه، در جهت اریب مقطع اصلی منحرف می‌شود.

Elliott (1990) و Elliott and Sellin (1990) جریان در آبراهه مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنان دریافتند که اریب بودن سیلاب‌دشت‌ها سبب کاهش ظرفیت انتقال آبراهه شده و با افزایش عمق نسبی جریان تأثیر اریب بودن سیلاب‌دشت‌ها بر کاهش ظرفیت انتقال جریان کمتر می‌شود. Sellin (1995) با پیگیری و تکمیل نتایج بررسی‌های Elliott and Sellin (1990)، بیان کرد که تغییر زاویه اریب سیلاب‌دشت‌ها تأثیر چندانی بر ظرفیت جریان عبوری از آبراهه ندارد لیکن زاویه دیواره مقطع اصلی در میزان کاهش ظرفیت انتقال آبراهه بسیار مؤثر است. Chlebek (2009) با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک آبراهه مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب، بیان کرد که در این نوع آبراهه محل بیشینه سرعت طولی جریان در مقطع اصلی و در نزدیکی دیواره سیلاب‌دشت واگرا قرار دارد. Bousmar et al. (2012) تأثیر زبری بستر سیلاب‌دشت‌ها بر روی رفتار جریان در آبراهه مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های مورب را بررسی کردند. Dolati Mahtaj (2021) تأثیر شیب جانبی سیلاب‌دشت‌ها در آبراهه‌های مرکب مورب را به صورت تجربی بررسی کرد.

در مورد بررسی‌ها عددی انجام شده بر روی آبراهه‌های مرکب، Sofialidis and Prinos (1998) با شبیه‌سازی جریان در آبراهه‌های مرکب منشوری با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ بیان کردند که این مدل آشفتگی توانایی مناسبی در برآورد ویژگی‌های جریان دارد. محققان دیگری مانند Rameshwaran and Naden (2003) و Rezaei and Safarzade (2016) نیز از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی میدان جریان در آبراهه‌های مرکب استفاده کرده‌اند. Rezaei and Safarzade (2016) تأثیر تغییر عرض سیلاب‌دشت‌ها بر میدان جریان در آبراهه‌های مرکب منشوری را به صورت عددی بررسی کردند.

Beaman (2010)، Kara et al. (2012) و Xie et al. (2013) با استفاده از مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES) اقدام به مدل‌سازی جریان در آبراهه‌های

آزمایش‌ها در چهار عمق نسبی $D_r = (H-h)/H$ که D_r عمق نسبی جریان، H عمق جریان در مقطع اصلی و h عمق مقطع اصلی آبراهه است) برابر با ۰/۳۱۳، ۰/۲۰۵، ۰/۴۱۵ و ۰/۵۱۴ انجام شده است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در این آزمایش‌ها آورده شده است.

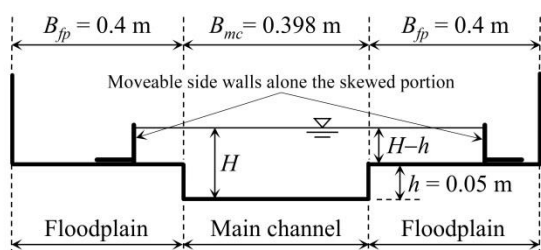


Fig. 2 Cross-section of skewed compound channel used by Chlebek (2009)

شکل ۲ مقطع عرضی آبراهه مرکب مورب استفاده شده توسط Chlebek (2009)

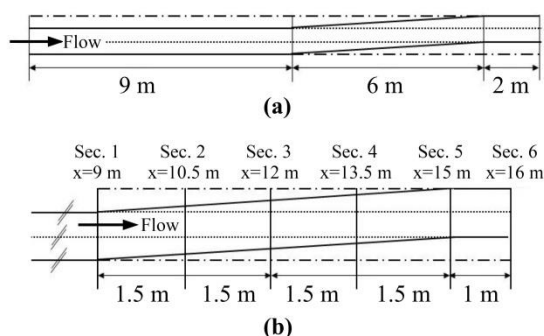


Fig. 3 (a) Plan view of skewed compound channel, (b) position of experimental sections (Chlebek, 2009)

شکل ۳ (a) نمای از بالا آبراهه مرکب مورب، (b) موقعیت مقطع‌های آزمایشگاهی (Chlebek, 2009)

در همه‌ی مقطع‌های اندازه‌گیری (شکل ۳-b)، سرعت میانگین در عمق در یک موقعیت ارتفاعی با استفاده از سرعت‌سنج پروانه‌ای (از نوع Novar Nixon) به قطر ۱۳ میلی‌متر، در ارتفاع $0.4H$ از بستر مقطع اصلی و $0.4(H-h)$ از بستر سیلاب‌دشت‌ها اندازه‌گیری شده است (شکل ۲). فواصل عرضی اندازه‌گیری سرعت نیز برابر ۲۵ میلی‌متر بوده است. همچنین اندازه‌گیری تنش برشی مرزی نیز در پیرامون مرطوب همه‌ی مقطع‌ها، با استفاده از لوله پرستون با قطر خارجی ۴/۷۷ میلی‌متر، در فواصل

۲- آبراهه مرکب آزمایشگاهی

در این پژوهش آبراهه مرکب شبیه‌سازی شده مشابه آبراهه آزمایشگاهی مورد استفاده (Chlebek 2009) موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بیرمنگام انگلستان می‌باشد. این آبراهه آزمایشگاهی دارای طول کلی ۱۷ متر، عرض ۱/۱۹۸ متر و عمق ۰/۴ متر است. شیب کف این آبراهه برابر $10^{-3} \times 2/003$ بوده و جنس دیواره‌های آن از شیشه است. مقطع عرضی این آبراهه به صورت مرکب بوده و از یک مقطع اصلی مستطیلی با عرض و عمق به ترتیب ۰/۳۹۸ و ۰/۰۵ متر و دو سیلاب‌دشت در طرفین آن با عرض ۰/۴ متر با استفاده از ورق‌های PVC ساخته شده است. به منظور اریب ساختن سیلاب‌دشت‌ها از نیمرخ‌های آلومینیومی استفاده شده است. شروع ناحیه اریب در فاصله ۹ متری از ابتدای آبراهه مرکب بوده و طول ناحیه اریب برابر با ۶ متر (متناظر با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه) است. شکل ۱ نمای کلی از آبراهه آزمایشگاهی و شکل ۲ مقطع عرضی این آبراهه مرکب را نشان می‌دهد. همچنین در این آبراهه اندازه‌گیری‌های سرعت میانگین در عمق و تنش برشی بستر در ۵ مقطع در امتداد ناحیه اریب آبراهه با فاصله‌های طولی ۱/۵ متر و ۱ مقطع بعد از پایان ناحیه اریب در فاصله ۱۶ متری از ابتدای آبراهه مرکب انجام شده است. شکل ۳ تصویر از بالا و موقعیت مقطع‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



Fig. 1 General view of flume with skewed floodplains (Chlebek, 2009)

شکل ۱ نمای کلی آبراهه آزمایشگاهی با سیلاب‌دشت‌های مورب (Chlebek, 2009)

۳-۱- معادله‌های حاکم

معادله‌های اصلی حاکم بر جریان روابط ناویه-استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز (RANS) و اصل بقاء جرم (رابطه پیوستگی) می‌باشند. در نرم‌افزار FLOW-3D رابطه پیوستگی و رابطه‌های اندازه حرکت در دستگاه مختصات دکارتی (x, y, z) برابر رابطه‌های (۱) تا (۴) تعریف می‌شوند (Flow Science, 2016).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \dots = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \dots = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

در این رابطه‌ها u, v و w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های x, y و z هستند. همچنین A_x, A_y و A_z کسری از سطح جریان در جهت‌های مختلف، G_x, G_y و G_z شتاب حجمی (گرانشی) در جهت‌های مختلف، f_x, f_y و f_z شتاب لزوجت در جهت‌های مختلف، V_F کسری از حجم فضای باز به جریان، p فشار، ρ چگالی سیال و t نشانه زمان است.

۳-۲- مدل آشفتگی گروه‌های دوباره نرمال شده (RNG)

مدل آشفتگی گروه‌های دوباره نرمال شده (RNG) توسط Yakhot and Orszag (1986) ارائه شده است. مدل آشفتگی RNG از رابطه‌های همانند با مدل استاندارد $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند با این تفاوت که میزان‌های ثابتی که به صورت تجربی در مدل $k-\varepsilon$ به دست آمده‌اند، در مدل RNG به صورت صریح محاسبه می‌شوند (Flow Science, 2016). در مدل آشفتگی RNG همانند مدل استاندارد $k-\varepsilon$ ، فرض بر آن است که لزوجت آشفتگی (μ_t) به دو فراسنجه انرژی جنبشی آشفتگی (k) و استهلاک انرژی

عرضی ۲۵ میلی‌متری و فواصل ارتفاعی ۱۰ میلی‌متری انجام شده است. در ادامه برای محاسبه تنش برشی مرزی از رابطه‌های واسنجی شده توسط Patel (1965) استفاده شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در آبراهه مرکب مورب
Table 1 Hydraulic characteristics of flow in skewed compound channel

Discharge Q_t (m ³ /s)	H (m)	$H-h$ (m)	D_r (-)
0.0162	0.0629	0.0129	0.205
0.0214	0.0728	0.0228	0.313
0.0296	0.0855	0.0355	0.415
0.0434	0.1028	0.0528	0.514

۳- شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان شامل پراکنش سرعت، تنش برشی مرزی، جریان‌های ثانویه، پراکنش دبی و نیمرخ سطح آب در آبراهه مرکب مورب، از ابزار دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای (CFD) و نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای حل معادله‌های حاکم بر جریان در یک شبکه‌بندی منظم مستطیلی استفاده می‌کند. همچنین این نرم‌افزار از روش حجم سیال (VOF) برای شبیه‌سازی سطح آزاد آب و برای شبیه‌سازی سطح‌های سخت و مرزهای احجام هندسی از روش کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR) استفاده می‌کند (Flow Science, 2016). برای وارد کردن مدل آبراهه مرکب مورب به نرم‌افزار FLOW-3D، در ابتدا مدل سه‌بعدی آن با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD 3D ساخته و آن‌گاه وارد نرم‌افزار FLOW-3D شده است. شکل ۴ مدل سه‌بعدی آبراهه مرکب مورب وارد شده به نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

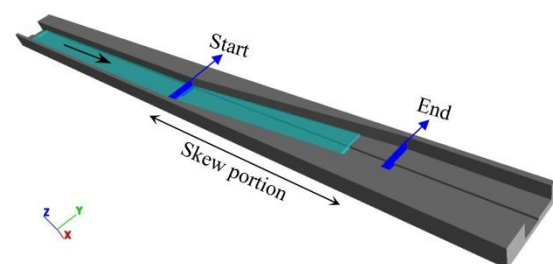


Fig. 4 The 3D geometry of skewed compound channel
شکل ۴ هندسه سه‌بعدی آبراهه مرکب مورب

مقیاس نوسان‌های سرعت به میزان L برابر میانگین تنش برشی در هر المان است. در مدل آشفتگی LES، این میزان‌ها در رابطه تعیین لزوجت گردابی سینماتیکی ترکیب شده‌اند (Flow Science, 2016):

$$\nu_t = (cL)^2 \sqrt{2e_{ij} 2e_{ij}} \quad (9)$$

که در این رابطه c میزانی ثابت بوده و میزان آن در حدود 0.1 تا 0.2 است. همچنین e_{ij} نشان دهنده اجزای تانسور نرخ کرنش است. با معلوم بودن لزوجت گردابی سینماتیکی (ν_t)، لزوجت آشفتگی (μ_t) قابل محاسبه است (Flow Science, 2016):

$$\mu_t = \rho \nu_t \quad (10)$$

۳-۴- شبکه محاسبه‌ای

در این پژوهش برای شبکه‌بندی میدان حل در آبراهه مرکب مورب از شبکه با سلول‌های مکعبی استفاده شده است. با توجه به هندسه آبراهه مرکب مورب و افزایش اندرکنش جریان بین مقطع اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در ناحیه اریب آبراهه، به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی عددی، در شبکه‌بندی میدان حل از دو بلوک شبکه یکی با ابعاد سلول‌های بزرگتر در قسمت بالادست ناحیه اریب آبراهه و دیگری با ابعاد سلول‌های کوچکتر در ناحیه اریب استفاده شده است. در این شبکه‌ها، ابعاد سلول‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که نسبت اندازه دو سلول مجاور هم از میزان توصیه شده $1/25$ کمتر باشد (Flow Science, 2016). شکل ۵ طرح کلی از شبکه‌بندی انجام شده را نشان می‌دهد.

با توجه به اهمیت انتخاب مناسب ابعاد سلول‌های شبکه در شبیه‌سازی عددی و همچنین به منظور بررسی تأثیر ابعاد سلول‌های شبکه بر شبیه‌سازی جریان، آبراهه مرکب مورب با سه شبکه‌بندی ریز، متوسط و درشت شبیه‌سازی شده است. ابعاد سلول‌های این شبکه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که نسبت بین آن‌ها از میزان $1/3$ توصیه شده توسط Celik et al. (2008) کمتر نباشد. در جدول ۲ جزئیات شبکه‌بندی‌های ریز، متوسط و درشت آورده شده است.

با استفاده از مدل آشفتگی RNG و برای عمق نسبی 0.415 (متناظر با دبی 0.0296 متر مکعب بر ثانیه)، میدان جریان

آشفتگی (ε) برابر رابطه (۵) وابسته است.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

در این رابطه C_μ میزانی ثابت بوده و در مدل RNG برابر 0.0845 است. میزان‌های k و ε نیز با حل معادله‌های دیفرانسیلی نرخ انرژی جنبشی آشفتگی (رابطه (۶)) و نرخ استهلاك انرژی آشفتگی (رابطه (۷)) برآورد می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \dots + G_k - G_b - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \dots + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

در این روابط i و j نشان دهنده جهت، G_k و G_b بیانگر تولید انرژی آشفتگی به ترتیب ناشی از گرادیان سرعت و شناوری و μ_{eff} لزوجت مؤثر بوده که برابر حاصل جمع لزوجت سیال و لزوجت آشفتگی است ($\mu_{eff} = \mu + \mu_t$). در مدل آشفتگی RNG، میزان‌های ثابت α_k ، α_ε ، $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ موجود در رابطه‌های (۶) و (۷) به ترتیب برابر $1/39$ ، $1/42$ ، $1/68$ و 1 هستند (Ghaderi et al., 2021).

۳-۳- مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES)

ایده اصلی در مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES) آن است که همه‌ی ساختارهای جریان آشفته که با استفاده از شبکه محاسبه‌ای قابل تعیین هستند، محاسبه شوند و فقط ساختارهای آشفتگی بسیار ریز که قابل محاسبه نیستند تقریب زده شوند. در مدل آشفتگی LES، تأثیرهای بسیار کوچک آشفتگی با یک لزوجت گردابی نشان داده می‌شوند که با مقیاس طول نواسانات سرعت متناسب است. برای تعیین مقیاس طول از میانگین هندسی ابعاد المان شبکه حل استفاده می‌شود (Flow Science, 2016):

$$L = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3} \quad (8)$$

در این رابطه δx ، δy و δz به ترتیب ابعاد المان‌های شبکه حل در جهت‌های x ، y و z بوده و L مقیاس طول است.

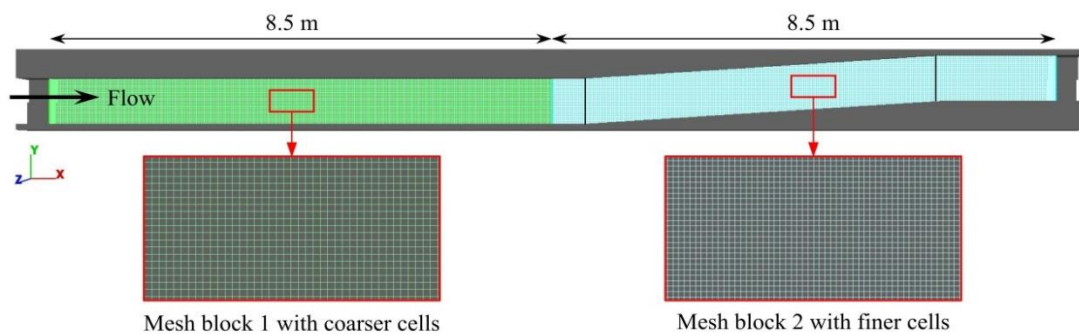


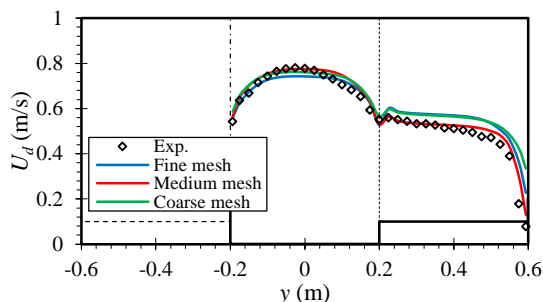
Fig. 5 Schematic view of gridding details

شکل ۵ طرح کلی از جزئیات شبکه‌بندی

جدول ۲ جزئیات شبکه‌بندی برای شبکه‌های محاسبه‌ای مختلف

Table 2 Details of gridding for different computational meshes

	Fine mesh	Medium mesh	Coarse mesh
Mesh block 1 cell size (m)	0.013	0.017	0.022
Mesh block 2 cell size (m)	0.011	0.014	0.018
Number of cells in mesh block 1	814131	510720	412425
Number of cells in mesh block 2	1762992	1142778	943500
Total number of cells	2577123	1653498	1355925


 Fig. 6 A comparison between the measured depth-averaged velocity and the results of numerical simulations for different mesh sizes at $x = 9$ m and relative depth of 0.415

شکل ۶ مقایسه سرعت میانگین در عمق اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای ابعاد شبکه مختلف در مقطع $x = 9$ m و عمق نسبی ۰/۴۱۵

۳-۵- شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی عددی در شکل ۸ نشان داده شده است. برای مرز ورودی آبراهه از شرط دبی حجمی (Volume flow rate)، برای مرز خروجی از شرط جریان خروجی (Outflow)، برای سطح آزاد جریان از شرط مرزی تقارن (Symmetry) و برای کف و دیواره‌های آبراهه از شرط مرزی دیوار (Wall) استفاده شده است.

برای هر سه شبکه‌بندی ریز، متوسط و درشت به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. سپس میزان‌های سرعت میانگین در عمق در مقطع ابتدائی ناحیه اریب ($x = 9$ m) استخراج و در شکل ۶ ترسیم شده است. به منظور گزینش شبکه‌بندی با ابعاد سلول‌های مناسب و بهینه، پراکندگی زوج مرتب‌های نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و بررسی‌های آزمایشگاهی در پیرامون خط مطلوب (ایده‌آل) $y = x$ برای هر سه شبکه ریز، متوسط و درشت در شکل ۷ ترسیم شده است. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان مشاهده کرد که کاهش ابعاد سلول‌ها در شبکه‌بندی میدان حل همواره باعث افزایش دقت شبیه‌سازی عددی نخواهد شد به گونه‌ای که پراکندگی نتایج در پیرامون خط $y = x$ در شبکه‌بندی با ابعاد سلول ریز نسبت به شبکه‌بندی با ابعاد سلول متوسط بیشتر شده است (شکل‌های ۷-a و ۷-b). با توجه به این موضوع شبکه‌بندی با ابعاد سلول‌های متوسط که شمار کل سلول‌های محاسبه‌ای آن برابر ۱۶۵۳۴۹۸ عدد است به عنوان شبکه‌بندی با ابعاد سلول‌های مناسب و بهینه گزینش شده و ادامه شبیه‌سازی‌ها با این شبکه‌بندی انجام شده است.

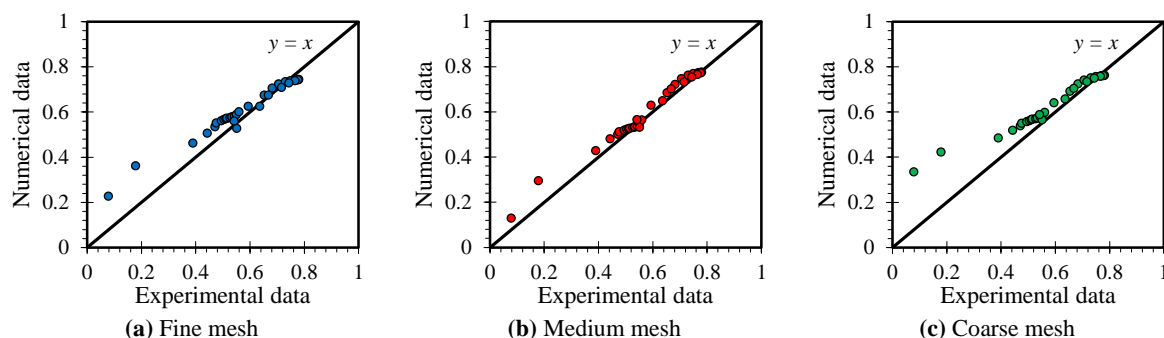


Fig. 7 Dispersion diagram of depth averaged velocity around the $y = x$ line for different computational meshes

شکل ۷ نمودار پراکندگی سرعت میانگین در عمق پیرامون خط $x = y$ برای شبکه‌های محاسبه‌ای مختلف

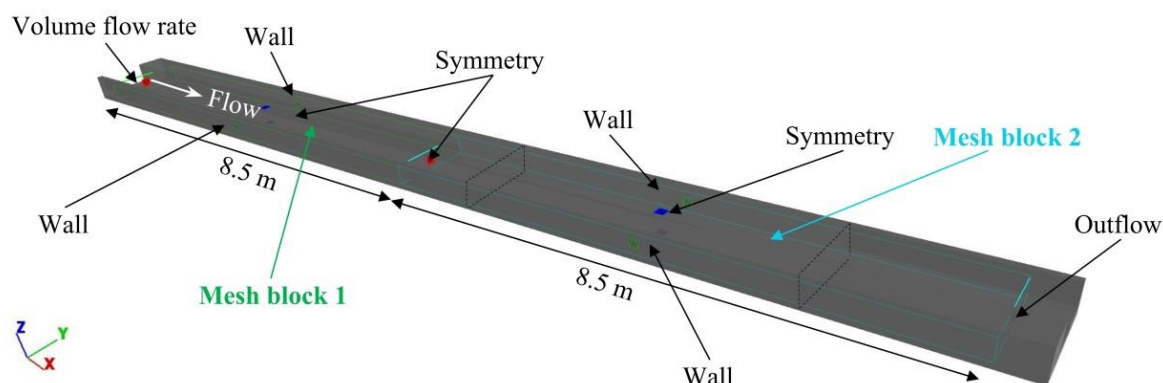


Fig. 8 Boundary conditions applied in numerical simulation

شکل ۸ شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی عددی

در شرط مرزی تقارن، گرادیان‌های سرعت عمود بر مرز برابر صفر بوده و میزان‌های فراسنجه‌ها برابر میزان آن‌ها در نزدیک‌ترین سلول مجاور مرز قرار داده می‌شوند (Flow Science, 2016). در جدول ۳ شرایط مرزی تعریف شده در هر دو بلوک شبکه‌بندی آورده شده است.

همچنین دیواره‌ها و کف آبراهه بدون لغزش در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به اینکه در شبکه‌بندی میدان حل از دو بلوک شبکه‌بندی یکی در بالادست ناحیه اریب و دیگری در ناحیه اریب آبراهه استفاده شده است، در مرز بین این دو بلوک شبکه‌بندی از شرط مرزی تقارن استفاده شده است.

جدول ۳ تعریف شرایط مرزی در شبیه‌سازی عددی

Table 3 Definition of boundary conditions in numerical simulation

Boundary	Mesh block 1	Mesh block 2
Inlet	Volume flow rate	Symmetry
Outlet	Symmetry	Outflow
Free surface	Symmetry	Symmetry
Right side	Wall	Wall
Left side	Wall	Wall
Floor	Wall	Wall

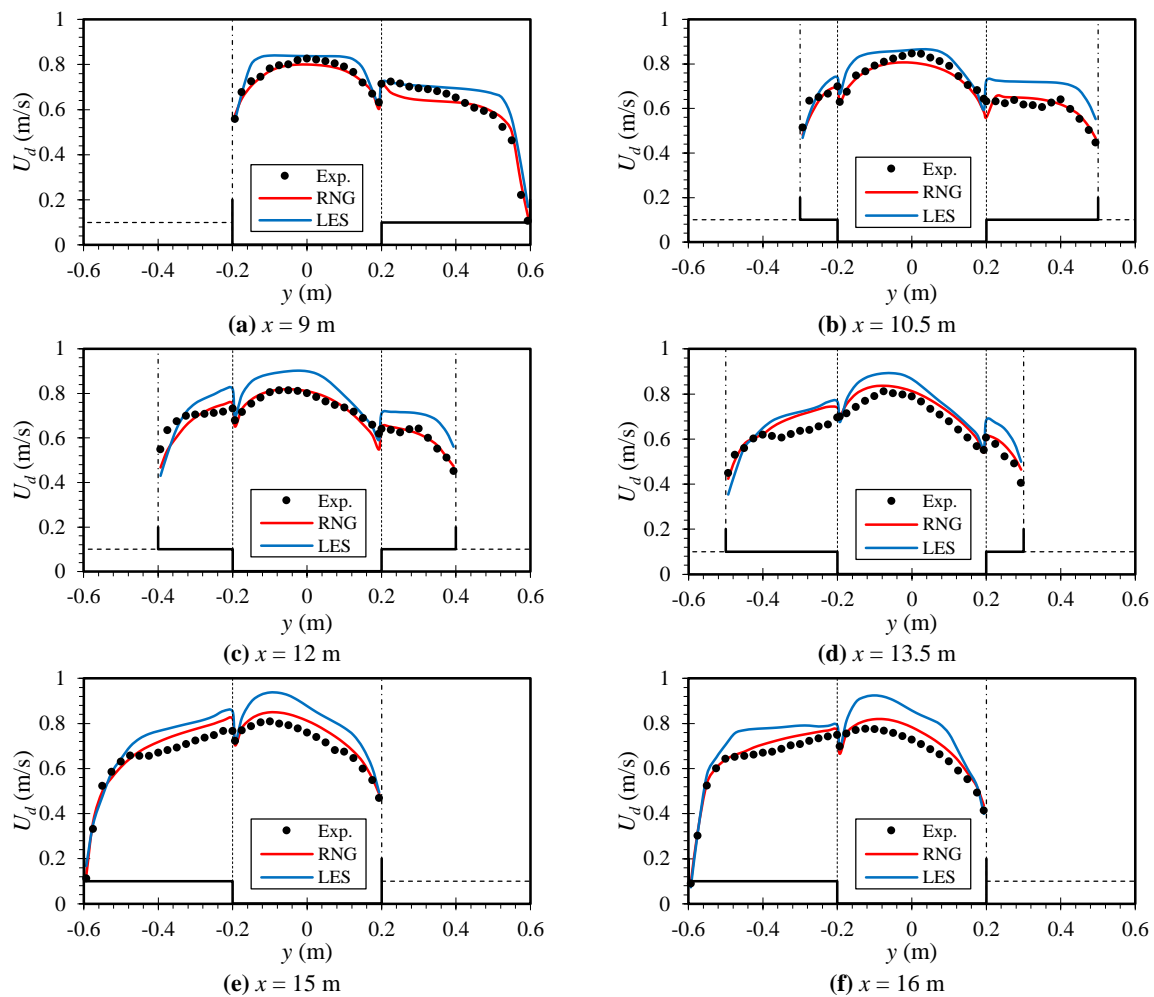


Fig. 9 Lateral distribution of depth averaged velocity in different sections for relative depth of 0.514

شکل ۹ پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق در مقطع‌های مختلف برای عمق نسبی ۰/۵۱۴

بررسی‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل ۹ نتایج پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D برای عمق نسبی ۰/۵۱۴ (دبی ۰/۴۳۴ متر مکعب بر ثانیه) و در مقطع‌های مختلف در طول آبراهه آورده شده است. با توجه به شکل ۹، می‌توان مشاهده کرد که مدل آشفتگی RNG عملکرد مناسبی در برآورد پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق به ویژه در نیمه اول ناحیه آریب آبراهه مرکب ($9 \text{ m} < x \leq 12 \text{ m}$) داشته است. این در حالی است که مدل آشفتگی LES در تمامی مقطع‌های اندازه‌گیری، سرعت جریان را بیشتر از میزان واقعی آن پیش‌بینی کرده است. این موضوع به روشنی در نیمه دوم ناحیه آریب آبراهه مرکب ($12 \text{ m} < x \leq 15 \text{ m}$) مشخص است. در آبراهه مرکب مورب بیشینه سرعت جریان در طول ناحیه

۴- نتایج و بحث

۴-۱- سرعت میانگین در عمق

سرعت میانگین در عمق (U_d) یکی از فراسنجه‌های رایج در ارائه نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی آبراهه‌های مرکب است. این فراسنجه برابر رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود که در این رابطه h معرف عمق جریان و u مؤلفه سرعت در جهت جریان است.

$$U_d = \frac{1}{h} \int_0^h u dz \quad (11)$$

به منظور بررسی میدان جریان در آبراهه مرکب مورب، پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق با هر دو مدل آشفتگی RNG و LES برای چهار عمق نسبی ۰/۲۰۵، ۰/۳۱۳، ۰/۴۱۵ و ۰/۵۱۴ شبیه‌سازی شده و در شش مقطع در طول آبراهه مرکب مورب استخراج و با نتایج

مقطع‌های شبیه‌سازی شده و با میزان‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل ۱۰ نتایج پراکنش عرضی تنش برشی مرزی بدست آمده از شبیه‌سازی عددی برای عمق نسبی ۰/۵۱۴ در شش مقطع در طول آبراهه مرکب مورب نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰ می‌توان دریافت که همانند پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق، مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل آشفتگی LES کارکرد بهتری در پیش‌بینی پراکنش عرضی تنش برشی مرزی دارد. مدل آشفتگی RNG اغلب در نیمه دوم ناحیه اریب، تنش برشی مرزی را در مقطع اصلی آبراهه و سیلاب‌دشت واگرا اندکی بیشتر از میزان‌های اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. این در حالی است که مدل آشفتگی LES میزان‌های تنش برشی مرزی را در کل مقطع عرضی آبراهه به ویژه در سیلاب‌دشت واگرا بیشتر از میزان‌های آزمایشگاهی محاسبه کرده است.

مورب آبراهه از جهت اریب پیروی کرده و به سوی سیلاب‌دشت واگرا متمایل شده است. این موضوع به خوبی توسط هر دو مدل آشفتگی RNG و LES نشان داده شده است (شکل ۹). همچنین در بررسی‌های انجام شده مشاهده شده است که با افزایش عمق نسبی جریان، اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی عددی و بررسی‌های آزمایشگاهی کاهش یافته است. نتیجه‌ای یکسان توسط Rezaei and Amiri (2018) نیز ارائه شده است.

۲-۴- تنش برشی مرزی

یکی دیگر از فراسنجه‌های اساسی در بحث مهندسی رودخانه، تنش برشی مرزی است که در بررسی‌های مربوط به حفاظت از بستر و همچنین انتقال رسوب کاربرد دارد. در این پژوهش با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و LES تنش برشی مرزی در پیرامون مرطوب همه‌ی

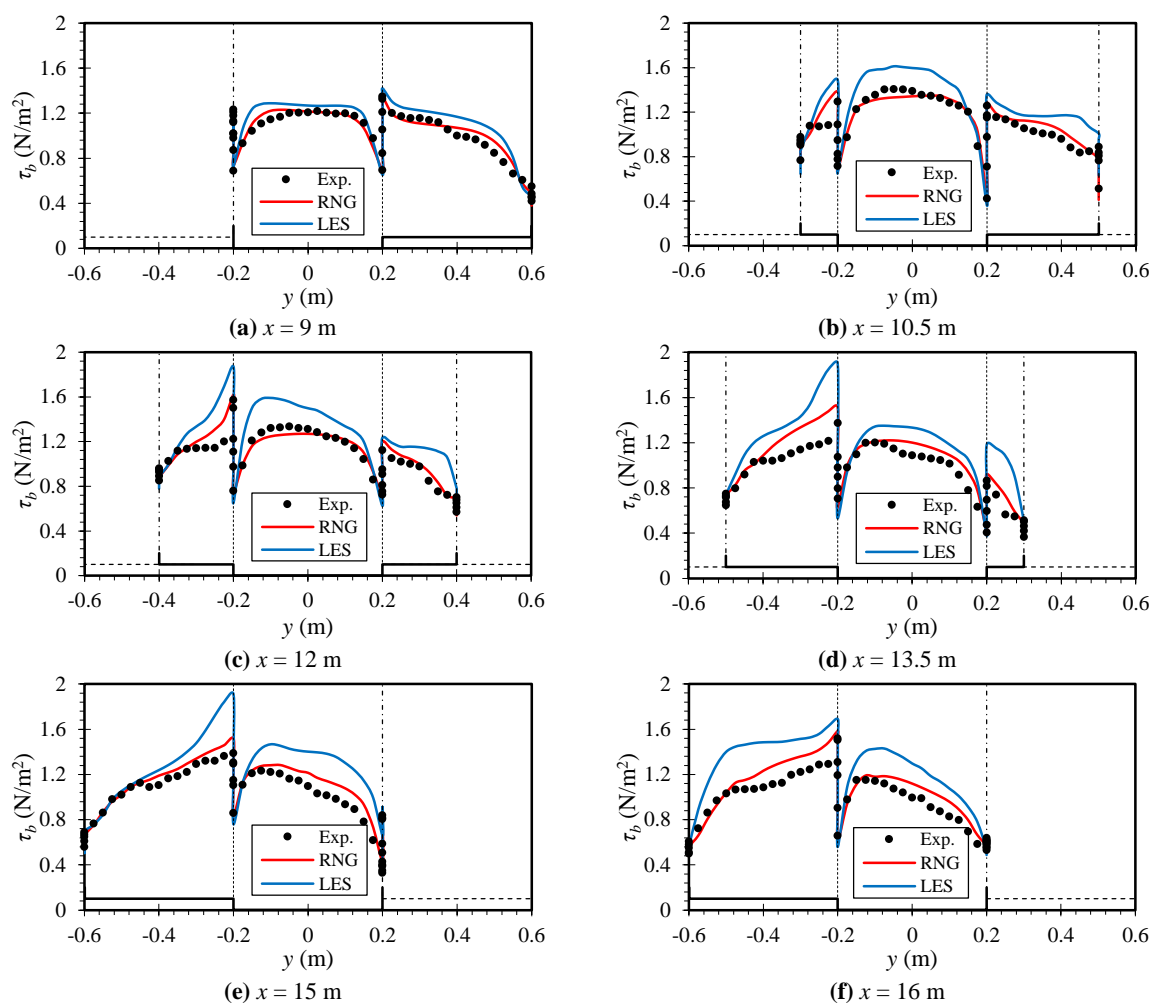


Fig. 10 Lateral distribution of boundary shear stress in different sections for relative depth of 0.514

شکل ۱۰ پراکنش عرضی تنش برشی مرزی در مقطع‌های مختلف برای عمق نسبی ۰/۵۱۴

شده بین آن‌ها بسیار با اهمیت است. در این پژوهش درصد دبی عبوری از هر یک از زیربخش‌های آبراهه مرکب مورب شامل سیلاب‌دشت و اگرآ، مقطع اصلی آبراهه و سیلاب‌دشت همگرا با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و LES شبیه‌سازی شده و در شکل ۱۱ برای عمق نسبی ۰/۳۱۳ و در شکل ۱۲ برای عمق نسبی ۰/۵۱۴ با نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

با توجه به شکل‌های a-۱۱ و a-۱۲، می‌توان مشاهده کرد که هر دو مدل آشفتگی مورد استفاده در این پژوهش، به ویژه مدل آشفتگی RNG درصد دبی عبوری از سیلاب‌دشت و اگرآ را به خوبی پیش‌بینی می‌کنند این در حالی است که در برآورد درصد دبی عبوری از مقطع اصلی آبراهه (شکل‌های b-۱۱ و b-۱۲) دقت کمتری در نتایج هر دو مدل آشفتگی مشاهده شده است.

در سیلاب‌دشت همگرا با حرکت در طول ناحیه اریب آبراهه، دقت شبیه‌سازی عددی در تعیین درصد دبی عبوری از آن افزایش یافته است. این موضوع در شکل‌های c-۱۱ و c-۱۲ قابل مشاهده است.

با حرکت در طول ناحیه اریب آبراهه، اغلب اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی عددی در برآورد تنش برشی مرزی و میزان‌های آزمایشگاهی افزایش یافته است. این در حالی است که با افزایش عمق نسبی جریان، همانند پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق، دقت شبیه‌سازی عددی در محاسبه تنش برشی مرزی بیشتر شده است.

در هر دو مدل آشفتگی RNG و LES محل بیشینه تنش برشی مرزی در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت و اگرآ تعیین شده است که این پدیده در بررسی‌های آزمایشگاهی (Elliott and Sellin (1990) و Chlebek (2009) نیز مشاهده شده است. با این حال در مدل آشفتگی RNG میزان بیشینه تنش برشی مرزی تعیین شده در محل $y = -0.2 \text{ m}$ به میزان اندازه‌گیری شده در بررسی‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر است.

۳-۴- پراکنش دبی جریان

تعیین درصد مشارکت هر یک از زیربخش‌های آبراهه مرکب در انتقال دبی جریان به منظور بررسی جرم مبادله

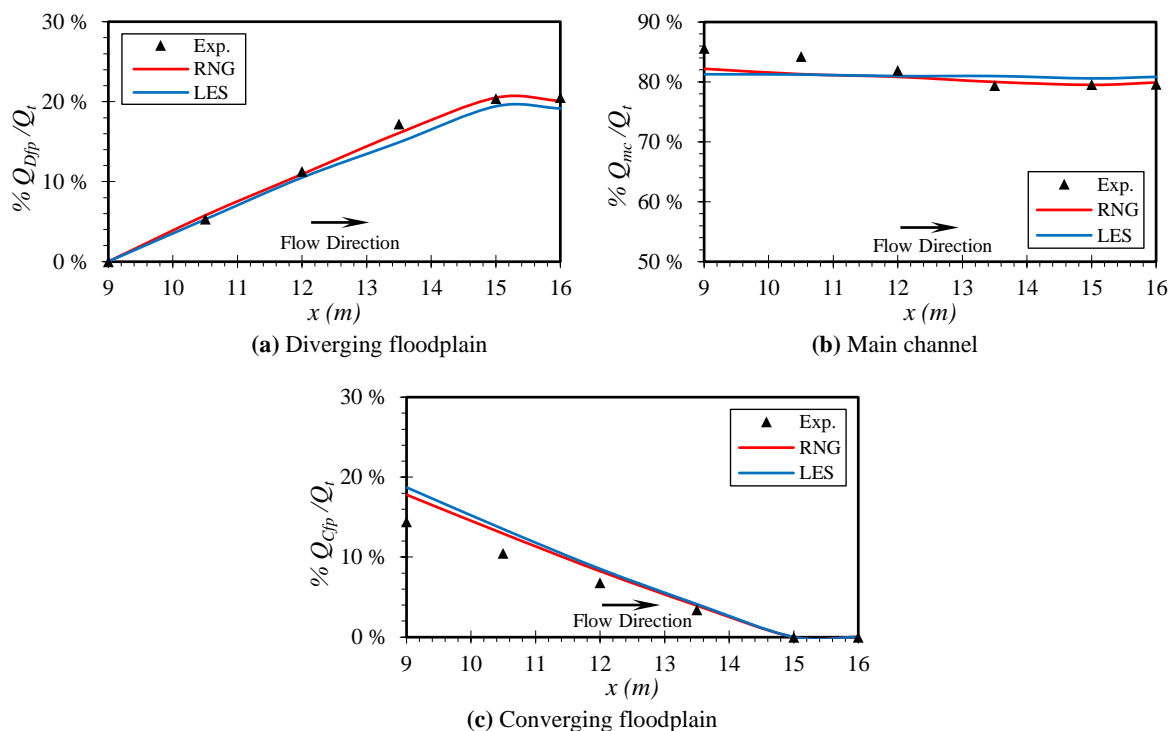


Fig. 11 Discharge distribution along the skew part of the flume l for relative depth of 0.313

شکل ۱۱ پراکنش دبی در طول زیربخش‌های آبراهه مرکب مورب برای عمق نسبی ۰/۳۱۳

صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در شکل ۱۳ با استفاده از مدل آشفتگی RNG و در شکل ۱۴ با استفاده از مدل آشفتگی LES پراکنش نقطه‌های هم‌سرعت در شش مقطع در طول آبراهه مرکب برای عمق نسبی ۰/۵۱۴ نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴، قابل مشاهده است که پراکنش نقاط هم‌سرعت تعیین شده توسط هر دو مدل آشفتگی RNG و LES تا حدودی همانند بوده لیکن مدل آشفتگی LES سرعت را بیشتر از مدل آشفتگی RNG برآورد کرده است.

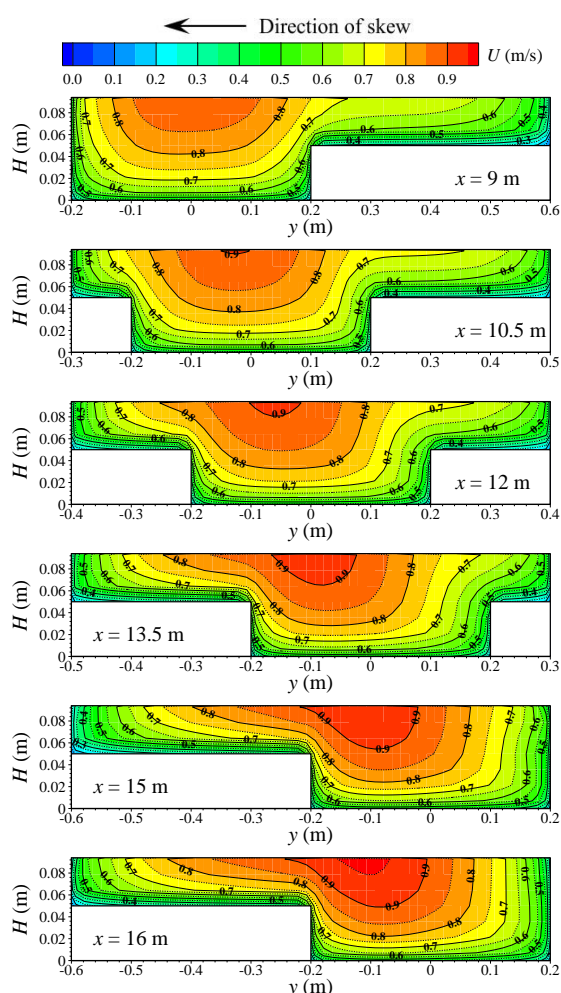


Fig. 13 Velocity distribution along the skewed portion of compound channel simulated by RNG turbulence model for relative depth of 0.514

شکل ۱۳ پراکنش سرعت در امتداد ناحیه اریب آبراهه مرکب شبیه‌سازی شده بوسیله مدل آشفتگی RNG برای عمق نسبی ۰/۵۱۴

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، در آبراهه مرکب مورب

همانند نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط Chlebek (2009)، تغییرپذیری‌های درصد دبی عبوری از سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا در طول ناحیه اریب آبراهه در شبیه‌سازی عددی نیز به صورت خطی است. همچنین با افزایش عمق نسبی جریان دقت شبیه‌سازی عددی در برآورد درصد دبی عبوری از هر یک از زیربخش‌های آبراهه مرکب مورب به ویژه در سیلاب‌دشت همگرا بیشتر شده است.

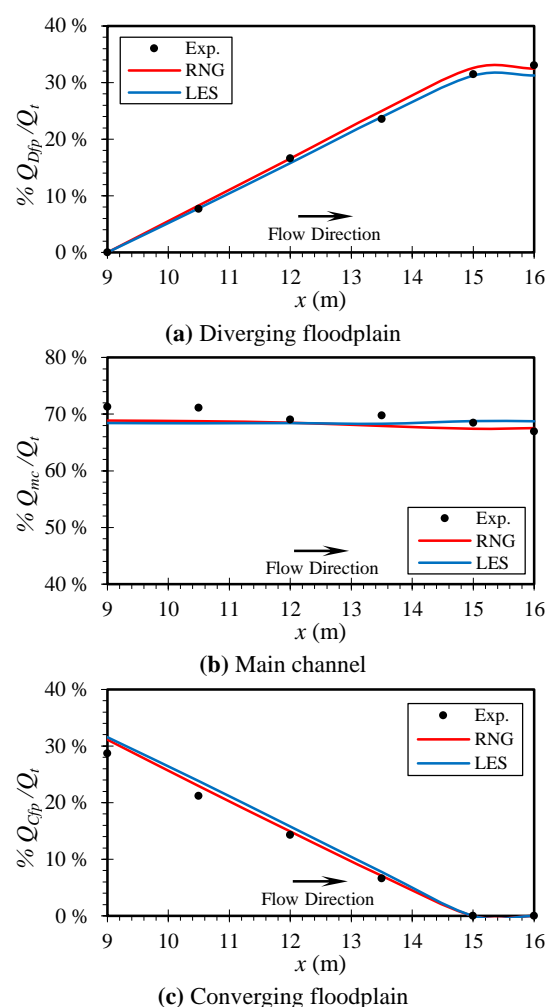


Fig. 12 Discharge distribution along the skew part of the flume for relative depth of 0.514

شکل ۱۲ پراکنش دبی در طول زیربخش‌های آبراهه مرکب مورب برای عمق نسبی ۰/۵۱۴

۴-۴- نمودارهای منحنی‌های هم‌سرعت

نمودارهای منحنی‌های هم‌سرعت جریان در مقطع عرضی آبراهه با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و LES به

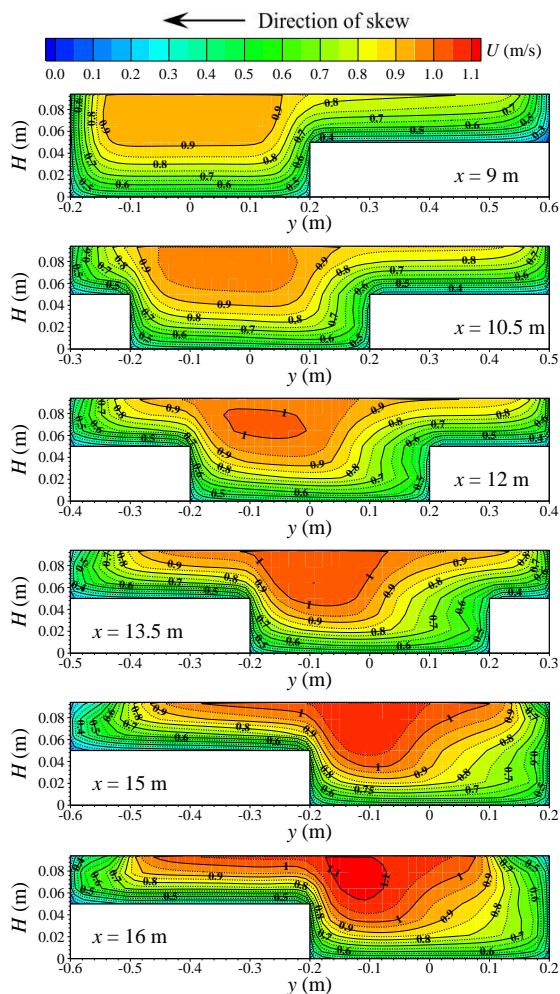


Fig. 14 Velocity distribution along the skew part of compound channel simulated by LES turbulence model for relative depth of 0.514

شکل ۱۴ پراکنش سرعت در امتداد ناحیه اریب آبراهه مرکب شبیه‌سازی شده بوسیله مدل آشفتگی LES برای عمق نسبی ۰/۵۱۴

ناحیه‌های با سرعت جریان بیشتر با حرکت در طول ناحیه اریب از خط مرکزی مقطع اصلی آبراهه فاصله گرفته و با پیروی از جهت اریب آبراهه به طرف فصل مشترک بین مقطع اصلی و سیلاب‌دشت واگرا حرکت می‌کنند. این پدیده در بررسی‌های آزمایشگاهی (Elliott and Chlebek, 2009) و Sellin (1990) نیز مشاهده شده است.

میزان بیشینه سرعت طولی جریان توسط مدل آشفتگی RNG به خوبی پیش‌بینی شده است. این در حالی است که مدل آشفتگی LES بیشینه سرعت طولی را بیشتر از میزان آزمایشگاهی برآورد می‌کند. به عنوان نمونه برای عمق نسبی ۰/۵۱۴ مدل آشفتگی LES میزان بیشینه مؤلفه طولی سرعت جریان را در حدود ۰/۱۵ متر بر ثانیه بیشتر از مدل آشفتگی RNG برآورد کرده است (شکل ۱۴).

نتایج شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی سرعت میانگین جریان عبوری از هر یک از زیربخش‌های آبراهه مرکب مورب برای دو عمق نسبی ۰/۳۱۳ و ۰/۵۱۴ در جدول ۴ آورده شده است. در جدول ۴ منظور از زیرنویس‌های Dfp ، mc و Cfp به ترتیب سیلاب‌دشت واگرا، مقطع اصلی آبراهه و سیلاب‌دشت همگرا است.

لازم به یادآوری است که سرعت میانگین جریان عبوری از هر زیربخش ارائه شده در جدول ۴، از تقسیم دبی عبوری از آن زیربخش بر سطح مقطع آن محاسبه شده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی آورده شده در جدول ۴، در آبراهه مرکب مورب همواره سرعت میانگین جریان در

جدول ۴ مقایسه سرعت‌های میانگین جریان اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای عمق‌های نسبی ۰/۳۱۳ و ۰/۵۱۴

Table 4 A comparison between averag velocity simulated by numerical modelling and experimental data for relative depths of 0.313 and 0.514

Relative depth D_r	Section x (m)	Exp. velocity (m/s)			RNG velocity (m/s)			LES velocity (m/s)		
		U_{Dfp}	U_{mc}	U_{Cfp}	U_{Dfp}	U_{mc}	U_{Cfp}	U_{Dfp}	U_{mc}	U_{Cfp}
0.313 ($Q_t = 0.0214 \text{ m}^3/\text{s}$)	9	—	0.641	0.368	—	0.617	0.384	—	0.623	0.413
	10.5	0.520	0.645	0.354	0.453	0.620	0.380	0.441	0.645	0.418
	12	0.484	0.595	0.304	0.471	0.618	0.356	0.481	0.651	0.401
	13.5	0.467	0.564	0.283	0.478	0.614	0.318	0.486	0.657	0.362
	15	0.431	0.566	—	0.449	0.602	—	0.485	0.673	—
	16	0.412	0.559	—	0.447	0.601	—	0.500	0.682	—
0.514 ($Q_t = 0.0434 \text{ m}^3/\text{s}$)	9	—	0.758	0.609	—	0.746	0.602	—	0.795	0.663
	10.5	0.633	0.767	0.602	0.618	0.755	0.611	0.641	0.816	0.696
	12	0.687	0.752	0.616	0.662	0.759	0.594	0.703	0.825	0.697
	13.5	0.609	0.721	0.527	0.690	0.761	0.552	0.736	0.837	0.676
	15	0.643	0.719	—	0.677	0.759	—	0.731	0.854	—
	16	0.636	0.684	—	0.713	0.764	—	0.772	0.853	—

شده است (Bousmar, 2002; Rezaei and Amiri, 2018). با حرکت در طول ناحیه اریب آبراهه، ابعاد سلول‌های جریان ثانویه (گردابه‌ها) افزایش یافته است به گونه‌ای که در مقطع پایین دست ناحیه اریب آبراهه ($x = 16 \text{ m}$) گردابه ایجاد شده بیشترین ابعاد را داشته است (شکل‌های ۱۵ و ۱۶).

۴-۶- نیمرخ سطح آب

در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری، بررسی تغییرپذیری‌های عمق جریان در طول آبراهه یکی از فراسنجه‌های مهم به

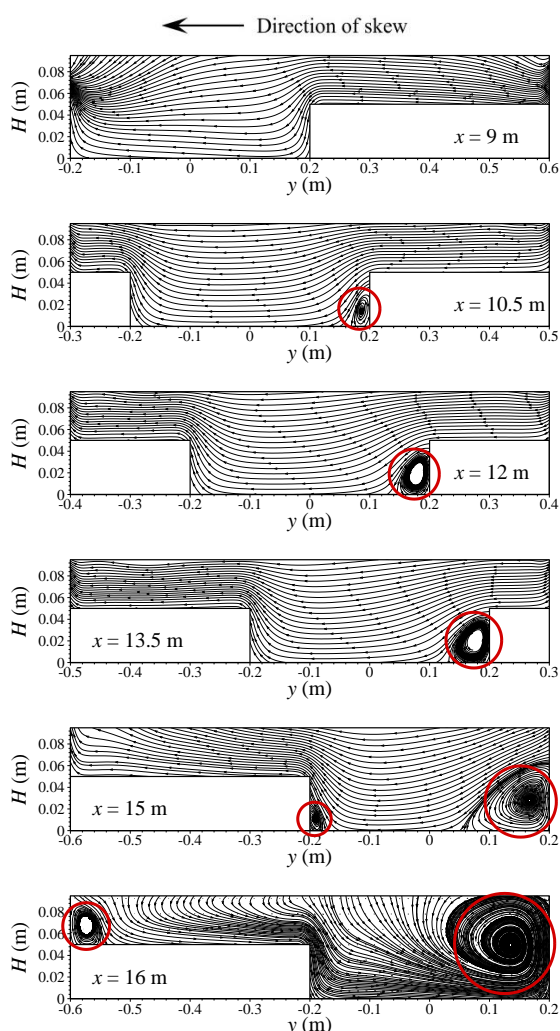


Fig. 15 Secondary currents circulation predicted using RNG turbulence model along the skewed portion for relative depth of 0.514

شکل ۱۵ گردش جریان‌های ثانویه پیش‌بینی شده توسط مدل آشفتگی RNG در مقطع‌های مختلف در امتداد ناحیه اریب آبراهه برای عمق نسبی ۰/۵۱۴

سیلاب‌دشت واگرا بیشتر از میزان همانند آن در سیلاب‌دشت همگرا است. این پدیده توسط هر دو مدل آشفتگی RNG و LES به درستی تعیین شده است.

۴-۵- جریان‌های ثانویه

الگوی گردش جریان‌های ثانویه در آبراهه مرکب مورب به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. نتایج الگوی گردش جریان‌های ثانویه و همچنین محل تشکیل سلول‌های جریان‌های ثانویه شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های آشفتگی RNG و LES برای عمق نسبی ۰/۵۱۴ در مقطع‌های مختلف در طول ناحیه اریب آبراهه در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶، الگوی گردش جریان‌های ثانویه پیش‌بینی شده توسط هر دو مدل آشفتگی RNG و LES تا حدودی همانند بوده و همچنین محل ایجاد گردابه‌ها (جریان‌های ثانویه) در مقطع عرضی آبراهه مرکب مورب نیز در نتایج ارائه شده بوسیله هر دو مدل آشفتگی RNG و LES یکسان است.

در شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده با حرکت در امتداد آبراهه مرکب مورب، با توجه به کاهش عرض سیلاب‌دشت همگرا در طول ناحیه اریب، جریان به تدریج سیلاب‌دشت همگرا را ترک کرده و وارد مقطع اصلی آبراهه شده است. در طرف مقابل با افزایش عرض سیلاب‌دشت واگرا در طول قسمت مورب آبراهه، جریان به تدریج از مقطع اصلی وارد سیلاب‌دشت واگرا می‌شود. این پدیده به روشنی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

در مقطع‌های میانی ناحیه اریب آبراهه ($10.5 \text{ m} \leq x \leq 15 \text{ m}$)، اندرکنش جریان عبوری از مقطع اصلی آبراهه و جریان عرضی ورودی از طرف سیلاب‌دشت همگرا باعث ایجاد گردابه‌ای در مقطع اصلی آبراهه در مجاورت دیواره نزدیک به سیلاب‌دشت همگرا شده است. این موضوع در بررسی‌های آزمایشگاهی (Dolati Mahtaj, 2021) در آبراهه‌های مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار نیز مشاهده شده است. همچنین در بررسی‌های صورت گرفته بر روی آبراهه‌های مرکب همگرا نیز وجود گردابه‌هایی در مقطع اصلی آبراهه در نزدیکی سیلاب‌دشت همگرا گزارش

منظور شناخت ویژگی‌های مختلف جریان است. در این پژوهش نیمرخ سطح آب در آبراهه مرکب مورب با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و LES به صورت عددی شبیه‌سازی شده و با نیمرخ سطح آب آزمایشگاهی مقایسه شده است (شکل ۱۷).

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که در طول آبراهه مرکب مورب، همخوانی مناسبی میان نتایج نیمرخ سطح آب اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی عددی به ویژه نتایج مدل آشفتگی RNG وجود دارد. با توجه به نتایج نیمرخ سطح آب اندازه‌گیری شده در بررسی‌های آزمایشگاهی، با حرکت در امتداد ناحیه اریب آبراهه، در آغاز عمق جریان روندی کاهشی داشته سپس عمق جریان با شیبی ملایم افزایش یافته است. این پدیده به خوبی توسط شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی نشده است. همچنین در انتهای ناحیه اریب و قسمت منشوری شکل پایین‌دست آن، اختلاف بین میزان‌های نیمرخ سطح آب شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی اندکی افزایش یافته است.

برخلاف نتایج به دست آمده در پیش‌بینی پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق و تنش برشی مرزی، با افزایش عمق نسبی جریان دقت شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی نیمرخ سطح آب کاهش یافته است (شکل ۱۷-ب).

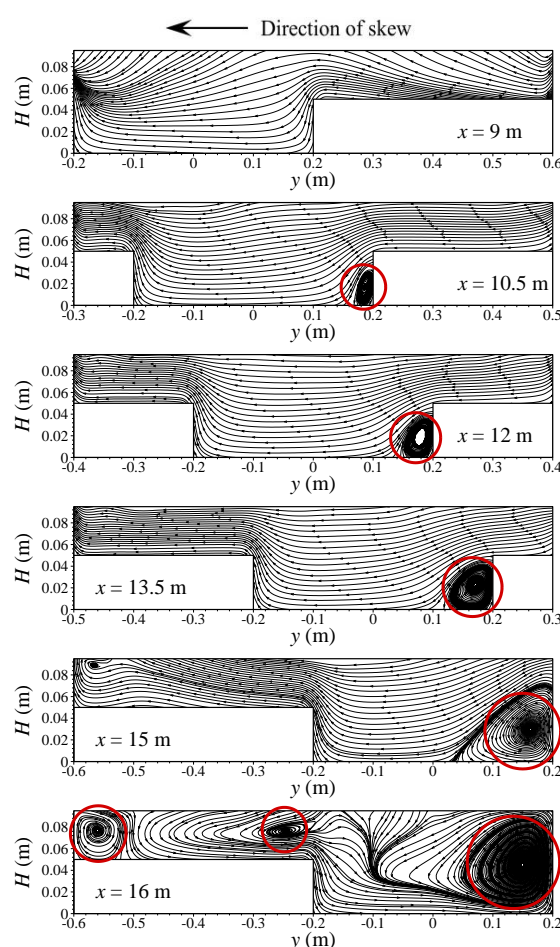


Fig. 16 Secondary currents circulation predicted using LES turbulence model along the skewed portion for relative depth of 0.514

شکل ۱۶ گردش جریان‌های ثانویه پیش‌بینی شده توسط مدل آشفتگی LES در مقطع‌های مختلف در امتداد ناحیه اریب آبراهه برای عمق نسبی ۰/۵۱۴

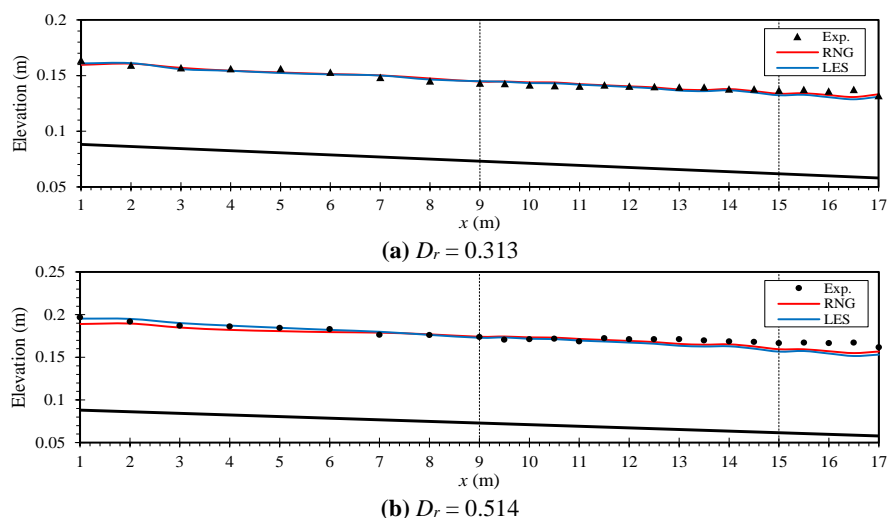


Fig. 17 Comparison between measured water surface profile and simulated using RNG and LES turbulence models along the skewed compound channel for relative depths of 0.313 and 0.514

شکل ۱۷ مقایسه نیمرخ سطح آب شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های آشفتگی RNG و LES و اندازه‌گیری شده در طول آبراهه مرکب مورب برای عمق‌های نسبی ۰/۳۱۳ و ۰/۵۱۴

۴-۵- تحلیل خطاها

به منظور بررسی دقت شبیه‌سازی عددی و همچنین شناخت توانایی هر یک از مدل‌های آشفتگی RNG و LES در پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف جریان در آبراهه مرکب مورب، تحلیل خطاهای بین نتایج شبیه‌سازی عددی و میزان‌های بدست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده است. برای این منظور فراسنجه‌های مختلفی همانند میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب تشخیص (R^2) با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۱۲) تا (۱۵) محاسبه شده است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Num_i - Exp_i| \quad (12)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Exp_i - Num_i}{Exp_i} \right| \times 100 \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Num_i - Exp_i)^2} \quad (14)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Num_i - Exp_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{Exp} - Exp_i)^2} \quad (15)$$

در این رابطه‌ها n شمار داده‌ها، Num_i نتایج پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی، Exp_i نتایج بدست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی و \overline{Exp} میزان میانگین نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است که طبق رابطه (۱۶) تعیین می‌شود (Chicco et al., 2021).

$$\overline{Exp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Exp_i \quad (16)$$

در جدول ۵ میانگین خطاهای بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی توسط مدل‌های آشفتگی RNG و LES در آبراهه مرکب مورب به صورت جداگانه آورده شده است. در این جدول خطاهای محاسبه‌ای مختلف برای هر یک از مشخصه‌های جریان مانند سرعت میانگین در عمق، تنش برشی مرزی، پراکنش دبی، سرعت میانگین جریان و نیمرخ سطح آب آورده شده است.

جدول ۵ مقایسه خطاهای بین نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی

Table 5 Comparison of errors between the numerical simulation and experimental data

	RNG turbulence model				LES turbulence model			
	MAE	MAPE	RMSE	R^2	MAE	MAPE	RMSE	R^2
Depth averaged velocity	0.0409	6.53 %	0.0483	0.89	0.0962	15.33 %	0.1077	0.51
Boundary shear stress	0.1154	12.07 %	0.1565	0.87	0.3255	33.41 %	0.4105	0.45
Discharge distribution	0.0127	4.59 %	0.0179	0.92	0.0170	8.39 %	0.0231	0.87
Flow averaged velocity	0.0306	4.15 %	0.0387	0.94	0.0536	10.73 %	0.0692	0.81
Water surface profile	0.0032	1.97 %	0.0039	0.77	0.0036	2.29 %	0.0047	0.66

هر چه فراسنجه‌های MAE، MAPE و RMSE به میزان صفر، و کمیت R^2 به میزان یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده اختلاف کمتر میان نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی است (Chicco et al., 2021).

با توجه به جدول ۵، مشاهده می‌شود که مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل آشفتگی LES، توانایی بیشتری در پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف جریان در آبراهه مرکب مورب دارد. همواره در هر دو مدل آشفتگی مورد بررسی در این پژوهش، بیشترین اختلاف میان نتایج شبیه‌سازی عددی و میزان‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی مربوط

به برآورد پراکنش عرضی تنش برشی مرزی بوده و کمترین اختلاف در در پیش‌بینی نیمرخ سطح آب، پراکنش دبی و سرعت میانگین جریان مشاهده شده است. در شکل ۱۸ میزان‌های فراسنجه MAPE در برآورد ویژگی‌های مختلف جریان، برای عمق‌های نسبی مختلف آورده شده است. شکل ۱۸ نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی جریان، دقت شبیه‌سازی عددی به ویژه مدل آشفتگی RNG در پیش‌بینی پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق، تنش برشی مرزی، پراکنش دبی و سرعت میانگین جریان افزایش یافته است. این در حالی

است که در پیش‌بینی نیم‌رخ سطح آب با افزایش عمق نسبی جریان، دقت شبیه‌سازی عددی کمتر شده است. در شکل ۱۹ میزان‌های فراسنجه MAPE میان نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای پیش‌بینی فراسنجه‌های مختلف جریان، در مقطع‌های مختلف در طول آبراهه مرکب مورب آورده شده است. با توجه به شکل ۱۹، با حرکت در امتداد ناحیه اریب

آبراهه مرکب، دقت شبیه‌سازی عددی در محاسبه پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق در مقطع‌های مختلف تغییر چندانی نمی‌کند به گونه‌ای که در مدل آشفتگی RNG، میزان تغییرپذیری‌های فراسنجه MAPE در برآورد سرعت میانگین در عمق بین ۶ تا ۸ درصد است. این میزان برای مدل آشفتگی LES بین ۱۳ تا ۲۰ درصد می‌باشد.

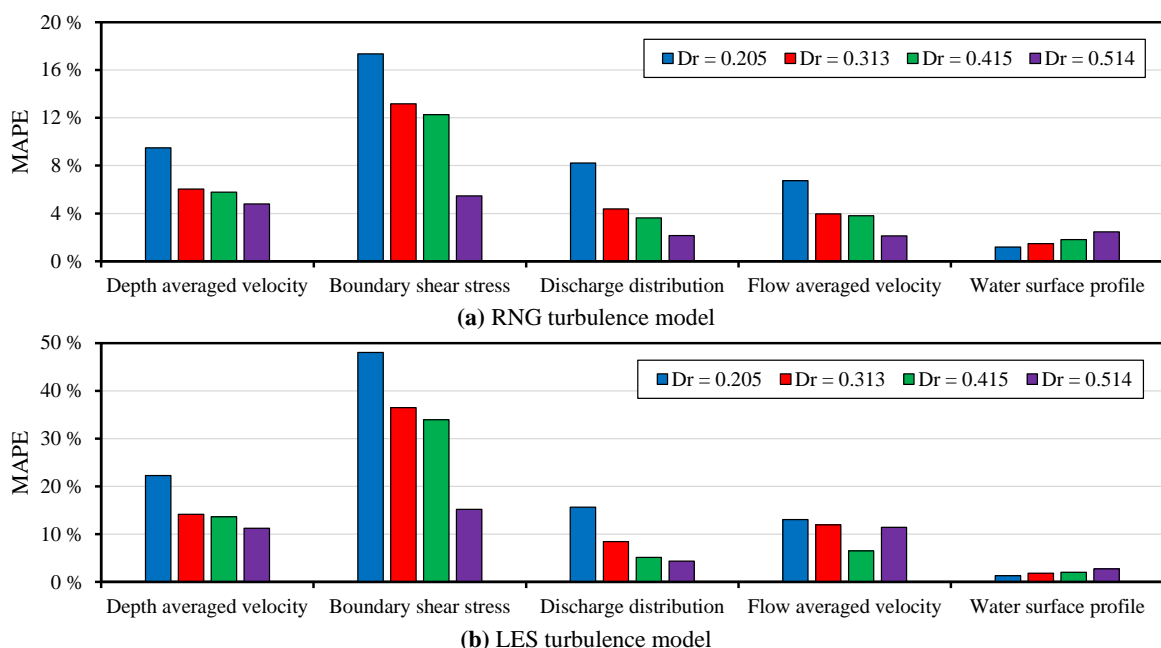


Fig. 18 Mean absolute percentage error (MAPE) for different relative depths
 شکل ۱۸ میزان‌های میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE) برای عمق‌های نسبی مختلف

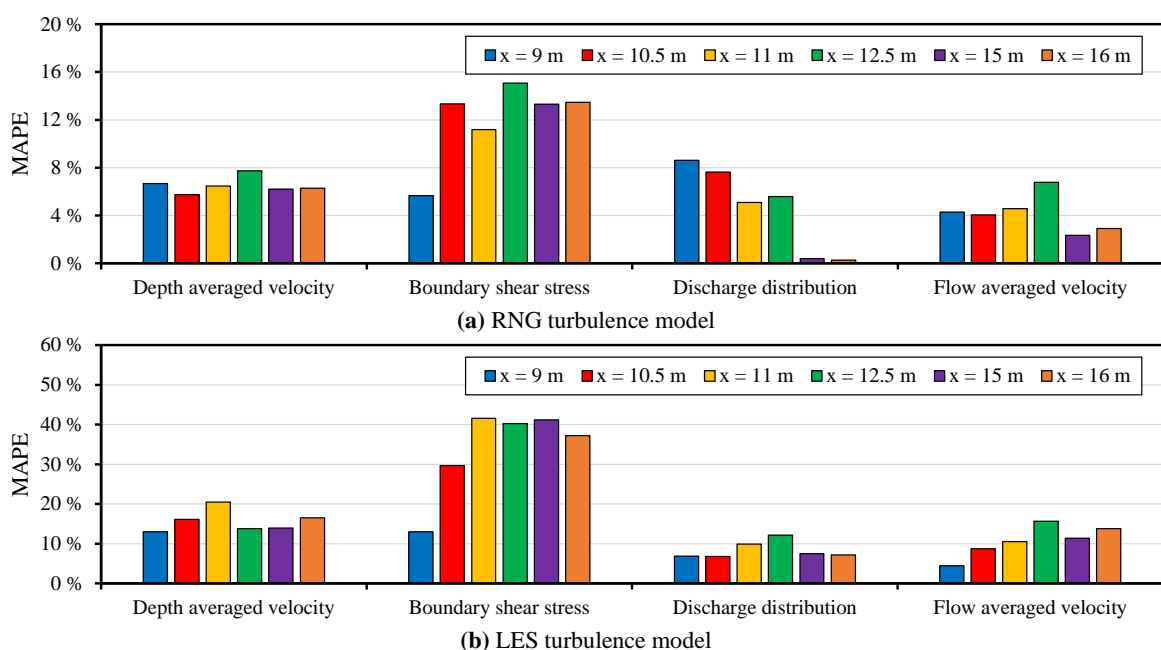


Fig. 19 Mean absolute percentage error (MAPE) at different sections along the skewed compound channel
 شکل ۱۹ میزان‌های میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE) در مقطع‌های مختلف در طول آبراهه مرکب مورب

دبی، دقت شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف جریان در آبراهه مرکب مورب افزایش یافته لیکن توانایی شبیه‌سازی عددی در برآورد نیمرخ سطح آب کمتر شده است.

۴- بیشترین اختلاف میان نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی تنش برشی مرزی مشاهده شده است. همچنین کمترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نیز در محاسبه نیمرخ سطح آب، پراکنش دبی و سرعت میانگین جریان بوده است.

۵- با حرکت در طول ناحیه اریب آبراهه، بیشینه سرعت طولی جریان با پیروی از جهت اریب آبراهه به طرف سیلاب‌دشت واگرا متمایل شده است.

۶- با توجه به نتایج به دست آمده، در آبراهه مرکب مورب، سرعت و تنش برشی مرزی در سیلاب‌دشت دریافت‌کننده جریان (سیلاب‌دشت واگرا) همواره بیشتر از میزان‌های همانند آن در سیلاب‌دشت همگرا است.

۷- با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی، به دلیل ورود جریان عرضی از طرف سیلاب‌دشت همگرا به آبراهه اصلی در طول ناحیه اریب آبراهه مرکب مورب، یک گردابه در مقطع اصلی آبراهه در نزدیکی سیلاب‌دشت همگرا ایجاد شده و با حرکت در طول ناحیه اریب آبراهه ابعاد آن بزرگتر می‌شود.

۸- در آبراهه مرکب مورب تغییرپذیری‌های درصد دبی عبوری از هر یک سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا به صورت خطی بوده و با حرکت در طول آبراهه مرکب مورب، دقت شبیه‌سازی عددی در برآورد درصد دبی عبوری از سیلاب‌دشت‌ها بیشتر شده است.

۶- فهرست نشانه‌ها

$A_{x,y,z}$	کسری از سطح جریان در مختصات دکارتی
B_{fp}	عرض سیلاب‌دشت (m)
B_{mc}	عرض مقطع اصلی آبراهه (m)
D_r	عمق نسبی جریان
e_{ij}	نشانه تانسور نرخ کرنش

دقت شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی تنش برشی مرزی با استفاده از هر دو مدل آشفتگی RNG و LES، در مقطع ابتدائی ناحیه اریب آبراهه ($x = 9\text{ m}$) بیشتر بوده و با حرکت در امتداد آبراهه توانایی شبیه‌سازی عددی در تعیین پراکنش عرضی تنش برشی مرزی کاهش یافته است (شکل ۱۹). به گونه‌ای که میزان فراسنجه MAPE در برآورد تنش برشی مرزی در مقطع ابتدائی ناحیه اریب آبراهه ($x = 9\text{ m}$) پیش‌بینی شده بوسیله مدل‌های آشفتگی RNG و LES به ترتیب برابر ۵/۶۷ و ۱۳/۰۲ درصد بوده که در مقطع انتهائی ناحیه اریب ($x = 15\text{ m}$) به ترتیب به میزان‌های ۱۳/۳۱ و ۴۱/۲ درصد افزایش یافته است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش میدان جریان در آبراهه مرکب مورب با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه و برای چهار عمق نسبی ۰/۲۰۵، ۰/۳۱۳، ۰/۴۱۵ و ۰/۵۱۴ با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و LES و به کمک نرم‌افزار محاسبه‌ای FLOW-3D به صورت عددی شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده با داده‌های بدست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط Chlebek (2009) مقایسه شده است. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- نتایج بدست آمده از مقایسه مدل‌های آشفتگی RNG و LES بیانگر دقت بیشتر مدل آشفتگی RNG در شبیه‌سازی میدان جریان شامل پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق، تنش برشی مرزی، پراکنش دبی، سرعت میانگین جریان و نیمرخ سطح آب در آبراهه مرکب مورب است.

۲- در نتایج پراکنش عرضی سرعت میانگین در عمق و تنش برشی مرزی، همخوانی مناسبی میان نتایج شبیه‌سازی عددی توسط مدل آشفتگی RNG و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد لیکن مدل آشفتگی LES میزان‌های این فراسنجه‌ها را در کل مقطع عرضی آبراهه بیشتر از میزان‌های اندازه‌گیری شده برآورد کرده است.

۳- با افزایش عمق نسبی جریان و به تبع آن افزایش

in flood evacuation systems, Journal of Hydraulics, 14(3), 67-84. (in Persian)

Bousmar, D. (2002). Flow modeling in compound channels: Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains, PhD Thesis, University Catholique de Louvain, Belgium.

Bousmar, D., Jacqmin, T., Wyseur, S. and Van Emelen, S. (2012). Flow in skewed compound channels with rough floodplains, Proceedings of the River Flow 2012, San Jose, Costa Rica.

Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., Coleman, H. and Raad, P.E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications, Journal of Fluids Engineering, 130, 078001-4.

Chicco, D., Warrens, M.J. and Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation, PeerJ Computer Science, 7, e623, 1-24.

Chlebek, J. (2009). Modelling of simple prismatic channels with varying roughness using the SKM and a study of flows in smooth non-prismatic channels with skewed floodplains, PhD Thesis, Birmingham University, UK.

Dolati Mahtaj, M. (2021). Experimental study of flow in skewed compound channel with inclined floodplains, MSc Thesis, Bu-Ali Sina University, Iran. (in Persian)

Elliott, S.C.A. (1990). An investigation into skew channel flow, PhD Thesis, University of Bristol, UK.

Elliott, S.C.A. and Sellin, R.H.J. (1990). SERC flood channel facility: skewed flow experiments, Journal of Hydraulic Research, 28(2), 197-214.

Ervine, D.A. and Jasem, H.K. (1995). Observations on flows in skewed compound channels, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water, Maritime and Energy, 112(3), 249-259.

Flow Science. (2016). FLOW-3D User Manual, Version 11.2, Santa Fe, New Mexico, Flow Science Inc, <https://www.flow3d.com>.

Ghaderi, A., Abbasi, S. and Di Francesco, S. (2021). Numerical study on the hydraulic properties of flow over different pooled stepped spillways, Water, 13, 710, 1-26.

Exp_i	داده‌های آزمایشگاهی
\overline{Exp}	میانگین داده‌های آزمایشگاهی
$f_{x, y, z}$	شتاب لزوجت در مختصات دکارتی
$G_{x, y, z}$	شتاب حجمی (گرانش) در مختصات دکارتی
H	عمق جریان (m)
h	عمق جریان و عمق مقطع اصلی آبراهه (m)
k	انرژی جنبشی آشفتگی
L	مقیاس طول
Num_i	نتایج شبیه‌سازی عددی
p	فشار (N/m^2)
Q	دبی جریان (m^3/s)
Q_t	کل دبی جریان (m^3/s)
u, v, w	مؤلفه‌های سرعت در مختصات دکارتی (m/s)
U	سرعت طولی جریان (m/s)
U_d	سرعت میانگین در عمق (m/s)
V_F	کسری از حجم فضای باز به جریان
x	نشانه طول آبراهه (m)
y	نشانه عرض آبراهه (m)
	علائم یونانی:
$\delta_{x, y, z}$	ابعاد سلول‌های شبکه‌بندی (m)
ε	استهلاک انرژی آشفتگی
μ_t	لزوجت آشفتگی ($kg/m.s$)
μ_{eff}	لزوجت مؤثر ($kg/m.s$)
μ	لزوجت دینامیکی ($kg/m.s$)
ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
τ_b	تنش برشی مرزی (N/m^2)
ν_t	لزوجت گردابی سینماتیکی (m^2/s)
	زیرنویس‌ها:
C_{fp}	سیلاب‌دشت همگرا
D_{fp}	سیلاب‌دشت واگرا
mc	مقطع اصلی آبراهه

۷- منابع‌ها

Beaman, F. (2010). Large eddy simulation of open channel flows for conveyance estimation, PhD Thesis, Nottingham University, UK.

Biabani, S., Hamidi, M. and Navayi Neya, B. (2019). Numerical simulation of the chute convergence effects on forming the transverse wave

- Rezaei, B. and Safarzade, A. (2016). Numerical modeling of flow field in prismatic compound channels with different floodplain widths, *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 3(2), 260-270.
- Seif, M.M. and Rezaei, B. (2019). Numerical study on the effects of the floodplains angles on interaction between the main channel and floodplains in skewed compound channels, *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 32(1), 151-164. (In Persian)
- Sellin, R.H.J. (1964). A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain, *La Houille Blanche*, 7, 793-802.
- Sellin, R.H.J. (1995). Hydraulic performance of a skewed two-stage flood channel, *Journal of Hydraulic Research*, 33(1), 43-64.
- Shiono, K. and Knight, D.W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel, *Journal of Fluid Mechanics*, 222, 617-646.
- Sofialidis, D. and Prinos, P. (1998). Compound open-channel flow modeling with nonlinear low-Reynolds $k-\epsilon$ models, *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, 253-262.
- Tominaga, A. and Nezu, I. (1991). Turbulent structure in compound open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(1), 21-41.
- Xie, Z., Lin, B. and Falconer, R.A. (2013). Large-eddy simulation of the turbulent structure in compound open-channel flows, *Advances in Water Resources*, 53, 66-75.
- Yakhot, V. and Orszag, S.A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. basic theory, *Journal of Scientific Computing*, 1, 3-51.
- James, M. and Brown, B.J. (1977). Geometric parameters that influence floodplain flow, waterways experiment section, Report H-77-1, US Army Corps of Engineering, Mississippi, USA.
- Jasem, H.K. (1990). Flow in two-stage channels with the main channel skewed to the flood plain direction, PhD Thesis, University of Glasgow, Scotland.
- Kara, S., Stoesser, T. and Sturm, T.W. (2012). Turbulence statistics in compound channels with deep and shallow overbank flows, *Journal of Hydraulic Research*, 50(5), 482-493.
- Karimpour, S., Gohari, S. and Yasi, M. (2020). Experimental and numerical investigation of blockage effects on flows in a culvert, *Journal of Hydraulics*, 15(2), 1-14. (in Persian)
- Naik, B., Khatua, K.K., Wright, N., Sleight, A. and Singh, P. (2018). Numerical modeling of converging compound channel flow, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(3), 285-297.
- Patel, V.C. (1965). Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients, *Journal of Fluid Mechanics*, 23(1), 185-208.
- Rahmani Firozjaei, M., Salehi Neyshabouri, S.A.A., Amini Sola, S. and Mohajeri, S.H. (2019). Numerical simulation on the performance improvement of a lateral intake using submerged vanes, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, 43, 167-177.
- Rameshwaran, P. and Naden, P.S. (2003). Three dimensional numerical simulation of compound channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, 645-652.
- Rezaei, B. and Amiri, H. (2018). Numerical modelling of flow field in compound channels with non-prismatic floodplains, *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, 25, 2413-2424.

