

بررسی دینامیک جریان غیرماندگار در رودخانه‌ها تحت تأثیر عدم قطعیت مقاطع عرضی

راضیه ولی‌زاده^۱، مهدی مظاهری^{۲*}، جمال محمد ولی سامانی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- r.valizadeh@modares.ac.ir

۲- m.mazaheri@modares.ac.ir

۳- samani_j@modares.ac.ir

چکیده:

رودخانه‌ها به‌عنوان یک حلقه اساسی در چرخه هیدرولوژیکی عمل می‌کنند و جریان آن‌ها همواره پایدار و مداوم است. مدل‌سازی جریان‌های رودخانه‌ای به دلیل وجود عدم قطعیت‌های ذاتی در داده‌های ورودی و پارامترهای هندسی، به چالشی پیچیده در تحلیل حساسیت و ارزیابی منابع خطا تبدیل شده است. یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت، خطاهای اندازه‌گیری و تعریف مقاطع عرضی رودخانه است که می‌تواند اثر مستقیمی بر نتایج مدل‌های هیدرودینامیکی داشته باشد. در این مطالعه، به منظور بررسی نحوه انتشار عدم قطعیت در شبیه‌سازی جریان هیدرولیکی، از چارچوب شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد. عدم قطعیت‌ها در سه مثال کاربردی شامل دو رودخانه‌ی واقعی و یک رودخانه فرضی تحلیل شدند. سناریوهای شبیه‌سازی بر اساس توابع توزیع احتمال نرمال و یکنواخت با خطاهای تصادفی ۱۰ درصد و ۲۰ درصد و همچنین خطاهای سیستماتیک صفر و \pm سه درصد در داده‌های مقاطع تعریف شدند. نتایج نشان دادند که خطاهای تصادفی با توزیع یکنواخت بیشترین پراکندگی را در نتایج جریان ایجاد می‌کنند و افزایش دامنه خطا در داده‌های هندسی مستقیماً منجر به افزایش واریانس خروجی‌های مدل می‌شود. در مقابل، تأثیر خطاهای سیستماتیک بر خروجی‌ها نسبت به خطاهای تصادفی کمتر است، که نشان‌دهنده‌ی حساسیت بالای مدل به تغییرات تصادفی داده‌های هندسی می‌باشد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در ارتقاء دقت مدل‌های هیدرودینامیک و تفسیر نتایج آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این نتایج برای مدیریت منابع آب، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و اتخاذ تصمیم‌های مبتنی بر ریسک در حوزه مهندسی رودخانه کاربرد عملی خواهد داشت.

کلمات کلیدی: توزیع نرمال، توزیع یکنواخت، مقاطع عرضی رودخانه، مونت‌کارلو.

* مهدی مظاهری، دانشیار دانشکده کشاورزی- دانشگاه تربیت مدرس.

ایمیل: m.mazaheri@modares.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Investigation of Unsteady Flow Dynamics in Rivers under the Influence of Cross-Sectional Uncertainty

R. Valizadeh ¹, M. Mazaheri ^{2*}, J. Mohammad Vali Samani ³

- 1- Ph.D Student of Water Engineering and Management of Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- 2- Associate Prof, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- 3- Professor, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract:

Rivers serve as a fundamental component of the hydrological cycle, exhibiting continuous and stable flow. However, river flow modeling is inherently associated with uncertainties in input data and geometric parameters, which make sensitivity analysis and the assessment of error sources a complex and challenging task. Among the most significant sources of uncertainty are measurement errors and inaccuracies in defining river cross-sections, which can directly influence the outcomes of hydrodynamic models. In this study, a Monte Carlo simulation framework was employed to investigate the propagation of uncertainty in hydraulic flow modeling. The uncertainties were analyzed through three case studies, including two real rivers and one hypothetical river. Simulation scenarios were constructed based on normal and uniform probability distributions, incorporating random errors of 10% and 20%, as well as systematic errors of 0% and $\pm 3\%$ in the cross-sectional data. The results demonstrated that random errors following a uniform distribution introduced the greatest variability in flow predictions, and an increase in the magnitude of geometric data errors directly led to higher variance in the model outputs. In contrast, the influence of systematic errors on the results was comparatively smaller, indicating the model's greater sensitivity to stochastic variations in geometric input data. The findings of this study can contribute to enhancing the accuracy of hydrodynamic models and improving the interpretation of their results. Moreover, the outcomes provide practical implications for water resources management, hydraulic structure design, and risk-informed decision-making in the field of river engineering.

Keywords: Normal distribution, Uniform distribution, River cross-sections, Monte Carlo

بنای اصلی شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی رودخانه‌ها در درک و مدل‌سازی دینامیک جریان غیر ماندگار بر اساس مقاطع عرضی بنا شده‌است. در جریان غیر ماندگار مقاطع عرضی در واقع تعریفی از رابطه میان سطح مقطع جریان، شعاع هیدرولیکی، محیط خیس شده و ویژگی‌های رابطه دبی-شل را ارائه می‌کنند که مستقیماً بر مقاومت جریان و اتلاف انرژی اثر می‌گذارد (Chow, 1959). تخمین دقیق مقاطع عرضی در شرایط جریان غیر ماندگار که تغییرات زمانی دبی و تراز آب قابل توجه است، اهمیت بیشتری دارد و خطا در برداشت مشخصات هندسی در مدل‌های هیدرولیکی منتشر شده و منجر به عدم قطعیت‌های قابل ملاحظه در پیش‌بینی تراز آب، سرعت جریان و پهنه‌های سیلاب می‌شود (Di Baldassarre and Montanari, 2009). در ارزیابی خطرات ناشی از سیل و طراحی سازه‌های مهندسی، تعیین میزان ظرفیت عبور جریان و اتصال رودخانه به دشت‌های سیلابی نیز به وسیله مقاطع عرضی صورت می‌پذیرد (Apel et al., 2008). فناوری‌های پیشرفته‌ای همچون نقشه‌برداری با پهپاد و برداشت نقاط بستر رودخانه از طریق پوششگرهای صوتی، دقت داده‌ها را نسبت به روش‌های سنتی به میزان چشم‌گیری بهبود داده و عدم قطعیت‌ها را کاهش داده‌اند (Javernick et al., 2014).

تحلیل حساسیت و تحلیل عدم قطعیت، ابزارهای ضروری برای بررسی رفتار مدل، آزمون فرضیه‌ها و ارزیابی پتانسیل ساده‌سازی مدل‌ها هستند (Wagener and Pianosi, 2019). در تمامی مدل‌سازی‌هایی که شامل نمایش فرآیندهای طبیعی یا رفتار انسانی هستند، عدم قطعیت امری ذاتی است. منابع اصلی عدم قطعیت که باید مورد توجه قرار گیرند، شامل داده‌های ورودی مدل، ساختار مدل و پارامترهای مدل می‌باشد. تحلیل حساسیت، تأثیر عوامل ورودی (مانند پارامترها، مقادیر اولیه حالت‌های مدل، وضوح مدل و ساختار مدل) را بر خروجی‌های مدل مطالعه می‌کند. این یک عمل کلیدی در ارزیابی مدل‌های محیطی محسوب می‌شود (Pianosi et al., 2016; Jakeman et al., 2006; Matott et al., 2009; Oakley and O'Hagan, 2004; Yue et al., 2020). در مقابل، عدم قطعیت خروجی‌های مدل را از مجموعه داده‌های ورودی و پارامترهای مدل تعیین می‌کند، که معمولاً با توزیع‌های احتمال تجربی و یا مرزهای اطمینان برای پارامترها و خروجی‌های مدل مشخص می‌شوند. روش مونت‌کارلو^۱ برای تولید مجموعه‌ای از اطلاعات ورودی استفاده می‌شود که هر کدام مربوط به یک استراتژی مدیریت جایگزین است. کلید شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تولید مجموعه‌ای از ورودی‌های تصادفی است. حجم کافی نمونه برای نتایج آماری قابل قبول ضروری است. شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر تولید اعداد تصادفی متکی است، بنابراین نتایج شبیه‌سازی ماهیت کاملاً تصادفی خواهند داشت (Leong, 2007; Lambert et al., 2012). در تعیین تعداد کافی نمونه‌ها باید به این نکته توجه داشت که تعداد تکرارها تا زمانی افزایش می‌یابد که نتایج به میزان ناچیزی تغییر کند، در غیر این صورت تعداد تکرارها باید افزایش یابد (Ren et al., 2016). بر اساس نظریه استنتاج بیزی، مونت‌کارلو یک تکنیک تخمین پارامتر قدرتمند است که در زمینه‌های مختلف هیدرولوژی، سیستم‌های توزیع آب، زیست‌شناسی، کیهان‌شناسی، اختریف‌بیک و اقلیم‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است (Qin and Boccelli, 2019; Knapp et al., 2017). Brackins et al. (2021) در مطالعه‌ای با مقایسه مقاطع ساده‌شده و مقاطع واقعی دریافتند که استفاده از هندسه واقعی، دقت پیش‌بینی‌های روندیابی جریان و تراز آب را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد.

^۱ Monte Carlo

Castellarin et al. (2009) در مطالعه‌ی رودهای پو^۱ در ایتالیا و سورن^۲ در بریتانیا نشان دادند که فاصله بهینه بین مقاطع عرضی به‌ویژه در مدل‌های یک‌بعدی مبتنی بر الگوی پریسمن^۳ نقش کلیدی در دقت مدل دارد. فاصله کم‌تر و استفاده از داده‌های با وضوح بالاتر دقت پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی و مصنوعی را افزایش می‌دهد. Jesna et al. (2023) با بررسی شش سناریوی جهت‌گیری مقطع در رودخانه‌های مناطق در حال توسعه، دریافتند که در مناطق با توپوگرافی پیچیده، جهت‌گیری مقطع بر دقت پیش‌بینی عمق و گستره سیلاب تأثیر قابل توجهی دارد. در حالی که در بازه‌های ساده، مدل نسبت به تغییر جهت‌گیری مقاوم‌تر است. Tian et al. (2025) با بررسی تغییرات مورفولوژیکی کانال، به‌ویژه در قالب پیکربندی‌های باراستخر، بیان کردند این تغییرات می‌توانند منجر به دگرگونی معنادار هندسه مقاطع عرضی و در نتیجه افزایش عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی شوند. در همین راستا نتایج نشان می‌دهد که استفاده از توصیف‌های هندسی پیشرفته‌تر نسبت به شاخص‌های کلاسیک می‌تواند در کاهش عدم قطعیت مدل‌های جریان غیرماندگار مؤثر باشد. هندسه مقطع کانال صرفاً یک ویژگی هندسی نیست، بلکه عاملی تعیین‌کننده در سازمان‌دهی جریان و توزیع پارامترهای عملکردی است؛ برداشتی که در مدل‌سازی هیدرودینامیکی رودخانه‌ها و تحلیل جریان‌های غیرماندگار نیز تأیید شده است (Badiger et al., 2025). هندسه مقطع عرضی در مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها با کنترل ظرفیت عبور جریان، عامل کلیدی در پیش‌بینی نواحی سیلابی و تصمیم‌گیری برای اقدامات احیایی محسوب می‌شود (Mahmood and Mohammed-Ali, 2025). مطالعات نشان داده‌اند که هندسه مقطع کانال می‌تواند به‌طور قابل توجهی الگوهای جریان و تمرکز ذرات را تغییر دهد، مفهومی که به‌طور مشابه در مدل‌سازی هیدرودینامیکی رودخانه‌ها و تحلیل جریان غیرماندگار کاربرد دارد (Tennakoon et al., 2025).

Conner and Tonina. (2014) در رودخانه اسنیک^۴ اثر فاصله مقاطع را بر نتایج مدل دوبعدی بررسی کردند. نتایج نشان داد فاصله‌ی زیاد، عمق سنجی^۵ را هموار کرده و جریان را سرکوب می‌کند، در حالی که فاصله کم (معادل ۰.۵ عرض کانال) با عمق سنجی کامل مطابقت دارد. تغییرات مورفولوژیکی دینامیک (فرسایش، رسوب‌گذاری، حرکت بستر) به‌عنوان منابع اصلی عدم قطعیت هندسی شناخته می‌شوند. Siedersleben et al. (2021) در مدل‌سازی مورفودینامیکی رودخانه دانوب^۶ دریافتند که داده‌های پروفیل متقاطع نسبت به داده‌های فضایی با وضوح بالا، ظرفیت انتقال بیشتر و انحرافات محلی در پیش‌بینی فرسایش ایجاد می‌کنند. Wong et al. (2021) در مطالعه سیلاب شدید در کوکرموت^۷ (بریتانیا) نشان دادند تغییرات مورفولوژیکی کانال تنها اثرات محلی بر نتایج مدل هیبرید دارد و تأثیر جهانی آن بر گستره سیلاب چشم‌گیر نیست. McMillan et al. (2010) تأکید کردند که حرکت بستر و پوشش گیاهی در شرایط سیلابی، منجر به تغییرات مقطعی شده و عدم قطعیت در منحنی‌های درجه‌بندی را افزایش می‌دهد. Vatanchi and Maghrebi (2024) سه روش

¹ Po River

² Severn River

³ Preissmann scheme

⁴ Snake River

⁵ Bathymetry

⁶ Danube River

⁷ Cockermouth

¹QN + CM، ²GLUE و ³SUFI-2 برای تحلیل عدم قطعیت در منحنی‌های دبی-اشل بررسی شدند. نتایج نشان داد که روش GLUE با دقت بالاتر نسبت به دو روش دیگر، عملکرد بهتری در پیش‌بینی دبی داشت. همچنین، GLUE و SUFI-2 نسبت به QN + CM در ارزیابی عدم قطعیت برتری نشان دادند، و این تحقیق به شناسایی نقاط غیرمعمول در سری داده‌های دبی نیز کمک کرد. مدل‌های هیدرودینامیکی در مفهوم خاص، روابط ریاضی است که سیستم طبیعی رودخانه، دبی و سطح مقطع رودخانه را به صورت تابعی از مکان و زمان نشان می‌دهد و رفتار فیزیکی جریان را شبیه‌سازی می‌کند. انتخاب توزیع احتمال مناسب برای پارامترهای هندسی به‌ویژه در رودخانه‌های نامنظم اغلب به صورت ساده‌انگارانه با فرض توزیع یکنواخت انجام می‌شود، در حالی که مطالعات میدانی نشان می‌دهد توزیع‌های آماری نقاط (X,Z) در مقاطع مختلف متفاوت است. انتخاب روش کمی‌سازی عدم قطعیت، یک تصمیم دلخواه نیست، بلکه باید با دقت و بر اساس سؤال پژوهش، ویژگی‌های مدل، منابع محاسباتی موجود و سطح جزئیات مورد نظر در توصیف عدم قطعیت انجام شود.

این پژوهش با هدف ارائه یک رویکرد کمی‌سازی عدم قطعیت هندسی در مدل‌سازی جریان غیرماندگار، از متد مونت‌کارلو استفاده می‌کند تا اثر تغییرات تصادفی و سیستماتیک هندسه مقاطع بر متغیرهای کلیدی هیدرودینامیکی ارزیابی شود. مزیت این رویکرد، امکان شناسایی حساسیت پارامترهای هندسی، بهینه‌سازی طراحی مقاطع و ایجاد پایه علمی برای تصمیم‌گیری مبتنی بر ریسک در مدیریت سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی است. بدین ترتیب، پژوهش حاضر عدم قطعیت‌های موجود در توانایی مدل‌ها برای ارائه پیش‌بینی‌های قابل اعتماد در شرایط جریان غیرماندگار را کاهش می‌دهد و راهکاری کاربردی و قابل تعمیم برای تحلیل ریسک و مدیریت حوضه‌های رودخانه‌ای فراهم می‌آورد.

۲- مبانی تئوری و روش‌ها

تاکنون پژوهش‌هایی با آنالیز حساسیت و عدم قطعیت سعی بر شناخت شرایط جریان رودخانه داشته‌اند، اما به علت این که این پژوهش‌ها بر مبنای داده‌های مشاهداتی بوده، نمی‌تواند به طور قطع نمایانگر رفتار مدل در شرایط مختلف باشند. علی‌رغم دهه‌ها تلاش، تحقیقات منفرد بر روی یک رودخانه نمی‌تواند اثر فرآیندهای موجود در رودخانه، متغیرهای هیدرولیکی و ویژگی‌های رودخانه بر یکدیگر را مشخص کند (Ward and Packman, 2019). در این پژوهش تلاش شده است که با یک رویکرد ساده و مؤثر بر اساس روش مونت‌کارلو، یک چارچوب جامع و کاربردی توسعه یافته برای کمی کردن عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر مدل‌های هیدرودینامیک ایجاد شود که می‌تواند تصویر جامعی از رودخانه در شرایط عدم قطعیت مشخصات هندسی ایجاد کند.

۲-۱ - حل معادلات حاکم بر جریان غیرماندگار

جریان در رودخانه‌ها یک جریان غیرماندگار است و عمق آب و دبی در هر نقطه با زمان تغییر می‌کند. برای شبیه‌سازی جریان‌های یک‌بعدی غیرماندگار در مجاری باز، از دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی سنت و نانت شامل معادلات پیوستگی و مونتوم

¹ Quasi-Newton + Covariance Matrix

² Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

³ Sequential Uncertainty Fitting Ver-2

استفاده می‌شود. این معادلات بر پایه‌ی اصول بقای جرم و مومنتوم خطی استخراج شده و در فرم عمومی خود به شرح معادلات (۱) و (۲) بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (2)$$

در رابطه فوق Q دبی جریان، A سطح مقطع جریان، h عمق جریان آب، g شتاب ثقل، y عمق جریان، S_f شیب خط انرژی، S_0 شیب کف کانال t زمان، x فاصله دو مقطع متوالی و q_0 جریان جانبی ورودی یا خروجی می‌باشد (Akan, 2011).

در هر موقعیت مکانی از طول رودخانه، هندسه مقطع عرضی جریان به عمق جریان وابسته است. به عبارت دیگر، برای هر مقدار از عمق، مشخصات هندسی مقطع شامل مساحت خیس شده $A(y)$ ، محیط خیس شده $P(y)$ ، عرض سطح آزاد $T(y)$ و شعاع هیدرولیکی $R(y)$ قابل تعیین است. این توابع هندسی بیانگر نحوه تغییر خصوصیات مقطع با تغییر عمق جریان هستند و در روابط حاکم بر جریان غیرماندگار نقش اساسی دارند (Chow, 1959; Henderson, 1966; Chaudhry, 2008). بدین ترتیب، در هر نقطه از مسیر جریان، تغییرات زمانی و مکانی عمق $y(x,t)$ مستقیماً موجب تغییر پارامترهای A ، T ، P و R می‌گردد و از طریق آن‌ها بر رفتار دینامیکی جریان، از جمله توزیع فشار، اصطکاک و سرعت انتشار امواج سطح آزاد، تأثیر می‌گذارد. در تحلیل جریان غیرماندگار در کانال‌های روباز، شکل هندسی مقطع عرضی از طریق توابع $A(y)$ ، $P(y)$ ، $T(y)$ و در معادلات حاکم ظاهر می‌شود (Cunge et al., 1980). مطابق شکل (۱) مشخصات هندسی در هر مقطع با توجه به تغییرات عمق محاسبه می‌شوند.

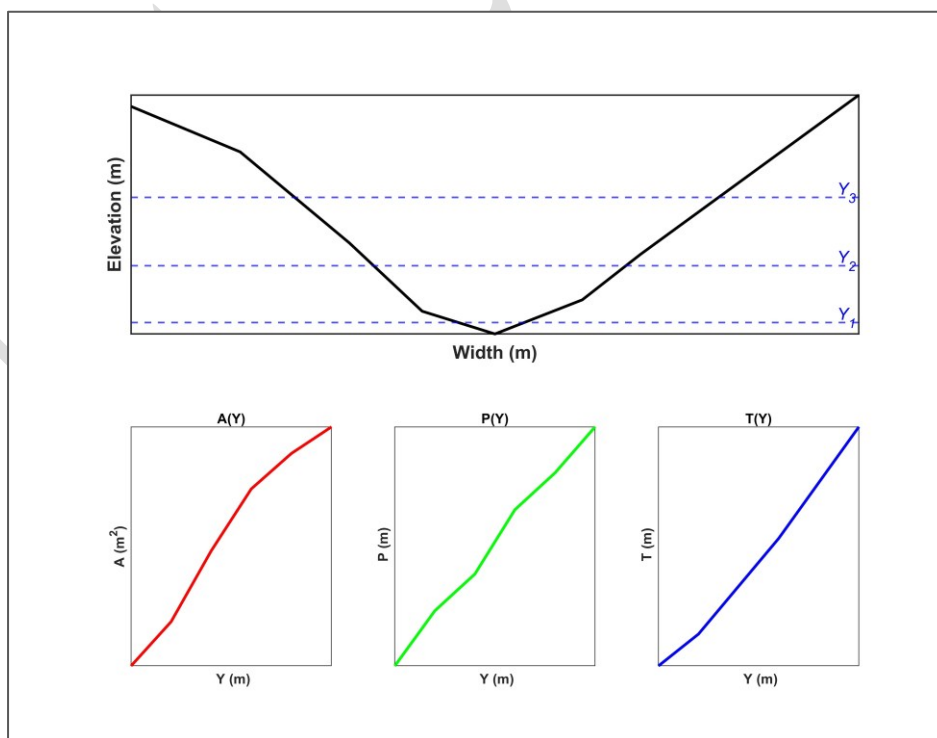


Figure 1- Method of incorporating geometric characteristics into the saint-venant equations

برای حل معادلات سنت و نانت از الگوی ضمنی پریسمن استفاده شد. در هر بازه‌ی زمانی، معادلات پیوستگی و مومنتوم به صورت هم‌زمان در کل رودخانه نوشته شده و روابط غیرخطی بین دبی و سطح مقطع جریان شکل گرفت. شرط مرزی هیدروگراف در

بالادست، شرط مرزی منحنی مشخصه در پایین دست، و شرط اولیه‌ی معین در ابتدا و انتهای بازه تعریف گردید. گام زمانی نیز با در نظر گرفتن سرعت انتشار تغییرات سطح آب و نیاز به همگرایی سریع انتخاب شد تا تغییرات تراز آب در طول زمان به صورت یکنواخت و پیوسته باز تولید شود. نحوه‌ی حل معادلات سنت و نانت با توجه به مشخصات هندسی مقاطع جریان صورت گرفت. در هر مرحله با تولید نقاط تصادفی، مقاطع هندسی تصادفی جدید ساخته شده و از ترکیب آن‌ها رودخانه‌های تصادفی با ویژگی‌های متفاوت شکل گرفتند. این فرآیند موجب می‌شود که در هر بار اجرای مدل، مجموعه‌ی جدیدی از مشخصات هندسی وارد معادلات شود و اثر این تغییرات بر پاسخ هیدرودینامیکی سیستم به صورت مستقیم بررسی گردد. برای هر رودخانه‌ی تصادفی، مقادیر دبی، سرعت و تراز سطح آب در طول بازه‌ی زمانی شبیه‌سازی محاسبه شدند و با نتایج حاصل از سایر نمونه‌ها مقایسه گردیدند. در نهایت، با تحلیل آماری خروجی‌ها، حساسیت معادلات سنت و نانت نسبت به تغییرات هندسی مقطع مورد ارزیابی قرار گرفت. این رویکرد امکان بررسی پایداری مدل و میزان وابستگی پاسخ دینامیکی جریان به پارامترهای هندسی را فراهم می‌سازد.

۲-۲- تعیین تابع توزیع احتمال جهت تولید مقاطع تصادفی

برای تولید مقاطع تصادفی بر اساس مقطع اولیه، ابتدا لازم است تابع توزیع احتمال پارامترهای مورد نظر تعیین شود. کیفیت نتایج شبیه‌سازی به شدت وابسته به این است که تابع توزیع انتخاب شده بتواند رفتار واقعی پارامترهای تصادفی را به خوبی نشان دهد. انتخاب تابع توزیع مناسب، مرحله‌ی مهمی است که امکان نمونه‌گیری دقیق از فضای پارامتری و تحلیل صحیح عدم قطعیت‌ها را فراهم می‌کند. پس از مشخص شدن تابع توزیع احتمال، مشخصات هندسی رودخانه به طور تصادفی تولید می‌شوند. با توجه به نبود مطالعات مشخص در مورد توزیع احتمال مناسب برای پارامترهای هندسی مقاطع، و همچنین با توجه به اینکه خطاها و نوسانات در پدیده‌های طبیعی معمولاً به صورت نرمال توزیع می‌شوند، ابتدا فضای پارامتری با استفاده از توزیع نرمال ایجاد شد (Li et al., 2020). علاوه بر این، به منظور بررسی تأثیر نوع توزیع انتخابی بر نتایج شبیه‌سازی و عدم قطعیت‌های خروجی، یک بار دیگر فضای پارامتری با استفاده از توزیع یکنواخت ایجاد شد. این رویکرد امکان مقایسه اثر توزیع‌های مختلف و اطمینان از پایداری نتایج را فراهم می‌کند. در این پژوهش منابع عدم قطعیت برآورد مشخصات هندسی رودخانه، نقاط (X,Z) هستند که دقت در برداشت آن‌ها با دقت نقشه‌بردار و روش نقشه‌برداری ارتباط مستقیم دارد. نقاط (X,Z) می‌توانند در هر نقطه از محدوده باند عدم قطعیت وجود داشته باشند، بنابراین انتخاب تصادفی آن‌ها می‌تواند مقطع جدیدی با مشخصات هندسی جدید را تولید کنند. این نقاط با توجه به توزیع‌های احتمالاتی عنوان شده از باند عدم قطعیت به صورت تصادفی انتخاب شدند. بنابراین با انتخاب نقاط تصادفی از باند عدم قطعیت مقاطع جدید رودخانه بارها تولید و سپس متناظر با هریک از مقاطع تولید شده مشخصات هندسی محاسبه و وارد مدل هیدرودینامیک شدند. این عمل بارها تکرار منتج به ایجاد تعداد زیادی نتیجه مستقل و جداگانه گشت. در این مطالعه نقاط (X,Z) در هر مقطع با ۱۰ درصد و ۲۰ درصد خطا و کل مقطع با \pm سه درصد و صفر برای هر کدام از دو توزیع نرمال و یکنواخت تولید شدند. روابط (۳) و (۴) نحوه تولید نقاط تصادفی جدید را نشان می‌دهد:

$$\Delta Z_{max} = Z_{max} - Z_{min} \quad (3)$$

$$Z_i = Z_i \pm \alpha \Delta Z_{max} + \beta \Delta Z_{max} \quad (4)$$

در روابط فوق ΔZ_{max} بیشینه اختلاف ارتفاع نقاط هر مقطع عرضی رودخانه را نشان می‌دهد که مبنای محاسبه خطاهای اعمالی در مدل قرار می‌گیرد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مشخصات هندسی مقطع رودخانه، ارتفاع هر نقطه Z_i از بستر با ترکیبی از خطای سیستماتیک (α) و خطای تصادفی (β) اصلاح می‌شود. α ضریب خطای سیستماتیک است که برای هر مقطع مقدار ثابتی دارد و کل مقطع را به‌طور یکنواخت در راستای عمودی به سمت بالا یا پایین جابه‌جا می‌کند و نمایانگر خطای کلی برداشت یا اثرات سیستماتیک است. β ضریب خطای تصادفی است که برای هر نقطه مستقل تولید می‌شود و نشان‌دهنده عدم قطعیت محلی برداشت یا نوسانات طبیعی بستر است. مقادیر α و β در این پژوهش بر اساس قضاوت مهندسی و تجربه مدل‌سازی تعیین شده‌اند. α دو سطح خطای سه درصد و صفر در نظر گرفته شده که جابجایی یکنواخت مقطع را به بالا یا پایین تغییر می‌دهد و باعث تغییرات خط الرأس رودخانه می‌شود. برای β دو سطح خطای ۱۰٪ و ۲۰٪ انتخاب شده و مقادیر آن برای هر نقطه از توزیع احتمال نرمال یا یکنواخت تولید شده‌اند؛ در توزیع نرمال نقاط حول مقدار میانگین متمرکز می‌شوند و در توزیع یکنواخت پراکندگی نقاط در کل بازه خطا یکنواخت و با دامنه بیشتری است. اثر خطای سیستماتیک و خطای تصادفی به‌طور مستقل اعمال می‌شوند، بنابراین هر مقطع می‌تواند علاوه بر جابجایی کل، دارای نوسانات محلی ارتفاع نیز باشد. بررسی‌های عددی نشان داد که افزایش بیش از این سطوح خطا باعث نوسانات شدید ارتفاع نقاط، ایجاد شیب‌های معکوس موضعی، برگشت جریان و ناپایداری حل هیدرودینامیکی می‌شود؛ بنابراین مقادیر خطا به‌گونه‌ای انتخاب شدند که ضمن حفظ واقع‌گرایی فیزیکی، امکان تحلیل پایدار و قابل اعتماد مدل فراهم شود (Warmink et al., 2011). با این روش، امکان تحلیل حساسیت پاسخ هیدرودینامیکی نسبت به تغییرات سیستماتیک و موضعی مقطع فراهم می‌شود و دامنه عدم قطعیت پارامترهای کلیدی مانند سطح مقطع، عمق مؤثر و شعاع هیدرولیکی مشخص می‌گردد. در هر سناریو، مجموعه‌های متعددی از مقاطع تصادفی نمونه‌گیری شده و به‌عنوان ورودی مدل هیدرودینامیک استفاده شده و نتایج به‌صورت مجزا ذخیره و تحلیل شدند. این روش امکان شبیه‌سازی پراکندگی ارتفاع در عرض رودخانه و تحلیل اثر تغییرات هندسی بر رفتار دینامیکی جریان را فراهم می‌کند و واقع‌گرایی مدل هیدرودینامیکی را افزایش می‌دهد.

شکل (۲) نحوه‌ی اعمال خطاهای سیستماتیک و تصادفی و همچنین تفاوت برداشت نقاط هندسی در دو توزیع نرمال و یکنواخت را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در توزیع نرمال نوسانات نقاط پیرامون مقدار میانگین متمرکز بوده، در حالی که در توزیع یکنواخت پراکندگی نقاط در کل بازه خطا یکنواخت‌تر و با دامنه بیشتری اتفاق می‌افتد.

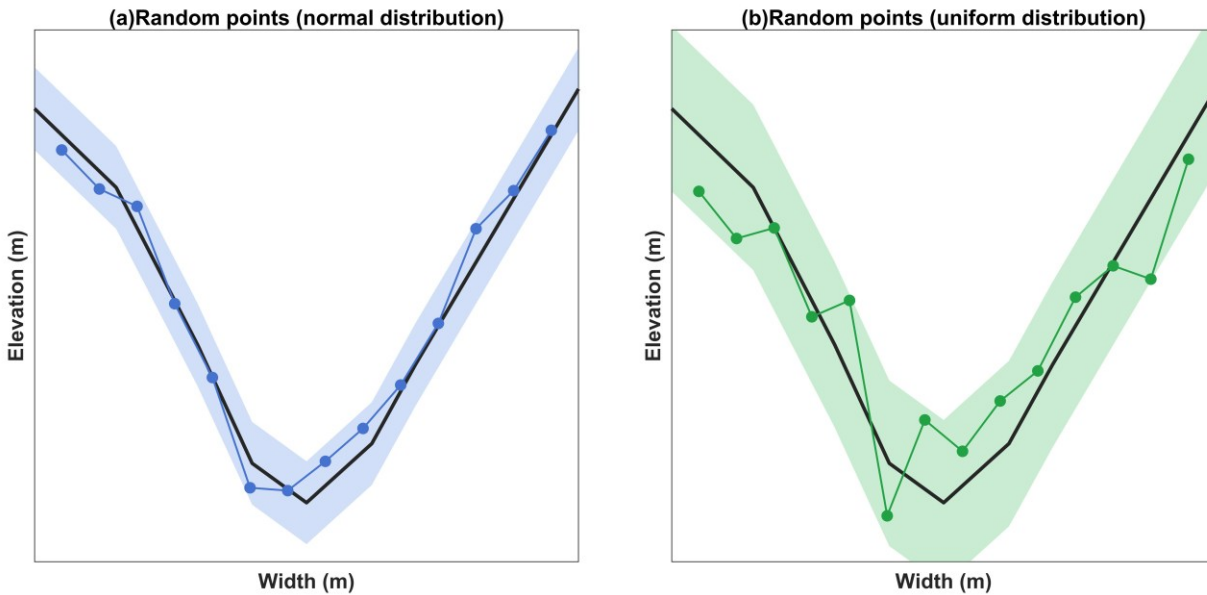


Figure 2. Cross-Sectional riverbed profiles illustrating uncertainty bands (β), generated from randomly sampled elevation points based on (a) normal and (b) uniform probability distributions

شکل (۳) نمایی از پراکندگی احتمالی ارتفاع مقطع در عرض رودخانه را نشان می‌دهد. در این مدل، خطای سیستماتیک به صورت دوطرفه (در جهت مثبت و منفی) و به طور مستقل برای هر مقطع اعمال شده است تا رفتار موضعی و تصادفی تغییرات هندسی به درستی بازتاب یابد. به عبارت دیگر، برای هر مقطع عرضی، بیشینه تغییر ارتفاع قابل انتظار به صورت محلی و بدون وابستگی به مقاطع مجاور در نظر گرفته شده و مقدار آن مستقیماً تابع ΔZ_{max} همان مقطع است. این موضوع بیانگر آن است که هر مقطع دارای دامنه‌ای از ارتفاع‌های ممکن می‌باشد که گستره‌ی آن توسط اختلاف بین بیشینه و کمینه‌ی ارتفاع مقطع تعیین می‌شود. چنین رویکردی اجازه می‌دهد تغییرات ناهمگن و غیرمنظم بستر و دیواره‌های رودخانه در مدل عددی لحاظ شوند، بدون آن‌که فرض یکنواختی یا پیوستگی مصنوعی در امتداد عرض جریان تحمیل گردد. از آنجا که تغییرات موضعی هندسه تأثیر مستقیمی بر توزیع سرعت، الگوی جریان‌های ثانویه و انتقال رسوب دارند، در نظر گرفتن این نوسانات تصادفی ارتفاع، موجب افزایش واقع‌گرایی مدل هیدرودینامیکی می‌شود. در عمل، هر بخش از مقطع می‌تواند بسته به شرایط هندسی خود دچار افزایش یا کاهش مستقل ارتفاع گردد. نتیجه‌ی این مدل‌سازی آن است که پراکندگی ارتفاع در عرض رودخانه نه تنها به صورت عددی قابل شبیه‌سازی است، بلکه امکان تحلیل حساسیت پاسخ هیدرولیکی جریان نسبت به تغییرات هندسی نیز فراهم می‌شود. از این طریق می‌توان محدوده‌ی عدم قطعیت در پارامترهای کلیدی نظیر سطح مقطع جریان، عمق مؤثر، و شعاع هیدرولیکی را تخمین زد.

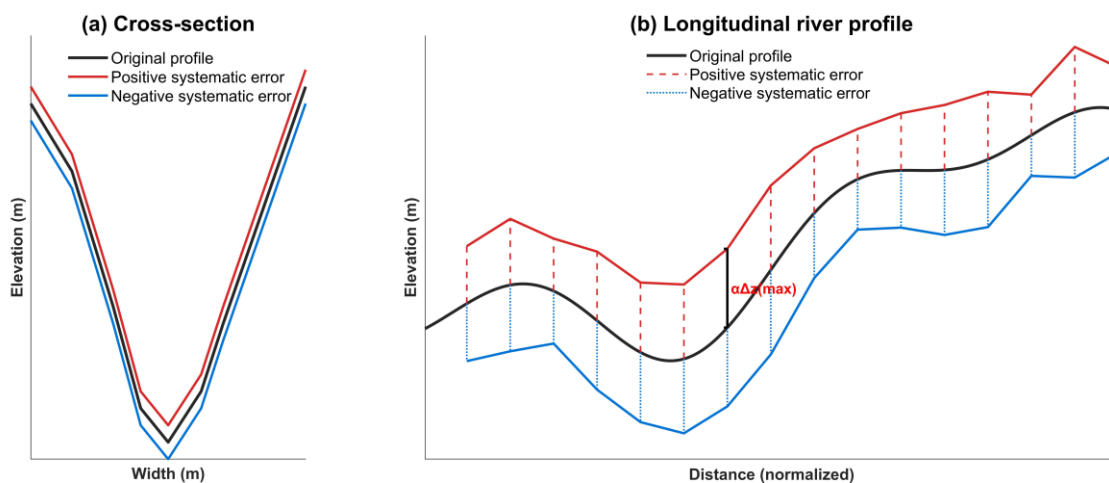


Figure 3. Morphological variability and systematic uncertainty in (a) cross-sectional and (b) longitudinal river

فرآیند تحلیل مدل با دریافت داده‌های ورودی و اجرای اولیه مدل با مقادیر بدون خطای پارامترها آغاز می‌شود تا رفتار کلی سیستم هیدرودینامیکی مشخص گردد. سپس، توزیع آماری مناسب برای پارامترهای مورد بررسی تعیین شده و نمونه‌برداری تصادفی بر اساس این توزیع انجام می‌شود. از میان نمونه‌های تولیدشده، مقادیر پارامتر به صورت سیستماتیک انتخاب شده و مدل به طور تکرارشونده برای مجموعه نمونه‌ها اجرا می‌گردد. تعداد اجرای مدل به تدریج افزایش می‌یابد تا همگرایی آماری نتایج حاصل از نمونه‌برداری مونت کارلو حاصل شود؛ به گونه‌ای که با افزایش تعداد نمونه‌ها، تغییرات نسبی شاخص‌های آماری هدف شامل میانگین مربعات خطا، درصد خطای مطلق و محدوده تغییرات به مقدار ناچیز رسیده و روند آن‌ها پایدار گردد. به عبارت دیگر، هنگامی که نسبت به تکرار قبل کمتر از نیم درصد تغییر مشاهده شد، نتایج همگرا و قابل اعتماد در نظر گرفته شدند. پس از دستیابی به این شرط، نتایج به‌عنوان همگرا و قابل اعتماد در نظر گرفته می‌شوند. خروجی‌های مدل در طول فرآیند نمونه‌برداری تحت تحلیل مقدماتی شامل بررسی روند تغییرات و ارزیابی سازگاری نتایج قرار می‌گیرند و پس از اتمام فرآیند نمونه‌برداری، تحلیل جامع عدم قطعیت و حساسیت به منظور کمی‌سازی اثر پارامترها بر پاسخ مدل انجام می‌شود. در نهایت، شاخص‌های آماری هدف بررسی و کنترل شده و فرآیند تحلیل با جمع‌بندی نتایج و تفسیر رفتار سیستم خاتمه می‌یابد. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر کمی‌سازی عدم قطعیت ناشی از مشخصات هندسی مقاطع عرضی رودخانه در مدل‌های هیدرودینامیک بوده است. از این رو، روش مونت کارلو صرفاً برای نمونه‌برداری از فضای عدم قطعیت هندسی و تحلیل حساسیت پاسخ مدل نسبت به این منبع عدم قطعیت به کار گرفته شد. به منظور تفکیک اثرات و جلوگیری از هم‌پوشانی عوامل، پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر ضریب زبری، شیب کف و شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته شدند. توزیع‌های نرمال و یکنواخت بر اساس قضاوت مهندسی و ماهیت خطاهای برداشت میدانی انتخاب و مقایسه شدند.

فلوچارت کلی حل مسئله طبق شکل (۴) می‌باشد.

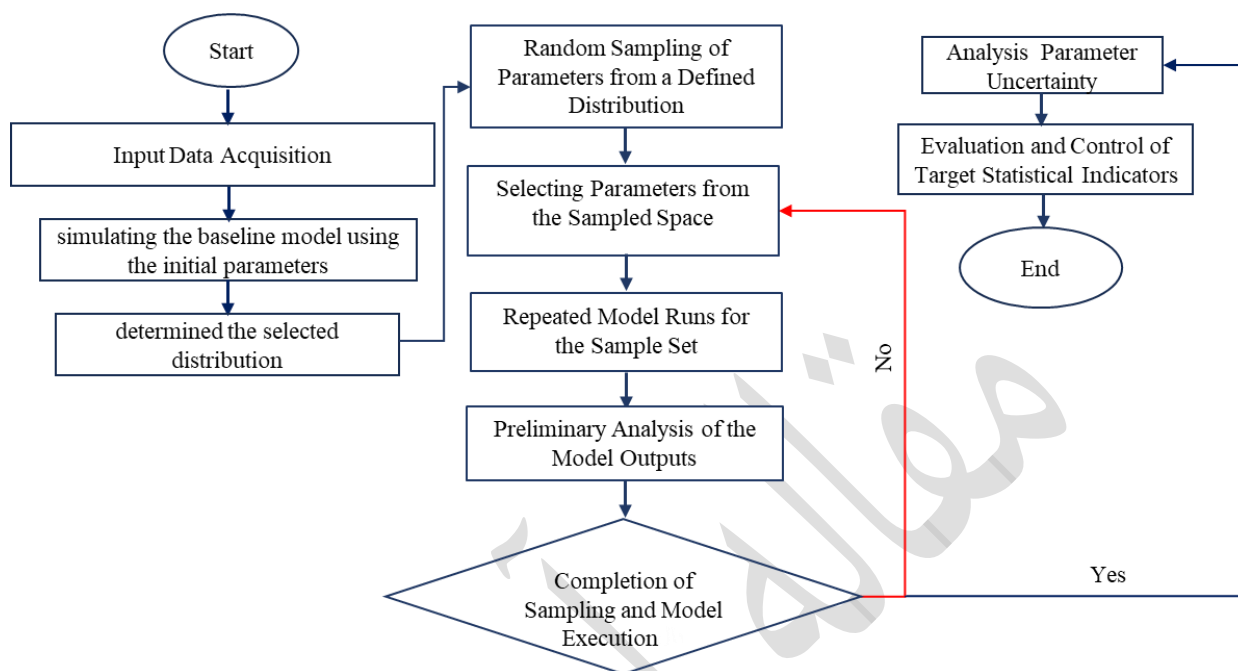


Figure 4. General flowchart of the problem-solving procedure

۴-۲- موارد مطالعاتی ارائه شده از مقاطع رودخانه جهت مدل سازی

به منظور ارزیابی جامع دقت، کارایی و قابلیت اطمینان روش تحلیل عدم قطعیت پیشنهادی، سه مطالعه‌ی موردی مستقل در شرایط توپوگرافی متفاوت طراحی و پیاده‌سازی گردید. انتخاب این سه مطالعه با هدف پوشش طیف گسترده‌ای از شرایط هندسی، هیدرولیکی و عددی انجام شد تا عملکرد مدل از شرایط ساده تا شرایط طبیعی و پیچیده‌ی رودخانه‌ای مورد ارزیابی واقع شود. در مطالعه‌ی نخست، مدل در محیطی ساده و از پیش تعریف شده پیاده‌سازی شد تا رفتار پایه‌ای الگوریتم و پاسخ آن نسبت به تغییرات محدود هندسی و هیدرولیکی به‌طور دقیق بررسی گردد. در این مرحله، تمرکز اصلی بر تحلیل پایداری عددی، روند همگرایی، و حساسیت خروجی‌ها نسبت به خطای ورودی قرار داشت. نتایج این مرحله مبنایی برای تفسیر رفتار ذاتی مدل در غیاب عوامل طبیعی فراهم آورد.

در مطالعه‌ی دوم، روش پیشنهادی در یک سامانه‌ی رودخانه‌ای واقعی اعمال گردید تا میزان پایداری، دقت و انعطاف‌پذیری آن در برابر تغییرات مورفولوژیکی مقاطع مورد سنجش قرار گیرد.

در نهایت، مطالعه‌ی سوم با تمرکز بر یک رودخانه‌ی واقعی در مقیاس منطقه‌ای انجام شد تا توانایی روش در تعمیم‌پذیری و پایداری نتایج در شرایط با تغییرات مکانی و زمانی گسترده‌تر بررسی شود. این مطالعه امکان ارزیابی قابلیت مدل در بازتولید روندهای دینامیکی واقعی و انطباق آن با داده‌های میدانی بلندمدت را فراهم ساخت.

به منظور ارائه‌ی دیدی کلی از گستره‌ی مطالعات و اهداف اختصاصی هر یک از موارد بررسی شده، ویژگی‌های اصلی آن‌ها شامل مقیاس مکانی، مشخصات هندسی، شرایط مرزی، و نوع داده‌های ورودی و خروجی در جدول (۱) گردآوری و مقایسه شده‌اند.

Table 1-Study Areas

Case study	River type	Length of the ridge (km)	Number of sections	Study objectives
1	Hypothetical river	28	12	Initial evaluation of the method under controlled conditions and simple geometry
2	Real river (Kootnai river)	45	45	Investigation of the method's performance under natural and variable hydraulic conditions
3	Real river (Qarasoo river)	30	10	Final validation of the method's performance at an applied scale

برای تولید رودخانه فرضی با مقاطع منظم ۲۸ مقطع عرضی با تعداد نقاط برداشت شده مختلف تولید شد که مجموعه این مقاطع یک رودخانه فرضی به طول ۱۲ کیلومتر را تشکیل دادند. پس از بررسی و تحلیل مقاطع عرضی چند رودخانه مختلف به منظور ارزیابی دقت و صحت مدل توسعه یافته با داده‌های واقعی، در نهایت بخشی از رودخانه کوتنای^۱ به عنوان مورد مطالعه انتخاب شد. این رودخانه از کشور کانادا سرچشمه می‌گیرد و از دو ایالت آیداهو و مونتانا می‌گذرد و سپس به کانادا بازمی‌گردد. بازه مورد مطالعه در این مقاله در محدوده طول و عرض جغرافیایی (۴۸° ۳۰' - ۴۸° ۲۰') و (۱۱۵° ۴۵' - ۱۱۵° ۲۰') قرار دارد (شکل ۵) (Barton et al., 2004). داده‌های مقاطع این بازه به طول ۴۵ کیلومتر و ۴۵ مقطع برداشت شده است.

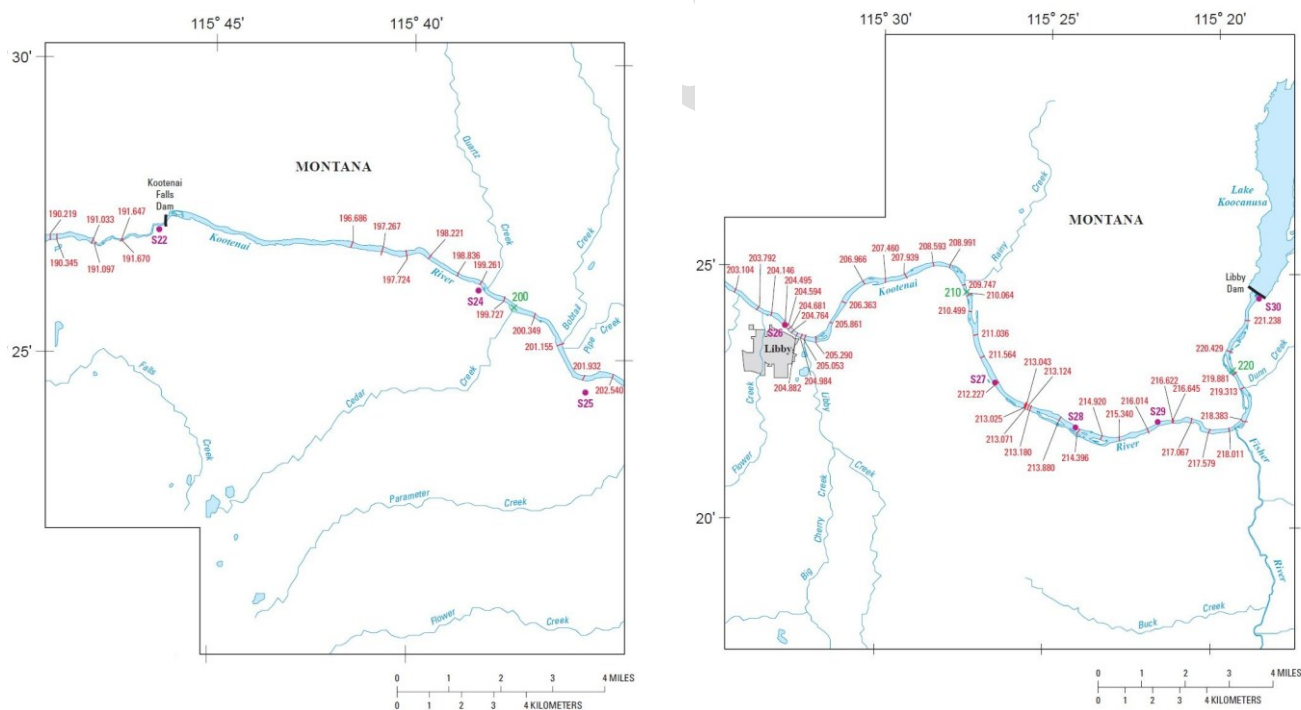


Figure 5. Study area of the kootenai river

¹ Kootenai

رودخانه‌ی قره‌سو یکی از شاخه‌های مهم و دائمی حوزه‌ی آبریز گاماسیاب است که از سراب روانسر در شمال‌غرب شهرستان کرمانشاه سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه پس از عبور از شهر روانسر، با جهت عمومی شمال‌غربی به جنوب‌شرقی، در نهایت به رودخانه‌ی گاماسیاب ملحق می‌شود. منبع اصلی تغذیه‌ی این رودخانه، چشمه‌ی روانسر است که در حدود ۵۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر کرمانشاه واقع شده و دبی پایه‌ی قابل‌توجهی را تأمین می‌کند. افزون بر این، جریان‌های سطحی ناشی از بارش‌های فصلی و رواناب دامنه‌های اطراف نیز در تقویت رژیم آبی رودخانه نقش دارند. در مسیر عبور از دشت کرمانشاه، رودخانه‌ی قره‌سو بر روی بستر نسبتاً ملایم و کم‌عمق جریان دارد. میانگین دبی سالانه‌ی آن بر اساس آمار ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه، حدود ۲۴/۶ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده‌است. ویژگی‌های مورفولوژیکی بستر شامل پهنای زیاد، شیب هیدرولیکی ملایم و رسوبات ریزدانه‌ی آبرفتی است که منجر به رفتار هیدرولیکی آرام و پایداری نسبی مقاطع جریان در فصول مختلف سال می‌شود. طول کل رودخانه حدود ۲۱۹ کیلومتر برآورد می‌شود و در امتداد مسیر خود از نواحی کوهستانی روانسر تا دشت‌های میانی کرمانشاه امتداد دارد. در پژوهش حاضر، به‌منظور انجام تحلیل‌های هیدرولیکی و صحت‌سنجی مدل عددی توسعه‌یافته، بخشی از رودخانه با طول ۱۲ کیلومتر و شامل ۳۰ مقطع عرضی برداشت‌شده به‌عنوان بازه‌ی مورد مطالعه انتخاب گردید. شکل (۶) موقعیت جغرافیایی رودخانه‌ی قره‌سو، مسیر جریان، و محدوده‌ی انتخاب‌شده برای مطالعه را نمایش می‌دهد.



Figure 6- Study area of the gharasoo river

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر مدل‌های هیدرودینامیک تحت سناریوهای مختلف، با در نظر گرفتن دو نوع توزیع آماری خطا شامل توزیع نرمال و توزیع یکنواخت و همچنین دو نوع خطای سیستماتیک و خطای تصادفی، برای سه مقطع مطالعاتی ارائه شده است. برای ارزیابی اثر این خطاها بر عملکرد مدل، چند شاخص آماری به عنوان معیار دقت محاسبات معرفی و محاسبه شده‌اند. میانگین مربعات خطا شاخصی برای سنجش انحراف میانگین مقادیر محاسباتی از مقادیر واقعی، که حساس به خطاهای بزرگ بوده و افزایش آن بیانگر افت دقت مدل است. درصد خطای مطلق میانگین نشان‌دهنده میانگین نسبی خطاها به صورت درصدی از مقدار واقعی، که قابلیت مقایسه سناریوها را فراهم می‌کند و محدوده تغییرات که بیانگر گستردگی نتایج مدل در تکرارهای مختلف و معیاری از میزان پراکندگی و ناپایداری خروجی مدل است. جدول (۲) شاخص‌های آماری مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. این شاخص‌ها به‌طور مستقیم نشان می‌دهند که افزایش خطاهای برداشت هندسی، به‌ویژه خطای تصادفی، موجب کاهش دقت و افزایش نوسانات مدل هیدرودینامیکی می‌شود و ضرورت توجه به کیفیت داده‌ها و مدیریت عدم قطعیت را برجسته می‌کند.

Table 2- Statistical indicators

Row	Index	Formula	
1	Range of variation	$\Delta x_{\max} = X_{\max} - X_{\min}$	(5)
2	Mean squared error	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	(6)
3	Percent absolute error	$PAE_i = \frac{ Sim_i - Obs_i }{Obs_i} * 100$	(7)

۳-۱- تحلیل عدم قطعیت رودخانه فرضی

برای محاسبه شاخص‌های آماری در تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی در حالت تحلیل رودخانه‌ای پس از اجرای مدل و محاسبه سرعت و سطح مقطع میانگین سرعت‌ها به‌عنوان سرعت رودخانه و میانگین سطوح مقطع محاسبه شد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های عدم قطعیت رودخانه‌ای سرعت و سطح مقطع به ترتیب به شرح جدول (۳) و (۴) است.

Table 3. Velocity uncertainty analysis indices in the river mode (Hypothetical River)

Distribution- Index Velocity	-/3		0		+/3		
	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	
%10	Mean square error(m) ⁴	0.00031	0.0005	0.00013	0.00029	0.00016	0.00034
	Range of variation(m) ²	0.33	0.45	0.3	0.44	0.3	0.43
	Percent absolute error	2.76	3.01	1.78	2.58	1.94	2.76
%20	Mean square error(m) ⁴	0.00127	0.00134	0.00039	0.0011	0.00045	0.00127
	Range of variation(m) ²	0.34	0.61	0.35	0.63	0.35	0.63
	Percent absolute error	4.26	5.31	3.04	5.11	3.83	5.26

Table 4. Area uncertainty analysis indices in the river mode (Hypothetical River)

Distribution- Index area	-/3		0		+/3		
	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	
%10	Mean square error(m) ⁴	66.23	69.17	26.82	55.46	47.32	66.23
	Range of variation(m) ²	139.37	150.03	133.89	150.61	133.85	149.37
	Percent absolute error	2.81	2.75	1.76	2.6	1.96	2.81
%20	Mean square error(m) ⁴	247.7	294	73.75	217.24	166.81	247.7
	Range of variation(m) ²	188.85	191.35	155.87	188.04	156.46	188.85
	Percent absolute error	4.43	5.32	3.01	5.2	4.84	5.43

میانگین مربعات خطای سرعت و سطح مقطع نشان می‌دهد که افزایش خطاهای سیستماتیک و تصادفی باعث افزایش عدم قطعیت در خروجی‌ها می‌شود. حتی در سناریوی خطای سیستماتیک صفر، افزایش خطای تصادفی از ۱۰٪ به ۲۰٪ باعث رشد قابل توجه MSE و محدوده تغییرات شد. این روند نشان می‌دهد که مدل نسبت به نوسانات محلی و کلی مقطع حساس است و کنترل دقیق برداشت هندسی برای پیش‌بینی قابل اعتماد حیاتی است میانگین مربعات خطای یکی از متداول‌ترین معیارها برای ارزیابی عملکرد عدم قطعیت در مدل‌ها است. این معیار نشان‌دهنده میانگین مربع تفاضل بین مقادیر واقعی (داده‌های مشاهده‌شده) و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل است. مطابق جدول (۳) میانگین مربعات خطای سرعت در کلیه سناریوها در حالت بررسی رودخانه‌ای نشان می‌دهد که با افزایش خطا در برداشت مشخصات هندسی، خطای محاسبات سرعت هم افزایش می‌یابد. مطابق جدول این معیار در حالت خطای سیستماتیک صفر و خطای تصادفی ۱۰ درصد، ۰/۰۰۰۱۳ بوده است که در همان خطای سیستماتیک و خطای تصادفی با توزیع نرمال ۲۰ درصد با روندی افزایشی به ۰/۰۰۰۳۹ رسیده است. همچنین در خطای سیستماتیک منفی سه درصد و خطای تصادفی با توزیع نرمال ۱۰ درصد مقداری برابر با ۰/۰۰۰۳۱ داشته است که با ثابت ماندن خطای سیستماتیک و افزایش خطای تصادفی به ۰/۰۰۱۲۷ رسیده است. این روند برای خطای سیستماتیک مثبت سه درصد نیز حفظ شده است.

میانگین مربعات خطای سرعت با افزایش خطای سیستماتیک چه در جهت مثبت و چه در جهت منفی روند افزایشی داشته است. با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود مقادیر میانگین مربعات خطای سرعت برای خطای تصادفی با توزیع نرمال ۱۰ درصد و خطاهای سیستماتیک منفی سه درصد، صفر و مثبت سه درصد در ترتیب ۰/۰۰۰۳۱، ۰/۰۰۰۱۳ و ۰/۰۰۰۱۶ می‌باشد. با افزایش خطای تصادفی نیز همین روند حفظ شده است و مقادیر میانگین مربعات خطا برای خطای تصادفی با توزیع نرمال ۲۰ درصد و خطاهای سیستماتیک منفی سه درصد، صفر و مثبت سه درصد در ترتیب ۰/۰۰۰۳۹، ۰/۰۰۰۱۲۷ و ۰/۰۰۰۴۵ می‌باشد.

روند تغییرات میانگین مربعات خطای سرعت با تغییر توزیع احتمال در خطای تصادفی با توزیع یکنواخت در کلیه سناریوها افزایشی می‌باشد. روند تغییرات میانگین مربعات خطا برای سطح مقطع نیز دقیقاً مطابق نتایج میانگین مربعات خطای سرعت است. این افزایش‌ها نشان می‌دهد که حتی تغییرات کوچک در برداشت هندسی می‌تواند اثر غیرخطی قابل توجهی بر سرعت جریان داشته باشد و احتمال ایجاد ناپایداری‌های موضعی در رودخانه را افزایش دهد. مطابق جدول (۴) در حالت خطای سیستماتیک صفر و خطای تصادفی با توزیع نرمال ۱۰ درصد، میانگین مربعات خطای سطح مقطع ۲۶/۸۲ بوده است و با افزایش خطای تصادفی به ۷۳/۷۵ رسیده است. با افزایش خطای سیستماتیک چه در جهت مثبت و چه در جهت منفی نیز روند این شاخص برای تغییرات سطح مقطع افزایشی است. همچنین مطابق سرعت، روند تغییرات میانگین مربعات خطای سطح مقطع با تغییر توزیع احتمال در خطای تصادفی با توزیع یکنواخت در کلیه سناریوها افزایشی می‌باشد به گونه‌ای که در خطای سیستماتیک صفر با خطای تصادفی ۲۰ درصد از توزیع نرمال مقداری برابر با ۷۳/۷۵ داشته است و در همان خطا با توزیع یکنواخت به مقدار ۲۱۷/۲۴ رسیده است. مطابق جداول (۳) و (۴) محدوده تغییرات سرعت و سطح مقطع با افزایش خطای تصادفی در هر دو توزیع افزایش یافته است. درصد خطای مطلق

سرعت و سطح مقطع مطابق جداول (۳) و (۴) نشان می‌دهد که افزایش خطا از هر نوع باعث افزایش درصد خطای مطلق خواهد شد. افزایش دامنه عدم قطعیت ورودی موجب گسترش نوسانات سرعت و تغییرات مقطع رودخانه می‌شود. در باندهای خطای بالاتر، سرعت جریان افزایش‌های موقت و شیب‌های تیز نشان می‌دهد و پهنای مقطع در نقاط بحرانی به‌طور غیرهمزمان تغییر می‌کند. این عدم همزمانی، برهم‌کنش پیچیده مومنتوم و مقاومت هیدرولیکی را نمایان می‌سازد و می‌تواند تمرکز فرسایش، شتاب‌گیری جریان و توزیع نامتقارن رسوب را تشدید کند.

میانگین مربعات خطا (MSE) سرعت و سطح مقطع نشان می‌دهد که مدل جریان به خطاهای سیستماتیک و تصادفی برداشت هندسی حساس است. افزایش خطای سیستماتیک چه در جهت مثبت و چه منفی، باعث افزایش MSE می‌شود و نشان‌دهنده تأثیر تجمعی انحرافات ثابت در مشخصات هندسی بر پیش‌بینی جریان است. همچنین افزایش خطای تصادفی موجب افزایش پراکندگی پیش‌بینی‌ها و بالا رفتن MSE می‌شود، به‌ویژه در ترکیب با خطای سیستماتیک، که حساسیت مدل به نوسانات داده‌ها را برجسته می‌کند. توزیع خطای تصادفی نیز اثر قابل توجهی دارد؛ خطای تصادفی یکنواخت باعث افزایش شدیدتر MSE نسبت به توزیع نرمال می‌شود، که اهمیت کنترل نوسانات بزرگ در داده‌ها را نشان می‌دهد. همبستگی افزایش خطا در سرعت و سطح مقطع بر ضرورت برداشت دقیق هندسی، کالیبراسیون مدل و تحلیل عدم قطعیت تأکید می‌کند و بیانگر این است که پیش‌بینی قابل اعتماد جریان و مقطع رودخانه نیازمند داده‌های با کیفیت و تحلیل حساسیت‌سنجی دقیق است. شکل (۷) نمودارهای ارائه‌شده تغییرات سرعت جریان و سطح مقطع رودخانه را در طول مسیر با لحاظ دو باند خطای ۱۰ درصد و ۲۰ درصد از توزیع نرمال نشان می‌دهند. تحلیل هیدرودینامیکی نشان می‌دهد که افزایش دامنه عدم قطعیت ورودی موجب گسترش نوسانات سرعت و تغییرات مقطع رودخانه می‌شود. در باندهای خطای بالاتر، سرعت جریان افزایش‌های موقت و شیب‌های تیز نشان می‌دهد، در حالی که پهنای مقطع در نقاط بحرانی به‌طور غیرهمزمان تغییر می‌کند. این عدم همزمانی حداکثر سرعت و حداقل سطح مقطع، برهم‌کنش پیچیده مومنتوم و مقاومت هیدرولیکی را نمایان می‌سازد و می‌تواند تمرکز فرسایش، شتاب‌گیری جریان و توزیع نامتقارن رسوب را تشدید کند. بنابراین، حتی تغییرات کوچک در ورودی‌ها اثرات غیرخطی قابل توجهی بر انرژی جریان و الگوی هیدرولیکی رودخانه دارد و توجه به دامنه‌های عدم قطعیت برای طراحی و مدیریت جریان ضروری است.

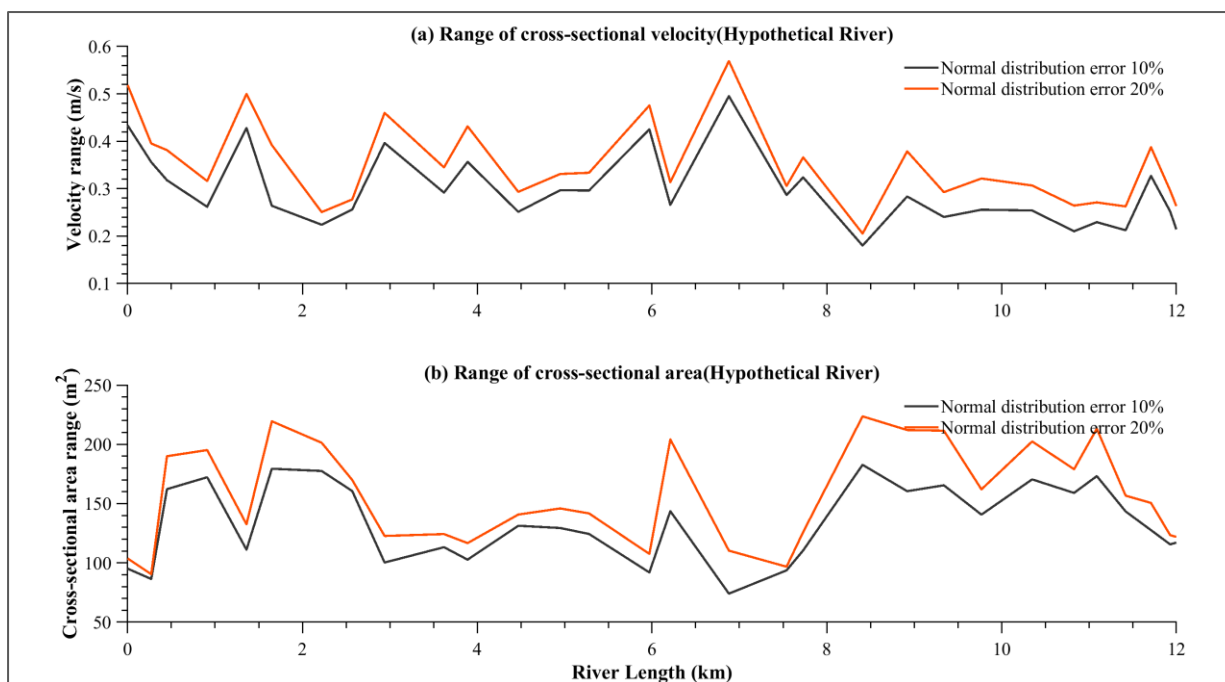


Figure 7. Range of cross-sectional (a) velocity and (b) area in a hypothetical river

۲-۳- تحلیل عدم قطعیت رودخانه کوتنای

پس از تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی یک رودخانه فرضی، جهت صحت سنجی و مقایسه نتایج حاصل، به تحلیل عدم قطعیت مقاطع واقعی حاصل از نقشه برداری رودخانه کوتنای پرداخته شد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص های عدم قطعیت رودخانه ای سرعت و سطح مقطع رودخانه کوتنای به ترتیب به شرح جداول (۵) و (۶) است.

Table5. Velocity uncertainty analysis indices in the river mode (Kootenai River)

Distribution- Index Velocity	-/3		0		+/3		
	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	
/10	Mean square error(m) ⁴	0.00047	0.00108	0.00019	0.00085	0.000809	0.0014
	Range of variation(m) ²	0.52	0.54	0.51	0.54	0.51	0.54
	Percent absolute error	2.64	3.79	2.47	3.24	2.59	3.78
/20	Mean square error(m) ⁴	0.0013	0.005	0.0011	0.01	0.0016	0.0056
	Range of variation(m) ²	0.55	0.58	0.54	0.58	0.54	0.57
	Percent absolute error	4.18	8.45	3.67	8.17	4.13	8.30

Table6. Area uncertainty analysis indices in the river mode (Kootenai River)

Distribution- Index Area	-/3		0		+/3		
	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	
/10	Mean square error(m) ⁴	123.00	316.66	43.83	211.78	111.20	247.24
	Range of variation(m) ²	343.18	370.47	344.91	372.43	346.81	371.86
	Percent absolute error	2.48	4.28	2.35	3.63	2.57	4.03
/20	Mean square error(m) ⁴	384.40	1638.95	274.88	1483.42	302.15	1467.33
	Range of variation(m) ²	379.75	439.03	381.48	441.31	382.89	437.30
	Percent absolute error	4.78	10.54	4.16	10.11	4.48	10.13

مطابق جداول (۵) و (۶) میانگین مربعات خطای سرعت و سطح مقطع در سناریوهای مختلف نشان می دهد که حساسیت مدل رودخانه ای به خطاهای ورودی بسیار برجسته است. در حالت خطای سیستماتیک صفر، افزایش خطای تصادفی از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد

باعث رشد قابل توجه MSE سرعت از حدود $0/00019$ به $0/0011$ و MSE سطح مقطع از $43/83$ به $274/88$ می‌شود، که نمایانگر اثر مستقیم نوسانات داده‌های هندسی بر پیش‌بینی جریان و تغییرات مقطع است. خطاهای سیستماتیک، با وجود اثر تجمعی کمتر نسبت به خطاهای تصادفی، با ترکیب با آن‌ها دامنه عدم قطعیت مدل را افزایش می‌دهند؛ به عنوان مثال، در خطای تصادفی ۲۰ درصد، تغییر خطای سیستماتیک از ۳- درصد به ۳+ درصد باعث افزایش MSE سرعت از $0/0013$ به $0/0016$ می‌شود. همچنین، تغییر توزیع خطای تصادفی از نرمال به یکنواخت باعث افزایش قابل توجه خطاها می‌شود؛ برای سطح مقطع در خطای سیستماتیک صفر و خطای تصادفی ۲۰ درصد، MSE از $274/88$ در توزیع نرمال به $302/15$ در توزیع یکنواخت رسیده است. تحلیل هیدرودینامیکی نشان می‌دهد که افزایش دامنه عدم قطعیت ورودی موجب گسترش نوسانات سرعت و تغییرات مقطع رودخانه می‌شود. بنابراین، برای دستیابی به پیش‌بینی‌های دقیق و قابل اعتماد سرعت جریان و تغییرات مقطع، ضروری است علاوه بر کنترل خطاهای سیستماتیک، نوسانات تصادفی داده‌ها با دقت مدیریت شوند، اثر ترکیبی توزیع‌های مختلف خطا در تحلیل عدم قطعیت لحاظ شود و برداشت هندسی دقیق با ابزارهای مناسب انجام شود. برای درک بهتر اثر خطای برداشت نقاط خروجی‌های جریان، برای چند مقطع از رودخانه کوتنا، نمودارهای توزیع فراوانی رسم شد. نمودارهای فراوانی سرعت و سطح مقطع برای یکی از مقاطع رودخانه کوتنا در خطای ۱۰ درصد و ۲۰ درصد از توزیع نرمال، مطابق شکل (۸) و (۹) ترسیم شد. شکل (۸) نمایانگر توزیع فراوانی سرعت در تکرارهای متعدد یک مقطع نمونه در دو سطح ۱۰ درصد و ۲۰ درصد از خطای نرمال است. توزیع فراوانی در خطای تصادفی با توزیع نرمال ۱۰ درصد و بدون خطای سیستماتیک نشان‌دهنده همگرایی بالای مدل و پایداری پیش‌بینی‌ها در شرایط خطای کم است. به عبارت دیگر، عدم قطعیت محاسباتی پایین بوده و مدل توانسته پاسخ‌های قابل اعتماد و نزدیک به مقادیر واقعی تولید کند. در مقابل برای خطای تصادفی ۲۰ درصد نمودار توزیع پهن‌تر و پراکندگی بیشتر را نشان می‌دهد، که بیانگر افزایش نوسانات خروجی مدل و کاهش پایداری پیش‌بینی‌هاست. افزایش دامنه خطای تصادفی باعث می‌شود سرعت در بازه وسیع‌تری نوسان کند و عدم قطعیت مدل به‌طور ملموس افزایش یابد. رفتار مشابهی در شکل (۹) برای سطح مقطع جریان مشاهده می‌شود؛ در خطای ۱۰ درصد داده‌ها حول مقدار میانگین تجمع یافته و دامنه تغییرات محدود است، اما با افزایش خطا به ۲۰ درصد، توزیع گسترده‌تر شده و تراکم نقاط در هر بازه کاهش می‌یابد.

تحلیل کمی نمودارهای فراوانی سرعت و سطح مقطع (شکل‌های ۸ و ۹) نشان می‌دهد که با افزایش دامنه خطای تصادفی از ۱۰٪ به ۲۰٪، دامنه نوسانات خروجی مدل به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌طور مشخص، سرعت در خطای ۱۰٪ بین ۰.۳۵ تا ۰.۷۷ متر بر ثانیه در خطای ۲۰٪ بین ۰.۳۰ تا ۰.۸۰ متر بر ثانیه قرار دارد. مشابه آن، سطح مقطع در خطای ۱۰٪ در بازه ۲۷۰ تا ۶۱۰ متر مربع و در خطای ۲۰٪ بین ۲۵۰ تا ۶۸۰ متر مربع نوسان می‌کند. گسترش دامنه توزیع و کاهش تمرکز داده‌ها در خطای بیشتر نشان‌دهنده افزایش نوسانات محلی و اثر غیرخطی خطاهای برداشت هندسی بر پیش‌بینی جریان است.

از دیدگاه کاربردی، حتی تغییرات کوچک در داده‌های برداشت‌شده می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت و پایداری پیش‌بینی‌های مدل داشته باشد. بنابراین، استفاده از ابزارهای دقیق و رعایت دقت بالا در برداشت هندسی مقاطع بحرانی برای کاهش عدم قطعیت و افزایش اعتمادپذیری مدل ضروری است.

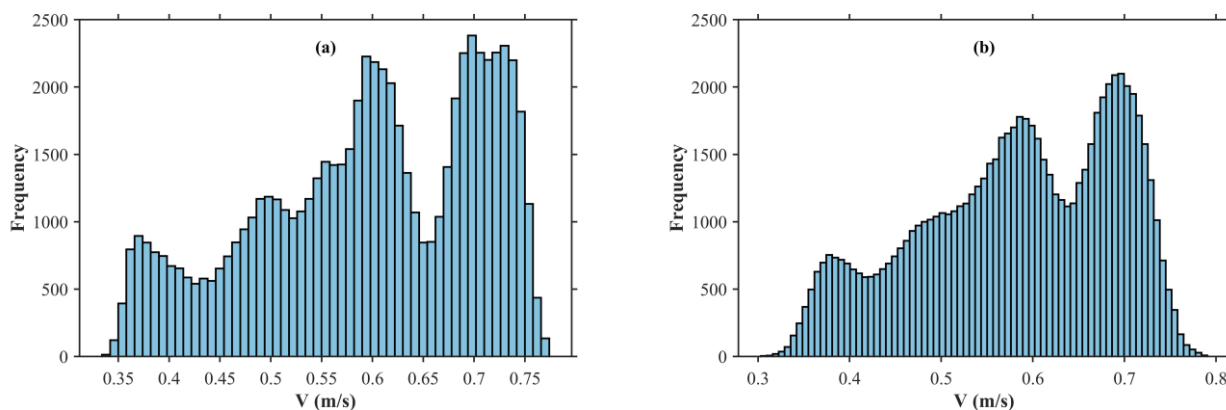


Figure 8. (a) Frequency distribution of velocity in a cross-section generated by a normal distribution with an error of 10% - (b) Frequency distribution of velocity in a cross-section generated by a normal

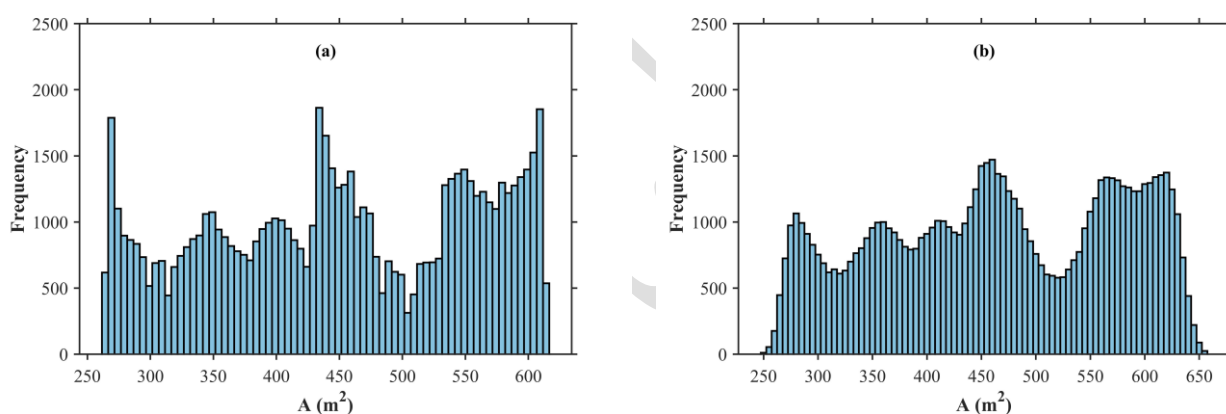


Figure 9. (a) Frequency distribution of cross-sectional area in a cross-section generated by a normal distribution with an error of 10% - (b) Frequency distribution of cross-sectional area in a cross-section generated by a normal distribution with an error of 20%

شکل ۱۰ شاخص‌های مقطعی سطح مقطع در $\alpha = 0$ را برای حالات مختلف عدم قطعیت نقاط، برای دو شاخص محدوده تغییرات (10-a) و درصد خطا (10-b) نمایش می‌دهند. مطابق شکل محدوده تغییرات و میانگین مربعات خطای سطح مقطع نشان دهنده آن است که افزایش خطای تصادفی نقاط موجب بروز تغییرات بیشتری می‌شود. عدم یکسان بودن ضخامت این محدوده را بیانگر این است که هر مقطع به طور مستقل عدم قطعیتی را به خروجی‌های مدل القا می‌کند. همچنین با افزایش خطا در برداشت نقاط میانگین مربعات خطا و محدوده تغییرات سطح مقطع افزایش می‌یابد که نشان دهنده این است که با افزایش خطا عدم قطعیت افزایش یافته است. روند تغییرات برای سرعت در مقاطع مختلف نیز مشابه سطح مقطع می‌باشد.

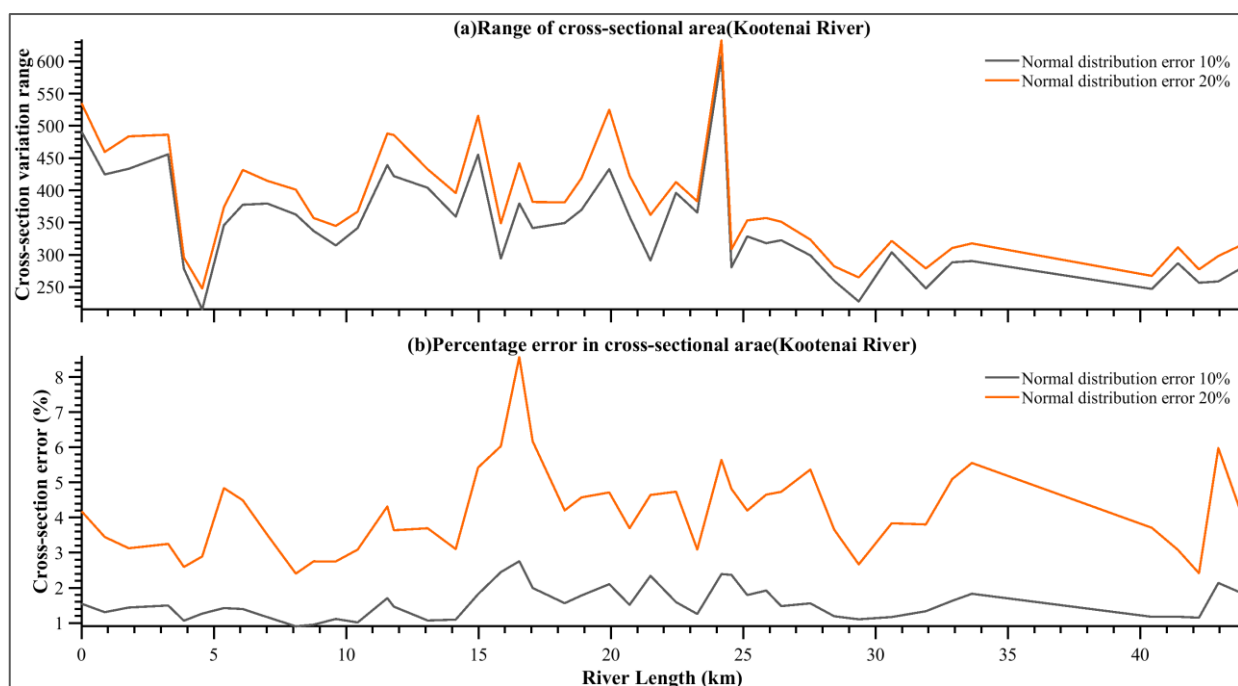


Figure 10. (a) Range of cross-sectional area (b) Percentage error in cross-sectional area

۳-۳- تحلیل عدم قطعیت رودخانه قره سو

به منظور بررسی دقیق تر اثر خطاهای هندسی و اعتبارسنجی نتایج حاصل از دو مورد مطالعاتی پیشین، تحلیل عدم قطعیت بر اساس داده‌های واقعی برداشت شده از مقاطع رودخانه قره‌سو انجام شد. شاخص‌های آماری مرتبط با تحلیل عدم قطعیت سرعت و سطح مقطع در جداول (۷) و (۸) ارائه شده‌اند

Table 7. Velocity uncertainty analysis indices in the river mode (Gharasoo River)

Distribution- Index Velocity		-/3		0		+/3	
		Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
/10	Mean square error(m) ⁴	0.00131	0.00046	0.00125	0.00035	0.00129	0.00044
	Range of variation(m) ²	0.36	0.55	0.37	0.55	0.36	0.54
	Percent absolute error	3.67	4.92	3.61	4.17	3.64	4.51
/20	Mean square error(m) ⁴	0.00447	0.00057	0.0041	0.00044	0.00044	0.00049
	Range of variation(m) ²	0.53	0.71	0.52	0.71	0.52	0.71
	Percent absolute error	6.96	7.34	6.73	7.05	6.8	7.2

Table 8. Area uncertainty analysis indices in the river mode (Gharasoo River)

Distribution- Index Area		-/3		0		+/3	
		Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
/10	Mean square error(m) ⁴	7.14	7.5	6.71	7.23	6.9	7.4
	Range of variation(m) ²	62.81	90.05	62.91	89.63	62.95	89.9
	Percent absolute error	3.9	4.9	3.61	4.68	3.7	4.84
/20	Mean square error(m) ⁴	29.13	39.4	25.42	36.91	28.8	37.8
	Range of variation(m) ²	79.81	100.01	80.06	100.33	80.01	100.31
	Percent absolute error	7.02	7.49	6.8	7.35	6.99	7.41

مطابق نتایج جداول مذکور، روند تغییرات شاخص‌های آماری در رودخانه قره‌سو مشابه الگوی مشاهده‌شده در دو مورد مطالعاتی پیشین است. به‌طور کلی، افزایش خطای تصادفی موجب رشد محسوس در مقدار میانگین مربعات خطا، درصد خطای مطلق و محدوده تغییرات می‌شود. در مقایسه بین توزیع‌های نرمال و یکنواخت نیز مشخص است که توزیع یکنواخت نوسانات بزرگ‌تری را در داده‌های هندسی ایجاد کرده و در نتیجه، میزان عدم قطعیت در خروجی‌های مدل هیدرودینامیکی بیشتر است. شکل (۱۱) نمودارهای ارائه‌شده تغییرات سطح مقطع و درصد خطای سطح مقطع رودخانه را در طول مسیر با لحاظ دو باند خطای ۱۰ درصد و ۲۰ درصد از توزیع نرمال نشان می‌دهند.

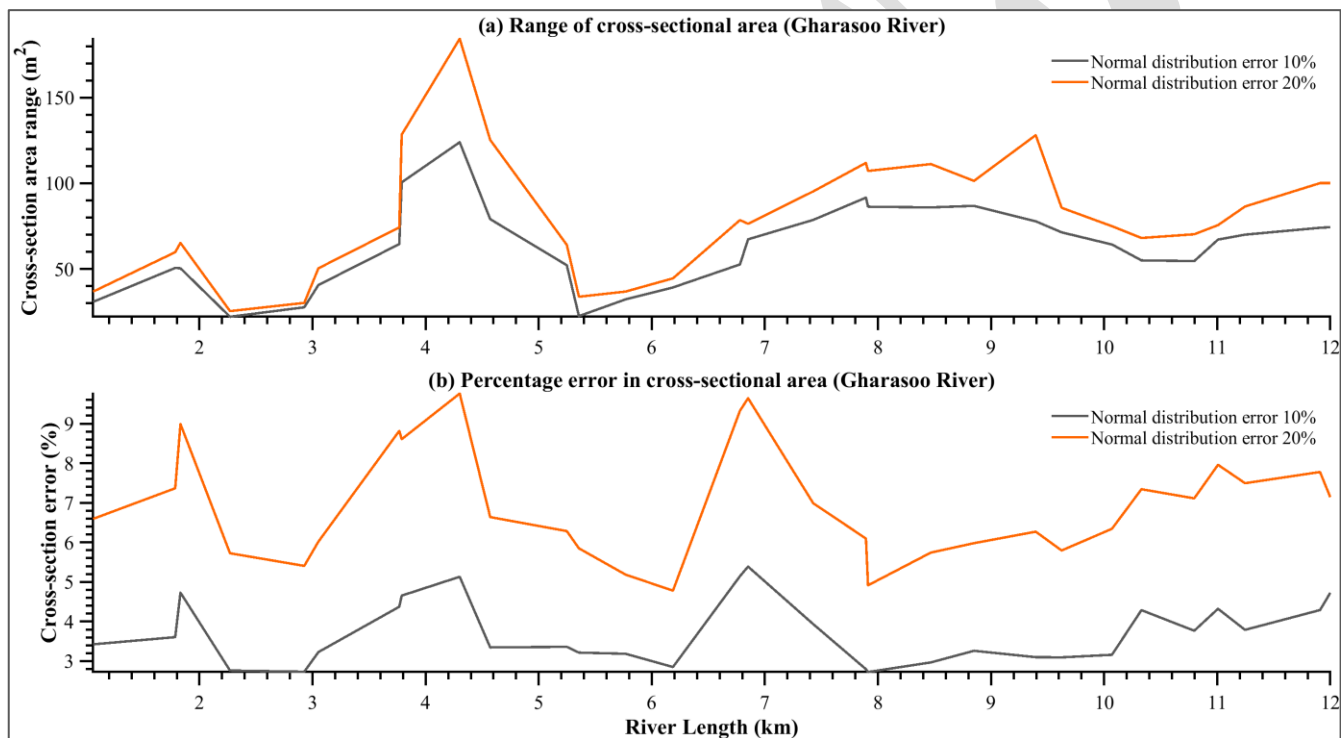


Figure 11. (a) Range of cross-sectional area (b) Percentage error in cross-sectional area

بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح خطا، دامنه نوسانات سرعت جریان و سطح مقطع در طول رودخانه افزایش می‌یابد و پراکندگی داده‌ها در خروجی مدل بیشتر می‌شود. این رفتار، حساسیت بالای مدل نسبت به تغییرات هندسی و تأثیر مستقیم دقت داده‌های برداشت‌شده بر پایداری پیش‌بینی‌های هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد. شکل‌های (11-a) و (11-b) محدوده تغییرات و درصد خطای سطح مقطع رودخانه قره‌سو را در دو سطح خطای تصادفی ۱۰ درصد و ۲۰ درصد با توزیع نرمال نمایش می‌دهند. الگوی مشاهده‌شده کاملاً مشابه دو مطالعه پیشین است؛ به‌طوری‌که با افزایش سطح خطا، دامنه تغییرات و نوسانات سطح مقطع به‌طور محسوس افزایش می‌یابد. این افزایش بیانگر گسترش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های مدل و کاهش پایداری محاسباتی آن است. در مجموع، نتایج تحلیل رودخانه قره‌سو نیز همچون دو مطالعه پیشین تأیید می‌کند که افزایش خطای تصادفی در داده‌های هندسی برداشت‌شده، به‌طور مستقیم موجب افزایش دامنه عدم قطعیت و کاهش اعتمادپذیری مدل در شبیه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی رودخانه می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه نشان می‌دهد که مدل‌های هیدرودینامیک به شدت نسبت به خطاهای برداشت هندسی حساس هستند. افزایش خطای سیستماتیک، چه در جهت مثبت و چه منفی، موجب افزایش میانگین مربعات خطا و کاهش دقت پیش‌بینی سرعت جریان و سطح مقطع می‌شود، زیرا انحرافات تجمعی در مقطع بر رفتار جریان اثر مستقیم دارند. به علاوه، خطای تصادفی و نوسانات محلی در نقاط مقطع اثر قابل توجهی بر پیش‌بینی جریان دارند؛ در رودخانه کوتنا، با افزایش خطای تصادفی از ۱۰٪ به ۲۰٪، میانگین مربعات خطای سرعت و سطح مقطع به‌طور ملموس افزایش یافته و محدوده تغییرات گسترده‌تر شده است، که نشان‌دهنده کاهش دقت مدل و القای عدم قطعیت مستقل توسط هر مقطع است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع خطای یکنواخت موجب پراکندگی بزرگ‌تر خروجی مدل نسبت به توزیع نرمال می‌شود. دلیل فیزیکی این رفتار در تفاوت ماهیت تغییرات این دو توزیع نهفته است: در توزیع نرمال بیشتر خطاها حول مقدار میانگین متمرکز هستند و تغییرات شدید به ندرت رخ می‌دهند، در حالی که در توزیع یکنواخت احتمال وقوع تغییرات بزرگ در تمام نقاط مقطع یکسان است. این تغییرات شدید محلی باعث اثرات غیرخطی بر سرعت جریان و سطح مقطع می‌شوند، که میانگین مربعات خطا و دامنه تغییرات را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، جریان تحت توزیع یکنواخت «شوک‌های محلی» بیشتری تجربه می‌کند، در حالی که در توزیع نرمال نوسانات تجمعی و ملایم هستند و مدل پایدارتر عمل می‌کند. تحلیل هیدرودینامیکی نشان می‌دهد که افزایش دامنه عدم قطعیت ورودی موجب گسترش نوسانات سرعت و تغییرات سطح مقطع، عدم همزمانی حداکثر سرعت و حداقل سطح مقطع، و در نتیجه برهم‌کنش پیچیده مومنتوم و مقاومت هیدرولیکی می‌شود، که می‌تواند فرسایش موضعی، شتاب‌گیری جریان و توزیع نامتقارن رسوب را تشدید کند. نمودارهای فراوانی سرعت و سطح مقطع نشان می‌دهند که حتی تغییرات کوچک تصادفی می‌تواند دامنه نوسانات را تا چندین برابر افزایش دهد، الگوی غیرهمزمان افزایش سرعت و تغییرات پهنای مقطع را آشکار می‌کند و برای مدیریت سیلاب، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و ارزیابی ریسک فرسایش اهمیت دارد. این یافته‌ها بر ضرورت برداشت دقیق هندسی، کنترل خطاهای سیستماتیک، مدیریت نوسانات تصادفی داده‌ها و تکرار کافی شبیه‌سازی تأکید دارند و نشان می‌دهند که برای پیش‌بینی قابل اعتماد جریان و رفتار رودخانه، تحلیل حساسیت، کالیبراسیون مدل و توجه دقیق به دامنه‌های عدم قطعیت ورودی ضروری است. برای کاهش عدم قطعیت و افزایش اعتمادپذیری مدل، توصیه می‌شود از ابزارهای دقیق برداشت هندسی استفاده شود، تعداد تکرارهای شبیه‌سازی کافی باشد، توزیع احتمالات خطا به دقت انتخاب گردد و تحلیل حساسیت و کالیبراسیون مدل در تمام مراحل اعمال شود. همچنین، در طراحی سازه‌ها و مدیریت سیلاب باید اثر نوسانات محلی و سیستماتیک داده‌ها در نظر گرفته شود تا پیش‌بینی‌های جریان و تغییرات مقطع قابل اعتماد باشند.

در خصوص ارتباط هندسه و پارامترهای هیدرولیکی نیز تحلیل رودخانه‌های واقعی نشان می‌دهد که حساسیت مدل به خطاهای هندسی به پیچیدگی هندسه بستگی دارد؛ هر مقطع می‌تواند نوسانات محلی قابل توجهی در سرعت و سطح مقطع ایجاد کند که با انباشت این نوسانات، دامنه تغییرات خروجی افزایش می‌یابد. افزایش خطای تصادفی، به ویژه در ترکیب با خطای سیستماتیک، موجب افزایش پراکندگی، عدم همزمانی تغییرات سرعت و سطح مقطع و ایجاد اثرات غیرخطی در جریان می‌شود.

این نتایج تاکید می‌کند که برای پیش‌بینی دقیق و پایدار جریان و تغییرات مقطع، کنترل دقیق برداشت هندسی، مدیریت توزیع خطای تصادفی و کالیبراسیون مدل ضروری است، و حتی تغییرات کوچک در هندسه می‌توانند اثرات قابل توجهی بر رفتار هیدرودینامیکی رودخانه داشته باشند. در مطالعات آتی توصیه می‌شود تحلیل عدم قطعیت به صورت هم‌زمان برای مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرودینامیکی مانند ضریب زبری، شیب کف و شرایط مرزی انجام شود تا اثرات ترکیبی منابع مختلف عدم قطعیت به طور جامع ارزیابی گردد. یکی از محدودیت‌های این مطالعه استفاده از مدل یک‌بعدی سنت و نانت برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌های با هندسه پیچیده است. مدل یک‌بعدی قادر به شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه و اثرات محلی پیچیده نیست و بنابراین دقت پیش‌بینی در مقاطع با تغییرات هندسی شدید محدود است. با این حال، هدف اصلی مطالعه تحلیل حساسیت و عدم قطعیت ناشی از خطاهای هندسی بود و مدل یک‌بعدی توانایی کافی برای ارزیابی اثرات تجمعی تغییرات مقطع و نوسانات ورودی بر سرعت و سطح مقطع را فراهم می‌کند. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود از مدل‌های دو یا سه‌بعدی برای بررسی اثرات هندسه پیچیده و تعامل پارامترهای هیدرودینامیکی استفاده شود. همچنین، استفاده از داده‌های میدانی دقیق‌تر برای برآورد توزیع‌های احتمالی خطا و به‌کارگیری معیارهای کمی برای تعیین همگرایی مونت‌کارلو می‌تواند قابلیت اعتماد نتایج را افزایش دهد. این پژوهش محدود به داده‌های موجود و برداشت مقاطع بوده و مدل تنها جریان یک‌بعدی غیرماندگار را در نظر گرفته است؛ اثر جریان‌های ثانویه، رسوب‌گذاری پیچیده و تغییرات طولانی‌مدت بستر لحاظ نشده است، که می‌تواند زمینه مطالعات تکمیلی و تعمیم نتایج به سایر رودخانه‌ها باشد.

۵- منابع و مؤاخذ

- 1- Akan, A.O., 2011. *Open Channel Hydraulics*. Butterworth-Heinemann.
- 2- Apel, H., Merz, B. & Thieken, A.H., 2008. Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management*, 6(2), pp.149–162.
- 3- Badiger, G., Sonawane, P., Patil, N., Shelake, G. and Jadhav, S. (2025) 'Investigating the influence of nano coolant and cross-sectional variations on microchannel cooling for electronic devices', *Materials Research Proceedings*, 49, pp. 338–349. <https://doi.org/10.21741/9781644903438-34>
- 4- Castellarin, A., Di Baldassarre, G., Bates, P.D. & Brath, A., 2009. Optimal cross-sectional spacing in Preissmann scheme 1D hydrodynamic models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(2), pp.96–105.
- 5- Chaudhry, M.H., 2008. *Open-channel flow*. 2nd edn. New York: Springer.
- 6- Chow, V.T., 1959. *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- 7- Conner, J. & Tonina, D., 2014. Effect of cross section interpolated bathymetry on 2D hydrodynamic model results in a large river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(4), pp.463–475.
- 8- Cunge, J.A., Holly, F.M. & Verwey, A., 1980. *Practical aspects of computational river hydraulics*. London: Pitman.
- 9- Di Baldassarre, G. & Montanari, A., 2009. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, pp.913–921.
- 10- Henderson, F., 1957. *M. Open Channel Flow*. *Journal of Fluid Mechanics*, 29(2), pp.414–415.
- 11- Henderson, F.M., 1966. *Open channel flow*. New York: Macmillan.
- 12- Jakeman, A.J., Letcher, R.A. & Norton, J.P., 2006. Ten iterative steps in development & evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 21(5), pp.602–614.
- 13- Jesna, I., Bhallamudi, S. & Sudheer, K., 2023. Impact of cross-sectional orientation in one-dimensional hydrodynamic modeling on flood inundation mapping. *Journal of Flood Risk Management*, 16(3), e12893.

- 14- John Brackins, Moragoda, N., Rahman, A., Cohen, S. & Lowry, C., 2021. The role of realistic channel geometry representation in hydrological model predictions. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 57(2), pp.222–240.
- 15- Knapp, J.L., González-Pinzón, R., Drummond, J.D., Larsen, L.G., Cirpka, O.A. & Harvey, J.W., 2017. Tracer-based characterization of hyporheic exchange and benthic biolayers in streams. *Water Resources Research*, 53(2), pp.1575–1594.
- 16- Knapp, J.L.A. & Kelleher, C., 2020. A perspective on the future of transient storage modeling: Let’s stop chasing our tails. *Water Resources Research*, 56(3), e2019WR026257.
- 17- Lambert, R.J.W., Mytilinaios, I., Maitl, L. & Brown, A.M., 2012. Monte Carlo simulation of parameter confidence intervals for non-linear regression analysis of biological data using Microsoft Excel. *Computational Methods and Programs in Biomedicine*, 107, pp.155–163.
- 18- Leong, T.Y., 2007. Monte Carlo spreadsheet simulation using resampling. *INFORMS Transactions on Education*, 7, pp.188–200.
- 19- Li, J., He, L., Lu, H.W. & Fan, X., 2014. Stochastic goal programming based groundwater remediation. Javernick, L., Brasington, J. & Caruso, B., 2014. Modelling the topography of shallow braided rivers using Structure from Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213, pp.166–182.
doi:10.1016/J.GEOMORPH.2014.01.006
- 20- Li, T., Douglas, K.A., Le, H.P., Raz, A.K., Huang, W.J. & Fentiman, A.W., 2020. Applying Social Constructivism in Model-based Systems Engineering Online Instructional Module for Engineering Professionals. In: 2020 *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, Uppsala, Sweden, 21–24 October 2020. IEEE. DOI: 10.1109/FIE44824.2020.9274251.
- 21- Mahmood, K.M. and Mohammed-Ali, W.S. (2025) ‘A hydraulic performance model of Khassa Chai River under varying flow conditions’, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(2), pp. 20934–20940. <https://doi.org/10.48084/etasr.9675>
- 22- Matott, L.S., Babendreier, J.E. & Purucker, S.T., 2009. Evaluating uncertainty in integrated environmental models: a review of concepts & tools. *Water Resources Research*, 45(6), pp.1–14.
- 23- Oakley, J.E. & O’Hagan, A., 2004. Probabilistic sensitivity analysis of complex models: a Bayesian approach. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 66(3), pp.751–769.
- 24- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J.W., Rougier, J., Stephenson, D.B. & Wagener, T., 2016. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, pp.214–232.
- 25- Ren, L., He, L., Lu, H. & Chen, Y., 2016. Monte Carlo based interval transformation analysis for multi criteria decision analysis of groundwater management strategies under uncertain naphthalene concentrations and health risks. *Journal of Hydrology*, 539, pp.468–477.
- 26- Siedersleben, J., Jocham, S., Aufleger, M. & Klar, R., 2021. Morphodynamic modelling with uncertain geometry input. *Water*, 13(16), 2248.
- 27- Tennakoon, T., Lai, T.W., Chan, K.C., Liu, C.-H., Leung, R.C.K., Chao, C.Y.H. & Fu, S.C. (2025) ‘Leveraging microchannel cross-sectional geometry for acoustophoretic manipulation of submicron particles’, *Ultrasonics*, 149, 107570.

- 28- Tian Qin & Boccelli, D.L., 2019. Estimating distribution system water demands using Markov chain Monte Carlo. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(7), 04019023.
- 29- Tian, H., Yao, C., Ren, Z., Zeng, Z., Guo, J., Yu, M. & Xia, C. (2025) 'Cross-sectional geometrical characteristic for the bends along the lower Jingjiang reach', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 178(1), pp. 18–27.
- 30- Vatanchi, S.M. and Maghrebi, M.F. (2024) *Calibration and uncertainty analysis for isovel contours-based stage–discharge rating curve by sequential uncertainty fitting (SUFI-2) method*. *Water Resources Management*, 39(4), pp. 1655–1676. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-04039-9>
- 31- Wagener, T. & Pianosi, F., 2019. What has Global Sensitivity Analysis ever done for us? A systematic review to support scientific advancement & to inform policy-making in earth system modelling. *Earth Science Reviews*, 194, pp.1–18.
- 32- Ward, A.S. & Packman, A.I., 2019. Advancing our predictive understanding of river corridor exchange. *Water Resources Research*, 6(1), e1327.
- 33- Warmink, J.J., van der Klis, H., Booij, M.J., & Hulscher, S.J.M.H. (2011). *Identification and quantification of uncertainties in a hydrodynamic river model using expert opinions*. *Water Resources Management*, 25(2), 601–622.
- 34- Wong, J.S., Freer, J., Bates, P., Warburton, J. & Coulthard, T., 2021. Assessing the hydrological and geomorphic behaviour of a landscape evolution model within a limits of acceptability uncertainty analysis framework. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(10), pp.1981–2003.
- 35- Yue, S., Chen, M., Song, J., Yuan, W., Chen, T., Lü, G., Chen, C., Ma, Z., Xu, K., Wen, Y. & Song, H., 2020. Participatory intercomparison strategy for terrestrial carbon cycle models based on a service-oriented architecture. *Future Generation Computer Systems*, 112, pp.449–466.