



Research Article

Mathematical Modeling of Uncertainty in River Cross-Sections on Hydrodynamic Parameters of Steady Flow

Raziyeh Valizadeh, Mahdi Mazaheri * and Jamal Mohammad Vali Samani

Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* corresponding author: (m.mazaheri@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 13 April 2024

Revised: 7 July 2024

Accepted: 13 August 2024

Keywords:

Monte Carlo,
Normal Distribution,
Uniform Distribution,
River Cross Sections

Abstract

In order to analyze the uncertainty of the geometric characteristics of the river on the hydrodynamic model, the uncertainty of the river cross-sections was investigated for a hypothetical example and a real river. Accordingly, taking into account 5%, 10% and 20% errors in the harvested points and $\pm 6\%$, $\pm 3\%$ and 0 errors in the entire section, 15 scenarios were defined for generating new cross-sections. In order to investigate the effect of the selected distribution in generating random points on the output results, the random points of each section in each of the proposed scenarios were generated once by normal distribution and once again by uniform distribution. Five statistical indicators were used in river analysis mode and section by section analysis to analyze the two characteristics of the flow output, i.e. velocity and cross-sectional area. The results indicate that with the increase of the error in picking the points of each cross-section, the thickness of the 95% confidence interval, the coefficient of variation, the dispersion index and the result of dividing the actual value of each characteristic by the deviation from the criterion of that characteristic in different repetitions for both river and cross-sectional conditions increases. This is despite the fact that increasing the error of the entire section does not change much in the output of the results. By comparing the results of the two mentioned distributions, the uncertainty indices in the scenarios implemented with a uniform distribution show more dispersion. The result of dividing the thickness of the 95% confidence interval by the standard deviation of the data in each scenario in both distributions is also around a constant axis with little fluctuation in change. The results of the investigation of two types of systematic and random errors showed that the change of systematic error does not impose uncertainty on the output of the model. Also, in the case of normal error distribution, with the increase of the percentage of error, the statistical indicators change in such a way that the statistical indicators do not undergo unacceptable fluctuations up to the 20% error that was investigated in this study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:

Valizadeh, R., Mazaheri, M. and Vali Samani, J. 2025. Mathematical modeling of uncertainty in river cross-sections on hydrodynamic parameters of steady flow, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 28-41.
<https://doi.org/10.24200/j30.2024.64363.3320>



مدل سازی ریاضی عدم قطعیت در مقاطع عرضی رودخانه در پارامترهای هیدرودینامیک جریان در حالت ماندگار

راضیه ولی زاده، مهدی مظاهری* و جمال محمد ولی سامانی

دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (m.mazaheri@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵	با توجه به رشد کاربرد مدل سازی آب های سطحی، یکی از مسائل مهم در فرآیند مدل سازی، شناسایی منابع عدم قطعیت است. به منظور تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار، عدم قطعیت مقاطع رودخانه برای یک مثال فرضی و یک رودخانه‌ی واقعی بررسی شده و با در نظر گرفتن خطاهای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد در نقاط برداشت شده و خطاهای ± 3 ، ± 6 ، و ۰ درصد در کل مقطع، ۱۵ سناریو برای تولید مقاطع تصادفی جدید یکبار از طریق توزیع نرمال و باردیگر توسط توزیع یکنواخت تعریف شده‌اند. در پژوهش حاضر مشخص شده است که در صورت احصاء مقاطع عرضی رودخانه از نقشه برداری یا تصاویر ماهواره‌ای یا هر روش دیگر، چه میزان خطا در مقاطع مذکور، چه خطایی را در نهایت در متغیرهای جریان در بر خواهند داشت. نتایج حاصل از بررسی دو نوع خطای سیستماتیک و تصادفی نشان داده است که تغییر خطای سیستماتیک بر خروجی، مدل عدم قطعیتی را تحمیل نمی کند. در حالی که با افزایش عدم قطعیت، مشخصات هندسی رودخانه حاصل از خطای تصادفی، عدم قطعیت مشخصه های جریان افزایش می یابد.
واژگان کلیدی:	
مونت کارلو،	
توزیع نرمال،	
توزیع یکنواخت،	
مقاطع عرضی رودخانه.	

۱. مقدمه

یکی از چالش های مهم پیش روی شناسایی مشخصات جریان در رودخانه ها، وجود عدم قطعیت ها در پارامترهای ورودی و خروجی است؛ که از جمله ی آن ها می توان به عدم قطعیت موجود در مشخصات هندسی رودخانه اشاره کرد، که همواره به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در مدل سازی جهت اندازه گیری دبی، سطح مقطع، و میزان اختلاط آلاینده در رودخانه ها مورد توجه پژوهشگران بوده است. در تعیین پارامترهای هندسی، همواره روش های نقشه برداری میدانی دقیق ترین روش ها هستند و عدم قطعیت کمتری نسبت به سایر روش ها، از جمله استفاده از تصاویر ماهواره ای دارند. اجرای عملیات نقشه برداری در مناطق کوهستانی به دلیل صعب العبور بودن ممکن نیست و یا با هزینه ی عملیاتی زیادی همراه است. همچنین رودخانه ها تحت تأثیر عوامل مختلفی، از جمله خصوصیات زمین شناسی منطقه و شرایط هیدرولیکی جریان، تغییر پذیری دارند. عوامل ذکر شده باعث می شوند که مشخصات هندسی رودخانه به طور مداوم دستخوش تغییرات شود؛ در نتیجه، داده های حاصل از نقشه برداری مستقیم در طولانی مدت قابل استفاده نیستند. بنابراین، انجام مطالعات گسترده در زمینه ای که عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه را در مدل هیدرودینامیک تحلیل کند، ضروری به نظر می رسد.

منظور از عدم قطعیت، میزان خطا در اندازه گیری یا برآورد یک پارامتر است، که می تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی، از قبیل: خطای انسانی، خطای دستگاه های اندازه گیری، یا خطای روش های استفاده شده در اندازه گیری باشد و به عنوان رخداد پدیده هایی که خارج از کنترل انسان است، تعریف می شود.^[۱] به طور کلی، عدم قطعیت ها از خطاهای اندازه گیری مرتبط با ورودی سیستم، مشکلات ساختاری مدل به دلیل فرضیات و ساده سازی و تقریب در تعیین پارامترها ناشی می شوند.^[۲] عدم قطعیت های طبیعی، عدم قطعیت مربوط به مدل، فراسنجه ها، و داده های ورودی آن، و عدم قطعیت های عملکردی از جمله منابع مولد عدم قطعیت در مدل های مذکور هستند.^[۳ و ۴] اندازه گیری مستقیم پارامترها معمولاً کاری فشرده، زمانبر، و پرهزینه است، که منجر به عدم قطعیت در سیستم های مدل سازی می شود.^[۵] ممکن است حتی در مدل های خیلی پیچیده با واسنجی مطلوب، اطلاعات ورودی مدل نیز عدم قطعیت داشته باشند؛^[۶] بنابراین مسئله ی عدم قطعیت، یکی از مهم ترین بازدارنده ها در کاربرد نتایج مدل سازی در مسائل واقعی است و کمی سازی عدم قطعیت پیش بینی نتایج هر مدل سازی با توجه به اهداف خاص آن ضروری به نظر می رسد.^[۷]

روش های متعددی جهت به کمیت درآوردن عدم قطعیت موجود در شبیه سازی وجود دارد، که از جمله ی آن ها می توان به روش های آماری و روش های

به صورت تحلیلی برای کانال های مثلثی و سهمی حل شود. گرمالدی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۰] به مطالعه ای اثر هندسه ی رودخانه در مدل های هیدرولیکی پیش بینی سیل پرداخته و روشی را برای نشان دادن هندسه ی رودخانه با استفاده از زمان و هزینه ی محدود ایجاد کرده اند. شبیه سازی مدل براساس هندسه ی ساده ی رودخانه با استفاده از ترکیبی از فرمول های تجربی موجود در سطح جهان، داده های سنجش از دور و تعداد محدودی از اندازه گیری ها انجام شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد. بهروز و همکاران (۲۰۱۴)^[۲۱] به تحلیل حساسیت عدم قطعیت های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، و اقتصادی در طراحی سیستم های کنترل سیلاب پرداخته و جهت تحلیل عدم قطعیت ها از روش مونت کارلو استفاده کرده اند. هوانگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۲] به مطالعه ای عدم قطعیت در شکل هیدروگراف سیل، پیش بینی سیل، ظرفیت دبی مخازن، منحنی های ذخیره ی سطح آب، و تأثیر موج باد در حین عملیات کنترل مخزن سیل پرداخته و با در نظر گرفتن عدم قطعیت های متعدد، ارزیابی جامعی از خطر سیل در طول عملیات کنترل مخزن سیل با استفاده از روش LHS ارائه داده اند.

روش GLUE تخمین عدم قطعیت تشابه های عمومی، یکی از روش های متداول در تحلیل عدم قطعیت پارامترها در مدل سازی هاست، که بیون و باینلی^{۱۴} (۱۹۹۲) آن را پیشنهاد کرده اند، که در آن شبیه سازی مونت کارلو و تئوری بیز تلفیق شده است.^[۲۳] در روش GLUE، عدم قطعیت در همه ی اجزاء مدل (ورودی ها، پارامترها، متغیرهای حالت، و غیره) به صورت یکجا در نظر گرفته می شود؛ در حالی که در برخی روش ها، عدم قطعیت اجزاء مختلف مدل، به صورت مجزا برآورد می شود. تجزیه و تحلیل روش عدم قطعیت GLUE در مطالعه ی ناندینگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۴] نشان می دهد که توزیع پارامترهای شبیه سازی GLUE نه فقط به انتخاب مقادیر آستانه بستگی دارد، بلکه به کیفیت تخمین های بارندگی و خود پارامتر نیز بستگی دارد و هر عاملی که در کیفیت تخمین داده های بارندگی تأثیر می گذارد، در عدم قطعیت پارامتر و در نتیجه شبیه سازی دبی تأثیر خواهد داشت. بررسی کارایی تحلیل عدم قطعیت ضریب های مدل شبه دو بُعدی توزیع سرعت و تنش برشی در رودخانه ها،^[۲۵] ضریب های نفوذ در مدل سازی حرکت آب در خاک،^[۲۶] تحلیل بیزین عدم قطعیت تراز سطح آب در رودخانه ها،^[۲۷] و عدم قطعیت اندازه گیری دبی و منحنی دبی - اشل رودخانه ها،^[۲۸] از جمله مواردی است که نشانگر کاربرد موفق تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل های هیدرولیکی در مهندسی رودخانه است. همان طور که گفته شد، منابع مولد عدم قطعیت باعث ایجاد ابهام، کاهش دقت، و کاهش قابلیت اطمینان در تفسیر نتایج می شود. برآورد مطمئن ویژگی های هیدرولیکی جریان در رودخانه ها، و کسب دانش دقیق از عدم قطعیت های موجود در نتایج مدل های هیدرولیکی در بررسی های مهندسی رودخانه، ساماندهی رودخانه ها، مدیریت سیلاب، و مدیریت ظرفیت انتقال رودخانه ها اهمیت بارزی دارد.^[۲۹ و ۳۰] ادغام تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در طراحی سازه های هیدرولیکی می تواند بینشی در مورد راهبردهای مدیریت ارائه

مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو^۱ و نمونه گیری تصادفی،^[۸] برآورد عدم قطعیت با نمونه گیری بازگشتی،^[۹] تحلیل عدم قطعیت مبتنی بر نظریه ی اطلاعات بیزین^۲، الگوریتم مونت کارلو زنجیر مارکوف^۳،^[۱۰] روش گشتاور دوم مرتبه ی اول پیرامون میانگین (MFOSM^۴)،^[۱۱] و روش عمومی عدم قطعیت همانندی،^[۱۲] اشاره کرد. انتخاب هر کدام از روش های مذکور به ماهیت موضوع مورد نظر، از جمله در دسترس بودن اطلاعات، پیچیدگی مدل، نوع، و دقت نتایج مورد نظر بستگی دارد. روش مونت کارلو، یک روش عمومی تحلیل عدم قطعیت محسوب می شود و فرضیات کمتری نسبت به سایر روش ها دارد؛ و در آن، مقادیر تصادفی هر یک از متغیرهای غیرقطعی با توجه به توزیع های احتمالاتی مربوط به آن ها تولید و مدل چندین بار با مجموعه های مختلف متغیرهای ورودی اجرا می شود. در پژوهش دیمتریادیس^۵ و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۳] حساسیت عمق آب و حجم سیلاب در برابر متغیرهای دبی جریان، شیب های طولی و عرضی، زبری، و اندازه ی سلول شبکه ارزیابی و نشان داده شده است که به طور کلی، عدم قطعیت حجم سیلاب با افزایش دبی، شیب طولی، و زبری کانال کاهش می یابد. مطالعات آپل^۶ و همکاران (۲۰۰۸)^[۱۴] و بوزی^۷ و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۵] نیز به ترتیب به منظور کمی سازی عدم قطعیت پارامتر در رابطه ی دبی - اشل و بررسی عدم قطعیت زبری و دبی بر محاسبات تراز سطح آب در چارچوب مونت کارلو صورت گرفته است.

از روش های دیگر محاسبه ی عدم قطعیت می توان به روش های LHS^۸، GLUE^۹، هار، و... اشاره کرد. در روش LHS، نمونه ها و اجراهای کامپیوتری کمتری نیاز است تا بتوان به درجه ای از دقت که قابل مقایسه با نمونه گیری تصادفی از پارامترهای ورودی باشد، دست یافت.^[۱۶] از مطالعات صورت گرفته به روش LHS می توان به این موارد اشاره کرد: وول^{۱۰} (۱۹۹۸)^[۱۷] مطالعاتی در زمینه ی عدم قطعیت دبی در ارتباط با ضریب زبری انجام داده و دریافته است که روش تخمین دبی با مدل Step-Backwater، بهتر و کم خطا تر از روش های غیرمستقیم برآورد دبی است. محمدزاده و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۸] با استفاده از اطلاعات هندسی و هیدرولیکی مقطع رودخانه، رابطه ی دبی - اشل را محاسبه کرده اند. یکی از اطلاعات مذکور، ضریب زبری مانینگ است، که برای محاسبه ی ضریب زبری رابطه ی دقیقی وجود ندارد و بنابر تجربه ی شخصی و جدول های مرجع تخمین زده می شود. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که هر چه دقت تعیین ضریب زبری به عنوان پارامتر ورودی بیشتر باشد، عدم قطعیت در تخمین دبی کاهش خواهد یافت. جفری^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۹] به مطالعه ی ترکیب مؤثر عدم قطعیت هندسه ی مقطع کانال در مدل های طغیان سیل در مقیاس منطقه ای و جهانی پرداخته اند. هدف ایشان، ایجاد یک متغیر پیوسته بوده است، که می تواند برای نشان دادن تنوع شکل کانال ساده نزدیک مثلث و نزدیک مستطیل استفاده شود. مطالعه ی ایشان، رویکرد یک ساختار مدل انعطاف پذیر را ارائه داده است که می تواند کانال های مختلف را آزمایش کند. مدل هندسه ی جدید با استفاده از یک آزمون آزمایشی ساده براساس یک کانال مستقیم با خواص کانال و هندسه های ثابت قابل تأیید است، که می تواند

^۹ Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

^{۱۰} Wohl

^{۱۱} Jeffrey

^{۱۲} Grimaldi

^{۱۳} Huang

^{۱۴} Beven & Binley

^{۱۵} Nanding

^۱ Monte Carlo simulation

^۲ Bayesian information-theoretic

^۳ Markov chain Monte Carlo simulation

^۴ Mean First-Order Second-Moment

^۵ Dimitriadis

^۶ Apel

^۷ Bozzi

^۸ Latin hypercube sampling

در نظر گرفتن نقاط هر مقطع به عنوان مولدهای عدم قطعیت، عدم قطعیت کلی مقطع هم به عنوان عاملی از ΔZ_{max} آن مقطع در نظر گرفته شده است.

۲. مبانی تئوری و روش‌ها

همان‌طور که عنوان شده است، تاکنون پژوهشی در خصوص تحلیل عدم قطعیت مقاطع رودخانه بر مدل هیدرودینامیک انجام نشده است. در پژوهش حاضر، اثر تغییر شکل مقاطع رودخانه در مشخصات جریان در حالت ماندگار با استفاده از شاخص‌های آماری محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪، ضریب تغییرات، ضریب پخشیدگی، نسبت ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر مقدار واقعی داده‌ها، و ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر انحراف از معیار داده‌ها در دو مثال از یک رودخانه‌ی فرضی و یک رودخانه‌ی واقعی تحلیل و مقایسه شده است.

۱.۲. حل معادله‌های حاکم بر جریان ماندگار

انواع جریان در کلنال‌های روباز به دو گروه جریان‌های ملندگار و غیرملندگار تقسیم می‌شوند. در جریان ماندگار در یک نقطه از مسیر، جریان با گذشت زمان تغییر نمی‌کند و در جریان غیرماندگار عکس این موضوع اتفاق می‌افتد. اساس معادله‌ی حاکم بر جریان ماندگار، معادله‌ی انرژی در دو مقطع متوالی است. انرژی در هر مقطع از رودخانه مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود.

$$E = y \cos^2 \theta + Z + \alpha \frac{Q^2}{A^2 2g} \quad (1)$$

که در آن، E انرژی مقطع، y عمق آب در مقطع، θ زاویه‌ی شیب کلنال، Z اختلاف ارتفاع از سطح مبنا، Q دبی جریان، A سطح مقطع جریان، g شتاب گرانش، و α ضریب تصحیح انرژی جنبشی هستند.

اگر دو مقطع متوالی از یک رودخانه در نظر گرفته شود، جریان با عبور از مقطع ۱ و رسیدن به مقطع ۲، دچار افت انرژی خواهد شد. معادله‌ی حاکم بین دو مقطع ۱ و ۲، مطابق معادله‌ی ۲ خواهد بود. مقدار افت انرژی نیز مطابق معادله‌ی ۳ محاسبه خواهد شد. [۳۳]

$$y_1 \cos^2 \theta + Z_1 + \alpha_1 \frac{Q^2}{A_1^2 2g} - h_f = y_2 \cos^2 \theta + Z_2 + \alpha_2 \frac{Q^2}{A_2^2 2g} \quad (2)$$

$$h_f = S_f L \quad (3)$$

که در آن، h_f افت انرژی است. L فاصله‌ی بین دو مقطع متوالی و S_f شیب خط انرژی است، که از معادله‌ی مانینگ (رابطه‌ی ۴) محاسبه می‌شود.

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

که در آن، Q دبی جریان، A سطح مقطع، و R شعاع هیدرولیکی هستند. با حل معادله‌های اخیر و با در نظر گرفتن مقدار ثابت دبی، مشخصات جریان در هر مقطع تعیین می‌شود. در هر مرحله با تولید نقاط تصادفی، مقاطع تصادفی ساخته می‌شوند و از کنار هم قرار گرفتن مقاطع مذکور، رودخانه‌های تصادفی جدید تشکیل خواهند شد. این بدین معناست که هر بار مشخصات هندسی تصادفی جدیدی وارد معادله‌های مذکور می‌شوند و در هر مرحله با توجه به مشخصات هندسی جدید، خروجی‌های جریان محاسبه خواهد شد.

۲.۲. تعیین تابع توزیع احتمال جهت تولید مقاطع تصادفی

در روش‌های تحلیل عدم قطعیت استفاده از تابع توزیع احتمال مناسب، اهمیت بسیار ویژه‌ای در تسریع جواب دارد. مهم‌ترین عامل مؤثر در کیفیت نتایج

دهد، که ممکن است حالت‌های بالقوه‌ی شکست، عدم قطعیت‌ها، و خطرهای مرتبط را در نظر بگیرد. [۳۰]

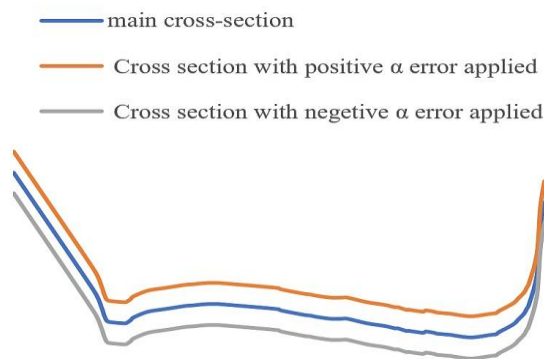
تاکنون بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی واسنجی، راستی‌آزمایی، و ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولیکی در تحلیل جریان رودخانه‌ها انجام شده است. [۳۱] و [۳۲] درستی مدل‌سازی و سودمندی بررسی‌های اخیر به دقت اندازه‌گیری‌های میدانی و واسنجی مدل هیدرولیکی بستگی دارد. [۲۶] بنابراین لازم است در تحلیل نتایج مدل‌های هیدرولیکی، عدم قطعیت نتایج در نتیجه‌ی فراسنجه‌های مدل‌سازی بررسی شود.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، تاکنون مطالعه‌ای که به‌طور خاص عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه را بررسی کند، انجام نشده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از روش مونت کارلو با تعیین توزیع مناسب به بررسی عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر دو مشخصه‌ی اصلی جریان، یعنی سرعت و سطح مقطع، با در نظر گرفتن خطا در برداشت هر نقطه از مقطع و لحاظ خطای کل مقطع پرداخته شده است. خطاهای تصادفی منجر به اندازه‌گیری‌هایی می‌شوند که به روشی غیرقابل پیش‌بینی دقیق نیستند و نتیجه‌گیری‌های کمتر قطعی را در پی دارند. علاوه بر وجود خطاهای تصادفی، توجه به امکان بروز خطاهای سیستماتیک نیز ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن دو خطای تصادفی و سیستماتیک در برداشت مشخصات هندسی مقاطع، به تحلیل مشخصه‌های جریان ماندگار پرداخته شده است. دقت شود که در رودخانه‌های دائمی، جریان غالب در رودخانه‌ها، عمدتاً ماندگار یا دست‌کم شبه‌ماندگار است. شبه‌ماندگار بدین معناست که با وجود دبی پایه در رودخانه‌ها، تغییرات زمانی سطح آب و دبی در مقاطع مختلف رودخانه کم است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. جریان غیرماندگار کامل در زمان سیلاب، رهاسازی ناگهانی سدها و نظایر آن‌ها رخ می‌دهد. از آنجایی که هدف بررسی عدم قطعیت مقاطع است، این امر به نوعی با ترازها و دبی‌های مختلف در مقاطع اتفاق می‌افتد. در جریان‌های غیرملندگار نیز اتفاق مشابهی رخ می‌دهد. از آنجایی که در پژوهش حاضر، تحلیل جریان ماندگار با دبی و ترازهای مختلف آب انجام شده است، تغییرات سطح آب و دبی در هر بار در مقطع و به نوعی عدم قطعیت مذکور لحاظ می‌شود و مشلبه جریان غیرماندگار خواهد بود. با روش ذکر شده، ساده‌سازی چشم‌گیری انجام می‌شود و پیچیدگی‌های مربوط به جریان غیرملندگار، مانند حل معادله‌های سنت-ونانت و پیچیدگی‌های مرتبط، تنوع شرایط مرزی و اولیه و تفکیک آثار آن‌ها در عدم قطعیت نهایی و امثال آن، وجود نخواهد داشت.

بروز خطای سیستماتیک، عدم قطعیت یکسانی را به مدل القا می‌کند، در حالی که خطاهای تصادفی برای هر یک از نقاط برداشت شده، مقدار متغیری خواهند داشت. تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر خروجی مدل هیدرودینامیک می‌تواند سبب تخمین مشخصات هندسی رودخانه به نتایج مطلوب با دقت کمتری شود. در پژوهش حاضر، به بررسی دو نوع خطای همزمان سیستماتیک و تصادفی با دو تابع احتمال مختلف در بررسی عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه در حل مدل‌های هیدرودینامیک پرداخته شده است. نکته‌ی قابل توجه در پژوهش حاضر، علاوه بر نکات ذکر شده این است که عدم قطعیت هم به‌صورت نقطه‌ای و هم به‌صورت مقطعی بررسی شده است. بدان معنا که در هر مقطع، خطا در برداشت هر نقطه (X, Z) می‌تواند یک عامل مستقل تولید عدم قطعیت باشد. جدا از

جدول ۱. شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت.

Row	Indicator	Formula	
1	95% Confidence Interval	-	-
2	Coefficient of Variation	$CV = \frac{\sigma}{\mu}$	(7)
3	Dispersion Index	$D = \frac{\sigma^2}{\mu}$	(8)
4	The ratio of 95% confidence interval to standard deviation	$BS = \frac{95\% \text{ bandwidth}}{\sigma}$	(9)
5	The ratio of the 95% confidence interval to the original value	-	-



شکل ۱. اعمال خطای α .

۴.۲. گام‌های اجرا شده

در هر مقطع، $\Delta Z_{\max}$ محاسبه شده است. مقدار خطای کل با در نظر گرفتن یک ضریب ثابت از $\Delta Z_{\max}$ محاسبه و کلیه نقاط (X, Z) هر مقطع به یک مقدار مطابق شکل ۱ جابجا شده‌اند. این اعمال خطا برای شش حالت با مقادیر ± 6 ، ± 3 ، و 0 درصد برای α اجرا شده است. پس از اعمال خطای یکسان برای همه نقاط، از هر نقطه به عنوان یک منبع عدم قطعیت به طور مجزا با استفاده از دو توزیع نرمال و یکنواخت، نقاط تصادفی جدیدی به تعداد زیاد تولید شده است. از تولید نقاط تصادفی، هر بار یک مقطع تصادفی جدید شکل گرفته و به این ترتیب رودخانه‌های تصادفی تولید شده‌اند. در جدول ۲، یک مقطع تولیدشده با توزیع نرمال با درصد خطاهای مختلف α و β ارائه شده است.

همان‌طور که ذکر شد، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی عدم قطعیت مشخصات هندسی بر خروجی‌های جریان است. به همین منظور از روش ذکرشده، مقاطع تصادفی جدیدی با خطاهای مشخص تولید شده است. در هر رودخانه‌ای تصادفی تولیدشده، معادله انرژی برای مقاطع متوالی حل و دو مشخصه جریان یعنی سرعت و سطح مقطع برای هر کدام از مقاطع تغییر یافته محاسبه شده است. محاسبات ذکرشده برای ۱۵ سناریوی عنوان شده در هر یک از توزیع‌های انتخابی به تعداد زیاد اجرا شده است. مشخصه‌های محاسبه‌شده جریان نیز با استفاده از شاخص‌های آماری ذکرشده در جدول ۱ تحلیل شده‌اند.

شبیه‌سازی، مناسب بودن تابع توزیع احتمال برای پارامترهای تصادفی است. [۳۴] انتخاب تابع چگالی احتمال فقط برای به دست آوردن نمونه‌ی پارامترها از فضای پارامتری مرتبط اهمیت دارد. [۳۵] پس از تعیین تابع توزیع احتمال مناسب، مشخصات هندسی رودخانه به طور تصادفی تولید می‌شوند. به دلیل تبعیت خطای پدیده‌های طبیعی از توزیع نرمال، فضای پارامتری یک بار با استفاده از توزیع نرمال و جهت بررسی اثر توزیع انتخابی در عدم قطعیت‌های خروجی، یک بار با استفاده از توزیع یکنواخت ایجاد شده است.

۳.۲. تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه با استفاده از روش مونت کارلو

تحلیل عدم قطعیت نیازمند شناسایی منابع مولد عدم قطعیت و تحلیل آماری آن‌ها به منظور دستیابی به نمونه‌های تصادفی با شمار زیاد است. [۳۶] در پژوهش حاضر، منابع عدم قطعیت برآورد مشخصات هندسی رودخانه، نقاط (X, Z) هستند، که دقت در برداشت آن‌ها با دقت نقشه‌بردار، روش نقشه‌برداری، و... 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 کند. نقاط (X, Z) با توجه به توزیع‌های احتمالاتی عنوان شده از باند عدم قطعیت به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. اساس کار روش‌های تحلیل عدم قطعیت، نمایش ترکیب‌های تصادفی با تولید آن‌ها با توجه به حالت‌های ممکن از عدم قطعیت‌هایی است که در یک مطالعه رخ می‌دهند. بنابراین، با انتخاب نقاط تصادفی از باند عدم قطعیت، مقاطع جدید رودخانه بارها تولید و سپس متناظر با هر یک از مقاطع تولیدشده، مشخصات هندسی محاسبه و وارد مدل هیدرودینامیک می‌شوند. این عمل بارها تکرار و منتج به ایجاد تعداد زیادی نتایج مستقل و جداگانه خواهد شد. در مطالعه‌ی حاضر، نقاط (X, Z) در هر مقطع با 5 ، 10 ، و 20 درصد خطا و کل مقطع ± 6 ، ± 3 ، و 0 درصد در ۱۵ سناریو برای هر کدام از دو توزیع نرمال و یکنواخت تولید شده‌اند. روابط 5 و 6 ، نحوه‌ی تولید نقاط تصادفی جدید را نشان می‌دهند:

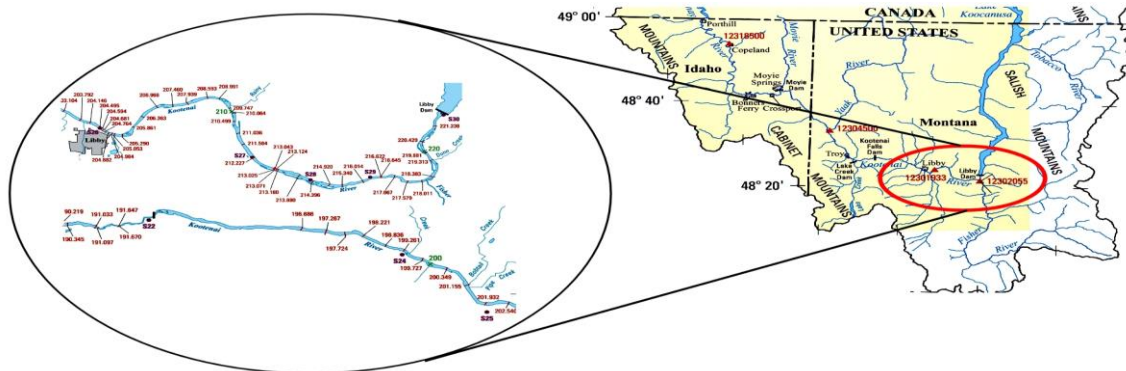
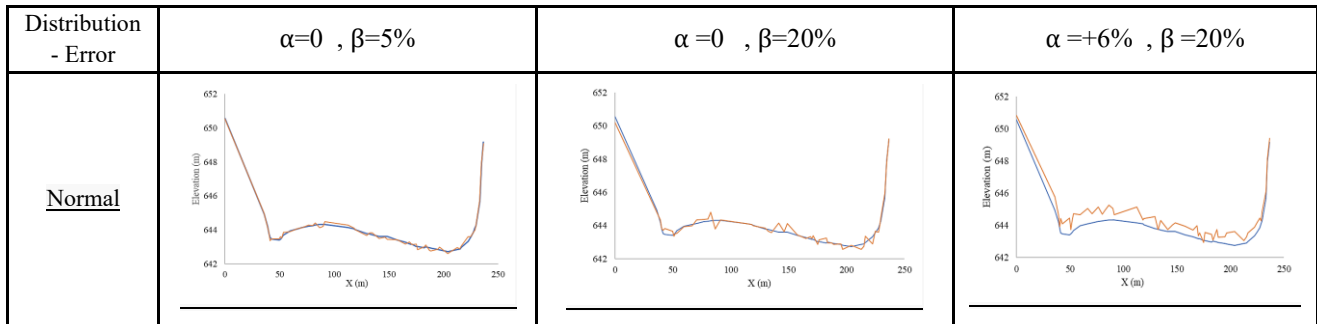
$$\Delta Z_{\max} = Z_{\max} - Z_{\min} \quad (5)$$

$$Z_i = Z_i \pm \alpha \Delta Z_{\max} + \beta \Delta Z_{\max} \quad (6)$$

که در آن‌ها، $\Delta Z_{\max}$ بیشینه‌ی اختلاف ارتفاع نقاط هر مقطع را محاسبه می‌کند. $\alpha \Delta Z_{\max}$ در هر مقطع برای مقادیر ± 6 ، ± 3 ، و 0 درصد برای α اجرا می‌شود. در واقع α بیانگر خطای سیستماتیک مدل است و برای هر مقطع مقدار ثابتی دارد و به آن معناست که $\alpha \Delta Z_{\max}$ کل مقطع را به سمت پایین یا بالا جابجا می‌کند. β بیانگر خطای تصادفی در برداشت هر نقطه است و عدم قطعیت مستقل هر نقطه را نشان می‌دهد و برای هر نقطه از مقطع با توجه به توزیع انتخابی، میزان متغیری دارد و در واقع باعث نوسان مقدار Z در هر نقطه می‌شود. در پژوهش حاضر، مقادیر β با خطاهای 5 ، 10 ، و 20 درصد با دو توزیع نرمال و یکنواخت تولید شده‌اند. Z_i نیز ارتفاع هر نقطه را نشان می‌دهد.

در هر سناریو، تعداد زیادی مجموعه‌ی پارامتر به عنوان پارامترهای ورودی مدل نمونه‌گیری شده‌اند. مدل‌سازی جریان با استفاده از مجموعه‌ی پارامترهای تولیدشده اجرا و نتایج هر اجرا به صورت مجزا ذخیره شده است. برای تحلیل نتایج خروجی و تعیین میزان عدم قطعیت پارامترهای خروجی از ۵ شاخص آماری مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۲. مقاطع تصادفی تولید شده با درصد خطاهای مختلف.



شکل ۲. موقعیت رودخانه کوتنای.

حاصل از مدل سازی با استفاده از شاخص های آماری انجام شده است. فلوچارت روش استفاده شده در پژوهش حاضر در شکل ۳ مشاهده می شود.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تحلیل عدم قطعیت آزمون مثال بررسی شده اول

برای محاسبه شاخص های آماری در تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی در حالت تحلیل رودخانه ای پس از اجرای مدل و محاسبه سرعت و سطح مقطع، میانگین سرعت ها به عنوان سرعت رودخانه و میانگین سطوح مقطع محاسبه شده است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص های عدم قطعیت رودخانه ای سرعت و سطح مقطع به ترتیب در جدول های ۳ و ۴ ارائه شده اند. تغییر ضریب تغییرات سرعت و سطح مقطع، نشانگر افزایش خطای نقاط در هر دو توزیع است، که موجب بروز تغییرهای بیشتری در خروجی های جریان می شود. ضریب تغییرات در واقع پراکندگی داده ها حول میانگین را نشان می دهد؛ که نشان دهنده نسبت انحراف معیار استاندارد به میانگین است. هر چه میزان ضریب تغییرات کمتر باشد، بدین معناست که پراکندگی در اطراف نقطه میانگین کمتر است و داده ها یکدست تر هستند. هر چه میزان ضریب تغییرات بالاتر باشد، نشانه پراکندگی و فاصله ی بیشتر داده ها از میانگین است. مطابق جدول های ۳ و ۴، با افزایش خطا در برداشت نقاط، میزان ضریب تغییرات افزایش یافته است. همچنین با توجه به جدول های مذکور، مقادیر ضریب تغییرات سرعت و سطح مقطع در حالت مقطع کلی ثابت، برای هر کدام از دو توزیع بررسی شده، روند نسبتاً ثابتی را در بر گرفته است.

با توجه به جدول های ۳ و ۴، ضخامت محدوده ی اطمینان ۹۵٪، سرعت و سطح مقطع با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط افزایش یافته است. نتایج حاصل از مقایسه ی دو توزیع نرمال و یکنواخت در محاسبه ی ضخامت باند مذکور

۲.۵. آزمون مثال بررسی شده ارائه شده از مقاطع رودخانه جهت مدل سازی

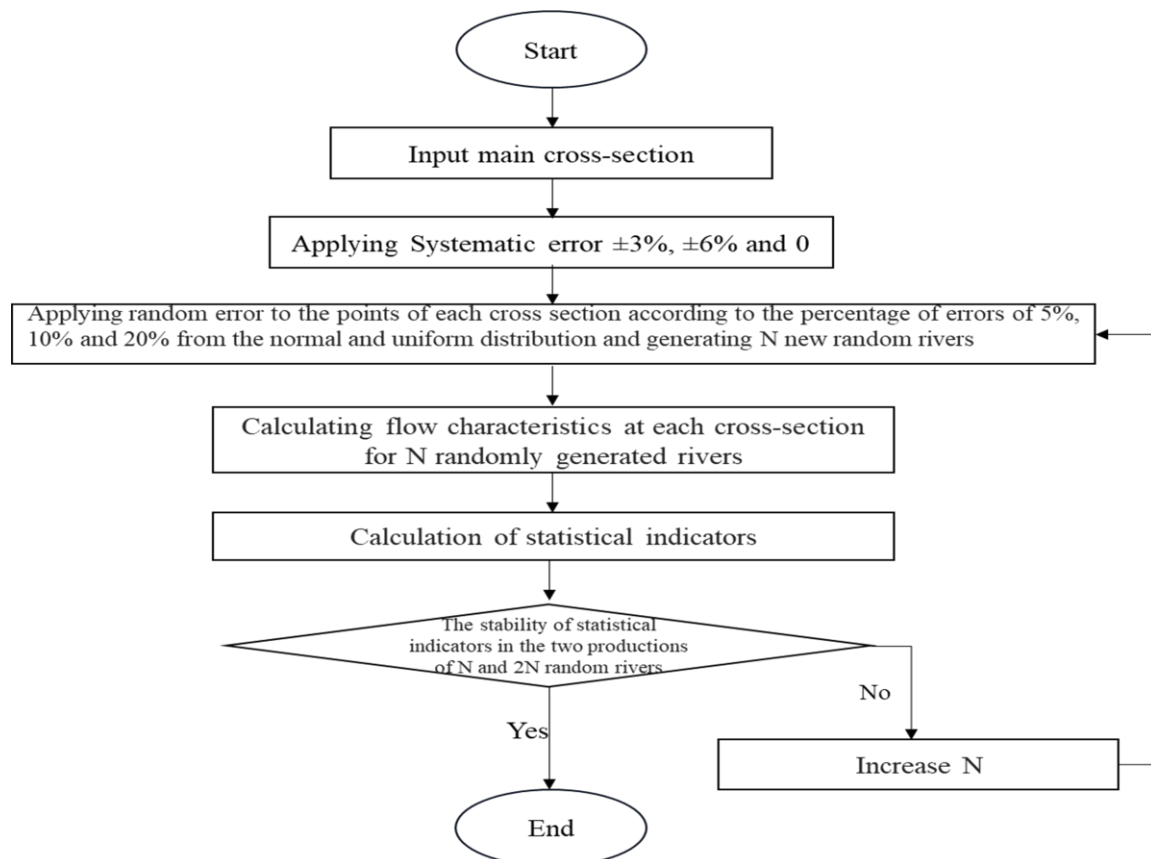
در تعیین رودخانه ی مناسب برای مدل سازی این نکته حائز اهمیت است که علاوه بر اینکه مقاطع قابل اعتماد باشند، داده های در دسترس نیز برای طول قابل قبولی از رودخانه موجود باشند. قابل اعتماد بودن به آن معناست که مقاطع از دید مهندسی قابل پذیرش بوده و شکل منطقی داشته باشند. به منظور ارزیابی و کاربرد روش تحلیل عدم قطعیت پیشنهادی، دو آزمون ارائه شده است، که در مثال بررسی شده اول، مقاطع ساده از یک رودخانه ی فرضی به طول ۱۲ کیلومتر و با تعداد ۲۸ مقطع ارزیابی شده اند. در مثال بررسی شده دوم، نیز عدم قطعیت مقاطع یک رودخانه ی واقعی به طول ۴۵ کیلومتر با تعداد ۴۵ مقطع تحلیل شده است.

۲.۱.۵. آزمون مثال بررسی شده اول: مدل سازی با عدم قطعیت در مقاطع ساده ی یک رودخانه ی فرضی

برای تولید رودخانه ی فرضی با مقاطع منظم ۲۸ مقطع عرضی با تعداد نقاط برداشت شده ی مختلف تولید شده است، که مجموعه ی آن ها یک رودخانه ی فرضی به طول ۱۲ کیلومتر را تشکیل داده اند.

۲.۲.۵. آزمون مثال بررسی شده دوم: مدل سازی با عدم قطعیت در مقاطع یک رودخانه ی واقعی

پس از بررسی مقاطع چند رودخانه ی مختلف، به منظور راستی آزمایی ارائه شده با داده های واقعی، در نهایت بخشی از رودخانه ی کوتنای به عنوان رودخانه ی مورد مطالعه انتخاب شده است؛ که از کشور کانادا سرچشمه می گیرد و از دو ایالت آیداهو و مونتانا می گذرد و سپس به کانادا باز می گردد. بازه ی مطالعه شده در نوشتار حاضر در محدوده ی طول و عرض جغرافیایی (۴۸° ۲۰' - ۴۸° ۳۰' و ۱۱۵° ۴۵' - ۱۱۵° ۲۰') قرار دارد (شکل ۲). [۳۷] داده های مقاطع بازه ی مذکور به طول ۴۵ کیلومتر و ۴۵ مقطع برداشت شده است. طبق توضیحات بیان شده از مقاطع رودخانه ی کوتنای، مقاطع تصادفی تولید و ارزیابی نتایج



شکل ۳. فلوچارت روش استفاده شده در پژوهش حاضر.

جدول ۳. شاخص های عدم قطعیت رودخانه ای سرعت در جریان ماندگار رودخانه ای فرضی.

Index- Distribution		-6%		-3%		0		+3%		+6%	
		Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
5%	coefficient of variation	0.019	0.038	0.021	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04
	Thickness of 95% confidence interval	0.1	0.2	0.1	0.2	0.11	0.2	0.1	0.21	0.1	0.22
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.13	0.24	0.13	0.24	0.13	0.24	0.13	0.25	0.13	0.27
	Dispersion	0.0003	0.0014	0.0003	0.0015	0.0003	0.0015	0.0003	0.0015	0.0003	0.0014
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6.1	6	6	6	6	6.2	6	6.35	6.3
10%	coefficient of variation	0.046	0.081	0.047	0.084	0.048	0.084	0.046	0.083	0.046	0.08
	Thickness of 95% confidence interval	0.22	0.4	0.24	0.4	0.23	0.4	0.24	0.4	0.24	0.41
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.26	0.5	0.28	0.5	0.28	0.5	0.29	0.5	0.29	0.5
	Dispersion	0.0018	0.0055	0.0019	0.0058	0.0019	0.0058	0.0018	0.0056	0.0018	0.0058
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.3	6	6	6	6	6	6.3	6	6.3	6.1
20%	coefficient of variation	0.086	0.17	0.087	0.17	0.085	0.17	0.089	0.17	0.088	0.17
	Thickness of 95% confidence interval	0.44	0.9	0.44	0.95	0.43	0.95	0.45	0.93	0.47	0.91
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.56	1.1	0.54	1.15	0.5	1.16	0.5	1.14	0.58	1.1
	Dispersion	0.006	0.02	0.006	0.025	0.006	0.025	0.006	0.025	0.0064	0.02
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6.5	6.2	6.6	6.1	6.6	6.2	6.6	6.5	6.5

جدول ۴: شاخص‌های عدم قطعیت رودخانه‌ای سطح مقطع در جریان ماندگار رودخانه فرضی.

Index- Distribution		-6%		-3%		0		+3%		+6%	
		Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
5%	coefficient of variation	0.018	0.035	0.018	0.036	0.019	0.036	0.018	0.036	0.018	0.036
	Thickness of 95% confidence interval	31.39	59	31.9	58	31.1	58	31.5	59.2	31.2	60.7
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.11	0.21	0.11	0.21	0.11	0.21	0.11	0.22	0.11	0.22
	Dispersion	0.09	0.35	0.09	0.35	0.09	0.36	0.09	0.35	0.093	0.35
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.3	6	6.2	6.2	6.2	6	6.2	6.2	6.2	6.2
10%	coefficient of variation	0.04	0.071	0.04	0.071	0.04	0.071	0.04	0.071	0.04	0.072
	Thickness of 95% confidence interval	68	118	68.5	117	68	116.9	68	117	66.4	116.3
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.25	0.43	0.25	0.43	0.25	0.42	0.25	0.43	0.24	0.42
	Dispersion	0.43	1.4	0.44	1.4	0.44	1.4	0.43	1.4	0.43	1.4
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6	6.3	6	6.2	6	6.3	6	6.2	6
20%	coefficient of variation	0.074	0.14	0.077	0.14	0.075	0.14	0.076	0.14	0.076	0.14
	Thickness of 95% confidence interval	128	230.4	130	230	129	233	126.5	230	129	229.8
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.47	0.86	0.46	0.87	0.47	0.88	0.46	0.87	0.47	0.84
	Dispersion	1.5	5.5	1.58	4.5	1.5	6.5	1.6	6.5	1.5	5.5
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6.1	6.3	6.1	6.2	6.1	6.3	6.1	6.2	6.1

در هر سناریو است. با افزایش خطا و در نتیجه‌ی آن، افزایش ضخامت باند اطمینان ۹۵٪، بدیهی است که انحراف معیار داده‌ها نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، حاصل تقسیم ضخامت باند اطمینان ۹۵٪ بر انحراف معیار داده‌ها در هر سناریو حول محور ثابتی با نوسان کم در تغییر است.

۲.۳. تحلیل عدم قطعیت آزمون مثال بررسی شده دوم

پس از تحلیل عدم قطعیت، مشخصات هندسی یک رودخانه‌ی فرضی جهت راستی‌آزمایی و مقایسه‌ی نتایج حاصل، به تحلیل عدم قطعیت مقاطع واقعی حاصل از نقشه‌برداری رودخانه کوتنای پرداخته شده است. نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص‌های عدم قطعیت رودخانه‌ای سرعت و سطح مقطع رودخانه کوتنای به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن‌ها، با افزایش خطا در برداشت نقاط، میزان ضریب تغییرات افزایش یافته است. مقادیر ضریب تغییرات سرعت و سطح مقطع در حالت مقطع کلی ثابت، برای هر کدام از دو توزیع بررسی‌شده، روند نسبتاً ثابتی را در بر گرفته است. ضریب تغییرات سرعت در سه خطای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد از توزیع نرمال با ثابت‌بودن شکل کلی مقطع، به ترتیب مقداری برابر با ۰/۰۱۷، ۰/۰۳۶، و ۰/۰۷ داشته است. مقادیر مذکور در خطای اعمال‌شده با توزیع یکنواخت تقریباً دو برابر شده و به ترتیب مقادیر ۰/۰۳، ۰/۰۶، و ۰/۱۳ را در بر گرفته است.

در تحلیل روند ضریب تغییرات سطح مقطع نیز برای مقدار ثابت $\alpha=0$ در سه خطای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد از توزیع نرمال طبق جدول ۶ به ترتیب مقدار ضریب تغییرات برابر با ۰/۰۱۵، ۰/۰۳۱، و ۰/۰۶۱ بوده است؛ که در خطای اعمال‌شده با توزیع یکنواخت افزایش یافته و به ترتیب مقادیر ۰/۰۵۸، ۰/۰۷۱، و ۰/۱۱ را شامل شده‌اند. بنابراین، افزایش عدم قطعیت در داده‌های مربوط به نقاط مقطع باعث افزایش پراکندگی خروجی‌های جریان خواهد شد. با

نشان داد در مقاطعی که نقاط آن‌ها با استفاده از خطای یکنواخت تولید شده‌اند، عدم قطعیت بیشتری وجود دارد. حال اگر درصد خطای نقاط مقاطع در هر کدام از دو توزیع مذکور ثابت در نظر گرفته شود و خطای کل مقطع افزایش یابد، ضخامت باند عدم قطعیت سرعت و سطح مقطع برای ۵ سناریو با خطاهای $\pm 3\%$ ، و 0% درصد در مقطع با در نظر گرفتن مقادیر β ثابت، تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد.

شاخص دیگری که در پژوهش حاضر، ارزیابی شده است، حاصل تقسیم ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر مقدار اولیه‌ی حاصل از مدل‌سازی جریان با شکل اصلی مقطع است. همان‌طور که بیان شد، افزایش خطا در برداشت نقاط مقطع باعث افزایش محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ خواهد شد. بدیهی است تقسیم این مقدار بر مقدار اولیه‌ی متغیر مورد مطالعه با افزایش خطا، رابطه‌ی مستقیم دارد. مقایسه‌ی مقادیر شاخص ذکر شده در تغییر شکل کلی مقطع با درصد تغییرات مذکور نشان داد نوسان کلی دره‌ی رودخانه، تغییری در محاسبه‌ی شاخص اخیر ایجاد نخواهد کرد. بررسی شاخص پراکندگی سرعت و سطح مقطع در تکرار سناریوهای مطرح‌شده با درصد خطاهای عنوان‌شده نیز نشان داد که افزایش خطا باعث افزایش شاخص پراکندگی سرعت و سطح مقطع خواهد شد. با افزایش میزان خطا و در نتیجه‌ی آن، افزایش ضریب تغییرات، انحراف از معیار، و میانگین داده‌ها افزایش خواهد یافت. این افزایش در خطای اعمال‌شده توسط توزیع یکنواخت بیشتر از خطای اعمال‌شده توسط توزیع نرمال برآورد شده است و همانند سه شاخص بررسی‌شده‌ی دیگر با افزایش خطای کل رودخانه، تغییری در روند آن مشاهده نشده است. شاخص دیگری که برای تحلیل کمی خروجی‌های جریان در پژوهش حاضر استفاده شده است، حاصل تقسیم ضخامت باند اطمینان ۹۵٪ بر انحراف معیار داده‌ها

جدول ۵: شاخص های عدم قطعیت رودخانه ای سرعت در جریان ماندگار رودخانه کوتناي.

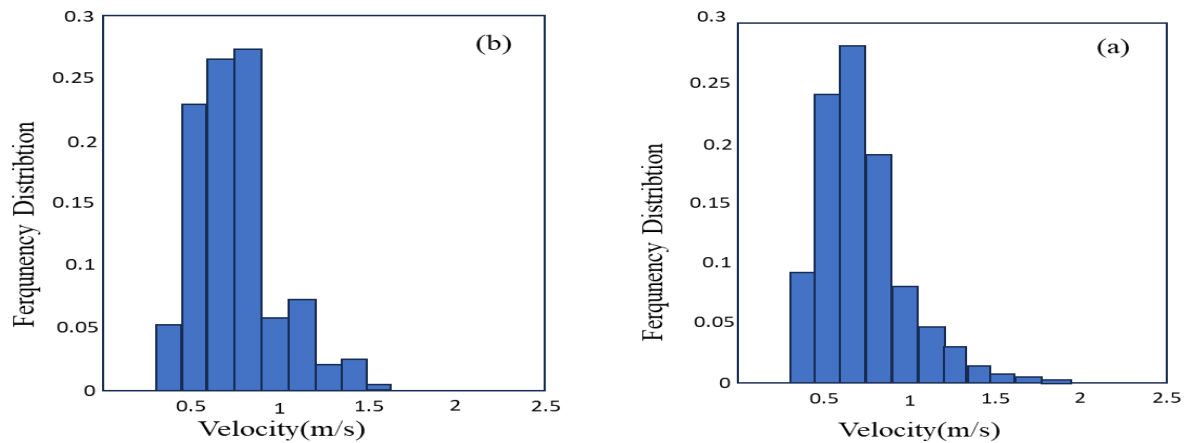
Index- Distribution		-6%		-3%		0		+3%		+6%	
		Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
5%	coefficient of variation	0.0175	0.03	0.017	0.03	0.017	0.03	0.017	0.03	0.0172	0.03
	Thickness of 95% confidence interval	0.0816	0.15	0.08	0.15	0.08	0.16	0.08	0.16	0.0802	0.15
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.108	0.2	0.11	0.2	0.11	0.2	0.11	0.2	0.1057	0.2
	Dispersion	0.00023	0.0008	0.0002	0.0008	0.00021	0.0008	0.00022	0.0008	0.00022	0.0008
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.18	6.1	6.24	6	6.13	6	6.13	6.2	6.22	6.1
10%	coefficient of variation	0.037	0.068	0.037	0.06	0.036	0.06	0.035	0.066	0.036	0.065
	Thickness of 95% confidence interval	0.17	0.32	0.18	0.32	0.17	0.31	0.17	0.3	0.17	0.3
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.23	0.4	0.23	0.4	0.22	0.4	0.22	0.4	0.23	0.4
	Dispersion	0.001	0.0033	0.001	0.0033	0.001	0.0033	0.0009	0.0033	0.0009	0.0033
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.3	6.4	6.3	6.4	6.3	6.3	6.5	6.2	6.33	6.3
20%	coefficient of variation	0.071	0.13	0.07	0.13	0.07	0.13	0.07	0.13	0.069	0.13
	Thickness of 95% confidence interval	0.34	0.7	0.34	0.7	0.33	0.67	0.33	0.67	0.34	0.67
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.44	0.93	0.44	0.9	0.44	0.88	0.46	0.86	0.45	0.88
	Dispersion	0.0037	0.013	0.0037	0.013	0.0035	0.013	0.0036	0.013	0.0035	0.013
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.4	7.1	6.4	6.9	6.6	7	6.4	6.7	6.6	7

جدول ۶: شاخص های عدم قطعیت رودخانه ای سطح مقطع در جریان ماندگار رودخانه کوتناي.

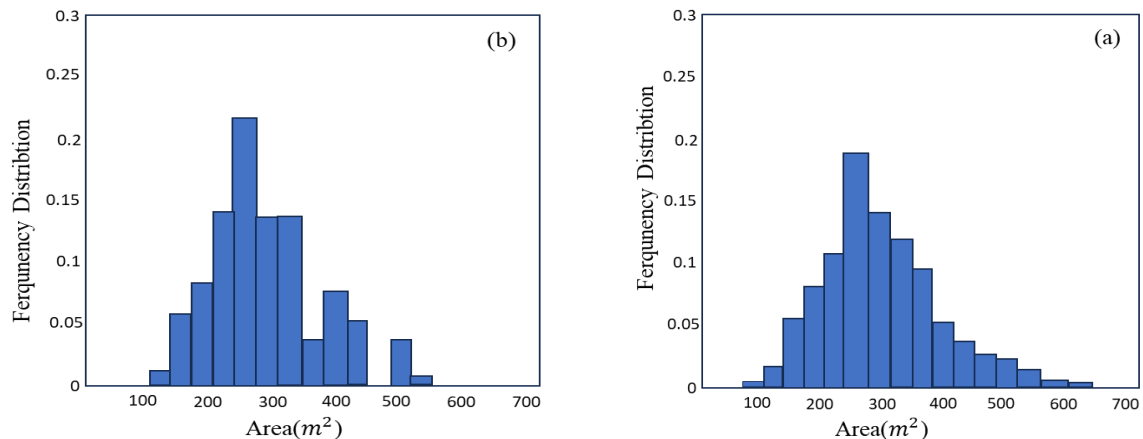
Index- Distribution		-6%		-3%		0		+3%		+6%	
		Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
5%	coefficient of variation	0.015	0.03	0.015	0.03	0.015	0.03	0.015	0.03	0.015	0.03
	Thickness of 95% confidence interval	27.6	52.7	27.7	53.2	27.4	51	28	53.4	27.5	52.7
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.095	0.18	0.095	0.18	0.1	0.18	0.095	0.18	0.094	0.17
	Dispersion	0.068	0.26	0.067	0.26	0.067	0.25	0.066	0.25	0.067	0.25
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6.13	6.2	6.13	6.27	6.13	6.26	6.13	6.16	6
10%	coefficient of variation	0.031	0.06	0.031	0.057	0.031	0.058	0.031	0.058	0.031	0.058
	Thickness of 95% confidence interval	58.9	107	60.5	106.5	60	105.3	58	103.9	58.8	104
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.2	0.35	0.2	0.37	0.2	0.35	0.2	0.33	0.2	0.36
	Dispersion	0.29	1	0.29	1	0.29	1	0.31	1	0.31	1
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.44	6	6.3	6.14	6.3	6.1	6.3	6.2	6.3	6.1
20%	coefficient of variation	0.061	0.11	0.06	0.11	0.061	0.11	0.065	0.11	0.06	0.11
	Thickness of 95% confidence interval	113.3	207	113.1	206.5	114.3	206.3	113	212	114.3	206.2
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.4	0.71	0.39	0.73	0.39	0.71	0.39	0.71	0.4	0.71
	Dispersion	1.1	3.7	1.07	3.8	1.1	3.7	1.1	3.7	1.08	3.7
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.4	6.2	6.25	6.2	6.24	6	6.2	6.1	6.38	6.1

خطای ۵٪ به ضخامت ۰/۱۷ متر بر ثانیه در خطای ۱۰٪ و در نهایت به ضخامت ۰/۳۳ متر بر ثانیه در خطای ۲۰٪ رسیده است. در تحلیل خروجی های سطح مقطع نیز این روند حفظ شده است، به گونه ای که ضخامت باند اخیر در مقاطع تصادفی حاصل از توزیع نرمال برای خطاهای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد به ترتیب ۲۷/۴، ۶۰، و ۱۱۴/۳ مترمربع بوده است. مقادیر ارائه شده برای مقاطع تصادفی حاصل از توزیع یکنواخت افزایش یافته و به ترتیب ۵۱، ۱۰۵/۳، و ۲۰۶/۳ مترمربع بوده است. همچنین مطابق نتایج حاصل از

مقایسه ی ضریب تغییرات برای مقادیر مختلف α با ثابت بودن شکل کلی مقطع در کلیه ی سناریوهای جدول های ۵ و ۶ نیز می توان دریافت که تغییر یکسان کلیه ی نقاط مقطع در محاسبه ی ضریب تغییرات اثر گذار نیست. با توجه به جدول های ۵ و ۶، ضخامت محدوده ی اطمینان ۹۵٪ سرعت و سطح مقطع با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط افزایش یافته است. به گونه ای که در مقاطع تصادفی تولید شده با استفاده از توزیع نرمال، ضخامت این باند در تحلیل سرعت خروجی، بدون تغییر کلی مقطع از حدود ۰/۰۸ متر بر ثانیه در



شکل ۴. توزیع فراوانی سرعت: (a) توزیع یکنواخت، (b) توزیع نرمال.



شکل ۵. توزیع فراوانی سطح مقطع: (a) توزیع یکنواخت، (b) توزیع نرمال.

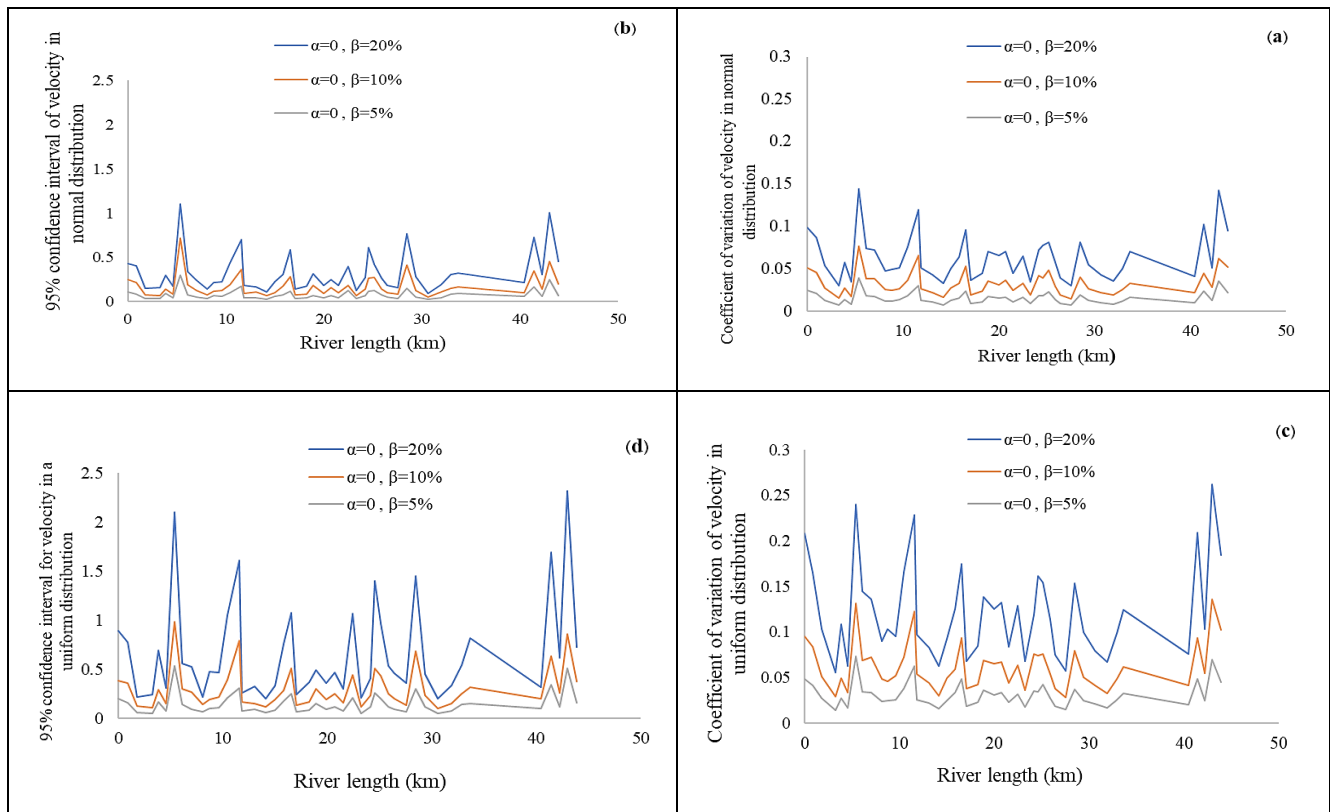
افزایش شاخص مذکور شده است. حاصل تقسیم ضخامت باند اطمینان ۹۵٪ بر انحراف معیار داده‌ها در هر سناریو نیز مطابق رودخانه‌ی فرضی حول محور ثابتی در تغییر بوده است. برای درک بهتر اثر خطای برداشت نقاط و اثر توزیع انتخابی در خروجی‌های جریان، برای چند سناریو از سناریوهای مطرح‌شده، نمودارهای توزیع فراوانی رودخانه‌ای رسم شده است. نمودارهای فراوانی سرعت و سطح مقطع برای خطای ۲۰٪ از هر دو توزیع، در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شوند.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، گستردگی طیف داده‌های سرعت و سطح مقطع در خطای یکنواخت در مقایسه با خطای نرمال بیشتر بوده است. مطابق شکل ۴، مقادیر سرعت در توزیع نرمال دارای بازه‌ی کمتری هستند، که این گستردگی در توزیع یکنواخت بیشتر بوده است. در نتایج حاصل از فراوانی سطح مقطع در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود سطح مقطع در خطای توزیع یکنواخت بازه‌ی ۱۰۰-۵۵۰ مترمربعی را شامل می‌شود، در حالی که با همان درصد خطا در توزیع یکنواخت، این بازه حدوداً ۵۰-۶۵۰ مترمربع است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در تولید نقاط تصادفی با توزیع نرمال از هر نقطه با میانگین خودش در مقطع اصلی و انحراف معیاری برابر با خطای در نظر گرفته‌شده، نقاط جدیدی تولید شده است. این در حالی است که در تولید نقاط تصادفی با توزیع یکنواخت، احتمال بروز هر نقطه در محدوده‌ی تعیین‌شده یکسان است. بدیهی است که نوسان نقاط تصادفی تولیدشده با توزیع نرمال کمتر از نوسان نقاط تصادفی تولیدشده با توزیع یکنواخت بوده است. بنابراین، مقاطع تصادفی حاصل از تولید نقاط با توزیع یکنواخت، تغییرات بیشتری

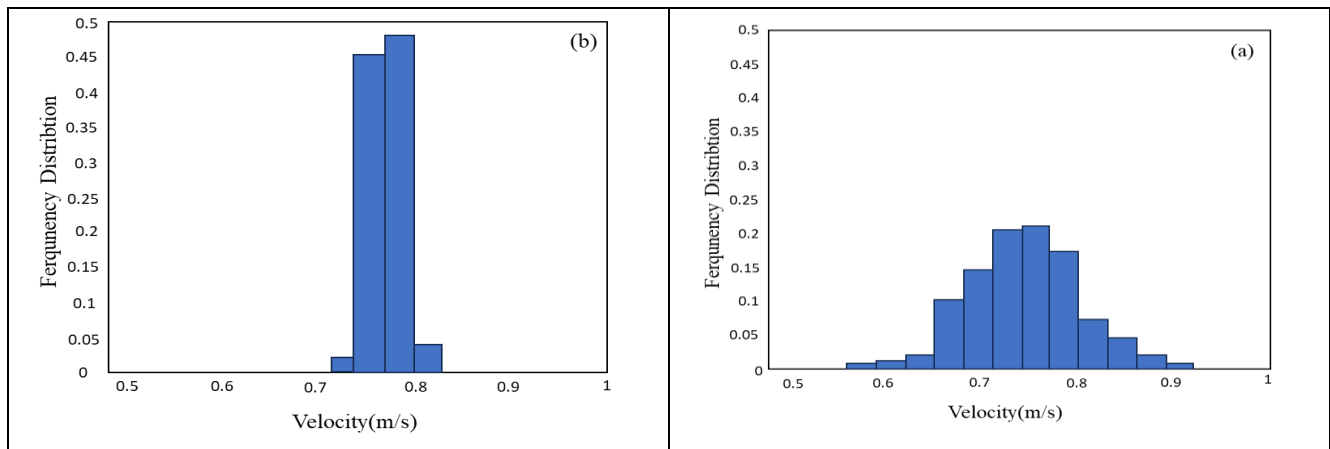
محاسبه‌ی محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ رودخانه‌ی فرضی، افزایش خطای کل مقطع، اثر چندانی در ضخامت باند عدم قطعیت سرعت و سطح مقطع در هیچ‌یک از ۵ سناریوی ذکرشده نداشته است. مطابق جدول ۵، برای خطای ثابت با بتای ۵٪ از توزیع نرمال، مقادیر ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ سرعت در حدود ۰/۰۸ متر بر ثانیه بوده است. این مقادیر در بتای ۱۰٪ از توزیع نرمال به عدد ثابت ۰/۱۷ متر بر ثانیه رسیده و در بتای ۲۰٪ از توزیع نرمال، حدوداً ۰/۳۳ متر بر ثانیه بوده است، که نشان می‌دهد خطایی که شکل اصلی مقطع را تغییر ندهد، اثر چشمگیری در ضخامت محدوده‌ی اطمینان نخواهد داشت. همچنین توزیع یکنواخت در محاسبه‌ی شاخص اخیر، عدم قطعیت خروجی بیشتری را به دنبال دارد.

حاصل تقسیم ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر مقدار اولیه‌ی حاصل از مدل‌سازی جریان برای سرعت بدون در نظر گرفتن خطای کل مقطع، برای خطاهای ۵، ۱۰، و ۱۵ درصد از توزیع نرمال به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۲۲، و ۰/۳۳ و برای همان درصد خطا از توزیع یکنواخت به ترتیب برابر با ۰/۲، ۰/۴، و ۰/۶۷ بوده است. مقادیر ذکرشده برای سطح مقطع جریان به ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۲، و ۰/۳۹ برای خطای حاصل از توزیع نرمال و ۰/۱۸، ۰/۳۵، و ۰/۷۱ برای خطای حاصل از توزیع یکنواخت بوده است، که با نتایج حاصل از آزمون مثال بررسی شده فرضی در تطابق است.

بررسی شاخص پراکندگی سرعت و سطح مقطع در تکرار سناریوهای مطرح‌شده با درصد خطاهای عنوان‌شده نیز نشان داد که افزایش خطا باعث



شکل ۶. (a) و (b) به ترتیب ضریب تغییرات و محدوده‌ی اطمینان سرعت در توزیع یکنواخت؛ (c) و (d) به ترتیب ضریب تغییرات و محدوده‌ی اطمینان سرعت در توزیع نرمال.



شکل ۷. (a) توزیع فراوانی سرعت مقطعی در مقطع تولیدشده با توزیع یکنواخت با خطای ۲۰٪، (b) توزیع فراوانی سرعت مقطعی در مقطع تولیدشده با توزیع نرمال با خطای ۵٪

محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ در تمامی مقاطع افزایش یافته است. عدم یکسان بودن ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بیانگر این مطلب است که هر مقطع مستقلاً عدم قطعیتی را به خروجی‌های مدل القا می‌کند. ضریب تغییرات، شاخص پراکندگی، و حاصل تقسیم ضخامت باند در هر مقطع بر مقدار واقعی مشخصه‌ی مطالعه‌شده در آن مقطع، یعنی سرعت و سطح مقطع، با افزایش خطا، با نوسان بیشتری در تغییر است. مشابه تحلیل نتایج رودخانه‌ای، میزان نوسان شاخص‌های ذکرشده در مقاطع تولیدشده با توزیع یکنواخت از مقاطع تولیدشده با توزیع نرمال بیشتر بوده است. تحلیل شاخص‌های آماری سطح مقطع رودخانه نیز در هر دو مثال بررسی شده بررسی‌شده نیز همین روند را داشته است. در شکل ۷-الف، فراوانی داده‌های سرعت در تکرارهای مختلف از یک مقطع دلخواه با خطای یکنواخت ۲۰٪ از نقاط برداشت‌شده و در شکل ۷-ب، فراوانی داده‌های

داشته‌اند. بنابراین، خطا در توزیع یکنواخت دارای عدم قطعیت بیشتری نسبت به خطا در توزیع نرمال بوده است.

۱.۲.۳. مقایسه‌های مقطعی

تا کنون به بررسی نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص‌های عدم قطعیت رودخانه‌ای پرداخته شده است. در گام بعد، تحلیل کلیه‌ی نتایج به صورت مقطع به مقطع انجام شده است. در شکل ۶، شاخص‌های مقطعی سرعت در $\alpha=0$ برای حالت‌های مختلف عدم قطعیت نقاط برای دو شاخص ضریب تغییرات و محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ در دو توزیع نرمال و یکنواخت مشاهده می‌شوند.

مطابق شکل ۶، در تحلیل نتایج حاصل از شاخص‌های عدم قطعیت مقطعی سرعت به نظر می‌رسد با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط، ضخامت

محاسبه‌ی شاخص‌های عدم قطعیت نتایج نشان داد با افزایش خطا، روند تغییرات پراکندگی داده‌ها، ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪، ضریب تغییرات، و حاصل تقسیم مقدار واقعی هر مشخصه بر انحراف از معیار آن، مشخصه‌ی افزایشی است که به معنای بروز عدم قطعیت بیشتر در خروجی‌های مدل است. با در نظر گرفتن خطاهای تصادفی ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد و خطای سیستماتیک صفر، ضخامت باند عدم قطعیت سرعت به ترتیب مقادیر ۰/۸، ۰/۱۷، و ۰/۳۳ را در بر می‌گیرد. با افزایش میزان خطا، ضخامت محدوده‌ی اخیر افزایش یافته است. تغییرات محدوده‌ی مذکور و سایر آماره‌های بررسی‌شده در پژوهش حاضر در حالت توزیع نرمال تا خطای ۲۰٪ به گونه‌ای است که شرایط حاکم بر جریان را به هم نمی‌زنند.

با در نظر گرفتن ۲۰٪ خطای تصادفی و خطاهای سیستماتیک ± 3 ، ± 6 و ۰ درصد محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ سرعت و سطح مقطع تقریباً ثابت است و نشان می‌دهد که بروز خطاهای سیستماتیک، عدم قطعیتی را به مدل وارد نخواهد کرد.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داده است که تعیین تابع توزیع خطا، یکی از مهم‌ترین عوامل در تسطیح داده‌های نقشه‌برداری به شمار می‌رود. عدم قطعیت با در نظر گرفتن خطای یکنواخت در مقایسه با خطای نرمال به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

سرعت در تکرارهای مختلف از یک مقطع دلخواه با خطای نرمال ۵٪ و خطای ۱۰٪ از کل مقطع مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، فراوانی داده‌ها در درصد خطای نرمال ۵٪ در بازه‌ی کمتری در نوسان هستند؛ لذا، مقادیر خروجی بسیار به هم نزدیک هستند. با افزایش خطا، فراوانی هر بازه کم و گستردگی داده‌ها بیشتر شده است. به گونه‌ای که در مقاطع تصادفی تولیدشده از مقطع شماره‌ی ۴۱ رودخانه کوتنای، خطای نرمال ۵٪ بیشترین فراوانی در کمترین بازه‌ی تغییرات و خطای یکنواخت ۲۰٪، کمترین فراوانی در بیشترین بازه‌ی تغییرات را داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

عدم قطعیت در داده‌های ورودی جزء جدانشدنی مدل‌سازی‌های هیدرولیکی است. در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن دو نوع خطای سیستماتیک و تصادفی در ۱۵ سناریو به تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار پرداخته شده است. مقاطع تصادفی با در نظر گرفتن خطاهای سیستماتیک ± 3 ، ± 6 و ۰ درصد و خطاهای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد تصادفی با دو توزیع نرمال و یکنواخت برای هر سناریو به تعداد ۸۰۰ بار تولید و به عنوان عامل عدم قطعیت در نتایج خروجی مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار تحلیل شده‌اند.

با در نظر گرفتن تبعیت خطای تصادفی نقشه‌برداری از توزیع نرمال، با افزایش میزان خطای تصادفی، عدم قطعیت مشخصه‌های جریان افزایش می‌یابد.

References- منابع

1. Fisher, H.B., 1968. Dispersion predictions in natural streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 94(5), pp.927-943. DOI:10.1061/JSEDAI.0000900
2. Blasone, R.S., Vrugt, J.A., Madsen, H., Rosbjerg, D., Robinson, B.A. and Zyvoloski, G.A., 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. *Advances in Water Resources*, 31(4), pp.630-648. DOI:10.1016/j.advwatres.2007.12.003
3. Koo, H., Iwanaga, T., Croke, B.F., Jakeman, A.J., Yang, J., Wang, H.H., Sun, X., Lü, G., Li, X., Yue, T. and Yuan, W., 2020. Position paper: Sensitivity analysis of spatially distributed environmental models-a pragmatic framework for the exploration of uncertainty sources. *Environmental modelling & software*, 134, p.104857. DOI:10.1016/j.envsoft.2020.104857.
4. Teng, J., Jakeman, A.J., Vaze, J., Croke, B.F., Dutta, D. and Kim, S.J.E.M., 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modelling & software*, 90, pp.201-216. DOI:10.1016/j.envsoft.2017.01.006
5. Wu, J. and Zeng, X., 2013. Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation. *Chinese Science Bulletin*, 58, pp.3044-3052. DOI: 10.1007/s11434-013-5950-8.
6. Rojas, R., Kahunde, S., Peeters, L., Batelaan, O., Feyen, L. and Dassargues, A., 2010. Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario uncertainties in groundwater modelling. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), pp.416-435. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.09.016
7. Guo, A., Chang, J., Wang, Y., Huang, Q. and Li, Y., 2020. Uncertainty quantification and propagation in bivariate design flood estimation using a Bayesian information-theoretic approach. *Journal of Hydrology*, 584, p.12467. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124677.
8. Serinaldi, F., 2013. An uncertain journey around the tails of multivariate hydrological distributions. *Water Resources Research*, 49(10), pp.6527-6547. DOI:10.1002/wrcr.20531
9. Dung, N.V., Merz, B., Bárdossy, A. and Apel, H., 2015. Handling uncertainty in bivariate quantile estimation—An application to flood hazard analysis in the Mekong Delta. *Journal of Hydrology*, 527, pp.704-717. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.05.033.
10. Pinheiro, V.B., Naghettini, M. and Palmier, L.R., 2019. Uncertainty estimation in hydrodynamic modeling using Bayesian techniques. *RBRH*, 24, p.e38.

DOI:10.1590/2318-0331.241920180110

11. Eftekharian, L.E.Y.L.A., Abrishamchi, A. and Tajrishi, M., 2005. Uncertainty Analysis of Water Levels of Sistan River and Reliability Analysis of Flood Control System. *Journal of Hydraulics*, 1(1), pp.39-54. [In Persian an]. DOI:10.30482/jhyd.2005.85363
12. Masoumi, F., Najjar-Ghabel, S. and Salimi, N., 2021. Automatic calibration of the two-dimensional hydrodynamic and water quality model using sequential uncertainty fitting approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, pp.1-15. DOI:10.1007/s10661-020-08831-z
13. Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D. and Efstratiadis, A., 2016. Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*, 534, pp.478-492. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.01.020.
14. Apel, H., Merz, B. and Thielen, A.H., 2008. Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management*, 6(2), pp.149-162. DOI:10.1080/15715124.2008.9635344.
15. Bozzi, S., Passoni, G., Bernardara, P., Goutal, N. and Arnaud, A., 2015. Roughness and discharge uncertainty in 1D water level calculations. *Environmental Modeling & Assessment*, 20, pp.343-353. DOI:10.1007/s10666-014-9430-6
16. Papadopoulos, C.E. and Yeung, H., 2001. Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12(4), pp.291-298. DOI:10.1016/S0955-5986(01)00015-2.
17. Wohl, E.E., 1998. Uncertainty in flood estimates associated with roughness coefficient. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(2), pp.219-223. DOI:10.1061/(ASCE)07339429(1998)124:2(219).
18. Mohammadzade Vatanchi, S. and Maghrebi, M., 2022. Uncertainty Analysis of Stage-Discharge Rating Curves In Rivers. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 52(106), pp.157-167. [In Persian] DOI:ceej.tabrizu.ac.ir/article_11115.html
19. Neal, J.C., Odoni, N.A., Trigg, M.A., Freer, J.E., Garcia-Pintado, J., Mason, D.C., Wood, M. and Bates, P.D., 2015. Efficient incorporation of channel cross-section geometry uncertainty into regional and global scale flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 529, pp.169-183. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.026.
20. Grimaldi, S., Li, Y., Walker, J.P. and Pauwels, V.R.N., 2018. Effective representation of river geometry in hydraulic flood forecast models. *Water Resources Research*, 54(2), pp.1031-1057. DOI:10.1002/2017WR021765
21. Behrooz, M., Alimohammadi, S. and Atari, J., 2014. Sensitivity analysis of hydrologic, hydraulic and economic uncertainties in design of flood control systems. *Iran-Water Resources Research*, 10(2), pp.69-81. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_13440.html
22. Huang KangDi, H.K., Ye Lei, Y.L., Chen Lu, C.L., Wang QuanSen, W.Q., Dai Ling, D.L., Zhou JianZhong, Z.J., Singh, V.P., Huang MuTao, H.M. and Zhang JunHong, Z.J., 2018. Risk analysis of flood control reservoir operation considering multiple uncertainties. DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.08.040
23. Beven, K. and Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6(3), pp.279-298. DOI:10.1002/hyp.3360060305
24. Nanding, N., Rico-Ramirez, M.A., Han, D., Wu, H., Dai, Q. and Zhang, J., 2021. Uncertainty assessment of radar-raingauge merged rainfall estimates in river discharge simulations. *Journal of Hydrology*, 603, p.127093. DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.127093
25. Riahi-Madvar, H. and Seifi, A., 2018. Uncertainty analysis in bed load transport prediction of gravel bed rivers by ANN and ANFIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21), p.688. DOI:10.1007/s12517-018-3968-6
26. Soroush, F. and Riahi Madvar, H., 2019. Uncertainty Analysis of Infiltration Parameters of WinSRFR Furrow Irrigation Simulation Model with Monte Carlo Method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), pp.1007-991. [in Persian]. <https://www.magiran.com/p2018514>
27. Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F. and Le Boursicaud, R., 2014. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, pp.573-587. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.11.016.
28. Di Baldassarre, G. and Montanari, A., 2009. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), pp.913-921. DOI:10.5194/hess-13-913-2009.
29. Vatanchi, S.M. and Maghrebi, M.F., 2019. Uncertainty in rating-curves due to manning roughness coefficient. *Water Resources Management*, 33(15), pp.5153-5167. DOI:10.1007/s11269-019-02421-6
30. Sadeghfam, S., Shams, H., Crookston, B.M., Babaeian Amini, A. and Daneshfaraz, R., 2023. Reliability Analysis of Water Supply Channels for Conveying Design Flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(12), p.04023028. DOI:10.1061/JIDEDH.IRENG-10179
31. Saberi Tanasvan, M., Noroozi, Z.G., Delghandi, M., Ashouri, S.N. and Dorostkar, V., 2020. Sensitivity

- analysis of flood parameters to roughness variation. *Journal Irrigation and Water Engineering*, 10(40), pp. 164-177. [In Persian]. DOI:10.22125/iwe.2020.110081
32. Scharffenberg, W.A. and Kavvas, M.L., 2011. Uncertainty in flood wave routing in a lateral-inflow-dominated stream. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), pp.165-175. DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000298.
33. Henderson, F.M., 1996. Open channel flow.
34. Bates, B.C. and Townley, L.R., 1988. Nonlinear, discrete flood event models, 3. Analysis of prediction uncertainty. *Journal of Hydrology*, 99(1-2), pp.91-101. DOI:10.1016/0022-1694(88)90080-7
35. Jacquin, A.P. and Shamseldin, A.Y., 2007. Development of a possibilistic method for the evaluation of predictive uncertainty in rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 43(4). DOI:10.1029/2006WR005072.
36. Dalledonne, G.L., Kopmann, R. and Brudy-Zippelius, T., 2019. Uncertainty quantification of floodplain friction in hydrodynamic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(8), pp.3373-3385.. DOI:10.5194/hess-23-3373-2019
37. Barton, G.J., Moran, E.H. and Berenbrock, C., 2004. *Surveying cross sections of the Kootenai River between Libby Dam, Montana, and Kootenay Lake, British Columbia, Canada* (No. 2004-1045). US Geological Survey. DOI:10.3133/ofr20041045