Sharif Civil Engineering Journal (2025), **41**(2), 28-41

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



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 ±6%, ±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

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

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

راضیه ولی‌زاده، مهدی مظاهری * و جمال محمد ولی سامانی

دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

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

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

واژگان کلیدی:

مونت‌کارلو،

توزیع نرمال،

توزیع یکنواخت،

مقاطع عرضی رودخانه.

چکیده

با توجه به رشد کاربرد مدل‌سازی آب‌های سطحی، یکی از مسائل مهم در فرآیند مدل‌سازی، شناسایی منابع عدم‌قطعیت است. به‌منظور تحلیل عدم‌قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار، عدم‌قطعیت مقاطع رودخانه برای یک مثال فرضی و یک رودخانه‌ی واقعی بررسی شده و با درنظرگرفتن خطاهای ۵ ، ۱۰، و ۲۰ درصد در نقاط برداشت‌شده و خطاهای ۶ $\pm$ ، ۳ $\pm$، 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 نقشه‌برداری یا تصاویر ماهواره‌ای یا هر روش دیگر، چه میزان خطا در مقاطع مذکور، چه خطایی را درنهایت 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 عدم‌قطعیتی را تحمیل نمی‌کند. در حالی که با افزایش عدم‌قطعیت، مشخصات هندسی رودخانه حاصل از خطای تصادفی، عدم‌قطعیت مشخصه‌های جریان افزایش می‌یابد.

۱. مقدمه

یکی از چالش‌های مهم پیش روی شناسایی مشخصات جریان در رودخانه‌ها، وجود عدم‌قطعیت‌ها در پارامترهای ورودی و خروجی است؛ که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به عدم‌قطعیت موجود در مشخصات هندسی رودخانه اشاره کرد، که همواره به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی جهت اندازه‌گیری دبی، سطح مقطع، و میزان اختلاط آلاینده در رودخانه‌ها موردتوجه پژوهشگران بوده است. در تعیین پارامترهای هندسی، همواره روش‌های نقشه‌برداری میدانی دقیق‌ترین روش‌ها هستند و عدم‌قطعیت کمتری نسبت به سایر روش‌ها، از جمله استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دارند. اجرای عملیات نقشه‌برداری در مناطق کوهستانی به‌دلیل صعب‌العبوربودن ممکن نیست و یا با هزینه‌ی عملیاتی زیادی همراه است. همچنین رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی، از جمله خصوصیات زمین‌شناسی منطقه و شرایط هیدرولیکی جریان، تغییرپذیری دارند. عوامل ذکرشده باعث می‌شوند که مشخصات هندسی رودخانه به‌طورمداوم دستخوش تغییرات شود؛ در نتیجه، داده‌های حاصل از نقشه‌برداری مستقیم در طولانی‌مدت قابل استفاده نیستند. بنابراین، انجام مطالعات گسترده در زمینه‌ای که عدم‌قطعیت مشخصات هندسی رودخانه را در مدل هیدرودینامیک تحلیل کند، ضروری به‌نظر می‌رسد.

منظور از عدم‌قطعیت، میزان خطا در اندازه‌گیری یا برآورد یک پارامتر است، که می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی، از قبیل: خطای انسانی، خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری، یا خطای روش‌های استفاده‌شده در اندازه‌گیری باشد و به‌عنوان رخداد پدیده‌هایی که خارج از کنترل انسان است، تعریف می‌شود.[۱] به‌طورکلی، عدم‌قطعیت‌ها از خطاهای اندازه‌گیری مرتبط با ورودی سیستم، مشکلات ساختاری مدل به‌دلیل فرضیات و ساده‌سازی و تقریب در تعیین پارامترها ناشی می‌شوند.[۲] عدم‌قطعیت‌های طبیعی، عدم‌قطعیت مربوط به مدل، فراسنجه‌ها، و داده‌های ورودی آن، و عدم‌قطعیت‌های عملکردی از جمله منابع مولد عدم‌قطعیت در مدل‌های مذکور هستند.[۳ و ۴] اندازه‌گیری مستقیم پارامترها معمولاً کاری فشرده، زمانبر، و پرهزینه است، که منجر به عدم‌قطعیت در سیستم‌های مدل‌سازی می‌شود.[۵] ممکن است حتی در مدل‌های خیلی پیچیده با واسنجی مطلوب، اطلاعات ورودی مدل نیز عدم‌قطعیت داشته باشند؛[۶] بنابراین مسئله‌ی عدم‌قطعیت، یکی از مهم‌ترین بازدارنده‌ها در کاربرد نتایج مدل‌سازی در مسائل واقعی است و کمّی‌سازی عدم‌قطعیت پیش‌بینی نتایج هر مدل‌سازی با توجه به اهداف خاص آن ضروری به‌نظر می‌رسد.[۷]

روش‌های متعددی جهت به کمیت درآوردن عدم‌قطعیت موجود در شبیه‌سازی وجود دارد، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به روش‌های آماری و روش‌های

استناد به این مقاله:

ولی‌زاده، راضیه، مظاهری، مهدی و محمدولی سامانی، جمال، ۱۴۰۴. مدل‌سازی ریاضی عدم قطعیت در مقاطع عرضی رودخانه در پارامترهای هیدرودینامیک جریان در حالت ماندگار. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۲)، صص.۲۸-۴۱. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64363.3320

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو[1] و نمونه‌گیری تصادفی،[8] برآورد عدم‌قطعیت با نمونه‌گیری بازگشتی،[9] تحلیل عدم‌قطعیت مبتنی بر نظریه‌ی اطلاعات بیزین[2]،[7] الگوریتم مونت‌کارلو زنجیر مارکوف[3]،[10] روش گشتاور دوم مرتبه‌ی اول پیرامون میانگین (MFOSM[4])،[11] و روش عمومی عدم‌قطعیت همانندی،[12] اشاره کرد. انتخاب هر کدام از روش‌های مذکور به ماهیت موضوع موردنظر، از جمله در دسترس‌بودن اطلاعات، پیچیدگی مدل، نوع، و دقت نتایج موردنظر بستگی دارد. روش مونت‌کارلو، یک روش عمومی تحلیل عدم‌قطعیت محسوب می‌شود و فرضیات کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارد؛ و در آن، مقادیر تصادفی هر یک از متغیرهای غیرقطعی با توجه به توزیع‌های احتمالاتی مربوط به آن‌ها تولید و مدل چندین بار با مجموعه‌های مختلف متغیرهای ورودی اجرا می‌شود. در پژوهش دیمیتریادیس[5] و همکاران (۲۰۱۶)،[13] حساسیت عمق آب و حجم سیلاب در برابر متغیرهای دبی جریان، شیب‌های طولی و عرضی، زبری، و اندازه‌ی سلول شبکه ارزیابی و نشان داده شده است که به‌طورکلی، عدم‌قطعیت حجم سیلاب با افزایش دبی، شیب طولی، و زبری کانال کاهش می‌یابد. مطالعات آپل[6] و همکاران (۲۰۰۸)،[14] و بوزی[7] و همکاران (۲۰۱۵)،[15] نیز به‌ترتیب به‌منظور کمّی‌سازی عدم‌قطعیت پارامتر در رابطه‌ی دبی- اشل و بررسی عدم‌قطعیت زبری و دبی بر محاسبات تراز سطح آب در چارچوب مونت‌کارلو صورت گرفته است.

از روش‌های دیگر محاسبه‌ی عدم‌قطعیت می‌توان به روش‌های LHS[8]، GLUE[9]، هار، و... اشاره کرد. در روش LHS، نمونه‌ها و اجراهای کامپیوتری کمتری نیاز است تا بتوان به درجه‌ای از دقت که قابل‌مقایسه با نمونه‌گیری تصادفی از پارامترهای ورودی باشد، دست یافت.[16] از مطالعات صورت‌گرفته به روش LHS می‌توان به این موارد اشاره کرد: وول[10] (۱۹۹۸)،[17] مطالعاتی در زمینه‌ی عدم‌قطعیت دبی در ارتباط با ضریب زبری انجام داده و دریافته است که روش تخمین دبی با مدل Step-Backwater، بهتر و کم‌خطاتر از روش‌های غیرمستقیم برآورد دبی است. محمدزاده و همکاران (۲۰۲۲)،[18] با استفاده از اطلاعات هندسی و هیدرولیکی مقطع رودخانه، رابطه‌ی دبی- اشل را محاسبه کرده‌اند. یکی از اطلاعات مذکور، ضریب زبری مانینگ است، که برای محاسبه‌ی ضریب زبری رابطه‌ی دقیقی وجود ندارد و بنابر تجربه‌ی شخصی و جدول‌های مرجع تخمین زده می‌شود. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که هر چه دقت تعیین ضریب زبری به عنوان پارامتر ورودی بیشتر باشد، عدم‌قطعیت در تخمین دبی کاهش خواهد یافت. جفری[11] و همکاران (۲۰۱۵)،[19] به مطالعه‌ی ترکیب مؤثر عدم‌قطعیت هندسه‌ی مقطع کانال در مدل‌های طغیان سیل در مقیاس منطقه‌ای و جهانی پرداخته‌اند. هدف ایشان، ایجاد یک متغیر پیوسته بوده است، که می‌تواند برای نشان‌دادن تنوع شکل کانال ساده نزدیک مثلث و نزدیک مستطیل استفاده شود. مطالعه‌ی ایشان، رویکرد یک ساختار مدل انعطاف‌پذیر را ارائه داده است که می‌تواند کانال‌های مختلف را آزمایش کند. مدل هندسه‌ی جدید با استفاده از یک آزمون آزمایشی ساده براساس یک کانال مستقیم با خواص کانال و هندسه‌های ثابت قابل‌تأیید است، که می‌تواند به‌صورت تحلیلی برای کانال‌های مثلثی و سهمی حل شود. گریمالدی[12] و همکاران (۲۰۱۸)،[20] به مطالعه‌ی اثر هندسه‌ی رودخانه در مدل‌های هیدرولیکی پیش‌بینی سیل پرداخته و روشی را برای نشان‌دادن هندسه‌ی رودخانه با استفاده از زمان و هزینه‌ی محدود ایجاد کرده‌اند. شبیه‌سازی مدل براساس هندسه‌ی ساده‌ی رودخانه با استفاده از ترکیبی از فرمول‌های تجربی موجود در سطح جهان، داده‌های سنجش از دور و تعداد محدودی از اندازه‌گیری‌ها انجام شد و نتایج قابل قبولی به‌دست آمد. بهروز و همکاران (۲۰۱۴)،[21] به تحلیل حساسیت عدم‌قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، و اقتصادی در طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب پرداخته و جهت تحلیل عدم‌قطعیت‌ها از روش مونت‌کارلو استفاده کرده‌اند. هوانگ[13] و همکاران (۲۰۱۸)،[22] به مطالعه‌ی عدم‌قطعیت در شکل هیدروگراف سیل، پیش‌بینی سیل، ظرفیت دبی مخازن، منحنی‌های ذخیره‌ی سطح آب، و تأثیر موج باد در حین عملیات کنترل مخزن سیل پرداخته و با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت‌های متعدد، ارزیابی جامعی از خطر سیل در طول عملیات کنترل مخزن سیل با استفاده از روش LHS ارائه داده‌اند.

GLUE روش تخمین عدم‌قطعیت تشابه‌های عمومی، یکی از روش‌های متداول در تحلیل عدم‌قطعیت پارامترها در مدل‌سازی‌هاست، که بیون و باینلی[14] (۱۹۹۲) آن را پیشنهاد کرده‌اند، که در آن شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تئوری بیز تلفیق شده است.[23] در روش GLUE، عدم‌قطعیت در همه‌ی اجزاء مدل (ورودی‌ها، پارامترها، متغیرهای حالت، و غیره) به‌صورت یکجا در نظر گرفته می‌شود؛ در حالی که در برخی روش‌ها، عدم‌قطعیت اجزاء مختلف مدل، به‌صورت مجزا برآورد می‌شود. تجزیه‌وتحلیل روش عدم‌قطعیت GLUE در مطالعه‌ی ناندینگ[15] و همکاران (۲۰۲۱)،[24] نشان می‌دهد که توزیع پارامترهای شبیه‌سازی GLUE نه فقط به انتخاب مقادیر آستانه بستگی دارد، بلکه به کیفیت تخمین‌های بارندگی و خود پارامتر نیز بستگی دارد و هر عاملی که در کیفیت تخمین داده‌های بارندگی تأثیر می‌گذارد، در عدم‌قطعیت پارامتر و در نتیجه شبیه‌سازی دبی تأثیر خواهد داشت. بررسی کارایی تحلیل عدم‌قطعیت ضریب‌های مدل شبه دوبُعدی توزیع سرعت و تنش برشی در رودخانه‌ها،[25] ضریب‌های نفوذ در مدل‌سازی حرکت آب در خاک،[26] تحلیل بیزین عدم‌قطعیت تراز سطح آب در رودخانه‌ها،[27] و عدم‌قطعیت اندازه‌گیری دبی و منحنی دبی- اشل رودخانه‌ها،[28] از جمله مواردی است که نشانگر کاربرد موفق تحلیل عدم‌قطعیت نتایج مدل‌های هیدرولیکی در مهندسی رودخانه است. همان‌طور که گفته شد، منابع مولد عدم‌قطعیت باعث ایجاد ابهام، کاهش دقت، و کاهش قابلیت اطمینان در تفسیر نتایج می‌شود. برآورد مطمئن ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها، و کسب دانش دقیق از عدم‌قطعیت‌های موجود در نتایج مدل‌های هیدرولیکی در بررسی‌های مهندسی رودخانه، ساماندهی رودخانه‌ها، مدیریت سیلاب، و مدیریت ظرفیت انتقال رودخانه‌ها اهمیت بارزی دارد.[22 و 29] ادغام تجزیه‌وتحلیل قابلیت اطمینان در طراحی سازه‌های هیدرولیکی می‌تواند بینشی در مورد راهبردهای مدیریتی ارائه

[1] Monte Carlo simulation
[2] Bayesian information-theoretic
[3] Markov chain Monte Carlo simulation
[4] Mean First-Order Second-Moment
[5] Dimitriadis
[6] Apel
[7] Bozzi
[8] Latin hypercube sampling
[9] Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
[10] Wohl
[11] Jeffrey
[12] Grimaldi
[13] Huang
[14] Beven & Binley
[15] Nanding

دهد، که ممکن است حالت‌های بالقوه‌ی شکست، عدم‌قطعیت‌ها، 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 شده‌است.[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، عدم‌قطعیت نتایج در نتیجه‌ی فراسنجه‌های مدل‌سازی بررسی شود.

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، تاکنون مطالعه‌ای که به‌طورخاص عدم‌قطعیت مشخصات هندسی رودخانه را بررسی کند، انجام نشده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از روش مونت‌کارلو با تعیین توزیع مناسب به بررسی عدم‌قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر دو مشخصه‌ی اصلی جریان، یعنی سرعت و سطح مقطع، با درنظرگرفتن خطا در برداشت هر نقطه از مقطع و لحاظ خطای کل مقطع پرداخته شده است. خطاهای تصادفی منجر به اندازه‌گیری‌هایی می‌شوند که به روشی غیرقابل‌پیش‌بینی دقیق نیستند و نتیجه‌گیری‌های کمترقطعی را در پی دارند. علاوه‌بر وجود خطاهای تصادفی، توجه به امکان بروز خطاهای سیستماتیک نیز ضروری به‌نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر با درنظرگرفتن 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 عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت مذکور لحاظ می‌شود و مشابه جریان غیرماندگار خواهد بود. با روش ذکرشده، 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 عدم‌قطعیت نهایی و امثال آن، وجود نخواهد داشت.

بروز خطای سیستماتیک، عدم‌قطعیت یکسانی را به مدل القا می‌کند، در حالی که خطاهای تصادفی برای هر یک از نقاط برداشت‌شده، مقدار متغیری خواهند داشت. تحلیل عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت مشخصات هندسی رودخانه در حل مدل‌های هیدرودینامیک پرداخته شده است. نکته‌ی قابل توجه در پژوهش حاضر، علاوه‌بر نکات ذکرشده این است که عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت باشد. جدا از درنظرگرفتن نقاط هر مقطع به‌عنوان مولدهای عدم‌قطعیت، عدم‌قطعیت کلی مقطع هم به‌عنوان عاملی از $\Delta Z_{\max}$ آن مقطع در نظر گرفته شده است.

۲. مبانی تئوری و روش‌ها

همان‌طور که عنوان شده است، تاکنون پژوهشی درخصوص تحلیل عدم‌قطعیت مقاطع رودخانه بر مدل هیدرودینامیک انجام نشده است. در پژوهش حاضر، اثر تغییرشکل 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 کانال‌های روباز به دو گروه جریان‌های ماندگار و غیرماندگار 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.

$$E = y\cos^2\theta + Z + \alpha\frac{Q^2}{A^2 2g} \qquad (۱)$$

که در آن، E انرژی مقطع، y عمق آب در مقطع، θ زاویه‌ی شیب کانال، 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]

$$y_1\cos^2\theta + Z_1 + \alpha_1\frac{Q^2}{A_1^2 2g} - h_f = y_2\cos^2\theta + Z_2 + \alpha_2\frac{Q^2}{A_2^2 2g} \qquad (۲)$$

$$h_f = S_f L \qquad (۳)$$

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.

$$Q = \frac{A}{n}R^{\frac{2}{3}}S_f^{\frac{1}{2}} \qquad (۴)$$

که در آن، Q دبی جریان، A سطح مقطع، و R شعاع هیدرولیکی هستند. با حل معادله‌های اخیر و با درنظرگرفتن 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 قرارگرفتن 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 عدم‌قطعیت استفاده از تابع توزیع احتمال مناسب، اهمیت بسیار ویژه‌ای در تسریع جواب دارد. مهم‌ترین عامل مؤثر در کیفیت نتایج

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

۳.۲. تحلیل عدم‌قطعیت مشخصات هندسی رودخانه با استفاده از روش مونت‌کارلو

تحلیل عدم‌قطعیت نیازمند شناسایی منابع مولد عدم‌قطعیت و تحلیل آماری آن‌ها به‌منظور دستیابی به نمونه‌های تصادفی با شمار زیاد است.[۳۶] در پژوهش حاضر، منابع عدم‌قطعیت 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 محدوده‌ی باند عدم‌قطعیت 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 عنوان‌شده از باند عدم‌قطعیت به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. اساس کار روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت، نمایش ترکیب‌های تصادفی با تولید آن‌ها با توجه به حالت‌های ممکن از عدم‌قطعیت‌هایی است که در یک مطالعه رخ می‌دهند. بنابراین، با انتخاب نقاط تصادفی از باند عدم‌قطعیت، 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 هرمقطع با ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد خطا و کل مقطع با ۶ $\pm$ ، ۳ $\pm$، و ۰ درصد در ۱۵ سناریو برای هر کدام از دو توزیع نرمال و یکنواخت تولید شده‌اند. روابط ۵ و ۶، نحوه‌ی تولید نقاط تصادفی جدید را نشان می‌دهند:

$$\Delta Z_{max} = Z_{max} - Z_{min} \quad (۵)$$

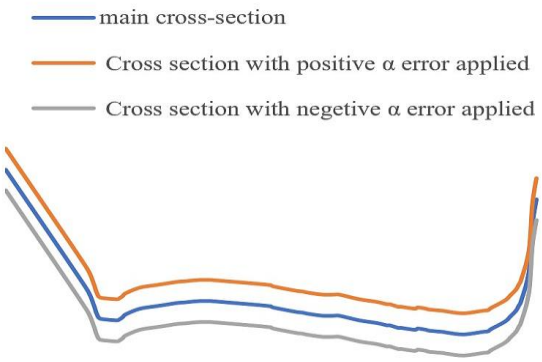
$$Z_i = Z_i \pm \alpha \Delta Z_{max} + \beta \Delta Z_{max} \quad (۶)$$

که در آن‌ها، ΔZ_{max} بیشینه‌ی اختلاف ارتفاع نقاط هر مقطع را محاسبه می‌کند. $\alpha \Delta Z_{max}$ در هر مقطع برای مقادیر ۶ $\pm$ ، ۳ $\pm$، و ۰ 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 عدم‌قطعیت 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 ۵، ۱۰، و ۲۰ 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 به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل نمونه‌گیری شده‌اند. مدل‌سازی جریان با استفاده از مجموعه‌ی پارامترهای تولیدشده اجرا و نتایج هر اجرا به‌صورت مجزا ذخیره شده است. برای تحلیل نتایج خروجی و تعیین میزان عدم‌قطعیت پارامترهای خروجی از ۵ شاخص آماری مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱. شاخص‌های آماری تحلیل عدم‌قطعیت.

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	$BS = \frac{95\%\ bandwidth}{\sigma}$	(9)
5	The ratio of the 95% confidence interval to the original value	-	-



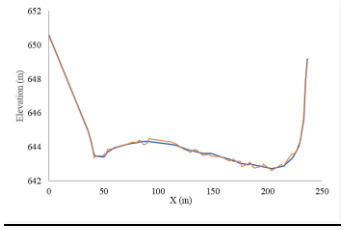
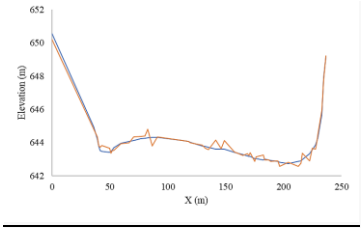
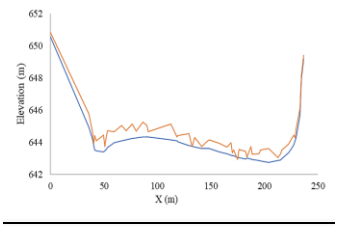
شکل ۱. اعمال خطای α.

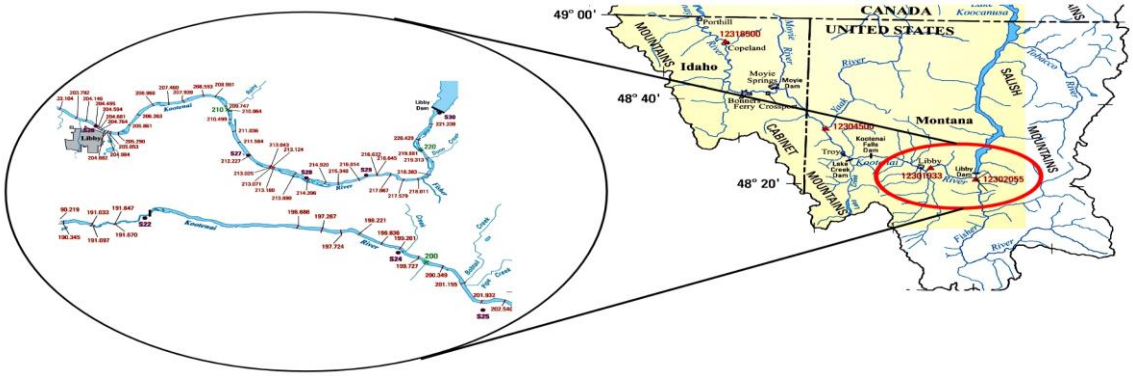
۴.۲. گام‌های اجراشده

در هر مقطع، ΔZ_{max} محاسبه شده است. مقدار خطای کل با درنظرگرفتن یک ضریب ثابت از ΔZ_{max} محاسبه و کلیه‌ی نقاط (X,Z) هر مقطع به یک مقدار مطابق شکل ۱ جابجا شده‌اند. این اعمال خطا برای شش حالت با مقادیر ۶ $\pm$ ، ۳ $\pm$، و ۰ درصد برای α اجرا شده است. پس از اعمال خطای یکسان برای همه‌ی نقاط، از هر نقطه به‌عنوان یک منبع عدم‌قطعیت به‌طور 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 به‌این 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 عدم‌قطعیت مشخصات هندسی بر خروجی‌های جریان است. به همین منظور از روش ذکرشده، مقاطع تصادفی جدیدی با خطاهای مشخص تولید شده است.در هر رودخانه‌ی تصادفی تولیدشده، معادله‌ی انرژی برای مقاطع متوالی حل و دو مشخصه‌ی جریان یعنی سرعت و سطح مقطع برای هرکدام از مقاطع تغییریافته محاسبه شده است. محاسبات ذکرشده برای ۱۵ سناریوی عنوان‌شده در هر یک از توزیع‌های انتخابی به تعداد زیاد اجرا شده است. مشخصه‌های محاسبه‌شده‌ی جریان نیز با استفاده از شاخص‌های آماری ذکرشده در جدول ۱ تحلیل شده‌اند.

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

Distribution - Error	α=0 , β=5%	α =0 , β=20%	α =+6% , β =20%
Normal			



شکل ۲. موقعیت رودخانه‌ی کوتنای.

۵.۲.آزمون مثال بررسی شده ارائه‌شده از مقاطع رودخانه جهت مدل‌سازی

در تعیین رودخانه‌ی مناسب برای مدل‌سازی این نکته حائز اهمیت است که علاوه‌بر اینکه مقاطع قابل‌اعتماد باشند، داده‌های دردسترس نیز برای طول قابل‌قبولی از رودخانه موجود باشند. قابل اعتمادبودن به آن معناست که مقاطع از دید مهندسی قابل پذیرش بوده و شکل منطقی داشته باشند. به‌منظور ارزیابی و کاربرد روش تحلیل عدم‌قطعیت پیشنهادی، دو آزمون ارائه شده است، که در مثال بررسی شده اول، مقاطع ساده از یک رودخانه‌ی فرضی به طول ۱۲ کیلومتر و با تعداد ۲۸ مقطع ارزیابی شده‌اند. در مثال بررسی شده دوم، نیز عدم‌قطعیت مقاطع یک رودخانه‌ی واقعی به طول ۴۵ کیلومتر با تعداد ۴۵ مقطع تحلیل شده است.

۱.۵.۲.آزمون مثال بررسی شده اول: مدل‌سازی با عدم‌قطعیت در مقاطع ساده‌ی یک رودخانه‌ی فرضی

برای تولید رودخانه‌ی فرضی با مقاطع منظم ۲۸ مقطع عرضی با تعداد نقاط برداشت‌شده‌ی مختلف تولید شده است، که مجموعه‌ی آن‌ها یک رودخانه‌ی فرضی به طول ۱۲ کیلومتر را تشکیل داده‌اند.

۲.۵.۲. آزمون مثال بررسی شده دوم: مدل‌سازی با عدم‌قطعیت در مقاطع یک رودخانه‌ی واقعی

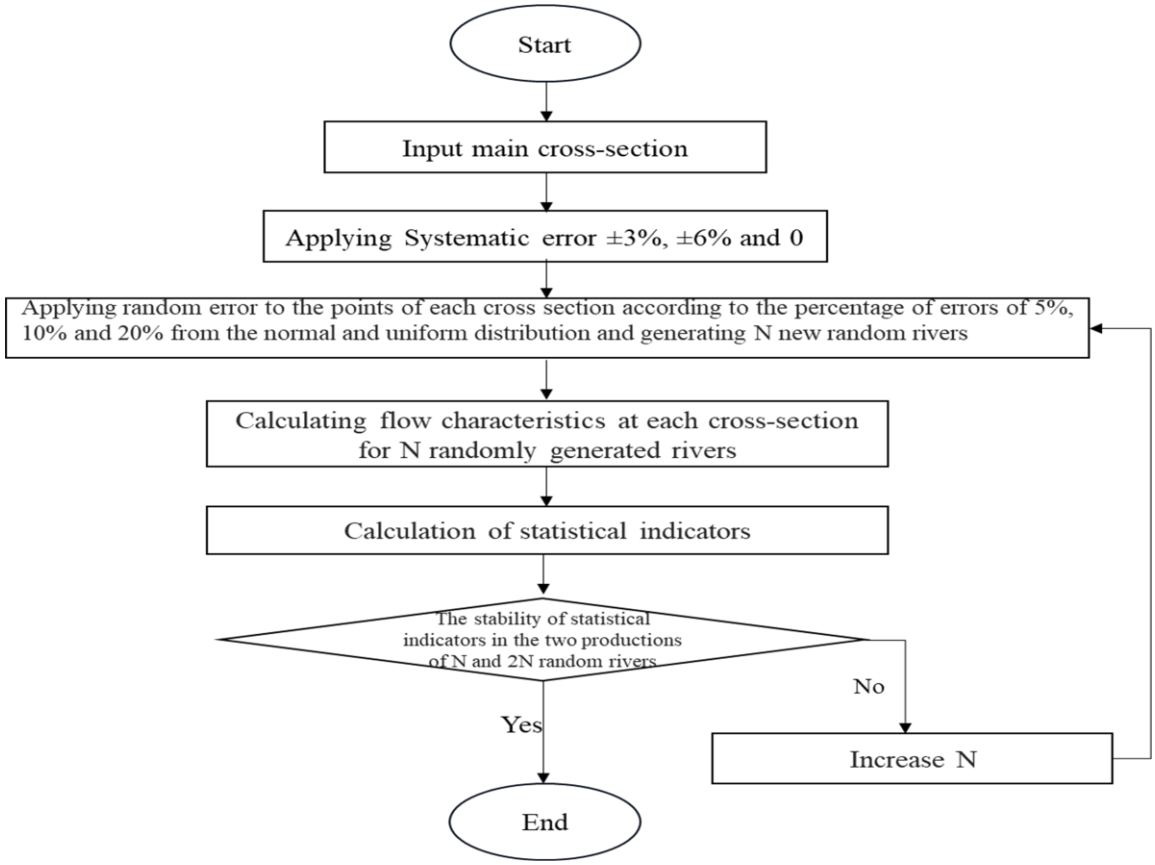
پس از بررسی مقاطع چند رودخانه‌ی مختلف، به‌منظور راستی‌آزمایی ارائه‌شده با داده‌های واقعی، درنهایت بخشی از رودخانه‌ی کوتنای به‌عنوان رودخانه‌ی موردمطالعه انتخاب شده است؛ که از کشور کانادا سرچشمه می‌گیرد و از دو ایالت آیداهو و مونتانا می‌گذرد و سپس به کانادا باز می‌گردد. بازه‌ی مطالعه‌شده در نوشتار حاضر در محدوده‌ی طول و عرض جغرافیایی (' ۳۰ °۴۸ -' ۲۰ °۴۸) و (' ۴۵ °۱۱۵ -' ۲۰ °۱۱۵) قرار دارد (شکل۲).[۳۷] داده‌های مقاطع بازه‌ی مذکور به طول ۴۵ کیلومتر و ۴۵ مقطع برداشت شده است. طبق توضیحات بیان‌شده از مقاطع رودخانه‌ی کوتنای، مقاطع تصادفی تولید و ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از شاخص‌های آماری انجام شده است. فلوچارت روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تحلیل عدم‌قطعیت آزمون مثال بررسی شده اول

برای محاسبه‌ی شاخص‌های آماری در تحلیل عدم‌قطعیت مشخصات هندسی در حالت تحلیل رودخانه‌ای پس از اجرای مدل و محاسبه‌ی سرعت و سطح مقطع، میانگین سرعت‌ها به‌عنوان سرعت رودخانه و میانگین سطوح مقطع محاسبه شده است. نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص‌های عدم‌قطعیت رودخانه‌ای سرعت و سطح مقطع به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. تغییر ضریب تغییرات سرعت و سطح مقطع، نشانگر افزایش خطای نقاط در هر دو توزیع است، که موجب بروز تغییرهای بیشتری در خروجی‌های جریان می‌شود. ضریب تغییرات در واقع پراکندگی داده‌ها حول میانگین را نشان می‌دهد؛ که نشان‌دهنده‌ی نسبت انحراف معیار استاندارد به میانگین است. هر چه میزان ضریب تغییرات کمتر باشد، بدین معناست که پراکندگی در اطراف نقطه‌ی میانگین کمتر است و داده‌ها یکدست‌تر هستند. هر چه میزان ضریب تغییرات بالاتر باشد، نشانه‌ی پراکندگی و فاصله‌ی بیشتر داده‌ها از میانگین است. مطابق جدول‌های ۳ و ۴، با افزایش خطا در برداشت نقاط، میزان ضریب تغییرات افزایش یافته است. همچنین با توجه به جدول‌های مذکور، 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.

با توجه به جدول‌های ۳ و ۴، ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪، سرعت و سطح مقطع با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط افزایش یافته است. نتایج حاصل از مقایسه‌ی دو توزیع نرمال و یکنواخت در محاسبه‌ی ضخامت باند مذکور



شکل ۳. فلوچارت روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر.

جدول ۳. شاخص‌های عدم‌قطعیت رودخانه‌ای سرعت در جریان ماندگار رودخانه‌ی 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

جدول۴: شاخص‌های عدم‌قطعیت 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

نشـــان داد در مقاطعی که نقاط آن‌ها با اســـتفاده از خطای یکنواخت تولید شـده‌اند، عدم‌قطعیت بیشـتری وجود دارد. حال اگر درصـد خطای نقاط مقاطع در هر کدام از دو توزیع مذکور ثابت در نظر گرفته شـــود و خطای کل مقطع افزایش یابد، ضخامت باند عدم‌قطعیت سرعت و سطح مقطع برای ۵ سناریو با خطاهای ۶ $\pm$، ۳ $\pm$، و ۰ درصـــد در مقطع با درنظرگرفتن مقادیر β ثابت، تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد.

شـاخص دیگری که در پژوهش حاضـر، ارزیابی شـده اسـت، حاصـل تقسـیم ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر مقدار اولیه‌ی حاصل از مدل‌سازی جریان با شـکل اصـلی مقطع اسـت. همان‌طور که بیان شـد، افزایش خطا در برداشـت نقاط مقطع باعث افزایش محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ خواهد شـد. بدیهی اسـت تقسـیم این مقدار بر مقدار اولیه‌ی متغیر موردمطالعه با افزایش خطا، رابطه‌ی مسـتقیم دارد. مقایسـه‌ی مقادیر شـاخص ذکرشـده در تغییرشـکل کلی مقطع با درصـد تغییرات مذکور نشـان داد نوسـان کلی دره‌ی رودخانه، تغییری در محاسبه‌ی شاخص اخیر ایجاد نخواهد کرد. بررسی شاخص پراکندگی سرعت و سطح مقطع در تکرار سـناریوهای مطرح‌شـده با درصـد خطاهای عنوان‌شـده نیز نشان داد که افزایش خطا باعث افزایش شاخص پراکندگی سرعت و سطح مقطع خواهد شـد. با افزایش میزان خطا و در نتیجه‌ی آن، افزایش ضـریب 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 شـده اسـت و همانند سـه شـاخص بررسـی‌شـده‌ی دیگر با افزایش خطای کل رودخانه، تغییری در روند آن مشاهده نشده است. شاخص دیگری که برای تحلیل کمّی خروجی‌های جریان در پژوهش حاضـر اسـتفاده شـده اسـت، حاصـل تقسـیم ضـخامت باند اطمینان ۹۵٪ بر انحراف معیار داده‌ها در هر سـناریو اسـت. با افزایش خطا و در نتیجه‌ی آن، افزایش ضـخامت باند اطمینـان ۹۵٪، بدیهی اســـت کـه انحراف معیـار داده‌هـا نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، حاصـل تقسـیم ضخامت باند اطمینان ۹۵٪ بر انحراف معیار داده‌ها در هر سناریو حول محور ثابتی با نوسان کم در تغییر است.

۲.۳. تحلیل عدم‌قطعیت آزمون مثال بررسی شده دوم

پس از تحلیل عدم‌قطعیت، مشـخصـات هندسـی یک رودخانه‌ی فرضـی جهت راسـتی‌آزمایی و مقایسـه‌ی نتایج حاصـل، به تحلیل عدم‌قطعیت مقاطع واقعی حاصـل از نقشـه‌برداری رودخانه کوتنای پرداخته شـده اسـت. نتایج حاصـل از محاسـبه‌ی شـاخص‌های عدم‌قطعیت رودخانه‌ای سـرعت و سـطح مقطع رودخانه کوتنای به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن‌ها، با افزایش خطا در برداشـــت نقاط، میزان ضـــریب تغییرات افزایش یافته اســـت. مقادیر ضـــریب تغییرات ســـرعت و ســـطح مقطع در حالت مقطع کلی ثابت، برای هر کدام از دو توزیع بررسـی‌شـده، روند نسـبتاً ثابتی را در بر گرفته است. ضـریب تغییرات سـرعت در سـه خطای ۵ ،۱۰، و۲۰ درصـد از توزیع نرمال با ثابت‌بودن شـــکل کلی مقطع، به ترتیب مقداری برابر با ۰/۰۱۷، ۰/۰۳۶، و ۰/۰۷ داشـــته اســـت. مقادیر مذکور در خطای اعمال‌شـــده با توزیع یکنواخت تقریباً دو برابر شده و به‌ترتیب مقادیر ۰/۰۳، ۰/۰۶، و ۰/۱۳ را در بر گرفته است.

در تحلیل روند ضریب تغییرات سـطح مقطع نیز برای مقدار ثابت α=۰ در سـه خطای ۵ ،۱۰، و۲۰ درصـــد از توزیع نرمال طبق جدول ۶ به ترتیب مقدار ضـــریب تغییرات برابر با ۰/۰۱۵، ۰/۰۳۱، و ۰/۰۶۱ بوده اســـت؛ که در خطای اعمال‌شـــده با توزیع یکنواخت افزایش یافته و به ترتیب مقادیر ۰/۰۳، ۰/۰۵۸، و ۰/۱۱ را شـامل شـده‌اند. بنابراین، افزایش عدم‌قطعیت در داده‌های مربوط به نقاط مقطع باعث افزایش پراکندگی خروجی‌های جریان خواهد شـــد. با

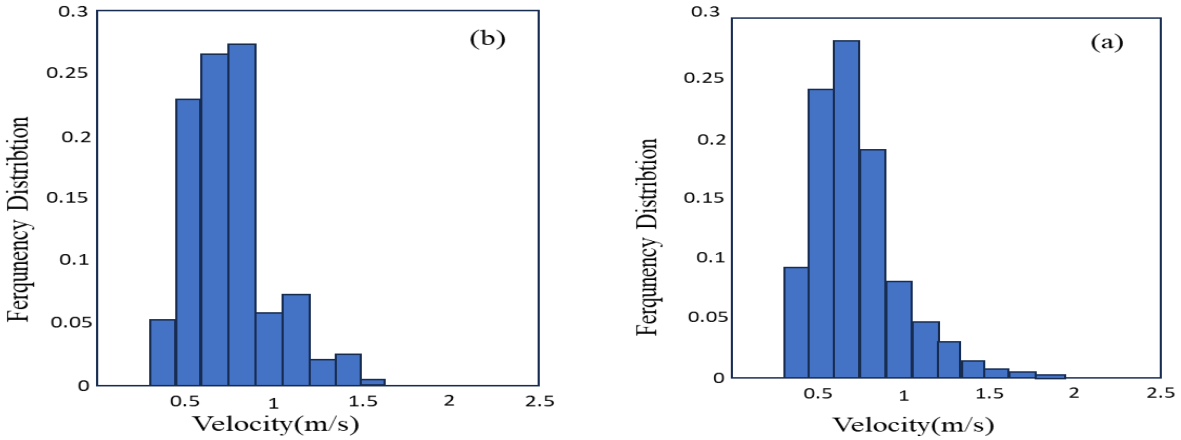
جدول۵: شاخص‌های عدم‌قطعیت رودخانه‌ای سرعت در جریان ماندگار رودخانه کوتنای.

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

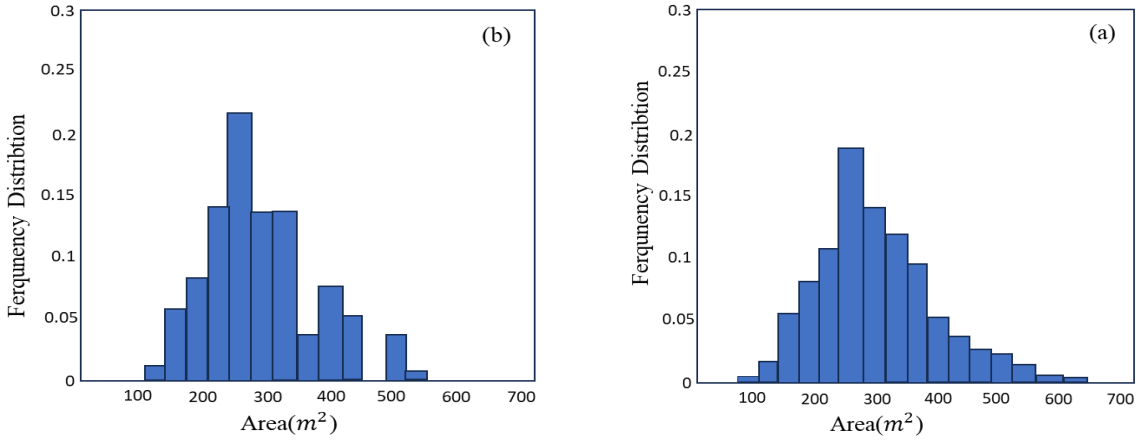
جدول ۶: شاخص‌های عدم‌قطعیت رودخانه‌ای سطح مقطع در جریان ماندگار رودخانه کوتنای.

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

مقایسه‌ی ضریب تغییرات برای مقادیر مختلف α با ثابت‌بودن شکل کلی مقطع در کلیه‌ی سناریوهای جدول‌های ۵ و ۶ نیز می‌توان دریافت که تغییر یکسان کلیه‌ی نقاط مقطع در محاسبه‌ی ضریب تغییرات اثرگذار نیست. با توجه به جدول‌های ۵ و ۶، ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ سرعت و سطح مقطع با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط افزایش یافته است. به‌گونه‌ای که در مقاطع تصادفی تولیدشده با استفاده از توزیع نرمال، ضخامت این باند در تحلیل سرعت خروجی، بدون تغییر کلی مقطع از حدود ۰/۰۸ متر بر ثانیه در خطای ۵٪ به ضخامت ۰/۱۷ متر بر ثانیه در خطای ۱۰٪ و درنهایت به ضخامت ۰/۳۳ متر بر ثانیه در خطای ۲۰٪ رسیده است. در تحلیل خروجی‌های سطح مقطع نیز این روند حفظ شده است، به‌گونه‌ای 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 ارائه‌شده برای مقاطع تصادفی حاصل از توزیع یکنواخت افزایش یافته و به‌ترتیب ۵۱ ، ۱۰۵/۳، و ۲۰۶/۳ مترمربع بوده است. همچنین مطابق نتایج حاصل از



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



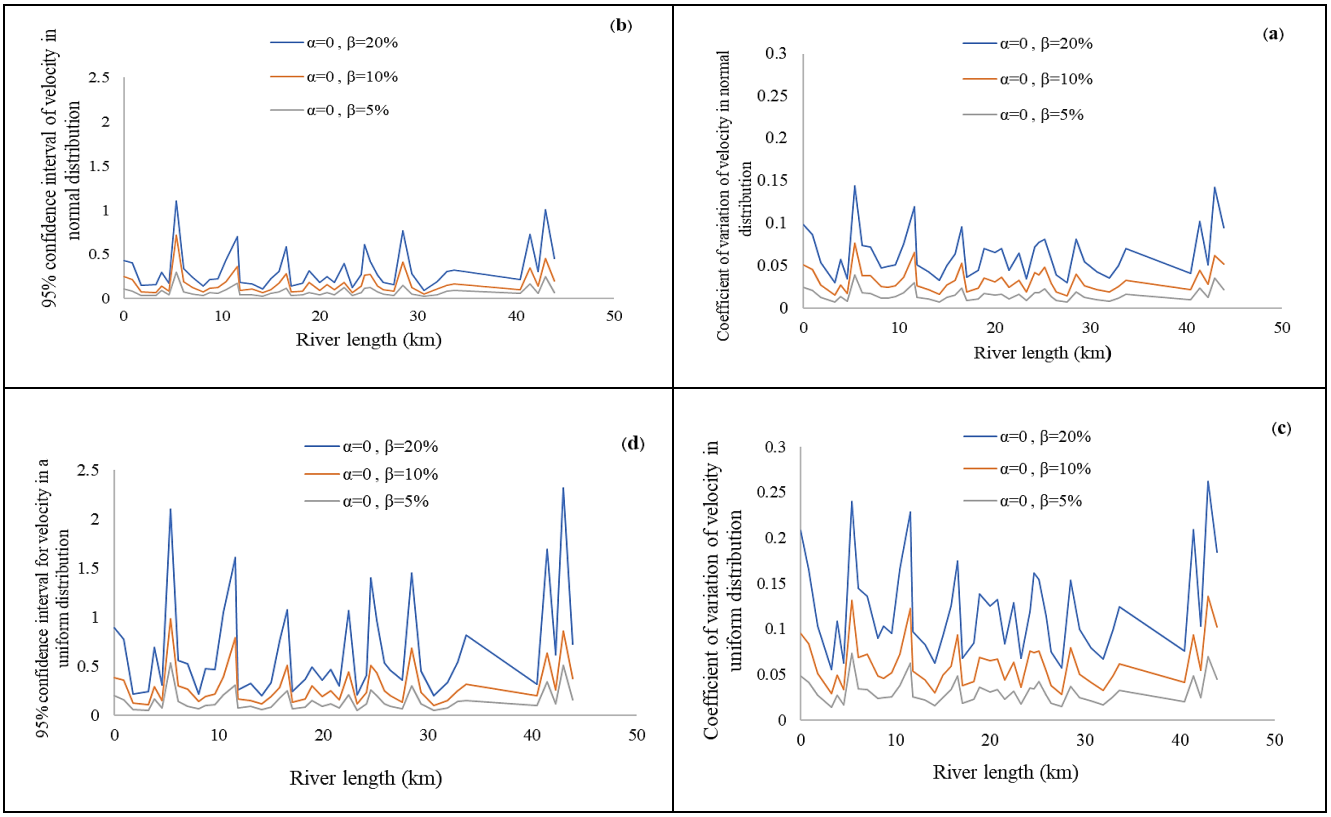
شکل ۵. توزیع فراوانی سطح مقطع: (a) توزیع یکنواخت، (b) توزیع نرمال.

محاسبه‌ی محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ رودخانه‌ی فرضی، افزایش خطای کل مقطع، اثر چندانی در ضخامت باند عدم‌قطعیت 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 ثلبت 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، عدم‌قطعیت خروجی بیشتری را به‌دنبال دارد.

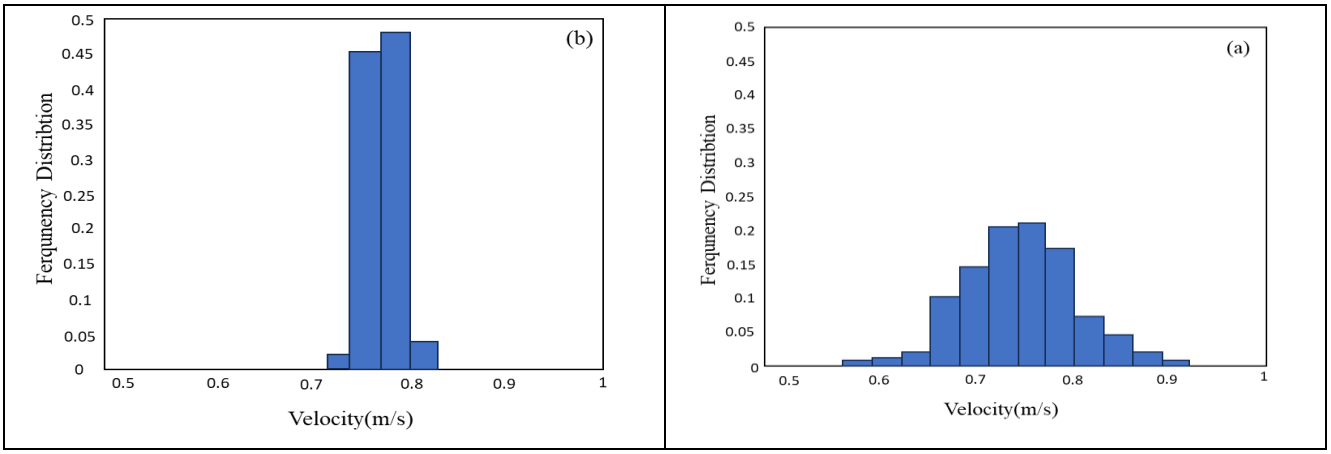
حاصل تقسیم ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر مقدار اولیه‌ی حاصل از مدل‌سازی جریان برای سرعت بدون درنظرگرفتن خطای کل مقطع، برای خطاهای ۵، ۱۰، و۱۵ درصد از توزیع نرمال به‌ترتیب ۰/۱۱، ۰/۲۲، و ۰/۳۳ و برای همان درصد خطا از توزیع یکنواخت به‌ترتیب برابر با ۰/۲، ۰/۴، و ۰/۶۷ بوده است. مقادیر ذکرشده برای سطح مقطع جریان 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 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



شکل ۶. (a) و (b) به‌ترتیب ضریب تغییرات و محدوده‌ی اطمینان سرعت در توزیع یکنواخت؛(c) و (d) به‌ترتیب 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٪

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

۱.۲.۳. مقایسه‌های مقطعی

تا کنون به بررسی نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص‌های عدم‌قطعیت رودخانه‌ای پرداخته شده است. در گام بعد، تحلیل کلیه‌ی نتایج به‌صورت مقطع به مقطع انجام شده است. در شکل ۶، شاخص‌های مقطعی سرعت در $\alpha=0$ برای حالت‌های مختلف عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت مقطعی سرعت به نظر می‌رسد با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط، ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ در تمامی مقاطع افزایش یافته است. عدم یکسان‌بودن ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بیانگر این مطلب است که هر مقطع مستقلاً عدم‌قطعیتی 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

سرعت در تکرارهای مختلف از یک مقطع دلخواه با خطای نرمال ۵٪ و خطای ۰٪ 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. به‌گونه‌ای که در مقاطع تصادفی تولیدشده از مقطع شماره‌ی ۴۱ رودخانه کوتنای، خطای نرمال ۵٪ بیشتربن فراوانی در کمترین بازه‌ی تغییرات و خطای یکنواخت ۲۰٪ ، کمترین فراوانی در بیشترین بازه‌ی تغییرات را داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

عدم‌قطعیت در داده‌های ورودی جزء جدانشدنی مدل‌سازی‌های هیدرولیکی است. در پژوهش حاضر، با درنظرگرفتن دو نوع خطای سیستماتیک و تصادفی در ۱۵ سناریو به تحلیل عدم‌قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار پرداخته شده است. مقاطع تصادفی با درنظرگرفتن خطاهای سیستماتیک ۶ ± ، ۳ ±، 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 عدم‌قطعیت در نتایج خروجی مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار تحلیل شده‌اند.

با درنظرگرفتن تبعیت خطای تصادفی نقشه‌برداری از توزیع نرمال، با افزایش میزان خطای تصادفی، عدم‌قطعیت مشخصه‌های جریان افزایش می‌یابد.

محاسبه‌ی شاخص‌های عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت بیشتر در خروجی‌های مدل است. با درنظرگرفتن خطاهای تصادفی ۵ ، ۱۰، و ۲۰ درصد و خطای سیستماتیک صفر، ضخامت باند عدم‌قطعیت سرعت به ترتیب مقادیر ۰/۰۸، 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٪ به‌گونه‌ای است که شرایط حاکم بر جریان را به هم نمی‌زند.

با درنظرگرفتن ۲۰٪ خطای تصادفی و خطاهای سیستماتیک ۶ ± ، ۳ ±، و ۰ درصد محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ سرعت و سطح مقطع تقریباً ثابت است و نشان می‌دهد که بروز خطاهای سیستماتیک، عدم‌قطعیتی 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 به‌شمار می‌رود. عدم‌قطعیت با درنظرگرفتن خطای یکنواخت در مقایسه با خطای نرمال به میزان قابل‌توجهی 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 Persi 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 Thieken, 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