


Uncertainty Analysis of The HEC-RAS Results in Hydraulic Simulation of Karoon River Flow by Monte-Carlo Approach

Hossien Riahi-Madvar ^{1*}, Bahman Fakouri ²

1- Department of Water Science & Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

2- PhD. Student of Water Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran.

* h.riahi@vru.ac.ir

Received: 18 October 2020, Accepted: 20 April 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The roughness parameter in hydraulic modelling of natural river and channel flows is not easily measurable and accurate point determination of roughness coefficient, its spatial and temporal variations include several uncertainties that acts as the main source of error and uncertainty in hydraulic modeling. These drawbacks restricts the applicability of the hydraulic model in river engineering projects, flood control and management, re-habitation and river restoration. Following these drawbacks, in the present study, uncertainty analysis by Monte-Carlo Simulation (MCS) combined with HEC-RAS model.

Methodology: In the present study, uncertainty analysis by Monte-Carlo Simulation (MCS) combined with HEC-RAS model is used to study a 105 km reach of Karoon River from Mollasani to Farsiat. The model is calibrated and verified using two year daily data of river flow and stage levels in Ahvaz station at the middle of the river reach. A computational control module is developed and combined with HEC-RAS model to perform MCS automatically and the flowchart of modeling strategy and uncertainty analysis is presented. The MCS approach is coupled with HEC-RAS model by developing a subprogram that create and modifies the input files of HEC-RAS, run it automatically based on random samples of n Manning, and extracting the results of HEC-RAS model in each execution for further analysis in an automatic procedure. By using probability distribution of Manning roughness, 3000 simulations performed and graphical and quantitative indices used to evaluate the uncertainties of model results. In order to refine proper MCS from non-proper ones, the $NSE > 0.75$ index is used to objectively sample n Manning from uncertainty analysis. The uncertainty analysis of proper MCS evaluated by 5 and 95% uncertainty bounds. The uncertainty analysis of model results are evaluated based on the six parameters of water surface elevation, top width of water, flow velocity, Froude number, stream power and shear stress in 3000 runs of peak flow and mean flow discharges respectively and quantified by two indices of 95PPU and d-factor.

Results and Discussion: The calibration and verification results of the HEC-RAS model in Figs 3-4 shows that in the calibration data set, the R^2 and RMSE of model in discharge are respectively 0.94 and 21 (m^3/s); and 0.93 and 0.6 (m) for water stage. These values in the verification stage were 0.94 and 25.2(m^3/s) for discharge; and 0.91 and 0.1(m) for water stage respectively. The results in 105 km length of Karoon River reveals high level of uncertainties with d-factor greater than 1 up to 11 in peak discharge of 3000 and mean daily discharge of 457 m^3/s . These results revealed that using conditional evaluations based on $NSE > 0.75$ reduced the uncertainty of d-factor in results of rating curve, stage, top water width, stream

power, shear stress, Froude number and velocity. The d-factor of water stage reduced from 2 to 0.07 in peak discharge, and from 0.96 to 0.02 in average flows. These uncertainty reductions in top width of water were 2.5 to 0.19 in peak discharge and 1.3 to 0.078 in average flows of Karoon River. The highest uncertainty of HEC-RAS model results observed in water velocity and Froude number with di-factor 10.85 and 7.44 in peak discharge respectively. This trend of uncertainty reduction observed for water velocity, Froude number, stream power and shear stress along the river, as provided in Tables 1-3. The spectral responses of hydraulic parameters in model result that presented in Figs 5-10, indicate that although the HEC-RAS model produced high uncertainty values, especially in the complex domain of Karoon River, these uncertainties do not deviate the hydraulic patterns of river flow. The peak and maximum and the zones of high values of parameters, show high level of uncertainty than the small or moderate hydraulic situations. These indicate the inherent uncertainty in model results that causes high extents of spectral responses for model simulations. The provided findings necessitate the accurate determination of roughness coefficient according to its spatial and dynamic variations along the river reach.

Conclusion: The uncertainty results revealed high level of latent uncertainties in HEC-RAS model and probabilistic analysis of models results is required for river re-habitation and management practices of large rivers such as Karoon River to provide certain and reliable results. The presented methodology and framework in the current study that uses automatic control and automation of HEC-RAS runs, strengthens the modeling capability of one dimensional river flows for probabilistic analysis and automatic calibration of this mode.

Keywords: Parameter Estimation, Uncertainty, Hydraulic modeling, Monte Carlo Simulation, HEC-RAS model.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

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

تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل HEC-RAS در شبیه سازی فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان رودخانه کارون با رویکرد مونت کارلو

حسین ریاحی مدوار^{۱*}، بهمن فکوری^۲

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

* h.riahi@vru.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: فراسنجه ضریب زبری در مدل‌سازی هیدرولیکی جریان رودخانه‌ها به سادگی قابل اندازه‌گیری نیست و تعیین آن همواره با عدم قطعیت و خطا در نتایج همراه است. به همین منظور در این پژوهش از رویکرد شبیه‌سازی مونت-کارلو برای تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل هیدرولیکی HEC-RAS در بازه ملاثانی تا فارسیات رودخانه کارون به طول ۱۰۵ کیلومتر استفاده شده است. با توسعه یک ماژول محاسباتی کنترلی و ترکیب آن با هسته محاسباتی HEC-RAS اجرای خودکار فرآیند مونت کارلو فراهم شد. شبیه‌سازی ۳۰۰۰ نمونه مونت-کارلو بر مبنای توزیع احتمال ضریب مانینگ انجام شد و تحلیل نگاره‌ای (گرافیکی) و کمی‌سازی نتایج عدم قطعیت روی فراسنجه‌های هیدرولیکی خروجی مدل صورت گرفت. نتایج نشان‌دهنده عدم قطعیت زیاد با پهنای باند اطمینان بزرگتر از ۱ تا ۱۱، در دبی بیشینه سیلاب ۳۰۰۰ و دبی میانگین روزانه ۴۵۷ مترمکعب بر ثانیه است. برای پالایش شبیه‌سازی‌های مونت-کارلوی کارآمد و ناکارآمد از معیار شاخص $NSE > 0.75$ در تحلیل هدفمند عدم قطعیت زبری بر مبنای محدوده‌های عدم قطعیت ۵ و ۹۵ درصد استفاده شد. در این حالت پهنای باند عدم قطعیت (d-factor) هر شش فراسنجه تراز سطح آب، عرض سطح آب، عدد فرود، سرعت جریان، تنش برشی و توان جریان، به عنوان متغیرهای پاسخ، کمتر از ۱ شد که نشان‌دهنده کارآمدی رویکرد پیشنهادی در به‌گزینی ضریب زبری و واسنجی دقیق‌تر مدل است. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان داد عدم قطعیت‌های پنهان در نتایج مدل HEC-RAS بالا است و در صورت تحلیل احتمالاتی روی نتایج می‌توان در بررسی‌های بهسازی، لایروبی و احیای رودخانه‌هایی همچون کارون به نتایج اطمینان و اعتماد بالاتری بخشید و پهنه‌های سطح‌های سیل‌گیری احتمالاتی را استخراج کرد.

کلید واژگان: برآورد فراسنجه، تحلیل هیدرولیکی، عدم قطعیت، شبیه‌سازی مونت-کارلو، مدل HEC-RAS.

۱- مقدمه

متناظر با ویژگی‌های بستر آبراهه معرفی شده است (Shafaei Bajestan, 2005) ولی در رودخانه‌های طبیعی به علت ناهمگنی زبری بستر و بدنه، تغییرپذیری ویژگی‌های هیدرولیکی، فرسایش و رسوب‌گذاری، تغییرپذیری فصلی زبری، ضریب زبری به عنوان مهمترین فراسنجه رابطه دبی-اشل و سطح‌های سیل‌گیری یکی از مهمترین منبع‌های عدم قطعیت در نتایج مدل‌سازی است (Mukolwe et al., 2014; Saberi et al., 2020). منبع‌های مختلف مولد عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی

برآورد مطمئن ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها و کسب دانش دقیق از عدم قطعیت‌های^۱ موجود در نتایج مدل‌های هیدرولیکی در بررسی‌های مهندسی رودخانه، ساماندهی رودخانه‌ها، مدیریت سیلاب و مدیریت ظرفیت انتقال جریان رودخانه‌ها اهمیت بارزی دارد (Vatanchi and Maghrebi, 2019; Kiang et al., 2018). در بررسی‌های هیدرولیک، ضریب زبری به عنوان یک فراسنجه فیزیکی

¹ Uncertainty

و هیدرولیکی عبارت است از: عدم قطعیت‌های طبیعی (ذاتی)، عدم قطعیت‌های مربوط به مدل و فراسنجه‌ها و داده‌های ورودی آن، و عدم قطعیت‌های عملکردی (Teng et al., 2017; Koo et al., 2020 a, b). عدم قطعیت‌های طبیعی یا ذاتی، عدم قطعیت‌های مربوط به فرآیندهای طبیعی تصادفی مانند بارش، جریان آشفته رودخانه و انتقال رسوبات است. عدم قطعیت مدل در نتیجه ساده‌سازی ریاضی فرآیندها و ناتوانی معادله‌های مدل در توصیف و توضیح دقیق سامانه واقعی ایجاد می‌شوند. عدم قطعیت فراسنجه‌ها در نتیجه نامشخص بودن فراسنجه‌ها و ضریب‌های مدل و ناتوانی در تعیین میزان دقیق آنهاست. عدم قطعیت داده‌ها و اطلاعات در نتیجه خطاهای اندازه‌گیری، ناهمگنی و ناجور بودن داده‌ها، خطاهای مربوط به گردآوری و ثبت داده‌ها و کمبود داده‌ها تولید می‌شود، و در نهایت عدم قطعیت‌های عملکردی مدل مربوط به ساخت و توسعه مدل، تعمیر و نگهداری، اجرا و به طور کلی مربوط به عامل‌های انسانی است (Eftekharian et al., 2005). بنابراین به دور از عدم قطعیت ذاتی، سه منبع و عامل اصلی مولد عدم قطعیت در هیدرولوژی و هیدرولیک عبارت‌اند از عدم قطعیت ورودی‌ها، عدم قطعیت فراسنجه‌های مدل و عدم قطعیت ساختاری مدل. از بین فراسنجه‌های مختلف مؤثر بر عدم قطعیت نتایج در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان رودخانه‌ها مانند: دبی و آب‌نگار (هیدروگراف) ورودی، شکل و فاصله مقطع‌های هندسی، عدم قطعیت سازه‌های آبی در مسیر جریان، فراسنجه‌های افت و ضرایب زبری مانینگ که می‌توانند مولدهای عدم قطعیت باشند (Liu and Merwade, 2019). عدم قطعیت مربوط به ضریب زبری به عنوان اصلی‌ترین و تنها فراسنجه واسنجی در مدل‌سازی هیدرولیکی دارای اهمیت ویژه است و حدود ۹۸ درصد از عدم قطعیت کل را دربر دارد (Eftekhari et al., 2005). ضریب زبری اغلب توسط رابطه و یا جدول به صورت تجربی تعیین می‌شود. از جمله در روش کاون ضریب‌های مختلفی مانند جنس بستر، نامنظمی و تغییرپذیری‌های مقطع‌ها، وجود مانع، پوشش گیاهی و درجه پیچان رودی یا مستقیم بودن مسیر بررسی می‌شوند (Mohammadi and Kashefipour, 2011). این

ضرایب‌ها، غیرقابل اندازه‌گیری مستقیم، تابع نظر کارشناسی و تشخیص‌های کیفی هستند و قطعی نمی‌باشند و دارای عدم قطعیت هستند. خطاهای ذاتی مدل‌های هیدرودینامیکی در اثر ذات تصادفی جریان و عدم درک درست فرآیند آن، عدم قطعیت متغیرهای ورودی همچون دبی و ناهم‌آوری عوارض (توپوگرافی) و بستر، خطا در اندازه‌گیری‌ها، فرضیه‌های نامناسب در توسعه مدل‌ها، عدم قطعیت فراسنجه‌ها، ضریب‌ها، ثابت‌ها مدل، عدم قطعیت ساختاری مدل، عدم قطعیت‌های شرایط مرزی و اولیه (Guo et al., 2020) از مهم‌ترین منابع و مولدهای عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولیکی و آب‌شناختی (هیدرولوژیکی) است که باعث ایجاد ابهام، کاهش دقت و کاهش قابلیت اطمینان در تفسیر نتایج می‌شود. بنابراین مسئله عدم قطعیت یکی از مهم‌ترین بازدارنده‌ها در کاربرد نتایج مدل‌سازی در مسئله‌های واقعی است و کمی‌سازی عدم قطعیت نتایج مدل‌سازی ضروری است. روش‌های مختلفی برای تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، شامل الگوریتم تحلیل عدم قطعیت مبتنی بر شبیه‌سازی مونت-کارلو و نمونه‌گیری تصادفی^۱ (Serinaldi, 2013)، برآورد عدم قطعیت با نمونه‌گیری بازگشتی^۲ (Dung et al., 2015)، تحلیل عدم قطعیت مبتنی بر نظریه اطلاعات بیزین^۳ (Guo et al., 2020)، الگوریتم مونت کارلو زنجیر مارکوف^۴ (Pinheiro et al., 2019)، روش گشتاور دوم مرتبه اول پیرامون میانگین^۵ (Eftekharian et al., 2005) و روش عمومی عدم قطعیت همانندی‌ها^۶ (Masoumi et al., 2021) توسعه یافته است که الگوریتم مبتنی بر شبیه‌سازی احتمالی مونت کارلو به دلیل سرعت محاسباتی بالاتر، سادگی کاربرد، بی‌نیاز از محاسبه مشتقات جزئی معادله‌ها، عدم حساسیت به نوع توزیع احتمالاتی متغیر پاسخ، امکان تولید خروجی‌های با سطح‌های احتمالی مدنظر (Couto et al., 2013; Pinheiro et al., 2019; Zheng and Han, 2016; Riahi et al., 2011; Ebtehaj et al., 2020) دارای عمومیت و مقبولیت بیشتری است. در این تحقیق که هدف کاربرد مدل هیدرولیکی در مقیاس بزرگ رودخانه کارون و تحلیل عدم قطعیت آن است به همین دلیل

⁵ Mean First-Order Second-Moment (MFOSM)
⁶ Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)

¹ Monte Carlo-based algorithms
² Bootstrapping
³ Bayesian information-theoretic (BIT)
⁴ Markov chain Monte Carlo (MCMC)

بررسی تأثیر زبری و پوشش گیاهی بر نتایج مدل در رودخانه خشک شیراز (Nikmanesh et al., 2010)، تحلیل حساسیت نتایج مدل HEC-RAS نسبت به ضریب زبری در رودخانه‌های منطقه شیروان (Saberi et al., 2020)، شبیه‌سازی سیل و تعیین خط‌پذیری (ریسک) آسیب و زیان‌های کشاورزی توسط مدل HEC-RAS (Ganji et al., 2014) نشان داده است که حساسیت نتایج مدل HEC-RAS نسبت به ضریب زبری بسیار زیاد است و بنابراین تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل HEC-RAS در رودخانه‌ها با توجه به سطح‌های احتمالی ضریب زبری ضروری است. در رودخانه‌های با شیب کم، همچون رودخانه کارون، تغییرپذیری در نتایج مدل در نتیجه برآورد غیرقطعی ضریب زبری بیشتر است و بی‌توجهی به خطاهای ناشی از ضریب زبری قابلیت اعتماد و اطمینان نتایج را مورد تردید قرار می‌دهد. در این زمینه تحلیل عدم قطعیت زبری موثر مدل HEC-RAS و تأثیر آن بر سطح‌های سیل‌گیری پایین‌دست و تراز آب مشاهده شده پایاب به روش GLUE (Pappenberger et al., 2005)، تحلیل عدم قطعیت بیزین مدل HEC-RAS در رخ‌نمای (پروفیل) سطح آب رودخانه در کشور برزیل (Pinheiro, et al., 2019)، تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل HEC-RAS در مدلسازی شکست سد (Tschiedel et al., 2018)، تحلیل تأثیر عدم قطعیت دبی اوج (پیک) سیلاب بر خروجی HEC-RAS (Dysarz et al., 2019)، تحلیل عدم قطعیت آبستنگی پایه پل در HEC-RAS (Bessar et al., 2020; Rathod and Manekar, 2020)، مدلسازی رابطه دبی-اشل توسط HEC-RAS و تحلیل عدم قطعیت آن (Ahmed and Freeman, 2004)، تحلیل تأثیر عدم قطعیت دبی سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف بر پهنه‌های سیل‌گرفتگی در مدل HEC-RAS در مالزی (Faghih et al., 2017)، تحلیل تأثیر عدم قطعیت ضریب زبری و دبی جریان بر پهنه‌های سیل‌گیری در مدل HEC-RAS در آمریکا (Stephens et al., 2020) نمونه‌هایی از کاربرد موفق تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل HEC-RAS است ولی در داخل کشور کمتر به مسئله عدم قطعیت نتایج مدل HEC-RAS پرداخته شده است. ملاحظه می‌شود اگر چه تحلیل‌های عدم قطعیت در بررسی‌های منابع آب در داخل کشور

از روش مونت کارلو که قابلیت، کارآمدی و سرعت محاسباتی بالای آن تایید شده، استفاده شد.

تاکنون بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه واسنجی، صحت‌سنجی و ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولیکی در تحلیل جریان رودخانه‌ها انجام شده است (Saberi et al., 2020; Scharffenberg and Kavvas, 2011). صحت مدل‌سازی و سودمندی این بررسی‌ها به دقت اندازه‌گیری‌های میدانی و واسنجی مدل هیدرولیکی بستگی دارد (Mansanarez et al., 2019). از این رو برای یک مجموعه داده شده از ویژگی‌های هندسی مقطع عبور جریان، زبری و شرایط مرزی، ترکیب‌های مختلفی از فراسنجه‌های مدل می‌تواند منجر به پیش‌بینی یکسان مشخصات هیدرولیکی جریان شود، این حالت همپایانی^۱ نامیده می‌شود که در نتیجه همبستگی بین فراسنجه‌ها، حساسیت و عدم حساسیت فراسنجه‌ها رخ می‌دهد و ممکن است موجب بروز عدم قطعیت در خروجی‌ها شود (Bautista et al., 2019; Soroush and Riahi, 2009). بنابراین لازم است در تحلیل نتایج مدل‌های هیدرولیکی، عدم قطعیت نتایج در نتیجه فراسنجه‌های مدلسازی بررسی شود. بررسی کارایی تحلیل عدم قطعیت ضریب‌های مدل شبه‌دو بعدی^۲ توزیع سرعت و تنش برشی در رودخانه‌ها (Riahi et al., 2011, 2018)، ضریب‌های نفوذ در مدلسازی حرکت آب در خاک (Soroush and Riahi, 2019)، تحلیل بیزین عدم قطعیت تراز سطح آب در رودخانه‌ها (Le coz et al., 2014)، عدم قطعیت اندازه‌گیری دبی و منحنی دبی-اشل رودخانه‌ها (Di Baldassarre and Montanari, 2009)، عدم قطعیت سطح‌های سیل‌گیری (Mukolwe et al., 2014)، عدم قطعیت نتایج مدل FLO-2D در شبیه‌سازی سطح‌های سیل‌گیری (Huang and Qin, 2014)، از جمله مواردی است که نشان‌دهنده کاربرد موفق تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل‌های هیدرولیکی در مهندسی رودخانه است. یکی از مدل‌های هیدرولیکی که به صورت وسیعی در بررسی‌های مهندسی رودخانه استفاده شده است مدل HEC-RAS³ است. بررسی کاربرد زبری‌های مختلف در نتایج مدل HEC-RAS در مدلسازی رودخانه کارده (Abasi et al., 2012)، تأثیر زبری بر گستره پهنه سیل رودخانه اترک (Eftekharian et al., 2005)،

³ Hydrologic Engineering Center – River Analysis System: HEC-RAS

¹ Equifinality

² Quasi-Two Dimensional

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش از پژوهش، منطقه مورد بررسی، داده‌ها و اطلاعات استفاده شده در مرحله‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-RAS، جزئیات رویکرد ترکیبی مونت-کارلو در HEC-RAS و روش تحلیل نتایج عدم قطعیت ارائه شده است. با این رویکرد می‌توان کارآیی تحلیل هیدرولیکی رودخانه کارون در شرایط عدم قطعیت ضریب زبری در جریان‌های سیلابی و در جریان میانگین رودخانه را با روش MCS مورد ارزیابی قرار داد. برای دستیابی به این هدف تغییرپذیری‌های تصادفی ضریب زبری مانینگ با توزیع احتمالاتی نرمال در محدوده ایستگاه‌های آب‌سنجی ملاثانی تا فارسیات در هسته محاسباتی مدل HEC-RAS اعمال شده است. با استفاده از روش MCS، به ازای میزان‌های تصادفی ممکن بین ۰/۱ تا ۰/۱ برای ضریب زبری مانینگ (۳۰۰۰ نمونه)، طیف منحنی پاسخ، باندهای اطمینان در سطح احتمال ۹۵ درصد و شاخص‌های عدم قطعیت شش فراسنجه هیدرولیکی تراز سطح آب، عرض سطح آب، سرعت جریان، عدد فرود، توان جریان و تنش برشی محاسبه شده است.

۲-۱- بررسی موردی و داده‌های مورد استفاده

بررسی موردی در این تحقیق رودخانه کارون دارای حوضه آبریزی با گستره‌ای بالغ بر ۶۷۰۰۰ کیلومتر مربع و طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر است که از کوه‌های زاگرس سرچشمه گرفته و پس از عبور از دشت خوزستان به خلیج فارس می‌ریزد (Fakouri et al., 2018). بازه انتخابی از ایستگاه ملاثانی در بالادست مرز مدلسازی و در فاصله ۶۵ کیلومتری بالادست شهر اهواز تا ایستگاه فارسیات در پایین دست مرز مدلسازی و در فاصله ۴۰ کیلومتری پایین دست شهر اهواز است (Fakouri et al., 2017). این بازه از چندین زیربازه مستقیم و همچنین چندین پیچان رود تشکیل شده است. تغییرپذیری‌های تراز بستر در رودخانه نیز غیریکنواخت و نامنظم با شیب کم است. ترکیبی از مقطع‌های عرضی ساده، مقطع‌های عرضی مرکب و مقطع‌های عرضی دوگانه در طول مسیر وجود دارد. در شکل ۱ منطقه مورد بررسی، مسیر رودخانه در بازه انتخابی و برخی از مقطع عرضی آن نشان داده شده است. بازه انتخابی از نظر هیدرولیکی دارای

طی دو دهه گذشته استفاده شده است ولی در زمینه مدل‌های نرم‌افزاری هیدرولیکی جریان در آبراه‌ها و رودخانه‌های داخل کشور از جمله مدل HEC-RAS، تحلیل عدم قطعیت کمتر مورد توجه بوده است. افزون بر این، یکی از موارد مهمی که بر خلاف بررسی‌های شبیه‌سازی و واسنجی مدل HEC-RAS در ایران به آن کمتر پرداخته شده است، تحلیل عدم قطعیت حاصله از ضریب زبری در هنگام ارائه نتایج در بررسی‌های موردی رودخانه‌ها و از جمله رودخانه کارون به عنوان یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های ایران است، که دارای ارزش کاربردی بارزی است. مدل HEC-RAS یک مدل رایگان است که در بررسی‌های مهندسی رودخانه و تحلیل پهنه‌های سیل‌گیری و انتقال رسوب‌ها قابلیت‌های زیادی دارد. این مدل در بررسی‌های کاربردی زیادی نیز استفاده شده و قابلیت ترکیب با دیگر مدل‌های HEC و نیز ابزارهای مختلف GIS را دارد. همچنین در تحقیقات پیشین داخل کشور به‌رغم استفاده گسترده از این مدل کمتر از قابلیت‌های کنترل هسته محاسباتی و خودکارسازی فرآیندهای شبیه‌سازی آن استفاده شده است. همچنین این مدل همواره رو به توسعه بوده و توسط مرکز تخصصی HEC به صورت رایگان پشتیبانی می‌شود. به همین منظور این تحقیق با هدف بررسی تاثیر عدم قطعیت ضریب زبری مانینگ بر مدلسازی هیدرولیکی رودخانه کارون، با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی مونت-کارلو^۱ (MCS) و مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی HEC-RAS انجام گرفت. در این پژوهش روش اصلاح شده مونت-کارلو (Marce et al., 2004) که در تحلیل عدم قطعیت مدل‌های هیدرولیکی دقت مطلوبی نشان داده است به دلیل جدید بودن و عملکرد مناسب در شبیه‌سازی هیدرولیکی (Riahi et al., 2011)، استفاده شد. به این منظور با توسعه یک برنامه واسط و ترکیب آن با هسته محاسباتی مدل HEC-RAS، امکان اجرای خودکار مدل و استخراج نتایج شبیه‌سازی مونت-کارلو از آن، فراهم شد و تحلیل عدم قطعیت روی شش فراسنجه هیدرولیکی تراز سطح آب، عرض سطح آب، توان جریان، تنش برشی، عدد فرود و سرعت جریان در طول بازه ۱۰۵ کیلومتری رودخانه کارون انجام گرفت.

¹ Monte Carlo Simulation

صحت‌سنجی نیز نتایج مدل در ایستگاه اهواز ارزیابی شد و پس از آن تحلیل عدم قطعیت با شبیه‌سازی مونت-کارلو صورت گرفت. در مدل HEC-RAS برای مدل‌سازی هیدرولیکی در حالت جریان دائمی از روش گام استاندارد استفاده شده و محاسبات با توجه به نوع جریان زیربحرانی در طول مسیر انتخابی رودخانه، از شرایط مرزی پایاب آغاز شده و تا شرط مرزی سراب پیش می‌رود. مبنای محاسبات در روش گام به گام استاندارد، معادله انرژی در مقاطع متوالی است و در حالت غیردائمی نیز از روش تفاضل محدود برای حل معادله‌های پیوستگی و مومنت غیردائمی استفاده می‌کند. محاسبه دبی جریان و ضریب زبری نیز با استفاده از معادله مقاومت جریان مایننگ و روش تقسیم مقطع برای زبری‌های نایک‌نواخت و ناهمگن صورت می‌گیرد.

۲-۳- ترکیب شبیه‌سازی مونت-کارلو با HEC-RAS

روش MCS از پرکاربردترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی است که تأثیر فراسنجه‌های غیرقطعی مدل بر نتایج را با استفاده از شبیه‌سازی به ازای توزیع احتمالاتی پ فراسنجه‌های موثر مورد ارزیابی قرار

ویژگی‌های بارز و خاصی است که پیچیدگی‌های آن را افزایش می‌دهد. همچنین ارزش کشاورزی و شهری اراضی اطراف رودخانه، لزوم بررسی عدم قطعیت‌ها در نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

در این تحقیق اطلاعات آب‌سنجی سه ایستگاه ملاثانی درمرز بالادست بازه مورد بررسی، ایستگاه اهواز در وسط بازه مورد بررسی، ایستگاه فارسیات در مرز پایین دست بازه مدل‌سازی، ویژگی‌های مسیر رودخانه و ۱۱۵ مقطع عرضی رودخانه که توسط سازمان آب و برق خوزستان تهیه و گردآوری و ثبت شده است، برای مدل‌سازی هیدرولیکی استفاده شده است.

۲-۲- مدل‌سازی هیدرولیکی

برای مدل‌سازی هیدرولیکی جریان در بالادست از شرط مرزی آب‌نگار جریان روزانه ایستگاه ملاثانی در سال ۹۰-۱۳۹۱ برای واسنجی و سال آبی ۹۲-۱۳۹۳ برای صحت‌سنجی استفاده شد. برای شرط مرزی پایین دست نیز رابطه دبی-اشل در ایستگاه فارسیات استفاده شده است. ضریب زبری در مرحله واسنجی تعیین و تدقیق شده و میزان دقیق آن از مقایسه آب‌نگار دبی و آب‌نگار اشل در ایستگاه اهواز تعیین شده است. در مرحله

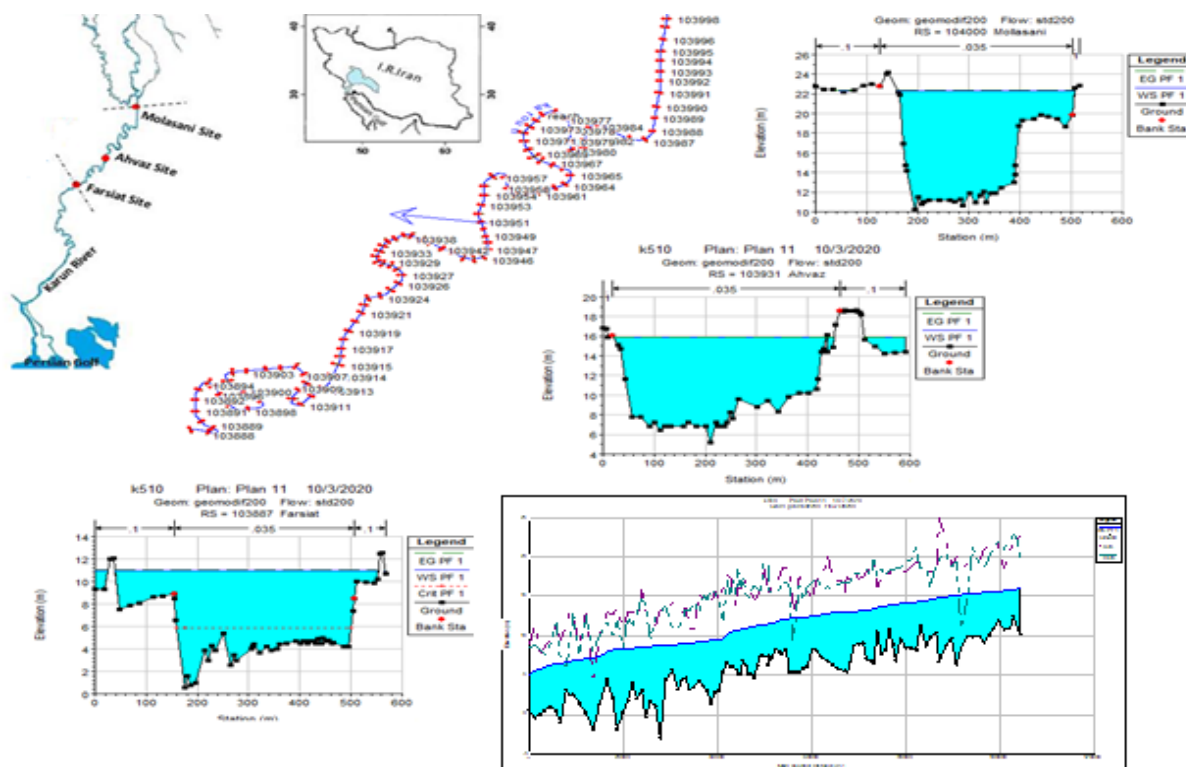


Fig. 1 The river plan in Mollasni to Farsiat reach, cross section and bed profile with water elevation in $Q=457\text{m}^3/\text{s}$
 شکل ۱ مسیر رودخانه کارون در بازه ملاثانی تا فارسیات، شکل مقطع‌های عرضی، بستر و تراز آب در دبی ۴۵۷ مترمکعب در ثانیه

می‌دهد (Seifi et al., 2020). در این روش به ازای سری تصادفی تولید شده از فراسنجه‌ها و ضریب‌های مدل و به شمار زیاد، مدل شبیه‌ساز اجرا شده و نتایج خروجی‌های مدل در شبیه‌سازی‌ها تحلیل می‌شوند. تحلیل عدم قطعیت به روش MCS نیازمند شناسایی منبع‌های مولد عدم قطعیت و تحلیل آماری آن‌ها به منظور دستیابی به نمونه‌های تصادفی با شمار زیاد است. روش MCS برای هر فراسنجه از تابع چگالی احتمال مناسب آن استفاده می‌کند (Dalledonne et al., 2019). از مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در کیفیت نتایج شبیه‌سازی، مناسب بودن تابع چگالی احتمال برای فراسنجه‌ها است که به طور معمول به علت نبود اطلاعات، از توزیع‌های ساده نرمال، گوسین و یکنواخت استفاده می‌گردد (Bates and Townley, 1988). انتخاب تابع چگالی احتمال تنها برای به دست آوردن نمونه فراسنجه‌ها از فضای فراسنجه‌ای مربوطه اهمیت دارد (Jacquin and Shamseldin, 2007). در این تحقیق انتخاب توزیع نرمال برای ضریب زبری بر مبنای تحقیقات پیشین مرتبط در این زمینه که توزیع نرمال را پیشنهاد داده‌اند انجام شده است (Huang et al., 2014).

از بین فراسنجه‌های مختلف مؤثر بر هیدرولیک جریان درون رودخانه‌ها مانند: آب‌نگار ورودی، شکل مقطع هندسی، فراسنجه‌ها و ضریب‌های زبری مانینگ که می‌توانند مولدهای عدم قطعیت باشند. در این بررسی عدم قطعیت مربوط به ضریب زبری به عنوان اصلی‌ترین و تنها فراسنجه واسنجی در مدل HEC-RAS مدنظر قرار گرفته است.

مبنای روش MCS توسعه یافته در این تحقیق بر پایه استفاده از تولید احتمالاتی ضریب زبری و دستیابی به تابع توزیع احتمالاتی خروجی‌ها شامل: تراز سطح آب، عرض سطح آب، سرعت جریان، عدد فرود، توان جریان و تنش برشی است. بدین صورت که منبع‌های عدم قطعیت با استفاده از تابع توزیع احتمالی به طور تصادفی و به تعداد ۳۰۰۰ نمونه تولید می‌شود. سپس این نمونه‌های تولید شده در یک فرآیند شبیه‌سازی متوالی خودکار و با کمک یک برنامه رایانه‌ای در هر مرتبه به فایل هندسی مدل HEC-RAS وارد می‌شوند. آن‌گاه مازول محاسباتی HEC-RAS فراخوانی شده و مدل HEC-RAS به شمار ۳۰۰۰ مرتبه شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در مسیر رودخانه کارون را با حل معادله‌های حاکم انجام می‌دهد

(Abbaspour et al., 2007). در حین اجرای هر مرتبه مدل، نتایج خروجی HEC-RAS نیز توسط زیر برنامه جانبی توسعه یافته استخراج می‌شوند. در انتهای فرآیند، زیر برنامه تحلیل عدم قطعیت فراخوانی شده و عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل در شش فراسنجه تراز سطح آب، عرض سطح آب، سرعت جریان، عدد فرود، توان جریان و تنش برشی از طریق محاسبه شاخص‌های آماری و تعیین باند عدم قطعیت متناظر و یا تعیین تابع توزیع احتمالی برآورد شده است. روندنمای مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. انجام این مرحله‌ها به برآورد عدم قطعیت در فراسنجه‌های مدل و در نتیجه خروجی مدل، عدم اریب بودن میانگین خروجی مدل و تعیین حدود اطمینان میزان‌های پیش‌بینی شده می‌انجامد (Marce et al., 2004). در نتیجه با استفاده از این روش محاسباتی خودکار به جای پیش‌بینی یک میزان مطلق برای خروجی‌های مدل HEC-RAS برخلاف آنچه در تحقیقات همانند انجام گرفته، محدوده‌ای از خروجی‌ها به شکل منحنی‌های با سطح‌های احتمالی متناظر که نتیجه عدم قطعیت مدل توسعه یافته است، به دست می‌آید. برای بررسی عدم قطعیت، حدود اطمینان ۹۵ درصد (95PPU) برای پیش‌بینی‌ها مد نظر قرار گرفته است. برای به دست آوردن آن در آغاز حدود ۲/۵ درصد (X_U) و ۹۷/۵ درصد (X_L) از روی توزیع تجمعی احتمال تجربی خروجی‌های مدل در ۳۰۰۰ شبیه‌سازی تعیین شده است. حدود اطمینان مناسب حدودی هستند که بالای ۸۰ درصد از میزان‌های مشاهده‌شده در آن حدود قرار گرفته باشند و دارای عرض میانگین قابل قبولی باشند. برای سنجش عرض میانگین باند اطمینان، شاخص عامل عرض باند مطابق رابطه ۱ استفاده شده است (Abbaspour et al., 2007):

$$d.factor = \frac{\bar{d}_x}{\sigma_x} \quad (1)$$

در آن S_x انحراف استاندارد مشاهده شده و \bar{d}_x عرض میانگین باند اطمینان است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{d}_x = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_U - X_L) \quad (2)$$

میزان عامل عرض باند کوچکتر از ۱ و \bar{d}_x برابر صفر میزان بهینه به حساب می‌آیند (Abbaspour et al., 2007). درصد داده‌های قرار گرفته در باند اطمینان ۹۵ درصد نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (۴)$$

در این رابطه O_i میزان اندازه‌گیری شده، P_i میزان شبیه‌سازی شده توسط مدل و \bar{O} میانگین میزان اندازه‌گیری است. محدوده تغییرات NSE از منفی بینهایت تا یک است. عدد ۱ مربوط به مدلی است که به کل با واقعیت همخوانی دارد. اگر NSE بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد نتایج مدل رضایت بخش و اگر بزرگتر از ۰/۷۵ باشد نتایج مدل مطلوب است (Moriasi et al., 2007). همان‌گونه که بیان شد اگرچه دقت مدل HEC-RAS در بررسی‌های زیادی تایید شده است ولی به تحلیل عدم قطعیت نتایج آن و تحلیل احتمالی نتایج خروجی آن چندان توجه نشده که در این تحقیق به آن پرداخته شده است.

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج مدلسازی هیدرولیکی رودخانه کارون و رویکرد MCS ترکیب شده با مدل ارائه شده است. در آغاز نتایج

$$95PPU = \frac{1}{n} \text{Count}(X|X_U \leq X \leq X_L) \quad (۳)$$

میزان مطلوب 95PPU برابر ۱۰۰ درصد است و بنابر نظر Abbaspour et al. (2007) در صورتی که درصد داده‌های داخل باند اطمینان نزدیک به ۹۰ درصد باشد عدم قطعیت‌ها کم خواهند بود. در این تحقیق مرحله‌های توسعه و انتخاب توزیع پسین، تولید فایل‌های ورودی و اجرای خودکار هسته محاسباتی مدل HEC-RAS، استخراج نتایج با برنامه تدوین شده در محیط رایانه‌ای ویژوال بیسیک انجام شده است. شبیه‌سازی فرآیند مونت-کارلو، تحلیل نتایج نتایج HEC-RAS و محاسبات عدم قطعیت با برنامه‌نویسی در نرم افزار MATLAB 2019 انجام شد. افزون بر این در این تحقیق از معیاره (NSE^1) نش-ساتکلیف (Nash and Sutcliffe, 1970) برای گزینش بهترین میزان‌های ضریب زبری مانینگ و محدود کردن باندهای عدم قطعیت به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی و معیار به‌گزینی در شبیه‌سازی‌های عدم قطعیت استفاده شد:

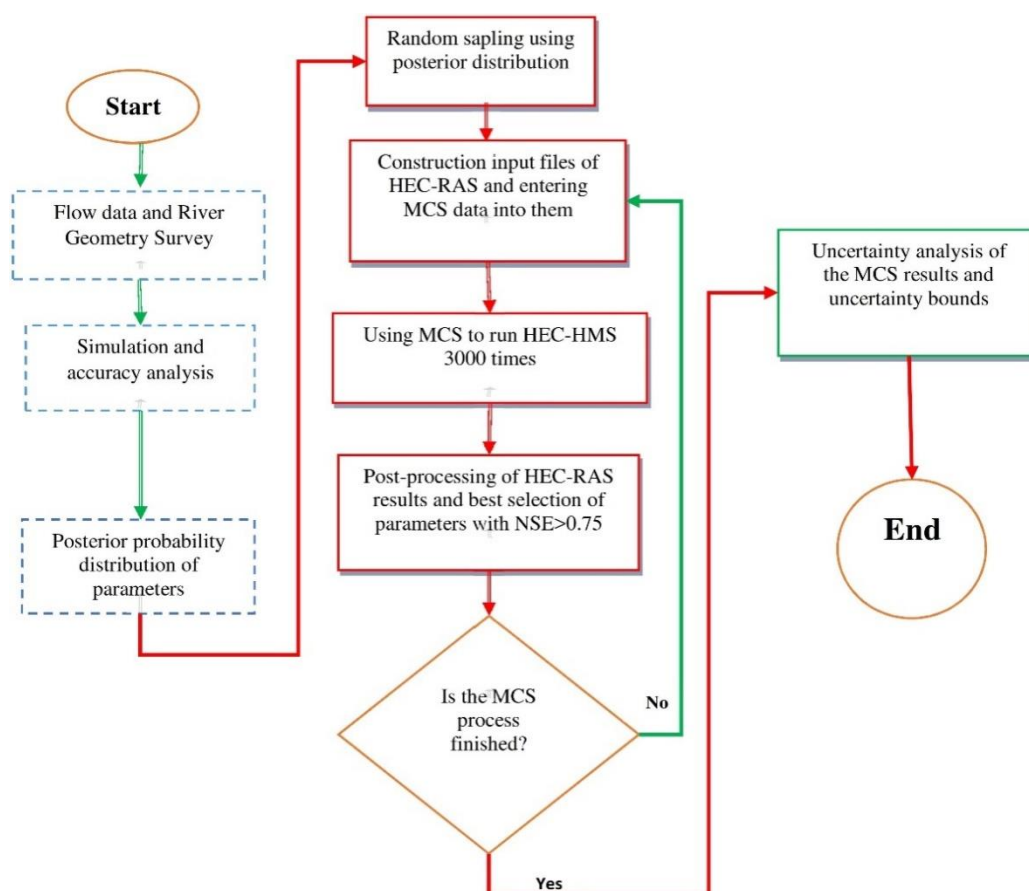


Fig. 2 The flowchart of uncertain analysis in HEC-RAS model with MCS
 شکل ۲ روندنمای تحلیل عدم قطعیت مدل HEC-RAS به روش MCS

¹ Nash-SutcliffeEfficiency

هیدرولیکی در موج مثبت و همچنین کاهش دقت نتایج در موج مثبت نیز توسط (2011) Reichstetter گزارش شده است. در

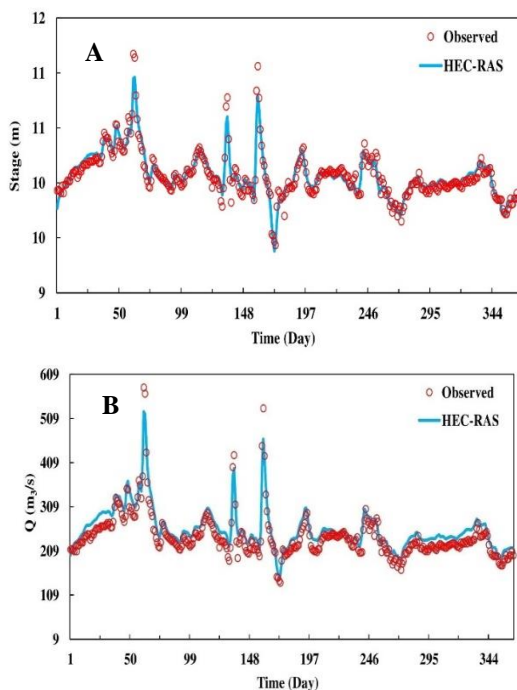


Fig. 3 The model results in Ahvaz station at calibration stage A) Discharge, B) Stage
شکل ۳ نتایج مدل در ایستگاه اهواز در مرحله واسنجی (A) دبی جریان، (B) تراز سطح آب

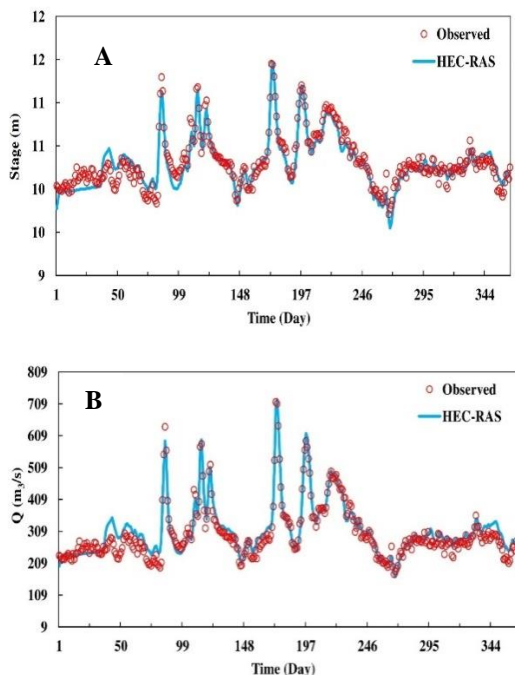


Fig. 4 The model results in Ahvaz station at verification stage A) Discharge, B) Stage
شکل ۴ نتایج مدل در ایستگاه اهواز در مرحله اعتبارسنجی (A) تراز سطح آب و (B) دبی جریان

ارزیابی دقت مدل در مرحله‌های واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است و سپس نتایج تحلیل عدم قطعیت فراسنجه‌های هیدرولیکی مدل در طول بازه مورد بررسی، ارزیابی شده است.

۳-۱- نتایج ارزیابی دقت

در این بررسی در آغاز ویژگی‌های هندسی رودخانه کارون و مقطع‌های عرضی به مدل معرفی شد و آن‌گاه مدل برای داده‌های دبی جریان روزانه سال ۱۳۹۰-۹۱ واسنجی شد. با انتخاب میزان‌های مختلف ضریب زبری و تغییر گام به گام آن، در نهایت ضریب زبری بهینه رودخانه برابر 0.35 به دست آمد (Fakouri et al., 2019).

مبنای مقایسه، داده‌های اندازه‌گیری شده تراز سطح آب و دبی جریان روزانه در طی یک سال آبی کامل در ایستگاه اهواز بود. بنابر نتایج در شکل ۳ مشاهده می‌شود که به‌رغم انتخاب یک میزان ثابت ضریب زبری برای کل مسیر رودخانه به منظور هرچه کاربردی‌تر کردن نتایج مدل‌سازی، مدل در مرحله واسنجی به خوبی توانسته است روند تغییرپذیری دبی جریان و تراز سطح آب در سال آبی ۱۳۹۰-۹۱ را شبیه‌سازی کند و ضریب تعیین R^2 و RMSE مدل در دبی جریان به ترتیب برابر 0.94 و 21 ، و در تراز سطح آب به ترتیب برابر 0.93 و 0.06 در مرحله واسنجی به دست آمد. به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل نیز مدل با میزان‌های فراسنجه‌های بهینه شده در مرحله واسنجی، برای سال آبی ۱۳۹۲-۹۳ در بازه ملاثاتی تا فارسیات و بدون تغییر فراسنجه‌های مرحله واسنجی اجرا شد. نتایج مرحله اعتبارسنجی نیز در شکل ۴ ارائه شده است. ضریب تعیین R^2 و RMSE مدل در دبی جریان به ترتیب برابر 0.94 و $25/2$ در تراز سطح آب به ترتیب برابر 0.9 و 0.1 در مرحله صحت‌سنجی حاصل شد و عملکرد مدل قابل قبول است (Fakouri et al., 2019). در بازه انتخابی رودخانه کارون به علت کم بودن شیب رودخانه همواره جریان زیربحرانی است و شیب رودخانه نیز کم است، در شیب کم اثرگذاری‌های پویائی (دینامیکی) و موج پویائی (دینامیکی) سیلاب شدیدتر است و در روزهای ۲۰ تا ۷۵ و روزهای ۲۷۰ تا ۳۴۰ در شکل ۳ دبی جریان ورودی در حال افزایش بوده است و با توجه به شیب کم رودخانه، افزایش دبی به صورت یک موج مثبت در رودخانه عمل می‌کند و مدل در شبیه‌سازی موج مثبت سرعت و دبی با خطا همراه است. خطای بیشتر مدل‌سازی

بررسی کم است و جریان همواره در آن زیر بحرانی است همواره کنترل از نوع پایین دست در جریان درون رودخانه برقرار است. در این حالت هرچه به مرز پایین دست نزدیک تر می شویم به علت قطعی بودن شرط مرزی و مشخص بودن رابطه دبی - اشل در آن، تاثیر کنترل هیدرولیکی پایین دست، عدم قطعیت نتایج کاهش می یابد. هر چه از پایین دست فاصله می گیریم تاثیر شرایط ورودی بالاست بر تراز سطح آب بیشتر می شود و تاثیر شرط کنترل هیدرولیکی پایاب بر محاسبات پروفیل سطح آب کاهش می یابد و در نتیجه عدم قطعیت نتایج نیز افزایش می یابد. افزون بر این مشاهده می شود در میزان های ضریب زبری کوچک که تراز سطح آب پایین می افتد ناپایداری و نوسان سطح آب (حدود کیلومتر ۴۰ تا ۹۰ در شکل ۵) ایجاد می شود و عدم قطعیت ها را افزایش می دهد. این نتایج در سازگاری با نتایج بررسی های (Khayyun (2008), Wang et al. (2019) و Gillen (1996) است که حساسیت و تغییر پذیری بیشتر پروفیل سطح آب در بازه های بالادست در جریان زیر بحرانی نسبت به ضریب زبری مانینگ را گزارش کرده اند. بنابراین با توجه به اینکه ساختار مدل و فراسنجه های آن و نیز دبی طراحی سیل، عدم قطعیت هایی دارند، به رغم دقت مطلوب مدل HEC-RAS، نتایج مدل را نمی توان قطعی تلقی کرد. در واقع به جای یک میزان قطعی، بهتر است با تعریف تراز سطح آب به عنوان متغیری تصادفی در شبیه سازی احتمالاتی مونت-کارلو حدود اطمینان آن را مشخص کنیم (Eftekharian et al., 2005).

میزان های کمی عدم قطعیت نیز در جدول ۱ برای ۳۰۰۰ شبیه سازی و برای شبیه سازی هدفمند با $NSE > 0.75$ آمده است. مشاهده می شود در کل ۳۰۰۰ شبیه سازی عامل پهنای باند عدم قطعیت تراز سطح آب در دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه ۲ و در دبی ۴۵۷ مترمکعب بر ثانیه ۰/۹۶ است. همان طور که رابطه های ۱ و ۲ نشان می دهند این عامل میانگین فاصله بین حد بالا و حد پایین در باندهای عدم قطعیت نسبت به انحراف معیار مقادیر مشاهداتی را نشان می دهد. عدد ۰/۹۶ در حقیقت نشان می دهد که پهنای باند عدم قطعیت نتایج مدل در شبیه سازی تراز سطح آب برابر ۹۶ درصد انحراف معیار داده های تراز سطح آب مشاهده شده در طول بازه مورد بررسی رودخانه کارون است. بیشینه میزان مجاز عامل پهنای باند قابل پذیرش ۱ است و مشاهده می شود در دبی ۳۰۰۰ عدم قطعیت نتایج بسیار

مرحله اعتبارسنجی خطا قدری افزایش یافته و نشان دهنده عدم قطعیت ذاتی (طبیعت تصادفی جریان آشفته مجاری روباز، ناهمگنی و تغییرپذیری تصادفی ویژگی های جریان، مشخصات مقطع ها و بستر) در نتایج مدل است و لزوم تحلیل عدم قطعیت و پیش بینی بازه های احتمالاتی را نشان می دهد.

۳-۲- عدم قطعیت تراز سطح آب و عرض سطح آب

عدم قطعیت در مدلسازی، در نتیجه شرایط متنوعی مانند عدم قطعیت طبیعت تصادفی پدیده (ذاتی)، عدم قطعیت در اندازه-گیری داده های ورودی، عدم قطعیت در توسعه مدل و خطای برآورد فراسنجه ها ایجاد می شود. عدم قطعیت داده های ورودی، در اثر خطاهای اندازه گیری داده های شبکه آب سنجی یا خطا در پیش بینی داده های ورودی مدل مانند بارش، رواناب ایجاد می شود. عدم قطعیت و خطای توسعه مدل، در نتیجه ناهمخوانی کامل معادله های ریاضی مورد استفاده در توسعه مدل با شرایط واقعی حاکم بر فیزیک پدیده های طبیعی تولید می شود و برآورد ضریب ها و فراسنجه های مدل، با توجه به به دقت آمار و اطلاعات در دسترس برای واسنجی مدل، همواره دارای عدم قطعیت و خطاست (Heydari et al., 2007). در این قسمت و بخش های بعدی این پژوهش نتایج تحلیل عدم قطعیت در فراسنجه های خروجی هیدرولیکی مدل HEC-RAS ارائه شده است. تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو با ۳۰۰۰ شبیه سازی در دو دبی میانگین روزانه ۴۵۷ و دبی بیشینه ثبت شده ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه در رودخانه کارون انجام شده است. نتایج عدم قطعیت در دبی بیشینه رودخانه کارون برابر ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه در ایستگاه اهواز که در ۱۵ سال اخیر رخ داده است و همچنین جریان ۴۵۷ مترمکعب بر ثانیه که میانگین دبی روزانه در بازه ۱۳ سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۳ است، ارائه شده است. به منظور رعایت اختصار تنها نتایج دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه بصورت نمودار و نگاره ای (گرافیکی) ارائه شده است و نتایج دبی میانگین ۴۵۷ نیز بصورت مقادیر کمی در جدول ها ارائه و بررسی شده است. در شکل ۵-الف طیف پاسخ هیدرولیکی تراز سطح آب در طول رودخانه کارون ارائه شده است. مشاهده می شود که محدوده طیف پاسخ نتایج بسیار گسترده است و نشان دهنده عدم قطعیت بالای نتایج مدل در تراز سطح آب نسبت به ضریب زبری مانینگ است. با توجه به اینکه شیب رودخانه کارون در طول مسیر مورد

بیشتر است ولی در دبی ۴۵۷ از ۱ کمتر است و قابل پذیرش است. همچنین بنابر نتایج، اعمال شرط گزینش هدفمند ضریب زبری با معیار $NSE > 0.75$ نشان می‌دهد عامل عدم قطعیت پهنای باند تراز سطح آب از ۲ به ۰/۰۷ در دبی بیشینه و از ۰/۹۶ به ۰/۰۲ در دبی میانگین روزانه کاهش یافته است. این مطلب از یک سو لزوم توجه به انتخاب دقیق ضریب زبری یکپارچه در مدل HEC-RAS را مشهود می‌سازد و از سوی دیگر نشان می‌دهد به‌گزینی ضریب زبری با معیار NSE کارآمدی مطلوبی داشته است. در شکل ۵-ب نتایج شبیه‌سازی تراز سطح آب با حدود اطمینان ۹۵ درصد شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است و برخلاف روش‌های کلاسیک که یک تراز سطح آب ثابت در شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌شود در این شکل باند اطمینان احتمالی برای تراز سطح آب تهیه شده است که قابلیت اطمینان و اعتماد در بررسی‌های پهنه‌بندی سیل و خطرپذیری آسیب و زیان سیل را افزایش می‌دهد. همچنین در شکل ۶-الف و ب طیف پاسخ و حدود اطمینان ۹۵ درصد شبیه‌سازی‌های مربوط به فراسنجه عرض سطح آب و میزان‌های عددی شاخص‌های عدم قطعیت آن نیز در جدول ۱ آمده است. افزون بر این در این جدول شاخص‌های عدم قطعیت برای عرض سطح آب در مقطع اصلی، دشت سیلابی چپ و راست نیز آمده است. همان‌طور که در شکل ۶-الف آمده است تغییرات عرض سطح آب در برخی مقطع‌ها بسیار زیاد است. به عنوان مثال در کیلومتر ۶۳ اختلاف عرض سطح آب در طی ۳۰۰۰ شبیه‌سازی مونت-کارلو ۲/۵ برابر شده است. عرض از ۳۰۰ متر به ۷۵۰ متر افزایش یافته است. بررسی مقطع‌های عرضی نشان داد که در کیلومتر ۶۳ شکل مقطع عرضی به صورت یک مقطع نامتقارن کم عمق و عریض واقع در قسمت پیچان‌رود آغازین (شکل ۱) است.

در این موقعیت عرض مقطع تا ۷۵۰ متر نیز می‌رسد در حالی که عمق مقطع کم است و مقطع عرضی نیز در سمت چپ شیب جانبی خیلی کمی دارد و دیواره ساحلی سمت راست نزدیک به عمود کامل است و تغییرپذیری‌های ضریب زبری به علت محدود بودن عمق و گستره مقطع باعث تغییرپذیری‌های قابل توجه در عرض سطح آب شده است.

در این حالت تغییر ضریب زبری جریان در طی شبیه‌سازی‌ها باعث افزایش قابل توجه در عرض جریان می‌شود و به همین دلیل محدوده تغییرپذیری‌های زیادی دارد. این تغییرپذیری‌های

قابل توجه در سرعت جریان در این مقطع نیز در شکل ۷ مشاهده شده است. همچنین مقایسه شاخص‌های عدم قطعیت در سیلاب‌دشت‌های سمت چپ و راست نسبت به مقطع اصلی در جدول ۱ نشان می‌دهد که با تغییر ضریب زبری، عرض سطح آب در سیلاب‌دشت‌ها عدم قطعیت بسیار بیشتری نسبت به مقطع اصلی دارد و تاثیر بارز عدم قطعیت ضریب زبری بر پهنه-های سیل‌گیری اراضی مجاور رودخانه را مشهود می‌سازد. همچنین بررسی نتایج در شکل ۶-ب و سازگاری آنها با شکل مقطع‌های عرضی در طول مسیر رودخانه و همچنین پیچان-رودها و مئاندرهای موجود در بازه مورد بررسی نشان می‌دهد در محدوده‌هایی از بازه مورد بررسی رودخانه کارون که شکل مقطع‌های عرضی از نوع پهن و کم عمق و پهن می‌باشند عدم قطعیت عرض سطح آب نسبت به ضریب زبری زیادتر است و لازم است دقت و توجه بیشتری به تغییرپذیری‌های مکانی ضریب زبری در طول رودخانه شود.

همچنین بررسی تغییرپذیری عدم قطعیت دشت‌های سیلابی، مسیر (پلان) طولی رودخانه و پیچان‌رودهای موجود نشان داد که در نتایج مدل HEC-RAS که یک مدل یک‌بعدی است تاثیر شکل مقطع‌های عرضی و نامنظمی‌های مقطع‌های عرضی بر عرض سطح آب بیشتر از اثرات پیچان‌رودهای موجود است و مشاهده می‌شود که عدم قطعیت عرض سطح آب در نتایج مدل HEC-RAS زیاد است. این نتایج تایید می‌کنند که عدم قطعیت‌های عرض سطح آب بیشتر از تراز سطح آب است و تغییرپذیری مکانی ضریب زبری نیز بسیار با اهمیت است. بنابراین در صورتی که از این مدل برای پهنه‌بندی سیلاب و مشخص کردن سطح‌های سیل‌گیری استفاده شود عدم قطعیت نتایج در نتیجه ضریب زبری مانینگ به نسبت بالاست و لازم است نتایج به صورت باندهای اطمینان احتمالاتی، همانند سطح‌های ۹۵ درصد احتمال این تحقیق ارائه شوند. ملاحظه می‌شود به‌رغم اینکه همانند اغلب بررسی‌های پیشین مدل HEC-RAS عملکرد مطلوب با خطای کوچک، در شبیه‌سازی تراز و عرض سطح آب رودخانه دارد ولی کمتر به عدم قطعیت بالای نتایج این مدل نسبت به فراسنجه ضریب زبری و تغییرپذیری مکانی آن توجه شده است. خطا اختلاف میزان واقعی با میزان برآورد شده را نشان می‌دهد ولی عدم قطعیت محدوده قابل اطمینان برای پذیرش نتایج یک مدل را نشان

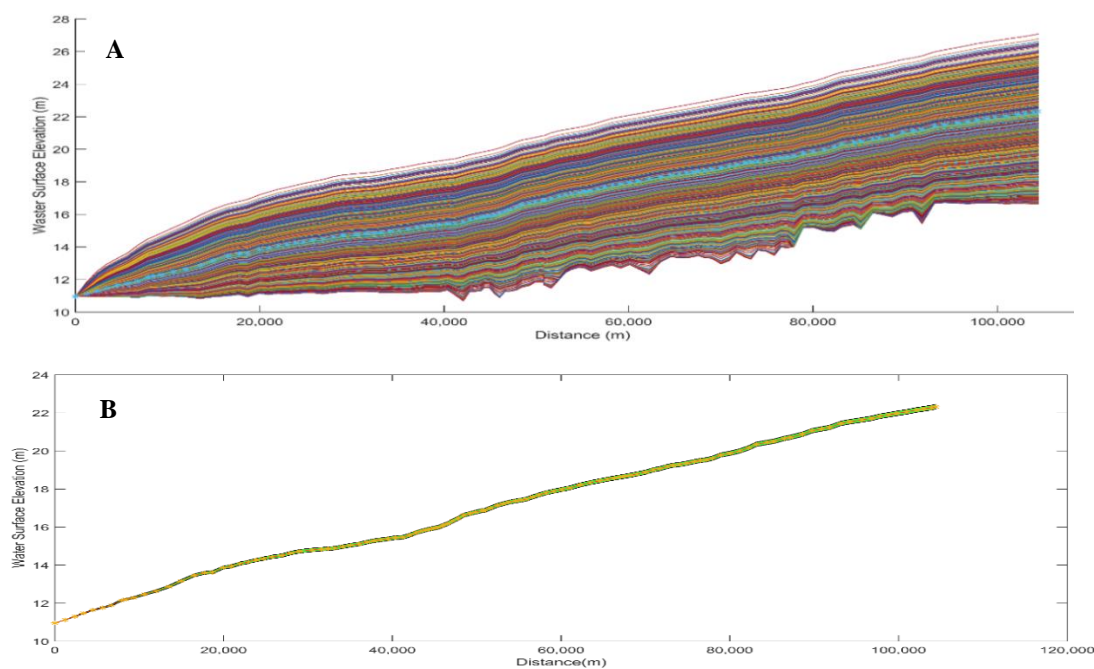


Fig. 5 A) The spectral response of water level in 3000 MCS runs, B) The uncertainty bound with 95% probability level of HEC-RAS model results using constrained manning roughness selection

شکل ۵ A) طیف پاسخ تراز سطح آب خروجی شبیه‌سازی شده در ۳۰۰۰ سری فرآیند مونت کارلو و B) باندهای اطمینان با احتمال ۹۵ درصد در به‌گزینی ضریب زبری از بین ۳۰۰۰ شبیه‌سازی مدل HEC-RAS

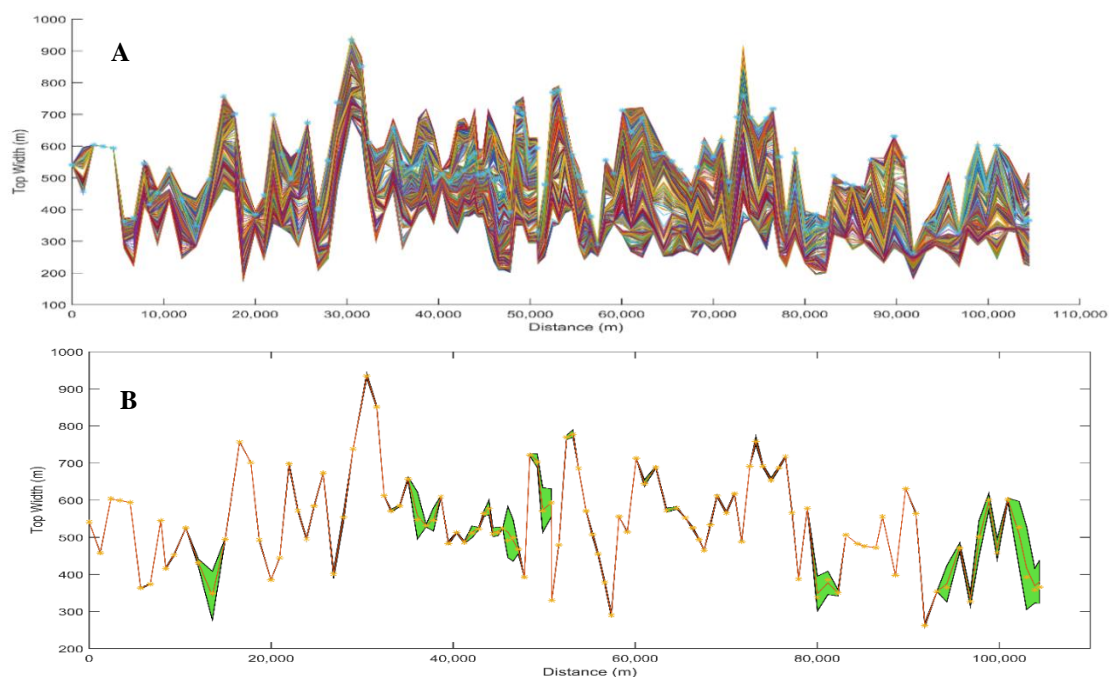


Fig. 6 A) The spectral response of top width of water in 3000 MCS runs, B) The uncertainty bound with 95% probability level of HEC-RAS model results using constrained manning roughness selection

شکل ۶ A) طیف پاسخ عرض سطح آب خروجی شبیه‌سازی شده در ۳۰۰۰ سری فرآیند مونت کارلو و B) باندهای اطمینان با احتمال

۹۵

مطلق با واقعی تعیین می‌شود. تحلیل عدم قطعیت حدود اطمینان با سطح احتمال مشخص برای قابل پذیرش بودن نتایج

می‌دهد و قابلیت اعتماد و اطمینان به نتایج مدل و باندهای مربوط به آن را نشان می‌دهد در حالی که خطا از مقایسه میزان

جدول ۱ نتایج عدم قطعیت مدل HEC-RAS در شبیه سازی تراز سطح آب و عرض سطح آب رودخانه کارون

Table 1 The uncertainty indices of HEC-RAS model in water level and top width of water in Karoon River

Hydraulic Parameter	Uncertainty Index	Discharge (m ³ /s)			
		3000		457	
		3000 MCS runs	NSE>0.75	3000 MCS runs	NSE>0.75
Water level	95PPU	99.12	99.12	99.12	99.12
	d-factor	2	0.07	0.96	0.02
Top width (Total)	95PPU	97.4	87.72	99	99
	d-factor	2.5	0.19	1.3	0.078
Top width (Left)	95PPU	100	100	100	100
	d-factor	2.22	0.13	0.4	0.02
Top width (Right)	95PPU	100	100	100	100
	d-factor	2.43	0.17	0.19	0.01
Top width (Center)	95PPU	100	100	100	100
	d-factor	0.40	0.03	1.22	0.07

این نتایج عامل پهنای باند عدم قطعیت سرعت جریان در دبی بیشینه ۷/۴۴ و در دبی میانگین ۵/۵ است که بسیار بیشتر از حدود مجاز آن است و با اعمال شرط به گزینی ضریب زبری این میزان ها به ۰/۶ و ۰/۵۲ کاهش یافته است. درصد داده های باند اطمینان ۹۵ درصد نیز بیشتر از ۹۰ درصد است که نشان دهنده عملکرد درست مدل و روند درست شبیه سازی های آن و توزیع احتمالاتی مناسب ضریب زبری است (Abbaspour et al, 2007) که توانسته است الگوی کلی حاکم بر هیدرولیک رودخانه را به خوبی شبیه سازی کند، به دور از اینکه پهنای باند عدم قطعیت بالا است. در حقیقت توانایی مدل در شبیه سازی الگوی کلی و رفتار میانگین جریان از یک سو و از سوی دیگر عدم قطعیت پنهان در نتایج مدل ممکن است محققان را در تفسیر نتایج دچار خطا کرده و به خوبی توان جداسازی این دو مطلب از هم فراهم نشود. در این شرایط است که تحلیل های عدم قطعیت و بررسی احتمالاتی خروجی های مدل HEC-RAS می تواند اطمینان بخشی نتایج در بررسی های کاربردی را افزایش دهد. در مورد مدل های یک بعدی تحلیل جریان مجاری روباز که مبتنی بر معادله های مقاومت جریان و به ویژه معادله مانینگ عمل می کنند، بررسی سوابق پژوهش نشان داده است که در حدود ۲ درصد عدم قطعیت مربوط به معرفی شرایط هندسی مقطع های عرضی است و ۹۸ درصد از عدم قطعیت کل ظرفیت هیدرولیکی مقطع عرضی مربوط به ضریب زبری مانینگ است و بنابراین در تحلیل عدم قطعیت جریان درون مجاری روباز بیشترین سهم عدم قطعیت مربوط به ضریب زبری مانینگ است (Eftekharian et al., 2005). از نظر هیدرولیکی سرعت جریان ارتباط مستقیم و نزدیکی با تغییرپذیری های عمق و تراز سطح آب دارد.

مدلسازی در نتیجه گزینش فراسنجه ها و ضریب های مدل را مشخص می کند و بهترین ابزار برای بیان دقت و قابلیت اعتماد و اطمینان به نتایج مدل است (Heckert et al., 2002). مشابه نتایج این تحقیق، در مطالعه (Vatanchi and Maghrebi (2019) نیز عدم قطعیت بالای در تراز سطح آب در زبری نایک نواخت در مقطع های مرکب در مدل تحلیلی ایشان مشاهده شده است و ایشان لزوم توجه به تغییرپذیری های فصلی و مکانی ضریب زبری مانینگ را پیشنهاد داده اند. در نتایج بررسی یوسفی و بانژاد (۱۳۹۲) نیز گزارش شده است که با تغییر ۰/۰۳ بر آورد ضریب زبری خطای بر آورد دبی در معادله مانینگ بیشتر از ۱۰ درصد خواهد و حساسیت بالای سرعت و دبی نسبت به عدم قطعیت در تعیین ضریب زبری مشاهده شده است.

۳-۳- عدم قطعیت سرعت جریان و عدد فرود

از فراسنجه های دیگر که در تحلیل هیدرولیکی جریان در رودخانه ها مهم است سرعت جریان و عدد فرود است که ارتباط نزدیکی با مخاطره های سیل گرفتگی و آسیب و زیان سیل دارند و از شاخص های مهم در تهیه نقشه های خطرپذیری آسیب و زیان سیلاب هستند. در جدول ۲ و شکل های ۷ و ۸ نتایج عدم قطعیت مربوط به آنها ارائه شده است. مقایسه نتایج عدم قطعیت سرعت جریان با عدد فرود نشان می دهد که در دبی بیشینه سیلاب عدم قطعیت عدد فرود بیشتر از عدم قطعیت سرعت جریان است ولی در دبی میانگین روزانه اختلافی بین نتایج وجود ندارد. همچنین مقایسه نتایج جدول ۱ با جدول ۲ نشان می دهد که عدم قطعیت های سرعت و عدد فرود جریان بسیار بیشتر از عدم قطعیت های تراز و عرض سطح آب است. بنابر

بنابراین مدل هیدرولیکی HEC-RAS نیازمند دقت خاص در تنظیم فراسنجه ضریب زبری مانینگ و همچنین استفاده از قابلیت‌های هسته محاسباتی خودکار آن در تحلیل و تفسیر نتایج احتمالاتی است. تحلیل عدم قطعیت زبری به روش مونت کارلو در نتایج بررسی عددی دوبعدی مدل TELEMAC-2D توسط Dalledonne et al. (2019) نیز نشان دهنده بالا بودن عدم قطعیت در میزان‌های سرعت محاسباتی بوده و لزوم تخمین دقیق ضریب زبری و تحلیل احتمالاتی نتایج مدل هیدرولیکی همانند این تحقیق تایید شده است. در بررسی Eftekharian et al. (2005) نیز عدم قطعیت قابل توجه در تحلیل ریسک خسارت سیل گزارش شده است و در نظر نگرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی خسارت‌پذیری سیل‌بندها را افزایش داده است. از منظر تحلیل خسارت سیلاب که اغلب توسط فراسنجه‌های عمق جریان، سرعت و عدد فرود کمی‌سازی و پهنه‌بندی می‌شود اثرگذاری هیدرولیکی کل مسیر مهم‌تر از اثرگذاری نامنظمی‌ها و ناهمگنی‌های موضعی بستر و مقطع-هاست که برخلاف عدم قطعیت‌ها در عرض سطح آب است. بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موثر بر مدل باعث افزایش ضریب اطمینان نتایج می‌شود.

همان‌طور که در مورد شکل ۵ بیان شد با توجه به اینکه جریان در کل مسیر از نوع زیربحرانی است و کنترل هیدرولیکی نیز از نوع پایین دست است حساسیت و تغییرپذیری‌ها در میزان‌های تراز سطح آب و سرعت جریان در بازه‌های بالادست مسیر بیشتر از انتهای پایین دست مسیر است. همچنین شیب بستر رودخانه در قسمت‌های آغازین بازه مورد بررسی کمتر از قسمت‌های پایانی است. در شیب‌های کم اثرگذاری کم اثرگذاری تغییرپذیری‌های ضریب زبری بر عمق جریان و تراز افزایش می‌یابد و بنابر رابطه پیوستگی باعث افزایش تغییرپذیری در میزان‌های سرعت و عدم قطعیت‌های بیشتر نیز می‌شود. همچنین مقایسه شکل B-۷ با شکل B-۵ نشان می‌دهد که باندهای عدم قطعیت سرعت جریان مانند باندهای اطمینان تراز سطح آب به صورت یکنواخت و پیوسته در کل مسیر وجود دارند و کمتر تحت تاثیر تغییرپذیری‌های موضعی شکل مقطع عرضی، نامنظمی‌ها در شکل‌های مقطع‌های عرضی، شیب‌های موضعی مستقیم و معکوس بستر رودخانه کارون، و یا مماندهای موجود در مسیر قرار گرفته‌اند و بیشتر از رفتار هیدرولیکی جریان زیربحرانی و شرط کنترل هیدرولیکی پایین دست تاثیر می‌پذیرند.

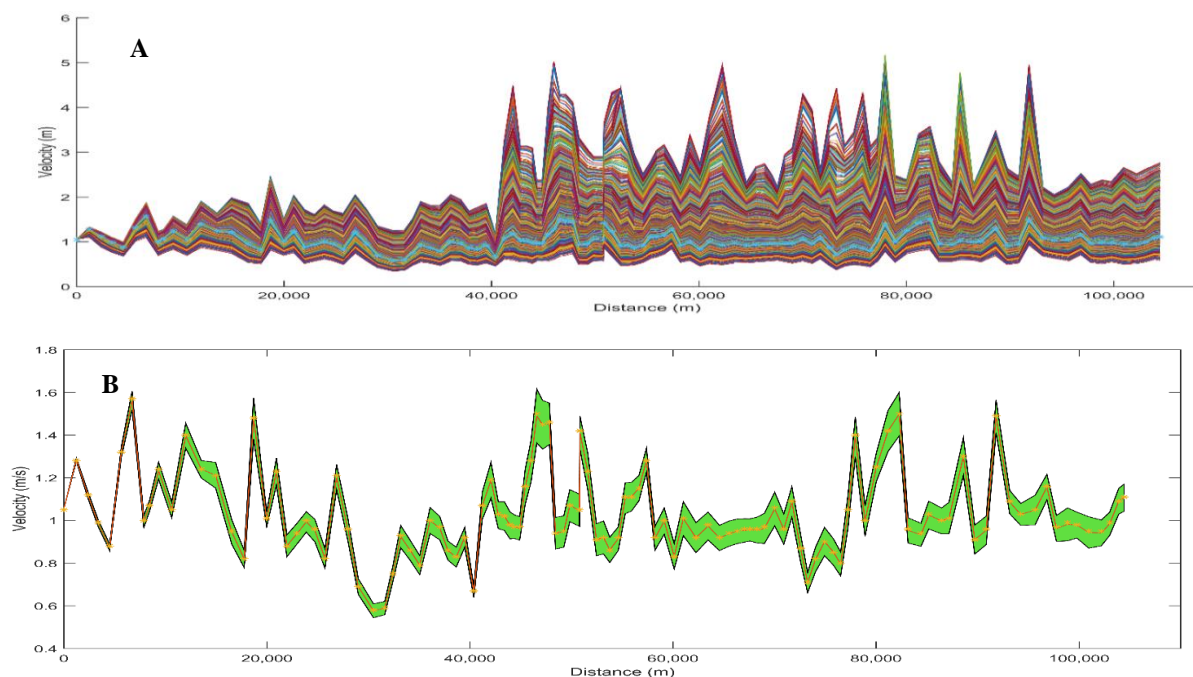
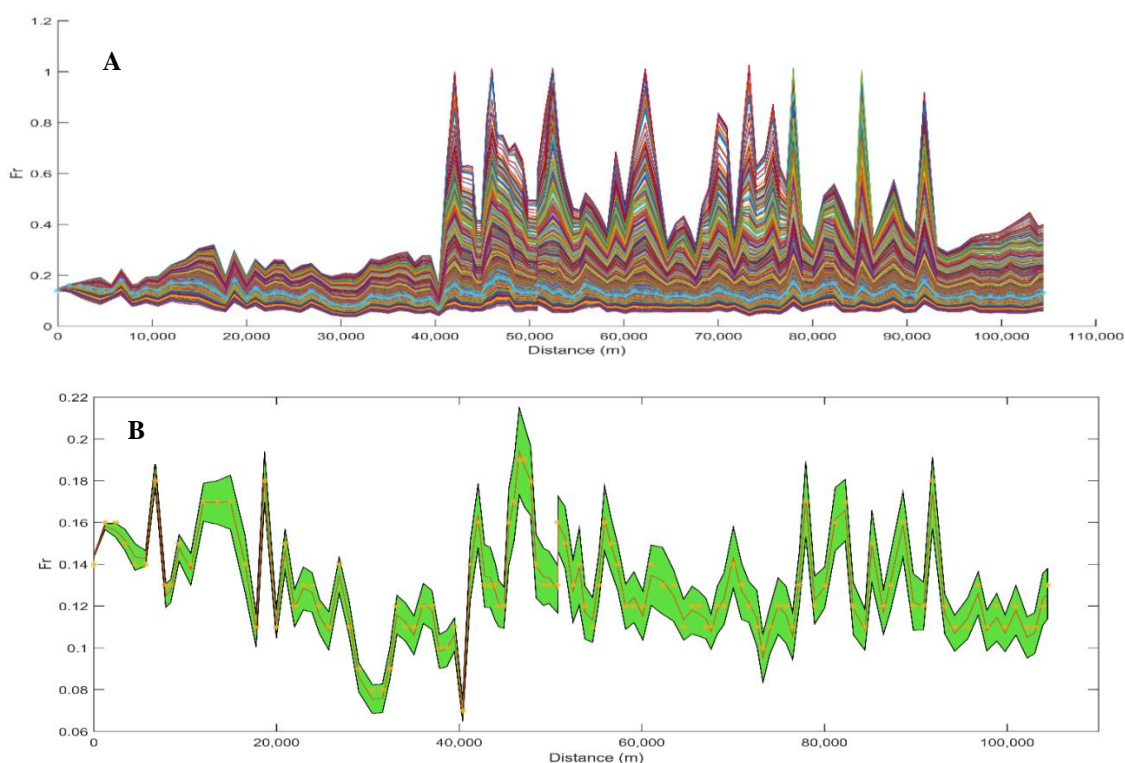


Fig. 7 A) The spectral response of flow velocity in 3000 MCS runs, B) The uncertainty bound with 95% probability level of HEC-RAS model results using constrained manning roughness selection

شکل ۷ A) طیف پاسخ سرعت جریان در طول رودخانه کارون و خروجی شبیه‌سازی شده در ۳۰۰۰ سری فرآیند مونت کارلو و B) باندهای اطمینان با احتمال ۹۵ درصد در به‌گزینی ضریب زبری از بین ۳۰۰۰ شبیه‌سازی مدل HEC-RAS



شکل ۸ A) طیف پاسخ عدد فرود جریان و خروجی شبیه‌سازی شده در ۳۰۰۰ سری فرآیند مونت کارلو (B) و باندهای اطمینان با احتمال ۹۵ درصد در به‌گزینی ضریب زبری از بین ۳۰۰۰ شبیه‌سازی مدل HEC-RAS

Fig. 8 A) The spectral response of Froude Number in 3000 MCS runs B) The uncertainty bound with 95% probability level of HEC-RAS model results using constrained manning roughness selection

جدول ۲- نتایج عدم قطعیت مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی سرعت جریان و عدد فرود رودخانه کارون

Table 2 The uncertainty indices of HEC-RAS model in flow velocity and Froude Number of water in Karoon River

Hydraulic Parameter	Uncertainty Index	Discharge (m^3/s)			
		3000		457	
		3000 MCS runs	NSE>0.75	3000 MCS runs	NSE>0.75
Flow velocity	95PPU	99.12	99.12	99	99
	d-factor	7.44	0.6	5.5	0.52
Froude Number	95PPU	99.12	97.4	99	95.6
	d-factor	10.85	0.94	5.5	0.52

در دبی بیشینه در شرایط به‌گزینی، 95PPU برابر ۹۶/۵ درصد است و نشان می‌دهد ۹۶/۵ درصد میزان‌های مشاهده شده داخل باند اطمینان ۹۵ درصد قرار دارند ولی در بقیه موارد ۱۰۰ درصد آنها درون باند اطمینان ۹۵ درصد قرار دارند. بالا بودن شاخص 95PPU نشان می‌دهد که مدل از یک مبنای فیزیکی و نظری قوی استفاده می‌کند و به خوبی مبانی نظری و ریاضی حاکم بر هیدرولیک رودخانه را لحاظ می‌کند ولی از طرف دیگر مشاهده می‌شود که عامل پهنای باند d-factor در ۳۰۰۰ شبیه‌سازی مونت کارلو بزرگ است و نشان دهنده عدم قطعیت‌های فراسنجه‌ای و ساختاری مدل است و استفاده از مدل در

۳-۴- عدم قطعیت توان جریان و تنش برشی

تأثیر در این قسمت نتایج عدم قطعیت مدل HEC-RAS در دو فراسنجه توان جریان و تنش برشی ارائه شده است. این دو فراسنجه بر فرآیندهای انتقال رسوب، شکل و تغییرپذیری‌های ریخت‌شناسی (مورفولوژی) رودخانه، و فرسایش رودخانه مؤثر هستند. در جدول ۳ نتایج تحلیل عدم قطعیت به صورت شاخص‌های کمی و در شکل‌های ۹ و ۱۰ طیف پاسخ و باندهای اطمینان در سطح‌های احتمال ۹۵ درصد شبیه‌سازی‌ها آمده است. در این قسمت مشاهده می‌شود که مانند بخش‌های پیشین فراسنجه 95PPU در تمامی موارد برابر ۱۰۰ درصد است.

تابع ارتفاع زبری موضعی بیان کرده‌اند و توزیع توان رودخانه در دشت‌های سیلابی را به شدت تابع شیب جانبی، نامنظمی مقطع عرضی، شکل ریخت‌شناسی و پیچان‌رودها می‌دانند. بنابراین ملاحظه می‌شود که تغییرپذیری‌های توان جریان و عدم قطعیت‌های آن در طول رودخانه کارون بیشتر تابع شیب بستر، نامنظمی‌های شیب بستر، وجود پیچان‌رودهای موجود در مسیر است. بررسی طیف پاسخ عدم قطعیت‌های مدل در شکل‌های ۵ تا ۱۰ نشان می‌دهد که به‌رغم بالا بودن عدم قطعیت نتایج مدل، ولی این عدم قطعیت‌ها کمتر باعث از دست رفتن الگوهای حاکم بر فراسنجه‌های هیدرولیکی رودخانه کارون در بازه ملاثانی تا فارسیات شده است، هرچند میزان‌های اوج و بیشینه فراسنجه‌ها در طول رودخانه عدم قطعیت بسیار بالاتری نسبت به میزان‌های کوچکتر داشته‌اند و بعلاوه عدم قطعیت‌های حاکم و پنهان در نتایج، طیف پاسخ بسیار گسترده‌تری در تمامی فراسنجه‌های پیرامون میزان‌های بیشینه مشاهده شده که در مسئله‌های کاربردی مهندسی رودخانه، بازسازی و لایروبی رودخانه کارون توجه به این عدم قطعیت‌های پنهان در نتایج مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده ضروری است. به‌همین منظور از معیار NSE برای به‌گزینی ضریب زبری مانینگ استفاده شد و یکبار دیگر محاسبات عدم قطعیت با استفاده از اعمال شرط $NSE > 0.75$ بر گزینش فراسنجه‌ها، انجام شد. بنابر نتایج شکل‌های ۹ و ۱۰ و جدول ۳ در این حالت مشاهده می‌شود که با استفاده از معیار به‌گزینی ضریب زبری مانینگ می‌توان عدم قطعیت‌های نتایج مدل شبیه‌ساز HEC-RAS را کاهش داده و محدوده با اطمینان بالاتری برای فراسنجه‌های مدل بدست آورد. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان می‌دهد که در صورت صرف‌نظر کردن از عدم قطعیت‌های حاکم، ویژگی‌های هیدرولیکی جریان محاسبه شده توسط مدل‌های هیدرولیکی، به علت بالا بودن ریسک آنها نمی‌توانند مبنای طراحی سیستم کنترل سیل و سیل‌بندها قرار گیرند.

۴- نتیجه گیری

ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها مانند تراز سطح آب و پروفیل سطح آب در رودخانه، عرض پهنه‌های سیل‌گیری، سرعت جریان و عدد فرود، تنش برشی و توان جریان میزان‌های قطعی نبوده و در واقع تابع عدم قطعیت‌های حاکم و تصادفی

شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ها مستلزم واسنجی دقیق و دینامیکی ضریب زبری است و لزوم استفاده از ضریب زبری تابع دبی و مکان نسبت به ضریب زبری یکپارچه در طول رودخانه را مشهود می‌سازد. بررسی نمودارهای طیف پاسخ و باند اطمینان در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد در طول رودخانه کارون میزان‌های عدم قطعیت مدل ثابت نیست و بر مبنای ویژگی‌های شکل مقطع عرضی رودخانه کارون، وضعیت مستقیم یا مئاندر و مارپیچ بودن آن بعلاوه تغییرپذیری‌های ویژگی‌های هیدرولیکی جریان، عدم قطعیت‌های نتایج نیز تغییر می‌کند و عدم قطعیت نتایج مدل نسبت به ضریب زبری در طول رودخانه و در بازه‌های مختلف متفاوت است و لزوم توجه به تغییرپذیری‌های مکانی ضریب زبری در رودخانه کارون را نشان می‌دهد. توان کل جریان از رابطه ۵ و تنش برشی از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$\Omega = YQS_f \quad (5)$$

$$\tau = YRS_f \quad (6)$$

در این رابطه Ω توان جریان (نیوتن بر مترثانیه)، τ تنش برشی (نیوتن بر مترمربع)، Y وزن مخصوص آب، R شعاع هیدرولیکی و S_f شیب خط انرژی است. مشاهده می‌شود شیب خط انرژی به‌طور مستقیم بر توان جریان تاثیر دارد. شیب بستر رودخانه کارون و نامنظمی‌های بستر در قسمت‌های پایین دست بازه رودخانه بیشتر از قسمت بالادست است (شکل ۱) که باعث افزایش شیب خط انرژی و همچنین افزایش عدم قطعیت‌ها در نتایج مدل شده است. علاوه بر این از شکل‌های ۹، ۱۰ و مقایسه نتایج آنها با پلان طولی مسیر رودخانه مشاهده می‌شود در بازه‌هایی که پیچان‌رودها بیشتر هستند توان جریان و تنش برشی رودخانه نیز بیشتر و عدم قطعیت در توان جریان و تنش برشی نیز بیشتر است. تنش برشی و توان جریان در حقیقت مهم‌ترین نیروی تشکیل‌دهنده و توسعه‌دهنده شکل مورفولوژیکی رودخانه هستند و اثرات تداخلی بین مقطع اصلی با دشت‌های سیلابی را نشان می‌دهند. در قسمت‌های پیچان‌رودی رودخانه کارون تداخل شدیدتری بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رخ می‌دهد که باعث افزایش تنش برشی، توان جریان و افزایش عدم قطعیت‌ها شده است و در توافق با نتایج Song et al. (2014) است که تغییرپذیری توان جریان را

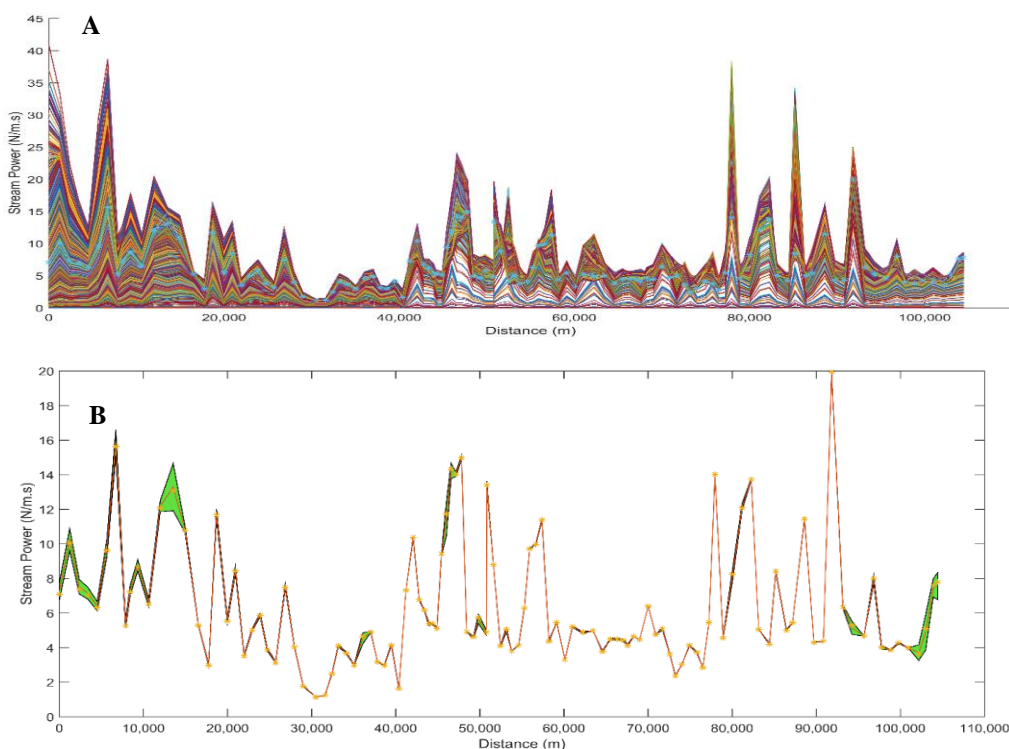


Fig. 9 A) The spectral response of Stream power in 3000 MCS runs, B)The uncertainty bound with 95% probability level of HEC-RAS model results using constrained manning roughness selection

شکل ۹ A) طیف پاسخ توان جریان رودخانه کارون در ۳۰۰۰ سری فرآیند مونت کارلو و B) باندهای اطمینان با احتمال ۹۵ درصد در به‌گزینی ضریب زبری از بین ۳۰۰۰ شبیه‌سازی مدل HEC-RAS

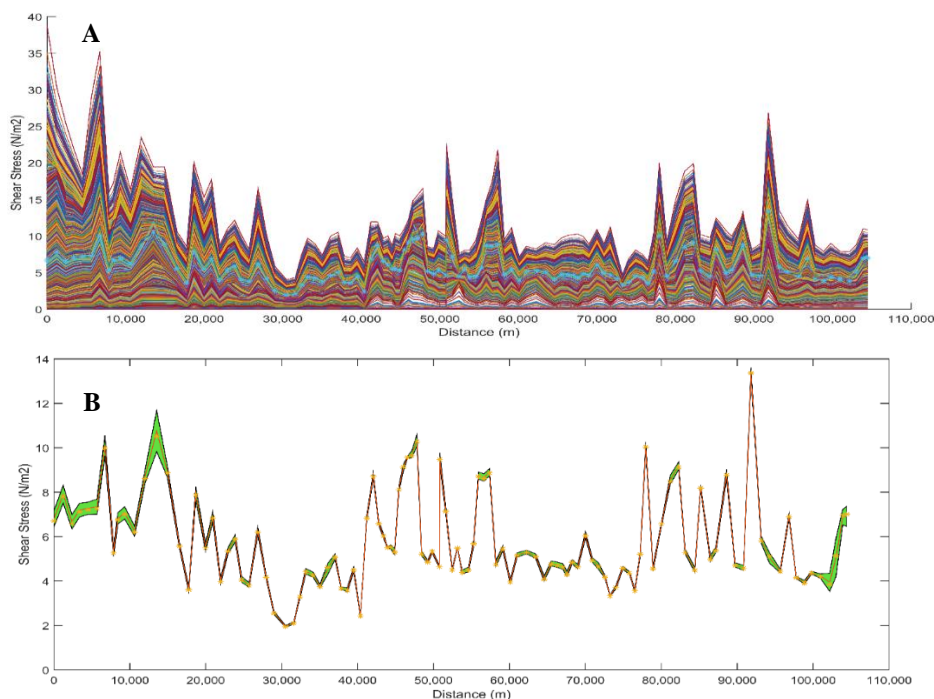


Fig. 10 A) The spectral response of bed shear stress in 3000 MCS runs, B)The uncertainty bound with 95% probability level of HEC-RAS model results using constrained manning roughness selection

شکل ۱۰ A) طیف تنش برشی بستر رودخانه کارون در ۳۰۰۰ سری فرآیند مونت کارلو و B) باندهای اطمینان با احتمال ۹۵ درصد در به‌گزینی ضریب زبری از بین ۳۰۰۰ شبیه‌سازی مدل HEC-RAS

جدول ۳- نتایج عدم قطعیت مدل HEC-RAS در شبیه سازی توان جریان و تنش برشی رودخانه کارون

Table 3 The uncertainty indices of HEC-RAS model in stream power and shear stress of Karoon River

Hydraulic Parameter	Uncertainty Index	Discharge (m ³ /s)			
		3000		457	
		3000 MCS runs	NSE>0.75	3000 MCS runs	NSE>0.75
Stream Power	95PPU	100	96.5	100	100
	d-factor	1.79	0.08	1.5	0.173
Shear Stress	95PPU	100	100	100	100
	d-factor	3.71	0.16	1.86	0.12

ضریب زبری مانینگ، پیچیدگی‌های جریان در بازه‌های مختلف رودخانه و تأثیر آن بر هیدرولیک جریان و انتقال رسوب‌ها و تغییرپذیری‌های قدرت جریان و نیروی برشی باعث افزایش عدم قطعیت و بالا رفتن خطرپذیری نتایج مدل می‌شوند. رویکرد تدوین شده که مبتنی بر ترکیب شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری احتمالاتی ضریب زبری در هسته محاسباتی مدل HEC-RAS است به نحو مطلوبی مفهوم‌های عدم قطعیت را در نتایج مدل وارد کرده و با توجه به نتایج قابل اعتماد به دست آمده، استفاده از این روش در مدلسازی هیدرولیکی مسئله‌های مهندسی رودخانه، بهسازی رودخانه‌ها، لایروبی و احیا آنها توصیه می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان به‌جای مواجهه با یک عدد واحد به‌عنوان پیش‌بینی در مدلسازی هیدرولیک جریان رودخانه‌ها، ترکیب این عدد و باند اطمینان در سطح احتمال موردنظر را به دست آورده و تصمیم‌های واقع‌بینانه‌تری گرفته شود.

۵- فهرست نشانه‌ها

σ_x	انحراف استاندارد مشاهده شده
\bar{d}_x	عرض میانگین باند اطمینان
XL	حد ۲/۵٪ توزیع احتمال تجربی
XU	حد ۹۷/۵٪ توزیع احتمال تجربی
95PPU	درصد داده‌های واقع در باند اطمینان ۹۵٪
O_i	میزان اندازه‌گیری
P_i	میزان شبیه‌سازی شده توسط مدل
\bar{O}	میانگین میزان اندازه‌گیری
NSE	معیاره نش-ساتکلیف
Q	دبی جریان (m ³ /s)
τ	تنش برشی (N/m ²)
Ω	توان جریان (N/m-s)

هستند. در این پژوهش، به تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل هیدرولیکی HEC-RAS در بازه موردبررسی به طول ۱۰۵ کیلومتر در رودخانه کارون از ایستگاه ملاثانی تا فارسیات پرداخته شده است. بدین منظور روش شبیه‌سازی مونت کارلو با هسته محاسباتی مدل HEC-RAS ترکیب شده و با ۳۰۰۰ بار نمونه‌گیری تصادفی ضریب زبری مانینگ در دو دبی بیشینه ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و میانگین روزانه ۴۵۷ مترمکعب بر ثانیه تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل انجام گرفته است. نتایج عدم قطعیت در قالب منحنی‌های طیف پاسخ، باندهای اطمینان در سطح احتمال ۹۵ درصد، آماره‌های 95PPU و d-factor نشان داده عدم قطعیت نتایج مدل در فراسنجه‌های هیدرولیکی تراز سطح آب، عرض سطح آب، سرعت جریان، عدد فرود، توان جریان و تنش برشی است و مدلسازی‌ها نیازمند به‌گزینی ضریب زبری مانینگ در تحلیل عدم قطعیت است. با اعمال معیار $NSE > 0.75$ نمونه‌گیری هدفمند ضریب زبری مانینگ در بازه موردبررسی انجام شد و در این حالت برای پارامترهای خروجی مدل هیدرولیکی عرض باند اطمینان عدم قطعیت کمتر از ۱ به دست آمد که نشان از کاهش عدم قطعیت و مطلوبیت خوبی داشته است. همچنین طبق نتایج پژوهش مشاهده می‌شود که عدم قطعیت‌های تراز سطح آب، سرعت جریان و عدد فرود در طول رودخانه کارون بیشتر تحت تاثیر خصوصیات هیدرولیکی جریان زیربحرانی مسیر قرار گرفته و اثرگذاری‌های نامنظمی‌ها و پیچان‌رودهای موضعی بر آنها کمتر است. ولی عدم قطعیت و تغییرپذیری‌های مکانی آن در فراسنجه‌های عرض سطح آب، توان جریان و تنش برشی بیشتر تحت تاثیر نامنظمی‌های مقطع‌های عرضی، وجود پیچان‌رودها در طول مسیر و تغییرپذیری‌های طرح و پروفیل مسیر قرار می‌گیرند و تغییرپذیری‌های مکانی ضریب زبری مانینگ در آنها قابل ملاحظه است. عامل‌هایی مانند تغییرپذیری‌های زمانی و مکانی

Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Safari, M.J.S., Gharabaghi, B., Zaji, A.H., Madavar, H.R. and Mehr, A.D. (2020). Combination of sensitivity and uncertainty analyses for sediment transport modeling in sewer pipes. <i>International Journal of Sediment Research</i> , 35(2), 157-170.	Y	وزن مخصوص آب (N/m^3)
	R	شعاع هیدرولیکی (m)
	Sf	شیب خط انرژی (m/m)

۶- منابع ها

- Eftekharian, L., 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), 39-54. (in Persian).
- Faghih, M., Mirzaei, M., Adamowski, J., Lee, J. and El-Shafie, A. (2017). Uncertainty estimation in flood inundation mapping: an application of non-parametric Bootstrapping. *River research and Applications*, 33(4), 611-619.
- Fakouri, B., Mazaheri, M., and Samani, J.M. (2019). Management scenarios methodology for salinity control in rivers (case study: Karoon River, Iran). *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 68(1), 74-86.
- Fakouri Dekahi, B., Mazaheri, M. and Mohammad Vali Samani, J. (2018). Evaluation of Karun River Water Salinity Reduction Strategies Using Management Scenarios. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(2), 245-256. (in Persian).
- Fakouri Dekahi, B., Samani, J. and Mazaheri, M. (2016). Effect of floods and management of pollution sources on temporal and spatial variations in water salinity of Karun River (Mollasani to Farsiat). *Water and Irrigation Management*, 6(2), 295-314. (in Persian)
- Ganji Nowrouzi, Z., Shokoohi, A., and Singh, V. (2016). Evaluating the effect of discharge - probability function uncertainty on the risk of agricultural loss due to flood using Monte Carlo method. *Iran-Water Resources Research*, 12(2), 13-23. (in Persian).
- 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, 124677.
- Heckert N.A., Filliben, J.J., Croarkin, C.M., Hembree, B., Guthrie, W.F., Tobias, P., and Prinz, J. (2002). Handbook 151: NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR).
- Heydari, A., Saghafian, B. and Maknoun, R. (2007). Application of Generalized Likelihood Uncertainty
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J. and Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, 333(2-4), 413-430.
- Ahmed, I. and Freeman, G.E. (2004). Estimating Stage Discharge Uncertainty for Flood Damage Assessment. In *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, pp. 1-8.
- Bates, B.C., and Townley, L.R. (1988). Nonlinear, discrete flood event models, 3. Analysis of prediction uncertainty. *Journal of Hydrology*, 99, 91-101.
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., and Schlegel, J. (2009). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96(7), 1146-1154.
- Bessar, M.A., Matte, P., and Anctil, F. (2020). Uncertainty Analysis of a 1D River Hydraulic Model with Adaptive Calibration. *Water*, 12(2), 561.
- Couto, P.R.G., Damasceno, J.C., Oliveira, S.D., and Chan, W.K. (2013). Monte Carlo simulations applied to uncertainty in measurement. Theory and applications of Monte Carlo simulations, 27-51.
- Dalledonne, G., Kopmann, R. and Brudy-Zippelius, T. (2019). Uncertainty analysis of floodplain friction in hydrodynamic models. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, doi: 10.5194/hess-2019-159.
- Di Baldassarre, G. and Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology & Earth System Sciences*, 13(6), 913-921.
- 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, 704-717.
- Dysarz, T., Wicher-Dysarz, J., Sojka, M. and Jaskuła, J. (2019). Analysis of extreme flow uncertainty impact on size of flood hazard zones for the Wronki gauge station in the Warta river. *Acta Geophysica*, 67(2), 661-676.

- Curve Assessment Using Hydraulic Modeling in an Uncertainty Framework. *Water Resources Research*, 55(11), 9765-9787.
- Marcé, R., Comerma, M., García, J.C. and Armengol, J. (2004). A neuro-fuzzy modeling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time varying human impact. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2(11), 342-355.
- 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(2), 1-15.
- Mohammadi, S. and Kashefipour, M. (2011). Numerical modeling of flow using an improved dynamic roughness coefficient (Case study: Karun River). *Irrigation and Water Engineering*, 2(1), 99-110.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mukolwe, M.M., Baldassarre, G.D., Werner, M. and Solomatine, D.P. (2014). Flood modelling: parameterization and inflow uncertainty. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. 167(1), 51-60.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nikmanesh, M.R. (2011). Predicting the effect of vegetation on the coefficient of hydraulic roughness of the Shiraz river bed. *Water Science and Engineering*. 1(3), 41-54. (in Persian).
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M. and Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, 302(1-4), 46-69.
- Pinheiro, V.B., Naghettini, M. and Palmier, L.R. (2019). Uncertainty estimation in hydrodynamic modeling using Bayesian techniques. *RBRH*, 24.
- Rathod, P. and Manekar, V.L. (2020). Parameter uncertainty in HEC-RAS 1D CSU scour model. *Current Science*, 118(8), 1227.
- Estimation Approach in Real Time Updating of Flood Forecasting Model. *Journal of Hydraulics*, 2(2), 17-32. (in Persian).
- Huang, Y. and Qin, X. (2014). Uncertainty analysis for flood inundation modelling with a random floodplain roughness field. *Environmental Systems Research*, 3(1), 1-7.
- 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*, W04425.
- Kahe, M.S., Javadi, S., Roozbahani, A. and Mohammadi, K. (2021). Parametric uncertainty analysis on hydrodynamic coefficients in groundwater numerical models using Monte Carlo method and RPEM. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24.
- Kiang, J.E., Gazoorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I.K., Belleville, A., Sevrez, D., Sikorska, A.E., Petersen-Øverleir, A., and Reitan, T. (2018). A comparison of methods for Streamflow uncertainty estimation. *Water Resour Res*, 54(10), 7149–7176.
- Koo, H., Chen, M., Jakeman, A.J. and Zhang, F. (2020a). A global sensitivity analysis approach for identifying critical sources of uncertainty in non-identifiable, spatially distributed environmental models: A holistic analysis applied to SWAT for input datasets and model parameters. *Environmental modelling & software*, 127, 104676.
- Koo, H., Iwanaga, T., Croke, B.F., Jakeman, A.J., Yang, J., Wang, H.H. and Chen, M. (2020b). Position paper: Sensitivity analysis of spatially distributed environmental models-a pragmatic framework for the exploration of uncertainty sources. *Environmental modelling & software*, 104857.
- 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, 573-587.
- Liu, Z. and Merwade, V. (2019). Separation and prioritization of uncertainty sources in a raster based flood inundation model using hierarchical Bayesian model averaging. *Journal of Hydrology*, 578, 124100.
- Mansanarez, V., Westerberg, I.K., Lam, N. and Lyon, S.W. (2019). Rapid Stage-Discharge Rating

- Teng, J., Jakeman, A.J., Vaze, J., Croke, B.F., Dutta, D. and Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201-216.
- Tschiedel, A.D.F. and Paiva, R.C.D.D. (2018). Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. *RBRH*, 23.
- Vatanchi, S.M. and Maghrebi, M.F. (2019). Uncertainty in Rating-Curves Due to Manning Roughness Coefficient. *Water Resources Management*, 33(15), 5153-5167.
- Wohl, E.E. (1998). Uncertainty in flood estimates associated with roughness coefficient. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(2), 219-223.
- Zheng, Y. and Han, F. (2016). Markov Chain Monte Carlo (MCMC) uncertainty analysis for watershed water quality modeling and management. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 30(1), 293-308.
- Reichstetter, M. (2011). Hydraulic Modelling of Unsteady Open Channel Flow: Physical and Analytical Validation of Numerical Models of Positive and Negative Surges. MPhil thesis, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia, 112 p.
- Riahi-Madvar, H., Ayyoubzadeh, S., Namin, M. and Seifi, A. (2011). Uncertainty analysis of quasi-two-dimensional flow simulation in compound channels with overbank flows. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 59(3), 171-183.
- 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), 1-20.
- Saberi Tanasvan, M., Ganji Noroozi, Z., Delghandi, M. and Dorostkar, V. (2020). Sensitivity analysis of flood parameters to roughness variation. *Irrigation and Water Engineering*, 10(4), 167-180. (in Persian)
- 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), 165-175.
- Seifi, A., Dehghani, M. and Singh, V.P. (2020). Uncertainty analysis of water quality index (WQI) for groundwater quality evaluation: Application of Monte-Carlo method for weight allocation. *Ecological Indicators*, 117, 106653. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106653
- Seifi, A., Ehteram, M. and Soroush, F. (2020). Uncertainties of instantaneous influent flow predictions by intelligence models hybridized with multi-objective shark smell optimization algorithm. *Journal of Hydrology*, 587, 124977.
- Serinaldi, F. (2013). An uncertain journey around the tails of multivariate hydrological distributions. *Water Resources Research*, 49(10), 6527-6547.
- Shafaei Bajestan, M. (2005). Sediment hydraulics, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. (in Persian).
- Soroush, F. and Riahi, 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), 1007-991. (in Persian)
- Stephens, T.A. and Bledsoe, B.P. (2020). Probabilistic mapping of flood hazards: Depicting uncertainty in streamflow, land use, and geomorphic adjustment. *Anthropocene*, 29, 100231.