

تحلیل عدم قطعیت ضریب زبری مانینگ و دبی جریان به روش مونت کارلو و *GLUE*

زهرا شریفی نیک^۱، محمود فغفور مغربی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

zshn139@gmail.com

خلاصه

نقشه‌های سیلاب بر مبنای رویکردهای قطعی به‌عنوان ابزاری مهم در تصمیم‌گیری برای به حداقل رساندن تلفات ناشی از سیل نقش عمده‌ای دارند. اما روند ایجاد نقشه‌های سیلاب تحت تأثیر عدم قطعیت داده (مانند دبی جریان)، عدم قطعیت پارامتر (زبری مانینگ) و رویکرد مدل‌سازی (یک‌بعدی یا دوبعدی) قرار دارد که متأسفانه رویکردهای قطعی به صراحت آن‌ها را در نظر نمی‌گیرند. این پژوهش به بررسی تأثیر عدم قطعیت زبری و دبی بر ارتفاع سطح آب پرداخته و میزان خطای آن با استفاده از روش تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو و *GLUE* به کمک مدل *HEC-RAS* ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد ترکیب عدم قطعیت ناشی از زبری و دبی منجر به ایجاد پهنای باند بیشتر عدم قطعیت ارتفاع سطح آب می‌شود. کاهش باند عدم قطعیت در روش *GLUE* با توجه به تشخیص مجموعه پارامتر قابل قبول نسبت به روش مونت کارلو نیز نشان داد می‌توان مقادیر خطا و در نتیجه تغییرات ارتفاعی سطح آب را با انتخاب زبری و دبی از دامنه بهینه ارائه‌شده کاهش داد. مقایسه توزیع پیشین و پسین زبری کاربری مختلف نیز حاکی از حساسیت بیشتر زبری کانال نسبت به سیلاب‌دشت و ناحیه مرتع و زراعی است. لذا تغییرات بیشتر در زبری کانال و افزایش آن منجر به افزایش ارتفاع سطح آب خواهد شد.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت، زبری مانینگ، دبی سیلاب، شبیه‌سازی مونت کارلو، روش *GLUE*

۱. مقدمه

سیلاب یکی از بزرگ‌ترین بلاهای طبیعی است که منجر به از دست دادن میلیاردها دلار در زمینه‌ی زیرساخت‌ها و تلفات جانی می‌شود. یکی از راه‌حل‌های جلوگیری و کاهش تلفات، تأمین اطلاعات قابل اطمینان برای عموم مردم در مورد خطر سیل از طریق نقشه‌های سیلاب گرفتگی است. متداول‌ترین نمایش نتایج مدل‌سازی سیلاب گرفتگی، رویکرد قطعی مبتنی بر شبیه‌سازی واحد با استفاده از بهترین مدل مناسب است. متأسفانه، این رویکرد به‌طور صریح عدم قطعیت را در فرآیند مدل‌سازی به‌حساب نمی‌آورد [1] و ممکن است منجر به دقت اما ارزیابی نادرست نقشه خطر علی‌رغم افزایش دانش در فرآیندهای آب گرفتگی و انتشار سیل شود.

یکی از مسائل مهم در تهیه نقشه‌های دقیق سیلاب گرفتگی، ترکیب عدم قطعیت‌های ناشی از عناصر مختلف در روند کلی است. این عدم قطعیت‌ها در اثر تخمین جریان از یک مدل هیدرولوژیکی یا منحنی دبی-اشل؛ داده‌های ورودی، از جمله توپوگرافی و داده‌های کاربری زمین؛ نوع مدل‌سازی (یک‌بعدی در مقابل دوبعدی)؛ تنظیم مدل و فرضیات مسئله (به‌عنوان مثال، جریان دائمی در مقابل جریان غیردائم)؛ پارامترهای مدل مانند زبری مانینگ؛ فقدان داده‌های کالیبراسیون مدل (به‌عنوان مثال، میزان سیلاب مشاهده‌شده) و رویکرد پهنه‌بندی سیلاب گرفتگی به‌وجود می‌آید [2]. ارزیابی کمی عدم قطعیت در خروجی‌های مدل شبیه‌سازی شده و تخمین پارامترهای آن، موجب افزایش اطمینان در نتایج مدل‌سازی و شناخت درستی از منابع عدم قطعیت می‌شود. در میان تمامی منابع عدم قطعیت ذکر شده در رابطه با پهنه‌بندی سیلاب، عدم قطعیت زبری و دبی جریان به‌عنوان دو منبع کلیدی بر ارتفاع سطح آب سیلاب محسوب می‌شوند. تخمین زبری به دلیل وابستگی آن به عوامل مختلف مقاومت جریان، کار سختی است و از آن‌جایی که به روش تجربی یا به‌طور غیرمستقیم با روش‌های آزمایشگاهی و میدانی تخمین زده می‌شود، لزوماً درجه قابل توجهی از عدم قطعیت را به مدل اعمال می‌کند. همچنین از آن‌جایی که دبی‌های ثبت‌شده با استفاده از منحنی دبی-اشل استخراج می‌شوند، بایستی توجه کرد که در داده‌های ثبت‌شده، عدم قطعیت ذاتی در ارتباط با آن‌ها وجود دارد که بر کیفیت داده‌های ورودی و در تحلیل فراوانی سیلاب یا مدل‌سازی هیدرولوژیکی اثر می‌گذارد [3]. در واقع، عدم قطعیت بر منحنی دبی-اشل به ورودی جریان در یک مدل هیدرولوژیکی و به تبع آن تخمین ارتفاع سطح آب و دبی سیلاب منتقل می‌شود.

چندین روش آماری برای تحلیل عدم قطعیت وجود دارد که به طور کلی این روش‌ها در شش گروه بشرح زیر تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱- روش‌های تحلیلی، ۲- روش‌های تقریبی (مانند روش ممان دوم مرتبه اول)، ۳- روش‌های مبتنی بر نمونه‌برداری و شبیه‌سازی (مانند روش مونت کارلو)، ۴- روش‌های بی‌زی (مانند روش *GLUE*)، ۵- روش‌های مبتنی بر تحلیل خطاهای مدل و ۶- روش‌های مبتنی بر رویکرد مجموعه فازی [4]. هر روش دارای سطوح مختلف پیچیده ریاضی و نیازهای داده است. انتخاب هر کدام از روش‌های مذکور به ماهیت موضوع مورد نظر، از جمله در دسترس بودن اطلاعات، پیچیدگی مدل، نوع و دقت نتایج مورد نظر بستگی دارد [5]. روش مورد استفاده در این تحقیق روش مونت کارلو و *GLUE* است که به کمک آن به تحلیل عدم قطعیت زبری و دبی جریان و تأثیر آن بر نتایج ارتفاع سطح آب پرداخته می‌شود.

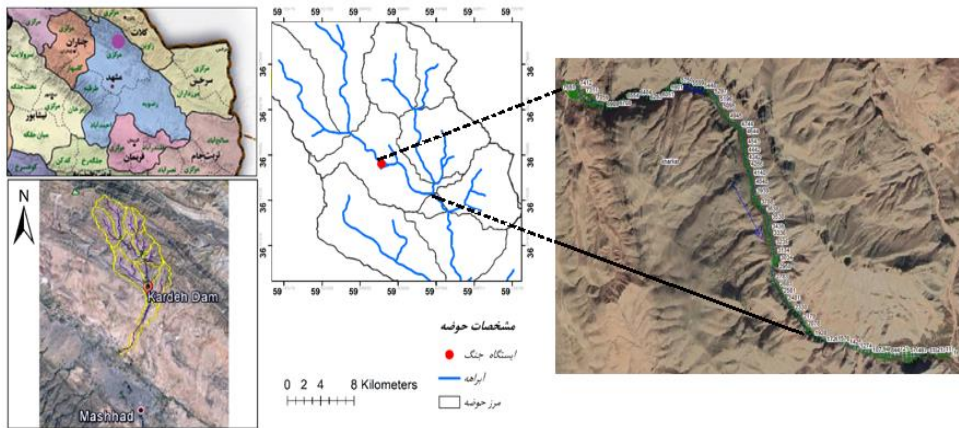
پیش از این، مطالعات بسیاری به تحلیل انتشار عدم قطعیت ضریب زبری مایننگ در مدل‌سازی سیل با استفاده از *GLUE* و شبیه‌سازی مونت کارلو اختصاص داده شده است. در همین راستا، وطن‌چی و مغربی [6] به تحلیل عدم قطعیت زبری و پارامترهای توانی منحنی دبی-اشل به کمک روش *GLUE* پرداختند. اساس پژوهش آن‌ها روش تخمین منحنی‌های دبی-اشل مبتنی بر مفهوم کنتورهای بی‌بعد سرعت در روش اندازه‌گیری تک‌نقطه‌ای (*SPM*) است که اولین بار توسط مغربی در سال ۲۰۰۶ [7] معرفی شد. همچنین، موکولو و همکاران [8] به کمک *GLUE* و با مدل *HEC-RAS*، به تحلیل عدم قطعیت ناشی از خطاهای جریان ورودی (منحنی دبی-اشل) و عدم قطعیت پارامترهای ورودی (زبری مایننگ) پرداختند. نتایج تحلیل عدم قطعیت آن‌ها نشان داد که عدم قطعیت جریان ورودی سهم بیشتری در عدم قطعیت کلی مدل نسبت به پارامتر زبری دارد و زبری کانال اصلی نسبت به سیلاب‌دشت حساسیت بیشتری دارد. تحقیقات یونگ و مرواد [2] نیز با هدف کمی کردن عدم قطعیت دبی جریان، توپوگرافی و زبری با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و *GLUE* نشان می‌دهد که عدم قطعیت متغیرها در حالت ترکیبی یک مرز عدم قطعیت در ناحیه آب‌گرفتگی که در بازه ۱/۴ تا ۴/۶ درصد برای مسیر سیمور و ۴ تا ۲۹ درصد برای استرودز کریک در حال تغییر است، ایجاد می‌کند. تحلیلی جامع به منظور عدم چشم‌پوشی از خطاهای داده‌های دبی توسط دی‌بالداسارا و مونتاری [9] صورت گرفت. در همین راستا، خطاهای منحنی دبی-اشل را با توجه به تعدادی از منابع مختلف خطا بر مشاهدات بدست آمده مانند خطای اندازه‌گیری داده‌های دبی، خطای درون‌یابی و برون‌یابی منحنی دبی-اشل، تغییرات فصلی پوشش گیاهی بر زبری و شرایط جریان غیردائمی با استفاده از مدل هیدرولیکی یک‌بعدی *HEC-RAS* مورد بررسی گرفت و نشان دادند خطای کل مؤثر بر مشاهدات دبی رودخانه در محدوده ۶/۲ تا ۴۲/۸ درصد است. همچنین بوزی و همکاران [10] با استفاده از روش مونت کارلو، عدم قطعیت ضریب زبری و دبی را به صورت جداگانه و باهم بر محاسبات تراز سطح آب در مدل هیدرولیکی یک‌بعدی مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به اهمیت عدم قطعیت دو منبع مهم زبری و دبی در نتایج سطح آب سیلاب، در این مطالعه به بررسی تأثیر عدم قطعیت ضریب زبری مایننگ و دبی جریان بر ارتفاع سطح آب پرداخته می‌شود و میزان خطای آن با استفاده از دو روش تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو و *GLUE* به کمک مدل یک‌بعدی و دوبعدی *HEC-RAS* بررسی می‌شود. با استفاده از مدل دوبعدی *HEC-RAS* به تحلیل عدم قطعیت زبری و دبی به صورت جداگانه و ترکیبی پرداخته می‌شود. پس از اجرای ۱۵۰۰ شبیه‌سازی مونت کارلو با اعمال روش *GLUE* و انتخاب معیار *RMSE* به عنوان تابع درست‌نمایی، توزیع پسین زبری و دبی بررسی و مقادیر دامنه بهینه بین حد بالا و پایین در سطح اطمینان ۹۵ درصد بدست می‌آید.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه موردی و داده‌های مورد استفاده

محدوده مورد مطالعه در پژوهش بخشی از رودخانه کارده بعد از خروجی حوضه کارده-کریم‌آباد به طول حدود ۷/۵ کیلومتر در جهت پایین دست ایستگاه مشاهداتی جنگ مطابق شکل (۱) است. حوضه سد کارده با مساحتی حدود ۶۸۰/۵ کیلومتر مربع در شمال شرق ایران و شمال شهرستان مشهد قرار گرفته است. این منطقه در دامنه جنوبی رشته کوه‌های هزارمسجد و زون کپه‌داغ و در محدوده مختصات جغرافیایی $31^{\circ} 26' 59''$ تا $48^{\circ} 44' 59''$ طول شرقی و $17^{\circ} 37' 36''$ تا $27^{\circ} 58' 36''$ عرض شمالی واقع شده است و بخشی از حوضه آبخیز کشف‌رود مشهد نیز محسوب می‌شود. فاصله پایین‌ترین قسمت حوضه تا شهر مشهد ۴۲ کیلومتر است. مهم‌ترین رودخانه حوضه رودخانه کارده است که جهت جریان آب از شمال به جنوب بوده و از پیوستن دو شاخه کوشک‌آباد و آل به وجود آمده است. مقادیر زبری از روش کاون، براساس جدول (۱) و با استفاده از گزارش سازمان آب منطقه‌ای و زبری ارائه شده توسط چاو (۱۹۵۹) به ۴ ناحیه کاربری اراضی که نقشه آن در محیط *GIS* ساخته شده است، اعمال می‌گردد. در ادامه کلیه محاسبات تحلیل عدم قطعیت زبری و دبی جریان برای پهنه سیل گیر سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال با دبی اوج $203/4 m^3/s$ که براساس نشریه ۳۰۷ به عنوان پهنه سیل پرخطر شناخته می‌شود، انجام گرفته است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ناحیه مورد مطالعه و مقاطع عرضی

جدول ۱- اطلاعات ضریب زبری مانینگ کاربری اراضی مختلف رودخانه کارده

نوع کاربری اراضی	ضریب واحد	حداقل	حداکثر
کانال اصلی	0.054	0.017	0.099
سیلاب دشت	0.063	0.02	0.107
مرتع	0.035	0.008	0.064
منطقه زراعی	0.04	0.013	0.069

۲-۲- مدل هیدرولیکی و معادلات حاکم بر جریان

جهت مدل سازی هیدرولیکی جریان در رودخانه کارده از مدل یک بعدی و دوبعدی *HEC-RAS* استفاده می شود. سیستم تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژیکی (*HEC-RAS*)، توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا (*USACE*) توسعه یافته است و به کاربر امکان شبیه سازی جریان را در شرایط دائمی و غیردائمی می دهد. در پژوهش حاضر، مدل یک بعدی در شرایط دائمی و در مدل سازی دوبعدی با توجه به قابلیت نسخه جدید مدل *HEC-RAS 5.0.7*، معادلات به روش موج دیفیوژن که سرعت اجرای مدل نسبت به روش موج دینامیک بالاتر و پایداری به مراتب بیشتر است، استفاده می شود. الف) یک بعدی: پروفیل سطح آب براساس روش گام به گام استاندارد از مقطعی به مقطع دیگر برای حل معادله انرژی مطابق با معادله (۱) محاسبه می شود:

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

ب) دوبعدی: در روش دیفیوژن معادله اندازه حرکت سنت و نانت کامل در مواردی که ترم های اصطکاک کف و گرانش بر جریان حاکم است به فرم دیفرانسیلی رایج زیر ساده سازی می شود:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - V \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (2)$$

$$\text{که در آن } \beta = \frac{(R(H))^{5/3}}{n |\nabla H|^{1/2}} \text{ است.}$$

در روابط بالا y_1 و y_2 به ترتیب عمق آب در پایین دست و بالادست، z_1 و z_2 ارتفاع کانال از سطح مبنا، α_1 و α_2 ضرایب تصحیح سرعت، V_1 و V_2 سرعت متوسط، g شتاب ثقل و h_e افت انرژی بین دو مقطع، H ارتفاع آب از سطح مبنا، q دبی جانبی، n ضریب زبری مانینگ و R شعاع هیدرولیکی است.

۲-۳- اجرای *HEC-RAS* در چارچوب مونت کارلو

روش مونت کارلو از پرکاربردترین روشهای تحلیل عدم قطعیت در مسائل مدل سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی است که تأثیر پارامترهای غیرقطعی مدل بر نتایج را به ازای توزیع احتمالاتی پارامتر مورد بررسی ارزیابی می کند. در شبیه سازی مونت کارلو، مقادیر تصادفی هر یک از متغیرهای غیرقطعی با

توجه به توزیع‌های احتمالاتی مربوط به آن‌ها تولید می‌شوند و مدل چندین بار با مجموعه‌های مختلف متغیرهای ورودی اجرا می‌گردد. در این پژوهش چارچوبی برای تحلیل عدم قطعیت و اجرای خودکار *HEC-RAS* اجرا گردیده است. این چارچوب قادر به شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از مدل *HECRASController* بوده و روش‌های دستکاری و کنترل خودکار داده‌ها را از طریق *HECRASController* فراهم می‌کند. *HECRASController* بخشی از رابط برنامه‌نویسی نرم افزار (*API*) پر کاربرد و محبوب *HEC-RAS* است. این رابط مجموعه‌ای از ابزارهای برنامه‌نویسی شامل: کلاس‌ها، توابع و زیرروال‌ها هستند. با توجه به اینکه *HEC-RAS* در زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک (*VBA*) نوشته شده و همچنین *VBA* در مایکروسافت اکسل برای محاسبات و تجزیه و تحلیل داده‌ها ابزاری بسیار قدرتمند است، لذا ماژول محاسباتی قابل کنترل در محیط ماکرو صورت گرفته است. در واقع، رابط امکان باز کردن پروژه‌های *HEC-RAS* جهت اجرای شبیه‌سازی و ذخیره آن‌ها را فراهم می‌سازد. یکی از کاربردهای قابل توجه آن امکان دستکاری ضریب زبری مائینگ است [11] که در این مقاله از آن استفاده می‌شود.

۳-۴- روش *GLUE*

یکی از روش‌های تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل هیدرولیکی روش تخمین عدم قطعیت تشابهات عمومی (*GLUE*) است که توسط بون و باینلی (۱۹۹۲) پیشنهاد شده است. روش *GLUE* یک روش مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو است که در این پژوهش به منظور تحلیل عدم قطعیت زبری، دبی و ترکیبی به کمک مدل دوبعدی *HEC-RAS* بهره گرفته می‌شود. مراحل گام به گام این روش به صورت زیر دنبال می‌شود:

گام اول: تعیین توزیع احتمال پیشین در بازه تغییرات مشخص برای پارامترها. انتخاب توزیع با دانش قبلی اندک از توزیع پارامتر صورت می‌گیرد و معمولاً این توزیع احتمال برای متغیر مدل یکنواخت یا نرمال فرض می‌شود که در تحقیق حاضر توزیع پیشین زبری و دبی به صورت نرمال فرض شده است.

گام دوم: تولید N مجموعه از پارامترهای تصادفی در گام قبل با استفاده از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو. در این پژوهش به علت حجم زمانی بسیار بالای محاسبات مدل دوبعدی، ۵۰۰ مجموعه پارامتر زبری و هیدروگراف دبی جهت ۱۵۰۰ اجرای نرم‌افزار برای بررسی سه حالت عدم قطعیت زبری و دبی به طور جداگانه و ترکیبی تولید گردید.

گام سوم: اجرای خودکار شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک حلقه وژوال بیسیک برای هر مجموعه پارامتر تولیدشده در گام قبل به کمک مدل *HEC-RAS*. در این مرحله مدل دوبعدی برای هر مجموعه پارامتر اجرا و با پیاده‌سازی یک تابع متلب به حلقه، ارتفاع سطح آب در موقعیت‌های موردنظر استخراج می‌شود.

گام چهارم: تعیین تابع درستنمایی. هر کدام از معیارهای درستنمایی *MAPE*، *MPE*، *NSE* و *RMSE* می‌توانند به جای تابع درستنمایی پیشنهادی انتخاب شوند. از بین توابع درستنمایی ذکر شده، تابع درستنمایی به منظور تحلیل عدم قطعیت عبارتست از خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(h(i) - \hat{h}(i / \theta_j) \right)^2 \right]} \quad (3)$$

که در رابطه فوق، *RMSE* همان تابع درستنمایی است که با نماد $L(\theta_j)$ نمایش می‌دهیم. N تعداد نقاط مشاهداتی، $h(i)$ ارتفاع سطح آب مشاهداتی در تراز i و $\hat{h}(i / \theta_j)$ ارتفاع سطح آب شبیه‌سازی شده برای i زمین مجموعه پارامتر θ در تراز i است.

گام پنجم: انتخاب حد آستانه برای پذیرش مجموعه پارامترهای قابل قبول و تفکیک آن از مجموعه پارامترهای غیر قابل قبول. در همین راستا، مقادیر *RMSE* بیشتر از ۱ متر بر مبنای طراحی عمق آزاد به عنوان حد آستانه برای عدم پذیرش مجموعه پارامترهای قابل قبول در نظر گرفته شد. همچنین به عنوان شرط دوم، مجموعه پارامترهایی که مقادیر زبری کانال بیشتر از زبری سیلاب دشت بودند به عنوان شبیه‌سازی‌های غیر قابل قبول رد می‌شوند.

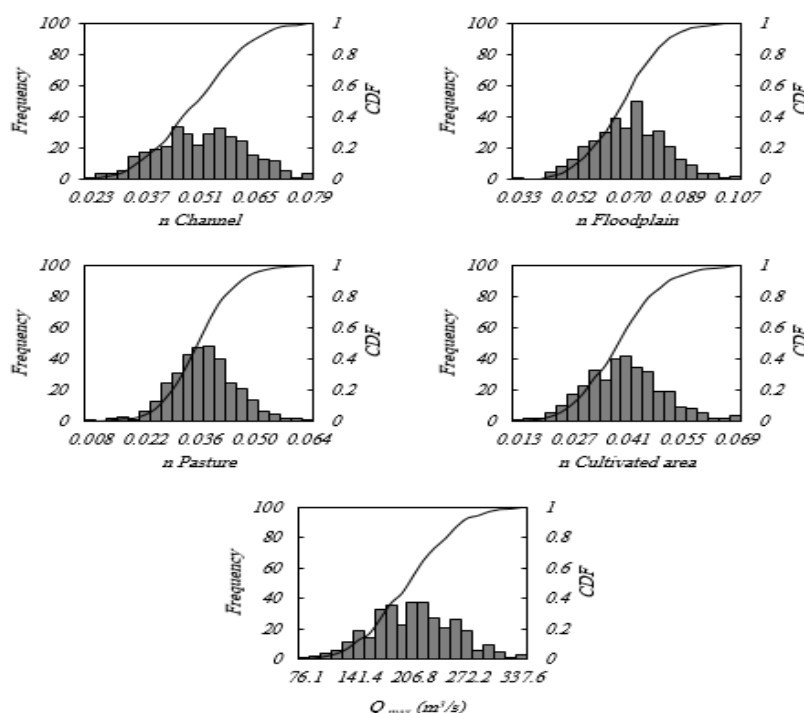
گام ششم: محاسبه عدم قطعیت خروجی مدل با محاسبه وزن‌های درستنمایی. با توجه به چارچوب *GLUE*، وزن درستنمایی به عنوان تابعی از معیار درستنمایی متناسب برای مجموعه پارامترهای قابل قبول بیان می‌شود و به صورت زیر بدست می‌آید:

$$L_W(\theta_j) = \frac{L(\theta_j)}{\sum_{i=1}^M L(\theta_j)} \quad (4)$$

که در آن $L_W(\theta_j)$ وزن درستنمایی برای i زمین مجموعه پارامتر ورودی θ_j و M تعداد مجموعه‌های پارامتر قابل قبول است. مجموع این وزن‌ها برابر با یک بوده و تابع توزیع تجمعی (*CDF*) را تشکیل می‌دهند. در واقع، L_W همان توزیع تجمعی بر روی نتایج قابل قبول است که توزیع پسین روش *GLUE* نامیده می‌شود. به کمک توزیع پسین میزان عدم قطعیت در سطح اطمینان ۹۵ درصد (بازه صدک ۵ و ۹۵ درصد) از تابع توزیع تجمعی تخمین زده می‌شود.

۳. نتایج و بحث

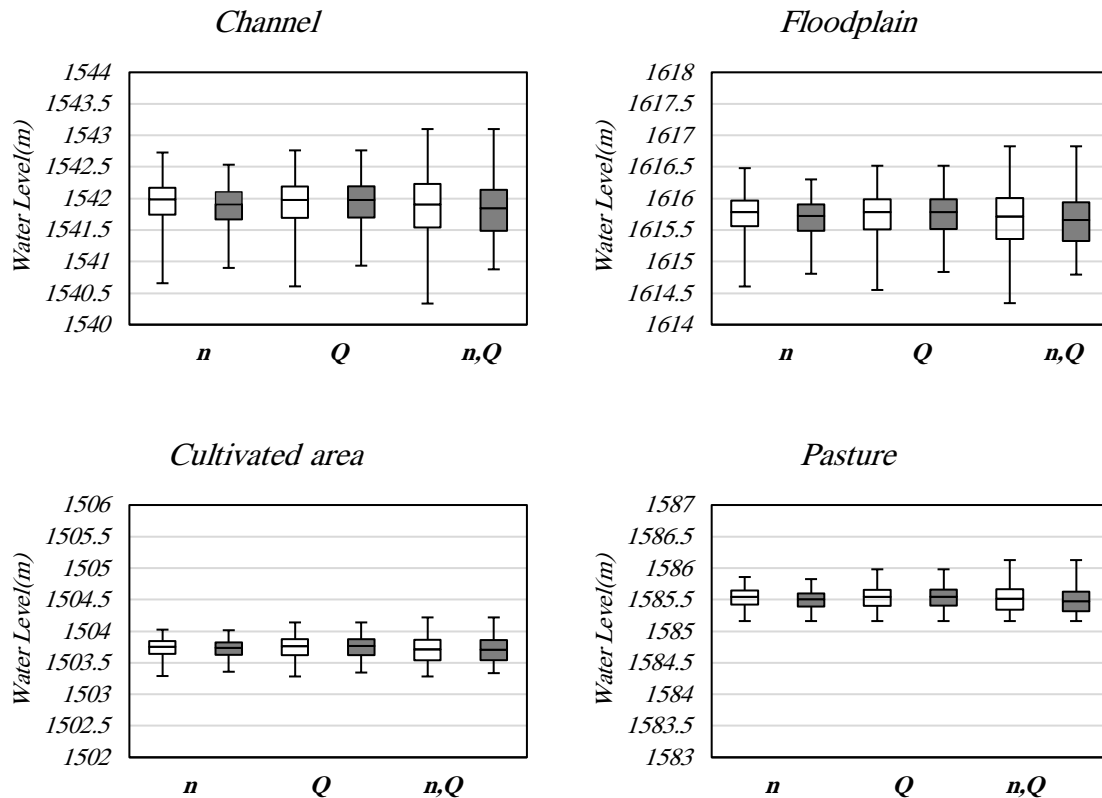
در این بخش به کمک *GLUE* عدم قطعیت ترکیب زبری و دبی با استفاده از توزیع پسین آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگرچه تحلیل عدم قطعیت برای سه حالت ناشی از متغیر زبری و دبی به صورت جداگانه و ترکیبی انجام شده است، اما به منظور رعایت اختصار تغییرات توزیع پسین زبری و دبی تنها در حالت عدم قطعیت ترکیبی که باند ارتفاع سطح آب بیشتری ایجاد می‌کند، گزارش می‌شود. توزیع پسین زبری کاربری مختلف و دبی پس از شبیه‌سازی مونت کارلو و اعمال حد آستانه *GLUE* در شکل ۲ ارائه شده است. دامنه زبری سیلاب‌دشت، مرتع و منطقه زراعی نسبت به توزیع پیشین آن‌ها (دامنه اولیه جدول ۱) تغییر محسوسی نداشته و تنها زبری کانال که بیشترین نقش را بر ارتفاع سطح آب دارد، دچار تغییرات اندکی شده که با مقایسه توزیع پیشین و پسین آن‌ها مشاهده می‌شود زبری کانال نسبت به سیلاب‌دشت و دو کاربری دیگر حساس تر است که مشابه نتایج گزارش شده پاپنبرگر و همکاران [12] و موکلو و همکاران [8] است. البته واضح است که حساسیت بیشتر زبری کانال به دلیل ظرفیت انتقال بالای جریان کانال اصلی نسبت به سیلاب‌دشت است.



شکل ۲- توزیع پسین زبری کاربری اراضی مختلف و دبی در اثر عدم قطعیت ترکیبی زبری و دبی به روش *GLUE*

به منظور مشاهده بهتر اثر تغییرات بین توزیع پیشین و پسین پارامترها بر متغیر خروجی ارتفاع سطح آب از نمودار جعبه‌ای استفاده می‌شود. نمودارهای ارائه شده در شکل ۳ به منظور رعایت اختصار برای ۴ نقطه مشاهداتی از مجموع ۵۵ نقطه در نظر گرفته شده در پژوهش منطبق بر ایستگاه‌های مقطع عرضی مدل یک‌بعدی ترسیم شده است. این نمودارها با هدف نشان دادن درجه حساسیت ارتفاع سطح آب به تغییرات زبری و دبی در موقعیت‌های مشاهداتی در طول ۷/۵ کیلومتر رودخانه کارده به گونه‌ای انتخاب شده است که بازه ابتدایی، میانی و انتهایی رودخانه را پوشش داده و علاوه بر آن به عنوان نماینده‌ای از پوشش کاربری اراضی خود باشند. در هر نمودار ۶ جعبه ترسیمی به صورت دوتایی، توزیع پیشین (نمودارهای سفید رنگ) و توزیع پسین (نمودارهای خاکستری رنگ) ارتفاع سطح آب را بر اثر عدم قطعیت زبری (دو نمودار ابتدایی)، عدم قطعیت دبی (دو نمودار میانی) و عدم قطعیت ترکیبی (دو نمودار انتهایی) نشان می‌دهند. در این شکل با مقایسه حساسیت کاربری‌های اراضی مشاهده می‌شود موقعیت نقطه مشاهداتی انتخابی در ناحیه کانال و سیلاب‌دشت نسبت به موقعیت‌های دیگر از حساسیت بیشتری برخوردار است و تغییرات ارتفاعی آب در آن‌ها بیشتر است. همچنین توزیع‌های پیشین و پسین ارتفاع سطح آب نشان می‌دهند باند عدم قطعیت ارتفاع سطح آب در حالت ترکیبی بیشتر از عدم قطعیت دبی و باند عدم قطعیت ارتفاع سطح آب در حالت تغییرات دبی بیشتر از باند ایجاد شده توسط زبری است. اطلاعات تغییرات ارتفاعی در ۴ نقطه مشاهداتی ارائه شده در جدول ۲ گزارش شده است. واضح است باند عدم قطعیت ارتفاع سطح آب در توزیع پسین (روش *GLUE*) به نسبت توزیع پیشین (روش مونت کارلو) در اثر اعمال محدودیت در پذیرش پارامترهای قابل قبول کاهش یافته است که مبنای رویکرد روش *GLUE* در تشخیص این مجموعه پارامترها جهت کاهش عدم قطعیت ارتفاع سطح آب

را نشان می‌دهد. در این جدول؛ به‌عنوان مثال، باند عدم قطعیت ارتفاع سطح آب در نقطه مشاهداتی انتخابی کانال در اثر اعمال ۵۰ درصد تغییرات در زبری، دبی و ترکیبی به ترتیب با روش مونت کارلو به ۲/۰۷، ۲/۱۶ و ۲/۷۷ متر و با روش *GLUE* به ۱/۶۴، ۱/۸۳ و ۲/۲۳ متر می‌رسد.

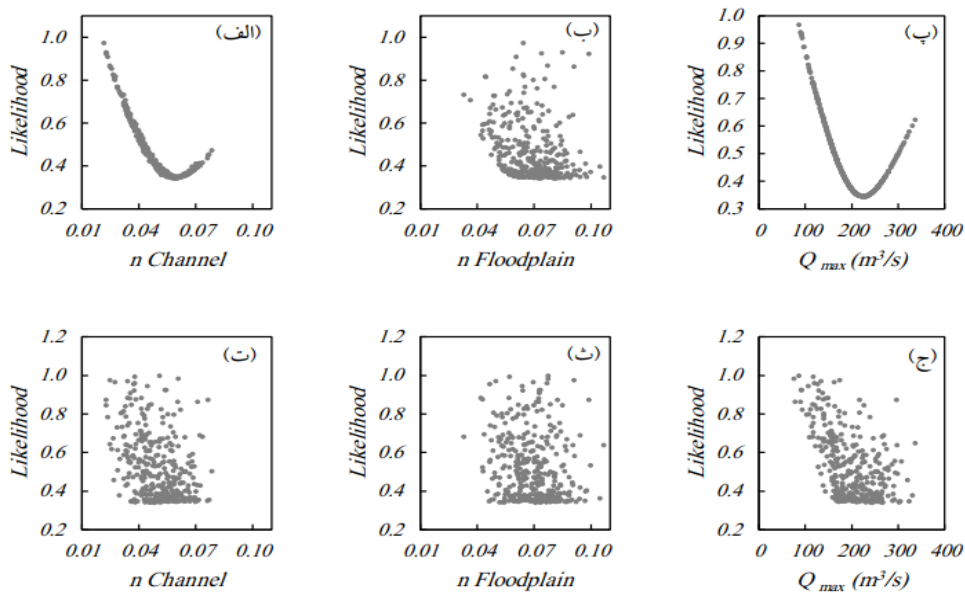


شکل ۳- نمودار جعبه‌ای جهت مقایسه توزیع پیشین (نمودارهای سفید رنگ) و پسین (نمودارهای خاکستری رنگ) ارتفاع سطح آب بر اثر تحلیل عدم قطعیت زبری، دبی و ترکیبی به ترتیب به روش مونت کارلو و *GLUE*

جدول ۲- باند عدم قطعیت ارتفاع سطح آب در نقاط مشاهداتی به روش *GLUE* و مونت کارلو

Observation point	Uncertainty Band (m)					
	<i>n</i>		<i>Q</i>		<i>n, Q</i>	
	Monte Carlo	<i>GLUE</i>	Monte Carlo	<i>GLUE</i>	Monte Carlo	<i>GLUE</i>
Channel	2.07	1.64	2.16	1.83	2.77	2.23
Floodplain	1.88	1.50	1.97	1.68	2.49	2.03
Pasture	0.70	0.67	0.82	0.82	0.97	0.97
Cultivated area	0.74	0.66	0.86	0.79	0.94	0.88

در ادامه به منظور ارائه دامنه بهینه پارامترهای زبری و دبی، ابتدا پراکندگی مقادیر پارامترهای قابل قبول که توزیع پسین آن‌ها تنها در حالت ترکیبی بررسی شد، برای دو ناحیه کانال و سیلاب‌دشت (با توجه به پوشش بخش عمده نقشه کاربری اراضی نسبت به ناحیه مرتع و منطقه زراعی) و متغیر دبی سیلاب جریان غیردائمی در شکل ۴ ترسیم می‌شود. نمودار تغییرات تابع درست‌نمایی با هدف شناسایی پارامترها در فرآیند واسنجی و استخراج مقادیر حد بالا و حد پایین ترسیم می‌شود. با مقایسه این شکل‌ها مشاهده می‌شود پارامترهای زبری و دبی در حالت عدم قطعیت ترکیبی (شکل ۴-ت تا ج) از قابلیت شناسایی کمتری برخوردارند. در حالی که در نمودارهای درست‌نمایی ناشی از عدم قطعیت زبری (شکل ۴-الف و ب) و دبی (شکل ۴-پ) انتخاب مقدار بهینه زبری کانال و دبی سیلاب که کمترین مقادیر تابع درست‌نمایی را به خود اختصاص می‌دهند راحت‌تر است. دامنه بهینه زبری کاربری اراضی مختلف و دبی سیلاب در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است دامنه بهینه زبری در حالت عدم قطعیت ترکیبی نسبت به تحلیل عدم قطعیت زبری به تنهایی چندان تغییری نمی‌کند، اگرچه در مقدار بهینه تفاوت ایجاد می‌کند. انتخاب مقادیر بهینه از مجموعه زبری و دبی پیشنهادی جدول ۳ به این معناست که مقدار درست‌نمایی در حالت عدم قطعیت ترکیبی در شکل ۴ (ت تا ج) به کمترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۴- تغییرات مقادیر تابع درستنمایی بر اثر (الف) و (ب): عدم قطعیت زبری، (پ): عدم قطعیت دبی و (ت)، (ث) و (ج): عدم قطعیت ترکیبی زبری و دبی برای کانال، سیلاب‌دشت و دبی اوج سیلاب

جدول ۳- دامنه بهینه زبری و دبی در تحلیل عدم قطعیت ترکیبی زبری و دبی به روش GLUE

RMSE			متغیر	
Optimal	Upper 95%	Lower 5%		
0.048	0.069	0.032	کانال	
0.071	0.089	0.049	سیلاب دشت	زبری کاربری اراضی
0.040	0.050	0.023	مرتع	
0.053	0.056	0.023	منطقه زراعی	
245.504	287.990	117.955	دبی (m^3/s)	

نتایج تحلیل *GLUE* بر باند عدم قطعیت تابع درستنمایی *RMSE* در سه حالت عدم قطعیت زبری و دبی جریان به صورت جداگانه و ترکیبی در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول همچنین باند عدم قطعیت خطا در سطح اطمینان ۵ و ۹۵ درصد برای تابع درستنمایی بدست آمده است که نشان می‌دهد همانند نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو (جدول ۵)، ترکیب دو متغیر منجر به اختلاف ارتفاع سطح آب بیشتری نسبت به دو حالت عدم قطعیت زبری و دبی به صورت جداگانه می‌شود. در این جدول ستون اختلاف مقدار ماکزیمم از مینیمم نشان می‌دهد با اعمال ۵۰٪ تغییرات در زبری، دبی و یا هر دو پس از محدود کردن نتایج پارامترهای قابل قبول توسط *GLUE*، اختلاف بیشترین خطای جذر میانگین مربعات از کمترین آن در ۵۰۰ شبیه‌سازی دچار چه میزان تغییرات می‌شود. این ستون در جدول ۵ نیز معرف اختلاف خطای ماکزیمم و مینیمم است با این تفاوت که برای تمام مجموعه پارامترهای قابل قبول و غیر قابل قبول بدست آمده است. در واقع این جدول نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو را برای هر متغیر غیرقطعی و تمام مجموعه پارامترها نشان می‌دهد. در هر دو جدول ذکر شده، ترکیب دو متغیر بیشترین باند خطا را ایجاد کرده به طوری که باند خطا در روش *GLUE* به ۰/۶۵۹ متر و در روش مونت کارلو به ۰/۹۹۷ متر می‌رسد. پس از آن عدم قطعیت دبی با اختلاف ناچیزی از عدم قطعیت پارامتر زبری مهم تر بشمار می‌آید.

همچنین باندهای خطای بدست آمده از روش *GLUE* کمتر از روش مونت کارلو است که به دلیل رویکرد *GLUE* در تشخیص مجموعه پارامترهای قابل قبول برای ایجاد نتایج نسبتاً خوب و برابر است. لذا با استفاده از توزیع پسین این روش و مقادیر دامنه بهینه می‌توان باند خطا را در نقاط موردنظر رودخانه کارده کاهش داد. لازم به ذکر است، در جداول زیر به عنوان نمونه برای متغیر زبری در روش *GLUE* (جدول ۴)، Upper 95% به این معناست که در ۹۵ درصد داده‌ها، مقادیر خطا کمتر از ۰/۷۴۴ متر است. به همین ترتیب Lower 5% بیان می‌کند که ۵ درصد مقادیر خطای جذر میانگین مربعات محاسبه شده برای ۵۰۰ مجموعه پارامتر کمتر از ۰/۳۴۶ متر است.

جدول ۴- باند عدم قطعیت خطای ارتفاع سطح آب به روش GLUE

باند عدم قطعیت (معیار درست‌نمایی $RMSE$)				متغیر
$Max-Min(m)$	$Band(m)$	$Upper\ 95\%(m)$	$Lower\ 5\%(m)$	
0.632	0.398	0.744	0.346	زبری
0.623	0.401	0.746	0.345	دبی جریان
0.659	0.528	0.874	0.346	ترکیب زبری و دبی

جدول ۵- باند عدم قطعیت خطای ارتفاع سطح آب به روش مونت کارلو

باند عدم قطعیت (معیار درست‌نمایی $RMSE$)				متغیر
$Max-Min(m)$	$Band(m)$	$Upper\ 95\%(m)$	$Lower\ 5\%(m)$	
0.784	0.379	0.726	0.347	زبری
0.834	0.408	0.754	0.345	دبی جریان
0.997	0.574	0.923	0.349	ترکیب زبری و دبی

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد ترکیب عدم قطعیت ناشی از زبری و دبی جریان منجر به ایجاد پهنای باند بیشتر عدم قطعیت ارتفاع سطح آب می‌شود و پس از آن عدم قطعیت جریان ورودی سهم بیشتری در عدم قطعیت کلی مدل نسبت به پارامتر زبری در این بازه از رودخانه کرده دارد. علاوه بر این، مقایسه توزیع پیشین و پسین زبری کاربری مختلف نشان داد زبری کانال نسبت به نواحی سیلاب‌دشت و دو کاربری مرتع و منطقه زراعی حساس تر است. لذا تغییرات بیشتر در زبری کانال و افزایش آن منجر به افزایش خطای عملکرد مدل دوبعدی و افزایش باند عدم قطعیت ارتفاع سطح آب خواهد شد. کاهش باند عدم قطعیت خطا در روش $GLUE$ نسبت به روش مونت کارلو نیز نشان داد با استفاده از رویکرد $GLUE$ در تشخیص مجموعه پارامتر قابل قبول می‌توان مقادیر خطا و در نتیجه تغییرات ارتفاعی سطح آب را با انتخاب زبری و دبی از دامنه بهینه ارائه شده در حالت عدم قطعیت ترکیبی کاهش داد.

۵. مراجع

- Bates, P. D., Horritt, M. S., Aronica, G., & Beven, K. (2004). Bayesian updating of flood inundation likelihoods. conditioned on flood extent data. *Hydrological Processes*, 18(17), 3347–3370.
- Jung, Y., & Merwade, V. (2012). Uncertainty quantification in flood inundation mapping using generalized likelihood uncertainty estimate and sensitivity analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(4), 507–520.
- Parodi, U., & Ferraris, L. (2004). Influence of stage discharge relationship on the annual maximum discharge statistics. *Natural Hazards*, 31(3), 603–611.
- Solomatine, D. P., & Shrestha, D. L. (2009). A novel method to estimate model uncertainty using machine learning techniques. *Water Resources Research*, 45(12).
- Tung, Y.-K., Yen, B. C., & Melching, C. S. (2006). *Hydrosystems engineering reliability assessment and risk analysis*. McGraw-Hill New York.
- Vatanchi, S. M., & Maghrebi, M. F. (2019). Uncertainty in Rating-Curves Due to Manning Roughness Coefficient. *Water Resources Management*, 33(15), 5153–5167.
- Maghrebi, M. F. (2006). Application of the single point measurement in discharge estimation. *Advances in Water Resources*, 29(10), 1504–1514.
- Mukolwe, M. M., Baldassarre, G. Di, Werner, M., & Solomatine, D. P. (2014). Flood modelling: parameterisation and inflow uncertainty. *Water Management*, 167(1).
- Di Baldassarre, G., & Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology & Earth System Sciences*, 13(6).
- Bozzi, S., Passoni, G., Bernardara, P., Goutal, N., & Arnaud, A. (2015). Roughness and discharge uncertainty in 1D water level calculations. *Environmental Modeling & Assessment*, 20(4), 343–353.
- Dysarz, T. (2018). Application of Python scripting Techniques for control and automation of HEC-RAS simulations. *Water*, 10(10), 1382.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., & 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.