

تحلیل عدم قطعیت منحنی‌های دبی - اشل در رودخانه‌ها

سجاد محمدزاده وطن‌چی^۱، محمود فغفور مغربی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب- سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
^۲ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت: ۹۸/۵/۱۰، پذیرش: ۹۹/۶/۲۲، نشر آنلاین: ۹۹/۶/۲۲)

چکیده

رابطه دبی-اشل، یکی از مهم‌ترین اطلاعات ورودی در مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی است که می‌تواند در کنترل سیلاب و مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار بگیرد. برای به دست آوردن این رابطه اطلاعات هندسی و هیدرولیکی مقطع رودخانه مورد نیاز است. یکی از این اطلاعات ضریب زبری مانینگ (Manning) است که برای محاسبه این ضریب رابطه دقیقی وجود ندارد و بنا بر تجربه شخصی و جداول مرجع تخمین زده می‌شود. علاوه بر پارامتر زبری، عوامل مختلفی مانند برون‌یابی منحنی دبی-اشل و خطای اندازه‌گیری مستقیم دبی می‌تواند در تخمین نتایج اثرگذار باشد. هدف اصلی در این مقاله، تحلیل عدم قطعیت با روش ارزیابی انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها و منحنی دبی-اشل پیشنهادی در رودخانه‌ها است. اساس روش تخمین منحنی‌های دبی-اشل در این پژوهش مبتنی بر مفهوم کنتورهای بی‌بعد مقطع در روش اندازه‌گیری تک‌نقطه‌ای سرعت، SPM (Single point Measurement) می‌باشد. بنابراین برای اولین بار به بررسی عدم قطعیت در این روش پیشنهادی پرداخته می‌شود تا میزان کیفیت تخمین‌ها مورد ارزیابی قرار بگیرد. برای بررسی عدم قطعیت کلی در منحنی دبی-اشل از اطلاعات زبری در رودخانه‌های نازلی چای در ایران، مین در انگلستان و کلرادو در آرژانتین استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هر چه دقت تعیین ضریب زبری به‌عنوان پارامتر ورودی بیشتر باشد، عدم قطعیت در تخمین دبی کاهش خواهد یافت و کیفیت سنجش‌ها افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین متوسط عدم قطعیت کلی بر مبنای سه داده مشاهده‌ای مرجع در رودخانه‌های نازلی چای، مین و کلرادو به ترتیب در حدود ۲۴/۳، ۳۳/۱ و ۴۲/۵ درصد محاسبه شد.

کلیدواژه‌ها: رودخانه، منحنی دبی-اشل، عدم قطعیت، خطوط هم‌تراز سرعت، ضریب زبری مانینگ.

۱- مقدمه

می‌روند؛ همچنین، برون‌یابی فراتر از محدوده اندازه‌گیری برای تخمین منحنی دبی-اشل در شرایط جریان با دبی زیاد، اعمال می‌شود. با این حال، این امر باعث عدم قطعیت قابل توجهی در مدل‌سازی سیل می‌شود. فرض جریان دائمی و یکنواخت در طول مدل‌سازی با وجود داشتن شرایط جریان غیردائمی در واقعیت، یک منبع خطای دیگر برای مدل‌سازی هیدرودینامیکی به وجود می‌آورد. عامل دیگری که بر عدم قطعیت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی افزوده می‌شود، تغییرات پوشش گیاهی فصلی است که منجر به تغییرات زبری می‌شود. پژوهشگران بر این نکته تأکید دارند که ضریب زبری را نمی‌توان به‌طور قابل اعتمادی تعیین کرد؛ چون تحت تأثیر تعداد زیاد عوامل دیگر قرار می‌گیرد که همگی با زمان و یا در مسیر جریان تغییر می‌کنند. امروزه، استفاده از روش‌های تحلیل عدم قطعیت در مبحث مدیریت منابع آب به‌طور گسترده‌ای توسط پژوهشگران در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته است.

پیش‌بینی جریان‌های رودخانه‌ای به‌منظور طراحی، بهره‌برداری و برنامه‌ریزی منابع آب ضروری است (بهمنش و همکاران، ۱۳۹۶). در نتیجه هر چه کیفیت تخمین جریان ارتقا پیدا کند، درک بهتری نسبت به مدیریت، برنامه‌ریزی خطرات سیل و مدل‌سازی برای طولانی‌مدت حاصل می‌شود. یکی از روش‌ها به‌منظور اندازه‌گیری غیرمستقیم جریان در رودخانه‌ها، منحنی دبی-اشل است. به‌منظور کاربرد موفقیت‌آمیز رابطه دبی-اشل در پژوهش‌های کاربردی منابع آب، واسنجی دقیق و تحلیل عدم قطعیت آن ضروری است. 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. وجود خطا در طول اندازه‌گیری تراز و دبی رودخانه، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت به شمار

برونبایی، تغییرپذیری زبری و خطای اندازه‌گیری مستقیم دبی در رودخانه پو پرداخته بود، استفاده می‌شود. لازم به ذکر است همانند مطالعه (DiBaldassarre و Montanari، ۲۰۰۹) از بررسی خطای اندازه‌گیری تراز و اثر رسوب‌گذاری و فرسایش در تخمین منحنی دبی-اشل صرف‌نظر شده است. همچنین از روش پیشنهادی Tomkins (۲۰۱۲) به منظور تحلیل عدم قطعیت و بررسی کیفیت سنجش در منحنی دبی-اشل استفاده می‌شود. لازم به ذکر است در این پژوهش برای اولین بار به بررسی عدم قطعیت روش پیشنهادی مغربی و همکاران (Maghrebi و همکاران، ۲۰۱۷) پرداخته می‌شود. این مطالعه بر روی رودخانه‌های نازلی‌چای در ایران، مین در انگلستان و کلرادو در آرژانتین انجام می‌شود. همچنین از روش CES^۱ برای مقایسه با نتایج روش استفاده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تخمین منحنی دبی-اشل

روش‌های مختلف برای تخمین منحنی دبی-اشل در رودخانه‌ها وجود دارد که به‌طور کلی به سه روش مختلف تقسیم می‌شود. در روش اول، تنها با بهره‌جستن از داده‌های مشاهداتی دبی و تراز به تخمین منحنی پرداخته می‌شود. تابعی که به‌طور گسترده به‌عنوان منحنی دبی-اشل در هیدرولیک رودخانه به‌کار گرفته می‌شود، تابع توانی است؛ به‌عنوان مثال، این روش توسط Dymond و Christian (۱۹۸۲)، Herschy (۲۰۰۹) و Pappenberger و همکاران (۲۰۰۶) به‌کار گرفته شده است:

$$Q_e = a_1(H - a_2)^{a_3} \quad (1)$$

که در آن Q_e دبی تخمینی، H عمق آب و a_1 ، a_2 و a_3 پارامترهای کالیبراسیون هستند که معمولاً با روش کم‌ترین مربعات محاسبه می‌شوند (Petersen-Øverleir، ۲۰۰۴). توابع چندجمله‌ای نیز می‌توانند به‌عنوان منحنی‌های دبی-اشل استفاده شوند (Herschy، ۲۰۰۹):

$$Q_e = a_0 + a_1 \times H + a_2 \times H^2 + \dots + a_n \times H^n \quad (2)$$

روش دوم برای تخمین منحنی دبی-اشل روش‌های هیدرولیکی است. در این روش‌ها بدون در اختیار داشتن داده‌های مشاهداتی و تنها با کمک پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مقطع به تخمین منحنی دبی-اشل پرداخته می‌شود. مدل‌های هیدرولیکی سیستم تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژیکی ارتش آمریکا (HEC-RAS) و سیستم تخمین انتقال (GES) جزء این گروه می‌باشند. در سال‌های اخیر به‌کمک معادلات دیفرانسیلی حاکم بر

هر یک از این روش‌ها دارای نقاط ضعف و قوت متفاوتی بوده و دارای مفروضات گوناگونی می‌باشد.

Venetis (۱۹۷۰) اولین روش آماری را برای محاسبه عدم قطعیت منحنی‌های دبی-اشل براساس رگرسیون غیرخطی یک تابع توانی منتشر کرد که خطاها براساس واریانس‌های پارامترهای تخمینی، برآورد می‌شدند. Petersen-Øverleir (۲۰۰۴) روشی مبتنی بر احتمالات را پیشنهاد کرد تا روابط دبی-تراز با واریانس ناهمگن (Heteroscedasticity) مشاهده شده را به‌حساب آورد. McMillan و همکاران (۲۰۱۰) شبیه‌سازی MCMC را در رابطه بین دبی و تراز (تابع توانی تک‌بخشی) در رودخانه‌ای در نیوزیلند انجام دادند. آن‌ها عدم قطعیت را در اندازه‌گیری‌های دبی و تراز، رابطه‌ی دبی-اشل مفروض، برون‌یابی رابطه بین دبی و تراز و همچنین تغییرات مقطع عرضی با توجه به رشد گیاهان و یا حرکت بستر، ارزیابی کردند.

McMillan و Westerberg (۲۰۱۵) عدم قطعیت را با استفاده از یک تابع احتمال آماری (Informal Bayesian) ارزیابی کردند که در آن منابع عدم قطعیت، خطاهای شناختی (شامل رشد علف‌های هرز، رسوب شنی بستر و جریان‌های غیرقابل کنترل) و خطاهای تصادفی بودند. در روشی دیگر برای تحلیل عدم قطعیت منحنی دبی-اشل Westerberg و همکاران (۲۰۱۱) با بهره‌جویی از روش رگرسیون فازی به تحلیل عدم قطعیت منحنی دبی-اشل پرداختند.

DiBaldassarre و Montanari (۲۰۰۹) در تحلیل جامعی خطاهای منحنی دبی-اشل را با توجه به اشتباهات اندازه‌گیری داده‌های مشاهداتی دبی، خطاهای برون‌یابی و درون‌یابی منحنی دبی-اشل، اثرات جریان غیردائمی و اثرات پوشش گیاهی بر زبری کانال با استفاده از یک مدل هیدرولیکی یک‌بعدی موردبررسی قرار دادند. Tomkins (۲۰۱۲) با ارزیابی انحرافات اندازه‌گیری‌ها، به تحلیل داده‌های اندازه‌گیری ۳۶ ایستگاه اندازه‌گیری دبی در حوضه آبریز Namoi استرالیا که بر روی عدم قطعیت منحنی دبی-اشل تمرکز داشت، پرداخت. روش‌هایی مانند رگرسیون وزنی غیر پارامتری (LOWESS) (Coxon و همکاران، ۲۰۱۵) و روش تخمین عدم قطعیت تشابهات عمومی (GLUE) (Guerrero و همکاران، ۲۰۱۲) نیز به‌منظور تحلیل عدم قطعیت در منحنی دبی-اشل استفاده شده است.

در این مطالعه، به تحلیل عدم قطعیت در رابطه‌ی دبی-اشل بر مبنای خطوط هم‌تراز سرعت معرفی‌شده توسط مغربی و همکاران (Maghrebi و همکاران، ۲۰۱۷) پرداخته می‌شود. در این پژوهش از روش پیشنهادی DiBaldassarre و Montanari (۲۰۰۹) که به بررسی عدم قطعیت کلی شامل عدم قطعیت

در نهایت متغیرهای تأثیرگذار بر مقدار دبی مطابق رابطه (۴) انتخاب می‌شوند:

$$Q \propto A^{a_1} P^{a_2} P_t^{a_3} U_{SPM}^{a_4} n^{a_5} \quad (4)$$

برای دو تراز مختلف این رابطه به صورت نسبتی بیان می‌شود. فرم کلی رابطه پیشنهادی جهت تخمین منحنی دبی-اشل به صورت رابطه (۵) ارائه می‌گردد:

$$\frac{Q_e}{Q_r} = \left(\frac{A_e}{A_r}\right)^{a_1} \left(\frac{P_e}{P_r}\right)^{a_2} \left(\frac{P_t}{P_t}\right)^{a_3} \left(\frac{U_{SPM}_e}{U_{SPM}_r}\right)^{a_4} \left(\frac{n_e}{n_r}\right)^{a_5} \quad (5)$$

که در آن زیرنویس e نشان‌دهنده تراز است که دبی در آن تراز تخمین زده شده و r نشان‌دهنده تراز مرجع یا به عبارتی مقادیر پارامترهای مشخص شده در تراز است که مقدار دبی در آن تراز اندازه‌گیری شده، می‌باشد. اکنون باید توان‌های a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 را تعیین نمود. در معادله پیوستگی، دبی از ضرب سرعت در مساحت مقطع جریان حاصل می‌شود و چون پارامتر U_{SPM} در روش مغربی نقش سرعت را ایفا می‌کند، توان آن برابر واحد در نظر گرفته شده است ($a_4=1$). همچنین، با در نظر گرفتن معادله مانینگ، توان پارامتر زبری برابر منفی یک اتخاذ می‌شود ($a_5=-1$); بنابراین تنها کافی است که توان‌های a_1, a_2, a_3 تعیین شوند. جهت استخراج توان‌ها از فرآیند کمینه‌سازی خطا بین دبی‌های مشاهداتی و تخمین زده شده در کانال‌های ساده و مرکب، استفاده شده است. بدین منظور از روش نیوتن چند متغیره بهره گرفته می‌شود تا مقادیر توان‌های مجهول تابع هدف، متوسط مقدار نرمال شده خطای جذر میانگین مربعات (NRMSE)^۴، محاسبه شود. بهترین رابطه با استفاده از روش نیوتن چند متغیره به صورت زیر بیان می‌شود (Maghrebi و همکاران، ۲۰۱۷):

$$\frac{Q_e}{Q_r} = \left(\frac{A_e}{A_r}\right)^{0.972} \left(\frac{P_e}{P_r}\right)^{-1.268} \left(\frac{P_t}{P_t}\right)^{0.832} \left(\frac{U_{SPM}_e}{U_{SPM}_r}\right)^1 \left(\frac{n_e}{n_r}\right)^{-1} \quad (6)$$

از پارامترهای مؤثر در این رابطه، ضریب زبری است که در تخمین دقیق آن رابطه مشخصی وجود ندارد و وجود عدم قطعیت در تخمین آن اجتناب‌ناپذیر است. در مجاری طبیعی به دلیل ناهمگن بودن ضریب زبری در مقطع عرضی رودخانه، تغییرات زبری معادل با تراز غیرقابل چشم‌پوشی است.

۲-۲- تحلیل عدم قطعیت کلی

عدم قطعیت در سنجش‌ها عمدتاً به دلیل عدم قطعیت در اندازه‌گیری (عدم قطعیت اندازه‌گیری) و عدم قطعیت در تعیین

جریان (مانند معادلات نویر-استوکس^۲) و حل آن‌ها در مقاطع مختلف هندسی با شرایط مرزی پیچیده در فضاهای دو یا حتی سه‌بعدی توسط رایانه‌های پیشرفته، تخمین دبی امکان‌پذیر شده است. یکی از این روش‌ها، روش شیونو-نایت^۳ (Knight و همکاران، ۲۰۱۰) بوده که نرم‌افزار CES بر پایه آن قادر است علاوه بر تخمین منحنی دبی-اشل، اثرات آب برگشتی و عدم قطعیت منحنی دبی-اشل را بررسی کند. جهت به‌کارگیری این روش در تخمین منحنی دبی-اشل در رودخانه‌ها، Abril و Knight (۲۰۰۴) روشی مبتنی بر اجزای محدود را برای حل معادلات حاکم بر جریان ارائه نمودند که تحت عنوان RFMFEM معرفی گردید. در روش سوم که ترکیبی از دو روش فوق است علاوه بر در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مقطع رودخانه، داده‌های مشاهداتی دبی برای کالیبراسیون مدل نیز موردنیاز است. روش پیشنهادی Maghrebi و همکاران (۲۰۱۶) دارای چنین ویژگی می‌باشد. در سال ۲۰۱۶ برای اولین بار روش تخمینی رابطه دبی-اشل در رودخانه‌های طبیعی براساس اندازه‌گیری سرعت تک-نقطه‌ای (SPM) توسط Maghrebi (۲۰۰۶) معرفی شد. در این روش وجود حداقل یک جفت اطلاعات مشاهداتی دبی و تراز به‌عنوان نقطه مرجع برای تعیین رابطه دبی-اشل ضروری است. در ادامه در سال ۲۰۱۷، این روش نیز در کانال‌های مرکب موردبررسی قرار گرفت (Maghrebi و همکاران، ۲۰۱۷).

جهت تخمین منحنی دبی-اشل با کمک روش پیشنهادی Maghrebi و همکاران (۲۰۱۷)، در ابتدا بایستی پارامترهای مؤثر شناسایی شود. در نتیجه، دبی را می‌توان در هر تراز به صورت تابعی از پارامترها در رابطه (۳) تعریف کرد:

$$Q = f(A, P, T, P_t, U_{SPM}, n, S) \quad (3)$$

که در این رابطه Q دبی جریان، A مساحت مقطع جریان، P محیط مرطوب، T عرض سطح آب، P_t مجموع محیط مرطوب با عرض سطح آب ($P_t = P + T$)، U_{SPM} در روش SPM نماینده سرعت متوسط است که این روش برای اولین بار توسط مغربی در سال ۲۰۰۶ ارائه شده است (Maghrebi، ۲۰۰۶)؛ n ضریب زبری معادل و S شیب متوسط زمین می‌باشد. از آنجایی که هدف یافتن یک ارتباط کلی بین دبی در دو تراز مختلف است، بهتر است این رابطه به صورت نسبت بیان شود. از این رو، متغیرهایی که در این نسبت نقش اساسی را ایفا می‌کنند با متغیرهایی که در همه ترازها ثابت باقی می‌مانند و می‌توانند از روند محاسباتی حذف گردند، باید از یکدیگر تمیز داده شوند. به‌علت ثابت بودن شیب بستر در ترازهای مختلف سطح آب، اثر آن قابل صرف‌نظر کردن است. بر این اساس

4. Normalized Root Mean Square Error

2. Navier-Stokes
3. Shiono and Knight

مطالعات Leonard و همکاران (۲۰۰۰) مطابقت دارد. در این مطالعه نیز، ε_1 یک متغیر تصادفی نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار $0.027Q_e$ در نظر گرفته می‌شود (DiBaldassarre و Montanari, ۲۰۰۹).

۲-۲-۲- ارزیابی عدم قطعیت در منحنی دبی - اشل (ε_2)
Tomkins (۲۰۱۲) عدم قطعیت منحنی دبی - اشل در مقادیر دبی را که به‌طور مستقیم از دبی اندازه‌گیری شده و متناظر آن‌ها در منحنی دبی - اشل^۶ محاسبه شده، مورد مطالعه قرار داد. به این ترتیب، انحراف نسبی اندازه‌گیری‌ها از منحنی دبی - اشل مربوطه برای به‌دست آوردن عدم قطعیت بین مقادیر دبی تخمین زده شد:

$$D = [(Q_r - Q_e) / Q_e] \times 100 \quad (9)$$

که در آن، D میزان انحراف بین دبی اندازه‌گیری شده و دبی پیش‌بینی شده از منحنی دبی - اشل برای هر یک از اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد. نتایج می‌تواند به‌صورت جدول (۱) تحلیل شود (Tomkins, ۲۰۱۲):

جدول ۱- طبقه‌بندی معیار D جهت تحلیل نتایج تخمین منحنی

دبی - اشل	
$D = \pm 10\%$	خوب
$D = \pm 11 - 20\%$	قابل قبول
$D = \pm 21 - 50\%$	مشکوک
$D \geq \pm 50\%$	تخمین دست پایین یا دست بالا

D در جدول (۱) نشان‌دهنده قابلیت اطمینان برآزش منحنی‌های دبی - اشل به اندازه‌گیری‌ها است و برای تصمیم‌گیری در مورد این‌که آیا تغییری در رابطه جریان وجود دارد یا خیر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، اگر انحراف $\pm 10\%$ درصد در یک منحنی وجود داشته باشد، می‌توان آن را در محدوده قابل قبول عدم قطعیت اندازه‌گیری که نیاز به تغییر ندارد، در نظر گرفت؛ درحالی‌که انحراف $\pm 50\%$ درصد ممکن است نشان دهد که منحنی دبی - اشل، یا بخش‌هایی از آن، به‌طور قابل توجهی جریان را دست‌بالا و یا دست‌پایین تخمین زده‌اند. تحلیل انحراف در اندازه‌گیری از منحنی دبی - اشل یک روش ساده اما درعین حال قابل اعتماد مبتنی بر تجربه است که می‌تواند اطلاعات قابل توجهی از عدم قطعیت منحنی دبی - اشل و اطمینان از داده‌های جریان را فراهم کند. شایان ذکر است، انحرافات به‌طور گسترده برای ارزیابی برآزش و به‌روزرسانی منحنی‌های دبی - اشل استفاده می‌شوند (Tomkins, ۲۰۱۲).

رابطه دبی و تراز (عدم قطعیت منحنی دبی - اشل) ایجاد می‌شود. Montanari و DiBaldassarre (۲۰۰۹) مشاهده کردند که منابع اصلی خطایی که دبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، خطا در اندازه‌گیری دبی (ε_1) و خطای ناشی از عدم قطعیت منحنی دبی - اشل (ε_2) که توسط خطای درون‌یابی و برونیابی، حضور شرایط جریان غیردائمی و تغییرات فصلی زبری، به‌وجود می‌آید. این نویسندگان فرض کردند که عدم قطعیت کلی را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\varepsilon(Q(x,t)) = \pm \varepsilon_1(Q(x,t)) + \varepsilon_2(Q(x,t)) \quad (7)$$

لازم به‌ذکر است که این روش به اطلاعات موجود بستگی دارد که منجر به چالش آن می‌شود. در کاربردهای عملی، فقدان اطلاعات مرتبط با ε_2 ، ما را به سمت ارزیابی عدم قطعیت منحنی دبی - اشل با استفاده از اختلاف بین دبی اندازه‌گیری شده از دبی پیش‌بینی شده از منحنی دبی - اشل می‌برد. در ادامه به‌نحوه محاسبه ε_1 و ε_2 پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- ارزیابی عدم قطعیت اندازه‌گیری‌های دبی (ε_1)

عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های دبی از روش سرعت-مساحت عمدتاً ناشی از: غیردائمی بودن جریان در زمان اندازه‌گیری، وجود باد، خطا در اندازه‌گیری سرعت به‌وسیله مولینه^۵، خطا در اندازه‌گیری عرض و عمق و خطاهای ساختاری می‌باشد. به‌منظور اندازه‌گیری این عدم قطعیت، استاندارد اروپا ایزو ۷۴۸ (European ISO EN Rule 748, ۱۹۹۷) روشی را برای اندازه‌گیری این خطاها در سطح اطمینان ۹۵٪ ارائه می‌دهد:

$$X_Q = \pm \sqrt{X_A^2 + \frac{1}{m}(X_e^2 + X_c^2 + X_B^2 + X_d^2 + X_p^2)} \quad (8)$$

که X_Q خطای اندازه‌گیری دبی به درصد، X_b عدم قطعیت تأثیرگذار بر اندازه‌گیری عرض مقطع، X_d عدم قطعیت ناشی از اندازه‌گیری تراز سطح آب، X_e عدم قطعیت سرعت جریان مربوط به مدت زمان اندازه‌گیری، X_p عدم قطعیت سرعت جریان در ارتباط با تعداد نقاط اندازه‌گیری در طول هر بخش عمودی، زمانی که حداقل ۵ نقطه اندازه‌گیری شده وجود داشته باشد، X_c عدم قطعیت سرعت جریان مرتبط با کالیبراسیون ابزار اندازه‌گیری و X_A عدم قطعیت در سرعت جریان بسته به تعداد بخش عمودی، است.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه‌گیری دبی رودخانه که جهت کالیبراسیون منحنی دبی - اشل استفاده می‌شود، توسط عدم قطعیت در حدود ۵ درصد در ۹۵ درصد سطح اطمینان تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Montanari و DiBaldassarre, ۲۰۰۹) که با

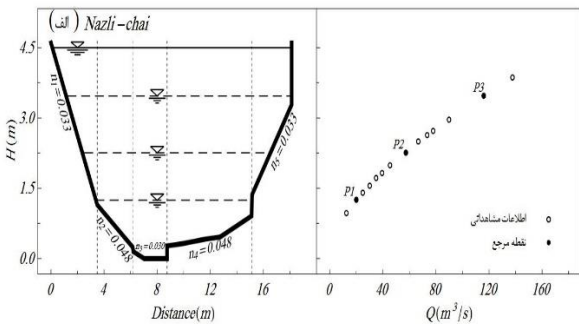
6. Stage-discharge

5. Current meter

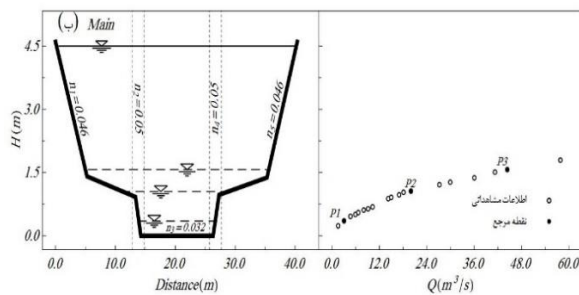
ضریب زبری مانینگ در تخمین رابطه دبی-اشل بحث می‌شود و سپس، تغییرپذیری طبیعی زبری بررسی خواهد شد.

۳-۲- مقاطع مورد مطالعه

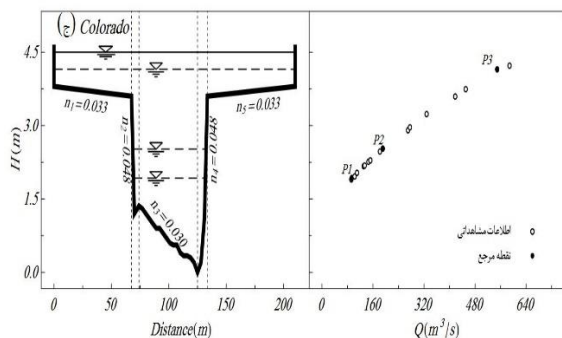
برای ارزیابی نتایج تحلیل عدم قطعیت در رابطه پیشنهادی دبی-اشل، سه رودخانه نازلی چای در ایران، مین در انگلستان و کلرادو واقع در آرژانتین مورد بررسی قرار می‌گیرند. رودخانه نازلی چای از دامنه‌های شرقی کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و پس از پیمودن مسافت زیادی در بستر خود به دشت ارومیه وارد و نهایتاً به حوضه آبریز دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. شکل هندسی مقطع در شکل (۱-الف) قابل مشاهده است. همچنین جهت بررسی بیشتر از دو رودخانه مین و کلرادو استفاده شده است. شکل هندسی مقطع رودخانه مین (شکل (۱-ب)) مرکب بوده و شیب بستر ۰/۰۰۲۹۷ می‌باشد. رودخانه کلرادو (شکل (۱-ج)) یک رودخانه با مقطع سیلاب‌دشت عریض محسوب می‌شود که شیب طولی بستر آن برابر ۰/۰۰۱۳ می‌باشد. توزیع زبری بستر در این مقاطع به صورت ناهمگن است. اطلاعات زبری و داده‌های مشاهداتی برای سه مقطع مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- هندسی مقاطع: (الف) نازلی چای، (ب) مین، (ج) کلرادو (Knight و همکاران، ۲۰۱۰)

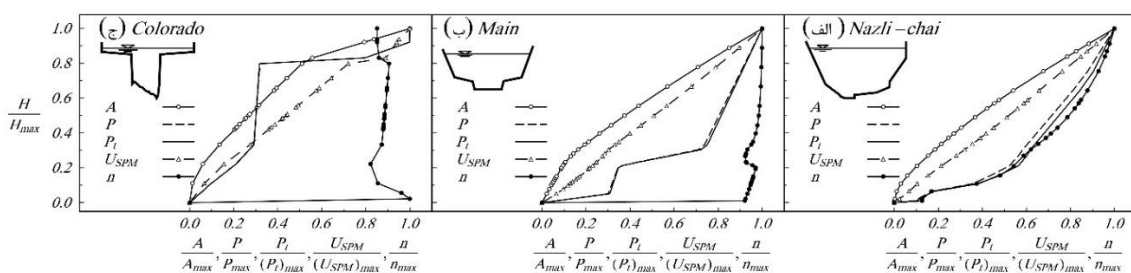
۳- نتایج و بحث

۱-۳- تخمین منحنی دبی-اشل

با توجه به رابطه (۶)، علاوه بر محاسبه زبری، نیاز به محاسبه پارامترهای هندسی و سرعت در رودخانه‌های مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین ابتدا در شکل (۲) تغییرات بدون بعد پارامترهای P_t , P , A و U_{SPM} و n در کلیه ترازها نشان داده شده است. در این شکل‌ها آگاهی از مقادیر حداکثری هر یک از پارامترهای متناظر با تراز حداکثر، لازم است. از این رو در جدول (۲) مقادیر حداکثری پارامترها ارائه شده است. به منظور محاسبه زبری معادل در رابطه (۶)، می‌توان از روابط پیشنهادی توسط Yen (۲۰۰۲)، Chen و Yen (۲۰۰۲) بهره جست. تأثیر زبری در تخمین منحنی دبی-اشل می‌تواند از دو منظر مورد بررسی قرار گیرد که در ابتدا دقت

جدول ۲- مقادیر حداکثر پارامترهای موجود در شکل (۲)

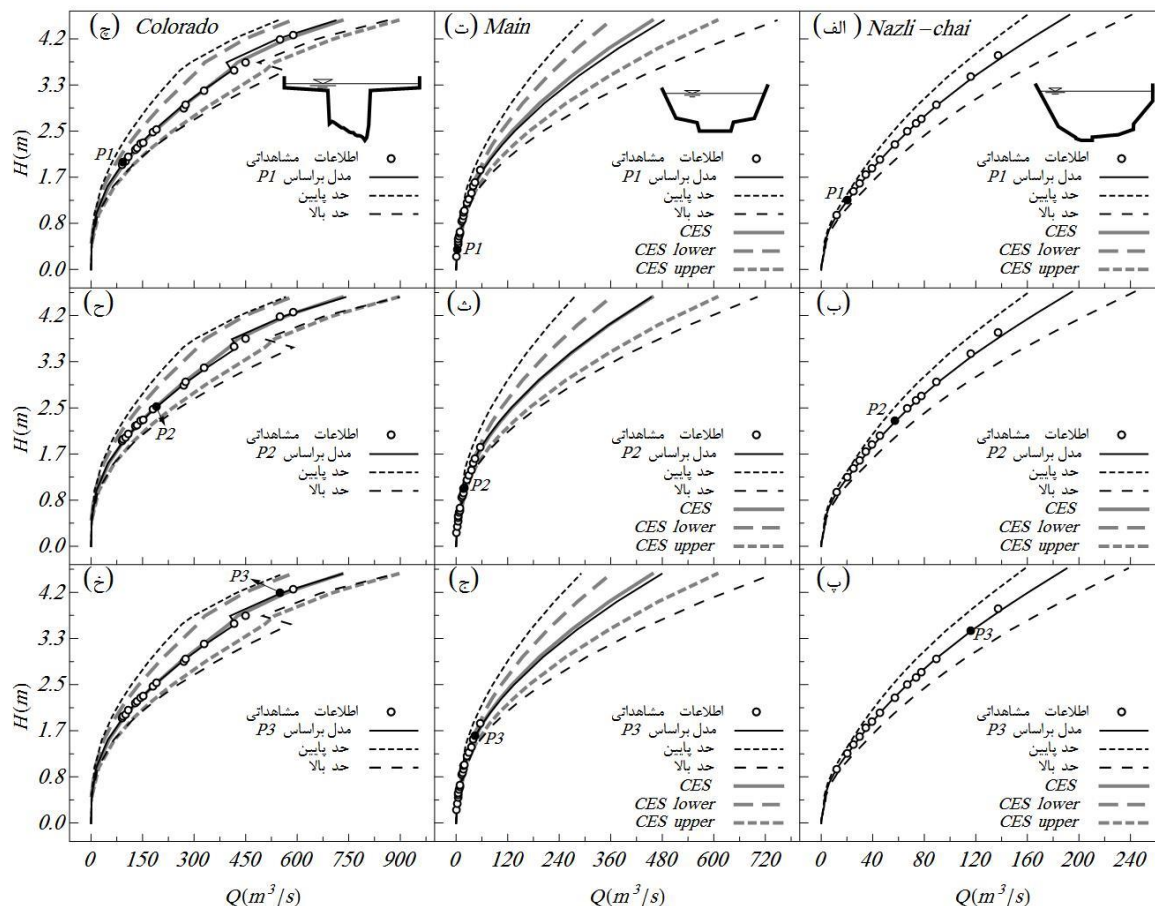
رودخانه	$H_{max}(m)$	$A_{max}(m^2)$	$P_{max}(m)$	$(P_t)_{max}(m)$	$(U_{SPM})_{max}$	n_{max}
نازلی چای	۴/۶	۶۱/۴	۲۲/۴	۴۰/۵	۱۷/۶	۰/۰۳۶
مین	۴/۵	۱۳۲	۴۲/۸	۸۳	۲۲/۷	۰/۰۳۲
کلرادو	۴/۵	۳۵۷/۴	۲۱۳/۵	۴۲۳/۵	۳۰/۱	۰/۰۴



شکل ۲- تغییرات پارامترهای A , P , P_t و U و n در رودخانه‌های: (الف) نازلی چای، (ب) مین، (ج) کلرادو

جدول ۳- اطلاعات ضریب زبری مانینگ در رودخانه‌های مورد مطالعه

رودخانه	بستر			دیواره ساحلی			سیلاب‌دشت		
	زبری واحد	حداقل	حداکثر	زبری واحد	حداقل	حداکثر	زبری واحد	حداقل	حداکثر
نازلی‌چای	۰/۰۳	۰/۰۲۴	۰/۰۳۶	۰/۰۴۸	۰/۰۳۸۴	۰/۰۵۸	۰/۰۳۳	۰/۰۲۶۴	۰/۰۳۹۶
مین	۰/۰۳۲	۰/۰۲۷	۰/۰۲۵	۰/۰۵	۰/۰۴۴	۰/۰۵۵	۰/۰۴۵۶	۰/۰۲۶۲	۰/۰۸۳۸
کلرادو	۰/۰۳	۰/۰۲۴	۰/۰۴۱	۰/۰۴۸	۰/۰۳۱	۰/۰۸۵	۰/۰۳۳	۰/۰۲۹	۰/۰۳۷



شکل ۳- منحنی‌های دبی- اشل تخمینی و عدم قطعیت ناشی از ضریب زبری بر مبنای تراز مرجع P1, P2 و P3 در رودخانه‌های نازلی‌چای: (الف) (ب) (پ) مین، (ت) (ث) (ج) کلرادو، (چ) (ح) (خ) مقایسه با روش CES

منحنی دبی- اشل ناشی از زبری پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است، در رودخانه نازلی‌چای به دلیل نبود اطلاعات حداکثر و حداقل زبری، فرض شده است که تغییرات زبری با $\pm 20\%$ درصد نسبت به مقادیر میانگین متغیر است. همچنین اطلاعات زبری در دو رودخانه مین و کلرادو از مطالعه Knight و همکاران (۲۰۱۰) استخراج شده است. در جدول (۳) زبری واحد (Unit Roughness) از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$n_l = \sqrt{n_{veg}^2 + n_{sur}^2 + n_{irr}^2} \quad (10)$$

۳-۲- تأثیر دقت زبری بر تخمین منحنی دبی- اشل

تغییرپذیری زبری یک فرایند طبیعی است که با تغییرات پوشش گیاهی در فصول مختلف در رودخانه به وجود می‌آید، گرچه، فعالیت‌های انسانی در سیلاب‌دشت رودخانه‌ها این امر را تشدید می‌کند. برای بررسی این موضوع معمولاً ضرایب زبری را به صورت یک بازه تعریف می‌کنند. به همین دلیل اثر تغییرات پوشش گیاهی در شرایط مختلف، در ضرایب زبری متغیر و با تعریف کردن مقادیر حداکثر و حداقل در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش با در اختیار داشتن اطلاعات زبری حداقل و حداکثر رودخانه‌های مورد مطالعه (جدول (۳))، به بررسی عدم قطعیت

اطلاعات از صحت اندازه‌گیری میدانی دبی از فرضیات مطالعه DiBaldassarre و Montanari (۲۰۰۹) برای محاسبه ε_1 استفاده می‌گردد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، مقدار ε_1 یک متغیر تصادفی نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار $0.27Q_e/\alpha$ است که در سطح اطمینان ۹۵ درصد تعریف می‌شود؛ بنابراین، می‌توان فواصل اطمینان مقادیر دبی Q_r را از رابطه (۱۲) به دست آورد (Montanari و DiBaldassarre, ۲۰۰۹):

$$Q_r \pm \left\{ \alpha \times 0.027Q_r + |\varepsilon_2(Q_r)| \right\} = Q_r \pm \varepsilon^*(Q_r) \quad (12)$$

که α با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد برای توزیع نرمال استاندارد، برابر ۱/۹۶ در نظر گرفته می‌شود. همچنین ε^* عرض بین حد بالا و حد پایین در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. در $\varepsilon_2(Q_r)$ چون اطلاعاتی از علامت خطاها در دسترس نیست بدترین وضعیت را در نظر گرفته و فرض می‌شود که علامت خطاها موافق یکدیگر است. در مورد خطای ناشی از تغییرات ضریب زبری، مقداری که بیشترین خطا را بر تخمین دبی اعمال می‌کند، در محاسبات لحاظ می‌شود.

در شکل (۴) مقادیر ε^* که به صورت درصدی از دبی مشاهداتی تعریف می‌شود، برای تمامی نقاط مرجع مشاهداتی در سه رودخانه، ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در رودخانه نازلی‌چای (شکل (۴-الف)) حداکثر مقدار ε^* تقریباً به ۳۰ درصد می‌رسد که به دلیل تخمین منحنی دبی-اشل بر مبنای تراز مرجع P_2 است. همچنین، دامنه تغییرات ε^* در سه تراز انتخابی مختلف، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد است. در رودخانه مین (شکل (۴-ب)) زمانی که منحنی دبی-اشل بر مبنای تراز مرجع P_2 ترسیم شده، حداکثر مقدار ε^* به ۶۰ درصد می‌رسد. در رودخانه کلرادو نیز (شکل (۴-ج)) حداکثر خطا براساس ترازهای مرجع مختلف در مرز بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت اتفاق می‌افتد که حدود ۵۰ درصد است. جهت مقایسه سه رودخانه مورد مطالعه، در جدول (۴) مقادیر متوسط ε^* بر مبنای ترازهای مشاهداتی P_1 ، P_2 و P_3 بیان شده است. که در رودخانه نازلی‌چای اختلاف اندکی بین ترازهای مرجع مختلف مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است، در رودخانه مین بیش‌ترین خطا و در رودخانه کلرادو کم-ترین خطا بر مبنای تراز مرجع P_2 اتفاق افتاده است.

در ادامه، براساس رابطه (۱۲) و مقادیر ε^* در شکل (۴)، حد بالا Q_{95}^+ و حد پایین Q_{95}^- در بازه اطمینان ۹۵ درصد برای دبی مشاهداتی با کمک رابطه دبی-اشل بر مبنای تراز مرجع P_2 و روش CES برای سه رودخانه مورد مطالعه محاسبه شده که در شکل (۵) نمایش داده می‌شود.

که در این رابطه n_i زبری واحد، n_{veg} زبری ناشی از پوشش گیاهی، n_{sur} زبری ناشی از سطح مصالح مانند شن و ماسه و n_{irr} ناشی از ریشه درختان و آشغال‌های شهری می‌باشد. برای تخمین منحنی، نیاز به اطلاعات مشاهداتی در زبری‌های حداقل و حداکثر وجود دارد. به همین دلیل با استفاده از اطلاعات مشاهداتی جریان Q_r متناظر با مقدار ضریب زبری معادل مرجع n_r و معادله مانینگ، می‌توان دبی مرجع را در ضرایب زبری معادل متفاوت Q'_r تخمین زد که در رابطه (۱۱) قابل مشاهده است:

$$Q'_r = Q_r \left(\frac{n_r}{n} \right) \quad (11)$$

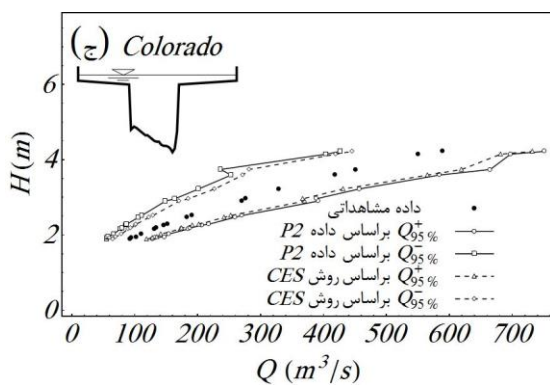
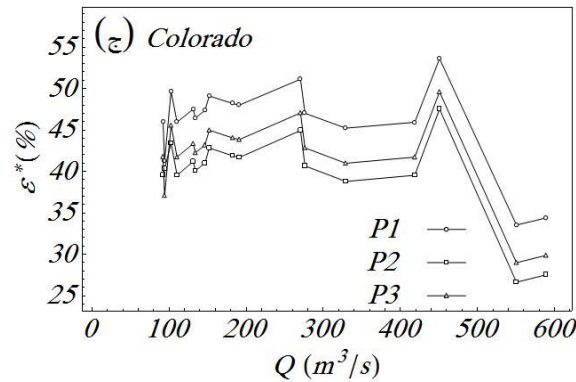
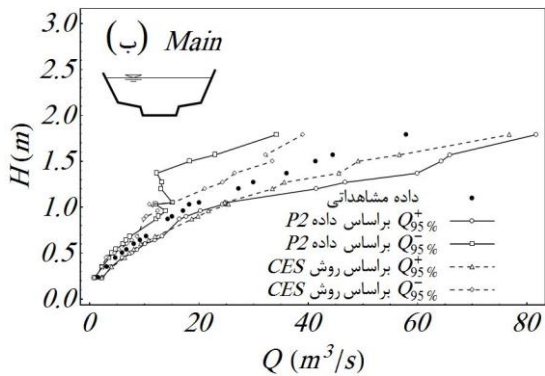
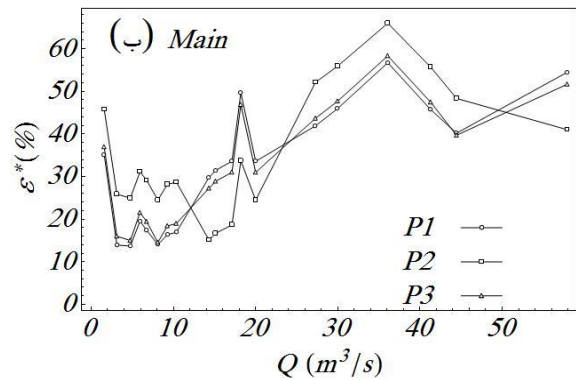
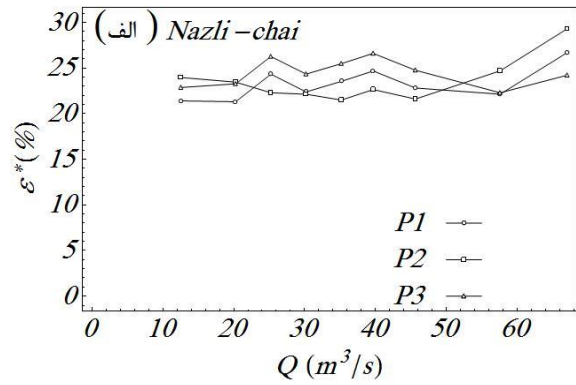
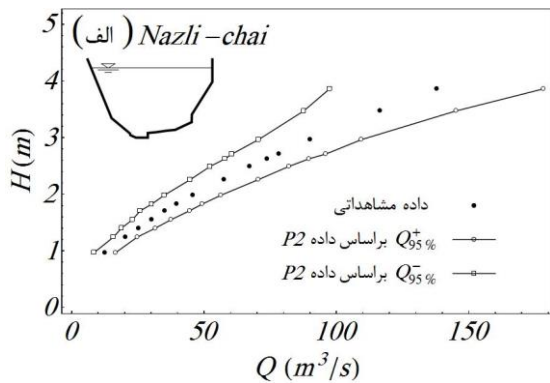
با محاسبه پارامترهای موجود در رابطه مغربی و داده‌های مشاهداتی به‌عنوان نقاط مرجع می‌توان به تخمین منحنی دبی-اشل پرداخت.

با توجه به اطلاعات جدول (۳)، منحنی دبی-اشل به‌روش مغربی برای سه رودخانه در شکل (۳) ترسیم می‌شود. در این شکل علاوه بر منحنی دبی-اشل تخمینی به‌روش پیشنهادی بر مبنای داده‌های مشاهداتی P_1 ، P_2 و P_3 ، حدود عدم قطعیت حداکثر و حداقل ناشی از عدم قطعیت زبری ترسیم می‌شود. لازم به ذکر است، P_1 تراز اول مربوط به اطلاعات برداشت‌شده دبی مشاهداتی در عمق‌های پایین (نزدیک بستر)، P_2 تراز دوم نماینده دبی‌های برداشت‌شده در عمق‌های میانی منحنی دبی-اشل و نهایتاً P_3 تراز سوم متناظر با اطلاعات دبی در تراز نزدیک به حداکثر تراز ممکن هیدرومتری شده، است. علاوه بر آن، نتایج روش CES ناشی از سه مقدار زبری حداقل، حداکثر و زبری واحد نشان داده شده است. شایان ذکر است که به دلیل نبود اطلاعات شیب بستر در رودخانه نازلی‌چای از به‌کار بستن روش CES در این رودخانه صرف‌نظر شده است. همان‌طور که در شکل (۳-ث) و (۳-ح) مشاهده می‌شود، با انتخاب تراز میانی به‌عنوان داده مرجع در روش پیشنهادی، نتایج دو روش با یکدیگر مطابقت بیشتری دارد. همچنین، در بیشتر موارد عدم قطعیت روش مغربی به نسبت روش CES بیشتر می‌باشد. در رودخانه نازلی‌چای (شکل (۳-الف) تا (۳-پ)) تفاوت چشمگیری در نتایج بر مبنای ترازهای مرجع مختلف مشاهده نمی‌شود که می‌تواند به دلیل عریض نبودن مقطع عرضی رودخانه در مقایسه با دو رودخانه دیگر باشد.

۳-۳- عدم قطعیت کلی

به‌منظور محاسبه عدم قطعیت کلی که در این مطالعه شامل عدم قطعیت برون‌یابی، تغییرپذیری زبری و خطای اندازه‌گیری مستقیم دبی است، از رابطه (۷) استفاده می‌شود. در این رابطه عدم قطعیت کلی شامل عدم قطعیت در اندازه‌گیری دبی (ε_1) و عدم قطعیت در منحنی دبی-اشل (ε_2) است. به دلیل نبود

در شکل (۵)، بازه بین حد بالا و پایین دبی در روش مغربی بیشتر از روش CES است که نشان دهنده عدم قطعیت کلی بیشتر این روش به نسبت CES می‌باشد. همچنین افزایش عدم قطعیت در ترازهای بالاتر در سه رودخانه مشهود است. در ادامه، با استفاده از روش پیشنهادی Tomkins (۲۰۱۲) عدم قطعیت منحنی دبی-اشل (ε₂) بررسی شده و نتایج آن با کمک رابطه (۹) و جدول (۱) تحلیل می‌شود.



شکل ۴- مقادیر ε* در رابطه (۴-۵) که به صورت درصدی از دبی مشاهداتی تعریف شده، براساس نقاط مرجع P1، P2 و P3 در مقاطع: الف) نازلی چای، ب) مین، ج) کلرادو

جدول ۴- مقادیر متوسط ε* بر مبنای ترازهای مشاهداتی P1، P2 و P3 در سه رودخانه مطالعه شده

تراز انتخابی	رودخانه		
	کلرادو	مین	نازلی چای
P1	۴۵/۹	۳۲/۱	۲۳/۸۶
P2	۳۹/۸	۳۵	۲۴/۴
P3	۴۱/۷	۳۲/۳	۲۴/۷

شکل ۵- دبی مشاهداتی به همراه حد بالا و حد پایین Q_{95%}⁺ و حد پایین Q_{95%}⁻ در بازه اطمینان ۹۵ درصدی دبی مشاهداتی با کمک رابطه دبی-اشل بر مبنای تراز مرجع P2 و مقایسه با روش CES در مقاطع: الف) نازلی چای، ب) مین، ج) کلرادو

مشاهداتی مختلف در سه رودخانه مورد مطالعه، خوب و قابل قبول طبقه‌بندی شده که نشان‌دهنده کیفیت مطلوب سنجش‌ها در این حالت است. در جدول (۶) تأثیر عدم قطعیت در زبری، در بدترین حالت، بر روی کیفیت سنجش قابل مشاهده است که در رودخانه نازلی چای باعث شده است که کیفیت سنجش از حالت خوب به حالت مشکوک تغییر یابد.

برای طبقه‌بندی نتایج به یکی از حالت‌های خوب، قابل قبول، مشکوک و تخمین دست‌پایین یا دست‌بالا (ضعیف)، در ابتدا فرض را بر عدم قطعیت در تعیین پارامتر زبری قرار داده (جدول (۵)) و سپس در گام بعد تأثیر غیرقطعی بودن پارامتر زبری (در اینجا نیز بدترین حالت در نظر گرفته می‌شود) در تخمین منحنی دبی-اشل لحاظ می‌شود (جدول (۶)). همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، کیفیت تخمین منحنی دبی-اشل بر مبنای داده‌های

جدول ۵- طبقه‌بندی نتایج منحنی دبی-اشل براساس داده‌های P1، P2 و P3 بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت زبری

طبقه‌بندی	درصد انحراف	P1			P2			P3		
		نازلی چای	مین	کلرادو	نازلی چای	مین	کلرادو	نازلی چای	مین	کلرادو
خوب	۰-۱۰	۱۰۰	۸۴/۲	۱۰۰	۱۰۰	۷۳/۷	۱۰۰	۸۴/۲	۹۴/۱	۱۰۰
قابل قبول	۱۱-۲۰	۰	۱۵/۸	۰	۰	۲۶/۳	۰	۱۵/۸	۵/۹	۰
مشکوک	۲۱-۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ضعیف	>۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۶- طبقه‌بندی نتایج منحنی دبی-اشل براساس داده‌های P1، P2 و P3 با در نظر گرفتن تغییرات زبری

طبقه‌بندی	درصد انحراف	P1			P2			P3		
		نازلی چای	مین	کلرادو	نازلی چای	مین	کلرادو	نازلی چای	مین	کلرادو
خوب	۰-۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
قابل قبول	۱۱-۲۰	۰	۳۶/۸	۰	۰	۵۲/۶	۰	۴۲/۱	۰	۰
مشکوک	۲۱-۵۰	۱۰۰	۴۲/۱	۱۱/۸	۱۰۰	۱۵/۸	۱۷/۶	۳۶/۸	۱۱/۸	۱۰۰
ضعیف	>۵۰	۰	۲۱/۱	۸۸/۲	۰	۳۱/۶	۸۲/۴	۲۱/۱	۸۸/۲	۰

۴- نتیجه‌گیری

یکی از مشکلات اصلی شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی ناتوانی در شناخت و کمی کردن متغیرهای حاکم بر فرآیندهای مربوط می‌باشد. شبیه‌سازی یک فرآیند به دلیل عواملی مانند خطاهای اندازه‌گیری، ماهیت تصادفی پارامترها و خطاهای تخمین داده‌ها همواره با نوعی عدم قطعیت همراه است. لذا کاربرد مدل‌ها مستلزم داشتن اطلاعاتی درباره عدم قطعیت خروجی آن‌ها است تا تصمیم‌گیران با اطمینان بیشتری به کاربرد آن‌ها دست یابند و در این راستا تحلیل عدم قطعیت مربوط به این پدیده می‌تواند راه‌گشا بوده و درک درستی از اهمیت عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها را ایجاد کند. اساس روش تخمین منحنی‌های دبی-اشل در این پژوهش مبتنی بر مفهوم کنتورهای بی‌بعد مقطع در روش اندازه‌گیری تک‌نقطه‌ای سرعت (SPM) است که این روش اولین

بار توسط مغربی (۲۰۰۶) معرفی شد. نتایج در این پژوهش نشان داد که:

- تأثیر عوامل عدم قطعیت (تغییرات ضریب زبری، برونمایی و خطای اندازه‌گیری مستقیم) بر تخمین منحنی دبی-اشل پیشنهادی قابل توجه است که می‌تواند به‌طور متوسط بر مبنای سه تراز مشاهداتی مرجع انتخابی، عدم قطعیت در حدود ۲۴/۳ درصد در تخمین دبی در رودخانه نازلی چای به‌وجود آورد. این مقدار در رودخانه مین و کلرادو به ترتیب به حدود ۳۳/۱ و ۴۲/۵ درصد می‌رسد.
- در بیشتر موارد بازه عدم قطعیت کلی (فاصله بین حد بالا و پایین) در روش مغربی به نسبت روش CES بیشتر است.
- کیفیت تخمین منحنی دبی-اشل بر مبنای داده‌های مشاهداتی مختلف در سه رودخانه مورد مطالعه، خوب و قابل قبول

- Di Baldassarre G, Montanari A, "Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis", *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13, 913-921.
- Chen Y, Yen BC, "Resistance coefficient for compound channels", *Hydraulic Information Management*, 2002, 52 (May), 153-1161.
- Coxon G, Freer J, Westerberg IK, Wagener T, Woods R, Smith PJ, "A novel framework for discharge uncertainty quantification applied to 500 UK gauging stations", *Water Resources Research*, 2015, 51 (7), 5531-5546.
- Dymond JR, Christian R, "Accuracy of discharge determined from a rating curve", *Hydrological Sciences Journal*, 1982, 27 (4), 493-504.
- European ISO EN Rule 748 "Measurement of Liquid Flow in Open Channels- Velocity- area Methods", Reference Number ISO748: 1997 (E), International Standard' 1997.
- Guerrero JL, Westerberg IK, Halldin S, Xu CY, Lundin LC, "Temporal variability in stage-discharge relationships", *Journal of Hydrology*, 2012, 446-447, 90-102.
- Herschey RW, "Streamflow Measurement", Taylor & Francis. CRC Press, 2009.
- Knight DW, Hazlewood C, Lamb R, Samuels PG, Shiono K, "Practical channel hydraulics: Roughness", *Conveyance and Afflux*. CRC Press, 2010.
- Joel L, Mietton M, Najib H, Philippe G, "Rating curve modelling with Manning's equation to manage instability and improve extrapolation", *Hydrological Sciences Journal*, 2000, 45 (5), 739-750.
- Maghrebi MF, "Application of the single point measurement in discharge estimation", *Advances in Water Resources*, 2006, 29 (10), 1504-1514.
- Maghrebi MF, Ahmadi A, Attari M, Maghrebi RF, "New method for estimation of stage-discharge curves in natural rivers", *Flow Measurement and Instrumentation*, Elsevier, 2016, 52, 67-76.
- Maghrebi MF, Kavouszadeh A, Maghrebi RF, Ahmadi A, "Stage-discharge estimation in straight compound channels using isovel contours", *Hydrological Processes*, 2017, 31 (22), 3859-3870.
- McMillan H, Freer J, Pappenberger F, Krueger T, Clark M, "Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions", *Hydrological Processes*, 2010, 24 (10), 1270-1284. McMillan HK, Westerberg IK, "Rating curve estimation under epistemic uncertainty", *Hydrological Processes*, 2015, 29 (7), 1873-1882.
- Pappenberger F, Matgen P, Beven KJ, Henry JB, Pfister L, "Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions", *Advances in Water Resources*, 2006, 29 (10), 1430-1449.
- Petersen-Øverleir A, "Accounting for heteroscedasticity in rating curve estimates", *Journal of Hydrology*, 2004, 292 (1-4), 173-181.

طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که عدم قطعیت در زبری تأثیر چشمگیری بر کیفیت تخمین منحنی دبی- اشل خواهد گذاشت. جهت بررسی جامع‌تر این موضوع می‌توان دیگر عوامل عدم قطعیت بسته به شرایط هیدرولیکی و هندسی مقطع رودخانه مورد بررسی قرار بگیرد.

۵- علائم

A	مساحت مقطع، m^2
a_1, a_2, a_3	پارامترهای کالیبراسیون منحنی دبی- اشل
D	درجه سازگاری بین دبی اندازه‌گیری شده و دبی پیش‌بینی شده از منحنی دبی- اشل
H	عمق آب، m
n	ضریب زبری معادل
n_l	زبری واحد
n_{veg}	زبری ناشی از پوشش گیاهی
n_{sur}	زبری ناشی از سطح مصالح مانند شن و ماسه
n_{irr}	زبری ناشی از ریشه درختان و آشغال‌های شهری
P	محیط مرطوب، m
P_t	مجموع محیط مرطوب با عرض سطح آب $(P_t = P + T)$
Q_e	دبی تخمینی، m^3/s
Q_r	دبی مشاهداتی، m^3/s
Q'_r	دبی مرجع در ضرایب زبری معادل متفاوت، m^3/s
S	شیب متوسط زمین
U_{SPM}	سرعت متوسط در روش مغربی، m^2/s
X_A	عدم قطعیت در سرعت جریان بسته به تعداد بخش عمودی
X_B	عدم قطعیت تأثیرگذار بر اندازه‌گیری عرض مقطع
X_C	عدم قطعیت سرعت جریان مرتبط با کالیبراسیون ابزار اندازه‌گیری
X_D	عدم قطعیت ناشی از اندازه‌گیری تراز سطح آب
X_E	عدم قطعیت سرعت جریان مربوط به مدت زمان اندازه‌گیری
X_P	عدم قطعیت سرعت جریان مرتبط با تعداد نقاط اندازه‌گیری در طول هر بخش قائم
X_Q	خطای اندازه‌گیری دبی به درصد
ε_1	عدم قطعیت اندازه‌گیری‌های دبی
ε_2	عدم قطعیت دبی در منحنی دبی- اشل
ε^*	عرض بین حد بالا و حد پایین در سطح اطمینان ۹۵ درصد

۶- مراجع

- بهمنش ج، مصطفوی س، زمان‌زاد قویدل س، "استفاده از محاسبات نرم در پیش‌بینی و برآورد دبی جریان و بررسی جریان زیست‌محیطی (مطالعه موردی: رودخانه خرخره‌چای)"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶، ۴۷ (۳)، ۲۲-۹.
- Abril JB, Knight DW, "Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model", *Journal of Hydraulic Research*, 2004, 42 (6), 616-629.

doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.024.

Tomkins KM, "Uncertainty in streamflow rating curves: methods, controls and consequences", *Hydrological Processes*, 2012, 28 (3), 464-481.

Venetis C, "A Note On The Estimation Of The Parameters In Logarithmic Stage-Discharge Relationships With Estimates Of Their Error", *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 1970, 15 (2), 105-111.

Westerberg I, Guerrero JL, Seibert J, Beven KJ, Halldin S, "Stage-discharge uncertainty derived with a non-stationary rating curve in the Choluteca River, Honduras", *Hydrological Processes*, 2011, 25 (4), 603-613.

Yen BC, "Open Channel Flow Resistance", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128 (1), 20-39.

EXTENDED ABSTRACT

Uncertainty Analysis of Stage-Discharge Rating Curves In Rivers

Sajjad Mohammadzadeh Vatanchi, Mahmoud F. Maghrebi *

Faculty of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, 91775-1111, Iran

Received: 02 August 2019; Accepted: 13 September 2020

Keywords:

River, Stage- discharge rating curve, Uncertainty, Isovel contours, Manning’s roughness coefficient.

1. Introduction

The primary purpose of this paper is to analyze the uncertainty by assessing gauging deviations of the stage-discharge rating curve in rivers. In this research, the basis of the estimation of the rating curve is the concept of isovel contours in the Single Point Measurement method (SPM). Observed data in the Nazli-chai River in Iran, Main River in England and Colorado River in Argentina are used to investigate the global uncertainty in the rating curve estimation. The results can be used to improve flood control and water resource management.

2. Methodology

2.1. The proposed stage-discharge relationship

Maghrebi et al. (2017) assumed that the discharge at any stage of a channel could be stated as a function of the following parameters:

$$Q = f (A, P, T, P_t, U_{SPM}, n, S_0) \tag{1}$$

Where Q is the discharge, A is the cross-section area, P is the wetted perimeter of the flow section, P_t is the sum of P and the width of the water surface ($P_t = P + T$), U_{SPM} is the cross-sectional mean flow velocity in the stream-wise direction, n is the Manning roughness and S_0 is a longitudinal bed slope. According to Eq. 1, a general form of the stage-discharge relationship is as follows:

$$\frac{Q_e}{Q_r} = \left(\frac{A_e}{A_r} \right)^{a_1} \left(\frac{P_e}{P_r} \right)^{a_2} \left(\frac{(P_t)_e}{(P_t)_r} \right)^{a_3} \left(\frac{(U_{SPM})_e}{(U_{SPM})_r} \right)^{a_4} \left(\frac{n_e}{n_r} \right)^{a_5} \left(\frac{(S_0)_e}{(S_0)_r} \right)^{a_6} \tag{2}$$

Where the subscripts r and e refer to the referenced and estimated values, respectively. The value of a_6 is set to zero because the effect of the bed slope of the channel, which stays fixed at all water levels, can be ignored in the computational processing. Maghrebi et al. (2017) have presented the most reliable relationship, which is associated with the least values of NRMSE. They have suggested their last relationship as follows:

$$Q_e = Q_r \left(\frac{A_e}{A_r} \right)^{0.972} \left(\frac{P_e}{P_r} \right)^{-1.27} \left(\frac{(P_t)_e}{(P_t)_r} \right)^{0.83} \left(\frac{(U_{SPM})_e}{(U_{SPM})_r} \right) \left(\frac{n_e}{n_r} \right)^{-1} \tag{3}$$

In order to estimate the discharge by the Eq. 3, all of the effective parameters are needed to be calculated at all water levels in the range of the required rating curve.

* Corresponding Author

E-mail addresses: sajjadm72@gmail.com (Sajjad Mohammadzadeh Vatanchi), magrebi@yahoo.com (Mahmoud F. Maghrebi).

2.2. The global uncertainty analysis method

Di Baldassarre and Montanari (2009) observed that the main sources of error affecting the rating curve are the error in discharge measurement (ε_1) and the error caused by the uncertainty of the rating curves (ε_2). The authors assumed that global uncertainty could be obtained as follows:

$$\varepsilon(Q(x,t)) = \pm\varepsilon_1(Q(x,t)) + \varepsilon_2(Q(x,t)) \quad (4)$$

In this study, ε_1 is considered as a normal random variable that mean value is zero, and the standard deviation is $0.027Q_r$. Therefore, it is possible to obtain the confidence interval of the observed data (Q_r) values from Eq. 5:

$$Q_r \pm \left\{ \alpha \times 0.027Q_r + |\varepsilon_2(Q_r)| \right\} = Q_r \pm \varepsilon^*(Q_r) \quad (5)$$

Where α in a 95% confidence level for the standard normal distribution is set 1.96 and ε^* is the width between the upper limit and the lower limit in the 95% confidence level.

Tomkins (2012) investigated the uncertainty of the rating curve $\varepsilon_2(Q_r)$ by considering the deviation of observed data and estimated discharge derived by the rating curve. Therefore, the relative deviations of measurements from the corresponding rating curve estimations are calculated to obtain the quality of rating curves:

$$D = [(Q_r - Q_e) / Q_e] \times 100 \quad (6)$$

Where D is the fitting degree between the measured discharge and the predicted discharge from the rating curve for each of the measurements. D values can be analyzed as Table 1:

Table 1. Classification of D for the analysis of the results of the estimate of the rating curve.

Good	$D = \pm 10\%$
Acceptable	$D = \pm 11 - 20\%$
Suspect	$D = \pm 21 - 50\%$
Poor	$D \geq \pm 50\%$

3. Results and discussion

3.1. The effect of roughness on the rating curve

In order to determine the effect of roughness on the rating curve, roughness coefficients are usually defined as an interval. For this reason, the effect of vegetation changes in different conditions is considered in variable roughness coefficients and with the definition of maximum and minimum values. In Fig. 1, in addition to the estimated rating curve by the proposed method, based on observed data P1, P2 and P3, the limits of maximum and minimum uncertainty due to roughness uncertainty are plotted. As can be seen in Figs. 1e and 1h, the results of the two methods are more consistent by the selection of the P2 as a reference level in the proposed method. Also, in most cases, the uncertainty of the proposed method is higher than the CES method. Moreover, there is no significant difference in the results based on different reference levels in the Nazli-chai River (Figs. 1a-1c), which may be due to the less broad cross-section of the river compared to the other two rivers.

3.2. Global uncertainty

In the following, Eq. 5 is used to calculate the global uncertainty. As can be seen, in the Nazli-chai River, the maximum ε^* values reach approximately 30%, which is based on the P2 reference level for estimation of the rating curve. For comparison of the studied rivers, Table 2 presents the average values of ε^* based on the P1, P2 and P3. The mean global uncertainty of the proposed rating curve based on three reference observation data in Nazli-chai, Main and Colorado Rivers are estimated to be 24.3, 33.1 and 42.5%, respectively. Also, by using Tomkins's proposed method (Eq. 6), the quality of the rating curve estimation is classified as "good" and "acceptable", which indicates the favorable quality of the estimations when roughness uncertainty is not considered. However, the quality of the estimates is reduced when the roughness uncertainty is considered.

4. Conclusions

The stage-discharge relationship is one of the essential inputs in hydraulic and hydrological models that can be used for flood control and water resource management. The geometric and hydraulic information of the river cross-sections are required to obtain the rating curve relationship. In addition to the roughness parameter, various factors such as the extrapolation of the rating curve and the direct measurement error of the discharge can be effective in estimating the results. In this research, the basis of the estimation of the rating curves is the concept of isovel contours SPM method. Observed data in the Nazli-chai River in Iran, Main River in England and Colorado River in Argentina are used to investigate the global uncertainty in the rating curve estimation.

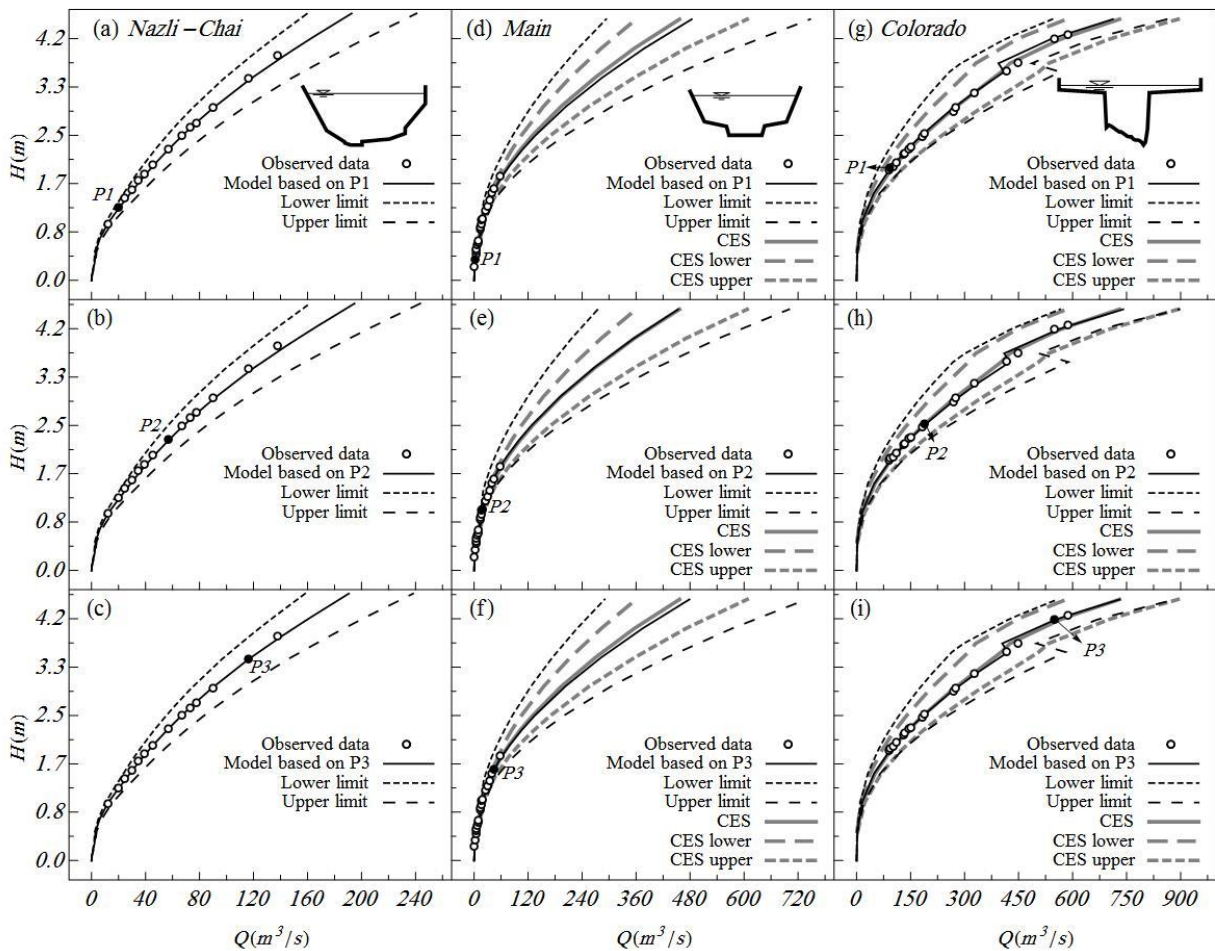


Fig. 1. Estimated rating curves and uncertainty analysis of roughness variation based on different reference point P1, P2 and P3 in the (a-c) Nazli-chai, (d-f) Main and (g-i) Colorado Rivers and Comparison with CES Method.

Table 2. Average values of ϵ^* based on different reference levels (P1, P2 and P3) in the three studied Rivers.

Reference level	The average values of ϵ^*		
	Nazli-chai	Main	Colorado
P1	23.86	32.1	45.9
P2	24.4	35	39.8
P3	24.7	32.3	41.7

The results show that if the higher accuracy for the estimation of the roughness coefficient as the input parameter is considered, the uncertainty in the discharge estimation will be reduced and the quality of the measurements will increase. Also, the mean global uncertainty of the proposed stage-discharge relationship based on three reference observation data (P1, P2 and P3) in Nazli-chai, Main and Colorado Rivers are calculated to be 24.3, 33.1 and 42.5%, respectively.

5. References

- Di Baldassarre G, Montanari A, "Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis", *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13, 913-921.
- Maghrebi MF, Kavousizadeh A, Maghrebi RF, Ahmadi A, "Stage-discharge estimation in straight compound channels using isovel contours", *Hydrological Processes*, 2017, 31 (22), 3859-3870.
- Tomkins KM, "Uncertainty in streamflow rating curves: methods, controls and consequences", *Hydrological Processes*, 2012, 28 (3), 464-481.