دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیستم، شماره پنجم، ۱۳۹۲
http://jwsc.gau.ac.ir

تعیین توزیع سرعت در عرض مقاطع مرکب با استفاده از جستجوی ژنتیکی

***عبدالرضا ظهیری**
استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۱۱

چکیده

رودخانه‌های آبرفتی معمولاً عرض وسیعی داشته و به همین دلیل توزیع سرعت در عرض رودخانه دارای تغییرات زیادی است. محاسبه این تغییرات در محاسبات تعیین دبی جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی، انتقال رسوب در مجرای اصلی، انتقال و پخش مواد آلاینده، محاسبه تنش برشی و تعیین نقاط فرسایشی و رسوب‌گذار در عرض رودخانه کاربرد زیادی دارد. تاکنون برای محاسبه توزیع عرضی سرعت در رودخانه‌های سیلابی از اندازه‌گیری مستقیم سرعت نقطه‌ای به کمک مولینه و یا مدل‌های ریاضی شبه‌دوبعدی استفاده شده است. اندازه‌گیری میدانی سرعت در عرض رودخانه، پرهزینه و زمان‌بر بوده و در شرایط سیلاب بسیار سخت است. از طرف دیگر، تئوری مدل‌های ریاضی به‌نسبت پیچیده بوده و ممکن است برای استفاده کاربردی مهندسین هیدرولیک دارای مشکلاتی باشند. در این پژوهش با استفاده از جستجوی ژنتیکی، رابطه ساده و بدون‌بعدی برای محاسبه سرعت جریان در عرض رودخانه استخراج شده است. از متغیرهای بدون بعد عمق نسبی جریان و کوهیرنس مقطع به‌عنوان پارامترهای ورودی اصلی استفاده شده است. برای انجام این کار، داده‌های توزیع سرعت در عرض مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای در دو گروه واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفتند. با مقایسه آماری نتایج محاسباتی، ضریب تعیین (R^2) و ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE) برای داده‌های واسنجی به‌ترتیب حدود ۰/۹۳ و ۰/۰۶۳ و برای مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب حدود ۰/۹۱ و ۰/۱۲۷ به‌دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: پروفیل عرضی سرعت، پارامتر کوهیرنس، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، مقاطع مرکب

---

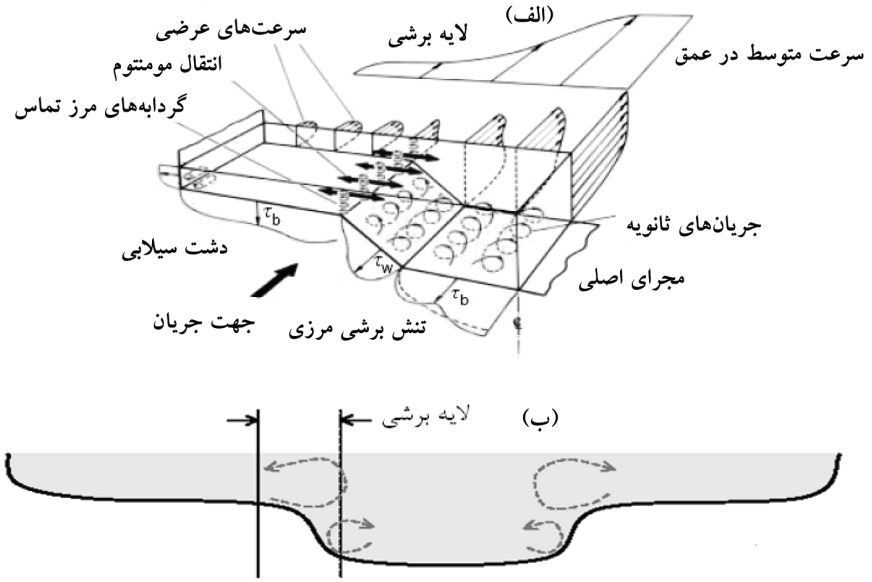
* مسئول مکاتبه: zahiri@gau.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها، رابطه دبی- اشل است. این رابطه، ۲ پارامتر مهم جریان یعنی دبی و عمق جریان رودخانه را به یکدیگر ارتباط می‌دهد. برای استخراج این رابطه، اندازه‌گیری هم‌زمان پروفیل سرعت جریان در عرض و برداشت مقطع عرضی رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری به دفعات زیاد مورد نیاز است. زمان و هزینه انجام این عملیات میدانی (به‌ویژه برای رودخانه‌های مناطق صعب‌العبور و نیز رودخانه‌های آبرفتی دارای دشت‌های سیلابی عریض) قابل ملاحظه بوده و در صورت وقوع سیل و طغیان رودخانه بسیار خطرناک است. با توجه با این‌که این فرایند ۱ یا ۲ بار در ماه تکرار می‌شود نیز با توجه به صرف هزینه و زمان قابل‌توجه و خطرات احتمالی، لازم است راه‌کارهای جدید و نوینی برای استخراج رابطه دبی- اشل در رودخانه‌ها ارایه شوند. اخیراً استفاده از تجهیزات مدرن و پیشرفته مانند سرعت‌سنج‌های الکترونیکی و نیز استفاده از مدل‌های ریاضی با دقت مناسب کاربرد زیادی داشته است.

هر کدام از راه‌کارهای جدید بالا از نقاط قوت و ضعف خاصی برخوردار است. مثلاً استفاده از تجهیزات و دستگاه‌های اندازه‌گیری مدرن علاوه‌بر صرف هزینه فراوان، نیاز به کاربران ماهر و مسلط دارد به‌طوری‌که اندازه‌گیری‌ها با حداقل خطا انجام شود. کاربرد مدل‌های ریاضی نیز اگرچه تقریباً بدون هزینه است، اما به کاربران با تخصص بالا نیاز دارد و احتمالاً پرسنل بهره‌بردار در این زمینه با محدودیت مواجه خواهند شد.

در شرایط وقوع سیل و ورود جریان به دشت‌های سیلابی، رودخانه به شکل یک مقطع مرکب ظاهر می‌شود. از نظر هیدرولیکی، این‌گونه مقاطع تفاوت‌های بسیار زیادی با مقاطع ساده رودخانه‌ها در حالت جریان عادی (دبی پایه) دارند. در مقاطع ساده، محاسبه دبی جریان با استفاده از روابط مقاومت جریان (مثلاً فرمول مانینگ یا شزی) به سادگی و با دقت خوبی امکان‌پذیر است، اما در مقاطع مرکب به‌دلیل اختلاف مقادیر سرعت‌های جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی (گرادیان عرضی سرعت)، تنش برشی به‌نسبت شدیدی در مرز تماس مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی ایجاد شده و سرعت متوسط جریان را کاهش می‌دهد. این کاهش سرعت باعث کاهش دبی جریان و ظرفیت حمل رسوب معلق شده و تأثیر زیادی بر هیدرولیک جریان و رسوب می‌گذارد. در شکل ۱- الف مکانیسم هیدرولیک جریان در یک مقطع مرکب منظم (شامل گردابه‌های ایجاد شده در مرز تماس، انتقال انرژی جنبشی از مقطع اصلی به دشت سیلاب، جریان‌های ثانویه و لایه برشی) و در شکل ۱- ب، اندازه و جهت سلول‌های چرخشی جریان ثانویه به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمایش شماتیک هیدرولیک جریان در یک مقطع مرکب (رودخانه سیلابی).

برای استخراج رابطه دبی- اشل رودخانه‌ها در هنگام وقوع سیل، لازم است مقطع مرکب به مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی تقسیم شود. در نرم‌افزارهای کاربردی معمول در مهندسی رودخانه (مثل HEC-RAS و MIKE11) این کار به کمک تجزیه قائم مقطع مرکب (VDCM)[1] انجام می‌شود. با توجه به در نظر نگرفتن تنش برشی بین مقطع اصلی و دشت سیلاب در این روش، خطای زیادی در محاسبه دبی کل جریان و به‌ویژه دبی هر یک از مقاطع اصلی و سیلابی ایجاد می‌شود. به همین جهت مطالعات زیادی برای اصلاح روش معمول محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب انجام شده است. در بیش‌تر این مطالعات، تمرکز اصلی پژوهش‌گران بر ارایه دبی کل جریان در مقاطع مرکب بوده است. این در حالی است که علاوه‌بر دبی کل جریان، دبی‌های جزیی در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی و نیز توزیع سرعت در عرض کانال یا رودخانه نیز مهم بوده و باید در نظر گرفته شود. از مهم‌ترین مدل‌های یک‌بعدی مبتنی بر محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب، روش‌های کوهیرنس (آکرز، ۱۹۹۲)، هیدرا و والنتاین (۲۰۰۲) و هاتوف و همکاران (۲۰۰۸) قابل ذکر می‌باشند. روش‌هایی نیز برای

1- Vertical Divided Channel Method (VDCM)

محاسبه دبی‌های جریان به‌صورت جداگانه برای مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ارایه شده است که روش‌های اندیس φ (ورم‌لیتون و مرت، ۱۹۹۰)، تجزیه وزنی مقطع مرکب (لامبرت و میرز، ۱۹۹۸)، تبادل دبی (بوسمار و زک، ۱۹۹۹) و تجزیه وزنی اصلاح شده مقطع مرکب (آتابای و نایت، ۲۰۰٦) از جمله این روش‌ها هستند. محدودیت مهم این روش‌ها این است که به‌طور عموم فقط در کانال‌های آزمایشگاهی مورد آزمون قرار گرفته و تاکنون در رودخانه‌های طبیعی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. هم‌چنین این رابطه‌ها معمولاً دارای محاسبه‌های طولانی بوده و زمان‌بر می‌باشند و به همین دلیل از نظر کاربرد محدودیت مواجه هستند.

برای محاسبه توزیع سرعت جریان در عرض مقاطع مرکب، مدل‌های ریاضی شبه‌دوبعدی زیادی ارایه شده‌اند که از نظر دقت دارای برتری‌های زیادی بوده و توسط پژوهش‌گران زیادی در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل‌های ارایه شده توسط شیونو و نایت (۱۹۹۱)، وارک و همکاران (۱۹۹۰)، لامبرت و سلین (۱۹۹٤)، اروین و همکاران (۲۰۰۰) و هو و همکاران (۲۰۱۰) از مهم‌ترین مدل‌ها در این زمینه می‌باشند. محدودیت عمده و اصلی این مدل‌ها این است که اگرچه دارای دقت کافی بوده و توزیع سرعت جریان و تنش برشی در عرض رودخانه را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کنند، اما نیازمند حل عددی معادلات دیفرانسیل بوده و به‌طور قطع با خطای گسسته‌سازی (انفصال معادلات) هم‌زمان می‌باشند. هم‌چنین برای محاسبه دبی جریان، لازم است از توزیع سرعت به‌دست آمده، انتگرال‌گیری عرضی انجام شود که این هم به‌طور قطع با خطای عددی همراه است. از طرف دیگر، تئوری این مدل‌ها به‌نسبت پیچیده بوده و ممکن است برای استفاده کاربردی دارای مشکلاتی باشند.

با توجه به موارد مهم بالا، روش‌های بهینه‌سازی و هوشمند نیز مورد توجه پژوهش‌گران هیدرولیک قرار گرفته‌اند. مک‌لیود (۱۹۹۷) و لیو و جیمز (۲۰۰۰) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، رابطه دبی- اشل در مقاطع مرکب آزمایشگاهی مستقیم و پیچانرود را شبیه‌سازی نمودند. حسینی (۲۰۰٤)، با مطالعه نتایج آزمایشگاهی رابطه‌های دبی- اشل مقاطع مرکب همگن و با مسیر مستقیم، روابط رگرسیونی را برای تعیین سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ارایه نمود. ظهیری و دهقانی (۲۰۰۹)، شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای استخراج رابطه دبی- اشل مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای با مسیر مستقیم استفاده نمودند. اونال و همکاران (۲۰۱۰) نتایج

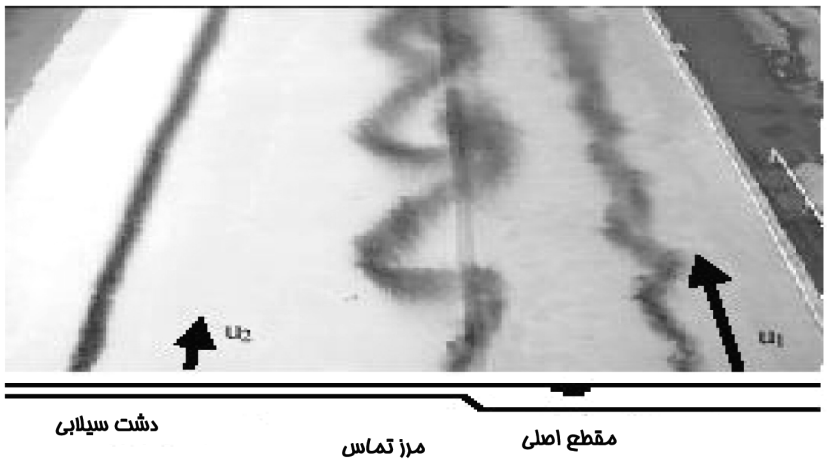
شبکه عصبی مصنوعی را با نتایج مدل‌های یک و دوبعدی تخمین جریان در مقاطع مرکب مستقیم مورد مقایسه قرار داده و دقت بیش‌تر نتایج شبکه عصبی مصنوعی را اثبات نمودند. ظهیری و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، رابطه صریحی را برای محاسبه دبی سیل در رودخانه‌ها ارایه نمودند. عظمت‌الله و ظهیری (۲۰۱۲) به کمک روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی[1]، دبی کل جریان در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای را شبیه‌سازی نمودند.

با توجه به اهمیت حل توزیع سرعت جریان در عرض رودخانه و نیز مطالعات بسیار کمی که در این زمینه انجام شده است، لزوم ارایه روشی مناسب، دقیق و با حجم محاسبه‌های قابل‌قبول برای محاسبه توزیع سرعت جریان در عرض مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای احساس می‌شود. با محاسبه توزیع سرعت در عرض رودخانه علاوه‌بر محاسبه دبی کل جریان، امکان محاسبه توزیع غلظت رسوب معلق و بستر در عرض رودخانه، محاسبه تنش برشی نقاط مختلف در عرض رودخانه و شناسایی نقاط فرسایشی و رسوب‌گذار و نیز مشخص نمودن مقطع پایدار رودخانه فراهم خواهد شد. در این پژوهش به کمک روش جستجوی ژنتیکی، رابطه ساده و بدون‌بعدی برای محاسبه توزیع سرعت در عرض مقاطع مرکب ارایه شده است. سادگی محاسبه‌ها، دقت نتایج و قابلیت تعمیم نتایج از مهم‌ترین برتری‌های رابطه‌های پیشنهادی است.

مواد و روش‌ها

هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب: در شکل ۲، خطوط جریان در مقطع اصلی، دشت سیلابی و مرز تماس بین این دو مقطع در یک کانال آزمایشگاهی نشان داده شده است. به‌وضوح مشخص است که سرعت جریان در دشت‌های سیلابی به مراتب کم‌تر از سرعت جریان در مقطع است. هم‌چنین در مرز تماس مقطع اصلی و دشت سیلابی، تلاطم جریان شدیدی مشاهده می‌شود که ناشی از تنش برشی عرضی ایجاد شده در این ناحیه است.

1- Linear Genetic Programming

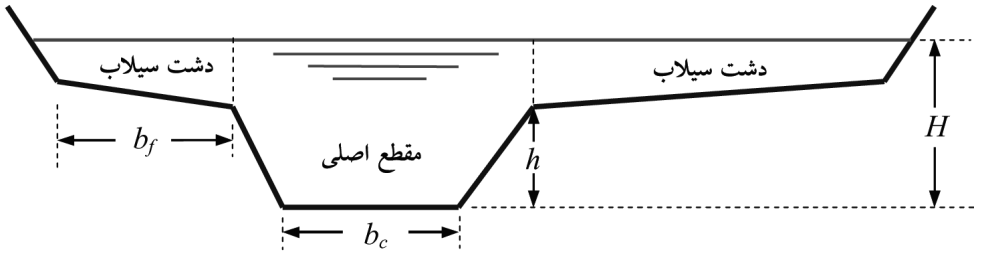


شکل ۲- آشفتگی جریان در ناحیه اتصال مقطع اصلی به دشت سیلابی در یک کانال آزمایشگاهی.

روش تجزیه قائم مقطع مرکب: روش مورد استفاده در نرم‌افزارهای کاربردی برای محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب، روش تجزیه قائم مقطع مرکب است که در آن، رودخانه به مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی تقسیم شده و با استفاده از رابطه مانینگ، دبی جریان در هر یک از این مقاطع به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شود. دبی کل جریان از مجموع این دبی‌های جزیی به‌دست می‌آید (چاو، ۱۹۵۹):

$$Q_{DCM} = \sum_{i=1}^{N} Q_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{A_i R_i^{2/3} S_0^{1/2}}{n_i} \qquad (1)$$

که در آن، Q_{VDCM}: دبی کل جریان به‌دست آمده از روش تجزیه مقطع، i: بیان‌کننده هر یک از مقاطع جزیی (مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی)، N: تعداد کل مقاطع جزیی، A: سطح مقطع جریان، R: شعاع هیدرولیکی هر یک از مقاطع جزیی، S_0: شیب طولی رودخانه و n: ضریب زبری مانینگ می‌باشند. نحوه تفکیک و جداسازی مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی در روش معمول برای یک مقطع مرکب منظم در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مقطع مرکب و تجزیه آن به مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی.

روش بالا با وجود سادگی محاسبه‌ها، به‌دلیل در نظر نگرفتن اثر متقابل بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، دبی کل جریان را به‌میزان قابل‌توجهی بیش‌تر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. میزان خطای این روش، تابع شرایط مختلفی مانند عمق نسبی جریان، ضریب زبری نسبی و عرض نسبی مقطع مرکب می‌باشد (آکرز، ۱۹۹۲). خطای این روش در مقاطع مرکب همگن آزمایشگاهی (مقاطع مرکب با زبری یکسان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی) حدود ۱۰ درصد (آکرز، ۱۹۹۲) و در مقاطع مرکب غیرهمگن رودخانه‌ای (مقاطع مرکب با دشت‌های سیلابی زبرتر از مقطع اصلی مشابه رودخانه‌های طبیعی) حدود ٤٠ درصد گزارش شده است (مارتین و میرز، ۱۹۹۱). دلیل اصلی خطای زیاد این روش این است که تنش برشی ایجاد شده در مرز تماس مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ناچیز فرض می‌شود در حالی‌که این فرض درست نیست.

مطالعات آکرز (۱۹۹۲) نشان داد که تنش برشی بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به شرایط جریان در هر یک از دو مقطع بستگی دارد. هرچه مقادیر سرعت‌ها و عمق‌های جریان در این دو مقطع متفاوت‌تر باشند، میزان تنش برشی و در نتیجه خطای روش تجزیه قائم مقطع مرکب افزایش می‌یابد. آکرز (۱۹۹۲) عوامل مؤثر در میزان خطای روش تجزیه قائم مقطع مرکب را به‌صورت زیر اولویت‌بندی نمود:

۱- عمق نسبی (نسبت عمق جریان در دشت سیلابی به عمق جریان در مقطع اصلی)

۲- زبری نسبی (نسبت ضرایب زبری دشت سیلابی به مقطع اصلی)

۳- عرض نسبی (نسبت عرض دشت سیلابی به عرض مقطع اصلی)

او به‌عنوان یک ایده مهم و کاربردی، پارامتر بدون‌بعدی به‌نام کوهیرنس مقطع را معرفی نمود که همه متغیرهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر در هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب را با تأکید بر تنش برشی ایجاد شده بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی دربر می‌گیرد. پارامتر کوهیرنس بیان‌کننده میزان تشابه جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی است و از نسبت مقادیر هندسی و هیدرولیکی (مثل عمق، عرض، سطح مقطع و ضریب زبری) در دشت‌های سیلابی به مقادیر آن‌ها در مجرای اصلی استفاده می‌کند. این پارامتر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$COH = \frac{(1+A_*)^{1.5} \Big/ \sqrt{\left(1+P_*^{1.33} n_*^{2} \Big/ A_*^{0.33}\right)}}{1+A_*^{1.67} \Big/ n_* P_*^{0.33}} \qquad (2)$$

که در آن، A: سطح مقطع جریان و P: محیط مرطوب است. زیرنویس * نسبت متغیرها در دشت سیلاب به مقطع اصلی را بیان می‌کند به این صورت که $A_* = A_f / A_c$ ، $P_* = P_f / P_c$ و $n_* = n_f / n_c$.

مبانی روش جستجوی ژنتیکی: امروزه استفاده از روش‌های نوین هوشمند به‌منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. از میان الگوریتم‌های هوشمند، روش جستجوی ژنتیکی که ایده آن از سیستم تکامل طبیعی موجودات زنده (ژن و کروموزوم) گرفته شده، به‌عنوان روش نوین بهینه‌سازی مدل‌های غیرخطی بسیار مناسب بوده و کاربردهای فراوانی دارد. روش جستجوی ژنتیک، تلاشی برای شبیه‌سازی و به‌کارگیری برخی خصوصیات و توانایی‌های تکامل در بهینه‌سازی است. این روش توسط جان هالند (۱۹۷۵) (گولدبرگ، ۱۹۸۹) معرفی شد و بعد از آن به‌طور وسیع در مسایل مهندسی، به‌ویژه در مسایل بهینه‌سازی شبکه جریان در لوله‌ها، سازه‌های ساختمانی، واسنجی مدل‌های بارش- رواناب و آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (دهقانی و همکاران، ۲۰۰۶؛ هارونی و همکاران، ۱۹۹۶).

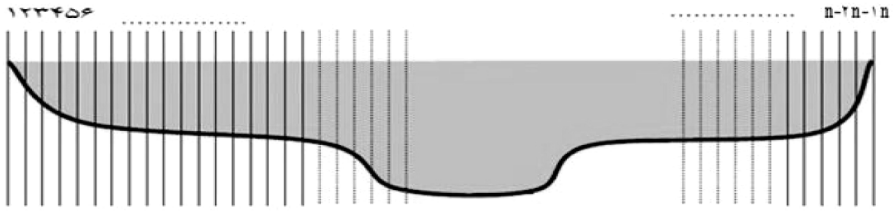
فرآیند بهینه‌سازی در جستجوی ژنتیکی به این صورت می‌باشد که ابتدا تعدادی پاسخ در محدوده تغییر پارامترها حدس زده می‌شود و با تبدیل این اعداد به زنجیره‌ای از صفر و ۱، مقادیر تابع هدف به‌ازای این مقدار پاسخ به‌دست می‌آید. آن‌گاه زنجیره‌هایی که تابع هدف به‌ازای آن‌ها کمینه شده است باقی‌مانده و بقیه حذف می‌شوند. پس از انتخاب زنجیره‌ها و با برگزیدن درصد احتمال ترکیب مناسب، مکان‌هایی از تابع زنجیره‌ها برای رد و بدل کردن اطلاعات انتخاب می‌شود. همچنین با انتخاب درصد

مناسب برای احتمال جهش، مکان یا مکان‌هایی از زنجیره جواب انتخاب شده و اعداد درون این مکان‌ها از صفر به ۱ و بالعکس تبدیل می‌شود. سپس دوباره تابع هدف به‌ازای جمعیت جدید محاسبه و این روند آن‌قدر تکرار می‌شود تا تمامی جواب‌ها به‌سمت نقطه بهینه رهنمون گردند. این جواب (کروموزوم) به‌عنوان بهترین تخمین برای تعیین توزیع سرعت جریان در عرض مقطع مرکب معرفی می‌گردد. در این پژوهش، تابع برازش براساس میزان تطابق مقادیر محاسباتی توزیع سرعت در عرض کانال با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه یا رودخانه تعریف شده است. همچنین برای انتخاب کروموزوم‌ها برای جامعه جدید از جامعه اولیه، از تابع ارزش به‌صورت زیر استفاده شده است:

$$\phi(s) = \sum^{n} \left(f_i(\exp) - f(x_i, s) \right)^{2} \qquad (۳)$$

که در آن، $f_i(exp)$: مقادیر واقعی یا آزمایشگاهی و $f(x_i, s)$: مقادیر محاسبه شده توسط رابطه پیشنهادی در حالت‌ها یا تکرارهای مختلف است.

روش پیشنهادی برای محاسبه توزیع سرعت در عرض مقاطع مرکب: در روش پیشنهادی این پژوهش ابتدا مطابق شکل ٤، مقطع عرضی کانال یا رودخانه به تعداد دلخواهی از المان‌ها یا برش‌های کوچک تقسیم می‌شود. سپس گره‌های محاسباتی در عرض مقطع و در مرز المان‌ها مشخص می‌شود. در این شکل چند گره از گره‌های ابتدایی و انتهایی مقطع رودخانه نشان داده شده است. با افزایش تعداد گره‌های محاسباتی، می‌توان دقت نتایج محاسبه‌ها را افزایش داد. سرعت جریان در اولین و آخرین گره به‌دلیل شرط نبود لغزش[1]، برابر صفر فرض می‌شود.



شکل ٤- گره‌های محاسباتی برای محاسبه توزیع عرضی سرعت.

1- No Slip Condition

در این پژوهش براساس فرمول مانینگ و پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب، رابطه بدون بعد زیر برای محاسبه سرعت جریان در هر نقطه (المان) از عرض مقطع مرکب تعریف شده است:

$$\frac{u_i}{u_{iMan}} = Dr^a COH^b \qquad (٤)$$

که در آن، u_i: سرعت جریان در هر المان از عرض رودخانه، u_{iMan}: سرعت جریان به‌دست آمده از رابطه مانینگ در هر المان، Dr: عمق نسبی، COH: پارامتر کوهیرنس مقطع مرکب و نماهای a و b، مقادیر واسنجی رابطه پیشنهادی بوده و به کمک روش جستجوی ژنتیکی محاسبه و بهینه خواهند شد. سرعت جریان u_{iMan} از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$u_{iMan} = \frac{۱}{n_i} R_i^{۲/۳} S_.^{۱/۲} \qquad (۵)$$

که در آن، R_i: شعاع هیدرولیکی هر المان (برابر با عمق جریان در هر المان) است.

با توجه به این‌که در اثر تنش برشی ایجاد شده بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، انرژی جنبشی (مومنتوم جریان) از مقطع اصلی به دشت‌های سیلابی منتقل شده و باعث کاهش سرعت در مقطع اصلی و افزایش آن در دشت سیلابی می‌شود، انتظار می‌رود نمای b در هر کانال مقطع مرکب در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی دارای رابطه یا مقدار متفاوتی باشد.

در این پژوهش، حداقل نمودن اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سرعت‌های جریان در عرض رودخانه به‌عنوان تابع هدف و ضرایب و نماهای ثابت رابطه کلی ٤ به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده‌اند.

داده‌ها و مقاطع مرکب مورد استفاده: در این پژوهش برای واسنجی و ارزیابی دقت رابطه پیشنهادی محاسبه توزیع عرضی سرعت جریان، از چند مقطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای که دارای داده‌های هندسی و هیدرولیکی دقیقی هستند استفاده شده است (نایت و سلین، ۱۹۸۷). کانال‌های آزمایشگاهی مؤسسه هیدرولیک والینگفورد[1] (سری‌های ۰۲، ۰۳، ۰٦ و ۰۷) با هندسه‌های متفاوت و نیز رودخانه سورن[2] (ایستگاه مونتفورد بریج) به این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

1- Wallingford
2- River Severn at Montford Bridge

نتایج

مرحله واسنجی: برای استخراج رابطه‌های نهایی تعیین توزیع سرعت در عرض مقاطع مرکب و در حقیقت واسنجی رابطه ۵، از داده‌های هندسی و هیدرولیکی کانال‌های مرکب ۰۲، ۰٦ و ۰۷ استفاده شده است. کانال ۰۲ به شکل یک مقطع مرکب متقارن از جنس بتن صاف با مقطع اصلی ذوزنقه‌ای به عرض ۱/۵ متر و شیب جانبی ۱:۱ و دو دشت سیلاب ذوزنقه‌ای با عرض ۲/۲۵ متر و شیب جانبی ۱:۱ می‌باشد. کانال ۰٦ مشابه کانال ۰۲ می‌باشد اما فقط دارای یک دشت سیلاب ذوزنقه‌ای به عرض ۰/۷۵ متر و شیب جانبی ۱:۱ می‌باشد. کانال ۰۷ نیز دقیقاً مشابه کانال ۰۲ است اما دشت‌های سیلابی آن با قرار دادن شبکه‌ای از میله‌های چوبی، زبرتر شده است. شیب طولی همه این کانال‌ها ۰/۰۰۱۰۳ و ضریب زبری مانینگ برای مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ۰/۰۱ است. برای دشت‌های سیلابی کانال ۰۷ به‌ازای هر عمق جریان، یک ضریب زبری مانینگ به‌دست آمده است (آتابای و نایت، ۲۰۰٦).

با معلوم بودن هندسه کانال، شیب طولی، عمق جریان، ضرایب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی و نیز توزیع واقعی سرعت در عرض کانال، می‌توان نماهای رابطه ٤ را به کمک بهینه‌سازی تعیین نمود. این کار با انتخاب مقادیری فرضی برای نماهای a و b قابل انجام است. برای ایجاد حداکثر انطباق بین توزیع واقعی و محاسباتی سرعت در عرض کانال، مقدار a و b توسط جستجوی ژنتیکی آن‌قدر تغییر داده می‌شوند تا تابع ارزش (رابطه ۳) به حداقل برسد. این مراحل برای چند عمق جریان در کانال‌های موردنظر تکرار شده و روابط نهایی زیر به‌ترتیب برای محاسبه توزیع عرضی سرعت در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌دست آمده است:

$$\frac{u_i}{u_{iMan}} = Dr^{۰/۲۰۴۸} COH^{b_۱} \qquad (٦)$$

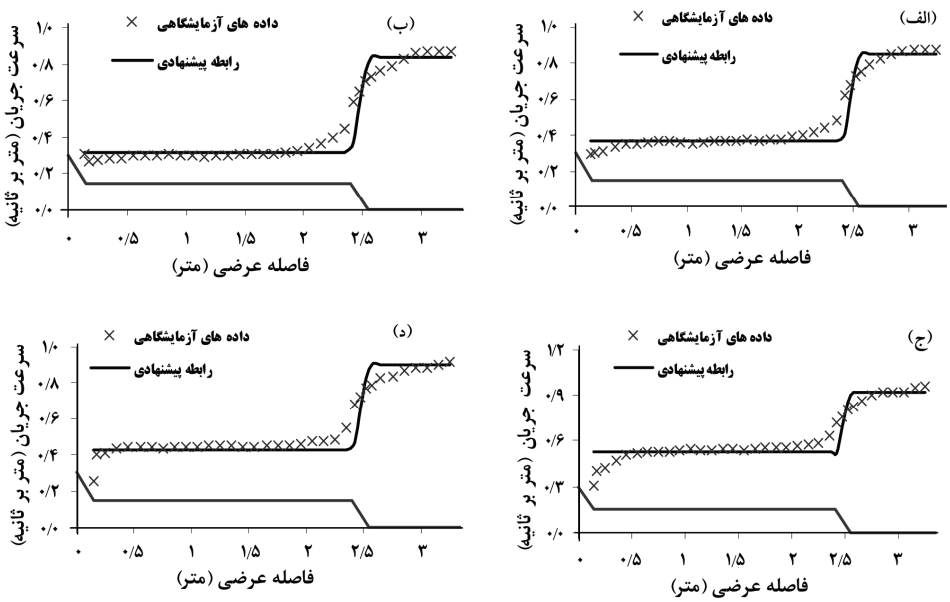
$$\frac{u_i}{u_{iMan}} = Dr^{۰/۲۰۴۸} COH^{b_۲} \qquad (۷)$$

همان‌طورکه انتظار می‌رفت به‌دلیل پیچیدگی جریان در مقاطع مرکب و نیز شرایط هندسی متنوع مقاطع مرکب، نمای b در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی دارای یک مقدار ثابت نبوده و باید رابطه‌های خاصی برای آن استخراج نمود. به این منظور و به کمک بهینه‌سازی جستجوی ژنتیکی، رابطه‌های زیر برای مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌ترتیب با ضریب تعیین ۰/۹۵ و ۰/۹٤ به‌دست آمده است:

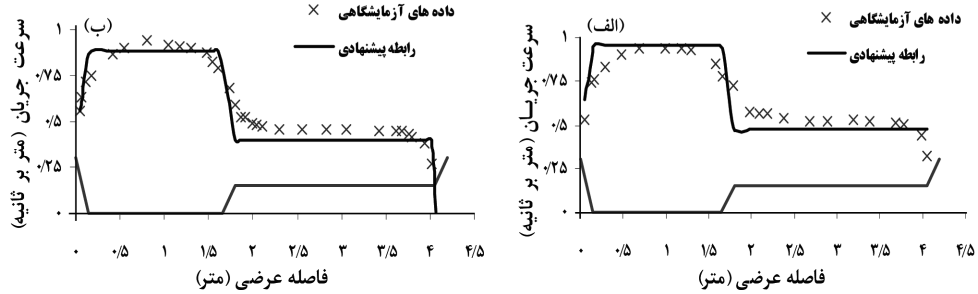
$$b_1 = -0/832 Dr^{2/898} \left(\frac{h_f}{h}\right)^{-2/9} \left(\frac{n_f}{n_c}\right)^{-1/571} \left(\frac{b_f}{B/2}\right)^{-0/369} \quad (8)$$

$$b_2 = -2/139 Dr^{0/667} \left(\frac{h_f}{h}\right)^{-0/283} \left(\frac{n_f}{n_c}\right)^{0/138} \left(\frac{b_f}{B/2}\right)^{-0/776} \quad (9)$$

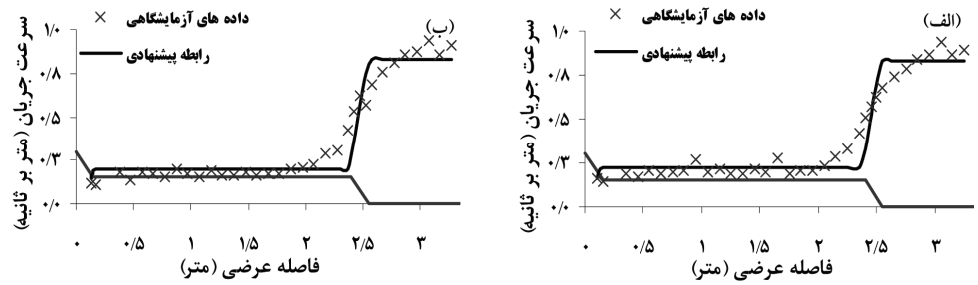
نتایج به‌دست آمده از این رابطه‌ها در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی توزیع سرعت در عرض کانال‌های مرکب ۰۲، ۰۶ و ۰۷ به‌ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. همان‌طورکه قابل مشاهده است، رابطه‌های پیشنهادی این پژوهش با وجود سادگی، در همه عمق‌های جریان و در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی کانال‌های مورد استفاده دارای دقت مناسب و قابل‌قبولی در تخمین توزیع سرعت در عرض کانال است. قابل ذکر است که به‌دلیل متقارن بودن کانال‌های ۰۲ و ۰۷، فقط نتایج مربوط به نصف کانال ارایه شده است.



شکل ۵- مقایسه نتایج رابطه‌های پیشنهادی با مقادیر آزمایشگاهی توزیع سرعت در عرض کانال مرکب ۰۲ (الف- عمق ۰/۱۷۸ متر، ب- عمق ۰/۱۸۷ متر، ج- عمق ۰/۱۹۸ متر و د- عمق ۰/۲۱٤ متر).



شکل ٦- مقایسه نتایج رابطه‌های پیشنهادی با مقادیر آزمایشگاهی توزیع سرعت در عرض کانال مرکب ٠٦ (الف- عمق ٠/١٩٨ متر و ب- عمق ٠/٢١٣٥ متر).



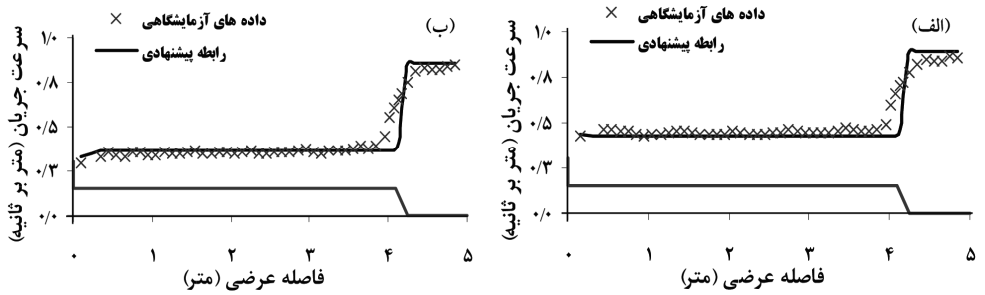
شکل ٧- مقایسه نتایج رابطه‌های پیشنهادی با مقادیر آزمایشگاهی توزیع سرعت در عرض کانال مرکب ٠٧ (الف- عمق ٠/١٧٦٥ متر و ب- عمق ٠/١٩٩٥ متر).

با توجه به این‌که استفاده از مقادیر بهینه پارامترهای روش جستجوی ژنتیکی مانند پارامتر کسر جهش (Pm)[1]، کسر ترکیب (Pc)[2] و اندازه جمعیت (Pop)[3] در همگرایی و جلوگیری از قرار گرفتن در نقاط بهینه موضعی بسیار مؤثر است، اثر مقادیر مختلف پارامترهای ذکر شده در بالا بر شاخص‌های خطا مانند میانگین مربعات خطا (MSE) و متوسط خطای مطلق (MAE) مورد بررسی قرارگرفت و از بین آن‌ها مقادیری که منجر به حداقل شدن خطا گردید، انتخاب شدند. مقادیر بهینه پارامتر کسر ترکیب Pc=٠/٩، اندازه جمعیت، Pop=١٠٠ و کسر جهش به‌دست آمدند.

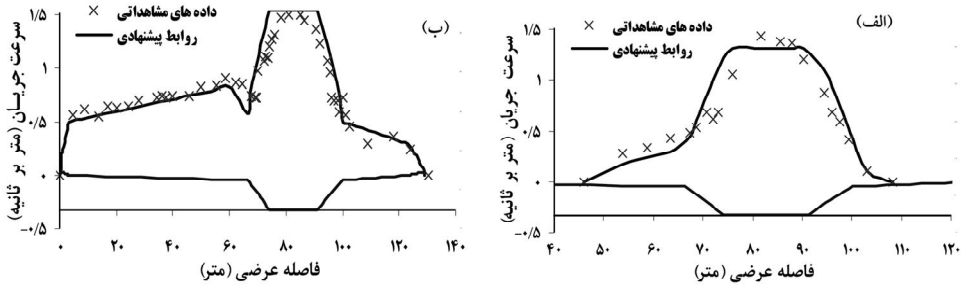
1- Probability of Mutation
2- Probability of Crossover
3- Population

مرحله صحت‌سنجی: در این مرحله برای ارزیابی دقت رابطه‌های پیشنهادی در شرایط کانال‌های آزمایشگاهی و رودخانه‌های طبیعی، کانال مرکب ۰۱ و رودخانه سورن در کشور انگلستان در نظر گرفته شده‌اند. کانال مرکب ۰۱ دارای مقطع اصلی ذوزنقه‌ای به عرض ۱/۵ متر، شیب جانبی ۱:۱ و دو دشت سیلاب مستطیلی به عرض ٤/۱ متر است. شیب کف آن ۰/۰۰۱ و ضریب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ۰/۰۱ می‌باشد. نتایج صحت‌سنجی رابطه‌های پیشنهادی در این کانال در شکل ۸ نشان داده شده است. این نتایج برای دو عمق جریان ۰/۱۸۷ متر و ۰/۱۹۹ متر به‌دست آمده‌اند.

رودخانه سورن دارای دو دشت سیلابی با شیب عرضی متفاوت می‌باشد. مقطع اصلی این رودخانه به شکل ذوزنقه به عمق لبریز ٦ متر، عرض کف ۱۷ متر و شیب‌های جانبی سمت چپ و راست ۱/۵ و ۱/۳ می‌باشد. ضریب زبری مقطع اصلی حدود ۰/۰۳ گزارش شده است (نایت و همکاران، ۱۹۸۹؛ آکرز، ۱۹۹۲). شیب عرضی دشت‌های سیلابی سمت چپ و راست به‌ترتیب ٦۳:۱ و ۲۳:۱ (قائم: افقی) می‌باشد. ضریب زبری دشت سیلابی سمت چپ این رودخانه از دشت سیلاب سمت راست بیش‌تر است به‌طوری‌که این مقادیر به‌ترتیب ۰/۰۲۸ و ۰/۰٤ به‌دست آمده است (نایت و همکاران، ۱۹۸۹). شیب طولی این رودخانه حدود ۰/۰۰۰۱۸۵ است. نتایج محاسباتی توزیع سرعت در عرض رودخانه سورن در عمق‌های ٦/٤٥ متر (با عمق نسبی ۰/۷) و ۷/۸۱ متر (با عمق نسبی ۰/۲۳) در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود نتایج این روش دارای دقت قابل‌قبولی بوده و می‌تواند برای رودخانه‌های سیلابی نیز مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۸- مقایسه نتایج رابطه‌های پیشنهادی با مقادیر مشاهداتی توزیع سرعت در کانال مرکب ۰۱ (الف- عمق جریان ۰/۱۸۷ متر و ب- عمق جریان ۰/۱۹۹ متر).

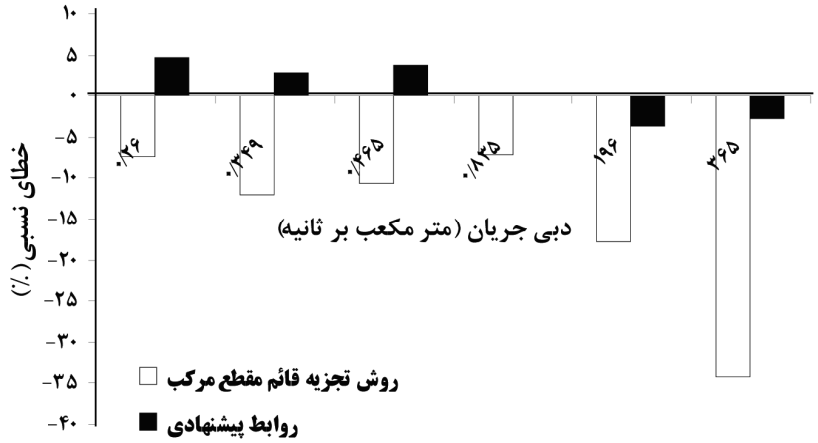


شکل ۹- مقایسه نتایج رابطه‌های پیشنهادی با مقادیر مشاهداتی توزیع سرعت در رودخانه سورن (الف- عمق جریان ٦/٤٥ متر و ب- عمق جریان ۷/۸۱ متر).

تجزیه و تحلیل نتایج: برای ارزیابی دقیق‌تر نتایج توزیع سرعت‌های به‌دست آمده از رابطه‌های پیشنهادی این پژوهش در عرض مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای، از پارامترهای آماری بیان‌کننده خطا شامل ضریب تعیین (R^2) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. این محاسبه‌ها نشان داد که نتایج سرعت‌های به‌دست آمده از رابطه‌های پیشنهادی این پژوهش در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی دارای دقت مناسبی است به‌طوری‌که ضریب تعیین و میانگین مجذور مربعات خطا در مرحله واسنجی به‌ترتیب حدود ۰/۹۳ و ۰/۰٦۳ و در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب حدود ۰/۹۱ و ۰/۱۲۷ به‌دست آمده است.

علاوه‌بر توزیع سرعت در عرض رودخانه‌ها، محاسبه دبی جریان نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی برای پروژه‌های مهندسی رودخانه مهم و ضروری است. معمولاً بهترین روش محاسبه دبی جریان، استفاده از توزیع سرعت در عرض رودخانه است. با انتگرال‌گیری عرضی از سرعت‌های به‌دست آمده از رابطه‌های پیشنهادی، دبی‌های جریان برای هر عمق از کانال‌های مرکب مورد مطالعه محاسبه شده و با نتایج روش معمول تجزیه قائم مقطع مقایسه شده است. در شکل ۱۰ نتایج درصد خطای نسبی هر دو روش در دبی‌های واقعی جریان ارایه شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود خطای متوسط برای روش تجزیه قائم مقطع مرکب همواره منفی بوده و بیانگر این است که این روش همیشه دبی جریان را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند. با افزایش عمق جریان، خطای این روش نیز افزایش یافته است به‌طوری‌که در رودخانه سورن و به‌ازای عمق جریان ۷/۸۱ متر (با دبی جریان واقعی ۳٦۵ مترمکعب بر ثانیه) خطای متوسط در این روش بیش از ۳٤- درصد می‌باشد. خطای

رابطه‌های پیشنهادی تقریباً در همه محدوده دبی‌های مورد استفاده در این پژوهش مناسب و قابل‌قبول بوده و حداکثر مقدار خطا ٤/٧ درصد است. خطای نسبی میانگین برای روش تجزیه قائم مقطع مرکب و رابطه‌های پیشنهادی این پژوهش به‌ترتیب ۱۵- و ۱ درصد به‌دست آمده است.



شکل ۱۰- درصد خطای نسبی رابطه‌های پیشنهادی و روش تجزیه قائم مقطع مرکب در دبی‌های مختلف جریان.

نتیجه‌گیری

۱- در این پژوهش روابط ساده‌ای برای تعیین توزیع عرضی سرعت جریان در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای ارایه شده و به کمک روش جستجوی ژنتیکی بهینه‌سازی شده است. ارزیابی دقت نتایج این رابطه‌ها در محاسبه توزیع سرعت در عرض کانال‌های مرکب در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، کارایی مناسب این روش را نشان می‌دهد. ضریب تعیین و میانگین مجذور مربعات خطا در این روش در مرحله واسنجی حدود ۰/۹۳ و ۰/۰٦۳ و در مرحله صحت‌سنجی حدود ۰/۹۱ و ۰/۱۲۷ به‌دست آمده است.

۲- دقت نتایج رابطه‌های پیشنهادی در محاسبه دبی جریان کانال‌ها و رودخانه‌های با مقطع مرکب قابل‌قبول می‌باشد. میانگین خطای نسبی این رابطه‌ها در تعیین دبی جریان مقاطع مرکب حدود ۱ درصد به‌دست آمده است. روش معمول تعیین دبی جریان در مقاطع مرکب (تجزیه قائم مقطع مرکب) با میانگین خطای نسبی ١٤- درصد، دقت بسیار کم‌تری نسبت به رابطه‌های پیشنهادی دارد.

۳- رابطه‌های پیشنهادی این پژوهش برای کانال‌هایی که عرض دشت سیلاب آن‌ها خیلی کم‌تر از عرض مقطع اصلی باشد، توزیع سرعت در دشت سیلاب را به‌صورت دقیق محاسبه نمی‌کند. دلیل این مسأله این است که در این حالت، عرض لایه برشی ناشی از انتقال مومنتوم از مقطع اصلی به دشت سیلاب افزایش یافته و توزیع واقعی سرعت را تغییر می‌دهد در حالی‌که در رابطه‌های پیشنهادی، پارامتری برای دخالت عرض لایه برشی در نظر گرفته نشده است.

منابع

1.Ackers, P. 1992. Hydraulic design of two-stage channels. J. Water Mar. Engin. 96: 247-257.

2.Atabay, S., and Knight, D.W. 2006. 1-D modeling of conveyance, boundary shear and sediment transport in overbank flow. J. Hydraul. Res. 44: 6. 739-754.

3.Azamathulla, H.Md., and Zahiri, A. 2012. Flow discharge prediction in compound channels using linear genetic programming. J. Hydrol. 454: 203-207.

4.Bousmar, D., and Zech, Y. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. J. Hydraul. Engin. 125: 7. 696-70.

5.Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, H., and Zech, Y. 2004. Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. J. Hydraul. Engin. 130: 4. 305-312.

6.Chow, V.T. 1959. Open channel hydraulics, McGraw-Hill, London, 700p.

7.Dehghani, A.A., Ghodsian, M., Montazer, Gh.A., and Nasiri Saleh, F. 2006. Optimization of gravity concrete dams sections using genetic algorithm and artificial neural networks. Modares Tech. Engin. J. 2: 22-33. (In Persian)

8.Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., and Sellin, R.H.J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. J. Hydraul. Engin. 126: 9. 653-669.

9.Goldberg, D.E. 1989. Genetic algorithms in search, Optimization and machine learning. Addison-Wesley.

10.Haidera, M.A., and Valentine, E.M. 2002. A practical method for predicting the total discharge in mobile and rigid boundary compound channels. P 153-160, In: Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Belgium.

11.Harrouni, K., Ouazar, D., and Walters, A.H.D. 1996. Groundwater Optimization and parameter estimation by genetic algorithm and dual reciprocity boundary element method. Engineering Analysis with Boundary Elements, 18: 287-296.

12.Hosseini, S.M. 2004. Equations for discharge calculation in compound channels having homogenous roughness. Iran. J. Sci. Technol. Shiraz University, Transaction B, 28: 5. 537-546.

13.Hu, C., Ju, Z., and Guo, Q. 2010. Flow movement and sediment transport in compound channels. J. Hydraul. Res. 48: 1. 23-32.

14.Huthoff, F., Roose, P.C., Augustijn, D.C.M., Hulscher, S.J.M.H. 2008. Interacting divided channel method for compound channel flow. J. Hydraul. Engin. 134: 8. 1158-1165.

15.Knight, D.W., and Sellin, R.H.J. 1987. The SERC flood channel facility. J. Ins. Water Environ. Manage. 1: 2. 198-204.
16.Knight, D.W., Shiono, K., and Pirt, J. 1989. Predictions of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. P 419-428, In: Int. Conf. on Hydraulics and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters, England.
17.Lai, S.H., and Bessaih, N. 2004. Flow in compound channels. P 275-280, In: 1st Int. Conf. on Managing Rivers in the 21st Century, Malaysia.
18.Lambert, M.F., and Myers, R.C. 1998. Estimating the discharge capacity in straight compound channels. Water, Maritime and Energy, 130: 84-94.
19.Lambert, M.F., and Sellin, R.H.J. 1996. Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept. J. Hydraul. Res. 34: 381-394.
20.Liu, W., and James, C.S. 2000. Estimating of discharge capacity in meandering compound channels using artificial neural networks. Can. J. Civil. Engin. 27: 2. 297-308.
21.Macleod, A.B. 1997. Development of methods to predict the discharge capacity in model and prototype meandering compound channels. PhD Thesis in Civil Engineering, University of Glasgow, 513p.
22.Martin, L.A., and Myers, R.C. 1991. Measurement of overbank flow in a compound river channel. J. Ins. Water Environ. Manage. Pp: 645-657.
23.Shiono, K., and Knight, D.W. 1988. Two dimensional analytical solution for a compound channel. P 1-8, In: 3rd Int. Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Japan.
24.Shiono, K., and Knight, D.W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. J. Fluid Mechanics, 222: 617-646.
25.Unal, B., Mamak, M., Seckin, G., and Cobaner, M. 2010. Comparison of an ANN approach with 1-D and 2-D methods for estimating discharge capacity of straight compound channels. J. Adv. Engin. Software. 41: 120-129.
26.Wark, J.B., Samuels, P.G., and Ervine, D.A. 1990. A practical method of estimating velocity and discharge in compound channels. P 163-172, In: Int. Conf. on River Flood Hydraulics, England.
27.Witten, I.H., and Frank, E. 2005. Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations. Morgan Kaufmann: San Francisco, 664p.
28.Wormleaton, P.R., and Merrett, D.J. 1990. An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/floodplain sections. J. Hydraul. Res. 28: 157-174.
29.Zahiri, A., and Dehghani, A.A. 2009. Flow discharge determination in straight compound channels using ANN. P 12-15, In: World Academy of Science, Engineering and Technology, Italy.
30.Zahiri, A., Dehghani, A.A., and Hezarjeribi, A. 2012. Determination of stage-discharge curve for laboratory and river compound channels applying genetic algorithm. J. Water and Soil Conservation, 19: 2. 179-192. (In Persian)

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(5), 2013
http://jwsc.gau.ac.ir

Optimization of the lateral velocity distribution in rivers using Genetic Algorithm

***A.R. Zahiri**
Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
Received: 10/29/2012; Accepted: 01/30/2013

Abstract

Alluvial rivers generally have wide widths, and hence, the lateral velocity profile in this condition is very variable. Calculation of this profile is necessary in many procedures such as determination of flow discharges in main channels and floodplains, sediment transport in rivers, pollutant transport, shear stress prediction and identification of reaches with erosion or deposition across the river. Currently, the field measurements of point velocities across the river using the current meter or quasi two dimensional mathematical models are being used for lateral velocity profile prediction. Field measurement of velocity takes much cost and time and is dangerous during flood. Also, mathematical models theory is rather complex and may be make some limitations for hydraulic engineers. In this study by using genetic algorithm, a simple and dimensionless equation has been derived for velocity profile prediction. Dimensionless variables of relative depth and coherence parameter have been used as input parameters. For this study, experimental and field data of velocity distributions have been categorized to two groups of calibration and validation. With statistical comparison of results, the determination coefficient and root mean squared error of calibration data were obtained as 0.93 and 0.063 and for validation data as 0.91 and 0.127, respectively.

Keywords: Lateral velocity profile, Coherence parameter, Optimization, Genetic algorithm, Compound channels

* Corresponding Author; Email: zahiri@gau.ac.ir