



دانشگاه گوارز و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و دوم، شماره اول، ۱۳۹۴
<http://jwsc.gau.ac.ir>

محاسبه دبی جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی مقاطع مرکب با استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی

* عبدالرضا ظهیری^۱، مهدی صالحی^۲ و خلیل قربانی^۱

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،
دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه عمران، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۷

چکیده

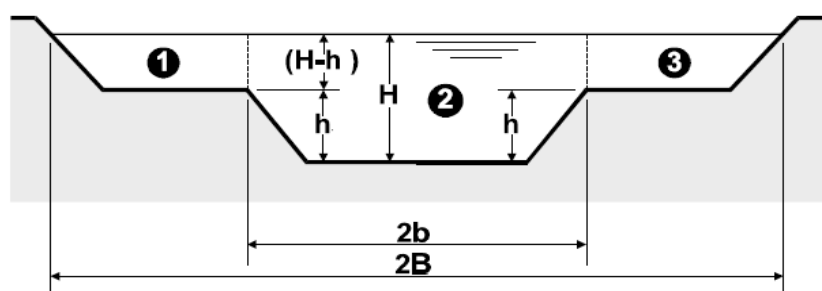
هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب به دلیل تبادل مومنتوم بین مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی پیچیده است. بیش‌تر مطالعات در این زمینه بر محاسبه سرعت متوسط و دبی کل جریان متمرکز می‌باشد، در حالی که توزیع دبی جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی هم مهم است. در شرایط سیلاب و ورود جریان به دشت‌های سیلابی، انتقال رسوب کف و معلق فقط توسط دبی مقطع اصلی انجام شده و نقش دبی جریان در دشت‌های سیلابی ناچیز است. همچنین برای پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ها، تعیین سرعت و تنش برشی در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی به صورت تفکیک شده لازم بوده و استفاده از سرعت متوسط نتایج دقیقی ارائه نمی‌کند. در این پژوهش با استفاده از ۱۰۲ داده دبی-اشل از ۱۴ کانال آزمایشگاهی با مقطع مرکب، دبی تفکیکی جریان در این کانال‌ها به کمک دو روش نوین بهینه‌سازی برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل درخت تصمیم محاسبه شده و با نتایج روش‌های تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که این دو روش به ترتیب با خطای متوسط ۲/۱ و ۶ درصد قابلیت مناسبی در برآورد دبی جریان در مجرای اصلی مقاطع مرکب آزمایشگاهی دارند. روش تجزیه قائم مقطع مرکب با خطای حدود ۱۹ درصد بیش‌ترین خطا را در بین روش‌های تجربی دارا می‌باشد. برای برآورد دبی جریان در دشت‌های سیلابی، علاوه بر روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل درخت تصمیم، روش تجزیه قائم مقطع مرکب نیز دارای دقت مناسبی است.

واژه‌های کلیدی: مقاطع مرکب، دبی مقطع اصلی، روش برنامه‌ریزی ژنتیک، مدل درخت تصمیم، داده‌های آزمایشگاهی

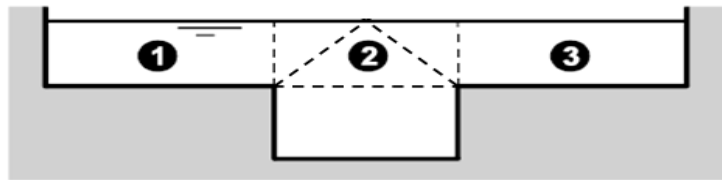
* مسئول مکاتبه: zahiri_reza@yahoo.com

مقدمه

بیش از سه دهه است که هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب توسط پژوهشگران مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در بیشتر این مطالعات، هدف اصلی تعیین سرعت متوسط و دبی کل جریان بوده و روش‌های زیادی در این خصوص ارایه شده است. اگرچه این روش‌ها دارای دقت زیادی می‌باشند اما برای تعیین سرعت و دبی تفکیکی در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی لزوماً از دقت مناسبی برخوردار نیستند (آکرز، ۱۹۹۲). مشخصات هیدرولیک جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی کاملاً با یکدیگر متفاوت بوده و به همین دلیل برای محاسبات هیدرولیکی این مقاطع، باید مقطع مرکب تجزیه شود (لامبرت و میرز، ۱۹۹۸). برای تجزیه مقاطع مرکب، سه روش ساده توصیه شده است که در محاسبات معمول بیش‌تر نرم‌افزارهای هیدرولیکی، از روش تجزیه قائم استفاده می‌شود (هاتوف و همکاران، ۲۰۰۸). اگرچه این روش‌ها، دبی کل جریان را در بعضی شرایط خاص با دقت مناسبی محاسبه می‌کنند اما به‌طورکلی برای محاسبات مهندسی توصیه نمی‌شوند (میرز و لینس، ۱۹۹۷). در شکل ۱، یک مقطع مرکب منظم با پارامترهای مربوط به آن نشان داده شده است. در شکل ۲ نیز سه روش اصلی تجزیه مقطع مرکب^۱ به مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی (شامل روش‌های قائم، مایل و افقی) ارایه شده است. در تمامی این روش‌ها، فرض می‌شود تنش برشی بین بخش‌های مختلف صفر بوده و هیچ‌گونه تبادل مومنتوم بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی وجود ندارد. نتایج مطالعات پژوهشگران نشان می‌دهد که این فرض صحیح نبوده و به همین دلیل روش‌های فوق دارای خطا می‌باشند (مارتین و میرز، ۱۹۹۱؛ آکرز، ۱۹۹۲).

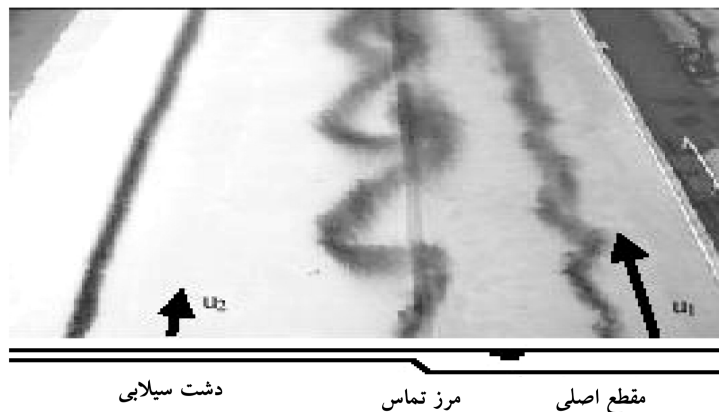


شکل ۱- نمایش یک مقطع مرکب منظم رودخانه‌ای و مقاطع جزئی آن (بوسمار و زک، ۱۹۹۹).



شکل ۲- سه روش اصلی تجزیه قائم، مایل و افقی مقطع مرکب به مجرای اصلی (۲) و دشت‌های سیلابی (۱ و ۳).

برای نشان دادن عدم کارایی روش‌های تجزیه مقطع، نتایج آزمایشگاهی ون‌پرویجن و همکاران (۲۰۰۵) در شکل ۳ نشان داده شده است. به وضوح مشخص است که سرعت در دشت 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. این تنش حتی نسبت به تنش برشی مقطع اصلی بزرگ‌تر بوده و بیانگر این است که فرض تنش برشی صفر در مرز تماس در روش‌های تجزیه مقطع مرکب غیرمنطقی است.



شکل ۳- آشفتگی جریان و تنش برشی شدید در ناحیه اتصال مقطع اصلی به دشت سیلابی در یک کانال آزمایشگاهی (ون‌پرویجن و همکاران، ۲۰۰۵).

با توجه به خطای زیاد روش‌های تجزیه مقطع مرکب، پژوهشگران روش‌های یک‌بعدی اصلاحی متعددی را ارائه نمودند (ورم‌لیتون و مرت، ۱۹۹۰؛ هاتوف و همکاران، ۲۰۰۸). این روش‌ها بر محاسبه دقیق دبی کل جریان متمرکز می‌باشند در حالی که در بیشتر مواقع علاوه بر محاسبه دبی کل مقطع

جریان، توزیع دبی در مقطع اصلی رودخانه و دشت‌های سیلابی نیز مهم و ضروری است. به‌طور مثال، برای محاسبات میزان انتقال بار بستر و معلق رودخانه‌ها در زمان سیل، فقط دبی جریان در مقطع اصلی رودخانه مؤثر بوده و دبی جریان در دشت سیلابی در عمل در این فرآیند نقشی ندارد (آکرز، ۱۹۹۲). به‌عبارت بهتر، دشت‌های سیلابی به‌دلیل سرعت کم جریان در آن‌ها، حالت مخزن داشته و ضمن رسوبگذار بودن، باعث ذخیره موقت سیل نیز می‌شوند. بنابراین، برای تعیین حجم رسوب بستر و معلق عبوری از هر ایستگاه هیدرومتری در رودخانه، باید دبی مقطع اصلی را از دبی کل سیل تفکیک نمود و سپس در روابط تجربی محاسبه ظرفیت حمل رسوب قرار داد. همچنین به‌دلیل اختلاف زیاد در شرایط هندسی و هیدرولیکی مجرای اصلی رودخانه و دشت‌های سیلابی آن، سرعت متوسط جریان در رودخانه معیار خوبی برای اظهارنظر در خصوص رفتار رودخانه مانند فرسایشی یا رسوبگذار بودن نیست. هر کدام از مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی با توجه به سرعت جریان، دارای شرایط متفاوتی از نظر میزان تنش برشی بستر می‌باشند. بنابراین برای پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ها، تعیین سرعت و تنش برشی در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی به‌صورت تفکیک شده لازم است. به همین دلیل، پژوهشگران چندین روش یک و دوبعدی برای تخمین دبی‌های جزئی یا تفکیک شده در مقاطع مرکب ارائه داده‌اند. روش‌های دوبعدی و سه‌بعدی از نظر دقت محاسبه‌ها دارای برتری‌های زیادی بوده و توسط پژوهشگران زیادی در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شیونو و نایت، ۱۹۹۱؛ شیونو و لین، ۱۹۹۲؛ اروین و همکاران، ۲۰۰۰؛ جزی‌زاده و ذراتی، ۲۰۰۸؛ هو و همکاران، ۲۰۱۰). این مدل‌ها اگرچه فیزیک و مکانیسم جریان را با دقت بیشتری نسبت به مدل‌های یک‌بعدی بیان می‌کنند، اما محدودیت عمده و اصلی آن‌ها این است که نیازمند حل عددی معادلات دیفرانسیل بوده و با خطای عددی هم‌زمان می‌باشند. همچنین تئوری این مدل‌ها به‌نسبت پیچیده بوده و ممکن است برای استفاده کاربردی مهندسی هیدرولیک دارای مشکلاتی باشند. بعضی از این مدل‌ها، نیاز به اندازه‌گیری‌های میدان سرعت جریان در جهات طولی و عرضی برای واسنجی مدل ریاضی داشته و حجم بالایی از حافظه رایانه را اشغال می‌کنند. بنابراین روش‌های یک‌بعدی تجربی از نظر کاربردی دارای برتری می‌باشند.

لامبرت و مایرز (۱۹۹۸) با تلفیق نتایج دو روش معمول تجزیه مقطع مرکب، روشی کاربردی به‌نام روش تجزیه وزنی مقطع مرکب^۱ برای محاسبه توزیع دبی جریان در مقاطع مرکب همگن و غیرهمگن

1- Weighted Divided Channel Method (WDCM)

ارایه نمودند. با این که نتایج این روش برای مقاطع مرکب آزمایشگاهی بسیار مناسب بوده است، اما به دلیل محدودیت کاربرد این روش در مقاطع مرکب رودخانه‌ای، نمی‌توان به صورت مشخص دقت این روش را برای مقاطع مرکب صحرایی ارزیابی نمود. آتابای (۲۰۰۱) با بررسی کارایی روش تجزیه وزنی مقطع مرکب در سه کانال مرکب آزمایشگاهی به این نتیجه رسید که این روش در حالت مقاطع مرکب همگن دارای دقت بسیار خوبی است اما در حالت مقاطع مرکب غیرهمگن دارای خطای زیادی است. او همچنین نتیجه گرفت که مقادیر دبی دشت‌های سیلابی به دست آمده از این روش در حالت مقاطع مرکب همگن نامتقارن دارای خطای زیادی است.

بوسمار و زک (۱۹۹۹) روشی یک‌بعدی موسوم به تبادل دبی^۱ برای محاسبه دبی جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ارایه نمودند. در این روش، مقادیر فاکتور انتقال مقاطع اصلی و سیلابی با استفاده از ضرایب اصلاحی مناسب، تصحیح شده و دبی جریان با دقت مناسبی محاسبه می‌شود. محاسبات این روش به نسبت پیچیده بوده و تاکنون کاربرد بسیار محدودی در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و به ویژه رودخانه‌ها داشته است.

با توجه به توسعه چشم‌گیر و روزافزون روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی و داده‌کاوی (به ویژه روش هوشمند برنامه‌ریزی ژنتیک^۲ و مدل درخت تصمیم^۳ M5) و نیز کارایی فوق‌العاده مناسب آن‌ها در حل مسایل مختلف مهندسی، این روش‌ها تاکنون کاربرد گسترده‌ای در حل مسایل اساسی مهندسی آب و هیدرولیک داشته‌اند. امروزه این روش‌ها در زمینه مهندسی آب به عنوان ابزاری مناسب برای مدل‌سازی مسایل مربوط به تعیین ساختار پدیده‌ها مطرح شده‌اند. تاکنون از روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای محاسبه ضریب اصطکاک داریسی- ویسباخ در لوله‌ها (داویدسون و همکاران، ۱۹۹۹)، محاسبه افت انرژی مازاد ناشی از پوشش گیاهی (بابوویچ و کیجرز، ۲۰۰۰)، پیش‌بینی رواناب حوضه‌های آبریز (خو و همکاران، ۲۰۰۱)، شبیه‌سازی بارش- رواناب (لیونگ و همکاران، ۲۰۰۲)، حل توزیع عرضی سرعت در کانال‌های مرکب با پوشش گیاهی (هریس و همکاران، ۲۰۰۳)، مدل‌سازی انتقال رسوب در رودخانه‌ها (کیژی‌سری و همکاران، ۲۰۰۵؛ آیتک و کیشی، ۲۰۰۸)، تخمین آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب (گوون و گونال، ۲۰۰۸)، برآورد عمق نهایی آبشستگی پایه پل‌ها (عظمت‌الله و همکاران، ۲۰۱۰)، برآورد ضریب پخش مواد آلاینده در رودخانه‌ها (عظمت‌الله و غنی،

1- Exchange Discharge Method (EDM)

2- Genetic Programming (GP)

3- Decision Tree Model

(۲۰۱۱)، تخمین دبی کل جریان در مقاطع مرکب (عظمت‌الله و ظهیری، ۲۰۱۲) استفاده شده است. از مدل M5 نیز تاکنون در حل مسایل مهندسی مانند مدل‌سازی فرآیند بارش- رواناب (سالوماتین و دولال، ۲۰۰۳)، پیش‌بینی سیلاب (سالوماتین و ژبو، ۲۰۰۴)، استخراج رابطه دبی- اشل رودخانه‌ها (باتاچاریا و سالوماتین، ۲۰۰۵)، محاسبه حجم رسوبگذاری در رودخانه (باتاچاریا و سالوماتین، ۲۰۰۶)، طبقه‌بندی کاربری اراضی (پال، ۲۰۰۶)، مدل‌سازی انتقال رسوب (باتاچاریا و همکاران، ۲۰۰۷)، تخمین غلظت رسوب معلق رودخانه‌ها (ردی و جی‌مایر، ۲۰۰۹)، محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل (پال و دسوال، ۲۰۰۹)، پیش‌بینی آبدهی رودخانه (لاند و دیکسیت، ۲۰۱۱) و تخمین دبی کل جریان در مقاطع مرکب (ظهیری و عظمت‌الله، ۲۰۱۴) استفاده شده است.

با بررسی مطالعات انجام شده مشخص می‌شود که تاکنون روش‌های بهینه‌سازی به صورت محدود در زمینه تخمین دبی کل جریان در مقاطع مرکب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش با توجه به اهمیت تخمین سرعت و دبی جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی، روابط ساده‌ای به کمک روش‌های نوین بهینه‌سازی و داده‌کاوی (برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل درخت تصمیم) استخراج شده است. به این منظور از ۱۰۲ داده از ۱۴ کانال آزمایشگاهی با مقطع مرکب استفاده شده است. نتایج روابط نهایی پیشنهادی با روش‌های تجربی مقایسه شده و دقت آن‌ها ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا مبانی و معادلات روش‌های معمول تجزیه مقطع مرکب و نیز روش تجزیه وزنی برای محاسبه دبی جریان مورد اشاره قرار گرفته و سپس روش‌های نوین بهینه‌سازی شامل برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل M5 از نظر فرآیند عملکرد و مبنای بهینه‌سازی توضیح داده شده‌اند. همچنین داده‌ها و کانال‌های مرکب آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش و نیز پارامترهای ورودی و خروجی مدل‌های مورد بررسی معرفی شده‌اند. شاخص‌های آماری برای ارزیابی دقت روش‌های معمول و پیشنهادی در محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب در انتهای این بخش ارائه شده‌اند.

روش‌های تجزیه مقطع مرکب: در روش‌های تجزیه مقطع مرکب، معمولاً کانال به سه بخش مجزا شامل مجرای اصلی و دو دشت سیلابی تقسیم شده و با استفاده از رابطه مانینگ، دبی جریان در هر یک از این مقاطع جزئی محاسبه می‌شود (چاو، ۱۹۵۹):

$$Q_i = \frac{A_i R_i^{2/3} S^{1/2}}{n_i} \quad (1)$$

که در آن، Q : دبی جریان، n : بیان‌کننده هر یک از مقاطع جزئی (شماره ۲ برای مقطع اصلی و شماره‌های ۱ و ۳ برای دشت‌های سیلابی)، A و R به ترتیب سطح مقطع جریان و شعاع هیدرولیکی هر یک از مقاطع جزئی با توجه به الگوی تجزیه مقطع مرکب (شکل ۲)، S : شیب طولی کانال و n : ضریب زبری مانینگ می‌باشند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد الگوهای تجزیه قائم، مایل و افقی مقطع مرکب به دلیل در نظر نگرفتن اثر متقابل بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، دبی جریان را به میزان قابل توجهی بیش‌تر یا کم‌تر از مقدار واقعی محاسبه می‌کنند.

پارامتر کوهیرنس مقطع: مطالعات آکرز (۱۹۹۲) نشان داد که مقدار تنش برشی بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به شرایط جریان در این دو بخش بستگی دارد. هرچه اختلاف سرعت در این دو مقطع بیش‌تر باشد، میزان تنش برشی و در نتیجه خطای روش‌های تجزیه مقطع مرکب نیز بیش‌تر می‌شود. او به‌عنوان یک ایده کاربردی، پارامتر بدون‌بعدی به نام کوهیرنس مقطع را معرفی نمود که بیش‌تر 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 (COH) بیان‌کننده میزان تشابه جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی بوده و از نسبت مقادیر پارامترهای هیدرولیکی در دشت سیلابی به مقادیر آن‌ها در مجرای اصلی استفاده می‌کند. این پارامتر به صورت زیر تعریف شده است:

$$COH = \frac{(1 + A_*)^{1/5} / \sqrt{(1 + P_*^{1/33} n_*^2 / A_*^{1/33})}}{1 + A_*^{1/33} / n_* P_*^{1/33}} \quad (2)$$

که در آن، P : محیط مرطوب و زیرنویس * نسبت متغیرها در دشت سیلاب به مقطع اصلی را بیان می‌کند.

روش تجزیه وزنی مقطع مرکب: لامبرت و میرز (۱۹۹۸) با تلفیق روش‌های تجزیه قائم و افقی مقطع مرکب و براساس داده‌های آزمایشگاهی کانال مؤسسه هیدرولیک والینگفورد^۱، رابطه زیر را برای محاسبه سرعت جریان در مقطع اصلی ارائه نمودند:

1- Wallingford

$$V_{mc} = \varepsilon V_{mc-DCM-V} + (1-\varepsilon) V_{mc-DCM-H} \quad (۳)$$

که در آن، V_{mc} : سرعت جریان در مقطع اصلی، $V_{mc-DCM-V}$: سرعت جریان در مقطع اصلی از روش تجزیه قائم مقطع مرکب، $V_{mc-DCM-H}$: سرعت جریان مقطع اصلی از روش تجزیه افقی مقطع مرکب و ε : یک ضریب وزنی است که بین صفر و یک متغیر می‌باشد. مشابه رابطه ۳ نیز برای محاسبه سرعت جریان در دشت‌های سیلابی ارایه شد:

$$V_{fp} = \varepsilon V_{fp-DCM-V} + (1-\varepsilon) V_{fp-DCM-H} \quad (۴)$$

که در آن، زیرنویس fp : برای بیان دشت سیلاب به جای mc (مقطع اصلی) استفاده شده است. در هر دو رابطه ۳ و ۴ فقط ضریب ε مجهول بوده و بقیه پارامترها از الگوهای تجزیه قائم و افقی مقطع مرکب قابل محاسبه است. لامبرت و میرز (۱۹۹۸) این ضریب را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی کانال‌های با مقطع مرکب همگن و غیرهمگن متقارن، به ترتیب ۰/۵ و ۰/۳ و اسنجی نمودند. با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴، سرعت جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی در هر مقطع مرکب دلخواه قابل محاسبه است و با ضرب آن‌ها در سطح مقطع جریان، دبی جریان در هر مقطع به دست خواهد آمد.

روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP): طبیعت همواره مایه الهام پژوهشگران در زمینه‌های مختلف برای طراحی و ارایه الگوریتم‌های ریاضی و محاسباتی بوده است. الگوریتم‌های تکاملی^۱ یکی از این روش‌ها می‌باشند. این الگوریتم‌ها از مدل‌های محاسباتی فرآیندهای تکاملی برای طراحی راه‌حل‌های کامپیوتری استفاده می‌کنند. در ادامه سیر تکاملی روش‌های بهینه‌سازی، روش جستجوی ژنتیکی (یا الگوریتم ژنتیک) نیز دچار تحول شد. روش برنامه‌ریزی ژنتیک (روش اصلاح‌شده الگوریتم ژنتیک)، شاخه‌ای از الگوریتم جستجو و بهینه‌سازی است که برای اولین بار توسط کوزا (۱۹۹۰) ارایه شد. او در روش برنامه‌ریزی ژنتیک، خروجی پیچیده‌ای را براساس محاسبات و برنامه‌ریزی کامپیوتری معرفی نمود. اگرچه ارایه خروجی به صورت برنامه یا مدل بسیار پیچیده‌تر از ارایه یک مقدار برای جواب است اما دارای برتری بسیار مهمی است به طوری که این خروجی عمومی برای بخش وسیعی از پدیده مورد مطالعه قابل تعمیم خواهد بود. در روش برنامه‌ریزی ژنتیک از سیستم درختی یا شاخه‌ای استفاده

می‌شود. هر شاخه نیز از یک مجموعه پایانه (متغیرهای ورودی) و مجموعه توابع (عملگرهای اصلی) تشکیل می‌شود. به این منظور ابتدا بلوک‌هایی که شامل متغیرهای ورودی، تابع هدف و تابع ارتباط‌دهنده آن‌ها می‌باشد، تعریف و سپس ساختار مناسب مدل و ضرایب آن تعیین می‌گردد. برای نشان دادن فضای محاسبات در این روش، در شکل ۲ یک مثال ساده ارائه شده است که عملگرهای +، -، *، /، sin، cos، exp و Sqrtp مجموعه توابع و متغیرهای X و Y و نیز کمیت‌های ثابت pi، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ مجموعه پایانه را تشکیل می‌دهند. در تابع یا مدل نهایی، ارتباط عملگرها با متغیرها به صورت یک ساختار درختی ارائه شده است. فرم ریاضی این تابع نیز استخراج شده است. لازم به ذکر است که برای اجتناب از خطاهای ریاضی مثل تقسیم یک عدد بر صفر و قرار گرفتن اعداد منفی درون رادیکال، از علامت % به جای تقسیم و تابع Sqrtp به جای رادیکال استفاده شده است.

در این الگوریتم ابتدا یک تابع هدف معرفی شده و سپس تابع یاد شده را برای اندازه‌گیری و مقایسه روش‌های مختلف حل، در یک فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها مورد استفاده قرار می‌دهد. در نهایت، روش حل مناسب ارائه می‌شود (کوزا، ۱۹۹۰). فرآیند گام به گام برنامه‌ریزی ژنتیک با ایجاد یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی از توابع مرکب نشان‌دهنده مدل‌های پیش‌بینی شروع می‌شود. سپس هر یک از افراد جمعیت نام‌برده با استفاده از توابع برازش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با هر تولیدمثل، یک جمعیت جدید انتخاب می‌شود. این انتخاب با انجام مراحل زیادی مانند انتخاب یکی از عملگرهای عبور، جهش و کپی، انتخاب تعداد مناسبی از افراد جمعیت حاضر، استفاده از عملگر انتخابی برای تولید فرزند، معرفی فرزند در یک جمعیت جدید و ارزیابی مدل مورد نظر با استفاده از برازش‌های مختلف صورت می‌گیرد. در نهایت مراحل بالا حصول حداکثر تعداد تولید تکرار می‌شوند. برازش هر یک از کروموزوم‌ها یا افراد جمعیت تولید از رابطه زیر قابل ارزیابی است (چپرفیلد، ۱۹۹۴):

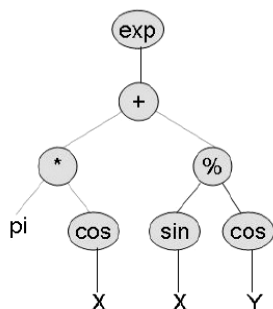
$$f_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |X_j - Y_j|^2 \quad (5)$$

که در آن، f_i : تابع هدف، X_j : مقدار محاسبه شده برای کروموزوم به‌ازای تابع برازش j ، Y_j : مقدار مورد انتظار کروموزوم به‌ازای تابع برازش j و N : تعداد توابع برازش می‌باشد.

Function_Set = [+ , - , * , % , sin , cos , exp , sqrt]

Arity_Set = [2 , 2 , 2 , 2 , 1 , 1 , 1 , 1]

Terminal_Set = [X , Y , pi , 1 , 2 , 3 , 4 , 5]



$$f = \exp\left(\pi \cos(X) + \frac{\sin(X)}{\cos(Y)}\right)$$

```
function z = example(X,Y)
z = exp(pi*cos(X)+(sin(x)/cos(y)));
```

$$(\exp (+ (* \pi (\cos X)) (\% (\sin X) (\cos Y))))$$

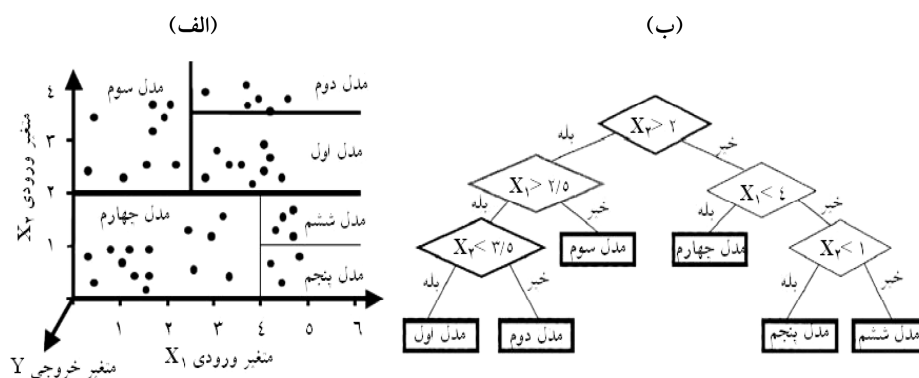
شکل ۴- ساختار درختی ارتباط عملگرها و متغیرها در روش برنامه‌ریزی ژنتیک و نیز رابطه ریاضی نهایی.

مدل درخت تصمیم M5: درخت‌های تصمیم به کمک جداسازی متوالی داده‌ها به یک سری گروه مجزا تشکیل شده و سعی می‌شود در فرآیند جداسازی، فاصله بین گروه‌ها افزایش یابد. ساختار یک مدل درختی شامل ریشه، گره‌های داخلی و برگ می‌باشد. برای اولین بار کوینلان (۱۹۹۲) مدل درخت تصمیم موسوم به M5 را برای پیش‌بینی داده‌های پیوسته ارائه نمود. این مدل، بر خلاف مدل‌های درخت تصمیم معمول که کلاس یا رده‌های گسسته را به‌عنوان خروجی ارائه می‌نمایند، یک مدل خطی چندمتغیره را برای داده‌ها در هر گره از مدل درختی می‌سازد. تشکیل ساختار مدل‌های درخت تصمیم‌گیری شامل مراحل ایجاد درخت و هرس کردن آن است (کوینلان، ۱۹۹۲؛ ویتن و فرانک، ۲۰۰۵). در مرحله ساختن درخت، از یک الگوریتم استنتاجی یا معیار تقسیم برای تولید یک درخت تصمیم استفاده می‌شود. معیار تقسیم برای الگوریتم مدل M5، ارزیابی انحراف معیار مقادیر کلاسی است که به‌عنوان کمیتی از خطا به یک گره می‌رسد و کاهش مورد انتظار در این خطا را به‌عنوان نتیجه آزمون هر صفت در آن گره محاسبه می‌نماید. کاهش انحراف معیار^۱ (SDR) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$SDR = sd(T) - \sum \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \quad (6)$$

1- Standard Deviation Reduction

که در آن، T : بیانگر یک سری نمونه‌هایی است که به گره می‌رسد، T_i : بیانگر نمونه‌هایی است که i امین خروجی سری پتانسیلی را دارند و sd : بیانگر انحراف معیار است. به دلیل فرآیند انشعاب، داده‌های قرار گرفته در گره‌های فرزند، انحراف معیار کم‌تری نسبت به گره مادر داشته و بنابراین خالص‌تر هستند. پس از حداکثرسازی تمامی انشعاب‌های ممکن، $M5$: صفتی را انتخاب می‌کند که کاهش مورد انتظار را بیشینه نماید. این تقسیم بیش‌تر ساختار شبه‌درختی بزرگی را تشکیل می‌دهد که باعث بیش‌برازش می‌گردد. برای غلبه بر مسأله بیش‌برازش، درخت تشکیل شده بایستی هرس شود. این کار با جایگزینی یک درخت فرعی با یک برگ انجام می‌شود. بنابراین، مرحله دوم در طراحی مدل درختی شامل هرس نمودن درخت رشد یافته و جایگزینی درختان فرعی با توابع رگرسیونی خطی است. با این تکنیک، فضای پارامترهای ورودی به زیرفضاهای کوچک‌تر تقسیم شده و در هر کدام از آن‌ها، یک مدل رگرسیونی خطی برازش داده می‌شود (باتاچاریا و سالوماتین، ۲۰۰۶). بعد از این‌که مدل خطی به‌دست آمد برای کمینه کردن خطای تخمین با حذف کردن پارامترها، ساده‌سازی مدل انجام می‌شود. در مدل $M5$ از یک جستجوی حریصانه برای حذف متغیرهایی که مشارکت کمی در مدل دارند، استفاده می‌شود. در شکل ۵ نحوه عملکرد مدل درخت تصمیم $M5$ برای یک مسأله فرضی هر مدل نشان‌دهنده یک معادله رگرسیونی خطی می‌باشد. به‌عنوان مثال اگر $X_1 > 2/5$ و $X_2 > 2$ باشند، آن‌گاه مدل سوم به فرم $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$ مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۵- عملکرد مدل درخت تصمیم $M5$. الف) تقسیم فضای پارامترهای ورودی $(X_1 \times X_2)$ به ۶ ناحیه. ب) بیان معیار تقسیم فضای پارامترهای ورودی به‌صورت درختی (سالوماتین و ژبو، ۲۰۰۴).

تعیین پارامترهای ورودی و خروجی در روش GP و مدل M5: دبی جریان در مقاطع مرکب تابع پارامترهای هندسی و هیدرولیکی زیادی است. در این پژوهش سعی شده است با کم‌ترین داده ورودی، روابط ساده و دقیقی برای محاسبه دبی جریان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی مقاطع مرکب ارائه و پیشنهاد شود. به این منظور مشابه روش‌های آکرز (۱۹۹۲)، هیدرا و والتاین (۲۰۰۲) و عظمت‌الله و ظهیری (۲۰۱۲)، در این پژوهش از پارامترهای عمق نسبی Dr (نسبت عمق جریان در دشت سیلابی به عمق کل جریان)، کوهپرنس مقطع و دبی به‌دست آمده از روش تجزیه قائم مقطع مرکب به‌عنوان ورودی و از دبی جریان در هر یک از مقاطع جزئی به‌عنوان پارامتر خروجی استفاده شده است:

$$Q_{mc} = f(Dr, COH, Q_{mc-DCM-V}) \quad (7)$$

$$Q_{fp} = f(Dr, COH, Q_{fp-DCM-V}) \quad (8)$$

که در آن‌ها، Q_{mc} و Q_{fp} به‌ترتیب دبی مقطع اصلی و دشت سیلابی به‌دست آمده از روش‌های محاسباتی (برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل درخت تصمیم) است.

داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزارهای مورد استفاده: در این پژوهش، برای استخراج روابط پیشنهادی محاسبه دبی جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به کمک مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و درخت تصمیم و نیز ارزیابی دقت آن‌ها، ۱۰۲ سری داده از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی از ۱۴ مقطع مرکب آزمایشگاهی (شامل عمق مقطع لبریز، عرض کف، شیب جانبی، عمق جریان، دبی جریان و ضریب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی و نیز شیب کف کانال) مورد استفاده قرار گرفته است. این داده‌ها از نتایج آزمایشگاهی نایت و سلین (۱۹۸۷)، لامبرت و میرز (۱۹۹۸)، بوسمار و زک (۱۹۹۹)، بوسمار و همکاران (۲۰۰۴) و فرناندز و همکاران (۲۰۱۲) جمع‌آوری شده است. در جدول ۱ محدوده تغییرات پارامترهای هندسی و هیدرولیکی کانال‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مقاطع مرکب مورد استفاده در این پژوهش.

پارامتر	مقدار حداقل	مقدار حداکثر	مقدار میانگین
ارتفاع مقطع لبریز h (متر)	۰/۰۵	۰/۲	۰/۱۰۳
عمق جریان H (متر)	۰/۰۵۸	۰/۳۲	۰/۱۴۸۲
عرض مقطع اصلی b_c (متر)	۰/۰۵	۱/۶	۰/۸۹
عرض دشت سیلاب b_f (متر)	۰/۱۶	۶	۱/۴۹
دبی مقطع پر Q_b (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۰۰۲۳۲۵	۰/۲۱۶۲	۲۲/۲۹
دبی کل جریان Q_r (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۰۰۳	۱/۱۱۴۲	۰/۲۱۴۵
دبی مقطع اصلی Q_{mc} (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۰۰۲۳۲۷	۰/۶۲۷۱	۰/۱۴۹۹
دبی دشت سیلاب Q_f (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۰۰۰۴۶	۰/۶۳۴۰	۰/۰۶۴
شیب کف S .	۰/۰۰۰۹۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲۱

برای استخراج روابط نهایی در روش‌های نوین بهینه‌سازی، ابتدا داده‌ها به دو گروه ۷۰ درصد و ۳۰ درصد به ترتیب برای آموزش (واسنجی) و آزمون (صحت‌سنجی) تقسیم شدند. سپس از نرم‌افزارهای Gene-XPro Tools و WEKA 3.7 به ترتیب برای روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل درخت تصمیم M5 استفاده می‌شود.

تحلیل آماری نتایج رابطه‌های پیشنهادی: برای ارزیابی دقیق‌تر نتایج توزیع دبی جریان به دست آمده از رابطه‌های پیشنهادی این پژوهش (مدل‌های GP و M5) در مقاطع مرکب آزمایشگاهی، از شاخص‌های آماری بیان‌کننده خطا شامل ضریب تعیین (R^2)، میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای مطلق (MAE) به صورت رابطه‌های زیر استفاده شده است:

$$R^2 = \left(\frac{\sum xy}{\sum x^2 \sum y^2} \right)^2 \quad (9)$$

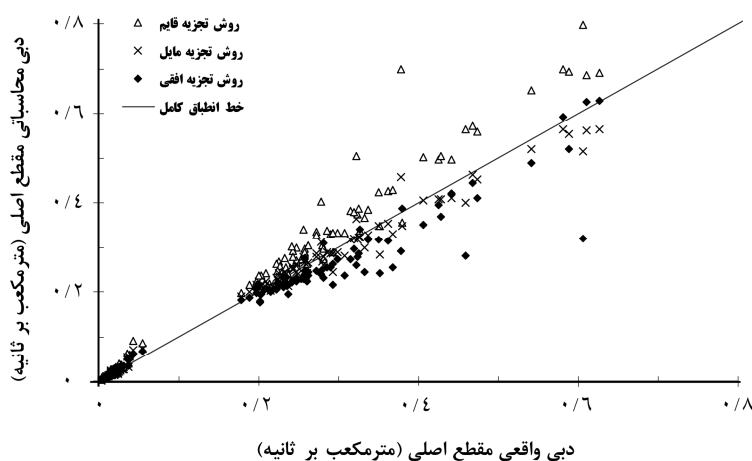
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x - y)^2}{N}} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum \frac{|X - Y|}{X} \times 100}{N} \quad (11)$$

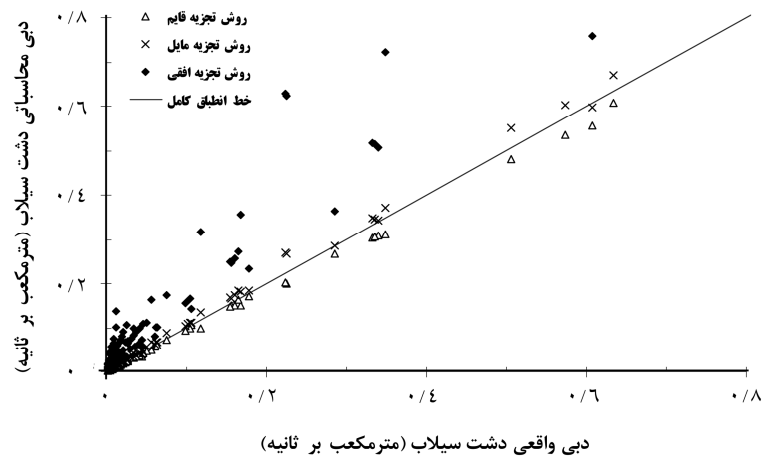
که در آن، $x = X - \bar{X}$ ، $y = Y - \bar{Y}$ ، X : مقدار مشاهداتی، Y : مقدار محاسباتی، \bar{X} : میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{Y} : میانگین مقادیر محاسباتی و N : تعداد داده‌ها است.

نتایج تحقیق

ارزیابی دقت روش‌های تجربی موجود: در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نتایج دبی جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به دست آمده از روش‌های معمول تجزیه مقطع مرکب (شامل تجزیه قائم، مایل و افقی) در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که از بین سه روش تجزیه مقطع مرکب، روش تجزیه مایل دارای دقت و اعتبار بیشتری در محاسبه دبی جریان مقطع اصلی است. اگرچه در دبی‌های بالا، خطای این روش افزایش می‌یابد (مثلاً به‌ازای دبی واقعی ۰/۶ مترمکعب بر ثانیه، دبی محاسباتی حدود ۰/۵۱ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده است که بیانگر بیش از ۱۵ درصد خطا است)، اما به‌طور کلی در صورتی که هیچ روش مناسب‌تری در دسترس نباشد، روش تجزیه مایل به‌عنوان بهترین راه‌حل، قابل توصیه است. برای دشت‌های سیلابی، روش‌های تجزیه قائم و مایل مقادیر دبی جریان را به‌نسبت به خوبی برآورد نموده‌اند اما روش تجزیه افقی در تمام محدوده دبی‌های جریان، دارای خطای زیادی است.

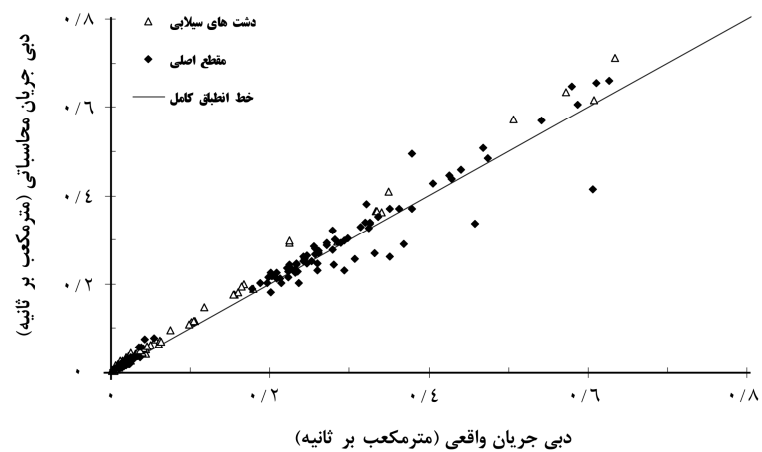


شکل ۶- نتایج دبی جریان مقطع اصلی به دست آمده از روش‌های مختلف تجزیه مقطع مرکب.



شکل ۷- نتایج دبی جریان دشت‌های سیلابی به‌دست آمده از روش‌های مختلف تجزیه مقطع مرکب.

در شکل ۸ نتایج دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌دست آمده از روش تجزیه وزنی ارزیابی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این روش به‌ویژه برای دشت‌های سیلابی، دقت نتایج روش‌های تجزیه معمول را تا حدودی بهبود داده است اما برای دبی مقطع اصلی، نتایج این روش قابل قبول نیست. خطای این روش در دبی‌های زیاد در مقطع اصلی قابل توجه بوده و بنابراین به‌عنوان روشی کارآمد برای محاسبه دبی جریان مقطع اصلی توصیه نمی‌شود.



شکل ۸- نتایج دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌دست آمده از روش تجزیه وزنی مقطع مرکب.

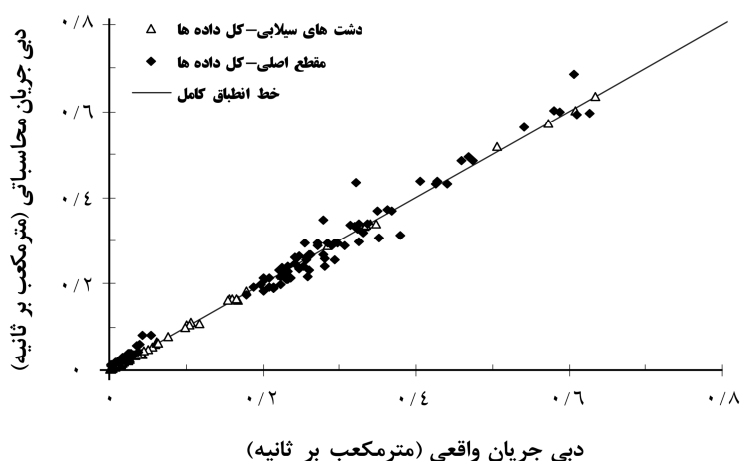
استخراج رابطه‌های پیشنهادی GP و M5: برای افزایش دقت نتایج روش‌های تجربی بالا، رابطه‌های پیشنهادی روش برنامه‌ریزی ژنتیک به ترتیب برای دبی مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به صورت زیر استخراج شده است:

$$Q_{mc} = \frac{Q_{mc-DCM-V}}{\sqrt{Dr - 8/181}} + \frac{e^{Coh} + Q_{mc-DCM-V} - e^{Dr}}{-5/103^3} + Q_{mc-DCM-V} \quad (12)$$

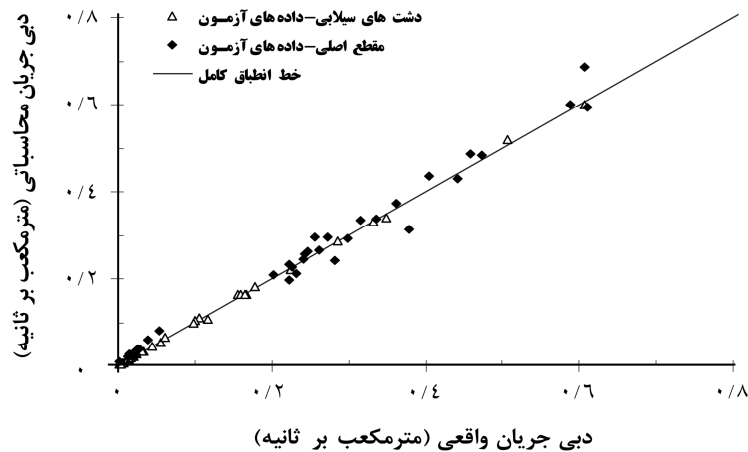
$$Q_{fp} = \frac{Coh^3 (Q_{fp-DCM-V} (Q_{fp-DCM-V} + Coh))^3}{Dr - 1/963} + Q_{fp-DCM-V} + \left[\frac{Q_{fp-DCM-V} (1 - Dr)}{Coh + Q_{fp-DCM-V}} \right]^3 \quad (13)$$

$$+ \frac{Dr^2}{5/222} (Coh + 5.222) \frac{Q_{fp-DCM-V}}{9/495}$$

نتایج این رابطه‌ها در محاسبه دبی جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی در مقاطع مرکب در شکل ۹ ارائه شده است. در این شکل، تمام داده‌ها (هر دو بخش آموزش و آزمون) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دقت نتایج این روش در هر دو حالت و به ویژه برای دشت‌های سیلابی بسیار خوب بوده و بیانگر کارایی فوق‌العاده مناسب رابطه‌های پیشنهادی ۱۲ و ۱۳ می‌باشد. در شکل ۱۰، فقط نتایج مربوط به داده‌های بخش آزمون ارائه شده است. در این حالت نیز نتایج رابطه‌های پیشنهادی برای هر دو مقطع اصلی و دشت سیلاب دارای دقت خوبی می‌باشند.



شکل ۹- نتایج دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به دست آمده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای تمام داده‌ها.



شکل ۱۰- نتایج دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌دست آمده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک در بخش آزمون مدل.

برای مدل درخت تصمیم M5 نیز فرآیند بالا تکرار شد. بر این اساس و برای تعیین دبی جریان در مقطع اصلی دو معادله خطی رگرسیونی به‌صورت زیر به‌دست آمد:

$$\text{If } Q_{mc-DCM-V} \leq 0.143 \text{ Then } Q_{mc} = -0.0155 Dr + 0.0159 COH + 0.5917 Q_{mc-DCM-V} - 0.0019 \quad (14)$$

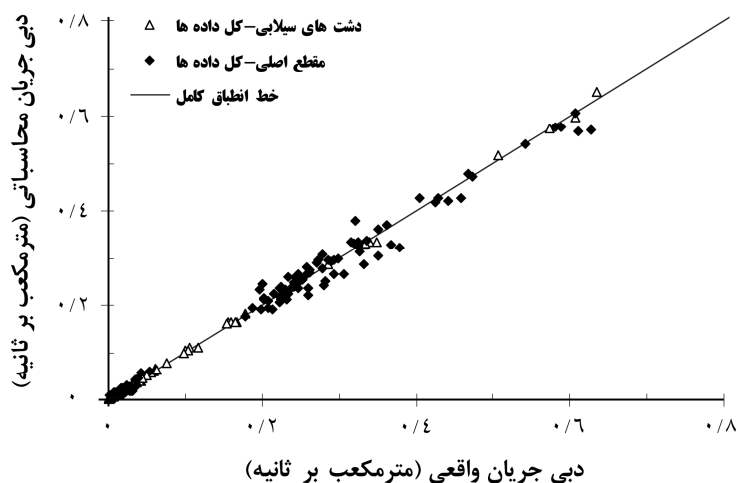
$$\text{If } Q_{mc-DCM-V} > 0.143 \text{ Then } Q_{mc} = -0.1168 Dr + 0.1102 COH + 0.8169 Q_{mc-DCM-V} - 0.0385 \quad (15)$$

برای تعیین دبی دشت‌های سیلابی نیز دو معادله خطی به‌صورت زیر استخراج شد:

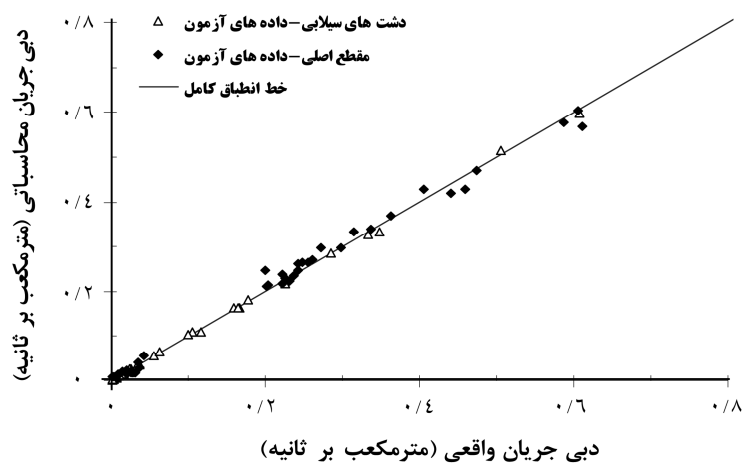
$$\text{If } Q_{fp-DCM-V} \leq 0.048 \text{ Then } Q_{fp} = 0.0006 COH + 1.0813 Q_{fp-DCM-V} - 0.0006 \quad (16)$$

$$\text{If } Q_{fp-DCM-V} > 0.048 \text{ Then } Q_{fp} = 0.3 COH + 1.625 Q_{fp-DCM-V} - 0.231 \quad (17)$$

نتایج این معادله‌ها برای مقاطع مرکب آزمایشگاهی این پژوهش در شکل ۱۱ ارائه شده است. همین نتایج در شکل ۱۲ فقط برای داده‌های بخش آزمون مدل نیز نشان داده شده است. دقت بالا و کارایی مناسب این مدل در تعیین دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی در هر دو بخش داده‌های آموزش و آزمون از این دو شکل کاملاً مشخص است. با توجه به سادگی معادله‌های پیشنهادی و تعداد کم آن‌ها، کاربرد این مدل برای محاسبه دبی جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی توصیه می‌شود.



شکل ۱۱- نتایج دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌دست آمده از مدل درخت تصمیم M5 برای تمام داده‌ها.



شکل ۱۲- نتایج دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌دست آمده از مدل درخت تصمیم M5 برای داده‌های آزمون مدل.

تجزیه و تحلیل آماری نتایج: برای ارزیابی دقیق‌تر نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، محاسبه‌های شاخص‌های آماری نتایج روش‌های مورد استفاده در جدول‌های ۲ و ۳ ذکر شده است. این نتایج برای دبی جریان در هر دو بخش مقطع اصلی دشت‌های سیلابی ارائه شده است.

همان‌طور که از جدول‌های ۲ و ۳ مشخص است، همه روش‌ها دارای ضریب تعیین بسیار بالایی می‌باشند، در حالی‌که بعضی از این روش‌ها از نظر دقت، کارایی مناسبی ندارند. بنابراین نباید تنها ضریب تعیین به‌عنوان مبنا و ملاک تصمیم‌گیری در انتخاب روش بهینه مدنظر قرار بگیرد. این ضریب فقط میزان ارتباط متغیر محاسباتی با متغیر مشاهداتی را نشان داده و دقت پیش‌بینی را اعلام نمی‌کند. با توجه به مقادیر مجذور مربعات خطای ارایه شده در این جدول، مشخص می‌شود که از میان روش‌های مورد بررسی، روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای برآورد دبی جریان در مقطع اصلی مقاطع مرکب آزمایشگاهی دارای دقت بیش‌تری است. مدل درخت تصمیم نیز از قابلیت مناسبی برخوردار بوده و از این نظر قابل توصیه است. در مورد تعیین دبی جریان در دشت‌های سیلابی، روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل M5 (با متوسط خطای حدود ۶ درصد) و حتی روش تجزیه قائم مقطع مرکب (با خطای متوسط حدود ۷ درصد) از نظر مهندسی دارای دقت مناسبی هستند.

جدول ۲- نتایج تحلیل آماری محاسبه‌های روش‌های مورد استفاده در برآورد دبی جریان در مقطع اصلی.

روش مورد استفاده	ضریب تعیین R^2	مجذور مربعات خطا RMSE	متوسط خطای مطلق MAE
تجزیه قائم	۰/۹۹۸	۰/۵۱	۱۸/۹۸
تجزیه افقی	۰/۹۹۷	۰/۳۹	۱۵/۹۱
تجزیه مایل	۰/۹۹۹۹	۰/۰۹۳	۱۱/۰۵
تجزیه وزنی	۰/۹۹۹۰	۰/۰۲۹	۱۴/۱۸
برنامه‌ریزی ژنتیک	۰/۹۹۹	۰/۰۲	۲/۱
مدل درخت تصمیم	۰/۹۹۰۴	۰/۰۱۶۱	۵/۹۷

جدول ۳- نتایج تحلیل آماری محاسبه‌های روش‌های مورد استفاده در برآورد دبی جریان در دشت‌های سیلابی.

روش مورد استفاده	ضریب تعیین R^2	مجذور مربعات خطا RMSE	متوسط خطای مطلق MAE
تجزیه قائم	۰/۹۹۱	۰/۰۱	۶/۷۶
تجزیه افقی	۰/۹۸۹	۰/۱۰۴	۲۴۷
تجزیه مایل	۰/۹۸۹	۰/۱۰۷	۱۰/۷۴
تجزیه وزنی	۰/۹۹۱	۰/۰۱۹۳	۴۰/۷۶
برنامه‌ریزی ژنتیک	۰/۹۹۹	۰/۰۰۲۷	۶/۲۲
مدل درخت تصمیم	۰/۹۹۹	۰/۰۰۳۵	۶/۴۳

نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های نوین بهینه‌سازی برای برآورد دبی تفکیکی جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن‌ها با نتایج روش‌های تجربی مقایسه شده است. براساس ارزیابی‌های انجام شده، یافته‌های مهم زیر قابل ارایه است:

۱- تمامی روش‌های تجزیه مقطع مرکب در برآورد دبی جریان در مقطع اصلی کانال‌های مرکب دارای خطای زیادی است. از میان این روش‌ها، روش تجزیه مایل با خطای متوسط ۱۱ درصد، بهترین کارایی را داشته است. روش تجزیه قائم مقطع مرکب که دارای بیش‌ترین کاربرد در نرم‌افزارهای هیدرولیکی است، با خطای متوسط ۱۹ درصد، کم‌ترین دقت را دارا می‌باشد که با نتایج پژوهش‌های تمامی پژوهشگران هم‌خوانی دارد. نکته جالب توجه این است که برای تعیین دبی جریان در دشت‌های سیلابی، روش تجزیه قائم با خطای متوسط حدود ۷ درصد از دقت مناسبی برخوردار است.

۲- روش تجزیه وزنی مقطع مرکب کارایی چندانی در بهبود نتایج روش‌های معمول تجزیه مقطع مرکب نداشته و دقت آن حتی از دقت روش تجزیه مایل نیز کم‌تر است. این نکته با نتایج مطالعات آتابای (۲۰۰۱) هم‌خوانی داشته اما بر خلاف نتایج مطالعات لامبرت و میرز (۱۹۹۸) است.

۳- روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای مقاطع مرکب همگن و غیرهمگن آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش کارایی و عملکرد بسیار مناسبی داشته است. خطای این روش در برآورد دبی جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به ترتیب حدود ۲/۱ و ۶/۲ درصد به دست آمده است. با توجه به اهمیت محاسبه دقیق دبی مقطع اصلی رودخانه‌ها در شرایط وقوع سیل و دقت مناسب این روش، کاربرد این روش در طرح‌های سامان‌دهی رودخانه و کنترل سیلاب توصیه می‌شود.

۴- مدل درخت تصمیم با خطای متوسط حدود ۶ و ۶/۴ درصد به ترتیب در تخمین دبی جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، دارای کارایی مناسبی بوده و به‌عنوان روشی مناسب قابل توصیه است.

منابع

1. Ackers, P. 1992. Hydraulic design of two-stage channels. *J. Water Maritime Eng.* 96: 247-257.
2. Atabay, S. 2001. Stage-discharge, resistance and sediment transport relationships for flow in straight compound channels. Ph.D. Thesis, The University of Birmingham, England, U.K.
3. Aytak, A., and Kisi, O. 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modelling. *J. Hydrol.* 351: 288-298.

4. Azamathulla, H.Md., and Zahiri, A. 2012. Flow discharge prediction in compound channels using linear genetic programming. *J. Hydrol.* 454-455: 203-207.
5. Azmathullah, H.Md., and Ghani, A. 2011. Genetic programming for predicting longitudinal dispersion coefficients in streams. *Water Resour. Manage.* 25: 1537-1544.
6. Azmathullah, H.Md., Ghani, A., Zakaria, N.A., and Guven, A. 2010. Genetic programming to predict bridge pier scour. *J. Hydraul. Eng.* 136: 3. 165-169.
7. Babovic, V., and Keijzer, M. 2000. Genetic programming as a model induction engine. *J. Hydroinformatics.* 2: 1. 35-60.
8. Bhattacharya, B., Price, R.K., and Solomatine, D.P. 2007. Machine learning approach to modeling sediment transport. *J. Hydr. Eng.* 133: 4. 440-450.
9. Bhattacharya, B., and Solomatine, D.P. 2006. Machine learning in sedimentation modelling, *Neural Networks.* 19: 208-214.
10. Bhattacharya, B., and Solomatine, D.P. 2005. Neural networks and M5 model trees in modeling water level-discharge relationship. *Neuro Computing.* 63: 381-396.
11. Bousmar, D., and Zech, Y. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *J. Hydraul. Eng.* 125: 7. 696-70.
12. Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, H., and Zech, Y. 2004. Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. *J. Hydraul. Eng.* 130: 4. 305-312.
13. Chipperfield, A., Fleming, P.J., Pohlheim, H., and Fonseca, C.M. 1994. Genetic Algorithm Toolbox User's Guide. Research Report 512. Dept. Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, U.K.
14. Chow, V.T. 1959. *Open channel hydraulics.* McGraw-Hill, London.
15. Davidson, J.W., Savic, D.A., and Walters, G.A. 1999. Method for identification of explicit polynomial formulae for the friction in turbulent pipe flow. *J. Hydroinformatics.* 1: 2. 115-126.
16. Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., and Sellin, R.H.J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *J. Hydraul. Eng.* 126: 9. 653-669.
17. Fernandes, J.N., Leal, J.B., and Cardoso, A.H. 2012. Flow structure in a compound channel with smooth and rough floodplains. *European Water,* 38: 3-12.
18. Guven, A., and Gunal, M. 2008. Genetic programming approach for prediction of local scour downstream of hydraulic structures. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134: 2. 241-249.
19. 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.

20. Harris, E.L., Babovic, V., and Falconer, R.A. 2003. Velocity predictions in compound channels with vegetated floodplains using genetic programming. *Int. J. Riv. Basin Manage.* 1: 2. 117-125.
21. Hu, C., Ju, Z., and Guo, Q. 2010. Flow movement and sediment transport in compound channels. *J. Hydraul. Res.* 48: 1. 23-32.
22. Huthoff, F., Roose, P.C., Augustijn, D.C.M., and Hulscher, S.J.M.H. 2008. Interacting divided channel method for compound channel flow. *J. Hydraul. Eng.* 134: 8. 1158-1165.
23. Jazizadeh, F., and Zarrati, A.R. 2008. Development of a three-dimensional numerical model to solve shallow-water equations in compound channels. *Canadian J. Civil Eng.* 35: 9. 963-974.
24. Khu, S.T., Liong, S.Y., Babovic, V., Madsen, H., and Muttill, N. 2001. Genetic programming and its application in real-time runoff forecasting. *J. Am. Wat. Resour. Assoc.* 37: 439-451.
25. Kizhisseri, A.S., Simmonds, D., Rafiq, Y., and Borthwick, M. 2005. An evolutionary computation approach to sediment transport modeling. 5th Int. Conf. on Coastal Dynamics, ASCE, Barcelona, Spain.
26. Knight, D.W., and Sellin, R.H.J. 1987. The SERC flood channel facility. *J. Inst. Water Environ. Manage.* 1: 2. 198-204.
27. Koza, J.R. 1990. Genetic programming: A paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems. Stanford University, Computer Science Dept. Technical Report STAN-CS-90-1314.
28. Lambert, M.F., and Myers, R.C. 1998. Estimating the discharge capacity in straight compound channels. *Water, Maritime and Energy.* 130: 84-94.
29. Liong, S.Y., Gautam, T.R., Khu, S.T., Babovic, V., and Muttill, N. 2002. Genetic Programming: A new paradigm in rainfall-runoff modelling. *J. Am. Wat. Resour. Assoc.* 38: 3. 705-718.
30. Londhe, S.N., and Dixit, P.R. 2011. Stream flow forecasting using model trees. *Int. J. Earth Sci. Engine.* 4: 6. 282-285.
31. Martin, L.A., and Myers, R.C. 1991. Measurement of overbank flow in a compound river channel. *J. Inst. Water Environ. Manage.* 91: 2. 645-657.
32. Myers, R.C., and Lyness, J.F. 1997. Discharge ratios in smooth and rough compound channels. *J. Hydraul. Eng.* 123: 3. 182-188.
33. Pal, M. 2006. M5 model tree for land cover classification. *Inter. J. Rem. Sens.* 27: 4. 825-831.
34. Pal, M., and Deswal, S. 2009. M5 model tree based modeling of reference evapotranspiration. *Hydr. Process.* 23: 1437-1443.
35. Quinlan, J.R. 1992. Learning with continuous classes. P 343-348, In: *Proceedings of 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Singapore.

- 36.Reddy, M.J., and Ghimire, B.N.S. 2009. Use of Model tree and Gene expression programming to predict the suspended sediment load in rivers. *J. Intelligent Systems*. 18: 3. 211-227.
- 37.Shiono, K., and Knight, D.W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *J. Fluid Mech.* 222: 617-646.
- 38.Shiono, K., and Lin, B. 1992. Pollutant behavior influenced by secondary flow using a 3-dimensional numerical-model in 2-stage open-channel flows. P 269-274, In: *Int. Symposium on Hydraulic Research in Nature and Laboratory, China*.
- 39.Solomatine, D.P., and Dulal, K. 2003. Model tree as an alternative to neural network in rainfall-runoff modeling. *Hydr. Sci. J.* 48: 3. 399-411.
- 40.Solomatine, D.P., and Xue, Y. 2004. M5 model trees and neural networks: Application to flood forecasting in the upper reach of the Huai river in China. *J. Hydrol. Eng.* 9: 6. 1-10.
- 41.Van Prooijen, B.C., Battjes, J.A., and Uijttewaal, W.S.J. 2005. Momentum exchange in straight uniform compound channel flow. *J. Hydraul. Eng.* 131: 175-183.
- 42.Witten, I.H., and Frank, E. 2005. *Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations*. Morgan Kaufmann:San Francisco, 664p.
- 43.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.
- 44.Zahiri, A., and Azamathulla, M.Hd. 2014. Genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels. *Neuarl Comput. Applic.* 24: 2. 413-420.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(1), 2015
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Computation of the main channel and flood plains discharges using new methods of optimization

***A.R. Zahiri¹, M. Salehi² and Kh. Ghorbani¹**

¹Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ²M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Engineering, Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 10/29/2013; Accepted: 12/28/2014

Abstract

Due to momentum exchange between main channel and flood plains, the flow hydraulic in compound channels is complicate. Most studies in this area are focused on prediction of the average cross sectional velocity and total flow discharge, while distribution of flow rate in the main channel and the flood plains is also important. In flood conditions and during the spill of water onto the flood plains, the bed load and suspended sediment load are transported mainly by the main channel flow discharge and floodplain flow has very little effect. Moreover, for simulation of river morphology, the individual velocity and shear stress in the main channel and floodplains are needed and utilizing the average cross sectional velocity led to erroneous results. In this study, using 102 laboratory stage-discharge data from canals with compound channel sections, the individual flow discharges in the main channel and floodplains are calculated with aid of two new optimization methods of Genetic Programming and Decision Tree Model and then compared with one-dimensional empirical methods. Results show that these two new methods with mean error of 2.1 and 6 %, respectively, have appropriate ability for main channel's flow discharge prediction. Among the empirical methods, the vertical divided channel method with mean error of 19% has the largest error in this regard. For floodplain's flow discharge prediction, in addition to Genetic Programming and Decision Tree Models, the vertical divided channel method has considerable accuracy.

Keywords: Compound channels, Main channel flow rate, Genetic programming, Decision tree model, Experimental data

* Corresponding Author; Email: zahiri_reza@yahoo.com