



دانشگاه گوارزی و منابع طبیعی گرگان

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد نوزدهم، شماره چهارم، ۱۳۹۱

<http://jwsc.gau.ac.ir>

مدل‌سازی دبی رودخانه‌های سیلابی با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک

*عبدالرضا ظهیری^۱، پروین اقبالی^۲ و محمدعلی قربانی^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۵/۲

چکیده

تعیین دبی سیل در رودخانه‌ها یکی از اجزاء اصلی طراحی پروژه‌های مهندسی رودخانه است. با ورود جریان سیل در دشت‌های سیلابی و تغییر ناگهانی هندسه رودخانه، روابط ساده مقاومت جریان قابل استفاده نیستند. به همین دلیل روش‌های زیادی برای اصلاح محاسبه‌ها دبی جریان ارائه شده‌اند. بیش‌تر این روش‌ها در شرایط آزمایشگاهی دارای نتایج خوبی بوده، اما تعمیم آن‌ها برای همه شرایط هندسی و هیدرولیکی رودخانه‌ها دشوار است. در دهه اخیر روش‌های هوش مصنوعی به‌خاطر قابلیت شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده، کاربرد زیادی در زمینه‌های مختلف مهندسی آب یافته‌اند. برنامه‌ریزی ژنتیک که جزو الگوریتم‌های تکاملی محسوب می‌شود، قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن بوده و رابطه صریحی براساس متغیرها و پارامترهای فرایند ارائه می‌نماید. در این پژوهش، با استفاده از حدود ۳۹۴ داده دبی-اشل از ۳۰ مقطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی و به کمک برنامه‌ریزی ژنتیک، رابطه‌ای بدون بعد براساس پارامترهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه برای محاسبه دبی جریان سیل ارائه شده است. مدل‌سازی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی انجام شده است که در هر دو مرحله، نتایج محاسباتی دبی سیلاب در مقایسه با دبی مشاهداتی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. ضریب تعیین برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب حدود ۰/۹۹ و ۰/۹۶ به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ژنتیک، رابطه دبی-اشل، رودخانه‌های سیلابی، دشت‌های سیلابی

*مسئول مکاتبه: zahiri_reza@yahoo.com

مقدمه

یکی از موارد مهم و معمول در مهندسی رودخانه، تعیین رقوم سطح آب به‌ازای دبی جریان سیلاب می‌باشد. برآورد رابطه دبی- اشل برای شرایط جریان عادی یک رودخانه، با استفاده از روابط مقاومت جریان مانند رابطه شزی و مانینگ به سادگی امکان‌پذیر است، اما در شرایط سیلاب، این محاسبه‌ها پیچیده است. رودخانه‌های آبرفتی در شرایط وقوع سیل ترکیبی از یک مجرای عمیق اصلی^۱ و یک یا دو دشت سیلابی^۲ هستند که به اصطلاح به این حالت، مقطع مرکب^۳ گفته می‌شود. با ورود جریان به دشت‌های سیلابی و کاهش ناگهانی شعاع هیدرولیکی، استفاده از رابطه مانینگ برای محاسبه دبی جریان هم‌زمان با خطای بسیار زیادی خواهد بود. به همین دلیل، باید محاسبه‌های تعیین دبی جریان برای مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی به‌صورت جداگانه انجام شود. با توجه به عمق کم جریان و نیز ضریب زبری بالای دشت‌های سیلابی، سرعت جریان در این ناحیه بسیار کم است. اختلاف سرعت این ناحیه با سرعت جریان در مجرای اصلی، باعث ایجاد تنش برشی در عرض رودخانه می‌شود (ورم‌لیتون و مرت، ۱۹۹۰؛ آکرز، ۱۹۹۲). روش‌های تفکیک مقطع عرضی رودخانه به بخش‌های مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی مبتنی بر فرض ناچیز بودن تنش برشی در مرز تماس این بخش‌ها است که طبق بررسی‌های پژوهش‌گران، این فرض نادرست است. این فرض حتی تا ۶۳ درصد خطا در محاسبه دبی جریان نیز وارد می‌کند (لای و بسیج، ۲۰۰۴). به همین دلیل روش‌های زیادی به‌منظور اصلاح روش تفکیک مقطع رودخانه انجام شده است که روش دوبعدی تحلیلی (شیونو و نایت، ۱۹۸۸)، روش فاکتور اصلاح ϕ (ورم‌لیتون و مرت، ۱۹۹۰)، روش نیمه‌تحلیلی کوهیرنس (آکرز، ۱۹۹۲)، روش شبه‌دوبعدی مبتنی بر طول اختلاط پرانتل (لامبرت و سلین، ۱۹۹۶)، روش تجزیه وزنی مقطع (لامبرت و میرز، ۱۹۹۸)، روش تبادل دبی (بوسمار و زخ، ۱۹۹۹)، روش شبه‌دوبعدی تحلیلی (اروین و همکاران، ۲۰۰۰) و روش اصلاحی تجزیه وزنی مقطع (آتابای و نایت، ۲۰۰۶) از جمله مهم‌ترین روش‌ها می‌باشند. این روش‌ها براساس داده‌های آزمایشگاهی توسعه داده شده‌اند به همین دلیل ممکن است قابلیت تعمیم به همه رودخانه‌ها و کانال‌های آزمایشگاهی را نداشته باشند. بنابراین اگر رابطه ساده و دقیقی برای تعیین دبی سیل ارایه شود که برای شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی رودخانه‌ها قابلیت کاربرد داشته باشد، بسیار مفید خواهد بود. استفاده از

- 1- Main Channel
- 2- Floodplains
- 3- Compound Channels

روش‌های نوین مبتنی بر بهینه‌سازی هوشمند برای این منظور ایده مناسبی است. لیو و جیمز (۲۰۰۰) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، رابطه دبی-اشل در مقاطع مرکب آزمایشگاهی پیچانرود را شبیه‌سازی نمودند. حداکثر خطا در برآورد دبی کل جریان در این مطالعه، ۱۵ درصد گزارش شده است. حسینی (۲۰۰۴)، با مطالعه نتایج آزمایشگاهی روابط دبی-اشل مقاطع مرکب همگن و با مسیر مستقیم، روابطی را برای تعیین سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ارائه نمود. ظهیری و دهقانی (۲۰۰۹)، شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای استخراج رابطه دبی-اشل مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای با مسیر مستقیم استفاده نمودند. نیک‌مهر و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از شبکه‌های عصبی و روش فازی، پروفیل عرضی سرعت در مقاطع مرکب آزمایشگاهی را شبیه‌سازی نمودند. اگرچه کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، برتری بسیار مناسبی نسبت به روش‌های محاسباتی دارد اما محدودیت مهم آن این است که رابطه صریحی را برای بیان ارتباط بین متغیر اصلی موردنظر و متغیرهای اساسی مورد مطالعه ارائه نمی‌نماید. اوانال و همکاران (۲۰۱۰) نتایج شبکه عصبی مصنوعی را با نتایج مدل‌های یک و دوبعدی تخمین جریان در مقاطع مرکب مستقیم را مورد مقایسه قرار دادند. این مقایسه نشان داد که نتایج شبکه عصبی مصنوعی، دارای دقت بهتری نسبت به مدل‌های ریاضی است. ظهیری و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، رابطه ساده و صریحی را برای محاسبه دبی سیل در رودخانه‌ها ارائه نمودند.

با ادامه سیر تکاملی روش‌های هوشمند، امروزه برنامه‌ریزی ژنتیک^۱ در زمینه مهندسی آب به‌عنوان ابزاری مناسب برای مدل‌سازی مسایل مربوط به تعیین ساختار پدیده‌ها مطرح شده است. تاکنون این روش در استخراج رابطه ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ در جریان متلاطم در لوله‌ها (داویدسون و همکاران، ۱۹۹۹)، تعیین افت مازاد ناشی از پوشش گیاهی (بابوویچ و کیچزر، ۲۰۰۰)، شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت در کانال‌های مرکب با پوشش گیاهی (هریس و همکاران، ۲۰۰۳)، تعیین ضریب مقاومت شزی برای مجاری متخلخل (جیوستولسی، ۲۰۰۴)، مدل‌سازی انتقال رسوب معلق رودخانه‌ها (کیژی‌سری و همکاران، ۲۰۰۵؛ آیتک و کیشی، ۲۰۰۸) پیش‌بینی آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب (گوون و گونال، ۲۰۰۸)، پیش‌بینی دبی جریان روزانه رودخانه لیکوان (فرودفام و همکاران، ۲۰۰۹) برآورد عمق نهایی آب‌شستگی پایه پل‌ها (عظمت‌الله و همکاران، ۲۰۱۰) و برآورد ضریب پخش مواد آلاینده در رودخانه‌ها (عظمت‌الله و همکاران، ۲۰۱۱) کاربرد داشته است.

1- Genetic Programming (GP)

با بررسی منابع موجود مشخص شد که تاکنون روش برنامه‌ریزی ژنتیک کاربرد محدودی در زمینه مهندسی هیدرولیک و هیدرولوژی داشته است. با توجه به ویژگی منحصر به فرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک در ارائه روابط صریح و دقیق بدون بعد، در این پژوهش سعی شده است رابطه مناسبی برای برآورد دبی جریان سیل در کانال‌ها و رودخانه‌های با مقطع مرکب ارائه شود. در این صورت محاسبه دبی سیل با دقت و سرعت زیادی امکان‌پذیر خواهد بود در حالی که روش‌های پیشنهادی توسط پژوهش‌گران مختلف دارای محاسبات طولانی و زمان‌بر بوده و نیاز به حل عددی معادلات دیفرانسیل و سعی و خطا دارند. به این منظور از داده‌های ۳۰ کانال آزمایشگاهی و رودخانه سیلابی با مسیر مستقیم و با شرایط زبری همگن و غیرهمگن استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب: روش متداول برای محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب، روش تجزیه قائم مقطع مرکب است که در آن، مقطع مرکب به مقاطع جزئی (مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی) تقسیم شده و با استفاده از رابطه مانینگ، دبی جریان در هر یک از این مقاطع جزئی به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. دبی کل جریان از مجموع این دبی‌های جزئی به دست می‌آید (چاو، ۱۹۵۹):

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

که در آن، Q : دبی کل جریان، i : بیان‌کننده هر یک از مقاطع جزئی (مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی)، N : تعداد کل مقاطع جزئی، A : سطح مقطع جریان، R : شعاع هیدرولیکی هر یک از مقاطع جزئی، S : شیب طولی کانال و n ضریب زبری مانینگ می‌باشند. نحوه تفکیک و جداسازی مقاطع اصلی و دشت‌های سیلابی در روش معمول برای یک مقطع مرکب منظم در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مقطع مرکب و تجزیه آن به مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی.

همان‌طورکه اشاره شد روش بالا با وجود سادگی محاسبه‌ها، به دلیل در نظر نگرفتن تنش برشی بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، دبی کل جریان را به میزان قابل توجهی بیش‌تر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. این خطا در کانال‌های آزمایشگاهی و رودخانه‌های طبیعی تا ۶۰ و ۴۰ درصد نیز گزارش شده است (لای و بسیج، ۲۰۰۴؛ مارتین و میرز، ۱۹۹۱).

داده‌های مورد استفاده: در این پژوهش، از ۳۹۴ سری داده هندسی و هیدرولیکی از ۳۰ مقطع مرکب در شرایط مختلف آزمایشگاهی و صحرایی استفاده شده است. داده‌های آزمایشگاهی از نتایج آزمایشگاهی پژوهش‌گران مختلفی مانند بلالوک و استورم (۱۹۸۱)، نایت و دیمتریو (۱۹۸۳)، نایت و سلین (۱۹۸۷)، لامبرت و سلین (۱۹۹۶)، میرز و لینس (۱۹۹۷)، لامبرت و میرز (۱۹۹۸)، بوسمار و زخ (۱۹۹۹) هیدرا و والتاین (۲۰۰۲)، لای و بسیج (۲۰۰۴)، آتابای و نایت (۲۰۰۶) و بوسمار و همکاران (۲۰۰۴) جمع‌آوری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. داده‌های صحرایی مقاطع مرکب از مقادیر اندازه‌گیری شده عمق و دبی جریان رودخانه‌های سورن^۱ (آکرز، ۱۹۹۲؛ نایت و همکاران، ۱۹۸۹) و مین^۲ (مارتین و میرز، ۱۹۹۱) در انگلستان و رودخانه ریو کلرادو^۳ در کشور آرژانتین (تراب و وبر، ۲۰۰۴) استخراج شده‌اند. در جدول ۱، محدوده تغییرات هندسی و هیدرولیکی این مقاطع ارائه شده است. در شکل ۲، متغیرهای مورد استفاده در این مقاله در یک مقطع مرکب نشان داده شده است.

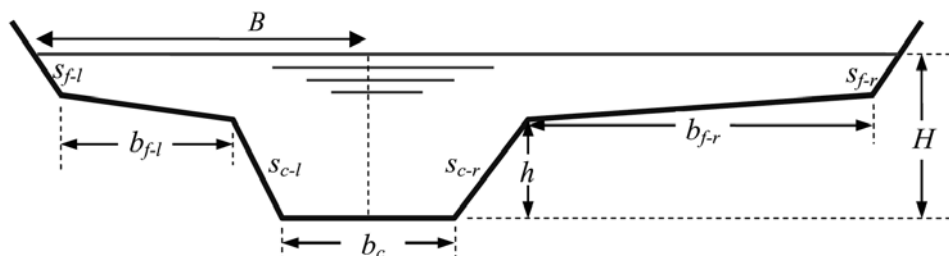
جدول ۱- محدوده تغییرات هندسی و هیدرولیکی مقاطع مرکب مورد استفاده در این پژوهش.

پارامتر	علامت	محدوده تغییرات
ارتفاع مقطع لبریز (متر)	h	۰/۰۳۱-۶
عرض مقطع اصلی (متر)	b_c	۰/۱۵۲-۲۱/۴
عرض دشت‌های سیلابی (متر)	b_f	۰-۶۳
شیب جانبی مقطع اصلی	s_c	۰-۲
شیب جانبی دشت‌های سیلابی	s_f	۰-۷/۱
شیب عرضی بستر دشت‌های سیلابی	b_i	۰-۰/۰۶۲
ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی	n_c	۰/۰۱-۰/۰۳۶
ضریب زبری دشت‌های سیلابی	n_f	۰/۰۱-۰/۰۵
شیب طولی	S_0	۰/۰۰۰۱۹-۰/۰۰۵
عمق جریان (متر)	H	۰/۰۳۶-۷/۸۱
دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)	Q	۰/۰۰۳-۵۶۰

1- River Severn

2- River Main

3- Rio Colorado



شکل ۲- نمایش متغیرهای مورد استفاده در یک مقطع مرکب طبیعی.

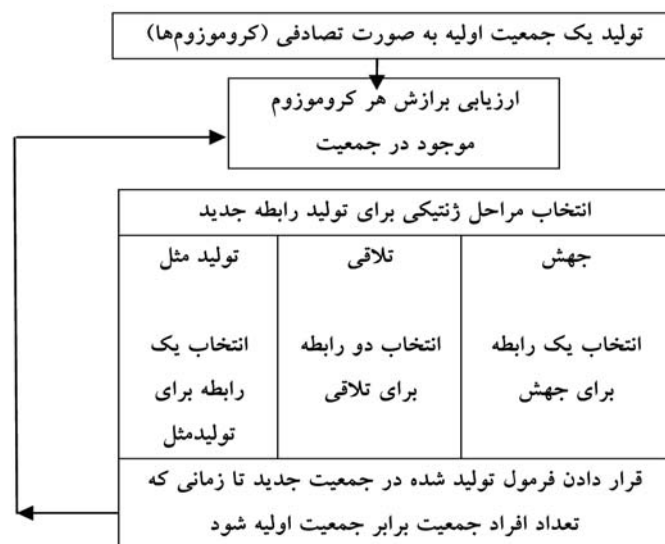
با استفاده از پارامترهای جدول ۱ و شکل ۲، پارامترهای بدون بعد به صورت عمق نسبی $D_r = \frac{H-h}{H}$ ، عرض نسبی دشت سیلابی $B_r = \frac{b_f}{B}$ (مطابق شکل ۲، B ، نصف عرض فوقانی سطح آب است)، عرض نسبی مقطع اصلی $B_c = \frac{b_c}{B}$ ، زبری نسبی $n_r = \frac{n_f}{n_c}$ ، فاکتور شکل $S_r = \frac{b_c}{h}$ ، S_c ، S_f ، b_i و کوهیرنس مقطع COH برای هر یک از مقاطع مرکب تعریف شد. با توجه به این که ممکن است متغیرهای هندسی در سمت چپ و راست مقاطع مرکب متفاوت باشند، بنابراین به طور کلی ۱۵ پارامتر بدون بعد به عنوان پارامترهای ورودی و دبی نسبی (نسبت دبی کل مقطع به دبی مقطع پُر یا Q/Q_b) به عنوان پارامتر خروجی انتخاب گردید. لازم به ذکر است که دبی مقطع پُر به کمک رابطه مانینگ و براساس هندسه مقطع پُر رودخانه قابل محاسبه است.

پارامتر بدون بعد کوهیرنس، پارامتری است که بیش تر متغیرهای هندسی و هیدرولیکی یک مقطع مرکب را دربر گرفته و میزان اثر متقابل بین مقطع اصلی و دشت سیلابی را بیان می کند. این پارامتر به صورت زیر تعریف می شود (آکرز، ۱۹۹۲):

$$COH = \frac{(1 + A_*) \sqrt{[(1 + A_*) / (1 + f_* P_*)]}}{1 + A_* \sqrt{(A_* / f_* P_*)}} \quad (2)$$

که در آن، A : سطح مقطع، P : محیط مرطوب و f : ضریب اصطکاک دارسی- ویسباخ است. اندیس * برای بیان نسبت متغیرها در دشت‌های سیلابی به مقطع اصلی است به این صورت که $A_* = A_f / A_c$ ، $f_* = f_f / f_c$ و $P_* = P_f / P_c$

برنامه‌ریزی ژنتیک: برنامه‌ریزی ژنتیک شاخه‌ای از الگوریتم گردشی است که برای اولین بار توسط کوزا (۱۹۹۲) ارائه شد، با این تفاوت که در این روش به‌جای نوارهای بیت از سیستم درختی یا شاخه‌ای استفاده می‌شود. هر شاخه نیز از یک مجموعه پایانه (متغیرهای ورودی) و مجموع توابع (عملگرهای اصلی) تشکیل می‌شود که مبنای همه این روش‌ها براساس نظریه تکاملی داروین استوار است. برنامه‌ریزی ژنتیک از روش‌های نوین در بین روش‌های الگوریتم گردشی محسوب می‌شود که به‌دلیل دارا بودن دقت کافی، به‌عنوان مرسوم‌ترین شیوه بوده و از کاربرد بیش‌تری برخوردار است. در برنامه‌ریزی ژنتیک، ابتدا بلوک‌هایی که شامل متغیرهای ورودی، تابع هدف و تابع ارتباط‌دهنده آن‌ها می‌باشد، تعریف و سپس ساختار مناسب مدل و ضرایب آن تعیین می‌گردد. این روش توانایی استخراج رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی را دارد و همچنین به‌صورت خودکار متغیرهایی که در مدل بیش‌ترین تأثیر را دارند، انتخاب و متغیرهای کم‌اهمیت را حذف می‌کند. یکی از مهم‌ترین مواردی که باید در این روش مورد توجه قرار داد، انتخاب ورودی‌های مناسب مدل می‌باشد و این امر در شرایطی که از داده‌های ورودی ثانویه نیز بهره برده شود، از اهمیت مضاعفی برخوردار خواهد بود، زیرا معرفی داده‌های ورودی کم‌اهمیت، سبب کاهش دقت مدل و ایجاد مدل‌های پیچیده‌تری می‌شود که تفسیر آن‌ها با دشواری‌های بیش‌تری مواجه می‌گردد. در شکل ۳ گام‌های اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک نشان داده شده است.



شکل ۳- شکل کلی گام‌های اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک (فربودفام و همکاران، ۲۰۰۹).

الگوریتم‌های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع یاد شده را برای اندازه‌گیری و مقایسه روش‌های مختلف حل، در یک فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها به کار گرفته و در نهایت، روش حل مناسب را ارایه می‌نمایند. فرآیند گام به گام برنامه‌ریزی ژنتیک به صورت مراحل زیر است:

۱- ایجاد یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی از توابع مرکب نشان‌دهنده مدل‌های پیش‌بینی.

۲- ارزیابی هر یک از افراد جمعیت نام برده با استفاده از توابع برازش.

۳- انتخاب یک جمعیت جدید در هر تولیدمثل با انجام مراحل:

الف- انتخاب یکی از عملگرهای عبور، جهش و کپی

ب- انتخاب تعداد مناسبی از افراد جمعیت حاضر

ج- استفاده از عملگر انتخابی برای تولید فرزند

د- وارد شدن فرزند یاد شده در یک جمعیت جدید

ه- ارزیابی مدل موردنظر با استفاده از برازش‌های مختلف

۴- تکرار گام سوم تا رسیدن به حداکثر تعداد تولید.

برازش هر یک از کروموزوم‌ها یا افراد جمعیت تولید در برنامه‌ریزی ژنتیک از رابطه زیر قابل ارزیابی

است که تابع هدف^۱ را بیان می‌کند:

$$f = \sum_{j=1}^N (|X_j - Y_j|) \quad (3)$$

که در آن، 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.

در روش برنامه‌ریزی ژنتیک، معمولاً حداکثر تعداد کروموزوم‌ها در یک حد معینی محدود می‌شود

تا از افزایش شدید کروموزوم‌ها و کاهش نرخ همگرایی جلوگیری شود (برامیر و بنتزف، ۲۰۰۱).

مدل‌سازی ژنتیکی و تجزیه و تحلیل نتایج: دبی جریان در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای تابع عمق نسبی، عرض نسبی، زبری نسبی، شیب‌های جانبی مقطع اصلی و دشت سیلابی، شیب طولی،

شیب عرضی دشت سیلابی و تعداد دشت‌های سیلابی است. بنابراین براساس بی‌بعدسازی متغیرهای ورودی و خروجی، رابطه کلی زیر قابل استفاده است:

$$\frac{Q}{Q_b} = f(D_r, B_r, n_r, s_c, s_f, S_0, b_i, N_f, COH) \quad (4)$$

که در آن، N_f : تعداد دشت‌های سیلابی است.

برای انجام این پژوهش و استخراج رابطه‌ای صریح برای متغیر خروجی مدل، ابتدا داده‌ها به صورت تصادفی به دو گروه آموزش (حدود ۷۰ درصد داده‌ها معادل ۲۷۶ داده) و آزمون (حدود ۳۰ درصد داده‌ها معادل ۱۱۸ داده) تقسیم شدند. این کار در بیش‌تر مطالعات مبتنی بر روش‌های نوین محاسباتی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، مدل درخت تصمیم و برنامه‌ریزی ژنتیک انجام می‌شود. سپس با استفاده از نرم‌افزار Gene Xpro Tools و براساس بهترین مقدار شاخص‌های آماری (یا توابع برازش R ، $RMSE$ و...) معادله‌ای به صورت رابطه ۵ برای پیش‌بینی دبی نسبی مقاطع مرکب برای داده‌های بخش واسنجی مدل استخراج گردید. نحوه استخراج معادله نهایی در روش برنامه‌ریزی ژنتیک در بخش فرایند گام به گام مدل‌سازی این روش توضیح داده شده است.

$$\frac{Q}{Q_b} = n_{r-r} \left(COH + s_r s_f (-v/vv - b_i - r) \right) S_c + B_r \left(\left((v/526 COH)^{COH} \right)^{v/96 B_i} \right)^{D_r \times COH} \quad (5)$$

$$+ ((s_{f-l} + 5/0785) D_r - n_{r-l}) \times (2D_r + S_c) + (n_{r-l} - 5/6749 B_r) - (s_{c-l} - n_{r-r} - n_{r-l}) D_r^2$$

که در آن، اندیس‌های l و r (زیرنویس‌های دوم) به ترتیب بیانگر بخش‌های سمت چپ و راست رودخانه است، مثلاً n_{r-l} و n_{r-r} به ترتیب زبری نسبی دشت‌های سیلابی سمت چپ و راست است. بررسی پارامترهای بدون بعد رابطه بالا نشان می‌دهد که از میان پارامترهای ورودی، تعداد دشت‌های سیلابی (N_f) به عنوان یک پارامتر مجزا اهمیت چندانی نداشته و حذف شده است. دلیل این مسأله این است که این پارامتر در بیش‌تر متغیرهای بدون بعد هندسی در نظر گرفته شده در این پژوهش دخالت دارد. در جدول ۲، پارامترهای نهایی مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (رابطه ۵) ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای نهایی مدل برنامه‌ریزی ژنتیک.

پارامتر	مقادیر / نوع
تعداد کروموزوم‌ها	۳۰
تعداد ژن‌ها	۳
عملگرهای ریاضی به‌کار برده شده	+, -, ×, /, توان
عملگر ریاضی بین ژن‌ها	جمع
سرعت جهش	۰/۰۴۴
سرعت وارونگی (Inversion rate)	۰/۱
سرعت تلاقی یک نقطه‌ای (One-point recombination rate)	۰/۳
سرعت تلاقی دو نقطه‌ای (Two-point recombination rate)	۰/۳
سرعت تلاقی ژن‌ها (Gene recombination rate)	۰/۱
سرعت جابجایی ژن‌ها (Gene transposition rate)	۰/۱

بعد از استخراج رابطه ۵ برای داده‌های بخش آموزش یا واسنجی، همین رابطه برای داده‌های بخش آزمون نیز مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی دقت نتایج محاسباتی این روش در مراحل آموزش و آزمون، از پارامترهای آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE)، متوسط خطا (AE) و متوسط قدرمطلق انحراف داده‌ها (δ) به‌صورت زیر استفاده شده است:

$$R^2 = \left(\frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \right)^2 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2}{n}} \quad (7)$$

$$AE = \frac{\sum \frac{X - Y}{X} \times 100}{n} \quad (8)$$

$$\delta = \frac{\sum |X - Y| \times 100}{\sum X} \quad (9)$$

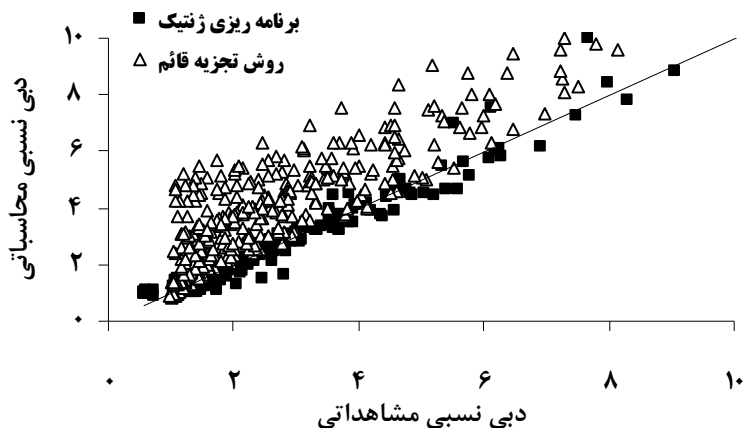
که در آن‌ها، $x = X - \bar{X}$ ، $y = Y - \bar{Y}$ ، مقدار مشاهداتی، X : مقدار مشاهداتی، Y : مقدار محاسباتی، \bar{X} : میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{Y} : میانگین مقادیر محاسباتی و n : تعداد داده‌ها است.

در شکل‌های ۴ و ۵، نتایج مقایسه دبی نسبی محاسباتی از روش تجزیه قائم مقطع مرکب یا DCM (رابطه ۳) و دبی نسبی مشاهداتی به ترتیب برای داده‌های مراحل آموزش و آزمون مدل پیشنهادی ارائه شده است. همان‌طور که از این دو شکل قابل مشاهده است، نتایج روش DCM در همه محدوده‌های دبی جریان با خطای زیادی هم‌زمان است. نکته مهم‌تر این است که در همه حالات، نتایج این روش مقادیر بزرگ‌تری از داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد که دلیل این امر، در نظر نگرفتن تنش برشی ایجاد شده در مرز اتصال مجرای اصلی رودخانه با دشت‌های سیلابی است. این مسأله باعث خطای قابل توجه در طراحی ابعاد سازه‌های کنترل و حفاظت سیل (دایک‌ها و خاک‌ریزهای کنترل سیل) خواهد شد. این در حالی است که در همه محدوده‌های دبی جریان، رابطه پیشنهادی برنامه‌ریزی ژنتیک در هر دو مرحله آموزش و آزمون مدل دقت بهتری دارد. بنابراین علاوه بر سادگی رابطه ارائه شده، دقت مناسب محاسبه‌ها نیز از برتری‌های مهم روش برنامه‌ریزی ژنتیک است.

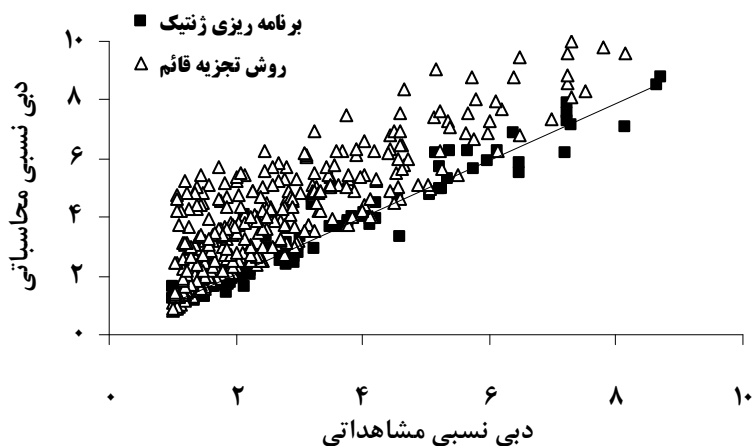
مقایسه آماری نتایج دو روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و روش تجزیه قائم مقطع مرکب (DCM) در جدول ۳ ارائه شده است. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که ضریب تعیین (R^2) در روش تجزیه قائم مقطع مرکب برای داده‌های بخش آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۶۹ و در روش برنامه‌ریزی ژنتیک این مقادیر به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۶ می‌باشد. ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روش DCM در مراحل آموزش و آزمون به ترتیب ۱/۷۲ و ۱/۲۲ و در روش GP به ترتیب ۰/۳۴۵ و ۰/۳۹۴ است. این مقایسه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی GP دارای دقت بسیار بیشتری می‌باشد. همچنین با توجه به این که خطای متوسط روش DCM برای کل داده‌ها حدود ۵۸/۳ درصد و برای روش GP حدود ۳/۲۴ درصد به دست آمده است، کارایی و دقت قابل توجه مدل پیشنهادی آشکارتر می‌شود.

جدول ۳- پارامترهای آماری نتایج روش‌های محاسبه دبی نسبی در مقاطع مرکب.

روش محاسبه دبی	مرحله آموزش مدل				مرحله آزمون مدل			
	R^2	RMSE	%AE	δ %	R^2	RMSE	%AE	δ %
DCM	۰/۸۲	۱/۷۲	-۶۰/۳	۵۰/۶	۰/۶۹	۱/۲۲	-۵۴/۴	۴۵/۴
GP	۰/۹۹	۰/۳۴۵	-۲/۳۵	۷/۸	۰/۹۶	۰/۳۹۴	-۴/۳۷	۸/۸

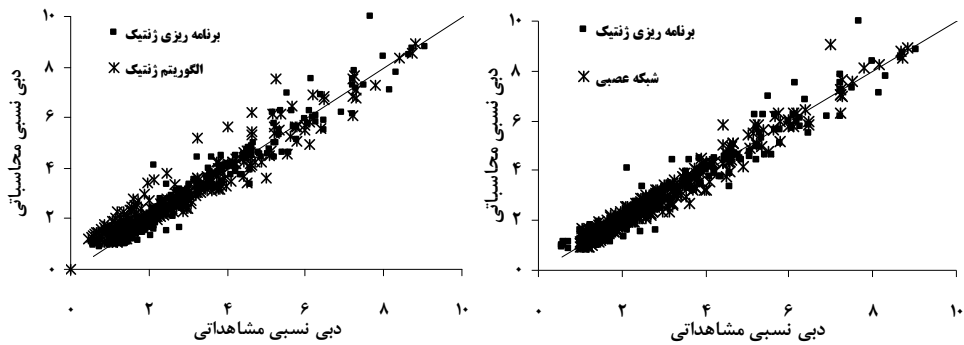


شکل ۴- ارزیابی دقت روش‌های تجزیه قائم (DCM) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) برای داده‌های بخش آموزش.



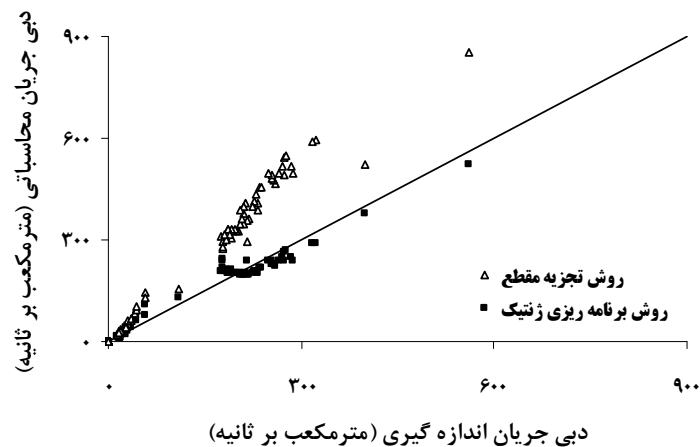
شکل ۵- ارزیابی دقت روش‌های تجزیه قائم (DCM) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) برای داده‌های بخش آزمون.

در شکل ۶ نتایج مدل GP این پژوهش با نتایج شبکه‌های عصبی مصنوعی (ظهیری و دهقانی، ۲۰۰۹) و الگوریتم ژنتیک (ظهیری و همکاران، ۲۰۱۲) در مقاطع مرکب مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو مورد، نتایج مدل GP این پژوهش از دقت بیشتری برخوردار است ضمن این‌که شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت ارائه یک معادله صریح برای بیان متغیر خروجی بر حسب متغیرهای ورودی را ندارند.



شکل ۶- مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج شبکه‌های عصبی مصنوعی (۲۰۰۹) و الگوریتم ژنتیک (۲۰۱۲).

در شکل ۷ نتایج دبی کل جریان محاسباتی از روش‌های تجزیه مقطع و برنامه‌ریزی ژنتیک در مقایسه با دبی‌های واقعی جریان در ۳۰ مقطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای مورد مطالعه نشان داده شده است. در این شکل خطای روش تجزیه مقطع مرکب (DCM) آشکارتر شده است به طوری که تا ۱۰۰ درصد خطا نیز در دبی واقعی ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه اتفاق افتاده است. خطای این روش با افزایش دبی جریان، افزایش یافته است.



شکل ۷- مقایسه نتایج دبی کل جریان محاسباتی از روش‌های تجزیه قائم (DCM) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) با مقادیر واقعی.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)، دبی جریان در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی شبیه‌سازی شده است. یافته‌های مهم این پژوهش به‌صورت زیر قابل بیان است:

۱- رابطه‌ی نهایی به‌دست آمده از مدل GP در مراحل آموزش و آزمون با ضریب تعیین ۰/۹۶ و ۰/۹۹ دارای دقت خوبی در مدل‌سازی دبی جریان در مقاطع مرکب است. ضریب تعیین روش تجزیه قائم حدود ۰/۷۶ به‌دست آمده است. خطای متوسط روش تجزیه مقطع مرکب حدود ۵۸/۳- درصد است در حالی که متوسط خطای مدل GP در مراحل آموزش و آزمون به‌ترتیب حدود ۲/۳۵- و ۴/۲۷- درصد به‌دست آمده است.

۲- مقایسه نتایج مدل GP نسبت به روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک در شبیه‌سازی دبی کل جریان در مقاطع مرکب نشان می‌دهد که نتایج مدل GP از دقت بالاتری برخوردار است. با توجه به این که شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت استخراج رابطه‌ای صریح برای برآورد دبی جریان را ندارند، کارایی و برتری مدل GP آشکارتر می‌شود.

منابع

1. Ackers, P. 1992. Hydraulic design of two-stage channels. J. Water and Maritime Engine. 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. Aytok, A., and Kisi, O. 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modelling. J. Hydrol. 351: 288-298.
4. Azmathullah, H.Md., and Ghani, A. 2011. Genetic programming for predicting longitudinal dispersion coefficients in streams. Water Resour. Manage. 25: 1537-1544.
5. Azmathullah, H.Md., Ghani, A., Zakaria, N.A., and Guven, A. 2010. Genetic programming to predict bridge pier scour. J. Hydraul. Engine. 136 :3. 165-169.
6. Babovic, V., and Keijzer, M. 2000. Genetic programming as a model induction engine. J. Hydroinformatics, 2: 1. 35-60.
7. Blalock, M.E., and Sturm, T.W. 1981. Minimum specific energy in compound channel. J. Hydraul. Div. 107: 699-717.
8. Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, H., and Zech, Y. 2004. Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. J. Hydraul. Engine. 130: 4. 305-312.
9. Bousmar, D., and Zech, Y. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. J. Hydraul. Engine. 125: 7. 696-70.

10. Brameier, M., and Banzhaf, W. 2001. A comparison of linear genetic programming and neural networks in medical data mining. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 5: 17-26.
11. Chow, V.T. 1959. *Open channel hydraulics*, Mc Graw-Hill, London, 700p.
12. 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.
13. Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., and Sellin, R.H.J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *J. Hydraul. Engine.* 126: 9. 653-669.
14. Farbodfam, N., Ghorbani, M.A., and Aalami, M.T. 2009. Forecasting river flow using genetic programming (Case study: Lighwan watershed). *J. Agric. Sci.* 19: 4. 107-123. (In Persian)
15. Giustolisi, O. 2004. Using genetic programming to determine Chèzy resistance coefficient in corrugated channels. *J. Hydroinformatics*, 6: 3. 157-173.
16. Guven, A., and Gunal, M. 2008. Genetic programming approach for prediction of local scour downstream of hydraulic structures. *J. Irrig. Drain. Engine.* 134: 2. 241-249.
17. Haidera, M.A., and Valentine, E.M. 2002. A practical method for predicting the total discharge in mobile and rigid boundary compound channels. *Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*, Belgium, Pp: 153-160.
18. 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.
19. Hosseini, S.M. 2004. Equations for discharge calculation in compound channels having homogenous roughness. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B*, 28: 5. 537-546.
20. 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.
21. Knight, D.W., Shiono, K., and Pirt, J. 1989. Predictions of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. *Int. Conf. on Hydraulics and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters*, England, Pp: 419-428.
22. Knight, D.W., and Sellin, R.H.J. 1987. The SERC flood channel facility. *J. Ins. Water and Environ. Manage.* 1: 2. 198-204.
23. Knight, D.W., and Demetriou, J.D. 1983. Flood plain and main channel flow interaction. *J. Hydraul. Div.* 109: 8. 1073-1092.
24. Lai, S.H., and Bessaih, N. 2004. Flow in compound channels. 1st *Int. Conf. on Managing Rivers in the 21st Century*, Malaysia, Pp: 275-280.
25. Lambert, M.F., and Myers, R.C. 1998. Estimating the discharge capacity in straight compound channels. *Water, Maritime and Energy*, 130: 84-94.

26. 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.
27. Liu, W., and James, C.S. 2000. Estimating of discharge capacity in meandering compound channels using artificial neural networks. *Can. J. Civil. Engine.* 27: 2. 297-308.
28. Martin, L.A., and Myers, R.C. 1991. Measurement of overbank flow in a compound river channel. *J. Ins. Water and Environ. Manage.* Pp: 645-657.
29. Myers, R.C., and Lyness, J.F. 1997. Discharge ratios in smooth and rough compound channels. *J. Hydraul. Engine.* 123: 3. 182-188.
30. Nikmehr, S., Farhoodi, J., and Samadianfard, S. 2009. Estimation of velocity profile in width of canal using ANFIS and neural network methods. 8th Iranian Hydraulic Conference, Tehran, Iran. (In Persian)
31. Shiono, K., and Knight, D.W. 1988. Two-dimensional analytical solution for a compound channel. 3rd Int. Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Japan, Pp: 503-510.
32. Tarrab, L., and Weber, J.F. 2004. Predicción del coeficiente de mezcla transversal en cauces aturales. *Mecánica Computacional, XXIII, Asociación Argentina de Mecanica Computacional, San Carlos de Bariloche*, Pp: 1343-1355.
33. 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. *Advances in Engineering Software*, 41: 120-129.
34. 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.
35. Zahiri, A., and Dehghani, A.A. 2009. Flow discharge determination in straight compound channels using ANN. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58: 12-15.
36. 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 Con.* (In Persian, In Press)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 19(4), 2013
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Flow discharge modeling in flooded rivers by using genetic programming

***A.R. Zahiri¹, P. Eghbali² and M.A. Ghorbani³**

¹Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ²M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ³Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Tabriz University

Received: 03/17/2012; Accepted: 07/23/2012

Abstract

Flow discharge determination in rivers is one the key elements in design of river engineering projects. By flow entering into the floodplains and sudden changes in river geometry, the common resistance equations are not applicable. Therefore, many approaches have been developed for modification of flow discharge computations. Most of these methods have satisfactory results in laboratory flumes but extending those to all hydraulic and geometric conditions such as natural rivers are very limited. In recent decades, due to ability of complex phenomena modeling, the artificial intelligent methods have very wide applications in many fields of water engineering. Genetic Programming, a branch of evolutionary algorithms, is able to optimize the model structure and its components and to derive an explicit equation based on the variables of the phenomena. In this study, using 394 laboratory and field stage-discharge data sets of 30 compound channels, a new equation has been derived for calculation of flood discharge, based on geometric and hydraulics parameters, using Genetic Programming. The modeling is conducted in training and testing phases that at these two phases, the agreement between computed and measured flow discharge was very good. The determination coefficient for the training and testing phases was 0.99 and 0.96, respectively.

Keywords: Genetic programming, Stage-discharge curve, Flooded Rivers, Floodplains

* Corresponding Author; Email: zahiri_reza@yahoo.com

