

## مدل سازی رابطه دبی- اشل در مقاطع مرکب با استفاده از روش برنامه ریزی بیان ژن چندمرحله ای

عبدالرضا ظهیری<sup>۱\*</sup>، محمدعلی شعبانی<sup>۲</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه های آبی

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۱۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۳۰)

### چکیده

در شرایط وقوع سیل در رودخانه های آبرفتی با مقطع مرکب، به دلیل تبادل جریان بین مقطع اصلی و دشت های سیلابی، محاسبه دبی سیلاب به کمک روش های معمول با خطای زیادی همراه است. در این مقاله از روش جدیدی به نام برنامه ریزی بیان ژن چندمرحله ای برای محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب مستقیم استفاده شده است. برای مدل سازی از سه متغیر بدون بعد شامل عمق نسبی جریان، پارامتر کوهپیرنس مقطع مرکب و دبی جریان نسبی محاسباتی به عنوان پارامترهای ورودی و از دبی جریان نسبی مشاهداتی به عنوان پارامتر خروجی استفاده شد. با استفاده از ۴۰۲ داده هیدرولیکی و هندسی از ۳۱ مقطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی، روابط صریحی برای محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب استخراج شد. میانگین خطای نسبی این روش در مراحل واسنجی و صحت سنجی به ترتیب حدود ۱۰/۲ و ۱۱/۶ درصد به دست آمد. این میزان خطا نسبت به خطای معادله مانینگ (۱۹/۳ درصد)، دقت بسیار بهتر روش برنامه ریزی بیان ژن چندمرحله ای را نشان می دهد. بنابراین، کاربرد این روش در محاسبه دبی سیلاب رودخانه های با مقطع مرکب توصیه می شود. همچنین، می توان با استفاده از تلفیق این ایده با محاسبات پروفیل سطح آب رودخانه ها و نیز روندیابی سیل، دقت محاسبات طراحی خاکریزهای کنترل سیل را افزایش داد.

**کلیدواژگان:** الگوریتم برنامه ریزی بیان ژن، بهینه سازی، دبی جریان، رودخانه های سیلابی، مقطع لبریز.

## مقدمه

رودخانه‌های آبرفتی، به‌ویژه در بازه‌های پایین‌دست، شیب طولی کمی دارند به طوری که با وقوع سیلاب، آب از مجرای اصلی رودخانه خارج شده و وارد دشت‌های وسیع اطراف می‌شود. به مقاطعی که جریان وارد دشت‌های سیلابی می‌شود، مقاطع مرکب گفته می‌شود. به همین دلیل بستر و سواحل این مجرا از مصالح آبرفتی تشکیل شده و بدون پوشش گیاهی و یا دارای پوشش گیاهی ضعیف است. مجرای اصلی بیشتر شکل هندسه‌ای نزدیک به مستطیل یا دوزنقه دارد و رواناب‌های معمول و دبی جریان پایه را منتقل می‌کند. از طرف دیگر، دشت‌های سیلابی معمولاً در انتقال جریان تأثیری ندارند و فقط در زمان وقوع سیلاب، تأثیر گذارند. این دشت‌ها مشابه یک مخزن عمل کرده و بخش زیادی از جریان سیل را ذخیره می‌کنند. معمولاً دشت‌های سیلابی پوشش گیاهی درخور توجهی دارند و در نتیجه از نظر هیدرولیکی از زبری بیشتری نسبت به مجرای اصلی برخوردارند [۱ و ۲]. در شکل ۱ نمایی از مقطع عرضی رودخانه گرگان‌رود، که به شکل یک مقطع مرکب طبیعی

است، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دشت‌های سیلابی پوشیده از گیاه هستند و ضریب زبری بیشتری نسبت به مقطع اصلی رودخانه دارند. مقاطع مرکب در بسیاری از طرح‌های مهندسی رودخانه و نیز کانال‌ها و مجاری انتقال آب و فاضلاب کاربرد دارند. به طور مثال، طرح‌های لایروبی رودخانه‌ها را معمولاً به فرم مقاطع مرکب اجرا می‌کنند تا جریان در کانال لایروبی حتی در دبی‌های کم نیز عمق و سرعت مناسبی داشته باشد و مشکلات رسوب‌گذاری در رودخانه را به کمترین حد برساند. چندین دهه است که محققان مشغول مطالعه و بررسی رفتار رودخانه‌ها در شرایط سیلابی‌اند. مهم‌ترین موضوع در این زمینه، تعیین رابطه دبی-اشل رودخانه در شرایط سیلاب است [۳ و ۴]. استخراج این رابطه با دقت مناسب برای بسیاری از طرح‌های مهندسی رودخانه ضروری است. به همین دلیل، ارائه و تدوین روش‌ها و مدل‌های ریاضی برای بهبود دقت محاسبات استخراج رابطه دبی-اشل رودخانه‌های با مقطع مرکب همچنان اهمیت دارد.



شکل ۱. نمایی از یک مقطع مرکب طبیعی (رودخانه گرگان‌رود در استان گلستان)

به خلاف روش‌های یادشده، روش نسبتاً ساده‌ای نیز توسط هاتوف و همکارانش (۲۰۰۸) برای محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب ارائه شد. آنها بر اساس مبانی تئوریک هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب و با بررسی دقیق وضعیت جریان در محل اتصال مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، تنش برشی ظاهری ایجادشده در این ناحیه را به صورت تابعی از اختلاف سرعت‌های جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی معرفی کردند:

تا کنون روش‌ها و مدل‌های زیادی بر اساس مفاهیم مختلف هیدرولیکی برای تخمین دبی جریان در مقاطع مرکب ارائه شده است که مدل‌های ریاضی وارک و همکارانش (۱۹۹۰)، شیونو و نایت (۱۹۹۱) و هو و همکارانش (۲۰۱۰) و نیز روش‌های ورم‌لیتون و مرت (۱۹۹۰)، آکرز (۱۹۹۲) و بوسمار و زک (۱۹۹۹) اعتبار زیادی دارند [۱۰ و ۱۱]. این روش‌ها با وجود دقت مناسب، محاسباتی طولانی و پیچیده دارند [۱۲].

$$V_{mc} = \left( V_{mc,VDCM}^{\gamma} - \frac{\cdot / \Delta \gamma N_{fp} \varepsilon_{mc} (V_{mc,VDCM}^{\gamma} - V_{fp,VDCM}^{\gamma})}{1 + \cdot / \Delta \gamma (N_{fp} \varepsilon_{mc} + \varepsilon_{fp})} \right)^{1/\Delta} \quad (1)$$

$$V_{fp} = \left( V_{fp,VDCM}^{\gamma} - \frac{\cdot / \Delta \gamma \varepsilon_{mc} (V_{mc,VDCM}^{\gamma} - V_{fp,VDCM}^{\gamma})}{1 + \cdot / \Delta \gamma (N_{fp} \varepsilon_{mc} + \varepsilon_{fp})} \right)^{1/\Delta} \quad (2)$$

روش های بهینه سازی هوشمند، به تأثیرات هر متغیر به صورت جداگانه توجه نمی شود، در این ایده، اثر متغیرهای مؤثر ورودی به صورت مجزا و جداگانه در مدل سازی و محاسبه متغیر خروجی وارد می شوند. در این تحقیق، ایده پیشنهادی با محاسبات برنامه ریزی بیان ژن تلفیق شده است که از آن به عنوان روش برنامه ریزی بیان ژن چند مرحله ای<sup>۱</sup> (MSGEP) نام برده خواهد شد. نتایج دبی کل جریان در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی به دست آمده از این روش با روش های معمول تجزیه قائم مقطع مرکب و نیز روش پیشنهادی هاتوف و همکارانش (۲۰۰۸) مقایسه شده است.

### مواد و روش ها

محاسبه رابطه دبی- اشل برای شرایط جریان عادی یک رودخانه، با استفاده از روابط مقاومت جریان مانند رابطه شزی و یا مانینگ به سادگی امکان پذیر است، اما در شرایط سیلاب، محاسبه دبی جریان در مقطع اصلی و دشت های سیلابی بسیار پیچیده و مشکل است. دلیل چنین پیچیدگی ای این است که وقتی تراز سطح آب از مقطع اصلی رودخانه بالاتر می رود و وارد دشت های سیلابی می شود، شرایط هندسی و هیدرولیکی رودخانه (شامل عمق جریان، ضریب زبری و عرض) با تغییر آبی و درخور توجهی مواجه می شود. تغییرات عمق آب و ضریب زبری سبب می شود که سرعت در مقطع اصلی رودخانه بسیار بیشتر از دشت های سیلابی باشد. این تفاوت زیاد، به ایجاد تنش برشی شایان توجهی در ناحیه اتصال مقاطع اصلی و سیلابی شده و افت انرژی و کاهش درخور توجه دبی جریان در مقطع اصلی را به دنبال خواهد داشت [۱ و ۸].

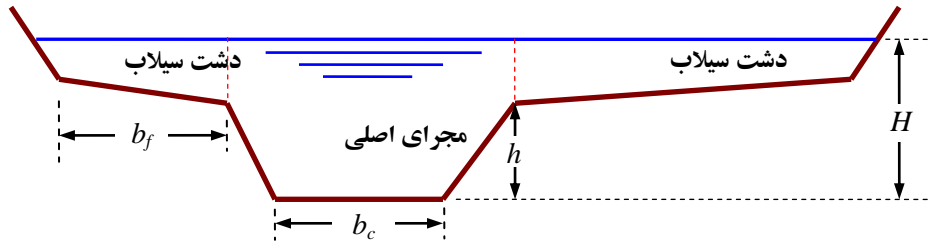
مشخصات هیدرولیک جریان در مجرای اصلی و دشت های سیلابی کاملاً با یکدیگر متفاوت است و به همین دلیل برای محاسبات هیدرولیکی این مقاطع، باید مقطع

در روابط یاد شده،  $V_{fp}$  و  $V_{mc}$  سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت سیلاب،  $V_{mc,VDCM}$  و  $V_{fp,VDCM}$  سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت سیلاب به روش تجزیه قائم مقطع مرکب،  $N_f$  تعداد دشت های سیلابی،  $\varepsilon_{mc} = h_{int} / (f_{mc} P_{mc})$  و  $\varepsilon_{fp} = h_{int} / (f_{fp} P_{fp})$  (که  $h_{int}$  عمق جریان در محل اتصال مقطع اصلی به دشت های سیلابی،  $f$  ضریب اصطکاک دارسی- و یسباخ  $P$  محیط مرطوب است) و  $\gamma$  ضریبی است که مقدار بهینه آن حدود ۰/۶ به دست آمده است [۱۳].

علاوه بر روش های یاد شده که پایه و اساس هیدرولیکی و تئوریکی دارند، روش های زیادی نیز بر اساس روش های بهینه سازی هوشمند برای محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب ارائه شده است. روش شبکه های عصبی مصنوعی توسط لیو و جیمز (۲۰۰۰)، ظهوری و دهقانی (۲۰۰۹) و اونال و همکارانش (۲۰۱۰) و روش ماشین های بردار پشتیبان توسط پارسایی و همکارانش (۲۰۱۵) استفاده شده است. هر دو روش یاد شده، قابلیت ارائه رابطه یا معادله ریاضی مشخص برای تعیین متغیر خروجی بر اساس متغیرهای ورودی را ندارند. همچنین، روش برنامه ریزی ژنتیک خطی توسط عظمت الله و ظهوری (۲۰۱۲) و روش های برنامه ریزی بیان ژن و مدل درخت تصمیم نیز توسط ظهوری و عظمت الله (۲۰۱۴) برای محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب استفاده شده است. این روش ها با وجود دقت مناسب این محدودیت را دارند که همه متغیرهای ورودی مؤثر بر پدیده در یک گام یا در یک مرحله استفاده می شود و بنابراین تأثیرات هر متغیر به تنهایی مورد توجه قرار نمی گیرد.

بررسی مطالعات یاد شده نشان می دهد تا کنون برای استخراج رابطه دبی- اشل در مقاطع مرکب روش های متنوعی ارائه شده است. در این پژوهش از یک ایده متفاوت موسوم به الگوی بهینه سازی چند مرحله ای برای محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب استفاده شده است. با توجه به اینکه تا کنون برای مدل سازی پدیده ها به کمک

ISIS) و از روش تجزیه قائم مقطع مرکب استفاده می‌کنند [۱۳]. در شکل ۲ یک مقطع مرکب منظم رودخانه‌ای با پارامترهای مربوط به آن نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایش یک مقطع مرکب منظم رودخانه‌ای و تفکیک مقاطع جزئی آن به روش تجزیه قائم

جریان در مقاطع مرکب است و به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود [۱]:

$$COH = \frac{(1+A_*)^{1/5} \sqrt{(1+P_*^{1/33} n_*^2 / A_*^{1/33})}}{1+A_*^{1/67} / n_* P_*^{1/33}} \quad (4)$$

که  $A$  سطح مقطع،  $P$  محیط خیس شده و  $n$  ضریب زبری مانیگ است. زیرنویس \* برای بیان نسبت متغیرها در دشت‌های سیلابی به مقطع اصلی است به این صورت که  $n_* = n_f / n_c$  و  $P_* = P_f / P_c$ ،  $A_* = A_f / A_c$  مقدار پارامتر کوهیرنس در کانال‌های با مقطع مرکب بین صفر و یک است و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بیان‌کننده این است که پدیده اثر متقابل در کانال مد نظر شدیدتر است.

**تعیین پارامترهای ورودی و خروجی برای مدل‌سازی**  
دبی کل جریان در مقاطع مرکب تابع پارامترهای هندسی و هیدرولیکی زیادی است. در این پژوهش سعی شده است مدل‌سازی دبی کل جریان با کمترین داده ورودی انجام شود. به این منظور مشابه بسیاری از تحقیقات پژوهشگران مختلف [۱ و ۱۱] از سه پارامتر بدون بعد عمق نسبی، کوهیرنس مقطع و دبی نسبی یا نسبت دبی جریان به دست‌آمده از روش تجزیه قائم مقطع مرکب به دبی جریان مقطع لبریز<sup>۱</sup> (مقطع پر) به عنوان پارامترهای ورودی و از نسبت دبی واقعی جریان در مقطع مرکب به دبی مقطع لبریز (یا دبی نسبی واقعی) به عنوان پارامتر خروجی استفاده شد:

مرکب تجزیه شود. برای تجزیه مقاطع مرکب روش‌های زیادی توصیه شده است که در محاسبات معمول اغلب از نرم‌افزارهای هیدرولیکی (مانند HEC-RAS، MIKE-11،

در روش تجزیه قائم، مقطع مرکب به مقاطع جزئی (مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی) تقسیم شده و با استفاده از رابطه مانیگ، دبی جریان در هر یک از این مقاطع جزئی محاسبه می‌شود. با فرض وجود دو دشت سیلاب، دبی کل جریان به کمک رابطه ۳ و از مجموع دبی‌های جزئی به دست خواهد آمد [۱۹ و ۲۰]:

$$Q_{VDCM} = \sum_{i=1}^r Q_i = \sum_{i=1}^r \frac{A_i R_i^{2/3} S_0^{1/2}}{n_i} \quad (3)$$

که  $Q_{VDCM}$  دبی کل جریان ( $m^3/s$ )،  $i$  بیان‌کننده هر یک از مقاطع جزئی (مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی)،  $A$  سطح مقطع جریان ( $m^2$ )،  $R$  شعاع هیدرولیکی هر یک از مقاطع جزئی ( $m$ )،  $S_0$  شیب طولی کانال و  $n$  ضریب زبری مانیگ هستند.

روش یادشده با وجود سادگی محاسبات، به دلیل در نظر نگرفتن اثر متقابل بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، دبی کل جریان را به میزان درخور توجهی 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 است [۱]. خطای این روش در مقاطع مرکب غیرهمگن رودخانه‌ای (مقاطع مرکب با دشت‌های سیلابی زبرتر از مقطع اصلی) حدود ۴۰ درصد گزارش شده است [۲۱].

اکرز با تعریف پارامتر بدون بعد کوهیرنس ( $COH$ )، میزان اهمیت اثر متقابل بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی در مقاطع مرکب مختلف را مشخص کرد. این پارامتر، مهم‌ترین پارامتر بدون بعد در مطالعات هیدرولیک

بیان ژن مدل‌سازی شده و رابطه صریحی ( $F_1$ ) ارائه می‌شود.

۲. در مرحله دوم، خطای این رابطه نسبت به مقدار واقعی به صورت تابعی از دومین متغیر ورودی ( $COH$ )، مدل‌سازی می‌شود ( $F_2$ ).

۳. خطای رابطه دوم ( $F_2$ ) به صورت تابعی از متغیر ورودی سوم ( $Dr$ ) مدل‌سازی شده و رابطه سوم استخراج می‌شود ( $F_3$ ).

۴. این فرایند به همین صورت تکرار می‌شود تا آخرین متغیر ورودی مؤثر در مدل‌سازی وارد شود. بعد از انجام این مراحل و استفاده از همه متغیرهای ورودی در مدل‌سازی، باید اثر متقابل این متغیرها بر یکدیگر نیز در نظر گرفته شود. به این منظور، از تابع اثر متقابل استفاده می‌شود ( $F_{int}$ ). این تابع برای پدیده‌ای با سه متغیر ورودی به صورت رابطه ۶ مدل‌سازی می‌شود [۲۴]:

$$f_{int} = f(x) - (f_1(x_1) + f_2(x_2) + f_3(x_3)) \quad (6)$$

در رابطه یادشده،  $f_{int}$  مقدار تابع اثر متقابل،  $f(x)$  مقدار متغیر خروجی،  $f_1(x_1)$  مقدار به دست آمده از تابع  $F_1$ ،  $f_2(x_2)$  مقدار به دست آمده از تابع  $F_2$  و  $f_3(x_3)$  مقدار به دست آمده از تابع  $F_3$  است. با استفاده از رابطه یادشده، مقادیر خروجی تابع اثر متقابل محاسبه می‌شود. متغیرهای ورودی در این مرحله، همه متغیرهای ورودی ( $COH, Dr, \frac{Q_{VDCM}}{Q_b}$ ) برای مدل‌سازی پدیده اصلی ( $\frac{Q}{Q_b}$ ) هستند.

۵. تابع نهایی به صورت رابطه ۷ مرتب خواهد شد:

$$F_{total} = (F_1 + F_2 + F_3) + F_{int} \quad (7)$$

که  $F_{total}$  تابع نهایی برای محاسبه پدیده مد نظر است. برای مدل‌سازی توابع یادشده از نرم‌افزار Gene-Expro-Tools استفاده شد.

#### داده‌های استفاده شده

در این تحقیق برای مدل‌سازی دبی کل جریان در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی، از ۴۰۲ سری داده هندسی و هیدرولیکی ۳۱ مقطع مرکب در شرایط مختلف آزمایشگاهی و صحرایی استفاده شد. داده‌های آزمایشگاهی از نتایج آزمایشگاهی محققان مختلفی مانند بالوک و استورم (۱۹۸۱)، نایت و دیمتریو (۱۹۸۳)، نایت و سلین (۱۹۸۷)،

$$\frac{Q}{Q_b} = f \left( Dr, COH, \frac{Q_{VDCM}}{Q_b} \right) \quad (5)$$

که در رابطه یادشده،  $Dr$  پارامتر بدون بعد عمق نسبی است و به صورت نسبت عمق کل جریان در مقطع اصلی رودخانه به عمق جریان در دشت‌های سیلابی تعریف می‌شود.  $Q_b$  و  $Q$  نیز به ترتیب دبی واقعی کل جریان در مقطع مرکب و دبی جریان در مقطع لبریز است. برای محاسبه دبی مقطع لبریز، کافی است از رابطه مانینگ و مشخصات هندسی و هیدرولیکی رودخانه در حالت پر بودن مجرای اصلی رودخانه استفاده شود.

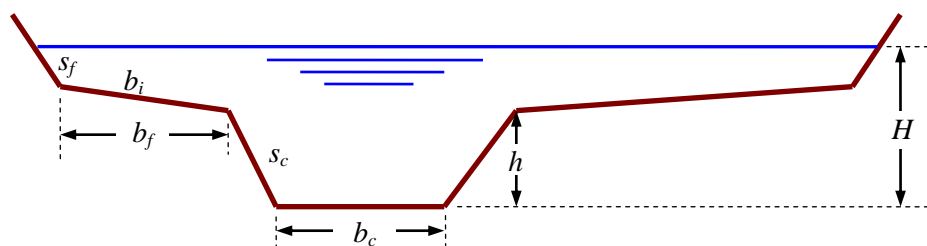
#### روش برنامه‌ریزی بیان ژن چندمرحله‌ای<sup>۱</sup>

روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) جدیدترین روش خانواده الگوریتم‌های جست‌وجوی ژنتیکی است. جزئیات این روش در مقالات زیادی توضیح داده شده است [۱۲، ۲۲ و ۲۳]. این روش شاخه‌ای از الگوریتم‌های گردشی است که برای نخستین بار توسط فریرا (۱۹۹۹) ارائه شد. مهم‌ترین ویژگی این روش، استفاده از کروموزوم‌هایی است که قابلیت بیان و ایجاد رشته‌هایی به فرم توابع و روابط ریاضی دارند. این کروموزوم‌های ساده متشکل از یک رشته خطی شامل یک یا چند ژن هستند و توانایی برنامه‌نویسی پیچیده‌ترین فرم توابع ریاضی را دارند. اطلاعات ژنتیکی به صورت یک فرمت درختی در درون این ژن‌ها برنامه‌نویسی می‌شود. تا کنون این روش کاربرد نسبتاً زیادی در حل مسائل مهندسی آب داشته است. در این روش مشابه همه روش‌های معمول بهینه‌سازی و استخراج مدل‌ها، متغیرهای ورودی به صورت کامل و با همدیگر به مدل معرفی می‌شوند. این در حالی است که ممکن است بین هر متغیر ورودی با دیگر متغیرها، اثر متقابل وجود داشته باشد که در نهایت بر مدل نهایی تأثیرگذار باشد. برای کاهش این خطا، در مقاله حاضر از روش برنامه‌ریزی بیان ژن چندمرحله‌ای (MSGEP) استفاده شده است. در روش MSGEP، به خلاف روش‌های معمول، ابتدا هر متغیر به صورت مجزا وارد مراحل مدل‌سازی می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای انجام این کار به صورت زیر است:

- در مرحله نخست، متغیر خروجی بر اساس اولین متغیر مؤثر ورودی ( $\frac{Q_{VDCM}}{Q_b}$ ) به کمک روش برنامه‌ریزی

رودخانه‌های سورن [۳۶] و مین [۲۱] در انگلستان و رودخانه کلرادو در کشور آرژانتین [۳۷] استخراج شده است. در شکل ۳، متغیرهای ورودی استفاده شده در این تحقیق در یک مقطع مرکب نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز محدوده تغییرات هندسی و هیدرولیکی این مقاطع ارائه شده است.

لامبرت و سلین (۱۹۹۶)، میرز و لینس (۱۹۹۷)، لامبرت و میرز (۱۹۹۸)، بوسمار و زخ (۱۹۹۹)، هیدرا و والتناین (۲۰۰۲)، لای و بسیج (۲۰۰۲)، آتابای و نایت (۲۰۰۶)، بوسمار و همکارانش (۲۰۰۴) و فرناندز و همکارانش (۲۰۱۱) جمع‌آوری شده است. داده‌های صحرایی مقاطع مرکب از مقادیر اندازه‌گیری شده عمق و دبی جریان



شکل ۳. بیان متغیرهای هندسی و هیدرولیکی استفاده شده در یک مقطع مرکب طبیعی

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

متغیر استفاده شده	علامت	محدوده تغییرات
ارتفاع مقطع لبریز (متر)	$h$	۰/۰۳۱-۰/۰۶
عرض مقطع اصلی (متر)	$b$	۰/۱۵۲-۰/۲۱۴
عرض دشت‌های سیلابی (متر)	$b_f$	۰-۰/۰۶۳
شیب جانبی مقطع اصلی	$s_c$	۰-۰/۰۲
شیب جانبی دشت‌های سیلابی	$s_f$	۰-۰/۰۷۱
شیب عرضی دشت‌های سیلابی	$b_i$	۰-۰/۰۶۲
ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی	$n_c$	۰/۰۱-۰/۰۳۶
ضریب زبری دشت‌های سیلابی	$n_f$	۰/۰۱-۰/۰۰۵
شیب طولی	$S_0$	۰/۰۰۰۱۹-۰/۰۰۰۵
عمق کل جریان (متر)	$H$	۰/۰۳۶-۰/۰۷۸۱
دبی کل جریان (مترمکعب بر ثانیه)	$Q$	۰/۰۰۳-۰/۰۵۶۰

که  $y = Y - \bar{Y}$ ،  $x = X - \bar{X}$  مقدار مشاهده‌ای،  $Y$  مقدار محاسباتی،  $\bar{X}$  میانگین مقادیر مشاهده‌ای،  $\bar{Y}$  میانگین مقادیر محاسباتی و  $N$  تعداد داده‌هاست.

### نتایج و بحث

#### مدل‌سازی دبی جریان به روش GEP

در الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن، همه متغیرهای ورودی در مدل‌سازی پدیده بررسی شده به صورت کامل مشارکت دارند و به نوعی از اثر متقابل هر متغیر بر متغیرهای دیگر صرف‌نظر می‌شود. برای انجام مدل‌سازی با این روش، ابتدا داده‌های انتخاب شده به دو گروه داده‌های آموزش و داده‌های آزمون تقسیم می‌شوند. یکی از معیارها و شرایط

#### پارامترهای آماری ارزیابی دقت نتایج

برای ارزیابی دقت نتایج دبی جریان به دست آمده از روش‌های مختلف از پارامترهای آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) به صورت روابط ۸-۱۰ استفاده شده است:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \right]^2 \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2}{N}} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{\sum |X - Y|}{N} \times 100 \quad (10)$$

پیشنهادی نهایی برای کاربرد در مطالعات آینده باشد. معمولاً، ۷۰ درصد کل داده ها به بخش داده های آموزش مدل و ۳۰ درصد باقی مانده به گروه داده های آزمون اختصاص داده می شوند. با انجام مدل سازی به روش GEP به کمک داده های آموزش، رابطه ۱۱ استخراج شد:

$$\frac{Q_t}{Q_b} = COH^4 \left( \frac{Q_{VCDM}}{Q_b} \right)^{7/5} \text{Log}(COH) - 0.664612 COH + COH^7 - Dr + \frac{Q_{VCDM}}{Q_b} + \sqrt{COH - \frac{Dr}{9/169189}} - 0.664612 \quad (11)$$

آزمون نیز ارزیابی شود. بر این اساس، با توجه به پارامترهای ورودی داده های آزمون و استفاده از رابطه ۹، دبی کل جریان محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در شکل ۴ در مقایسه با مقادیر اندازه گیری و نیز نتایج روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج مدل GEP در بخش آزمون مدل نیز بسیار مناسب بوده و دقت بسیار بیشتری نسبت به نتایج روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب دارد.

#### مدل سازی دبی جریان به روش MSGEP

برای انجام مدل سازی در این روش نیز مانند روش GEP ابتدا داده های انتخاب شده به دو گروه داده های آموزش و داده های آزمون تقسیم بندی شده و سپس محاسبات مدل سازی به صورت گام به گام انجام می شود:

۱. در مرحله اول، دبی جریان نسبی به دست آمده از

روش تجزیه قائم مقطع مرکب  $\left( \frac{Q_{VDCM}}{Q_b} \right)$  به عنوان

متغیر ورودی و دبی نسبی واقعی جریان به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته می شود. بر این اساس، مدل سازی انجام شده و رابطه ۱۲ به عنوان رابطه نهایی مدل در مرحله اول استخراج شد:

$$F_1 = \frac{Q_{VCDM}}{Q_b} + \frac{\left( \frac{Q_{VCDM}}{Q_b} \right)^{7/2}}{\left( \frac{Q_{VCDM}}{Q_b} \right)^2 - 521/47} + e^{\left( -0.77963 \left( \frac{Q_{VCDM}}{Q_b} \right)^2 - 0.15005 \right)} - 0.101 \log \left( e^{\frac{Q_{VCDM}}{Q_b}} - \frac{Q_{VCDM}}{Q_b} + 15/142 \right) \quad (12)$$

مهم این تقسیم بندی این است که کمترین و بیشترین داده های خروجی در گروه آموزش قرار گیرد. در گروه داده های آزمون نیز سعی می شود که مقادیر نزدیک به کمترین و بیشترین حد جزء این گروه قرار گیرند. این معیار می تواند تضمین کننده کارایی و اعتبار مدل

نتایج دبی کل جریان نسبی محاسبه شده از رابطه ۹ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی گروه آموزش مدل در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، نتایج محاسباتی با مقادیر اندازه گیری شده دبی نسبی بسیار مطابقت دارد. از مهم ترین ویژگی های نتایج مدل GEP، تخمین مناسب مدل در دبی های زیاد جریان است؛ با توجه به اینکه در مقاطع مرکب، هر چه دبی جریان بیشتر باشد، به نوعی بیان کننده هندسه بزرگ تر کانال مرکب است و مشابهت بیشتر آن با رودخانه های طبیعی را نشان می دهد. این مورد یکی از موارد مهم در ارزیابی دقت مدل های ریاضی مرتبط با هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب است.

به منظور برجسته کردن دقت و قابلیت مدل GEP در تعیین دبی کل جریان در مقاطع مرکب، در شکل ۴، نتایج روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب نیز ارائه شده است. مقایسه نتایج این روش با روش GEP، به وضوح کارایی بهتر مدل GEP را نشان می دهد. نکته مهم در بررسی نتایج روش تجزیه قائم مقطع مرکب این است که با افزایش دبی جریان، خطای این روش نیز افزایش یافته است. این مسئله نشان می دهد کاربرد این روش در رودخانه های طبیعی باید با احتیاط صورت گیرد. برای اطمینان از قابلیت و کارایی رابطه پیشنهادی ۹ در تخمین دبی کل جریان در مقاطع مرکب، لازم است اعتبار این رابطه برای داده های

$$F_r = Dr^{12} \left( e^{Dr+1/6746} \right)^2 - 10/6706 Dr^5 + Dr^2 \quad (13)$$

۳. در مرحله سوم، پارامتر  $COH$  به عنوان متغیر ورودی و خطای به دست آمده از مدل دوم به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده و مدل سازی انجام می شود. رابطه ۱۴ به عنوان رابطه نهایی مدل سوم استخراج شد:

$$F_r = COH^{12} - 0/276672 (COH - 0/6170)^{19} + COH^{22} (0/48703 COH + 0/276672 COH)^2 \quad (14)$$

دوباره مدل سازی انجام شد. رابطه ۱۵ به عنوان رابطه نهایی و به نوعی اثر متقابل پارامترهای ورودی بر یکدیگر استخراج شد:

$$F_{int} = \left( Dr - \left( \left( \frac{Q_{VDCM}}{Q_b} \right)^{12} - 1/194275 \right) \right) + \frac{\frac{Q_{VDCM}}{Q_b} \times COH \times \sqrt{Dr}}{COH + \left( \frac{Q_{VDCM}}{Q_b} \right)^2 - \frac{Q_{VDCM}}{Q_b}} \quad (15)$$

$$+ \left( 2Dr (COH)^2 - Dr^2 \right)^6 - Dr$$

MSGEP مطابقت خوبی با مقادیر اندازه گیری شده دارد. نتایج این مدل نیز مشابه با مدل GEP در دبی های زیاد جریان دقت قابل قبولی دارد و اعتبار آن را در تعیین دبی های سیلاب نشان می دهد. در این شکل، محاسبات دبی کل جریان نسبی مربوط به داده های گروه آزمون روش MSGEP نیز ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، نتایج این مدل در بخش آزمون نیز بسیار مناسب است و دقت بسیار بیشتری نسبت به نتایج روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب دارد.

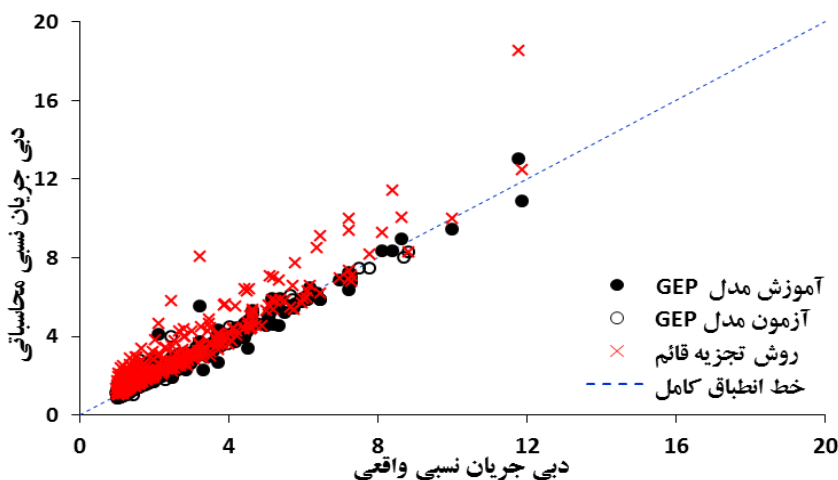
۲. در مرحله دوم، پارامتر  $Dr$  به عنوان متغیر ورودی و خطای به دست آمده از مدل اول به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته می شود. دوباره بر این اساس، مدل سازی انجام شده و رابطه ۱۳ به عنوان رابطه نهایی مدل دوم استخراج شد:

۴. در مرحله چهارم، هر سه پارامتر  $Dr$ ،  $\frac{Q_{VDCM}}{Q_b}$  و  $COH$  به عنوان متغیرهای ورودی و خطای به دست آمده از مدل سوم به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده و

۵. مدل یا تابع نهایی روش MSGEP برای تخمین دبی جریان نسبی در مقاطع مرکب از مجموع توابع استخراج شده از مراحل یاد شده به دست می آید:

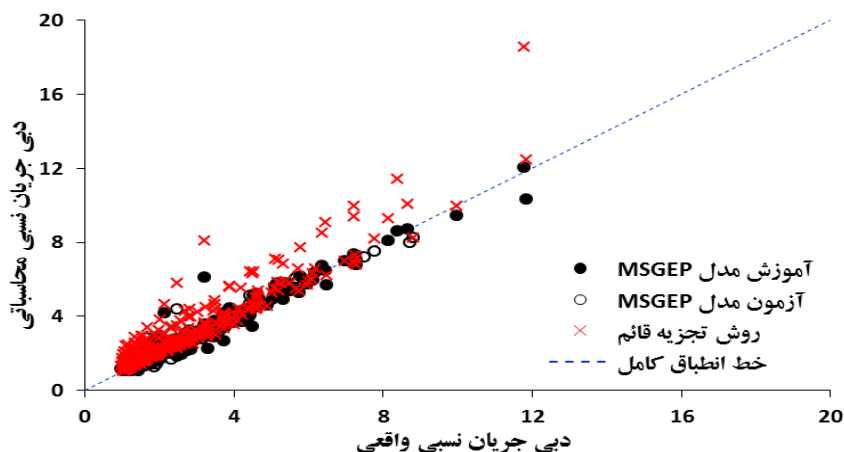
$$F_{Total} = \frac{Q_t}{Q_b} = (F_1 + F_r + F_v) + F_{int} \quad (16)$$

در شکل ۵ نتایج دبی کل جریان نسبی محاسبه شده از رابطه ۱۶ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی داده های گروه آموزش مدل و نیز نتایج روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود به جز برای چند مورد، مقادیر به دست آمده از روش



شکل ۴. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل GEP و روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب با مقادیر مشاهداتی دبی نسبی برای داده های آموزش و آزمون مدل





شکل ۵. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل MSGEP و روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب با مقادیر مشاهداتی دبی نسبی برای داده های آموزش و آزمون مدل

### تجزیه و تحلیل آماری نتایج

برای بررسی بهتر دقت نتایج محاسباتی مدل های پیشنهادی این تحقیق، شاخص های آماری مهم مرتبط با نکویی برازش برای این مدل ها در جدول های ۲ و ۳ به ترتیب برای داده های بخش آموزش و آزمون مدل ها محاسبه شده است. بر اساس جدول ۲، از میان سه روش استفاده شده در این تحقیق، مدل MSGEP با ضریب تعیین ۰/۹۶۰، میانگین مجذور مربعات خطای ۰/۳۳۲ و

میانگین خطای مطلق ۱۰/۲۳ درصد بیشترین دقت در تخمین دبی جریان در مقاطع مرکب را دارد. مدل GEP با ضریب تعیین ۰/۹۶۲، میانگین مجذور مربعات خطای ۰/۳۵۸ و میانگین خطای مطلق ۱۱/۰۷ درصد دقت بسیار مناسبی دارد و با اختلاف بسیار کم در اولویت دوم است. مقادیر این سه شاخص آماری برای روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب به ترتیب ۰/۸۹۴، ۰/۸۳۷ و ۱۹/۳۲ درصد به دست آمده است.

جدول ۲. نتایج شاخص های آماری برای مدل های استفاده شده در مرحله آموزش

متوسط خطای مطلق MAE	مجذور مربعات خطا RMSE	ضریب تعیین $R^2$	مدل استفاده شده
۱۹/۳۲	۰/۸۳۷	۰/۸۹۴	روش تجزیه قائم
۱۱/۰۷	۰/۳۵۸	۰/۹۶۲	برنامه ریزی بیان ژن
۱۰/۲۳	۰/۳۳۲	۰/۹۶۰	برنامه ریزی بیان ژن چندمرحله ای

جدول ۳. نتایج شاخص های آماری برای مدل های استفاده شده در مرحله آزمون

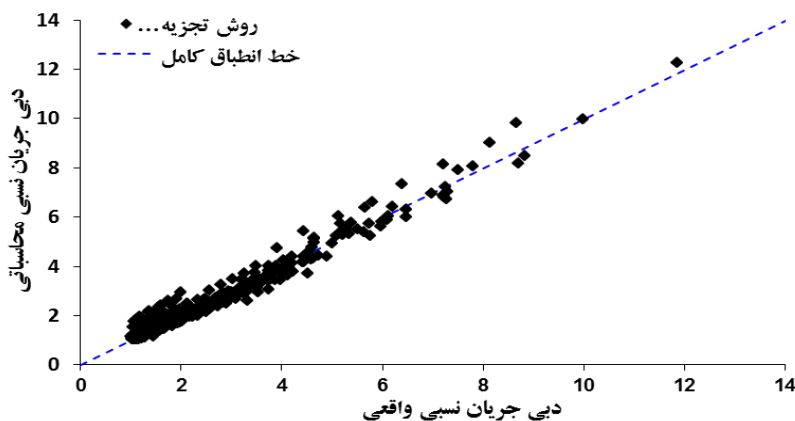
متوسط خطای مطلق MAE	مجذور مربعات خطا RMSE	ضریب تعیین $R^2$	مدل استفاده شده
۱۸/۹	۰/۶۱۷	۰/۹۰۶	روش تجزیه قائم
۱۱/۶۶	۰/۳۸۴	۰/۹۶۰	برنامه ریزی بیان ژن
۱۰/۶۰	۰/۳۲۴	۰/۹۵۳	برنامه ریزی بیان ژن چندمرحله ای

اصلی و دشت های سیلابی، دخالت پدیده اثر متقابل و تبادل مومنتوم بین مقطع اصلی و دشت های سیلابی در محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب لحاظ می شود. در شکل ۶ نتایج این روش در مقایسه با مقادیر دبی جریان واقعی مقایسه

به منظور مقایسه دقت نتایج روش پیشنهادی نسبت به روش های محققان مختلف، روش هاتوف و همکارانش (۲۰۰۸) موسوم به «تجزیه تبادلی مقطع مرکب» انتخاب شد. در این روش بر اساس اصلاح سرعت های جریان در مقطع

داد این روش با میانگین خطای مطلق ۱۲/۵۸ درصد تا حدودی خطای بیشتری نسبت به دو روش GEP و MSGEP دارد، اما بر روش تجزیه قائم برتری در خور توجهی دارد. ضریب تعیین روش تجزیه تبادلی ۰/۹۷ و میانگین مجذور مربعات خطای آن حدود ۰/۳۰۹ به دست آمده است.

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش تجزیه تبادلی دقت مناسبی در تخمین دبی کل جریان دارد. البته، اگرچه دقت نتایج در مقادیر دبی‌های نسبتی زیاد بیشتر است، در محدوده دبی‌های نسبتی کم، دقت این روش تا حدود زیادی کاهش یافته است. محاسبه شاخص‌های آماری نشان



شکل ۶. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل تجزیه تبادلی هاتوف و همکارانش (۲۰۰۸) با مقادیر مشاهداتی دبی نسبی

اینکه امروزه در مدل‌های ریاضی مانند HEC-RAS و MIKE-11 از روش تجزیه قائم مقطع برای حل پروفیل سطح آب در کانال‌ها و رودخانه‌های سیلابی استفاده می‌شود. این در حالی است که در روش یادشده، دبی جریان بیش از دبی واقعی تخمین زده می‌شود و به نوعی در محاسبات پروفیل سطح آب، ارتفاع دیواره خاکریزهای حفاظتی کمتر از حد مجاز به دست خواهد آمد. به عنوان یک پیشنهاد اجرایی می‌توان از روابط نهایی ۱۱ یا ۱۶ در محاسبات پروفیل سطح آب استفاده کرد. این کار دقت محاسبات و طراحی‌های دایک‌های کنترل سیلاب را تا حدود زیادی افزایش خواهد داد.

#### منابع

- [1]. Ackers, P. Hydraulic design of two-stage channels. *Journal of Water and Maritime Engineering*. 1992 Dec ; 96: 247-257.
- [2]. Jiang, B., Yang, K., and Cao, S. An analytical model for the distributions of velocity and discharge in compound channels with submerged vegetation. *PLoS ONE*. 2015 Jul 10; 10(7): 1-17.
- [3]. Yang, Z., Gao, W. and Huai, W. Estimation of discharge in compound channels based on energy concept. *Journal of Hydraulic Research*. 2102 Aug 31; 50(1): 105-113.

#### نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت تعیین دبی جریان در رودخانه‌های سیلابی و نیز خطای نسبتاً زیاد روش‌های موجود برای محاسبه این پارامتر، در این مقاله از روش جدید برنامه‌ریزی بیان ژن چندمرحله‌ای برای محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای استفاده شد. با جمع‌آوری داده‌های کاملی از مقاطع مرکب با هندسه و شرایط هیدرولیکی مختلف، سه روش تجزیه قائم مقطع مرکب، برنامه‌ریزی بیان ژن و برنامه‌ریزی بیان ژن چندمرحله‌ای مدل‌سازی شده و دقت نتایج آنها ارزیابی شد. نتایج نشان داد روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب با میانگین خطای حدود ۱۹ درصد، کارایی مناسبی برای محاسبه دبی کل جریان رودخانه‌ها در شرایط سیلاب ندارد. این در حالی است که روش برنامه‌ریزی بیان ژن چندمرحله‌ای با میانگین خطای حدود ۱۰ درصد دقت بیشتری دارد و می‌تواند به عنوان روشی کاربردی در طرح‌های مهندسی رودخانه و کنترل سیلاب استفاده شود. روش برنامه‌ریزی بیان ژن نیز با خطای متوسط حدود ۱۱ درصد دقت زیادی دارد و به دلیل داشتن محاسبات کمتر نسبت به روش برنامه‌ریزی بیان ژن چندمرحله‌ای، به عنوان یک روش کاربردی قابل توصیه است. نکته دیگر

- [4]. Conway, Ph., O'Sullivan, J.J., and Lambert, M.F. Stage-discharge prediction in straight compound channels using 3D numerical models. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management*. 2013 Jun; 166(1): 3-15.
- [5]. Wark, J.B., Samuels, P.G., and Ervine, D.A. A practical method of estimating velocity and discharge in compound channels. *International Conference on River Flood Hydraulics*. London, 1990 Sep; 163-172.
- [6]. Shiono, K. and Knight, D.W. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*. 1991 Jun; 222: 617-646.
- [7]. Hu, C., Ju, Z., and Guo, Q. Flow movement and sediment transport in compound channels. *Journal of Hydraulic Research*. 2010 Mar 18; 48(1): 23-32.
- [8]. Wormleaton, P.R. and Merrett, D.J. 1990. An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/floodplain sections. *Journal of Hydraulic Research*. 1990 Apr; 28(2): 157-174.
- [9]. Bousmar, D., and Zech, Y. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1999 Jul 1; 125(7): 696-70.
- [10]. Naik, B. and Khatua, K.K. Water surface profile computation in nonprismatic compound channels. *Aquatic Procedia*. 2015 Jun 25; 4: 1500-1507.
- [11]. Zahiri, A., Azamathulla, H.Md. Comparison between linear genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels. *Neural Computing & Applications*. 2014 Feb; 24(2):413-420.
- [12]. Zahiri, A., Dehghani, A.A. and Azamathulla, H.Md. "Chapter 4. Application of gene-expression programming in hydraulics engineering". *Handbook of Genetic Programming Applications*, A.H. Gandomi, A.H. Alavi and C. Ryan (eds). Springer. 2015; 71-98.
- [13]. Huthoff, F., Roose, P.C., Augustijn, D.C.M., and Hulscher, S.J.M.H. Interacting divided channel method for compound channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2008 Aug; 134(8):1158-1165.
- [14]. Liu, W., and James, C. S. Estimating of discharge capacity in meandering compound channels using artificial neural networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000 Nov 2; 27(2): 297-308.
- [15]. Zahiri, A., and Dehghani, A.A. Flow discharge determination in straight compound channels using ANN. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. Italy, 2009 Oct 28-30; 58: 12-15.
- [16]. Unal, B., Mamak, M., Seckin, G., and Cobaner, M. Comparison of an ANN approach with 1-D and 2-D methods for estimating discharge capacity of straight compound channels. *Advances in Engineering Software*. 2010 Feb 1; 41: 120-129.
- [17]. Parsaei, A., Yonesi, H. and Najafian, S. Predictive modeling of discharge in compound open channel by support vector machine technique. *Earth System Environment*. 2015 May 9; 1:1-6.
- [18]. Azamathulla, H.Md., and Zahiri, A. Flow discharge prediction in compound channels using linear genetic programming. *Journal of Hydrology*. 2012 Aug 6; 454-455C: 203-207.
- [19]. Chow, V.T. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill. London. 1959.
- [20]. Chadwick, A., and Morfett, J., and Borthwick, M. *Hydraulics in civil and environmental engineering*. CRC Press, Fourth Edition. 2004.
- [21]. Martin, L.A. and Myers, R.C. Measurement of overbank flow in a compound river channel. *Journal of Institution of Water and Environment Management*. 1991 Dec; 91(2): 645-657.
- [22]. Ferreira, C. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems*. 2001 Feb 25; 13(2): 87-129.
- [23]. Sattar, M.A. Gene expression models for the prediction of longitudinal dispersion coefficients in transitional and turbulent pipe flow. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2014 Feb; 5(1): 04013011.
- [24]. Gandomi A.H., and Alavi, A.H. Multi-stage genetic programming: A new strategy to nonlinear system modeling. *Information Sciences*. 2011 Jul 23; 181(23): 5227-5239.
- [25]. Blalock, M.E. and Sturm, T.W. Minimum specific energy in compound channel. *Journal of Hydraulic Division*. 1981 Nov; 107: 699-717.
- [26]. Knight, D.W. and Demetriou, J.D. Flood plain and main channel flow interaction. *Journal of Hydraulic Division*. 1983 Aug 1; 109(8):1073-1092.
- [27]. Knight, D.W. and Sellin, R.H. J. The SERC flood channel facility. *Journal of Institution of Water and Environment Management*. 1987 Jan 23; 1(2): 198-204.

- [28]. Lambert, M.F. and Sellin, R.H.J. Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept. *Journal of Hydraulic Research*. 1996 Mar 18; 34: 381-394.
- [29]. Myers, R.C. and Lyness, J.F. Discharge ratios in smooth and rough compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1997 Mar 1; 123(3): 182-188.
- [30]. Lambert, M.F., and Myers, R.C. Estimating the discharge capacity in straight compound channels. *Water, Maritime and Energy*. 1998 Jan; 130:84-94.
- [31]. Haidera, M.A., and Valentine, E.M. A practical method for predicting the total discharge in mobile and rigid boundary compound channels. *International Conference on Fluvial Hydraulics*. Belgium. 2002 Sep 4-6; 153-160.
- [32]. Lai, S.H. and Bessaih, N. Flow in compound channels. *1st International Conference on Managing Rivers in the 21<sup>st</sup> Century*. Malaysia. 2004 Sep 21-23; 275-280.
- [33]. Atabay, S., and Knight, D.W. 1-D modelling of conveyance, boundary shear and sediment transport in overbank flow. *Journal of Hydraulic Research*. 2006 Nov; 44(6): 739-754.
- [34]. Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, H. and Zech, Y. Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004 Apr; 130(4): 305-312.
- [35]. Fernandes, J.N., Leal, J.B. and Cardoso, A.H. Analysis of flow characteristics in a compound channel: comparison between experimental data and 1-D numerical simulations. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Urban Environment Symposium*. Sweden 2010 Jun 9-11; 249-262.
- [36]. Knight, D.W., Shiono, K., and Pirt, J. Predictions of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. *International Conference on Hydraulics and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters*. UK. 1989 Sep 19-21; 419-428.
- [37]. Tarrab, L., and Weber, J.F. Transverse mixing coefficient prediction in natural channels. *Computational Mechanics*. 2004 Jun; 13: 1343-1355.