

مدل سازی دبی بار بستر در لوله های فاضلاب رو با شرایط مرزی متفاوت با استفاده از روش برنامه ریزی بیان ژن (GEP)

کیومرث روشنگر^{۱*}، رقیه قاسم پور^۲

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش آب و سازه هیدرولیکی، دانشگاه تبریز

roshangari@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۵/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش ۹۶/۰۲/۳۱

چکیده

پیش بینی دقیق بار رسوبی یکی از مهم ترین موضوعات مهندسی آب است. به دلیل پیچیدگی پدیده رسوب و تأثیر پارامترهای مختلف در تخمین نرخ انتقال آن، تعیین معادلات حاکم بر آن مشکل بوده و مدل های کلاسیک ریاضی نیز در این راستا از دقت کافی برخوردار نیستند. در این مقاله کارایی روش برنامه ریزی بیان ژن (GEP) در تخمین دبی بارکف در لوله های فاضلاب رو با شرایط مرزی متفاوت (یعنی بستر ثابت و بستر متحرک) ارزیابی شده است. بدین منظور برای هر شرایط مرزی مدل های ورودی مختلفی مبتنی بر مفاهیم تئوریک و تحت دو سناریو بر اساس دبی رسوب فقط تابعی از مشخصات جریان (سناریو ۱) و دبی رسوب تابعی از هر دو مشخصات جریان و ذرات رسوب (سناریو ۲) تعریف شد. سپس دقت و کارایی چندین فرمول انتقال بار بستر موجود مورد بررسی قرار گرفت و با مدل برتر روش GEP در هر شرایط مرزی مقایسه شد. نتایج به دست آمده ضمن تأیید قابلیت و کارایی روش برنامه ریزی بیان ژن در تخمین دبی عبوری از لوله های انتقال فاضلاب، برتری این روش را نسبت به روابط نیمه تجربی به اثبات رساند. همچنین مشاهده شد که مدل های تعریف شده تحت سناریو ۲ نتایج مطلوب تری را نسبت به مدل های سناریو ۱ ارائه می دهند.

واژگان کلیدی: رسوب، لوله های فاضلاب، برنامه ریزی بیان ژن، بستر ثابت و متحرک.

۱- مقدمه

پیچیده بار بستر و عدم وجود داده های اندازه گیری شده کافی تعیین دقیق آن در لوله های فاضلاب مشکل است. وجود ذرات رسوب در لوله های فاضلاب می تواند مشکلاتی از قبیل مسدود شدن لوله، ایجاد سیل موضعی و تغییر شرایط هیدرولیکی با افزایش زبری کلی لوله و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال لوله شود [1]. تاکنون در مورد بار بستر روابط متعددی بر اساس مشخصات جریان و ذرات رسوب توسعه یافته است. با این حال روابط موجود به دلیل عدم وجود

رسوب گذاری یکی از پدیده های متداول در لوله های انتقال آب و فاضلاب شهری هست. به دلیل طبیعت متناوب جریان مقداری رسوب همیشه در این لوله ها وجود دارد. انتقال رسوب در محیط دو فازه آب و رسوب پدیده ای پیچیده است که می تواند به صورت بار بستر یا بار معلق صورت گیرد. در انتقال بار بستر ذرات می توانند به صورت لغزش، جهش یا غلطش حرکت نمایند. به دلیل ماهیت

رسوب و رسوب‌گذاری و فرسایش آن‌ها پرداختند. آن‌ها از پیوستگی و چسبندگی رسوبات به عنوان فاکتورهای مهم در انتقال رسوب نام بردند. پرسکوتا و اتا¹ [12] با استفاده از ذرات رسوبی با قطرهای مختلف (۰/۷۲ تا ۲/۵ میلی‌متر) به بررسی انتقال رسوب در لوله‌ها با شرایط جریان نیمه‌پر پرداختند. مشاهده شد تمامی ذرات به صورت بار بستر انتقال می‌یابند. به‌هرحال، کاربرد بسیاری از این فرمول‌ها محدود به مواردی است که منطبق با فرضیات و شرایط توسعه و استخراج فرمول‌ها باشند و برای تمامی موارد نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد. از آنجاکه اندازه‌گیری دقیق میزان رسوب موجب بهبود و بهینه‌سازی در طراحی سیستم‌های انتقال آب باران و فاضلاب می‌شود، پس استفاده از روش‌های هوشمندی که بتوانند این پارامتر را دقیق‌تر تخمین بزنند ضروری به نظر می‌رسد. در دهه‌های اخیر روش‌های محاسباتی نرم [مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network; ANN)، برنامه‌ریزی ژنتیک (Genetic Programming; GP)، ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine; SVM) و مدل‌های نرو-فازی (Nero Fuzzy)] (NF) برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت بوده و هر کدام ویژگی خاص خود را دارد. به عنوان نمونه روش شبکه عصبی قدرت یادگیری و سرعت آموزش بالایی دارد. آموزش آن کمی آسان‌تر است و معمولاً دارای تخمین دقیق‌تری است. با این حال نتایج حاصل از آن غیرصریح است. در بین تمامی روش‌های هوش مصنوعی، نتایج حاصل از روش GEP صریح و همراه با رابطه کاربردی است. تاکنون از روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای تخمین پارامترهای مختلفی استفاده شده است، مانند پیش‌بینی بار کل رسوبی به وسیله روشنگر و همکاران [13]، پیش‌بینی بارش-رواناب به وسیله کیسی و همکاران [14]، مدل‌سازی افت انرژی در سرریزها به وسیله روشنگر و همکاران [15]، پیش‌بینی عمق آب‌های زیر زمینی به وسیله شیر و کیسی [16]، پیش‌بینی سری‌های زمانی دبی به وسیله ونگ و همکاران¹¹ [17]. لوله-های فاضلاب‌رو نقش مهمی در مدیریت سیستم‌های مربوط به انتقال فاضلاب و آب باران دارند. عملکرد این سیستم‌ها می‌تواند تحت

داده‌های اندازه‌گیری شده کافی و وجود فرضیات متفاوت در استخراج آن‌ها در شرایط مختلف جواب‌های متفاوتی را ارائه می‌دهند. روشنگر و همکارانش [2] با بررسی انتقال بار بستر در رودخانه‌ای با بستر حاوی ذرات درشت دانه نشان دادند که کارایی فرمول‌های نیمه تجربی بسته به شرایط جریان متفاوت است. می¹ [3] رسوب‌گذاری در فاضلاب‌های انتقال‌دهنده آب باران را بررسی کرد و قطر متوسط ذرات را ۲/۵ میلی‌متر گزارش داد. بناسیک² [4] آزمایش‌هایی را در مورد انتقال رسوبات غیر چسبنده در لوله‌ها انجام داد و به بررسی رفتار رسوبات ته‌نشین شده و تاثیر آنها روی عملکرد هیدرولیکی لوله‌ها پرداخت. نتایج آزمایش‌های او نشان داد که افزایش عمق بستر رسوبی باعث کاهش ظرفیت انتقال رسوب می‌شود. رنات³ [6] با بررسی رسوب در لوله‌های فاضلاب‌رو به ارزیابی فرمول‌های نیمه تجربی موجود پرداخت و به این نتیجه رسید که فرمول می، عملکرد بهتری دارد. سراون⁴ [7] رسوب‌گذاری در لوله صاف به قطر ۱۵۲ میلی‌متر را مطالعه کرده و از ذرات ماسه با قطر ۰/۵۸ و ۱/۶۲ میلی‌متر استفاده کرد که به‌صورت بار بستر انتقال می‌یافتند. نتایج آزمایش‌های او نشان داد که غلظت حجمی رسوب تابعی از دبی جریان و نسبت عمق رسوب به عمق لوله می‌باشد. گراف و آکاراقلو⁵ [5] با بررسی داده‌های موجود، فرمولی را بر اساس پارامترهای بدون بعد انتقال رسوب و تنش برشی ارائه نمودند. مایرلی⁶ [8] آزمایش‌هایی را در حالت رسوب‌گذاری محدود با شرایط جریان نیمه‌پر در لوله صاف و کانال مستطیلی انجام داد. ساخوجا و پال⁷ [9] با مطالعات تجربی در لوله-های دارای رسوبات ته‌نشین نشده فرمول انتقال بار بستری را که برای هر نوع کانالی با شکل مختلف کاربرد داشت ارائه داد. وانگ و همکاران⁸ [10] طی کار تحقیقی، معیارهای خود تمیزی در لوله‌های فاضلاب را بر اساس سرعت و تنش برشی حداقل بررسی کردند. برتراند و همکارانش⁹ [11] طی کار پژوهشی خود در مورد فاضلاب‌ها به بررسی مشخصات مواد رسوبی و چگونگی انتقال

1May, (1982)

2 Banasiak, (2008)

3Renaat, (2003)

4Craven, (1953)

5Graf and Acaroglu, (1968)

6Mayerle, (1988)

7Sakhuja and Paul, (1990)

8Vongvisessomjai et al, (2010)

9Bertrand et al, (1993)

10Perrusquia and Ota, (2013)

11Wang et al, (2009)

وسیله فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع شد [19]. GEP روشی مناسب برای مدلسازی فرآیندهای غیرخطی و پیچیده است. این نوع الگوریتم افرادی کدگذاری شده به شکل کروموزوم‌های خطی با طول ثابت هستند. ساختار خطی کروموزوم‌ها موجب می‌شود استفاده از عملگرهای ژنتیکی مانند جهش و ترکیب همیشه ساختارهای صحیح و معتبری تولید کند. در برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) اولین مرحله، تولید جمعیت اولیه از راه‌حل‌ها است. سپس کروموزوم‌ها به صورت بیان درختی (ETS) نشان داده شده، که این مرحله هم مطابق با یک تابع برازش ارزیابی می‌شود تا میزان مناسب بودن یک راه حل در حیطه مسئله تعیین شود. اگر کیفیت رضایت بخش از یک راه حل پیدا شود و یا نسل‌ها به تعداد معینی برسد، تکامل متوقف می‌شود و بهترین راه‌حل یافت شده تا به حال، گزارش داده می‌شود. از طرف دیگر اگر شرایط توقف ایجاد نشود، بهترین راه حل از نسل حاضر نگه‌داشته می‌شود (به معنای نخبه‌گزینی است) و بقیه راه‌حل‌ها به فرآیند گزینشی واگذار می‌شوند. گزینش یا انتخاب، نقش بقا شایستگی را انجام می‌دهد و بر اساس آن بهترین افراد شانس بهتری برای تولید فرزندان دارند. کل این روند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو، انتظار می‌رود که کیفیت جمعیت نیز به‌طور متوسط بهبود یابد [20]. راه‌حل اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن به‌طور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فرآیند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از تعداد معینی از افراد (جمعیت اولیه) آغاز می‌شود. سپس این کروموزوم‌ها به‌صورت بیان درختی (ETS) اظهار می‌شوند و میزان برازندگی هر فرد در مقابل مجموعه‌ای از برازش‌ها، ارزیابی می‌شود. سپس افراد بر اساس عملکردشان، انتخاب می‌شوند تا با اصلاحات و بهبودهایی دوباره ساخته شوند و در نتیجه فرزندان با ویژگی‌هایی جدید باقی می‌گذارند. این فرزندان جدید، در یک چرخه تحت همان فرآیند توسعه‌ای قرار می‌گیرند یعنی: بیان ژنوم، مواجهه با انتخاب محیط، انتخاب بر مبنای برازش، و تولیدمثل با بهبود. این فرآیند برای تعداد معینی از نسل‌ها تکرار می‌شود تا راه‌حل خوب و مناسبی پیدا شود. قسمت تولیدمثل، شامل تکثیر و اصلاحات ژنتیکی و تکثیر عملیاتی است که چندین فرد مناسب از نسل حاضر را برای نسل بعد نگه می‌دارد. در طول تکثیر، ژنوم کپی شده و به نسل بعد انتقال داده می‌شود.

تأثیر ذرات رسوبی قرار گیرد. از طرفی بخاطر پیچیدگی و عدم قطعیت موجود در پدیده انتقال رسوب، روابط نیمه تجربی موجود از دقت کافی برخوردار نیستند. بنابراین مقاله حاضر روش GEP را برای پیش‌بینی بار بستر در این نوع لوله‌ها بکار برده و به بررسی و تعیین بهترین مدل‌های ورودی و تأثیرگذارترین پارامترها در انتقال رسوب در آنها پرداخته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سری داده‌های انتقال رسوب در لوله‌های فاضلاب‌رو

در این پژوهش از داده‌های آزمایشگاهی گانی [1] و می و همکارانش [18] استفاده شده است. این آزمایش‌ها با استفاده از ماسه غیر چسبنده در لوله با قطرهای متفاوت و در حالت نیمه پر انجام گرفته و انتقال رسوب در دو حالت بستر ثابت (لوله با رسوبات ته‌نشین شده محدود) در دو بستر صاف و زیر و بستر متحرک (لوله حاوی رسوبات ته‌نشین شده) در دو حالت تلماسه (dune)‌های جداگانه و تلماسه‌های به هم پیوسته را مورد بررسی قرار داده است. شکل (۱) مقطع طولی جریان لوله را در دو حالت بستر ثابت و متحرک نشان می‌دهد. دامنه پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در آزمایش‌ها به صورت $0.08 < y_0/D < 0.15$ ، $0.08 < d_{50} < 0.46$ و سه زبری متفاوت بستر $0 < K_0 < 1/34$ است.

شکل ۱- مقطع طولی لوله، (الف) لوله با رسوبات ته‌نشین نشده، (ب) لوله با رسوبات ته‌نشین شده [۱]

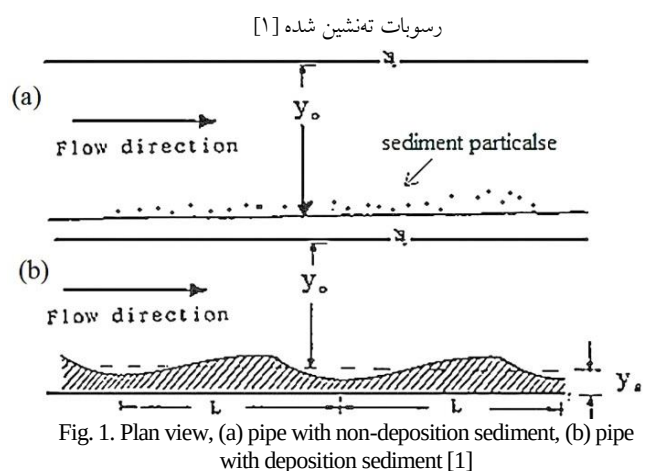


Fig. 1. Plan view, (a) pipe with non-deposition sediment, (b) pipe with deposition sediment [1]

۲-۲- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برنامه‌ریزی بیان ژن که شکل توسعه یافته برنامه‌ریزی ژنتیک است به

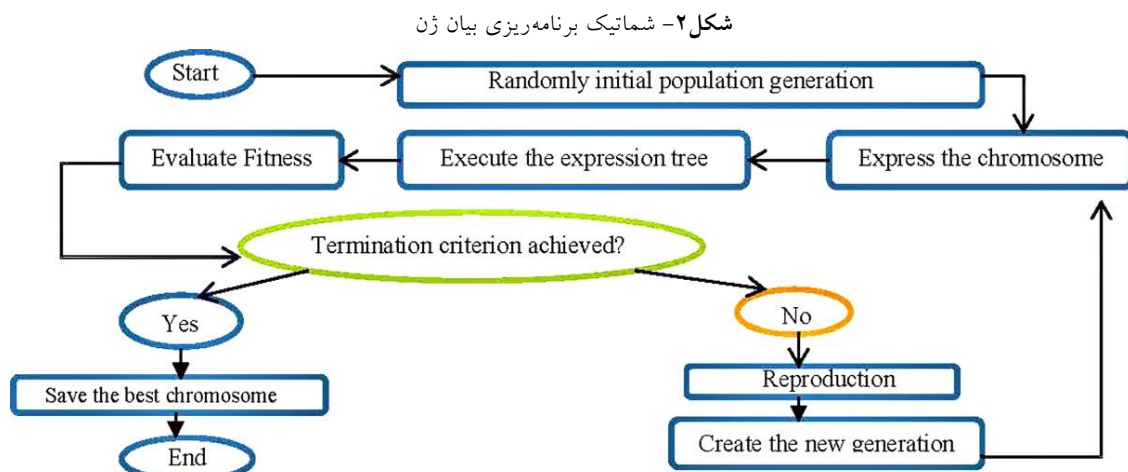


Fig. 2. Schematic view of gene expression programming

جدول ۱. روابط به کار رفته در این پژوهش

Researcher	Formula	Consideration	Theory background	Reference
Ackers (1991)	$C_v = \left[\frac{K \sqrt{g(s_s - 1)d_{50}}}{J} \right]^m$	$0.04 < d_{50} < 28.65 \text{ mm}, \quad K = [A \text{ gr} (11.3 \times (\frac{R}{d_{50}})^{0.1})^{1-n} (\frac{\lambda s}{8})^{\frac{n}{2}}]$ $J = \left(\frac{R}{d_{50}} \times \left(\frac{A}{w_0 R} \right)^{1-n} \times (\frac{\lambda s}{8})^{\frac{n}{2}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad w_0 = 10d_{50}$	Stream power	[21]
Neilsen (1992)	$\frac{qb}{\sqrt{(s_s - 1) \times g \times d_{50}^3}} = (12\theta - 0.05) \times \sqrt{\theta}$	$0.69 < d_{50} < 28.7 \text{ mm}, \quad 1.25 < s_s < 4.22$ $\theta = \frac{\tau_0}{\rho(s_s - 1) \times g \times d_{50}}$	Stream power	[22]
May (1993)	$C_v = \eta \times \left(\frac{D}{w_0} \right)^{-1} \times \left(\frac{A}{D^2} \right)^{-1} \times \left(\frac{\beta \times \lambda s \times V^2}{8 \times g \times (s_s - 1) \times D} \right)$	$\beta = \frac{\exp\left(\frac{R_e}{12.5}\right) - 1}{\exp\left(\frac{R_e}{12.5}\right) + 1}, \quad R_e = \sqrt{\frac{\lambda s}{8}} \times \frac{V \times d_{50}}{\nu}$	Shear stress	[23]
Mayerle (1988)	$C_v^{0.2} = \frac{\sqrt{g \times (s_s - 1) \times d_{50}}}{1.06 \times D \text{ gr}^{-0.4} \times \left(\frac{d_{50}}{R} \right)^{-0.2} \times \lambda s^{-1.05}}$	-	Shear stress	[8]
Laursen (1956)	$C_v^{1/3} = \frac{V}{7 \times \sqrt{2g \times (s_s - 1) \times y_0}}$	-	Stream power	[24]

Table 1. Utilized equations in this study

۲-۳- فرمول‌های بار بستر

استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فرمولی را که انتقال بار بستر را نتیجه‌ی تداخل پیچیده سیال و مواد بستر توصیف می‌کرد، به دست آورد. می [1] فرمول بارکف را بر اساس مفهوم تنش برشی که روی بستر رسوبی عمل می‌کند، ارائه داد. تابع انتقالی مایرلی [8] که با استفاده از آنالیز ابعادی استخراج شده بود، برای داده‌های آزمایشگاهی و با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه توسعه داده شد. لارسن [24] نیز از آنالیز ابعادی برای ارائه فرمول خود استفاده نمود. معادلات نیمه تجربی به‌کاررفته در این پژوهش در جدول (۱) نشان داده شده است.

تاکنون پژوهش‌های بسیاری برای تخمین رسوب کف در فلوم‌ها و لوله‌ها صورت گرفته است و روابط متعددی با توجه به شرایط خاص جریان و نیز ویژگی‌های رسوب توسعه داده‌شده‌اند. در استخراج این فرمول‌ها از مفاهیم تئوری و روش‌های متفاوتی استفاده شده که؛ انتخاب فرمول مناسب برای شرایط مد نظر مشکل است. فرمول بار بستر آکرز- وایت که برای شرایط رودخانه استخراج شده بود به وسیله آکرز برای کانال‌های آبرفتی توسعه داده شد تا شامل شرایط لوله‌های فاضلاب شود [1]. نیلسون [22] با

در این جدول V سرعت جریان (m/s)، d_{50} اندازه متوسط ذرات بستر (m)، A سطح مقطع جریان (m^2)، D_{gr} اندازه بدون بعد ذرات رسوب، D قطر لوله (m)، g شتاب ثقل (m/s^2)، λ_s ضریب اصطکاک کلی، R شعاع هیدرولیکی (m)، J پارامتر بدون بعد آکرز، پارامترهای Ag ، m ، n ، C اعداد ثابتی هستند که بر اساس D_{gr} بدست می آیند، θ عدد شیلدز، qb میزان بار بستر (m^2/s)، η پارامتر انتقال در فرمول می، β عدد ثابتی که بر حسب R_e که عدد رینولدز ذرات است بدست می آید، W_b عرض بستر رسوبی (m)، v ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)، S_s چگالی نسبی ذرات، ρ چگالی آب (kg/m^3)، τ_0 تنش برشی (kgm/s^2)، y_0 عمق جریان (m)، Q_s/Q نسبت دبی رسوب به دبی جریان (ppm) است.

$$x_n = a + b \left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad [4]$$

۳- مدل سازی، نتایج و بحث

۳-۱- تعیین ورودی مدل ها

انتخاب مدل های ورودی در سیستم های هوشمند می تواند روی جواب های حاصل از تحلیل تأثیرگذار، پس سعی شد در مدل سازی، پارامترهای مناسب و مؤثر انتخاب شود. آزمایش های تجربی انجام گرفته توسط چندین پژوهشگر (گانی [1]، می و همکاران [26] و وونگ ویس [10]) نشان می دهد که پارامترهای مهمی که می توانند بر انتقال رسوب در لوله های فاضلاب تأثیر بگذارند به صورت زیر است:

$$V, D_{gr}, d_{50}, D, y \text{ or } R, \lambda_s, s, F_{rm}$$

که در آن پارامترهای D_{gr} و F_{rm} به ترتیب اندازه بدون بعد ذرات و عدد فرود ذرات رسوب است و به صورت زیر تعریف می شوند:

$$D_{gr} = \sqrt[3]{\frac{g(S_s - 1)}{v^2}}, \quad F_{rm} = \frac{v}{\sqrt{gd_{50}(S_s - 1)}}$$

در حالت بستر متحرک پارامترهای W_b عرض بستر رسوبی و S_s عمق بستر رسوبی نیز به عنوان پارامترهای مؤثر در نظر گرفته شدند. در این آزمایش ها C_v (نسبت دبی رسوب به دبی جریان) پارامتر انتقال رسوب در نظر گرفته شده بود.

در پژوهش کنونی سعی شد مدل های متفاوتی تحت دو سناریو به صورت، وابسته به پارامترهای هیدرولیکی و وابسته به پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوب، تعریف شوند. پارامترهای هیدرولیکی به کار رفته شامل Fr عدد فرود جریان، Re عدد رینولدز و y است. لازم به توضیح است که ابتدا مدل ها برای هر چهار حالت (لوله با رسوبات ته نشین نشده در دو بستر صاف و زیر و لوله با رسوبات ته نشین شده به فرم بستر تلماسه های جدا از هم و تلماسه های به هم پیوسته) به صورت جداگانه اجرا شد.

در این پژوهش به منظور ارزیابی کارایی مدل ها از سه پارامتر آماری استفاده شد که عبارت اند از: R ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، (DC) همبستگی خطی بین مقادیر پیش بینی شده و واقعی و $(RMSE)$ ریشه میانگین مربعات خطاها. هر چه مقدار R و DC به یک نزدیک تر و مقدار $RMSE$ برای یک مدل کوچک تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل است. روابط این پارامترهای آماری به صورت زیر است:

۲-۴- معیارهای ارزیابی مدل ها

در این پژوهش به منظور ارزیابی کارایی مدل ها از سه پارامتر آماری استفاده شد که عبارت اند از: R ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، (DC) همبستگی خطی بین مقادیر پیش بینی شده و واقعی و $(RMSE)$ ریشه میانگین مربعات خطاها. هر چه مقدار R و DC به یک نزدیک تر و مقدار $RMSE$ برای یک مدل کوچک تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل است. روابط این پارامترهای آماری به صورت زیر است:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (L_m - \bar{L}_m) \times (L_p - \bar{L}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_m - \bar{L}_m)^2 \times (L_p - \bar{L}_p)^2}} \quad [1]$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (L_m - L_p)^2}{\sum_{i=1}^N (L_m - \bar{L}_m)^2} \quad [2]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(L_m - L_p)^2}{N}} \quad [3]$$

L_m غلظت رسوب اندازه گیری شده، $\bar{L}_m$ متوسط غلظت رسوب اندازه گیری شده، L_p غلظت رسوب شبیه سازی شده، $\bar{L}_p$ متوسط غلظت رسوب شبیه سازی شده، N تعداد داده ها. وارد کردن داده ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می شود پس نرمالیزه کردن داده ها کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع تر مدل می کند. در این پژوهش داده ها مطابق رابطه ۴ نرمالیزه شده اند. که در آن x_{max} ، x_{min} به ترتیب کمینه و بیشینه مقدار داده های مشاهده شده

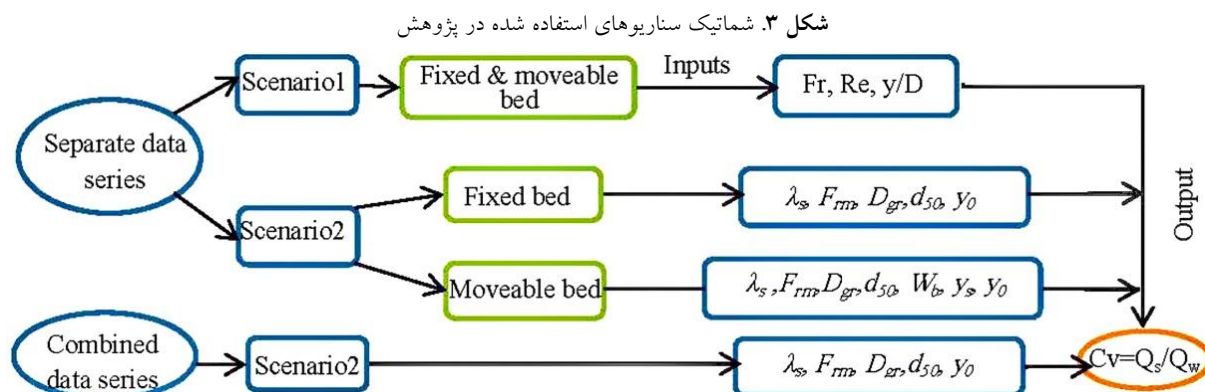


Fig. 3. Schematic view of used scenarios in study

جدول ۲. مدل‌های تعریف‌شده GEP

Scenario 1		Scenario 2			
Fixed & movable beds		Fixed beds		Movable beds	
Model	Inputs	Inputs	Model	Model	Inputs
(I)	Fr	FB(I)	λ_s, F_{rm}	MB(I)	λ_s, F_{rm}
(II)	Re	FB(II)	D_{gr}, F_{rm}	MB(II)	$\lambda_s, F_{rm}, D_{gr}$
(III)	Fr, y_0/D	FB(III)	$\lambda_s, F_{rm}, D_{gr}$	MB(III)	$\lambda_s, F_{rm}, w_b/y_0$
(IV)	Re, y_0/D	FB(IV)	$\lambda_s, F_{rm}, y/d_{50}$	MB(IV)	$y_s/D, F_{rm}, w_b/y_0$
		FB (V)	$\lambda_s, F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/D$	MB(V)	$y_s/D, F_{rm}, w_b/y_0, \lambda_s$
		FB(VI)	$\lambda_s, F_{rm}, D_{gr}, y/d_{50}$	MB(VI)	$\lambda_s, F_{rm}, D_{gr}, w_b/y_0$
		FB(VII)	$\lambda_s, F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/y$	MB(VII)	$\lambda_s, F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/y$

Table 2. GEP developed Models

و انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آن‌هاست. مجموعه ترمینال‌های به‌کار رفته در این پژوهش، متغیرهای مستقل شامل پارامترهای مؤثر در تخمین دبی رسوب است. عملگرهای استفاده شده نیز شامل $+$, $-$, $\times$ و $\div$ به عنوان عملگر اصلی و x^2 , x^3 , $x^{1/3}$, $\sqrt{\quad}$ به عنوان عملگر فرعی است. تعداد کروموزوم‌ها برابر با ۲۵، ۳۰ و ۳۵ و اندازه سر برابر با ۷ و ۸ و تعداد ژن‌های ۳ و ۴ انتخاب شد و برای ترکیب مختلف این پارامترها مدل اجرا شد و معیار ارزیابی خطای مدل (RMSE) محاسبه، مشاهده شد که مدل با تعداد کروموزوم‌های ۳۰، تعداد ژن ۳ و اندازه سر برابر با ۷ خطای کمتری را ارائه می‌دهد. همچنین تابع پیوند جمع نسبت به تابع ضرب منجر به نتایج دقیق‌تری شد. یکی از مراحل مهم در تنظیم روش GEP انتخاب مناسب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آنها است. این عملگرها شامل جهش، وارون‌سازی، تراننش، ترکیب و جایگشت است. در عملگر ترکیب شاخه‌هایی که به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند، بین دو درخت والد، معاوضه می‌شوند تا فرزند جدیدی را به وجود آید. عملگر جهش

سپس با توجه به اینکه ممکن است هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد شرایط لوله (صاف یا زبر بودن آن) و نوع فرم بستر شکل گرفته (duns جدا از هم یا به‌هم پیوسته) در دسترس نباشد و همچنین برای بررسی کارایی روش بکار رفته برای محدوده‌ی وسیعی از داده با شرایط متفاوت، کل داده‌های هر چهار حالت با یکدیگر ترکیب شد و این حالت نیز بررسی شد. در تعیین ورودی مدل‌ها از پارامترهای بی‌بعد استفاده شد. شکل (۳) شماتیک سناریوهای استفاده شده را نشان می‌دهد. همچنین جدول (۲) بیانگر مدل‌های تعریف شده است.

۳-۲- پارامترهای مدل‌های GEP

روند تعیین مدل‌های تخمین دبی بار بستر با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن شامل ۵ مرحله است. که به ترتیب عبارتند از: تعیین تابع برازش، انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها، انتخاب ساختار کروموزوم‌ها، انتخاب تابع پیوند

۳-۳- نتایج و بحث

برای تخمین دبی رسوبی در لوله‌های فاضلاب‌رو با شرایط مرزی متفاوت و بررسی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مختلف و همچنین اثر ترکیب داده‌ها، از دو سناریو با در نظر گرفتن تأثیر تنها پارامترهای مربوط به مشخصات جریان (سناریو ۱) و تأثیر هم‌زمان مشخصات جریان و ذرات رسوب در تعیین دبی بارکف (سناریو ۲) به‌عنوان ورودی مدل‌ها، استفاده شد.

۳-۳-۱- مدل‌های تعریف‌شده تحت سناریو ۱

نتایج آنالیز مدل‌های GEP تحت سناریو ۱ در جدول (۴) و شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق با جدول (۴) مشاهده می‌شود برای تمامی موارد مدل (III) با پارامترهای ورودی Fr , y_0/D با توجه به اینکه DC و R بیشتر و $RMSE$ کمتری دارد نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. شکل (۴) نمودار داده‌های مشاهداتی و محاسباتی سری داده‌های تست را برای این مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای مقادیر کم رسوب مدل توانایی تخمین نسبتاً دقیق دبی بارکف را دارد اما در مقدارهای بالاتر قادر به این کار نیست. به طور کلی از نتایج به دست آمده مشخص است که تنها استفاده از پارامترهای مربوط به مشخصات جریان به‌عنوان ورودی مدل‌ها، نمی‌تواند هماهنگی مناسبی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی نشان دهد و چنین به نظر می‌رسد که مدل‌های تعریف‌شده تحت سناریو ۱ از دقت مناسبی برای تخمین دبی بارکف در لوله‌های انتقال دهنده آب باران برخوردار نیستند.

گرهی را در درخت تجزیه انتخاب می‌کند و شاخه زیرین را با شاخه جدید تولید شده عوض می‌کند. در طی فرآیند جایگزینی، جای متغیرهای یک تابع که به‌طور تصادفی انتخاب شده است، باهم عوض می‌شوند. در GEP، دو عملگر ترانشس وجود دارد: IS و RIS (ریشه‌یابی). میزان احتمال این عملگرهای ژنتیکی توسط کاربر در حین اجرای مدل به صورت سعی و خطا تعیین می‌شود. جدول (۳) پارامترهای بهینه مدل‌های GEP به کار رفته در پژوهش را نشان می‌دهد. کل داده‌های موجود برای بستر صاف ۱۹۱ داده، بستر زیر ۱۰۱ داده، بستر یا تلماسه‌های جدا از هم ۵۰ داده و بستر با تلماسه‌های به هم پیوسته ۴۰ داده است. در هنگام مدل‌سازی برای تمامی حالات از ۷۵٪ داده‌ها برای آموزش مدل و ۲۵٪ دیگر برای آزمودن مدل استفاده شد.

جدول ۳. پارامترهای مدل‌های GEP به کار رفته در پژوهش

Description of parameter	Setting of parameter
Function set	$+, -, \times, /, \sqrt{x}, x^2, x^3, x^{1/3}$
Chromosomes	30
Head size	7
Number of genes	3
Linking function	Addition
Fitness function error type	Root Mean Square Error
Mutation rate	0.044
Inversion, IS and RIS transposition rate	0.1
One and Two-point recombination rate	0.3
Gene recombination and transposition rate	0.1

Table 3. Parameters of GEP models used in this study

جدول ۴. نتایج مربوط به مدل‌های GEP تحت سناریو ۱.

Condition	GEP model	Performance criteria						
		Train			Test			
		R	DC	RMSE	R	DC	RMSE	
Fixed bed	Smooth bed	(I)	0.825	0.7	0.092	0.751	0.52	0.11
		(II)	0.636	0.525	0.165	0.638	0.428	0.18
		(III)	0.85	0.721	0.088	0.778	0.61	0.1017
		(IV)	0.8	0.61	0.131	0.78	0.53	0.11
	Rough bed	(I)	0.858	0.76	0.096	0.84	0.634	0.101
		(II)	0.691	0.584	0.162	0.65	0.54	0.175
		(III)	0.889	0.8	0.095	0.859	0.65	0.094
		(IV)	0.868	0.78	0.096	0.86	0.635	0.099
Movable bed	Separate dunes	(I)	0.822	0.721	0.117	0.81	0.57	0.136
		(II)	0.73	0.59	0.158	0.729	0.568	0.159
		(III)	0.841	0.725	0.109	0.82	0.69	0.131
		(IV)	0.829	0.723	0.115	0.814	0.572	0.134
	Continuous bed	(I)	0.81	0.718	0.128	0.79	0.61	0.154
		(II)	0.69	0.58	0.165	0.651	0.58	0.182
		(III)	0.82	0.75	0.107	0.81	0.7	0.142
		(IV)	0.81	0.719	0.1279	0.791	0.62	0.155

Table 4. The results of the GEP models under scenario 1

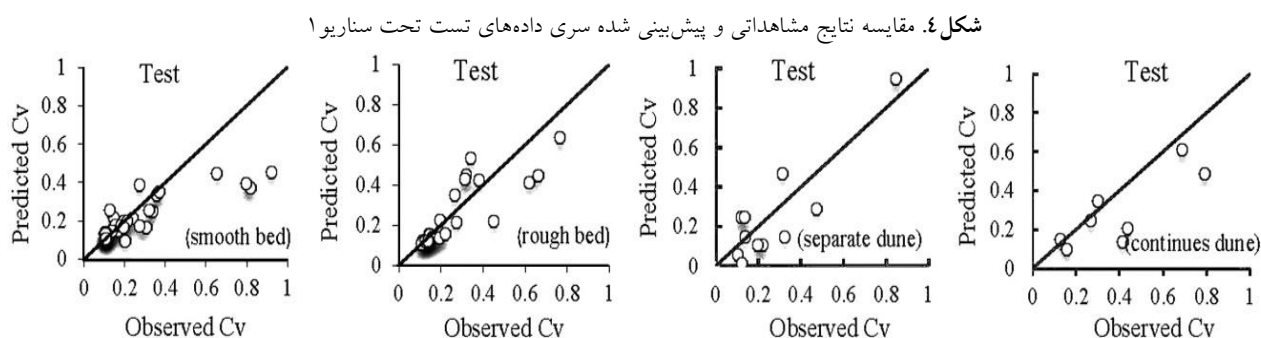


Fig. 4. Comparison of observed and predicted value of test series under scenario 1

ژن ارائه فرمول صریح در مورد پدیده بررسی شده است. با توجه به ماهیت روش GEP که در هر بار اجرا فرمول جدیدی ارائه می‌دهد برای استخراج فرمول بهینه، مدل‌های تعریف شده هر کدام باید چندین بار اجرا شده و در هر اجرا دقت مدل ارزیابی شود و در نهایت فرمول بهینه‌ای که کمترین خطا را دارا باشد ارائه شود. در GEP هر کروموزوم ترکیبی از یک یا چند ژن است که هر کدام به صورت ریز درختی بیان می‌شوند و در نهایت با هم ترکیب شده و بیان درختی پیچیده‌تری را تشکیل می‌دهند. یکی از روش‌های ترکیب این ژن‌ها استفاده از توابع پیوند است. در شکل (۶) بیان درختی فرمول مربوط به بستر زبر آورده شده است که از سه ژن تشکیل شده است. در این شکل d_3, d_2, d_1, d_0 به ترتیب بیانگر پارامترهای $\lambda_s, D_{gr}, d_{50}/y, F_{rm}$ بوده و C_0 و C_1 ضرایب ثابت می‌باشند که در فرمول [۶] جایگذاری شده‌اند. سه ژن توسط تابع پیوند جمع با یکدیگر ترکیب شده‌اند. فرمول‌های بدست آمده در این پژوهش نیز به صورت زیر است:

۳-۳-۲- مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۲

نتایج کلی مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۲ در جدول (۵) و شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده در حالت بستر ثابت برای هر دو بستر صاف و زبر (FB(VII) با ورودی‌های $\lambda_s, F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/y$ مدل برتر شد. از نتایج حاصل در جدول (۵) چنین به نظر می‌رسد که لحاظ کردن عمق جریان به عنوان ورودی مدل موجب بهبود جواب‌ها می‌شود. در مورد بستر متحرک مدل MB(IV) با ورودی‌های $\lambda_s, D_{gr}, d_{50}/y, F_{rm}$ و w_b/y_0 مدل برتر شد. به نظر می‌رسد اضافه کردن پارامترهای λ_s/D و w_b/y_0 در این حالت باعث بهبود جواب‌ها شده است و این امر حاکی از تأثیر عرض و عمق بستر رسوبی و همچنین عمق جریان در تخمین دبی رسوب کف در حالت لوله با رسوبات ته‌نشین شده است. در حالت کلی مطابق با نتایج به دست آمده سناریو ۲ با ورودی‌های وابسته به هر دو مشخصات جریان و ذرات رسوبی عملکرد بهتری را نسبت به سناریو ۱ نشان می‌دهد. و در تخمین دبی بارکف در لوله‌های فاضلاب‌رو موفق‌تر است. نکته مهم در مورد روش برنامه‌ریزی بیان

بستر صاف

$$Cv = \frac{d_{50}}{R} [F_{rm}^2 * (8.869904 - F_{rm}) - F_{rm}] + \left[9.571686 * \lambda_s * \frac{d_{50}}{y} * (17.996) * D_{gr} * F_{rm}^2 \right] + F_{rm} \sqrt{F_{rm} * \sqrt{\left(\frac{d_{50}}{y}\right)} * F_{rm}} \quad [5]$$

بستر زبر

$$Cv = D_{gr} * \left[(F_{rm} - \lambda_s) * D_{gr} - 0.219 \right] + \frac{d_{50}}{y} \left[\left(F_{rm} + \frac{d_{50}}{y} * F_{rm} \right) - \frac{D_{gr}}{3.61556} \right] + \left[\frac{d_{50}}{y} + \sqrt{\frac{d_{50}}{y}} * F_{rm} \right]^2 \quad [6]$$

بستر با dunes جداگانه

$$Cv = \left(\frac{w_b}{y_0} \right)^{1/3} * F_{rm}^2 * \left(\frac{w_b}{y_0} \right)^2 * F_{rm}^3 + \frac{\left(\frac{y_s}{D} - \sqrt{\frac{y_s}{D}} \right)}{-8.2675 * \left(F_{rm} + \frac{w_b}{y_0} \right)} + \left[\frac{w_b}{y_0} + \left(\frac{w_b}{y_0} \right)^2 * \frac{w_b}{y_0} - 4.053405 \right] F_{rm} \quad [7]$$

بستر با dunes به هم پیوسته

$$Cv = \frac{w_b}{y_0} - (F_{rm}^3 * F_{rm})^3 * F_{rm} + \sqrt{\frac{w_b}{y_0} * \sqrt{(.078 + F_{rm} * F_{rm} + [(C_{\frac{y_s}{D}})^4 * (-1.5846 + F_{rm})]^3 * F_{rm}}}} \quad [A]$$

در روابط بالا λ_s بدون بعد بوده و d_{50} ، D ، w_b و y_0 بر حسب واحد طول می‌توانند به کار روند.

جدول ۵. نتایج مربوط به مدل‌های GEP تحت سناریو ۲.

		Performance criteria						
Condition	GEP model	Train			Test			
		R	DC	RMSE	R	DC	RMSE	
Fixed bed	Smooth bed	FB(I)	0.48	0.35	0.198	0.36	0.24	0.219
		FB(II)	0.724	0.551	0.155	0.714	0.521	0.159
		FB(III)	0.88	0.83	0.091	0.85	0.81	0.0947
		FB(IV)	0.915	0.832	0.0831	0.884	0.812	0.0843
		FB(V)	0.932	0.851	0.0789	0.878	0.814	0.0829
		FB(VI)	0.932	0.868	0.076	0.91	0.83	0.081
		FB(VII)	0.949	0.91	0.0688	0.936	0.89	0.073
	Rough bed	FB(I)	0.46	0.348	0.199	0.441	0.31	0.221
		FB(II)	0.695	0.46	0.161	0.653	0.429	0.168
		FB(III)	0.89	0.798	0.0938	0.833	0.72	0.0951
		FB(IV)	0.911	0.86	0.0792	0.88	0.821	0.084
		FB(V)	0.91	0.865	0.079	0.881	0.818	0.0843
		FB(VI)	0.95	0.91	0.055	0.92	0.828	0.061
		FB(VII)	0.971	0.935	0.048	0.966	0.928	0.0501
Movable bed	Separate dunes	MB(I)	0.981	0.961	0.032	0.87	0.69	0.064
		MB(II)	0.982	0.964	0.0302	0.886	0.79	0.071
		MB(III)	0.99	0.971	0.0225	0.96	0.88	0.0375
		MB(IV)	0.994	0.98	0.0221	0.966	0.924	0.029
		MB (V)	0.99	0.965	0.027	0.93	0.889	0.0372
		MB(VI)	0.99	0.973	0.037	0.962	0.901	0.034
		MB(VII)	0.992	0.97	0.0223	0.965	0.91	0.034
	Continues bed	MB(I)	0.89	0.79	0.104	0.84	0.538	0.169
		MB(II)	0.914	0.88	0.09	0.88	0.759	0.122
		MB(III)	0.94	0.92	0.048	0.9	0.87	0.077
		MB(IV)	0.99	0.98	0.0316	0.98	0.93	0.049
		MB (V)	0.945	0.93	0.046	0.92	0.885	0.065
		MB(VI)	0.97	0.94	0.044	0.95	0.91	0.052
		MB(VII)	0.92	0.9	0.05	0.89	0.85	0.079

Table 5. The results of the GEP models under scenario 2

شکل ۵. مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش‌بینی شده سری داده‌های تست تحت سناریو ۲.

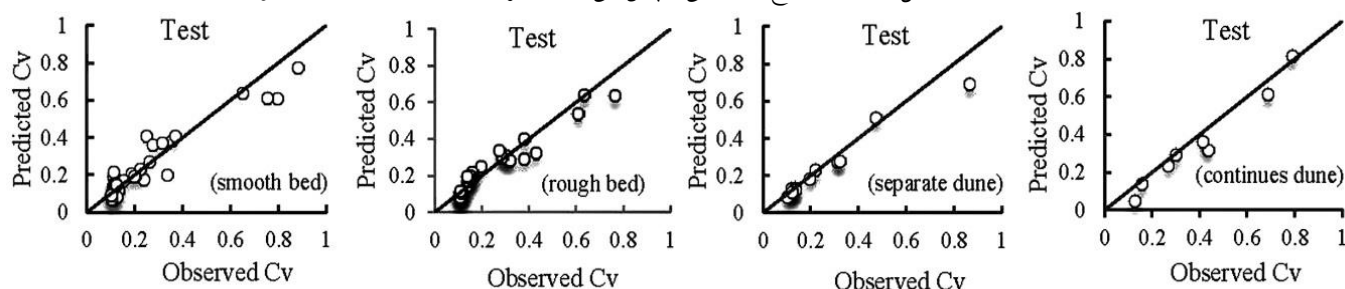


Fig. 5. Comparison of observed and predicted value under scenario 2

شکل ۶. بیان درختی مدل GEP برای بستر زیر.

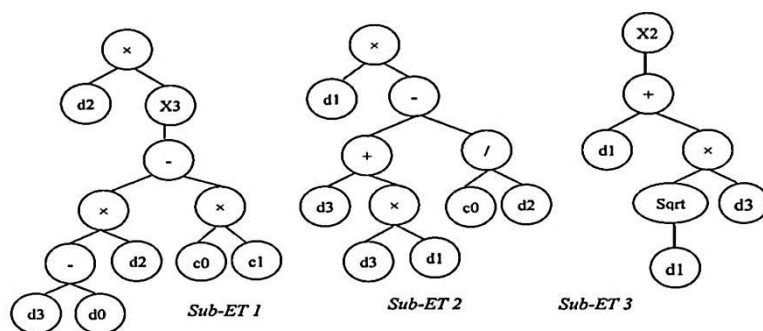


Fig. 6. Expression trees for the GEP model for rough bed.

جدول ۶. نتایج مربوط به مدل های GEP برای ترکیب داده ها.

GEP model	Performance criteria					
	Train			Test		
	R	DC	RMSE	R	DC	RMSE
Mixed data						
$\lambda s, F_{rm}, D_{gr}$	0.749	0.53	0.189	0.729	0.5025	0.191
$\lambda s, F_{rm}, y/d_{50}$	0.82	0.674	0.154	0.81	0.672	0.159
$\lambda s, F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/D$	0.803	0.635	0.158	0.782	0.54	0.162
$\lambda s, F_{rm}, D_{gr}, y/d_{50}$	0.834	0.684	0.132	0.828	0.683	0.142
$\lambda s, F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/y$	0.87	0.74	0.098	0.844	0.7	0.101

Table 6. The results of the GEP models for mixed data.

۳-۳-۵- ارزیابی فرمول های بار بستر و مقایسه با مدل های GEP

داده های مربوط به لوله های فاضلاب برای ارزیابی کارایی تعدادی از فرمول های بار بستر موجود در جدول (۱) استفاده، و نتایج حاصل با مدل برتر روش GEP مقایسه شد. برای تعیین دقت فرمول ها از سه معیار ارزیابی R، DC و RMSE استفاده شد. نتایج مطابق شکل (۸) و جدول (۷) ارائه شده است. مطابق با نتایج جدول (۷)، در حالت لوله با بستر ثابت برای دو بستر صاف و زیر در بین تمامی روابط، معادلات لارسن و مایرلی نتایج بهتری را نشان داده اند و تقریباً برای هر دو بستر جواب های مشابهی را تخمین زده اند. این دو فرمول در حالت لوله با بستر متحرک نتایج مطلوبی را ارائه نمی دهند و رابطه می در این حالت دقت بیشتری را دارد. به هر حال دقت نتایج حاصل شده از تمامی روابط نسبت به مدل های ارائه شده توسط روش GEP کمتر بوده و این روش دارای بیشترین R و DC و کمترین RMSE است. لازم به توضیح است که روابط کلاسیک موجود با توجه به شرایط خاص جریان و نیز ویژگی های رسوب و تحت فرضیات متفاوت توسعه داده شده اند و مطابق با نتایج ارائه شده در جدول (۷) قابلیت تعمیم دادن به همه شرایط را ندارند، درحالی که روش GEP در تمامی موارد جواب های قابل قبولی را ارائه داده و این امر حاکی از عملکرد مناسب آن است.

۳-۳-۳- ترکیب داده ها

با ترکیب کل داده های موجود عملکرد روش برنامه ریزی بیان ژن برای محدوده وسیعی از داده ها ارزیابی شد. جدول (۶) و شکل (۷) شامل نتایج آنالیز چندین مدل از سناریو ۲ برای این حالت است. نتایج حاصل شده بیانگر آن است که با اضافه کردن پارامترهای y/d_{50} و d_{50}/D به مدل ها دقت آنها بهبود یافته است و مدل FB(VII) با پارامترهای $\lambda s, F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/y$ بیشترین دقت را دارد. به هر حال مطابق با نتایج مشاهده می شود که مدل های GEP برای داده های ترکیب شده نسبت به حالتی که داده ها به صورت جداگانه ارزیابی شدند نتایج مطلوبی را به ویژه در مقادیر بالاتر CV ارائه نمی دهند.

شکل ۷. مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش بینی شده برای داده های ترکیب شده.

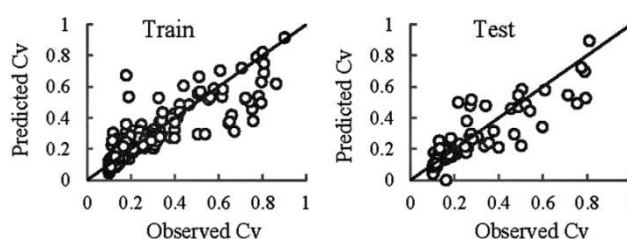


Fig. 7. Comparison of observed and predicted value for mixed data

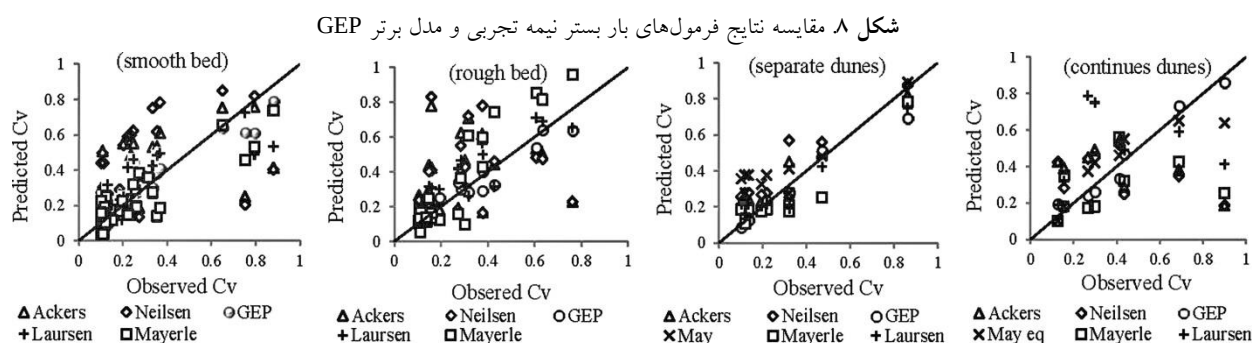


Fig. 8. Comparison of prediction from bed load semi-empirical equations and the best GEP model

جدول ۷. مقایسه معیارهای ارزیابی فرمول‌های نیمه تجربی و مدل برتر GEP.

Formula	Performance criteria					
	Train			Test		
	R	DC	RMSE	R	DC	RMSE
Smooth bed						
GEP	0.936	0.89	0.073	0.966	0.928	0.0501
Ackers	0.6	0.148	0.24	0.35	0.121	0.26
Neilsen	0.54	0.121	0.255	0.281	0.09	0.268
Laursen	0.84	0.705	0.14	0.85	0.7	0.115
Mayerle	0.78	0.694	0.147	0.84	0.67	0.137
Separate dune						
GEP	0.966	0.924	0.029	0.98	0.93	0.049
Ackers	0.8	0.66	0.085	0.75	0.5	0.31
Neilsen	0.71	0.65	0.107	0.56	0.21	0.47
May	0.9	0.78	0.064	0.85	0.76	0.085
Laursen	0.84	0.62	0.084	0.37	0.48	0.093
Mayerle	0.82	0.59	0.089	0.84	0.49	0.095
Continues dune						

Table 7. Comparison of statistical parameters of semi-empirical equations and the best GEP model

داده‌ها و مقایسه آن با حالتی که داده‌ها برای هر شرایط بستر به طور جداگانه آنالیز شدند، مشخص شد که استفاده از داده‌ها به صورت جداگانه منجر به جواب‌های دقیق‌تری می‌شود. همچنین نشان داده شد که زبری بستر و دیواره‌های لوله روی انتقال رسوب تاثیر گذار است. مقایسه نتایج تعدادی از روابط نیمه تجربی با مدل‌های برتر GEP در هر حالت نشان داد که مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن کارایی بالایی را در تخمین دبی رسوب در لوله‌های انتقال فاضلاب دارد و نسبت به روابط کلاسیک موجود دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر است.

References

- [1] Ghani A. 1993 *Sediment Transport in Sewers*. PhD thesis. University of Newcastle Upon Tyne, UK.
- [2] Roushangar K., Hassanzadeh Y., Keynejad M. A., Alami M. T., Nourani V. & Dominique M. 2011 Studying of flow model and bed load transport in a coarse bed river: case study Aland River, Iran. *Hydroinformatics*, 13(4), 850-866.
- [3] May R. W. P. 1982 *Sediment transport in sewers*. Report IT 222. Hydraulic Research Station, Wallingford, England.

۵- مراجع

۴- نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش برای تخمین میزان دبی بارکف در لوله‌های فاضلاب‌رو از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده شد و تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوب تحت دو سناریو ارزیابی شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که سناریو ۲ که در تعیین مدل‌های آن از پارامترهای مربوط به مشخصات جریان و ذرات رسوب به‌عنوان ورودی استفاده شده است نسبت به مدل‌هایی که فقط از پارامترهای هیدرولیکی برای تخمین دبی رسوب استفاده می‌کنند موفق‌تر بوده و از دقت بالاتری برخوردار است. در لوله دارای بستر ثابت در دو حالت بستر صاف و زبر مدل شامل پارامترهای λs , F_{mv} , D_{gr} , d_{50}/y نتایج بهتری را نشان داد. همچنین در لوله حاوی بستر متحرک نیز مدل با پارامترهای y_s/D , F_{mv} , w_b/y_0 مدل برتر شد. این مدل اثر عمق جریان و عرض رسوب را در تخمین میزان رسوب در بستر متحرک به‌خوبی نشان می‌دهد. با آنالیز ترکیب

- of *Hydrology*, **508**, 254-265.
- [16] Shiri J. & Kisi O. 2011 Comparison of genetic programming with neuro-fuzzy systems for predicting short-term water table depth fluctuations. *Computers and Geosciences* **37**(10), 1692-1701.
- [17] Wang W.C., Chau K.W., Cheng C.T. & Qiu L. 2009 A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *Journal of Hydrology*, **374**(3-4), 294-306.
- [18] May R. W. P., Brown P. M., Hare G. R. & Jones K. D. 1989 *Self-cleansing conditions for sewers carrying sediment*. Report SR 221. Hydraulics Research Ltd., Wallingford, England.
- [19] Ferreria C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems*, **13**(2), 87-129.
- [20] Ferreira C. 2004 Gene expression programming and the evolution of computer programs. *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, pp. 82-103.
- [21] Ackers P. 1991 *Sediment aspects of drainage and outfall design*. Proc. Intern. Symposium on Environmental Hydraulics, Hong Kong.
- [22] Neilson p. 1992 Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol.4, World Scientific, Singapore.
- [23] May R. W. P. 1993 *Sediment transport in pipes and sewers with deposited beds*. Report SR 320.25. Hydraulic Research Ltd., Wallingford, England.
- [24] Laursen E. M. 1956 *The hydraulics of a storm-drain system for sediment transporting flow*. Bull. No 5, Iowa Highway Research Board.
- [25] Dawson W. C. & Wilby R. 1998 An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrological Sciences*, **43**(1), 47-66.
- [26] May R. W. P., Ackers J. C., Butler D. & Johnt S. 1996 Development of design methodology for self-cleansing sewers. *Water Science and Technology*, **33**(9), 195-205.
- [4] Banasiak R. 2008 Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments. *Water Science Technology*, **57** (11), 1743-1748.
- [5] Graf W. H. & Acaroglu E. R. 1968 *Sediment transport in conveyance systems: part 1*. Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydr., XIII annee, No 2, 20-39.
- [6] Renat D. S. 2003 Validation of Existing Bed Load Transport Formulas Using In-Sewer Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE/ APRIL/ 325.
- [7] Craven J. P. 1953 The transportation of sand in pipes-full pipe flow. Proc. 5th. *Hydraulic Conf., State University of Iowa Studies in Engineering*, Iowa, USA, 67-76.
- [8] Mayerle R. 1988 *Sediment transport in rigid boundary channels*. PhD thesis. University of Newcastle upon Tyne, England.
- [9] Paul T. C. & Sakhuja V. S. 1990 Why sediment deposit in lined channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, **116**(5), 589-602.
- [10] Vongvisessomjai N., Tingsanchali T. & Babel M.S. 2010 Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow. *Urban Water Journal*, **7**(1), 61-77.
- [11] Bertrand-Krajewski J. L., Briat P. & Scrivener O. 1993 Sewer sediment production and transport modelling: A literature Review. *Journal of Hydraulic Research*, **31**(4), 435-460.
- [12] Ota J. J. & Perrusquia G. S. 2013 Particle velocity and sediment transport at the limit of deposition in sewers. *Water Science and Technology*, **67**(5), 959-967.
- [13] Roushangar K., Vojoudi F. & Shiri J. 2014 Modeling river total bed material load discharge using artificial intelligence approaches (based on conceptual inputs). *Journal of Hydrology*, **514**, 114-122.
- [14] Kisi O., Shiri J. & Tombul M. 2013 Modeling rain fall-runoff process using soft computing techniques. *Computers Geosciences*, **51**, 108-117.
- [15] Roushangar K., Akhgar S., Salmasi F. & Shiri J. 2014 Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal*

Modeling bed-load discharge in sewer pipes with different boundary conditions using Gene Expression Programming (GEP)

Kiyoumars Roushangar^{1*}, Roghayeh Ghasempour²

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz

2-Master of Water and Hydraulic Structure Engineering, Department of Civil Engineering, University of Tabriz

roshangari@tabrizu.ac.ir

Abstract:

Accurate prediction of the sediment load is one of the important issues to water engineering. Due to complexity of sedimentation phenomenon and influence of various parameters on estimation of sediment transport rate, determining the governing equations are difficult, and classical mathematical models are not sufficiently accurate in this regard. In the present study the applicability of Gene-Expression Programming (GEP) for modeling bed load discharge in sewer pipes with different boundary conditions was assessed (i.e. fixed and movable beds). Therefore different input models based on theoretical concepts were defined for each boundary condition. In order to develop the models, under two scenarios, different input combinations were considered, first scenario (Scenario1) which uses only hydraulic characteristics and second scenario (Scenario2) which uses both hydraulic and sediment characteristics as inputs for modeling bedload discharge. The sewer pipes experimental data available in the literature were applied for training and testing the employed GEP. For evaluating the efficiency of the models three statistical indexes which called: Determination Coefficient (DC), Correlation Coefficient (R) and Root Mean Square Errors (RSME) were used. Then the accuracy and capability of several available bed load formulas such as Ackers, Neilsen, May, Mayerle and Laursen were investigated and compared with GEP- best modes in each boundary. Also with considering this point that may there is no information about bed boundary condition and for evaluating the applicability of applied technique for a wide range of data; all data series of sediment transport were combined. Then, for predicting C_v , as the dependent variable, several models of Scenarioa 2 analyzed for the combined data. The obtained results confirmed the efficiency of Gene-Expression Programming method for estimation sediment discharge in sewage pipes, and proved this method superior to the semi- theoretical relationships. According to the results it was found that in scenario 1, for all of the cases, model (IV) with input parameters of Fr and y_0/D presented better performance than the others models, however it was observed that Scenario 2, which took advantage of both hydraulic and sediment parameters as inputs for modeling sediment discharge in sewer pipes performed more successful than Scenario1 which used only combinations of hydraulic parameters as input variables for models. Comparison between the results of separate data sets and combined data set revealed that analyzing data sets separately led to more accurate outcome. According to the results from fixed beds, it was found that adding F_{rm} and d_{50}/y as an input parameter increased the accuracy of the models. For both smooth and rough beds, the model with input parameters λs , F_{rm} , Dgr , d_{50}/y presented better results from the RMSE, R, and DC viewpoints (i.e. highest R and DC and lowest RMSE). For movable beds condition in the two cases of separate dunes and continuous loos bedform, the model with input parameters of ys/D , F_{rm} , W_b/y_0 showed more accuracy. This model showed the influence of flow depth and width and depth of movable bed in estimating of bedload transport in sewer pipes. For loose beds F_{rm} has dominant role than other parameters.

Keywords: Sediment, Gene Expression Programming (GEP), Sewer pipes, fixed and movable bed.