



مدل سازی انتقال رسوب در لوله های دایروی صاف و زبر انتقال دهنده آب باران با استفاده از آنالیز فاکتوریل و روش های هوشمند و تجربی

رقیه قاسم پور، کیومرث روشنگر*

گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۸
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۸
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

کلمات کلیدی:

انتقال رسوب
رگرسیون فرایند گاوسی
روش آنالیز فاکتوریل
لوله با بستر صاف و زبر
لوله های انتقال آب

خلاصه: رسوب گذاری یکی از مشکلات جدی در لوله های انتقال آب و فاضلاب شهری است که انتقال جریان آب را مختل می کند. به دلیل پیچیدگی پدیده انتقال رسوب و وجود چندین پارامتر موثر در تخمین آن، تعیین روابط حاکم مشکل می باشد. در این تحقیق کارایی روش هوشمند رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) در تخمین انتقال رسوب در لوله های دایروی شکل انتقال دهنده آب باران در دو بستر صاف و زبر بررسی شده است. در این راستا، با استفاده از روش آنالیز فاکتوریل و با در نظر گرفتن مشخصات هیدرولیکی و ذرات رسوبی، ابتدا پارامترهای دارای همبستگی بیشتر با پارامتر انتقال رسوب در هر نوع لوله تعیین شد. سپس، با استفاده از این پارامترها مدل های متفاوتی تعریف گردید و با استفاده از سه سری داده آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، دقت نتایج حاصله با روش های سنتی مقایسه شد. نتایج حاصله کارایی و برتری روش هوشمند GPR را در تخمین رسوب انتقالی از لوله های انتقال آب باران نسبت به معادلات تجربی مبتنی بر تکنیک های رگرسیون غیرخطی نشان داد. برای دو لوله با شرایط هیدرولیکی اشاره شده، مدل با پارامترهای $\lambda s, F_m, D_{gr}, d_{50} / y$ که به ترتیب بیانگر اندازه نسبی ذرات، اندازه بدون بعد ذرات، عدد فرود ذرات رسوب و ضریب اصطکاک کلی می باشند، مدل برتر به دست آمد. همچنین مشاهده شد که قطر لوله بر کارایی مدل ها تاثیرگذار بوده و با افزایش قطر لوله دقت مدل افزایش می یابد. نتایج آنالیز حساسیت به دو روش فاکتوریل و حذفی نیز نشان داد که پارامتر d_{50} / y تاثیرگذارترین پارامتر در مدل سازی است.

۱- مقدمه

رسوب گذاری در لوله ها مطالعات متعددی صورت پذیرفته است و روابط متعددی در این زمینه ارائه شده اند. می [۱] به بررسی رسوب در فاضلاب های انتقال دهنده آب باران پرداخت. نتایج آزمایش وی منجر به ارائه مدل تئوری برای انتقال بار بستر در لوله های فاضلابی شد. برتراند و همکاران [۲] طی کار تحقیقاتی خود در مورد فاضلاب ها به بررسی مشخصات مواد رسوبی و نحوه انتقال رسوب و رسوب گذاری و فرسایش آن ها پرداختند. رنات [۳] با استفاده از داده های آزمایشگاهی فرسایش در سیستم فاضلاب ها و داده های انتقال رسوب در لوله ها، به ارزیابی فرمول های تجربی موجود پرداخت. وانگ و همکاران [۴] در تحقیقی به بررسی معیارهای خود تمیزی در لوله های فاضلاب بر اساس سرعت و تنش برشی حداقل پرداخت. اوتا و پروسکا [۵] بر اساس مفهوم رسوب گذاری محدود فرمولی جهت تعیین تنش برشی بستر در لوله های فاضلابی ارائه دادند. بانگ و همکاران [۶] با استفاده از داده های آزمایشگاهی، روابط مربوط به آستانه حرکت را مورد بررسی قرار داده و معیاری جهت تعیین حداقل سرعت برای حالتی که رسوب گذاری در لوله

از سیستم های فاضلابی برای انتقال آب باران و فاضلاب شهری استفاده می گردد. این سیستم ها می توانند به صورت جداگانه یا ترکیبی به کار روند. یکی از پدیده های متداول در شبکه های انتقال آب و فاضلاب شهری پدیده رسوب گذاری است. به دلیل طبیعت متناوب جریان مقداری رسوب همیشه در این لوله ها وجود دارد. انتقال ذرات می تواند به صورت بار بستر یا بار معلق صورت گیرد. به دلیل اینکه وجود رسوب در لوله های انتقال آب باران موجب آلودگی منابع آبی می گردد، لذا در سال های اخیر مسئله انتقال ذرات رسوب در سیستم فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر آلودگی، وجود ذرات جامد در سیستم فاضلاب اثرات مهم دیگری بر روی عملکرد آن می گذارد که از آن جمله می توان به کاهش انتقال جریان در لوله های فاضلاب در اثر کاهش سطح مقطع لوله و افزایش مقاومت هیدرولیکی، ایجاد اضافه بار در داخل لوله، ایجاد سیل موضعی و مسدود شدن لوله اشاره کرد. در مورد

* نویسنده عهده دار مکاتبات: kroshangar@yahoo.com



ایجاد نشود ارائه دادند. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق میزان انتقال رسوب موجب بهبود و بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های انتقال آب و فاضلاب می‌گردد، لذا استفاده از روش‌های هوشمندی که بتوانند این پارامتر را دقیق‌تر تخمین بزنند ضروری می‌باشد. در دهه‌های اخیر روش‌های نرم برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال روشنگر و قاسمپور [۷] با استفاده از روش‌های تلفیقی مبتنی بر کرنل به مدلسازی بارش پرداختند. سیواپراگسام و همکاران [۸] از مدل SVM برای پیش‌بینی بارش - روان آب حوضه تریچوالد واقع در کشور هلند استفاده کردند. روشنگر و قاسمپور [۹] با استفاده از روش‌های هوشمند رگرسیون بردار پشتیبان و سیستم استنتاج عصبی - فازی انطباقی مقاومت جریان را در رودخانه‌های مارپیچی بررسی کردند. ونگ و همکاران [۱۰] با استفاده از چند روش هوش مصنوعی به پیش‌بینی سربهای زمانی دبی پرداختند. رزاقزاده و همکاران [۱۱] به شبیه‌سازی بارش با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری مبتنی بر ترکیب مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و نروفازی پرداختند. کومار و همکاران [۱۲] در مقایسه روش‌های سربزمانی و شبکه عصبی مصنوعی، روش شبکه عصبی مصنوعی را با توجه به سری زمانی پیچیده بارش‌های هند مناسب‌تر دانستند. نایاک و همکاران [۱۳] با مروری بر روش‌های پیش‌بینی بارش در هند، شبکه عصبی مصنوعی را در مقایسه با روش‌های پیش‌بینی عددی مناسب‌تر معرفی کردند. روش‌های هوشمند به عنوان ابزاری توانمند در حل مسائل پیچیده به شمار می‌آیند و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های تجربی هستند [۱۴]. ابتهاج و بنکداری [۱۵] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و شبکه عصبی مصنوعی و فرمول‌های موجود، به بررسی حداقل سرعتی که باعث ایجاد شرایط خود تمیزی در لوله گردد پرداخته و دریافتند که شبکه عصبی مصنوعی نتایج بهتری را نسبت به روابط تئوری ارائه می‌دهد. بنکداری و ابتهاج [۱۶] با استفاده از روش‌های هوشمند و پارامترهای بی بعد مؤثر بر انتقال رسوبات در لوله فاضلاب، مدل‌های مختلفی را برای تعیین حداقل سرعت ارائه دادند. ابتهاج و همکاران [۱۷] با استفاده از ترکیب روش‌های آنالیز حساسیت و عدم قطعیت با یک روش هوشمند، انتقال رسوب را در سیستم‌های فاضلاب و زهکشی شهری بررسی کردند تا بهترین ترکیب ورودی را برای مدلسازی انتقال رسوب ارائه دهند. با توجه به پیچیدگی پدیده‌های هیدرولیکی مانند انتقال رسوب و استفاده از روش هوش مصنوعی در تخمین برخی پارامترهای هیدرولیکی، در تحقیق حاضر سعی گردیده است تا کارایی روش مبتنی بر کرنل رگرسیون فرآیند گاوسی

(GRP)^۲ به عنوان یکی از روش‌های نوین داده کاوی و همچنین روابط نیمه تجربی موجود جهت تعیین میزان انتقال رسوب در لوله‌های انتقال آب باران و فاضلاب با بسترهای صاف و زیر مورد بررسی قرار گیرد. در واقع، با توجه به اینکه روش‌های تجربی به دلیل عدم قطعیت شدید پدیده انتقال رسوب خصوصاً در لوله‌های انتقال‌دهنده‌ی آب باران و فاضلاب ناتوان بوده و دارای خطای بالایی هستند، در این تحقیق بار بستر مورد بررسی قرار گرفته است تا با شناسایی پارامترهای مؤثر در پدیده انتقال رسوب در این مقاطع و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله، گامی رو به جلو در این زمینه برداشته شود. بنابراین، با استفاده از روش آنالیز حساسیت فاکتوریل ابتدا پارامترهای تأثیرگذار و دارای همبستگی بیشتر با بار رسوبی تعیین شد. سپس، مدل‌های مختلفی تعریف گردید و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اثر پارامترهای هیدرولیکی و شرایط کف لوله بررسی شد. در نهایت، با استفاده از آنالیز حساسیت حذفی مؤثرترین پارامترها در مدلسازی پارامتر انتقال رسوب تعیین گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سری داده‌های انتقال رسوب در لوله‌های فاضلاب رو

برای بررسی کارایی روش‌های به کار رفته در تحقیق از چند سری داده‌ی آزمایشگاهی مربوط به گانی [۱۸]، می و همکاران [۱۹] و وانگ و همکاران [۴] استفاده شد. این آزمایش‌ها در کل شامل ۳۲۲ داده بوده و 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 صاف و زیر را مورد بررسی قرار داده است. در آزمایشات مربوط به بستر زیر از دو زبری متفاوت به صورت $K_{01} = 0.34$ و $K_{02} = 1$ استفاده شده بود. تمام آزمایش‌ها تحت شرایط جریان یکنواخت و با رسوبات منتقل شده به عنوان بار بستر در بسترهای صاف و زیر انجام شد. از جمله پارامترهای مهم استفاده شده در آزمایشات زبری دیواره و کف، قطر لوله فاضلاب و اندازه ذرات رسوبی بود. می و همکاران مطالعات مربوط به انتقال رسوب با رسوب‌گذاری محدود در لوله‌های فاضلاب را به لوله‌های بزرگ‌تر (در لوله ۳۰۰ میلی‌متری) تعمیم دادند و از ماسه ۰/۷۲ میلی‌متر به عنوان بار بستر استفاده کردند و فرمولی برای غلظت بار بستر ارائه دادند. پارامترهای مؤثر شامل قطر لوله، عمق جریان، اندازه ذرات رسوبی و سرعت جریان بود. آزمایش‌های مربوط به گانی، می و همکاران و وانگ و همکاران نشان داد که رسوبات درشت‌تر از ۰/۴ میلی‌متر به احتمال زیاد به عنوان بار بستر حرکت خواهند کرد. آنها بیان نمودند که انتظار می‌رود افزایش زبری دیواره از دو طریق احساس تأثیرگذار باشد. اولاً ضریب اصطکاک بین

جدول ۱. محدوده ی داده های استفاده شده در آزمایشها

Table 1. Details of data used in experiments

شرایط بستر	محقق	پارامترها						تعداد داده‌ها
		D(mm) قطر لوله	V(m/s) سرعت جریان	y/D عمق نسبی جریان	d ₅₀ (mm) اندازه ذره	Cv (Qs/Q) میزان دبی رسوب/ دبی (آب)	S ₀ (10 ⁻²) شیب بستر	
صاف	Ghani (1993)	154	0.24-0.86	0.153-0.756	0.93-5.7	38-145	0.13-0.53	39
		305	0.395-1.2	0.210-0.8	0.46-8.30	1-1280	0.06-0.53	87
		450	0.502-1.2	0.50-0.75	0.72	2-37	0.04-0.31	27
	May et al. (1989)	300	0.082-1.5	0.37-0.75	0.72	0.31-443	0.14-0.56	38
	Vongvisesso	100	0.232-0.56	0.2-0.6	0.3-0.43	4-83	0.3-0.6	15
	mjai et al. (2010)	150	0.247-0.63	0.2-0.6	0.3-0.43	4-90	0.3-0.6	15
زبر	Ghani (1993)	305 زبری نوع ۱ (k ₀ = 0.53 mm)	0.411-1	0.18-0.77	0.97-8.30	1-923	0.07-0.56	71
		زبری نوع ۲ (k ₀ = 1.34 mm)	0.56-0.827	0.243-0.764	2.00-8.30	7-403	0.13-0.56	30

از تمام این متغیرهای تصادفی (شمارا و نامحدود) است. فرآیندهای گاوسی در مدلسازی آماری بسیار پراهمیتانند، زیرا خصوصیات نرمالی دارند [۲۰]. می توان n مشاهده را همیشه در مجموعه داده دالخواه $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ به صورت یک نقطه تکی نمونه گیری شده از توزیع گاوسی چند متغیری (n متغیری) تصور کرد. از این رو، مجموعه داده‌ها را می‌توان با یک فرآیند گاوسی متناظر کرد. اغلب فرض می‌شود که میانگین فرآیند گاوسی متناظر در هر جا صفر است. آنچه در چنین حالتی یک مشاهده را به مشاهده دیگر ارتباط می‌دهد تابع کوواریانس است. هر مشاهده y را می‌توان از طریق مدل نویزی گاوسی به یک تابع اصلی ارتباط داد:

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن بیانگر تابع رگرسیون دلخواه و نیز مقدار نویز توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس σ^2 می‌باشد، یعنی $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ رگرسیون در واقع جستجو برای $f(x)$ است. چنین فرض می‌گردد که داشته به نحوی که $p(f|x) = N(o, k)$ که در آن K ماتریس کوواریانس

رسوب و دیواره با افزایش زبری سطح افزایش می‌یابد. ثانیاً، مقاومت جریان افزایش می‌یابد که باعث کاهش عملکرد دراگ در رسوبات می‌شود. هر دوی این عوامل ظرفیت انتقال رسوب جریان برای لوله های زبر را کاهش می‌دهند. همچنین با افزایش اندازه رسوب برای غلظت رسوب معین، سرعت پایبندی برای انتقال رسوب لازم است. رسوبات درشت به دلیل مساحت بیشتر در معرض جریان و کشش بالاتری قرار دارند. همچنین، ذرات درشت تداخل کمتری با یکدیگر داشته و عملکرد دراگ بر روی آنها بیشتر بوده و در سرعت پایبندی بدون ته نشینی انتقال می‌یابند. در جدول ۱ محدوده ی داده های استفاده شده در آزمایش‌های نشان داده شده است. در این جدول $Cv = Q_s/Q$ نسبت دبی حجمی رسوب به دبی جریان بر حسب لیتر بر ثانیه بوده و در واحد (ppm) بیان شده است.

۲-۲- رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)

در نظریه احتمال و آمار یک فرآیند گاوسی یک مدل آماری است که در آن مشاهدات در دامنه پیوسته رخ می‌دهد، به عنوان مثال زمان یا فضا. در یک فرآیند گاوسی هر نقطه از فضای ورودی یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال است. علاوه بر این هر مجموعه متناهی از این متغیرهای تصادفی دارای توزیع گاوسی چند متغیره است. توزیع فرآیند گاوسی توزیع مشترک

راهحل یافت شده تا به حال، گزارش داده می‌شود. از طرف دیگر اگر شرایط توقف ایجاد نشود، بهترین راه حل از نسل حاضر نگه داشته 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 مثل دارند. این فرآیند برای تعداد معینی از نسل‌ها تکرار می‌شود تا راه حل خوب و مناسبی پیدا شود. قسمت تولید مثل، شامل تکثیر و اصلاحات وراثتی 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.

۲-۴- معیارهای ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی دقت مدلها تعریف شده در تخمین استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش هیدرولیکی، از دو پارامتر آماری استفاده گردید که عبارت‌اند از: ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (R) و ریشه میانگین مربعات خطاها ($RMSE$)^۳ که بیانگر میزان انحراف بین مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد. هر چه مقدار R برای یک مدل به یک نزدیکتر و مقدار $RMSE$ کوچکتر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می‌باشد. روابط این پارامترهای آماری به صورت زیر می‌باشد:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_o) \times (l_p - \bar{l}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_o)^2 \times \sum_{i=1}^N (l_p - \bar{l}_p)^2}}, \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (l_o - l_p)^2}{N}} \quad (3)$$

در روابط بالا L_o : مقدار اندازه گیری شده، \bar{L}_o : متوسط مقدار اندازه گیری شده، P_o : مقدار پیش‌بینی شده، \bar{P}_o : متوسط مقدار پیش‌بینی شده و N تعداد داده‌هاست.

۲-۵- روشهای آنالیز حساسیت

تحلیل حساسیت به بررسی چگونگی تغییرات در خروجی مدل نسبت به تغییرات در مؤلفه‌های ورودی می‌پردازد. یکی از روش‌های آنالیز حساسیت، روش حذف متغیر ورودی است که در آن تغییرات در خروجی مدل بررسی می‌شود در حالی که یکی از متغیرهای ورودی حذف شده و بقیه در مدل باقی مانده‌اند. روش دیگر آنالیز فاکتوریل است که جهت بررسی تأثیرات اصلی پارامترها از نظر کمی استفاده می‌شود. هر گاه در یک مدل تعداد نسبتاً

با درایه‌های $k_{i,j} = k(x_i, x_j)$ می‌باشد.

$$K(x, x) = \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & \dots & k(x_1, x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & \dots & k(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$k_{i,j}$ کوواریانس بین مقادیر توابع نهان $f(x_i)$ و $f(x_j)$ است. طراحی روشهای رگرسیون مبتنی بر فرآیند گاوسی شامل استفاده از مفهوم تابع کرنل است. در واقع، با یک تبدیل غیرخطی از فضای ورودی به فضای خصیصه با ابعاد بیشتر (حتی نامتناهی) میتوان مسائل را به صورت خطی تفکیک پذیر ساخت. از مهم‌ترین توابع کرنل میتوان به کرنل چند جمله‌ای ساده، چند جمله‌ای نرمال شده، تابع شعاع محور و تابع کرنل پیرسون اشاره کرد. لازم به توضیح است که به علت ماهیت جعبه سیاه مدل‌های هوش مصنوعی، رابطه ایجاد شده بین ورودی‌ها و خروجی در این مدلها مشخص نیست. این امر نیاز به استفاده محتاطانه از مدل‌های هوشمند دارد و باید برای محدودی داده‌های مورد استفاده آموزش داده شوند. با این حال، از روشهای هوشمند میتوان برای پیش‌بینی متغیرها در هر جایی که: روابط متقابل بین متغیرهای مربوطه ضعیف درک شوند، پیدا کردن راه‌حلهایی دشوار است و با روشهای تحلیل ریاضی معمولی نتوان راه حل‌های تحلیلی ارائه داد، استفاده کرد.

۲-۳- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برنامه‌ریزی بیان ژن توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع شد [۲۱]. برنامه‌ریزی بیان ژن که شکل توسعه یافته برنامه ریزی وراثتی است توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع شد [۲۱]. GEP روشی مناسب برای مدل‌سازی فرآیندهای غیر خطی 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 نظیر 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)^۴ نشان داده شده، که این مرحله هم مطابق با یک تابع برازش ارزیابی می‌گردد تا میزان مناسب بودن یک راه حل در حیطه مسئله تعیین گردد. اگر کیفیت رضایت بخش از یک راه حل پیدا شود و یا نسل‌ها به تعداد معینی برسد، تکامل متوقف می‌شود و بهترین

3 Correlation Coefficient
4 Root Mean Square Error

1 Gene Expression Programming
2 Expression Trees

یک متغیر که اغلب با علامت H_j^2 نشان داده می‌شود، برابر است با مجموع مجذورات بارهای عاملی مشترک.

$$H_j^2 = 1 = a_{j1}^2 + a_{j2}^2 + \dots + a_{jm}^2 \quad (۶)$$

میزان اشتراک بخشی از واریانس است که می‌توان آن را به عوامل مشترک نسبت داد. بخشی از واریانس که باقی می‌ماند و نمی‌توان آن را به عوامل مشترک نسبت داد، واریانس منفرد نامیده می‌شود که با علامت d_j^2 نشان داده می‌شود.

۲-۶- روابط تجربی مربوط به بار بستر رسوبی

بخش عمده‌ای از تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال رسوب به بررسی رسوب کف در فلوم‌ها و کانالها پرداخته اند تا معادلات حاکم در توصیف پدیده پیچیده فرایند انتقال رسوب را تعیین کنند. این روش‌های پیشنهادی مبتنی بر همبستگی‌های آماری، ترکیبی از مدل‌های تئوری، فرضیات مختلف و اطلاعات تجربی است. در شرایط هیدرولیک متغیر، نتایج به دست آمده از این فرمول‌ها اغلب از یکدیگر متفاوت هستند. فرمولهایی نیمه تجربی استفاده شده در این تحقیق در ادامه توضیح داده شده اند.

- فرمول آکرز (۱۹۹۱):

فرمول بار بستر آکرز [۲۴] که برای شرایط رودخانه و بر اساس مفهوم توان جریان استخراج گردیده بود توسط آکرز برای کانالهای آبرفتی توسعه داده شد تا شامل شرایط لوله‌های فاضلاب‌رو و انتقال آب باران گردد. این فرمول به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_V = \left[\frac{V}{K \sqrt{g(s_s - 1) d_{50}}} - 1 \right]^m$$

$$0.04 < d_{50} < 28.65 \text{ mm} \quad ,$$

$$K = A_{gr} (11.3 \times (\frac{R}{d_{50}})^{0.1})^{1-n} / (\frac{\lambda S}{8})^{\frac{n}{2}} \quad ,$$

$$J = \left[\frac{R}{d_{50}} \times \left(\frac{A}{w_0 R} \right)^{1-n} \times \left(\frac{\lambda S}{8} \right)^{\frac{n}{2}} / C \right]^{1/m} \quad (۷)$$

$$w_0 = 10 d_{50} \quad , \quad A_{gr} = 0.14 + \frac{0.23}{\sqrt{D_{gr}}} \quad ,$$

$$m = 1.34 + \frac{1.66}{D_{gr}} \quad , \quad n = 1 - 0.56 \times \log D_{gr} \quad ,$$

$$\log C = -3.46 + 2.79 \times \log D_{gr} - 0.98 (\log D_{gr})^2$$

زیادی متغیر وجود داشته باشد، یافتن رابطه‌ها و یا به عبارت دیگر همبستگی بین این متغیرها به روشهای معمولی بسیار مشکل و گاه ناممکن است. روش آنالیز فاکتوریل برای رفع این مشکل در سال ۱۹۰۱ به وجود آمده است [۲۲]. این روش مخصوصاً زمانی مفید است که بین عوامل طراحی و متغیر مورد بررسی، رابطه منحنی وجود داشته باشد. به طور کلی هدف از آنالیز فاکتوریل به شرح زیر خلاصه می‌شود:

الف) تفسیر وجود همبستگی درونی بین تعدادی صفت قابل مشاهده از طریق عواملی که قابل مشاهده نیستند و آن‌ها را فاکتور گویند (ب) ارائه روش ترکیب و خلاصه کردن تعداد زیادی از متغیرها در تعدادی گروه متمایز، (ج) از بین متغیرهای مختلف، تأثیرگذارترین آن‌ها تعیین می‌شود و در پژوهش‌های بعدی به طور جزئی‌تر، متغیرهای تأثیرگذار را با تکرار بیشتری بررسی می‌کنند.

در آنالیز فاکتوریل نمره فرد i در متغیر j را می‌توان به عنوان مجموع ضرایب نمره‌ها در تعداد کمتری از متغیرهای حاصل که فاکتور عاملی نامیده می‌شوند، تعریف کرد. هر عامل، ترکیب خطی متغیرهاست و بر پایه رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$Z_{ji} = a_{j1} F_{i1} + \dots + a_{jm} F_{im} + d_j U_{ji} \quad (۴)$$

که در آن Z_{ji} : نمره معیار فرد i ام در متغیر j ام است. F_{i1} : نمره معیار فرد i در اولین عامل مشترک و F_{im} : نمره معیار وی در m امین عامل مشترک است. عبارت U_{ji} : نمره معیار فرد i در چیزی است که عامل اختصاصی نامیده می‌شود؛ یعنی عاملی که تنها در یک متغیر واحد موجود است که در این مورد متغیر j است. ضرایب a_{jm} : بارهای عاملی هستند که به نمره‌های عامل مشترک نسبت داده می‌شوند. ضریب d_j : وزنی است که به نمره‌های عامل اختصاصی، اختصاص می‌یابد. معادله به شکل نمره معیار است، بنابراین نمره‌های Z_{ji} و نمره‌های عاملی F_i میانگین صفر و واریانس واحد دارند. با مجذور کردن هر دو طرف معادله و سپس جمع آن‌ها برای N مورد و تقسیم آن بر N و این فرض که نمره‌های عاملی ناهمبسته هستند، می‌توان نوشت:

$$S_j^2 = 1 = a_{j1}^2 + a_{j2}^2 + \dots + a_{jm}^2 + d_j^2 \quad (۵)$$

این معادله نشان می‌دهد که واریانس کل را می‌توان به دو بخش جمع‌پذیر واریانس مشترک و واریانس منفرد تقسیم کرد. میزان اشتراک

و ۱۵۲ میلی‌متر انجام شده بود، خلاصه کرد. اندازه ذرات رسوبی بین ۰/۲۵ تا ۱/۶ میلی‌متر متغیر بود و به عنوان پارامتر مهم در نظر گرفته نشد. رابطه لارسن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_v^{1/3} = \frac{V}{7 \times \sqrt{(2g \times (s_s - 1) \times y_0)}} \quad (10)$$

در روابط بالا پارامتر V : سرعت جریان (m/s) ، d_{50} : اندازه متوسط ذرات بستر (m) ، A : سطح مقطع جریان (m²) ، Dgr : اندازه بدون بعد ذرات رسوب D ، قطر لوله (m) ، g : شتاب ثقل (m/s²) ، λ_s : ضریب اصطکاک کلی ، R : شعاع هیدرولیکی (m) ، J : پارامتر بدون بعد آکز، پارامترهای C ، n ، m و Agr اعداد ثابتی هستند که بر اساس Dgr به دست می‌آیند، θ : عدد شیلدز، qb : میزان بار بستر (m²/s) ، v : ویسکوزیته سینماتیکی (m²/s) ، S_s : چگالی نسبی ذرات، ρ : چگالی آب (kg/m³) ، τ_0 : تنش برشی مرزی (kgm/s²) ، y_0 : عمق جریان و (m) $Cv = Q_s/Q$: نسبت دبی حجمی رسوب به دبی جریان بر حسب (ppm) می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین پارامترهای تاثیرگذار در مدلسازی دبی رسوبی

تعیین پارامترهای موثر هنگام مدلسازی یک پدیده با استفاده از روشهای هوش مصنوعی، مهمترین گام می‌باشد. به طوری که انتخاب پارامترهای ورودی نامناسب می‌تواند بر دقت نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مدل تعریف شده تأثیر بگذارد. به منظور درک هیدرولیک جریان و شناسایی عوامل مؤثر بر انتقال ذرات رسوبی درون لوله های آب و فاضلاب تحقیقات میدانی و تجربی زیادی انجام شده است. نتایج تحقیقات انجام گرفته توسط چند محقق [۲۷ و ۱۸ و ۴] نشان داد که پارامترهای مهم تاثیرگذار بر انتقال رسوب در لوله های انتقال آب و فاضلاب میتوانند به صورت زیر بیان شوند:

$$Cv = f(V, y \text{ or } R, D, d_{50}, s, g, \lambda_s)$$

با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای بالا به صورت بی بعد شده زیر بیان می‌شوند:

$$Cv = f(Fm, Dgr, \lambda_s, d_{50} / y, d_{50} / D)$$

که در آن پارامترهای $Dgr (= d_{50} [g(s-1)/v^2]^{1/3})$ و $Fm = (V / [g(s-1) \times d_{50}]^{0.5})$ به ترتیب اندازه بدون بعد ذرات و عدد فرود ذرات رسوب می‌باشند. لازم به توضیح است که چون در تحقیق حاضر

لازم به ذکر است که، بر اساس داده‌های تجربی می‌[۱] که در لوله‌هایی با قطر ۷۷ و ۱۵۸ میلی‌متر با استفاده از اندازه ذرات رسوبی بین ۰/۶۴ تا ۹/۹ میلی‌متر جمع‌آوری شده بود، آکرز پیشنهاد کرد که $w_0 = 1 \cdot d_s$ باشد. تحقیقات بعدی با استفاده از مقادیر مختلف عرض بستر رسوب نیز نشان دادند که اعتبار معادله به ازای $w_0 = 1 \cdot d_s$ نسبتاً خوب است. همچنین عنوان شد که w_0 ممکن است تابعی از خصوصیات ذرات رسوب (اندازه و شکل) و شکل کانال باشد.

- فرمول نیلسون (۱۹۹۲):

نیلسون [۲۳] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که دامنه وسیعی از اندازه ذرات رسوب را در بر میگرفت فرمولی را که انتقال بار بستر را نتیجه‌ی تداخل پیچیده سیال و مواد بستر توصیف می‌کرد و بر اساس مفهوم توان جریان بود، به دست آورد.

$$\frac{qb}{\sqrt{(s_s - 1) \times g \times d_{50}^3}} = (12\theta - 0.05) \times \sqrt{\theta} \quad (8)$$

$$0.69 < d_{50} < 28.7 \text{ mm} , 1.25 < s_s < 4.22 ,$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{\rho(s_s - 1) \times g \times d_{50}}$$

- فرمول مایرلی (۱۹۸۸):

فرمول مایرلی [۲۵] که با استفاده از آنالیز ابعادی استخراج گردیده بود، برای داده‌های آزمایشگاهی و با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه بر اساس مفهوم تنش برشی توسعه داده شد. اندازه ذرات رسوبی بین ۰/۵ تا ۸/۷۴ میلی‌متر با وزن مخصوص متوسط ۲/۵۵ متغیر بود. عدد جریان فرود جریان نیز در محدوده‌ی ۰/۶۱ تا ۱/۲۴ قرار داشت. معادله انتقال مایرلی بر حسب پارامتر CV به شرح زیر است:

$$C_v^{0.2} = \frac{V}{\sqrt{(g \times (s_s - 1) \times d_{50})}} \times \frac{1}{[1.06 \times D_{gr}^{-0.4} \times \left(\frac{d_{50}}{R}\right)^{-0.2} \times \lambda_s^{-1.05}]} \quad (9)$$

- فرمول لارسن (۱۹۵۶):

لارسن [۲۶] نیز از آنالیز ابعادی جهت ارائه فرمول خود استفاده نمود. در واقع لارسن نتایج چهار تحقیق را که با استفاده از لوله‌های صاف به قطر ۵۱

جدول ۲. ماتریس همبستگی حاصل از آنالیز فاکتوریل

Table 2. Correlation matrix obtained from factorial analysis

بستر صاف	d_{50}/y	Fm	Dgr	λ_s	y/d_{50}	d_{50}/Dgr	d_{50}/D	Cv
d_{50}/y	1.00	-0.72	0.81	0.59	-0.70	-0.29	0.89	0.66
Fm		1.00	-0.71	-0.45	0.76	0.32	-0.74	-0.49
Dgr			1.00	0.14	-0.70	-0.22	0.88	0.54
λ_s				1.00	-0.42	-0.33	0.44	0.35
y/d_{50}					1.00	0.44	-0.73	-0.48
d_{50}/Dgr						1.00	-0.38	-0.28
d_{50}/D							1.00	0.64
Cv								1.00

بستر زبر	d_{50}/y	Fm	Dgr	λ_s	y/d_{50}	d_{50}/Dgr	d_{50}/D	Cv
d_{50}/y	1.00	-0.52	0.80	0.43	-0.69	-0.13	0.78	0.83
Fm		1.00	-0.72	-0.32	0.65	-0.15	-0.75	-0.45
Dgr			1.00	0.10	-0.76	-0.14	0.97	0.50
λ_s				1.00	-0.33	0.44	0.20	0.38
y/d_{50}					1.00	-0.09	-0.78	-0.46
d_{50}/Dgr						1.00	0.06	-0.27
d_{50}/D							1.00	0.43
Cv								1.00

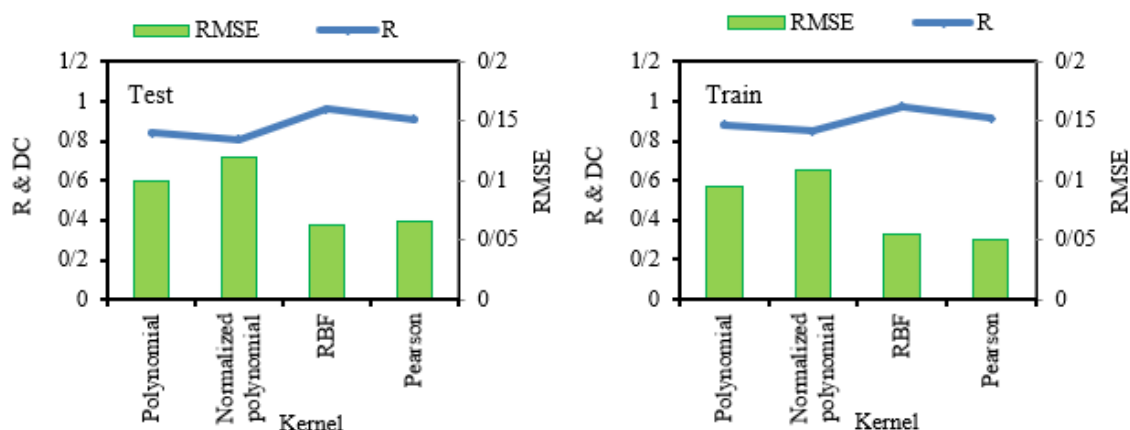
می‌شود، لذا نرمالیزه کردن داده‌ها کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. در تحقیق کنونی داده‌ها مطابق رابطه (۱۱) نرمالیزه شدند. که در آن X_{min} و X_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار داده‌های مشاهده شده و X_n داده نرمال شده می‌باشد. محدوده ی نرمالیزه کردن داده ها در این تحقیق بین ۰/۱ و ۱ انتخاب گردید.

$$x_n = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (11)$$

۳-۲ نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های GPR

جهت انتخاب تابع کرنل مناسب رگرسیون فرآیند گاوسی، مدل $[\lambda_s]$ $[d_{50}/y, Dgr, Fm]$ در حالت لوله با بستر صاف با کرنل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. از دو معیار ارزیابی R و RMSE جهت تعیین مناسبترین تابع کرنل استفاده شد. مطابق شکل ۱، نتایج نشان داد که تابع کرنل شعاع مداری (RBF) در تخمین پارامتر انتقال رسوب نسبت به توابع کرنل دیگر بهتر عمل می‌کند. بنابراین، در تجزیه و تحلیل تمامی مدل‌ها از تابع کرنل RBF استفاده شد. لازم به توضیح است که تابع کرنل RBF

از چند سری داده آزمایشگاهی استفاده شده است که هر کدام تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و با مشخصات متفاوت لوله ها انجام گردیده اند، لذا از آنالیز ابعادی استفاده شد تا تاثیر این پارامترها در مدل‌سازی کاهش یابد. همچنین پارامترهای بی بعد می‌توانند برای بیان روشنتر مفاهیم هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرند. در تحقیق کنونی سعی گردید تا مدل‌هایی بر اساس پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی به صورت بی بعد بر اساس میزان همبستگی آنها با پارامتر Cv تعریف شوند. با استفاده از آنالیز حساسیت فاکتوریل میزان همبستگی هر کدام از پارامترها بر روی دبی رسوبی و همچنین تاثیر این پارامترها بر روی هم تعیین شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در بین پارامترهای به کار رفته d_{50}/Dgr همبستگی مطلوبی را با Cv نشان نمیدهد و همبستگی آن با دبی رسوبی و سایر پارامترها به صورت معکوس می‌باشد. مشاهده می‌گردد که پارامتر d_{50}/y بیشترین همبستگی را با Cv دارد. در ادامه با استفاده از پارامترهای $d_{50}/y, y/d_{50}, Dgr, Fm, \lambda_s$ d_{50}/D مدل‌هایی تعریف گردید و با استفاده از روش GPR مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در اجرای مدل‌ها از ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد داده‌ها جهت آزمون مدل استفاده شده است. همچنین از آنجا که وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه



شکل ۱. پارامترهای آماری مدل GPR با توابع کرنل متفاوت- لوله با بستر صاف

Fig. 1. Statistical parameters of GPR model with different kernels function- smooth bed pipe

همچنین جهت بررسی کارایی روش بکار رفته برای محدوده وسیعی از داده‌ها با شرایط متفاوت، کل داده‌های لوله صاف و زبر با یکدیگر ترکیب گردید و این حالت نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت نیز مدل با پارامترهای λs , F_m , D_{gr} , d_{50}/y و d_{50}/D به دست آمد و مشاهده شد که با اضافه کردن پارامترهای d_{50}/D و d_{50}/y به مدلها، دقت آنها تا حدودی بهبود یافته است. با این حال، ترکیب داده‌ها به ویژه برای مقادیر بالاتر Cv منجر به نتایج دقیقی نگردیده و اجرای مدلها در حالت جداگانه منجر به نتایج مطلوبتری شده است. نمودارهای مربوط به مدل برتر برای دو مرحله آزمون و تست در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق با این شکل، همبستگی مناسبی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی پارامتر Cv در حالت اجرای داده‌ها به صورت جداگانه دیده می‌شود.

۳-۳- استخراج فرمول انتقال رسوب با روش GEP

با استفاده از روش GEP مدل برتر به دست آمده در هر حالت دوباره اجرا گردید تا فرمول صریحی برای بار رسوبی به دست آید. روند تعیین مدل تخمین Cv با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن شامل ۵ مرحله می‌باشد؛ که به ترتیب عبارت‌اند از تعیین تابع برازش، انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها، انتخاب ساختار کروموزوم‌ها که شامل طول سر و تعداد ژن‌ها است، انتخاب تابع پیوند که تعیین‌کننده پیوند بین ریز درخت‌ها می‌باشد و مرحله آخر انتخاب عملگرهای وراثتی و نرخ آنها است.

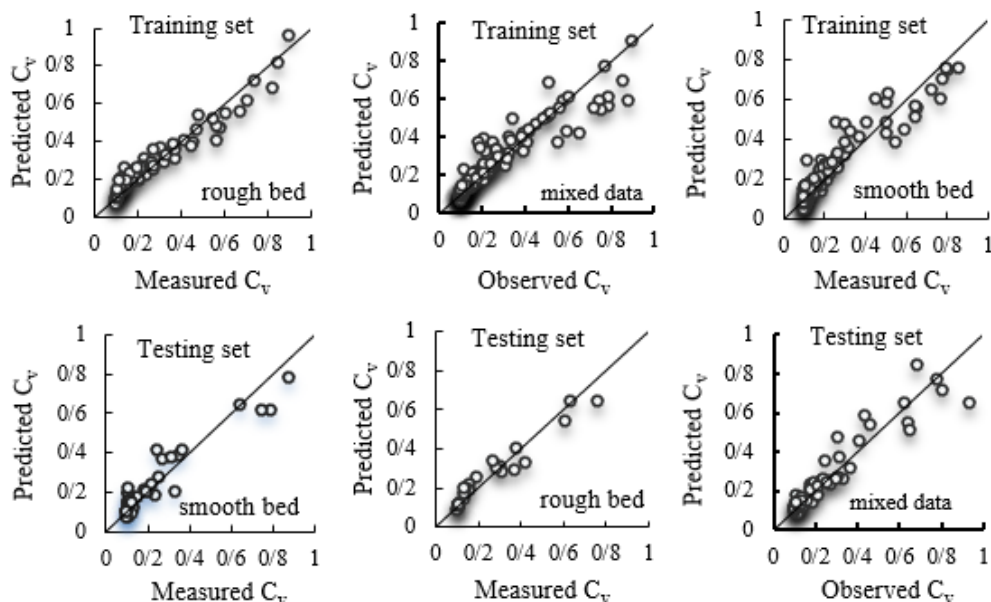
دارای پارامتر کرنل (γ) است که نحوه تنظیم آن در حصول جواب هر چه بهتر مسئله بسیار مؤثر می‌باشد. برای یافتن بهینه‌ترین مقدار پارامتر کرنل از روش سعی و خطا استفاده شد و با آزمون مقادیر مختلف مقدار بهینه این پارامترها انتخاب گردید. نحوه کار به این صورت بود که به ازای مقدار مختلف γ پارامترهای آماری محاسبه شد و با انتخاب مدل با بیشترین مقدار R و کمترین مقدار $RMSE$ مقدار بهینه γ تعیین شد.

جهت بررسی انتقال رسوب در لوله‌های انتقال دهنده فاضلاب و آب باران با شرایط بستر متفاوت، مدل‌های مختلفی تعریف گردیده و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی مدل‌های تعریف شده در جدول ۳ و شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده، برای هر دو بستر صاف و زبر مدل با پارامترهای ورودی λs , F_m , D_{gr} , d_{50}/y با توجه به دو معیار ارزیابی (R , $RMSE$) برای سری داده‌های آموزش و آزمایش نسبت به مدل‌های دیگر دقت بالاتری داشته و مدل برتر می‌باشد. از نتایج حاصل در جدول ۳ چنین به نظر می‌رسد که لحاظ کردن پارامتر عمق جریان (یا شعاع هیدرولیکی)، اندازه نسبی ذرات و ضریب اصطکاک کلی در دو بستر صاف و زبر سبب افزایش دقت مدل‌های تعریف شده در این لوله‌ها گردیده است و تأثیر پارامتر D_{gr} بیشتر از λs می‌باشد. با بررسی نتایج ارائه شده برای بستر صاف و زبر مشاهده می‌گردد که زبر بودن بستر تا حدودی سبب کاهش کارایی مدلها گردیده است. با توجه به اینکه ممکن است هیچ گونه اطلاعاتی در مورد شرایط اولیه لوله مانند صاف یا زبر بودن آن در دسترس نباشد و

جدول ۳. نتایج تحلیل مدل‌های تعریف شده

Table 3. Results of the determined models analysis

شرایط	مدل	معیارهای ارزیابی			
		مرحله آموزش		مرحله آزمایش	
		R	RMSE	R	RMSE
بستر صاف	λ_s, F_m	0.530	0.188	0.507	0.199
	Dgr, Fm	0.748	0.145	0.729	0.148
	λ_s, F_m, Dgr	0.880	0.079	0.873	0.083
	$\lambda_s, F_m, y/d_{50}$	0.890	0.073	0.881	0.080
	$\lambda_s, F_m, Dgr, d_{50}/D$	0.913	0.066	0.883	0.079
	$\lambda_s, F_m, Dgr, y/d_{50}$	0.960	0.055	0.940	0.067
	$\lambda_s, F_m, Dgr, d_{50}/y$	0.973	0.041	0.962	0.052
بستر زبر	λ_s, F_m	0.480	0.196	0.445	0.199
	Dgr, Fm	0.698	0.154	0.659	0.157
	λ_s, F_m, Dgr	0.875	0.084	0.871	0.092
	$\lambda_s, F_m, y/d_{50}$	0.895	0.076	0.879	0.082
	$\lambda_s, F_m, Dgr, d_{50}/D$	0.912	0.076	0.880	0.081
	$\lambda_s, F_m, Dgr, y/d_{50}$	0.953	0.046	0.922	0.066
	$\lambda_s, F_m, Dgr, d_{50}/y$	0.986	0.032	0.980	0.057
ترکیب داده‌ها	λ_s, F_m	0.530	0.188	0.507	0.199
	Dgr, Fm	0.748	0.145	0.729	0.148
	λ_s, F_m, Dgr	0.880	0.079	0.873	0.083
	$\lambda_s, F_m, y/d_{50}$	0.890	0.073	0.881	0.081
	$\lambda_s, F_m, Dgr, d_{50}/D$	0.913	0.066	0.883	0.080



شکل ۲. مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش بینی شده دبی رسوبی حاصل از اجرای GPR

Fig. 2. Comparison of the observed and predicted sediment discharge results obtained from GPR

جدول ۴. پارامترهای مدل‌های GEP به کار رفته در تحقیق

Table 4. Parameters of GEP models used in this study

تعریف پارامترها	تنظیمات پارامترها	تعریف پارامترها	تنظیمات
Function set	+, -, ×, /, √, X ²	Linking function	Addition
Chromosomes	30	Fitness function error type	RMSE
Head size	7	Mutation rate	0.044
Number of genes	3	Inversion, IS and RIS transposition rate, Gene recombination and transposition rate	0.1
One and Two-point recombination rate	0.3		

جدول ۵. مقایسه روش‌های هوش مصنوعی

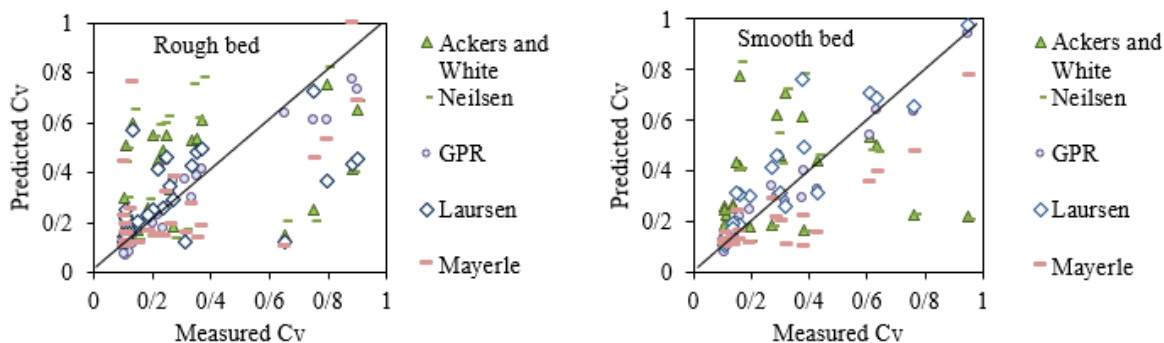
Table 5. Comparison of the artificial intelligence models

شرایط	مدل	روش	معیارهای ارزیابی			
			مرحله آموزش		مرحله آزمایش	
			R	RMSE	R	RMSE
بستر صاف	$\lambda_s, F_m, D_{gr}, d_{50/y}$	GPR	0.973	0.041	0.962	0.052
		GEP	0.963	0.051	0.945	0.059
بستر زبر	$\lambda_s, F_m, D_{gr}, d_{50/y}$	GPR	0.986	0.032	0.980	0.057
		GEP	0.955	0.048	0.921	0.051

اجرا شد و معیار ارزیابی خطای مدل (RMSE) محاسبه گردید. مشاهده گردید که مدل با تعداد کروموزوم های ۳۰، تعداد ژن ۳ و اندازه سر برابر با ۷ خطای کمتری را ارائه می دهد. همچنین تابع پیوند جمع نسبت به تابع ضرب منجر به نتایج دقیقتری گردید. نتایج حاصل از اجرای مدلها به صورت جدول ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد دقت نتایج حاصل از روش GEP نسبت به روش GPR اندکی کمتر می باشد. با این حال لازم به ذکر است که نتایج حاصل از روش برنامه ریزی بیان ژن، نیمه صریح و همراه با رابطه کاربردی بوده ولی نتایج حاصل از GPR به صورت غیر صریح و ضمنی می باشد. فرمولهای حاصله از اجرای مدل GEP به صورت زیر می باشند:

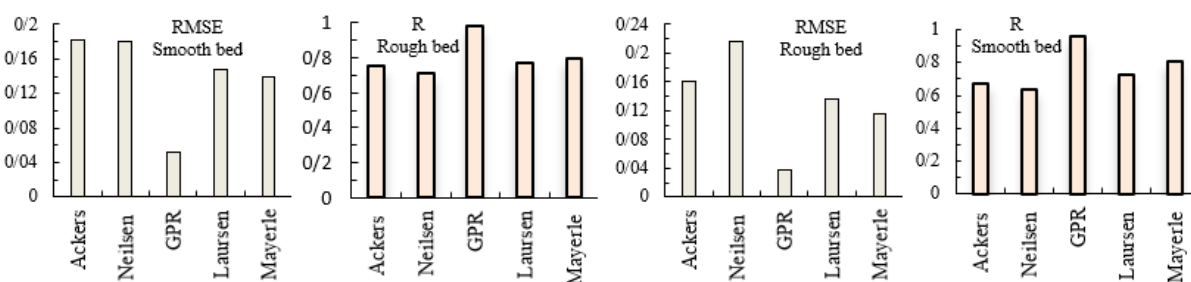
در این تحقیق ترکیبی از عملگرهای وراثتی (جهش^۱، وارونسازی^۲، ترکیب^۳ و ترانهش^۴) مطابق جدول ۴ استفاده گردیده است. مجموعه ترمینالهای به کار رفته در این تحقیق، متغیرهای مستقل شامل پارامترهای مؤثر در تخمین انتقال رسوب می باشند. عملگرهای استفاده شده نیز شامل +، - و × به عنوان عملگر اصلی و √، X^{1/3}، X³، X² به عنوان عملگر فرعی است. تعداد کروموزوم ها برابر با ۲۵، ۳۰ و ۳۵ و اندازه سر برابر با ۷ و ۸ و تعداد ژن های ۳ و ۴ انتخاب گردید و برای ترکیب مختلف این پارامترها مدل

- 1 Mutation
- 2 Inversion
- 3 Recombination
- 4 Transposition



شکل ۳. مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش بینی شده فرمول های نیمه تجربی بار بستر و مدل برتر GPR

Fig. 3. Comparison of observed and prediction from bedload semi-empirical equations and the best GPR model



شکل ۴. مقایسه معیارهای ارزیابی فرمول های نیمه تجربی و مدل برتر GPR

Fig. 4. Comparison of statistical parameters between semi-empirical equations and the best GPR model

۳-۴- مقایسه معادلات تجربی با روش GPR

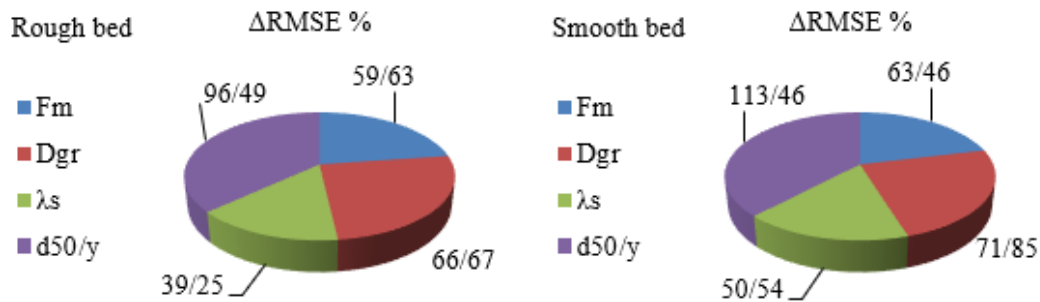
بستر صاف

کارایی تعدادی از فرمول های انتقال رسوب موجود مورد بررسی قرار گرفت و دقت این روابط با نتایج حاصله از مدل برتر روش GPR مقایسه گردید. نتایج به صورت اشکال ۳ و ۴ ارائه شده است. مشاهده می گردد که برای دو بستر صاف و زبر 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. با این وجود، روابط تجربی مقادیر Cv را در اکثر موارد کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده اند و دقت نتایج حاصله از این روابط نسبت به مدل های ارائه شده توسط روش GPR کمتر بوده و این روش دارای بیشترین مقدار R و کمترین مقدار RMSE می باشد. با توجه به اینکه روابط تجربی با لحاظ کردن شرایط خاص جریان و نیز خصوصیات متفاوت ذرات رسوبی توسعه داده شده اند و این روش ها مبتنی بر اطلاعات تجربی، مفاهیم فیزیکی و فرضیات متفاوتی هستند لذا، در شرایط هیدرولیکی متغیر، نتایج متفاوتی ارائه داده و قابلیت تعمیم دادن به همه شرایط را ندارند. در حالی که روش GPR با ترکیب چندین سری آزمایش تحت شرایط مختلف

$$C_v = \frac{d_{50}}{y} \left[F_m^2 \times (8.8699 - F_m) - F_m \right] + \left[9.57168 \times \lambda s \times \frac{d_{50}}{y} \times 17.996 \times D_{gr} \times F_m^2 \right] + \left[F_m \sqrt{F_m \times \sqrt{\frac{d_{50}}{y}} \times F_m} \right] \quad (12)$$

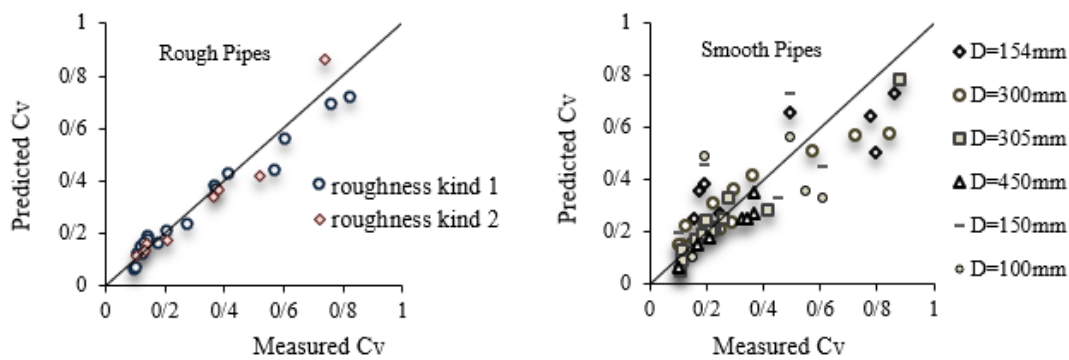
بستر زبر

$$C_v = D_{gr} \times \left[(F_m - \lambda s) \times D_{gr} - 0.219 \right]^3 + \frac{d_{50}}{y} \left[F_m + \left(\frac{d_{50}}{y} \times F_m \right) - \frac{D_{gr}}{3.61556} \right] + \left[\frac{d_{50}}{y} + F_m \times \sqrt{\frac{d_{50}}{y}} \right]^2 \quad (13)$$



شکل ۵. تاثیر نسبی هر یک از پارامترهای ورودی مدل برتر

Fig. 5. Relative significance of each of input parameters of the superior model



شکل ۶. مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش بینی شده دبی رسوبی برای لوله با زبری و قطرهای متفاوت

Fig. 6. Comparison of the observed and predicted sediment discharge results for pipe with different roughness and diameters

پارامتر بیشترین تاثیر را در مدلسازی انتقال رسوب در هر دو لوله با بستر صاف و زبر داراست.

از لحاظ هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی (جواب‌های نسبتاً قابل قبولی) را ارائه داده و این امر حاکی از عملکرد مناسب آن می‌باشد.

۳-۶- بررسی اثر قطر لوله و زبری بستر بر انتقال رسوب جهت بررسی اثر قطر لوله بر روی میزان انتقال رسوب، لوله صاف با شش قطر متفاوت انتخاب شد. مدل با پارامترهای λ_s , F_m , D_{gr} , d_{50}/y به خاطر دقت بالای آن در تخمین انتقال رسوب برای ارزیابی انتخاب شد. همچنین بستر زبر با لوله به قطر ۳۰۵ میلی‌متر که دارای دو نوع زبری متفاوت می‌باشد جهت بررسی زبری بستر و دیواره‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل مدل برای سری داده‌های آزمون در جدول ۶ و شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق با نتایج مشاهده میشود که با افزایش قطر لوله از ۱۰۰ به ۳۰۵ میلی‌متر دقت مدل افزایش یافته و لوله با قطر ۳۰۵ میلی‌متر منجر به نتایج دقیق تری شده است. با افزایش قطر لوله تا ۴۵۰ میلی‌متر دقت

۳-۵- تعیین میزان تاثیر نسبی پارامترها به روش آنالیز حساسیت حذفی برای بررسی تاثیر نسبی پارامترهای به کار رفته در مدل برتر هر دو نوع لوله با بستر صاف و زبر آنالیز حساسیت به روش حذفی انجام گرفت. برای این منظور با حذف تک‌تک پارامترهای مدل برتر و اجرای دوباره مدل و تعیین معیار ارزیابی RMSE به صورت درصد، میزان تاثیر پارامتر حذف شده در کاهش دقت مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت به صورت شکل ۵ ارائه گردیده است. در این شکل $\Delta RMSE$ میزان درصد خطای اضافه شده به مدل در اثر حذف پارامتر است. همان طوری که از شکل مشخص است با حذف پارامتر d_{50}/y میزان درصد خطا تا حدود زیادی افزایش یافته است. بنابراین، میتوان نتیجه گرفت که این

جدول ۶. نتایج مربوط به اثر قطر لوله

Table 6. Results of the pipe diameter effect

بستر زبر	معیارهای ارزیابی		قطر لوله	معیارهای ارزیابی	
	مرحله آزمایش			مرحله آزمایش	
	R	RMSE		R	RMSE
زبری نوع ۱	0.968	0.057	D=100mm	0.73 4	0.181
زبری نوع ۲	0.949	0.065	D=150mm	0.79 9	0.174
			D=154mm	0.80 7	0.171
			D=300mm	0.93 5	0.088
			D=305mm	0.94 1	0.078
			D=450mm	0.90 9	0.099

بررسی موفقتر می باشد. با آنالیز ترکیب دادهها و مقایسه آن با حالتی که داده ها برای هر شرایط بستر به طور جداگانه آنالیز گردیدند، مشخص گردید که استفاده از داده ها به صورت جداگانه منجر به جوابهای دقیقتری می گردد. همچنین نشان داده شد که لحاظ کردن پارامتر عمق جریان (یا شعاع هیدرولیکی)، اندازه نسبی ذرات و ضریب اصطکاک کلی به عنوان پارامترهای ورودی در دو بستر صاف و زبر، سبب افزایش دقت مدل های تخمین میزان انتقال رسوب میگردد. همچنین با استفاده از روش GEP روابط نیمه تجربی برای لوله با بستر صاف و زبر به دست آمد. مشاهده شد که قطر لوله بر ظرفیت انتقال رسوب در لولهها تاثیرگذار است. با افزایش قطر لوله از ۱۰۰ تا ۳۰۵ میلیمتر دقت مدل افزایش یافته و لوله با قطر ۳۰۵ میلیتری منجر به نتایج دقیقتری گردید و لوله با کوچکترین قطر ضعیف ترین نتایج را ارائه داد. مشاهده شد که افزایش زبری بستر و دیوارهای لوله سبب کاهش کارایی مدل می گردد. مقایسه نتایج تعدادی از روابط نیمه تجربی با مدل های برتر GPR نشان داد که مدل رگرسیون فرآیند گاوسی کارایی بالایی را در مدلسازی انتقال رسوب در لولههای دایروی فاضلابرو دارا بوده و نسبت به روابط تجربی موجود دقیقتر و قابل اعتمادتر است.

مدل کاهش یافته است. با این حال، لوله با کوچکترین قطر ضعیف ترین نتایج را ارائه داده است. در مورد اثر زبری بستر و دیوارها نیز نتایج نشان دهنده آن است که افزایش زبری سبب کاهش انتقال رسوب شده است. علت این امر می تواند افزایش ضریب اصطکاک بین رسوب و دیواره و مقاومت جریان در اثر افزایش زبری سطحی باشد که تأثیر منفی در انتقال رسوب داشته و سبب کاهش آن می شود.

۴- نتیجه گیری کلی

در این تحقیق به مدلسازی میزان انتقال رسوب در لولههای انتقال دهنده آب باران و فاضلاب دارای بستر صاف و زبر با استفاده از روش هوشمند GPR پرداخته شد. ابتدا با استفاده از آنالیز حساسیت فاکتوریل، پارامترهای دارای همبستگی بیشتر با بار رسوبی تعیین شد. سپس با استفاده از این پارامترها که شامل مشخصات هیدرولیکی و ذرات رسوب بودند، مدل های متفاوتی تعریف گردید و مورد بررسی قرار گرفت. سپس نتایج حاصله با روابط نیمه تجربی مقایسه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل با پارامترهای ورودی λs , $Fm Dgr$, d_{50}/y در تخمین پارامتر مورد

Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia (2014).

- [7] K. Roushangar, R. Ghasempour, Monthly precipitation prediction improving using the integrated model based on kernel-wavelet and complementary ensemble empirical mode decomposition, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.22060/ceej.2019.16043.6109, (2019). [in Persian]
- [8] C. Siviapragasam, S. Liong, M.F.K. Pasha, Rainfall and runoff forecasting with SSA-SVM approach, *Journal of Hydroinformatics*, 3(3) (2001) 141-152.
- [9] K. Roushangar, R. Ghasempour, The study of the performance of classical and artificial intelligence methods in the estimation of roughness coefficients in meander rivers, *Irrigation and Drainage Journal of Iran*, 12(4) (2019) 811-822. [in Persian]
- [10] W. Wang, K. Chau, C. T. Cheng, L. Qiu, A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series, *Journal of Hydrology*, 374(3-4) (2009) 294-306.
- [11] Z. Razzaghzadeh, V. Nourani, N. Behfar, The conjunction of feature extraction method with AI-based ensemble statistical downscaling models, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.22060/ceej.2018.14986.5806, (2018). [in Persian]
- [12] S. Kumar, D. Tripathy, S. Nayak, S. Mohaparta, Prediction of rainfall in India using artificial neural network models, *International Journal of Intelligent System and Applications*, 12 (2013) 1-22.
- [13] D. Nayak, A. Mahapatra, P. Mishra, A survey on rainfall prediction using artificial neural network, *International Journal of Computer Applications*, 72(16) (2013) 32-40.
- [14] ASCE, Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, *Artificial Neural Networks in hydrology. I: Preliminary concepts*, *Hydrological Engineering*, ASCE. 5(2) (2000) 115-123.
- [15] I. Ebtehaj, B. Bonakdari, Evaluation of sediment transport in sewer using artificial neural network.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

قطر لوله	D
سرعت جریان	V
عمق نسبی جریان	y
اندازه متوسط ذره	d50
نسبت دبی رسوبی به دبی جریان	C_v
شیب بستر	S_0
ضریب اصطکاک کلی	λ_s
شعاع هیدرولیکی	R
سطح مقطع جریان	A

علائم یونانی

مقدار نویز توزیع گاوسی	ε
واریانس	σ^2
شتاب ثقل	g
عدد شیلدز	θ
میزان بار بستر	qb
تعداد داده‌ها	N
چگالی آب	ρ
تنش برشی	τ_0
چگالی نسبی ذرات	S_s
ویسکوزیته سینماتیکی	ν

منابع

- [1] R. W. P. May, Sediment transport in sewers, Hydraulic Research Station, Wallingford, England, Report IT 222, (1983).
- [2] J. Bertrand, P. Briat, O. Scrivener, Sewer sediment production and transport modeling: A literature review, *Journal of Hydraulic Research*. 5 (2010) 24-32.
- [3] D.S. Renaat, Validation of existing bed load transport formulas using in-sewer sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 325 (2013) 37-48.
- [4] N. Vongvisessomjai, T. Tingsanchali, M. Babel, Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow, *Journal of Urban Water*, 7(1) (2010) 61-77.
- [5] J. J. Ota, G. S. Perrusquia, Particle velocity and sediment transport at the limit of deposition in sewers, *Water Science and Technology*, 67(5) (2013) 959-967.
- [6] C. H. Bong, C. Chau, L. Qiu, Self-cleansing design of rectangular open storm sewer, 13th International

- Complex System 13(2) (2001) 87–129.
- [22] U. Tezcan, F. Ates, N. Erginel, O. Ozcan, E. Oduncu, Adsorption of disperse orange 30 dye onto activated carbon derived from Holm Oak (*Quercus Ilex*) acorns: A 3k factorial design and analysis, *Environmental Management*, 155 (2015) 77- 89.
- [23] P. Neilson, 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport, *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol.4, World Scientific, Singapore, (1992).
- [24] P. Ackers, Sediment aspects of drainage and outfall design. Proc. Intern, Symposium on Environmental Hydraulics, Hong Kong, (1991).
- [25] R. Mayerle, Sediment transport in rigid boundary channels, PhD thesis, University of Newcastle upon Tyne, England, (1988).
- [26] E. M. Laursen, The hydraulics of a storm-drain system for sediment transporting flow, Bull. No 5, Iowa Institute of Hydraulic Research, (1956).
- [27] R. W. P. May, Sediment transport in pipes and sewers with deposited beds. Report SR 320.25. Hydraulic Research Ltd., Wallingford, England, (1993).
- Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 7(3) (2013) 382–392.
- [16] B. Bonakdari, I. Ebtehaj, I, Comparison of two data-driven approaches in estimation of sediment transport in sewer pipe. In E-proceedings of the 36th IAHR World Congress (pp. 1-11) (2015)..
- [17] I. Ebtehaj, B. Bonakdari, M. Safari, B. Gharabaghi, A. Zaji, H. Madavar, Z. Khozani, M. Es-haghi, A. Shishegaran, A. Mehr, Combination of sensitivity and uncertainty analyses for sediment transport modeling in sewer pipes. *International Journal of Sediment Research*, 35(2) (2020) 157-170.
- [18] A. Ghani, Sediment Transport in Sewers, Ph.D Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK, (1993).
- [19] R. W. P. May, P. M. Brown, G. R. Hare, K. D. Jones, Self-cleansing conditions for sewers carrying sediment, Report SR 221, Hydraulics Research Ltd., Wallingford, England, (1989).
- [20] C.E. Rasmussen, C.K.I. Williams, *Gaussian Processes for Machine Learning*. The MIT Press, Cambridge, MA, (2006).
- [21] C. Ferreria, 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems, *Journal of*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Ghasempour, K. Roushangar, *Sediment transport modeling in circular smooth and rough rainwater transport pipes using factorial analysis, intelligence and empirical methods*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(6) (2021) 2435-2450.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17406.6553



