

پیش‌بینی ضریب مقاومت جریان در آبروهای جمع‌آوری آب‌های سطحی با شرایط مرزی متفاوت با استفاده از روش فرامدل

کیومرث روشنگر^۱، صنم بیوگ آقازاده^۲، سید مهدی ثاقبیان^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۳۱

چکیده

تخمین دقیق مقاومت جریان در لوله‌های انتقال آب یکی از مهمترین موضوعات در زمینه مهندسی آب و هیدرولیک می‌باشد. به دلیل پیچیدگی پدیده‌های هیدرولیکی مقاومت جریان تخمین و تعیین معادلات حاکم بر آن مشکل است. مدل‌های کلاسیک ریاضی در این راستا از دقت کافی برخوردار نیستند. در این مقاله با استفاده از ۳۰۰ داده آزمایشگاهی ضریب زبری در لوله‌های جمع‌آوری آب باران با شرایط مرزی متفاوت (بستر صلب و بستر رسوبگذاری شده) تخمین زده شده است. سه سناریو بر اساس پارامترهای هیدرولیکی، و مشخصات ذرات رسوبی بدون و با در نظر گرفتن دبی رسوبی به عنوان پارامتر ورودی) با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن تخمین زده شده و نرخ تأثیر پارامترهای ورودی در هر حالت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مشاهده گردید که در حالت بستر صلب مدل با پارامترهای ورودی شامل عمق نسبی جریان، اندازه بدون بعد ذرات، عدد فرود معین و دبی رسوبی و در حالت بستر رسوبگذاری شده مدل با پارامترهای ورودی عمق و عرض نسبی بستر رسوبی، عدد فرود معین دبی رسوبی نتایج مطلوب‌تری را ارائه می‌دهند. بهترین نتایج برای سری داده‌های آزمون برای حالت بستر رسوبگذاری شده با مقادیر $R=0.9$ ، $DC=0.73$ و $RMSPE=10.9$ بدست آمد. یکی از قابلیت‌های برنامه‌ریزی بیان ژن ارائه فرمول صریح برای ضریب زبری می‌باشد. لذا، برای مدل برتر سناریوهای در نظر گرفته شده روابط صریحی ارائه گردید. همچنین مطابق نتایج حاصله، آنالیز سری داده‌ها به صورت جداگانه منجر به جواب‌های دقیق‌تری نسبت به ترکیب داده‌ها گردید.

واژه‌های کلیدی: بستر صلب، ضریب اصطکاک، آبروهای جمع‌آوری آب‌های سطحی، برنامه‌ریزی بیان ژن

مقدمه

توزیع آب شهری که با حجم عظیمی از داده‌ها روبه‌رو هستیم نیست (Yildirim, G., and Ozger, M., 2009). در مورد تعیین ضریب اصطکاک در لوله‌ها مطالعاتی زیادی انجام شده و روابط متعددی برای پارامترهای مربوط به ضریب اصطکاک با استفاده از روش‌های مختلف ارائه شده است. سلتا و همکاران ضریب اصطکاک را در میکرو لوله‌هایی با قطر ۱۳۰ میکرومتر برای اعداد رینولدز بین ۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰ بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند، که روابط تجربی برای جریان آرام زمانی که عدد رینولدز کمتر از ۵۸۵ باشد مناسب است و زمانی که جریان به حالت آشفته باشد، ضریب اصطکاک با روابط تجربی قابل محاسبه نیست (Celta et al, 2002). براتین و تادریس ضریب اصطکاک در جریان آرام آب را از طریق همجوشی در لوله‌های سیلیکا با قطر ۵۰ تا ۵۳۰ میکرومتر بررسی کردند. آن‌ها انحراف از استوکس و ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به روابط تجربی گزارش دادند. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر این نوع انحراف کاهش می‌یابد. در حالت کلی به این نتیجه رسیدند که به ترکیب یونی مایعات بستگی دارد (Brutin and Tadriss, 2003). کندلیکار و همکاران اثر زبری بر افت فشار در میکروتیوب‌ها را مورد بررسی قرار

برآورد دقیق ضریب اصطکاک به ویژه در در لوله‌های انتقال آب و فاضلاب یکی از مهم‌ترین موضوعات مهندسی آب می‌باشد. در واقع طراحی هیدرولیکی و تحلیل لوله‌های انتقال آب باران و فاضلاب بدون در نظر گرفتن مقدار صحیح ضریب اصطکاک امکان‌پذیر نخواهد بود و لحاظ غیر دقیق آن منجر به هدر رفتن منابع آبی خواهد شد (Yuhong, Z, and Wen x in, H., 2009). برای جریان‌های آرام به صورت تحلیلی رابطه‌ای صریح جهت محاسبه ضریب اصطکاک وجود دارد. ولی برای جریان‌های متلاطم که اغلب حرکت سیال در لوله‌ها را تشکیل می‌دهند هیچ رابطه صریحی وجود ندارد. مهم‌ترین رابطه برای چنین جریان‌هایی رابطه کلبروک و وایت است که یک رابطه ضمنی است مناسب پروژه‌های طراحی خصوصاً سیستم‌های

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

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

۳- گروه عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر- ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: smsaghebian@iau-ahar.ac.ir)

رودخانه تانگ واقع در ایالت ماتانای آمریکا به روش برنامه‌ریزی ژنتیک و مقایسه نتایج حاصله با منحنی سنج رسوب و روشهای رگرسیونی، روش برنامه‌ریزی ژنتیک را به عنوان یک راهکار مناسب جهت مدلسازی رسوبات معلق رودخانه‌ها معرفی نموده‌اند (Aytek and Kisi, 2008). روشنگر و همکاران از روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN و GEP) برای مدل‌سازی اتلاف انرژی روی سرریزهای پلکانی استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد قابل اطمینان این روش‌ها در پیش‌بینی اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی بود (Roushangar et al., 2014). با توجه به وجود عدم قطعیت در پدیده‌های هیدرولیکی مانند ضریب اصطکاک و استفاده از روش هوش مصنوعی در تخمین برخی از پارامترهای هیدرولیکی، در این تحقیق سعی گردیده است تا کارایی روش جدید برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) به عنوان روش فرامدل در تخمین ضریب اصطکاک در لوله‌های انتقال آب باران با شرایط بستر متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین مدل‌های و روی متفاوتی براساس مشخصات جریان و ذرات رسوب تعریف گردید تا تأثیر مدلسازی متفاوت در تخمین ضریب زبری تعیین گردد.

مواد و روش‌ها

سری داده‌های ضریب اصطکاک در لوله‌های انتقال آب باران
در این تحقیق از داده‌های نتایج آزمایشگاهی رسوب و مقاومت جریان در لوله‌های انتقال آب باران مربوط به گانی (Ghani, 1993) و می و همکارانش (May et al, 1989) استفاده شده است. این آزمایش‌ها با استفاده از ماسه غیر چسبنده در لوله با قطرهای مختلف ۱۵۴، ۳۰۵ و ۴۵۰ میلی‌متر و طول ۲۰/۵ متر در آزمایشگاه‌های دانشگاه نیوکاستل (UNuT) و موسسه تحقیقاتی هیدرولیک (HRL) در حالت نیمه پر انجام گرفته و انتقال رسوب را در دو حالت لوله تمیز با رسوبات ته نشین نشده شامل بستر صاف و زبر (شکل ۱) موارد الف و ب) و لوله حاوی رسوبات ته‌نشین شده به شکل بستر تلماسه‌های به هم پیوسته (شکل ۱) مورد ج) مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۱) شامل محدوده برخی از پارامترهای به کار رفته در این آزمایش‌ها می‌باشد.

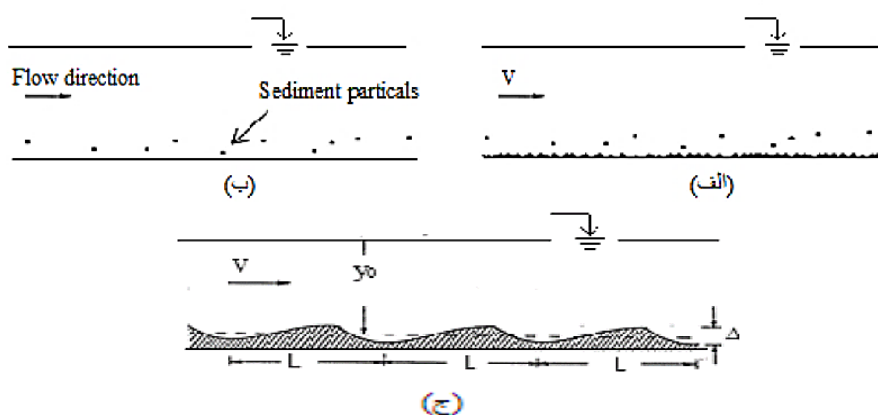
برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برنامه‌ریزی بیان ژن توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع شد. در این برنامه، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند.

دادند. آن‌ها مشاهده کردند که برای لوله‌های بزرگتر از ۱۰۶۷ میکرومتر اثر زبری نادیده گرفته می‌شود. و برای لوله‌های کوچک‌تر از ۶۲۰ میکرومتر زبری افزایش می‌یابد (Kandlikar et al, 2003). تام و همکاران اثر زبری سطح و حرارت را بر ضریب اصطکاک بررسی کردند. ضریب اصطکاک تحت هر دو شرایط ایزوترمال و گرما اندازه‌گیری شد، نتایج نشان داد که گرما باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود (Tam et al, 2011). سینگ ضریب اصطکاک را بر میکروتیوب‌ها از جنس نیکل بررسی کرد، و نتایج لوله‌های نیکل را با نتایج حاصل از فولاد و شیشه مقایسه کرد و به این نتیجه رسید که برای زبری کمتر از ۰،۰۰۵ تا ۰،۰۱۳ زبری عملاً تأثیری ندارد (Singh, 2011). قاجار و همکاران ضریب اصطکاک را برای میکرولوله‌های فولادی ضدزنگ از ۶۹۰ تا ۲۰۸۰ میکرومتر بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضریب اصطکاک به طور معنی‌داری با کاهش قطر تا رسیدن به حدود ۱۳۰۰ میکرومتر تحت تأثیر قرار نگرفت. آنها همچنین اثر زبری بر افت فشار را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که زبری برای میکرولوله‌های با قطر کوچک مهم خواهد بود (Ghajar et al, 2010). ازگر و بلدیریم با استفاده از داده‌های به دست آمده از دیاگرام مودی، ضریب اصطکاک در لوله‌ها توسط مدل تطبیقی استنتاج فازی عصبی شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند ضریب اصطکاک را نسبت به مقادیر واقعی با ضریب تعیین ۹۹/۹۹٪ تخمین بزند (Ozgar & Yildirim, 2009). از آنجا که اندازه‌گیری دقیق ضریب اصطکاک موجب بهبود و بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های انتقال آب باران می‌گردد، لذا استفاده از روش‌های هوشمندی که بتوانند این پارامتر را دقیق تخمین بزنند ضروری می‌باشد. در دهه‌های اخیر روش‌های محاسبات نرم برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها که اکثراً الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت هستند به عنوان ابزاری توانمند در حل مسائل پیچیده به شمار می‌آیند و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشند (Ferria, C. 2001). فربودنام و همکاران جریان روزانه رودخانه ليقوان را با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک پیش‌بینی کرده و نتایج را با شبکه‌های عصبی مصنوعی مقایسه نمودند. نتایج دقت بالای روش GP را در برآورد جریان رودخانه نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان داد (فربودنام و همکاران ۱۳۸۸). لوپس و وینرت سیستم برنامه‌ریزی بیان ژن را برای مدلسازی سری‌های زمانی به کار بردند. در این مطالعه چندین سری زمانی مختلف از جمله جریان رودخانه ریوگراندر سد فارناس در برزیل، رودخانه نیل در مصر و رودخانه تایت در ایستگاه کامبیکا در برزیل با استفاده از EGIPSY (سیستمی بر مبنای GEP) و بر مبنای مقادیر پیشین رواناب، مدلسازی شدند (Lopes and Weinert, 2004). آیتک و کیسی با مدلسازی میزان رسوب معلق در دو ایستگاه از

جدول ۱- محدوده داده‌های به کار رفته در آزمایشات مورد استفاده این تحقیق (Ghani,1993)

شرایط مرزی	محقق	متغیرها							تعداد داده
		D(mm)	V(m/s)	y_0/D	d_{50} (mm)	C_v (Qs/Q)	Re(10^5)	$S_0(10^{-2})$	
بستر صاف	Ghani	154	0.24 - 0.862	0.153 - 0.756	0.93 - 5.7	38 - 145	0.13-1.43	0.13-0.53	39
		305	0.395 - 1.2	0.210 - 0.8	0.46 - 8.30	1- 1280	0.87-2.7	0.06-0.53	87
		450	0.502 - 1.2	0.50 - 0.75	0.72	2- 37	1.04-4.6	0.04-0.31	27
	May et al	300	0.082-1.5	0.37-1	0.72	0.31-0.443	0.75-6.5	0.14-0.56	48
بستر زبر	Ghani	305Roughness 1 ($k_0=0.53$ mm)	0.411 - 1	0.18- 0.77	0.97 - 8.30	1- 923	0.89-2.52	0.07-0.56	71
		305Roughness 2 ($k_0=1.34$ mm)	0.56 - 0.827	0.243 - 0.764	2.00 - 8.30	7- 403	0.98-2.1	0.13-0.56	30
تلماسه‌های	Ghani	450	0.492-1.332	0.5-0.75	0.72	21.1269	1.54-4.1	0.069-0.46	26
بهم‌پیوسته	May et al	300	0.6-1.14	0.5	0.72	280-1186	1.5-2.4	0.29-.57	5



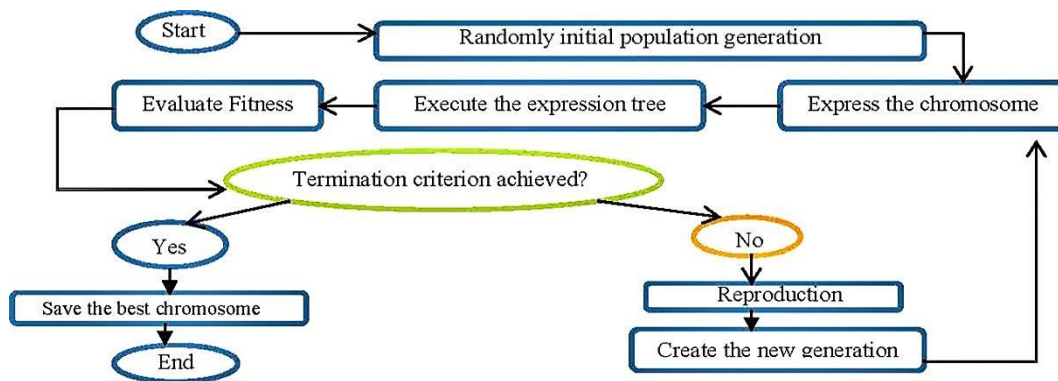
شکل ۱- حالت‌های مختلف فرم بستر حاوی رسوب، (الف) بستر زبر، (ب) بستر صاف، (ج) بستر حاوی تلماسه‌های جداگانه (Ghani,1993)

نتایج مدل برنامه ریزی ژن (GEP)

روند مدلسازی با استفاده از برنامه ریزی ژن را به طور خلاصه می‌توان به پنج مرحله تقسیم نمود:

مرحله نخست، شامل تعیین تابع برازش است. برای یک برازش کامل مقدار f_i از یک برنامه انفرادی i برابر با $f_i = f_{max} = nR$ می‌باشد. مرحله دوم، شامل انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها است. مرحله سوم، انتخاب ساختار کروموزوم‌ها است که شامل طول سر و تعداد ژن‌ها می‌باشد. طول سر برابر با (۷ و ۸) انتخاب شده و تعداد ۳ یا ۴ ژن نیز در هر کروموزوم در نظر گرفته شده است. همچنین در هر اجرا تعداد ۲۵ تا ۳۵ کروموزوم انتخاب گردیده است. مرحله چهارم، انتخاب تابع پیوند است که تعیین کننده ارتباط بین زیر درخت هاست. در این بررسی سه ژن انتخابی از طریق Addition به هم پیوند داده می‌شوند. مرحله پنجم، انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آن هاست. در این مورد ترکیبی از کلیه عملگرهای بهسازی از قبیل جهش، وارون سازی، سه نوع ترانهش و سه نوع ترکیب استفاده می‌شود. پارامترهای مدل‌های GEP استفاده شده در تحقیق در جدول ۲ آورده شده است.

سپس کروموزوم‌ها به صورت بیان درختی (ET) 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. معمولاً تابع برازش به وسیله پردازش تعدادی از مسئله هدف، که مورد برازش نیز نامیده می‌شوند، ارزیابی می‌گردد. اگر کیفیت رضایت بخش از یک راه حل پیدا شود و یا نسل‌ها به تعداد معینی برسد، تکامل متوقف می‌شود و بهترین راه حل یافت شده تا به حال، گزارش داده می‌شود. در (GEP)، هر ژن به صورت بیان درختی کدگذاری می‌شود. در مورد کروموزوم‌های چندژنی، تمامی بیان درختی‌ها با استفاده از تابع پیوند، از محل گره ریشه خود به یکدیگر متصل می‌شوند. هر ژن، ناحیه کدگذاری بنام ORF (چارچوب تفسیر باز) که بعد از کد برداری (رمزگشایی) به صورت ET بیان می‌شود و نشان دهنده یک راه حل کاندید، برای مسئله است. مراحل اصلی از برنامه ریزی بیان ژن به طور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، فرآیند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از تعداد معینی از افراد (جمعیت اولیه) آغاز می‌شود. این فرآیند برای تعداد معینی از نسل‌ها تکرار می‌شود تا راه حل خوب و مناسبی پیدا شود.



شکل ۲- فلوجارت برنامه‌ریزی بیان ژن (Ferria, C. 2001)

جدول ۲- پارامترهای مدل‌های GEP استفاده‌شده در این تحقیق

تنظیمات پارامتر	پارامتر	تنظیمات پارامتر	پارامتر
۰/۸	اندازه سر (Head Size)	۰/۸	نرخ ترانزیشن درج متوالی (IS Transposition Rate)
۲۵،۳۰،۳۵	تعداد کروموزوم‌ها (Chromosomes)	۰/۸	نرخ ترانزیشن ریشه درج (RIS Transposition Rate)
۳،۴	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم‌ها (Number of genes)	۰/۸	نرخ ترانزیشن ژن (Gene Transposition Rate)
۰/۰۴۴	نرخ جهش (Mutation Rate)	RMSE	معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)
۰/۸	نرخ وارون‌سازی (Inversion Rate)	+	تابع پیوند (Linking Function)
۰/۳	نرخ ترکیب تک- (One-Point Recombination Rate)	۰/۸	نرخ ترانزیشن درج متوالی (IS Transposition Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب دو- (Two-Point Recombination Rate)	۰/۸	نرخ ترانزیشن ریشه درج (RIS Transposition Rate)
۰/۸	نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Rate)	۰/۸	نرخ ترانزیشن ژن (Gene Transposition Rate)

معیارهای ارزیابی

به‌منظور ارزیابی کارایی روش‌های استفاده‌شده در تخمین ضریب زبری درلوله‌های آباران، از سه پارامتر آماری استفاده گردید که عبارت‌اند از: ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (R)، همبستگی خطی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی (DC) که یکی از معیارهای مهم ارزیابی قابلیت یک مدل است و هر چه مقدار آن نزدیک به یک باشد به معنی ارتباط بهتر داده‌ها می‌باشد و درصد ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSPE) که بیانگر میزان انحراف بین مقادیر پیش‌بینی‌شده می‌باشد. هر چه مقدار R و DC 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 (Roushangar et al., 2014):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{m_i} - \bar{L}_{m_i}) \times (L_{p_i} - \bar{L}_{p_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_{m_i} - \bar{L}_{m_i})^2 \times \sum_{i=1}^N (L_{p_i} - \bar{L}_{p_i})^2}} \quad (1)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (L_{m_i} - L_{p_i})^2}{\sum_{i=1}^N (L_{m_i} - \bar{L}_{m_i})^2} \quad (2)$$

$$RMSPE = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (L_{m_i} - L_{p_i})^2}{N}} \quad (3)$$

در روابط بالا L_m : ضریب زبری اندازه‌گیری شده، \bar{L}_m : متوسط ضریب زبری اندازه‌گیری شده، L_p : ضریب زبری پیش‌بینی‌شده، \bar{L}_p : متوسط ضریب زبری پیش‌بینی شده می‌باشد.

نرمال‌سازی داده‌ها

اصولاً واردکردن داده‌ها به‌صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود لذا نرمالیزه کردن داده‌ها خصوصاً زمانی که دامنه تغییرات ورودی‌ها زیاد باشد کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. استفاده از این فرمول دامنه اعداد را به هم نزدیک می‌کند و از نتایج پرت جلوگیری می‌کند. روش استفاده‌شده برای پیش‌پردازش داده‌ها به شرح زیر است که بر اساس سعی و خطا به دست آمد.

$$x_n = 0.1 + 0.9 \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

در این رابطه x_{\min} ، x_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار داده‌های مشاهده‌شده و x_n داده نرمال شده می‌باشد.

مدلسازی، نتایج و بحث

تعیین مدل های ورودی

با توجه به اینکه انتخاب مدل های ورودی در سامانه های هوشمند می تواند بر روی دقت جواب های حاصل از تحلیل تأثیر گذارد، لذا سعی گردید در مدل سازی GEP پارامترهای مناسب و مؤثر در تعیین ضریب زبری انتخاب گردد. که عبارتند از: V سرعت جریان، $D_{gr} = \sqrt[3]{g \left(\frac{\rho_s - 1}{\rho} \right) \frac{d_{50}}{v^2}}$ اندازه بدون بعد ذرات (در این رابطه پارامتر v نشان دهنده ویسکوزیته سینماتیکی جریان می باشد)، d_{50} اندازه متوسط ذرات، D قطر لوله، W_b عرض بستر رسوبی و y_s عمق بستر رسوبی نیز بر روی ضریب اصطکاک تأثیر گذار می باشند. در تعریف مدل ها از پارامترهای بدون بعد با در نظر گرفتن سه حالت استفاده گردید. در سناریو اول مدل هایی بر اساس پارامترهای هیدرولیکی (Fr

عدد فرود جریان Re ، عدد رینولدز و y عمق جریان) تعریف شد. در سناریو ۲ مدل هایی بر اساس از پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی بدون در نظر گرفتن C_v (دبی رسوبی در حالت بی بعد) تعریف شده است. و در سناریو ۳ چندین مدل بر اساس پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوب با در نظر گرفتن C_v به عنوان پارامتر ورودی برای سه حالت مختلف (لوله صاف و زبر و لوله شامل تلماسه های (dune) به هم پیوسته) تعریف گردد. همچنین جهت بررسی کارایی روش به کار رفته برای محدوده وسیعی از داده ها و با فرض اینکه هیچ گونه اطلاعاتی در مورد شرایط بستر لوله و ته نشینی رسوبات داخل لوله موجود نیست سعی گردید که کل داده ها ترکیب شده و این حالت نیز مورد بررسی قرار گیرد. جدول ۳ مدل های تعریف شده در تحقیق کنونی را نشان می دهد.

جدول ۳- مدل های تعریف شده

بررسی ضریب زبری					
سناریو ۱		سناریو ۲ (بدون در نظر گرفتن C_v)		سناریو ۳ (با در نظر گرفتن C_v)	
مدل	متغیر ورودی	مدل	متغیر ورودی	مدل	متغیر ورودی
بستر صلب (صاف و زبر)		بستر صلب		بستر صلب	
(I)	Re	R(I)	$F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/D$	CR(I)	F_{rm}, D_{gr}, C_v
(II)	Fr	R(II)	$F_{rm}, D_{gr}, y/d_{50}$	CR(II)	$F_{rm}, D_{gr}, y/d_{50}, C_v$
(III)	Re, y/D	R(III)	$F_{rm}, D_{gr}, d_{50}/y$		
(IV)	Fr, y/D	بستر شل		بستر شل	
		L(I)	F_{rm}	CL(I)	$C_v, y_s/D, w_b/y$
		L(II)	$F_{rm}, w_b/y$	CL(II)	$C_v, y_s/D, F_{rm}, w_b/y$
		L(III)	$y_s/D, F_{rm}, w_b/y$		
		L(IV)	$D_{gr}, F_{rm}, w_b/y$		

نتایج و بحث

نتایج ضریب زبری مانینگ برای بستر صاف و زبر (سناریو ۱)

در سناریو ۱ چندین مدل که تنها وابسته به مشخصات هیدرولیکی جریان (شامل عدد فرود و عدد رینولدز و عمق نسبی جریان) بود، برای تخمین ضریب زبری مانینگ در لوله های انتقال آباران برای بسترهای صلب تعریف گردید. نتایج مربوط به مدل های GEP در جدول ۴ آورده شده است. مطابق با نتایج نشان داده شده در جدول ۴ مشاهده می گردد مدل (III) با پارامترهای ورودی عدد رینولدز و نسبت عمق بر قطر لوله به عنوان بهترین مدل برای داده ها می باشد. نسبت به سایر مدل های تعریف شده برای سناریو ۱ از دقت بیشتری برخوردار است. این مدل دارای بیشترین R و DC بوده و کمترین درصد خطا (RMSPE) را داراست. مطابق با نتایج جدول و طبق نظریه سلتا مشاهده می گردد که استفاده از عدد رینولدز به تنهایی به عنوان پارامتر ورودی منجر به جواب های دقیق-

تری در مقایسه با عدد فرود می گردد. شکل ۳ نتایج مشاهداتی و پیش بینی شده سری داده ها برای آموزش و آزمون مدل برتر GEP را برای تخمین ضریب زبری مانینگ در بستر صاف و زبر به صورت جداگانه نشان می دهد. نکته مهم در مورد روش GEP ارائه فرمول صریح در مورد مسئله مورد بررسی می باشد. فرمول به دست آمده از این روش برای پیش بینی ضریب زبری مانینگ بر اساس مشخصات جریان به شکل زیر می باشد:

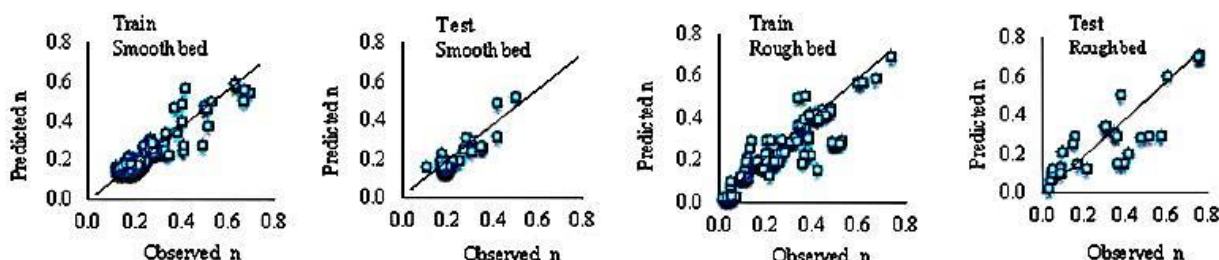
$$n_s = Re \times \left(Re - \sqrt[3]{7.5 \times 7.5 + \frac{y}{D}} + (3Re \times 0.42 \times \frac{y}{D}) \times \sqrt[3]{2Re} \right) \quad (5) \quad \text{بستر صاف}$$

$$n_s = \sqrt[3]{\frac{y}{D}} - \frac{y}{D} + \left(Re \times \sqrt[3]{0.009 \times \left(\frac{y}{D} - 0.018 \right)} \right) \quad (6) \quad \text{بستر زبر}$$

$$+ \sqrt[3]{2Re \times \left(\frac{y}{D} \right) \times \left(\frac{y}{D} \right) - Re}$$

جدول ۴- نتایج مربوط به مدل‌های GEP در بستر صاف و زیر (سناریو ۱)

مدل	معیار ارزیابی					
	آموزش			آزمون		
بستر صاف	R	DC	RMSPE	R	DC	RMSPE
(I)	-۰/۷۴۹	-۰/۶۰۲	۱۱/۵	-۰/۶۹۷	-۰/۵۸۴	۱۰/۲
(II)	-۰/۴۳۶	۲۲۵,۲	۱۲/۵	-۰/۴۰۵	-۰/۱۲۱	۱۹/۱
(III)	-۰/۷۹۴	-۰/۶۹۱	۹	-۰/۷۳۸	-۰/۶۷۱	۸/۹
(IV)	-۰/۷۵۲	-۰/۶۱۰	۱۰/۱	-۰/۶۹۹	-۰/۵۹۶	۹/۲
بستر زیر						
(I)	-۰/۷۱۲	-۰/۵۲۴	۱۲/۴	-۰/۶۶۲	-۰/۴۵۲	۱۹/۶
(II)	-۰/۴۲۱	-۰/۱۶۰	۱۸/۵	-۰/۳۹۲	-۰/۱۰۰	۱۹/۹
(III)	-۰/۸۰۵	-۰/۶۰۰	۱۱/۱	-۰/۷۴۹	-۰/۵۵۹	۱۶/۸
(IV)	-۰/۸۰۱	-۰/۵۹۶	۱۱/۹	-۰/۷۴۵	-۰/۵۸۲	۱۷/۶



شکل (۳) مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش‌بینی شده سری داده‌ها براساس پارامترهای هیدرولیکی برای مدل برتر

رسوبی و عمق جریان در تخمین ضریب زبری مانینگ در حالت لوله با رسوبات ته‌نشین شده می‌باشد. فرمول به‌دست‌آمده از این سناریو برای پیش‌بینی ضریب زبری مانینگ به صورت زیر می‌باشد:

$$ns = F_{rm} - D_{gr} - \frac{y}{d_{50}} - (-1.9 \times 0.22) \times D_{gr}^2 + \frac{F_{rm}}{2F_{rm}} + \frac{y}{d_{50}} \quad (7)$$

$$ns = ((D_{gr})^2 - \frac{d_{50}}{D})^2 - (2D_{gr} - \sqrt{\frac{d_{50}}{D}}) + \frac{d_{50}}{D} * \quad (8)$$

$$D_{gr} - F_{rm})^2 - (2D_{gr} - \sqrt{\frac{d_{50}}{D}}) \quad (9)$$

$$ns = (F_{rm} - 0.26) \left(\frac{y}{d_{50}} + 1.09 \right) (D_{gr}^3 - D_{gr}) - F_{rm} * (D_{gr} * 1.13 - \frac{y}{d_{50}}) + \frac{y}{d_{50}}^4$$

نتایج ضریب زبری مانینگ با در نظر گرفتن دبی رسوب (سناریو ۳)

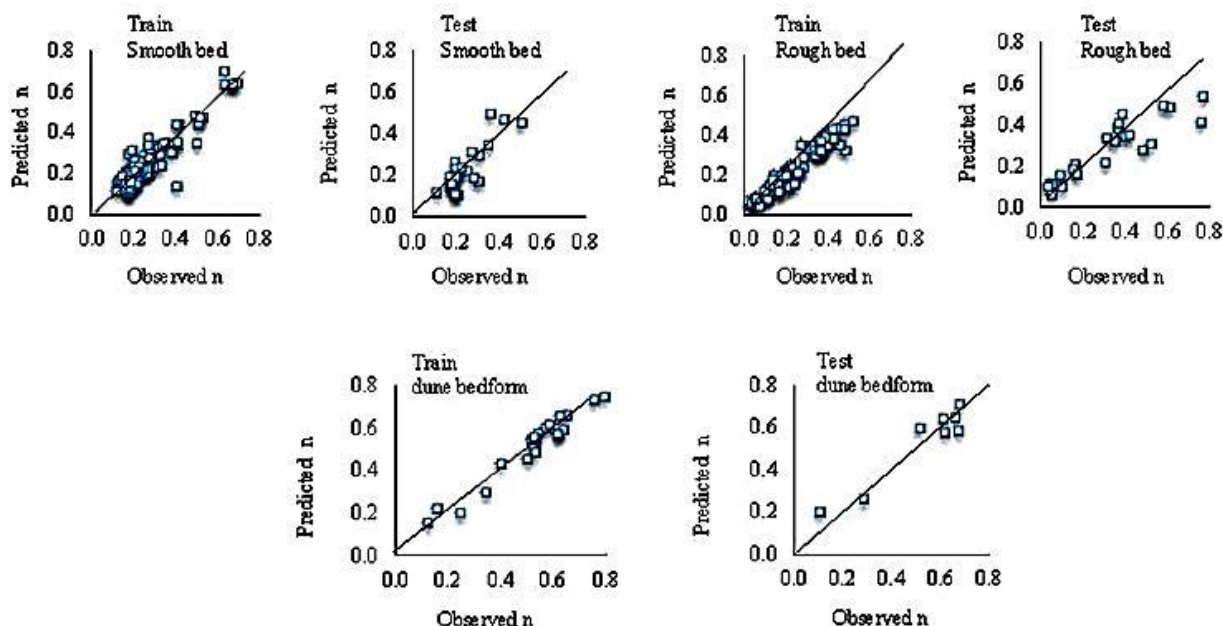
جهت تخمین ضریب زبری در لوله‌های انتقال آب‌باران تحت سناریو ۳، مدل‌هایی بر اساس مشخصات جریان و ذرات رسوب و با در نظر گرفتن دبی رسوب (CV) برای تخمین ضریب زبری مانینگ تعریف گردیده و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج کلی مدل‌های تعریف‌شده تحت سناریو ۳ در جدول ۶ و شکل ۵ نشان داده شده است.

نتایج ضریب زبری مانینگ بدون در نظر گرفتن دبی رسوب (سناریو ۲)

در حالت دوم یا همان سناریو ۲ تاثیر پارامترهای مشخصات ذرات رسوبیبا قطر ۰,۷۲ میلی‌متر بدون در نظر گرفتن دبی رسوب بر روی مقاومت جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی مدل‌های تعریف شده در جدول ۵ و شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با نتایج در حالت رسوب‌گذاری محدود برای بستر صاف مدل (II) با ورودی‌ها F_{rm} , D_{gr} , R/d_{50} برای بستر زیر مدل (I) با ورودی‌های F_{rm} , D_{gr} , d_{50}/D و در حالت تلماسه‌های به‌هم پیوسته، مدل (III) با پارامترهای ورودی F_{rm} , W_b/y_0 , D_{gr} با توجه به سه معیار ارزیابی (R, DC, RMSPE) برای سری داده‌های آموزش و آزمون، نسبت به مدل‌های دیگر دقت بالاتری داشته و مدل برتر می‌باشد. مطابق نتایج جدول ۵، در بستر صاف لحاظ کردن پارامتر شعاع هیدرولیکی، اندازه نسبی ذرات رسوب و در بستر زیر اندازه نسبی ذرات رسوب، در مدل‌های تخمین ضریب اصطکاک در لوله‌های انتقال آب موجب بهبود جواب‌ها می‌گردد. و همچنین در حالت تلماسه‌های به‌هم پیوسته، اضافه کردن پارامترهای W_b/y_0 به مدل‌ها به عنوان پارامتر ورودی منجر به نتایج دقیق‌تری گردیده است. که با یافته‌های براتین و کندلیکار و قاجار مطابقت دارد. این امر حاکی از تاثیر عرض بستر

جدول ۵- نتایج مربوط به مدل‌های GEP در بستر صاف و زیر براساس مشخصات رسوب بدون در نظر گرفتن دبی رسوب (سناریو ۲)

شرایط مرزی	مدل	معیارهای ارزیابی			آموزش			آزمون			
		R	DC	RMSPE	R	DC	RMSPE	R	DC	RMSPE	
بستر صلب	بستر صاف	R(I)	۰/۶۱۲	۰/۳۵۶	۱۰/۱۸	۰/۶۱۲	۰/۳۶۵	۱۵/۸			
		R(II)	۰/۶۵۹	۰/۴۱۰	۶/۸	۰/۶۳۶	۰/۴۰۲	۷/۳			
		R(III)	۰/۶۳۵	۰/۳۹۵	۹/۶	۰/۶۲۶	۰/۳۸۶	۱۴/۲			
	بستر زیر	R(I)	۰/۶۵۱	۰/۵۷۱		۰/۵۱۵	۰/۵۸۱				
		R(II)	۰/۶۷۱	۰/۷۳۵	۱۶/۱۸	۰/۵۶۶	۰/۶۰۸	۲۰/۹			
		R(III)	۰/۶۶۲	۰/۷۰۳	۱۷/۴	۰/۵۴۳	۰/۵۹۲	۹/۲۱			
بستر شل	تلماسه‌های بهم‌پیوسته										
	L(I)	۰/۶۰۵	۰/۵۱۱	۱۳/۱	۰/۶۰۲	۰/۴۸۱	۱۶/۹				
	L(II)	۰/۸۴۳	۰/۷۸۶	۱۲/۸	۰/۸۶۴	۰/۵۸۰	۱۵/۹				
	L(III)	۰/۸۶۵	۰/۷۹۴	۱۲/۴	۰/۸۷۱	۰/۵۸۶	۱۵/۳				
	L(IV)	۰/۸۹۰	۰/۸۰۰	۱۲/۲	۰/۸۸۰	۰/۶۰۰	۱۴/۹				



شکل ۴- مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش بینی شده سری داده‌ها براساس مشخصات رسوب بدون در نظر گرفتن دبی رسوب برای مدل برتر.

اضافه کردن پارامترهای y_s/D و W_b/y_0 به مدل‌ها به عنوان پارامتر ورودی در این حالت باعث بهبود جواب‌ها گردیده است و این امر حاکی از تأثیر عرض و عمق بستر رسوبی و همچنین عمق جریان در تخمین ضریب اصطکاک در حالت لوله با رسوبات ته‌نشین شده می‌باشد، که با نظریه کندلیکار و قاجار مطابقت دارد. نتایج حاصل از مقایسه جدول ۵ با جدول ۶ بیانگر این مطلب می‌باشد که اعمال کردن پارامتر دبی رسوبی C_v موجب بهبود جواب‌ها شده است. فرمول‌های بدست آمده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای سناریو ۳ بصورت زیر ارائه می‌باشد:

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در حالت رسوب‌گذاری محدود برای بستر صاف و زیر مدل (CRII) با پارامترهای ورودی y_s/d_{50} , C_v , F_{rm} D_{gr} با توجه به سه معیار ارزیابی (R, DC, RMSPE) برای سری داده‌های آموزش و آزمون نسبت به مدل‌های دیگر دقت بالاتری داشته و مدل برتر می‌باشد. مطابق نتایج حاصله، لحاظ کردن پارامتر دبی رسوب و اندازه نسبی ذرات رسوب در مدل‌های تخمین ضریب زبری مانینگ موجب بهبود جواب‌ها می‌گردد. برای حالت تلماسه‌های بهم‌پیوسته، مدل (CLI) با پارامترهای ورودی y_s/D , C_v , W_b/y_0 نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل دیگر را نشان می‌دهد.

استفاده از پارامتر y/d_{50} تا حدودی باعث بهبود نتایج شده است. با این حال، با مقایسه نتایج جدول ۷ با نتایج مربوط به جداول ۴ تا ۶ مشاهده می‌گردد که مدل‌های GEP برای داده‌های ترکیب‌شده نسبت به حالتی که داده‌ها به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند نتایج مطلوبی را به ویژه در مقادیر بالاتر n ارائه نداده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای تخمین ضریب اصطکاک مانینگ در لوله‌های انتقال آب باران از مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن GEP استفاده شده و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوب مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌های GEP به این صورت است:

- بین مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۱، مدلی که از پارامترهای Re و y_0/D به عنوان متغیرهای ورودی استفاده می‌کند در تخمین ضریب زبری نسبت به مدل‌های دیگر موفق‌تر می‌باشد.

$$ns = Fr_m \times \left(-2.3 \times D_{gr} + \frac{C_v}{-0.9} \right) + Fr_m \times \sqrt{C_v} \times (-0.37 - 0.97 + Fr_m - 0.97) + C_v \quad (10)$$

بستر صاف

$$ns = \left(\left[\frac{R}{d_{50}} - 2.4 \right] \times \left(\frac{D_{gr}}{R/d_{50}} \right) + \left[\frac{y}{d_{50}} \times \frac{D_{gr}}{R/d_{50}} \right] - \left[(0.35) \right]^2 \right) \times \left[\sqrt{D_{gr}} \right] \quad (11)$$

بستر زبر

$$ns = \left(\frac{W_b}{y_0} - \frac{C_v - 9.07}{-9.07} + \left(\frac{W_b}{y_0} \right)^2 \right)^2 + \frac{W_b}{y_0} \times C_v \times 0.07 \times \left(2 \frac{d_s}{D} \right) - (C_v)^3 + \left(\left(2.4 - \frac{d_s}{D} \right) \times \frac{W_b}{y_0} + 0.07 - \frac{W_b}{y_0} - \frac{d_s}{D} \right)^2 \quad (12)$$

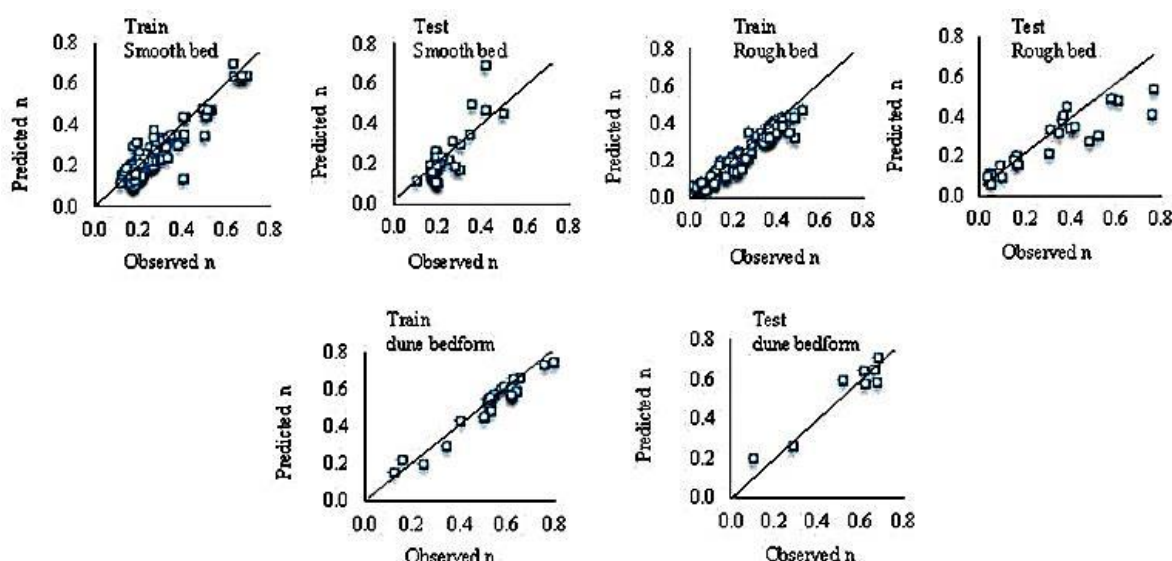
تلمسه‌های پیوسته

نتایج ضریب زبری مانینگ برای ترکیب داده‌ها

با ترکیب کل داده‌های موجود عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای محدوده وسیعی از داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۷ شامل نتایج آنالیز دو مدل از سناریو ۳ برای این حالت می‌باشد. نتایج حاصله بیانگر آن است که مدل CR(II) بیشترین دقت را داراست و

جدول ۶- نتایج مربوط به مدل‌های GEP در بستر صاف و زبر براساس مشخصات رسوب با در نظر گرفتن دبی رسوب (سناریو ۳)

شرایط مرزی	مدل	معیار ارزیابی					
		Train			Test		
	بستر صاف	R	DC	RMSPE	R	DC	RMSPE
بستر صلب	CR(I)	-/۸۳۵	-/۴۹۳	۷/۷	-/۷۲۱	-/۵۷۴	۷/۹
	CR(II)	-/۸۴۹	-/۵۱۰	۶/۸	-/۷۳۶	-/۵۹۰	۷/۳
	بستر زبر						
	CR(I)	-/۷۶۱	-/۶۶۴	۱۱/۱	-/۷۳۶	-/۵۹۵	۶/۷
	CR(II)	-/۸۷۱	-/۷۳۵	۹/۸	-/۷۶۶	-/۷۲۸	۵/۹
تلمسه بهم پیوسته							
بستر شل	CL(I)	-/۹۲۰	-/۹۶۰	۳/۲	-/۹۰۰	-/۷۳۰	۱۰/۹
	CL(II)	-/۹۱۳	-/۸۱۴	۴/۹	-/۸۷۷	-/۶۳۱	۱۳/۹



شکل ۵- مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش‌بینی شده سری داده‌ها براساس مشخصات رسوب با در نظر گرفتن دبی رسوب

جدول ۷- نتایج مربوط به مدل‌های GEP برای ترکیب داده‌ها.

مدل برتر	معیار ارزیابی					
	آموزش			آزمون		
	R	DC	RMSPE	R	DC	RMSPE
(CRI)	۰/۷۷۶	۰/۵۵۴	۱۳/۷	۰/۵۷۵	۰/۱۳۳	۱۵/۵
(CRII)	۰/۸۲۰	۰/۷۷۰	۸/۲	۰/۷۰۰	۰/۴۳۰	۱۴/۹

neutrality in gene expression programming", *advances in Complex Systems*, 5, 389-408.

Ghajar, A. J., Tang, C. C., and Cook, W. L., (2010). "Experimental Investigation of Friction Factor in the Transition Region for Water Flow in Mini tubes and Micro tubes." *Heat Transfer Engineering*, Vol. 31, 646-657.

Ghani A., 1993. *Sediment Transport in Sewers*. Ph.D Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK.

Kandlikar, S. G., Joshi. S., and Tian, S. R., (2003). "Effect of Surface Roughness on Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics at Low Reynolds Numbers in Small Diameter Tubes." *Heat Transfer Engineering*, 24, 4-16.

Lopes, H. S., weinert, W.R ., (2004). "EGYPSYS: An enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problem", *International journal of Applied mathematics and computer Science*, 14, , 375-384.

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.

Roushangar K., Akhgar S., Salmasi F. & Shiri J. 2014 Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal of Hydrology*, 508, 254-265.

Singh, A., (2011) "Experimental Investigation of Friction Factor in Micro tubes and Development of Correlations for Prediction of Critical Reynolds Number." MS thesis, Oklahoma State University.

Tam, H. K., Tam, L. M., Ghajar, A. J., Ng, W. S., Wong, I. W., Leong, K. F., and Wu, C. K., (2011). "The Effect of Inner Surface Roughness and Heating on Friction Factor in Horizontal Micro Tubes", ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, Japan.

Yıldırım, G., and Ozger, M. (2009). "Determining turbulent flow friction coefficient using adaptive neuro fuzzy computing technique." *Advances in Eng. Software*, 40, 281-287.

Yildirim, G., and Ozger, M. (2009). "Neuro-fuzzy approach in estimating Hazen-Williams friction coefficient for small-diameter polyethylene pipes." *Advances in Eng. Software*, 40, 593-599.

- نتایج به دست آمده حاکی از آن است که سناریو ۲ و ۳ که در تعیین مدل‌های آن از هر دو پارامترهای مربوط به مشخصات جریان و ذرات رسوبی به عنوان ورودی استفاده شده است نسبت به مدل‌هایی که فقط از پارامترهای هیدرولیکی جهت تخمین ضریب زبری استفاده می‌کنند موفق‌تر بوده و از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.

- در حالت لوله حاوی رسوب و بدون ته نشینی برای هر دو حالت لوله با بستر صاف و زبر مدل با پارامترهای ورودی (C_v, F_{rm}, D_{gr}) نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.

- در سناریوهای ۱ و ۲ و ۳ ضریب زبری در بستر زبر نسبت به بستر صاف نتایج ضعیف‌تری دارد، پس افزایش زبری بستر و دیواره‌های لوله سبب کاهش کارایی مدل می‌گردد.

- در حالت لوله حاوی رسوب ته نشین شده به صورت بستر تلماسه‌های به هم پیوسته مدل با پارامترهای ورودی ($F_{rm}, y_s/D, W_b/y_0$) در تخمین ضریب زبری موفق‌تر می‌باشد. این مدل اثر عمق جریان و عرض و ارتفاع بستر رسوبی را در تخمین میزان ضریب زبری در لوله شامل رسوبات ته نشین شده به خوبی نشان می‌دهد.

- آنالیز سری داده‌ها به صورت جداگانه منجر به جواب‌های دقیق‌تری نسبت به ترکیب داده‌ها می‌گردد و ترکیب کردن داده‌ها از کارایی مدل می‌کاهد.

منابع

فریودنام، ن.، قربانی، م.، ع.، اعلمی، م. ت.، ۱۳۸۸، پیش بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه ليقوان)، مجله دانش کشاورزی، جلد ۱۹، شماره ۴.

Aytek, A., Kişi, O., (2008). A genetic programming approach to suspended sediment modelling. *Journal of hydrology*, 351, 288-2.

Brutin, D., Tadrst, L., (2003). "Experimental Friction Factor of a Liquid Flow in Micro-tubes," *Physics of Fluids*, vol. 15, pp.653-661.

Celata, P. G., Cumo, M., Guglielmi, M. and Zummo, G., (2002). "Experimental Investigation of Hydraulic and Single-phase Heat Transfer in 0.130-mm Capillary Tube," *Microscale Thermo physical Engineering*, 6, 85-97.

Ferria, C., (2001) , "Genetic representation and genetic

in open channel flow.” Commun Nonlinear Sci. Numer Simulate, 14,2373-2378.

Yuhong, Z., and Wen x in., H... (2009). “Application of artificial neural network to predict the friction factor

Estimation of Flow resistance Coefficients in Surface water Transport Pipes with Different boundary Condition via Meta Model

K. Roushangar¹, S. Biughaghazadeh², S. M. Saghebian^{3*}

Received: Apr.21, 2019

Accepted: Jul.22, 2019

Abstract

An accurate-prediction of friction coefficient is one of the most important issues of water engineering. Due to the complexity of hydraulic phenomena and the influence of various parameters in its estimation, it is difficult to determine the governing equations and the classical mathematical models are not sufficiently accurate in this regard. In this research using 300 experimental data, the friction factor of rainwater pipes with different boundary condition (rigid and deposited beds) under three scenarios (first scenario was modeling based on the hydraulic parameters, the second and third scenarios were modeling based on the hydraulic parameters and the sediment particles characteristics without and with considering the sediment discharge as input parameter) was estimated using Gene Expression Programming (GEP) method and the impacts of different employed parameters in each boundary condition was assessed. Also it was observed that for rigid boundary state, the model including parameters of dimensionless sediment discharge, Modified Froude number, dimensionless particle number, and relative flow depth (C_v , F_{rm} , D_{gr} , d_{50}/y) and for deposited bed state, the model with parameters of relative depth and width of sediment bed, Modified Froude number, and dimensionless sediment discharge (y_s/D , F_{rm} , W_b/y_0 , C_v) led to more accurate outcomes. One of the capabilities of gene expression programming is providing the explicit formula for roughness coefficient. The best results was obtained for deposited bed with values of $R=0.9$, $DC=0.73$, and $RMSPE=10.9$. Therefore, explicit equations were presented for the superior models of the considered scenarios. Also, according to the results of analyzing data series separately lead to more accurate outcomes in compared to the mixed data and combining the data sets reduced the performance of the model.

Keywords: Friction factor, Gene expression programming, Surface water transport pipe, Rigid bed

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

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ahar Branch Islamic Azad University, Ahar, Iran

(* - Corresponding Author Email: smssaghebian@gmail.com)