

پیش‌بینی ضریب زبری مانینگ در کانال‌های روباز با فرم بستر تلماسه با استفاده از روش الگوریتم تکاملی

کیومرث روشنگر^{۱*}، محمد تقی اعلمی^۲، سید مهدی ثاقبیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۴

چکیده

پیش‌بینی دقیق ضریب زبری در کانال‌های روباز با شکل بستر تاثیر بسزایی در برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری پروژه‌های منابع آبی شامل انتقال آب و سیستم‌های رودخانه‌ای دارد. شکل‌های مختلف بستر مانند تلماسه‌ها اثرات بارزی بر روی مقاومت جریان دارند. با این وجود، به دلیل تاثیر پارامترهای مختلف بر ضریب زبری جریان تخمین دقیق این پارامتر مشکل می‌باشد. در این مقاله کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در تخمین ضریب زبری مانینگ در کانال‌های روباز با شکل بستر تلماسه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور مدل‌های مختلفی بر اساس مشخصات جریان، فرم بستر و ذرات رسوبی تعریف شد و با استفاده از چهار سری داده آزمایشگاهی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاصله ضمن تائید قابلیت روش به کاررفته در تحقیق، برتری این روش را نسبت به روابط کلاسیک در تخمین ضریب زبری مانینگ به اثبات رساند. همچنین مشخص گردید که مدل با پارامترهای ورودی مربوط به هر دو مشخصات جریان و ذرات رسوبی در تخمین ضریب زبری مانینگ موفق‌تر می‌باشد. مطابق با نتایج آنالیز حساسیت پارامتر عدد رینولدز بیشترین تاثیر را در پیش‌بینی ضریب زبری دارا است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، تلماسه، ضریب زبری مانینگ، کانال روباز

مقدمه

مختلفی نظیر جنس بستر، پوشش گیاهی، سطوح مربوط به دانه‌بندی و اندازه ذرات بستر، شکل بستر ناشی از بارهای رسوبی، موانع عمودی موجود در مسیر جریان و مورفولوژی رودخانه می‌باشد. با توجه به تاثیر پارامترهای متعدد بر ضریب زبری، تعیین پارامترهای موثر و ایجاد رابطه ریاضی میان آن‌ها بسیار پیچیده و مشکل می‌باشد. در رودخانه‌های با بستر آبرفتی، تنش برشی جریان در بستر موجب جابجایی مواد بستر شده و امواج ماسه‌ای ایجاد می‌شود که بسته به مقدار تنش برشی و اندازه مواد بستر به صورت شکل بستر نمایان می‌شود. بر اساس تجارب وسیع آزمایشگاهی چندین گونه از اشکال بستر شناسایی شدند که برای جریان زیر بحرانی شامل بستر هموار یا بستر مسطح (که به یک سطح بستر بدون شکل بستر اشاره دارد)، ریپل‌ها (اشکال بستر کوچکی با ارتفاع‌های موجی کم‌تر از چندین سانتی‌متر هستند. شکل ریپل‌ها از مثلثی تا حالت سینوسی متفاوتند) و تلماسه‌ها یا دون‌ها (بزرگ‌تر از ریپل‌ها هستند از نظر پروفیل‌های طولی دون‌ها اغلب مثلثی شکل با شیب‌های بالادست نسبتاً ملایمی هستند و شیب‌های پایین دست نزدیک به زاویه قرار مواد بستر می‌باشند) می‌شوند. در مورد تاثیر اندازه‌های ذرات رسوبی بستر و بدنه آبراهه بر ضریب زبری مانینگ (n) مطالعات زیادی صورت گرفته است که می‌توان به استریکلر (Strickler, 1923)، میر پیترمولر

یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه داشتن اطلاعات کافی در مورد مقاومت هیدرولیکی در کانال‌های آبرفتی است. برای محاسبه دبی، سرعت و عمق جریان در کانال‌های طبیعی و نیز برآورد سیل و رسوب ارزیابی مقاومت جریان ضروری می‌باشد. برای تعیین مقاومت جریان در مجاری روباز از روابط مانینگ، شزی و دارسی-ویسباخ استفاده می‌شود که در این روابط پارامترهایی مانند ضریب زبری مانینگ، ضریب زبری شزی و ضریب زبری دارسی-ویسباخ وجود دارد. هر سه این ضرایب به نوعی ضریب مقاومت جریان هستند که در معادلات حاکم بر جریان در رودخانه‌ها کاربرد فراوانی دارند. در حقیقت تخمین درست این ضرایب می‌تواند به برآورد دقیق‌تر شرایط جریان کمک کند. در هیدرولیک رودخانه‌ها با بستر فرسایش‌پذیر، بستر کانال متحرک بوده و مقاومت در برابر جریان متاثر از عوامل

۱- دانشیار گروه آب دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۲- استاد گروه آب دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی دکتری عمران سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه تبریز و گروه عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر - ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: kroshangar@yahoo.com)

بوده و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشند. در این زمینه می‌توان تخمین بار معلق رودخانه توسط روشنگر و کوشه (Roushangar and Kosheh., 2015)، مدل‌سازی فرآیند تبخیر در اقلیم‌های مختلف توسط نورانی و سیاح‌فرد (Nourani and Sayyah Fard., 2012) و شبیه‌سازی فرآیند بارش و رواناب توسط قربانی و همکاران (۱۳۹۵) اشاره کرد. تاکنون از بین روش‌های هوش مصنوعی، روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) جهت تخمین پارامترهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، مانند پیش‌بینی انتقال رسوب در لوله‌های دایره‌ای شکل توسط روشنگر و قاسم‌پور (Roushangar and Ghasempour., 2017)، پیش‌بینی بارش - رواناب توسط کیشی و همکاران (Kisi et al., 2013)، مدل‌سازی افت انرژی در سرریزها توسط روشنگر و همکاران (Roushangar et al., 2014)، پیش‌بینی عمق آب‌های زیرزمینی توسط شیری و کیشی (Shiri and Kisi, 2011) و پیش‌بینی سری‌های زمانی دبی توسط ونگ و همکاران (Wang et al., 2009). در تحقیق حاضر سعی گردیده است تا کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن به عنوان روش فرامدل در تخمین پارامتر ضریب زبری مانینگ مورد بررسی قرار گیرد؛ بنابراین مدل‌های ورودی متفاوتی بر اساس چهار سری داده آزمایشگاهی تعریف گردید تا تاثیر مدل‌سازی متفاوت در تعیین ضریب زبری تعیین گردد. سپس با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترهای موثر در تخمین این پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

سری داده‌های مورد استفاده در تحقیق

در تحقیق کنونی از داده‌های آزمایشگاهی گای و همکاران (Guy et al., 1966)، ویلیامز (Williams., 1970)، آزمایشات مهندسی ارتش آمریکا (USACE., 1935) و روشنگر (۱۳۸۸) استفاده شده است. گای و همکاران (Guy et al., 1966) ۱۱۴ سری داده آزمایشگاهی را در آزمایشگاه دانشگاه کلورادو در بازه زمانی ۱۹۶۱-۱۹۵۶ برداشت کردند که این آزمایش‌ها در کانال مستطیلی با عرض‌های ۲ و ۸ فوت، با ۱۰ حالت دانه بندی مختلف مصالح بستر صورت گرفته است. تعداد آزمایشات ویلیامز ۱۴۸ سری داده می‌باشد که در آزمایشگاه شهر واشینگتن در سال ۱۹۷۰ صورت پذیرفته است و این آزمایش‌ها در کانال مستطیلی با عرض‌های ۷/۶۲، ۱۵/۲۴ و ۳۰/۴۸ سانتی‌متر، با یک دانه‌بندی بستر انجام شده است. آزمایشات مهندسی ارتش آمریکا ۶۱ سری داده می‌باشد که در آزمایشگاه شهر می‌سی‌سی‌پی در سال ۱۹۳۵ صورت پذیرفته است. این آزمایش‌ها در کانال مستطیلی با عرض‌های ۷۰/۵ و ۷۳/۶ سانتی‌متر، با سه دانه‌بندی مواد بستر صورت گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی روشنگر نیز در آزمایشگاه هیدرولیک موسسه تحقیقاتی دانشگاه کان

(Henderson., 1948)، هندرسن (Meyer-Peter and Müller., 1948)، اندرسون و همکاران (Anderson et al., 1970) اشاره نمود. حیدری و همکاران (Heydari et al., 2014) در آزمایش‌های انجام شده برای بستر فرسایش‌پذیر نشان دادند که عدد شیلدز تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی ارتفاع و شیب دون دارد. تویندر و ریبیرینک مطالعه‌ای را درباره تشکیل شکل بستر و تاثیر آن بر روی زبری هیدرولیکی بستر رودخانه انجام دادند به طوری که در این آزمایش مقدار رسوبات وارد شده به سیستم را محدود کرده و نام این روش را عرضه-محدود (BDR) نامیدند. نتایج نشان داد که شکل بستر و زبری مربوط به آن‌ها، وابستگی واضحی را به میزان محدودیت عرضه نشان می‌دهد (Tuijnder and Ribberink., 2012). یانگ و همکاران مکانیسم اساسی مقاومت جریان درون یک کانال آبرفتی با شکل بستر را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که زبری دانه‌ها می‌تواند دو برابر قطر متوسط رسوبات بستر در نظر گرفته شود. آن‌ها رابطه‌ای تجربی برای زبری شکل بستر پیشنهاد دادند که وابسته به ارتفاع و تندی شکل بستر می‌باشد. همچنین آن‌ها تاثیر طول و ارتفاع شکل بستر بر روی تنش برشی کل و شیب انرژی را مورد بحث قرار دادند و رابطه‌ای تجربی برای طول ناحیه جدایش پشت شکل بستر پیشنهاد کردند (Yang et al., 2005). وندرمارک و همکاران مطالعات میدانی و آزمایشگاهی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و مشاهده نمودند در کانال آزمایشگاهی با جریان دائمی همانند رودخانه‌های طبیعی، شکل بستر حتی در شرایطی که رسوبات به شکل منظم چیده شده باشند، اندازه و شکل نامنظمی دارد (Van der Mark et al., 2008). کاکینوما و همکاران مقاومت هیدرولیکی و توزیع سرعت در بسترهای فرسایش‌پذیر را در یک فلوم آزمایشگاهی بررسی کردند (Kakinuma et al., 2014). مهاجری و همکاران مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی ساختار جریان روی بستر شنی ثابت در یک کانال باز با تمرکز روی ناحیه نزدیک بستر انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ساختار جریان تولیدشده بالای تلماسه‌ها روی مقاومت جریان، انتقال رسوب و شکل‌گیری سیستم‌های آبرفتی موثر است (Mohajeri et al., 2015).

به‌رحال کاربرد بسیاری از مدل‌های کلاسیک محدود به مواردی است که شامل فرضیات و شرایط توسعه و استخراج فرمول‌ها باشند و برای تمامی موارد نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق ضریب زبری جریان در طراحی و بهره‌برداری پروژه‌های آبی تاثیر بسزایی دارد، لذا 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، برنامه‌ریزی ژنتیک، ماشین بردار پشتیبان، مدل‌های فازی) برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفتند. این روش‌ها الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت

داده شده است. در این جدول Fr عدد فرود، Re عدد رینولدز، D_{50} متوسط اندازه ذرات، n و f ضرایب زبری مانینگ و دارسی- وایسباخ و y و b عمق جریان و عرض کانال می‌باشند.

فرانسه انجام گرفته است. در این آزمایش‌ها کانالی به طول ۸ متر، عرض ۰/۱۵ متر و عمق ۰/۴ متر مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۱ محدوده‌ی مشخصات هیدرولیکی و هندسی این آزمایش‌ها نشان

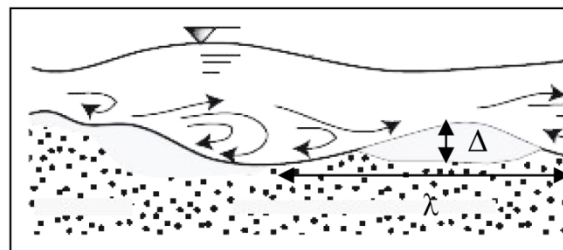
جدول ۱- محدوده‌ی داده‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

تعداد داده‌ها	پارامترها						محقق
	f	n	Re	Fr	D_{50} (mm)	y (mm)	
۱۱۴	۰/۱۶۳-۰/۰۲۱	۰/۰۳۸-۰/۰۱۵	۲۵۵۵۰۰-۴۶۸۰۰	۰/۲۵-۰/۱۶۵	۰/۹۳-۰/۱۹	۴۰۵-۹۱،۴	گای و همکاران (۱۹۶۶)
۸۹	۰/۰۵۹-۰/۰۱۹	۰/۰۲۰۱-۰/۰۰۹۱	۱۰۱۹۲۰-۱۱۹۳۲	۰/۳۴-۰/۱۸۴	۱/۳۵	۲۲۲-۱/۸۷	ویلیامز (۱۹۷۰)
۶۱	۰/۱۰۸-۰/۰۲۲	۰/۰۲۴۹-۰/۰۱۲۷	۶۶۴۳۲-۱۹۰۶۱	۰/۳-۰/۷۲	۰/۴۷-۰/۱۸	۲۰۸-۶۵،۵	مهندسین ارتش آمریکا (۱۹۳۵)
۱۰۴	۰/۰۶۳-۰/۰۳۶	۰/۰۲۵۲-۰/۰۲۰۳	۴۵۸۶۹-۲۴۱۹۲	۰/۲۱-۰/۴	۰/۴-۰/۱۵	۱۴۵-۷۱	روشنگر (۱۳۸۸)

از اشکال بستر را شناسایی و معرفی نمودند که شامل بستر هموار یا بستر مسطح، ریپل‌ها که شکل ریپل‌ها از مثلثی تا حالت سینوسی متفاوتند و تلماسه‌ها یا دون‌ها که بزرگ‌تر از ریپل‌ها هستند از نظر پروفیل‌های طولی دون‌ها اغلب مثلثی شکل با شیب‌های بالادست نسبتاً ملایمی می‌شوند. شکل ۱ نمای شماتیک پارامترهای توپوگرافی شکل بستر دون را نشان می‌دهد که در آن h ارتفاع تلماسه و L طول تلماسه می‌باشد.

شکل بستر تلماسه

زمانی که ذرات رسوبی کف بستر کانال‌ها و رودخانه‌ها در اثر جریان عبوری به جنبش درمی‌آیند و شروع به حرکت می‌کنند، الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری باعث تغییر ارتفاع بستر می‌شوند. در بسیاری از موارد این تغییرها تا زمانی افزایش پیدا می‌کنند که وضعیت و اشکال مختلف سطح که شکل بستر نامیده می‌شود، سراسر بستر را بپوشانند. سیمونز و ریچاردسون در طول آزمایشاتی که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ایالت کلرادو انجام دادند انواع مختلفی

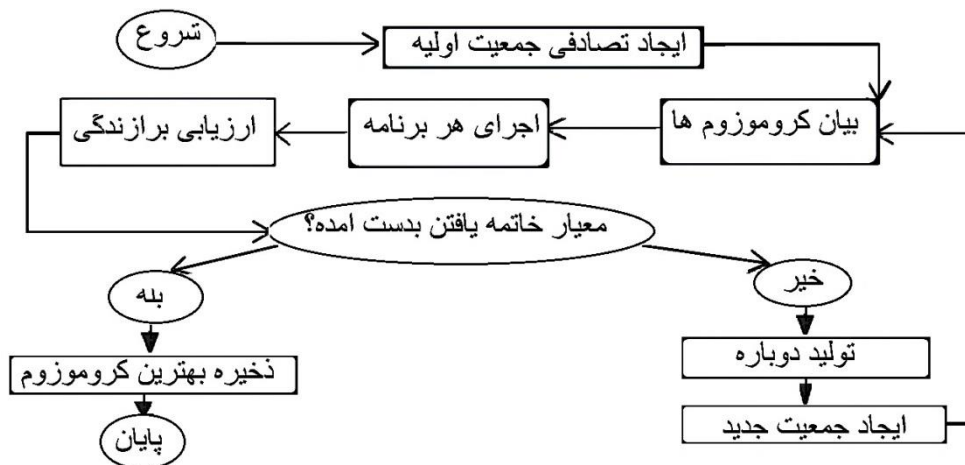


شکل ۱- شکل بستر تلماسه در کانال آبرفتی

شامل می‌شود، اما ساختارهای شاخه‌ای که به وسیله GEP استنتاج می‌شوند (که بیان درختی نیز نامیده می‌شوند)، مبین تمامی ژنوم‌های مستقل هستند؛ بنابراین موضوع قابل توجه در GEP این است که دومین آستانه تکاملی یعنی آستانه فنوتیپ عبور داده می‌شود و این بدان معنا است که در طول تولیدمثل، تنها ژنوم که اندکی اصلاح شده برای نسل بعد عبور داده می‌شود و در نتیجه نیازی به ساختارهای نسبتاً سنگین برای تکثیر شدن و جهش نیست، به طوری که تمامی به‌سازی‌ها در یک ساختار خطی ساده که بعداً داخل یک بیان درختی بزرگ می‌شود، اتفاق می‌افتد. راه‌حل اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن به‌طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برنامه‌ریزی بیان ژن توسط فریرا (Ferreria., 2001) در سال ۱۹۹۹ ابداع شد. در این برنامه، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند. از آنجایی که تمامی ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، در کروموزوم‌های خطی با طول ثابت کدگذاری می‌شوند، معادل این است که در (GEP)، ژنوتیپ و فنوتیپ سرانجام از یکدیگر جدا شده و اکنون سیستم می‌تواند از تمام مزایای تکاملی به سبب وجود آن‌ها بهره‌برد. با وجود اینکه فنوتیپ در GEP، همان نوع از ساختارهای شاخه‌ای مورد استفاده در GP را



شکل ۲- شماتیک برنامه‌ریزی بیان ژن

و شعاع هیدرولیکی (R) ارائه نمود (Bruschin, 1985). کاماچو و یین در یک تحقیق معادله‌ای ارائه نمودند و علاوه بر پارامترهایی چون عدد رینولدز (Re)، شعاع هیدرولیکی (R) و شتاب ثقل (g)، از پارامتر کاماچو (T^*) استفاده نمودند و فرمولشان را برای سه بازه مختلف عدد فرود تقسیم‌بندی کردند (Camacho and Yen., 1989). کریم معادله‌ای براساس مقاوت کل جریان و متوسط اندازه ذرات (D_{50}) ابداع نمود (Karim, 1995).

روابط نیمه تجربی ضریب زبری

انواع فرمول‌های تجربی و نیمه‌تجربی برای پیش‌بینی ضریب زبری کل جریان توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است که برخی از آن‌ها ساده و برخی ساختار پیچیده دارند. در جدول ۲ تعدادی از این معادلات ارائه شده است. استریکلر فرمولی برای تخمین ضریب زبری جریان پیشنهاد نمود که فقط براساس متوسط اندازه ذرات بستر (D_{50}) تعریف شده است (Strickler, 1923). بروسچین رابطه‌ای با متغیرهای شامل متوسط اندازه ذرات بستر (D_{50})، شیب خط انرژی (s)

جدول ۲- معادلات نیمه تجربی برای محاسبه طول پرش هیدرولیکی و نسبت اعماق متناوب

توضیحات	متغیر مستقل	محقق
$D_{50}(\text{mm})$	$n = \frac{D_{50}}{12.8} \times \left[\frac{R \times S_w}{D_{50}} \right]^{1/7.3}$	Bruschin, 1985
$D_{50}(\text{m})$	$n = 0.037 D_{50}^{0.126} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{0.465}$	Karim, 1995
$Fr < 0.4$	$n = \frac{R^6}{\sqrt{g}} \times 3.78 T^{*0.175} / Re^{0.19}$	Camacho and Yen., 1989
$0.4 < Fr < 0.7$	$n = \frac{R^6}{\sqrt{g}} \times 0.0081 \left(\frac{D_{50}}{R} \right)^{0.125} \times \frac{Re^{0.05}}{Fr^{0.88}}$	
$0.7 < Fr < 1$	$n = \frac{R^6}{\sqrt{g}} \times 0.078 \left(\frac{D_{50}}{R} \right)^{0.166} / Fr^{0.444}$	
$D_{50}(\text{m})$	$n = 0.0474 D_{50}^{1/6}$	Strickler, 1923

مطلوب بودن آن مدل می‌باشد (Legates and McCabe, 1999).

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

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (l_o - l_p)^2}{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_p)^2} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{l_o} \frac{\sum_{i=1}^n |l_o - l_p|}{N} \times 100 \quad (3)$$

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی کارایی روش استفاده شده برای تخمین ضریب زبری مانینگ در این مقاله از سه پارامتر آماری مطابق رابطه ۱ تا ۳ استفاده گردیده است. در این رابطه (R) ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، (DC) ضریب تبیین بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی و (MAPE) تفاوت مطلق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی می‌باشد. هر چه مقدار R و DC به یک نزدیک‌تر و مقدار MAPE برای یک مدل کوچک‌تر باشد به معنی

سعی گردید در مدل سازی GEP پارامترهای مناسب و موثر در تعیین ضریب زبری مانینگ انتخاب گردد. در تعریف مدل ها از پارامترهای بدون بعد با در نظر گرفتن سه حالت استفاده گردید. در حالت اول برای تعیین ضریب زبری تنها از مشخصات جریان استفاده گردید.

$$n = f(Re, Fr, y/b) \quad (5)$$

در حالت دوم از مشخصات مربوط به جریان و فرم بستر مطابق رابطه ۶ جهت تعیین ضریب زبری مانینگ استفاده گردید. در این رابطه Δ و λ به ترتیب ارتفاع و طول تلماسه می باشند.

$$n = f(Re, Fr, \Delta/\lambda, \lambda/y, \Delta/y) \quad (6)$$

در حالت سوم نیز از مشخصات مربوط به جریان و ذرات رسوبی استفاده گردید.

$$n = f(Re, Fr, R/D_{50}, \frac{V}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}, \frac{Vy}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}) \quad (7)$$

در رابطه بالا s و g به ترتیب چگالی نسبی ذرات و شتاب گرانشی می باشند. جدول ۳ مدل های تعریف شده در تحقیق کنونی را نشان می دهد.

جدول ۳- مدل های تعریف شده

بررسی مقاومت جریان					
مشخصات هیدرولیکی و ذرات رسوبی		مشخصات هیدرولیکی و فرم بستر		مشخصات هیدرولیکی	
Model	Output	Model	Inputs	Model	Inputs
HS1	R/D_{50}	HB1	$Re, \Delta/\lambda$	H1	Re
HS2	$V/[g(s-1)D_{50}]^{0.5}$	HB2	$Re, \Delta/y$	H2	Fr
HS3	$Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}$	HB3	$Re, \lambda/y$	H3	y/b
HS4	$Re, R/D_{50}$	HB4	$Re, \Delta/y, \lambda/y$	H4	$Re, y/b$
HS5	$Fr, R/D_{50}$	HB5	$Re, \Delta/y, \lambda/y, \Delta/\lambda$	H5	$Fr, y/b$
HS6	$V/[g(s-1)D_{50}]^{0.5}, R/D_{50}$	HB6	$Fr, \Delta/y, \lambda/y, \Delta/\lambda$		
HS7	$V/[g(s-1)D_{50}]^{0.5}, Re$	HB7	$Re, \Delta/\lambda, \lambda/y$		
HS8	$Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}, Re$				
HS9	$Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}, R/D_{50}$				
HS10	$Re, Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}, R/D_{50}$				
HS11	$Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}, R/D_{50}, V/[g(s-1)D_{50}]^{0.5}$				
HS12	$Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}, R/D_{50}, Re, V/[g(s-1)D_{50}]^{0.5}$				

پارامترهای مدل های GEP

روند تعیین مدل های تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی با استفاده از روش برنامه ریزی بیان ژن شامل ۵ مرحله می باشد؛ که به ترتیب عبارتند از تعیین تابع برازش، انتخاب مجموعه ترمینال ها و مجموعه توابع، انتخاب ساختار کروموزوم ها که شامل طول سر و تعداد ژن ها است، انتخاب تابع پیوند که تعیین کننده پیوند بین ریز درخت ها می باشد و مرحله آخر انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آن ها است. ترکیبی از عملگرهای ژنتیکی (جهش، وارون سازی، ترکیب ترانهش) مطابق جدول ۴ استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که در آنالیز مدل ها از ۷۵ درصد داده ها جهت آموزش و ۲۵ درصد دیگر جهت آزمون مدل ها استفاده گردیده است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل مدل ها براساس مشخصات جریان در این حالت چندین مدل براساس تنها مشخصات جریان تعریف گردید. نتایج حاصل به صورت جدول ۵ و شکل ۳ ارائه گردیده است. با بررسی نتایج حاصله و با در نظر گرفتن معیارهای ارزیابی برای مدل های مختلف مشاهده می شود که مدل H4 با پارامترهای ورودی عدد رینولدز و نسبت عمق بر عرض جریان به عنوان بهترین مدل برای داده ها می باشد.

جدول ۴- پارامترهای مدل‌های GEP مورد استفاده

تنظیمات پارامتر	توصیف پارامتر
$+, -, *, /, X^2, X^3, e^x$	مجموع توابع
۳۰	کروموزوم‌ها
۷	اندازه سر
۳	تعداد ژن‌ها
جمع	توابع پیوند
(RMSE) حداقل ریشه مربعات خطا	خطای تابع برازش
۰/۰۴۴	نرخ جهش
۰/۱	نرخ، وارونگی IS و RIS و وارونگی
۰/۳	نرخ ترکیب یک و دو نقطه‌ای
۰/۱	ترکیب ژن و نرخ انتقال

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها براساس مشخصات جریان و فرم بستر

در حالت دوم برای بررسی تأثیر هندسه فرم بستر مدلی با در نظر گرفتن مشخصات جریان و فرم بستر تعریف گردید. نتایج به صورت جدول ۶ و شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۶ مشاهده می‌گردد که مدل HB7 با پارامترهای ورودی $Re, \Delta/\lambda, \lambda/y$ بهترین نتایج را داراست. به نظر می‌رسد استفاده از پارامترهای Δ/λ و λ/y به عنوان ورودی مدل‌ها سبب افزایش نسبی دقت مدل‌ها گردیده است و این امر نشان‌دهنده تأثیر مشخصات هندسی شکل بستر در تخمین مقاومت جریان می‌باشد. در حالت کلی مقایسه نتایج جدول ۵ و ۶ نشان می‌دهد که حالت دوم با در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان مشخصات جریان و فرم بستر منجر به نتایج دقیق‌تری نسبت به حالتی که تنها مشخصات جریان در نظر گرفته شود، نگردیده است. فرمول حاصل از روش GEP در این حالت به صورت زیر می‌باشد.

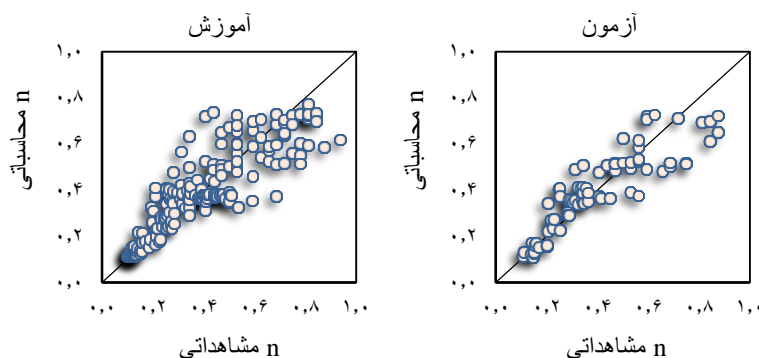
$$n = \frac{5.68}{5.68^3 - (\Delta/\lambda)(\lambda/y) + 5.68^2} + \frac{5.68^2}{-4.64 - Re} \left(\Delta/\lambda + \frac{5.68}{\lambda/y} \right) + \frac{-3.6 \times (9.95^2 + 9.95 + \Delta/\lambda)}{Re} \quad (9)$$

این مدل دارای بیشترین R و DC بوده و کمترین خطا (MAPE) را دارا است. مطابق با نتایج جدول مشاهده می‌گردد که استفاده از عدد رینولدز به تنهایی به عنوان پارامتر ورودی منجر به جواب‌های دقیق‌تری در مقایسه با عدد فرود می‌گردد. عدد رینولدز جریان بیانگر اثر ویسکوزیته سیال می‌باشد و با افزایش عدد رینولدز تأثیر ویسکوزیته بر روی مقاومت جریان کاهش پیدا می‌کند. همچنین عدد فرود جریان بیانگر اثر ثقل بر روی جریان می‌باشد. عدد فرود یک پارامتر مهم جریان رسوبات و شکل بستر می‌باشد ولی در فرودهای پایین اثر آن بر روی ضریب زبری جریان در بسترهای فرسایش پذیر با شکل بستر تلماسه ناچیز می‌باشد (Yen., 2002). در شکل ۳ نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده مدل برتر برای سری داده‌های آموزش و تست نشان داده شده است. نکته مهم در مورد روش GEP ارائه فرمول صریح در مورد مسئله مورد بررسی می‌باشد. فرمول به‌دست‌آمده از این روش برای پیش‌بینی ضریب زبری مانینگ بر اساس مشخصات جریان به شکل فرمول ۸ می‌باشد.

$$n = \frac{y}{b} \times Re \times [(Re + 0.4156) \times (-0.4156) Re] + Re \times \frac{Re}{Re^3 + \sqrt[3]{Re}} + e^{\left[\frac{y}{b} - 7.98 \times \frac{y}{b} \right]} - (Re^2 + Re) \quad (8)$$

جدول ۵- نتایج حاصل برای مدل‌های تعریف شده براساس مشخصات جریان

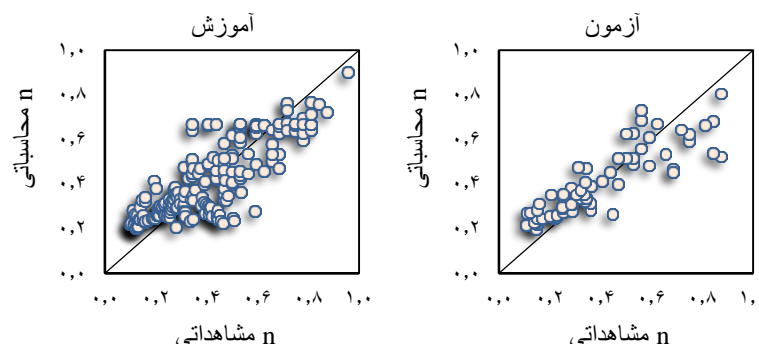
معیارهای ارزیابی						مدل	روش
آموزش			آزمون				
R	DC	RMSE	R	DC	MAPE		
۰/۸۵۱۳	۰/۶۵۵۱	۱۷/۷۶	۰/۸۰۲۵	۰/۵۳۰۴	۱۹/۰۶	H1	GEP
۰/۵۵۹۵	۰/۱۹۱۹	۲۴/۵۸	۰/۵۳۸۴	۰/۱۲۸۵	۲۶/۳۷	H2	GEP
۰/۷۹۳۶	۰/۴۱۴۱	۲۰/۳۴	۰/۷۶۹۵	۰/۳۱۵۴	۲۲/۹۰	H3	GEP
۰/۸۴۳۹	۰/۷۳۴۶	۱۴/۷۴	۰/۸۳۲۹	۰/۶۹۲۶	۱۵/۸۲	H4	GEP
۰/۷۷۳۸	۰/۵۱۷۴	۱۸/۸۴	۰/۶۵۲۳	۰/۲۵۸۶	۲۰/۲۱	H5	GEP



شکل ۳- نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی - محاسباتی ضریب زبری برای مدل برتر با در نظر گرفتن مشخصات جریان

جدول ۶- نتایج حاصل برای مدل‌های تعریف شده براساس مشخصات جریان و فرم بستر

معیارهای ارزیابی						مدل	روش
آموزش			آزمون				
R	DC	MAPE	R	DC	MAPE		
۰/۸۶۳۹	۰/۶۲۶۲	۱۹/۵۸	۰/۷۰۵۳	۰/۵۰۷۷	۲۱/۰۱	HB1	GEP
۰/۸۰۴۹	۰/۵۸۶۱	۲۱/۴۸	۰/۶۵۷۱	۰/۴۷۵۲	۲۳/۰۵	HB2	GEP
۰/۸۲۵۶	۰/۶۰۱۱	۲۰/۹۳	۰/۶۷۴۰	۰/۴۸۷۴	۲۲/۴۶	HB3	GEP
۰/۸۵۵۲	۰/۶۱۹۹	۲۰/۲۲	۰/۶۹۸۲	۰/۵۰۲۶	۲۱/۶۹	HB4	GEP
۰/۸۳۸۱	۰/۶۱۳۷	۲۰/۶۱	۰/۶۸۴۳	۰/۴۹۷۶	۲۲/۱۱	HB5	GEP
۰/۷۲۴۴	۰/۴۹۸۲	۲۳/۶۴	۰/۵۹۱۴	۰/۴۰۳۹	۲۵/۳۷	HB6	GEP
۰/۸۷۲۶	۰/۶۳۲۵	۱۹/۲۵	۰/۷۱۲۴	۰/۵۱۲۸	۲۰/۸۷	HB7	GEP



شکل ۴- نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی - محاسباتی ضریب زبری برای مدل برتر با در نظر گرفتن مشخصات جریان و فرم بستر

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها براساس مشخصات جریان و ذرات رسوبی در حالت سوم تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی بر روی مقاومت جریان مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که نتایج و ارزیابی مدل‌ها در جدول ۷ نشان می‌دهد مدل HS11 با پارامترهای ورودی Re ، $R/D50$ و $\frac{v_y}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}$ بهترین نتیجه را در بین مدل‌های دیگر برای پیش‌بینی ضریب زبری مانینگ نشان می‌دهد. مطابق با نتایج مشخص است که پارامترهای $R/D50$ و دیگر می‌باشند. شکل ۵ نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده مدل

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها براساس مشخصات جریان و ذرات رسوبی

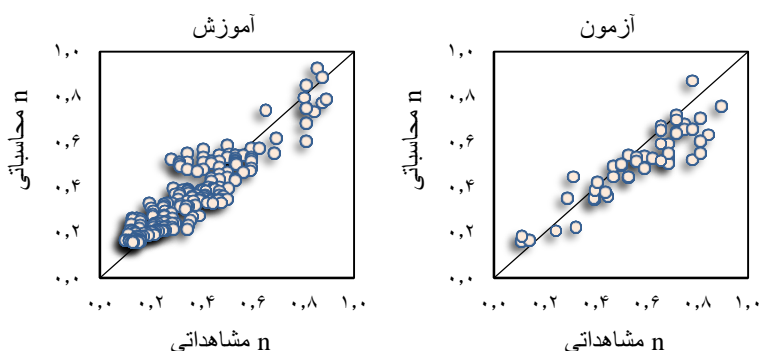
در حالت سوم تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی بر روی مقاومت جریان مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که نتایج و ارزیابی مدل‌ها در جدول ۷ نشان می‌دهد مدل HS11 با پارامترهای ورودی Re ، $R/D50$ و $\frac{v_y}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}$ بهترین نتیجه را در بین مدل‌های دیگر برای پیش‌بینی ضریب زبری مانینگ نشان می‌دهد. مطابق با نتایج مشخص است که پارامترهای $R/D50$ و

$$n = \left(\frac{R}{D_{50}} \right)^6 \times Re^{0.3} + \left(\sqrt[3]{Re} - \left(\frac{V_y}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}} \right)^2 \right) + \frac{V_y}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}} \times \left(\frac{R}{D_{50}} \right)^3 \quad (10)$$

برتر را نشان می‌دهد. فرمول حاصل از روش GEP نیز در این حالت به صورت رابطه ۱۰ می‌باشد.

جدول ۷- نتایج حاصل برای مدل‌های تعریف شده براساس مشخصات جریان و ذرات رسوبی

معیارهای ارزیابی						مدل	روش
آموزش			آزمون				
R	DC	MAPE	R	DC	MAPE		
۰/۷۷۱۸	۰/۵۶۴۶	۲۰/۸۴	۰/۷۵۹۵	۰/۵۴۵۶	۲۲/۳۶	HS1	GEP
۰/۸۲۲۲	۰/۴۳۲۶	۲۳/۱۵	۰/۷۴۱۰	۰/۳۱۷۶	۲۴/۸۴	HS2	GEP
۰/۸۲۷۲	۰/۴۸۰۶	۱۹/۸۹	۰/۷۷۲۵	۰/۴۱۰۵	۲۱/۳۴	HS3	GEP
۰/۸۴۱۷	۰/۶۷۱۵	۱۷/۰۷	۰/۸۲۹۲	۰/۶۳۴۲	۱۸/۳۲	HS4	GEP
۰/۶۸۲۸	۰/۵۲۲۴	۲۰/۳۶	۰/۶۵۴۱	۰/۴۳۳۹	۲۱/۸۵	HS5	GEP
۰/۸۲۸۱	۰/۶۴۳۰	۲۰/۶۱	۰/۸۰۴۴	۰/۵۵۶۹	۲۲/۱۱	HS6	GEP
۰/۸۳۲۰	۰/۶۸۸۷	۱۵/۸۶	۰/۸۲۲۷	۰/۶۳۸۳	۱۷/۰۲	HS7	GEP
۰/۸۵۰۳	۰/۷۲۱۲	۱۴/۹۷	۰/۸۲۸۷	۰/۶۳۸۸	۱۶/۰۶	HS8	GEP
۰/۸۰۵۴	۰/۵۸۵۱	۲۰/۷۷	۰/۷۸۵۳	۰/۵۴۸۵	۲۲/۲۹	HS9	GEP
۰/۸۹۶۶	۰/۷۴۳۵	۱۷/۰۶	۰/۸۶۴۲	۰/۶۳۹۲	۱۸/۳۰	HS10	GEP
۰/۹۱۴۵	۰/۸۱۲۵	۱۲/۹۳	۰/۸۶۶۲	۰/۷۴۲۵	۱۳/۸۷	HS11	GEP
۰/۷۸۵۵	۰/۵۵۰۵	۲۰/۸۸	۰/۷۵۳۰	۰/۵۳۳۱	۲۲/۴۰	HS12	GEP
۰/۸۲۳۵	۰/۶۵۶۱	۱۷/۰۳	۰/۸۱۵۹	۰/۶۳۰۴	۱۸/۲۷	HS13	GEP



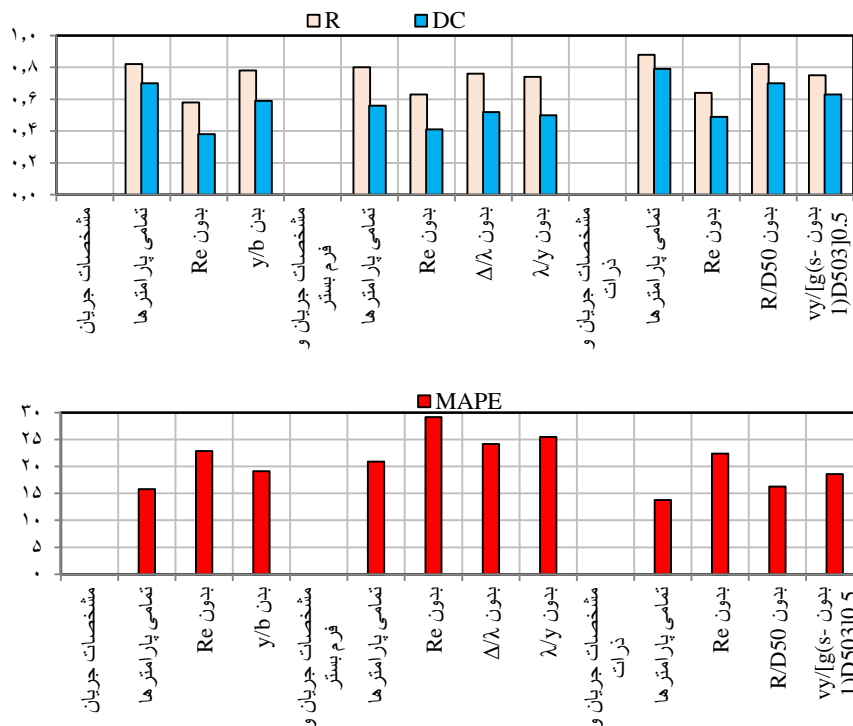
شکل ۵- نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای - محاسباتی ضریب زبری برای مدل برتر با در نظر گرفتن مشخصات جریان و ذرات رسوبی

آنالیز حساسیت

جهت بررسی تأثیر پارامترهای به کاررفته در مدل برتر هر مشخصه پرش هیدرولیکی آنالیز حساست انجام گرفت. برای این منظور با حذف تک تک پارامترهای مدل برتر و اجرای دوباره مدل تعیین معیارهای ارزیابی میزان تأثیر پارامتر حذف شده در کاهش دقت مدل موردبررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت به صورت شکل ۶ ارائه شده است. مطابق با این شکل مشخص است که با حذف پارامتر Re خطای حاصل از اجرای مدل به مقدار زیادی افزایش یافته است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عدد رینولدز تأثیرگذارترین پارامتر در تخمین تخمین ضریب زبری مانینگ می‌باشد.

جدول ۸- مقایسه معیارهای ارزیابی روش GEP با روابط نیمه

روش	معیارهای ارزیابی		
	R	DC	MAPE
GEP	۰/۸۶۶۲	۰/۷۴۲۵	۱۳/۸۷
بروسچین (۱۹۸۵)	۰/۲۲	۰/۱۱۸	۳۶/۸۱
کریم (۱۹۹۵)	۰/۸۱	۰/۶۸	۲۱/۴
کاماچو و بن (۱۹۸۹)	۰/۴۷	۰/۳۱۵	۳۰/۴۹
استریکلر (۱۹۲۳)	۰/۴۳	۰/۳۰۸	۳۳/۰۷

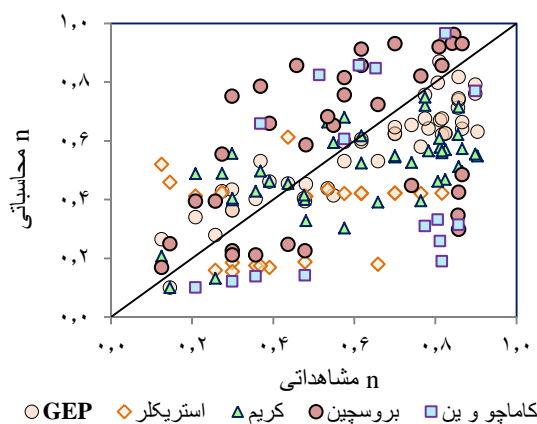


شکل ۶- مقایسه پارامترهای آماری به دست آمده از آنالیز حساسیت

نتایج این مقایسه در جدول ۸ و شکل ۷ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می شود که روش GEP نتایج بهتری را نسبت به روابط نیمه تجربی در تخمین ضریب زبری مانینگ ارائه داده است.

مقایسه‌ی نتایج GEP با روابط نیمه تجربی

برای ارزیابی عملکرد روش برنامه ریزی بیان ژن نسبت به برخی روابط نیمه تجربی موجود برای تخمین ضریب زبری مانینگ از داده های آزمون استفاده شد و نتایج حاصل باهم مقایسه گردیدند.



شکل ۷- مقایسه نتایج روش GEP با روابط نیمه تجربی در تخمین ضریب زبری مانینگ

و تاثیر پارامترهای هیدرولیکی، مشخصات فرم بستر و ذرات رسوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه روابط نیمه تجربی و کلاسیک با نتایج حاصل از روش به کاررفته در تحقیق نشان داد که نتایج روش هوشمند GEP نسبت به روابط کلاسیک دقیق تر و قابل اعتمادتر

نتیجه گیری

در این تحقیق برای تخمین ضریب زبری مانینگ در کانال های آبرفتی با شکل بستر تلماسه، از روش برنامه ریزی بیان ژن استفاده شد

- Heydari, H., Zarrati, A.R and Karimae Tabarestani, M. 2014. Bedform characteristics in a live bed alluvial channel, *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*. 21.6: 1773-1780.
- Kakinuma, T., Inoue, T., Akahori, R and Takeda, A. 2014. Study on hydraulic resistance of erodible bed at the Chiyoda experimental flume. *Advances in Geosciences*. 39: 81-89.
- Karim, F. 1995. Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*. 121.1: 15-25.
- Kisi, O., Shiri, J and Tombul, M. 2013. Modeling rain fall-runoff process using soft computing techniques. *Computers and Geosciences*. 51: 108-117.
- Legates, D.R and McCabe, G.J. 1999. Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*. 35.1: 233-241.
- Meyer-Peter, E and Müller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. *Process. 2nd Meeting IAHR, Stockholm*. 39-64.
- Mohajeri, S.H., Grizzi, S., Righetti, M., Romano, G.P and Nikora, V. 2015. The structure of gravel bed flow with intermediate submergence: A laboratory study. *Water Resources Research*. 51.11: 9232-9255.
- Nourani, V and Sayyah Fard, M. 2012. Sensitivity analysis of the artificial neural network outputs in simulation of the evaporation process at different climatologic regimes. *Journal of advances in Engineering Software*. 47: 127-146.
- Roushangar, K and Ghasempour, R., 2017. Prediction of non-cohesive sediment transport in circular channels in deposition and limit of deposition states using SVM. *Water Science and Technology: Water Supply*. 17.2: 537-551.
- Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F and Shiri, J. 2014. Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal of Hydrology*. 508: 254-265.
- Roushangar, K., Koosheh, A. 2015. Evaluation of GA-SVR method for modeling bed load transport in gravel-bed Rivers. *Journal of Hydrology*. 527: 1142-1152.
- Shiri, J and Kisi, O. 2011. Comparison of genetic programming with neuro-fuzzy systems for predicting short-term water table depth fluctuations. *Computers Geosciences*. 37.10: 1692-1701.
- Strickler, A. 1923. *Beitrag zur Frage der Geschwindigkeits-formel und der Rauhegkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen*. (Some contributions to the problem of the velocity formula and roughness factors for rivers, canals, and closed conduits.); Bern, Switzerland, Mitt. Eidgenössischen Amtes Wasserwirtschaft, no. 16.
- می‌باشد. همچنین ملاحظه گردید در حالتی که پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات در تعریف مدل‌ها به کار می‌روند نتایج دقیق‌تری ارائه می‌گردد. با توجه به نتایج حاصله مشاهده گردید که مدل با پارامترهای ورودی Re ، $R/D50$ و $\frac{v_y}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}$ در تعیین ضریب زبری مانینگ دقیق‌تر می‌باشد. همچنین نشان داده شد که $R/D50$ و $\frac{v_y}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}$ در بهبود کارایی مدل‌ها تاثیرگذار می‌باشند. با توجه به اینکه در طبیعت اندازه‌گیری سرعت دشوار می‌باشد، به نظر می‌رسد استفاده از پارامتر $R/D50$ در تخمین مقاومت جریان در کانال‌های باز با شکل بستر تلماسه می‌تواند موثر باشد. با توجه به نتایج حاصل مشاهده گردید که استفاده از پارامترهای Δ/λ و λ/y به عنوان ورودی مدل‌ها، سبب افزایش نسبی دقت مدل‌ها گردیده است و این امر نشان‌دهنده تاثیر مشخصات هندسی شکل بستر در تخمین مقاومت جریان می‌باشد. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت مشخص گردید که عدد رینولدز تاثیرگذارترین پارامتر در تخمین ضریب زبری جریان می‌باشد.

منابع

- روشنگر، ک. ۱۳۸۸. بررسی مقاومت جریان در کانال‌های باز. رساله دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.
- قربانی، م.ع.، آزانی، ا.، نقی‌پور، ل. و نعمتی، س. ۱۳۹۵. مقایسه عملکرد ماشین بردار پشتیبان با سایر مدل‌های هوشمند در شبیه‌سازی بارش-رواناب. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۷: ۹۲-۱۰۳.
- Anderson, A.G., Paintal, A.S and Davenport, J.T. 1970. Tentative design procedure for riprap lined channel. Report no. 108, Highway Research Board, National Academy of Sciences-National Academy of Engineering, Washington D C, USA, 75pp.
- Bruschin, J. 1985. Discussion on Brownlie (1983). Flow Depth in Sand-bed Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 111:736-739.
- Camacho, R and Yen, B.C. 1989. Nonlinear Resistance Relationships for Alluvial channels. In: Yen, B.C. (Ed.), *Proceedings, International Conference on Channel Flow and Catchment Runoff*. University of Virginia, Charlottesville, pp. 392-9.
- Ferreria, C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex System*. 13.2: 87-129.
- Guy, H.P., Simons, D.B and Richardson, E.V. 1966. Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61 (No. 462-I).
- Henderson, F.M. 1966. *Open Channel Flow*. Macmillan, New York.

- Wang, W.C., Chau, K.W., Cheng, C.T and Qiu, L. 2009. A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *J. Hydrology* 374.3-4: 294-306.
- Williams, G.P. 1970. Flume Width and Water Depth Effects in Sediment Transport Experiments. U.S. Geological Survey, Professional Paper 562-H.
- Yang, S.Q., Tan, S.K and Lim, S.Y. 2005. Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel. *Water Resource Research*. 41.9: 1-8.
- Yen, B.C. 2002. Open channel flow resistance. *Journal of hydraulic engineering* .128.1: 20-39.
- Tuijnder, A.P and Ribberink, J.S. 2012. Experimental observation and modelling of roughness variation due to supply-limited sediment transport in uni-directional flow. *Journal of Hydraulic Research*. 50.5: 506-520.
- United States Army Corps of Engineers, U.S. 1935. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. Studies of River Bed Materials and Their Movement with Special Reference to the Lower Mississippi River, Paper 17, 161 pp.
- Van der Mark, C.F., Blom, A and Hulscher, S.J. 2008. Quantification of variability in bedform geometry. *Journal of Geophysical research: Earth Surface*. 113: 15-36.

Prediction of Manning Roughness Coefficient in Open Channels with Dune Bedforms Using Evolutionary Algorithm Method

K. Roushangar^{1*}, M. T. Alami², S.M. Saghebian³

Received: Dec.14, 2017

Accepted: Jan.04, 2017

Abstract

An accurate prediction of the roughness coefficient in open channels with bedforms has a significant impact on the planning, design and operation of water resources projects, including water transport and river systems. Different bedforms such as dunes have obvious effects on flow resistance. However, due to the impact of various parameters on the roughness coefficient, accurate estimation of this parameter is difficult. In this paper, the efficiency of Gene Expression Programming (GEP) method in estimating manning roughness coefficient in open-channel channels with dune bedforms has been evaluated. In this regard, various models were defined based on flow, bedform, and sediment particles characteristics and were tested using four laboratory data series. The results proved capability of GEP in predicting Manning roughness coefficient and it was observed that the applied method is more accurate than semi-theoretical relationships. It was also found that the model with input parameters related to both flow and sediment particles characteristics is more successful in estimating Manning roughness coefficient. According to the results of the sensitivity analysis, the Reynolds number parameter has the most significant impact in predicting the roughness coefficient.

Keywords: Dune, Gene Expression Programming, Manning roughness coefficient, Open channel

1- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- PhD student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: kroshangar@yahoo.com)