

تخمین ضریب زبری کل و زبری ناشی از فرم‌بستر در کانال‌های آبرفتی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گاوسی

سید مهدی ثاقبیان^{۱*}، کیومرث روشنگر^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴

چکیده

شناخت مشخصات جریان در کانال‌های روباز با بستر فرسایش‌پذیر دارای شکل‌بستر اهمیت زیادی در مدیریت رودخانه‌ها و همچنین طراحی و بهره‌برداری از سازه‌های هیدرولیکی دارد. تلماسه‌ها یکی از اشکال مهم بستر بوده و تأثیر بسزایی بر خصوصیات آشفته‌گی و مقاومت جریان دارند. تاکنون تحقیقات متعددی در مورد مقاومت هیدرولیکی در کانال‌های روباز با فرم بستر انجام گردیده است، اما به دلیل تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب زبری جریان تخمین دقیق این پارامتر مشکل می‌باشد. در تحقیق کنونی با استفاده از داده‌های مربوط به آزمایش‌های انجام‌شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز با دو دانه‌بندی مختلف و با دو عرض کانال متفاوت، مقاومت جریان کلی و ناشی از شکل‌بستر بررسی شد. همچنین با ترکیب داده‌های به‌دست آمده از این تحقیق با داده‌های آزمایشگاهی محققین دیگر، با استفاده از روش هوشمند رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) مدل‌های مختلفی تعریف گردید و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از انجام آزمایشات نشان داد که در بررسی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر روی مقاومت جریان، همبستگی بین عدد رینولدز و مقاومت جریان به‌صورت نسبی بهتر از سایر پارامترهای هیدرولیکی است. همچنین نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها عملکرد مطلوب روش GPR را در پیش‌بینی ضریب زبری به اثبات رساند و مشاهده شد که هر دو مشخصات جریان و ذرات رسوبی در تخمین ضریب زبری تأثیرگذار می‌باشند. نتایج آنالیز حساسیت مدل برتر نیز نشان داد که عدد رینولدز بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی ضریب زبری دارد.

واژه‌های کلیدی: بسترهای فرسایش‌پذیر، داده‌های آزمایشگاهی، شکل بستر، مقاومت جریان، GPR

مقدمه

و مقاومت در برابر جریان متاثر از عوامل 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 تأثیر پارامترهای متعدد بر ضریب زبری، تعیین پارامترهای مؤثر 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 به‌صورت 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 شکل‌بستر اشاره دارد)، ریبیل‌ها (اشکال بستر کوچکی با ارتفاع‌های موجی کمتر از چندین سانتی‌متر هستند. شکل ریبیل‌ها از مثلی تا حالت سینوسی متفاوت‌اند) و تلماسه‌ها یا دون‌ها (بزرگ‌تر از ریبیل‌ها هستند از نظر پروفیل‌های طولی دون‌ها اغلب مثلی شکل با شیب‌های بالادست نسبتاً ملایمی هستند و شیب‌های پایین‌دست نزدیک به زاویه قرار مواد بستر می‌باشند) می‌شوند. در

پیش‌بینی دقیق ضریب زبری در کانال‌های روباز با شکل بستر تأثیر بسزایی در برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری پروژه‌های منابع آبی شامل انتقال آب و سیستم‌های رودخانه‌ای دارد. 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، بستر کانال متحرک بوده

۱- استادیار گروه عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر - ایران

۲- دانشیار گروه آب دانشکده عمران دانشگاه تبریز

(*)- نویسنده مسئول: (Email: smsaghebian@gmail.com)

تخمین برخی از پارامترهای هیدرولیکی، در تحقیق کنونی ابتدا با استفاده از داده‌های مربوط به آزمایش‌های انجام‌شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز، پارامترهای تأثیرگذار در تخمین ضریب زبری کلی و ناشی از شکل‌بستر مورد ارزیابی قرار گرفت و در ادامه با ترکیب این داده‌ها با داده‌های آزمایشگاهی موجود در منابع معتبر، کارایی روش رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) به عنوان یکی از روش‌های نوین داده کاوی در تخمین ضریب زبری در کانال‌های روباز با فرم بستر تلماسه مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های ورودی متفاوتی تعریف گردید تا تأثیر مدل‌سازی متفاوت در تعیین ضریب زبری تعیین گردد و سپس با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در تخمین ضریب زبری مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایشات انجام گرفته در دانشگاه تبریز

به منظور بررسی روند تغییرات ضریب زبری مقاومت جریان در بسترهای فرسایش‌پذیر چندین سری آزمایش با دو دانه‌بندی متفاوت بصورت بستر متحرک در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز طرح و اجرا گردید. آزمایش‌ها در کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۱ و ۵/۰ متر و عمق ۸/۰ متر با سیستم جریان آزاد انجام گردید. فلوم دارای دیواره‌هایی از جنسی شیشه و کف فلزی (گالوانیزه) بود و جهت تامین دبی از پمپ با قابلیت تغییر دبی استفاده شد. این کانال به کمک جک‌های هیدرولیکی قابلیت تغییر شیب طولی را داراست و سیستم گردش آب کانال بصورت مدار بسته می‌باشد. به منظور تامین عمق لازم برای ایجاد بستر فرسایش‌پذیر از یک کف گالوانیزه کاذب با بستر شیب دار (Ramp) با زاویه ۵ درجه نسبت به افق در ابتدا و یک کف کاذب دیگر در انتهای محدوده مورد مطالعه نصب گردید. فلوم در بالادست به یک منبع آرام‌کننده جریان با طول ۲/۵ متر و عرض ۲ متر و ارتفاع ۱/۵ متر مجهز بوده و جهت آرام کردن تلاطم جریان آب از دو صفحه مشبک و در پایین دست آن از سنگریزه و در ادامه از صفحات شناور بر روی سطح آب استفاده گردید. مصالح بستر از جنس سیلیس استفاده شد که از دو کارخانه تولید سیلیس یکی در آذرشهر و دیگری در شهر خوی تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. و به منظور تعیین قطر متوسط ذرات رسوبی و اطمینان از یکنواختی مصالح با عبور دادن رسوبات از یک سری الک، منحنی دانه بندی رسوبات تهیه گردید. بر اساس منحنی دانه بندی قطر متوسط مصالح برابر ۱۵/۰ و ۲۷/۰ میلیمتر بدست آمد. همچنین با استفاده از آزمایش پیکنومتر چگالی نسبی رسوبات $s=2.65$ محاسبه شد. شکل ۱ و ۲ نمای کلی از فلوم مورد استفاده و تجهیزات مربوطه را نشان می‌دهد. محدوده‌ی پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشات در جدول ۱ آورده شده است.

مورد تأثیر اندازه‌های ذرات رسوبی بستر و بدنه آبراهه بر ضریب زبری مانینگ (n) مطالعات زیادی صورت گرفته است که می‌توان به استریکلر (Strickler, 1923)، میر پترمولر (Meyer-Peter & Müller, 1948)، هندرسن (Henderson, 1966)، اندرسون و همکاران (Anderson et al., 1970) اشاره نمود. حیدری و همکاران (Heydari et al., 2014) در آزمایش‌های انجام‌شده برای بستر فرسایش‌پذیر نشان دادند که عدد شیلدز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی ارتفاع و شیب دون دارد. تویندر و ریرینک (Tuijnder & Ribberink, 2012) مطالعه‌ای را درباره تشکیل شکل بستر و تأثیر آن بر روی زبری هیدرولیکی بستر رودخانه انجام داده‌اند به طوری که در این آزمایش مقدار رسوبات وارد شده به سیستم را محدود کرده و نام این روش را عرضه-محدود (BDR^۱) نامیده‌اند. نتایج نشان دادند که شکل بستر و زبری مربوط به آنها، وابستگی واضحی را به میزان محدودیت عرضه نشان می‌دهد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2005) 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 تأثیر 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. وندر مارک و همکاران (Van der Mark et al., 2008) 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.

با توجه به اینکه 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 و از طرفی اندازه‌گیری دقیق ضریب زبری جریان در طراحی و بهره‌برداری پروژه‌های آبی تأثیر 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، رگرسیون فرایند گاوسی) برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت بوده و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشند (ASCE, 2000). با توجه به پیچیده بودن پدیده مقاومت جریان و استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در



شکل ۱- شماتیکی کلی از امکانات فلوم آزمایشگاهی



شکل ۲- مصالح استفاده شده برای کاهش تلاطم کانال

آزمایشات ویلیامز ۱۴۸ سری داده می‌باشد که در آزمایشگاه شهر واشینگتون در سال ۱۹۷۰ صورت پذیرفته است.

این آزمایش‌ها در کانال مستطیلی با عرض‌های ۷/۶۲، ۱۵/۲۴ و ۳۰/۴۸ سانتی‌متر، با یک دانه‌بندی بستر انجام شده است. در جدول ۱ محدوده‌ی مشخصات هیدرولیکی و هندسی این آزمایش‌ها نشان داده شده است. در این جدول Fr عدد فرود، Re عدد رینولدز، D_{50} متوسط اندازه ذرات، n ضریب زبری مانینگ، و y و b عمق جریان و عرض کانال می‌باشند.

سری داده‌های مورد استفاده در ارزیابی روش رگرسیون فرآیند گاوسی

جهت ارزیابی روش GPR از داده‌های آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق و چند محقق دیگر شامل گای و همکاران (Guy et al., 1966) و ویلیامز (Williams, 1970) استفاده شد. گای و همکاران ۱۱۴ سری داده آزمایشگاهی را در آزمایشگاه دانشگاه کلرادو 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

جدول ۱- محدوده‌ی داده‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

تعداد داده ها	پارامترها						محقق
	n	Re	Fr	D_{50} (mm)	b (mm)	y (mm)	
۱۱۴	۰/۰۳۸-۰/۰۱۵	۲۵۵۵۰۰-۴۶۸۰۰	۰/۲۵-۰/۶۵	۰/۹۳-۰/۱۹	۲۴۳۸، ۶۰۹	۴۰۵-۹۱/۴	گای و همکاران (۱۹۶۶)
۱۴۸	۰/۰۳۰۱-۰/۰۹۱	۱۰۱۹۳۰-۱۱۹۳۳	۰/۳۴-۰/۸۴	۱/۳۵	۱۱۱۸-۷۶/۲	۲۲۳-۱/۸۷	ویلیامز (۱۹۷۰)
۱۲۴	۰/۰۲۶۵-۰/۰۲	۴۷۲۳۸-۲۳۵۶۱	۰/۴۹، ۰/۱۹	۰/۲۷، ۰/۱۵	۱۰۰۰، ۵۰۰	۳۷۰-۱۹۰	ناقیبیان (۱۳۹۶)

$\{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n\}$ که در آن بردار ورودی با D بعد و y_i خروجی اسکالر یا هدف می‌باشد. این مجموعه متشکل از دو جز

رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)

مجموعه داده S با n مشاهده را در نظر بگیرید $S =$

رگرسیون فرآیند گاوسی به منظور محاسبه توزیع پیش‌بینی شده برای مقادیر تابع f^* در نقاط تست $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]$ به کار می‌رود. توزیع y مشروط به مقادیر f بوده که با یک گاوسین ایزوتروپیک به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$p(y|f, X) = N(f, \sigma_n^2 I) \quad (۶)$$

که در رابطه فوق، I ماتریس همبستگی می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های تابع گاوسی، توزیع حاشیه‌ای y به شکل زیر تعیین می‌شود:

$$p(y|X) = \int p(y|f, X) p(f|X) df = N(0, K + \sigma_n^2 I) \quad (۷)$$

توزیع ادغام شده مقادیر داده‌های مشاهداتی که خروجی مورد نظر می‌باشند و نیز مقادیر تابع در نقاط تست به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} y \\ f_* \end{bmatrix} \sim N \left(0, \begin{bmatrix} K(X, X) + \sigma^2 I & K(X, X_*) \\ K(X_*, X) & K(X_*, X_*) \end{bmatrix} \right) \quad (۸)$$

با توجه به رابطه (۳) و استفاده از قواعد استاندارد برای مقید نمودن گاوسین، می‌توان توزیع شرطی را بدست آورد:

$$p(f_*|X, y, X_*) \sim N(\bar{f}_*, cov(f_*)) \quad (۹)$$

$$\bar{f}_* = K(X_*, X) [K(X, X) + \sigma^2 I]^{-1} y \quad (۱۰)$$

توابع کرنل

یکی از روشهای متداول برای حل مسائل غیرخطی استفاده از توابع کرنل است؛ این توابع بر اساس ضرب داخلی داده‌های مفروض تعریف می‌شود. طراحی روشهای رگرسیون مبتنی بر فرآیند گاوسی نیز 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 تفکیک‌پذیر ساخت. با تبدیل نمونه‌ها از فضای ورودی به فضای ویژگی، تفکیک‌کننده غیرخطی به حالت خطی تبدیل خواهد شد. از مهمترین توابع کرنل می‌توان به کرنل چند جمله‌ای ساده، چند جمله‌ای نرمال‌شده، تابع شعاع محور و تابع کرنل پیرسون اشاره کرد. در ادامه روابط مربوط به این کرنل‌ها در جدول ۲ آورده شده است. مطابق با جدول ۲ توابع کرنل دارای پارامترهای مختلفی (γ, d, w, σ) است که نحوه تنظیم آن‌ها در حصول جواب هرچه بهتر مسئله بسیار موثر است.

ورودی و خروجی به عنوان نقاط نمونه یا تجربی معرفی خواهند شد. به منظور سهولت کار، ورودی‌های مجموعه در ماتریس $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ و خروجی‌ها نیز در ماتریس $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ جمع می‌گردند. وظیفه رگرسیون، ایجاد یک ورودی جدید x^* به منظور دستیابی به توزیع پیش‌بینی شده برای مقادیر متناظر داده‌های مشاهداتی y^* و بر مبنای مجموعه داده S می‌باشد. فرآیند گاوسی مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی است که تعداد محدودی از آنها با توزیع‌های گاوسی ادغام شده‌اند. فرآیند گاوسی تعمیمی از توزیع گاوسی می‌باشد. توزیع گاوسی در واقع توزیع بین متغیرهای تصادفی بوده در حالی که فرآیند گاوسی بیانگر توزیع بین توابع می‌باشد. فرآیند گاوسی $f(x)$ توسط توابع میانگین $m(x)$ و کواریانس به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$m(x) = E(f(x)) \quad (۱)$$

$$k(x, x') = E((f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))) \quad (۲)$$

که در روابط فوق، $k(x, x')$ تابع کواریانس (یا کرنل) بوده که در نقاط x و x' محاسبه می‌شود. فرآیند گاوسی $f(x)$ می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (۳)$$

که معمولاً جهت ساده‌سازی، مقدار تابع میانگین برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در فرآیند گاوسی، رابطه بین بردار ورودی و هدف به فرم زیر می‌باشد:

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon \quad (۴)$$

که در آن $f(x)$ بیانگر تابع رگرسیون دلخواه و ε نیز مقدار نویز توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس σ^2 می‌باشد، یعنی $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$. علاوه بر این، چنین فرض می‌گردد که $f = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]^T$ رفتاری بر مبنای فرآیند گاوسی داشته به نحوی که $p(f|X) = N(0, K)$ که در آن K ماتریس کواریانس با درایه‌های $k_{i,j} = k(x_i, x_j)$ می‌باشد.

$$K(X, X) = \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & k(x_1, x_2) & \dots & k(x_1, x_n) \\ k(x_2, x_1) & k(x_2, x_2) & \dots & k(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & k(x_n, x_2) & \dots & k(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (۵)$$

$k_{i,j}$ کواریانس بین مقادیر توابع نهان $f(x_i)$ و $f(x_j)$ می‌باشد.

جدول ۲- انواع تابع کرنل

نوع کرنل	تابع کرنل	پارامتر کرنل
چند جمله‌ای ساده	$K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + 1)^d$	d
چند جمله‌ای نرمال‌شده	$K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + 1)^d / \sqrt{(x_i^T x_i)(x_j^T x_j)}$	d
تابع شعاع محور	$K(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\sigma^2})$	γ
تابع کرنل پیرسون	$K(x_i, x_j) = 1/[1 + 2\sqrt{\ x_i - x_j\ ^2} \sqrt{2^{1/w} - 1/\sigma}]^w$	w, σ

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی کارایی روش استفاده‌شده برای تخمین ضریب زبری مانینگ در این مقاله از سه پارامتر آماری مطابق رابطه (۱۱) استفاده گردیده است. که در آن L_0 : ضریب زبری اندازه‌گیری شده، L_p : متوسط ضریب زبری اندازه‌گیری شده L_p : ضریب زبری پیش‌بینی شده، $\bar{L}_p$: متوسط ضریب زبری N تعداد داده‌هاست. در این رابطه (R) ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، (DC) همبستگی خطی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی و ($MAPE$) میانگین درصد خطای مطلق که تفاوت مطلق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی را بیان می‌کند، می‌باشند. هر چه مقدار R و DC به یک نزدیک‌تر و مقدار $MAPE$ برای یک مدل کوچک‌تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می‌باشد. یک نکته مهم در آموزش شبکه‌های عصبی نرمال‌سازی داده‌ها قبل از استفاده در مدل می‌باشد. این عمل خصوصاً وقتی دامنه تغییرات ورودی‌ها زیاد باشد کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. اصولاً واردکردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. برای نرمال‌سازی داده‌های تحقیق از رابطه (۱۲) استفاده شده است که در آن x_{mix} و x_{man} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار داده‌های

مشاهده‌شده و x_n داده نرمال شده می‌باشد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_o) \times (l_p - \bar{l}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_o)^2 \times \sum_{i=1}^N (l_p - \bar{l}_p)^2}}, \quad DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (l_o - l_p)^2}{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_p)^2}, \quad MAPE = \frac{1}{l_o} \times \frac{\sum_{i=1}^N |l_o - l_p|}{N} \times 100 \quad (11)$$

$$x_n = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \quad (12)$$

شبیه‌سازی و نتایج و بحث

تعریف مدل‌های ورودی

با توجه به اینکه انتخاب مدل‌های ورودی در سامانه‌های هوشمند می‌تواند بر روی دقت جواب‌های حاصل از تحلیل تأثیر گذارد، لذا سعی گردید در مدل‌سازی GPR پارامترهای مناسب و مؤثر در تعیین ضریب زبری مانینگ انتخاب گردد. در تعریف مدل‌ها از پارامترهای بدون بعد استفاده گردید. جدول ۳ مدل‌های تعریف شده در تحقیق کنونی را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مدل‌های تعریف‌شده

مدل‌ها بر اساس مشخصات هیدرولیکی		مدل‌ها بر اساس مشخصات هیدرولیکی و ذرات رسوبی	
Model	Inputs	Model	Output
H1	Re	S1	R/D_{50}
H2	Fr	S2	$V/[g(s-1)D_{50}]^{0.5}$
H3	y/b	S3	$Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}$
H4	Re, y/b	S4	Re, R/D_{50}
H5	Fr, y/b	S5	Fr, R/D_{50}
		S6	$V/[g(s-1)D_{50}]^{0.5}, R/D_{50}$
		S7	$V/[g(s-1)D_{50}]^{0.5}, Re$
		S8	$Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}, Re$
		S9	$Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}, R/D_{50}$
		S10	Re, $Vy/[g(s-1)D_{50}^3]^{0.5}, R/D_{50}$

نتایج و بحث

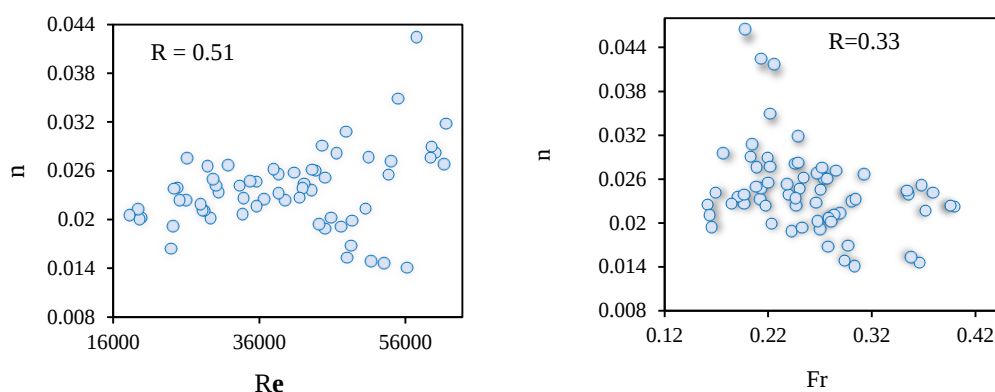
نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی ضریب زبری مانینگ کل (n)

در شکل ۳ روند تغییرات ضریب مقاومت جریان شامل ضریب زبری مانینگ کل (n) نسبت به پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل عدد رینولدز (Re) و عدد فرود (Fr) برای مصالح رسوبی نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که همبستگی ضریب مقاومت جریان با عدد رینولدز نسبت به عدد فرود کمی بهتر است، به عبارت دیگر عدد رینولدز (نشان دهنده تأثیر نیروی ویسکوزیته بر نیروی اینرسی)، نسبت به عدد فرود (نشان دهنده تأثیر نیروی ثقل بر نیروی اینرسی)

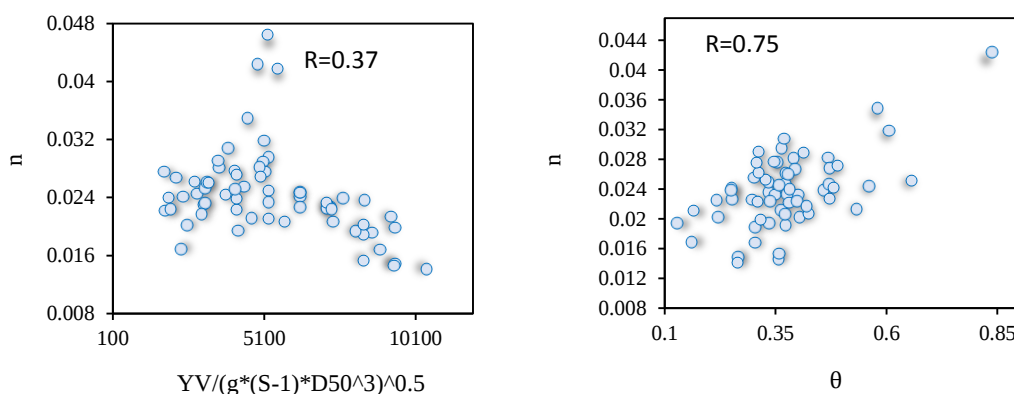
دارای همبستگی نسبتاً بهتری بوده و این می‌تواند بیانگر برتری نسبی اثر نیروی ویسکوزیته به نیروی ثقل باشد. همانطوریکه شکل ۳ نشان می‌دهد نواسانات شدیدی در مقادیر کمی ضریب زبری مقاومت جریان به ازای اعداد فرود و رینولدز وجود دارد که این بیانگر عدم قطعیت در تأثیر پارامترهای هیدرولیکی عدد رینولدز و فرود در ضریب زبری جریان می‌باشد و وزن آن پارامترها در مقاومت جریان نامشخص و نامعلوم می‌باشد. همچنین نشان دهنده این موضوع می‌باشد که مقاومت جریان و به تبع آن ضریب زبری جریان وابسته به یک متغیر (عدد فرود یا عدد رینولدز) نبوده بلکه وابسته به چند متغیر می‌باشد. به منظور بررسی ارتباط ضریب مقاومت جریان با

می‌یابد و این بدلیل رابطه مستقیم شیب خط انرژی با ضریب مقاومت جریان می‌باشد. مشاهده می‌گردد که پارامتر دبی در واحد عرض بی‌بعد ذرات $\left(\frac{V_y}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}\right)$ همبستگی قابل قبولی با ضرایب مقاومت جریان نشان نمی‌دهند و این امر حاکی از وجود عدم قطعیت در تاثیر پارامترهای مذکور به تنهایی در برآورد میزان ضریب زبری مقاومت جریان است.

پارامترهای مرتبط با جریان و مصالح رسوبی در کانالهای با بستر فرسایش‌پذیر با شکل بستر تلماسه، نتایج حاصل از ترکیب داده‌های آزمایشات انجام گرفته با دو دانه‌بندی $D50=0.15\text{mm}$ و $D50=0.27\text{mm}$ در نمودار اشکال ۴ ارائه گردیده است. مشاهده می‌گردد که پارامتر شیلدز θ با توجه به اینکه در محاسبه آن، از شیب خط انرژی S_f استفاده شده است، همبستگی بسیار خوبی با ضرایب مقاومت جریان دارد و همان‌طوریکه از نمودارها می‌توان ملاحظه کرد با افزایش مقدار پارامتر شیلدز مقدار ضریب مقاومت جریان نیز افزایش



شکل ۳- نمودار تغییرات ضریب زبری کل نسبت به پارامترهای هیدرولیکی



شکل ۴- نمودار تغییرات ضریب زبری کل نسبت به مشخصات جریان و مصالح رسوبی

ضریب مقاومت ناشی از زبری ذرات n' برای هر سری از آزمایشات با استفاده از روابط دارسی- وایسباخ و مانینگ زمانی که هنوز شکل بستر تشکیل نشده و بستر هموار و صاف می‌باشد، محاسبه شده و میانگین عددی آنها به عنوان مقدار ثابت ضریب مقاومت جریان ناشی از زبری ذرات در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از رابطه (۱۳) مقدار ضریب مقاومت ناشی از شکل‌بستر برای هر آزمایش با شکل بستر تلماسه حساب می‌شود.

$$n^2 = n'^2 + n''^2 \quad (13)$$

در این رابطه n ضریب مقاومت کل جریان، n' ضریب مقاومت

نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی ضریب زبری ناشی از شکل‌بستر و ناشی از ذرات (n' و n'')

در این قسمت به منظور بررسی ارتباط مقاومت جریان ناشی از مقاومت شکل بستر و همچنین مقاومت ناشی از زبری ذرات با پارامترهای هیدرولیکی و پارامترهای مصالح رسوبی، مقاومت کل جریان به دو ضریب مقاومت جریان ناشی از شکل بستر و ناشی از زبری ذرات، تفکیک شده و نمودارهای مربوط به هریک از روش‌ها رسم گردیده و نتایج با هم مقایسه شدند. در ابتدا ضریب مقاومت جریان به روش تنش برشی بابت تفکیک گردید. در این حالت میزان

برابر مشخصات جریان و ذرات بوده و می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد ضریب زبری ناشی از شکل‌بستر مشابه عملکرد زبری مانینگ کل می‌باشد. مطابق با نتایج حاصله مشاهده گردید که محدوده تغییرات ضریب مقاومت ناشی از ذرات در بازه کوچکی قرار داشته و عملاً می‌توان ضریب مقاومت ناشی از ذرات مصالح بستر را بصورت عدد ثابت اعمال نمود. به عبارت دیگر در کانال‌های با بستر فرسایش-پذیر با شکل‌بستر تلماسه، عملاً روند تغییرات ضریب مقاومت جریان ناشی از شکل بستر منطبق بر روند تغییرات ضریب مقاومت کل جریان می‌باشد.

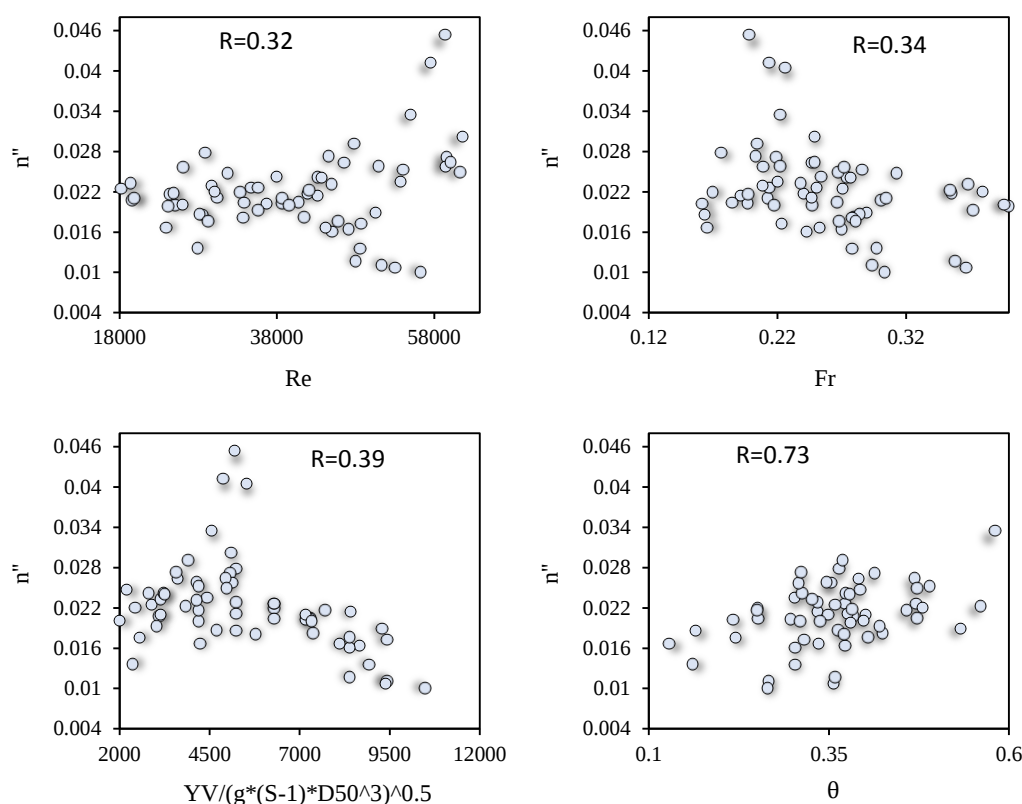
مدل‌سازی با روش GPR

نتایج مدل‌های تعریف شده جهت تخمین n

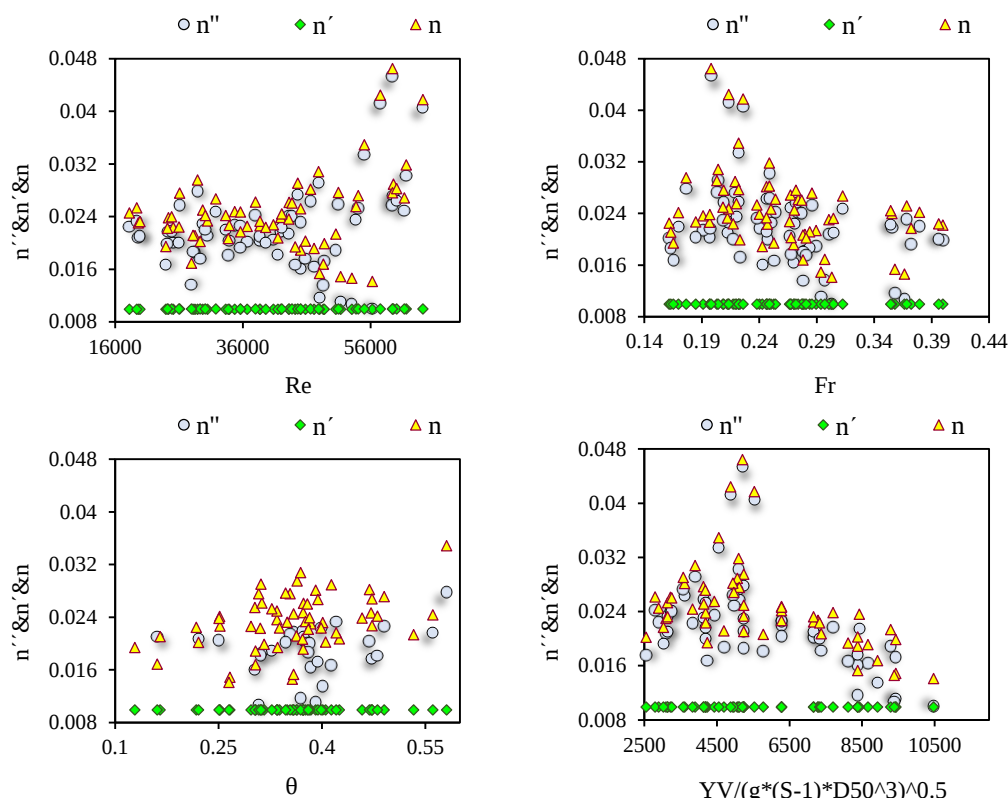
تعیین تابع کرنل مناسب برای رگرسیون فرآیند گاوسی

جهت انتخاب تابع کرنل مناسب رگرسیون فرآیند گاوسی مدل $S(10)$ با کرنل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق شکل ۷، نتایج نشان داد که تابع کرنل شعاع مداری در تعیین ضریب زبری مانینگ نسبت به توابع کرنل دیگر بهتر عمل می‌کند. بنابراین در تجزیه و تحلیل تمامی مدل‌ها از کرنل شعاع مداری استفاده شد.

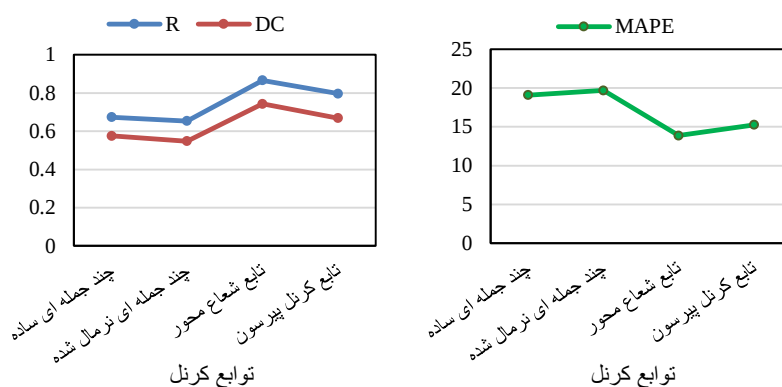
جریان ناشی از زبری ذرات مصالح رسوبی بستر و n'' ضریب مقاومت جریان ناشی از شکل‌بستر می‌باشد. برای بررسی ارتباط بین ضریب زبری ناشی از شکل‌بستر با مشخصات جریان و مشخصات مصالح رسوبی، نمودارهای تغییرات ضریب زبری ناشی از شکل‌بستر در برابر مشخصات جریان و مشخصات ذرات رسوبی ترسیم شده است (شکل ۵). با بررسی نمودارها ملاحظه می‌گردد ضریب زبری ناشی از شکل بستر همبستگی پایینی با اعداد رینولدز و فرود نشان می‌دهد و به نظر می‌رسد که پارامترهای هیدرولیکی فوق به‌تنهایی نمی‌توانند به عنوان پارامتر موثر در تخمین ضریب زبری جریان باشند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت و به تبع آن افزایش عدد فرود که منجر به تغییر وضعیت شکل‌بستر تلماسه می‌گردد، مقدار ضریب زبری کاهش پیدا کرده است. با بررسی شکل ۵ ملاحظه می‌گردد روند تغییرات ضریب زبری مانینگ ناشی از فرم‌بستر تلماسه نسبت به پارامترهای شیلدز θ تقریباً همخوانی خوبی دارند. برای مشاهده و بررسی ضریب زبری‌های تفکیک شده از ضریب زبری کل و تفسیر تاثیر ضریب زبری شکل بستر بر روی ضریب زبری کل نمودار تغییرات ضریب زبری ناشی از شکل‌بستر، ذرات رسوبی و ضریب زبری مانینگ کل در برابر مشخصات جریان در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ مشاهده می‌گردد که تغییرات زبری ناشی از شکل‌بستر تقریباً منطبق بر تغییرات ضریب زبری مانینگ کل در



شکل ۵- نمودار تغییرات ضریب زبری ناشی از شکل‌بستر نسبت به مشخصات جریان و مصالح رسوبی



شکل ۶- نمودار تغییرات ضریب زبری مانینگ کل، ذره و شکل بستر در برابر مشخصات جریان و ذرات رسوبی



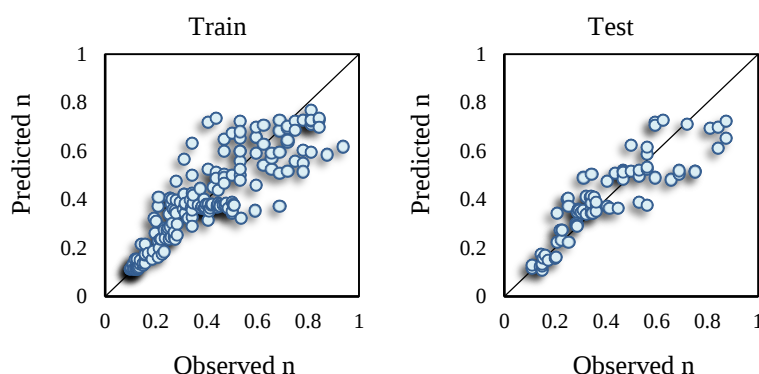
شکل ۷- پارامترهای آماری مدل GPR با توابع کرنل متفاوت

برای داده‌ها می‌باشد. این مدل دارای بیشترین R و DC بوده و کمترین خطا (MAPE) را داراست. 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. در شکل ۵ نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده مدل برتر برای سری داده‌های آموزش و تست نشان داده شده است.

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها براساس مشخصات جریان
در این حالت چندین مدل براساس تنها مشخصات جریان تعریف گردید. نتایج حاصل به صورت جدول ۴ و شکل ۸ ارائه گردیده است. با بررسی نتایج حاصله و با در نظر گرفتن معیارهای ارزیابی برای مدل‌های مختلف مشاهده می‌شود که مدل H4 با پارامترهای ورودی عدد رینولدز و نسبت عمق بر عرض جریان به عنوان بهترین مدل

جدول ۴- نتایج حاصل برای مدل‌های تعریف شده براساس مشخصات جریان

مدل	معیارهای ارزیابی					
	آزمون			تست		
	R	DC	RMSE	R	DC	MAPE
H1	۰.۸۷۷	۰.۶۷۵	۱۷.۴۰۵	۰.۸۲۷	۰.۵۴۶	۱۸.۶۷۹
H2	۰.۵۷۶	۰.۱۹۸	۲۴.۰۸۸	۰.۵۵۵	۰.۱۳۲	۲۵.۸۴۳
H3	۰.۸۱۷	۰.۴۲۷	۱۹.۹۳۳	۰.۷۹۳	۰.۳۲۵	۲۲.۴۴۲
H4	۰.۸۶۹	۰.۷۵۷	۱۴.۴۴۵	۰.۸۵۸	۰.۷۱۳	۱۵.۵۰۴
H5	۰.۷۹۷	۰.۵۳۳	۱۸.۴۶۳	۰.۶۷۲	۰.۲۶۶	۱۹.۸۰۶



شکل ۸- نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی- محاسباتی ضریب زبری کل برای مدل برتر با در نظر گرفتن مشخصات جریان

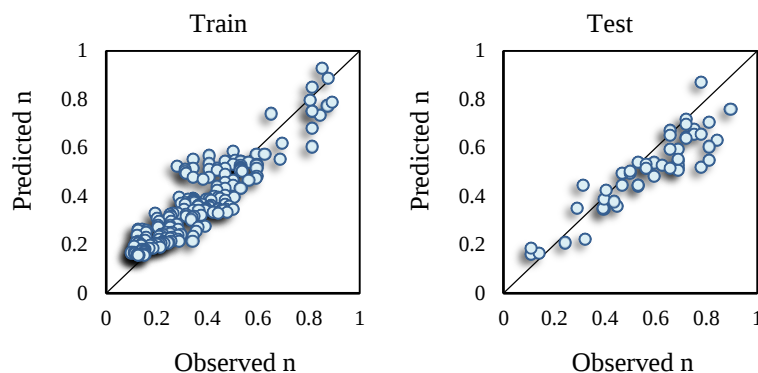
نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای R/D_{50} و $\frac{v_y}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}$ سبب افزایش دقت مدل‌ها گردیده‌اند. با مقایسه دو حالت در نظر گرفته شده، مشاهده می‌گردد که مدل‌های تعریف شده بر اساس مشخصات جریان و ذرات رسوبی در تخمین ضریب زبری مانینگ دقیق‌تر از حالت قبل می‌باشند. شکل ۹ نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده مدل برتر را برای سری داده‌های آموزش و تست نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها براساس مشخصات جریان و ذرات رسوبی

در حالت دوم تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی بر روی مقاومت جریان مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که نتایج و ارزیابی مدل‌ها در جدول ۵ نشان می‌دهد مدل S10 با پارامترهای ورودی Re 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.

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

مدل	معیارهای ارزیابی					
	آزمون			تست		
	R	DC	MAPE	R	DC	MAPE
S1	۰.۷۹۵	۰.۵۸۲	۲۰.۴۲۳	۰.۷۸۲	۰.۵۶۲	۲۱.۹۱۳
S2	۰.۸۵۲	۰.۴۹۵	۱۹.۴۹۲	۰.۷۹۶	۰.۴۲۳	۲۰.۹۱۳
S3	۰.۸۶۷	۰.۶۹۲	۱۶.۷۲۹	۰.۸۵۴	۰.۶۵۳	۱۷.۹۵۴
S4	۰.۷۰۳	۰.۵۳۸	۱۹.۹۵۳	۰.۶۷۴	۰.۴۴۷	۲۱.۴۱۳
S5	۰.۸۵۳	۰.۶۶۲	۲۰.۱۹۸	۰.۸۲۹	۰.۵۷۴	۲۱.۶۶۸
S6	۰.۸۵۷	۰.۷۰۹	۱۵.۵۴۳	۰.۸۴۷	۰.۶۵۷	۱۶.۶۸۰
S7	۰.۸۷۶	۰.۷۴۳	۱۴.۶۷۱	۰.۸۵۴	۰.۶۵۸	۱۵.۷۳۹
S8	۰.۸۳۰	۰.۶۰۳	۲۰.۳۵۵	۰.۸۰۹	۰.۵۶۵	۲۱.۸۴۴
S9	۰.۹۲۳	۰.۷۶۶	۱۶.۷۱۹	۰.۸۹۰	۰.۶۵۸	۱۷.۹۳۴
S10	۰.۹۴۲	۰.۸۳۷	۱۲.۶۷۱	۰.۸۹۲	۰.۷۶۵	۱۳.۵۹۳

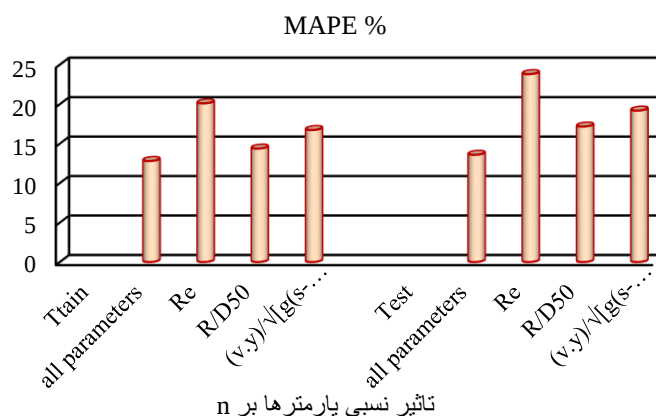


شکل ۹- نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی - محاسباتی ضریب زبری کل برای مدل برتر با در نظر گرفتن مشخصات جریان و ذرات رسوبی

آنالیز حساسیت

جهت بررسی تأثیر پارامترهای به کاررفته در مدل برتر (S10) آنالیز حساسیت انجام گرفت. برای این منظور با حذف تک تک پارامترهای مدل برتر و اجرای دوباره مدل و تعیین معیار ارزیابی MAPE میزان تأثیر پارامتر حذف شده در کاهش دقت مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت به صورت

شکل ۱۰ 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 می توان نتیجه گرفت که عدد رینولدز تأثیرگذارترین پارامتر در تخمین تخمین ضریب زبری مانینگ می باشد.



شکل ۱۰- مقایسه پارامترهای آماری به دست آمده از آنالیز حساسیت

پیش بینی ضریب زبری ناشی از فرم بستر نشان می دهند. با توجه به جدول ۶ می توان نتیجه گرفت که در تخمین ضریب زبری ناشی از فرم بستر نیز استفاده هم زمان از مشخصات جریان و ذرات رسوبی (سناریو ۲) منجر به جوابهای دقیق تری می گردد. با مقایسه نتایج مربوط به ضریب زبری مانینگ کل و ضریب زبری ناشی از شکل بستر ملاحظه می گردد که روش هوش مصنوعی به کار رفته در پیش بینی ضریب زبری مانینگ کل عملکرد بهتری داشته است.

نتایج مدل های تعریف شده جهت تخمین n'' تحت ۲ سناریو مختلف

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل مدل ها تحت ۲ سناریو جهت تخمین ضریب زبری ناشی از شکل بستر (n'') آورده شده است. نتایج به صورت جدول ۶ ارائه شده است. مطابق نتایج جدول ملاحظه می گردد که تحت سناریو ۱ مدل H4 با پارامترهای ورودی (Re ، y/b)، و تحت سناریو ۲ مدل S10 با پارامترهای ورودی $\frac{R}{D_{50}}$ و Re ، $\frac{Vy}{\sqrt{lg(s-1)D_{50}}}$ بهترین نتایج را در بین مدل های دیگر در

جدول ۶- نتایج مربوط به مدل‌های GPR برای سری داده‌های تست جهت تخمین n''

مدل	معیارهای ارزیابی			مدل	معیارهای ارزیابی		
	R ²	DC	RMSE		R ²	DC	RMSE
سناریو ۱				سناریو ۲			
H1	۰.۷۱۱۷	۰.۵۰۷۹	۰.۰۰۴۸	S1	۰.۶۹۴۶	۰.۵۱۲۹	۰.۰۰۴۸
H2	۰.۳۷۱۱	۰.۱۴۸۸	۰.۰۰۶۶	S2	۰.۵۳۸۴	۰.۲۹۸۵	۰.۰۰۶۷
H3	۰.۵۶۰۱	۰.۳۲۱۰	۰.۰۰۵۸	S3	۰.۶۱۳۶	۰.۳۸۵۹	۰.۰۰۶۳
H4	۰.۷۶۲۲	۰.۶۶۴۱	۰.۰۰۴۲	S4	۰.۷۸۹۴	۰.۶۴۸۶	۰.۰۰۴۱
H5	۰.۶۲۴۹	۰.۴۰۱۱	۰.۰۰۵۵	S5	۰.۶۸۷۹	۰.۴۹۱۲	۰.۰۰۵۴
				S6	۰.۶۸۳	۰.۴۸۴۷	۰.۰۰۵۹
				S7	۰.۷۶۳۲	۰.۶۲۳۹	۰.۰۰۴۳
				S8	۰.۷۴۷۰	۰.۶۱۷۱	۰.۰۰۴۴
				S9	۰.۶۹۱۷	۰.۴۹۷۳	۰.۰۰۵۳
				S10	۰.۷۹۵۰	۰.۶۹۵۲	۰.۰۰۳۸

نتیجه‌گیری

در این تحقیق جهت تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب زبری مانینگ و تخمین آن در کانال‌های آبرفتی با شکل بستر تلماسه، از داده‌های مربوط به آزمایش‌های انجام‌شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز استفاده شد و با استفاده از روش GPR تحت مدل‌سازی متفاوت تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و ذرات رسوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که همبستگی ضریب مقاومت جریان با عدد رینولدز نسبت به عدد فرود بهتر است و این می‌تواند بیانگر برتری نسبی اثر نیروی ویسکوزیته به نیروی ثقل باشد. مشاهده شد که نواسانات شدیدی در مقادیر کمی ضریب زبری مقاومت جریان به ازای اعداد فرود و رینولدز وجود دارد که این بیانگر عدم قطعیت در تأثیر پارامترهای هیدرولیکی عدد رینولدز و فرود در ضریب زبری جریان می‌باشد. در استفاده از پارامترهای مشخصات هیدرولیکی و ذرات رسوبی به تنهایی ملاحظه گردید که مقاومت جریان و به تبع آن ضریب زبری جریان وابسته به یک متغیر نبوده بلکه وابسته به چند متغیر می‌باشد. نتایج روش GPR بیانگر عملکرد مناسب این روش در تخمین ضریب زبری بود و مشخص گردید هنگامی که پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات هم‌زمان در تعریف مدل‌ها به کار روند نتایج دقیق‌تری ارائه می‌گردد. با توجه به نتایج حاصله مشاهده گردید که مدل با پارامترهای ورودی R/D_{50} و Re و $\frac{vy}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}$ در تعیین ضریب زبری مانینگ دقیق‌تر می‌باشد. همچنین نشان داده شد که R/D_{50} و $\frac{vy}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}}$ در بهبود کارایی مدل‌ها تأثیرگذار می‌باشند. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت مشخص گردید که عدد رینولدز تأثیرگذارترین پارامتر در تخمین ضریب زبری جریان می‌باشد. همچنین مشخص گردید که در کانال با بستر فرسایش‌پذیر و شکل بستر تلماسه بخش اصلی ضریب مقاومت کل

جریان مربوط به مقاومت جریان ناشی از شکل‌بستر بوده و مطابق آزمایشات حاصله مقاومت ناشی از شکل‌بستر ۰.۶۵ تا ۰.۸ مقاومت کل جریان را شامل می‌شود.

منابع

- ثاقبیان، س.م. ۱۳۹۶. بررسی روند تغییرات ضریب مقاومت جریان در بسترهای فرسایش‌پذیر، پایان نامه دکتری تخصصی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.
- 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.
- ASCE, Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. 2000. Artificial Neural Networks in hydrology. I: Preliminary concepts. J. Hydrologic Eng, ASCE. 5(2): 115-123.
- 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.
- 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.
- Meyer-Peter, E. and Müller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd Meeting IAHR, Stockholm, 39-64.
- Strickler, A. 1923. Beitrage zur Frage der Geschwindigkeits-formel und der Rauhegkeitszahlen fur Strome, Kanale und geschlossene Leitungen.

- 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.
- 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.
- (Some contributions to the problem of the velocity formula and roughness factors for rivers, canals, and closed conduits.): Bern, Switzerland, Mitt. Eidgenossischen Amtes Wasserwirtschaft, no. 16.
- Tuijnder, A. P. and Ribberink, J. S. 2012. Experimental observation and modelling of roughness variation due to supply-limited sediment transport in unidirectional flow. *Journal of Hydraulic Research*. 50(5): 506-520.

Prediction of Total and bedform Roughness Coefficient in Alluvial Channels Based on Experimental Data via Gaussian Process Regression Method

S. Mahdi Saghebani^{۱*}, K. Roushangar^۲

Recived: Jan.15, 2019

Accepted: Apr.13, 2019

Abstract

Understanding the flow and turbulence characteristics in movable open channels with bedforms is of substantial importance for the management of rivers as well as design and operation of hydraulic structures. Dunes are one of the most important bedforms and have significant impact on the characteristics of turbulence. So far numerous studies have been down about hydraulic resistance in open channels with bedforms, however, due to the impact of various parameters on the roughness coefficient, the exact estimation of this parameter is difficult. In this research, using the data of experiments carried out at the Hydraulic Laboratory of University of Tabriz with two different gradation and two channel widths, flow resistance due to bedform was studied. Also, by combining these data with laboratory data from other researchers, using Gaussian Process Regression (GPR) different models were defined and investigated. The obtained results from the experiments showed that in investigating the effect of hydraulic parameters on flow resistance, Reynolds number showed a better correlation with flow resistance in comparison with other hydraulic parameters. Also, the obtained results from the developed models proved desired capability of GPR method in predicting roughness coefficient and it was observed that both flow and sediment particles characteristics are effective in estimating roughness coefficient. The results of the superior model sensitivity analysis showed that the Reynolds number has the most significant impact in predicting the roughness coefficient.

Keywords: Bedform, Experimental Data, Flow resistance, GPR, Movable beds

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

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

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