

بررسی پارامترهای هیدرولیکی تأثیرگذار بر آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گاوسی

کیومرث روشنگر^{۱*}، سمیرا اخگر^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۵

چکیده

پیش‌بینی عمق آبشستگی در پایین دست سازه‌های کنترل از جمله سرریزها و سازه‌های کنترل شیب یکی از مسائل ضروری در طراحی این سازه‌ها می‌باشد. در تحقیق کنونی عملکرد روش رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) به عنوان یکی از روش‌های نوین داده کاوی در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل مورد بحث قرار گرفت. جهت بررسی موضوع برای هر سری داده، مدل‌های مختلفی تعریف شده و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. بهترین نتایج برای داده‌های آزمون، برای سرریز لبه تیز مقادیر $DC=0/90$ (ضریب تبیین)، $CC=0/93$ (ضریب همبستگی)، $RMSE=11/2\%$ (جزر میانگین مربعات خطاها)، $MAE=7/9\%$ (میانگین قدرمطلق خطاها)، و برای سازه کنترل شیب مقادیر $DC=0/81$ ، $CC=0/86$ ، $RMSE=19/4\%$ ، $MAE=16/7\%$ به دست آمد. همچنین بر اساس نتایج آنالیز حساسیت مشخص گردید که پارامترهای Fr_1 (عدد فرود بالاست جریان) و b/z (نسبت عرض سرریز به ارتفاع سرریز) در پایین دست سرریز لبه تیز و پارامترهای Dp/h (ارتفاع ریزش سازه به ارتفاع آب روی سازه) و Fr_1 در پایین دست سازه کنترل شیب کلیدی‌ترین نقش را در پیش‌بینی عمق آبشستگی دارند. در واقع تغییرات عمق آبشستگی متأثر از هندسه و انرژی جریان در بالادست این سازه‌ها است. مقایسه روابط نیمه تجربی و کلاسیک با نتایج حاصل از روش به کاررفته در تحقیق نشان داد که نتایج روش هوشمند GPR نسبت به روابط کلاسیک دقیق‌تر و قابل اعتمادتر بوده بطوریکه معیار خطای $RMSE$ بیش از ۸۰ درصد کمتر شده است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، سرریز لبه تیز، سازه کنترل شیب، GPR

مقدمه

نزدیکی خود را تغییر می‌دهند و به صورت موضعی باعث آبشستگی در این محدوده می‌شوند. اهمیت بررسی پدیده آبشستگی زمانی آشکار می‌گردد که عمق آبشستگی قابل ملاحظه باشد (Hoffmans 1998، Rajaratnam، Bohrer et al., 1998، Wittler et al., 1998 and Mazurek, 2003) به گونه‌ای که این عمق به پی سازه‌های هیدرولیکی برسد و پایداری این سازه‌ها را در معرض خطر قرار دهد یا موجب تخریب آنها گردد (نشریه شماره ۳۱۸ معاونت امور آب و آبفا، وزارت نیرو؛ مؤمنی و همکاران ۱۳۸۷).

در زمینه پیش‌بینی عمق آبشستگی پایین دست سازه‌ها تحقیقات متعددی انجام گرفته است. از جمله استرلچاک با بررسی آبشستگی بستر شنی در پایین دست پرتاب کننده جامی آزاد نشان داد که دو و سه برابر کردن دبی موجب افزایش ۵۰ و ۸۰ درصدی عمق حفره می‌شود (Strelchuck, 1969). میسون و آروموگام برخی از روابطی را که محققان جهت برآورد حداکثر عمق آبشستگی ارائه نموده بودند، را جمع آوری و تجزیه و تحلیل نمودند (Mason and Arumugam 1985). دی آگوستینو و فرو پس از مطالعه داده‌های میدانی و

آبشستگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان آب از محل استقرار اولیه آنها به مکان دیگری است. آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسان مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. به طور کلی آبشستگی در اثر اندرکنش نیروهای محرک ناشی از جریان (در راستای جدا کردن ذره از بستر) و نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک ذرات و وزن ذره (در برابر حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدایی ذره از بستر می‌شود) رخ می‌دهد. سازه‌های هیدرولیکی که به صورت مانعی در برابر جریان قرار می‌گیرند، الگوی جریان در

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانش آموخته دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

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

مواد و روش‌ها

رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)

مدلهای رگرسیون فرآیند گاوسی بر مبنای این فرض هستند که مشاهدات تنظیم باید حامل اطلاعاتی درباره هم‌دیگر باشد. فرآیندهای گاوسی راهی برای مشخص کردن اولویتی به صورت مستقیم روی فضای تابع هستند. این کار تعمیم طبیعی توزیع گاوسی است که میانگین و کواریانس آن به ترتیب بردار و ماتریس هستند (Yang et al. 2018). توزیع گاوسی روی بردارها است در حالیکه فرآیند گاوسی روی توابع است. در نتیجه، مدل‌های فرآیند گاوسی به دلیل دانش قبلی درباره وابستگی‌های تابعی و داده‌ها، برای تعمیم به هیچ فرآیند اعتبارسنجی نیاز ندارند و مدل‌های رگرسیون فرآیند گاوسی قادر به درک توزیع پیش‌بینی متناظر با ورودی آزمون هستند (Pal & Deswal, 2010).

مجموعه داده S با n مشاهده را در نظر بگیرید $S = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n\}$ ، که در آن x_i بردار ورودی با D بعد و y_i خروجی اسکالر یا هدف می‌باشد. این مجموعه متشکل از دو جز ورودی و خروجی به عنوان نقاط نمونه یا تجربی می‌باشد. به منظور سهولت کار، ورودی‌های مجموعه در ماتریس $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ و خروجی‌ها نیز در ماتریس $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ تجمیع 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:

$$m(x) = E(f(x)) \quad (1)$$

$$k(x, x') = E((f(x) - m(x))(f(x') - m(x'))) \quad (2)$$

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

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (3)$$

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:

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon \quad (4)$$

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

آزمایشگاهی موفق به ارائه رابطه برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز گردیدند (D'Agostino and Ferro 2004). مولر و واگنر عملکرد فرمول‌های نیمه تجربی موجود در مورد آبشستگی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روابط موجود دارای دقت مطلوبی نبوده و مقادیر محاسباتی را خیلی بیشتر یا کمتر از مقادیر واقعی تخمین می‌زنند (Mueller and Wagner, 2005). محمد و همکاران با استفاده از روش تابع شعاع محوری شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به بررسی عمق آبشستگی در اطراف گروه پایه‌های پل پرداختند (Mohammad et al., 2009). پال و همکاران با استفاده از داده‌های موجود آزمایشگاهی به بررسی عملکرد روش M5 و ماشین بردار پشتیبان در تخمین عمق آبشستگی در نزدیکی پایه‌های پل پرداخته و نشان دادند که دقت این روش از شبکه عصبی مصنوعی بیشتر است (Pal et al., 2012). حسن زاده و همکاران (۱۳۹۷) میزان عمق آبشستگی پایه پل را با استفاده از سیستم استنتاجی عصبی - فازی تطبیقی بهینه سازی شده با الگوریتم رقابت استعماری برآورد کرده و نشان دادند که روش‌های هوشمند نسبت به روابط تجربی عملکرد مناسب تری دارند. نجف زاده و همکاران با استفاده از روش‌های هوشمند ماشین بردار پشتیبان و سیستم استنتاج عصبی - فازی، عمق آبشستگی در کانال‌های مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نسبت اندازه ذرات به عرض کانال در تخمین عمق آبشستگی مؤثر است (Najafzadeh et al., 2016). روشنگر و همکاران (۱۳۹۸) پارامترهای هیدرولیکی تأثیرگذار بر آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای چسبنده و دانه‌ای را با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گاوسی بررسی نموده نتایج حاصله، کارایی بالای روش رگرسیون فرآیند گاوسی در تخمین عمق آبشستگی نسبت به روابط نیمه تجربی به اثبات رساند.

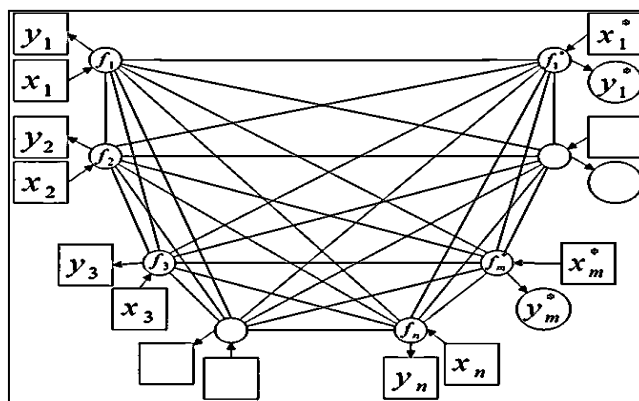
با توجه به مطالب بالا در دهه‌های اخیر روش‌های محاسباتی نرم برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها که اکثراً الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت هستند به‌عنوان ابزار توانمند در حل مسائل پیچیده به شمار می‌آیند و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشند (ASCE, 2000). با توجه به پیچیده بودن پدیده آبشستگی و استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در تخمین برخی از پارامترهای هیدرولیکی آن، در تحقیق کنونی کارایی روش رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) به عنوان یکی از روش‌های نوین داده کاوی در تخمین عمق پایین دست سازه‌های کنترل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با استفاده از آنالیز حساسیت، مؤثرترین پارامترها در تخمین عمق آبشستگی تعیین شد. در نهایت، نتایج مدل GPR با روابط تجربی موجود مقایسه گردید.

شده برای مقادیر تابع f^* در نقاط آزمون $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]$ به کار می‌رود. مدل تصویری فرآیند گاوسی در شکل (۱) ارائه شده است. در این شکل f_i بیانگر $f(x_i)$ می‌باشد. مجموعه توابع نهان f_i که با شاخص x_i نشان داده شده‌اند، به طور کامل به یکدیگر مرتبط می‌باشند. هر اتصال نشان دهنده یک رابطه بین دو متغیر نهان بوده که توسط تابع کوواریانس تعریف می‌شود. در شکل (۱) مربعات نشان دهنده متغیرهای مشاهداتی و دایره نمایانگر مجهولات می‌باشند. توزیع γ مشروط به مقادیر f بوده که با یک گاوسین ایزوتروپیک به شکل زیر ارائه می‌شود:

$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ ، 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 ماتریس کوواریانس با درایه‌های $k_{i,j} = k(x_i, x_j)$ می‌باشد.

$$K(X, X) = \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & k(x_1, x_2) & \dots & k(x_1, x_n) \\ k(x_2, x_1) & k(x_2, x_2) & \dots & k(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & k(x_n, x_2) & \dots & k(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

که $k_{i,j}$ کوواریانس بین مقادیر توابع نهان $f(x_i)$ و $f(x_j)$ می‌باشد. رگرسیون فرآیند گاوسی به منظور محاسبه توزیع پیش‌بینی



شکل ۱- مدل تصویری رگرسیون فرآیند گاوسی (روشنگر و همکاران ۱۳۹۸)

تبدیل نمونه‌ها از فضای ورودی به فضای ویژگی، تفکیک کننده غیرخطی به حالت خطی تبدیل خواهد شد. از مهمترین توابع کرنل می‌توان به کرنل چند جمله‌ای ساده، چند جمله‌ای نرمال شده، تابع شعاع محور و تابع کرنل پیرسون اشاره کرد. در ادامه روابط مربوط به این کرنل‌ها در جدول ۱ آورده شده است. مطابق با جدول ۱ توابع کرنل دارای پارامترهای مختلفی (مانند w, d, γ, σ) هستند که نحوه تنظیم آن‌ها در حصول جواب هرچه بهتر مسئله بسیار مؤثر است.

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

جدول ۱- 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 نرمال شده	$K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + 1)^d / \sqrt{(x_i^T x_i)(x_j^T x_j)}$	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

شیب) ارائه شده است. در این میان برای سرریز لبه تیز می‌توان به روابط ارائه شده توسط Yen(1987) و D'Agostino-Ferro(2004) که به ترتیب با (۶) و (۷) مشخص شده و برای سازه کنترل شیب به

روابط تجربی آبستگي

تاکنون روابط تجربی زیادی برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگي پایین دست سازه‌های کنترل (سرریز لبه تیز و سازه کنترل

مربوط به آبشستگی در انتهای سازه‌های کنترل که شامل ۲۲۵ سری داده برای سرریزهای لبه تیز (D'Agostino and Ferro, 2004) و ۸۹ سری داده برای سازه‌های کنترل شیب (Bormann and Julien, 1991) استفاده شده است.

جدول ۲- محدوده داده های آزمایشگاهی برآورد عمق آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز

پارامترها	محقق	محدوده	
		Yen(1987)	D'Agostino-Ferro(2004)
H(m)	حداقل	۰/۳۲۵	۰/۹۸۲
	حداکثر	۲/۱۵	۱/۱۴۶
q(m ² /s)	حداقل	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵
	حداکثر	۰/۴۲۰	۰/۱۵
ds یا d50 (m)	حداقل	۰/۰۰۱	۰/۰۰۹۱
	حداکثر	۰/۰۲۸	۰/۰۳۶۲
S	حداقل	۰/۰۷۱	۰/۰۵
	حداکثر	۱/۱۷۵	۰/۲۲

جدول ۳- محدوده داده های آزمایشگاهی برآورد عمق آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب

پارامترها	محقق	محدوده	
		Chee and Yuen(1985)	Bormann and Julien(1991)
Z(m)	حداقل	۰/۴۵	۰/۶۳
	حداکثر	۱/۲۸	۴/۶۵
U ₀ (m ² /s)	حداقل	۴/۱۰	۰/۸۸
	حداکثر	۵/۱۰	۴/۶۵
d50 یا ds (mm)	حداقل	۸/۶۸	۰/۳
	حداکثر		۰/۴۵
β°		۴۵/۶۰/۷۵/۹۰	۱۸/۴۵/۹۰
S(m)	حداقل	-	۰/۱
	حداکثر	-	۱/۵۲

انتخاب الگوهای ورودی جهت مدل سازی عمق آبشستگی

انتخاب الگوهای ورودی در سیستم‌های هوشمند تأثیر بسیاری بر روی دقت جواب‌های حاصل از تحلیل دارد، لذا در مدل سازی سعی گردید تا پارامترهای مناسب و مؤثر در تعیین عمق آبشستگی انتخاب گردد. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط D'Agostino and Ferro (2004) عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای لبه تیز وابسته به پارامترهای مشخصه جریان، هندسه سازه کنترلی و مشخصات مصالح بستر است. بطوریکه مطابق نظر ایشان عمق آبشستگی تابع پارامترهای مؤثر زیر است:

روابط ارائه شده توسط Bormann and Chee and Yuen(1985) و Julien(1991) که به ترتیب با (۸) و (۹) مشخص شده اشاره نمود. همچنین در جدول ۲ و ۳ محدوده داده های آزمایشگاهی برای روابط موجود به ترتیب برای سرریز لبه تیز و سازه کنترل شیب ارائه شده است.

$$\frac{S}{g} = \frac{S}{(g^2)^{1/3}} = (6.42 - 3.1H^{0.1})g^{-H/600} \left(\frac{gH^3}{q^2}\right)^{20+H/600} \left(\frac{H}{d_s}\right)^{1/10} \left(\frac{h}{H}\right)^{3/20} \quad (۶)$$

$$\frac{S}{Z} = 0.540 \left(\frac{b}{Z}\right)^{0.593} \left(\frac{h}{H}\right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-0.856} \left(\frac{b}{B}\right)^{-0.751} \quad (۷)$$

که در این روابط؛ h: عمق آب در پایین دست سرریز؛ H: اختلاف عمق آب در بالادست سرریز با پایین دست سرریز؛ g: شتاب گرانش زمین؛ q: دبی در واحد عرض سرریز؛ d_s: اندازه ذرات بستر که دچار آبشستگی شده اند؛ S: حداکثر عمق آبشستگی است.

$$S = 0.6 \frac{q^{0.45} U_0^{0.55} \sin \beta}{d_{50}^{0.1}} - Z \quad (۸)$$

$$S = 0.7 \frac{q^{0.45} U_0^{0.12} \sin \beta^{0.66}}{g^{0.73} d_{50}^{0.3}} \quad (۹)$$

که در این روابط U₀: سرعت متوسط جریان آب در بالا دست سازه کنترل شیب؛ β: زاویه جت آب در بالادست؛ g: شتاب گرانش زمین؛ q: دبی در واحد عرض سرریز؛ d_w: عمق آب در پایین دست سرریز؛ d₅₀: میانگین اندازه دانه‌های بستر؛ Z: ارتفاع ریزش سازه کنترل شیب؛ S: حداکثر عمق آبشستگی است.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی و بررسی کارایی روش‌های استفاده شده برای تخمین عمق آبشستگی، در این تحقیق از معیارهای ضریب تبیین^۱ (DC)، ضریب همبستگی^۲ (CC)، جذر میانگین مربعات خطاها^۳ (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطاها^۴ (MAE) استفاده شده است که در جدول ۴ ارائه شده است.

d_{S_p}: عمق آبشستگی اندازه گیری شده، d_{S_o}: متوسط عمق آبشستگی اندازه گیری شده،

d_{S_p}: عمق آبشستگی پیش بینی شده،

d_{S_p}: متوسط عمق آبشستگی پیش بینی شده و N: تعداد داده‌ها می‌باشد.

داده‌های مورد استفاده در تحقیق

جهت بررسی دقت الگوهای تعریف شده از داده آزمایشگاهی

- 1- Determination Coefficient
- 2- Correlation Coefficient
- 3- Root Mean Square Error
- 4- Mean Absolute Error

جدول ۴- روابط معیارهای ارزیابی مورد استفاده

روابط	پارامترهای آماری
$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (d_{s_o} - d_{\bar{s}_o})(d_{s_p} - d_{\bar{s}_p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (d_{s_o} - d_{\bar{s}_o})^2 \sum_{i=1}^N (d_{s_p} - d_{\bar{s}_p})^2}}$	Coefficient of correlation (cc)
$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{s_o} - d_{s_p} $	Mean normalized error
$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (d_{s_o} - d_{s_p})^2}{\sum_{i=1}^N (d_{s_o} - d_{\bar{s}_o})^2}$	Determination Coefficient
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_{s_o} - d_{s_p})^2}{N}}$	Root Mean square Error

(MI1) و (MS1) به ترتیب مربوط به آبشستگی پایین دست سازه کنترل شیب و سرریز لبه تیز با کرنل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق شکل ۳، نتایج نشان داد که تابع کرنل شعاع محور در تخمین عمق آبشستگی در هر دو سازه نسبت به توابع کرنل دیگر بهتر عمل می‌کند. بنابراین در تجزیه و تحلیل تمامی مدل‌ها از کرنل شعاع محور استفاده شد.

نتایج مربوط به مدل‌های GPR برای سرریز لبه تیز

جدول ۵ نتایج ارزیابی الگوهای اولیه با ورودی‌های مختلف را برای پیش‌بینی عمق آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز نشان می‌دهد. مطابق این جدول و با مقایسه مقدار معیارهای ارزیابی برای هر الگو، مشاهده می‌شود که الگو MS2 با دارا بودن بیشترین ضریب تبیین و ضریب همبستگی و کمترین خطا در مراحل آموزش و آزمون (مرحله آموزش $DC = 0.92$, $CC = 0.97$, $RMSE = 9.2\%$ ، $MAE = 7.5\%$ و مرحله آزمون $DC = 0.90$, $CC = 0.93$ ، $RMSE = 11.2\%$, $MAE = 7.9\%$) نسبت به سایر الگوها دقیق‌تر بوده و برتری نسبی نسبت به سایر الگوهای بی بعد تعریف شده دارد.

این الگو شامل ۵ پارامتر ورودی ($Fr_1, h/H, b/z, d_{50}/d_w, Fr_2$) به عنوان الگو برتر برای پیش‌بینی عمق آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز انتخاب می‌گردد. شکل ۴ رابطه خطی بین حالت مشاهداتی و پیش‌بینی شده در مرحله آموزش و آزمون را برای الگو برتر نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، خط چین رسم شده نیمساز دستگاه مختصات است، هرچه نقاط به این خط نزدیکتر باشند، عملکرد مطلوب‌تر است.

$$d_s = f(q, H, b, d_w, d_{50}, h, z) \quad (10)$$

که در آن q = دبی جریان، b = عرض سرریز، h = ارتفاع آب روی تاج سرریز، d_w = عمق آب در پایین دست سرریز، z = ارتفاع سرریز، H = هد کل بالادست سرریز، d_{50} = میانگین اندازه دانه‌های بستر و d_s = عمق آبشستگی می‌باشد.

همچنین با توجه به پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی در سازه‌های کنترل شیب موجود در مراجع، عمق آبشستگی در پایین دست این نوع سازه شامل موارد زیر می‌شود:

$$d_s = f(q, h, \lambda, d_w, d_{50}, d_{90}, D_p) \quad (11)$$

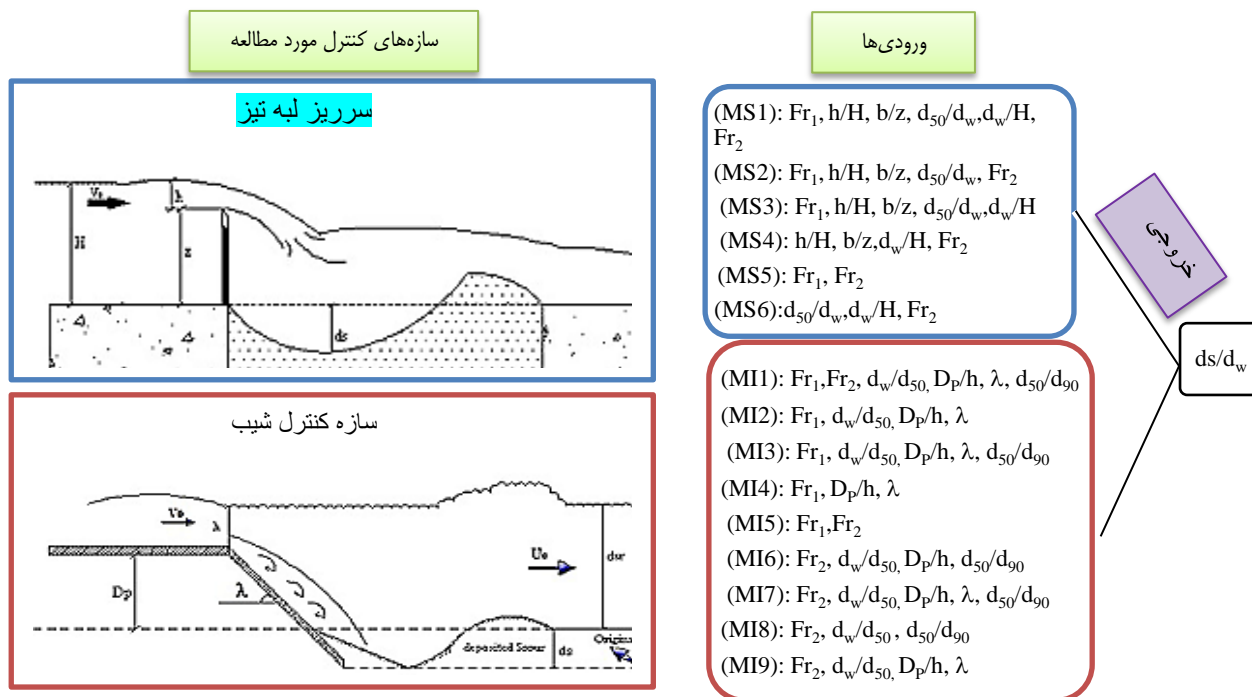
که در آن q = دبی جریان، h = ارتفاع آب روی تاج سرریز، λ = زاویه سطح سازه، d_w = عمق آب در پایین دست سرریز، d_{50} = میانگین اندازه دانه‌های بستر، D_p = ارتفاع ریزش سازه، d_{90} = قطری از ذرات که ۹۰٪ ذرات از آن ریزتر است و d_s = عمق آبشستگی می‌باشد.

در شکل ۲، الگوهای تعریف شده در حالت بی‌بعد نمایش داده شده‌اند. بطوریکه شش الگو برای سرریزهای لبه تیز و ۹ الگو برای سازه‌های کنترل شیب نشان داده شده است. در این شکل Fr_1 و Fr_2 به ترتیب عدد فرود جریان در بالادست و پایین دست سرریز می‌باشد. لازم به توضیح است که در این تحقیق، برای تمامی حالات از ۷۵٪ داده‌ها برای آموزش و ۲۵٪ دیگر برای آزمون الگوها استفاده گردیده است.

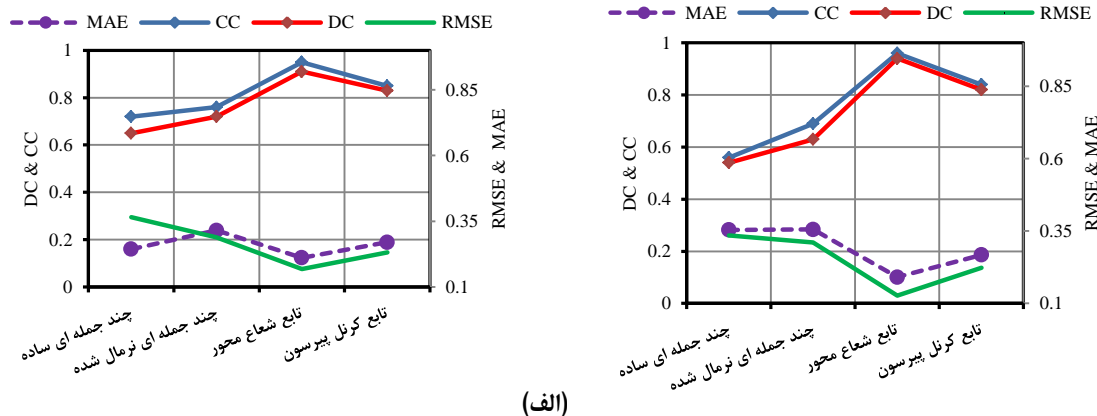
نتایج و بحث

تعیین تابع کرنل مناسب برای رگرسیون فرآیند گاوسی

جهت انتخاب تابع کرنل مناسب رگرسیون فرآیند گاوسی مدل



شکل ۲- الگوهای تعریف شده در تحقیق



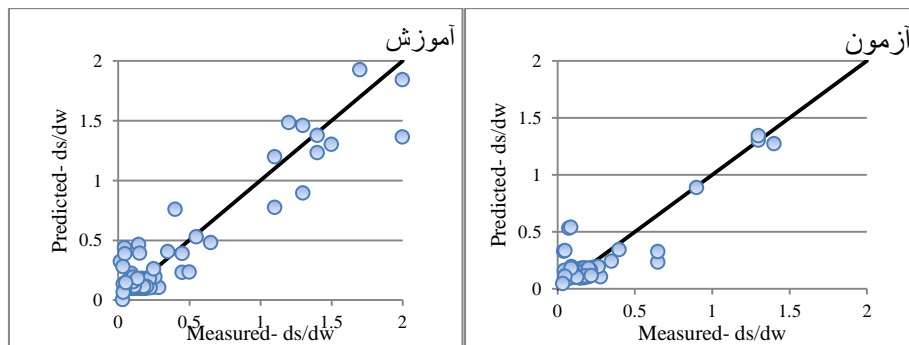
شکل ۳- پارامترهای آماری مدل GPR با توابع کرنل متفاوت برای سرریز لبه تیز (الف) و سازه کنترل شیب (ب)

جدول ۵- نتایج ارزیابی الگوها برای عمق آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز

الگوها	آموزش				آزمون			
	CC	DC	%RMSE(m)	%MAE(m)	CC	DC	%RMSE(m)	%MAE(m)
MS1	۰/۹۰	۰/۸۶	۱۴/۵	۹/۹	۰/۷۹	۰/۶۷	۱۹/۴	۱۲/۳
MS2	۰/۹۷	۰/۹۲	۹/۲	۷/۵	۰/۹۳	۰/۹۰	۱۱/۲	۷/۹
MS3	۰/۹۴	۰/۸۹	۱۳	۸/۲	۰/۹۰	۰/۸۴	۱۵	۸/۶
MS4	۰/۹۳	۰/۹۰	۱۴/۲	۹/۵	۰/۸۱	۰/۷۶	۱۸/۷	۱۰/۸
MS5	۰/۹۱	۰/۸۵	۱۶/۸	۱۰/۳	۰/۸۳	۰/۷۹	۱۱/۹	۸/۵
MS6	۰/۹۴	۰/۷۹	۱۰/۳	۶/۱	۰/۹۱	۰/۸۸	۱۴/۹	۷/۸

بودن است، به عبارت دیگر، روش GPR مقادیر برآورد شده را کمتر یا بیشتر از مقدار اندازه گیری شده محاسبه نمی کند و دارای عملکرد مناسب جهت پیش بینی عمق آبستگی در پایین دست سرریز لبه تیز است.

همچنین مدلسازی و پیش بینی عمق آبستگی با روش GPR نشان می دهد که داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده تقریباً به طور مساوی بین بالا و پایین خط نیمساز پخش شده اند که نشان از بی تفاوتی این مدل ها نسبت به کم شبیه ساز بودن یا بیش شبیه ساز



شکل ۴- نتایج مرحله آموزش و آزمون الگو برتر MS2 برای آبستگی پایین دست سرریز لبه تیز

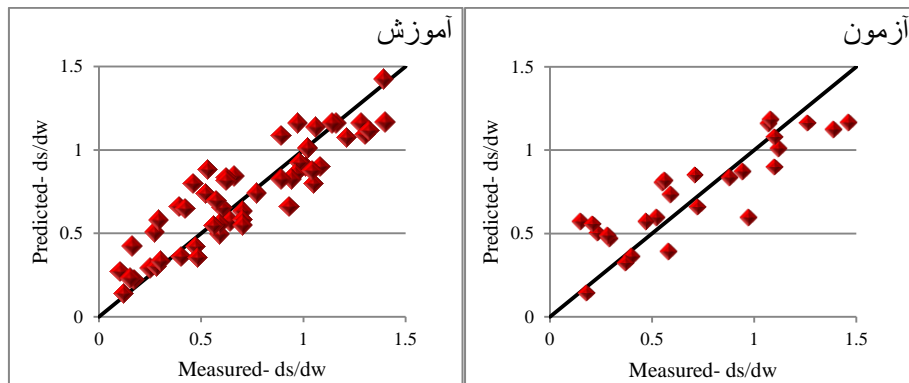
و آزمون را برای الگو برتر عمق آبستگی پایین دست سازه کنترل شیب نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، خط چین رسم شده نیمساز دستگاه مختصات است و با افق زاویه ۴۵ درجه می سازد، بطور مشابه هرچه نقاط به این خط نزدیکتر باشند، عملکرد مطلوب تر است. همچنین مدلسازی و پیش بینی عمق آبستگی با روش GPR نشان می دهد که داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده تقریباً به طور مساوی بین بالا و پایین خط نیمساز پخش شده اند که نشان از بی تفاوتی این مدل ها نسبت به کم شبیه ساز بودن یا بیش شبیه ساز بودن است، به عبارت دیگر، روش GPR مقادیر برآورد شده را کمتر یا بیشتر از مقدار اندازه گیری شده محاسبه نمی کند و دارای عملکرد مناسب جهت پیش بینی عمق آبستگی در پایین دست سازه کنترل شیب است.

نتایج مربوط به مدل های GPR برای عمق آبستگی پایین دست سازه کنترل شیب

نتایج حاصل از تحلیل الگوها برای عمق آبستگی پایین دست سازه کنترل شیب به صورت جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که نتایج این جدول نشان می دهد، الگو MS4 نسبت به سایر الگوها نتایج دقیق تری را ارائه داده است بطوریکه در این الگو معیارهای ارزیابی برای مرحله آموزش $MAE = 0.090$ ، $DC = 0.94$ و $CC = 0.86$ و برای مرحله آزمون $MAE = 0.167$ ، $DC = 0.81$ و $RMSE = 19.4\%$ می باشد. الگو MI4 دارای ۳ پارامترهای ورودی λ ، D_p/h و Fr_1 است که با مقایسه نتایج ملاحظه می گردد که عدد فرود بالادست به عنوان پارامتر ورودی سبب بهبود نتایج الگوها شده است. شکل ۵ رابطه خطی بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده در مرحله آموزش

جدول ۶- ارزیابی الگوهای با ورودی های مختلف برای پیش بینی عمق آبستگی پایین دست سازه های کنترل شیب مایل

الگوها	آموزش				آزمون			
	CC	DC	%RMSE(m)	%MAE(m)	CC	DC	%RMSE(m)	%MAE(m)
MI1	۰/۸۳	۰/۷۶	۲۱/۵	۱۷/۶	۰/۶۳	۰/۵۴	۳۱/۱	۲۸/۴
MI2	۰/۸۶	۰/۸۱	۱۹/۱	۱۶/۴	۰/۷۰	۰/۵۷	۲۸/۲	۲۴/۶
MI3	۰/۹۰	۰/۸۵	۱۶	۱۳	۰/۸۷	۰/۸۱	۱۹/۸	۱۶/۴
MI4	۰/۹۴	۰/۹۰	۱۲/۱	۹/۱	۰/۸۶	۰/۸۱	۱۹/۴	۱۶/۷
MI5	۰/۹۰	۰/۷۷	۱۵/۹	۱۲/۶	۰/۸۲	۰/۶۶	۲۳/۴	۱۹/۲
MI6	۰/۸۸	۰/۶۹	۱۷/۶	۱۴/۱	۰/۸۴	۰/۶۹	۲۲/۳	۱۸/۶
MI7	۰/۸۶	۰/۸۱	۱۹/۳	۱۵/۶	۰/۷۲	۰/۶۸	۲۷/۹	۲۳/۹
MI8	۰/۹۳	۰/۸۴	۱۳/۴	۱۱/۳	۰/۸۵	۰/۸۱	۲۱/۲	۱۷/۴
MI9	۰/۸۶	۰/۷۳	۱۸/۸	۱۴/۲	۰/۸۵	۰/۸۰	۲۰/۹	۱۶/۹

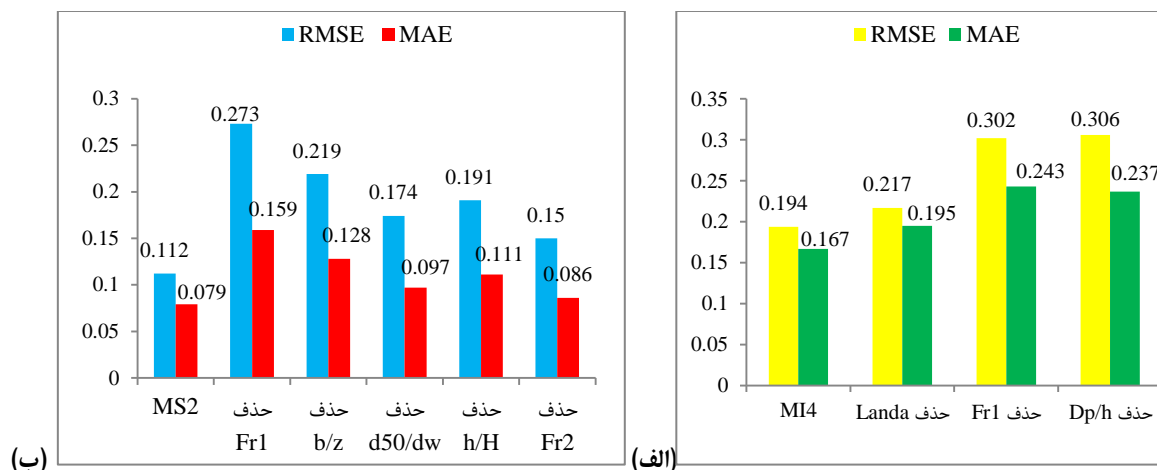


شکل ۵- نتایج مرحله آموزش و آزمون الگو برتر MI4 برای آبشستگی پایین دست سازه کنترل شیب

یافته است. ملاحظه می‌گردد که با حذف این پارامترها ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی نسبت به حذف سایر پارامترها تا حدود زیادی افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای عدد فرود بالادست جریان برای هر دو سازه و نسبت عرض سرریز به ارتفاع آب روی سرریز و نسبت ارتفاع سازه کنترل شیب به ارتفاع آب روی آن بیشترین تأثیر را به ترتیب در پیش‌بینی عمق آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز و سازه کنترل شیب دارا می‌باشند. درواقع با توجه به تأثیر چشمگیر حذف پارامترهای ورودی مذکور بر عمق آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل می‌توان به این نتیجه رسید که این پارامترها کلیدی‌ترین نقش را در تعیین رابطه عمق آبشستگی در الگوهای برتر دارند و علاوه بر هندسه سازه‌ها به لحاظ هیدرولیکی نیز می‌توان چنین گفت که تغییرات عمق آبشستگی متأثر از انرژی جریان در بالادست این سازه‌ها است.

نتایج مربوط به آنالیز حساسیت مدل برتر

جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در پیش‌بینی عمق آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز و سازه کنترل شیب از آنالیز حساسیت استفاده گردید. بدین منظور با حذف تک‌تک پارامترها از سری پارامترهای ورودی الگوی برتر، مدل GPR دوباره اجرا شد و میزان تأثیر حذف پارامتر در دقت مدل برتر با استفاده از پارامترهای آماری RMSE و MAE مورد بررسی قرار گرفت و نتایج شکل ۶ حاصل گردید. در شکل ۶ جهت مقایسه، پارامترهای آماری RMSE و MAE مربوط به مدل‌های برتر MS2 و MI4 و همچنین نتایج آماری مربوط به حذف تک‌تک پارامترهای ورودی آورده شده است. همان‌طور که از نتایج این شکل مشخص است با حذف پارامترهای b/z و Fr_1 در الگوی برتر MS2 برای عمق آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز و حذف پارامتر Dp/h و Fr_1 در الگوی برتر MI4 برای عمق آبشستگی پایین دست سازه کنترل شیب دقت مدل‌ها کاهش



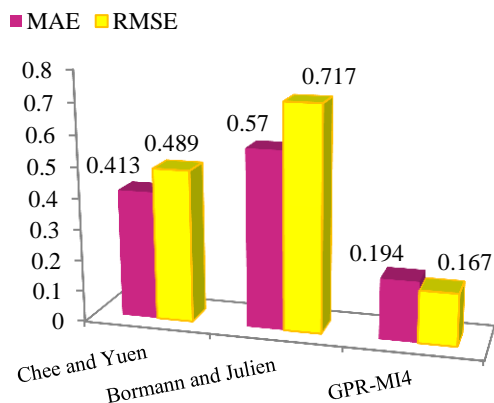
شکل ۶- نتایج آنالیز حساسیت مدل‌های برتر منتخب برای تخمین عمق آبشستگی پایین دست سازه کنترل شیب (الف) و سرریز لبه تیز (ب)

برخی روابط نیمه تجربی موجود برای تخمین عمق آبشستگی از داده‌های آزمون استفاده شده و نتایج حاصل باهم مقایسه گردید. جهت

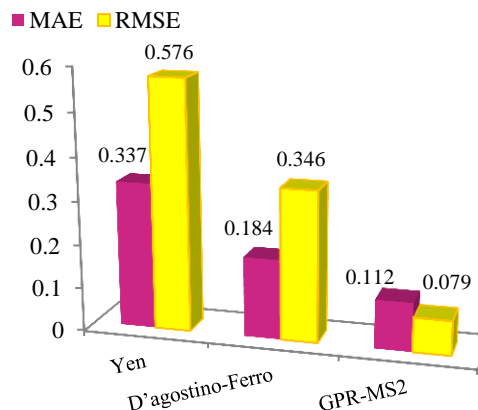
نتایج مربوط به مقایسه روش GPR و روابط نیمه تجربی برای ارزیابی عملکرد روش رگرسیون فرآیند گاوسی نسبت به

کنترلی مورد مطالعه موفق تر است. لازم به توضیح است که روابط کلاسیک موجود با توجه به شرایط خاص جریان و تحت فرضیات متفاوت توسعه داده شده‌اند و مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۷ قابلیت تعمیم دادن به همه شرایط را ندارند، درحالی که روش GPR در تمامی موارد جواب‌های قابل قبولی را ارائه داده و این امر حاکی از عملکرد مناسب آن می‌باشد.

تعیین دقت فرمول‌ها از معیار ارزیابی RMSE و MAE استفاده شد. نتایج این مقایسه در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که بین روابط تجربی، معادلات مربوط به D'agostino-Ferro (2004) و Chee and Yuen (1985) به ترتیب برای سازه کنترل شیب و سرریز لبه تیز نتایج دقیق‌تری را ارائه داده است. با این حال روش GPR کمترین خطا را نسبت به روابط نیمه تجربی دارا بوده و در تخمین عمق آبستنگی در سازه‌های



(ب)



(الف)

شکل ۷ - مقایسه روش GPR و روابط نیمه تجربی برای تخمین عمق آبستنگی پایین دست سرریز لبه تیز (الف) و سازه کنترل شیب (ب)

آنالیز حساسیت مشخص گردید که پارامترهای Fr_1 و b/z و پارامتر Dp/h و Fr_1 دارای بیشترین تأثیر در پیش‌بینی عمق آبستنگی به ترتیب در پایین دست سرریز لبه تیز و سازه کنترل شیب دارد. در واقع با توجه به تأثیر چشمگیر حذف پارامترهای ورودی مذکور بر عمق آبستنگی پایین دست سازه‌های کنترل می‌توان به این نتیجه رسید که این پارامترها کلیدی‌ترین نقش را در تعیین رابطه عمق آبستنگی در الگوهای برتر دارند و علاوه بر هندسه سازه‌ها به لحاظ هیدرولیکی نیز می‌توان چنین گفت که تغییرات عمق آبستنگی متأثر از انرژی جریان در بالادست این سازه‌ها است. مقایسه روابط نیمه تجربی و کلاسیک با نتایج حاصل از روش به کاررفته در تحقیق نشان داد که نتایج روش هوشمند GPR نسبت به روابط کلاسیک دقیق‌تر و قابل اعتمادتر می‌باشد.

منابع

راهنمای روش‌های محاسبه آبستنگی موضعی نشریه شماره ۳۱۸ معاونت امور آب و آبفا، وزارت نیرو، ۱۳۸۹.

حسن‌زاده، ی.، اعلمی، م.ت.، کاردان، ن. و جعفری باویل علیایی، ا. ۱۳۹۷. تخمین میزان عمق آبستنگی پایه پل با استفاده از سیستم استنتاجی عصبی - فازی تطبیقی بهینه سازی شده با

نتیجه گیری

الگوی سه بعدی جریان و نامحدود بودن تغییرات پارامترهای هندسی در تعیین عمق آبستنگی پایین دست سازه‌های کنترل (سرریز لبه تیز و سازه کنترل شیب) از یک سو و محدودیت اطلاعات قابل دسترس درباره هیدرولیک این سازه‌ها از سوی دیگر، چالشی است بزرگ که باعث شده تا به کارگیری سیستم‌های فرامدل و داده‌گرا مورد توجه محققان قرار گیرد. در این پژوهش برای تخمین عمق آبستنگی پایین دست سازه‌های کنترل از جمله سرریز لبه تیز و سازه کنترل شیب، از روش رگرسیون فرآیند گاوسی استفاده شد و تأثیر پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصله برای سرریز لبه تیز، الگو با پارامترهای ورودی $Fr_1, h/H, b/z$ و برای سازه کنترل شیب الگو با پارامترهای ورودی $d_{50}/d_w, Fr_2$ و $Dp/h, \lambda$ مدل برتر بوده و نسبت به سایر الگوها در تخمین عمق آبستنگی منجر به نتایج دقیق‌تری می‌گردند. برای الگو برتر با استفاده از داده‌های آزمون، برای سرریز لبه تیز مقادیر $MAE=7.9\%$ ، $RMSE=11.2\%$ ، $CC=0.93$ ، $DC=0.9$ و برای سازه کنترل شیب مقادیر $MAE=16.7\%$ ، $RMSE=19.4\%$ ، $CC=0.86$ ، $DC=0.81$ به دست آمد که عملکرد مناسب روش به کاررفته را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج

- Applied Soft Computing. 9.2: 746–755.
- Mueller, D. S. and Wagner, C. R. 2005. Field observations and evaluations of streambed scour at bridges. Rep. No. FHWA-RD-03-052, Office of Engineering Research and Development, Federal Highway Administration, 134.
- Najafzadeh, M., Etemad-Shahidi, A. and Lim, S.Y. 2016. Scour prediction in long contractions using ANFIS and SVM. *Ocean Engineering*. 111: 128-135.
- Pal, M., Singh, N. K. and Tiwari, N. K. 2012. M5 model tree for pier scour prediction using field dataset. *Journal of Civil Engineering*. 16.6: 1079–1084.
- Pal, M. and Deswal, S. 2010. Modelling pile capacity using Gaussian process regression. *Computer. Geotechnical*. 37: 942-947.
- Rajaratnam, N., and Mazurek, K. 2003. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129.3:225-229.
- Strelchuck, D.L.1969. Scour at the base of spillway buckets. MS thesis, University of Windsor, Ontario.
- Wittler, R.J., Annandale, G.W., Abt, S.R., and Ruff, J.F. 1998. New technology for estimating plunge pool or spillway scour. Proceeding of 1998 annual conference of the association of state safety officials. October 11-14 Las Vegas.
- Yang, D., Zhang, X., Pan R., Wang, Y., and Chen, Z. 2018. A novel Gaussian process regression model for state-of-health estimation of lithium-ion battery using charging curve. *Journal of Power Sources*. 384: 387–395.
- Yen, C.-L. 1987 Discussion on 'Free jet scour below dams and flip buckets' by Peter J. Mason and Kanapathypilly Arumugam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113.9: 1200–1202.
- الگوریتم رقابت استعماری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲،۴: ۸۸۴–۸۷۲.
- روشنگر، ک.، قاسمپور، ر. و ثاقبیان، س.م. ۱۳۹۸. بررسی مقایسه‌ای پارامترهای هیدرولیکی تأثیرگذار بر آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای چسبنده و دانه‌ای با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گاوسی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲،۴: ۱۴۷۵–۱۴۸۵.
- ASCE, Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. 2000. *Artificial Neural Networks in hydrology. I: Preliminary concepts*. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE. 5.2: 115-123.
- Bohrer, J.G., Abt, S.R., and Wittler, R. J. 1998. Prediction plunge pool velocity decay of free falling rectangular jet. *Journal of Hydraulic Engineering*. 124.10: 1043-1048.
- Bormann, N., Julien, P. 1991. Scour Downstream of Grade-Control Structures. *Hydraulic Engineering*, ASCE, 117: 579-594.
- Chee, S. P., and Yuen, E. M. 1985. Erosion of unconsolidated gravel beds. *Canadian Journal of Civil. Engineering*, 12: 559-566.
- D'Agostino, V., Ferro, V. 2004. Scour on Alluvial Bed Downstream of Grade-Control Structures. *Hydraulic Engineering*, ASCE. 130: 24-37.
- Hoffmans, G.J.C.M. 1998. Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydraulic Engineering*. 124.4: 430-437
- Mason, P.J.1985. Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets. *Hydraulic Engineering*, ASCE. 111: 220-235.
- Mohammad, Z. K., Beheshti, A. A., Behzad, A. A. and Sabbagh-Yazdi, S. R. 2009. Estimation of current-induced scour depth around pile groups using neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system.

Investigation of Effective Hydraulic Parameters on Scouring at Downstream of Grade-Control Structures Using Gaussian Process Regression Method

K. Roushangar^{1*}, S. akhgar²

Received: May.18, 2019

Accepted: Aug.05, 2019

Abstract

Scour depth prediction downstream of control structures such as spillways and grade-control structures is one of the essential issues in the design of these structures. In the present study, the efficiency of the Gaussian Process Regression (GPR) method was evaluated to estimate the scour depth downstream of control structures. Various models were developed and the impacts of hydraulic parameters were evaluated. The results proved the high efficiency of the applied method in the research in estimating the scour depth compared to the semi-empirical equations. The best result for test series was obtained in the state of sharp crested weir with the values of $CC=0.93$, $DC=0.90$, $RMSE=11.2\%$ and $MAE=7.9\%$ and in the inclined slope controlled with the values of $CC=0.86$, $DC=0.81$, $RMSE=19.4\%$ and $MAE=16.7\%$. As well as, the sensitivity analysis results show that Fr_1 and b/z parameters and Fr_1 and Dp/h is the most important parameter affecting the scour depth simulation downstream of sharp crested weir and inclined slope controlled respectively. In fact, variations in the scour depth are influenced by geometry and flow energy in the upstream of these structures. The comparison of semi-empirical and classical relations with the results of the applied method in the research showed that the results of the intelligent GPR method are more accurate and reliable than the classical relations. So that the root mean square error decreased more than 80%.

Keywords: Scour, sharp crested weir, inclined slope controlled, GPR

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

2- Ph.D. Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

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