

## بررسی مقایسه‌ای پارامترهای هیدرولیکی تاثیرگذار بر آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای چسبنده و دانه‌ای با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گاوسی

کیومرث روشنگر<sup>۱\*</sup>، رقیه قاسم‌پور<sup>۲</sup>، سیدمهدی ثاقبان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۱۷

### چکیده

پدیده آبشستگی در اطراف پایه‌های پل‌ها از مسایل مهم در علم مهندسی رودخانه می‌باشد. آبشستگی باعث ایجاد گودال در اطراف پایه‌های پل و در نهایت تخریب آن می‌گردد. تاکنون مطالعات بسیاری در این خصوص انجام شده و روابط متعددی برای تخمین پارامتر عمق آبشستگی ارائه گردیده است. با این حال، به دلیل تاثیر پارامترهای مختلف و وجود عدم قطعیت در پدیده آبشستگی روابط موجود منجر به نتایج جامع و دقیقی نمی‌گردند. در تحقیق کنونی با استفاده از چندین سری داده‌ی آزمایشگاهی کارایی روش هوشمند رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) در تخمین میزان عمق آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای چسبنده و دانه‌ای بررسی شد. مدل‌های مختلفی تعریف گردیده و تاثیر پارامترهای هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصله کارایی بالای روش به کار رفته تحقیق در تخمین عمق آبشستگی نسبت به روابط نیمه تجربی به اثبات رساند. ملاحظه گردید که مدل‌های تعریف شده برای خاک چسبنده نسبت به خاک دانه‌ای و غیرچسبنده در تخمین عمق آبشستگی موفق تر می‌باشند. بهترین نتایج برای داده‌های آزمون، در حالت ترکیب رس و ماسه مقادیر  $DC=0/80$ ،  $CC=0/952$ ،  $RMSE=0/132$ ،  $MAPE=15/23$ ، در حالت خاک رس مقادیر  $DC=0/883$ ،  $CC=0/986$ ،  $RMSE=0/054$ ،  $MAPE=11/82$  و برای خاک دانه‌ای مقادیر  $DC=0/769$ ،  $CC=0/889$ ،  $RMSE=0/191$ ،  $MAPE=18/21$  به دست آمد. نتایج نشان داد که پارامترهای مربوط به رطوبت نمونه خاک و درصد تراکم خاک رسی در پیش‌بینی عمق آبشستگی موثر می‌باشند. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت مشخص گردید که در حالت ترکیب رس و ماسه رطوبت خاک با داشتن میانگین درصد خطای مطلق  $24/42\%$ ، در حالت خاک رسی تنش برشی بی‌بعد و درصد تراکم خاک رسی به ترتیب با داشتن خطای  $43/49\%$  و  $47/04\%$  و در حالت خاک غیرچسبنده عدد فرود پایه با داشتن خطای  $28/65\%$  به ترتیب موثرترین پارامترها در تخمین عمق آبشستگی در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده هستند.

**واژه‌های کلیدی:** آبشستگی، پل، خاک‌های چسبنده، ذرات دانه‌ای رس، GPR

### مقدمه

متعددی از قبیل ویژگی‌های هیدرولیکی سیال، مشخصات هندسی پایه و مواد رسوبی بستگی دارد، مطالعه تاثیر کلیه این عوامل مشکل و غیرممکن است، بنابراین روابط ارائه شده تعداد محدودی از پارامترهای موثر در عمق آبشستگی را در نظر گرفته و نتایج قابل قبولی را ارائه نمی‌دهند (شفاعی بجزستان، ۱۳۸۷). طی دهه‌های اخیر مطالعات متنوعی در زمینه تخمین عمق آبشستگی پایه‌های پل انجام پذیرفته است. انصاری و همکاران نشان دادند که بیشینه عمق آبشستگی متعادل در خاک‌های چسبنده می‌تواند کوچک تر یا حتی بیش تر از خاک‌های غیرچسبنده باشد، به علاوه مقدار رطوبت مهم‌ترین فاکتور حاکم در خاک‌های چسبنده است (Ansari et al., 2002). لی و همکاران در بررسی مدل شبکه عصبی تخمین عمق آبشستگی در خاک‌های غیرچسبنده به این نتیجه رسیدند که مدل شبکه عصبی در مقایسه با روابط تجربی توانایی خوبی در پیش‌بینی عمق آبشستگی دارد (Lee et al., 2007). فیرات و گانگور ضمن بررسی مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی عمق آبشستگی نشان دادند که قطر پایه و

امروزه پدیده آبشستگی از مسایل مهم در علم مهندسی رودخانه و مهندسی سواحل است. قرارگیری سازه‌های مختلف در مسیر جریان رودخانه‌ها مستلزم تعبیه پایه‌هایی در این مناطق است که عملاً این پایه‌ها در معرض پدیده آبشستگی قرار خواهند داشت. تعیین عمق آبشستگی از این جهت دارای اهمیت می‌باشد که ۱- بیانگر میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه بوده و ۲- در طراحی ابعاد فونداسیون سازه‌هایی که در مسیر جریان آب قرار دارند نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. با توجه به این که عمق آبشستگی به پارامترهای

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

۲- دانشجوی دکتری گروه آب، دانشکده عمران دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

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

قرار گرفته‌اند. این روش‌ها که اکثراً الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت هستند به‌عنوان ابزاری توانمند در حل مسایل پیچیده به شمار می‌آیند و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشند (ASCE., 2000). با توجه به پیچیده بودن پدیده آبخستگی و استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در تخمین برخی از پارامترهای هیدرولیکی، در تحقیق کنونی کارایی روش رگرسیون فرآیند گاوسی (GRP) به‌عنوان یکی از روش‌های نوین داده‌کاوی در تخمین عمق آبخستگی پایه‌های پل در بسترهای چسبنده و دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های ورودی متفاوتی تعریف گردیده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر پارامترهای هیدرولیکی، مشخصات پایه و بستر مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از آنالیز حساسیت موثرین پارامترها در تخمین عمق آبخستگی تعیین شد. در نهایت، نتایج مدل (GRP) با روابط تجربی موجود مقایسه گردید.

## مواد و روش‌ها

### داده‌های مورد استفاده در تحقیق

جهت بررسی دقت مدل‌های تعریف شده از چند سری داده آزمایشگاهی مربوط به آبخستگی پایه‌های پل که توسط دپناس و پادوری (Depnath and Chaudhuri., 2010) و سازمان بزرگ راه‌های آمریکا (Federal Highway Administration, 1999 and 2003) انجام شده بود استفاده گردید. این آزمایش‌ها در بسترهای چسبنده و غیرچسبنده و با استفاده از ذرات با قطرهای متفاوت و با در نظر گرفتن پایه‌های استوانه‌ای شکل انجام گرفته بود. در جدول ۱ محدوده‌ی داده‌های استفاده شده در آزمایشات نشان داده شده است. پارامترهای به کار رفته در جدول به صورت عمق آبخستگی  $d_s$ ، سرعت جریان  $V$ ، قطر پایه  $D$ ، مقدار رس در ترکیب رس - ماسه  $C_p$ ، اندازه متوسط ذره رسوبی  $d_{50}$ ، شیب بستر  $S_0$  می‌باشند.

اندازه متوسط ذرات دارای بیش‌ترین تاثیر روی آبخستگی در خاک‌های غیرچسبنده می‌باشند (Firat and Gungor., 2009). دپنات و چادری با بررسی جامع آزمایشگاهی بر روی آبخستگی موضعی اطراف پایه‌های استوانه‌ای در بستر رسی و ترکیب رس - ماسه نشان دادند که برای تنش برشی متوسط، بیشینه عمق آبخستگی در بالادست و پایین‌دست پایه یکسان است (Depnath and Chaudhuri., 2010). مولر و واگنر عملکرد فرمول‌های نیمه‌تجربی موجود در مورد آبخستگی 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). بتانی و همکاران با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی روابط موجود را بررسی کرده و بیان کردند که روابط موجود تحت شرایط خاص آزمایشگاهی می‌توانند عملکرد مطلوبی داشته باشند و جامعیتی برای تعمیم به همه شرایط را ندارند (Bateni et al., 2007). محمد و همکاران با استفاده از روش تابع شعاع محوری شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به بررسی عمق آبخستگی 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 آبخستگی در نزدیکی پایه‌های پل پرداخته و نشان دادند که دقت این روش از شبکه عصبی مصنوعی بیش‌تر است (Pal et al., 2012). نجف‌زاده و همکاران با استفاده از روش‌های هوشمند ماشین بردار پشتیبان و سیستم استنتاج عصبی - فازی، عمق آبخستگی در کانال‌های مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نسبت اندازه ذرات به عرض کانال در تخمین عمق آبخستگی موثر است (Najafzadeh et al., 2016).

با توجه به مطالب بالا در دهه‌های اخیر روش‌های محاسباتی نرم برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده

جدول ۱- محدوده‌ی داده‌های مورد استفاده در تحقیق

پارامترها	بستر غیرچسبنده (Federal Highway Administration., 2003)		بستر چسبنده (Depnath and Chaudhuri., 2010) (Federal Highway Administration., 1999)	
	ماسه	رس	ترکیب رس و ماسه	رس
$d_s$ (cm)	۰-۳۰/۵	۰-۲۲/۹	۰/۷-۱۴/۷	
$C_p$	-	-	۰/۲ - ۱	
$D$ (cm)	۱/۹-۲۱/۶	۱۵	۱۲	
$d_{50}$ (cm)	۰/۰۵۵-۱/۰۶۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۸-۰/۰۱۴۷۲	
$V$ (cm/s)	۱۱-۲۴۷/۸	۲۳/۶-۸۵/۵	۴۹/۷- ۸۲/۷	
$S_0$	۰-۰/۰۰۴۱۸	۰/۰۰۲-۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	
تعداد داده‌ها	۱۰۵	۴۰	۵۶	

**رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)**

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 رابطه ۴ می‌باشد:

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

که در آن  $f(x)$  بیانگر تابع رگرسیون دل‌خواه و  $\varepsilon$  نیز مقدار نویز توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  می‌باشد، یعنی  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ . علاوه بر این، چنین فرض می‌گردد که 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 (رابطه ۵).

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

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

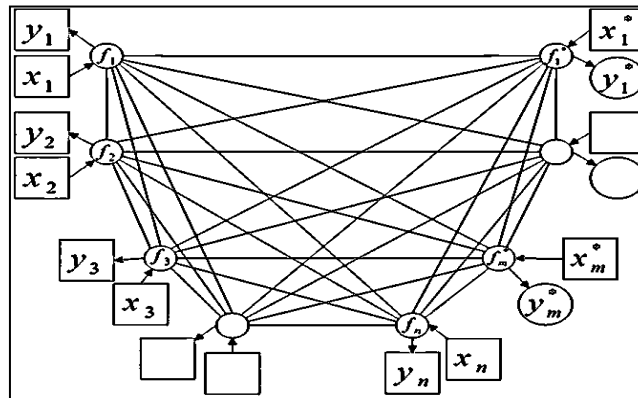
مجموعه داده  $S$  با  $n$  مشاهده را در نظر بگیرید  $S = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n\}$  که در آن بردار ورودی با  $D$  بعد و  $y_i$  خروجی اسکالر یا هدف می‌باشد. این مجموعه متشکل از دو جز ورودی و خروجی به عنوان نقاط نمونه یا تجربی معرفی خواهند شد. به منظور سهولت کار، ورودی‌های مجموعه در ماتریس  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  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 رابطه ۱ و ۲ تعریف می‌شود.

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

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

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 رابطه ۳ بیان گردد:

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



شکل ۱- مدل تصویری رگرسیون فرآیند گاوسی

می‌شود.

$$p(y|X) = \int p(y|f, X)p(f|X)df = N(0, K + \sigma_n^2 I) \quad (7)$$

توزیع ادغام شده مقادیر داده‌های مشاهداتی که خروجی موردنظر می‌باشند و نیز مقادیر تابع در نقاط تست به صورت رابطه ۸ نوشته می‌شوند.

در شکل ۱ مربعات نشان دهنده متغیرهای مشاهداتی و دایره نمایانگر مجهولات می‌باشند. توزیع  $y$  مشروط به مقادیر  $f$  بوده که با یک گاوسین ایزوتروپیک به شکل رابطه ۶ ارائه می‌شود.

$$p(y|f, X) = N(f, \sigma_n^2 I) \quad (6)$$

که در رابطه فوق،  $I$  ماتریس همانی می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های تابع گاوسی، توزیع حاشیه‌ای  $y$  به شکل رابطه ۷ تعیین

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 مسایل 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 چندجمله‌ای ساده، چندجمله‌ای نرمال شده، 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 ( $\gamma, d, w, \sigma$ ) است که نحوه تنظیم آن‌ها در حصول جواب هر چه بهتر مسئله بسیار موثر است.

$$\begin{bmatrix} y \\ f_* \end{bmatrix} \sim N \left( 0, \begin{bmatrix} K(X, X) + \sigma^2 I & K(X, X_*) \\ K(X_*, X) & K(X_*, X_*) \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

با توجه به رابطه ۳ و استفاده از قواعد استاندارد برای مقید نمودن گاوسین، می‌توان توزیع شرطی ۹ تا ۱۱ را بدست آورد.

$$p(f_* | X, y, X_*) \sim N(\bar{f}_*, cov(f_*)) \quad (9)$$

$$\bar{f}_* = K(X_*, X) [K(X, X) + \sigma^2 I]^{-1} y \quad (10)$$

$$cov(f_*) = K(X_*, X_*) - K(X_*, X) \times [K(X, X) + \sigma^2 I]^{-1} K(X, X_*) \quad (11)$$

### توابع کرنل

از روش‌های متداول برای حل مسایل غیرخطی استفاده از توابع کرنل است؛ این توابع بر اساس ضرب داخلی داده‌های مفروض تعریف

جدول ۲- انواع تابع کرنل

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

عمق آبستگي،  $Fr_p$ : عدد فرود پایه،  $Fr$ : عدد فرود جریان،  $D$ : عرض پایه،  $L$ : طول پایه،  $\theta p$ : زاویه برخورد جریان با پایه،  $K_1$ : ضریب شکل پایه،  $K_2$ : ضریب زاویه برخورد جریان با پایه،  $K_3$ : ضریب تصحیح برای شرط بستر،  $K_4$ : ضریب تصحیح برای اندازه مصالح بستر،  $\phi$ : ضریب شکل پایه و تأثیر طول پایه و هجوم آب به پایه را نشان می‌دهند.

### معادلات نیمه تجربی آبستگي

تاکنون روابط تجربی و نیمه تجربی متعددی برای برآورد آبستگي پایه پل ارایه شده است. در این تحقیق از روابط شن و همکاران (۱۹۶۹)، (ریچاردسون و دیویس ۲۰۰۱) CSU، اتما (۱۹۸۰) و فروهلیچ (۱۹۸۰) استفاده شده است. جدول ۳ روابط تجربی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این جدول پارامترهای  $ds$ :

جدول ۳- روابط نیمه تجربی به کار رفته در تحقیق

ملاحظات	معدله	محقق
$Fr_p < 0.2$	$ds = 11 Fr_p^2$	Shen et al.
$Fr_p > 0.2$	$ds = 3.4 Fr_p^{0.67}$	Shen et al.
$k_2 = [\sin\theta_p + (1/a) \cos\theta_p]^{0.65}$	$ds/y = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \times (D/y)^{0.65} Fr^{0.43}$	CSU
$D' = D \cos\theta_p + L \sin\theta_p$	$ds/D = 0.32 \phi (D'/D)^{0.65} \times (y/D)^{0.46} Fr^{0.2} (D/d_{50})^{0.08} + 1$	Froehlich
-	$ds/D = (D/d_{50})^{0.08} \times (y/D)^{0.62} Fr^{0.2}$	Ettema

کوچک‌تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می‌باشد. روابط این پارامترهای آماری به صورت روابط ۱۲ تا ۱۵ می‌باشند.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - \bar{l}_{mi}) \times (l_{pi} - \bar{l}_{pi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - \bar{l}_{mi})^2 \times (l_{pi} - \bar{l}_{pi})^2}} \quad (12)$$

### معیارهای ارزیابی

جهت ارزیابی دقت مدل‌ها پارامترهای آماری بسیاری وجود دارد. در این تحقیق جهت تعیین دقت مدل‌ها از سه معیار ارزیابی استفاده گردید که عبارتند از: (CC) ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، (DC) ضریب تبیین، (RMSE) ریشه میانگین مربعات خطاها و (MAPE) میانگین درصد خطای مطلق. هر چه مقدار CC و DC به یک نزدیک‌تر و مقدار RMSE و MAPE برای یک مدل

### انتخاب مدل‌های ورودی جهت مدل‌سازی عمق آبخستگی

انتخاب مدل‌های ورودی در سیستم‌های هوشمند تاثیر بسیاری بر دقت جواب‌های حاصل از تحلیل دارد، بنابراین در مدل‌سازی سعی گردید تا پارامترهای مناسب و موثر در تعیین عمق آبخستگی انتخاب گردد. مدل‌ها به صورت وابسته به پارامترهای هیدرولیکی، مشخصات پایه و بستر تعریف گردیدند. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط دپنات و چادوری (Depnath and Chaudhuri., 2010) و لی و همکاران (Lee et al., 2007) پارامترهای موثر در آبخستگی می‌توانند شامل پارامترهای سرعت جریان در بالادست پایه  $V$ ، تنش برشی بستر  $\tau$ ، قطر پایه  $D$ ، عمق جریان در بالادست پایه  $y$ ، اندازه متوسط ذرات  $d_{50}$ ، شیب بستر  $S_0$ ، مقدار رس در ترکیب رس - ماسه  $C_p$ ، درصد آب ترکیب رس - ماسه، درصد تراکم رس  $c$  و توزیع دانه‌بندی مواد بستر در حالت ذرات غیرچسبیده  $\sigma$  در شکل ۲، مدل‌های تعریف شده در حالت بی‌بعد نمایش داده شده‌اند. لازم به توضیح است که در این تحقیق برای تمامی حالات از ۷۵٪ داده‌ها برای آموزش و ۲۵٪ دیگر برای آزمودن مدل‌ها استفاده گردید.

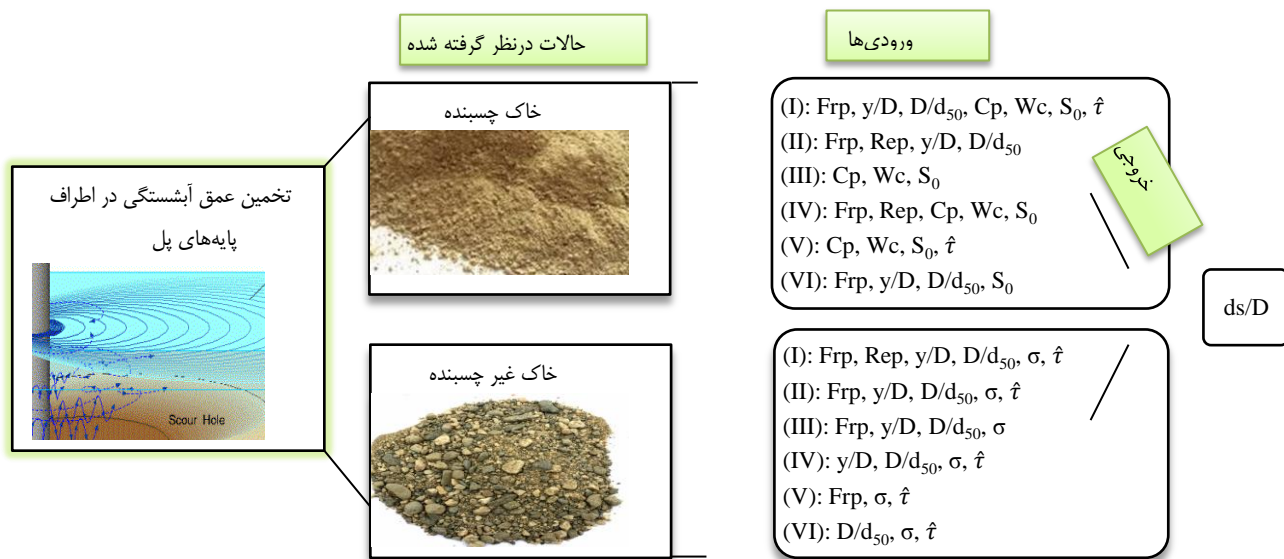
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - l_{pi})^2}{N}} \quad (13)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - l_{pi})^2}{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - \bar{l}_{mi})^2} \quad (14)$$

$$MAPE = \frac{1}{\bar{l}_{mi}} \frac{\sum_{i=1}^n |l_{mi} - l_{pi}|}{N} \times 100 \quad (15)$$

$l_{mi}$ : مقدار اندازه‌گیری شده،  $\bar{l}_{mi}$ : متوسط مقدار اندازه‌گیری شده،  $l_{pi}$ : مقدار پیش‌بینی شده،  $\bar{l}_{pi}$ : متوسط مقدار پیش‌بینی شده،  $N$ : تعداد داده‌ها. از آن‌جا که وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود بنابراین نرمال‌سازی کردن داده‌ها کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. در تحقیق کنونی داده‌ها مطابق رابطه ۱۶ نرمال‌شدند که در آن  $x_{min}$ ،  $x_{max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار داده‌های مشاهده شده و  $x_n$  داده نرمال شده می‌باشد.

$$x_n = 0.05 + 0.95 \left( \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (16)$$



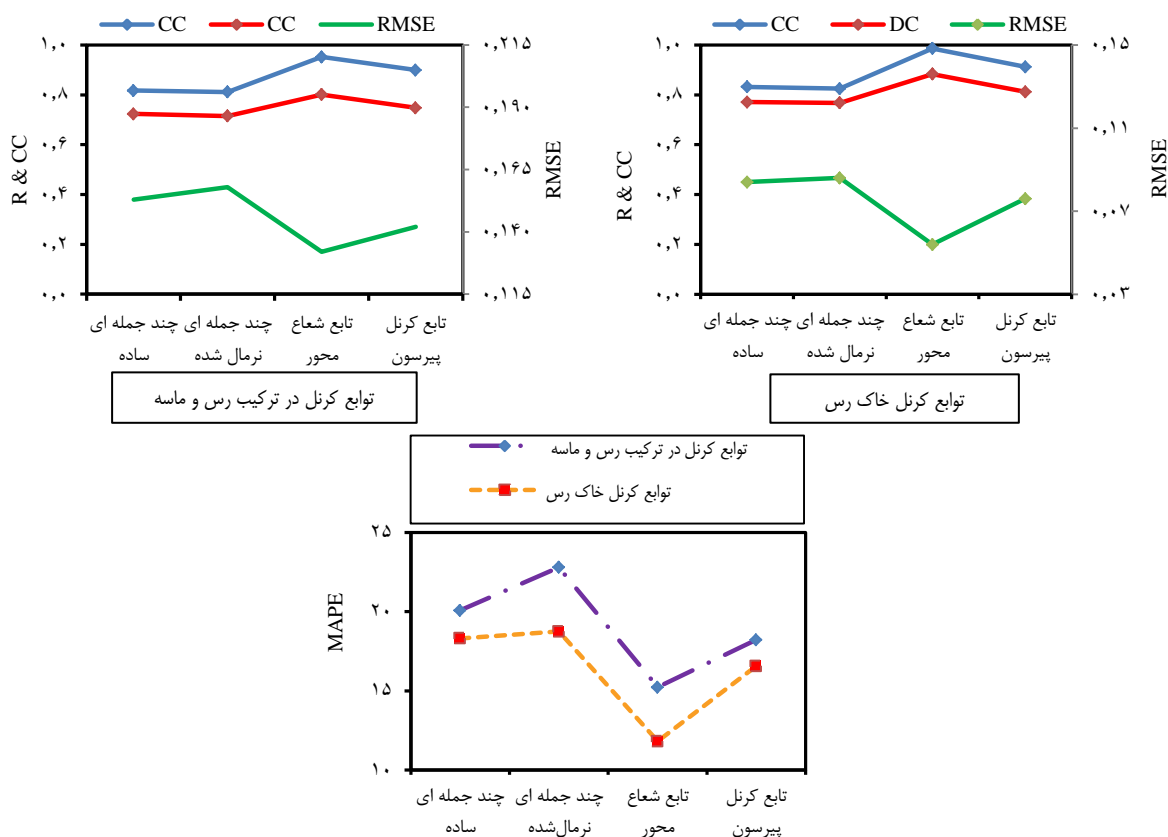
شکل ۲- مدل‌های تعریف شده در تحقیق

مطابق شکل ۳، نتایج نشان داد که تابع کرنل شعاع مداری در تخمین عمق آبخستگی در هر دو خاک نسبت به توابع کرنل دیگر بهتر عمل می‌کند. بنابراین در تجزیه و تحلیل تمامی مدل‌ها از کرنل شعاع مداری استفاده شد.

### نتایج و بحث

#### تعیین تابع کرنل مناسب برای رگرسیون فرآیند گاوسی

جهت انتخاب تابع کرنل مناسب رگرسیون فرآیند گاوسی مدل (I) در حالت خاک چسبیده با کرنل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۳- پارامترهای آماری مدل GPR با توابع کرنل متفاوت- مدل (I) خاک چسبیده

دو سری داده‌های آموزش و آزمون در مدل (I)، نسبت به سایر مدل‌ها کم‌ترین مقدار است. ملاحظه می‌گردد که استفاده از پارامترهای  $C_p$ ,  $\hat{t}$ ,  $Wc$  و  $Fr_p$  به عنوان ورودی مدل‌ها سبب بهبود دقت نتایج گردیده است. برای حالت ترکیب خاک رسی نیز مدل (I) مدل برتر می‌باشد. در این حالت نیز پارامترهای  $Re_p$ ,  $Wc$ ,  $C$ ,  $\hat{t}$  و  $Fr_p$  باعث افزایش کارایی مدل‌ها شده‌اند. پارامترهای  $Wc$  و  $C$  بیان‌گر تاثیر رطوبت نمونه خاک و درصد تراکم خاک رسی در پیش‌بینی عمق آبستگي می‌باشند. مطابق با نتایج ارایه شده، مدل‌های تعریف شده در حالت خاک رس تا حدودی دقیق‌تر از خاک ترکیب شده از رس و ماسه می‌باشد. شکل ۴ رابطه خطی بین حالت مشاهداتی و پیش‌بینی شده در مرحله آزمون و تست را برای مدل برتر هر دو خاک نشان می‌دهد.

#### نتایج مربوط به مدل‌های GPR برای خاک‌های غیرچسبیده

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها برای خاک‌های دانه‌ای و غیرچسبیده به صورت جدول ۵ و شکل ۵ ارایه شده است. همان‌طور که نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد برای این حالت، مدل (III) با پارامترهای ورودی  $\sigma$ ,  $D/d_{50}$ ,  $y/D$  و  $Fr_p$  نسبت به سایر مدل‌ها نتایج

#### نتایج مربوط به مدل‌های GPR برای خاک‌های چسبیده

جهت بررسی کارایی روش به‌کار رفته در تحقیق در تعیین میزان عمق آبستگي در خاک‌های چسبیده، از دو سری داده مربوط به آبستگي در اطراف پایه‌های پل استفاده گردید. داده‌ها به‌صورت بی‌بعد و مطابق رابطه ۱۶ به‌صورت پیش‌پردازش شده مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از متغیرهای مختلف مدل‌هایی تعریف گردید و با آنالیز مدل‌ها و مقایسه معیارهای ارزیابی در مرحله آموزش و تست، مدل برتر انتخاب گردید. مدلی به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد که ضریب همبستگی و همبستگی خطی آن نزدیک‌ترین مقدار به یک و ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین درصد خطای مطلق آن کم‌ترین مقدار را دارا بود. نتایج حاصله به صورت جدول ۴ و شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با نتایج ملاحظه می‌گردد که در حالتی که خاک از ترکیب رس و ماسه تشکیل شده است مدل (I) با پارامترهای ورودی  $\bar{t}$ ,  $S_0$ ,  $Wc$ ,  $D/d_{50}$ ,  $y/D$  و  $C$  و  $Fr_p$  با توجه به این که مقادیر DC و CC بیش‌تر و RMSE کم‌تری دارد، نسبت به سایر مدل‌ها دقیق‌تر بوده و مدل برتر است. میانگین درصد خطای بدست آمده از اجرای تمامی مدل‌ها در جدول ۴ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) برای هر

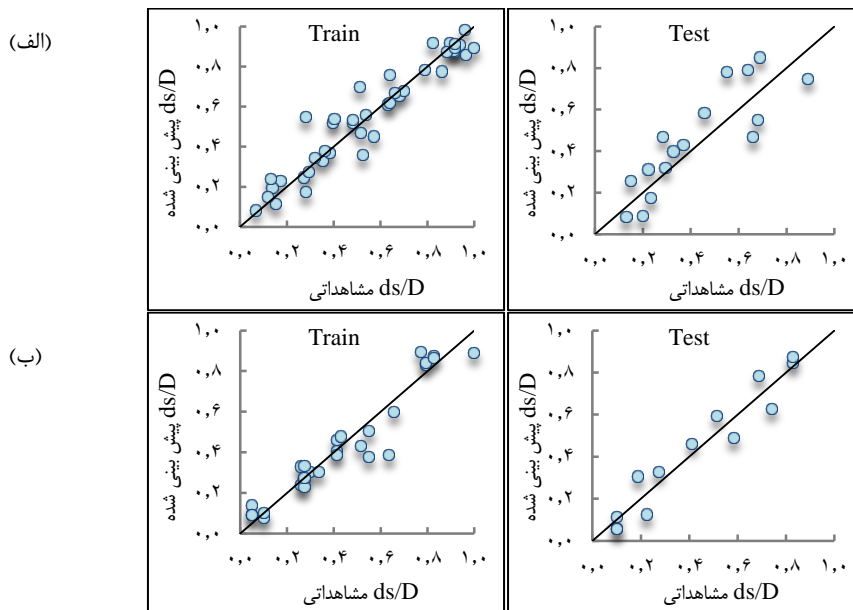
**نتایج مربوط به آنالیز حساسیت مدل برتر**

جهت بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در پیش‌بینی عمق آبشستگی در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده از آنالیز حساسیت استفاده گردید. بدین منظور با حذف تک تک پارامترها از سری پارامترهای ورودی مدل برتر GPR، مدل دوباره اجرا شد و میزان تاثیر حذف پارامتر در دقت مدل برتر با استفاده از پارامترهای آماری RMSE و MAPE مورد بررسی قرار گرفت و نتایج شکل ۶ حاصل گردید.

دقیق‌تری آرایه داده شده است. با مقایسه نتایج ملاحظه می‌گردد که عدد فرود پایه به عنوان پارامتر ورودی سبب بهبود نتایج مدل‌ها شده است. مقایسه نتایج جداول ۴ و ۵ نشان داد که مدل GPR در حالت خاک چسبنده منجر به نتایج بهتری است. شکل ۵ رابطه خطی بین حالت مشاهداتی و پیش‌بینی شده در مرحله آزمون و تست را برای مدل برتر خاک غیرچسبنده نشان می‌دهد.

**جدول ۴- نتایج ارزیابی مدل‌ها در حالت خاک چسبنده**

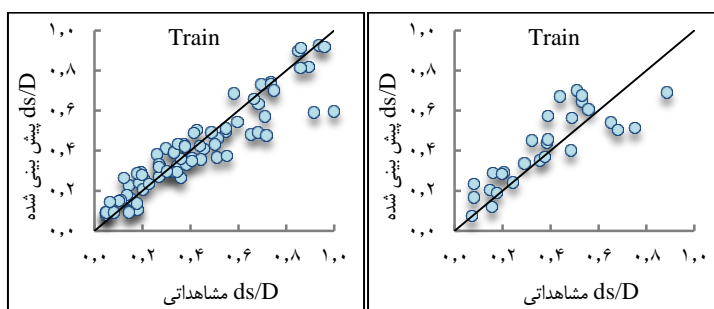
مدل	آزمون				تست			
	CC	DC	RMSE	MAPE %	CC	DC	RMSE	MAPE %
خاک ترکیب شده از رس و ماسه								
(I)	۰/۹۶۸	۰/۸۲۳	۰/۱۱۸	۱۳/۱۱	۰/۹۵۲	۰/۸۰۱	۰/۱۳۲	۱۵/۲۳
(II)	۰/۸۴۸	۰/۷۳۵	۰/۱۸۸	۲۰/۸۹	۰/۸۱۲	۰/۷۱۴	۰/۱۹۳	۲۴/۲۷
(III)	۰/۷۶۴	۰/۶۱۸	۰/۲۴۲	۲۶/۸۹	۰/۷۲۸	۰/۶۰۹	۰/۲۶۱	۳۵/۱۱
(IV)	۰/۹۴۴	۰/۸۰۱	۰/۱۲۱	۱۴/۴۴	۰/۹۱۵	۰/۷۹۹	۰/۱۴۱	۱۸/۲۷
(V)	۰/۹۳۳	۰/۷۸۴	۰/۱۴۸	۱۶/۴۴	۰/۹۰۲	۰/۷۳۸	۰/۱۵۵	۲۰/۰۸
(VI)	۰/۷۳۳	۰/۶۱۲	۰/۲۶۱	۳۰/۱۲	۰/۶۸۸	۰/۵۹۹	۰/۲۷۴	۳۹/۶۱
خاک رس								
(I)	۰/۹۸۸	۰/۸۹۳	۰/۰۴۵	۴/۵۳	۰/۹۸۶	۰/۸۸۳	۰/۰۵۴	۱۱/۸۲
(II)	۰/۹۶۴	۰/۸۲۸	۰/۰۶۶	۶/۶۴	۰/۹۵۶	۰/۸۱۳	۰/۰۷۱	۱۵/۵۳
(III)	۰/۷۸۵	۰/۶۳۳	۰/۲۲۹	۲۳/۰۵	۰/۷۲۱	۰/۶۹۹	۰/۲۴۱	۱/۰۴۸
(IV)	۰/۸۳۵	۰/۸۱۱	۰/۱۱۲	۱۱/۲۸	۰/۷۹۵	۰/۷۵۵	۰/۱۲۲	۲۶/۶۸
(V)	۰/۸۹۴	۰/۷۸۳	۰/۰۹۵	۹/۵۶	۰/۸۳۸	۰/۷۴۱	۰/۱۱۸	۲۴/۸۳
(VI)	۰/۷۱۴	۰/۶۸۹	۰/۲۱۵	۲۱/۶۴	۰/۷۰۸	۰/۶۵۵	۰/۲۲۴	۱/۹۲۴



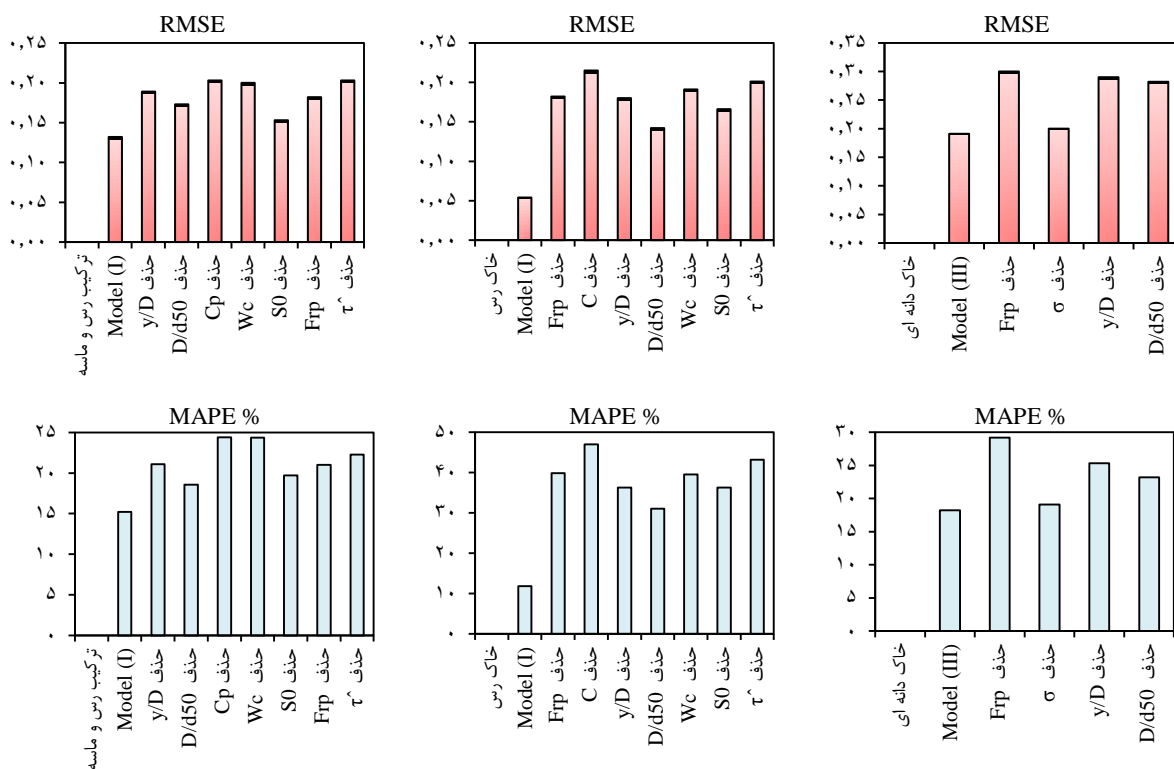
شکل ۴- نتایج مرحله آزمون و تست مدل برتر تعریف شده برای خاک چسبنده؛ (الف) ترکیب رس و ماسه، (ب) خاک رس

جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل‌ها در حالت خاک غیرچسبنده

مدل	آزمون				تست			
	CC	DC	RMSE	MAPE %	CC	DC	RMSE	MAPE %
خاک غیرچسبنده								
(I)	۰/۸۲۹	۰/۷۷۹	۰/۲۵۳	۱۳/۵۶	۰/۸۱۴	۰/۷۳۷	۰/۲۶۶	۲۶/۶۰
(II)	۰/۷۵۴	۰/۶۸۴	۰/۳۱۵	۱۸/۴۸	۰/۷۲۱	۰/۶۴۲	۰/۳۲۳	۳۳/۹۲
(III)	۰/۹۰۵	۰/۸۰۵	۰/۱۷۸	۹/۵۴	۰/۸۸۹	۰/۷۹۴	۰/۱۹۱	۱۸/۳۱
(IV)	۰/۶۳۸	۰/۶۱۹	۰/۳۶۷	۲۵/۸۵	۰/۶۲۳	۰/۶۰۳	۰/۳۷۱	۳۸/۹۶
(V)	۰/۷۹۴	۰/۷۱۲	۰/۲۸۱	۱۵/۰۶	۰/۷۳۸	۰/۶۹۹	۰/۲۹۷	۳۱/۱۹
(VI)	۰/۷۲۲	۰/۶۴۲	۰/۳۱۶	۱۹/۲۲	۰/۷۱۹	۰/۶۲۳	۰/۳۲۲	۳۴/۵۹



شکل ۵- نتایج مرحله آزمون و تست مدل برتر تعریف شده برای خاک غیرچسبنده



شکل ۶- نتایج آنالیز حساسیت مدل برتر GPR

همان طور که از نتایج این شکل مشخص است با حذف پارامترهای  $W_c$  و  $C_p$  در حالت ترکیب رس و ماسه، حذف پارامتر  $c$

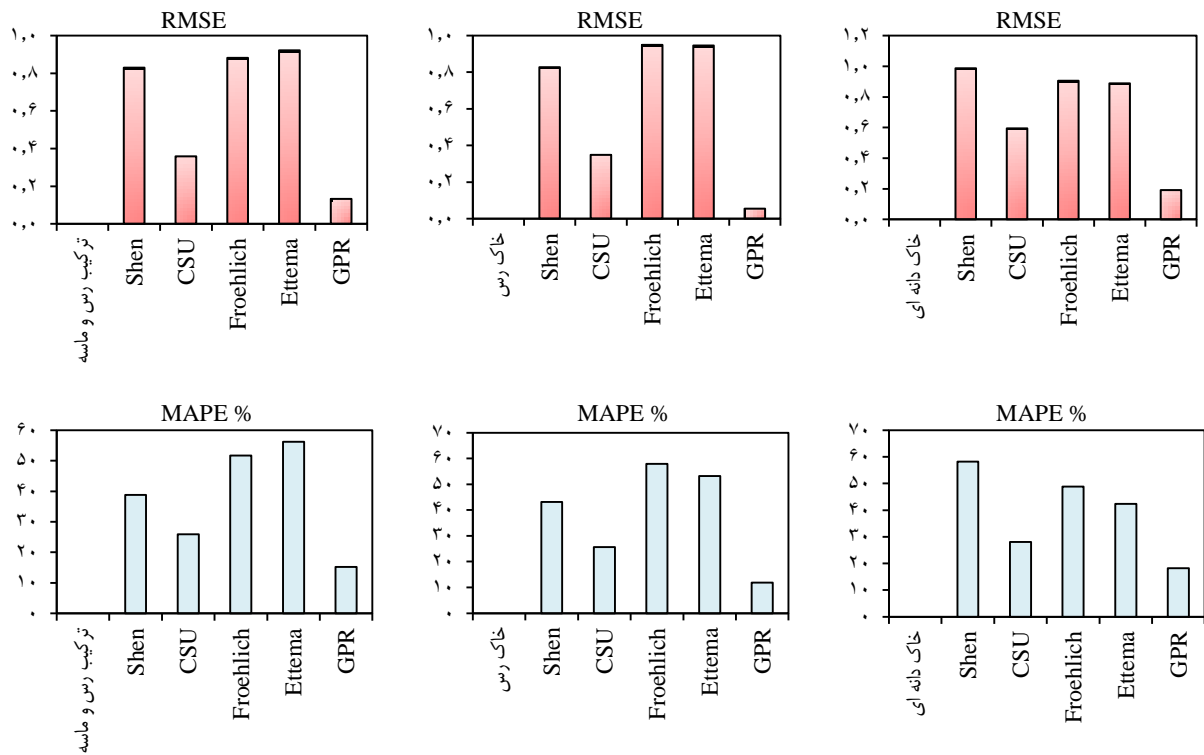


داده‌های آزمون استفاد شد و نتایج حاصل باهم مقایسه گردید. جهت تعیین دقت فرمول‌ها از معیار ارزیابی RMSE و MAPE استفاده شد. نتایج این مقایسه در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که بین تمامی روابط، معادلات مربوط به CSU نتایج دقیق‌تری را ارائه داده است. با این حال روش GRP به کمترین خطا را نسبت به روابط نیمه‌تجربی دارا بود و در تخمین عمق آبشستگی در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده موفق‌تر 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، در حالی که روش GRP در تمامی موارد جواب‌های قابل قبولی را ارائه داده و این امر حاکی از عملکرد مناسب آن می‌باشد.

ورودی  $\bar{\tau}$  در حالت خاک رسی و حذف پارامتر  $Fr_p$  در حالت خاک غیرچسبنده دقت مدل‌ها کاهش یافت. ملاحظه می‌گردد که با حذف این پارامترها ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای مطلق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (MAPE) نسبت به حذف سایر پارامترها تا حدود زیادی افزایش یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای رطوبت نمونه، تنش برشی بی‌بعد، درصد تراکم خاک رسی و عدد فرود پایه بیش‌ترین تاثیر را در تخمین عمق آبشستگی در خاک‌های چسبنده و دانه‌ای دارا می‌باشند.

### نتایج مربوط به مقایسه روش GPR و روابط نیمه‌تجربی

برای ارزیابی عملکرد روش رگرسیون فرآیند گاوسی نسبت به برخی روابط نیمه‌تجربی موجود برای تخمین عمق آبشستگی از



شکل ۷- نتایج مقایسه روش GPR و روابط نیمه‌تجربی

قابل اعتمادتر می‌باشد. همچنین ملاحظه گردید که مدل‌های تعریف شده برای خاک چسبنده در تخمین عمق آبشستگی نسبت به خاک دانه‌ای و غیرچسبنده نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. با توجه به نتایج حاصله برای خاک چسبنده، مدل با پارامترهای ورودی  $C, y/D, \hat{\tau}, S_0, Wc, D/d_{50}$  و  $Fr_p$  برای خاک غیرچسبنده مدل با پارامترهای ورودی  $\sigma, D/d_{50}, y/D$  و  $Fr_p$  مدل برتر بوده و نسبت به سایر مدل‌ها در تخمین عمق آبشستگی منجر به نتایج دقیق‌تری

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای تخمین عمق آبشستگی در دو خاک چسبنده و غیرچسبنده، از روش رگرسیون فرآیند گاوسی استفاده شد و تاثیر پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه روابط نیمه‌تجربی و کلاسیک با نتایج حاصل از روش به کار رفته در تحقیق نشان داد که نتایج روش هوشمند GPR نسبت به روابط کلاسیک دقیق‌تر و

- Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 216.
- Federal Highway Administration 2003. Bridge scour in non-uniform sediment mixtures and in cohesive materials. No. FHWA-RD - 03 - 083.
- Federal Highway Administration. 1999. Exprimenal study of scour around circular pier in cohesive soils. 4. No. FHWA- RD - 99 - 186.
- Firat,M and Gungor,M. 2009. Generalized regression neural networks and feed forward neural networks for prediction of scour depth around bridge piers. *Advances in Engineering Software*. 40: 731-737.
- Froehlich,D.C. 1987. Local Scour at Bridge Piers from Onsite Measurements, U.S. Geological Survey, Water Resources Division. 11: 534-539.
- Lee,T.L., Jeng,D.S., Zhang,G.H and Hong,J.H. 2007. Neural network modeling for estimation of scour depth around bridge piers. *Hydrodynamics*. 19.3: 378-386.
- 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. *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. *Civil Engineering*. 16.6: 1079-1084.
- Richardson,E.V and Davis,S.R. 2001. Evaluating Scour at Bridges. 4th edn. *Hydraulic Engineering Circular No. 18*, Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Shen,H.W., Schneider,V.R and Karaki,S.S. 1969. Local scour around bridge piers. *Hydraulic Division ASCE*. 95.6: 1919-1940.
- می‌گردند. برای مدل برتر با استفاده از داده‌های آزمون، در حالت ترکیب رس و ماسه مقادیر  $DC=0/801$ ،  $CC=0/952$ ،  $RMSE=0/132$ ،  $MAPE=15/23$ ، در حالت خاک رس مقادیر  $DC=0/883$ ،  $CC=0/986$ ،  $RMSE=0/054$ ،  $MAPE=11/82$  و برای خاک دان‌های مقادیر  $DC=0/769$ ،  $CC=0/889$ ،  $RMSE=0/191$ ،  $MAPE=18/31$  به دست آمد که عملکرد مناسب روش به کار رفته را نشان می‌دهد. هم‌چنین مشاهده شد که استفاده از پارامترهای  $Wc$ ،  $C_p$  و  $Fr_p$  به عنوان ورودی مدل‌ها سبب بهبود دقت نتایج می‌گردد. نتایج حاصله نشان داد که پارامترهای مربوط به رطوبت نمونه خاک و درصد تراکم خاک رسی در پیش‌بینی عمق آبستگي موثر می‌باشند. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت مشخص گردید که رطوبت خاک در حالت ترکیب رس و ماسه، تنش برشی بی‌بعد و درصد تراکم خاک رسی در حالت خاک رسی و عدد فرود پایه در حالت خاک غیرچسبنده به ترتیب بیش‌ترین تاثیر را در تخمین عمق آبستگي در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده دارا می‌باشند.

## منابع

شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ اول.

Ansari,S.A., Kothyari,U.C and Ranga Raju,K.G. 2002. Influence of cohesion on scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*. 40.6: 717-729.

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.

Bateni,S.M., Borghei,S.M and Jeng,D.S. 2007. Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 20.3: 401-414.

Depnath,K and Chaudhuri,S. 2010. Laboratory experimental on local scour around cylinder for clay - sand mixed beds. *Journal of Geology*. 111: 51 - 61.

Ettema,R.E. 1980. Scour at Bridge Piers. Department of

## Comparative Study of Effective Hydraulic Parameters on Bridge Piers Scouring in Cohesive and Grainy Soils Using Gaussian Process Regression Method

K. Roushangar<sup>1\*</sup>, R. Ghasempour<sup>2</sup>, S. M. Saghebian<sup>3</sup>

Received: May.27, 2018

Accepted: Agu.08, 2018

### Abstract

The phenomenon of scouring around bridge piers is one of the important issues in river engineering science. Scouring creates a trench around the bridge piers and ultimately destroys them. So far, many studies have been done in this regard and numerous relationships have been proposed to estimate the scour depth parameter. However, due to the influence of various parameters and uncertainty in the scouring phenomenon, existing relationships do not lead to accurate and comprehensive results. In the present study, using a series of experimental data, the efficiency of the Gaussian Process Regression (GPR) method was evaluated to estimate the scour depth of bridge piers in cohesive and grainy beds. 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. It was observed that the defined models for cohesive soils are more successful in estimating the scour depth than grainy and non-cohesive soil. The best result for test series was obtained in the state of soil with clay and sand with the values of  $CC=0.952$ ,  $DC=0.801$ ,  $RMSE=0.132$  and  $MAPE=15.23\%$ ; in clay soil state with the values of  $CC=0.889$ ,  $DC=0.883$ ,  $RMSE=0.054$  and  $MAPE=11.82\%$  and in non-cohesive soil state with the values of  $CC=0.988$ ,  $DC=0.796$ ,  $RMSE=0.191$  and  $MAPE=18.21\%$ . The results showed that soil moisture and clay soil density were effective in predicting scour depth. Based on the results of sensitivity analysis, in the state of soil with clay and sand moisture with mean absolute percentage error of 24.42%, in the state of clay soil shear stresses and the percentage of soils density with errors of 43.42% and 47.04%, respectively, and in non-cohesive soil state pier Froude number with error of 28.65% were respectively the most effective parameters in estimating the scour depth in cohesive and non-cohesive soils.

Keywords: Bridge, Clay, Cohesive soil, GPR, Grainy particles, Scouring

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

2- PhD Student of Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

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

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