

## مقاله پژوهشی

# بررسی تاثیر مشخصات جریان و ذرات رسوبی بر انتقال رسوبات ماسه‌ای در مقاطع دایروی با استفاده از روش‌های داده‌گرا

رامین وفایی پورسرخابی\*

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۹/۲/۲۱

استادیار گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [raminvafaei@yahoo.com](mailto:raminvafaei@yahoo.com)

### چکیده

پدیده رسوبگذاری به دلیل تاثیر آن در ظرفیت انتقال و عملکرد هیدرولیکی سازه‌های انتقال آب به عنوان یکی از مسائل مهم در مهندسی آب تلقی می‌شود. با توجه به تاثیر عوامل مختلف در پیش‌بینی میزان انتقال بار رسوبی، تعیین دقیق پارامترهای تاثیرگذار کاری دشوار و پیچیده است. در تحقیق حاضر کارایی روش‌های هوشمند رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) و سیستم استنتاج عصبی- فازی انطباقی (ANFIS) در پیش‌بینی رسوبات ماسه‌ای در لوله‌های دایروی شکل با بستر زبر و غیر زبر مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از چندین سری داده‌ی آزمایشگاهی، مدل‌های متفاوتی با در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی تعریف گردیده و در لوله‌های با بستر زبر و غیر زبر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصله دقت بالای روش به‌کار رفته در تحقیق را به اثبات رساند. مطابق با نتایج در برآورد مقدار بار رسوبی تنها استفاده از پارامترهای هیدرولیکی منجر به جواب‌های دقیقی نمی‌گردد و مشخصات ذرات رسوبی نیز در تخمین این پارامتر تاثیرگذار است. با انجام آنالیز حساسیت مشخص شد که عدد فرود ذرات رسوبی تاثیرگذارترین پارامتر در تخمین بار رسوبی در لوله‌های دایروی شکل است. همچنین نتایج حاصله نشان داد که زبری بستر و دیواره‌های لوله بر انتقال ذرات رسوبی موثر بوده و افزایش زبری باعث کاهش دقت نتایج می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بستر زبر، رسوبات ماسه‌ای، روش داده‌گرا، ظرفیت انتقال، لوله‌های دایروی شکل

## Investigating the Effect of Flow and Sediment Particles Characteristics on Sandy Sediments Transport in Circular Sections using Data Driven Methods

\*R Vafaeipousorkhabi

Received: July 3, 2018 Accepted: May 10, 2020

Assist. Prof., Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: raminvafaei@yahoo.com

### Abstract

Sedimentation is one of the important phenomena in water engineering due to its effect on the transport capacity and hydraulic performance of water transport structures. As there are numerous factors that affect this phenomenon, it is difficult to accurately determine the most influential parameters. In the present study, the efficiencies of intelligent Gaussian Process Regression (GPR) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) approaches in the prediction of sandy sediments in circular pipes with rough and smooth beds have been evaluated. Using several series of laboratory data, different models were defined with considering the impacts of hydraulic parameters and sediment particle characteristics and evaluated for rough and smooth pipes. The results showed a high accuracy of the methods used in the present research. According to the results in estimating the sediment load in circular pipes using only hydraulic parameters did not lead to accurate results, and the properties of sediment particles also affect the estimation process of this parameter. With performing sensitivity analysis, it was observed that the particle's Froude number is the most important parameter in the estimation of sediment load in circular pipes. Also, the results showed that the bed and walls roughness of pipes was effective in sediment transport and the increase of roughness values reduced the accuracy of the results.

**Keywords:** Circular pipes, Data driven approach, Rough bed, Sandy sediments, Transport capacity

### مقدمه

پدیده انتقال رسوب از جمله فرآیندهای هیدرودینامیکی مهمی است که بسیاری از سیستمهای فیزیکی و تأسیسات عمرانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از ابزارهایی که جهت انتقال آب یا فاضلاب شهری استفاده می‌شود لوله‌های با مقطع دایره‌ای شکل می‌باشد. ته‌نشینی ذرات رسوبی در این نوع لوله‌ها یکی از پدیده‌های متداول بوده که می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد آنها بگذارد. هرچه رسوبات مدت زمان بیشتری در لوله باقی بمانند احتمال اینکه خصوصیات مواد رسوبی تغییر کند و پیوستگی و چسبندگی آن بیشتر شود، وجود دارد. تغییر خصوصیات مواد رسوبی باعث

تغییر طبیعت سرعت و توزیع تنش برشی مرزی شده و بر روی ظرفیت انتقال رسوب و مقاومت هیدرولیکی لوله‌های انتقال آب و یا فاضلاب تأثیر می‌گذارد. بنابراین ضروری است تا ماهیت و چگونگی حرکت رسوب شناخته شود و همچنین مقدار مواد رسوبی منتقل شده به‌طور دقیق محاسبه گردد تا در طراحی سازه‌های انتقال آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد. به دلیل اهمیت پدیده‌ی رسوب و رسوب‌گذاری، تاکنون مطالعات بسیاری صورت گرفته و روابط متعددی برای پارامترهای مختلف مربوط به انتقال رسوب با استفاده از روش‌های مختلف ارائه شده است. می (۱۹۸۲)، رسوب‌گذاری در فاضلاب‌های انتقال‌دهنده‌ی آب باران

را مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایش وی منجر به ارائه مدل تئوری برای انتقال بار بستر در سیستم فاضلاب شد. لارسن (۱۹۵۶)، با مطالعات تجربی نشان داد که اگر لوله شیبدار باشد و آب و دبی رسوب، ثابت نگه داشته شود، رسوب‌گذاری تا زمانی که جریان کاملاً پر در لوله اتفاق بیفتد، ادامه خواهد داشت. برتراند و همکاران (۲۰۱۰)، طی کار تحقیقاتی خود در مورد فاضلاب‌ها به بررسی مشخصات مواد رسوبی و نحوه انتقال رسوب و رسوب‌گذاری و فرسایش آن‌ها پرداختند. دوران (۱۹۵۳)، به بررسی رسوب در لوله‌های صاف با قطرهای مختلف پرداخت. نتایج بررسی‌های او در حالت انتقال ذرات با رسوب‌گذاری محدود منجر به بیان پارامتر بدون بعد، به نام عدد فرود ذرات رسوب گردید. فلامکی و همکاران (۲۰۱۳)، تخمین بار رسوب را با استفاده از دو مدل شبکه عصبی و توابع پایه شعاعی بر روی ۲۰۰ نمونه را انجام داده و با روابط تجربی مقایسه نمودند. بر مبنای نتایج، روابط وایت و آکرس، در تخمین بار رسوب بسیار بیش‌برآورد تشخیص داده شد و مدل‌های ارائه شده بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی با مقادیر رسوب کل مشاهده شده، همخوانی بیشتری در نقاط پیک از خود نشان داد. رنات (۲۰۱۳)، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فرسایش در سیستم فاضلاب‌ها و داده‌های نرخ انتقال رسوب در لوله‌ها، به ارزیابی فرمول‌های تجربی موجود پرداخت. ونگ و ویس (۲۰۱۰)، در تحقیقی به بررسی معیارهای خود تمیزی در لوله‌های فاضلاب بر اساس سرعت و تنش برشی حداقل پرداخت؛ و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نتیجه مطالعه خود را به رسوبات غیر چسبنده و بدون رسوب‌گذاری و با جریان یکنواخت تعمیم داد. اوتا و پروسکیا (۲۰۱۳)، بر اساس مفهوم رسوب‌گذاری محدود، فرمولی جهت تعیین تنش برشی بستر در لوله‌های فاضلاب، ارائه دادند. بانگ (۲۰۱۴)، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی روابط مربوط به آستانه‌ی حرکت را مورد بررسی قرار داده و معیاری جهت تعیین حداقل

سرعت برای حالتی که رسوب‌گذاری در لوله ایجاد نشود، ارائه دادند. اندازه‌گیری دقیق میزان رسوب، موجب بهبود و بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های انتقال آب و فاضلاب می‌گردد، لذا استفاده از روش‌های هوشمندی که بتوانند این پارامتر را دقیق‌تر تخمین بزنند، ضروری است. در دهه‌های اخیر روش‌های 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 ابزاری توانمند در حل مسائل پیچیده به شمار می‌آیند و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشند (بی‌نام ۲۰۰۰). روشنگر (۲۰۱۴)، از روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی، برای پیش‌بینی بار کل رسوبی استفاده کردند. در این مطالعه نتایج با روش‌های تجربی شناخته‌شده مقایسه گردید. بهتر بودن دقت و عملکرد روش‌های هوش مصنوعی نسبت به روش‌های تجربی از نتایج این تحقیق می‌باشد. رضازاده و ستاری (۲۰۱۶)، با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گوسی به مدل‌سازی آبشستگی پایه پل پرداختند و نتایج نشان داد که این روش بیشترین کارایی و بالاترین دقت را در مقایسه با معادلات تجربی برای برآورد عمق آبشستگی با استفاده از مجموعه داده‌های میدانی را دارد. سیواپراگسام و لیئونگ (۲۰۰۱)، از مدل SVM برای پیش‌بینی بارش-رواناب حوضه تریگولید واقع در کشور هلند استفاده کردند. در تحقیق حاضر، مدل‌های رگرسیون فرایند گاوسی و سیستم استنتاج عصبی-فازی انطباقی بر اساس مشخصات جریان و ذرات رسوب تعریف گردیده و تأثیر آن‌ها در پیش‌بینی بار رسوبی ماسه‌ای بررسی شد. در نهایت با استفاده از تحلیل حساسیت، موثرترین پارامتر در تخمین دبی رسوبی تعیین شد.

#### مواد و روش‌ها

##### داده‌های مورد استفاده در تحقیق

بود. در جدول ۱، محدوده‌ی داده‌های استفاده شده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. پارامترهای به‌کار رفته در جدول به صورت ارتفاع زبری بستر  $k_0$  سرعت جریان  $V$ ، عمق نسبی جریان  $y_0/D$  اندازه متوسط ذره  $d_{50}$  نسبت دبی رسوبی به دبی جریان  $C$  و عدد رینولدز  $Re$  می‌باشند.

جهت بررسی دقت مدل‌های تعریف شده از چند سری داده آزمایشگاهی مربوط به دبی رسوبی در لوله‌های دایره‌ای شکل که توسط گانی (۱۹۹۳)، ونگ ویس (۲۰۱۰) و ال-زامی (۱۹۹۱) انجام شده بود، استفاده گردید. این آزمایش‌ها با استفاده از ماسه در لوله با قطرهای متفاوت با ارتفاع زبری متفاوت و در حالت جریان نیمه پر انجام گرفته

جدول ۱- محدوده‌ی داده‌های مورد استفاده در تحقیق

پارامترها	بستر زبر			
	El-Zaemey		Ghani	
با قطر لوله ۳۰۵ میلیمتری $k_0$ (mm)	۰/۸	۱/۴	۰/۵۳	۱/۳۴
$V$ (m/s)	۰/۴-۰/۸	۰/۴۷-۰/۸۲	۰/۴۱-۱	۰/۵۶-۰/۸۳
$y_0/D$	۰/۲۱-۰/۸	۰/۵۰-۰/۷۵	۰/۱۸-۰/۷۷	۰/۲۴-۰/۷۶
$d_{50}$ (mm)	۲-۸/۴	۲-۸/۴	۰/۹۷-۸/۳۰	۲/۰۰-۸/۳۰
$C$	۱۴-۹۸۲	۱۲-۱۰۰۱	۱-۹۲۳	۷-۴۰۳
$Re$ ( $\times 10^5$ )	۰/۱۲-۰/۴۵	۰/۱۱-۰/۵۸	۰/۰۷-۰/۵۶	۰/۱۳-۰/۵۶
تعداد داده‌ها	۳۲	۳۸	۷۱	۳۰

پارامترها	بستر غیر زبر			
	Ghani		Vongvisessomjai et al	
$D$ (mm)	۱۵۴	۳۰۵	۴۵۰	۱۵۰
$V$ (m/s)	۰/۲۴-۰/۸۶	۰/۳۹-۱/۲۰	۰/۵۰-۱/۲۰	۰/۰۸-۱/۵۰
$y_0/D$	۰/۱۵-۰/۷۵	۰/۲۱-۰/۸۰	۰/۵۰-۰/۷۵	۰/۳۷-۰/۷۵
$d_{50}$ (mm)	۰/۹۳-۵/۷۰	۰/۴۶-۸/۳۰	۰/۷۲	۰/۷۲
$C$	۳۸-۱۴۵	۱-۱۲۸۰	۲-۳۷	۰/۳۱-۴۴۳
$Re$ ( $\times 10^5$ )	۰/۱۳-۱/۴۳	۰/۸۷-۲/۷۰	۱/۰۴-۴/۶۰	۰/۷۵-۶/۵۰
تعداد داده‌ها	۳۹	۸۷	۲۷	۲۸

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 در معادلات ۱ تا ۳، آمده‌اند.

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

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

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 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،

### رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)

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. وظیفه‌ی 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،

مشروط به مقادیر  $f$  بوده که با یک گاوسین ایزوتروپیک به شکل زیر ارائه می‌شود:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 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 فرایند 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

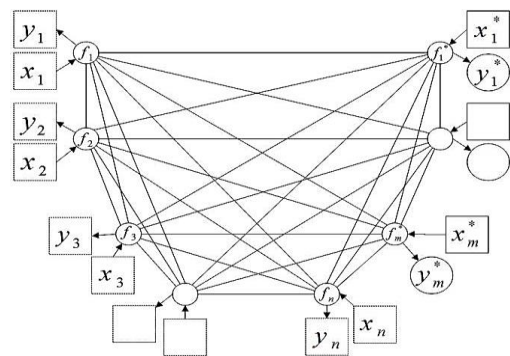
رابطه بین بردار ورودی و هدف، به فرم معادله‌ی ۴ می‌باشد.

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

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  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ . همچنین فرض،  $f = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]^T$  رفتار بر مبنای فرآیند گاوسی داشته به نحوی که  $p(f|X) = N(0, K)$  که در آن ماتریس کواریانس با درایه‌های  $k_{i,j} = k(x_i, x_j)$  می‌باشد.

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

$k_{i,j}$ ، 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.



شکل ۱- مدل تصویری رگرسیون فرآیند گاوسی

در شکل ۱ مربعات نشان دهنده متغیرهای مشاهداتی و دایره‌های نمایانگر مجهولات می‌باشند. توزیع  $y$

کرنل دارای پارامترهای مختلفی ( $\gamma, d, w, \sigma$ ) است که نحوه تنظیم آن‌ها در حصول جواب هرچه بهتر مسئله بسیار مؤثر است.

جدول ۲- انواع تابع کرنل.

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

روشی ترکیبی است که در آن بخش فازی رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی را برقرار می‌نماید و مشخصه‌های مربوط به توابع عضویت بخش فازی نیز به وسیله شبکه عصبی تعیین می‌شود (جانق ۱۹۹۳). روند کار به این صورت است که ابتدا ساختار مدل با مشخصه‌های مشخص، که متناسب با ورودی‌ها، درجه عضویت و قوانین و توابع درجه عضویت خروجی است، انتخاب می‌شود. سپس بخشی از داده‌های موجود به عنوان ورودی- خروجی که قابل استفاده برای آموزش این سیستم باشد، انتخاب می‌شود. در مرحله آموزش، با اصلاح مشخصه‌های درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مشخصه‌های مدل به مقادیر واقعی نزدیک می‌شوند. مدل سیستم استنتاج عصبی انطباقی شبکه‌ای چندلایه، متشکل از گره‌های فازی و کمان‌های اتصال‌دهنده گره‌ها است. سیستم فازی با مجموعه‌ای شامل  $N$  قاعده فازی بیان می‌گردد و شامل پنج لایه: گره‌های ورودی، گره‌های قاعده، گره‌های متوسط، گره‌های نتیجه و گره‌های خروجی است. ANFIS، که از الگوریتم‌های آموزشی شبکه عصبی سود می‌برد به کمک مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی، یک سیستم استنتاج فازی (FIS) ایجاد می‌کند. پارامترهای توابع عضویت این سیستم از طریق الگوریتم پس انتشار یا ترکیب آن با روش حداقل مربعات تنظیم می‌شوند.

### سیستم استنتاج عصبی- فازی انطباقی ANFIS

شبکه‌های عصبی (ANN) از شمار زیادی عناصر پردازشی به هم پیوسته به نام نرون ساخته شده‌اند که به صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این عناصر، تقلیدی بسیار ساده از فرآیندی است که توسط شبکه عصبی بیولوژیکی انجام می‌پذیرد. در طبیعت، عملکرد شبکه‌های عصبی از طریق نحوه اتصال بین اجزا تعیین می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند نگاشت یا تبدیل از فضای چندبعدی به فضای چندبعدی دیگر را انجام دهند و قابلیت‌هایی مانند شناسایی الگو، تفکیک الگو، نگاشت غیرخطی، حافظه انجمنی، خودسازمان‌دهی و کنترل را دارا هستند. یادگیری عصبی- انطباقی دارای عملکردی مشابه با شبکه‌های عصبی است. تکنیک‌های یادگیری عصبی- انطباقی روشی را برای ایجاد یک رویه مدل‌سازی فازی در راستای یادگیری اطلاعات از یک مجموعه داده فراهم می‌آورند. جعبه‌ابزار منطق فازی پارامترهای تابع عضویت را طوری محاسبه می‌کند که سیستم استنتاج فازی بر مجموعه داده‌های ورودی- خروجی منطبق گردد. چنین فرآیندی به وسیله منطق فازی و ابزارهای آن انجام می‌شود. مجموعه‌های فازی، توابع عضویت، عملگرهای منطقی و قوانین اگر- سپس، مؤلفه‌های فرآیند سیستم استنتاج فازی است. روش سیستم استنتاج عصبی- فازی انطباقی (ANFIS)

دقت شبکه می‌شود لذا نرمالیزه کردن داده‌ها کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. در تحقیق کنونی داده‌ها مطابق رابطه (۱۵) نرمالیزه شدند که در آن  $x_{\min}$  ،  $x_{\max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار داده‌های مشاهده شده و  $x_n$  داده نرمال شده می‌باشد.

$$x_n = 0.05 + 0.95 \left( \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \quad [15]$$

**انتخاب مدل‌های ورودی جهت مدل‌سازی دبی رسوبی**  
 انتخاب مدل‌های ورودی در سیستم‌های هوشمند تاثیر بسیاری بر روی دقت جواب‌های حاصل از تحلیل دارد، لذا در مدل‌سازی سعی گردید تا پارامترهای مناسب و مؤثر در تعیین دبی رسوبات ماسه‌ای انتخاب گردد؛ بنابراین مدل‌ها به دو صورت، وابسته به پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی تعریف گردید. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط مایرلی (۱۹۸۸) پارامترهای مؤثر در انتقال رسوب در لوله‌ها می‌توانند شامل پارامترهای سرعت حد  $V_s$ ، اندازه بدون بعد ذرات رسوب  $D_{gr}$ ، شعاع هیدرولیکی  $R$ ، عمق جریان  $y$ ، اندازه متوسط ذرات رسوب  $d_{50}$  وزن نسبی ذرات در آب  $s_s$  ضریب اصطکاک کلی  $k_s$  عدد فرود ذرات رسوب  $Fd$  باشند. در شکل ۲، مدل‌های تعریف شده بر اساس پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوبی نمایش داده شده‌اند. پارامترهای به کار رفته در تعریف مدل‌ها بر اساس فقط پارامترهای هیدرولیکی شامل Fr: عدد فرود جریان، Re: عدد رینولدز جریان، R: شعاع هیدرولیکی جریان و D: قطر لوله است. لازم به توضیح است که در این تحقیق برای تمامی حالات از ۷۵٪ داده‌ها برای آموزش و ۲۵٪ دیگر برای آزمودن مدل‌های استفاده گردیده است.

این عملیات تنظیم، به سیستم‌های فازی اجازه می‌دهد تا ساختار خود را از مجموعه داده‌ها فراگیرد. در این مدل شبکه عصبی و سیستم فازی در یک ساختار هماهنگ با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در واقع این مدل را می‌توان شبکه عصبی با پارامتر فازی و یا یک سیستم فازی با یادگیری توزیع شده دانست. بنابراین با ترکیب این دو، سیستم‌های فازی قالب قدرتمندی برای نمایش دانش متخصص فراهم می‌نمایند و سبب افزایش توان یادگیری شبکه عصبی می‌گردند.

### معیارهای ارزیابی

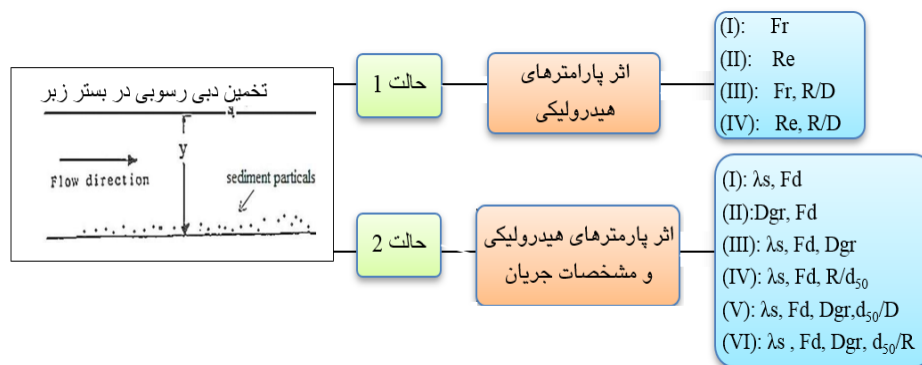
جهت ارزیابی دقت مدل‌ها پارامترهای آماری بسیاری وجود دارد. در این تحقیق جهت تعیین دقت مدل‌ها از سه معیار ارزیابی استفاده گردیده است که عبارت‌اند از: (CC) ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، (DC) ضریب تبیین و (RMSE) ریشه میانگین مربعات خطاها. هر چه مقدار CC و DC به یک نزدیک‌تر و مقدار RMSE برای یک مدل کوچک‌تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می‌باشد. روابط این پارامترهای آماری به صورت زیر می‌باشند:

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

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

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

$l_{mi}$ : 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



شکل ۲- مدل‌های مختلف بر اساس پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات رسوب.

## نتایج و بحث

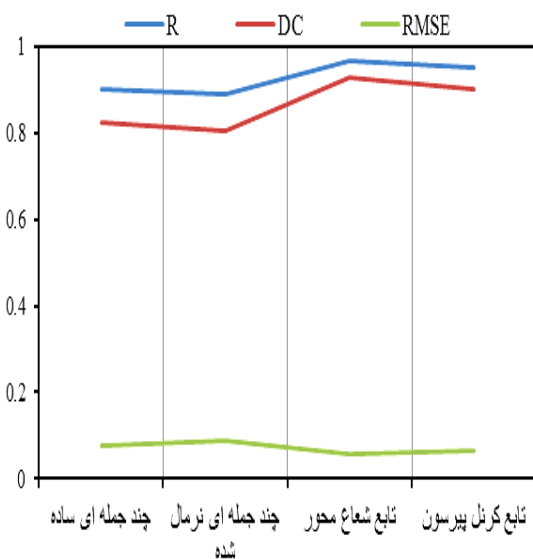
### نتایج مربوط به مدل‌های GPR و ANFIS با در نظر

#### گرفتن تنها مشخصات جریان

جهت بررسی کارایی روش به‌کار رفته در تحقیق، در تعیین میزان رسوبات ماسه‌ای در لوله‌های دایره‌ای شکل، در این تحقیق از دو سری داده مربوط به انتقال رسوب در بستر صاف و بستر زبر استفاده گردید. داده‌ها به‌صورت بی‌بعد و مطابق فرمول ۱۵، به‌صورت پیش‌پردازش شده، مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از متغیرهای مختلف مدل‌های ورودی تعریف گردید؛ و با آنالیز مدل‌ها و مقایسه‌ی معیارهای ارزیابی در مرحله آموزش و تست برای تمام مدل‌ها، مدل برتر برای هر نوع بستر انتخاب گردید. مدلی به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد که ضریب همبستگی (CC) و همبستگی خطی (DC) آن نزدیک‌ترین مقدار به یک و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) آن کمترین مقدار را دارا بود. در ابتدا تاثیر مدل‌سازی بر اساس تنها مشخصات جریان مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای ورودی به‌کار رفته در این حالت شامل عدد فرود، عدد رینولدز و قطر لوله می‌باشد. نتایج حاصله به صورت جدول ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با نتایج ملاحظه می‌گردد که در مدل‌هایی که تنها بر اساس پارامترهای هیدرولیکی تعریف شوند نتایج مطلوبی حاصل نمی‌گردد. برای این حالت و برای دو لوله زبر و غیر زبر مدل (III) با پارامترهای ورودی  $R/D$  و  $Fr$  با توجه به اینکه مقادیر  $DC$  و  $CC$  بیشتر و  $RMSE$  کمتری دارد، نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که نتایج روش GPR تا حدودی نسبت

### تعیین تابع کرنل مناسب برای رگرسیون فرآیند گاوسی

جهت انتخاب تابع کرنل مناسب رگرسیون فرآیند گاوسی مدل (VI) بستر زبر با کرنل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق شکل ۳، نتایج نشان داد که تابع کرنل شعاع مداری در تخمین میزان رسوب در لوله‌های دایره‌ای شکل با رسوبات ماسه‌ای بهتر عمل می‌کند. بنابراین تمامی مدل‌ها در دو حالت بستر زبر و غیر زبر با استفاده از کرنل شعاع مداری تحلیل شدند. برای انتخاب بهینه‌ترین پارامترهای تابع کرنل نیز از روش سعی و خطا استفاده شد و با آزمون مقادیر مختلف مقدار بهینه این پارامترها انتخاب گردید.



شکل ۳- پارامترهای آماری مدل GPR با توابع کرنل متفاوت- مدل (VI) بستر زبر.



شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق نتایج جدول ۴ برای هر دو بستر زبر و غیر زبر مدل (VI) با پارامترهای  $(\lambda s, Fd, Dgr, d_{50}/R)$  مدل برتر گردید. نتایج حاصله برای لوله با بستر صاف یا غیر زبر اندکی دقیق‌تر از بستر زبر می‌باشد. با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های تعریف شده برای هر دو لوله در جدول چنین به نظر می‌رسد که لحاظ کردن پارامتر شعاع هیدرولیکی (یا عمق جریان)، اندازه نسبی ذرات و ضریب اصطکاک کلی در دو بستر صاف و زبر سبب افزایش دقت مدل‌های تخمین دبی رسوبی گردیده است. با مقایسه نتایج جداول ۳ و ۴ ملاحظه می‌گردد که استفاده از هر دو مشخصات جریان و ذرات رسوبی در مدل‌سازی بار رسوبی در لوله‌ها دایره‌ای شکل، نتایج دقیق‌تری بدست آمده است. نمودارهای مربوط به مدل برتر، دو حالت بستر زبر و غیر زبر برای دو مرحله آزمون و تست در شکل ۵، نشان داده شده است. مطابق با این شکل همبستگی مناسبی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بار بستر دیده می‌شود.

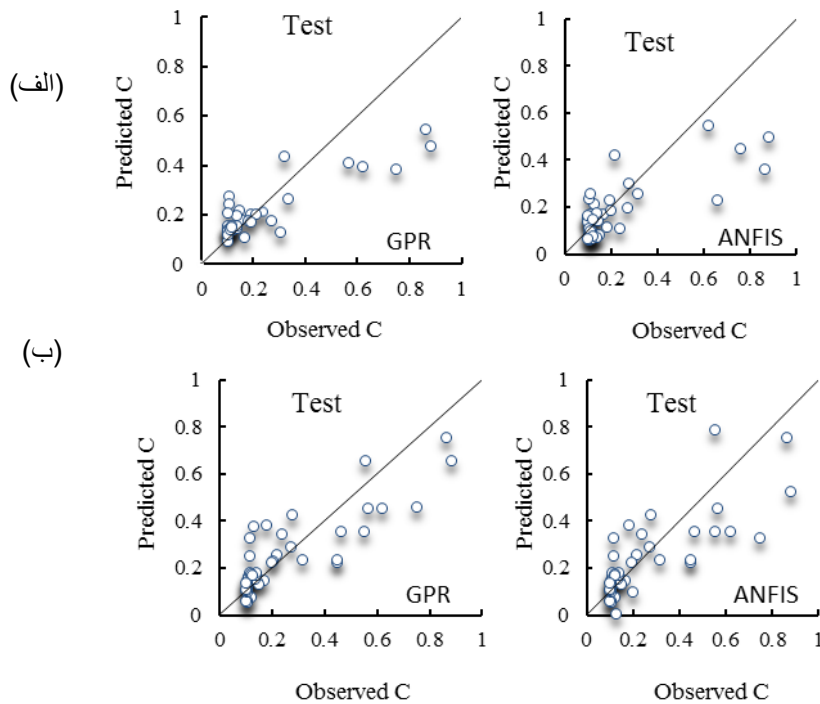
به روش ANFIS بهبود یافته است. شکل ۴، رابطه‌ی خطی بین حالت مشاهداتی و پیش‌بینی شده در مرحله آزمایش را برای مدل برتر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد برای مقادیر کم رسوب، مدل توانایی تخمین نسبتاً دقیق بار رسوبی را دارا می‌باشد اما در مقدارهای بالاتر قادر به تخمین دقیقی نیست. به‌طورکلی از نتایج به‌دست‌آمده چنین به نظر می‌رسد که تنها استفاده از پارامترهای مربوط به مشخصات جریان به‌عنوان ورودی مدل‌ها، نمی‌تواند مطابقت مناسبی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی نشان دهد.

### نتایج مربوط به مدل‌های GPR و ANFIS با در نظر گرفتن مشخصات جریان و ذرات رسوب

جهت بررسی تفاوت بین مدل‌های تعریف شده در حالتی که بار رسوبی تنها وابسته به مشخصات جریان می‌باشد باحالتی که از هر دو مشخصات مربوط به ذرات رسوبی و جریان استفاده گردیده است، چندین مدل با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات برای تخمین بار رسوبی تعریف گردید. مدل‌های برتر و نتایج کلی حاصل از آنالیز مدل‌ها در جدول ۴ و

جدول ۳ - نتایج ارزیابی مدل.

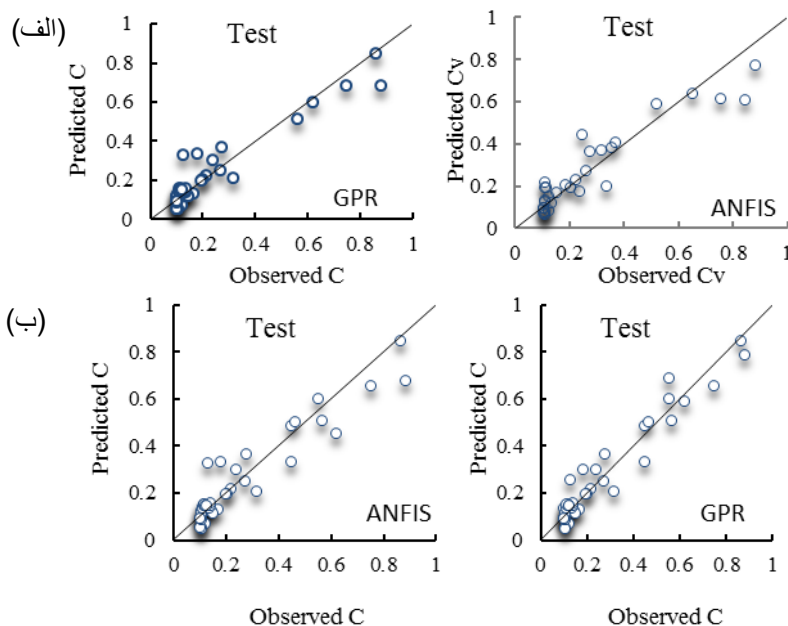
مدل		آزمون			تست		
		CC	DC	RMSE	CC	DC	RMSE
بستر زبر							
(I)	GPR	۰/۸۱	۰/۶۸	۰/۱۰۲	۰/۷۵۵	۰/۵۳۴	۰/۱۲۱
	ANFIS	۰/۷۹۲	۰/۶۴	۰/۱۰۹	۰/۷۲۲	۰/۵۱۴	۰/۱۲۸
(II)	GPR	۰/۶۶	۰/۵۵	۰/۱۶۳	۰/۶۴۸	۰/۴۴۸	۰/۱۸۳
	ANFIS	۰/۶۳۱	۰/۵۴۵	۰/۱۶۸	۰/۶۳۴	۰/۴۲۱	۰/۱۸۹
(III)	GPR	۰/۸۲۱	۸۰۰/۷	۰/۰۹۰۷	۰/۷۹۸	۰/۶۳	۰/۱۰۵
	ANFIS	۰/۸۱۳	۰/۷۰۰	۰/۰۹۱	۰/۷۹۳	۰/۶۲	۰/۱۰۷
(IV)	GPR	۰/۸۰۴	۰/۶۲	۰/۱۰۸	۰/۷۴	۰/۵۲	۰/۱۲۴
		۰/۷۹۸	۰/۶۱۸	۰/۱۱۸	۰/۷۵	۰/۵۰۷	۰/۱۲۹
بستر غیر زبر							
(I)	GPR	۰/۸۹۰	۰/۷۸۰	۰/۰۹۵	۰/۸۵۰	۰/۶۳۶	۰/۱۲۱
	ANFIS	۰/۸۶۲	۰/۷۷۶	۰/۱۰۰	۰/۸۲۰	۰/۶۱۳	۰/۱۲۷
(II)	GPR	۰/۶۹۱	۰/۵۸۴	۰/۱۶۱	۰/۶۵۲	۰/۵۴۶	۰/۱۷۱
	ANFIS	۰/۶۶۷	۰/۵۶۴	۰/۱۶۹	۰/۶۲۹	۰/۵۲۷	۰/۱۸۰
(III)	GPR	۰/۸۹۰	۰/۸۱	۰/۰۹۲	۰/۸۵۹	۰/۶۵۰	۰/۰۹۴
	ANFIS	۰/۹۶۹	۰/۷۸۹	۰/۱۰۰	۰/۸۲۰	۰/۶۳۴	۰/۱۱۰
(IV)	GPR	۰/۸۸۰	۰/۷۷۱	۰/۱۰۲	۰/۸۶۰	۰/۶۲۳	۰/۱۲۴
	ANFIS	۰/۸۴۹	۰/۷۵۳	۰/۱۰۸	۰/۸۳۱	۰/۶۱۸	۰/۱۲۹



شکل ۴- نتایج مرحله آزمون و تست مدل برتر تعریف شده بر اساس مشخصات جریان (الف) بستر غیر زیر، (ب) بستر زیر.

جدول ۴ - نتایج ارزیابی مدل‌ها.

مدل		آزمون			تست		
		CC	DC	RMSE	CC	DC	RMSE
بستر زیر							
(I)	GPR	۰/۴۸	۰/۳۵۴	۰/۱۵۶	۰/۴۴۵	۰/۳۱	۰/۱۹۹
	ANFIS	۰/۴۶۳	۰/۳۴۲	۰/۱۶۴	۰/۴۲۹	۰/۲۹۹	۰/۲۰۹
(II)	GPR	۰/۶۹۸	۰/۴۶۶	۰/۱۴۲	۰/۶۵۹	۰/۴۳۸	۰/۱۴۹
	ANFIS	۰/۶۷۴	۰/۴۵۰	۰/۱۴۹	۰/۶۳۶	۰/۴۲۳	۰/۱۵۳
(III)	GPR	۰/۸۹	۰/۸۲۱	۰/۰۷۳۸	۰/۸۸۱	۰/۸۱	۰/۰۷۴۱
	ANFIS	۰/۸۵۹	۰/۷۹۲	۰/۰۷۷	۰/۸۵۰	۰/۷۸۲	۰/۰۷۹
(IV)	GPR	۰/۹۲	۰/۹۰۱	۰/۰۶۹۵	۰/۸۹	۰/۸۹۸	۰/۰۷۶۱
	ANFIS	۰/۸۸۸	۰/۸۶۹	۰/۰۷۳	۰/۸۵۹	۰/۸۶۷	۰/۰۷۲۹۸
(V)	GPR	۰/۹۳	۰/۸۷۳	۰/۰۷۰۲	۰/۸۸۳	۰/۸۴۱	۰/۰۷۳۰
	ANFIS	۰/۸۹۷	۰/۸۴۲	۰/۰۷۴	۰/۸۵۲	۰/۸۱۲	۰/۰۷۳۵
(VI)	GPR	۰/۹۹۲	۰/۹۵۴	۰/۰۵۸۸۰	۰/۹۶۸	۰/۹۲۸	۰/۰۶۱۳۰
	ANFIS	۰/۹۵۷	۰/۹۲۸	۰/۰۶۰۵	۰/۹۳۴	۰/۹۰۵	۰/۰۶۲۸
بستر غیر زیر							
(I)	GPR	۰/۵۸	۰/۳۷	۰/۱۸۸	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۱۸۲
	ANFIS	۰/۵۶۰	۰/۳۵۷	۰/۱۹۷	۰/۴۵۴	۰/۳۵۷	۰/۱۸۸
(II)	GPR	۰/۷۴۸	۰/۵۵۳	۰/۱۳۵	۰/۷۲۹	۰/۵۲۸	۰/۱۴۳
	ANFIS	۰/۷۲۲	۰/۵۳۴	۰/۱۴۲	۰/۷۰۳	۰/۵۱۰	۰/۱۴۷
(III)	GPR	۰/۹۰۱	۰/۸۶	۰/۰۶۸۶	۰/۸۸۳	۰/۸۲۲	۰/۰۷۲۱
	ANFIS	۰/۸۶۹	۰/۸۳۰	۰/۰۷۰۵	۰/۸۵۲	۰/۷۹۳	۰/۰۷۶۸
(IV)	GPR	۰/۹۲۹	۰/۸۸۷	۰/۰۶۳۱	۰/۸۹۱	۰/۸۲۳	۰/۰۷۱۲
	ANFIS	۰/۹۰۳	۰/۸۵۶	۰/۰۶۸۱	۰/۸۷۰	۰/۸۰۴	۰/۰۷۳۴
(V)	GPR	۰/۹۵۳	۰/۹۰۶	۰/۰۶۳۸	۰/۸۸۹	۰/۸۲۶	۰/۰۷۰۹
	ANFIS	۰/۹۳۸	۰/۸۷۴	۰/۰۶۴۲	۰/۸۶۸	۰/۸۱۳	۰/۰۷۱۲
(VI)	GPR	۰/۹۸۳	۰/۹۷۸	۰/۰۵۱	۰/۹۶۳	۰/۹۳۳	۰/۰۵۵
	ANFIS	۰/۹۵۹	۰/۹۶۳	۰/۰۵۴	۰/۹۲۹	۰/۹۱۲	۰/۰۶۱



شکل ۵- مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده برای دو حالت آزمون و تست مدل برتر (الف) بستر غیر زبر، (ب) بستر زبر.

### آنالیز حساسیت

جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در پیش‌بینی میزان رسوب در لوله‌های با مقاطع دایره‌ای شکل از آنالیز حساسیت استفاده گردید. بدین منظور با حذف تک‌تک پارامترها از سری پارامترهای ورودی مدل برتر GPR، مدل دوباره اجرا شد؛ میزان تأثیر حذف پارامتر در دقت مدل برتر با استفاده از پارامترهای آماری CC،

DC و RMSE مورد بررسی قرار گرفت و نتایج جدول ۵ حاصل گردید. از نتایج این جدول مشخص است با حذف پارامتر Fd دقت مدل تا حدود زیادی کاهش یافته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که عدد فرود ذرات بیشترین تأثیر را در انتقال دبی رسوبی در لوله‌های انتقال آب و فاضلاب دارا می‌باشد.

جدول ۵- نتایج آنالیز حساسیت مدل برتر GPR

پارمتر حذف شده	آزمون			تست		
	CC	DC	RMSE	CC	DC	RMSE
بستر زبر - مدل (VI)						
$\lambda_s$	۰/۹۲۵	۰/۹۰۸	۰/۰۶۸۹	۰/۸۹۴	۰/۹۰۲	۰/۰۷۶۱
$d_{50/y}$	۰/۸۹۰	۰/۸۲۱	۰/۰۷۳۸	۰/۸۸۱	۰/۸۱۰	۰/۰۷۴۱
Dgr	۰/۹۲۰	۰/۹۰۱	۰/۰۶۹۵	۰/۸۹۰	۰/۸۹۸	۰/۰۷۸۶
Fd	۰/۸۲۳	۰/۷۸	۰/۰۹۴	۰/۷۹۱	۰/۵۸۱	۰/۱۱۱
بستر غیر زبر - مدل (VI)						
$\lambda_s$	۰/۹۴۳	۰/۸۹۲	۰/۰۶۲۴	۰/۹۰۱	۰/۸۸۱	۰/۰۶۹۴
$d_{50/y}$	۰/۹۰۰	۰/۸۶۰	۰/۰۷۷۶	۰/۸۸۳	۰/۸۲۲	۰/۰۷۲
Dgr	۰/۹۲۹	۰/۸۸۷	۰/۰۶۳۱	۰/۸۹۱	۰/۸۲۳	۰/۰۷۱۲
Fd	۰/۸۲۷	۰/۷۷۲	۰/۱۳۴	۰/۶۶۵	۰/۶۲	۰/۱۷۳

بستر زبر با ارتفاع زبری متفاوت به صورت جداگانه و با روش GPR انجام گرفت. مدل (VI) به خاطر دقت بالای آن در تخمین دبی رسوبی برای این ارزیابی انتخاب شد. نتایج به صورت جدول ۶ و شکل ۶، ارائه شده است. در مورد اثر

بررسی تاثیر ارتفاع زبری بستر و دیواره‌های لوله بر روی انتقال رسوب در این تحقیق اثر زبری متفاوت بستر و دیواره‌ها بر روی میزان انتقال رسوب با استفاده از داده‌های مربوط

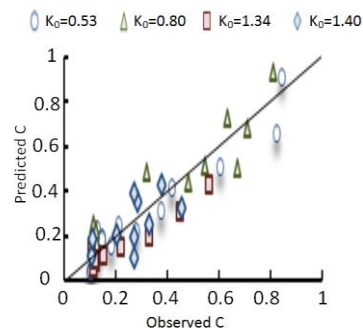
### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق برای تخمین میزان رسوب در لوله‌های دایره‌ای شکل که برای انتقال آب و یا فاضلاب می‌توانند به‌کار روند از مدل‌های رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) و سیستم استنتاج عصبی-فازی انطباقی (ANFIS) استفاده شد و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات ذرات رسوب مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها نشان داد، این روش‌ها کارایی بالایی را در تخمین دبی رسوب در لوله‌های دایره‌ای شکل دارا بوده و قابل‌اعتماد است. در بین مدل‌های تعریف‌شده مدلهایی که بر اساس مشخصات ذرات رسوبی و پارامترهای هیدرولیکی تعریف‌شده بودند نتایج دقیق‌تری را ارائه دادند. در هر دو حالت لوله زبر و غیر زبر مدل (VI) با پارامترهای ورودی  $(\lambda s, Fd, Dgr, d_{50}/R)$ ، نتایج بهتری را ارائه داد. ملاحظه گردید، لحاظ کردن پارامترهای شعاع هیدرولیکی (یا عمق جریان)، اندازه نسبی ذرات و ضریب اصطکاک کلی در دو بستر صاف و زبر، سبب افزایش دقت مدل‌های تخمین دبی رسوبی می‌گردد. مطابق با نتایج آنالیز حساسیت مشخص شد که پارامتر عدد فرود ذرات ( $F_d$ ) تأثیرگذارترین پارامتر در برآورد دبی رسوبی است. بر مبنای نتایج حاصله، مدل‌های تعریف شده برای بستر غیر زبر تا حدودی دقیق‌تر از بستر زبر می‌باشند. همچنین نتایج ماخوذه، بیان‌گر آن بود که زبری بستر و دیواره‌ها در انتقال میزان رسوب موثر بوده و افزایش زبری سبب کاهش انتقال رسوب می‌گردد. لوله با کمترین ارتفاع زبری ( $K_0=0.53$  mm) نتایج دقیق‌تری را ارائه داد.

زبری بستر و دیواره‌ها نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که افزایش زبری سبب کاهش انتقال رسوب گردیده است. با افزایش ارتفاع زبری بستر از  $0.53$  به  $1/4$  میلی‌متر دقت مدل کاهش یافته و لوله با زبری بستر  $0.53$  میلی‌متر منجر به نتایج دقیق‌تری شده است. علت این امر آن است که با افزایش زبری سطحی، ضریب اصطکاک بین رسوب و دیواره و همچنین مقاومت جریان افزایش می‌یابد که هر دو این عوامل تأثیر منفی در انتقال رسوب داشته و سبب کاهش آن می‌شوند.

جدول ۶- نتایج مربوط به اثر زبری بستر و دیواره‌های لوله برای داده‌های آزمون.

مدل	معیارهای ارزیابی		
	Test		
	CC	DC	RMSE
$K_0=0.53$ mm	۰/۹۴۸	۰/۹۲۱	۰/۰۸۱
$K_0=0.80$ mm	۰/۹۲۹	۰/۹۰۴	۰/۰۸۸
$K_0=1.34$ mm	۰/۸۸۷	۰/۷۸۰	۰/۱۲۱
$K_0=1.40$ mm	۰/۸۲۵	۰/۷۳۱	۰/۱۳۳



شکل ۶- مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای زبری متفاوت بستر و دیواره‌های لوله برای داده‌های آزمون.

### منابع مورد استفاده

- Anonymous, 2000. Artificial Neural Networks in hydrology. I: Preliminary concepts. Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. Journal of Hydrologic Engineering 5(2): 115-123.
- Bertrand JL.2010. Sewer sediment production and transport modeling: A literature review. Journal of Hydraulic Research. 5: 24-32.
- Bong CH, 2014. Self-cleansing design of rectangular open storm sewer. 13th International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia.
- El-Zaemey AK,1991. Sediment transport over deposited beds in sewers. Ph.D Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK.
- Falamaki A, Eskandari M, Baghlani A and Ahmadi SA, 2013. Modeling total sediment load in rivers using artificial neural networks. Water and Soil Science - University of Tabriz 2(3):13-26 (In Persian with English abstract)

- Ghani A, 1993. Sediment Transport in Sewers. Ph. D Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK.
- Jang JR, 1993. ANFIS: Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System, Proc., IEEE Conf. Transactions on Systems Man and Cybernetics 23: 665-685.
- Laursen EM, 1956. The Hydraulics of a Storm-Drain System for Sediment Transporting Flow. Bull. No 5, Iowa Highway Research Board.
- May RW, 1982. Sediment transport in sewers. Hydraulic Research Station, Wallingford, England, Report IT 222.
- Mayerle R. 1988. Sediment transport in rigid boundary channels. PhD thesis. University of Newcastle Upon Tyne England.
- Ota JJ and Perrusquia GS, 2013. Particle velocity and sediment transport at the limit of deposition in sewers. Water Science and Technology 67(5): 959-967.
- Renaat DS, 2013. Validation of existing bed load transport formulas using In-Sewer sediment. Journal of Hydraulic Engineering 12(1):325-338.
- Rezazadeh Joudi A and Sattari MT, 2016. Estimation of scour depth of piers in hydraulic structures using gaussian process Regression. Journal of Applied Research in Irrigation and Drainage Structures Engineering 65(16): 19-36 (In Persian with English abstract)
- Roushangar K, 2014. Modeling river total bed material load discharge using artificial intelligence approaches (based on conceptual inputs). Journal of Hydrology 514: 114-122.
- Siviapragasam C and Liong S, 2001. Rainfall and runoff forecasting with SSA-SVM approach. Journal of Hydroinformatics 3:141-152.
- Vongvisessomjai N, 2010. Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow. Urban Water Journal 7(1):61-77.