

**توسعه مدل فرا ابتکاری انفیس - الگوریتم ژنتیک برای پیش بینی عمق آبستگی در مجاورت لوله های مستغرق\***

مقاله علمی - پژوهشی

احسان یارمحمدی<sup>(۱)</sup> احمد رجبی<sup>(۲)</sup> محمدعلی ایزدبخش<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در نواحی ساحلی، عبور خطوط لوله مستغرق نفت و گاز بسیار رایج است و وقوع آبستگی در اطراف لوله پایداری آنها را تهدید می کند. در این مطالعه یک مدل فرا ابتکاری برای پیش بینی عمق آبستگی در اطراف لوله های افقی مستغرق توسعه داده می شود. مدل عددی با ترکیب مدل سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی (انفیس) و الگوریتم ژنتیک تولید می شود. علاوه بر این در مطالعه حاضر برای ارزیابی دقت مدل های عددی از شبیه سازی های مونت کارلو استفاده شد. در مقابل برای اعتبار سنجی نتایج مدل های مذکور از روش اعتبار سنجی متقابل با  $k=6$  بهره گرفته شد. سپس ۶ مدل عددی مختلف توسعه داده می شود. سرانجام با تجزیه و تحلیل نتایج مدل های عددی، مدل برتر معرفی شد. مدل برتر عمق آبستگی را با دقت قابل قبولی شبیه سازی کرد. این مدل مقادیر آبستگی را با استفاده از کلیه پارامترهای ورودی شبیه سازی کرد. به عنوان مثال برای مدل برتر مقادیر ضریب همبستگی و شاخص پراکنندگی به ترتیب مساوی با ۰/۹۷۴ و ۰/۰۹۰ محاسبه شد. علاوه بر این، فاصله بین لوله و بستر رسوبی قبل از آبستگی به قطر لوله ( $e/D$ ) به عنوان مؤثرترین پارامتر ورودی شناسایی شد.

**واژه های کلیدی** شبیه سازی، مدل فرا ابتکاری، شبیه سازی مونت کارلو، روش اعتبار سنجی متقابل.

### Developing of ANFIS-Genetic Algorithm Meta-Heuristic Model for Predicting the Scour Depth in Vicinity of Submarine Pipelines

E. Yarmohammadi A. Rajabi M. A. Izadbakhsh

**Abstract** In coastal areas, passing oil and gas submarine pipelines is quite common and scouring around them threatens the stability of the submarine pipes. In this study, a meta-heuristic model is developed in order to predict the scour pattern in vicinity of the submarine pipelines. The model is produced using combination of adaptive Neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and genetic algorithm (GA). Additionally, in this article, Monte Carlo simulations (MCs) were utilized to evaluate the accuracy of numerical models. On the other hand, in order to validate the numerical results, the k-fold cross-validation ( $k=6$ ) was used. Next, six different numerical models were developed. Finally, by analyzing the numerical results, the superior model was introduced. The superior model simulated the scour depth with reasonable accuracy. The model simulated the scour depth by employing all input parameters. For example, correlation coefficient and scatter index for superior model were respectively calculated 0.974 and 0.090. In addition, distance between pipe and bed before scouring to pipe diameter ( $e/D$ ) was identified as the most effective input parameter.

**Key Word** Simulation, Meta-heuristic model, Monte Carlo simulation, K-Fold cross validation.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۱/۱۹ تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱۲/۰۷ می باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه. Email: ahmad.rajabi1974@gmail.com

(۳) استادیار گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه.

### مقدمه

مورد مقایسه قرار دادند و بیان کردند که مدل مذکور مشخصات میدان جریان را با دقت قابل قبولی شبیه سازی می‌کند [4]. علاوه بر این لی و چنگ (Li and Cheng) یک مطالعه عددی بر روی عمق آبشستگی در مجاورت لوله‌های افقی مستغرق انجام دادند. مدل عددی مذکور اندرکنش بین لوله و بستر متحرک را در شرایط آب شفاف با دقت مناسبی پیش‌بینی نمود [5]. میرهاوگ و رو (Myrhaug and Rue) تأثیر امواج را بر روی عمق آبشستگی اطراف لوله‌های مستغرق افقی را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. آنها نتایج مدل تحلیلی خود را با مقادیر آزمایشگاهی سایر محققین مقایسه نمودند [6]. ته و همکاران (Teh et al.) یک روش تحلیلی به منظور طراحی لوله‌های مستغرق واقع بر بستر رسوبی ارائه نمودند. روش طراحی آنها در شرایطی که چگالی خاک بستر در شرایط بحرانی باشد قابل استفاده است [7]. دی و سینگ (Dey and Singh) یک مدل نیمه تحلیلی به منظور تخمین مقدار آبشستگی در اطراف لوله‌های افقی مستغرق واقع بر بستر متحرک در شرایط آب شفاف پیشنهاد دادند. تجزیه و تحلیل نتایج مدل تحلیل نشان‌دهنده تطابق قابل قبول آن با مقادیر آزمایشگاهی بود. آنها تأثیرات نشت از زیر لوله به سمت بالا را نیز مورد مطالعه قرار دادند که بیان نمودند وجود نشت باعث کاهش عمق حفره آبشستگی می‌شود [8]. ژانگ و همکاران (Zhang et al.) با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی، آبشستگی موضعی در اطراف لوله‌های مستغرق بر اثر امواج و جریان مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی روابطی را برای محاسبه عمق آبشستگی پیشنهاد دادند [9]. لی و همکاران (Lee et al.) یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی دوبعدی را برای شبیه‌سازی عمق آبشستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق را توسعه دادند. آنها برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی  $k-\omega$  استفاده کردند [10]. همچنین میرعلیزاده اورنگ و همکاران اثر خطوط لوله با قطرهای مختلف و

برای انتقال نفت، گاز و سایر مواد قابل انتقال از خطوط لوله استفاده می‌شود. این سازه‌ها در مناطق ساحلی و دریایی به‌ناچار از محل بستر ساحلی عبور می‌کنند. با توجه به اینکه احتمال وجود جریان‌های ساحلی و امواج در این نواحی وجود دارد بنابراین وقوع پدیده آبشستگی در اطراف خطوط لوله وجود دارد. با توجه به پیچیدگی فرایند آبشستگی در مجاورت سازه‌های مذکور، مطالعات فراوانی توسط محققان مختلفی بر روی رفتار آبشستگی در اطراف خطوط لوله مستغرق انجام شده است. به‌عنوان مثال بیکر و لیووستین (Bijker and Leeuwestein) اندرکنش بین لوله و مرفولوژی بستر رسوبی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها تأثیر عواملی همچون قطر لوله، سرعت جریان ورودی و ارتفاع نسبی لوله را بر روی عمق آبشستگی در اطراف لوله‌های افقی مستغرق را بررسی کردند [1]. در ادامه فردسو و همکاران (Fredsoe et al.) با توسعه یک مدل سه‌بعدی مقدار آبشستگی در اطراف لوله‌های انتقال را پیش‌بینی نمودند. آنها مقادیر مدل تحلیلی خود را با نتایج آزمایشگاهی که به صورت دوبعدی اندازه‌گیری شده بود مقایسه نمودند و نشان دادند که مدل سه‌بعدی طول حفره آبشستگی را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند [2]. چيو (Chiew) با انجام یک تحقیق آزمایشگاهی مکانیزم آبشستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق را بر روی بسترهای رسوبی متشکل از ذرات غیر چسبنده مورد ارزیابی قرار دادند. وی بیان نمود که گرادیان هیدرولیکی بحرانی رسوبات برابر گرادیان شناوری ذرات رسوب است [3]. اولسن و مه‌لان (Olsen and Melaaen) با استفاده از یک مدل عددی، الگوی جریان و آبشستگی اطراف لوله‌های مستغرق را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند. آنها برای حل میدان جریان از معادلات ناویر استوکس استفاده و آشفتگی میدان محاسباتی را توسط مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  مدل‌سازی کردند. آنها نتایج مدل عددی خود را با مقادیر آزمایشگاهی

تأثیرات آرایش در کنار هم آن‌ها بر روی فرایند آبخستگی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها با نصب ورق زیرسری نفوذناپذیر زیر خطوط لوله، برای هر یک از آرایش‌های لوله‌های موازی، اثر این صفحه روی پدیده آبخستگی را مطالعه نمودند و بیان کردند که استفاده از ورق‌های زیرسری نفوذناپذیر در زیر خطوط لوله دریایی تا حدودی مانع شکل‌گیری تونل آبخستگی در زیر خطوط لوله شده و آنها را از خطرهای ناشی از آبخستگی حفظ می‌نماید [11]. هدایت بهرامی و همکاران تأثیر زاویه‌های مختلف برخورد جریان بر روی بیشینه عمق آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که زاویه برخورد جریان بر روی مکان قرارگیری بیشینه عمق آبخستگی و نحوه عملکرد گرابه‌ها مؤثر است [12]. اخیراً نجف‌زاده و همکاران با استفاده از روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها عمق آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق را تخمین زدند. آنها نتایج مدل مذکور را با ماشین بردار پشتیبان نیز مقایسه نمودند و بیان کردند که روش دسته‌بندی داده‌ها دارای دقت بیشتری است [13]. همچنین حقیابی توسط مدل‌های رگرسیونی، عمق آبخستگی در مجاورت لوله‌های افقی واقع بر بستر نواحی ساحلی را مدل‌سازی کرد. وی با استفاده از تست گاما مبادرت به شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر روی عمق حفره آبخستگی نمود [14].

### مواد و روش‌ها

#### سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی

سیستم‌های استنتاج فازی (Fuzzy Inference System)، با بهره بردن از قوانین ساده فازی به صورت اگر- آنگاه، می‌توانند بدون احتیاج به آنالیز دقیق اطلاعات ورودی، معلومات و سیستم تصمیم‌گیری انسان در مورد یک مسئله خاص را به صورت کیفی مدل‌سازی کنند. مشکل اساسی که در استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی وجود دارد، نحوه تعیین قوانین فازی و همچنین توابع عضویت است. برای رفع این مشکل، استفاده از شبکه‌های عصبی فازی در ترکیب با سیستم استنتاج فازی، برای اولین بار توسط جانگ (۱۹۹۳) مطرح گردید و روش سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems) معرفی شد [16]. بخش فازی، رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی، به وسیله شبکه عصبی تعیین می‌شود، لذا، خصوصیات هر دو مدل فازی و عصبی در ANFIS نهفته است. سیستم‌های استنتاج فازی دارای کاربردهای گسترده‌ای هستند؛ با توجه به نوع عملیات استنباطی بر روی قانون If-Then، به دودسته مدل‌های فازی ممدانی، مدل‌های فازی TSK (تاکاگی-سوگنو و مدل‌های فازی تسوکاموتو) تقسیم‌بندی می‌گردد. روش

تأثیرات آرایش در کنار هم آن‌ها بر روی فرایند آبخستگی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها با نصب ورق زیرسری نفوذناپذیر زیر خطوط لوله، برای هر یک از آرایش‌های لوله‌های موازی، اثر این صفحه روی پدیده آبخستگی را مطالعه نمودند و بیان کردند که استفاده از ورق‌های زیرسری نفوذناپذیر در زیر خطوط لوله دریایی تا حدودی مانع شکل‌گیری تونل آبخستگی در زیر خطوط لوله شده و آنها را از خطرهای ناشی از آبخستگی حفظ می‌نماید [11]. هدایت بهرامی و همکاران تأثیر زاویه‌های مختلف برخورد جریان بر روی بیشینه عمق آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که زاویه برخورد جریان بر روی مکان قرارگیری بیشینه عمق آبخستگی و نحوه عملکرد گرابه‌ها مؤثر است [12]. اخیراً نجف‌زاده و همکاران با استفاده از روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها عمق آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق را تخمین زدند. آنها نتایج مدل مذکور را با ماشین بردار پشتیبان نیز مقایسه نمودند و بیان کردند که روش دسته‌بندی داده‌ها دارای دقت بیشتری است [13]. همچنین حقیابی توسط مدل‌های رگرسیونی، عمق آبخستگی در مجاورت لوله‌های افقی واقع بر بستر نواحی ساحلی را مدل‌سازی کرد. وی با استفاده از تست گاما مبادرت به شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر روی عمق حفره آبخستگی نمود [14].

نجف‌زاده و سرکاماریان با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن، رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی و مدل درخت عمق آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق را در اثر امواج بهینه‌سازی کردند [15].

مرور مطالعات گذشتگان نشان می‌دهد که بررسی آبخستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. همچنین ترکیب الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) (GA) و انفیس (Adaptive Neuro-fuzzy inference system)

در هر دو معادله بالا، If بخش مقدم فازی و Then بخش نتیجه است و تابعی از متغیر مقدم است. به‌طور کلی، سیستم ANFIS، پنج لایه دارد که در ادامه، عملکرد هر لایه به‌طور خلاصه بیان می‌شود.

لایه اول (لایه ورودی): در این لایه، درجه‌های عضویت مربوط به هر یک از مجموعه‌های فازی، به‌عنوان ورودی توابع عضویت شناخته می‌شود. تابع عضویت مورد استفاده در این مطالعه از نوع گوسی است که عملکرد خوبی در مطالعات مختلف مهندسی داشته است و به‌عنوان یکی از پرکاربردترین توابع عضویت، شناخته شده است. در این لایه، خروجی هر گره به‌صورت زیر تعیین می‌شود.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (4)$$

$$O_i^1 = \mu_{B_i}(y)$$

در اینجا  $x$  و  $y$  ورودی‌های گره  $i$  ام هستند،  $A_i$  و  $B_i$  مجموعه فازی مرتبط با این گره است.

لایه دوم (لایه قوانین): همه گره‌ها در این لایه، ثابت هستند. این لایه، قدرت هر قاعده را با استفاده از ضرب جبری، مطابق رابطه زیر ارائه می‌کند:

$$O_i^2 = w_i = \mu_A(x) \mu_B(y) \quad (5)$$

در لایه دوم، هر گره، از حاصل ضرب مقادیر ورودی در لایه قبلی، به دست می‌آید. مقدار به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده قدرت اجرایی  $i$  امین قاعده، جایی که متغیر  $x$  ارزش زبان‌شناختی  $A_i$  را دارد، است. لایه سوم (لایه نرمال‌سازی): در این لایه قدرت قاعده (قانون) همانند رابطه زیر، نرمال‌سازی می‌شود:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $w_i$  قدرت اجرایی  $i$  امین قاعده است. تعداد گره‌های این لایه مانند لایه قبلی است. لایه سوم قدرت اجرایی قاعده را برای مجموع قواعد قدرت اجرایی، محاسبه می‌کند.

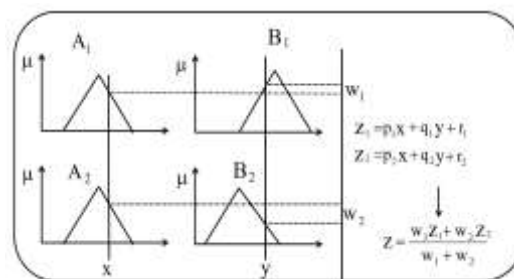
لایه چهارم (لایه انطباقی): هر گره در این لایه، یک تابع خطی است و ضرایب این تابع از طریق ترکیبی از تقریب حداقل مربعات و پس انتشار تعدیل می‌شود.

TSK با استفاده از توابع خطی یا ثابت ساده عمل می‌کند، درحالی‌که روش ممدانی از توابع عضویت فازی استفاده می‌کند. با توجه به دقت بالا و مدل نسبتاً کوچک TSK، در مطالعه حاضر از استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل فازی سوگنو، برای توسعه‌ی یک سیستم اسلوب‌مند، در راستای ایجاد قواعد فازی با توجه به مجموعه داده‌های ورودی-خروجی عمل می‌کند [16]. قاعده کلی مدل فازی سوگنو در معادله (۱) ارائه شده است.

$$\text{Rule1: If } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B; \text{ Then } z = f(x, y) \quad (1)$$

ه در آن  $A$  و  $B$  عبارت زبان‌شناختی و  $z=f(x,y)$  یک تابع در قسمت نتیجه قاعده است. اگر  $f(x,y)$  چندجمله‌ای درجه‌یک باشد، از سیستم استنتاج فازی تحت عنوان مدل فازی سوگنوی درجه اول و اگر  $f(x,y)$  ثابت باشد، به‌عنوان مدل فازی سوگنوی درجه صفر یاد می‌شود. شکل (۱) استدلال فازی در مدل سوگنوی درجه اول را نشان می‌دهد.



شکل (۱): استدلال فازی در مدل سوگنوی درجه اول

به‌عنوان مثال، یک سیستم استنتاج فازی ساده با دو ورودی  $x$  و  $y$  و خروجی  $z$  در نظر گرفته می‌شود. فرض کنید که مبنای قواعد، شامل دو قانون فازی If-Then مطابق رابطه زیر است:

$$\text{Rule1: If } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1, \text{ Then } z_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (2)$$

$$\text{Rule 2: If } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2, \text{ Then } z_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (3)$$

معیار پایان روند آموزشی است. علاوه بر این، سیستم آموزش دیده می‌بایست، جواب‌های صحیح در شرایط جدید خطا را دارا باشد، سائز و اندازه این سیستم‌ها، عامل مهمی هستند، چراکه با افزایش تعداد توابع عضویت، قوانین فازی If-Then در ساختار شبکه بسیار بزرگ می‌شوند، به طوری که ویژگی‌های تعمیمی ANFIS برای پیش‌بینی داده‌ها کاهش می‌یابد. به منظور مدل‌سازی سیستم ANFIS، نیاز است که روش ارائه شده جهت تولید سیستم استنتاج فازی تعریف شود. در این مطالعه، از روش خوشه‌بندی فازی استفاده می‌شود (Fuzzy C-Means Clustering (FCM)). همچنین تابع عضویت، شامل پارامترهای قابل تنظیم متفاوتی است. برای رسیدن به مدل‌سازی بهینه، این پارامترها، باید بهینه شوند؛ بنابراین به یک الگوریتم قوی‌تر، برای تعریف مقادیر نیاز است. الگوریتم‌های بهینه بسیاری وجود دارد که می‌توانند عملکرد سیستم‌های فازی را بهبود ببخشند. الگوریتم ژنتیک، یکی از این الگوریتم‌هاست که ابزار مناسبی برای بهینه‌سازی است. این الگوریتم قادر است، خطای بین خروجی مدل و مقدار واقعی داده‌های آموزشی را به حداقل مقدار برساند.

### روش خوشه‌بندی فازی

خوشه‌بندی فازی، به کشف مدل‌های فازی از داده‌ها می‌پردازد. لازم به ذکر است که FCM یکی از کاربردی‌ترین روش‌های خوشه‌بندی فازی است که بر مبنای تابع هدف و استفاده از فاصله اقلیدسی، توسط دان [17] ارائه و سپس توسط بزدک [۱۸] تعمیم داده شد. در الگوریتم C میانگین نمونه‌ها به C خوشه تقسیم می‌شوند. تعداد C از قبل توسط کاربر مقداردهی شده است. هدف این الگوریتم، تفکیک داده‌های  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset \mathbb{R}^z$  به تعداد C خوشه، بر اساس معیار کمینه‌سازی تابع حداقل فاصله، به صورت زیر است:

$$J_m(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \mu_{ik}^m \|x_k - v_i\|^p \quad (10)$$

$$O_i^4 = \bar{w}_i z_i = \bar{w}_i (P_i x + q_i y + r_i) \quad (7)$$

لایه پنجم (لایه خروجی): نتایج این لایه، به صورت مجموعه‌ای از خروجی گره‌های لایه قبلی به دست آمده می‌آید:

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i z_i = \frac{\sum_i w_i z_i}{\sum_i w_i} \quad (8)$$

در رابطه فوق،  $\bar{w}_i z_i$ ، خروجی گره i ام در لایه قبلی است، خروجی کلی، خطی است. اگرچه پارامترها، از لحاظ منطقی، غیرخطی اند.

فرایند آموزش ANFIS، برای تنظیم تمام پارامترهای قابل تنظیم (پارامترهای تابع عضویت) به دنبال به دست آوردن مقادیر خروجی است که بیشترین تطابق را با داده‌های آموزشی داشته باشد. پس از آموزش ANFIS، با معرفی داده‌های مختلف می‌توان خروجی را به شکل زیر، به دست آورد.

$$Z = \frac{w_1}{w_1 + w_2} z_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} z_2 = \bar{w}_1 (p_1 x + q_1 y + r_1) + \bar{w}_2 (p_2 x + q_2 y + r_2) \quad (9)$$

در حقیقت Z، ترکیب خطی از پارامترهای نتیجه  $(p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2)$  است.

همان‌طور که گفته شد، ANFIS ترکیبی از شبکه عصبی و یک سیستم استنتاج فازی است. الگوریتم یادگیری شبکه عصبی در روش ANFIS، برای تعیین پارامترهای سیستم استنتاج فازی استفاده می‌شود. در بخش سیستم فازی، ANFIS، همیشه داده‌ها را به صورت If-Then تفسیر می‌کند و هر تابع واقعی را با هر دقتی تقریب می‌زند. به عبارت دیگر، یافتن تابعی است که بتواند با ایجاد شرایط واقعی، عملکرد مطلوب‌تری ارائه دهد.

در انواع سیستم‌های فازی، دقت و صحت عملکرد سیستم ANFIS آموزش دیده، به پارامترهای ساختاری و پارامترهای مربوط به آموزش این سیستم‌ها بستگی دارد. پارامترهای مربوط به آموزش، شامل سیستم استنتاج فازی، روش بهینه‌سازی، نرخ افزایش و کاهش گام‌ها و

ژنتیکی همچون پیوند، جهش و انتخاب جمعیت‌های جدیدی تولید می‌شود. با هر تکرار از این سه اپراتور (عملگر) ژنتیکی، یک نسل به وجود می‌آید. جمعیت‌های اولیه به صورت رشته‌ای تعریف می‌شوند و هر رشته را بانام کروموزوم توصیف می‌کنند. در عملگر پیوند ژن‌های دو والدین با یکدیگر ترکیب می‌شوند و دو فرزند جدید ایجاد می‌شود. در عملگر جهش، یک تغییر ناگهانی در ژن صورت می‌گیرد.

در عملگر انتخاب، جمعیت‌ها را به کمک تابع برازندگی مورد ارزیابی قرار می‌دهند. جمعیت‌های دارای برازندگی کمتر حذف شده و جمعیت‌ها به سمت پاسخ بهینه سوق داده می‌شوند. روش‌های انتخاب جمعیت‌ها برای اعمال اپراتورهای ژنتیکی به سه دسته انتخاب به صورت قطعی، انتخاب بر اساس تورنمنت و انتخاب بر اساس مکانیسم چرخ گردان تقسیم می‌شود. در روش انتخاب بر اساس چرخ گردان، برای انتخاب هر عضو جمعیت از معیار برازندگی استفاده می‌شود. به طوری که در هر رشته‌ای مقدار تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مقادیر تابع هدف در هر تکرار، برازندگی مشخصی برای هر رشته حاصل می‌شود. عدد برازندگی برابر است با نسبت مقدار تابع هدف آن جمعیت به مجموع توابع هدف جمعیت‌ها که این نسبت را احتمال بقاء هر جمعیت نیز می‌نامند؛ بنابراین الگوریتم ژنتیک بعد از چندین نسل به تدریج به سمت جواب بهینه همگرا می‌شود. شرط توقف الگوریتم نیز طی کردن تعداد معینی تکرار است که پیش از آغاز الگوریتم توسط کاربر تعیین می‌شود.

### مدل آزمایشگاهی

در مطالعه حاضر، جهت مدل‌سازی عمق آبستگي در اطراف لوله‌های مستغرق با استفاده از روش ANFIS- GA از مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط مونکادا و اگویری (Moncada Aguirre) (۱۹۹۹) استفاده می‌شود [20]. مدل آزمایشگاهی آنها شامل یک کانال افقی مستطیلی است که لوله‌های مستغرق در مجاورت بستر رسوبی قرار گرفته‌اند. طول، عرض و

در معادله فوق،  $m$  پارامتر فازی سازی که مقداری بزرگ‌تر از یک دارد. همچنین  $v_i \in \mathbb{R}^z$ ، مرکز  $i$  امین خوشه است.  $\mu_{ik} \in [0,1]$ ، درجه تعلق داده‌ها به خوشه است و  $p$ ، درجه توان اقلیدسی است. در این رابطه،  $n$  نقطه داده ورودی به گونه‌ای به  $c$  خوشه تقسیم می‌شود که شرط زیر رعایت شود [17]:

$$M_{fcn} = \left\{ U \in \mathbb{R}^{c \times n} \mid \forall i, k, \mu_{ik} \leq 1, \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1 \right\} \quad (11)$$

$$1, 0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik}$$

به منظور بهینه‌سازی تابع  $J_m(U, V)$  و پارامترهای

$U$  و  $V$ ، الگوریتم بهینه‌سازی در دو گام تخمین  $U$  و  $V$  انجام می‌گیرد. روش کار به این صورت است که مراکز خوشه‌ها ( $V$ ) در مرحله  $r$  ام با توجه به مقدار  $U$  در مرحله  $(r-1)$  ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_k)^m x_k}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m} \quad (12)$$

سپس مقدار جدید  $U$  (با استفاده از مقدار محاسبه شده برای  $V$  در قسمت قبل) به کمک رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^c \left( \frac{\|X_k - v_i\|^{-2/(m-1)}}{\|X_k - v_j\|^{-2/(m-1)}} \right) \quad (13)$$

این الگوریتم تا زمانی که به شرایط همگرایی دست پیدا کند، به صورت بازگشتی ادامه می‌یابد.

### الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یکی از شناخته شده‌ترین نوع از الگوریتم‌های تکاملی است که هالند آن را در سال ۱۹۷۵ ابداع کرد [19]. الگوریتم ژنتیک، جستجو را با جمعیتی از راه‌حل‌های اولیه تصادفی شروع می‌کند. هرگاه معیارهای نهایی اقلان نشود به کمک عملگرهای

$$d_s = f(U, y, \rho, \rho_s, \mu, S_0, B, d_{50}, D, e, g) \quad (14)$$

بر اساس تئوری باکینگهام و با انجام آنالیز ابعادی و معرفی گروه‌های بدون بعد، معادله (۱۴) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$d_s/D = f(Fr, Re, \tau^*, y/D, D/d_{50}, e/D, S_0, y/B) \quad (15)$$

در معادله (۱۵) پارامترهای بدون بعد  $Fr = U/\sqrt{g \cdot y}$ ،  $Re = UD\mu/g$  و  $\tau^* = u_*^2/g(\rho_s/\rho - 1)d_{50}$  به ترتیب شامل عدد فرود، عدد رینولدز و پارامتر بدون بعد شیلدز به علت انتقال رسوبات هستند. علاوه بر این، مونکادا و اگوویری (۱۹۹۹) بیان نمودند که پارامتر  $y/B$  تأثیر قابل توجهی بر روی عمق آبشستگی در اطراف لوله‌های مستغرق ندارد. همچنین شیب کانال ( $S_0$ ) در کلیه آزمایش‌های آنها ثابت است. آنها نشان دادند که عدد رینولدز در مطالعه آنها در محدوده‌ای است که این پارامتر تأثیری بر روی عمق آبشستگی بدون بعد ( $d_s/D$ ) ندارد:

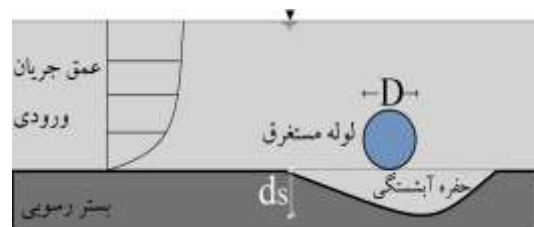
$$d_s/D = f(Fr, \tau^*, y/D, D/d_{50}, e/D) \quad (16)$$

بنابراین برای معرفی مدل‌های ANFIS-GA از پارامترهای معادله (۱۶) استفاده می‌شود. ترکیب پارامترهای ورودی در مدل‌های مختلف ANFIS-GA در شکل (۳) قابل مشاهده است. در این مقاله، برای ارزیابی قابلیت مدل‌های ANFIS-GA از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو استفاده می‌گردد. این شبیه‌سازی‌ها یک طبقه‌بندی گسترده از الگوریتم‌های محاسباتی هستند که از نمونه‌گیری‌های تصادفی جهت محاسبه نتایج عددی استفاده می‌کنند. مونت-کارلو برای شبیه‌سازی مسائل فیزیکی و معادلات ریاضیاتی که معمولاً حل آنها با استفاده از روش‌های رایج مقدور نیست به کار گرفته می‌شوند. همچنین، از روش اعتبار سنجی چندلایه برای سنجش توانایی مدل‌های ANFIS-GA استفاده می‌شود. در این روش، نمونه اصلی که شامل کلیه داده‌ها است، به شکل کاملاً تصادفی به  $k$  نمونه فرعی با اندازه مساوی تقسیم می‌شود. در میان نمونه‌های فرعی، یک

ارتفاع کانال مذکور به ترتیب برابر  $۸/۳$ ،  $۰/۵$  و  $۰/۵$  متر است. آنها در مطالعه آزمایشگاهی مذکور از چهار لوله با قطرهای مختلف و رسوبات با دو قطر متفاوت استفاده نمودند. آنها ۹۰ آزمایش در شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف انجام دادند. در جدول (۱) محدوده مقادیر آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه مرتب شده است. علاوه بر این، در شکل (۲) نحوه آبشستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق در نزدیکی بستر رسوبی نشان داده شده است.

جدول ۱ محدوده پارامترهای آزمایشگاهی مونکادا و اگوویری (۱۹۹۹) مورد استفاده در این مطالعه

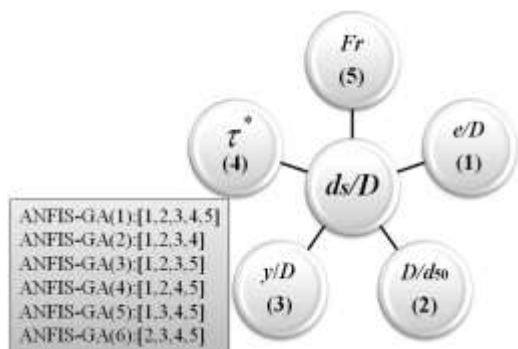
پارامتر	محدوده
$e/D$	۰/۰-۱/۰۶۸
$D/d_{50}$	۳/۲۸۹-۶۶/۶۶۷
$y/D$	۱/۰۶۷-۵
$T_a$	۰/۰۳۸-۰/۶۶۵
$Fr$	۰/۲۳۴-۰/۸۳۶
$d_s/D$	۰/۰۰۸-۱/۶۰۶



شکل ۲ طرح شماتیک آبشستگی در اطراف لوله‌های مستغرق افقی

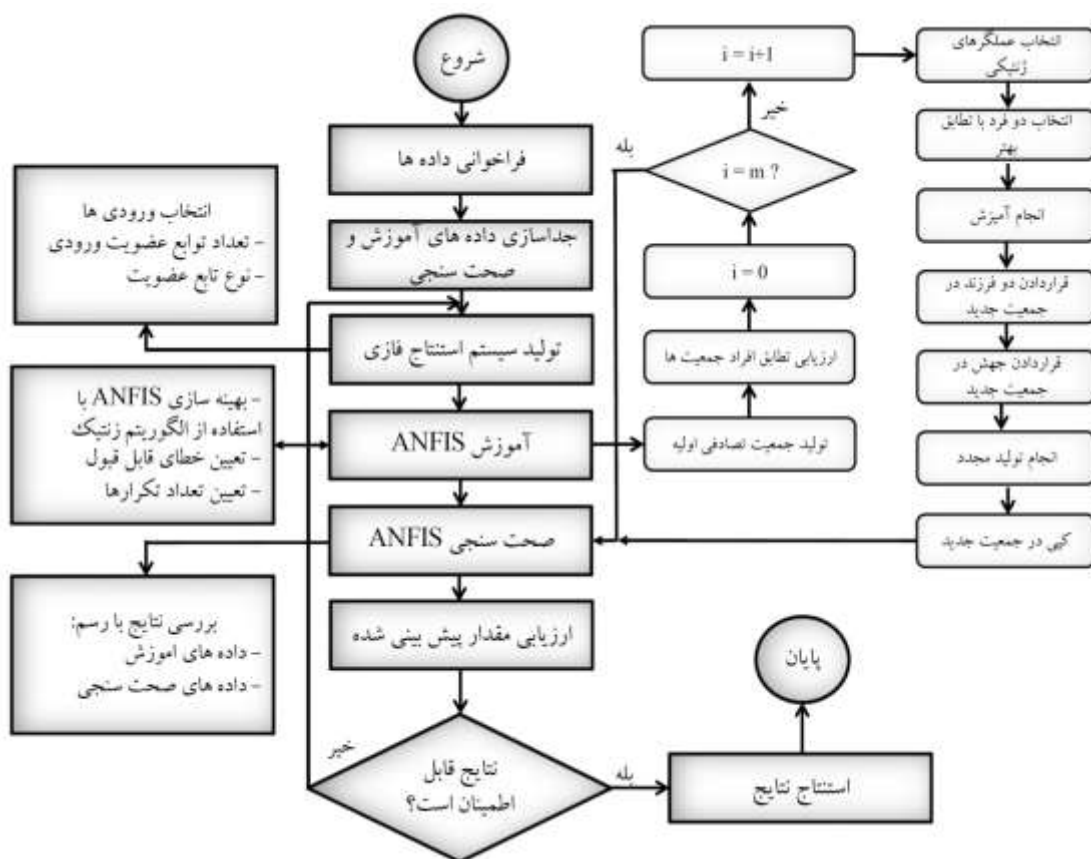
### آبشستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق افقی

مونکادا و اگوویری (۱۹۹۹) آبشستگی در اطراف لوله‌های افقی مستغرق ( $d_s$ ) را تابعی از سرعت متوسط جریان ( $U$ )، عمق جریان نرمال ( $y$ )، چگالی آب ( $\rho$ )، چگالی رسوب ( $\rho_s$ )، ویسکوزیته دینامیکی آب ( $\mu$ )، شیب کانال ( $S_0$ )، عرض کانال ( $B$ )، قطر مصالح بستر ( $d_{50}$ )، قطر لوله ( $D$ )، فاصله بین لوله و بستر رسوبی قبل از آبشستگی ( $e$ ) و شتاب گرانش ( $g$ ) در نظر گرفتند:



شکل ۳ مدل‌های مختلف ANFIS-GA و نحوه ترکیب پارامترهای ورودی

نمونه به‌عنوان داده‌های صحت سنجی انتخاب شده و باقیمانده داده‌ها (k-1) به‌عنوان داده‌های تست مدل‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس روند اعتبارسنجی k بار تکرار شده و هرکدام از نمونه‌های فرعی k نیز یک‌بار به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی مورد استفاده می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده از k لایه مشخص متوسط‌گیری شده و به‌عنوان یک تخمین قابل قبول ارائه می‌شود. مهم‌ترین مزیت این روش، تکرار تصادفی نمونه‌های فرعی در روند تست و آموزش برای کلیه مشاهدات است. در مطالعه حاضر مقدار k برابر ۶ انتخاب می‌شود. علاوه بر این، فلوجارت روش ترکیبی ANFIS-GA در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۴ فلوجارت روش ترکیبی ANFIS-GA



است. همچنین پنج مدل ANFIS-GA(2) تا ANFIS-GA(6) مقادیر تابع هدف را با چهار پارامتر ورودی مدل سازی می نمایند.

در شکل (۵) نتایج شاخص های آماری برای مدل های مختلف ANFIS-GA به تصویر کشیده شده است. به عنوان مثال مقادیر ضریب همبستگی و شاخص پراکندگی برای ANFIS-GA(1) به ترتیب مساوی با ۰/۹۷۴ و ۰/۰۹۰ محاسبه گردیده است. همچنین برای مدل مذکور شاخص های RMSE و MAPE نیز به ترتیب برابر ۰/۰۷۹ و ۹/۵۷۱ به دست آمده است. همان گونه که بیان شد این مدل تابعی از کلیه ورودی ها مؤثر، تأثیر هر کدام از این پارامترها برای مدل های بعدی به صورت جداگانه حذف شده و دقت مدل عددی مورد ارزیابی قرار می گیرد. به عنوان مثال، مدل ANFIS-GA(2) تابعی از  $(Fr, \tau^*, y/D, D/d_{50}, e/D)$  است. به عبارت دیگر برای این مدل تأثیر عدد فرود نادیده گرفته شده است. برای مدل مذکور مقدار SI مساوی ۰/۰۹۲ و مقدار R نیز برابر ۰/۹۷۳ تخمین زده شده است. علاوه بر این برای مدل ANFIS-GA(3) تأثیر پارامتر  $\tau^*$  حذف شده است. برای این مدل مقادیر RMSE، R و SI به ترتیب مساوی با ۰/۰۹۷، ۰/۹۶۰ و ۰/۱۱۰ محاسبه گردیده است. مدل ANFIS-GA(4) مقادیر تابع هدف را بر حسب  $Fr, \tau^*, D/d_{50}, e/D$  مدل سازی می کند. به بیان دیگر برای این مدل تأثیر  $y/D$  نادیده گرفته شده است. برای ANFIS-GA(4) مقادیر شاخص های ضریب همبستگی برابر ۰/۹۶۷ و درصد میانگین مطلق خطا مساوی ۴۲/۰۶۶ می باشند. برای این مدل SI و RMSE نیز به ترتیب برابر ۰/۱۰۰ و ۰/۰۸۸ محاسبه شده است. پارامترهای بدون بعد  $Fr, \tau^*, y/D, e/D$  برای مدل سازی آبستگی اطراف لوله های مستغرق افقی با استفاده از مدل ANFIS-GA(5) استفاده شده اند. برای این مدل تأثیر  $D/d_{50}$  نادیده گرفته شده است. برای مدل مذکور مقادیر MAPE، RMSE و SI به ترتیب مساوی ۱۴/۵۰۹، ۰/۱۰۳ و ۰/۹۵۲ محاسبه گردیده است. همچنین برای مدل ANFIS-GA(6) تأثیر پارامتر

معیارهای بررسی دقت مدل های هوش مصنوعی در این مقاله جهت ارزیابی دقت مدل های ترکیبی ANFIS-GA از شاخص های آماری ضریب همبستگی (R)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) و شاخص پراکندگی (SI) استفاده می شود:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Observed)_i} \cdot \overline{(d_s/D)_{(Observed)}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Observed)_i} \cdot \overline{(d_s/D)_{(Observed)}})^2}} \times \frac{\sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Predicted)_i} \cdot \overline{(d_s/D)_{(Predicted)}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Predicted)_i} \cdot \overline{(d_s/D)_{(Predicted)}})^2}} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Predicted)_i} \cdot (d_s/D)_{(Observed)_i})^2} \quad (18)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{(d_s/D)_{(Predicted)_i} \cdot (d_s/D)_{(Observed)_i}}{(d_s/D)_{(Observed)_i}} \right| \right) \times 100 \quad (19)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{(d_s/D)_{(Observed)}}} \quad (20)$$

در اینجا  $(d_s/D)_{(Observed)}$  آبستگی آزمایشگاهی،  $(d_s/D)_{(Predicted)}$  آبستگی پیش بینی شده،  $\overline{(d_s/D)_{(Observed)}}$  میانگین آبستگی آزمایشگاهی و n تعداد اندازه گیری های آزمایشگاهی است. لازم به ذکر است که نزدیک بودن مقادیر RMSE، MAPE و SI به صفر یک نشان دهنده خطای کم و دقت بالای مدل عددی است. در مقابل، نزدیک بودن R به عدد یک حاکی از همبستگی بالای دقت مدل عددی مذکور است.

### نتیجه گیری و بحث

در این مطالعه شش مدل ANFIS-GA معرفی شده که مدل شماره یک ترکیبی از کلیه پارامترهای ورودی

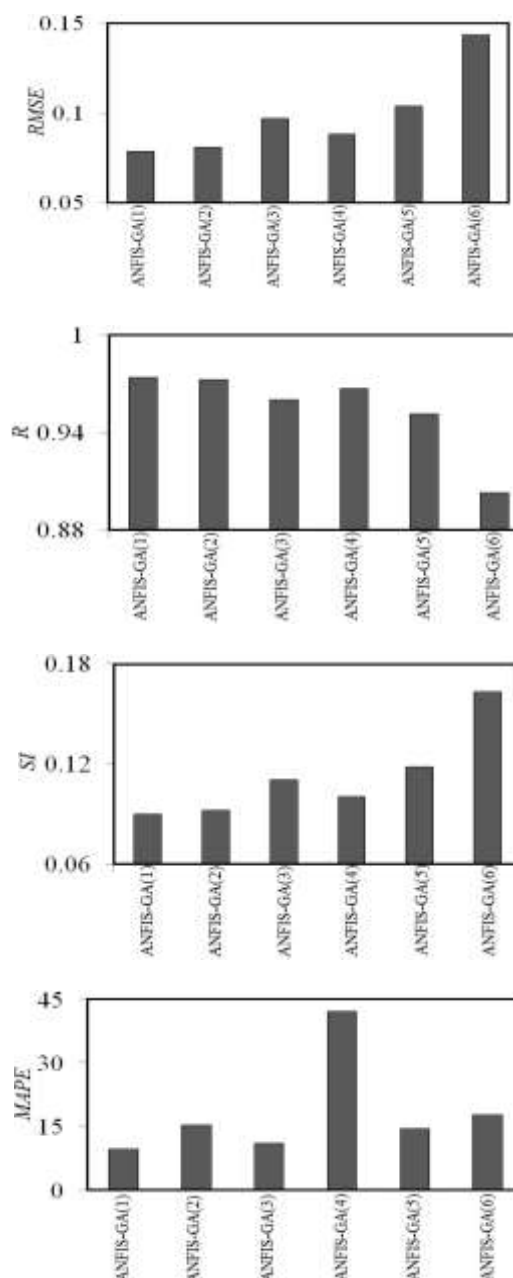
جدول ۲ نتایج شاخص‌های آماری برای مدل‌های ANFIS-GA مختلف

مدل	R	SI	RMSE	MAPE
ANFIS-GA 1	۰/۹۷۴	۰/۰۹۰	۰/۰۷۹	۹/۵۷۱
ANFIS-GA 2	۰/۹۷۳	۰/۰۹۲	۰/۰۸۱	۱۵/۲۶۰
ANFIS-GA 3	۰/۹۶۰	۰/۱۱۰	۰/۰۹۷	۱۱/۰۶۹
ANFIS-GA 4	۰/۹۶۷	۰/۱۰۰	۰/۰۸۸	۴۲/۰۶۶
ANFIS-GA 5	۰/۹۵۲	۰/۱۱۸	۰/۱۰۳	۱۴/۵۰۹
ANFIS-GA 6	۰/۹۰۳	۰/۱۶۳	۰/۱۴۳	۱۷/۶۴۷

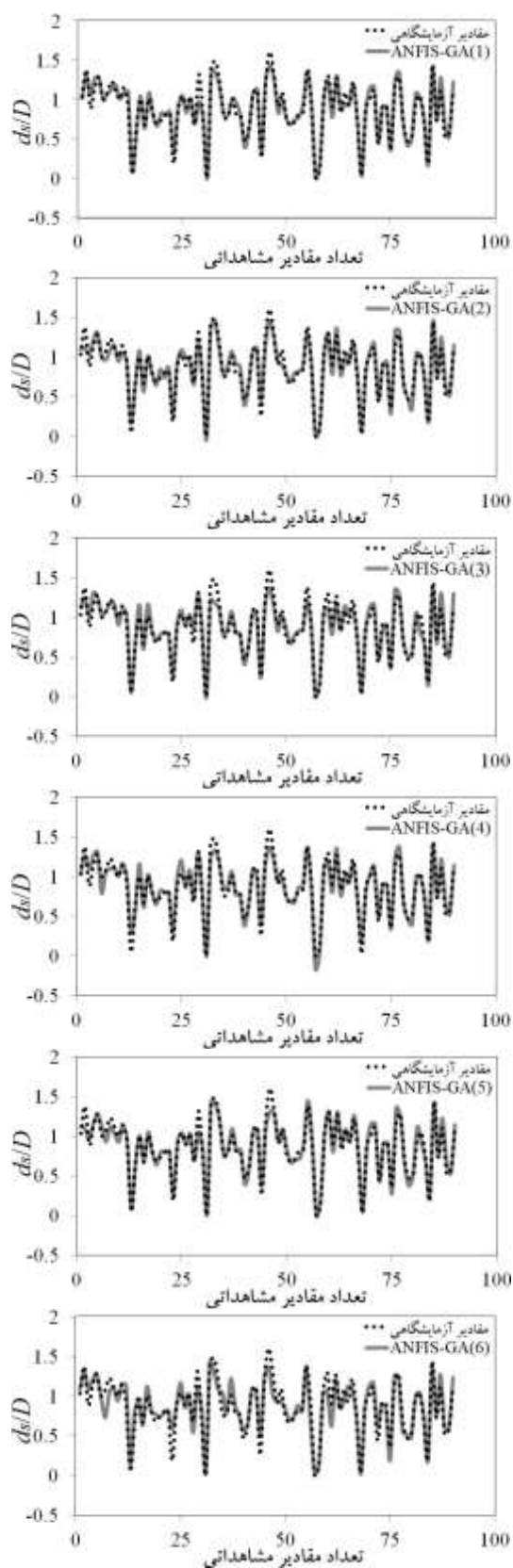
علاوه بر این در شکل (۶) نمودار توزیع خطای مدل‌های مختلف ANFIS-GA ترسیم شده است. به‌عنوان مثال تقریباً ۶۷ درصد مقادیر آبهستگی پیش‌بینی‌شده توسط مدل ANFIS-GA(1) خطایی کمتر از ۸ درصد دارند. همچنین حدوداً ۹۱ مقادیر مدل‌سازی شده توسط مدل مذکور دارای درصد خطایی کمتر از ۲۰ درصد هستند. این در حالی است که تقریباً ۷۰ درصد نتایج مدل ANFIS-GA(2) دارای درصد خطایی کمتر از ده درصد هستند. علاوه بر این مطابق نتایج توزیع خطا، حدوداً ۸۷ درصد مقادیر خطای مدل‌سازی شده توسط مدل ANFIS-GA(3) دارای درصد خطایی کمتر از ۱۶ درصد می‌باشند. بر اساس نتایج مدل‌سازی، حدوداً ۵۱ درصد نتایج آبهستگی‌های مدل‌سازی شده توسط مدل ANFIS-GA(4) خطایی کمتر از ۶ درصد دارند. برای این مدل تقریباً ۸۸ درصد نتایج، خطایی کمتر از ۲۰ درصد دارند. با توجه به توزیع خطای مدل ANFIS-GA(5)، حدوداً ۷۷ درصد مقادیر مدل‌سازی شده توسط مدل مذکور دارای خطایی کمتر از ۱۲ درصد هستند. این در حالی است که تقریباً ۷۷ درصد نتایج مدل ANFIS-GA(6) درصد خطایی کمتر از ۲۰ درصد دارند.

در شکل (۷) مقایسه مقادیر آبهستگی توسط مدل‌های ANFIS-GA با مقادیر آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این شکل محور افقی نشان‌دهنده تعداد اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و محور قائم معرف پارامتر بدون بعد آبهستگی است ( $d_s/D$ ). با توجه به نتایج

بدون بعد  $e/D$  حذف شده است. برای این مدل، مقدار خطای جذر میانگین مربعات و شاخص پراکندگی به- ترتیب مساوی ۰/۱۴۳ و ۰/۱۶۳ تخمین زده شده‌اند. خلاصه نتایج برای مدل‌های ANFIS-GA مختلف در جدول (۲) خلاصه شده است.

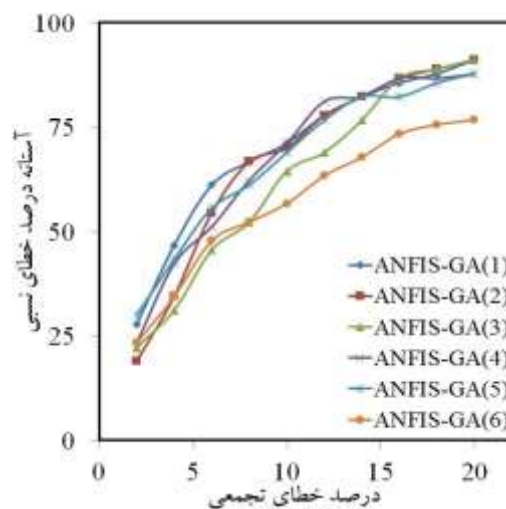


شکل ۵ نتایج شاخص‌های آماری برای مدل‌های مختلف ANFIS-GA



شکل ۷ مقایسه مقادیر آبستگتی توسط مدل‌های ANFIS-GA با مقادیر آزمایشگاهی

شبیه‌سازی مدل ANFIS-GA(1) در مقایسه با سایر مدل‌های ترکیبی مقادیر آبستگتی را با دقت بیشتری پیش‌بینی نمود. هرچند این مدل در حین پروسه شبیه‌سازی در بعضی از موقعیت‌ها دارای عملکردی کمتر از مقدار واقعی داشته است اما به‌طور کلی دارای دقت قابل قبولی است. این مدل به‌عنوان مدل برتر معرفی می‌شود. همچنین در میان کلیه مدل‌های ترکیبی، مدل ANFIS-GA(6) دارای کمترین دقت و بیشترین مقدار خطا است. همان‌گونه که بیان شد برای این مدل تأثیر پارامتر فاصله بین لوله و بستر رسوبی قبل از آبستگتی به قطر لوله ( $e/D$ ) حذف شده است. به‌بیان‌دیگر با نادیده گرفتن پارامتر مذکور دقت مدل‌سازی به شکل قابل‌توجهی کاهش یافته است. این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های عددی عملکرد ضعیف‌تری داشته است؛ بنابراین با حذف پارامتر  $e/D$  دقت مدل‌سازی کاهش می‌یابد. این پارامتر به‌عنوان مؤثرترین پارامتر در پیش‌بینی آبستگتی در مجاورت لوله‌های افقی مستغرق شناخته می‌شود. لازم به ذکر است که با حذف پارامتر بدون بعد  $D/d_{50}$  دقت شبیه‌سازی مدل عددی به شکل محسوسی کاهش یافت (ANFIS-GA 5)؛ بنابراین این پارامتر نیز تأثیر قابل‌توجهی در شبیه‌سازی عمق آبستگتی در مجاورت لوله‌های مستغرق توسط مدل ترکیبی ANFIS-GA دارد.



شکل ۶ نمودار توزیع خطای مدل‌های مختلف ANFIS-GA

برتری محسوسی در مقایسه با سایر مطالعات گذشتگان دارد.

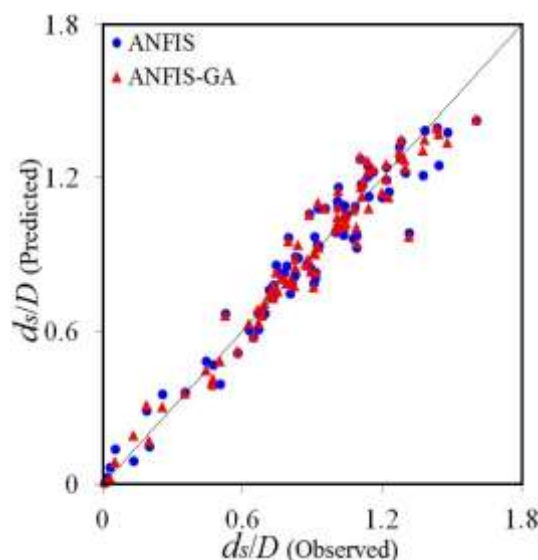
جدول ۳ نتایج شاخص‌های آماری مدل برتر ANFIS-GA، مونکادا و اگوویری (۱۹۹۹)، نجف‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) و حق‌یابی (۲۰۱۶)

مدل	MAPE	RMSE	SI	R
ANFIS-GA	۹/۵۷۱	۰/۰۷۹	۰/۰۹۰	۰/۹۷۴
مونکادا و اگوویری (۱۹۹۹)	۱۰	-	-	۰/۷۰۰
نجف‌زاده و همکاران (۲۰۱۲)	۱۹/۷۰	۰/۰۷۳	-	۰/۹۶۷
حق‌یابی (۲۰۱۶)	-	۰/۱۳۷	-	۰/۹۷۵

### نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی لوله‌های گاز و نفت از روی بستر رسوبی نواحی ساحلی عبور می‌کنند. به دلیل وقوع جریان‌های قوی ساحلی و امواج، احتمال وقوع پدیده آبشستگی در اطراف خطوط لوله وجود دارد. با افزایش عمق آبشستگی در مجاورت لوله‌های مذکور احتمال ناپایداری لوله و شکست آن وجود دارد؛ بنابراین شناسایی و پیش‌بینی عمق آبشستگی در اطراف سازه‌های مذکور از اهمیت بسزایی برخوردار است. در مطالعه حاضر با ترکیب مدل انفیس (ANFIS) و الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) یک مدل فرا ابتکاری (ANFIS-GA) برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق توسعه داده شد. سپس پارامترهای مؤثر بر روی عمق آبشستگی شناسایی گردید. همچنین برای بررسی دقت مدل‌های عددی و صحت سنجی آنها به ترتیب از شبیه‌سازی مونت کارلو و روش اعتبار سنجی متقابل با مقدار  $k$  مساوی با ۶ استفاده شد. با ارزیابی نتایج مدل‌های عددی مذکور مدل ترکیبی برتر معرفی شد. این مدل با دقت مناسبی مقادیر آبشستگی را پیش‌بینی نمود. مدل برتر مقادیر آبشستگی را بر حسب کلیه پارامترهای ورودی‌ها (Fr, )

در شکل (۸) نمودار پراکندگی برای مدل برتر ANFIS-GA و ANFIS ترسیم شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی، شاخص آماری R برای مدل‌های ANFIS-GA و ANFIS به ترتیب برابر با ۰/۹۷۴ و ۰/۹۶۸ محاسبه شدند. علاوه بر این مقادیر SI، MAPE و RMSE برای مدل ANFIS به ترتیب مساوی با ۰/۰۹۹، ۱۲/۴۴۱ و ۰/۰۸۷ به دست آمدند؛ بنابراین با توجه به نتایج مدل‌های ANFIS-GA و ANFIS، الگوریتم ژنتیک به شکل قابل توجهی دقت مدل انفیس را افزایش داد. به بیان دیگر، توانایی بهینه‌سازی این الگوریتم در شبیه‌سازی عمق آبشستگی توسط مدل مذکور کاملاً مشهود است.



شکل ۸ نمودار پراکندگی برای مدل برتر ANFIS-GA و ANFIS

### مقایسه با نتایج سایر محققین

در این بخش، نتایج مدل برتر ANFIS-GA با نتایج مطالعات انجام شده توسط مونکادا و اگوویری (۱۹۹۹)، نجف‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) و حق‌یابی (۲۰۱۶) مقایسه می‌شود. در جدول (۳) نتایج شاخص‌های آماری محاسبه شده توسط این محققین و مدل برتر ANFIS-GA مرتب شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل ANFIS-GA تقریباً در کلیه شاخص‌های آماری

سپس برای شناسایی پارامتر مؤثر، اثر هرکدام از این پارامترها برای مدل‌های بعدی به صورت جداگانه حذف شد و دقت آنها مورد ارزیابی قرار گرفت که پارامتر فاصله بین لوله و بستر رسوبی قبل از آبشستگی به قطر لوله ( $e/D$ ) به عنوان پارامتر مؤثر شناسایی گردید.

پیش‌بینی کرد. به عنوان مثال، مقادیر شاخص‌های RMSE و MAPE نیز برابر مدل مذکور به ترتیب ۰/۰۷۹ و ۹/۵۷۱ به دست آمده است؛ و همچنین تقریباً ۹۱ مقادیر مدل‌سازی شده توسط مدل برتر دارای درصد خطایی کمتر از ۲۰ درصد بودند.

## مراجع

1. Bijker E. W., Leeuwestein W., "Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents", In Seabed mechanics, pp. 235-242. Springer Netherlands, (1984).
2. Fredsoe J., Hansen E. A., Mao Y. Sumer B.M., "Three-dimensional scour below pipelines", *Journal of offshore mechanics and arctic engineering*, Vol. 110, No. 4, pp.373-379, (1988).
3. Chiew Y. M., "Mechanics of local scour around submarine pipelines", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 4, pp.515-529, (1990).
4. Olsen N. R., Melaaen M.C., "Three-dimensional calculation of scour around cylinders", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 9, pp.1048-1054, (1993).
5. Li F., Cheng L., "Numerical model for local scour under offshore pipelines", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 4, pp. 400-406, (1999).
6. Myrhaug D., Rue H., "Scour below pipelines and around vertical piles in random waves", *Coastal Engineering*, Vol. 48, pp. 227-242, (2003).
7. Teh T. C., Palmer A. C., Bolton M. D., Damgaard J. S., "Stability of submarine pipelines on liquefied seabeds", *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, Vol. 132, No. 4, pp.244-251, (2006).
8. Dey S., Singh N. P., "Clear-water scour depth below underwater pipelines", *Journal of Hydro-Environment Research*, Vol. 1, No. 2, pp.157-162, (2007).
9. Zhang Q., Draper S., Cheng L., An H., "Time Scale of Local Scour around Pipelines in Current, Waves, and Combined Waves and Current", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 143, No. 4, pp.04016093, (2016).
10. Lee J. Y., Hardjanto F. A., Cossu R., Chai S., Leong Z. Q., Forrest A. L., "Current-induced scour beneath initially elevated subsea pipelines", *Applied Ocean Research*, Vol. 82, pp.309-324, (2019).
11. Mir Alizadeh Ovrang S. M. R., Lotfollahi Yaghin M. E., Hosseinzadeh Dalir, E., Hakimzadeh H., "Investigation of scour process problem around sea pipes by considering impermeable plate under the pipe", *Journal of Civil Engineering-Modarres*. Vol. 13, No. 4, pages 125-136, (2013)
12. Hedayat Bahrami P., Katourani S., Hosseinzadeh Dalir E., Farsadi Zadeh D., "Experimental study on the effects of collision angle of flow in scouring of submerged pipes", *Soil and water sciences*. Vol.

- 26, No. 2.4, pp. 123-133, (2016).
13. Najafzadeh M., Barani G. A., Azamathulla H. M., "Prediction of pipeline scour depth in clear-water and live-bed conditions using group method of data handling", *Neural Computing and Applications*, Vol. 24, No. 3-4, pp.629-635, (2014).
  14. Haghiabi A. H., "Prediction of river pipeline scour depth using multivariate adaptive regression splines", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Vol. 8, No. 1, pp. 04016015, (2016).
  15. Najafzadeh M., Sarkamaryan S., "Extraction of optimal equations for evaluation of pipeline scour depth due to currents", In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, Vol. 171, No. 1, pp. 1-10, (2018).
  16. Jang J. S., "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system", *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, (1993).
  17. Dunn J. C. U., "A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters", *J. Cybern.*, Vol. 3, pp. 32-57, (1973).
  18. Bezdek J. C., "Pattern Recognition with Fuzzy Object Function Algorithms", New York: Plenum, (1981).
  19. Holland J., "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, USA, (1975).
  20. Moncada-M A. T., Aguirre-Pe J., "Scour below pipeline in river crossings", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 9, pp. 953-958, (1999).