



دانشگاه گیلان، دانش‌پژوهی آب و خاک

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و دوم، شماره ششم، ۱۳۹۴

http://jwsc.gau.ac.ir

گزارش کوتاه علمی

## پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج با استفاده از سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک

\* مهدی اسمعیلی‌ورکی<sup>۱</sup>، اظهر کنعانی<sup>۲</sup>، مریم نواییان<sup>۱</sup> و سیدحامد اشرف<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران، واحد علوم تحقیقات هرمزگان،

<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، هرمزگان، ایران، <sup>۳</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۵

### چکیده

**سابقه و هدف:** یکی از دلایل اصلی تخریب پل‌ها، آبشستگی پیرامون آن‌ها می‌باشد. از این رو شناخت عوامل تأثیرگذار و تخمین حداکثر عمق آبشستگی نقش مهمی در طراحی ایمن این نوع از سازه‌ها در رودخانه‌ها خواهد داشت. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر بهینه‌سازی پارامترهای سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS) با الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج و مقایسه آن با ANFIS جعبه‌ابزار نرم‌افزار Matlab و انواع مولدهای سیستم استنتاج فازی (FIS) در آن می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** به منظور بررسی تأثیر بهینه‌سازی پارامترهای ANFIS با الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج، داده‌های ۴۸ سری آزمایش مربوط به گروه پایه کج مستقر بر روی فونداسیون برای شرایط هیدرولیکی و رقوم کارگذاری فونداسیون مختلف مورد استفاده قرار گرفت. به منظور مقایسه نتایج از آماره‌های ضریب تبیین ( $R^2$ ) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که مدل ANFIS با سیستم استنتاج فازی (FIS) از نوع GENFIS1 بهترین عملکرد را در میان انواع مولدهای مورد بررسی داشته و قادر است حداکثر عمق نسبی آبشستگی را با ( $R^2$ ) و (RMSE) به ترتیب برابر 0.976 و 0.053 پیش‌بینی نماید. ارزیابی نتایج بیانگر آن است که بهینه‌سازی پارامترهای ANFIS منجر به بهبود عملکرد آن در پیش‌بینی پارامتر مورد نظر شده و توانسته است حداکثر عمق نسبی آبشستگی را با  $R^2$ ، 0.992 و RMSE، 0.0254، پیش‌بینی نماید.

**نتیجه‌گیری:** مقایسه نتایج نشان داد هر دو مدل ANFIS توانایی بالایی در پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر دارند ولی، بهینه‌سازی پارامترهای ANFIS منجر به کاهش خطای مدل در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی از 0.053 به 0.0254 می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** عمق آبشستگی، گروه پایه کج، ANFIS، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی

\* مسئول مکاتبه: esmaeili@guilan.ac.ir

## مقدمه

آبشستگی پایه‌های پل یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده پایداری پل‌های احداث شده بر رودخانه‌ها می‌باشد. در اثر آبشستگی، حفره‌ای در اطراف پایه پل شکل گرفته که به تدریج با توسعه آن باعث ناپایداری سازه و در نهایت تخریب آن در یک سیلاب خواهد شد. از این رو شناخت پدیده‌های حاکم بر آن، شبیه‌سازی جریان و الگوی آبشستگی پیرامون پایه‌ها و ارائه راه‌کارهایی جهت برآورد حداکثر مقدار آن از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

تاکنون پژوهشگران زیادی مسأله آبشستگی پایه‌های پل را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش‌ها جنبه‌های مختلف از پارامترهای اثرگذار بر آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش‌های انجام شده در رابطه با تأثیر پارامترهای هندسی پایه نظیر قطر پایه، یکنواختی سطح مقطع و زاویه آن در صفحه قائم و موازی جریان نشان داد که برای پایه با سطح مقطع یکنواخت، حداکثر عمق آبشستگی تا  $2/4$  برابر قطر پایه خواهد رسید (2). در شرایطی که سطح مقطع متفاوت باشد، نظیر شرایطی که پایه بر روی فونداسیون قرار گرفته است، بسته به تراز کارگذاری فونداسیون مقدار آبشستگی متفاوت می‌باشد (5, 11). در شرایطی که فونداسیون در عمقی کم‌تر از حداکثر آبشستگی برای تک‌پایه قرار گیرد، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد (7). همچنین در شرایطی که تراز کارگذاری فونداسیون بالاتر از بستر است، عمق آبشستگی نسبت به تک‌پایه افزایش می‌یابد (8).

پایه گروه کج یکی از انواع پل‌ها با هندسه مدرن بوده که با توجه به توسعه فناوری‌های ساخت سازه‌ها، نمونه‌هایی از آن‌ها در نقاط مختلف جهان از جمله پل

هشتم اهواز، ساخته شده یا در درست ساخت می‌باشد. فرایند آبشستگی در حضور گروه پایه تحت تأثیر عامل تقویت‌کننده در پایه جلویی که باعث افزایش عمق آبشستگی در مجاورت آن می‌گردد و عامل حفاظ بودن که منجر به کاهش سرعت مؤثر و عمق آبشستگی برای پایه پایین دست می‌شود، می‌باشد. مقایسه‌های انجام شده در خصوص تأثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه پایه کج نشان داد که مقدار آبشستگی در گروه پایه کج از حالت تک‌پایه بیش‌تر بوده که این موضوع به دلیل تأثیر توأم دو پایه و نیز کج‌شدگی آن به سمت بالادست می‌باشد. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد در شرایط نصب پایه‌ها بر روی فونداسیونی که در زیر بستر و بالاتر از حداکثر عمق آبشستگی به‌ازای تک‌پایه قرار دارد، مقدار حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد (3).

یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر به‌منظور پیش‌بینی پدیده‌هایی که عوامل مؤثر بر آن از پیچیدگی زیادی برخوردار می‌باشند، استفاده از سیستم‌های هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های تکاملی و منطق فازی می‌باشد که برگرفته از ساختار ذهنی انسان الهام می‌باشند. سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)، را می‌توان ترکیبی از شبکه عصبی و سیستم‌های فازی معرفی کرد که به‌طور هم‌زمان از الگوریتم یادگیری شبکه عصبی و بیان کیفی منطق فازی به‌منظور طراحی نگاهت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند و امروزه به‌طور گسترده برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی بسیاری از مسایل مهندسی آب مورد استفاده قرار می‌گیرند (4).

از جمله پژوهش‌های انجام شده در این رابطه می‌توان به پیش‌بینی عمق آبشستگی اطراف پایه پل با

آزمایشگاهی صورت گرفته در خصوص آبخستگی اطراف گروه پایه کج توسط (3)، حاصل شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی و به طول ۸/۶ متر، عرض ۰/۹۲ و عمق ۱ متر که دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف پلکسی گلاس بود، انجام شد (شکل ۱). پایه گروه کج مورد بررسی در این پژوهش از دو پایه مستطیلی شکل به طول و عرض ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر که با زاویه ۲۸ درجه بر روی فونداسیون مستطیلی شکل به طول و عرض ۱۶ و ۱۰ سانتی‌متر نصب شده بودند، تشکیل شد. ابعاد پایه نمونه به مقیاس ۱/۱۹۰ رفته از پل هشتم اهواز بود. رسوبات مورد استفاده در این پژوهش دارای قطر ۰/۷ میلی‌متر بود که از مصالح رودخانه‌ای تهیه و بعد از الک کردن در بازه‌ای به طول ۱/۵ متر از فلوم آزمایشگاهی که محدوده مورد مطالعه برای آبخستگی بود، قرار داده شد. قبل از شروع آزمایش‌ها لازم بود که سرعت آستانه حرکت برای قطر رسوبات مورد استفاده مشخص گردد. بنابراین برای شرایط مختلف عمق و دبی، وضعیت آستانه حرکت بررسی و در نهایت مقدار متوسط سرعت جریان برای آستانه حرکت ۰/۲۲ متر بر ثانیه تعیین گردید. مقایسه نتایج حاصله با دیاگرام شیلدرز و روابط تجربی مطابقت مطلوبی را در محدوده خطای نسبی کم‌تر از ۵ درصد نشان داد.

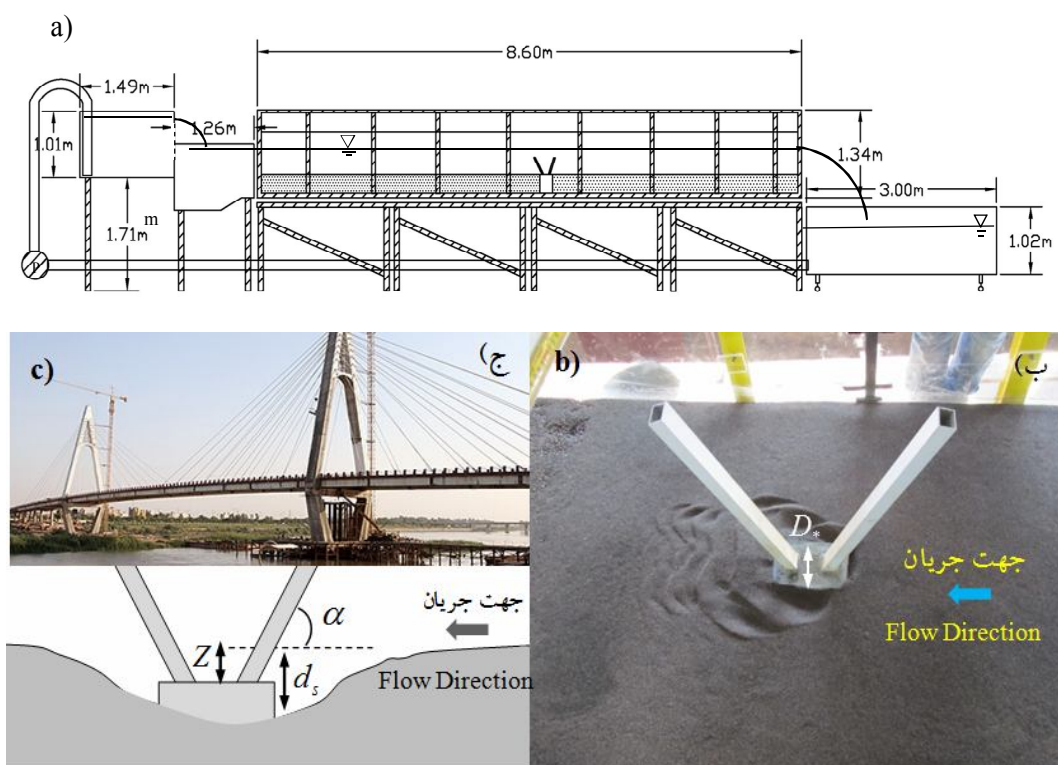
در مجموع ۴۸ آزمایش برای شرایط مختلف هیدرولیکی و استقرار فونداسیون انجام شد (جدول ۱). لازم به ذکر است زمان تعادل پس از انجام آزمایش‌های اولیه ۲۵ ساعت تعیین گردید.

استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ANFIS (باطنی و همکاران، ۲۰۰۷)، پیش‌بینی عمق آبخستگی اطراف گوشواره‌های پل در بسترهای مسلح شده (10)، پیش‌بینی میزان عمق آبخستگی پیرامون آستانه قوسی شکل (6) و پیش‌بینی عمق آبخستگی نهایی در اطراف تکیه‌های طویل (9) اشاره نمود. پژوهشگران یادشده بیان داشتند که عملکرد ANFIS در پیش‌بینی پارامترهای مورد بررسی نشان داد در اغلب موارد بهتر از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد.

از آنجا که در سیستم‌های مبتنی بر قوانین فازی با افزایش توابع عضویت در فضای ورودی، تعداد قواعد برای مدل‌سازی در ساختار شبکه بسیار زیاد خواهد شد و نیز هر یک از توابع عضویت دارای پارامترهای تنظیم‌پذیر خود هستند، بنابراین این مشکل سبب ایجاد پدیده بیش‌برازش می‌گردد (4). به همین منظور استفاده از روش‌هایی که بتواند تعداد قواعد و پارامترهای تنظیم‌پذیر لازم برای پیش‌بینی پدیده مورد نظر را بهینه نماید از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر بررسی میزان بهبود عملکرد سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) که پارامترهای توابع عضویت آن برای پارامترهای ورودی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده است در پیش‌بینی حداکثر عمق آبخستگی اطراف گروه پایه کج و مقایسه آن با ANFIS جعبه‌ابزار نرم‌افزار Matlab آن می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی و داده‌های مورد استفاده: داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از نتایج مطالعه



شکل ۱- الف) طرح کلی کانال آزمایشگاهی، ب) پایه پل مورد آزمایش و ج) نمایی از پل هشتم اهواز.

Figure 1. a) Sketch of experimental flume, b) experimental model of inclined bridge piers group and c) 8<sup>th</sup> bridge of Ahvaz.

جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی برای مطالعه آبستگي.

Table 1. Hydraulic and geometric parameters of experiment.

دبی جریان ( $l/s$ ) Discharge	سرعت نسبی ( $U/U_C$ ) Relative velocity of flow	عمق نسبی جریان ( $y/D_*$ ) Relative depth of flow	تراز نسبی قرارگیری فونداسیون ( $Z/D_*$ ) Relative level of top of foundation	تعداد آزمایش Number Experiment
11-58	0.5, 0.6, 0.8 and 0.95	1, 2 and 3	0	12
11-58	0.5, 0.6, 0.8 and 0.95	1, 2 and 3	1	12
11-58	0.5, 0.6, 0.8 and 0.95	1, 2 and 3	-0.5	12
11-58	0.5, 0.6, 0.8 and 0.95	1, 2 and 3	-1	12

ترکیبی، بخش فازی، رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد نموده و پارامترهای توابع عضویت آن به وسیله شبکه عصبی تعیین می‌گردند (4). ساختار ANFIS در مجموع حاوی پنج لایه می‌باشد. این لایه‌ها به ترتیب عبارتند از: لایه اول: این لایه به عنوان لایه ورودی شناخته می‌شود. در این لایه هر گره  $i$  مقادیر عضویتی که به

سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) بهینه شده: اولین بار جانگ (۱۹۹۳) توانست از قدرت زبانی سیستم‌های فازی که منطبق بر قواعد اگر و آنگاه می‌باشد و شبکه‌های عصبی به دلیل قابلیت‌های آموزش پذیری و استفاده از الگوهای مختلف آموزشی سیستمی تحت عنوان سیستم‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی استفاده نماید (4). در این روش

$$Q_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (6)$$

لازم به ذکر است که ساختار این شبکه تطبیقی یکتا نمی‌باشد و می‌توان به راحتی لایه ۳ و ۴ را ادغام نمود تا یک لایه معادل تشکیل گردد و ساختار شامل چهار لایه شود. در شکل ۲ ساختار ANFIS به کار رفته در این پژوهش که دارای ۳ ورودی و ۲ تابع عضویت برای هر ورودی می‌باشد، نشان داده شده است.

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طراحی مدل ANFIS با به کارگیری  $2n \times \sum_{i=1}^n r_i$  مقدار حقیقی از پارامترهای تابع عضویت  $c$  و  $\sigma$  به صورت رشته‌های دودویی تعریف می‌گردد. بنابراین هر دسته داده تولید شده در این مجموعه به دسته داده دیگری که شامل تعداد توابع عضویت به ازای هر ورودی هستند، مرتبط خواهند شد. از این رو با تولید توابع عضویت که در این پژوهش از نوع گوسی انتخاب شدند، پارامترهای  $(\sigma, c)$  با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه گردیده و همچنین ضرایب ترکیب خطی خروجی با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد (SVD) تعیین گردید. این پارامترها باعث حداقل شدن چند هدفی تابع هدف که در این مدل به صورت مجذور میانگین مربع تفاضلات (RMSE) محاسبه می‌شود، می‌گردد (4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_{i(Model)} - y_{i(Actual)})^2}{M}} \quad (7)$$

که در آن،  $M$  برابر تعداد داده‌های ورودی می‌باشد. در مرحله بهینه‌سازی که به صورت چند هدفی انجام می‌گیرد، پارامترهای ژنتیکی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد.

هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند، با استفاده از تابع عضویت تعریف شده برای آن تولید می‌نماید. به عنوان مثال برای دو ورودی و دو تابع عضویت می‌توان نوشت:

$$Q_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i=1,2 \quad (1)$$

$$Q_{2,i} = \mu_{B_{i-2}}(x) \quad \text{for } i=3,4 \quad (2)$$

لایه دوم: در این لایه مقادیر ورودی به هر گره در هم ضرب و وزن قانون‌ها به دست می‌آید. برای گره اول داریم:

$$Q_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i=1,2 \quad (3)$$

لایه سوم: هر گره در این لایه، عمل محاسبه وزن نسبی قوانین را با استفاده از معادله زیر انجام می‌دهد.

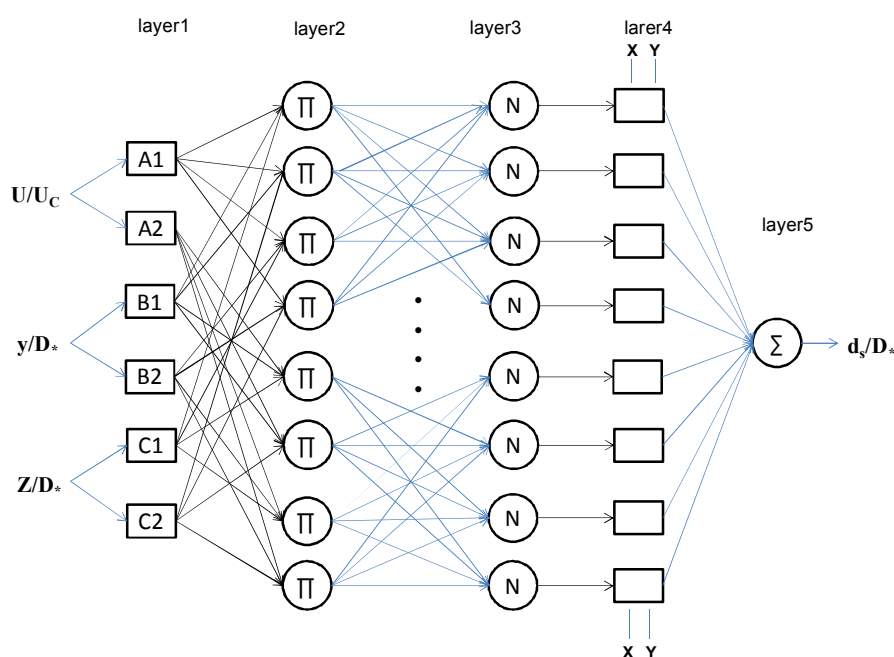
$$Q_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad i=1,2 \quad (4)$$

که در آن،  $N$  تعداد گره‌ها در این لایه می‌باشد. لایه چهارم: این لایه به لایه قوانین معروف بوده و از جمع عملیات‌ها بر روی سیگنال‌های ورودی به این لایه بدست می‌آید. برای این لایه می‌توان نوشت:

$$Q_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (5)$$

که در آن،  $\bar{w}_i$  خروجی لایه سوم و  $p_i$ ،  $q_i$  و  $r_i$ ، مجموعه پارامترهای معادله خطی قابل تنظیم در این لایه می‌باشد. به این پارامترها، پارامترهای تالی گفته می‌شود.

لایه پنجم: تنها گره این لایه، یک گره ثابت می‌باشد که خروجی اصلی شبکه را با جمع‌آوری ورودی‌ها به گره به صورت زیر محاسبه می‌نماید.



شکل ۲- ساختار ANFIS برای مدل به کار رفته در این پژوهش.

Figure 2. ANFIS structure to predict scour depth.

در برنامه Matlab تحت عنوان‌های GenFIS1، GenFIS2 و GenFIS3 نام‌گذاری شد. GenFIS1 از الگوریتم گسسته‌سازی شبکه‌ای در ساختار خود بهره می‌برد. برای پارامترهای ورودی مدل ANFIS، با به کار بردن چهار نوع از توابع عضویت گوسی (Gaussmf)، مثلثی (Trimf)، زنگوله‌ای (Gbellmf) و ذوزنقه‌ای (Trapmf) و برای دو تعداد از تابع عضویت (۲ و ۳ عدد) در هر اجرا مقادیر  $R^2$  و RMSE برای داده‌های آموزش (۳۶ داده) و آزمون (۱۲ داده) محاسبه گردید که نتایج در جدول ۳ آورده شد. مقایسه نتایج نشان داد که تابع عضویت گوسی با دو تعداد برای هر ورودی بهترین عملکرد را در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی داشت.

در این پژوهش به منظور مقایسه تأثیر بهینه‌سازی در بهبود پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی، مقادیر پیش‌بینی شده با خروجی ANFIS موجود در جعبه ابزار Matlab مقایسه گردید.

### نتایج و بحث

بررسی عملکرد مولدهای سیستم استنتاج فازی در ANFIS برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی: برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی با استفاده از ANFIS، کدنویسی در نرم‌افزار Matlab صورت گرفت. در این کد از هر سه مولد تولید سیستم استنتاج فازی (FIS) شامل گسسته‌سازی شبکه‌ای، خوشه‌بندی کاهشی و خوشه‌بندی فازی استفاده گردید. مولدهای سیستم استنتاج فازی (FIS) مذکور

جدول ۲- پارامترهاي ژنتيكي اوليه براي بهينه‌سازي پارمترهاي توابع عضويت.

**Table 2. Initial genetic algorithm parameter to optimization of membership function.**

مقدار	پارامتر
100	جمعيت اوليه (Initial population)
300	تعداد تکرار (Number of repetition)
0.8	احتمال پیوند (Crossover probability)
0.1	احتمال جهش (Mutation probability)

جدول ۳- نتايج حاصل از اجرائي مدل انفيس براي نوع و تعداد مختلف تابع عضويت.

**Table 3. Statistical performance of Anfis for various type and number of membership function.**

R <sup>2</sup>	RMSE	نوع داده Type of data	تعداد تابع عضويت براي هر ورودی number of membership function	نوع تابع عضويت number of membership function
0.994	0.0223	آموزش (Training)	2	گوسی Gaussmf
0.976	0.053	آزمون (Test)	2	
1	0	آموزش (Training)	3	
0.891	0.1046	آزمون (Test)	3	
0.994	0.0239	آموزش (Training)	2	مثلثی Trimf
0.973	0.0586	آزمون (Test)	2	
1	0	آموزش (Training)	3	
0.975	0.1335	آزمون (Test)	3	
0.994	0.0239	آموزش (Training)	2	زنگوله‌ای Gbellmf
0.799	0.0533	آزمون (Test)	2	
1	0	آموزش (Training)	3	
0.83	0.1334	آزمون (Test)	3	
0.993	0.0248	آموزش (Training)	2	دو زنگوله‌ای Trapmf
0.973	0.0531	آزمون (Test)	2	
1	0	آموزش (Training)	3	
0.745	0.1623	آزمون (Test)	3	

می‌توان گفت شعاع بهینه برای داشتن بهترین ساختار سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی مقدار ۰/۵ می‌باشد که قادر است حداکثر آبشستگی را با  $R^2$  برابر ۰/۸۷ و RMSE برابر ۰/۱۱۷ پیش‌بینی نماید.

در پیاده‌سازی ANFIS با سیستم استنتاج فازی عصبی از نوع GenFIS2 که از الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی بهره می‌گیرد، ساختارهای مختلف با به‌کار بردن شعاع‌های تأثیر متفاوت اجرا شد که نتایج حاصل در جدول ۴ ارائه گردید. با توجه به نتایج حاصله

جدول ۴- نتایج حاصل از اجرای مدل ANFIS برای شعاع‌های تأثیر مختلف.

Table 4. Statistical performance of Anfis for various radius of influence.

0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	شعاع تأثیر radius of influence
0.87	0.859	0.805	0.809	0.824	0.823	0.831	0.831	0.812	$R^2$
0.117	0.1273	0.1415	0.1383	0.1326	0.1328	0.1376	0.1298	0.1391	RMSE
0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	شعاع تأثیر radius of influence
0.91	0.919	0.903	0.684	0.496	0.456	0.576	0.723	0.853	$R^2$
0.1494	0.1442	0.1678	0.2707	0.3073	0.3105	0.2463	0.1777	0.1276	RMSE

بیانگر آن است که مناسب‌ترین تعداد خوشه‌ها به جهت بهترین پیش‌بینی از حداکثر عمق آبشستگی ۵ می‌باشد که توانسته حداکثر عمق آبشستگی را با  $R^2$  برابر ۰/۹۵۸ و RMSE برابر ۰/۰۶۵۹ پیش‌بینی نماید.

در پیاده‌سازی ANFIS با سیستم استنتاج فازی عصبی از نوع GenFIS3 که از الگوریتم خوشه‌بندی مراکز فازی بهره می‌گیرد، ساختارهای مختلف با به‌کار بردن تعداد خوشه‌های متفاوت اجرا شد که نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه گردیده است. مقایسه نتایج

جدول ۵- نتایج حاصل از اجرای مدل ANFIS با اعمال تعداد خوشه‌های متفاوت.

Table 5. Statistical performance of ANFIS for number of clusters.

تعداد خوشه‌ها (Number of clusters)								نوع داده‌ها (type of data)	شاخص آماری (Index)
20	15	10	7	5	4	3	2		
1	1	0.999	0.969	0.977	0.963	0.964	0.907	آموزش (Training)	$R^2$
0.832	0.849	0.793	0.749	0.958	0.941	0.93	0.853	آزمون (Test)	
0	0	0.0099	0.0183	0.0422	0.0957	0.0587	0.0942	آموزش (Training)	RMSE
0.1345	0.1268	0.1574	0.1654	0.0659	0.0821	0.0885	0.1228	آزمون (Test)	



کمترین مقدار RMSE، بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت صورت پذیرفت. در جدول ۶ خلاصه مقایسه آماره‌های نتایج حاصله و در شکل ۴، مقایسه نتایج خروجی ANFIS بهینه شده با الگوریتم ژنتیک با داده‌های آزمایشگاهی متناظر نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، بهینه‌سازی توانسته است دقت پیش‌بینی را افزایش قابل‌قبولی دهد به‌گونه‌ای که مقدار RMSE در پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگي از ۰/۰۵۳ به ۰/۰۲۵۳۷ کاهش دهد.

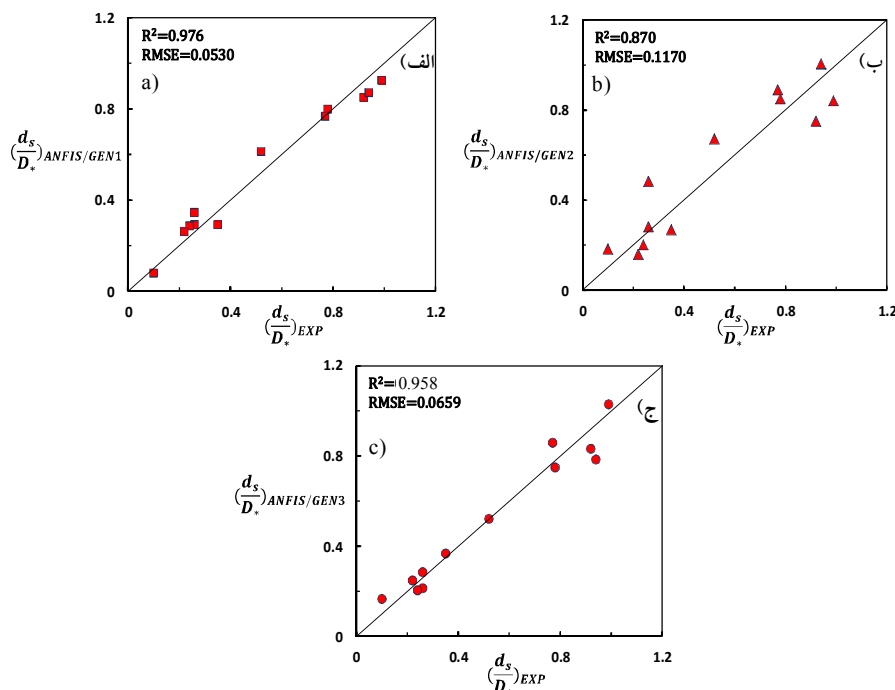
جهت ارزیابی و مقایسه بهتر وضعیت عملکرد سه مدل در پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگي، نمودارهای خروجی در کنار داده‌های آزمایشگاهی برای بهترین حالت‌های به‌دست آمده در هر مدل در شکل ۳ نشان داده شد.

بررسی عملکرد مدل ANFIS بهینه شده در پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگي: به‌منظور ارزیابی تأثیر بهینه‌سازی بر بهبود عملکرد ANFIS در پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگي، با معیار قرار دادن

جدول ۶- نتایج آماری حاصل از ANFIS بهینه شده با الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگي.

Table 6. Comparison of optimized ANFIS to predict maximum scour depth.

RMSE	R <sup>2</sup>	نوع داده Type of data	نوع مدل به‌کار رفته Type of model
0.02396	0.994	آموزش (Training)	ANFIS بهینه شده
0.02537	0.992	آزمون (Test)	optimized ANFIS



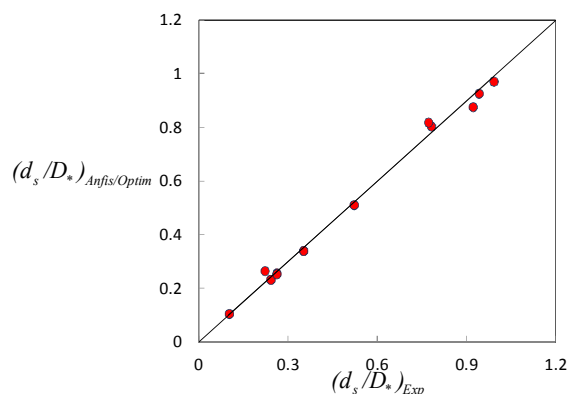
شکل ۳- مقایسه خروجی مدل ANFIS با داده‌های آزمایشگاهی برای ساختارهای منتخب الف) GENFIS1، ب) GENFIS2، ج) GENFIS3.

Figure 3. Comparison of predicted scour depth results with experimental data for various configuration, a) GENFIS1, b) GENFIS2 and c) GENFIS3.

## نتیجه‌گیری

تعیین آبخستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل یکی از مهم‌ترین مسایل در طراحی عمق کارگذاری فونداسیون و شمع‌های پل‌ها می‌باشد. در چند دهه اخیر پژوهش‌های زیادی برای یافتن روابط معتبر جهت تخمین حداکثر عمق آبخستگی در اطراف پایه‌های پل صورت گرفته است اما، به دلیل گستردگی پارامترهای تأثیرگذار و پیچیدگی روابط بین آن‌ها، اثر توأم همه پارامترها مقدور نمی‌باشد. در این پژوهش عملکرد سیستم ANFIS که پارامترهای تابع عضویت و قوانین آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک

بهینه شده با عملکرد انواع مولدهای ANFIS موجود در جعبه ابزار برنامه Matlab در پیش‌بینی حداکثر عمق آبخستگی در مجاورت پایه گروه کج مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل‌های انجام شده نشان داد که هر دو مدل توانایی بالایی در پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر دارند ولی، بهینه‌سازی پارامترهای ANFIS منجر به بهبود عملکرد آن شده و توانسته است مقدار حداکثر عمق آبخستگی را با  $R^2$ ،  $0.992$  و  $RMSE$ ،  $0.02537$  پیش‌بینی نماید.



شکل ۴- مقایسه عملکرد نتایج ANFIS بهینه شده با الگوریتم ژنتیک.

Figure 4. Comparison of predicted scour depth results of optimized ANFIS.

## منابع

1. Bateni, S.M., Borghi, S.M., and Jend, D.S. 2007. Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 20: 3. 401-414.
2. Breusers, H.N.C., and Raudkivi, A.J. 1991. *Scouring*. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 143p.
3. Esmaeili Varaki, M., Mosapoor, S., and Hatam Jafari, M. 2013. Experimental Study of the Effect of Geometry and Flow Parameters on Local Scour around Inclined Bridge Pier Group. *Iran. J. Water Res.* 7: 13. 141-151.
4. Jamali, A., Nariman-Zadeh, N., Darvizeh, A., Masoumi, A., and Hamrang, S. 2009. Multi-objective evolutionary optimization of polynomial neural networks for modelling and prediction of explosive cutting process. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 22: 4-5. 676-687.
5. Jones, J.S., Kilgore, R.T., and Misitichelli, M.P. 1990. Effect of footing location on bridge pier scour. *J. Hyd. Eng. ASCE*. 118: 2. 280-290.
6. Keshavarzi, A., Gazni, R., and Homayoon, S.R. 2012. Prediction of scouring around an arch-shaped bed sill using Neuro-Fuzzy model. *Applied Soft Computing*. 12: 1. 486-493.

7. Lu, J.Y., Shi, Z.Z., Hong, J.H., Lee, J.J., and Raikar, R.V. 2011. Temporal variation of scour depth at non uniform cylindrical piers. *J. Hyd. Eng. ASCE*. 137: 1. 45-56.
8. Melville, B.W., and Raudkivi, A.J. 1996. Effect of foundation geometry on bridge pier scour. *J. Hyd. Eng. ASCE*. 122: 4. 203-209.
9. Mohammadpour, R., Ghani, A., and Azamathulla, H.M. 2012. Prediction of equilibrium scour time around long abutments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, ICE*. 166: 7. 394-401.
10. Muzzammil, M., and Alam, J. 2011. ANFIS-based approach to scour depth prediction at abutments in armored beds. *J. Hydroinf.* 13: 4. 699-713.
11. Vittal, N., Kothyari, U.C., and Haghghat, M. 1994. Clear-water scour around bridge pier group. *J. Hyd. Eng. ASCE*. 120: 11. 1309-1318.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(6), 2016*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

### Short Technical Report

## Prediction of scour depth around inclined bridge Piers group using optimized ANFIS system parameters with GA

\***M. Esmaeili Varaki**<sup>1</sup>, **A. Kanani**<sup>2</sup>, **M. Navabian**<sup>1</sup> and **S.H. Ashraf**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Guilan, <sup>2</sup>M.Sc. Student,  
Dept. of Civil Engineering, Hormozgan Branch, Islamic Azad University, Hormozgan, Iran,

<sup>3</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Mechanical Engineering, University of Guilan

Received: 02/15/2014; Accepted: 03/16/2015

### Abstract

**Background and Objectives:** The main cause of collapse of bridges is scour around bridge piers. Therefore, knowledge about the effective parameters and estimation of maximum scour depth has an important role on the safe design of bridges in rivers. The aim of this research is evaluation of optimized ANFIS parameters with GA on prediction of maximum scour depth and comparison with all FIS generator of Matlab Toolbox ANFIS.

**Materials and Methods:** To evaluate prediction of scour depth around inclined bridge piers located on rectangular foundation using optimized ANFIS parameters with GA and Matlab ANFIS, 48 sets of experimental data of scour around incline bridge piers were used. To compare the performance of results,  $R^2$  and RMSE were utilized.

**Results:** Analysis of results showed that GENFIS1 generator of ANFIS toolbox in Matlab had the best performance, which could predict maximum scour with  $R^2$  and RMSE, 0.976 and 0.053, respectively. Comparison of the predicted scour depths indicated that optimization of ANFIS parameters had better desired parameters prediction with  $R^2$  and RMSE, 0.992 and 0.02537 in comparison of ANFIS toolbox in Matlab.

**Conclusion:** Comparison of results indicated that both ANFIS toolbox in Matlab and optimized ANFIS could predict desired output, but the study are encouraging and suggest that an optimized adaptive neuro-fuzzy approach is a powerful tool to model scour depth around inclined bridge piers group which could reduce RMSE from 0.053 to 0.0254.

**Keywords:** Scour depth, Inclined Pier group, ANFIS, Genetic algorithm, Optimization

---

\* Corresponding Author; Email: [esmaeili@guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@guilan.ac.ir)