

مدل سازی طول پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر شیب دار با استفاده از سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی - الگوریتم ژنتیک

امیر علیزاده^۱، فریبرز یوسفوند^{۲*}، احمد رجبی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۲

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

۲- استادیار گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

۳- استادیار گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fariborzoyosefvand@gmail.com

چکیده

معمولاً تبدیل سریع رژیم فوق بحرانی جریان به زیر بحرانی با پرش هیدرولیکی همراه است. این پدیده به طور کلی بعد از سازه‌های هیدرولیکی از قبیل سرریز اوجی به وقوع می‌پیوندد. یکی از مهمترین پارامترهای پرش هیدرولیکی که در تعیین ابعاد حوضچه‌های آرامش استفاده می‌شود، طول پرش هیدرولیکی است. در مطالعه حاضر، یک روش ترکیبی برای پیش‌بینی طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر شیب‌دار توسعه داده شد. به عبارت دیگر، روش حاضر با ترکیب روش‌های سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی با الگوریتم ژنتیک (ANFIS-GA) ارائه شده است. در این مطالعه، به منظور سنجش عملکرد مدل‌های ANFIS-GA از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. در ابتدا، پارامترهای مؤثر بر روی طول پرش هیدرولیکی که شامل عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی، نسبت زبری بستر، نسبت اعماق مزدوج و شیب بستر بود شناسایی شد. سپس با توجه به پارامترهای مذکور پنج مدل ANFIS-GA تعریف می‌شود. در ادامه، نتایج مدل‌های پنج‌گانه ANFIS-GA مورد بررسی قرار گرفت و مدل برتر معرفی شد. مدل برتر، مقادیر آزمایشگاهی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. به عنوان مثال مقادیر درصد میانگین مطلق خطا، خطای جذر میانگین مربعات برای این مدل به ترتیب مساوی ۴/۵۲۰ و ۰/۷۸۱ محاسبه گردیده است. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی موثرترین پارامتر در مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر شیب‌دار با استفاده از مدل ANFIS-GA است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بستر زبر شیب‌دار، سیستم استنباط فازی - عصبی تطبیقی، طول پرش هیدرولیکی، مدل ترکیبی

Modeling Hydraulic Jump Length on Sloping Rough Beds using Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems – Genetic Algorithm

A Alizadeh¹, F Yosefvand^{2*}, A Rajabi³

Received: July 22, 2018

Accepted: December 24, 2019

¹Ph.D. Candidate, Dept. of Water Eng., Kermanshah Branch, Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran

²Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Kermanshah Branch, Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran

³Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Kermanshah Branch, Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran

*Corresponding Author, Email: fariborzoyosefvand@gmail.com

Abstract

In general, rapid transformation of supercritical flow regime into subcritical flow is accompanied with hydraulic jump. The phenomenon usually occurs at downstream of the hydraulic structures such as ogee spillway. The length of hydraulic jump is one of the most important parameters used to determine the dimension of stilling basins. In current study, a hybrid method for predicting the hydraulic jump length on sloping rough bed was developed. In the other words, the hybrid method (ANFIS-GA) was presented using combination of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) and Genetic Algorithm (GA). In this study, to examine the performance of ANFIS-GA models, the Monte Carlo simulation (MCs) was used. At first, the effective parameters on length of hydraulic jump such as; Froude number in upstream of the hydraulic jump, the ratio of bed roughness, sequent depth ratio, and bed slope, were identified. Next, regarding these parameters, five ANFIS-GA models were defined. Then, the results of the ANFIS-GA models were examined and the superior model was introduced. The superior model predicted the experimental measurements with acceptable accuracy. For example, the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and Root Mean Square Error (RMSE) were respectively computed 4.520 and 0.781. In addition, the results of modeling revealed that the Froude number at upstream of hydraulic jump was the most effective parameter in modeling the length of hydraulic jump on sloping rough bed using ANFIS-GA method.

Key Words: ANFIS, Genetic Algorithm, Hybrid method, Length of hydraulic jump, Sloping rough bed.

مقدمه

آزمایشگاهی، نظری و عددی فراوانی بر روی رفتار پرش هیدرولیکی انجام گرفته است که می توان از مطالعات پارسامهر و همکاران (۲۰۱۶)، پورعبدالله و همکاران (۲۰۱۴) و عباسپور (۲۰۱۳) نام برد. بردلی و پترکا (۱۹۵۷) طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف را مورد مطالعه قرار دادند. راجاراتنام (۱۹۶۸) برای اولین بار رفتار پرش هیدرولیکی روی بستر زبر را مورد مطالعه قرار داد. لوئیوسر و شیلر (۱۹۷۵) یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی مشخصات پرش

پرش هیدرولیکی به طور کلی در پائین دست سازه‌هایی همچون سرریزهای اوجی با تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی اتفاق می افتد. همچنین به منظور جلوگیری از کف شویی بستر توسط جریان فوق بحرانی، حوضچه‌های آرامش در پائین دست سرریزهای اوجی ساخته می شوند. طول پرش هیدرولیکی یکی از پارامترهای موثر در طراحی ابعاد حوضچه‌های آرامش محسوب می شود. مطالعات

هیدرولیکی داخل کانال مستطیلی با بستر زبر انجام دادند. هوگس و فلاک (۱۹۵۷) مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بستر زبر باعث کاهش عمق جریان پائین دست و طول پرش هیدرولیکی می شود. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف و کنگره ای را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. آنها نشان دادند که طول پرش هیدرولیکی روی بستر صاف دو برابر پرش هیدرولیکی روی بستر کنگره ای می باشد. همچنین کارولو و همکاران (۲۰۰۷) رفتار پرش هیدرولیکی داخل یک کانال مستطیلی با بستر زبر و صاف را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آنها با تجزیه و تحلیل نتایج مطالعه آزمایشگاهی خود یک رابطه برای محاسبه طول غلتاب پرش هیدرولیکی روی بستر زبر ارائه نمودند. پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۸) پارامترهای موثر بر روی اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر و غیرهمگن را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آنها رابطه ای را برای تعیین طول غلتاب پرش هیدرولیکی روی بستر زبر همگن و غیرهمگن پیشنهاد دادند. شفاعی بجستان و نیسی (۲۰۰۹) اثر زبری های به شکل لوزی را بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که این نوع زبری، عمق پایاب پرش هیدرولیکی را ۲۴٪ و طول پرش هیدرولیکی را ۴۰٪ کاهش می دهد. کارولو و همکاران (۲۰۰۹) مشخصات پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی بر روی بسترهای صاف و زبر را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آنها با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی، روابطی را برای محاسبه اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی ارائه نمودند. روابط آنها برای بستر صاف تابعی از عدد فرود جریان در بالادست پرش بوده و برای کانال با بستر زبر به عنوان تابعی از عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی و نسبت زبری بستر به عمق بحرانی جریان است.

ایزیزه و همکاران (۲۰۱۲) پرش هیدرولیکی روی بستر های با زبری U شکل را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مشخصات پرش هیدرولیکی روی بستر با زبری U شکل به طر قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. کارولو و همکاران (۲۰۱۲) رفتار پرش های هیدرولیکی کلاسیک و B-jump روی بسترهای زبر و صاف را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند و معادلاتی را برای محاسبه طول غلتاب این نوع از پرش های هیدرولیکی ارائه نمودند. در دهه های اخیر، روش های مختلف هوش مصنوعی برای شبیه سازی پدیده های پیچیده و غیرخطی علوم مختلف به صورت گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته اند. مطالعات بسیاری در ارتباط با مدل سازی مشخصات پرش هیدرولیکی با استفاده از تکنیک های مختلف محاسبات نرم انجام شده است. به عنوان مثال، امید و همکاران (۲۰۰۵) اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی را به وسیله شبکه عصبی مصنوعی تخمین زدند. آنها با تجزیه و تحلیل نتایج مدل خود نشان دادند که شبکه عصبی مصنوعی مشخصات پرش هیدرولیکی را با دقت مناسبی شبیه سازی می کند. طول پرش هیدرولیکی در کانال های مستطیلی با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی توسط ناصری و عثمان (۲۰۱۲) مدل سازی گردید. آنها با استفاده از این مدل، مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال های مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. آنها طول پرش هیدرولیکی را برای اعداد فرودهای ۱/۷ تا ۱۹/۵ تخمین زدند. طول، عمق و افت انرژی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با استفاده از برنامه ریزی نویسی ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی توسط عباسپور و همکاران (۲۰۱۳) مدل سازی گردید. آنها بیان کردند که شبکه عصبی مصنوعی مشخصات پرش هیدرولیکی را در مقایسه با برنامه ریزی ژنتیک با دقت بیشتری شبیه سازی می کند. هویوچی و همکاران (۲۰۱۳) مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال های U شکل را مورد مطالعه

که "کم" و "زیاد" در این قاعده، متغیرهای کلامی هستند. پایگاه داده، توابع عضویت بکار برده شده در قواعد فازی و همچنین مکانیسم استدلال، رویه استنتاج خروجی از متغیرهای ورودی را اجرا می‌کند. فرض می‌شود که سیستم فازی دارای دو متغیر x و y و یک خروجی z می‌باشد. بعلاوه پایگاه قواعد شامل دو قاعده فازی اگر-آنگاه در سیستم فازی تاکاگی-سوگنو^۴ درجه اول، به صورت زیر می‌باشد.

$$\text{Rule1: if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \quad [1]$$

$$\text{Rule2: if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ then } f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \quad [2]$$

ساختار ANFIS متشکل از پنج لایه مختلف است

که به صورت زیر تعریف می‌شوند (جانگ و همکاران، ۱۹۹۷):

لایه ۱: گره‌ها در این لایه گره‌های تطبیقی هستند

که خروجی هر گره به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad [3]$$

که x مقدار ورودی گره A_i است و $O_{1,i}$ تابع

عضویت متغیر زبانی A_i است. برای تابع عضویت A اشکال مختلفی وجود دارد اما با توجه به عملکرد خوب توابع عضویت زنگوله‌ای شکل در مطالعات مختلف، از این تابع که به شکل زیر تعریف می‌شود، استفاده می‌شود:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad [4]$$

که a_i و b_i و c_i پارامترهای تابع می‌باشند و با

تغییر هر یک از این پارامترها، تابع عضویت زنگوله‌ای شکل نیز متناسب با آن تغییر می‌کند که در واقع اشکال گوناگونی از تابع عضویت برای مجموعه فازی را موجب می‌شود. پارامترهایی که در این لایه قرار دارند به عنوان پارامترهای مقدم^۵ معرفی می‌شوند. این پارامترها در طول فرایند آموزش تنظیم می‌شوند.

آزمایشگاهی و عددی قرار دادند. آنها به وسیله مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های U شکل را پیش‌بینی کردند. آنها با استفاده از رگرسیون روابطی را برای محاسبه طول پرش هیدرولیکی ارائه نمودند. در ادامه عظیمی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل انفیس و یک مدل ترکیبی طول غلتاب پرش هیدرولیکی را پیش‌بینی کردند. آنها بیان نمودند که مدل ترکیبی دارای دقت بیشتری است. در مطالعه حاضر، طول پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای شیب‌دار زبر با استفاده از روش ترکیبی ANFIS-GA (انفیس-الگوریتم ژنتیک) تخمین زده می‌شود. بنابراین با توجه به پارامترهای موثر بر روی طول پرش، پنج مدل مختلف برای تخمین این پارامتر بر روی سطوح زبر شیب‌دار معرفی شدند. در ادامه با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌های مذکور، مدل برتر برای تخمین طول پرش هیدرولیکی معرفی شد.

مواد و روش‌ها

سیستم‌های استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS^۱)

انفیس برای اولین بار با آموزش سیستم‌های استنتاج فازی (FIS^۲) در چاقوب یک شبکه عصبی تطبیقی توسط جانگ (۱۹۹۳) ارائه شده است. ساختار یک شبکه عصبی تطبیقی شامل تعدادی گره در لایه‌های مختلف است که با یکدیگر ارتباط دارند. خروجی این شبکه وابسته به پارامترهای قابل تنظیم در گره‌هاست. قواعد یادگیری شبکه تعیین می‌کند که چطور این پارامترها به منظور کمینه کردن خطا به‌روز شوند. ساختار یک سیستم استنتاج فازی شامل سه جزء اصلی شامل پایگاه قواعد، پایگاه داده و یک مکانیسم استدلال است. یک پایگاه قواعد فازی شامل قواعد اگر-آنگاه^۳ می‌باشد. بطور مثال "اگر مقدار x کم باشد، آنگاه مقدار y کم می‌شود" می‌تواند یک قاعده فازی باشد. بطوری

¹ Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems

² Fuzzy Inference Systems

³ IF-THEN

⁴ Takagi-Sugeno

⁵ Premise

الگوریتم‌های مختلفی برای آموزش انفیس وجود دارد. الگوریتم‌های پس انتشار^۱ و الگوریتم هیبریدی (ترکیب الگوریتم پس انتشار و حداقل مربعات) دوتا از رایج ترین الگوریتم‌ها هستند. اما با توجه به اینکه در مسائل پیچیده این الگوریتم‌های مبتنی بر گرادیان از عملکرد خوبی برخوردار نیستند، در این مطالعه الگوریتم ژنتیک که به عنوان یکی الگوریتم بهینه سازی قوی در مسائل مختلف مهندسی شناخته شده است، جهت تنظیم بهینه پارامترهای توابع عضویت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (هالند ۱۹۷۵) روش جستجوی احتمالاتی فراگیر است که از فرایند تکامل زیست‌شناختی طبیعی پیروی می‌کند. این الگوریتم بر جمعیت جواب‌های بالقوه عمل می‌کند و اصل تنازع بقا را در تولید تقریب-های بهتر جواب مساله، به کار می‌گیرد. در هر نسل، مجموعه جدیدی از تقریب‌ها با فرایند انتخاب بهترین عضو بر اساس میزان برازش آن‌ها در دامنه مسئله و تکثیر با عملگرهای گرفته شده از ژنتیک طبیعی، ساخته می‌شود. این فرایند نهایتاً به تکامل جمعیتی از اعضا ختم می‌شود که نسبت به اعضای اولیه که در واقع والدین اصلی آن‌هاست، با محیط سازگاری بهتری دارند. رویه کلی الگوریتم ژنتیک در ادامه بیان می‌شود:

- ۱- شروع: ایجاد جمعیتی از n کروموزوم (جواب‌های بالقوه مسئله) به صورت تصادفی
- ۲- شایستگی^۲: ارزیابی میزان سازگاری هر کروموزوم x با استفاده از تابع شایستگی x .
- ۳- جمعیت جدید: ایجاد مراحل جدید با تکرار مراحل زیر تا تکمیل جمعیت جدید
- ۳-۱- انتخاب^۳: انتخاب دو کروموزوم مادر از میان جمعیت براساس میزان سازگاری آن‌ها

لایه ۲: مقدار هر گره در این لایه نشان دهنده شدت خروجی (یا قدرت آتش) قاعده نام است. خروجی این لایه حاصل ضرب سیگنال‌های همه ورودی‌ها بوده که به صورت رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(x) \quad i=1,2 \quad [5]$$

لایه ۳: هر گره در این لایه ثابت می‌باشد. در این لایه نسبت شدت قاعده نام به کل قواعد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_1}{w_1 + w_2} \quad i=1,2 \quad [7]$$

لایه ۴: گره‌ها در این لایه اجراکننده خروجی هر قاعده هستند:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i=1,2 \quad [11]$$

که p_i, q_i, r_i پارامترهای تالی هستند.

لایه ۵: در این لایه تنها یک گره وجود دارد که یک گره ثابت است و مقدار نهایی پارامتر خروجی را به عنوان مجموعی از سیگنال‌های ورودی به صورت زیر نشان می‌دهد:

$$O_{5,i} = \sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i} \quad (8)$$

مرحله آموزش انفیس به منظور تنظیم همه پارامترهای قابل تنظیم (پارامترهای تابع عضویت) و با هدف بدست آوردن مقادیر خروجی از سیستم انفیس که بیشترین تطابق را با داده‌های آموزش داشته باشند، انجام می‌شود. پس از آموزش انفیس می‌توان با معرفی داده‌های مختلف ورودی، خروجی را بدست آورد. با فرض ثابت بودن پارامترهای تابع هدف، خروجی انفیس را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد (جانگ ۱۹۹۳):

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 = \bar{w}_1 (p_1 x + q_1 y + r_1) + \bar{w}_2 (p_2 x + q_2 y + r_2) \quad [9]$$

در حقیقت، f یک ترکیب خطی از پارامترهای تالی

$(p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2)$ است

¹ Backpropagation

² Fitness

³ Selection

ارزیابی می‌شود و آن‌هایی که دارای شایستگی بیشتری هستند، به عنوان جمعیت جایگزین انتخاب می‌شوند.

روش ترکیبی ANFIS-GA

در این مطالعه، جهت تعیین مقدار توابع عضویت انفیس که منجر به آموزش بهینه این شبکه می‌شود، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مزیت این روش کاهش هزینه‌های محاسباتی برای یک توپولوژی داده شده است. در این قسمت الگوریتم ارائه شده در این تحقیق جهت ارائه روش ترکیبی نروفازی و الگوریتم ژنتیک که به صورت شکل ۱ می‌باشد، به صورت مرحله به مرحله توضیح داده می‌شود.

در ابتدا با استفاده از یک ماتریس که داده‌های مربوط به طول پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زیر شیب‌دار در آن ارائه شده است، داده‌های شبکه تعیین می‌شود. داده‌ها به دو قسمت داده‌های آموزش و تست تقسیم می‌شوند. درصد قابل توجهی از داده‌های آموزش جهت صحت سنجی مدل در حین آموزش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از داده‌های مرتب شده، آموزش انفیس شروع می‌شود. روند آموزش به سیستم این امکان را می‌دهد که پارامترهای تعریف شده به عنوان ورودی و یا خروجی مدل را تنظیم کند. روند آموزش زمانی متوقف می‌شود که معیارهای تعیین شده جهت توقف برنامه، اتمام شوند. بعد از تعیین داده‌های آموزش، نوع توابع عضویت و سیستم استنتاج فازی با استفاده از تطبیق پارامترهای تابع عضویت بهینه می‌شود که در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک جهت تعیین پارامترهای وابسته به توابع عضویت در سیستم استنتاج فازی استفاده می‌شود. در ادامه یک بردار که دارای N بعد مختلف می‌باشد، (N تعداد توابع عضویت است)، تعریف می‌شود. این بردار شامل پارامترهای تابع عضویت می‌باشد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار آن‌ها بهینه می‌شود. مقدار تابع شایستگی تعریف شده در این مطالعه به صورت تابع میانگین مربعات خطا

۲-۳ تقاطع^۱: کروموزوم‌های مادر مرحله ۳-۱ به طور تصادفی با میزان احتمال تعیین شده جفت گیری می‌کنند و دو فرزند بوجود می‌آورند. اگر تقاطع صورت نگیرد، فرزندان عیناً مشابه دو کروموزوم مادر می‌شوند.

۳-۳ جهش^۲: کروموزوم‌های فرزند ایجاد شده به طور تصادفی با میزان احتمال معینی، جهش می‌یابند.

۳-۴ فرزندان ایجاد شده با استفاده از عملگرهای ژنتیکی (انتخاب، تقاطع و جهش) در جمعیت جدید قرار می‌گیرند.

۴- جایگزینی: از جمعیت ایجاد شده در جمعیت جدید، قرار می‌گیرند.

۵- شرط همگرایی: اگر شرایط مطلوب مانند رسیدن به دقت مورد نظر یا تعداد تکرارهای تعیین شده در مساله، حاصل شود، الگوریتم متوقف و جمعیت موجود، جواب مطلوب را نشان می‌دهد.

۶- حلقه تکرار: در صورت عدم توقف الگوریتم در گام ۵، به گام ۲ برگردیم و مراحل تکرار می‌شود و این روند تا رسیدن به شرایط مطلوب ادامه می‌یابد. در این پژوهش جمعیت اولیه برابر با ۳۰، تعداد نسل‌ها برابر با ۱۰۰۰، ثابت تقاطع برابر با ۰/۸، ثابت جهش برابر با ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است. روش تقاطع مورد استفاده به صورت تقاطع دو نقطه‌ای^۳ مورد استفاده قرار گرفته است و برای انتخاب از روش چرخه رولت^۴ استفاده شده است. شرط توقف به صورت عدم پیشرفت تابع برای ۷۰ نسل متوالی و یا به پایان رسیدن تعداد نسل‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین برای جایگزینی فرزندان تازه متولد شده با جمعیت نسل قبل، میزان تابع شایستگی مربوط به یک ذره از کروموزوم‌ها

¹ Crossover

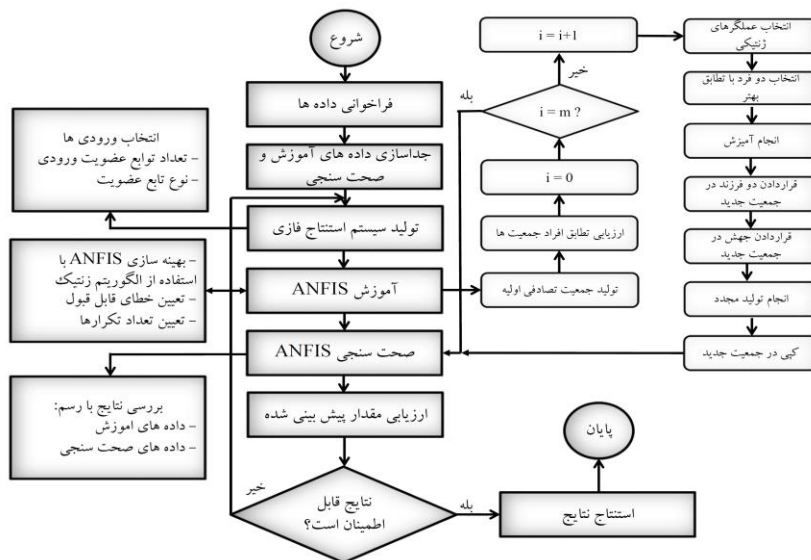
² Mutation

³ Two-point crossover

⁴ Roulette wheel

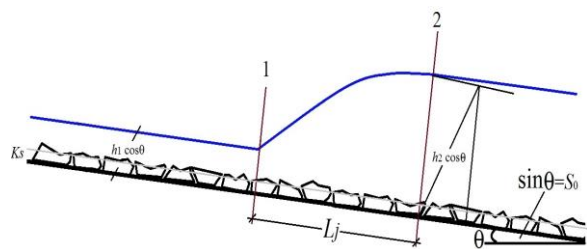
پارامترها یکبار بروزرسانی شدند، در تکرار بعدی، پارامتر اول برای بار دوم بروز رسانی می‌شود. بنابراین به صورت تکرار به تکرار تمامی پارامترها جهت رسیدن به سمت نقطه بهینه بروزرسانی می‌شوند.

می‌باشد. در ابتدا پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک به صورت تصادفی تعیین می‌شوند و در ادامه با استفاده از الگوریتم، مقادیر تعیین شده بروز رسانی می‌شوند. در هر مرحله از تکرار، یکی از پارامترهای تابع عضویت بروزرسانی می‌شود و این مراحل برای تمامی پارامترها ادامه می‌یابد و پس از اینکه تمامی



شکل ۱- فلوچارت روش ترکیبی نرو-فازی و الگوریتم ژنتیک.

شده است. در جدول ۱ نیز دامنه مقادیر آزمایشگاهی کومار و لودهی (۲۰۱۶) مرتب شده است.



شکل ۲- پرش هیدرولیکی روی سطح شیب‌دار زبر.

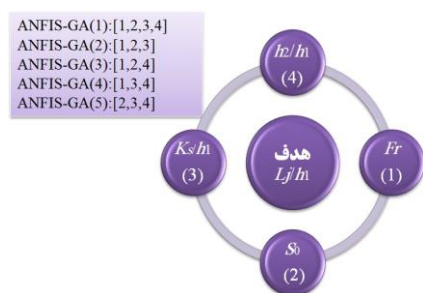
جدول ۱- دامنه مقادیر آزمایشگاهی کومار و لودهی (۲۰۱۶).

پارامتر مورد نظر	بیشینه	کمینه
$Q (m^3 s^{-1})$	۰/۰۷۲	۰/۰۳۴
$S_0 (-)$	۰/۰۱۶	۰/۰۰۰۵
$Ks (m)$	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲
$h_1 (m)$	۰/۰۸۷	۰/۰۳

مدل آزمایشگاهی

در مطالعه حاضر به منظور اعتبار سنجی نتایج مدل‌های ANFIS-GA از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی کومار و لودهی (۲۰۱۶) استفاده می‌شود. مطالعه آزمایشگاهی مذکور در یک کانال مستطیلی به طول ۸ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و عرض ۰/۶ متر انجام گرفته است. مشخصات پرش هیدرولیکی در سه شیب مختلف ۰/۰۰۴۶۳، ۰/۰۰۹۸۶ و ۰/۰۱۵۵۲ اندازه‌گیری شده است. در مطالعه آزمایشگاهی مذکور زبری بستر با استفاده از مصالح سنگی با میانگین قطر (d_{50}) برابر ۰/۰۰۳۹۸، ۰/۰۰۰۵۶، ۰/۰۰۰۷ و ۰/۰۱۱ متر ایجاد شده است. در مطالعه آزمایشگاهی کومار و لودهی (۲۰۱۶)، ارتفاع زبری بستر (Ks) برابر اندازه متوسط مصالح سنگی در نظر گرفته شده است که در شکل ۲ طرح کلی پرش هیدرولیکی بر روی بستر شیب‌دار زبر نشان داده

بنابراین در این مطالعه، برای مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی تاثیر پارامترهای عدد فرود جریان (F_1)، نسبت زبری بستر (Ks/h_1)، نسبت عمق‌های مزدوج (h_2/h_1) و شیب بستر (S_0) در نظر گرفته شد. به‌منظور شناسایی پارامتر موثر در مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی پنج مدل ANFIS-GA مختلف تعریف می‌شود. نحوه ترکیب پارامترهای مذکور در مدل‌های مختلف ANFIS-GA در شکل ۳ نشان داده شده است. در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های ANFIS-GA از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. لازم به یادآوری است که، برای اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی‌ها روش اعتبارسنجی ضربدری با k مساوی ۴ به کار گرفته شده است.



شکل ۳- چگونگی ترکیب پارامترهای ورودی مدل‌های ANFIS-GA

نتایج و بحث

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های عددی از شاخص‌های آماری خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$)، درصد میانگین مطلق خطا ($MAPE$) و ضریب همبستگی (R) که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند، استفاده می‌گردد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((Lj/h_1)_{(Predicted)_i} - (Lj/h_1)_{(Observed)_i} \right)^2} \quad [13]$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|(Lj/h_1)_{(Predicted)_i} - (Lj/h_1)_{(Observed)_i}|}{(Lj/h_1)_{(Observed)_i}} \right) \times 100 \quad [14]$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \left((Lj/h_1)_{(Observed)_i} - \overline{(Lj/h_1)_{(Observed)}} \right) \left((Lj/h_1)_{(Predicted)_i} - \overline{(Lj/h_1)_{(Predicted)}} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left((Lj/h_1)_{(Observed)_i} - \overline{(Lj/h_1)_{(Observed)}} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left((Lj/h_1)_{(Predicted)_i} - \overline{(Lj/h_1)_{(Predicted)}} \right)^2}} \quad [15]$$

$h_2 (m)$	۰/۳۴۴	۰/۰۲۶
$L_j (m)$	۰/۹	۰/۳

طول پرش هیدرولیکی

هاگر و همکاران (۱۹۹۰)، اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و کارولو و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که طول پرش هیدرولیکی تابعی از پارامترهای عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی (F_1) و نسبت زبری بستر کانال به عمق جریان در بالادست پرش هیدرولیکی (Ks/h_1) است:

$$\frac{L_j}{h_1} = f \left(F_1, \frac{Ks}{h_1} \right) \quad [10]$$

همچنین عظیمی و همکاران (۲۰۱۶) برای مدل‌سازی طول پرش، پارامتر مذکور را به‌عنوان تابعی از عدد فرود (F_1)، نسبت زبری بستر به عمق جریان در بالادست پرش هیدرولیکی (Ks/h_1) و نسبت عمق‌های مزدوج (h_2/h_1) در نظر گرفت:

$$\frac{L_j}{h_1} = f \left(F_1, \frac{h_2}{h_1}, \frac{Ks}{h_1} \right) \quad [11]$$

این درحالی است که، کومار و لودهی (۲۰۱۶) شیب کانال (S_0) را نیز در مطالعه خود در نظر گرفتند. بنابراین در مطالعه حاضر، تاثیر عدد فرود جریان (F_1)، نسبت زبری بستر (Ks/h_1)، نسبت عمق‌های مزدوج (h_2/h_1) و شیب بستر کانال (S_0) بر روی طول پرش هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود:

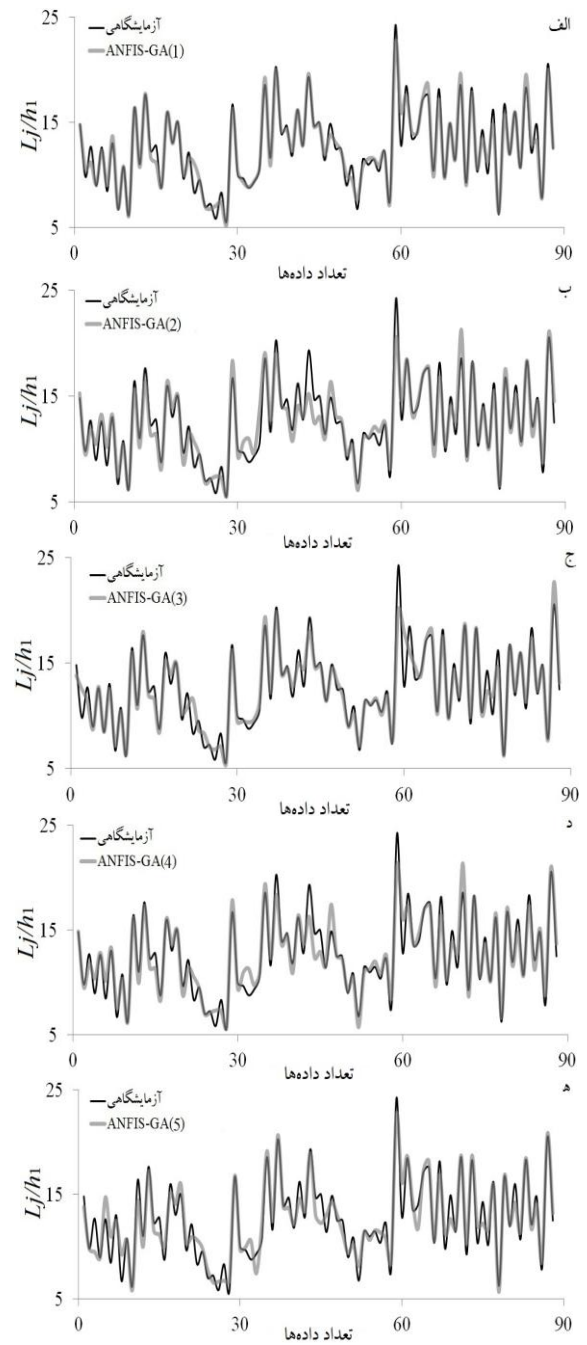
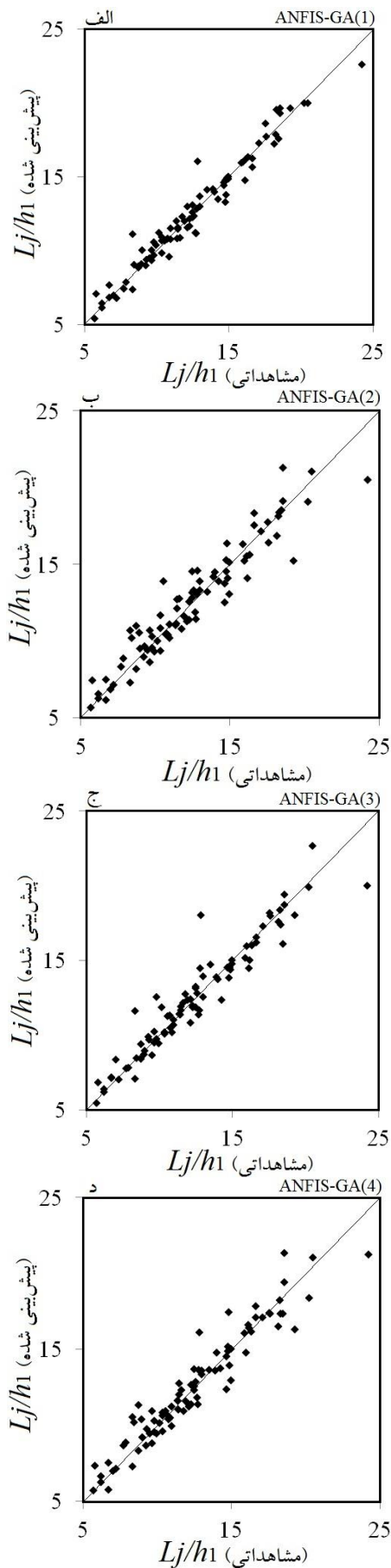
$$\frac{L_j}{h_1} = f \left(F_1, \frac{h_2}{h_1}, \frac{Ks}{h_1}, S_0 \right) \quad [12]$$

طول پرش هیدرولیکی را بر حسب پارامترهای F_1 ، h_2/h_1 و S_0 پیش‌بینی می‌کند. برای این مدل مقادیر شاخص‌های R ، $MAPE$ و $RMSE$ به ترتیب برابر 0.903 و 0.0955 و $1/132$ محاسبه گردیده است. مقدار ضریب همبستگی برای مدل ANFIS-GA(4) برابر 0.957 می‌باشد. در بین مدل‌های با سه پارامتر ورودی، مدل ANFIS-GA(4) بیشترین دقت را در شبیه‌سازی طول پرش هیدرولیکی دارد. در مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی توسط این مدل تاثیر پارامتر شیب کف کانال حذف شده است. این مدل مقادیر طول پرش را بر حسب پارامترهای F_1 ، h_2/h_1 و Ks/h_1 تخمین می‌زند. مقدار خطای جذر میانگین مربعات برای ANFIS-GA(4) مساوی $1/114$ و مقدار شاخص درصد میانگین مطلق خطا نیز برابر $6/719$ بدست آمده است. در میان مدل‌های با سه پارامتر ورودی، مدل ANFIS-GA(5) دارای کمترین مقدار دقت است. برای این مدل، مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ به ترتیب مساوی با $8/718$ و $1/240$ محاسبه گردیده است. همچنین مقدار شاخص همبستگی برای ANFIS-GA(5) برابر 0.946 تخمین زده شده است. این مدل، طول پرش هیدرولیکی را به‌عنوان تابعی از نسبت زبری بستر (Ks/h_1)، نسبت عمق‌های مزدوج (h_2/h_1) و شیب بستر (S_0) مدل‌سازی می‌نماید. به عبارت دیگر، تاثیر پارامتر عدد فرود جریان (F_1) برای مدل ANFIS-GA(5) نادیده گرفته شده است. با توجه به تجزیه و تحلیل نتایج مدل-های پنج‌گانه ANFIS-GA، موثرترین پارامتر در پیش-بینی طول پرش هیدرولیکی، عدد فرود جریان (F_1) می‌باشد. همچنین مدل ANFIS-GA(1) به‌عنوان مدل برتر در تخمین طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر شیب-دار معرفی می‌گردد.

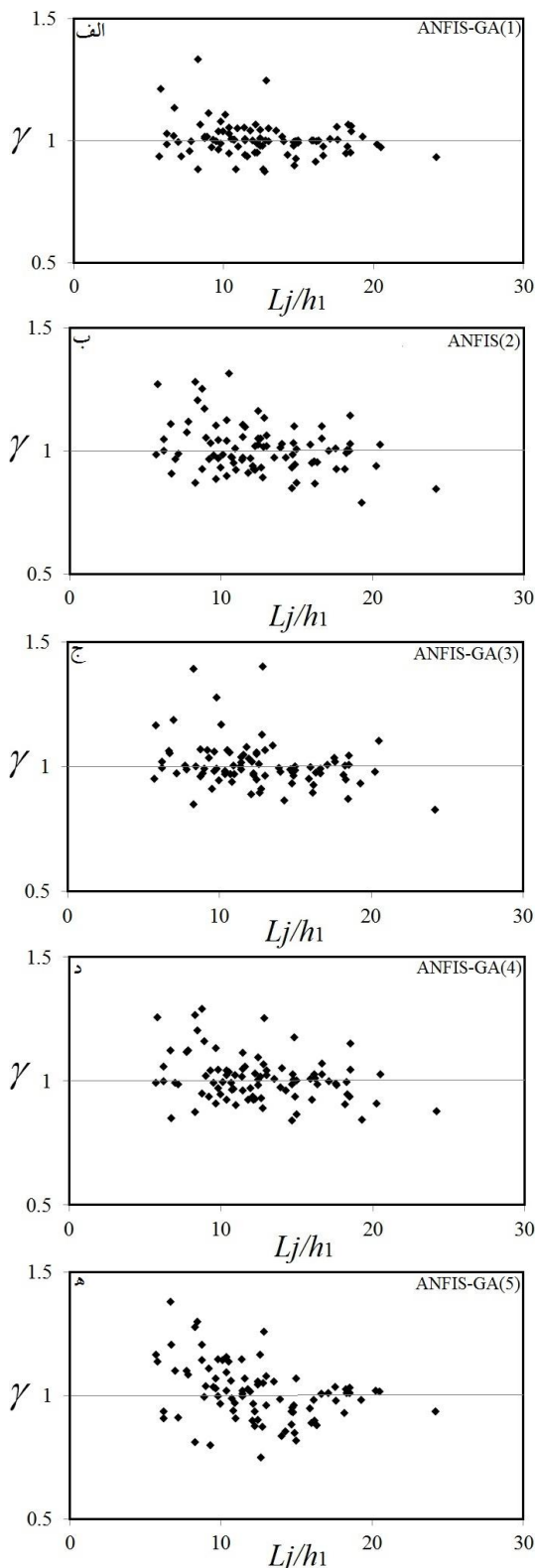
همچنین برای تجزیه و تحلیل بیشتر نتایج مدل-های ANFIS-GA(1) تا ANFIS-GA(5) پارامتر γ یا نسبت اختلاف به‌صورت نسبت طول پرش هیدرولیکی مدل‌سازی شده به مقدار آزمایشگاهی به‌صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\gamma = (Lr/h_1)_{(Predicted)} - (Lr/h_1)_{(Observed)} \quad (16)$$

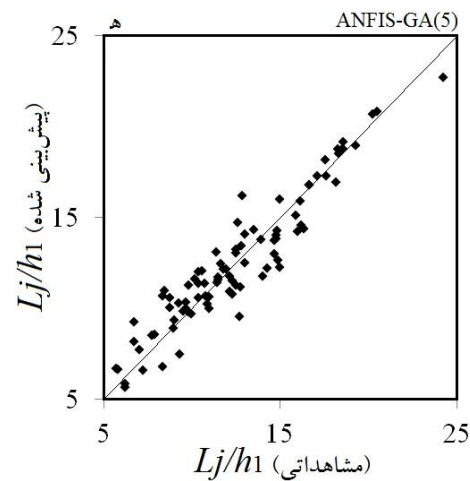
در معادلات بالا، $(Lj/h_1)_{(Observed)_i}$ برابر طول پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی، $(Lj/h_1)_{(Predicted)_i}$ مساوی طول پرش هیدرولیکی مدل‌سازی شده، $(Lj/h_1)_{(Observed)_i}$ برابر میانگین طول‌های پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی و n مساوی تعداد اندازه-گیری‌های آزمایشگاهی است. در ادامه نتایج مدل‌های ANFIS-GA معرفی شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌همین منظور، در شکل ۴ طول پرش‌های مدل‌سازی شده توسط مدل‌های ANFIS-GA(1) تا ANFIS-GA(5) با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین، نمودارهای پراکندگی مدل‌های پنج‌گانه ANFIS-GA در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مدل ANFIS-GA(1) طول پرش هیدرولیکی را بر حسب عدد فرود جریان، نسبت زبری بستر، نسبت عمق‌های مزدوج و شیب بستر مدل‌سازی می‌کند. برای مدل ANFIS-GA(1) مقدار پارامترهای $RMSE$ و $MAPE$ به ترتیب برابر 0.781 و $4/520$ محاسبه گردیده است. در مقابل مقدار ضریب همبستگی (R) برای این مدل مساوی 0.979 می‌باشد. بر اساس نتایج مدل-سازی طول پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل‌های مختلف ANFIS-GA، نتایج مدل ANFIS-GA(1) بیشترین همبستگی را با مقادیر آزمایشگاهی دارد. همچنین چهار مدل ANFIS-GA(2) تا ANFIS-GA(5) با ترکیبی از ۳ پارامتر ورودی، طول پرش هیدرولیکی را مدل‌سازی می‌کنند. مدل ANFIS-GA(2) طول پرش هیدرولیکی را به‌عنوان تابعی از عدد فرود، شیب کف کانال و پارامتر نسبت زبری کف تخمین می‌زند. برای پیش‌بینی طول پرش هیدرولیکی توسط مدل مذکور، تاثیرات پارامتر نسبت عمق‌های مزدوج نادیده گرفته شده است. برای ANFIS-GA(2) مقدار شاخص آماری R مساوی 0.950 محاسبه گردیده است. همچنین مقادیر خطای جذر میانگین مربعات و درصد میانگین مطلق خطا برای این مدل به ترتیب مساوی $1/196$ و $7/306$ بدست آمده است. بر اساس شکل ۴-ب مدل ANFIS-GA(2) در بخشی از مدل‌سازی دارای عملکردی کمتر از برآورد و در بخش دیگری از روند مدل‌سازی عملکردی بیشتر از برآورد است. برای مدل ANFIS-GA(3) تاثیرات نسبت زبری بستر (Ks/h_1) حذف شده است. به عبارت دیگر، این مدل



شکل ۴- مقایسه طول پرش‌های مدل‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی الف- ANFIS-GA(1) ب- ANFIS-GA(2) ج- ANFIS-GA(3) د- ANFIS-GA(4) ه- ANFIS-GA(5)



شکل ۶- نحوه تغییرات پارامتر γ در مقابل طول پرش برای مدل‌های -ب- ANFIS-GA(1) -ج- ANFIS-GA(2) -د- ANFIS-GA(3) -ه- ANFIS-GA(4) - ANFIS-GA(5)



شکل ۵- نمودارهای پراکنندگی برای مدل‌های الف- ANFIS-GA(1) -ب- ANFIS-GA(2) -ج- ANFIS-GA(3) -د- ANFIS-GA(4) -ه- ANFIS-GA(5)

بنابراین نحوه تغییرات پارامتر γ در مقابل نسبت طول پرش هیدرولیکی به عمق جریان در بالادست پرش هیدرولیکی در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل محور افقی مقادیر مشاهداتی طول پرش هیدرولیکی و محور قائم نیز مقادیر نسبت اختلاف می‌باشند. لازم به یادآوری است که مطابق تعریف نسبت اختلاف، نزدیک بودن مقدار پارامتر γ به عدد یک نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی شده به مشاهداتی و به تبع آن بیان‌گر عملکرد بهتر مدل مورد نظر است. بر اساس نتایج مدل‌سازی، مقدار γ متوسط برای مدل ANFIS-GA(1) برابر ۱/۰۰۵ است. در مقابل مقدار γ متوسط برای مدل ANFIS-GA(2) برابر ۱/۰۰۹ و برای ANFIS-GA(3) مساوی ۱/۰۰۷ محاسبه گردیده است. این در حالی است که مقدار این پارامتر برای مدل‌های ANFIS-GA(4) و ANFIS-GA(5) به ترتیب برابر ۱/۰۰۸ و ۱/۰۱۲ بدست آمده است. بنابراین با توجه به تجزیه و تحلیل پارامتر γ ، مدل ANFIS-GA(1) مقادیر طول پرش هیدرولیکی را به مقادیر آزمایشگاهی با دقت بالاتری پیش‌بینی کرده است.

نتیجه‌گیری کلی

یک پرش هیدرولیکی بعد از سازه‌هایی از قبیل دریچه‌های کنترل و سرریزهای اوجی به وقوع می‌پیوندد. برای طراحی مناسب حوضچه‌های آرامش، ابعاد پرش هیدرولیکی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. در تحقیق حاضر، یک مدل ترکیبی با استفاده از سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و الگوریتم ژنتیک (GA) تحت عنوان مدل ANFIS-GA برای مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای شیب‌دار زبر معرفی گردید. برای مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی، ابتدا پارامترهای موثر بر روی طول پرش شناسایی شد. سپس پنج مدل ANFIS-GA مختلف معرفی گردید که با تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی، مدل برتر معرفی شد. مدل برتر طول پرش هیدرولیکی

را با دقت مناسبی تخمین زد. به‌عنوان مثال، مقدار ضریب هبستگی (R) برای این مدل مساوی 0.979 و مقدار شاخص‌های آماری $RMSE$ و $MAPE$ به‌ترتیب برابر 0.781 و 4.520 محاسبه گردید. همچنین، نتایج مدل‌های پنج‌گانه ANFIS-GA نشان می‌دهد که عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی موثرترین پارامتر در تخمین طول پرش‌های هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر شیب‌دار است. به‌علاوه، به‌منظور تجزیه و تحلیل بیشتر نتایج مدل‌های پنج‌گانه ANFIS-GA، مقدار پارامتر γ متوسط (متوسط نسبت طول پرش‌های هیدرولیکی مدل‌سازی شده به مقایر آزمایشگاهی) برابر $1/0.05$ محاسبه گردید که نشان دهنده نزدیک بودن نتایج مدل برتر به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است.

منابع مورد استفاده

- Abbaspour A, 2013. Prediction of Hydraulic Jump Characteristics on Rough Bed Using Artificial Neural Network and Genetic Programming. *Journal of Water and Soil Science- University of Tabriz*, 24(2): 1-10.
- Abbaspour A, Farsadzadeh D and Ghorbani MA, 2013. Estimation of hydraulic jump on corrugated bed using artificial neural networks and genetic programming. *Water Science and Engineering* 6(2): 189-198.
- Azimi H, Bonakdari H, Ebtehaj I and Michelson DG, 2018. A combined adaptive neuro-fuzzy inference system–firefly algorithm model for predicting the roller length of a hydraulic jump on a rough channel bed. *Neural Computing and Applications* 29 (6): 249-258.
- Bradley JN and Peterka AJ, 1957. The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin D). *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 83(5): 1-24.
- Carollo F, Ferro V and Pampalone V, 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 133(9): 989-999.
- Carollo F, Ferro V and Pampalone V, 2009. New solution of classical hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 135(6): 527-531.
- Carollo F, Ferro V and Pampalone V, 2012. New expression of the hydraulic jump roller length. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 138(11): 995-999.
- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 128(7): 656-663.
- Ezizah G, Yousif N and Mostafa S, 2012. Hydraulic jumps in new roughened beds. *Asian Journal of Applied Sciences* 5(2): 96-106.
- Hager WH, Bremen R and Kawagoshi N, 1990. Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of Hydraulic Research* 28(5): 591-608.
- Houichi L, Dechemi N, Heddami S and Achour B, 2013. An evaluation of ANN methods for estimating the lengths of hydraulic jumps in U-shaped channel. *Journal of Hydroinformatics* 15(1): 147-154.
- Holland JH, 1975. *Adaptation in Natural and Artificial System*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Hughes W and Flack J, 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 110(12): 1755-1771.

- Jang JSR, 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Trans. on*, 23(3): 665-685.
- Jang JSR, Sun CT and Mizutani E, 1997. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall, N. J.
- Kumar M and Lodhi AS, 2016. Hydraulic jump over sloping rough floors. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 22(2): 127-134.
- Leutheusser HJ and Schiller EJ, 1975. Hydraulic jump in a rough channel. *Water Power Dam Constr* 27(5):186-191.
- Naseri M and Othman F, 2012. Determination of the length of hydraulic jumps using artificial neural networks. *Advances in Engineering Software* 48:27-31.
- Omid MH, Omid M and Esmaeeli VM, 2005. Modelling hydraulic jumps with artificial neural networks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management* 158 (2): 65–70.
- Parsamehr P, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A, Abbaspour A and Nasr Esfahani MJ, 2016. Investigation of Hydraulic Jump Characteristics on Rough Bed with Different Density and Arrangements of Roughness Elements. *Journal of Water and Soil Science- University of Tabriz*, 26(1): 13-24.
- Pagliara S, Lotti I and Palermo M, 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. *Journal of Hydro-environment Research* 2(1): 29-38.
- Pourabdollah N, Honar T and Fatahi R, 2014. Investigation of Water Velocity and Surface Profile in Hydraulic Jump over Rough Bed with Adverse Slope. *Journal of Water and Soil Science- University of Tabriz*, 25(1): 143-152.
- Rajaratnam N, 1968. Hydraulic jumps on rough beds. *Transactions of the Engineering Institute of Canada* 11(A-2): 1-8.
- Shafaii Bejestan MS and Neisi K, 2009. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *Asian Journal of Applied Sciences* 2: 436-45.