

مدل سازی طول پرش هیدرولیکی روی بستر زبر شیب دار با استفاده از مدل ترکیبی مبتنی بر سیستم های فازی و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

ابراهیم شهبازیگی^۱، سعید شعبانلو^{۲*} و محمد علی ایزدبخش^۳

چکیده

برای طراحی مناسب حوضچه های آرامش، تعیین طول پرش هیدرولیکی از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این مطالعه، با استفاده از سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی و بهینه سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم ترکیبی (ANFIS-PSO) برای پیش بینی طول پرش هیدرولیکی روی سطوح شیب دار زبر توسعه داده می شود. در این جستار، برای ارزیابی عملکرد مدل های ANFIS-PSO از شبیه سازی مونت کارلو^۴ استفاده می شود. همچنین از روش اعتبارسنجی چند لایه^۵ برای صحت سنجی نتایج مدل های مذکور بهره گرفته می شود. ابتدا با استفاده از پارامترهای مؤثر بر طول پرش هیدرولیکی پنج مدل ANFIS-PSO مختلف معرفی و با تجزیه و تحلیل نتایج مدل های ANFIS-PSO، مدل برتر معرفی شد. مدل برتر، طول پرش هیدرولیکی را بر حسب عدد فرود جریان، زبری بستر، نسبت اعماق مزدوج و شیب بستر پیش بینی می کند. مقادیر درصد میانگین مطلق خطا، خطای جذر میانگین مربعات و ضریب همبستگی حاصل از کاربرد مدل برتر به ترتیب برابر $3/750$ و $0/688$ و $0/984$ که نشان دهنده دقت مناسب مدل برتر مورد استفاده در پیش بینی نتایج آزمایشگاهی بود. براساس تجزیه و تحلیل نتایج مدل سازی عددی، پارامتر عدد فرود به عنوان مؤثرترین پارامتر در شبیه سازی طول پرش هیدرولیکی شناسایی شد. همچنین بعد از عدد فرود جریان، نسبت اعماق مزدوج، شیب کانال و پارامتر بدون بعد زبری بستر بیشترین تأثیر را بر مدل سازی طول پرش هیدرولیکی داشتند.

واژه های کلیدی: بستر زبر، بهینه سازی، پرش هیدرولیکی، سیستم استنباط فازی - عصبی تطبیقی.

ارجاع: شهبازیگی ا. شعبانلو س. و ایزدبخش م. ع. ۱۳۹۷. مدل سازی طول پرش هیدرولیکی روی بستر زبر شیب دار با استفاده از مدل ترکیبی مبتنی بر سیستم های فازی و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات. مجله پژوهش آب ایران. ۳۰: ۱۰۹-۱۱۸.

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه.
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه.
۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه.

* نویسنده مسئول Saeid.Shabanlou@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۱۴

مقدمه

مدل‌سازی پدیده‌های غیرخطی مهندسی مورد استفاده گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. ناصری و عثمان (۲۰۱۲) با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی را پیش‌بینی کردند. در مطالعه آنان محدوده عدد فرود بالادست پرش هیدرولیکی بین ۱/۷ تا ۱۹/۵ بود. عباسپور و همکاران (۲۰۱۳) عمق پرش، طول پرش و افت انرژی برای پرش‌های هیدرولیکی را روی بستر کنگره‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌نویسی ژنتیک پیش‌بینی کردند.

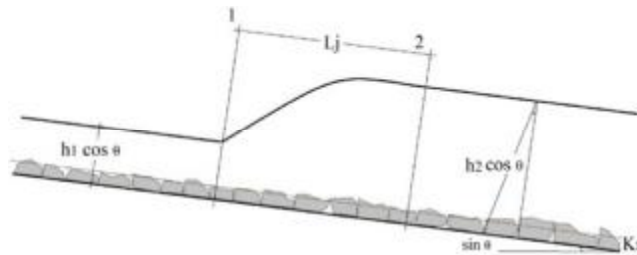
در این مطالعه، طول پرش‌های هیدرولیکی روی بسترهای زبر شیب‌دار با استفاده از ترکیب روش‌های انفیس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیش‌بینی شد. به همین منظور با توجه به پارامترهای مؤثر روی طول پرش هیدرولیکی، مدل‌هایی برای تخمین این پارامتر روی سطوح زبر شیب‌دار معرفی می‌شوند. در ادامه با محاسبه مقادیر خطا و سایر شاخص‌های آماری نتایج مدل‌های مختلف ترکیبی ارزیابی می‌شود که مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل‌های عددی است. سپس با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی، مدل برتر برای تخمین طول پرش هیدرولیکی پیشنهاد داده می‌شود.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه برای اعتبار سنجی نتایج مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی کومار و لودهی (۲۰۱۶) استفاده می‌شود. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی به طول ۸ متر، ارتفاع ۰/۶ و عرض ۰/۶ متر انجام شده است. مقادیر آزمایشگاهی در شیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۱۶ نیز اندازه‌گیری شده‌اند. در مطالعه آزمایشگاهی کومار و لودهی (۲۰۱۶) زبری بستر با استفاده از سنگ‌دانه‌های با میانگین قطرهای (d_{50}) برابر با ۰/۰۰۳۹۸، ۰/۰۰۵۶، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱۱ متر ایجاد شد. در مطالعه آزمایشگاهی مذکور، ارتفاع زبری بستر (k_s) برابر اندازه متوسط قطعات شنی اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱ طرح کلی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر شیب‌دار و در جدول ۱ محدوده اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است.

تبدیل سریع رژیم فوق‌بحرانی به جریان زیربحرانی با پرش هیدرولیکی همراه است. پرش‌های هیدرولیکی جزء جریان‌ات متغیر سریع محسوب می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و تئوریک فراوانی روی این پدیده هیدرولیکی انجام گرفته است. هگر و همکاران (۱۹۹۰) با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی، یک معادله برای محاسبه طول غلتاب پرش‌های هیدرولیکی پیشنهاد دادند. در مطالعه آزمایشگاهی آنان، محدوده عدد فرود جریان ۲/۵ تا ۸ بود که طول غلتاب را به‌عنوان تابعی از عدد فرود جریان در بالادست پرش معرفی کردند. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) یک مطالعه آزمایشگاهی روی پرش هیدرولیکی روی بستر کنگره‌ای انجام دادند. دامنه عدد فرود بالادست پرش هیدرولیکی در مدل آزمایشگاهی آنان بین ۴ تا ۱۰ بود. آنان مشخصات پرش هیدرولیکی را برای سه وضعیت زبری نسبی ۰/۲۵، ۰/۴۳ و ۰/۵ بررسی کردند و نشان دادند که طول پرش هیدرولیکی روی بستر زبر نصف طول پرش هیدرولیکی روی بستر صاف است. کارولو و همکاران (۲۰۰۷) مشخصات پرش هیدرولیکی را در دو حالت بستر صاف و زبر مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آنان با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی رابطه‌ای را برای محاسبه طول غلتاب پیشنهاد دادند. پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۸) با انجام مطالعه‌ای آزمایشگاهی، رفتار پرش هیدرولیکی را روی بسترهای زبر همگن و غیرهمگن بررسی کردند. آنان اثر بستر زبر را روی اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی و طول پرش هیدرولیکی بررسی کردند. افضل و همکاران (۲۰۱۱) ساختار جریان آشفته پرش هیدرولیکی را روی یک بستر زبر در داخل کانال‌های مستطیلی مورد مطالعه تحلیلی قرار دادند. روش تحلیلی‌شان براساس معادلات ممنوم رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق به‌دست آمد. کارولو و همکاران (۲۰۱۳) نسبت عمق‌های مزدوج پرش‌های هیدرولیکی نوع B را برای هر دو بستر صاف و زبر در یک کانال مستطیلی شیب‌دار مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. ولی‌اقلو و همکاران (۲۰۱۵) با انجام مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار پرش هیدرولیکی را روی بستر زبر بررسی کردند و نشان دادند که زبری بستر باعث کاهش عمق پایاب می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از محاسبات نرم برای



شکل ۱- طرح کلی پرش هیدرولیکی روی بستر زیر شیب‌دار (کومار و لودهی، ۲۰۱۶)

جدول ۱- محدوده اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی کومار و لودهی (۲۰۱۶)

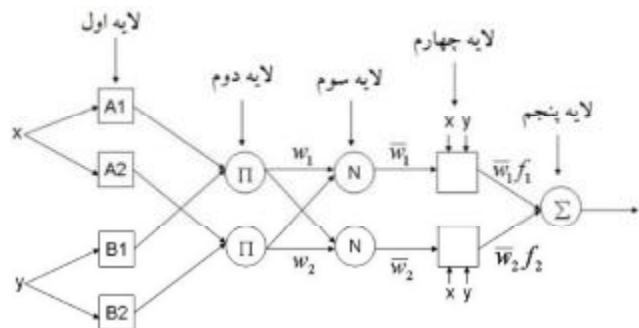
	$Q (m^3 s^{-1})$	$S_0 (-)$	$K_s (m)$	$h_1 (m)$	$h_2 (m)$	$L_j (m)$
مقدار بیشینه	۰/۰۷۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۱	۰/۰۸۷	۰/۳۴۴	۰/۹
مقدار کمینه	۰/۰۳۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲۶	۰/۳

است و توانایی شبیه‌سازی نگاشت غیرخطی پیچیده با استفاده از یادگیری شبکه‌های عصبی و روش‌های استخراج فازی را دارد (اینان و همکاران، ۲۰۰۷). ساختار انفیس متشکل از پنج لایه مختلف است که هر یک از این لایه‌ها دارای گره‌های مختلفی هستند که بوسیله توابع مختلفی توصیف می‌شوند. در شکل ۲ ساختار یک شبکه ANFIS با دو ورودی، دو قانون و یک خروجی دارای پنج لایه مختلف نشان داده شده است.

مدل عددی

سیستم استخراج فازی عصبی

ترکیب سیستم‌های فازی که مبتنی بر قواعد منطقی هستند و روش شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه که توان استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند، منجر به ارائه سیستم‌های استخراج فازی عصبی تطبیقی (انفیس) توسط جانگ (۱۹۹۳) شده است. انفیس دارای ساختاری با قواعد اگر-آنگاه و جفت داده‌های ورودی- خروجی فازی



شکل ۲- ساختار یک شبکه ANFIS با دو ورودی، دو قانون و یک خروجی دارای پنج لایه مختلف

در روابط فوق x (یا y) ورودی‌های غیرفازی گره A_i و B_i (یا B_{i-2}) برچسب‌های زبانی هستند که با توابع عضویت μ مشخص می‌شوند. تابع عضویت مورد استفاده در این مطالعه به شکل زنگوله‌ای است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$mA_i(x) = \frac{1}{1 + |(x - r_i) / p_i|^{2q_i}} \quad (3)$$

که $\{p_i, q_i, r_i\}$ مجموعه پارامترهایی هستند که به عنوان پارامترهای فرض مشخص می‌شوند و با تغییر آنان، توابع زنگوله‌ای شکل متفاوتی ایجاد می‌شود. در لایه دوم تمامی

لایه اول، گره‌های ورودی هستند که هر گره از این لایه مقادیر عضویتی که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند، با استفاده از تابع عضویت تولید می‌کنند. اگر O_i^1 خروجی نام گره در لایه زام باشد، هر گره i یک گره تطبیقی با تابعی به شکل زیر است:

$$O_i^1 = mA_i(x) \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

$$O_i^1 = mB_{i-2}(x) \quad i = 3, 4 \quad (2)$$

پایان تمامی مراحل به‌عنوان gbest شناخته می‌شود. تمامی ذرات بر مبنای pbest و gbest به‌دست آمده مکان خود را به روز می‌کنند تا راه حل بهینه سراسری حاصل شود. با فرض اینکه x مکان ذره λ م و v سرعت آن باشد، سرعت و موقعیت هر ذره در هر تکرار با استفاده از روابط زیر محاسبه و بروزرسانی می‌شود:

$$v_i(t+1) = w(t).v_i(t) + c_1.rand().(pbest(t) - x_i(t)) + c_2.rand().(gbest(t) - x_i(t)) \quad (8)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (9)$$

که $i=1,2,\dots,N$ و $t=1,2,\dots,I_{max}-1$ که i شماره تکرار و I_{max} بیشینه تکرار است. همچنین rand() برابر یک مقدار تصادفی در دامنه $[0, 1]$ ، c_1 و c_2 دو مقدار ثابت با عنوان میزان یادگیری شناختی^۱ و نرخ یادگیری اجتماعی^۲ هستند که بهترین حالت آنان زمانی است که مجموع آنان حداقل برابر با ۴ باشند. در این مطالعه هر دو مقدار c_1 و c_2 در حالت بهینه برابر با ۲/۰۵ در نظر گرفته شده‌اند. pbest(t) بهترین جواب به‌دست آمده در تکرار λ م و gbest(t) بهترین جواب به‌دست آمده تا تکرار λ م است. $w(t)$ وزن اینرسی است که از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$w(t) = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times t}{I_{max}} \quad (10)$$

که w_{max} و w_{min} حداقل و حداکثر وزن اینرسی هستند در این مطالعه به‌ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۹ در نظر گرفته شده‌اند.

روش ترکیبی

در این مقاله، برای تعیین توابع عضویت انفیس از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده می‌شود. مزیت این روش کاهش هزینه‌های محاسباتی برای یک توپولوژی داده شده است. در این قسمت الگوریتم ارائه شده در این مقاله برای ارائه روش ترکیبی پیشنهادی که به‌صورت شکل ۳ است، به‌صورت مرحله به مرحله توضیح داده می‌شود. در ابتدا با استفاده از یک ماتریس که داده‌های مربوط به طول پرشی هیدرولیکی روی بستر زبر شیپ‌دار را دربر می‌گیرد. با استفاده از داده‌های مرتب شده، آموزش انفیس شروع می‌شود. روند آموزش به سیستم این امکان را می‌دهد که پارامترهای تعریف شده به‌عنوان ورودی یا خروجی مدل را تنظیم کند. روند آموزش، زمانی متوقف می‌شود که

قوانین موجود میان ورودی با به‌کارگیری قاعده تقاطع یا همان اشتراک فازی (AND) فرمول‌بندی می‌شود. برای هر قانون عملیات ضرب برای برآورد ضریب مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروجی هر گره نشان‌دهنده قدرت آتش یک قانون است.

$$Q_i^2 = w_i = mA_i(x).mB_i(y) \quad i=1,2 \quad (4)$$

در لایه سوم نسبت قدرت آتش هر قانون نسبت به کل قوانین در گره‌ها به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_i^3 = \bar{w}_i = w_i / (w_1 + w_2) \quad i=1,2 \quad (5)$$

خروجی به‌عنوان قدرت آتش نرمالیز شده شناخته می‌شود. در لایه چهارم هر گره سهم قانون λ م به خروجی کل را به شکل زیر محاسبه می‌کند:

$$Q_i^4 = \bar{w}_i z_i = \bar{w}_i (a_i x + b_i y + c_i) \quad i=1,2 \quad (6)$$

که \bar{w}_i خروجی لایه سوم و $\{a_i, b_i, c_i\}$ پارامترهای تنظیمی هستند که به‌عنوان پارامترهای نتیجه شناخته می‌شوند.

در لایه پنجم، هر گره خروجی نهایی را به‌صورت جمع همه سیگنال‌های ورودی محاسبه می‌شوند و خروجی نهایی انفیس به شکل زیر به‌دست می‌آید:

$$Q_i^5 = \sum_i \bar{w}_i z_i = \sum_i w_i z_i / \sum_i w_i \quad (7)$$

بهینه‌سازی ازدحام ذرات

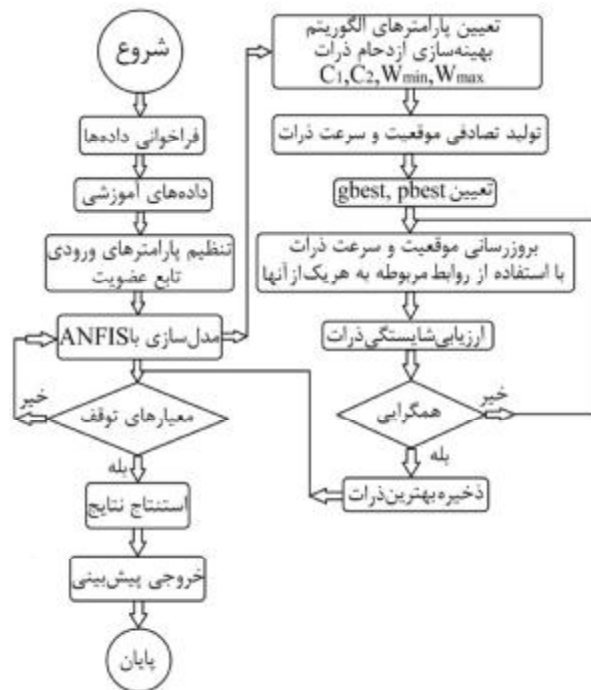
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (کندی و ابرهات، ۱۹۹۵) عضوی از خانواده الگوریتم‌های تکاملی است که رفتار اجتماعی گروهی از ذرات مانند پرندگان و ماهی‌ها را در رسیدن به منابع غذایی در جامعه، تقلید می‌کند. مزیت اصلی این روش بر استراتژی‌های کمینه‌سازی دیگر، این است که تعداد فراوان ذرات ازدحام‌کننده، باعث پایداری روش در برابر مشکل کمینه محلی می‌گردد. در این الگوریتم ابتدا یک مجموعه جواب اولیه تولید و سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای پاسخ‌های ممکن، با به روزرسانی نسل‌ها، جست‌وجوی پاسخ انجام می‌شود. هر ذره به‌صورت چند بعدی با دو مقدار موقعیت، سرعت تعریف می‌شود و در هر مرحله از حرکت ذره، با دو شاخص سرعت و موقعیت، بهترین پاسخ از لحاظ شایستگی برای تمامی ذرات تعیین می‌شوند. بهترین موقعیت به‌دست آمده در هر مرحله به‌عنوان pbest و در

1- Cognitive acceleration

2- Social acceleration

یک موقعیت و سرعت اولیه با اندازه مشابه تعیین می‌شود. (۲) تعیین مقدار pbest و gbest. اگر مقدار به دست آمده بهتر از مقدار موجود در ذره باشد، pbest به روزرسانی و مقدار آن با مقدار جدید جایگزین می‌شود. همچنین اگر بهترین مقدار از مقادیر ذرات بهتر از مقدار کل gbest موجود باشد، موقعیت بهترین ذرات نیز به روزرسانی می‌شود. (۳) بررسی شایستگی هر ذره (pbest) و ذخیره ذرات با بهترین مقدار شایستگی (gbest). (۴) اصلاح سرعت‌ها براساس مقادیر gbest و pbestهای به روزرسانی شده. (۵) به روزرسانی ذرات. (۶) این روند تا تمام شدن تعداد تکرارها ادامه می‌یابد. حال خروجی انقیس که پارمترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دست آمده است، استخراج و در نهایت خروجی‌های مربوط به پیش‌بینی طول پرش هیدرولیک با استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی در این مطالعه، تعیین می‌شود.

معیارهای تعیین شده برای توقف برنامه مانند رسیدن به حداقل مقدار تعیین شده برای تابع هدف یا تمام شدن تعداد تکرارهای تعیین شده، اکتان شوند. بعد از تعیین داده‌های آموزش، نوع توابع عضویت و سیستم استنتاج فازی عصبی با استفاده از تطبیق پارامترهای تابع عضویت بهینه می‌شود که در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تعیین پارامترهای وابسته به توابع عضویت در سیستم استنتاج فازی استفاده می‌شود. در ادامه یک بردار با تعداد N بعدی که N تعداد توابع عضویت است، تعریف می‌شود. در ادامه پارامترهای مرتبط به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تعریف می‌شود که مقادیر آنان در قسمت‌های قبل ارائه شد. در ابتدا پارامترها به صورت تصادفی تعیین می‌شوند و در ادامه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مقادیر تعیین شده به روزرسانی می‌شوند. استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی پارامترهای تابع عضویت به صورت زیر است: (۱) در این مرحله برای تمامی ذرات



شکل ۳- فلوجارت روش ترکیبی ارائه شده در این مطالعه (ANFIS-PSO)

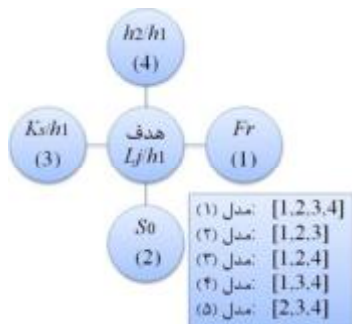
تابعی از عدد فرود (F_1) و نسبت زبری بستر (Ks/h_1) در نظر گرفته‌اند:

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

طول پرش هیدرولیکی روی سطوح زبر

هاگر و همکاران (۱۹۹۰)، اد و راجاراتنام (۲۰۰۲) و کارولو و همکاران (۲۰۰۷) طول پرش هیدرولیکی را به عنوان

مدل‌های ANFIS-PSO از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر روش اعتبارسنجی ضربداری با k برابر 4 برای بررسی توانایی مدل‌های مذکور استفاده شده است.



شکل 4- شیوه ترکیب پارامترهای ورودی برای معرفی مدل‌های مختلف ANFIS-PSO

معیارهای بررسی دقت مدل عددی

در مطالعه حاضر برای بررسی دقت مدل‌های ANFIS-PSO از شاخص‌های آماری درصد میانگین مطلق خطا ($MAPE$)، خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$)، ضریب همبستگی (R) و شاخص پراکندگی (SI) به صورت زیر استفاده می‌شود:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((L_j/h_1)_{(Predicted)_i} - (L_j/h_1)_{(Observed)_i} \right)^2} \quad (15)$$

$$SI = \frac{RMSE}{(L_j/h_1)_{(Observed)}} \quad (16)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \left((L_j/h_1)_{(Observed)_i} - \overline{(L_j/h_1)_{(Observed)}} \right) \left((L_j/h_1)_{(Predicted)_i} - \overline{(L_j/h_1)_{(Predicted)}} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left((L_j/h_1)_{(Observed)_i} - \overline{(L_j/h_1)_{(Observed)}} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left((L_j/h_1)_{(Predicted)_i} - \overline{(L_j/h_1)_{(Predicted)}} \right)^2}} \quad (17)$$

نتایج و بحث

در ادامه، نتایج مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی برای مدل‌های ANFIS-PSO(1) تا ANFIS-PSO(5) تجزیه و تحلیل می‌شوند. با توجه به شکل 4 مدل ANFIS-PSO(1) طول پرش هیدرولیکی را بر حسب کلیه پارامترهای ورودی پیش‌بینی می‌کند. مقدار ضریب همبستگی (R) برای این مدل برابر 0/984 پیش‌بینی شده است. همچنین درصد میانگین مطلق خطا ($MAPE$) و

همچنین عظیمی و همکاران (2016) برای تخمین طول پرش هیدرولیکی، پارامتر مذکور را به عنوان تابعی از عدد فرود، نسبت زبری بستر به عمق جریان در بالادست پرش هیدرولیکی و نسبت اعماق مزدوج (h_2/h_1) در نظر گرفتند:

$$\frac{L_j}{h_1} = f \left(F_1, \frac{h_2}{h_1}, \frac{K_s}{h_1} \right) \quad (12)$$

همچنین کومار و لودهی (2015) شیب بستر (S_0) را نیز در مدل آزمایشگاهی خود اندازه‌گیری کردند. بنابراین در این مطالعه، تأثیرات عدد فرود جریان (F_1)، نسبت زبری بستر (K_s/h_1)، نسبت اعماق مزدوج (h_2/h_1) و شیب بستر (S_0) روی طول پرش هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود که در این صورت معادله (12) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{L_j}{h_1} = f \left(F_1, \frac{h_2}{h_1}, \frac{K_s}{h_1}, S_0 \right) \quad (13)$$

با توجه به مطالب بیان شده در این مطالعه، پارامترهای مذکور ($F_1, K_s/h_1, h_2/h_1, S_0$) به عنوان پارامترهای ورودی مدل ANFIS-PSO در نظر گرفته می‌شود. بنابراین 5 مدل ANFIS-PSO مختلف برای مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی روی سطوح زیر شیب‌دار معرفی می‌شود. شیوه ترکیب پارامترهای ورودی در این مدل‌ها در شکل 4 نشان داده شده است. یادآوری می‌شود که برای بررسی عملکرد

در اینجا $(L_j/h_1)_{(Observed)_i}$ ، $(L_j/h_1)_{(Predicted)_i}$ و $\overline{(L_j/h_1)_{(Observed)_i}}$ به ترتیب طول پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی، طول پرش هیدرولیکی پیش‌بینی شده، میانگین طول‌های پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی و تعداد اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هستند.

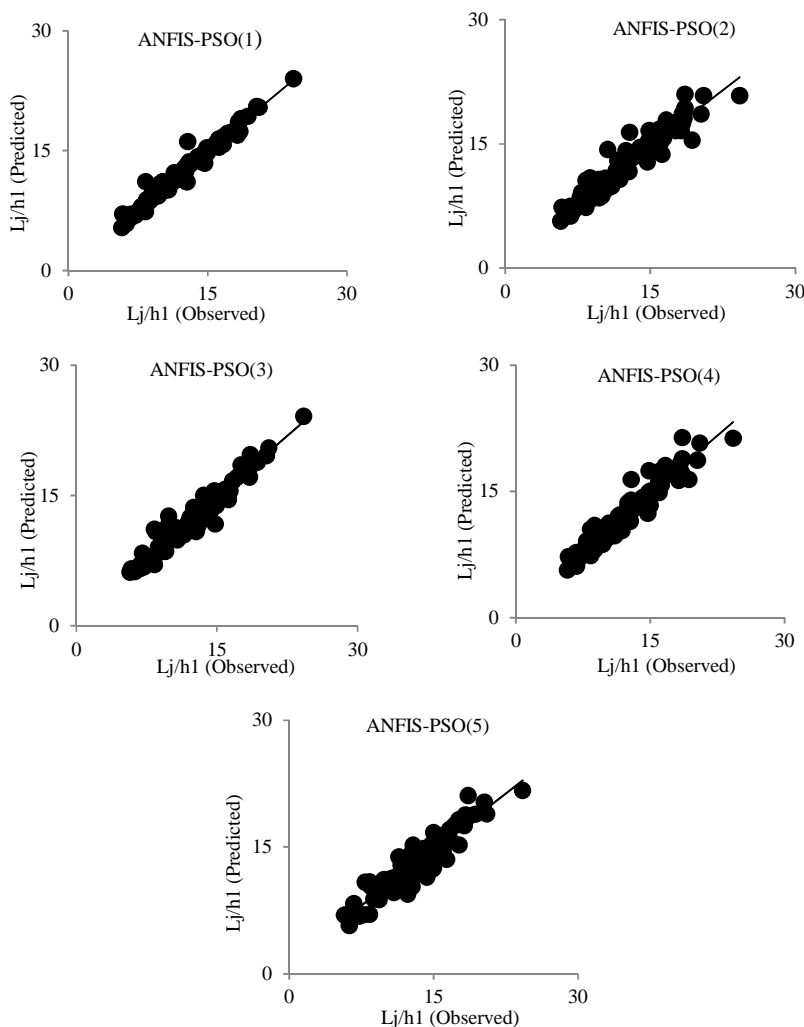
محاسبه شد. مقدار درصد میانگین مطلق خطا برای مدل ANFIS-PSO(5) برابر ۱/۲۸۸ محاسبه شد. همچنین شاخص پراکندگی (SI) برای این مدل برابر با ۰/۱۰۳ است. این در حالی است که مقادیر $MAPE$ و R برای مدل ANFIS-PSO(5) به ترتیب برابر ۸/۳۸۴ و ۰/۹۴۲ پیش‌بینی شده است. در بین مدل‌های با ترکیبی از سه پارامتر ورودی، مدل ANFIS-PSO(5) دارای بیشترین مقدار خطا و کمترین همبستگی است. مدل مذکور، طول پرش هیدرولیکی را بر حسب نسبت زبری بستر، نسبت اعماق مزدوج و شیب بستر شبیه‌سازی کرده است. در پیش‌بینی طول پرش توسط این مدل تأثیر عدد فرود جریان حذف شده است. براساس تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی روی بستر شیب‌دار زبر با مدل ترکیبی ANFIS-PSO(1)، مدل ANFIS-PSO(1) به‌عنوان مدل برتر معرفی می‌شود. این مدل تأثیر همه پارامترهای ورودی را در نظر می‌گیرد. همچنین، پارامتر عدد فرود جریان نیز به‌عنوان مؤثرترین پارامتر در تخمین طول پرش هیدرولیکی شناسایی می‌شود. علاوه بر این، با توجه به نتایج مدل‌های پنج‌گانه ANFIS-PSO، پارامترهای بدون بعد S_0 و h_2/h_1 به ترتیب بعد از عدد فرود جریان به‌عنوان پارامترهای مؤثر روی شبیه‌سازی طول پرش هیدرولیکی شناسایی می‌شوند. نمودارهای پراکندگی مدل‌های مذکور در شکل ۵ و نتایج شاخص‌های آماری نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ روابط ریاضی مدل‌های مختلف ANFIS-PSO استخراج شده از نمودارهای پراکندگی شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲- روابط ریاضی مدل‌های مختلف ANFIS-PSO

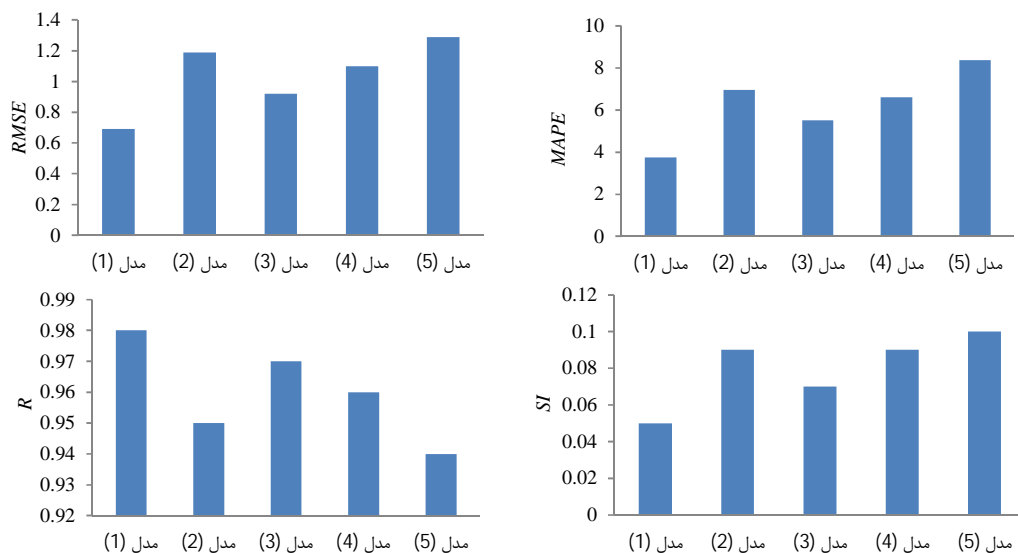
استخراج شده از نمودارهای پراکندگی شکل ۴

مدل	روابط ریاضی
ANFIS-PSO(1)	$y = 0.967x + 0.414$
ANFIS-PSO(2)	$y = 0.9x + 1.257$
ANFIS-PSO(3)	$y = 0.938x + 0.774$
ANFIS-PSO(4)	$y = 0.915x + 1.071$
ANFIS-PSO(5)	$y = 0.885x + 1.449$

خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$) برای مدل مزبور به ترتیب برابر با ۳/۷۵۰ و ۰/۶۸۸ محاسبه شده است. این در حالی است که شاخص پراکندگی (SI) برای ANFIS-PSO(1) برابر ۰/۰۵۵ به دست آمده است. در میان کلیه مدل‌های ANFIS-PSO این مدل دارای کمترین مقدار خطا و بیشترین مقدار همبستگی است. در این مطالعه برای شناسایی پارامتر مؤثر در پیش‌بینی طول پرش هیدرولیکی، چهار مدل ANFIS-PSO(2) تا ANFIS-PSO(5) با ترکیبی از سه پارامتر ورودی معرفی شده‌اند. برای مثال ANFIS-PSO(2) مقدار طول پرش هیدرولیکی را بر حسب عدد فرود جریان (F_1)، نسبت زبری بستر (Ks/h_1) و شیب بستر (S_0) پیش‌بینی می‌کند؛ به عبارت دیگر، در این مدل آثار پارامتر نسبت اعماق مزدوج (h_2/h_1) نادیده گرفته شده است. براساس نتایج مدل‌سازی، مقدار $RMSE$ ، $MAPE$ و SI برای ANFIS-PSO(2) به ترتیب برابر ۱/۱۹۰، ۶/۹۵۸ و ۰/۰۹۵ به دست آمده و همچنین مقدار شاخص آماری R برای این مدل برابر با ۰/۹۵۱ محاسبه شد. برای مدل ANFIS-PSO(3) مقدار شاخص پراکندگی برابر ۰/۰۷۳ تخمین زده شده است. این در حالی است که ضریب همبستگی برای آن برابر با ۰/۹۷۱ است. این مدل طول پرش هیدرولیکی را بر حسب عدد فرود جریان، نسبت اعماق مزدوج و شیب بستر مدل‌سازی می‌کند؛ به عبارت دیگر، تأثیرات نسبت زبری بستر در این مدل حذف شده است؛ با وجود این، مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ برای ANFIS-PSO(3) به ترتیب برابر ۵/۵۱۷ و ۰/۹۲۰ محاسبه شده است. گفتنی است که در میان مدل‌های با سه پارامتر ورودی، ANFIS-PSO(3) دارای بیشترین دقت است. همچنین مدل ANFIS-PSO(4) مقدار شاخص آماری R را مساوی با ۰/۹۵۸ تخمین زد. برای ANFIS-PSO(4) تأثیر پارامتر شیب بستر کانال نادیده گرفته شد؛ به عبارت دیگر این مدل طول پرش هیدرولیکی را به‌عنوان تابعی از عدد فرود جریان (F_1)، نسبت زبری بستر (Ks/h_1) و نسبت اعماق مزدوج (h_2/h_1) مدل‌سازی می‌کند. همچنین مقادیر $RMSE$ ، $MAPE$ و SI برای این مدل به ترتیب برابر با ۱/۱۰۴، ۶/۶۱۹ و ۰/۰۸۸



شکل ۵- مقایسه طول پرش هیدرولیکی شبیه‌سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی برای مدل‌های مختلف ANFIS-PSO



شکل ۶- مقایسه شاخص‌های آماری الف- درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) ب- خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، ج- شاخص

پراکندگی (SI) د- ضریب همبستگی (R) برای مدل‌های مختلف ANFIS-PSO

در ادامه، به منظور تجزیه و تحلیل نتایج طول پرش پیش‌بینی شده با مدل‌های ANFIS-PSO پارامتر I به صورت نسبت طول پرش هیدرولیکی پیش‌بینی شده به طول پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$I = (Lr/h_1)_{(Predicted)} - (Lr/h_1)_{(Observed)} \quad (18)$$

نزدیک بودن مقدار پارامتر I به یک نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر عددی به نتایج آزمایشگاهی است. همچنین مقادیر I بیشینه، کمینه و متوسط ($I_{max}, I_{min}, I_{ave}$) در جدول ۳ مرتب شده است. براساس نتایج جدول ۳، بزرگ‌ترین مقدار I_{ave} برای مدل ANFIS-PSO(5) پیش‌بینی شده است ($I_{ave} = 1/0.12$). همچنین مقادیر I_{max} و I_{min} برای این مدل به ترتیب برابر با $1/3.72$ و 0.766 به دست آمد. همچنین مقدار I_{ave} برای ANFIS-PSO(4) برابر $1/0.08$ محاسبه شد. در مقابل مقدار I_{max} برای مدل‌های ANFIS-PSO(3) و ANFIS-PSO(2) به ترتیب برابر با $1/3.37$ و $1/3.55$ تخمین زده شده است. در مقابل، مقادیر I بیشینه، کمینه و متوسط برای مدل ANFIS-PSO(1) به ترتیب برابر $1/3.36$ ، 0.870 و $1/0.03$ به دست آمد؛ بنابراین کمترین مقدار I_{ave} برای مدل ANFIS-PSO(1) پیش‌بینی شد.

منابع

1. Abbaspour A. Farsadizadeh D. and Ghorbani M. A. 2013. Estimation of hydraulic jump on corrugated bed using artificial neural networks and genetic programming. Water Science and Engineering. 6(2): 189-198.
2. Afzal N. Bushra A. and Seena A. 2011. Analysis of Turbulent Hydraulic Jump over a Transitional Rough Bed of a Rectangular Channel: Universal Relations. Journal Engineering Mechanics. 137(12): 835-845.
3. Azimi H. Bonakdari H. Ebtehaj I. and Michelson D. G. 2016. 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. Comput. & Applic. 1-10. DOI 10.1007/s00521-016-2560-9.
4. Carollo F. Ferro V. and Pampalone V. 2007. Hydraulic Jumps on Rough Beds. Journal of Hydraulic Engineering. 133(9): 989-999.
5. Carollo F. Ferro V. and Pampalone V. 2013. Sequent depth ratio of B-jumps on smooth and rough beds. Journal of Agricultural Engineering. 44(2): 82-86.
6. Ead S. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic Jumps on Corrugated Beds. Journal of Hydraulic Engineering. 128(7): 656-663.
7. Hager W. H. Bremen R. and Kawagoshi N. 1990. Classical hydraulic jump: length of roller. Journal of Hydraulic Research. 28(5): 591-608.

در ادامه، به منظور تجزیه و تحلیل نتایج طول پرش پیش‌بینی شده با مدل‌های ANFIS-PSO پارامتر I به صورت نسبت طول پرش هیدرولیکی پیش‌بینی شده به طول پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$I = (Lr/h_1)_{(Predicted)} - (Lr/h_1)_{(Observed)} \quad (18)$$

نزدیک بودن مقدار پارامتر I به یک نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر عددی به نتایج آزمایشگاهی است. همچنین مقادیر I بیشینه، کمینه و متوسط ($I_{max}, I_{min}, I_{ave}$) در جدول ۳ مرتب شده است. براساس نتایج جدول ۳، بزرگ‌ترین مقدار I_{ave} برای مدل ANFIS-PSO(5) پیش‌بینی شده است ($I_{ave} = 1/0.12$). همچنین مقادیر I_{max} و I_{min} برای این مدل به ترتیب برابر با $1/3.72$ و 0.766 به دست آمد. همچنین مقدار I_{ave} برای ANFIS-PSO(4) برابر $1/0.08$ محاسبه شد. در مقابل مقدار I_{max} برای مدل‌های ANFIS-PSO(3) و ANFIS-PSO(2) به ترتیب برابر با $1/3.37$ و $1/3.55$ تخمین زده شده است. در مقابل، مقادیر I بیشینه، کمینه و متوسط برای مدل ANFIS-PSO(1) به ترتیب برابر $1/3.36$ ، 0.870 و $1/0.03$ به دست آمد؛ بنابراین کمترین مقدار I_{ave} برای مدل ANFIS-PSO(1) پیش‌بینی شد.

جدول ۳- مقادیر I بیشینه، کمینه و متوسط برای مدل‌های

مختلف ANFIS-PSO

	I_{max}	I_{min}	I_{ave}
ANFIS-PSO(5)	1/3.72	0.766	1/0.12
ANFIS-PSO(4)	1/2.76	0.842	1/0.08
ANFIS-PSO(3)	1/3.37	0.791	1/0.07
ANFIS-PSO(2)	1/3.55	0.800	1/0.09
ANFIS-PSO(1)	1/3.36	0.870	1/0.03

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، برای محاسبه طول پرش هیدرولیکی روی بستر زبر درون کانال‌های یک الگوریتم ترکیبی توسعه داده شد. برای رسیدن به این هدف، با استفاده از سیستم استنباط فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) مدل ANFIS-PSO معرفی شد. با توجه به پارامترهای ورودی، پنج مدل ANFIS-PSO معرفی شد. تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌های مذکور نشان داد که مدل‌های ANFIS-PSO طول پرش

8. Inan G. Goktepe A. B. Ramyar K. and Sezer A. 2007. Prediction of sulfate expansion of PC motor using adaptive neuro-fuzzy methodology. *Building and Environment*. 42: 1264-1269.
9. Jang J. S. R. 1993. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE Trans. Systems. Man Cybernetics*. 23(3): 665-685.
10. Kennedy J. and Eberhart R. 1995. Particle swarm optimization, *IEEE Int. Conf. Neural Networks*. 4: 1942-1948.
11. Kumar M. and Lodhi A. S. 2016. Hydraulic jump over sloping rough floors. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 22(2): 127-134.
12. Naseri M. and Othman F. 2012. Determination of the length of hydraulic jumps using artificial neural networks. *Advances in Engineering Software*. 48: 27-31.
13. 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.
14. Velioglu D. Tokyay N. D. and Dincer A. I. 2015. A numerical and experimental study on the characteristics of hydraulic jumps on rough beds. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June–3 July, 2015, The Hague, the Netherlands.