Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۲/ شماره ۳/ پیاپی ۳۰/ پاییز ۱۳۹۷ (۱۰۹-۱۱۸)

مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی روی بستر زبر شیب‌دار با استفاده از مدل ترکیبی مبتنی بر سیستم‌های فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

ابراهیم شهبازبیگی[۱]، سعید شعبانلو[۲*] و محمد علی ایزدبخش[۳]

چکیده

برای طراحی مناسب حوضچه‌های آرامش، تعیین طول پرش هیدرولیکی از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این مطالعه، با استفاده از سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم ترکیبی (ANFIS-PSO) برای پیش‌بینی طول پرش هیدرولیکی روی سطوح شیب‌دار زبر توسعه داده می‌شود. در این جستار، برای ارزیابی عملکرد مدل‌های ANFIS-PSO از شبیه‌سازی مونت کارلو[۴] استفاده می‌شود. همچنین از روش اعتبارسنجی چند لایه[۵] برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌های مذکور بهره گرفته می‌شود. ابتدا با استفاده از پارامترهای مؤثر بر طول پرش هیدرولیکی پنج مدل ANFIS-PSO مختلف معرفی و با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌های 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 پیش‌بینی می‌کند. مقادیر درصد میانگین مطلق خطا، خطای جذر میانگین مربعات و ضریب همبستگی حاصل از کاربرد مدل برتر به‌ترتیب برابر ۳/۷۵۰ و ۰/۶۸۸ و ۰/۹۸۴ که نشان دهنده دقت مناسب مدل برتر مورد استفاده در پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی بود. براساس تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی عددی، پارامتر عدد فرود به‌عنوان مؤثرترین پارامتر در شبیه‌سازی طول پرش هیدرولیکی شناسایی شد. همچنین بعد از عدد فرود جریان، نسبت اعماق مزدوج، شیب کانال و پارامتر بدون‌بعد زبری بستر بیشترین تأثیر را بر مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی داشتند.

واژه‌های کلیدی: بستر زبر، بهینه‌سازی، پرش هیدرولیکی، سیستم استنباط فازی- عصبی تطبیقی.

ارجاع: شهبازبیگی ا. شعبانلو س. وایزدبخش م. ع. ۱۳۹۷. مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی روی بستر زبر شیب‌دار با استفاده از مدل ترکیبی مبتنی بر سیستم‌های فازی و الگوریتم بهینه‌سازی 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 دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۶

6- Monte Carlo simulation
7- k-fold cross validation

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

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 مطالعهٔ آزمایشگاهی آنان، محدودهٔ 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 مطالعهٔ آزمایشگاهی روی پرش هیدرولیکی روی بستر کنگره‌ای انجام دادند. دامنهٔ 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 مطالعهٔ 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 ممنتوم 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 شیب دار مورد مطالعهٔ آزمایشگاهی قرار دادند. ولی‌اُقلو 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 مدل‌سازی پدیده‌های غیرخطی مهندسی مورد استفاده گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. ناصری و عثمان (۲۰۱۲) با استفاده از الگوریتم شبکهٔ عصبی طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی را پیش‌بینی کردند. در مطالعهٔ آنان محدودهٔ 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 شبکهٔ 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 محاسبهٔ مقادیر خطا و سایر شاخص‌های آماری نتایج مدل‌های مختلف ترکیبی ارزیابی می‌شود که مقایسهٔ نتایج عددی و آزمایشگاهی، نشان‌دهندهٔ دقت قابل قبول مدل‌های عددی است. سپس با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی، مدل برتر برای تخمین طول پرش هیدرولیکی پیشنهاد داده می‌شود.

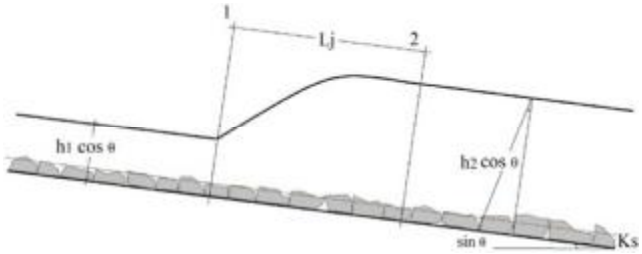
مواد و روش‌ها

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 ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۱۶ نیز اندازه‌گیری شده‌اند. در مطالعهٔ 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 مطالعهٔ آزمایشگاهی مذکور، ارتفاع زبری بستر (ks) برابر اندازهٔ متوسط قطعات شنی اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱ طرح کلی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر شیب‌دار و در جدول ۱ محدودهٔ اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



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

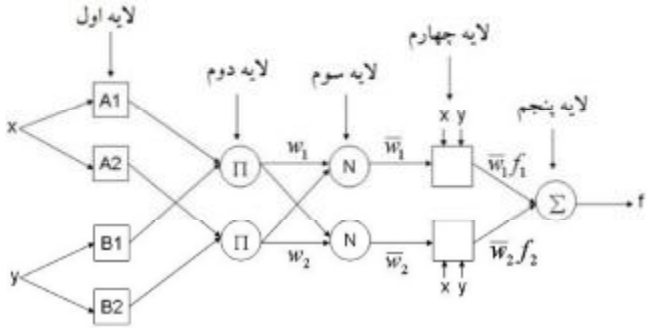
جدول ۱- محدودهٔ اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی کومار و لودهی (۲۰۱۶)

	$Q\ (m^3 s^{-1})$	S_0 (-)	$Ks\ (m)$	$h_1\ (m)$	$h_2\ (m)$	$Lj\ (m)$
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

مدل عددی

سیستم استنتاج 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 استنتاج فازی عصبی تطبیقی (انفیس) توسط جانگ (۱۹۹۳) شده است. انفیس دارای ساختاری با قواعد اگر-آنگاه و جفت داده‌های ورودی- خروجی فازی است و توانایی شبیه‌سازی نگاشت غیرخطی پیچیده با استفاده از یادگیری شبکه‌های عصبی و روش‌های استنتاج 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 بوسیلهٔ توابع مختلفی توصیف می‌شوند. در شکل ۲ ساختار یک شبکهٔ ANFIS با دو ورودی، دو قانون و یک خروجی دارای پنج لایهٔ مختلف نشان داده شده است.



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

لایهٔ 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 iام گره در لایه jام باشد، هر گره i یک گره تطبیقی با تابعی به شکل زیر است:

$$O_i^1 = mA_i(x) \qquad i = 1,\ 2 \qquad (۱)$$

$$O_i^1 = mB_{i-2}(x) \qquad i = 3,\ 4 \qquad (۲)$$

در روابط فوق x (یا y) ورودی‌های غیرفازی گره iام و (A_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 به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$mA_i(x) = \frac{1}{1+\left|(x-r_i)/p_i\right|^{2q_i}} \qquad (۳)$$

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

www.SID.ir

Archive of SID

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

$$Q_i^2 = w_i = mA_i(x).mB_i(y) \qquad i=1,2 \qquad (۴)$$

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

$$Q_i^3 = \overline{w}_i = w_i/(w_1+w_2) \qquad i=1,2 \qquad (۵)$$

خروجی به‌عنوان قدرت آتش نرمالایز شده شناخته می‌شود. در لایهٔ چهارم هر گره سهم قانون iام به خروجی کل را به شکل زیر محاسبه می‌کند:

$$Q_i^4 = \overline{w}_i z_i = \overline{w}_i(a_i x + b_i y + c_i) \qquad i=1,2 \qquad (۶)$$

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

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

$$Q_i^5 = \sum_i \overline{w}_i z_i = \sum_i w_i z_i \Big/ \sum_i w_i \qquad (۷)$$

بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (کندی و ابرهارت، ۱۹۹۵) عضوی از خانوادهٔ 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 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 بهینهٔ سراسری حاصل شود. با فرض اینکه x مکان ذره iام و v سرعت آن باشد، سرعت و موقعیت هر ذره در هر تکرار با استفاده از روابط زیر محاسبه و بروزرسانی می‌شود:

$$v_i(t+1) = w(t).v_i(t) + c_1.rand().(pbest(t) - x_i(t)) + c_2.rand().(gbest(t) - x_i(t)) \qquad (۸)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \qquad (۹)$$

که i=1,2, …,N، t=1,2,…,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[1] و نرخ یادگیری اجتماعی[2] 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 tام و gbest(t) بهترین جواب به‌دست امده تا تکرار tام است. w(t) وزن اینرسی است که از معادلهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$w(t) = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times t}{I_{max}} \qquad (۱۰)$$

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

روش ترکیبی

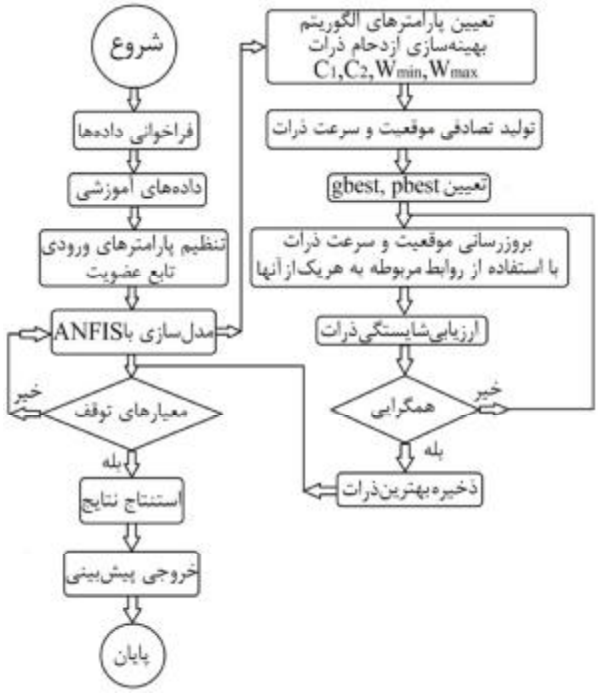
در این مقاله، برای تعیین توابع عضویت انفیس از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده می‌شود. مزیت این روش کاهش هزینه‌های محاسباتی برای یک توپولوژی داده شده است. در این قسمت الگوریتم ارائه شده در این مقاله برای ارائهٔ روش ترکیبی پیشنهادی که به‌صورت شکل ۳ است، به‌صورت مرحله به مرحله توضیح داده می‌شود. در ابتدا با استفاده از یک ماتریس که داده‌های مربوط به طول پرشی هیدرولیکی روی بستر زبر شیبدار 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

1- Cognitive acceleration
2- Social acceleration

www.SID.ir

Archive of SID

معیارهای تعیین شده برای توقف برنامه مانند رسیدن به حداقل مقدار تعیین شده برای تابع هدف یا تمام شدن تعداد تکرارهای تعیین شده، اقناع 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 به‌صورت تصادفی تعیین می‌شوند و در ادامه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مقادیر تعیین شده به‌روزرسانی می‌شوند. استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی پارامترهای تابع عضویت به‌صورت زیر است: ۱) در این مرحله برای تمامی ذرات یک موقعیت و سرعت اولیه با اندازهٔ مشابه تعیین می‌شود. ۲) تعیین مقدار pbest و gbest. اگر مقدار به‌دست آمده بهتر از مقدار موجود در ذره باشد، pbest به‌روزرسانی 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 به‌روزرسانی می‌شود. ۳) بررسی شایستگی هر ذره (pbest) و ذخیره ذرات با بهترین مقدار شایستگی (gbest). ۴) اصلاح سرعت‌ها براساس مقادیر gbest و pbestهای بروزرسانی شده. ۵) به‌روزرسانی ذرات. ۶) این روند تا تمام شدن تعداد تکرارها ادامه می‌یابد. حال خروجی انفیس که پارمترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌دست آمده است، استخراج و در نهایت خروجی‌های مربوط به پیش‌بینی طول پرش هیدرولیک با استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی در این مطالعه، تعیین می‌شود.



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

طول پرش هیدرولیکی روی سطوح زبر

هاگر و همکاران (۱۹۹۰)، اد و راجاراتنام (۲۰۰۲) و کارولو و همکاران (۲۰۰۷) طول پرش هیدرولیکی را به‌عنوان تابعی از عدد فرود (F_1) و نسبت زبری بستر (Ks/h_1) در نظر گرفته‌اند:

$$\frac{Lj}{h_1} = f\left(F_1, \frac{Ks}{h_1}\right) \qquad (۱۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

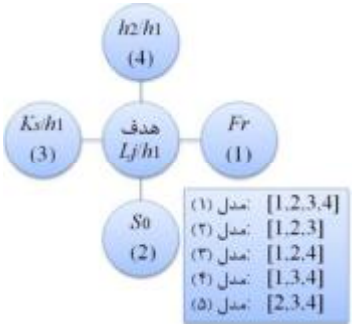
همچنین عظیمی و همکاران (۲۰۱۶) برای تخمین طول پرش هیدرولیکی، پارامتر مذکور را به‌عنوان تابعی از عدد فرود، نسبت زبری بستر به عمق جریان در بالادست پرش هیدرولیکی و نسبت اعماق مزدوج (h_2/h_1) در نظر گرفتند:

$$\frac{Lj}{h_1} = f\left(F_1, \frac{h_2}{h_1}, \frac{Ks}{h_1}\right) \quad (۱۲)$$

همچنین کومار و لودهی (۲۰۱۵) 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 (Ks/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 معادلهٔ (۱۲) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{Lj}{h_1} = f\left(F_1, \frac{h_2}{h_1}, \frac{Ks}{h_1}, S_0\right) \quad (۱۳)$$

با توجه به مطالب بیان شده در این مطالعه، پارامترهای مذکور (F_1, Ks/h_1, h_2/h_1, S_0) به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل ANFIS-PSO در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ۵ مدل ANFIS-PSO مختلف برای مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی روی سطوح زبر شیب‌دار معرفی می‌شود. شیوهٔ ترکیب پارامترهای ورودی در این مدل‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. یادآوری می‌شود که برای بررسی عملکرد مدل‌های ANFIS-PSO از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر روش اعتبارسنجی ضربدری با k برابر ۴ برای بررسی توانایی مدل‌های مذکور استفاده شده است.



شکل ۴- شیوهٔ ترکیب پارامترهای ورودی برای معرفی مدل‌های مختلف ANFIS-PSO

معیارهای بررسی دقت مدل عددی

در مطالعهٔ 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*) به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left|(Lj/h_1)_{(Predicted)_i} - (Lj/h_1)_{(Observed)_i}\right|}{(Lj/h_1)_{(Observed)_i}}\right)\times 100 \quad (۱۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left((Lj/h_1)_{(Predicted)_i} - (Lj/h_1)_{(Observed)_i}\right)^2} \quad (۱۵)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{(Lj/h_1)}_{(Observed)}} \quad (۱۶)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left((Lj/h_1)_{(Observed)i} - \overline{(Lj/h_1)}_{(Observed)}\right)\left((Lj/h_1)_{(Predicted)i} - \overline{(Lj/h_1)}_{(Predicted)}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left((Lj/h_1)_{(Observed)i} - \overline{(Lj/h_1)}_{(Observed)}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left((Lj/h_1)_{(Predicted)i} - \overline{(Lj/h_1)}_{(Predicted)}\right)^2}} \quad (۱۷)$$

در اینجا $(Lj/h_1)_{(Observed)i}$، $(Lj/h_1)_{(Predicted)i}$، $\overline{(Lj/h_1)}_{(Observed)i}$ و n به‌ترتیب طول پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی، طول پرش هیدرولیکی پیش‌بینی شده، میانگین طول‌های پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی و تعداد اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هستند.

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 ۴ مدل ANFIS-PSO(1) طول پرش هیدرولیکی را بر حسب کلیه پارامترهای ورودی پیش‌بینی می‌کند. مقدار ضریب همبستگی (R) برای این مدل برابر ۰/۹۸۴ پیش‌بینی شده است. همچنین درصد میانگین مطلق خطا (*MAPE*) و

www.SID.ir

Archive of SID

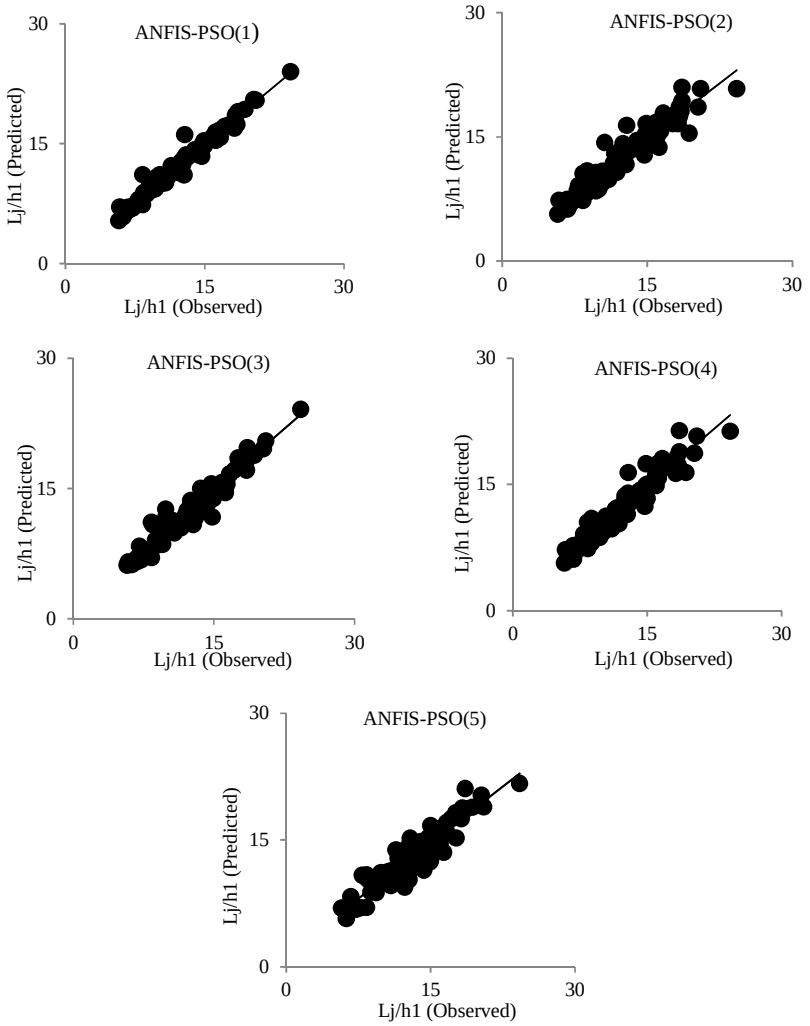
خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*) برای مدل مزبور به‌ترتیب برابر با ۳/۷۵۰ و ۰/۶۸۸ محاسبه شده است. این در حالی است که شاخص پراکندگی (*SI*) برای ANFIS-PSO(1) برابر ۰/۰۵۵ به‌دست آمده است. در میان کلیه مدل‌های ANFIS-PSO این مدل دارای کمترین مقدار خطا و بیشترین مقدار همبستگی است. در این مطالعه برای شناسایی 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؛ به‌عبارت 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) به‌ترتیب برابر ۱/۱۹۰، ۶/۹۵۸ و ۰/۰۹۵ به‌دست 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؛ به‌عبارت دیگر، تأثیرات نسبت زبری بستر در این مدل حذف شده است؛ با وجود این، مقادیر *MAPE* و *RMSE* برای ANFIS-PSO(3) به‌ترتیب 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 به‌ترتیب برابر با ۱/۱۰۴، ۶/۶۱۹ و ۰/۰۸۸ 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) به‌ترتیب 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، مدل ANFIS-PSO(1) به‌عنوان مدل برتر معرفی می‌شود. این مدل تأثیر همهٔ 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 بدون‌بعد h_2/h_1، S_0 و Ks/h_1 به‌ترتیب 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

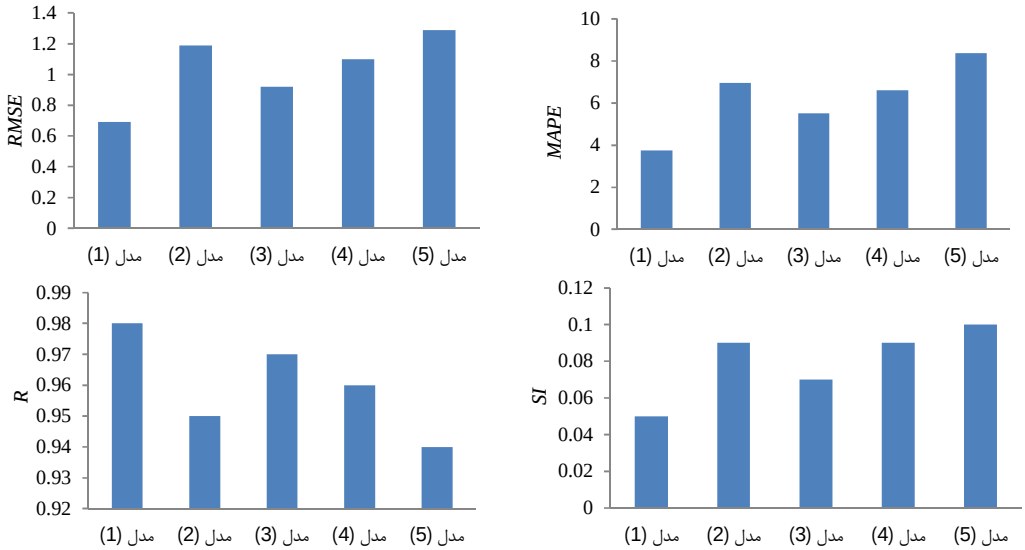
مدل	روابط ریاضی
ANFIS-PSO(1)	y = 0.967x + 0.414
ANFIS-PSO(2)	y = 0.9x + 1.257
ANFIS-PSO(3)	y = 0.938x + 0.774
ANFIS-PSO(4)	y = 0.915x + 1.071
ANFIS-PSO(5)	y = 0.885x + 1.449

www.SID.ir

Archive of SID



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

www.SID.ir

Archive of SID

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

$$l = (Lr/h_1)_{(Predicted)} - (Lr/h_1)_{(Observed)} \qquad (۱۸)$$

نزدیک بودن مقدار پارامتر l به یک نشان‌دهندهٔ نزدیک بودن مقادیر عددی به نتایج آزمایشگاهی است. همچنین مقادیر l بیشینه، کمینه و متوسط $(l_{\max}, l_{\min}, l_{ave})$ در جدول ۳ مرتب شده است. براساس نتایج جدول ۳، بزرگ‌ترین مقدار l_{ave} برای مدل ANFIS-PSO(5) پیش‌بینی شده است (l_{ave}=۱/۰۱۲). همچنین مقادیر $l_{\max}$ و $l_{\min}$ برای این مدل به‌ترتیب برابر با ۱/۳۷۲ و ۰/۷۶۶ به‌دست آمد. همچنین مقدار l_{ave} برای ANFIS-PSO(4) برابر ۱/۰۰۸ محاسبه شد. در مقابل مقدار $l_{\max}$ برای مدل‌های ANFIS-PSO(3) و ANFIS-PSO(2) به‌ترتیب برابر با ۱/۳۳۷ و ۱/۳۵۵ تخمین زده شده است. در مقابل، مقادیر l بیشینه، کمینه و متوسط برای مدل ANFIS-PSO(1) به‌ترتیب برابر ۱/۳۳۶، ۰/۸۷۰ و ۱/۰۰۳ به‌دست آمد؛ بنابراین کمترین مقدار l_{ave} برای مدل ANFIS-PSO(1) پیش‌بینی شد.

جدول ۳- مقادیر l بیشینه، کمینه و متوسط برای مدل‌های مختلف ANFIS-PSO

	$l_{\max}$	$l_{\min}$	l_{ave}
ANFIS-PSO(5)	۱/۳۷۲	۰/۷۶۶	۱/۰۱۲
ANFIS-PSO(4)	۱/۲۷۶	۰/۸۴۲	۱/۰۰۸
ANFIS-PSO(3)	۱/۳۳۷	۰/۷۹۱	۱/۰۰۷
ANFIS-PSO(2)	۱/۳۵۵	۰/۸۰۰	۱/۰۰۹
ANFIS-PSO(1)	۱/۳۳۶	۰/۸۷۰	۱/۰۰۳

نتیجه‌گیری

در مطالعهٔ حاضر، برای محاسبهٔ 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 هیدرولیکی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. همچنین مدل برتر ANFIS-PSO، طول پرش هیدرولیکی را به‌عنوان تابعی از عدد فرود جریان (F_1)، نسبت زبری بستر (Ks/h_1)، نسبت اعماق مزدوج (h_2/h_1) و شیب بستر (S_0) پیش‌بینی می‌کند. مقدار شاخص پراکندگی (SI) برای این مدل مساوی ۰/۰۵۵ محاسبه شد. همچنین بررسی نتایج مدل‌های مختلف نشان داد که عدد فرود جریان مؤثرترین پارامتر در مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی روی بسترهای شیب‌دار زبر محسوب می‌شود. لازم است ذکر شود که بعد از عدد فرود، نسبت اعماق مزدوج، شیب کانال و پارامتر بدون‌بعد زبری بستر به‌ترتیب دارای بیشترین تأثیر در مدل‌سازی طول پرش هیدرولیکی بودند. بررسی پارامتر l (نسبت طول پرش هیدرولیکی پیش‌بینی شده به طول پرش هیدرولیکی آزمایشگاهی) نشان داد که مدل برتر در مقایسه با سایر مدل‌های ANFIS-PSO، طول پرش هیدرولیکی را به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک‌تر مدل‌سازی می‌کند.

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.

www.SID.ir

Archive of SID

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.

www.SID.ir