

مقاله علمی-پژوهشی

برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای پلان منحنی با روش ترکیبی WOA-ANFIS

سمیه امامی^{۱*}، جواد پارسا^۲، حجت امامی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۲۴

چکیده

استفاده از سرریزهای کنگره‌ای یکی از راه‌های مؤثر و اقتصادی جهت افزایش راندمان سرریز از طریق افزایش طول مؤثر تاج آن است، بدین صورت که در یک عرض معین و ارتفاع هیدرولیکی مشخص در مقایسه با سایر سرریزها، دبی بیش‌تری را عبور می‌دهد. در این پژوهش، روش ترکیبی الگوریتم وال و سیستم استنتاج عصبی-فازی برای برآورد ضریب دبی بهینه سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی معرفی شده است. در روش پیشنهادی کارایی و سرعت همگرایی الگوریتم وال مورد سنجش قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. عملکرد روش پیشنهادی با چهار آماره، شامل ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و معیار کارایی (NSE)، ارزیابی گردید. نتایج حاکی از تطابق مناسب بین مقادیر مشاهداتی و برآورد شده می‌باشد. نتایج حاصل از روش WOA-ANFIS با ورودی‌های نسبت بار آبی بالادست سرریز به ارتفاع سرریز (H/w) و زاویه قوس سرریز (θ)، نشان داد که ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی ($C_d=0.786$) در مقایسه با سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی ($C_d=0.682$)، ۱۰٪ افزایش می‌یابد. هم‌چنین تحلیل‌های آماری انجام شده بر روی نتایج به‌دست آمده نشان داد که روش WOA-ANFIS با کسب مقادیر $RMSE=0.021$ ، $R^2=0.981$ ، $MAE=0.010$ و $NSE=0.976$ از کارایی بالایی در برآورد ضریب دبی این نوع سرریز برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم وال، پلان منحنی، سرریز کنگره‌ای، سیستم استنتاج عصبی-فازی، ضریب دبی

مقدمه

کرده‌اند که با ساخت و نصب سازه‌های اندازه‌گیری در کانال‌ها، دبی جریان را با دقت مناسبی اندازه‌گیری کنند. یکی از سازه‌های متداول در بسیاری از سدها و کانال‌های انتقال آب، سرریزها هستند که برای تخلیه، اندازه‌گیری و کنترل سطح آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً سرریزها را بر اساس مهم‌ترین مشخصه آن‌ها، تقسیم‌بندی می‌کنند. این مشخصه می‌تواند در رابطه با سازه کنترل، کانال تخلیه و یا هر عضو دیگر آن باشد. در صورتی که سرریزها بر اساس تراز آبگیریشان تقسیم‌بندی شوند، می‌توان آن‌ها را به دو دسته سرریزهای سطحی و زیرسطحی معرفی کرد (امامی، ۱۳۹۵). سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی از جمله کاربردی‌ترین سرریزهای سطحی هستند که اخیراً مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. این نوع سرریزها به دلیل تاج طولانی خود، دبی بیش‌تری را در مقایسه با سرریزهای معمولی (سرریز عرضی) از خود عبور می‌دهند.

برای انتخاب بهترین طرح برای بسیاری از سدها و مجاری روباز بایستی با صرفه‌ترین و دقیق‌ترین روش را جهت بررسی چگونگی رفتار جریان بر روی سرریز در صورت وقوع سیل، در نظر گرفت. امروزه مسائل متعددی از جمله افزایش هزینه‌ها، وقت‌گیر بودن و وقوع خطای انسانی، موجب استفاده از مدل‌های سه بعدی و

با توجه به اقلیم خشک و نزولات جوی بسیار کم در ایران، همواره یکی از دغدغه‌های اساسی مهندسين هیدرولیک، مدیریت بهینه منابع محدود آب کشور بوده است. با توجه به رشد روز افزون سرمایه‌گذاری‌های ملی در بخش طرح‌های آبی، بهینه‌سازی طرح‌های کنترل و هدایت آب به منظور ذخیره‌سازی سرمایه ملی بیش از پیش مطرح می‌شود (نصر اصفهانی، ۱۳۹۶). طرح‌های کنترل و هدایت آب باید به گونه‌ای تعریف شوند که ضمن کمک به توسعه بخش صنعت، کشاورزی و حمل و نقل، آسیب‌های غیر قابل جبران به دنبال نداشته باشند. بنابراین تنها با شناخت صحیح و بررسی دقیق هیدرولیک جریان‌های عبوری از سیستم‌های هدایت آب و کاربرد آن در طرح‌های آبی می‌توان انتظار داشت که از منابع آب به‌صورت پایدار استفاده شود. در طول سال‌های اخیر، مهندسان هیدرولیک تلاش

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب

*- نویسنده مسئول: (Email: somayehemami70@gmail.com)

RMSE=0.077 از کارایی بالایی نسبت به دو روش دیگر برخوردار است (Bonakdari and Zaji, 2018). ایاز و منصور با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای مورب در حالت جریان آزاد و مستغرق پرداختند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد، طول (L) و ارتفاع (P) سرریز، کم‌ترین تأثیر را بر روی ضریب دبی این نوع سرریزها دارند (Ayaz and Mansoor, 2019). بنکداری و همکاران کارایی روش برنامه‌نویسی بیان ژن^۷ را جهت پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای پلان مثلثی بررسی و نتیجه گرفتند روش GEP در پیش‌بینی ضریب دبی این نوع سرریزها نتایج بهتری ارائه می‌کند (Bonakdari et al., 2020). شفیی و همکاران از روش ANFIS-FFA برای تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی استفاده کردند. مقایسه نتایج مدل ANFIS-FFA با مدل ANFIS نشان داد که مدل ANFIS-FFA در پیش‌بینی ضریب دبی از دقت بالاتری برخوردار است (Shafiei et al., 2020).

با توجه به مطالعات پیشین و نیز هزینه بالا و زمان‌بر بودن مطالعات آزمایشگاهی، روش‌های متعدد محاسبات نرم به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی و تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای چند سیکله با پلان‌های مختلف توسعه یافته‌اند. با توجه به این که اطلاعات کافی در مورد سرریزهای کنگره‌ای پلان منحنی که به دلیل دارا بودن تاج طویل عملکرد بسیار مناسبی برای تنظیم سطح آب در مقایسه با سایر سرریزها دارند، وجود ندارد، لذا در پژوهش حاضر، برای نخستین بار روشی ترکیبی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی وال و سیستم استنتاج عصبی-فازی برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مؤثر بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی معرفی شده است. روش پیشنهادی با چهار ترکیب مختلف از پارامترهای موثر برای شناسایی مناسب‌ترین ترکیب ورودی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مطالعه تجربی کومار و همکاران، برای آموزش و آزمون روش ترکیبی پیشنهادی WOA-ANFIS استفاده و با مطالعات پیشین مورد مقایسه قرار گرفته است (Kumar et al., 2012).

مواد و روش‌ها

تعیین ضریب دبی

هدف اصلی در مسئله تعیین ضریب دبی، بررسی عملکرد سرریز و تخمین دبی عبوری از روی سرریز است.

برای محاسبه C_d در سرریزهای کنگره‌ای از رابطه زیر استفاده می‌شود (Rehbock, 1929):

$$C_d = \frac{Q}{2/3 L \sqrt{2g} H^{3/2}} \quad (1)$$

کامپیوتری شده است (Emami et al., 2018).

نخستین مطالعه در مورد سرریزهای کنگره‌ای توسط تیلور^۱ در سال ۱۹۶۸ صورت گرفت که سرریزهای کنگره‌ای با تاج لبه‌تیز را مورد بررسی قرار داد. تیلور و هی و تیلور^۲، کارایی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی و دوزنقه‌ای را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که کارایی سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی از سرریزهای کنگره‌ای با پلان دوزنقه‌ای مناسب‌تر می‌باشد (Taylor, 1968; Hay and Taylor, 1970). نتایج مطالعات لاکس و هینچکلیف^۳ نشان داد که میزان واقعی جریان عبوری از سرریز زیگزاگی حدود ۲۵٪ کم‌تر از مقدار برآورد شده نظیر آن از روش هی و تیلور است (Lux and Hinchliff, 2003).

خوش‌بین و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از روش گروهی مدل‌سازی داده‌ها^۴ و الگوریتم ژنتیک به پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی پرداختند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تقریباً تمامی مدل‌های ارائه شده به‌منظور برآورد ضریب دبی از دقت خوبی برخوردار هستند. همچنین نتایج نشان داد عدم در نظر گرفتن پارامتر عدد فرود سبب برآورد C_d کم‌تری نسبت به سایر حالات می‌باشد. ظهیری (۱۳۹۴) با استفاده از روش نوین بهینه‌سازی برنامه‌ریزی ژنتیک، رابطه‌ای بدون بعد را بر اساس پارامترهای زاویه قوس سرریز و نسبت بار آبی سرریز به ارتفاع آن برای برآورد ضریب دبی سرریزهای قوسی ارائه داد. مقایسه نتایج حاصله از این رابطه با مقادیر آزمایشگاهی ضریب دبی سرریزهای قوسی، نشان داد که رابطه پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.

حق‌آبی و همکاران ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی با استفاده از روش سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی را پیش‌بینی نمودند. سپس، با استفاده از آزمون گاما (GT)^۵، ۲۲۳ سری داده را برای معرفی پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی جریان بررسی نمودند. در ادامه، با توجه به نتایج آزمون گاما، ساختار ANFIS^۶ برای مدل مورد نظر طراحی شد. ایشان با مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو ساختار MLP و ANFIS نشان دادند که هر دو مدل از عملکرد مناسبی برخوردارند، ولی ساختار مدل ANFIS بهینه‌تر می‌باشد (Haghiabi et al., 2017).

بنکداری و زاجی عملکرد سه روش محاسبات نرم ترکیبی شامل روش‌های ANFIS-PSO، ANFIS-DE، و ANFIS-GA را جهت تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای جانبی ارزیابی و نتیجه گرفتند روش ترکیبی ANFIS-DE با مجذور مربعات خطا

- 1- Taylor
- 2- Taylor & Hey
- 3- Lux & Hinchliff
- 4- Group Method of Data Handling
- 5- Gamma Test
- 6- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

پارامترهای ورودی

در پژوهش حاضر، زاویه قوس (θ)، نسبت طول سرریز به ارتفاع آن (L/W)، نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز (H/W)، نسبت طول سرریز به عرض کانال اصلی (L/B) و عدد فرود (Fr)، به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شد. بر اساس پارامترهای ورودی، شش ترکیب ورودی مختلف برای بررسی تأثیرگذارترین پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). لازم به ذکر است، تمام پارامترهای ورودی به صورت بی بعد مورد استفاده قرار گرفتند.

مدل عددی

الگوریتم بهینه‌سازی وال

الگوریتم وال^۲ یک الگوریتم فراابتکاری کاملاً جدید به تقلید از رفتار شکار نهنگ کوهان‌دار است. تفاوت عمده‌ی این الگوریتم با دیگر الگوریتم‌ها، شبیه‌سازی رفتار شکار به صورت تصادفی و یا بهترین عامل جستجو برای تعقیب شکار است. این الگوریتم با مجموعه‌ای از جواب‌های تصادفی شروع می‌شود. در هر مرحله عامل‌های جستجو موقعیت خود را با توجه به انتخاب تصادفی عامل جستجو یا بهترین جواب به دست آمده قبلی به‌روز می‌کنند (Mirjalili and Lewis, 2016).

مدل ریاضی الگوریتم وال به صورت زیر است:

محاصره طعمه

نهنگ‌های کوهان‌دار می‌توانند محل طعمه را تشخیص داده و آن‌ها را محاصره کنند. الگوریتم WOA فرض می‌کند که در حال حاضر نامزد بهترین راه‌حل، طعمه هدف می‌باشد. این رفتار توسط معادلات ۴ و ۵ نشان داده شده است:

(۴)

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X} * (t) - \bar{X}(t)|$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X} * (t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (۵)$$

که در این روابط، t تکرار فعلی، \bar{A} و \bar{C} بردار ضرایب، \bar{X}^* بردار بهترین راه‌حل به دست آمده تاکنون و \bar{X} بردار موقعیت جسم می‌باشد. بردارهای A و C به فرم روابط ۶ و ۷، محاسبه می‌شوند.

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r} - \bar{a} \quad (۶)$$

$$\bar{C} = 2\bar{r} \quad (۷)$$

بردار a به صورت خطی در هر تکرار از ۲ تا ۰ کاهش می‌یابد و بردار r یک بردار تصادفی بین صفر و یک است (Mirjalili and Lewis, 2016).

بر اساس مطالعات انجام شده، ضریب دبی تابعی از ۶ پارامتر اساسی است که عبارتند از (Emami et al., 2018).

انرژی کل بالادست سرریز (H)، طول سرریز (L)، ارتفاع سرریز (p)، عرض کانال اصلی (B)، زاویه رأس سرریز (θ) و عمق جریان (y).

پس از انجام آنالیز ابعادی با استفاده از تئوری پی باکینگهام^۱ ضریب دبی تابعی از پارامترهای بدون بعد مطابق روابط ۲ و ۳، به دست می‌آید:

$$C_d = f(H, L, p, B, \theta, y) \quad (۲)$$

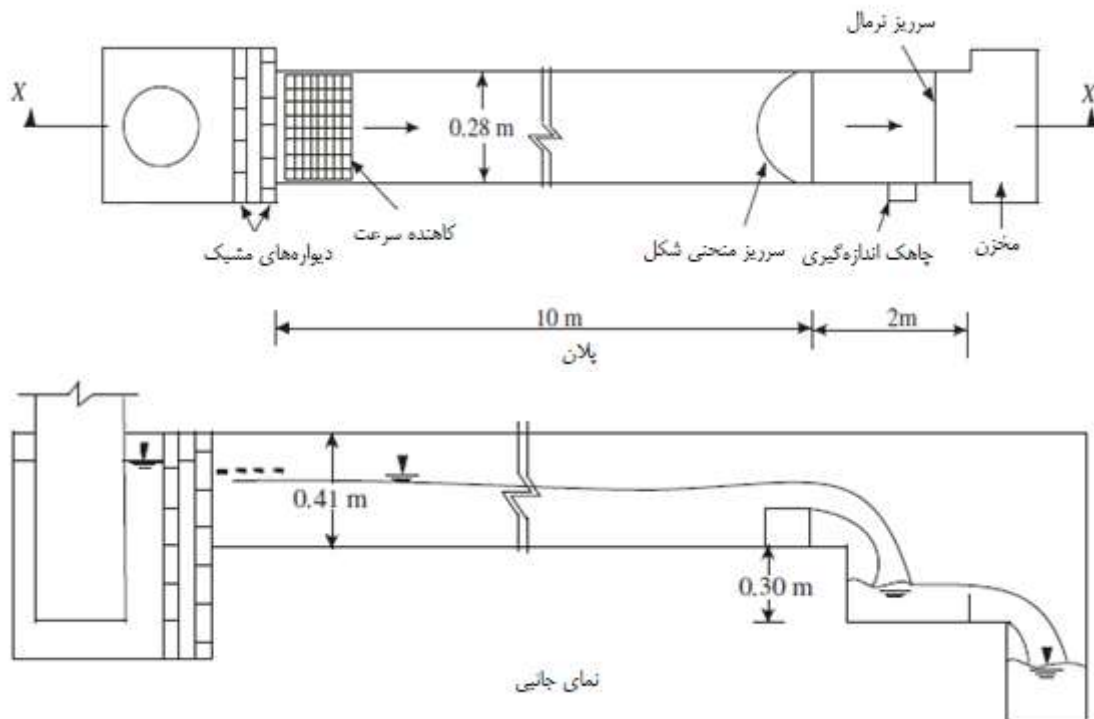
$$C_d = f\left(\frac{H}{p}, \frac{L}{p}, \frac{y}{p}, \frac{L}{B}, \frac{y}{B}, R_e, \theta, W_e\right) \quad (۳)$$

در این رابطه، C_d ضریب دبی بدون بعد، Q دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه و g شتاب ثقل برابر با 9.806 متر بر مجذور ثانیه است.

هندرسون نشان داد که اگر عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌توان از اثر لزجت صرف‌نظر کرد. در پژوهش حاضر نیز جریان در سرریز و کانال متلاطم بوده و می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر نمود (Henderson, 1966). هم‌چنین نواک و کابلک به این نتیجه رسیدند که اگر ارتفاع آب روی سرریز از ۳ تا ۴ سانتی‌متر بیش‌تر باشد، می‌توان اثر کشش سطحی را نیز نادیده گرفت (امامی، ۱۳۹۵). با توجه به اینکه حداقل ارتفاع آب روی سرریز معادل ۳ سانتی‌متر منظور شده است، می‌توان از اثر عدد وبر نیز صرف‌نظر نمود. با توجه به آنالیز ابعادی انجام گرفته و تحقیقات پژوهشگران مختلف از جمله، تولیس و همکاران و هی و تیلور، نشان می‌دهد که پارامتر بدون بعد H/P به عنوان مهم‌ترین پارامتر در روابط ضریب دبی مطرح شده است (Tullis et al., 1995; Hay and Taylor, 1970).

مدل آزمایشگاهی

برای ارزیابی روش پیشنهادی در تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای پلان منحنی، از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی جمع‌آوری شده توسط کومار و همکاران، استفاده شد. این محققان برای انجام مطالعه آزمایشگاهی خود، از یک کانال مستطیلی به عرض 0.28 متر، طول 12 متر و ارتفاع 0.41 متر استفاده نمودند. پلان و مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی و سرریز کنگره‌ای پلان منحنی، در شکل ۱ ارائه شده است. جهت بررسی ضریب دبی جریان، زوایای 30° ، 60° ، 90° ، 120° ، 150° و 180° درجه به ازای $0 \leq h/p \leq 0.7$ مورد آزمایش قرار گرفت. ارتفاع سرریز برابر با 18 سانتی‌متر و شرایط جریان در تمامی آزمایش‌ها به صورت زیر بحرانی، آشفته و جریان ریزشی در نظر گرفته شد.



شکل ۱- پلان و مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی و سرریز کنگره‌ای پلان منحنی (Kumar et al., 2012)

در جدول ۱، مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل‌های آزمایشگاهی مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل‌های آزمایشگاهی (Kumar et al., 2012)

پارامتر	تعریف	واحد	محدوده
θ	زاویه قوس	درجه (deg.)	۱۸۰-۴۵
w	ارتفاع سرریز	متر (m)	۰/۸
B	عرض کانال	متر (m)	۰/۲۸
H	بار آبی	متر (m)	۰/۰۱۰۴ - ۰/۱۱۵۵
Q	دبی جریان	مترمکعب بر ثانیه (m^3/s)	۰/۰۰۰۸ - ۰/۰۲۰۳
L	طول تاج	متر (m)	۰/۲۸ - ۰/۳۳۸۶

جدول ۲- ترکیبات ورودی

مدل	پارامترهای ورودی
M_1	$H/w, \theta$
M_2	$H/w, L/w, \theta$
M_3	$H/w, L/w, \theta, Fr$
M_4	$L/B, H/w, L/w, \theta, Fr$

روش حمله شبکه حباب (فاز بهره‌برداری)

برای مدل‌سازی ریاضی رفتار شبکه حباب نهنگ کوهان‌دار، دو روش به صورت زیر طراحی شده است:

کاهش سازوکار محاصره: این رفتار با کاهش مقدار \bar{a} در رابطه

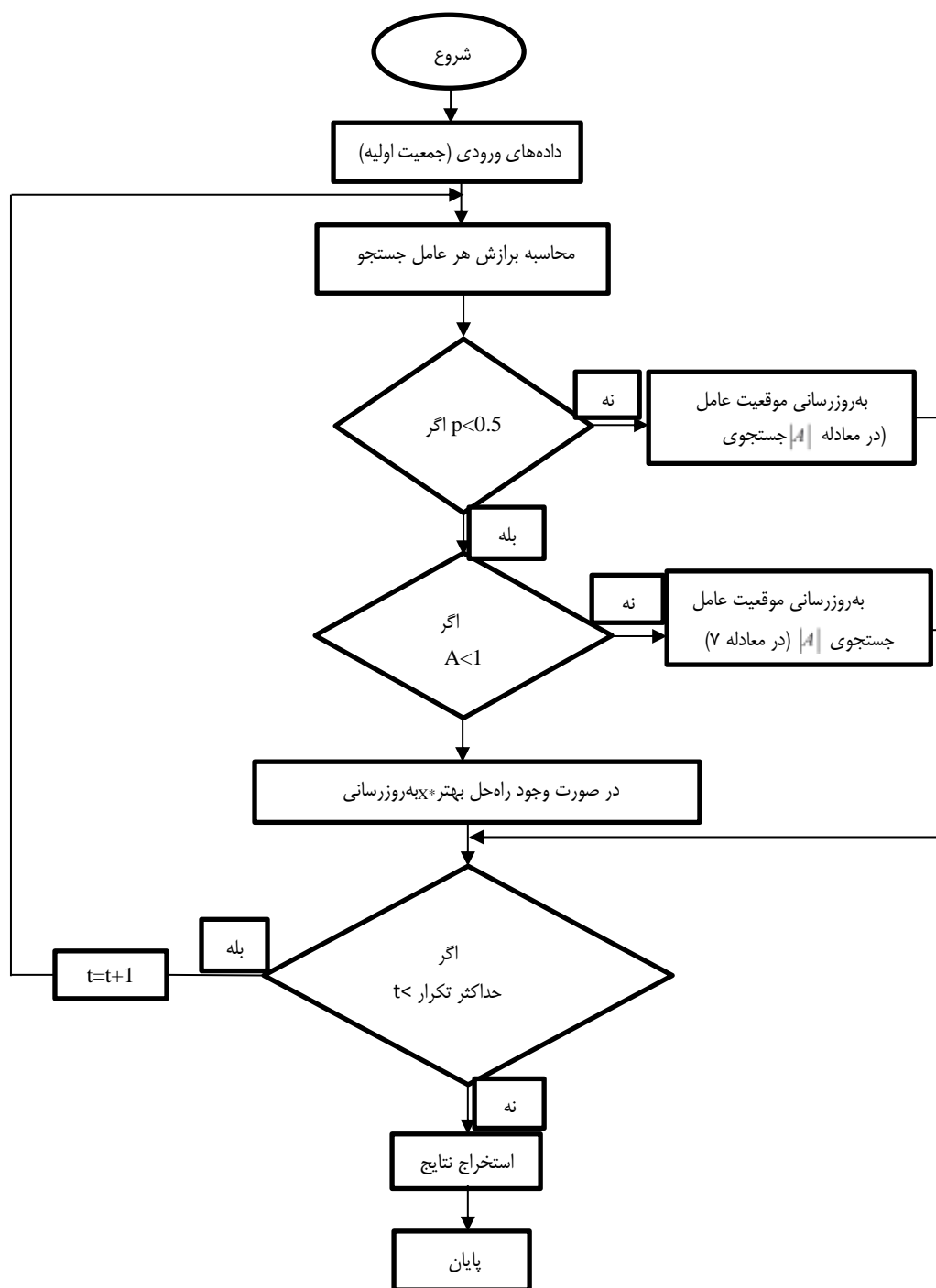
۶، به دست می‌آید. باید توجه داشت که محدوده نوسان \bar{A} نیز به a کاهش می‌یابد.

موقعیت به روزرسانی ماریپیچ: معادله ماریپیچی بین موقعیت نهنگ و موقعیت طعمه برای تقلید از حرکت ماریپیچ شکل نهنگ کوهان‌دار به فرم روابط ۸ و ۹، می‌باشد.

$$\bar{X}(t+1) = \bar{D}^t e^{N \cdot \cos(2\pi l)} + \bar{X}^*(t) \quad (8)$$

که:

$$\bar{X}(t+1) = \begin{cases} \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} & p < 0.5 \\ \bar{D}^t e^{N \cdot \cos(2\pi l)} + \bar{X}^*(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (9)$$



شکل ۲- فلوجارت الگوریتم وال

که p عددی تصادفی بین ۰ و ۱ است.

جستجوی طعمه (فاز اکتشاف)

رویکرد مشابه بر اساس تنوع بردار \bar{A} می‌تواند برای جستجوی

طعمه (اکتشاف)، مورد استفاده قرار گیرد. لذا این سازوکار و $|A^*| < 1$ با تأکید بر اکتشاف و اجازه دادن به الگوریتم WOA، موجب انجام یک جستجوی کلی می‌شود. مدل ریاضی به‌صورت روابط ۱۰ و ۱۱ تعریف می‌شود:

از داده‌های مرتب شده، آموزش ANFIS 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، ارضا شوند. پس 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 وال 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)، تعریف می‌شود. این بردار شامل پارامترهای تابع عضویت است که با استفاده از الگوریتم وال مقدار آن‌ها بهینه می‌شود. مقدار تابع هدف تعریف شده به صورت تابع میانگین مربعات خطا می‌باشد. همچنین، جستجو جهت یافتن جواب‌های بهتر و به روزرسانی بهترین جواب، انجام می‌شود و عملگرهای مربوط به الگوریتم وال شامل جهش، تقاطع و انتخاب، اعمال می‌شوند. در ادامه مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود و با در نظر گرفتن رسیدن به همگرایی و خاتمه تعداد تکرارها، شرایط توقف کنترل می‌شود. در صورت رسیدن به شرایط توقف، بهینه‌سازی پایان می‌یابد و مقادیر بهینه شده با استفاده از داده‌های مربوط به آزمون مدل، مقدار ضریب دبی را برآورد می‌کنند. در غیر این صورت، مجدد جستجو جهت یافتن بهترین جواب ادامه می‌یابد.

پیش از ادامه بحث، لازم است برای قسمت‌های مختلف مدل‌های مورد استفاده اعم از جمعیت اولیه، نسبت داده‌های آموزش و آزمایش و ... باید مقادیر مناسب را انتخاب نمود که البته انتخاب صحیح این مقادیر تأثیر مستقیمی در نحوه عملکرد و سرعت مدل‌ها در مسئله مدنظر خواهد داشت. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم وال در جدول ۳ ارائه شده است.

لازم به ذکر است، مقادیر عددی پارامترهای ارائه شده در جدول ۳، برای الگوریتم وال پس از بررسی مقادیر مختلف برای پارامترها و اجرای الگوریتم به‌ازای این مقادیر تا رسیدن به بهینه‌ترین جواب انتخاب شدند.

ارزیابی کارایی مدل‌های پیشنهادی

کارایی روش پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های ضریب تبیین^۱، جذر میانگین مربعات خطا^۲، میانگین خطای مطلق^۳ و معیار کارایی^۴ مورد ارزیابی قرار گرفت (روابط ۱۲ تا ۱۵) (Ghorbani et al., 2017):

$$\bar{D} = \left| \overline{C \cdot X_{rand}} - \bar{X} \right| \quad (10)$$

$$\bar{X}(t+1) = \overline{X_{rand} \cdot \bar{A} \cdot \bar{D}} \quad (11)$$

که $\overline{X_{rand}}$ یک بردار موقعیت تصادفی (یک نهنگ تصادفی) است که از جمعیت فعلی انتخاب شده است. در شکل ۲، فلوچارت الگوریتم وال ارائه شده است.

سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی

این مدل توسط جانگ در سال ۱۹۹۳ توسعه یافت. ساختار ظاهری مدل‌های عصبی-فازی تطبیقی هم‌چون مدل‌های شبکه عصبی می‌باشد یعنی دارای ساختار شبکه‌ای و لایه‌ای است (Jang, 1993). ساختار ANFIS پنج لایه دارد که شامل گره‌های ورودی، قاعده، متوسط، نتیجه و خروجی است و به‌طور مستقیم با هم ارتباط دارند. هر گره دارای تابعی با پارامترهای قابل تنظیم می‌باشد. ساختار مناسب بر اساس داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع عضویت ورودی و خروجی انتخاب می‌گردد. در مرحله آموزش با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. این مدل از الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی برای طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند و دارای قابلیت مناسبی در آموزش، ساخت و طبقه‌بندی می‌باشد. همچنین قانون یادگیری آن بر پایه الگوریتم پس انتشار خطا با نگرش بر حداقل کردن میانگین مربعات خطا بین خروجی شبکه و خروجی واقعی می‌باشد (کیاء و همکاران، ۱۳۹۸، Kisi et al., 2009). از آنجایی که در این سیستم از مدل فازی سوگنو درجه صفر و یک استفاده می‌شود، لذا تابع عضویت خروجی سیستم فقط شامل دو تابع ثابت و خطی می‌باشد. برای تعیین نوع تابع عضویت ورودی و درجه عضویت آن‌ها، راه‌حل مشخصی وجود ندارد و با بهره‌گیری از سعی و خطا، بهترین ساختار مدل تعیین می‌شود. به‌نحوی که شبکه ANFIS با یک تابع عضویت و درجه عضویت پایین اجرا می‌گردد. در ادامه، با استفاده از مجموعه داده‌های آزمون، عملکرد شبکه نسبت به داده‌هایی که تاکنون با آن‌ها مواجه نبوده است، سنجیده می‌شود. چنانچه معیارهای ارزیابی داده‌های آزمون مورد قبول نباشد، درجه عضویت تابع را افزایش داده و مجدداً مراحل آموزش و آزمون شبکه تکرار می‌شود. در نهایت از بین شبکه‌های بهینه مربوط به توابع عضویت مختلف، یک شبکه به‌عنوان شبکه برتر انتخاب می‌گردد.

مدل ترکیبی

ابتدا با استفاده از یک ماتریس که داده‌های مربوط به ضریب دبی در سرریز منحنی شکل در آن ارائه شده است، داده‌های شبکه تعیین می‌شود. داده‌ها شامل داده‌های آموزشی و آزمون می‌باشند. با استفاده

- 1- Determination Coefficient
- 2- Root Mean Squared Error
- 3- Mean Absolute Error
- 4- Nash-Sutcliffe

نتایج و بحث

روند تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با پلان‌های مختلف برای بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی، سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی و منحنی شکل با زاویای رأس ۳۰ تا ۱۸۰ درجه و بر اساس مشخصات هندسی و هیدرولیکی ارائه شده در جدول ۱، با یکدیگر و با استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفتند (شکل‌های ۳ و ۴).

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، مشاهده می‌شود که در بارهای آبی کم ($H/w < 0.3$)، سرریز کنگره‌ای با پلان‌های مختلف عملکرد بهتری داشته و مقدار ضریب دبی در محدوده مناسبی تغییر می‌کند. اما با افزایش نسبت $H/w > 0.3$ ، ضریب دبی روند کاهشی را طی می‌کند. دلیل این امر افزایش تداخل تیغه‌های جریان در پایین دست تاج سرریز با افزایش بار آبی می‌باشد که موجب کاهش ضریب دبی می‌گردد. همچنین در بارهای آبی بالاتر، سرریز کنگره‌ای با پلان منحنی دارای بالاترین ضریب دبی است. همچنین مشاهده می‌شود، با کاهش زاویه رأس سرریز، طول سرریز بیش تر شده و دبی عبوری از روی سرریز افزایش می‌یابد (جدول ۴). به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت سرریز کنگره‌ای با پلان منحنی، ضریب دبی و ظرفیت دبی عبوری بیش تری در مقایسه با پلان مثلثی دارد. لذا، عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی نسبت به پلان مثلثی مناسب تر می‌باشد.

جدول ۳- تنظیم پارامترهای الگوریتم وال

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۱۰۰
حداکثر تعداد تکرار	۱۰۰۰
ضریب شکل ماریچ	۱

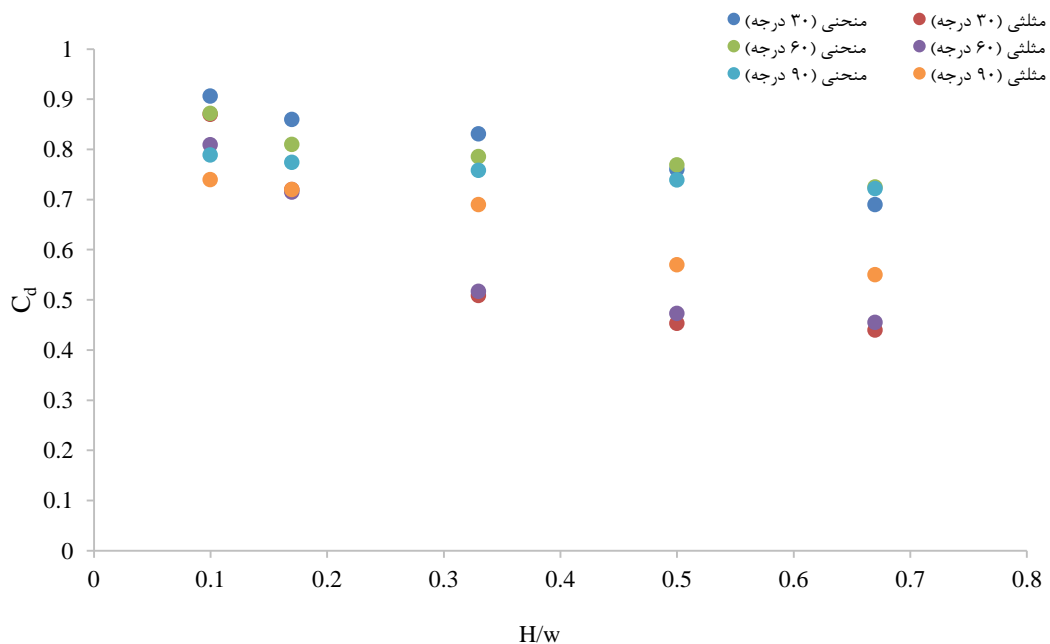
$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Y_i - \bar{Y})^2} \sum_{i=1}^n \sqrt{(X_i - \bar{X})^2}} \right]^2 \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2} \quad (13)$$

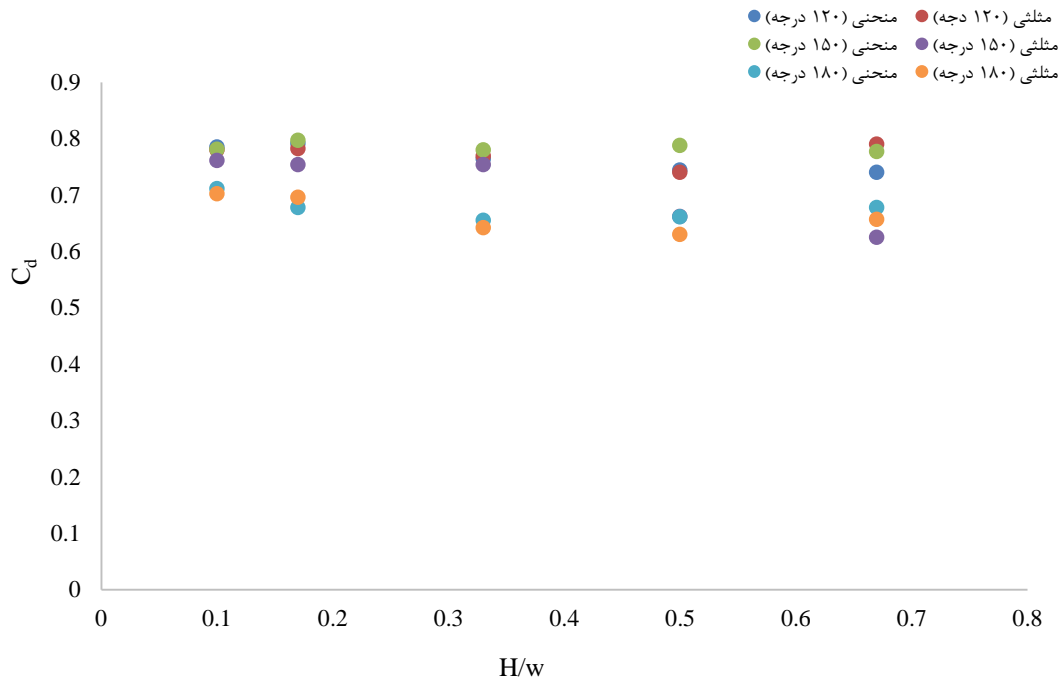
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (14)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (g_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{s})^2} \quad (15)$$

که X_i مقادیر پیش‌بینی شده، Y_i ها مقادیر مشاهده شده، \bar{X} میانگین X و \bar{Y} میانگین Y ها می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با دو پلان مثلثی و منحنی به‌ازای H/w های مختلف برای $30^\circ < \theta < 90^\circ$



شکل ۴- مقایسه تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با دو پلان مثلثی و منحنی به‌ازای $\frac{H}{w}$ های مختلف برای $180^\circ < \theta < 120^\circ$

از روی سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی نسبت به پلان مثلثی بوده و این امر نشان‌دهنده کارایی سرریز کنگره‌ای پلان منحنی می‌باشد.

مقادیر درصد افزایش دبی عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی و مثلثی در جدول ۴، مورد مقایسه قرار گرفته است. بیش‌ترین درصد افزایش دبی، مختص سرریز کنگره‌ای پلان منحنی با زاویه قوس ۴۵ درجه می‌باشد.

نتایج روش WOA-ANFIS در پیش‌بینی ضریب دبی

پس از مقایسه انجام شده و انتخاب بهینه‌ترین پلان سرریز، به پیش‌بینی ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای منحنی شکل با استفاده از روش WOA-ANFIS پرداخته شد (شکل‌های ۵ و ۶). در ابتدا، تمامی داده‌های موجود (۱۲۲ داده) استانداردسازی و پس از معرفی ساختارهای ورودی و یافتن مقادیر بهینه پارامترهای ANFIS و به‌کارگیری آن‌ها، از ۸۰ درصد داده‌ها (۹۸ داده)، برای آموزش و از ۲۰ درصد (۲۴ داده) برای تست مدل استفاده شد.

در جدول ۵، معیارهای ارزیابی ترکیبات مختلف ورودی برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منحنی شکل ارائه شده است.

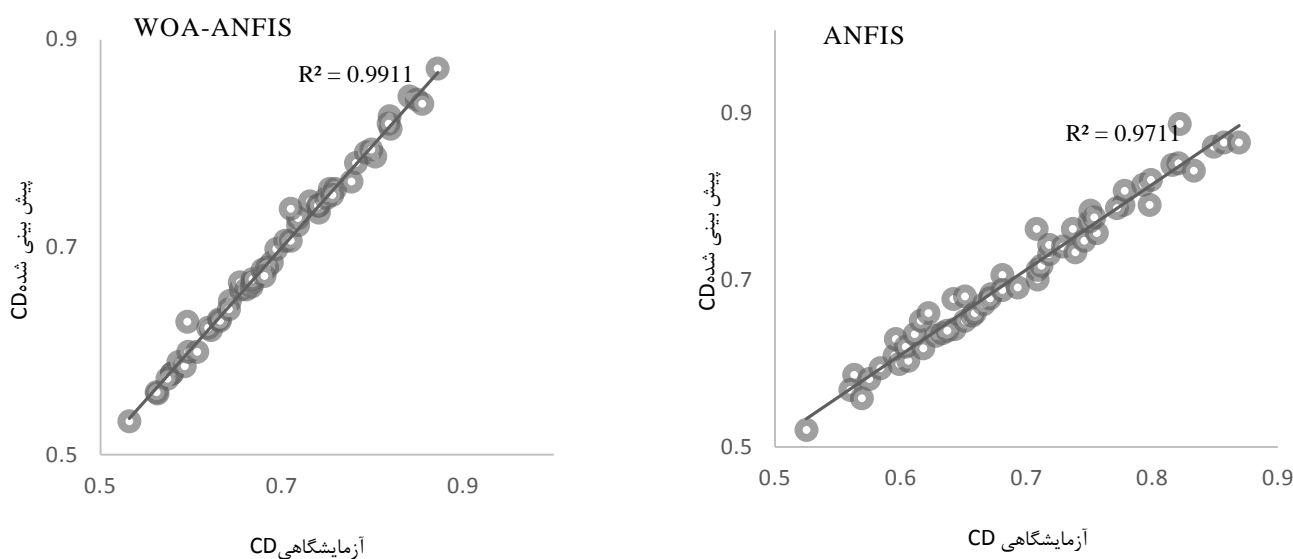
جدول ۴- درصد افزایش دبی جریان برای سرریز منقاری با

پلان مثلثی و منحنی شکل	
زاویه (°)	افزایش دبی (%)
۴۵	۲۵
۶۰	۲۰
۹۰	۱۹/۱
۱۲۰	۱۶/۶۷
۱۵۰	۱۵/۱۵

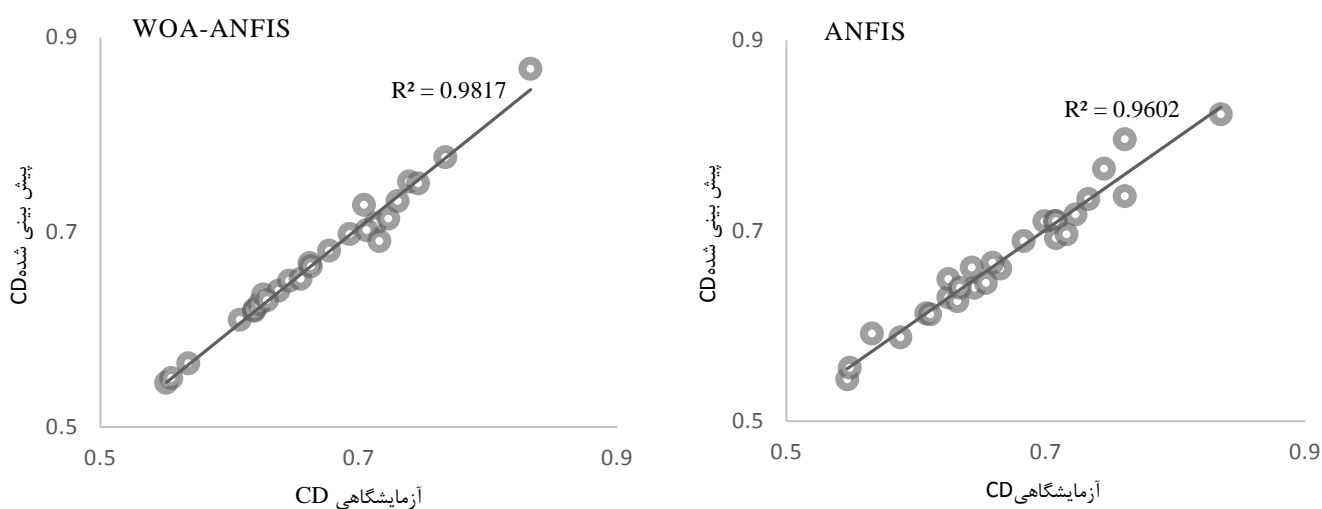
به‌طور کلی، نتایج حاصله بیانگر افزایش ۲۰٪ ظرفیت دبی عبوری

جدول ۵- ارزیابی ترکیبات ورودی

آزمون				آموزش				مدل
NSE	MAE	RMSE	R ²	NSE	MAE	RMSE	R ²	
۰/۹۷۶	۰/۰۱۰	۰/۰۲۱	۰/۹۸۱	۰/۹۹۰	۰/۰۰۹	۰/۰۱۵	۰/۹۹۱	M ₁
۰/۹۵۷	۰/۰۲۱	۰/۰۳۳	۰/۹۵۴	۰/۹۷۵	۰/۰۱۵	۰/۰۲۹	۰/۹۷۹	M ₂
۰/۹۴۳	۰/۰۲۴	۰/۰۳۷	۰/۹۴۲	۰/۹۵۸	۰/۰۱۹	۰/۰۳۲	۰/۹۶۰	M ₃
۰/۹۳۵	۰/۰۳۰	۰/۰۴۰	۰/۹۳۸	۰/۹۵۰	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	۰/۹۵۵	M ₄



شکل ۵- مقایسه تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با پلان منحنی در مرحله آموزش (مدل M_1)



شکل ۶- مقایسه تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با پلان منحنی در مرحله آزمون (مدل M_1)

می‌توان نتیجه گرفت که ثابت شدن ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای پلان منحنی در مقایسه با پلان مثلثی (در این نوع سرریزها، در محدوده‌ی $H/w > 0.35$ ، ضریب دبی روند ثابتی را طی می‌کند)، به ازای تغییرات H/w های مختلف، سریع‌تر اتفاق می‌افتد و C_d در این سرریزها در محدوده وسیعی از بهره‌برداری، مقدار ثابتی را دارا می‌باشد که بیانگر عملکرد مطلوب سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی است.

نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی و مقادیر آزمایشگاهی در جدول ۶، مورد مقایسه قرار گرفته است.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، مشخص می‌شود که ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با پلان منحنی با استفاده از روش WOA-ANFIS با دقت بالایی پیش‌بینی شده و انطباق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین مدل M_1 ، مقادیر ضریب دبی را برحسب پارامترهای ورودی H/w (نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز) و θ (زاویه قوس سرریز)، با خطای کمی مدل‌سازی می‌کند.

مقایسه‌های انجام شده نشان داد که در تمامی مدل‌های مورد بررسی، ضریب دبی در محدوده‌ی $H/w > 0.25$ ، به‌ازای تغییرات زاویای مختلف قوس سرریز، روند ثابتی را طی می‌کند. در حالت کلی

جدول ۶- مقایسه مقادیر C_d پیش‌بینی شده با استفاده از روش WOA-ANFIS با مقادیر آزمایشگاهی

C_d آزمایشگاهی		زاویه ($^\circ$)	C_d پیش‌بینی شده
۰/۵۴۷	۰/۵۴۴	۳۰	۰/۵۴۴
۰/۶۱۱	۰/۶۱۲	۳۰	۰/۶۱۲
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۳۰	۰/۶۴۵
۰/۷۰۸	۰/۷۱۰	۳۰	۰/۷۱۰
۰/۵۴۹	۰/۵۵۶	۶۰	۰/۵۵۶
۰/۶۳۲	۰/۶۲۶	۶۰	۰/۶۲۶
۰/۶۶۵	۰/۶۶۰	۶۰	۰/۶۶۰
۰/۷۰۸	۰/۶۹۲	۶۰	۰/۶۹۲
۰/۵۶۶	۰/۵۹۲	۹۰	۰/۵۹۲
۰/۶۴۵	۰/۶۴۰	۹۰	۰/۶۴۰
۰/۶۵۹	۰/۶۶۶	۹۰	۰/۶۶۶
۰/۷۱۶	۰/۶۹۶	۹۰	۰/۶۹۶
۰/۵۸۸	۰/۵۸۸	۱۲۰	۰/۵۸۸
۰/۶۲۵	۰/۶۴۹	۱۲۰	۰/۶۴۹
۰/۶۸۳	۰/۶۸۹	۱۲۰	۰/۶۸۹
۰/۷۲۳	۰/۷۱۷	۱۲۰	۰/۷۱۷
۰/۶۰۸	۰/۶۱۳	۱۵۰	۰/۶۱۳
۰/۶۳۴	۰/۶۴۰	۱۵۰	۰/۶۴۰
۰/۶۹۹	۰/۷۱۰	۱۵۰	۰/۷۱۰
۰/۷۳۳	۰/۷۳۳	۱۵۰	۰/۷۳۳
۰/۶۲۵	۰/۶۳۰	۱۸۰	۰/۶۳۰
۰/۶۴۳	۰/۶۶۱	۱۸۰	۰/۶۶۱
۰/۷۰۷	۰/۷۱۰	۱۸۰	۰/۷۱۰
۰/۷۴۵	۰/۷۶۵	۱۸۰	۰/۷۶۵

ارائه شده است. با استفاده از روش پیشنهادی جوابی مناسب برای مسئله با کمینه تابع هدف $6/02 \times 10^{-5}$ به دست آمد.

مقادیر میانگین و کمینه تابع هدف، انحراف معیار نرمال‌سازی شده و تعداد اجراهای با جواب شدنی در ۱۰ بار اجرای برنامه برای الگوریتم WOA، ضریب دبی و نوع و تعداد تابع عضویت در جدول ۷،

جدول ۷- مقادیر میانگین و حداقل تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای برنامه

تابع عضویت	مقادیر تابع هدف		تعداد اجرای شدنی	ضریب دبی بهینه	انحراف معیار نرمال‌سازی شده	الگوریتم	
	میانگین	حداقل				میانگین	حداقل
نوع تعداد	۶/۱۱×۱۰ ^{-۵}	۶/۰۲×۱۰ ^{-۵}	۱۰	۰/۷۸۶	۰/۰۰۰۴	۶/۱۱×۱۰ ^{-۵}	۶/۰۲×۱۰ ^{-۵}
				گوسی	۲		WOA

در جدول ۸، مقادیر ضریب دبی سرریز کنگره‌ای حاصل از پژوهش حاضر با گزینه‌های معادل با سرریز لبه تیز در شرایط جریان آزاد که با استفاده از تکنیک‌های مختلف محاسبات نرم به پیش‌بینی ضریب دبی این سازه‌ها پرداخته شده، مورد مقایسه قرار گرفته است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از اجرای روش WOA-ANFIS در برآورد ضریب دبی جریان سرریز کنگره‌ای پلان منحنی با کسب مقدار ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۸۱ بسیار بهینه بوده که این امر بیانگر کارایی و دقت بالای الگوریتم WOA-ANFIS می‌باشد.

جدول ۸- مقایسه ضریب دبی جریان سرریزهای کنگره‌ای با پلان‌های منحنی و لبه تیز

معیار کارایی		روش	پلان	نام محقق
R ²	RMSE			
۰/۹۷۳	۰/۰۱۶	ANFIS-DE	مثلثی	حیاتی و همکاران (۱۳۹۸)
۰/۹۶۵	۰/۰۳۵	ANFIS-FF	مثلثی	زاجی و همکاران (۲۰۱۶)
۰/۹۷۴	۰/۰۴۵	ANFIS	مثلثی	حق‌آبی و همکاران (۲۰۱۸)
۰/۹۳۰	۰/۰۲۱	GEP	مثلثی	بنکداری و همکاران (۲۰۲۰)
۰/۹۸۱	۰/۰۲۱	WOA-ANFIS	منحنی	پژوهش حاضر (۲۰۲۰)

خوشبین، ف.، ابته‌اج، ع.، بنکداری، ح. و لشته‌نشایی م.ا. ۱۳۹۳. ارزیابی مدل ریاضی جهت پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی با استفاده از شبکه عصبی GMDH و الگوریتم ژنتیک. سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. آبان ماه، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.

ظهیری، ع. ۱۳۹۴. استخراج رابطه ضریب دبی در سرریزهای قوسی به کمک روش برنامه‌ریزی ژنتیک. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۹(۲): ۳۳۳-۳۳۲.

حیاتی، ف.، یعقوبی، ب.، و ایزدبخش، م.ع. ۱۳۹۸. پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای مثلثی در پلان با استفاده از مدل ترکیبی مبتنی بر سیستم نرو فازی و الگوریتم تکامل تفاضلی. نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی. ۶(۲۲): ۸۵-۹۵.

کیا، ع.، عمادی، ع. ر.، و غلامی سفیدکوهی، م.ع. ۱۳۹۸. مدل‌سازی بارش-رواناب با سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR). نشریه مهندسی آب و آبیاری ایران. ۹(۴): ۳۹-۵۱.

Emami, S., Arvanaghi, H. and Parsa, J. 2018. Numerical investigation of geometric parameters effect of the labyrinth weir on the discharge coefficient. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering. 6(1): 1-9.

Hay, N. and Taylor, G. 1970. Performance and design of labyrinth weirs. Journal of Hydraulic Engineering. 96(11): 2337-2357.

Taylor, G. 1968. The performance of labyrinth weirs. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK.

Lux, F.L. and Hinchcliff, D. 2003. Design and construction of labyrinth spillways. International Congress on Large Dams. ICOLD Paris France, 4(15): 249-274.

Haghiabi, A.H., Parsaie, A. and Ememgholizadeh, S. 2017. Prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth weirs using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. Alexandria Engineering Journal. 57(3): 1773-1782.

Bonakdari, H. and Zaji, A.H. 2018. New type side weir

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر مطالعات انجام یافته، نشان‌دهنده دقت مناسب روش ترکیبی پیشنهادی در برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش ترکیبی WOA-ANFIS برای نخستین بار برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان منحنی معرفی شد. ابتدا، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با دو پلان مثلثی و منحنی بررسی شد. در این راستا، مقادیر ضریب دبی پیش‌بینی شده توسط روش پیشنهادی با ضریب دبی آزمایشگاهی مقایسه گردید که نتایج حاصله از تطابق مناسبی برخوردار بودند. برای تعیین مناسب‌ترین پارامترهای مؤثر در پیش‌بینی ضریب دبی، چهار مدل با ترکیبات ورودی مختلف انتخاب و مدل M₁ با ترکیب پارامترهای ورودی H/P و θ به عنوان مدل برتر معرفی گردید. علاوه بر این، نتایج نشان داد روش WOA-ANFIS در پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای پلان منحنی، به ترتیب با کسب مقادیر $R^2=0.981$ ، $RMSE=0.021$ ، $MAE=0.010$ و $NSE=0.976$ از کارایی مطلوبی برخوردار است. نتایج بیانگر آن است که روش WOA-ANFIS مقادیر تابع هدف را به مقدار بهتری کمینه می‌نماید. هم‌چنین مقدار ضریب دبی برای نسبت بار آبی ثابت در محدوده $0.7 < \frac{H}{w} < 0.9$ در سرریز کنگره‌ای با پلان منحنی از عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تری در مقایسه با سرریز کنگره‌ای با پلان مثلثی برخوردار است و ضریب دبی بیش‌تری نسبت به پلان مثلثی دارد.

منابع

نصراصفهانی، ا. بهینه‌سازی هوشمند ضریب آبگذری سرریز اوجی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور مرکز تهران شمال.
امامی، س. ۱۳۹۵. بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی سرریز منقاری بر ضریب دبی جریان. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

- Engineering ASCE. 121(3): 247-255.
- Mirjalili, S.A. and Lewis, A. 2016. The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*. 95: 51-67.
- Jang, J.S.R. 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst Manage Cybernet*. 23(3): 665-685.
- Kisi, O., Haktanir, T., Ardiclioglu, M., Ozturk, O., Yalcin, E. and Uludag, S. 2009. Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. *Advances in Engineering Software*. 40: 438-444.
- Ghorbani, M.A., Haghi, D.Z., Azani, A., Bonakdari, H. and Ebtehaj, I. 2017. Application of grey algorithm-based support vector machines for prediction of field capacity and permanent wilting point. *Soil Tillage Res*. 172: 32-38.
- Zaji, A.H., Bonakdari, H. and Khodashenas, S.R. Firefly optimization algorithm effect on support vector regression prediction improvement of a modified labyrinth side weir's discharge coefficient. *Applied Mathematics and Computation*. 24: 14-19.
- Haghiabi, A.H., Parsaie, A. and Shamsi, Z. 2019. Intelligent Mathematical Modeling of Discharge Coefficient of Nonlinear Weirs. 3(2): 149-156.
- discharge coefficient simulation using three novel hybrid adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Applied Water Science*. 8(1): 1-15.
- Ayaz, M.D. Mansoor, T. 2019. Discharge coefficient of oblique sharp crested weir for free and submerged flow using trained ANN model. *Water Science*. 32(2): 192-212.
- Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Gharabaghi, B. and Sharifi, A. 2020. Prediction of discharge capacity of labyrinth weir with Gene Expression Programming. doi: 10.20944/preprints202001.0313.v1.
- Shafiei, S., NajarchiM. and Shabanlou, S. 2020. A novel approach using CFD and neuro-fuzzy-firefly algorithm in predicting labyrinth weir discharge coefficient. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 42(1), 44.
- Kumar, S., Ahmad, Z., Mansoor, T. and Himanshu, S.K. 2012. Discharge Characteristics of Sharp Crested Weir of Curved Plan-form. *Research Journal of Engineering Sciences*. 1(4): 16-20.
- Rehbock, T. 1929. Discussion of Precise weir measurement. by E. W. Schoder and K. B. Turner, *Trans., ASCE*. 93: 1143-1162.
- Henderson, F.M. 1966. *Open Channel flow*. Macmillan Publishing, New York.
- Tullis, J.P., Nosratollah, A. and Waldron, D. 1995. Design of Labyrinth Spillways. *Journal of Hydraulic*

Estimation of Discharge Coefficient of Curved Plan-form Labyrinth Weirs Using a Hybrid WOA-ANFIS Method

S. Emami^{1*}, J. Parsa², H. Emami³

Received: Jun.14, 2020

Accepted: Jul.14, 2020

Abstract

The use of labyrinth weirs is one of the most effective and economical ways to increase weir efficiency by enhancing weir crown length, so that at a specified width and hydraulic height compared to other weirs, more discharge passes. In this study, the hybrid method of the Whale optimization algorithm and the fuzzy neural-inference system to estimate the optimal discharge coefficient of labyrinth weirs with the curved plan is introduced. In the proposed method, the efficiency and convergence of the Whale algorithm have been measured. The experimental data were used to validate the proposed method. The performance of the proposed method was evaluated with four statistics, including the correlation coefficient (R^2), the root means square error (RMSE), the mean absolute error (MAE) and the efficiency criterion (NSE). The results indicate a good match between the observed and estimated values. The results of the WOA-ANFIS method with (H/P) and (θ), showed that the discharge coefficient of labyrinth weirs with the curved plan ($C_d=0.786$) in compared to labyrinth weirs with a triangular plan ($C_d=0.682$), it increases by 10%. Also, statistical analyzes performed on the obtained results showed that the WOA-ANFIS method with high values of RMSE = 0.021, $R^2 = 0.981$, MAE = 0.010 and NSE = 0.976 has high efficiency in estimating the discharge coefficient of this type of weirs.

Keywords: Curve plan, Discharge coefficient, Labyrinth weir, Neural-fuzzy inference system, Whale algorithm

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, University of Tabriz

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz

3- Assistant Professor of Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab

(*- Corresponding Aurther Email: somayhemami70@gmail.com)