

مقاله علمی-پژوهشی

سرریز کنگره‌ای شبه کسینوسی و بررسی ضریب دبی آن با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-

پیش‌بینی

سمیه امامی^{۱*}، جواد پارسا^۲، حجت امامی^۳، اکرم عباس‌پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

چکیده

سرریزهای کنگره‌ای به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور دبی ماکزیمم محتمل با مشکل روبرو هستند، مطرح می‌شوند. در همین راستا، در پژوهش حاضر، سرریزی جدید با نام سرریز کنگره‌ای شبه کسینوسی معرفی شده است. ابتدا مدل‌هایی با عرض‌ها و ارتفاع‌های مختلف در نرم‌افزار FLUENT به‌عنوان یک آزمایشگاه مجازی ساخته شده، دبی و عمق جریان بالادست برای محاسبه‌ی ضریب دبی برداشت و در ادامه به پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه کسینوسی با استفاده از روش ترکیبی نوین بر مبنای الگوریتم آنتی‌کرونا-سیستم استنتاج عصبی-فازی (ACVO-ANFIS)، پرداخته شد. صحت‌سنجی روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. در ادامه به‌منظور شناسایی مدل برتر و تعیین پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه کسینوسی، ترکیب پارامترهای بی‌بعد مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. عملکرد روش پیشنهادی با پنج آماره، شامل ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین مطلق خطاهای پیش‌بینی ($MAPE$)، معیار کارایی (NSE) و جذر میانگین مربعات خطای نسبی ($RRMSE$)، ارزیابی شد. نتایج نشان داد در بارهای هیدرولیکی کم، ضریب دبی بیش‌ترین مقدار خود را دارا می‌باشد. با افزایش شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای، به دلیل افزایش طول مؤثر کنگره‌ها، ضریب دبی افزایش می‌شود. با افزایش ارتفاع سرریز، در یک $\frac{H}{W}$ ثابت، ضریب دبی افزایش یافت. نتایج مدل ACVO-ANFIS نشان داد متغیرهای ورودی نسبت شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای به ارتفاع سرریز $R^2=0.971$ ، $RMSE=0.009$ ، نسبت طول سرریز به ارتفاع آن (L/W) و نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز (H/W)، با مقادیر خطای $MAPE=0.006$ ، $RRMSE=0.010$ ، $NSE=0.977$ ، تأثیرگذارترین پارامترها در برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای شبه کسینوسی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم آنتی‌کرونا، سیستم استنتاج عصبی-فازی، پیش‌بینی، Fluent

مقدمه

محاسبه می‌گردد (امامی، ۱۳۹۵؛ اعظمی، ۱۳۹۴؛ ضمیری، ۱۳۹۶). در طی سالیان اخیر، سرریزها در شکل‌ها و مدل‌های مختلفی طراحی و ارائه شده‌اند. اصلاحات هندسی صورت گرفته در ساختار ابتدایی سرریز به دلیل از بین بردن مشکلات مختلفی که سرریزها با آن روبرو هستند، عبارت‌اند از (صالحی و اسماعیلی، ۱۳۹۸):

- از بین بردن خطر کاویتاسیون^۴،
- بالا بردن ضریب دبی^۵ برای کاهش هزینه‌ی اقتصادی ساخت سرریز،
- کاهش انباشت رسوبات^۶ در پشت سرریزها از طریق تغییر شکل سرریز،

سرریزها، سازه‌هایی هستند که به‌منظور اندازه‌گیری دبی جریان، در مسیر کانال‌های انتقال آب و رودخانه نصب و یا ساخته می‌شوند. در این سازه‌ها تنها با اندازه‌گیری عمق جریان بالادست، دبی عبوری

- ۱- دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۳- دانشیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران
- ۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: somayehemami70@gmail.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.2.5.4

4- Cavitation

5- Discharge Coefficient

6- Sediment accumulation

(تکرلی، ۱۳۹۴؛ Emami et al., 2018, Emiroglu et al., 2011) امامی و همکاران (۱۳۹۶) با بررسی عددی جریان و ضریب دبی جریان بر روی سرریز منقاری پلان‌های مثلثی و منحنی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT، نتیجه گرفتند که سرریزهای منقاری با پلان منحنی در مقایسه با سرریزهای منقاری با پلان مثلثی دارای ضریب دبی بیش‌تری بوده و از ظرفیت دبی عبوری بیش‌تری برخوردارند. شفیعی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از روش هوش مصنوعی نوین تحت عنوان ماشین آموزش نیرومند خارج از محدوده (ORELM)، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای را تخمین زدند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ORELM دارای عملکرد قابل قبولی برای شبیه‌سازی ضریب دبی است، اما دارای محدودیت‌هایی همچون ناتوانی در ارائه یک رابطه صریح می‌باشد. حق آبی و همکاران ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی را با استفاده از روش سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی پیش‌بینی و نتیجه گرفتند که هر دو مدل MLP و ANFIS از عملکرد مناسبی برخوردارند، ولی ساختار مدل ANFIS بهینه‌تر می‌باشد (Haghiabi et al., 2018). امامی و همکاران به شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای هندسی سرریز منقاری بر روی ضریب دبی جریان با استفاده از نرم‌افزار FLUENT پرداخته و نتایج را با دستاوردهای حاصل از سرریز مستطیلی هم‌عرض کانال مقایسه نمودند. نتایج نشان داد در سرریزهای منقاری مورد بررسی، ضریب دبی با افزایش $\frac{H}{P}$ (نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز) افزایش می‌یابد (Emami et al., 2018). بیلهان و همکاران توسط رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و ماشین آموزش نیرومند (ORELM) ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای را شبیه‌سازی کردند. نتایج حاصله نشان داد که یادگیری ماشین مقادیر ضریب دبی را با دقت بیش‌تری تخمین زد (Bilhan et al., 2019). صفررضوی‌زاده و همکاران به بررسی آزمایشگاهی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای و سینوسی پرداختند. در ادامه تأثیر نسبت بار آبی کل به ارتفاع سرریز (H_T/P)، نسبت طول سرریز (L/P)، نسبت شعاع قوس (R/P) و تعداد سیکل‌های سرریز (N) بر روی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای و سینوسی بررسی شد. مشاهدات نشان داد که ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای و سینوسی برخلاف سرریزهای خطی، در بارهای آبی کم ($H_T/P < 0.35$)، روند صعودی داشته و پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود، سیر نزولی می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد دبی عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای و سینوسی در مقایسه با سرریزهای خطی، ۳۰٪ افزایش یافت (Safarravizadeh et al., 2019). بنکداری و همکاران کارایی روش برنامه‌نویسی بیان ژن^۸ را جهت پیش‌بینی ضریب دبی

- بالا بردن دقت اندازه‌گیری،
 - ارائه راهکارهایی برای کاهش خطا در اندازه‌گیری دبی در حالت‌های آزاد و مستغرق^۱.
 تمامی موارد ذکرشده برای بهبود کارکرد سرریزها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. هنگامی که سرریز از حالت خط مستقیم عمود بر امتداد جریان خارج شود و حالت زیگزاگی به خود بگیرد، سرریز حاصل، سرریز غیرخطی یا کنگره‌ای نامیده می‌شود. مزیت اصلی در طرح کنگره‌ای سرریزها، افزایش ظرفیت انتقال جریان روی سرریز با تاج ثابت و به ازای ارتفاع معین سطح آب در بالادست سرریز می‌باشد (Emami et al., 2018, Emami et al., 2021). پارامترهای زیادی در تعیین ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان‌های مختلف مؤثر است که به عوامل متعددی از جمله بار آبی کل در بالادست (H_u) و پایین‌دست سرریز (H_d)، ارتفاع سرریز (P)، شعاع انحناء (R)، تعداد سیکل‌ها (N)، شکل تاج سرریز (CR)، مشخصات تیغه ریزشی^۲ (Na)، شرایط جریان نزدیک شونده^۳ (AF) و غیره بستگی دارد. برخی از پارامترهای ذکرشده ممکن است از دید پژوهشگران پنهان شده و یا آن‌که با پذیرش فرضیاتی ساده کننده از آن‌ها صرف‌نظر شده باشد. مطالعات آزمایشگاهی به دلیل محدودیت در زمان، هزینه و تجهیزات با چالش‌هایی روبه‌رو است. در سالیان اخیر، مدل‌های عددی جهت حل معادلات حاکم بر جریان سیال که در دسته دینامیک سیالات محاسباتی جای می‌گیرند (CFD)، گسترش چشم‌گیری یافته‌اند. در این مدل‌ها، معادلات حاکم بر جریان سیال در محدوده مسئله حل شده و پارامترهای موردنیاز را می‌توان شبیه‌سازی نمود. امروزه بهره‌مندی از روش‌های حل هوشمند به دلیل وجود خطای انسانی و استفاده از آزمون و خطا در روش‌های سنتی، به‌عنوان ابزاری مجزا یا مکمل در بسیاری از زمینه‌های هیدرولیک رایج شده است، مدل‌های بهینه‌سازی هوشمند از جمله الگوریتم‌های تکاملی، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴ و غیره، به‌طور گسترده به‌عنوان ابزارهای جستجو و بهینه‌یابی به کار گرفته شده‌اند (اژدری مقدم و همکاران، ۱۳۹۲؛ حیدری و همکاران، ۱۳۹۴؛ Bilhan et al., 2019; Emami et al., 2021). در بررسی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای تاکنون مطالعات متعددی توسط پژوهشگران انجام شده است. محققین با در نظر گرفتن برخی محدودیت‌های سازه‌ای نظیر ابعاد سازه، زاویه سرریز در جهت جریان و استفاده از روش‌های محاسباتی کلاسیک^۵ نظیر روش رگرسیون خطی^۶ و غیرخطی^۷، اقدام به تعیین ضریب دبی این سازه‌ها کرده‌اند

- 1- Submerged
- 2- Collision of nape
- 3- Approach flow
- 4- Artificial neural networks
- 5- Classical computational method
- 6- Linear
- 7- Non-Linear

$$C_d = f_1(B, L, HT, Hd, W, R, S, t, \alpha, N, g, \rho, \mu, \sigma, CS, JS, SW) \quad (2)$$

در این رابطه، f_1 نماد تابع، B عرض کانالی که سرریز در آن نصب می‌گردد، H_d ارتفاع هیدرولیکی کل جریان در پایین‌دست سرریز، W ارتفاع سرریز، R شعاع انحنا، S طول بخش مستقیم بین انحناهای سرریز، t ضخامت سرریز، α زاویه بخش مستقیم بین انحناهای سرریز با راستای کانال، N تعداد سیکل‌ها، ρ چگالی سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی، σ کشش سطحی، CS پارامتر معرف شکل تاج سرریز که می‌تواند به‌صورت لبه تیز، صاف، ربع دایره‌ای یا شعاع‌های کوچک تا بزرگ، نیم‌دایره‌ای و اوجی باشد، JS معرف شکل ریزش تیغه جریان در سرریزهای کنگره‌ای است که می‌تواند به‌صورت ریزش آزاد، ریزش تداخلی، هوادهی شده، هوادهی ناقص یا مستغرق باشد، SW شرایط جریان نزدیک شونده و تأثیر دیواره‌های جانبی می‌باشد. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه ۲ را می‌توان به‌صورت رابطه بدون بعد زیر نوشت:

$$C_d = f_2(Re, We, Fr, \frac{HT}{W}, \frac{H_d}{W}, \frac{L}{W}, \frac{B}{W}, \frac{R}{W}, \frac{S}{W}, \frac{t}{W}, \alpha, N, CS, JS, SW) \quad (3)$$

با توجه به مطالعات هندرسون^۳، چنانچه عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ باشد ($Re > 4000$)، می‌توان از اثر لزجت صرف‌نظر کرد (Henderson, 1966). در تحقیق حاضر نیز جریان در سرریز کانال متلاطم بوده و می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر نمود. همچنین نوک و همکاران^۴، 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 (Novak et al., 2010). با توجه به این که حداقل ارتفاع آب روی سرریز معادل ۵ سانتی‌متر در تحقیق حاضر منظور خواهد شد، لذا می‌توان از عدد وبر نیز صرف‌نظر نمود. با توجه به شرایط آزمایشگاهی در تحقیق حاضر، شکل لبه تمامی سرریزهای مورد استفاده به‌صورت لبه تیز انتخاب شده است؛ لذا، از تأثیر CS صرف‌نظر گردید. از آنجایی که سرریزها به‌صورت عمود بر جریان اصلی نصب خواهند شد و هیچ‌گونه تنگ‌شدگی موضعی در محل نصب آن‌ها ایجاد نخواهد شد، بنابراین شرایط جریان نزدیک شونده SW برای تمامی آزمایش‌ها یکسان بوده و با در نظر گرفتن شرایط ریزش آزاد جریان که منجر به صرف‌نظر از پارامتر بی‌بعد JS می‌شود و همچنین با صرف‌نظر از تأثیر عمق آب پایین‌دست سرریز (H_d/P)، رابطه ۳ به‌صورت معادله زیر ساده می‌گردد:

$$C_d = f_3(Fr, \frac{HT}{W}, \frac{L}{W}, \frac{B}{W}, \frac{R}{W}, \frac{S}{W}, \frac{t}{W}, \alpha, N) \quad (4)$$

رابطه بالا به‌عنوان یک رابطه پایه‌ای برای انجام آزمایش‌ها در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

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). شفیعی 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). امامی و همکاران با استفاده از روش الگوریتم بهبودیافته تکاملی تفاضلی خود تطبیق و رگرسیون بردار ماشین (ISaDE-SVR) به برآورد ضریب دبی سرریزهای با پلان W پرداخته و نتیجه گرفتند روش ISaDE-SVR با کسب مقادیر $MAPE=0.612$ ، $RMSE=0.006$ ، $R^2=0.982$ و $\delta=0.843$ کارایی بالایی در تخمین ضریب دبی این نوع سرریزها دارد (Emami et al., 2021).

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه سرریزها و در بین شکل‌های مختلف سرریزهای کنگره‌ای، تاکنون پژوهشی در زمینه سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی^۱ صورت نگرفته است. در همین راستا، در پژوهش حاضر سرریزی جدید به نام سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی معرفی و به بررسی خصوصیات جریان از جمله ارزیابی ضریب دبی و عملکرد این نوع سرریز پرداخته شد. در همین راستا، ابتدا به شبیه‌سازی جریان در سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی پرداخته و در ادامه تأثیر شکل سرریز بر میزان ضریب دبی سرریز کنگره‌ای بررسی شد. سپس با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، با به‌کارگیری مدل هوشمند الگوریتم آنتی‌کرونا (ACVO) و روش سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی^۲ (ANFIS)، به پیش‌بینی ضریب دبی در این نوع سازه پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

معادله یک‌بعدی جریان روی سرریزهای کنگره‌ای به روش تحلیل ریاضی به‌صورت معادله ۱ می‌باشد (محمدی و یاسی، ۱۳۸۶):

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} HT^{1.5} \quad (1)$$

که در آن Q دبی عبوری از سرریز، g شتاب ثقل، C_d ضریب دبی سرریز، L طول سرریز و H_T ارتفاع هیدرولیکی کل جریان در بالادست سرریز که برابر با $h + V^2/2g$ می‌باشد. ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای در شرایط جریان آزاد به تعدادی از پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بستگی دارد که آن‌ها را می‌توان به‌صورت رابطه تابعی زیر نوشت:

3- Henderson

4- Novak and Cabelka

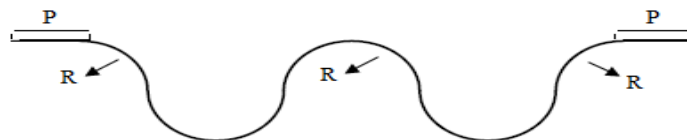
1- Cosine labyrinth weir

2- Adaptive neuro fuzzy inference system

مدل شبیه‌سازی

در پژوهش حاضر، ابتدا به شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از نرم‌افزار FLUENT با به‌کارگیری مدل آشفتگی k-ε و روش حجم سیال (VOF)، بر روی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی در یک

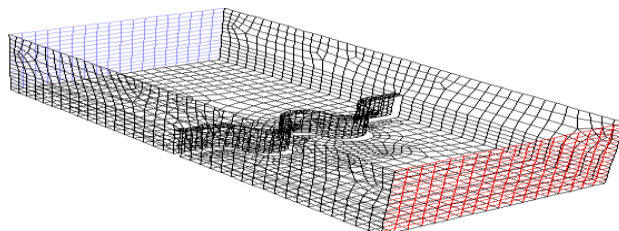
کانال با طول بالادست سرریز ۲ متر و طول کانال پایین‌دست سرریز ۱/۲ متر، عرض متغیر (۰/۴۹-۱/۱۱۵ متر) و ارتفاع ۰/۵ متر پرداخته شد (شکل ۱).



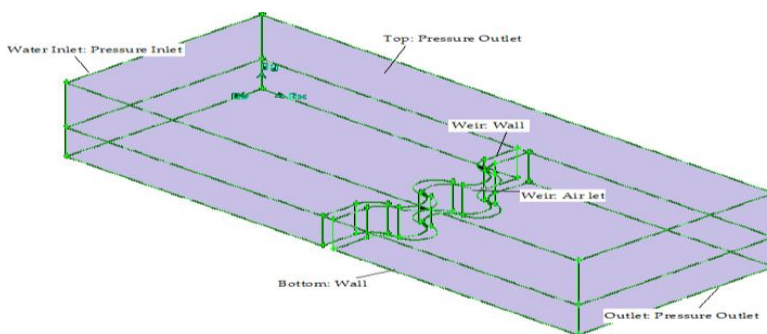
شکل ۱- نمایی از سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی مورد بررسی

در ادامه تأثیر شکل سرریز بر میزان ضریب دبی سرریز کنگره‌ای بررسی شد. به این منظور، ۴۰ مدل سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با شعاع‌ها و ارتفاع‌های مختلف در نرم‌افزار GAMBIT طراحی (شبکه‌بندی تمامی سرریزهای موردبررسی با استفاده از المان

QUAD-MAP) و سپس در نرم‌افزار FLUENT فراخوانی شد. در جدول ۱ و شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات هندسی سرریز شبه‌کسینوسی، شبکه‌بندی و شرایط مرزی اعمال شده نشان داده شده است.



شکل ۲- شبکه‌بندی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی طراحی شده در نرم‌افزار GAMBIT



شکل ۳- شرایط مرزی اعمال شده در مدل

جدول ۱- دامنه داده‌های آزمایشگاهی

تغییرات دبی (L/s)	تغییرات H/W	زاویه دیواره جانبی (α°)	طول کل سرریز L(cm)	طول بخش خطی P(cm)	تعداد سیکل‌ها (N)	ارتفاع سرریز W(cm)	قطر هر سیکل (cm)
۶۹-۱۲	۰/۵۰-۰/۱۵	۰	۲۲۵-۹۰	۱۵/۷۵	۳-۲	۲۰-۱۰	۱۰-۲/۵

دارای سه عملگر فاصله‌گذاری اجتماعی، قرنطینه و ایزوله کردن است. شکل ۴ فلوجارت الگوریتم آنتی‌کرونا را نشان می‌دهد. در ابتدا یک جمعیت اولیه ایجاد می‌شود:

الگوریتم آنتی‌کرونا (ACVO)

الگوریتم آنتی‌کرونا یک روش هوش جمعی است که از راهکارهای پیشگیری از کرونا الهام گرفته شده است (امامی، ۲۰۲۲). این الگوریتم

$$\alpha'_{ij} = e^{-\left(\frac{d'_{ij}}{\Delta}\right)} \quad (12)$$

Δ'_2 به صورت زیر تعریف شده است:

$$\Delta'_2 = \beta'_{ij} \times V \times (P^* - P'_i) \quad (13)$$

در رابطه بالا، β'_{ij} نرخ سرایت بیماری از فرد P^* به فرد P_i است. V اندازه گام حرکت است که میزان حرکت P_i به سمت P^* را کنترل می‌کند. مقدار متغیر V بر اساس توزیع لوی محاسبه می‌شود. P^* بهترین عضو جمعیت در تکرار t است.

در مرحله قرنطینه، افرادی که مشکوک به بیماری هستند به مدت q_d قرنطینه می‌شوند تا تمام جمعیت را مبتلا نکنند. در مرحله قرنطینه، الگوریتم به صورت تصادفی چند متغیر از فرد مشکوک را انتخاب می‌کند و سپس با استفاده از رابطه زیر هر متغیر انتخاب شده را بروز رسانی می‌کند.

$$p'_{ik}{}^{t+1} = p'_{ik}{}^t + U(-1, +1) \times rand \quad (14)$$

متغیر $rand$ یک عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ تولید می‌کند. بیانگر متغیر k ام در فرد P_i است.

در مرحله بستری، افرادی که به کرونا مبتلا شوند، از جمعیت جدا شده و تحت مداوا قرار می‌گیرند. در الگوریتم آنتی‌کرونا از روش پلاسما درمانی برای مداوای بیماران استفاده شده است. برای شبیه‌سازی این روش درمانی، الگوریتم ابتدا تعدادی عنصر از هر فرد را انتخاب و آن‌ها را با رابطه زیر بروز رسانی می‌کند.

$$p'_{ij}{}^{t+1} = \frac{1}{2} (p'_{ij}{}^t + (\gamma \times p_j^*)) \quad (15)$$

در این رابطه، p'_{ij} نشان‌دهنده عنصر j از فرد P_i در تکرار t است. p_j^* نشان‌دهنده عنصر j از بهترین فرد است. γ میزان تأثیر بهبود p_j^* بر روی متغیر p'_{ij} نشان می‌دهد. پس از طی دوره بستری، اگر وضعیت جسمانی فرد بهبود یابد، فرد مرخص شده و به جمعیت جاری اضافه می‌شود. الگوریتم مراحل فاصله‌گذاری اجتماعی، قرنطینه و بستری را به تعداد معین که توسط کاربر تعیین می‌شود، تکرار می‌کند تا در نهایت شرایط خاتمه ارضاء شوند (امامی، ۲۰۲۲).

سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS)

این مدل توسط جانگ در سال ۱۹۹۳ توسعه یافت. ساختار ظاهری مدل‌های عصبی-فازی تطبیقی هم‌چون مدل‌های شبکه عصبی می‌باشد (Jang., 1993). ساختار ANFIS پنج لایه دارد که شامل گره‌های ورودی، قاعده، متوسط، نتیجه و خروجی است (شکل ۵). 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.

$$P = [P_1, P_2, \dots, P_N] \quad (5)$$

هر جواب $P_i \in P$ در جمعیت یک فرد نامیده می‌شود که متناظر با یک جواب کاندید برای مسئله بهینه‌سازی است. هر فرد شامل دنباله‌ای از متغیرهایی با مقادیر اعشاری و یک متغیر پرچم s با مقدار صحیح بوده که نشان‌دهنده وضعیت سلامت فرد است.

$$P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}, s] \quad (6)$$

متغیر s به صورت زیر تعریف شده است:

$$s = \begin{cases} 1 & \text{if } P_i \text{ is healthy} \\ 0 & \text{if } P_i \text{ is in quarantine} \\ -1 & \text{if } P_i \text{ is in isolation} \end{cases} \quad (7)$$

هر کدام از متغیرهای p_{ij} به صورت زیر مقداردهی شده‌اند:

$$p_{ij} = (p_{\max j} - p_{\min j}) \times r + p_{\min j} \quad (8)$$

r یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ است، $p_{\min j}$ و $p_{\max j}$ ، به ترتیب کران پایین و بالای متغیر p_i است. پس از مقداردهی اعضای جمعیت، شایستگی هر فرد با تابع شایستگی ارزیابی می‌شود. در این الگوریتم، فرض شده است که افراد سالم دارای شایستگی بیش‌تری هستند. پس از تشکیل جمعیت اولیه، الگوریتم سعی می‌کند تا فاصله اجتماعی را در بین اعضای جمعیت فراهم کند. در هر مرحله به تعداد m نفر از اعضای جمعیت در فاصله‌گذاری اجتماعی شرکت می‌کنند تا تعاملات اجتماعی خود را کاهش دهند (رابطه ۹).

$$P_i{}^{t+1} = P_i{}^t + \Delta'_1 + \Delta'_2 \quad (9)$$

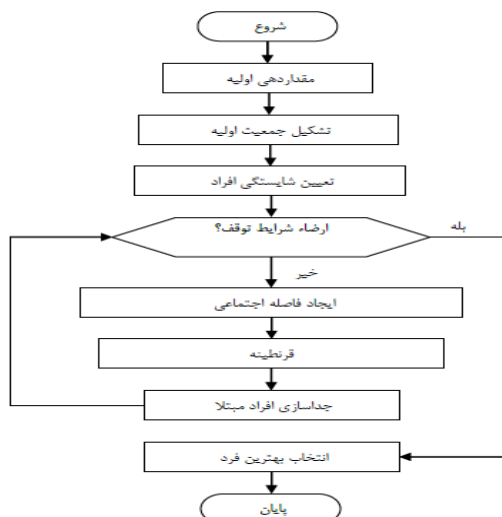
در رابطه بالا، t نشان‌دهنده تکرار فعلی الگوریتم، Δ_1 فاصله‌گذاری در مجاورت فرد P_i و سایر افراد را کنترل می‌کند. Δ_2 فاصله بین فرد P_i و بهترین فرد جمعیت P^* را کنترل می‌کند. هدف Δ_1 و Δ_2 هدایت فرد به منطقه ایمن است. Δ_1 به صورت زیر تعریف شده است:

$$\Delta'_1 = \alpha'_{ij} \times sd'_{ij} \times U(-1, 1) \quad (10)$$

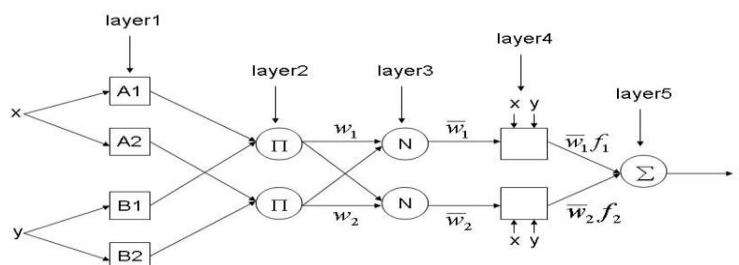
$U(-1, +1)$ یک عدد تصادفی یکنواخت است که مقدار $+1$ یا -1 را تولید می‌کند. sd'_{ij} حداقل فاصله فیزیکی بین P_i و هر فرد دیگر در جمعیت است که به صورت زیر تعریف شده است:

$$sd'_{ij} = \begin{cases} \Delta - d'_{ij} & \text{if } (d'_{ij} < \Delta) \\ d'_{ij} & \text{if } (d'_{ij} \geq \Delta) \end{cases} \quad \text{where } d'_{ij} = \|P_i - P_j\| \quad (11)$$

d'_{ij} فاصله فعلی بین P_i و P_j را نشان می‌دهد. Δ فاصله فیزیکی ایمن بین افراد در تکرار t است. مقدار Δ بر اساس پروتکل‌های کاهش کرونا تعیین می‌شود. α'_{ij} نرخ سرایت از فرد P_j به فرد P_i را نشان می‌دهد که به صورت زیر تعریف شده است:



شکل ۴- فلوچارت الگوریتم آنتی کرونا



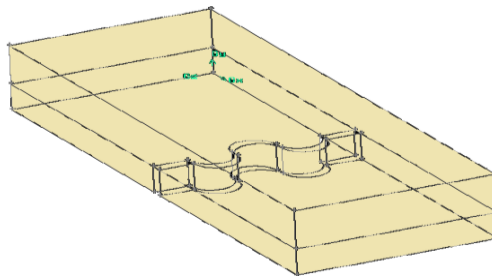
شکل ۵- نمایی از لایه‌های موجود در ساختار مدل ANFIS (نبی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰)

جریان در آن ارائه شده است، داده‌های شبکه تعیین می‌شود. با استفاده از داده‌های مرتب‌شده، آموزش ANFIS شروع می‌شود. روند آموزش زمانی متوقف می‌شود که معیارهای تعیین‌شده 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. در پژوهش حاضر از الگوریتم بهینه‌سازی آنتی کرونا (ACVO) برای تعیین پارامترهای وابسته به توابع عضویت در سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. در ادامه یک بردار که دارای N بعد مختلف (N تعداد توابع عضویت)، می‌باشد، تعریف می‌شود. این بردار شامل پارامترهای تابع عضویت است که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رشد درخت مقدار آن‌ها بهینه می‌شود. مقدار تابع هدف تعریف شده به صورت تابع میانگین مربعات خطا می‌باشد. هم‌چنین، جستجو جهت یافتن جواب‌های بهتر و به‌روزرسانی بهترین جواب، انجام می‌شود و عملگرهای مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی آنتی کرونا شامل فاصله‌گذاری اجتماعی، قرنطینه و ایزوله کردن، 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.

در مرحله آموزش با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند (کیاء و همکاران، ۱۳۹۸؛ Kisi et al., 2009). از آنجایی که در این سیستم از مدل فازی سوگنو^۱ 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. 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 ACVO-ANFIS

ابتدا با استفاده از یک ماتریس که داده‌های مربوط به ضریب دبی



شکل ۶- سرریز کنگره‌ای سینوسی طراحی شده

شبه‌کسینوسی، برای صحت‌سنجی کارایی و عملکرد نرم‌افزار FLUENT، سرریز کنگره‌ای سینوسی با ارتفاع ۰/۲ متر در کانالی به ترتیب با طول، عرض و ارتفاع، ۲/۴ متر، ۰/۵۰ متر و ۰/۹۲ متر، طراحی و به ازای بارهای آبی مختلف مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶).

در جدول ۲ و شکل ۷، مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده و درصد خطای نسبی (رابطه ۲۱) نتایج حاصل برای سرریز کنگره‌ای سینوسی در شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای ثابت ۱ سانتی‌متر مورد مقایسه گرفته است.

$$E(\%) = \frac{C_{d,Exp} - C_{d,Num}}{C_{d,Exp}} \quad (21)$$

که در این رابطه $C_{d,Exp}$ مقادیر ضریب دبی مقادیر آزمایشگاهی و $C_{d,Num}$ مقادیر ضریب دبی شبیه‌سازی شده می‌باشد.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ و شکل ۷، می‌توان بیان کرد که درصد خطای نسبی برای ضریب دبی بین ۰ تا ۱۰ درصد می‌باشد. مقادیر ضریب دبی شبیه‌سازی شده دارای تطابق خوبی با مقادیر متناظر آزمایشگاهی می‌باشد که این مسئله بیانگر کارایی و قابلیت مناسب نرم‌افزار FLUENT می‌باشد.

پس از اطمینان از عملکرد صحیح نرم‌افزار FLUENT، سرریزهای کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با شعاع‌های انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای و ارتفاع‌های مختلف شبیه‌سازی شدند (شکل ۸).

بردارهای سرعت

در شکل‌های ۹، بردارهای سرعت بر روی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با آرایش نرمال جهت نشان دادن الگوی جریان عبوری از روی سرریز نشان داده شده است. رنگ زرد فاز هوا و رنگ‌های آبی و قرمز فاز آب را نشان می‌دهند. به دلیل جدایی خطوط جریان در محل تاج سرریز، ابتدا بردارهای سرعت به صورت غیریکنواخت می‌باشند، ولی با فاصله گرفتن از تاج سرریز از مقدار تلاطم کاسته شده و بردارهای سرعت یکنواخت‌تر، موازی‌تر و تأثیر جریان‌های چرخشی از بین می‌رود. در پژوهشی مشابه امامی (۱۳۹۵)، گزارش کرد که در سرریزهای کنگره‌ای با زاویه‌دار شدن سرریز و افزایش طول سرریز،

ارزیابی کارایی مدل‌های پیشنهادی

عملکرد روش پیشنهادی با چهار آماره، شامل ضریب تبیین^۱ (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا^۲ ($RMSE$)، میانگین مطلق خطاهای پیش‌بینی^۳ ($MAPE$)، معیار کارایی^۴ (NSE) و جذر میانگین مربعات خطای نسبی^۵ ($RRMSE$)، ارزیابی شد (روابط ۱۶ تا ۲۰):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Y_i - \bar{Y})^2} \sum_{i=1}^n \sqrt{(X_i - \bar{X})^2}} \right]^2 \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2} \quad (17)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - X_i|}{Y_i} \quad (18)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{X})^2} \quad (19)$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\sum_{i=1}^n Y_i} \quad (20)$$

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

نتایج و بحث

صحت‌سنجی نرم‌افزار FLUENT

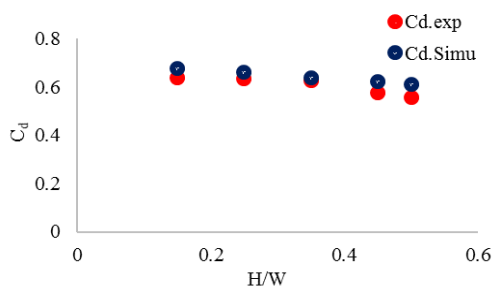
قبل از شروع بررسی مشخصات جریان بر روی سرریز کنگره‌ای

- 1- Determination Coefficient
- 2- Root Mean Squared Error
- 3- Mean Absolute Percentage Error
- 4- Nash-Sutcliffe
- 5- Relative Root Mean Square Error

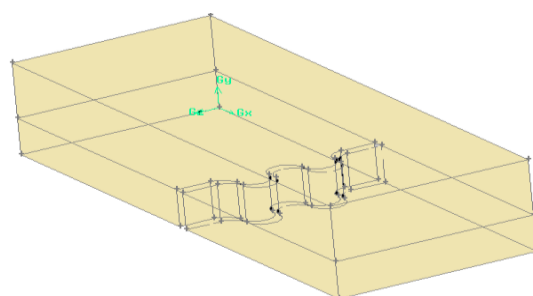
جریان پس از گذر از روی سرریز، به صورت چرخشی ادامه مسیر می‌دهد، در حالی که در سرریزهای استاندارد (مستقیم)، جریان پس از عبور از روی سرریز با کم‌ترین تغییر در مسیر خود به حرکت ادامه می‌دهد.

جدول ۲- متوسط خطای نسبی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای سینوسی در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده

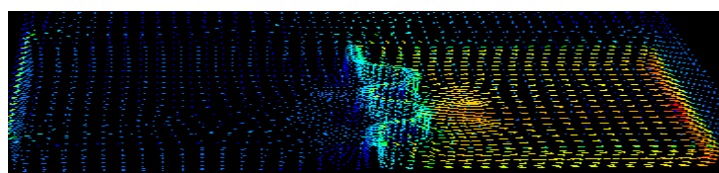
خطای نسبی (%)	$Cd.Num$	$Cd.Exp$	بار آبی (cm)	شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای (cm)
۵/۹۵	۰/۶۷۶	۰/۶۳۸	۳	۱۰
۴/۴۱	۰/۶۶۲	۰/۶۳۴	۵	۱۰
۱/۴۳	۰/۶۳۷	۰/۶۲۸	۷	۱۰
۸/۱۰	۰/۶۲۳	۰/۵۷۶	۹	۱۰
۹/۵۳	۰/۶۰۹	۰/۵۵۶	۱۰	۱۰



شکل ۷- مقایسه مقادیر ضریب دبی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای سینوسی



شکل ۸- سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی طراحی شده

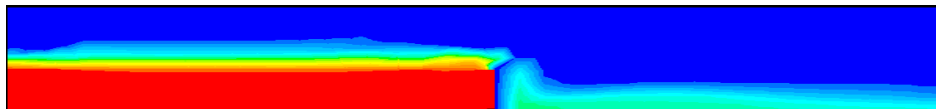


شکل ۹- بردارهای سرعت بر روی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با آرایش نرمال

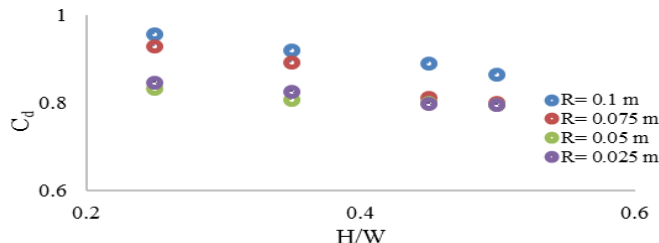
پروفیل سطح آب

در شکل ۱۰، پروفیل سطح آب در سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با آرایش نرمال برای جریان در کانال ارائه شده است. با بررسی پروفیل سطح آب در سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی مشاهده می‌شود که در این سرریزها جریان پس از سرریز در جهت عرض کانال حرکت کرده و با برخورد به دیواره کانال مجدداً به مسیر خود ادامه

می‌دهد. در مطالعات مشابهی امامی (۱۳۹۶) و جامی‌فر و همکاران (۱۳۹۴)، نتیجه گرفتند که مقدار بار هیدرولیکی در سرریزهای کنگره‌ای منحنی شکل در مقایسه با سرریزهای استاندارد کم‌ترین مقدار را دارد که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد (این شرایط در تمامی دبی‌ها صادق است).



شکل ۱۰- پروفیل سطح آب بر روی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی



شکل ۱۱- روند تغییرات ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی به ازای شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای و $\frac{H}{W}$ های مختلف در ارتفاع ثابت

عبوری از روی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی به‌خصوص در منطقه رأس افزایش می‌یابد. با افزایش تداخل لایه‌های جریان، بخش نزولی شروع شده و با افزایش $\frac{H}{W}$ ضریب دبی شروع به کاهش می‌نماید. بخش نزولی، ابتدا دارای شیب تند بوده ولی با افزایش $\frac{H}{W}$ از شیب نمودار کاسته می‌شود، به‌طوری‌که مقدار ضریب دبی با توجه به ارتفاع سرریز در یک $\frac{H}{W}$ مشخص، به مقدار ثابتی می‌رسد. به‌طورکلی با افزایش ارتفاع سرریز، در یک $\frac{H}{W}$ ثابت، ضریب دبی افزایش می‌یابد، ولی این افزایش ضریب دبی در بخش نزولی منحنی یعنی جایی که تداخل تیغه‌های ریزشی وجود دارد، بیش‌تر از بخش صعودی منحنی یعنی جایی که تداخل تیغه‌های ریزشی وجود ندارد، می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر با کاهش ارتفاع سرریز به دلیل تداخل سریع‌تر تیغه‌های ریزشی، دامنه تغییرات ضریب دبی کم شده و تعادل سریع‌تر اتفاق می‌افتد. امامی و همکاران نیز با بررسی تأثیر ارتفاع سرریز منقاری کنگره‌ای بر روی ضریب دبی نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع سرریز برای یک نسبت ثابت $\frac{H}{W}$ در جایی که تداخل تیغه‌های ریزشی چندان قابل نباشد، ضریب دبی افزایش می‌یابد (Emami et al. 2018).

نتایج مدل‌سازی

در این بخش، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با استفاده از مدل ترکیبی ACVO-ANFIS برآورد شد. در ابتدا تمامی داده‌های موجود نرمال‌سازی شدند تا داده‌های پرت حذف و یا اصلاح شوند. پس از معرفی ساختارهای ورودی مناسب، پارامترهای مدل ANFIS بهینه شدند. به این منظور اندازه جمعیت ۲۵، تعداد نسل‌ها ۴۰ و تعداد تکرار الگوریتم ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. جهت تخمین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی، متغیرهای بدون بعد نسبت شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای به ارتفاع سرریز (R/W)، نسبت طول سرریز به ارتفاع آن (L/W)، نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز

تأثیر اندازه شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی بر ضریب دبی

در شکل ۱۱، تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی به ازای شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای مختلف در ارتفاع ثابت ۲۰ سانتی‌متر نشان داده شده است.

همان‌گونه که از شکل ۱۱ مشخص است در سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی، به ازای افزایش نسبت $\frac{H}{W}$ (نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز)، ضریب دبی جریان رفته‌رفته روندی کاهشی را طی می‌کند تا این‌که به مقدار ثابتی میل می‌نماید. در بارهای هیدرولیکی کم، ضریب دبی بیش‌ترین مقدار خود را دارا می‌باشد. با افزایش شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای، طول مؤثر کنگره‌ها در عرض ثابت افزایش می‌یابد و این امر سبب افزایش ضریب دبی می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد افزایش شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای، موجب کاهش جریان‌های گردابه‌ای، آشفتگی در جریان، افزایش ناگهانی ارتفاع آب در طول سرریز و افت اولیه ارتفاع آب در دهانه سرریز می‌گردد (زاهدی، ۱۳۹۱، زاد قربان و همکاران، ۱۳۹۷). هم‌چنین نتایج بررسی‌های فیلی و همکاران (۱۳۹۹)، نشان داد که با افزایش نسبت شعاع قوس (R/w)، ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی افزایش یافت که با نتایج پژوهش حاضر در تطابق است.

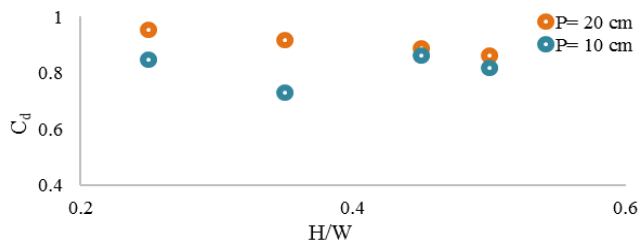
تأثیر ارتفاع سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی بر ضریب دبی

به‌منظور بررسی تأثیر ارتفاع سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی بر ضریب دبی، دو ارتفاع سرریز ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۲). نمودار روند تغییرات ضریب دبی به ازای $\frac{H}{W}$ در ارتفاع‌های مختلف دارای دو محدوده قابل تفکیک شامل بخش‌های صعودی و نزولی است. در بخش صعودی، به ازای تغییرات $\frac{H}{W}$ مقدار ضریب دبی به دلیل تداخل کم تیغه‌های ریزشی افزایش می‌یابد. به‌مرور، با افزایش ارتفاع آب روی سرریز، تداخل تیغه‌های ریزشی

کنگره‌ای شبه کسینوسی مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳ و شکل ۱۳).

در جدول ۴، معیارهای ارزیابی برای متغیرهای ورودی مختلف برای تخمین ضریب دبی ارائه شده است.

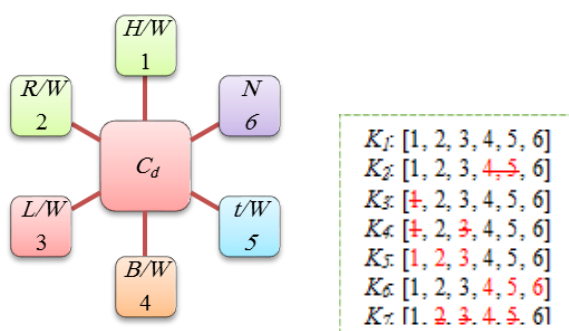
(H/W) ، نسبت عرض کانال به ارتفاع سرریز (B/W) ، نسبت ضخامت سرریز به ارتفاع آن (t/W) و تعداد سیکل‌ها (N) ، به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. هفت مدل با متغیرهای مختلف برای معرفی مؤثرترین پارامترهای ورودی در برآورد ضریب دبی سرریزهای



شکل ۱۲- نحوه تغییرات ضریب دبی نسبت به $\frac{H}{W}$ برای ارتفاع‌های مختلف

جدول ۳- ترکیبات ورودی مورد بررسی

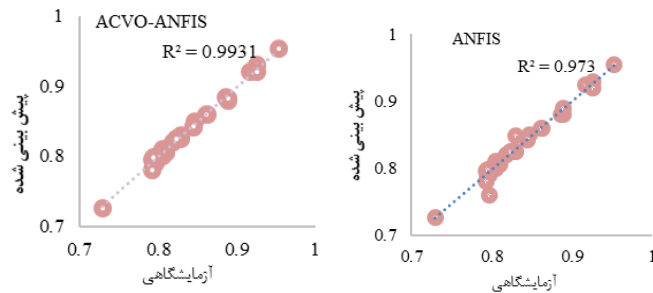
ترکیب ورودی	مدل
$H/W, L/W, R/W, B/W, t/W, N$	K_1
$H/W, L/W, R/W, N$	K_2
$L/W, R/W, B/W, t/W, N$	K_3
$R/W, B/W, t/W, N$	K_4
$B/W, t/W, N$	K_5
$H/W, R/W, L/W$	K_6
$H/W, N$	K_7



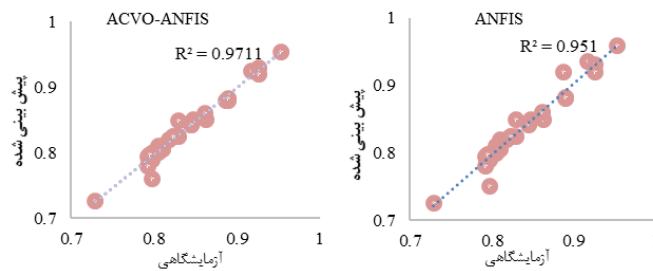
شکل ۱۳- نحوه ترکیب متغیرهای ورودی

جدول ۴- ارزیابی ترکیبات ورودی

توابع عضویت	تعداد	آزمون					آموزش					مدل
		NSE	RRMSE	MAPE	RMSE	R^2	NSE	RRMSE	MAPE	RMSE	R^2	
Gbell	۲	-/۰۹۴۶	-/۰۳۰	-/۰۲۵	-/۰۲۹	-/۰۹۴۴	-/۰۹۶۷	-/۰۲۵	-/۰۲۱	-/۰۲۴	-/۰۹۶۵	K_1
Gaussian	۱	-/۰۹۶۰	-/۰۱۶	-/۰۱۲	-/۰۱۵	-/۰۹۵۶	-/۰۹۸۰	-/۰۱۲	-/۰۰۹	-/۰۱۱	-/۰۹۷۸	K_2
Triangular	۲	-/۰۹۳۰	-/۰۴۶	-/۰۳۲	-/۰۴۵	-/۰۹۳۹	-/۰۹۵۰	-/۰۴۳	-/۰۲۸	-/۰۴۲	-/۰۹۴۸	K_3
Triangular	۱	-/۰۸۲۵	-/۰۸۳	-/۰۶۱	-/۰۸۲	-/۰۸۲۲	-/۰۸۳۳	-/۰۸۰	-/۰۵۹	-/۰۷۸	-/۰۸۳۰	K_4
Triangular	۱	-/۰۷۷۰	-/۰۱۰	-/۰۷۶	-/۰۹۸	-/۰۷۵۵	-/۰۸۰۴	-/۰۹۲	-/۰۷۳	-/۰۹۱	-/۰۷۹۴	K_5
Gaussian	۲	-/۰۹۷۷	-/۰۱۰	-/۰۰۶	-/۰۰۹	-/۰۹۷۱	-/۰۹۹۹	-/۰۰۷	-/۰۰۴	-/۰۰۶	-/۰۹۹۳	K_6
Gaussian	۱	-/۰۹۳۷	-/۰۴۰	-/۰۲۹	-/۰۴۱	-/۰۹۳۶	-/۰۹۵۸	-/۰۳۵	-/۰۲۴	-/۰۳۴	-/۰۹۵۶	K_7



شکل ۱۴- تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی در مرحله آموزش (مدل برتر K_6)



شکل ۱۵- تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی در مرحله آزمون (مدل برتر K_6)

نتایج نشان‌دهنده دقت روش پیشنهادی ACVO-ANFIS در برآورد ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با ضریب همبستگی بالا ($R^2=0.993$ و $R^2=0.971$) به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون، بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).
بر طبق نتایج، مدل K_6 با احتساب متغیرهای ورودی نسبت شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای به ارتفاع سرریز (R/W)، نسبت طول سرریز به ارتفاع آن (L/W) و نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز (H/W)، مدل برتر با مقادیر معیارهای خطای ($R^2=0.971$ ، $RMSE=00.9$)

نتایج نشان‌دهنده دقت روش پیشنهادی ACVO-ANFIS در برآورد ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با ضریب همبستگی بالا ($R^2=0.993$ و $R^2=0.971$) به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون، بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).
بر طبق نتایج، مدل K_6 با احتساب متغیرهای ورودی نسبت شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای به ارتفاع سرریز (R/W)، نسبت طول سرریز به ارتفاع آن (L/W) و نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز (H/W)، مدل برتر با مقادیر معیارهای خطای ($R^2=0.971$ ، $RMSE=00.9$)

جدول ۵- مقایسه ضریب دبی انواع سرریزهای کنگره‌ای با پلان‌های مختلف

نام محقق	سال	نوع سرریز	شرایط جریان	مقدار C_d
لاکس و هینچلیف	۱۹۸۵	سرریز کنگره‌ای با پلان مثلثی	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.7$	۰/۵۵ - ۰/۷۵
قدسیان و شنوایی	۲۰۰۱	سرریز کنگره‌ای مثلثی با شکل تاج ربع دایره	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.7$	۰/۵۲ - ۰/۶۵
محمدی و یاسی	۲۰۰۷	سرریز زیگزاگی با پلان قوسی	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.67$	۰/۵۲ - ۰/۷۱
کومار و همکاران	۲۰۱۲	سرریز لبه تیز با پلان منحنی	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.67$	۰/۵۸ - ۰/۸۸
گوپتا و همکاران	۲۰۱۵	سرریز مستطیلی هم‌عرض کانال (استاندارد)	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.67$	۰/۶۹ - ۰/۹۷
امامی و همکاران	۲۰۱۸	سرریز کنگره‌ای متقاری	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.67$	۰/۳۵ - ۰/۷۰
صفر رضوی‌زاده و همکاران	۲۰۱۹	سرریز کنگره‌ای سینوسی	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.67$	۰/۵۸ - ۰/۶۸
پژوهش حاضر	۲۰۲۲	سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.67$	۰/۶۴ - ۰/۹۲

مقایسه با دیگر پژوهش‌های انجام‌شده پیشین

با توجه به این که تاکنون پژوهشی در مورد سرریزهای کنگره‌ای شبه‌کسینوسی انجام نشده است، لذا، در این بخش کارایی هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی با گزینه‌های معادل پلان‌های قوسی، مثلثی، منحنی و سینوسی تحت جریان آزاد مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۵). نتایج بیانگر کارایی بالای سرریزهای کنگره‌ای کسینوسی در مقایسه با دیگر سرریزها می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سرریز جدیدی به نام سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی معرفی شد. در ادامه، برای بررسی عملکرد سرریز پیشنهادی، خصوصیات جریان بر روی آن با استفاده از نرم‌افزار FLUENT شبیه‌سازی و سپس با استفاده روش نوین الگوریتم آنتی کرونا و مدل استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ACVO-ANFIS)، به برآورد ضریب دبی در این نوع سرریز پرداخته شد. تطابق مناسبی بین مقادیر شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و مقادیر آزمایشگاهی مشاهده شد. نتایج نشان داد که به ازای تغییرات کم نسبت $\frac{H}{W}$ مقدار ضریب دبی به دلیل تداخل کم تیغه‌های ریزشی افزایش می‌یابد. به‌مرور، با افزایش ارتفاع آب روی سرریز، تداخل تیغه‌های ریزشی عبوری از روی سرریز کنگره‌ای شبه‌کسینوسی به-خصوص در منطقه رأس افزایش یافته و ضریب دبی روند کاهش را طی می‌کند. در یک نسبت $\frac{H}{W}$ ثابت، با افزایش شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای، ضریب دبی افزایش می‌یابد. نتایج مدل‌سازی نشان داد روش ترکیبی ACVO-ANFIS با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی نسبت شعاع انحناء قطاع نیم‌دایره‌ای به ارتفاع سرریز (R/W)، نسبت طول سرریز به ارتفاع آن (L/W) و نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز (H/W)، با کسب مقادیر $R^2=0.971$, $RMSE=0.009$, $MAPE=0.006$, $RRMSE=0.010$, $NSE=0.977$ در تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای شبه‌کسینوسی بسیار موفق عمل نموده است.

منابع

اژدری مقدم، م. و جعفری ندوشن، ا. ۱۳۹۲. طراحی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای با استفاده از هیدرودینامیک محاسباتی. مجله علمی پژوهشی عمران مدرس. ۱۳(۲): ۱-۱۲.

اعظمی، س. ۱۳۹۴. طراحی هیدرولیکی سرریز نیلوفری با استفاده از نرم‌افزار Flow-3d. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

امامی، س. ۱۳۹۵. بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی سرریز منقاری بر ضریب دبی جریان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

امامی، س.، ارونقی، ه. و پارسا، ج. ۱۳۹۶. پیش‌بینی تراوش از بدنه سد خاکی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی سد شهید کاظمی بوکان). نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی. ۱۴(۴): ۲۴-۳۴.

امامی، س.، پارسا، ج. و امامی، ج. ۱۳۹۹. برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای پلان منحنی با روش ترکیبی WOA-ANFIS. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۵): ۱۶۶۴-۱۶۷۶.

تکرلی، ف. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی ضریب دبی سرریز چند شکافه با استفاده از الگوریتم ژنتیک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

جامی‌فر، ف.، تکاوندی، ع. ر.، فغفورمغربی، م. و بینا، ک. ۱۳۹۶. بررسی پروفیل سطح آب در سرریزهای کنگره‌ای. دوازدهمین سمپوزیوم پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی کمیسیون چهارم: سرزمین پایدار یافته‌های نوین در مهندسی عمران و محیط‌زیست، مشهد.

حیدری، م.، دوستی، م. و صفری، ح. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی ضریب جریان سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای با استفاده از الگوریتم هوشمند تبرید تدریجی. دهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

زادقربان، م.، مسعودیان، م.، اسمعیلی ورکی، م. و قره‌گزلو، م. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر زبری سرریز استوانه‌ای روی خصوصیات جریان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۲(۴۰): ۶۹-۸۰.

زاهدی، ح. ۱۳۹۱. مطالعه تأثیر تغییر هندسه سرریز و افزایش تعداد سیکل بر ضریب تخلیه سرریزهای جانبی منقاره‌ای و نیم‌دایره‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی.

شفیعی، ش. ا.، نجارچی، م. و شعبانلو، س. ۱۳۹۹. تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای توسط مدل‌های نوین هوش مصنوعی. مجله علمی-پژوهشی مهندسی عمران مدرس. ۲۰(۱): ۱۶۱-۱۷۱.

صالحی، س. و اسماعیلی، ک. ۱۳۹۸. تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مؤثر در عملکرد سرریز نیم سیکل کسینوسی نسبت به سرریز مستطیلی. مهندسی عمران شریف. ۱۲(۱): ۳-۱۲.

ضمیری، ا. ۱۳۹۶. تلفیق مدل عددی و الگوریتم هوشمند به‌منظور پیش‌بینی ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای. پایان‌نامه کارشناسی

- https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-307750/v1.
- Emiroglu, E. and Kisi, O. 2013. Prediction of discharge coefficient for trapezoidal labyrinth side weir using a neuro-fuzzy approach. *Water resources management*. 27(5): 1473-1488.
- Gupta, K.K., Kumar, S. and Ahmad, Z. 2015. Effect of weir height on flow performance of sharp crested rectangular-planform weir. *World Applied Sciences Journal*. 33(1): 168-175.
- Haghiabi, A. H., Parsaie, A. and Ememgholizadeh, S. 2018. Prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth weirs using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Alexandria Engineering Journal*. 57(3): 1773-1782.
- Henderson, F.M. 1966. *Open Channel flow*. Macmillan Publishing, New York.
- 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.
- 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.
- Karami, H., Karimi, S. and Bonakdari, H. 2016. Predicting discharge coefficient of triangular labyrinth weir using extreme learning machine, artificial neural network and genetic programming. *Neural Computing and Applications*. 29: 983-989.
- 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 Science*. 1(4): 16-20.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A. and Reeve, D.E. 2010. *Hydraulic modelling- an introduction*, Spon Press, an Imprint of Taylor & Francis, London and New York, p. 599.
- Safarrazavi Zadeh, M., Esmaeili Varaki, M. and Biabani, R. 2019. Experimental study on flow over sinusoidal and semicircular labyrinth weirs. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 27(1): 304-313.
- Shafiei, S., Najarchi, M. 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): 1-19.
- ارشد، دانشکده مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه سمنان.
- فیلی، ج.، حیدر نژاد، م.، کمان بدست، ا.ع.، مسجدی، ع. ر. و اسدی لور، م. ۱۳۹۹. بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با شعاع قوس و طول سبکل متفاوت. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۵): ۱۱۱۵-۱۱۲۶.
- قدسیان، م. و شنوایی، ح. ۱۳۷۹. تأثیر طول تاج بر ضریب آبگذری در سرریزهای کنگره‌ای مثلثی با شکل تابع ربع دایره. چهارمین کنفرانس سدسازی ایران، تهران.
- کیاء، ع.، عمادی، ع. ر.، 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.
- محمدی، م. و یاسی، م. ۱۳۸۶. بررسی سرریزهای زیگزاگی با پلان قوسی. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*. ۱۱(۴۱ الف): ۱-۱۲.
- نبی‌زاده، م.، مساعدی، ا.، حسام، م.، دهقانی، ا. ا.، ذاکری نیا، م. و مفتاح هلقی، م. ۱۳۹۰. پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از سامانه استنتاج فازی (FIS) و سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS). *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۵(۱۷): ۷-۱۴.
- Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Gharabaghi, B., Sharifi, A. and Mosavi, A. 2020. Prediction of discharge capacity of labyrinth weir with gene expression programming. In *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*. 202-217.
- Bilhan, O., Emiroglu, M. E., Miller, C.J. and Ulas, M. 2019. The evaluation of the effect of nappe breakers on the discharge capacity of trapezoidal labyrinth weirs by ELM and SVR approaches. *Flow Measurement and Instrumentation*. 64: 71-82.
- 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.
- Emami, S., Parsa, J., Emami, H. and Abbaspour, A. 2021. An ISaDE algorithm combined with support vector regression for estimating discharge coefficient of W-planform weirs. *Water Supply*. 21(7): 3459-3476.
- Emami, H. 2022. Anti coronavirus optimization algorithm: A socioinspired meta-heuristic for numerical and engineering optimization problems. *Soft Computing*. doi:

Pseudo-Cosine Labyrinth Weir and Investigation of Its Discharge Coefficient Using Simulation-Prediction Approach

S. Emami^{1*}, J. Parsa², H. Emami³, A. Abbaspour⁴

Received: Nov.14, 2021

Accepted: Jan.11, 2021

Abstract

Labyrinth weirs are considered as an appropriate choice to correct the weirs that are having difficulty in passing the maximum possible flow. For this purpose, in the present study, a new weir was introduced called the pseudo-Cosine labyrinth weir. First, models with different widths and heights were built in FLUENT software as a virtual laboratory. The anti-corona algorithm and adaptive neuro-fuzzy inference system (ACVO-ANFIS) were used for predicting discharge coefficient of pseudo-Cosine labyrinth weir. Validation of the proposed method was performed using Experimental data. Then, to identify the superior model and determine the parameters affecting the discharge coefficient of pseudo-cosine labyrinth weir, the combination of different dimensionless parameters was evaluated. The performance of the proposed method was evaluated with five statistics, including determination coefficient (R^2), root means squared error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), nash-sutcliffe (NSE), and relative root mean square error (RRMSE). The results showed that in low hydraulic heads, the discharge coefficient has its highest value. As the radius increases, the discharge coefficient increases due to the increase in the effective length of the labyrinths. At a constant H/W, with increasing weir height, the discharge coefficient increased. The results of the ACVO-ANFIS model showed that the input variables are the ratio of the radius to the weir height (R/W), the ratio of the length of the weir to weir height (L/W), and the ratio of the hydraulic head to the weir height (H/W), with error values $R^2=0.971$, $RMSE=0.009$, $MAPE=0.006$, $RRMSE=0.010$, and $NSE=0.977$, the most effective parameters in determining the discharge coefficient of pseudo-cosine labyrinth weirs.

Keywords: Anti-corona algorithm, Flunet, Neuro-Fuzzy inference system, Prediction

1- Ph.D. in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3- Associate Professor, Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran
4- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
(*-Corresponding Author Email: somayhemami70@gmail.com)