

S. Emami

Water Engineering
Department, University of
Tabriz.

e-mail: somayehemami70@gmail.com

J. Parsa *

Water Engineering
Department, University of
Tabriz.

e-mail: jparsa@yahoo.com

H. Emami

Assistant Professor of
Computer Engineering,
Faculty of Engineering,
University of Bonab.

e-mail: emami@bonabu.ac.ir

A. Abbaspour

Associate Professor,
Department of Water
Engineering, University of
Tabriz.

e-mail: akramabbaspour@yahoo.com

Investigation of Discharge Coefficient of Triangular Duckbill Labyrinth Weirs Using Fluent Software and Gray Wolf and Elections Algorithms

Labyrinth weirs are important hydraulic structures for water level regulation and flow control in canals, rivers, and reservoirs. Due to the uneven distribution of hydraulic head on the weir crest, the discharge coefficient changes along the labyrinth weirs are noticeable. For optimal use of this type of weir, it is necessary to estimate the discharge coefficient. In this regard, in this study, using a data set including 120 experimental data collected by Kumar et al. (2011) and numerical (simulated by FLUENT software using $k-\epsilon$ RNG turbulence model) to optimally estimate the discharge coefficient of triangular-duckbill labyrinth weir embedded in a rectangular channel 0.28 m wide, 12 m long and 0.41 m high was addressed using modern gray wolf meta-heuristic (GWO) and election (EA) algorithms. To investigate the effect of discharge coefficient, angles of 30, 60, 90, 120, 150 and 180 degrees with weir height of 10 cm were selected and the flow conditions in all cases were considered as subcritical, turbulent and falling flow. The objective function is the sum of the squares of the difference between the computational flow and the observations defined as the minimum. Comparison of the results of GWO and EA algorithms and FLUENT software with values of $R^2=0.96$ and $NRMSE=0.052$ in comparison with the observed values, shows a good agreement between the observed and computational values.

Keywords: Flow Control, Optimization, Meta-Heuristic Algorithms, Turbulence Model.

* Corresponding author

Received 11 May 2021, Revised 11 June 2021, Accepted 13 June 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.6942.1250

بررسی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و الگوریتم‌های گرگ خاکستری و انتخابات

سرریزهای کنگره‌ای از جمله سازه‌های هیدرولیکی مهم جهت تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها محسوب می‌شوند. جهت استفاده بهینه از این نوع سرریزها، برآورد مقدار ضریب دبی ضروری است. در همین راستا، در این پژوهش با استفاده از مجموعه داده‌ای شامل ۱۲۰ داده آزمایشگاهی جمع‌آوری شده توسط کومار و همکاران (۲۰۱۱) و عددی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار FLUENT با استفاده از مدل آشفتگی (k-ε RNG) به برآورد بهینه ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلی که در یک کانال مستطیلی به عرض ۰/۲۸ متر، طول ۱۲ متر و ارتفاع ۰/۴۱ متر تعبیه شده، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نوین گرگ خاکستری (GWO) و انتخابات (EA)، پرداخته شد. برای بررسی اثر ضریب دبی، زوایای ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه با ارتفاع سرریز، ۱۰ سانتی‌متر انتخاب و شرایط جریان در تمامی حالات به صورت زیربهرانی، آشفته و جریان ریزشی در نظر گرفته شد. تابع هدف مجموع مربعات اختلاف بین دبی محاسباتی و مشاهداتی است که به صورت کمینه تعریف شد. مقایسه نتایج الگوریتم‌های GWO و EA و نرم‌افزار FLUENT با کسب مقادیر $R^2=0.96$ و $NRMSE=0.052$ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی، نشان‌دهنده تطابق مناسب بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های GWO و EA مقدار ضریب دبی جریان بهینه در بین سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلی مورد بررسی در سرریز با زاویه رأس ۶۰ درجه و به ترتیب برابر با مقادیر ۰/۴۴ و ۰/۵ به دست آمد.

واژگان کلیدی: کنترل جریان، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری، مدل آشفتگی.

سمیه امامی

گروه علوم و مهندسی آب،
دانشگاه تبریز.

پست الکترونیک:

somayehemami70@gmail.com

جواد پارسا*

گروه علوم و مهندسی آب،
دانشگاه تبریز.

پست الکترونیک:

jparsa@tabrizu.ac.ir

حجت امامی

گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده
فنی و مهندسی، دانشگاه بناب.

پست الکترونیک:

emami@bonabu.ac.ir

اکرم عباسپور

گروه علوم و مهندسی آب،
دانشگاه تبریز.

پست الکترونیک:

akabbaspour@yahoo.com

۱- مقدمه

نمی‌باشند و در پلان، به حالت خطی شکسته می‌باشند. به دلیل افزایش طول مؤثر سرریزهای کنگره‌ای منقاری نسبت به سرریز استاندارد، این سرریزها دارای ضریب دبی جریان بیش‌تری می‌باشند. ضریب دبی سرریزها به عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های هیدرولیکی جریان عبوری از روی تاج سرریز و مشخصات هندسی سرریز وابسته است [۲ و ۳].

محدودیت در تجهیزات، زمان و هزینه، مطالعه آزمایشگاهی را با چالش‌هایی روبه‌رو کرده است. پیشرفت‌های سریع در مدل‌های عددی جهت حل معادلات حاکم بر جریان سیال، توانسته است کمک

سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی مهم به‌شمار می‌آیند که در زمان کم‌آبی سطح آب را جهت آبیگری کانال‌های پایین‌دست تنظیم کرده و دبی لازم را فراهم می‌آورند [۱]. سرریزهای کنگره‌ای منقاری، نوعی از سرریزها می‌باشند که از یک لبه مستقیم و صاف برخوردار

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۲/۲۱، بازنگری ۱۴۰۰/۰۳/۲۱، پذیرش ۱۴۰۰/۰۳/۲۳.

(DOI): 10.22091/cer.2021.6942.1250 شناسه دیجیتال

نتایج می‌باشد [۵]. روشنگر و همکاران، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و کنگره‌ای قوسی را با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این روش دارای دقت بالایی برای پیش‌بینی ضریب دبی جریان سرریزهای کنگره‌ای می‌باشد [۶]. حق‌آبی و همکاران، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی را با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی پیش‌بینی کردند و نتیجه گرفتند مدل ANFIS^۳ با ضریب تبیین برابر با ۰/۹۷ از عملکرد بسیار مناسبی در پیش‌بینی ضریب دبی نوع سرریزها برخوردار است [۷]. امامی و همکاران، به بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی سرریز منقاری بر روی ضریب دبی جریان پرداختند. ایشان جریان عبوری از روی سرریز منقاری را با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و به صورت سه بعدی شبیه‌سازی نموده و نتایج مطالعه خود را با دستاوردهای حاصل از سرریز مستطیلی هم‌عرض کانال مقایسه نمودند. نتایج نشان داد در کلیه سرریزهای منقاری با زاویه رأس مختلف، ضریب دبی با افزایش $\frac{H}{P}$ (نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز) افزایش یافته و سپس به دلیل تداخل تیغه‌های ریزشی، ضریب دبی کاهش می‌یابد [۸]. محققان با استفاده از روش شبکه عصبی (NN^۴) و الگوریتم‌های جنگل تصادفی (RF^۵) به برآورد ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای قوسی پرداختند و بیان داشتند الگوریتم RF در تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی نتایج بهتری در مقایسه با روش NN از خود نشان می‌دهد [۹]. صانعی و فرودی، با استفاده از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و همچنین روش SVM مدل‌هایی بدون بعد برای برآورد ضریب دبی در سرریزهای لبه تیز قوس محور ارائه کردند. نتایج محاسباتی نشان داد که مدل‌های پیشنهادی از دقت بسیار مناسبی برخوردار می‌باشند. همچنین مدل‌سازی با

شایانی به مطالعه جریان پیچیده بر روی سرریزهای کنگره‌ای نماید. در مدل‌های عددی، معادلات حاکم بر جریان سیال در محدوده مسئله حل شده و پارامترهای مورد نیاز را می‌توان شبیه‌سازی نمود که این روش به دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۱) معروف می‌باشد. امروزه بهره‌مندی از روش‌های حل هوشمند نیز به‌عنوان ابزاری مجزا یا مکمل در بسیاری از زمینه‌های هیدرولیک رایج شده است، مدل‌های بهینه‌سازی هوشمند از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی به‌طور گسترده‌ای در حوزه وسیعی از مسائل به‌عنوان ابزارهای جستجو و بهینه‌یابی به‌کار گرفته شده‌اند. دلیل عمده موفقیت این الگوریتم‌ها، قابلیت کاربرد وسیع آن‌ها، دقت و کارایی بالای این روش‌ها است. پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی شامل انرژی کل بالادست سرریز (H_d)، طول مؤثر سرریز (L)، ارتفاع سرریز (P)، عرض سرریز (b)، زاویه رأس سرریز (θ) و عمق جریان (y) می‌باشد.

در زمینه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ضریب دبی جریان سرریزهای کنگره‌ای تاکنون مطالعات زیادی توسط محققین انجام شده است. امامی و همکاران، به بررسی عددی جریان و ضریب دبی جریان بر روی سرریز منقاری با پلان مثلثی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به‌عنوان یک آزمایشگاه مجازی پرداختند. نتایج نشان داد که سرریزهای منقاری با پلان منحنی در مقایسه با سرریزهای منقاری با پلان مثلثی دارای ضریب دبی بیشتری (۱/۲۵) برابر ضریب دبی سرریزهای منقاری با پلان مثلثی برای زاویه رأس ۴۵ درجه) می‌باشد [۴]. ماجدی اصل و فولادی‌پناه، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی لبه‌تیز را با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM^۲) بررسی و نتیجه گرفتند که در روش ماشین بردار پشتیبان، ترکیب ورودی که فقط شامل پارامترهای هندسی (θ ، L/B ، h/w) است، دارای بهترین

^۳ - Adaptive neuro fuzzy inference system

^۴ - Neural network

^۵ - Random forest algorithm

^۱ - Computational fluid dynamics

^۲ - Support vector machine

کنگره‌ای بررسی شود. در همین راستا، یافتن راهکارهایی جهت افزایش دقت، کاهش هزینه‌ها و زمان مطالعات آزمایشگاهی، کاهش بروز خطاهای زیاد ناشی از انجام محاسبات به شیوه دستی و نیز سهولت در مطالعه سرریزهای کنگره‌ای، بررسی روش‌های افزایش ضریب دبی جریان و برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با مشخص بودن مشخصات هندسی این سرریزها از اهمیت فراوانی برخوردار است. از این‌رو، هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO^۸) و انتخابات (EA^۹) به عنوان روش‌های تکاملی نوین و همچنین سازگاری این الگوریتم‌ها با تعداد کم‌تری از پارامترها و همچنین نرم‌افزار FLUENT در برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی و در نهایت تعیین بهترین مدل در برآورد ضریب دبی این نوع سرریزها با توجه به شاخص‌های ارزیابی می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- پارامترهای مؤثر

معادله یک بعدی جریان روی سرریزهای کنگره‌ای به روش تحلیل ریاضی (با حل معادلات پیوستگی و انرژی) و با فرضیات شرایط جریان آزاد و پرتابی از روی یک سرریز معادل خطی و نرمال، توزیع هیدرواستاتیکی فشار در محدوده بالادست سرریز و صرف‌نظر از فشردگی تیغه جریان و افت انرژی به‌صورت معادله (۱) به‌دست آمده است [۱۵]:

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

که در آن Q دبی عبوری از سرریز، g شتاب ثقل، C_d ضریب دبی^{۱۰} سرریز، L طول مؤثر سرریز و H ارتفاع هیدرولیکی (هد) سرریز می‌باشد. پارامترهای مؤثر بر

ANFIS با دارا بودن بیش‌ترین ضریب تعیین نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش SVM ارائه می‌دهد [۱۰].
بنکداری و همکاران، کارایی روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP^۶) 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 [۱۱]. شفیع‌ی و همکاران، از روش ANFIS-FFA^۷ 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 [۱۲]. پژوهشگران، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای را با استفاده از یک روش تکاملی بر مبنای نرو-فازی تخمین زدند. برای بهینه‌سازی پارامترهای سیستم استنتاج عصبی- فازی سازگار ANFIS از الگوریتم کرم شب‌تاب FFA استفاده شد. مقایسه مدل‌های ANFIS و ANFIS-FFA نشان داد که الگوریتم کرم شب‌تاب عملکرد مدل ANFIS را به شکل قابل توجهی بهبود داد [۱۳]. امامی و همکاران، با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم بهبود یافته تکامل تفاضلی و رگرسیون بردار پشتیبان (ISaDE-SVR) به برآورد ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل در پلان پرداختند. نتایج نشان داد روش ترکیبی ISaDE-SVR با کسب مقادیر R²=0.982 و RMSE=0.006 از دقت مناسبی در تخمین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل در پلان برخوردار است [۱۴].

با توجه به مطالعات انجام شده، مشاهده شد دامنه مطالعات در خصوص به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری در مدل‌سازی و بهینه‌سازی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای بسیار محدود است. تحقیقات گسترده، منظم و بلندمدتی نیاز است تا کارایی هیدرولیکی سرریزهای

⁸- Gray wolf optimizer algorithm

⁹- Election algorithm

¹⁰- Discharge coefficient

⁶- Gene expression programming

⁷- Firefly algorithm

گرفته شده است [۱۷ و ۱۸]. این الگوریتم دارای سه مرحله اصلی به صورت زیر است:

- ۱- مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن^{۱۲}
- ۲- نزدیک شدن، احاطه کردن شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند^{۱۳}.
- ۳- حمله به شکار^{۱۴}

در ابتدای الگوریتم، نوع گرگ‌ها مشخص می‌شود. در الگوریتم GWO، چهار نوع گرگ وجود دارد: گرگ‌های رهبر یا آلفا، بتا، دلتا و امگا. گرگ‌های آلفا هدایت‌کننده اصلی الگوریتم فرض می‌شوند. گرگ‌های بتا و دلتا بیشتر به عنوان دستیاران گرگ‌های آلفا مشارکت دارند و بقیه گرگ‌ها به عنوان دنبال‌کننده آن‌ها محسوب می‌شوند. در مرحله اول الگوریتم، گرگ‌های خاکستری طعمه را در طول شکار محاصره می‌کنند. برای مدل کردن رفتار محاصره به صورت ریاضی، معادله (۴) تعریف شده است:

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_p(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (4)$$

در این رابطه، t نشان‌دهنده تکرار جاری، $\bar{X}_p(t)$ موقعیت شکار در لحظه t و $\bar{X}(t)$ موقعیت گرگ در لحظه t است. \bar{D} فاصله گرگ تا شکار را نشان می‌دهد. \bar{A} و \bar{C} بردارهای ضریب هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{A} = 2a \cdot \bar{r}_1 - a \quad (5)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r}_2$$

\bar{r}_1 و \bar{r}_2 بردارهای تصادفی در بازه (صفر و ۱) هستند و مؤلفه‌ی \bar{a} پارامتری است که در طول تکرار مقدار آن به صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابد.

در مرحله شکار، گرگ خاکستری به طعمه محاصره شده حمله می‌کند. روند شکار معمولاً توسط آلفا هدایت می‌شود. گرگ‌های بتا و دلتا نیز گاهی اوقات ممکن است

ضریب دبی سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی شامل انرژی کل بالادست سرریز، طول مؤثر سرریز، ارتفاع سرریز، عرض سرریز، زاویه رأس سرریز و عمق جریان می‌باشد. پس از انجام آنالیز ابعادی ضریب دبی تابعی از پارامترهای بدون بعد زیر به دست خواهد آمد [۲]:

$$C_d = f_1(H, L, P, W, \theta, Y, g, \rho, \mu, \sigma) \quad (2)$$

$$C_d = f_2(\text{Re}, \text{We}, \text{Fr}, \frac{H}{P}, \frac{L}{P}, \frac{y}{P}, \theta, \frac{H}{W}, \frac{y}{W}, \frac{L}{W}) \quad (3)$$

در این روابط، F_r عدد فرود بالادست سرریز، P ارتفاع سرریز، W عرض سرریز، Re عدد رینولدز، L/W نسبت طول مؤثر سرریز به عرض سرریز، L/P نسبت طول مؤثر سرریز به ارتفاع سرریز، H/W نسبت انرژی کل بالادست سرریز به عرض سرریز، y/W نسبت عمق جریان به عرض سرریز، H/P نسبت انرژی کل بالای سرریز به ارتفاع سرریز، y/P نسبت عمق جریان به ارتفاع سرریز، We عدد ویر، θ زاویه رأس سرریز و y عمق جریان می‌باشد. با توجه به مطالعات هندرسون^{۱۱}، چنانچه عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ باشد ($\text{Re} > 4000$)، می‌توان از اثر لزجت صرف‌نظر کرد [۱۵]. در تحقیق حاضر نیز جریان در سرریز کانال متلاطم بوده و می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر نمود. هم‌چنین محققان، 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 [۱۶]. با توجه به اینکه حداقل ارتفاع آب روی سرریز معادل ۵ سانتی‌متر در تحقیق حاضر منظور شد، لذا می‌توان از عدد ویر نیز صرف‌نظر نمود.

۲-۲- الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)، یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در طبیعت و نحوه شکار آن‌ها الهام

¹²- Tracking and Approaching

¹³- Pursing and Encircling

¹⁴- Attacking

¹¹- Henderson

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (8)$$

موقعیت نهایی در یک مکان تصادفی واقع در یک دایره خواهد بود که به وسیله موقعیت‌های α ، β و δ در فضای جستجو تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، α ، β و δ موقعیت طعمه را تخمین می‌زنند و دیگر گرگ‌ها (راه‌حل‌های موجود)، موقعیت خود را به صورت تصادفی در اطراف طعمه یا نقطه بهینه به روزرسانی می‌کنند [۱۹ و ۲۰]. شکل ۱، روند نمای الگوریتم GWO را نشان می‌دهد.

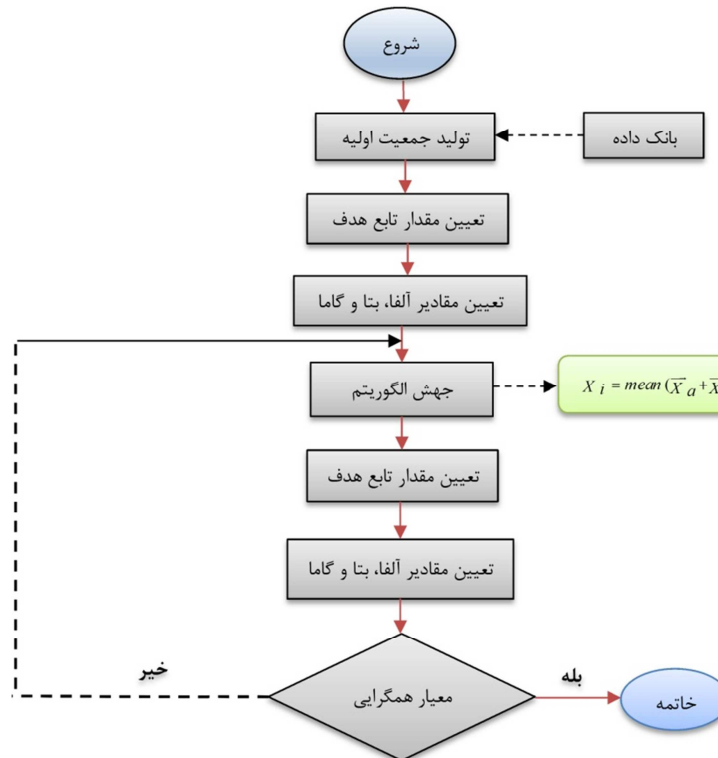
در شکار شرکت کنند. برای شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا از مکان بالقوه طعمه آگاهی بهتری دارند. بنابراین سه تا از بهترین راه‌حل‌های به دست آمده ذخیره شده و دیگر عوامل جستجو موقعیت خود را با توجه به موقعیت بهترین عوامل جستجو به روزرسانی می‌کنند. روابط زیر فرآیند شکار را نشان می‌دهند:

$$\bar{D}_j = |\bar{C}_i \bar{X}_j - \bar{X}|, \quad \bar{X}_i = \bar{X}_j - \bar{A}_i \cdot (\bar{D}_j) \quad (6)$$

$$(i, j) \in \{(1, \alpha), (2, \beta), (3, \delta)\} \quad (7)$$

پس از محاسبه X_i ها نقطه X به صورت رابطه

(۸) به روز می‌شود:



شکل ۱- روند نمای الگوریتم گرگ خاکستری

۲-۳- الگوریتم انتخابات

هر فرد P_i از آرایه‌ای از مقادیر ممکن P_1, P_2, \dots, P_N برای متغیرها تشکیل شده است:

$$P_i = [x_1, x_2, \dots, x_N] \quad (9)$$

شایستگی هر فرد با ارزیابی تابع E بر روی مقادیر متغیرها متناسب با تابع هدف مسئله محاسبه می‌شود.

الگوریتم انتخابات (EA) از پدیده انتخابات الهام گرفته شده است. الگوریتم EA، یک راهبرد چند عاملی و مبتنی بر جمعیت است که در آن هر عامل جستجو یک فرد نامیده می‌شود [۲۱]. برای یک مسئله با متغیرهای

$$\omega_e = \frac{1}{\text{dist}(E_c - E_v) + 1} \quad (13)$$

در مرحله تبلیغات منفی، کاندیداها سعی می‌کنند رأی دهندگان دیگر کاندیداها را به سمت خود جذب کنند. اگر کاندیدای یک حزب در مقایسه با دیگر کاندیداها ضعیف‌ترین فرد باشد، در این صورت آن حزب ضعیف در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی تبلیغات منفی، ابتدا تعدادی از رأی‌دهندگان از حزب ضعیف انتخاب می‌شوند. سپس مسابقه‌ای بین احزاب قدرتمند صورت می‌گیرد تا مشخص شود رأی‌دهندگان انتخاب شده به کدام حزب ملحق شوند. برای انتخاب رأی‌دهندگان ضعیف از ضعیف‌ترین حزب، فاصله شایستگی بین رأی‌دهندگان و ضعیف‌ترین کاندیدا محاسبه می‌شود و سپس ۵٪ از دورترین کاندیداها انتخاب می‌شوند. فاصله بین رأی‌دهندگان انتخاب شده و کاندیداها قدرتمند محاسبه شده و رأی‌دهندگان به نزدیک‌ترین کاندیداها تخصیص داده می‌شوند. در مرحله ائتلاف، چندین کاندیدا به همدیگر ملحق شده و یک حزب جدید تشکیل می‌دهند. بین کاندیداهایی که تلاش می‌کنند به همدیگر ملحق شوند، یک کاندیدا به صورت تصادفی انتخاب می‌شود تا به عنوان کاندیدای پیشرو^{۱۵} باشد و کاندیداها باقی‌مانده به عنوان کاندیدای تبعیت کننده^{۱۶} در نظر گرفته می‌شوند. در ائتلاف، تمامی تبعیت کنندگان و حامیان آن‌ها به عنوان رأی‌دهندگان جدید کاندیدای پیشرو در نظر گرفته می‌شود. تا هنگامی که شرایط خاتمه الگوریتم ارضا نشده است، عملگرهای تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف به صورت مکرر بر روی جمعیت اعمال می‌شود تا جمعیت را برای نیل به بهینه سراسری سوق دهد. در نهایت، فرآیند بهنگام‌سازی خاتمه می‌یابد و کاندیدایی با بیش‌ترین رأی به عنوان برنده انتخابات اعلام می‌شود. برنده معادل با بهترین راه

برخی از بهترین افراد در جمعیت انتخاب می‌شوند تا به عنوان کاندیدا باشند و مابقی افراد رأی‌دهندگان را تشکیل می‌دهند که هرکدام به عنوان حامی یک کاندیدا می‌باشد. رأی‌دهندگان براساس تشابه عقاید، بین کاندیداها تقسیم می‌شوند. برای انجام این کار، رأی‌دهنده v_k به عنوان حامی کاندیدا c_i انتخاب می‌شود اگر معادله (۱۰) برقرار باشد:

$$P_i = \{v_p : \|E_{v_p} - E_{c_i}\| < \|E_{v_p} - E_{c_j}\| \forall 1 \leq j \leq N_c\} \quad (10)$$

P_i حزب i و N_c تعداد کاندیدهای اولیه می‌باشند. E_{c_i} و E_{v_k} به ترتیب شایستگی کاندیدا c_i و رأی‌دهنده v_k را نشان می‌دهد. در اینجا، هر رأی‌دهنده دقیقاً به یک کاندیدا اختصاص داده می‌شود. در پیاده‌سازی‌های صورت گرفته ۷٪ از جمعیت اولیه به عنوان تعداد کاندیداها در نظر گرفته می‌شوند. پس از تشکیل احزاب سیاسی، کاندیداها تبلیغات انتخاباتی را شروع می‌کنند. تبلیغات انتخاباتی بنیان الگوریتم EA را تشکیل می‌دهد که شامل سه مؤلفه تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف است. در الگوریتم EA، تبلیغات مثبت، با انتقال برخی از صفات هر کاندیدا به حامیان خود شبیه‌سازی شده است. برای انجام این کار، در درون هر حزب، به تعداد N_s متغیر از کاندیدا به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و با متغیرهای انتخابی از رأی‌دهندگان جایگزین می‌شود. N_s به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N_s = \lceil X_s \times S_c \rceil, \quad (11)$$

در این رابطه، N_s تعداد متغیرها، S_c تعداد متغیرهای کاندیدا و X_s نرخ انتخاب است.

متغیرهای انتخاب شده با ضریب ω وزن دهی می‌شوند و سپس در رأی‌دهندگان جایگزین می‌شوند. مقدار جدید متغیر i در یک رأی‌دهنده در مرحله تبلیغات مثبت به صورت رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

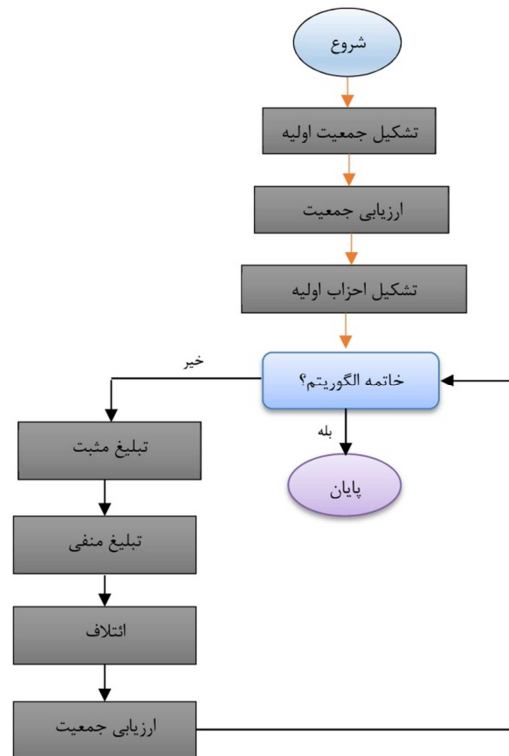
$$S_{i_{new}} = \omega_e \times S_{i_{old}} \quad (12)$$

که ω به صورت زیر تعریف شده است:

¹⁵- Leader Candidate

¹⁶- Follower Candidates

حل یافته شده برای مسئله بهینه‌سازی است [۲۱]. شکل ۲ روند نمای الگوریتم EA را نشان می‌دهد.



شکل ۲- روند نمای الگوریتم انتخابات [۲۱]

می‌کنند تا شرایط حل را کنترل کند و در انتها نتایج را مورد بازبینی قرار دهد.

۲-۵- تعریف مسئله

تابع هدف به صورت کمینه (رابطه ۱۴) و قیود آن (روابط ۱۵ و ۱۶) برای بهینه‌سازی ضریب دبی جریان به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$MinValue = \sum (Q_{cal} - Q_{obs})^2 \quad (14)$$

$$Q_{cal} = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H^{3/2} \quad (15)$$

$$C_d = \frac{Q_{obs}}{\frac{2}{3} L \sqrt{2g} H^{3/2}} \quad (16)$$

که در این روابط، Q_{cal} دبی محاسباتی و Q_{obs} دبی مشاهداتی می‌باشد.

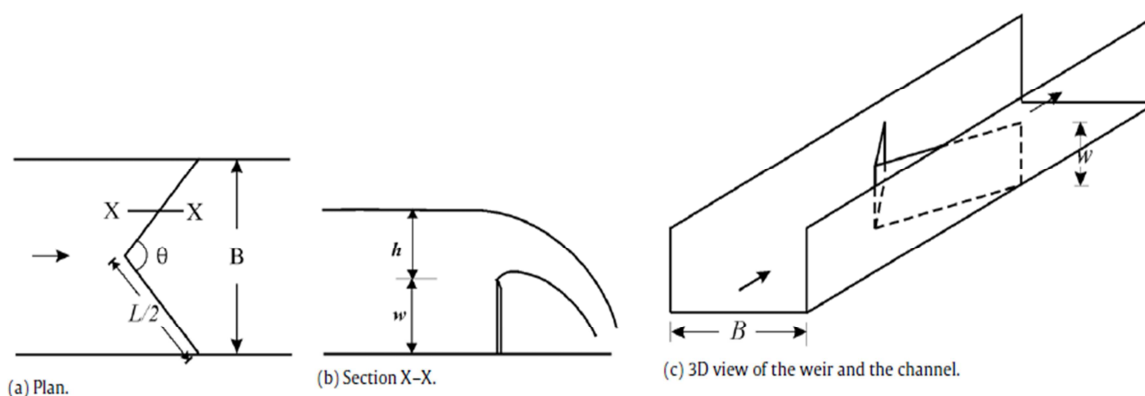
۲-۶- تعریف محدوده هندسی

۲-۴- نرم‌افزار Fluent

نرم‌افزار Fluent، یکی از کامل‌ترین و کاربردی‌ترین نرم‌افزارهای CFD می‌باشد که قابلیت مدل‌سازی هیدرولیک جریان‌های مختلف مانند جریان‌های دو یا چند فاز (جریان‌های حمل‌کننده رسوب، پرش هیدرولیکی و ...) و همچنین مدل‌سازی جریان‌های با سطح آزاد را دارد. این نرم‌افزار امکان انجام محاسبات با دقت معمولی و مضاعف را به صورت دو بعدی و سه بعدی دارا می‌باشد. نرم‌افزار Fluent از سه جزء اصلی که به ترتیب عبارت‌اند از: پیش‌پردازنده، حل‌کننده و پس‌پردازنده تشکیل شده است. در قسمت پیش‌پردازنده علاوه بر مدل‌سازی و تعیین هندسه و محدوده حل، می‌توان شبکه یا همان مش مورد نیاز برای حل را ایجاد کرد. در قسمت حل‌کننده مراحل مدل‌سازی انجام می‌پذیرد و عملیاتی که در قسمت پس‌پردازنده انجام می‌گیرند به کاربر کمک

۲-۶-۱- مدل آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش از داده‌های کومار و همکاران در رابطه با سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی با زوایای مرکزی مختلف استفاده شده است [۲۲]. این پژوهشگران برای انجام تحقیق آزمایشگاهی خود، از یک کانال مستطیلی به عرض 0.28 ، طول 12 و ارتفاع 0.41 متر استفاده نمودند. نمایش شماتیک پلان و مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی و سرریز



شکل ۳- نمایش پلان و مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی و سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی [۲۲]

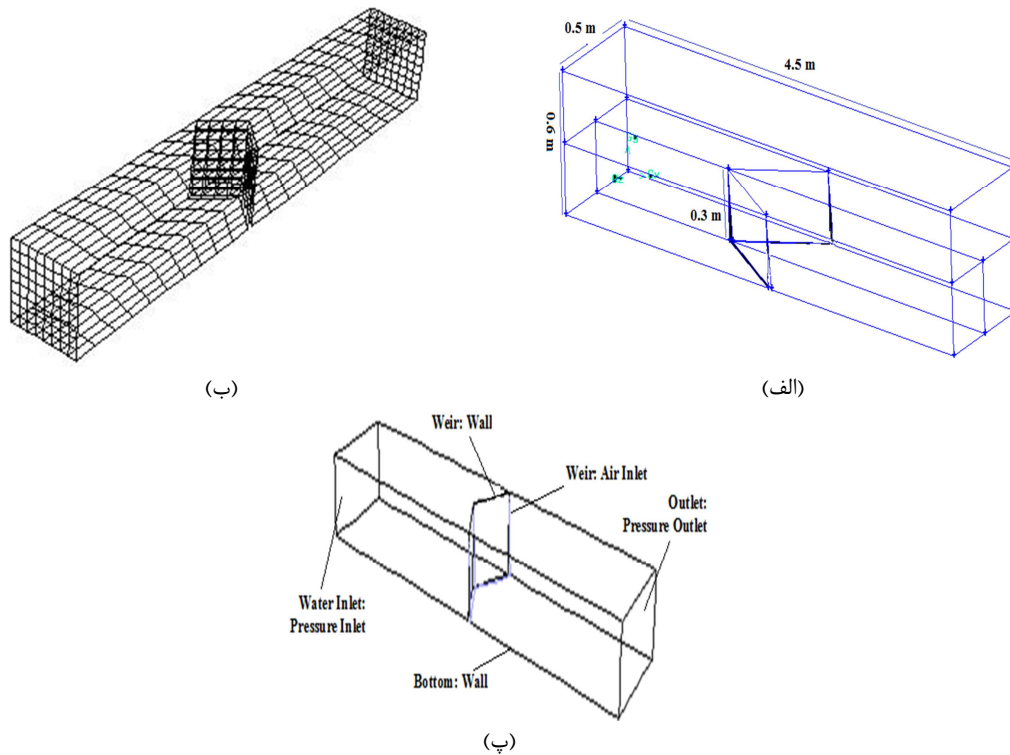
۲-۶-۲- مدل عددی

در این پژوهش، شرایط جریان آب در یک کانال با طول بالادست سرریز 3 متر و طول کانال پایین‌دست سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی $1/5$ متر، عرض 50 سانتی‌متر و ارتفاع 0.6 متر به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی و بررسی شده است (شکل ۴-الف). سطح آزاد جریان با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و روش حجم سیال (VOF) برای شبیه‌سازی جریان دو فاز آب و هوا با حل عددی تعیین گردیدند. مدل در این نرم‌افزار ساخته شده و سپس مش مورد نیاز بر روی مدل تهیه گردید. برای شبکه‌بندی هندسه مدل از المان Quad نوع MAP و جهت شبکه‌بندی تمامی حجم‌ها از المان Hex نوع MAP استفاده شد. همچنین برای کنترل عدم تأثیر اندازه سلول‌ها بر نتایج حاصل از حل عددی تعداد شبکه عدد ثابت 12800 طراحی شد (شکل ۴-ب). برای حصول اطمینان از اینکه کشش

کنگره‌ای منقاری مثلثی در شکل ۳ آورده شده است. برای بررسی اثر ضریب دبی جریان، زوایای 30° ، 60° ، 90° ، 120° ، 150° و 180° در محدوده $0 \leq h/P \leq 0.7$ را مورد آزمایش قرار دادند. ارتفاع سرریز برای تمامی زوایاها، 10 سانتی‌متر انتخاب و شرایط جریان در تمامی حالات به صورت زیربهرانی، آشفته و جریان ریزشی (جریان آزاد) در نظر گرفته شد.

سطحی قابل صرف‌نظر است، حداقل عمق روی تاج سرریز 30 میلی‌متر، ضخامت تاج سرریز برابر با صفر تا 5 میلی‌متر و برای حل مسئله در تمامی مدل‌ها گام زمانی 0.001 ثانیه به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که ضخامت تاج در سرریزهای لبه‌تیز با زاویه (θ) 45° تا 70° درجه برابر 2 تا 5 میلی‌متر می‌باشد که در این پژوهش با توجه به اینکه ضخامت تاج سرریز برابر با صفر تا 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است، این مقدار بر روی نتایج تأثیری ندارد. همچنین در شکل ۴-پ، شرایط مرزی اعمال شده در مدل عددی نشان داده شده است.

مشخصات هندسی مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مورد استفاده در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. به منظور کارایی مطلوب الگوریتم‌های GWO و EA، سعی و خطاهایی برای به دست آوردن بهترین مقدار برای هر پارامتر انجام شد که این پارامترها در جدول ۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۴- (الف) محدوده هندسی طرح در مدل عددی، (ب) سرریز منقاری مثلثی طراحی شده در نرم‌افزار Gambit و (پ) شرایط مرزی اعمال شده در مدل

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل‌های آزمایشگاهی

زاویه (درجه)	ارتفاع سرریز (متر)	بار آبی (متر)	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
۳۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۲۰-۰/۰۱۲۵
۶۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۲۱-۰/۰۱۲۰
۹۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۱۵-۰/۰۱۲۱
۱۲۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۲۱-۰/۰۱۲۴
۱۵۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۱۲-۰/۰۱۱۳
۱۸۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۲۲-۰/۰۱۰۹

جدول ۲- مشخصات هندسی مدل‌های عددی

زاویه (درجه)	ارتفاع سرریز (متر)	بار آبی (متر)	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
۳۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۱۵-۰/۰۱۲۰
۶۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۱۷-۰/۰۱۵۲
۹۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۱۳-۰/۰۱۱۷
۱۲۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۱۷-۰/۰۱۱۶
۱۵۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۱۰-۰/۰۱۰۸
۱۸۰	۰/۱۰	۰/۰۳-۰/۲	۰/۰۰۱۶-۰/۰۱۰۲

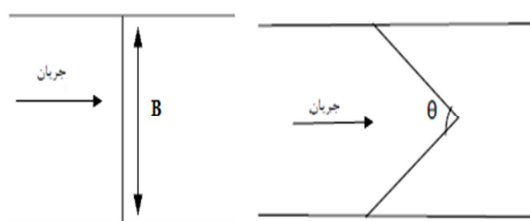
شده و در هر موردی که کارایی بیشتری کسب کردند، به‌عنوان مقدار مناسب آن پارامتر در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است اعداد مندرج در این جدول، براساس نتایج تجربی انتخاب شده‌اند. بدین صورت که الگوریتم‌ها براساس مقادیر مختلف اندازه جمعیت اجرا

هم‌چنین پس از آموزش مدل‌های استخراج شده براساس ۷۰ درصد داده‌ها (۸۴ داده)، از مدل‌های ساخته شده در مرحله بعدی برای آزمون (۳۶ داده) استفاده شد.

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (19)$$

جهت صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار فلوئنت، مدل سرریز مستطیلی هم‌عرض کانال با ارتفاع ۰/۳ متر در کانالی به عرض ۰/۵ متر طراحی و شبیه‌سازی گردید. سرریز لبه‌تیز مورد نظر به‌ازای دبی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۵).



شکل ۵- پلان مدل‌های ساخته شده

بعد از حصول اطمینان از عملکرد نرم‌افزار و روش‌های به‌کار گرفته شده در نرم‌افزار فلوئنت، به طراحی مدل‌های سرریز منقاری مثلثی پرداخته شد. سپس، نتایج حاصل از مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۶). با توجه به این شکل، ضریب دبی در بارهای آبی کم ($H/P < 0.35$)، روند صعودی داشته و سپس مقدار آن تقریباً به یک حد ثابت (۰/۴۷) می‌رسد.

از میان مدل‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، سرریز با زاویه رأس ۶۰ درجه و طول ۱ متر به عنوان سرریز بهینه انتخاب شد (شکل ۷). دلایل انتخاب این سرریز را می‌توان اینگونه بیان داشت:

الف) با توجه به اینکه در همه مدل‌های مورد بررسی، جریان آب به‌صورت آزاد از روی سرریز ریزش می‌یابد و جریان مستغرق وجود ندارد، هم‌چنین با توجه به اینکه سرریزهای منقاری مثلثی جزو سرریزهای ریزشی آزاد محسوب می‌شوند، در نتیجه نظر به مقادیر به‌دست آمده برای ضرایب

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم‌های GWO و

EA		الگوریتم
مقدار	پارامتر	
۱۰۰	تعداد گرگ‌ها	GWO
۱	محدوده پایین	
۳	محدوده بالا	
۱۰۰	اندازه جمعیت اولیه	EA
۷	تعداد کاندیداها	
۹۳	تعداد رأی دهندگان	
۰/۲	نرخ ائتلاف	
۰/۳	نرخ انتخاب	

۲-۶-۳- معیارهای کارایی

عملکرد روش‌های پیشنهادی با دو آماره، شامل ضریب تبیین^{۱۷} (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، به‌صورت روابط (۱۷) و (۱۸) ارزیابی گردید:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \right]^2 \quad (17)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}}{\bar{X}} \quad (18)$$

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

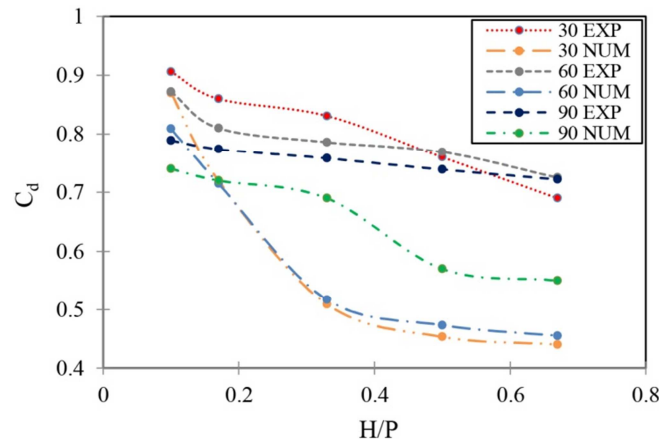
۳- نتایج و بحث

به‌طوری‌که در بخش مواد و روش‌ها گفته شد، در این پژوهش سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی با دبی‌ها و شش زاویه رأس مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، تمامی داده‌های موجود (۱۲۰ داده)، مطابق رابطه (۱۹) استانداردسازی شدند [۲۳]. پس از معرفی ساختارهای ورودی و یافتن مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر الگوریتم‌ها (ساختار بهینه) و به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌ها و

¹⁷- Determination Coefficient

ب) در کلیه بررسی‌های انجام یافته بر روی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی با زاویه‌های رأس مختلف، هدف یافتن بازه‌ای از تغییرات ضریب دبی به‌ازای H/P های مختلف بود که در آن بازه ضریب دبی روند ثابتی را طی کند.

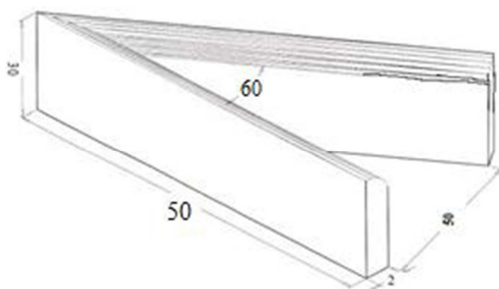
دبی، در بین مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق سرریز با زاویه رأس 60° درجه، طول ۱ متر و $L/W=2$ (طول سرریز و ارتفاع سرریز) به‌عنوان سرریز بهینه انتخاب گردید.



شکل ۶- مقایسه تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی به‌ازای مقادیر $\frac{H}{P}$ مختلف برای $30^\circ < \theta < 90^\circ$

سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی کارایی و عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده توسط اژدری مقدم و جعفری ندوشن، که محدوده ضرایب جریان را برای سرریزهای زیگزاگی ذوزنقه‌ای برابر $(0.4-0.7)$ ، کروکستون برابر $(0.25-0.55)$ و ساپراپتو برابر با $(0.55-0.15)$ به‌دست آوردند، مشخص می‌شود که نتایج حاصل از الگوریتم GWO (با مقادیر ضریب دبی برآورد شده برابر با $(0.35-0.7)$ ، از کارایی مطلوبی برخوردار است [۲۴-۲۶].

مقادیر میانگین و کمینه تابع هدف، انحراف معیار نرمال‌سازی شده و تعداد اجراهای با جواب شدنی در ۱۰ بار اجرای برنامه برای الگوریتم‌های مورد استفاده و همچنین ضریب دبی جریان متناظر با آن به‌عنوان ضریب دبی بهینه جریان در جدول ۴، ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که با استفاده از هر دو الگوریتم GWO و EA جوابی مناسب برای مسئله به‌دست آمده است، ولی نتایج حاصل از الگوریتم GWO با کمینه تابع هدف $6/26 \times 10^{-5}$ به‌دلیل عدم همگرایی سریع و ناپهنگام الگوریتم، مطلوب‌تر است و با به‌کارگیری



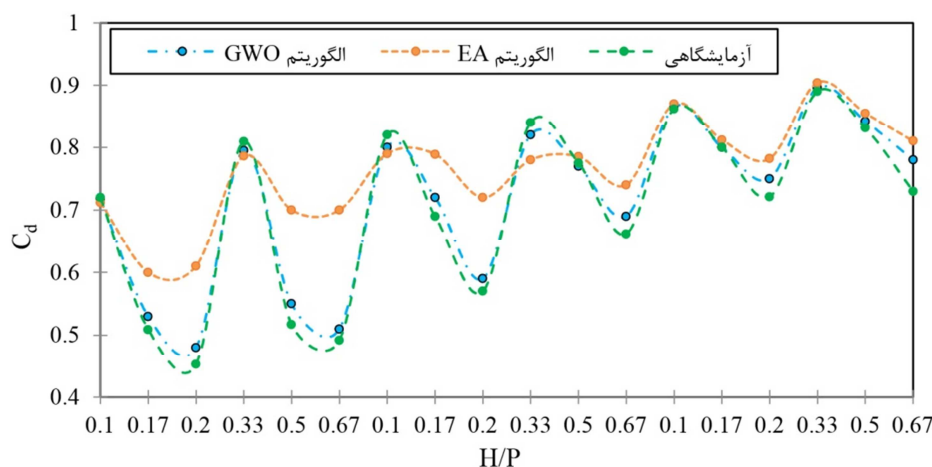
شکل ۷- سرریز بهینه با آرایش نرمال سرریز برای جریان در کانال

پس از انتخاب بهینه‌ترین سرریز، به برآورد و بهینه‌سازی ضریب دبی در این نوع سرریزها با استفاده از الگوریتم‌های GWO و EA پرداخته شد.

در شکل ۸، نمودار تغییرات ضریب دبی آزمایشگاهی و برآورد شده با استفاده از الگوریتم‌های GWO و EA مقایسه شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که ضریب دبی سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی با استفاده از الگوریتم‌های GWO و EA با دقت بالایی برآورد شده و انطباق و همبستگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین با توجه به نتایج، الگوریتم GWO در مقایسه با الگوریتم EA در برآورد ضریب دبی

الگوریتم GWO و نیز تعداد اجراهای با جواب شدنی (حصول جواب در تمامی ۱۰ اجرای برنامه) بیش از الگوریتم EA می‌باشد.

الگوریتم GWO، حداکثر مقدار تابع هدف در مقایسه با الگوریتم EA، ۳/۱۸ درصد کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که طول بازه گسسته‌سازی شده متغیر تصمیم در



شکل ۸- مقایسه ضریب دبی آزمایشگاهی و برآورد شده با استفاده از الگوریتم‌های GWO و EA

جدول ۴- مقادیر میانگین و حداقل تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای برنامه با استفاده از الگوریتم‌های GWO و EA

الگوریتم	مقادیر تابع هدف		انحراف معیار نرمال‌سازی شده	تعداد اجرای شدنی	ضریب دبی بهینه
	میانگین	حداقل			
GWO	$6/30 \times 10^{-5}$	$6/26 \times 10^{-5}$	۰/۰۰۰۶	۱۰	۰/۴۴
EA	$6/50 \times 10^{-5}$	$6/31 \times 10^{-5}$	۰/۰۱۸	۸	۰/۵

GWO در مقایسه با نتایج الگوریتم SA در بهینه‌سازی مقادیر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای است [۲۷]. در جدول ۵، ارزیابی دقت برآورد مدل‌ها در برآورد ضریب دبی جریان سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی ارائه شده است.

حیدری و همکاران، نیز ضریب دبی جریان سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای را با استفاده از الگوریتم هوشمند تبرید تدریجی (SA)، بهینه‌سازی و مقدار جواب بهینه مسئله را برابر با $1/3 \times 10^{-3}$ به دست آوردند که در مقایسه با نتایج بهینه الگوریتم GWO، ۱۹ درصد کاهش داشته است که بیانگر بهینه بودن نتایج حاصل از الگوریتم

جدول ۵- ارزیابی دقت برآورد مدل‌ها در برآورد ضریب دبی جریان

پارامتر	R ²			NRMSE		
	Fluent	EA	GWO	Fluent	EA	GWO
الگوریتم / مدل	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۶	۰/۰۸۲	۰/۰۷۴	۰/۰۵۲
C _d						

بیانگر کارایی بالای الگوریتم GWO در مقایسه با دو مدل دیگر می‌باشد.

برای ارزیابی دقت الگوریتم‌های مورد استفاده در این تحقیق، از تکرارپذیری و همگرایی الگوریتم‌ها استفاده شده است. در شکل ۹، نحوه تغییرات تابع هدف به‌زای

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از اجرای الگوریتم GWO در مقایسه با نتایج به دست آمده از الگوریتم EA و نرم‌افزار FLUENT در برآورد ضریب دبی جریان سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی با کسب مقدار ضریب تبیین برابر با ۰/۹۶، بسیار بهینه بوده که این امر

شد. برای به دست آوردن بهترین معادله، توابع مختلف برای C_d به عنوان متغیر وابسته در ارتباط با متغیرهای مستقل نظیر $\frac{H}{P}$ ، L و θ معادلاتی برای C_d استخراج گردید. پس از تعیین خطای توابع مختلف، معادله (۲۰)، با ضریب تبیین $R^2=0/94$ ، به عنوان بهترین معادله جهت تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی پیشنهاد شد:

$$C_d = 0.0948 \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.249} \theta^{0.374} \quad (19)$$

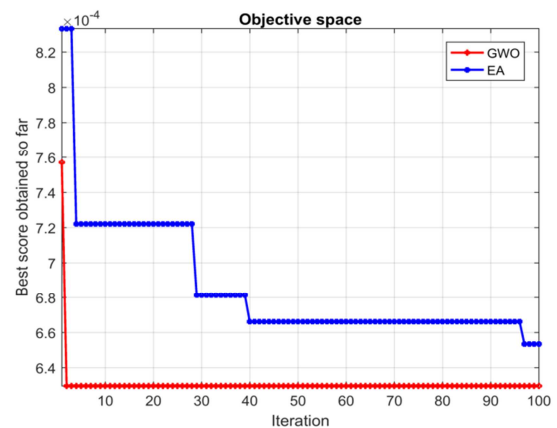
در جدول ۶، مقادیر ضریب دبی جریان سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی حاصل از تحقیق حاضر با نتایج به دست آمده از مطالعات سایر پژوهشگران مورد مقایسه قرار گرفته است. از آنجا که هنوز گزارش‌های مستندی در خصوص طرح سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی مشاهده نشده، بنابراین مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج مشابه دیگر امکان‌پذیر نبوده است. در تحقیق حاضر، کارایی هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای منقاری با دو گزینه معادل با پلان قوسی و پلان مثلثی در شرایط جریان آزاد مورد مقایسه قرار گرفت.

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر مطالعات انجام یافته، نشان‌دهنده دقت مناسب الگوریتم‌های بهینه‌سازی و همچنین مدل شبیه‌سازی (نرم‌افزار FLUENT) در برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از دو الگوریتم نوین بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) و انتخابات (EA) و همچنین نرم‌افزار Fluent به برآورد ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی پرداخته شد. مقادیر ضریب دبی برآورد شده توسط هر دو الگوریتم مورد استفاده و شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار Fluent با ضرایب دبی آزمایشگاهی (در مجموع از ۱۲۰ سری داده

تعداد تکرار برای الگوریتم‌های GWO و EA نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار تابع هدف در الگوریتم GWO در مقایسه با الگوریتم EA به میزان مطلوب‌تری به جواب بهینه همگرا شده است که نشان‌دهنده کارایی و سرعت مناسب این الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه می‌باشد. همچنین همگرایی پس از تکرار ۵۰ ام حاصل شد.



شکل ۹- نحوه تغییرات تابع هدف به‌ازای تعداد تکرار الگوریتم‌ها

لازم به ذکر است که تعداد پارامترهای تنظیم الگوریتم بهینه‌سازی GWO به مراتب کمتر از روش بهینه‌سازی EA است. با توجه به اینکه الگوریتم GWO با تعداد کمتری از پارامترها سازگاری دارد و نیز الگوریتم GWO در مقایسه با الگوریتم EA با افزایش پیچیدگی در مسائل بهینه‌سازی، از سرعت پایین همگرایی بهره برده و سبب افزایش زمان محاسبات نمی‌گردد، لذا عملکرد بهتری در برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی در مقایسه با الگوریتم EA دارد.

۳-۱- ارائه معادلات خطی و غیرخطی جهت برآورد ضریب دبی سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی

به منظور تعیین معادله‌ای جهت برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی، از نرم‌افزار متلب که یک نرم‌افزار کاربردی با قابلیت تقریب تابع بین چندین متغیر می‌باشد، با احتساب پارامترهای هندسی استفاده

آزمایشگاهی) مقایسه گردید که نتایج حاصله از تطابق مناسبی برخوردار بودند.

جدول ۶- مقایسه ضریب دبی جریان انواع سرریزهای کنگره‌ای منقاری و لبه تیز

مقدار C_d	شرایط جریان	نوع سرریز	سال	نام محقق
۰/۶۱۱-۰/۹۸۶	$\frac{H}{P} < 5$	سرریز لبه تیز ساده	۱۹۸۹	ریبک [۲۸]
۰/۵۸-۰/۶۹	$0.2 < \frac{H}{P} < 0.4$ $14.6^\circ < \alpha < 19.5^\circ$	سرریز کنگره‌ای با پلان مثلثی	۱۹۸۵	لاکس و هینچلینف [۲۹]
۰/۵۱-۰/۶۵	$0 < \frac{H}{P} < 0.7$ $0 < \alpha < 11^\circ$	سرریز کنگره‌ای مثلثی با شکل تاج ربع دایره	۲۰۰۱	قدسیان و شنوایی [۳۰]
۰/۵۸-۰/۷۱	$0.2 < \frac{H}{P} < 0.4$	سرریز زیگزاگی با پلان قوسی	۲۰۰۷	محمدی و یاسی [۳۱]
۰/۶۲۵-۱/۰۱	$0 < \frac{H}{P} < 10$	سرریز لبه تیز ساده	۲۰۱۰	باقری و حیدرپور [۳۲]
۰/۵۷۷-۰/۸۹۶	$0 < \frac{H}{P} < 0.9$ $0 < \alpha < 120^\circ$	سرریز لبه تیز با پلان منحنی	۲۰۱۲	کومار و همکاران [۳۳]
۰/۳۵-۰/۷	$0.1 < \frac{H}{P} < 0.67$ $45^\circ < \alpha < 180^\circ$	سرریز کنگره‌ای منقاری	۲۰۲۱	تحقیق حاضر

توسط الگوریتم EA و نرم افزار Fluent به ترتیب با مقادیر ضریب دبی $C_d=0.5$ و $C_d=0.47$ دارد. همچنین نتایج بیانگر آن بود که الگوریتم GWO مقادیر تابع هدف را نسبت به الگوریتم EA به مقدار بهتری کمینه می‌نماید. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت، الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری در برآورد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی، کارایی بسیار مناسبی داشته است.

نتایج نشان داد الگوریتم GWO در برآورد ضریب دبی سرریز کنگره‌ای منقاری مثلثی با احتساب پارامترهای هندسی (θ ، H/P و L) و به ترتیب با کسب مقادیر $R^2=0.96$ و $NRMSE=0.052$ از عملکرد مطلوبی برخوردار است. مقادیر ضریب دبی برآورد شده با استفاده از الگوریتم GWO، ($C_d=0.44$) تطابق بیشتری با مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی در مقایسه با مقادیر حاصله

مراجع

- [1] Abrishami, J., & Hosseini, M. (2010). *Hydraulics of open channels*. Imam Reza University Publications.
- [2] Emami, S. (2016). "Numerical study of the effect of geometric parameters of duckbill labyrinth weir on discharge coefficient", *MSc. Thesis*, Faculty of Agriculture, University of Tabriz.
- [3] Nikpeik, P., Kashefipour, S. M., & Multajei, A. (2012). "Investigation of the effect of geometric dimensions of duckbill weir on discharge coefficient", *National Conference on Structure, Road, Architecture*. Islamic Azad University, Chalous Branch.
- [4] Emami, S., Arvanaghi, H. & Parsa, J. (2017). "Investigation of discharge coefficient of duckbill labyrinth weir with triangular and curved plans", *Journal of Dam and Hydropower Plant*, 4(15), 1-11.
- [5] Majedi Asl, M. A., & Fooladpanah, M. (2018). "Application of evolutionary systems in determining the discharge coefficient of triangular labyrinth weir", *Journal of Soil and Water Sciences* (Agricultural Science and Technology and Natural Resources), 22(4), 279-290.
- [6] Roushangar, K., Alami, M. T., Shiri, J., & Majedi Asl, M. (2018). "Determining discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine", *Hydrology Research*, 49(3), 924-938.

- [7] Haghbi, A. H., Parsaie, A., & Ememgholizadeh, S. (2018). "Prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth weirs using adaptive neuro fuzzy inference system", *Alexandria Engineering Journal*, 57(3), 1773-1782.
- [8] Emami, S., Arvanaghi, H., & 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.
- [9] Salazar, F., & Crookston, B. M. (2019). "A performance comparison of machine learning algorithms for arced labyrinth spillways", *Water*, 11(3), 544.
- [10] Saneie, M. & Forudi, A. (2020). "Enhancing accuracy of discharge capacity prediction of a sharp-crested curved plan-form weirs under free flow conditions using evolutionary algorithms and artificial neural networks", *Journal of Watershed Engineering and Management*, 11(4), 891-902.
- [11] Bonakdari, H., Ebtahaj, I., Gharabaghi, B., Sharifi, A., & Mosavi, A. (2020). "Prediction of Discharge Capacity of Labyrinth Weir with Gene Expression Programming", In *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*, Springer, Cham, 202-217.
- [12] Shafiei, S., Najarchi, M., & 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.
- [13] Shafie, S., Najarchi, M. & Shabanlu, S. (2020). "Estimation of discharge coefficient of labyrinth weir by new artificial intelligence models", *Journal of Civil Engineering Modares*, 20(1), 161-171.
- [14] Emami, S., Parsa, J., Emami, H., & Abbaspour, A. (2021). "An ISaDE algorithm combined with support vector regression for estimating discharge coefficient of W-planform weirs", *Water Supply*, <https://doi.org/10.2166/ws.2021.112>.
- [15] Henderson, F. M. (1996). *Open Channel flow*. Macmillan Publishing, New York.
- [16] Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. E. (2010). *Hydraulic modelling- an introduction*. Spon Press, an Imprint of Taylor & Francis, London and New York.
- [17] Muro, C. Escobedo, R. Spector, L. & Coppinger, R. (2011). "Wolf-pack (canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations", *Behavioural Processes*, 88(3), 192-197.
- [18] Mech, L. D. (1999). "Alpha Status, dominance, and division of labor in wolf packs", *Canadian Journal of Zoology*, 77(8), 1196-1203.
- [19] Mirjalili, S. Mirjalili, S. M. & Lewis, A. (2014). "Grey Wolf Optimizer", *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- [20] Khishe, M. Mosavi, M. R. Ghamgosar, A. & Ghalandari, M. J. (2016). "Classification of sonar data set using the gray wolf optimizer algorithm", *Electronics Industries Quartely*, 7(1), 27-41.
- [21] Emami, H. & Derakhshan, F. (2015). "Election algorithm: A new socio-politically inspired strategy", *AI Communications*, 28, 591-603.
- [22] Kumar, S., Ahmad, Z., & Mansoor, T. (2011). "A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan form weirs", *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(3), 175-180.
- [23] Larose, D. T., & Larose, C. D. (2014). *Discovering knowledge in data: an introduction to data mining* (Vol. 4). John Wiley & Sons.
- [24] Ajdari Moghaddam, M., & Jafari Nodooshan, A. (2013). "Hydraulic design of trapezoidal labyrinth weir using computational hydrodynamics", *Journal of Imran Modares*, 13(2), 1-12.
- [25] Crookston, B. M. & Tullis, B. P. (2012). "Discharge efficiency of reservoir application specific labyrinth weirs", *Journal of Irrigation and Drainage Engr ASCE*, 138(6), 773-776.
- [26] Suprpto, M. (2013). "Increase spillway capacity using Labyrinth Weir", *Procedia Engineering*, 54, 440-446.
- [27] Heydari, M., Doosti, M., & Safari, H. (2015). "Optimization of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs using intelligent simulated annealing algorithm", *10th International Seminar on River Engineering*, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- [28] Rehbock, T. (1989). "Discussion of precise weir measurement. In: E. W. Schoder and K. B. Turner (Ed.)", *Journal of Transportation Engineering*, 93, 1143 – 1162
- [29] Lux, F. (1985). "Design and construction of labyrinth spillways", *15th Commission Internationale des Grands Barrages*, 1985, 249-274.
- [30] Shenavaie, H., & Ghodsian, M. (2001). "Effect of crest shape on water discharge coefficient in triangular labyrinth weir", *International Conference on Hydraulic Structures*, Kerman.
- [31] Mohammadi, M., & Yasi, M. (2007). "Investigation of zigzag overflows with arched plan", *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources*, 11(41), 1-12.
- [32] Bagheri, S., & Heidarpour, M. (2010). "Flow over rectangular sharp-crested weirs", *Irrigation science*, 28(2), 173-179.
- [33] Kumar, S., Ahmad, Z., Mansoor, T., & Himanshu, S. K. (2012). "Discharge Characteristics of Sharp Crested Weir of Curved Plan-form", *Research Journal of Engineering Science*, 1(4), 16-20.