

مقاله علمی- پژوهشی

## مقایسه عملکرد الگوریتم‌های تکاملی WCA و IWO در بهینه‌سازی چندهدفه سرریزهای کنگره‌ای ذورنقه‌ای

نازیلا کاردان<sup>۱\*</sup>، توحید حبیبی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴

### چکیده

با توجه به اهمیت طراحی سرریز سدها جهت ارائه ابعاد بهینه با حفظ عملکرد مطلوب آنها، رویکردی بر مبنای بهینه‌یابی دو هدفه سرریزهای کنگره‌ای ذورنقه‌ای با بهره‌گیری از الگوریتم‌های علف‌های هرز (IWO) و چرخه آب (WCA) پیشنهاد گردید. در طراحی سرریزهای کنگره‌ای حالت بهینه دست‌یابی به طرحی با بیشینه دبی عبوری از روی سرریز (راندمان) برای مواقع سیلابی و کم‌ترین حجم سرریز که بیانگر کمینه مقدار بتن ریزی و هزینه ساخت است، می‌باشد. در این راستا، کارایی دو الگوریتم بر روی سرریز کنگره‌ای سد UTE مورد بررسی قرار گرفته و سه سناریو مختلف برای ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفت. مقدار پارامتر GD برای الگوریتم IWO نسبت به الگوریتم WCA کمتر است، از سویی دیگر الگوریتم WCA دارای بیش‌ترین مقدار انحراف از معیار و میانگین تکرارها بر اساس معیار GD می‌باشد؛ که این امر نشان می‌دهد الگوریتم IWO از دقت بالایی برخوردار است. مطابق معیار S نیز، مقدار میانگین در IWO، ۰/۱۰۲ و در WCA برابر ۰/۳۶۷ می‌باشد، لذا در مجموع الگوریتم IWO دقت و سرعت همگرایی بهتری نسبت به الگوریتم WCA در حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه سرریزهای کنگره‌ای دارد. استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه می‌تواند مجموعه‌ای از پاسخ‌ها را در اختیار طراحان قرار دهد که بتوانند در هر شرایطی بسته به میزان هزینه و راندمان مورد نظر طرح مناسبی برای اجرا انتخاب نمایند. در ارزیابی سناریوهای پیشنهادی، سناریو سه با بررسی مقدار بهینه برای پارامترهای بیشتری، جواب‌های بهینه بهتری نسبت به سناریو دو ارائه می‌دهد؛ در نتیجه پارامترهای ضریب گذردهی جریان و ضخامت دیوار تأثیر بسزایی در بهینه‌سازی سرریز کنگره‌ای دارند. در بررسی تمامی سناریوها نیز معلوم گردید با کاهش مقدار پارامترهای طول کفبند، طول هر سیکل از سرریز و طول کل تاج هزینه ساخت سرریز کاهش می‌یابد، این در حالی است که افزایش زاویه دیواره  $\alpha$  نتایج مشابهی را حاصل می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم چرخه آب WCA، الگوریتم علف‌های هرز IWO، سرریزهای کنگره‌ای، منحنی پارتو، سرریز سد UTE

### مقدمه

دیگر یکی از کاربردهای مهم سرریزها، کنترل ارتفاع و حجم آب دریاچه پشت سد است (اسکویی، ۱۳۹۳). حجم دبی عبوری جریان از یک سرریز همواره تحت تاثیر دو عامل طول و شکل تاج بوده است. سرریزهایی با پلان غیرخطی مانند مثلثی، ذورنقه‌ای، دایروی و سهموی، برای افزایش طول موثر دهانه سرریز، باعث افزایش ظرفیت آگذری می‌شوند. به این نوع سرریزها سرریز کنگره‌ای می‌گویند. بارزترین و مهم‌ترین ویژگی و برتری این نوع سرریزها بر سرریزهای خطی، افزایش حجم عبوری جریان حتی در شرایطی که امکان افزایش عرض دهانه سرریز وجود ندارد، می‌باشد (Darvas, 1971). بیش از یک قرن از اختراع سرریزهای کنگره‌ای می‌گذرد. مورفی جز اولین افرادی است که به معرفی فواید سرریز کنگره‌ای در سال ۱۹۰۹ پرداخت (Murphy, 1909). اولین مطالعات هیدرولیکی روی این نوع

سرریزها از جمله سازه‌هایی هستند که به منظور کنترل سطح آب و اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها، دریاچه‌ها، مسیل‌ها، رودخانه‌ها و مخازن و... مورد استفاده قرار می‌گیرند و موجب تسهیل در دقت اندازه‌گیری دبی در شرایط مختلف می‌گردند. همچنین سرریزها امکان خروج سیلاب‌های مازاد بر ظرفیت سد را ممکن می‌سازند. به عبارت

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران - مهندسی آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

(\*- نویسنده مسئول: Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir)

به تاج ربع‌دایره دارد، هم‌چنین ظرفیت تخلیه سرریز کنگره‌ای با تاج نیم‌دایره بسیار بیش‌تر از ظرفیت تخلیه سرریز کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره می‌باشد (Ferdowsi et al., 2019; 2020). جعفری اصل و همکاران بهینه‌یابی دو هدفه سرریزهای کنگره‌ای را مورد توجه قرار دادند. در این پژوهش کاهش حجم بتن بدنه سرریز و نیز افزایش قابلیت اعتماد عملکرد آن به عنوان توابع هدف انتخاب گردیدند. نتایج این تحقیق نشان داد سه پارامتر عرض سرریز، هد آب بالادست سرریز و ضریب دبی، بیشترین تاثیر را بر بهینه‌سازی چند هدفه این سرریزها دارند (Jafari-Asl et al., 2021).

اژدری مقدم و همکاران (۱۳۸۸) و هم‌چنین اژدری مقدم و جعفری ندوشن (۱۳۹۲) به بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای با استفاده از مدل فازی عصبی و الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج نشان از کاهش ۱۲/۳۵ درصدی در هزینه‌های اجرایی سرریز مثلثی و ۱۳/۳۴ درصدی برای پلان دوزنقه‌ای نسبت به سرریز سد اصلی بود. فردوسی و همکاران (۱۳۹۷) از الگوریتم فراکاووشی جستجوی فاخته، جهت یافتن بهترین هندسه سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، استفاده شد. بدین منظور، حجم بدن مصرفی سرریز به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. مقدار کمینه تابع هدف الگوریتم پیشنهادی با نمونه مورد مطالعه واقعی و هم‌چنین با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و تکامل تفاضلی (DE) در تحقیقات پیشین مورد مقایسه قرار گرفت. استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته، منجر به کاهش بتن مصرفی در ساخت سرریز به میزان ۳۹ درصد نسبت به نمونه واقعی می‌شود. در مدل ارائه شده، علاوه بر کاهش حجم بتن سرریز، مقادیر ظرفیت دبی عبوری سرریز نیز افزایش یافت. کاهش حجم بتن‌ریزی در ساخت سرریز با استفاده از الگوریتم مذکور در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک GA و DE در حدود ۱۲٪ بیشتر است.

با توجه به اهمیت عملکرد صحیح سرریزهای کنگره‌ای در هنگام عبور سیلاب (Majedi Asl et al., 2022)، توجه صرف به کاهش میزان حجم و بتن مصرفی در بدنه سرریز، می‌تواند راندمان هیدرولیکی آنها را کاهش دهد. از اینرو، ضروری است علاوه بر توجه به بهینه نمودن حجم بتن مصرفی و کاهش ابعاد بدنه سرریزهای کنگره‌ای، عملکرد هیدرولیکی آنها نیز مورد توجه قرار گیرد. در این راستا، تابع هدف کمینه‌سازی هزینه ساخت سرریز (کاهش ابعاد بدنه سرریز) انتخاب شده و به‌منظور عدم کاهش کارایی و راندمان سرریز در عبور سیلاب و دبی جریان مورد طراحی، افزایش عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریز به عنوان تابع هدف دوم تعریف شده است. لذا بهینه‌سازی دو هدفه با هدف کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی عملکرد سرریز انجام خواهد یافت. در بخش مدل بهینه‌ساز دو هدفه، تعداد ۳ سناریو با تغییر در پارامترهای مختلف ارزیابی و نتایج حاصله ارائه شده است.

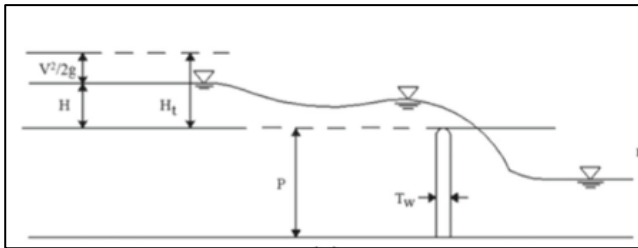
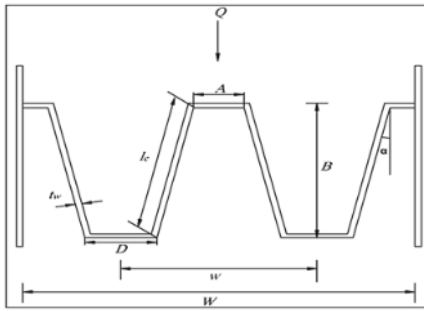
سرریز، توسط جنتیلینی صورت گرفته است (Gentilini, 1940). طی سال‌های گذشته نیز تحقیقات بسیاری در مورد طراحی سرریزهای کنگره‌ای انجام شده است. به عنوان نمونه، ویلمور به آزمایش سرریزهای کنگره‌ای با شکل‌های مختلف تاج پرداخت (Willmore, 2004). کروکستون و تولیس نیز تحقیقات گسترده‌ای را بر پایه مدلسازی فیزیکی در مورد سرریزهای کنگره‌ای انجام دادند (Crookston and Tullis, 2012, 2013). آنها علاوه بر مقایسه نتایج خود با محققین پیشین، نمودارهایی را برای ضریب دبی پیشنهاد نمودند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی متعددی نیاز در کشور انجام شده است (حیدریور و همکاران، ۱۳۸۵؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۴؛ شفاعت طلب دهقانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ ضمیری و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج تحقیقات صورت گرفته تا به امروز باعث ایجاد ضریب‌های بی‌بعد مختلفی از جمله نسبت عرض سیکل، هد آب و بزرگنمایی شده است که با محدود کردن ابعاد بدنه سرریز می‌توانند باعث عملکرد بهتر این سازه‌ها شوند. هم‌چنین، شکل‌های مختلفی از جمله مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای و قوسی برای این سرریزها معرفی شده است.

ساخت سرریز یکی از پرهزینه‌ترین بخش‌های اجرایی در ساخت سد به‌شمار می‌رود، از اینرو، توجه به مسائل بهینه‌سازی در طراحی آنها بسیار حائز اهمیت است (Hosseini et al., 2016). بزرگ حداد و همکاران برای طراحی بهینه سرریز پلکانی از الگوریتم کلونی زنبور عسل استفاده کرد و با نتایج بدست آمده با الگوریتم ژنتیک مقایسه نمودند (Bozorg Haddad et al., 2010). حسینی و همکاران برای پیکربندی بهینه سرریز UTE از دو الگوریتم فراکاووشی (ژنتیک و تکامل تفاضلی<sup>۱</sup>) استفاده کردند. بهینه‌سازی سرریز با در نظر گرفتن قیدهای مختلف و حجم بتن مصرفی بعنوان تابع هدف انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که نرخ همگرایی الگوریتم تکامل تفاضلی از الگوریتم ژنتیک بیش‌تر بوده و هزینه مربوط به ساخت سرریز بر اساس الگوریتم تکامل تفاضلی تقریباً ۱۹ درصد و بر اساس الگوریتم ژنتیک ۱۷ درصد کاهش را نشان می‌دهد (Hosseini et al., 2016). در پژوهش جامع دیگری نشان داده شده است با بهینه‌سازی بسیاری از پارامترهای سرریز کنگره‌ای از جمله عرض سرریز، زاویه، دماغه کنگره، ارتفاع و... در همان نمونه مورد مطالعه و با کمک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، کل حجم بتن‌ریزی حتی تا ۲۱ درصد نیز (نسبت به طرح اصلی) کاهش می‌یابد (Kardan et al., 2017). فردوسی و همکاران مطالعه‌ای بر روی بهینه‌سازی هندسه سرریز کنگره‌ای انجام داد. ایشان برای بهینه‌سازی، از الگوریتم هیبریدی (ترکیبی) که شامل دو الگوریتم فراکاووشی خفاش و دسته‌ذرات بود استفاده کرد. نتایج نشان داد سرریز کنگره‌ای با تاج نیم‌دایره نیازمند بتن کم‌تری نسبت

می‌گردد ( Khode et al., 2012; Tullis et al., 19951 )  
:(Crookston and Tullis, 2010

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

در معادله (۱)،  $Q$  دبی تخلیه بر روی سرریز،  $C_d$  ضریب تخلیه بی‌بعد،  $L_c$  طول مؤثر (طول تاج)،  $g$  شتاب ثابت گرانش و  $H_T$  ارتفاع کل جریان بر روی تاج سرریز و بصورت  $H_T = h + v^2/2g$  تعریف می‌شود.



شکل ۱- نمایشی از پلان سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای ( Kardan et al., 2017).

#### نسبت هد آب ( $H_T/p$ )

نسبت هد آب عبارت از بار هیدرولیکی کل ( $H_T = h + v^2/2g$ )، به ارتفاع تاج سرریز است. برخی از محققان حد بالایی را برای ( $H_T/p$ ) پیشنهاد داده‌اند (Lux, 1989; Hay and Taylor, 1970). با این وجود تولید و همکاران در سال ۱۹۹۵ حد بالای ۰/۹ را بر اساس نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد دادند.

#### نسبت عرض سیکل ( $w/p$ )

نسبت عرض سیکل توسط تیلور در سال ۱۹۶۸ برای در نظر گرفتن تأثیر تداخل تیغه‌ها در نظر گرفته شده است (Taylor, 1968). برای طراحی، تیلور و همکاران در سال ۱۹۹۵ نسبت عرض سیکل را بین ۳ و ۴، ماگال حائز و لورنا (۱۹۸۹)، بزرگتر از ۲/۵ و لاکس (۱۹۸۹)، این نسبت را بزرگتر از ۲ توصیه کردند.

#### نسبت ضخامت نسبی ( $P/t_w$ )

در عمل، حداقل ضخامت دیواره‌ی مورد نیاز با طراحی سازه‌ای و

الگوریتم چرخه آب (WCA) و الگوریتم علف‌های هرز (IWO)، دو الگوریتم بهینه‌سازی جدید می‌باشند که در حل مسائل گوناگون بهینه‌سازی به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه نیز عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی مذکور برای طراحی سرریزهای کنگره‌ای به‌صورت چند هدفه ارزیابی خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

بیش‌تر مسائل بهینه‌سازی مهندسی در جهان واقعی دارای چند هدف می‌باشند که معمولاً با یکدیگر در تضاد هستند. یافتن "یک پاسخ بهینه" در این موارد معمولاً امکان‌پذیر نیست. در این مسائل، سعی بر یافتن یک مجموعه از جواب‌هایی است که توازن نسبی بین اهداف مختلف برقرار کنند. پاسخ بهینه پاسخی است که در هر یک از اهداف از بقیه جواب‌ها بدتر نباشد و حداقل در یکی از اهداف، بهتر از سایر جواب‌ها باشد. جواب بهینه، جوابی است که در مقایسه با هیچ جواب دیگری در فضای تصمیم مسئله، مغلوب نشود. چنین جواب بهینه‌ای، جواب بهینه پارتو<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و مجموعه این جواب‌ها در یک مسئله چند هدفه، مجموعه بهینه پارتو نامیده می‌شوند. هر چند روش‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه پیشنهاد شده‌است، هدف همه این روش‌ها، یافتن مجموعه بهینه پارتو<sup>۲</sup> است (کشاورز، ۱۳۹۱). پتانسیل الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی چند منظوره (هدفه) توسط روزنبرگ در سال ۱۹۶۰ معرفی شد، اما این حوزه تحقیقاتی حدود ۲۵ سال بعد به نام بهینه‌سازی چندمنظوره (هدفه) تکاملی<sup>۳</sup> (EMOP) نامگذاری شد.

در این مطالعه، مساله طراحی سرریزهای کنگره‌ای به‌صورت یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا توابع هدف، شامل کمینه‌سازی هزینه‌های طراحی و بیشینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی سرریز می‌باشند. در ادامه جزئیات مساله بهینه‌سازی چند هدفه سرریزهای کنگره‌ای شامل توابع هدف، متغیرهای تصمیم، قیود بهینه‌سازی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده بیان شده است.

#### هیدرولیک سرریزهای کنگره‌ای

به‌دلیل هندسه خاص سرریزهای کنگره‌ای، الگوی جریان آن‌ها به‌صورت سه‌بعدی و بسیار پیچیده می‌باشد. پارامترهای مختلفی در طراحی و عملکرد این سرریزها تأثیر گذارند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. شکل ۱، پلان سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای را نمایش می‌دهد. دبی عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای براساس رابطه (۱) بیان

- 1- Dominated
- 2- Pareto Optimal
- 3- Evolutionary Multi-Objective Optimization (EMOP)

### تعداد سیکل (N)

تعداد سیکل‌ها یکی دیگر از پارامترهای مهم سرریز کنگره‌ای است که در طرح کلی و هزینه آن تاثیر خواهد گذاشت. بر اساس تحقیقات ویلمور و تیلور، تعداد سیکل‌ها تاثیر بر ضریب تخلیه نخواهند داشت که این امر طراحی را آسانتر می‌کند (Taylor, 1968; Waldron, 1994). هرچند اگر تعداد سیکل‌ها بسیار کم یا زیاد باشد، نه تنها طرح اقتصادی حاصل نخواهد شد بلکه عملکرد هیدرولیکی مورد نظر نیز حاصل نخواهد شد.

### طراحی و بهینه‌سازی سرریز کنگره‌ای

پژوهش حاضر، یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه می‌باشد و برای ارزیابی آن از دو تابع ارزیابی بیشینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی سرریز و کمینه‌سازی حجم بتن مصرفی در بدنه سرریز استفاده می‌شود. در ادامه توابع هدف، متغیرهای تصمیم و قیود بهینه‌سازی تشریح می‌گردند.

توابع هدفی که برای کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت و بیشینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی سرریز می‌باشند به ترتیب در روابط (۲) و (۳) آمده‌اند. برای کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت می‌توان حجم بتن‌ریزی ساخت سرریز را به حداقل رساند که در حالت کلی بتن‌ریزی شامل دیواره اصلی سرریز کنگره‌ای، سطح کف‌بند، دیوار کاتاف زیر کف‌بند و دیواره‌های کناری سرریز کنگره‌ای می‌باشد. بدیهی است ترکیب تمام قسمت‌های بتن‌ریزی شده، بهترین نتیجه را برای بهینه‌سازی خواهد داشت، اما در این پروژه با در نظر گرفتن محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی فقط حجم بتن قسمت اصلی سرریز کنگره‌ای به عنوان تابع هدف انتخاب شده است. بیان ریاضی تابع هدف اول به صورت زیر می‌باشد (به‌پور، ۱۳۹۸):

$$\text{Min}(F) = N(2B/\cos\alpha + 2A)Pt_w \quad (2)$$

$$\text{Max}(Q) = 2/3 \sqrt{2g} C_d H_T^{1.5} N(2B/\cos\alpha + 2A) \quad (3)$$

با توجه به شکل ۱ پارامترهای طراحی مورد استفاده در توابع هدف و قیدها به این صورت تعریف می‌شود؛ N تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای،  $Q_d$  دبی تخلیه طراحی، A طول داخلی رأس سرریز کنگره‌ای، P تراز تاج سرریز نسبت به تاج سرریز،  $t_w$  ضخامت دیواره سرریز،  $H_T$  هد کلی نسبت به تاج سرریز، w عرض هر سیکل از سرریز کنگره‌ای را نشان می‌دهد که با رابطه (۴) قابل محاسبه است، W عرض کل سرریز کنگره‌ای است که با رابطه (۵) محاسبه می‌شود،  $I_{c-cycle}$  طول دیواره بند کنگره‌ای در هر سیکل (طول مؤثر) (رابطه (۶))، و  $L_c$  طول کل دیواره بند کنگره‌ای (رابطه (۷)) تعریف می‌شود.

$$w = 2(B\tan\alpha + A) \quad (4)$$

$$W = 2N(B\tan\alpha + A) \quad (5)$$

تحلیل دیواره‌ی سرریز مشخص می‌شود. تویلیس و همکاران،  $P/t_w$  را برابر ۶ در نظر گرفتند (Tullis et al., 1995)، در مدل فیزیکی که توسط ویلمور در سال ۲۰۰۴ مورد آزمایش قرار گرفت، این نسبت برابر ۸ در نظر گرفته شد.

### شعاع انحناء ( $H_T/R_{crest}$ )

ضریب تخلیه  $C_d$  تحت تاثیر  $H_T/R_{crest}$  می‌باشد. منحنی نرخ تخلیه برای سرریزهای نیم‌دایره‌ای، از نمودار  $H_T/R_{crest}$  در مقابل  $C_d$ ، توسط روو و ایندلکوفر در سال ۱۹۷۴ ارائه شده است.

### زاویه دیواره‌ی کناری ( $\alpha$ ) / نسبت بزرگنمایی (M)

$\alpha$  مربوط به زاویه (به درجه) دیواره‌ی کناری سرریز کنگره‌ای نسبت به خط تقارن سیکل را نشان می‌دهد. M به صورت  $L_c/cycle/W$  یا نسبت طول خط وسط تاج سرریز برای یک سیکل  $L_c/cycle$  به عرض سیکل، W را نشان می‌دهد (Crookston, 2010).

### نسبت رأس ( $A/W$ )

نسبت رأس، طول داخلی سرریز کنگره‌ای می‌باشد (Brinker, 2005).  $A/W$  برای بررسی رفتاری و مقایسه‌ی هندسه‌ی سرریزهای کنگره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، هرچند این پارامتر نقش تعیین کننده‌ای در طراحی بهینه‌سازی ندارد.

### درجه تاثیر (E)

E روشی برای مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با یک سرریز خطی می‌باشد. این نسبت، ترکیب زاویه دیواره‌ها و بزرگنمایی می‌باشد.

### شکل تاج

شکل تاج سرریز می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی عملکرد هیدرولیکی یک سرریز کنگره‌ای داشته باشد. از نظر هیدرولیکی، بیش‌ترین کارایی را تاج اوجی شکل، با شعاع  $1/3 t_w$  برای لبه جلویی و  $2/3 t_w$  برای لبه پشتی، دارد (Willmore, 2004).

### تداخل تیغه آب

تداخل تیغه آب مربوط به اندرکنش جریان عبوری از روی سرریز و در موقعیت همگرایی جریان می‌باشد. اندرکنش دبی عبوری از روی دیواره یک سرریز باعث تاثیر بالقوه بر روی دبی مؤثر در نزدیکی‌های دیواره سرریز در اثر ایجاد استغراق موضعی در آن ناحیه می‌شود. در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای تیغه آب دیواره کناری نه تنها با تیغه آب رأس برخورد می‌کند که از آن متأثر نیز می‌شود.

$$g_{10} = 1 - \left( \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d H_T^{1.5} N (2B/\cos\alpha + 2A) \right) * (1/Q_d)$$

### سناریوهای تعریف شده برای بهینه‌سازی

- کمینه‌سازی هزینه‌ها، بیشینه کردن عملکرد هیدرولیکی سرریز و بهینه‌سازی دو هدفه همین توابع با ثابت در نظر گرفتن تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای (N).
- کمینه‌سازی هزینه‌ها، بیشینه کردن عملکرد هیدرولیکی سرریز و بهینه‌سازی دو هدفه همین توابع با ثابت در نظر گرفتن ارتفاع (P) و عرض کل سرریز (W).
- کمینه‌سازی هزینه‌ها، بیشینه کردن عملکرد هیدرولیکی سرریز و بهینه‌سازی دو هدفه همین توابع با ثابت در نظر گرفتن ارتفاع (P)، عرض کل سرریز (W)، ضخامت (tw)، تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای (N).

### الگوریتم‌های بهینه‌سازی

#### الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب (WCA)

الگوریتم WCA، از رفتار چرخه آب در طبیعت الهام گرفته شده است. همانند سایر الگوریتم‌های فراکاوشی، روش الگوریتم WCA نیز با یک جمعیت نخستین به اصطلاح قطرات باران شروع به کار می‌نماید. در ابتدا، فرض می‌گردد که باران یا دیگر انواع بارش وجود دارند. بهترین قطره آب، به عنوان دریا انتخاب می‌شود. سپس تعدادی از قطرات باران با برازندگی بهتر به عنوان رود و سایر قطرات به عنوان جویبار در نظر گرفته می‌شوند که به سمت رودخانه‌ها و دریا جریان دارند. در این روش به هر راه‌حل، قطره باران گفته می‌شود. در یک مسئله بهینه‌سازی، نخست ماتریس جمعیت به صورت  $N_{var} \times N_{pop}$  به طور تصادفی ایجاد می‌شود که  $N_{pop}$  تعداد جمعیت نخستین قطرات باران و  $N_{var}$  تعداد متغیرهای تصمیم می‌باشد. سپس به ازای هر عضو مقدار تابع هدف و قیدها محاسبه می‌گردد (Eskandar et al., 2012).

پس از ارزیابی تابع هدف به ازای هر کدام از جمعیت‌های اولیه، تعداد  $N_{Sr}$  از بهترین پاسخ‌ها بر اساس برازندگی تابع هدف به عنوان رودخانه و دریا انتخاب می‌گردند. در این میان، بهترین پاسخ به عنوان دریا انتخاب می‌شود. بقیه جمعیت قطرات به عنوان جویبارهایی که ممکن است در ادامه فرآیند به دریا اضافه شوند بنابر رابطه (۸) و (۹) انتخاب می‌گردند (Eskandar et al., 2012).

$$N_{Sr} = \text{Number of rivers} + 1(\text{sea}) \quad (۸)$$

$$N_{streams} = N_{pop} - N_{Sr} \quad (۹)$$

مقادیر قطرات باران با ارزیابی تابع هزینه (C) تعریف شده در رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$C_i = Cost_i = f(X_1^i, X_2^i, X_3^i, \dots, X_{N_{var}}^i) \quad (۱۰)$$

$$l_{c-cycle} = 2(B/\cos\alpha + A) \quad (۶)$$

$$L_c = 2N(B/\cos\alpha + A) \quad (۷)$$

برخی از این پارامترها و یا ترکیبی از آن‌ها دارای محدوده‌ی معینی می‌باشند که به عنوان قیود تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

### قیدهای بهینه‌سازی

مقادیر ثابت یا محدوده قیود از پژوهش‌های آزمایشگاهی محققان گذشته اخذ شده است. بر حسب متغیرهای طراحی و نیز مقادیر قیود مورد استفاده، تعداد سناریوهای مختلفی را می‌توان در نظر گرفت که می‌تواند شامل تعدادی از متغیرهای طراحی و قیود بهینه‌سازی باشد. در این پژوهش تنها تعداد سه سناریو برای بهینه‌سازی دو هدفه در نظر گرفته شده است.

قید  $H_T/P$  نسبت ارتفاع آب

$$0.05 \leq H_T/P \leq 0.9$$

قید  $w/P$  نسبت عرض سیکل

$$2 \leq (2B\tan\alpha + 2A)/P \leq 4$$

قید  $L_{c-cycle}/W$  نسبت بزرگ‌نمایی

$$3 \leq (2B/\cos\alpha + 2A) / (2B\tan\alpha + 2A) \leq 9.5$$

قید  $A/t_w$  نسبت رأس به ضخامت دیواره

$$1 \leq A/t_w \leq 2$$

قید Q، دبی محاسبه شده توسط رابطه استاندارد تخلیه سرریز (رابطه (۱)) است.

$$\frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d H_T^{1.5} N (2B/\cos\alpha + 2A) \geq Q_d$$

یکی از مشکلات موجود در این قیود آن است که مقادیر مربوط به آن‌ها در یک بازه نیستند و این موضوع باعث عدم کارایی برخی از محدودیت‌های قیود می‌شود. برای حل این مشکل تمام قیود نرمالیزه می‌شوند تا مقداری بین [-1, 1] داشته باشند. در نهایت قیود مسئله که در تمام سناریوها وجود دارد عبارتند از:

قیود  $H_T/P$

$$g_1 = (H_T/P) * (1/0.9) - 1$$

$$g_2 = 1 - (H_T/P) * (1/0.05)$$

قیود  $w/P$

$$g_3 = (2B\tan\alpha + 2A)/P * (1/4) - 1$$

$$g_4 = 1 - (2B\tan\alpha + 2A)/P * (1/2)$$

قید  $A/w$

$$g_5 = A/(2B\tan\alpha + 2A) * (1/0.08) - 1$$

قیود  $L_{c-cycle}/w$

$$g_6 = (2B/\cos\alpha + 2A)/(2B\tan\alpha + 2A) * (1/9.5) - 1$$

$$g_7 = 1 - (2B/\cos\alpha + 2A)/(2B\tan\alpha + 2A) * (1/3)$$

قیود  $A/t_w$

$$g_8 = (A/t_w) * (1/2) - 1$$

$$g_9 = 1 - (A/t_w) * (1/1)$$

قید Q

که در آن  $UB$  و  $LB$  به ترتیب حد پایین و بالای متغیرهای تصمیم می‌باشد. بهترین قطرات باران به‌عنوان رود، بقیه قطرات باران جدید به‌عنوان جویبارهای جدید که به سمت رودها در جریان هستند و یا ممکن است به‌طور مستقیم به دریا برسند، در نظر گرفته می‌شود. برای افزایش سرعت همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم از رابطه (۱۸) استفاده می‌شود.

$$X_{Stream}^{new} = X_{sea} + \sqrt{\mu} \times randn(1, N_{var}) \quad (18)$$

در این رابطه،  $\mu$  ضریب بیان‌کننده نزدیک بودن به دریا و  $randn$  عدد تصادفی توزیع نرمال است. مقدار مناسب برای این ضریب در پژوهش‌های مختلف  $\mu$  برابر ۱/۰ پیشنهاد شده است (Eskandar et al., 2012). در شکل ۲ فلوجارت این الگوریتم ارائه شده است.

### الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز (IWO)

این الگوریتم برای نخستین بار توسط محرابیان و لوکاس (۲۰۰۷) با الهام گرفتن از رشد و توسعه علف‌های هرز در طبیعت معرفی گردید. بنابر تعریف موجود، علف هرز گیاهی است که در مکان‌های ناخواسته، رشد و نمو می‌نماید و برای گیاهان کشاورزی آفت جدی محسوب می‌شود و جلوی رشد آن‌ها را می‌گیرد. الگوریتم IWO در عین سادگی، در یافتن نقاط بهینه بسیار سودمند و سریع می‌باشد و براساس ویژگی‌های اولیه و طبیعی علف‌های هرز مانند تولید بذر، رشد و تنازع بقاء در یک کلونی عمل می‌نماید (Mehrabian and Lucas, 2007). مراحل انجام این الگوریتم شامل مواردی است که در ادامه ارائه شده است.

- تولید جمعیت نخستین: ابتدا یک‌سری جمعیت نخستین به‌صورت تصادفی تولید می‌گردد.
- تولید مثل: در این الگوریتم، هر عضو از جمعیت بر پایه توانایی‌هایش دانه تولید می‌کند. تعداد دانه‌هایی که توسط هر گیاه تولید می‌شود به‌گونه خطی از کم‌ترین تعداد دانه تا بیش‌ترین تعداد تغییر می‌یابد و علف هرز با سازگاری بهتر، دانه بیش‌تری طبق رابطه (۱۹) تولید می‌کند.

$$Seed_n = \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min} + S_{min}} (S_{max} - S_{min}) \quad (19)$$

که  $Seed_n$  تعداد دانه‌های تولید شده،  $f$ ،  $f_{max}$  و  $f_{min}$  به ترتیب مقدار تابع هدف در تکرار فعلی، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار تابع هدف در تکرار فعلی،  $S_{min}$  و  $S_{max}$  به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار ممکن تولید دانه می‌باشد.

$i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop}$   
برای اختصاص قطرات باران به رودها و دریا، بر اساس شدت جریان از رابطه (۱۱) استفاده می‌گردد.

$$NS_n = round \left\{ \left| \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{SR}} Cost_i} \right| \times N_{streams} \right\}, \quad (11)$$

$$n = 1, \dots, N_{SR}$$

که  $NS_n$  تعدادی جویبار بوده که به دریا جریان می‌یابد. یک جویبار تا رسیدن به دریا در امتداد خط اتصال بین آن‌ها بر اساس یک فاصله که به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود، جریان می‌یابد. این فاصله طبق رابطه (۱۲) بیان می‌شود.

$$X = \epsilon(0, C \times d), \quad C > 1 \quad (12)$$

که  $C$  عددی بین یک و دو (نزدیک به دو) دارد و بهترین مقدار برای  $C$  برابر با دو در نظر گرفته می‌شود (Eskandar et al., 2012).  $d$  فاصله فعلی بین جویبار و دریا، و مقدار  $X$  یک عدد تصادفی بین صفر و  $(C \times d)$  می‌باشد. موقعیت جدید جویبارها و رودخانه‌ها طبق روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \times (X_{River}^i \\ & - X_{Stream}^i) \\ X_{River}^{i+1} &= X_{River}^i + rand \times C \quad (14) \\ & \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \end{aligned}$$

که  $rand$  یک عدد تصادفی در بازه صفر و یک می‌باشد. اگر راه‌حل ارائه شده توسط جویبار بهتر از رودخانه باشد؛ موقعیت رودخانه و جویبار عوض می‌شود. این تبادل نیز می‌تواند به‌همین شکل برای رودخانه و دریا رخ دهد. در این الگوریتم با استفاده از فرآیند تبخیر، از به دام افتادن الگوریتم در بهینه محلی جلوگیری می‌شود، بدین صورت که تبخیر موجب بازگشت آب دریا از رودخانه‌ها و جویبارها به چرخه هیدرولوژیکی می‌گردد. در رابطه زیر چگونگی تعیین این که آیا رود به دریا می‌ریزد یا خیر را نشان می‌دهد.

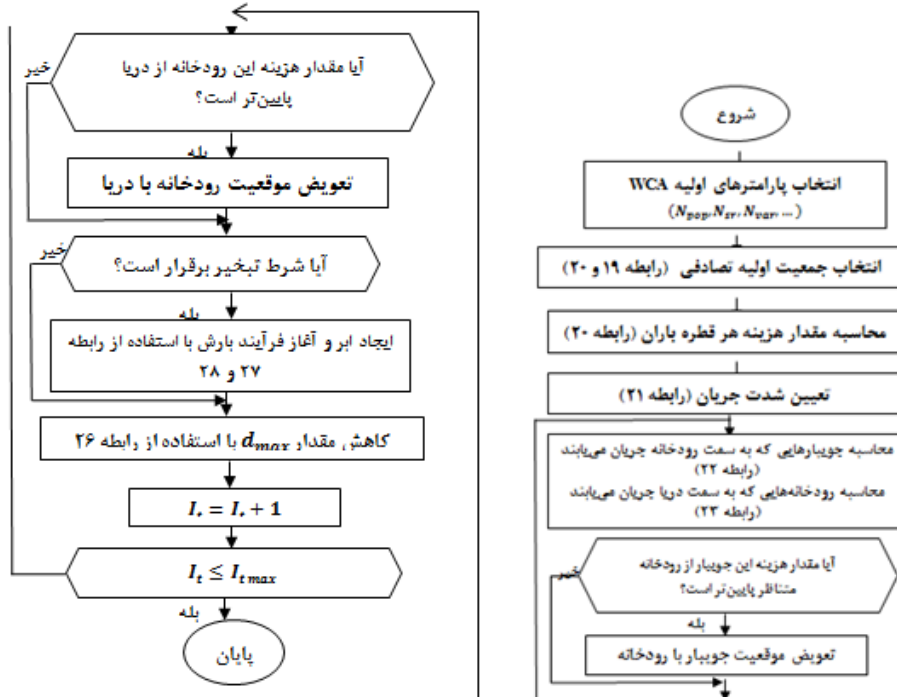
$$if |X_{Sea}^i - X_{River}^i| < d_{max}, i = 1, \dots, N_{SR} - 1 \quad (15)$$

اگر فاصله بین رود و دریا، کم‌تر از  $d_{max}$  باشد، بیان‌گر آن است که رود به دریا رسیده است. در این وضعیت، فرآیند تبخیر اثر نموده و همان گونه که در طبیعت دیده می‌شود بعد از تبخیر کافی بارش شروع می‌شود. مقدار  $d_{max}$  در هر مرحله، به‌صورت رابطه (۱۶) کاهش می‌یابد.

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{Max\ Iteration} \quad (16)$$

پس از برآورده شدن فرآیند تبخیر، فرآیند بارندگی اعمال می‌شود. در فرآیند بارندگی، قطرات باران جدید جویبارها را در مکان‌های مختلف تشکیل می‌دهند. برای این منظور از رابطه (۱۷) استفاده می‌شود (Eskandar et al., 2012).

$$X_{Stream}^{new} = LB + rand \times (UB - LB) \quad (17)$$



شکل ۲- فلوجارت بهینه‌سازی چرخه آب WCA.

این الگوریتم نشان داده شده است.

### معیارهای مقایسه

در مسائل بهینه‌سازی تک هدفه، مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس برزندگی جواب‌های به دست آمده برای تابع هدف، صورت می‌گیرد. اما در الگوریتم‌های چند هدفه، با توجه به این که دسته‌ای از پاسخ‌ها وجود دارد، استفاده از برزندگی تابع هدف به‌عنوان معیار مقایسه منطقی نمی‌باشد. از این رو برای ارزیابی کارایی و سنجش عملکرد الگوریتم‌ها، از معیارهایی نظیر معیار فاصله (رابطه ۲۲) و معیار پراکندگی (رابطه ۲۳) استفاده می‌شود که در این مطالعه نیز از آن‌ها بهره برده شده است (Premkumar et al., 2020).

$$d_i = \text{Min}_j \left( \sum_k^M |f_k^i(x) - f_k^j(x)| \right), \quad (21)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, N - 1$$

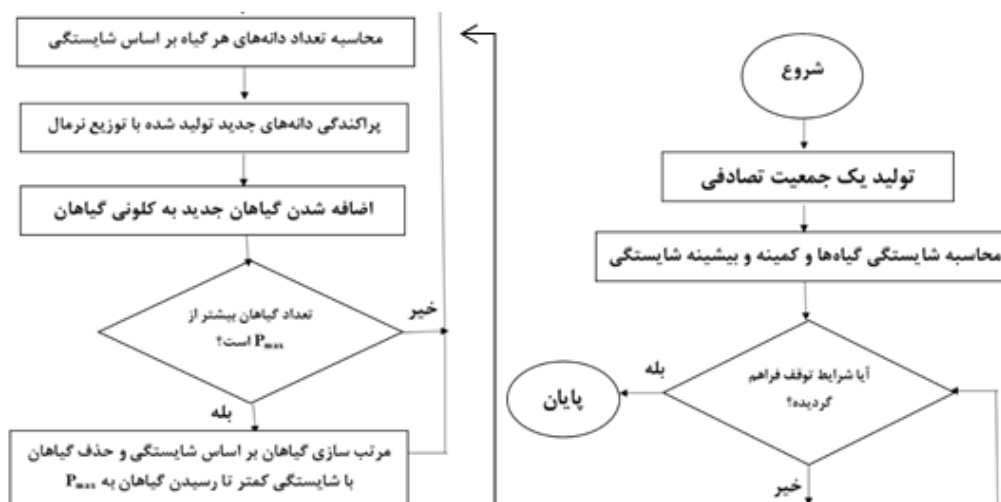
که  $f_k^i(x)$  نشان دهنده هدف  $k$ ام نقطه  $z$ ام و  $M$ ، تعداد اهداف می‌باشد. اندیس  $z$ ، شمارنده نقاط مجموعه به دست آمده می‌باشد که فاصله آن‌ها از نقطه  $z$ ام همین مجموعه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب  $d_i$  برابر است با حداقل فاصله بین نقطه  $z$ ام و سایر نقاط. سپس با استفاده از رابطه معیار  $S$  که در واقع فاصله است، به صورت رابطه (۲۲) محاسبه می‌گردد (Premkumar et al., 2020).

پراکندگی فضایی: در این مرحله، دانه‌های تولید شده به صورت تصادفی بر حسب توزیع نرمال در فضای مسئله پراکنده می‌شوند. مقدار انحراف از معیار ( $\sigma_{Iter}$ ) تابع توزیع نرمال در هر تکرار از مقدار اولیه ( $\sigma_{Init}$ ) تا مقدار نهایی ( $\sigma_{final}$ ) تعریف شده کاهش می‌یابد. این ارتباط در رابطه (۲۰) نشان داده شده است.

$$\sigma_{Iter} = \frac{(Iter_{max} - Iter)^n}{(Iter_{max})^n} (\sigma_{init} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (20)$$

که  $n$  شاخص نوسان غیرخطی می‌باشد.

حذف رقابتی: در الگوریتم IWO پس از چندین مرحله تکرار، تعداد دانه‌های کلونی در اثر تولید مثل، به بیش‌ترین مقدار خود ( $P_{max}$ ) می‌رسد و سپس سازوکاری برای حذف دانه‌های ضعیف به کار گرفته می‌شود. هنگامی که بیش‌ترین تعداد دانه‌های مجاز تولید گردید؛ هر دانه می‌تواند با توجه به روش گفته شده در مراحل پیشین، دانه‌های جدیدی تولید نماید که می‌توانند در فضای مورد بحث پراکنده شوند. هنگامی که کل دانه‌ها در محل پخش شدند؛ به هر دانه امتیازی داده می‌شود و در مرحله آخر دانه‌های با امتیاز کم‌تر حذف می‌شوند، به گونه‌ای که جمعیت دانه‌ها همان حد بیشینه بماند. این مراحل تکرار می‌شوند تا کم کم دانه‌ها به سمت بهینه همگرا شوند. در شکل ۳ فلوجارت



شکل ۳- فلوجارت بهینه‌سازی علف‌های هرز IWO.

۱۹٪ کاهش یافت. شکل ۴ نمودار همگرایی به دست آمده در پژوهش حاضر با استفاده از مدل توسعه داده شده برای طراحی سرریزهای کنگره‌ای بر روی سرریز سد UTE با استفاده از سه الگوریتم IWO، WCA و GA را نشان می‌دهد.

مقدار تابع تک هدف بهینه به دست آمده در مطالعه کاردان و همکاران (۲۰۱۶) ۷۸۳۰ مترمکعب با استفاده از GA بود. در این پژوهش نیز با استفاده از GA مقدار تابع هدف در حدود ۷۷۰۰ مترمکعب به دست آمد. این مقدار برای الگوریتم‌های IWO و WCA به ترتیب در حدود ۷۵۰۰ و ۷۴۰۰ مترمکعب است. لذا معلوم می‌گردد مدل‌های توسعه داده شده، صحیح بوده و می‌توانند منجر به حصول نتایج قابل قبولی گردند. برای بررسی‌های بیشتر، متغیرهای طراحی بهینه شده با استفاده از هر سه الگوریتم در جدول ۱ ارائه شده است که بیان‌گر نزدیکی پاسخ‌ها و دقت مدل توسعه داده شده می‌باشد.

#### مطالعه موردی: سرریز سد UTE

پس از صحت‌سنجی مدل، سرریز سد UTE برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشنهادی در طراحی چندهدفه سرریزهای کنگره‌ای انتخاب شده است. سد UTE یک سد خاکی به ارتفاع ۳۷ متر می‌باشد که ساخت آن در سال ۱۹۶۳ به اتمام رسید. این سد بر روی رودخانه Canadian در نیومکزیکوی مرکزی احداث گردیده است. سرریز اولیه این سد یک سرریز روگذر اوجی با طول ۲۵۶ متر بوده و به گونه‌ای طراحی شده بود که بتواند به منظور افزایش مخزن از سیستم کنترل دریچه‌ای در آن استفاده نماید. پس از چند سال مسئولین امر از USBR خواستند تا راه‌حلی را به منظور اصلاح سیستم موجود ارائه دهند. ارزیابی طرح‌ها نشان داد هزینه

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^P (\bar{d} - d_i)^2} \quad (22)$$

که در رابطه بالا P تعداد اعضای مجموعه به دست آمده (جبهه نامغلوب)،  $\bar{d}$  میانگین فواصلی که با استفاده از رابطه (۲۱) محاسبه شده است، می‌باشد. هرچه انحراف معیار فواصل، کم‌تر باشد توزیع جواب به دست آمده، مناسب‌تر می‌باشد. مقدار پراکندگی پاسخ‌های موجود بر روی نمودار پارتو، با استفاده از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود (Premkumar et al., 2020).

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{n} \quad (23)$$

که در آن GD فاصله نسلی،  $d_i$  برابر با حداقل فاصله بین نقطه نام و سایر نقاط است و n تعداد نقاط در جبهه می‌باشد.

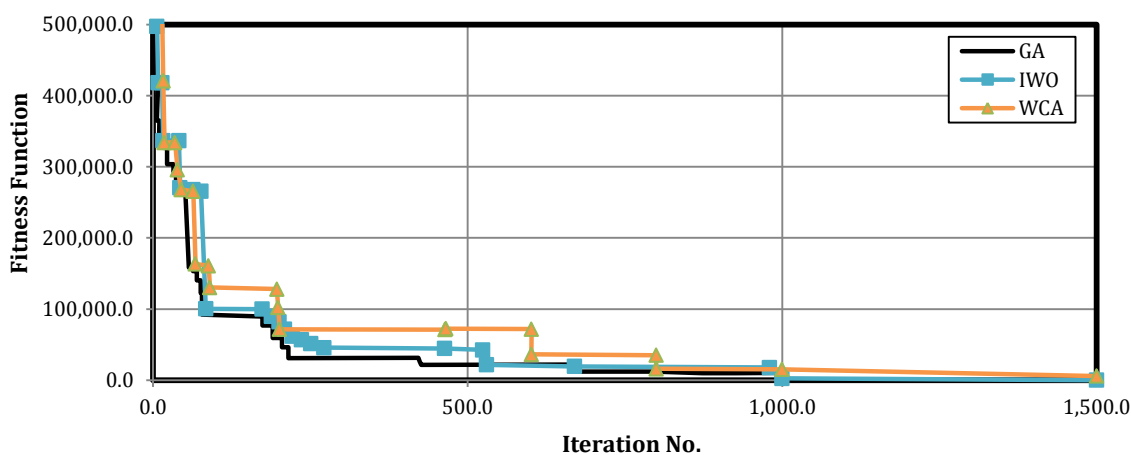
#### صحت‌سنجی مدل

برای صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده برای مدل‌سازی تک هدفه کاهش میزان بتن مصرفی در بدنه سرریز سد UTE (مطالعه موردی) در پژوهش حاضر، از اطلاعات مربوط به این سرریز که توسط کاردان و همکاران (۲۰۱۷) معرفی شده است، استفاده شد. کاردان و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای به توسعه یک مدل بهینه‌سازی با هدف کاهش حجم بدنه سرریز و در نتیجه کاهش حجم بتن مصرفی در بدنه پرداختند. در مطالعه مذکور، بهینه‌سازی با نرم افزار GA انجام یافته و میزان کاهش حجم بدنه سرریز در حالات مختلف به دست آمده است. در حالت ثابت نگه داشتن تعداد دهانه‌های سرریز نسبت به مدل اجرا شده سرریز، میزان حجم بدنه سرریز در حدود



سیکل و طول معادل ۱۰۲۴ متر ساخته شد. این سرریز که در سال ۱۹۸۳ تکمیل شد می‌تواند تحت بار هیدرولیکی ۵/۷۹ متر، سیلابی معادل ۱۵۵۷۵ متر مکعب در ثانیه را از خود عبور دهد (شکل ۵).

نصب سیستم کنترل دریچه‌ای بالغ بر ۳۴ میلیون دلار خواهد شد. پس از بررسی چند راه حل دیگر، استفاده از سرریز کنگره‌ای با هزینه ۱۰ میلیون دلار با صرفه‌ترین راه‌حل تشخیص داده شد. بدین لحاظ یک سرریز کنگره‌ای برای همان عرض کل ۲۵۶ متر به تعداد ۱۴



شکل ۴- نمودار همگرایی الگوریتم‌ها در صحت‌سنجی نتایج.

جدول ۱- مقادیر بهینه به‌دست آمده از صحت‌سنجی مدل

پارامتر	کاردان و همکاران (۲۰۱۶)	GA	WCA	IWO
عرض دهانه سرریز در هر سیکل w	۲۳/۶۵۵	۲۱/۰۱۹	۱۸/۶۷۵	۲۰/۵۷۷
طول دهانه سرریز در هر سیکل B	۳۳/۹۷۶	۳۲/۱۴۳	۳۰/۴۷۰	۳۱/۰۶۱
طول موثر سرریز $I_c$	۷۳/۵۹۱	۷۲/۲۰۳	۶۹/۱۲۱	۷۰/۵۱۱
عرض سرریز A	۱/۰۰۱	۹/۳۱۱	۷/۵۰۳	۸/۶۷۱
ارتفاع سرریز P	۷/۸۹۶	۷/۱۱۱	۶/۱۸۷	۶/۴۹۰



شکل ۵- نمای سرریز کنگره‌ای در سد UTE.

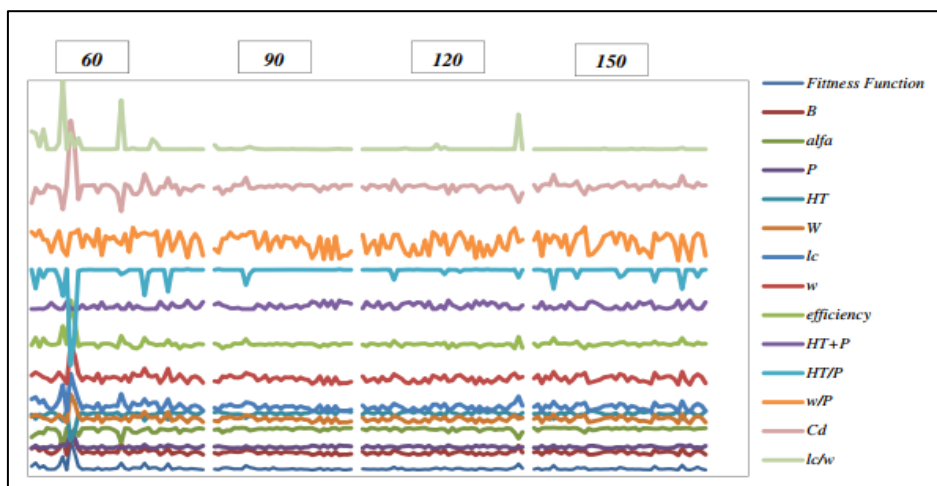
## نتایج و بحث

برای دست‌یابی به بهترین پاسخ در استفاده از الگوریتم‌های فراکوشی، تنظیم بهینه پارامترهای ثابت این الگوریتم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با تنظیم صحیح پارامترهای تنظیمی این الگوریتم‌ها، سرعت همگرایی را می‌توان افزایش داد که موجب کاهش

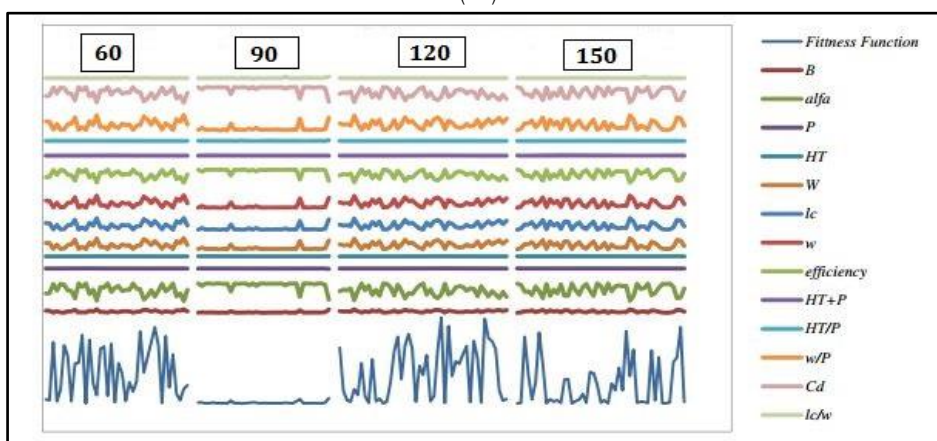
زمان محاسباتی می‌گردد. برای این منظور آنالیز حساسیت هر کدام از پارامترها انجام یافته و بهترین مقادیر حاصله برای این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. برای مقایسه صحیح بین الگوریتم‌ها، تعداد جمعیت اولیه و حداکثر تکرار هر دو الگوریتم برابر ۹۰ و ۱۵۰۰ انتخاب شد. به عنوان نمونه آنالیز حساسیت تعداد جمعیت اولیه برای الگوریتم‌های IWO و WCA در شکل ۶ آورده شده است. برای

WCA دارای برتری است. همچنین الگوریتم WCA دارای بیشترین مقدار انحراف از معیار و میانگین تکرارها بر اساس معیار GD می باشد؛ که این امر نشان می دهد الگوریتم IWO از دقت بالایی برخوردار است. مطابق معیار S نیز، مقدار میانگین در IWO، ۰/۱۰۲ و در WCA برابر ۰/۳۶۷ می باشد.

دستیابی به نتایج بهتر، هر الگوریتم ۲۰ مرتبه اجرا شد. نتایج حاصل از اجرای بهینه الگوریتمها در جداول ۲ و ۳ برای هر کدام از معیارها ارائه شده است. پس از تعیین مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتمها، مدل بهینه سازی اجرا شد. مطابق جدول ۳ مقدار پارامتر GD برای الگوریتم IWO دارای کمترین میانگین بوده و نسبت به الگوریتم



(الف)



(ب)

شکل ۶- آنالیز حساسیت پارامتر جمعیت اولیه برای (الف) الگوریتم IWO (ب) الگوریتم WCA.

جدول ۲- پارامترهای تنظیمی الگوریتمهای استفاده شده.

مقدار بهینه پارامتر	پارامتر مورد ارزیابی	الگوریتم
۰/۴	$\sigma_{init}$	IWO
$10^{-2}$	$\sigma_{final}$	
۷	$S_{max}$	
۰	$S_{min}$	
۳	شاخص نوسان غیر خطی	WCA
$10^{-16}$	$d_{max}$	
۴	$N_{SR}$	

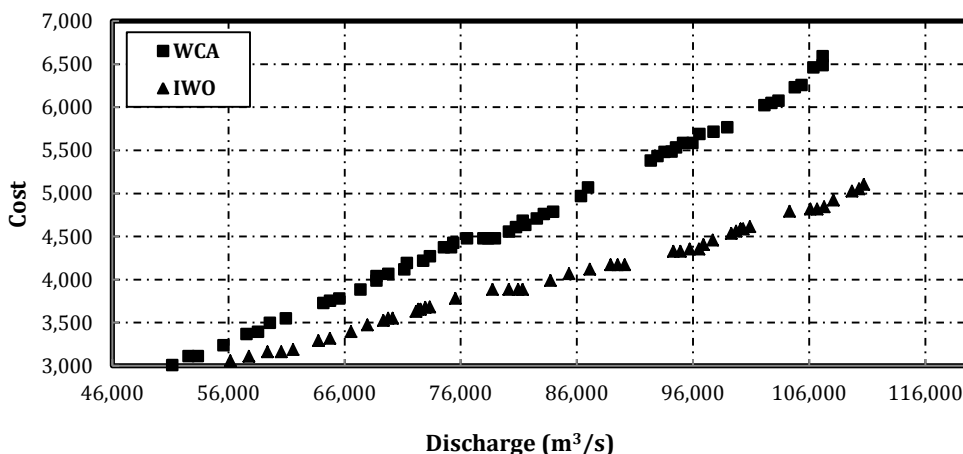
جدول ۳- نتایج کلی بهترین الگوریتم از نظر معیارهای GD و S.

معیار	الگوریتم	میانگین	میانه	بیش‌ترین	کم‌ترین	انحراف از معیار
معیار GD	WCA	۰/۱۶۷	۰/۱۴۲	۰/۳۱۱	۰/۱۰۹	۰/۰۱۵
	IWO	۰/۱۳۲	۰/۱۲۸	۰/۱۸۱	۰/۰۸۷	۰/۰۱۰
معیار S	WCA	۰/۳۶۷	۰/۰۱۱	۰/۳۶۹	۰/۰۴۸	۰/۰۱۱۴
	IWO	۰/۱۰۲	۰/۰۰۸۵	۰/۱۲۲	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸۷

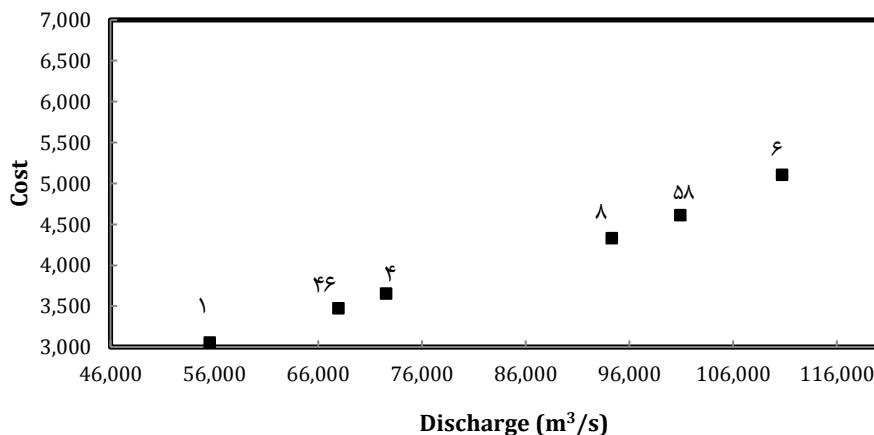
بررسی نتایج در سناریوهای مختلف

- سناریو اول (بیشینه کردن عملکرد هیدرولیکی و کمینه‌سازی هزینه ساخت سرریز با ثابت در نظر گرفتن تعداد سسیکل‌های سرریز کنگره‌ای (N))  
در این سناریو تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای (N)، ثابت در نظر گرفته شد، لیکن به دلیل محدود نبودن عرض کل سرریز (W)، با چندین بار اجرای برنامه و افزایش بازه پارامترهای طراحی، جواب مسئله همگرا نگردد.
- سناریو دوم (بیشینه کردن عملکرد هیدرولیکی و کمینه‌سازی هزینه ساخت سرریز با ثابت در نظر گرفتن ارتفاع (P) و عرض کل سرریز (W))  
در این سناریو عرض کل سرریز کنگره‌ای (W)، و ارتفاع سرریز

(P) همانند سرریز کنگره‌ای UTE بوده و ثابت در نظر گرفته شده است. متغیرهای تصمیم در این سناریو  $N, B, \alpha, A, t_w, H_T, C_d$  می‌باشند. تابع هدف در این سناریو رابطه (۲) و (۳) در نظر گرفته شده و مقدار P برابر ۹/۱۴ اعمال شد. قیود مسئله  $g_1$  تا  $g_{10}$  می‌باشد. تعداد ۹۰ عضو تابع صلاحیت نسل آخر در جبهه بهینه پارتو قرار گرفته‌اند (شکل ۷). ۶ عضو از ۹۰ عضو موجود در جبهه پارتو به روش فاصله ازدحامی انتخاب گردیدند که تنوع پاسخ‌ها در جبهه پارتو حفظ گردد و جواب یکنواخت‌تری حول ۹۰ جواب موجود رعایت گردد (شکل ۸). برخی از پارامترهای هندسی طرح پیشنهادی ۶ عضو انتخابی از جبهه پارتو و طرح موجود به شرح جدول ۴ می‌باشد.



شکل ۷- منحنی پارتو تشکیل شده از سناریوی دوم تعداد جمعیت ۹۰ برای الگوریتم‌های WCA و IWO.



شکل ۸- شش جمعیت انتخابی از ۹۰ جمعیت تابع صلاحیت نسل آخر منحنی پارتو برای الگوریتم IWO.

جدول ۴- مقایسه طرح فعلی با طرح پیشنهادی سرریز کنگره‌ای از سناریوی دوم.

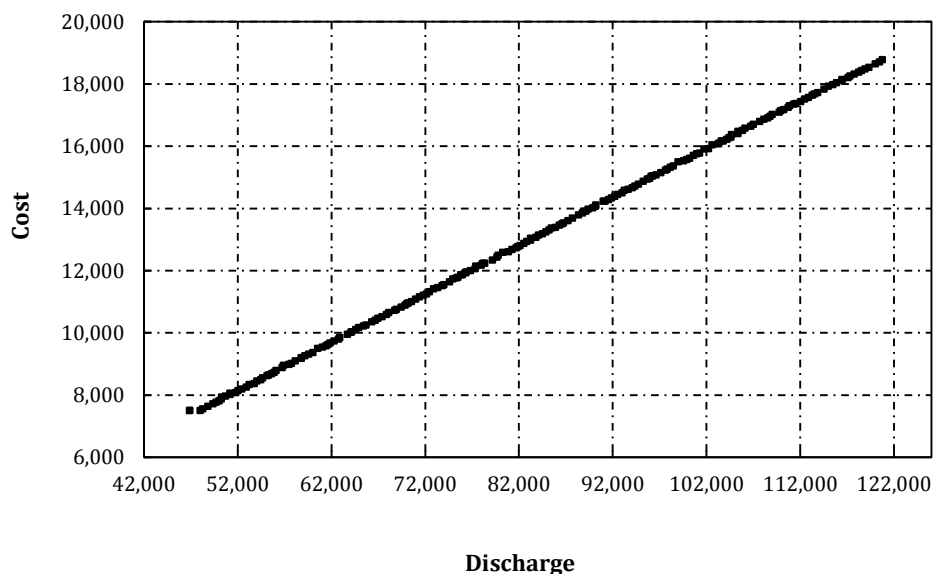
۶	۵۸	۸۱	۴	۴۶	۱	UTE	
۵۹/۹۶۳	۵۹/۱۳۴	۵۵/۴۳۰	۴۶/۲۷۱	۴۱/۵۰۶	۳۱/۹۷۹	۳۳/۹۹۰	B
۸/۱۸۳	۸/۲۷۴	۹/۴۰۵	۱۱/۱۹۶	۱۳/۴۴۸	۱۷/۱۹۲	۱۲/۱۴۷	$\alpha$
۰/۵۱۸	۰/۵۳۷	۰/۶۵۷	۰/۷۰۰	۰/۷۳۵	۰/۷۶۳	۱/۸۲۰	A
۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	P
۸/۲۲۵	۸/۲۲۲	۸/۲۲۱	۸/۲۰۱	۸/۱۹۹	۸/۱۹۰	۵/۷۹۰	$H_T$
۱۴	۱۴	۱۳	۱۳	۱۲	۱۲	۱۴	N
۲۵۵/۹۵۶	۲۵۵/۸۴۸	۲۵۵/۸۱۳	۲۵۶/۰۳۴	۲۵۵/۸۵۰	۲۵۵/۸۱۱	۲۵۵/۸۰۷	W
۱۲۲/۱۹۶	۱۲۰/۸۵۸	۱۱۳/۶۸۴	۹۵/۶۱۷	۸۶/۸۲۴	۶۸/۷۴۸	۷۳/۱۷۶	$I_c$
۱۸/۲۸۲	۱۸/۲۷۴	۱۹/۶۷۸	۱۹/۶۹۵	۲۱/۳۳۰	۲۱/۳۱۷	۱۸/۲۷۲	w
۰/۸۹۹	۰/۸۹۹	۰/۸۹۹	۰/۸۹۷	۰/۸۹۷	۰/۸۹۶	۰/۶۳۳	$H_T/P$
۲/۰۰۰	۱/۹۹۹	۲/۱۵۳	۲/۱۵۴	۲/۳۳۲	۲/۳۳۲	۱/۹۹۹	w/P
۰/۰۲۸	۰/۰۲۹	۰/۰۳۳	۰/۰۳۵	۰/۰۳۴	۰/۰۳۵	۰/۰۹۹	A/w
۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	$Q_d$
۰/۸۹۷	۰/۸۹۷	۰/۸۹۶	۰/۸۸۹	۰/۸۹۵	۰/۸۹۹	۰/۳۸۳	$C_d$
۱/۲۴۸	۱/۳۳۲	۱/۶۴۷	۱/۸۲۷	۱/۸۶۰	۱/۹۰۸	۱/۷۰۸	A/ $t_w$
۶۵۴۹/۴۱۷	۶۲۷۹/۰۸۳	۵۲۸۹/۳۸۲	۴۴۵۴/۸۷۴	۳۷۸۰/۹۶۳	۳۰۰۷/۴۲۸	۹۹۷۲/۳۵۳	f
۳۴/۳۰۰	۳۷	۴۷	۵۵/۳۰۰	۶۲/۱۰۰	۷۰	---	%
۱۰۶۸۳۵/۵۰۰	۱۰۵۴۶۲/۸۰۰	۹۲۲۶۶/۷۳۰	۷۶۵۷۷/۱۳۰	۶۴۶۷۲/۴۶۰	۵۱۱۴۷/۳۴۰	۱۶۱۸۱/۸۸۰	Q
۶/۶۰۰	۶/۵۱۰	۵/۷۰۰	۴/۷۳۰	۳/۹۹۰	۳/۱۶۰	---	Q/ $Q_{UTE}$

شکل ۷ مقایسه پاسخ بهینه بهترین جبهه پارتو الگوریتم‌ها و نیز کارایی بهتر الگوریتم IWO را به خوبی نشان داده شده است. عضو ۱ از جمعیت پارتو از لحاظ کاهش هزینه بهینه‌ترین عضو جمعیت جبهه پارتو می‌باشد، این در حالی است که طرح پیشنهادی ظرفیت عبوری مورد نظر را داشته و ظرفیت عبوری آن تقریباً ۳ برابر ظرفیت عبوری طرح کنونی سرریز UTE می‌باشد و در عین حال در حدود ۷۰ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌های اجرایی را نیز در بر دارد. عضو ۶ از جمعیت پارتو بیشترین کارایی هیدرولیکی را دارد به طوری که ظرفیت عبوری آن تقریباً ۷ برابر ظرفیت عبوری UTE می‌باشد و در عین حال در حدود ۳۴ درصد در هزینه‌های اجرایی صرفه‌جویی می‌گردد. بر حسب داده‌های جدول فوق، در سناریو ۲، همان‌طور که از ۶ جمعیت انتخابی جبهه پارتو مشاهده می‌شود با افزایش دبی و افزایش هزینه‌ها، پارامترهای  $B$ ،  $I_c$ ، روند افزایشی داشته و پارامتر  $\alpha$  روند کاهشی داشته است. پارامتر  $H_T/P$  تمایل دارد با افزایش دبی به حداکثر محدوده خود که ۰/۹ می‌باشد برسد. در جمعیت ۱ و ۶ که بهترین جمعیت تابع صلاحیت نسل آخر جبهه پارتو از لحاظ کمینه بودن هزینه ساخت و بهینه بودن کارایی هیدرولیکی می‌باشند مشاهده می‌شود که پارامتر  $B$  در کمترین هزینه حول حوش ۳۱ متر و بیشینه‌ترین ظرفیت عبوری حول ۶۰ متر اتفاق می‌افتد و پارامتر  $\alpha$  در کمترین هزینه حول ۱۷ درجه و در بیشترین ظرفیت عبوری این پارامتر حول ۸ درجه بهینه می‌شود.

- سناریوی سوم (بیشینه کردن عملکرد هیدرولیکی و کمینه‌سازی هزینه ساخت سرریز با ثابت در نظر گرفتن ارتفاع (P)، عرض کل سرریز (W)، تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای (N) و ضخامت ( $t_w$ ))  
 در این سناریو عرض کل سرریز کنگره‌ای (W)، ارتفاع سرریز (P)، ضخامت ( $t_w$ )، تعداد سیکل (N) همانند سرریز کنگره‌ای UTE بوده و ثابت در نظر گرفته شده است. متغیرهای تصمیم در این سناریو  $B$ ،  $\alpha$ ،  $C_d$  و  $H_T$  می‌باشند. مقدار P برابر ۹/۱۴، N برابر ۱۴ و  $t_w$  برابر ۱/۰۶۵ اعمال شده و قیود مسئله  $I_c$  تا  $g_{I1}$  می‌باشد. ۲۰۲ عضو تابع صلاحیت نسل آخر در جبهه بهینه پارتو قرار گرفته‌اند که در شکل ۹ نشان داده شده است. ۶ عضو از ۹۰ عضو موجود در جبهه پارتو به روش فاصله ازدحامی انتخاب گردیدند که تنوع پاسخ‌ها در جبهه پارتو حفظ گردد و جواب یکنواخت‌تری حول ۹۰ جواب موجود رعایت گردد. پارامترهای هندسی طرح پیشنهادی ۶ عضو انتخابی از جبهه پارتو و طرح موجود به شرح جدول ۵ می‌باشد.  
 عضو ۱ از جمعیت پارتو IWO از لحاظ کاهش هزینه بهینه‌ترین عضو جمعیت جبهه پارتو می‌باشد این در حالی است که طرح پیشنهادی ظرفیت عبوری مورد نظر را داشته و ظرفیت عبوری آن تقریباً ۳ برابر ظرفیت عبوری طرح کنونی سرریز UTE می‌باشد و در عین حال در حدود ۲۵ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌های اجرایی را نیز در بر دارد.

عضو ۲ از جمعیت پارتو فرانت بیشترین کارایی هیدرولیکی را دارد به طوری که ظرفیت عبوری آن تقریباً ۷ برابر ظرفیت عبوری UTE می‌باشد

می‌باشد ولی هزینه ساخت آن ۸۸ درصد بیش‌تر از هزینه ساخت طرح کنونی UTE می‌باشد.



شکل ۹- منحنی پارتو تشکیل شده از سناریوی دوم تعداد جمعیت ۹۰.

جدول ۵- مقایسه طرح موجود با طرح پیشنهادی سرریز کنگره‌ای از سناریوی سوم.

پارامتر	UTE	۱	۱۴	۱۱	۲۸	۱۵	۲
B	۳۳/۹۹۰	۲۴/۹۵۶	۳۲/۲۲۶	۴۰/۷۱۴	۴۹/۷۷۷	۵۹/۷۶۰	۶۶/۹۰۷
$\alpha$	۱۲/۱۴۷	۱۷/۲۸۱	۱۳/۸۶۷	۱۱/۰۴۶	۹/۱۲۰	۷/۵۴۷	۶/۵۳۷
A	۱/۸۲۰	۱/۳۷۳	۱/۱۸۱	۱/۱۹۶	۱/۱۸۶	۱/۲۴۶	۱/۴۶۹
P	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰	۹/۱۴۰
$t_w$	۱/۰۶۵	۱/۰۶۵	۱/۰۶۵	۱/۰۶۵	۱/۰۶۵	۱/۰۶۵	۱/۰۶۵
$H_T$	۵/۷۹۰	۸/۰۷۵	۸/۲۱۰	۸/۲۱۲	۸/۲۱۲	۸/۲۱۹	۸/۲۲۶
N	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴
W	۲۵۵/۸۰۷	۲۵۵/۸۵۸	۲۵۵/۸۳۵	۲۵۶/۰۵۳	۲۵۶/۹۸۱	۲۵۶/۵۹۱	۲۵۵/۸۳۳
$I_c$	۷۳/۱۷۶	۵۵/۰۲۰	۶۸/۷۵۰	۸۵/۳۵۹	۱۰۳/۲۰۳	۱۲۳/۰۵۷	۱۳۷/۶۳۰
$H_T/P$	۰/۶۳۳	۰/۸۸۳	۰/۸۹۸	۰/۸۹۸	۰/۸۹۸	۰/۸۹۹	۰/۹۰۰
w/P	۱/۹۹۹	۱/۹۹۹	۱/۹۹۹	۲/۰۰۱	۲/۰۰۸	۲/۰۰۵	۱/۹۹۹
A/w	۰/۰۹۹	۰/۰۷۵	۰/۰۶۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۴	۰/۰۶۸	۰/۰۸۰
$Q_d$	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰	۱۵۵۷۰
$C_d$	۰/۳۸۳	۰/۸۹۷	۰/۸۹۷	۰/۸۹۸	۰/۸۹۸	۰/۸۹۸	۰/۸۹۹
l/w	۴/۰۰۴	۳/۰۱۰	۳/۷۶۲	۴/۴۴۷	۵/۶۲۲	۶/۷۱۴	۷/۵۳۱
A/ $t_w$	۱/۷۰۸	۱/۲۸۹	۱/۱۰۹	۱/۱۲۳	۱/۱۱۴	۱/۱۶۹	۱/۳۷۹
f	۹۹۷۲/۳۵۳	۷۵۰۳/۳۴۲	۹۳۷۰/۵۷۱	۱۱۶۴۰/۰۷۰	۱۴۱۱۴/۶۵۰	۱۶۸۰۳/۶۵۰	۱۸۷۷۸/۱۶۰
%	-----	۲۴/۸۰۰	۶	۱۶/۷۰۰	۲۹/۳۴۷	۴۰/۶۵۳	۸۸/۳
Q	۱۶۱۸۱/۸۸۰	۴۶۸۶۲/۴۴۰	۶۰۰۰۴/۶۷۰	۷۴۵۹۹/۷۶۰	۹۰۲۰۹/۲۱۰	۱۰۷۶۸۳/۲۰۰	۱۲۰۷۳۶/۷۰۰
Q/ $Q_{UTE}$	-----	۲/۸۹۶	۳/۷۰۸	۴/۶۱۰	۵/۵۷۴	۶/۶۵۴	۷/۴۶۱

کاهش حجم بتن ریزی بدنه سرریز، میزان دبی عبوری نیز بین ۲ تا ۷ برابر افزایش می‌یابد.

- سناریو ۳ با بررسی مقدار بهینه برای پارامترهای بیشتری، جواب های بهینه بهتری نسبت به سناریو ۲ ارائه می‌دهد. در سناریو ۳ ظرفیت عبوری سرریز حدوداً ۳ برابر ظرفیت عبوری طرح کنونی سرریز UTE شده و در عین حال در حدود ۲۵ درصد صرفه-جویی در هزینه‌های اجرایی نیز حاصل شده است.

## منابع

اژدری مقدم، م.، امانیان، ن.ا. و جعفری ندوشن، ا. ۱۳۸۸. بهینه یابی هندسه سرریز کنگره ای مثلثی با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد Hyrum در ایالت یوتای آمریکا). نشریه مدلسازی در مهندسی. ۷(۱۹): ۵۷-۶۸.

اژدری مقدم، م. و جعفری ندوشن، ا. ۱۳۹۲. بهینه یابی هندسه سرریز کنگره ای دوزنقه ای با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد Hyrum در ایالت یوتای آمریکا). نشریه مهندسی عمران فردوسی. ۳۴(۲): ۱۲۹-۱۳۸.

اسکویی، م. ۱۳۹۳. بررسی تأثیر شیب وجه بالادست بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. مازندران، ایران.

حیدرپور، م.، موسوی، س.ف. و روشنی زرمهری، ع. ۱۳۸۵. بررسی سرریزهای چندوجهی با پلان مستطیلی و U شکل. نشریه علوم آب و خاک. ۱۰(۳): ۱-۱۲.

رضایی، م.، عمادی، ع. و آقاجانی مازندرانی، ق. ۱۳۹۴. مطالعه آزمایشگاهی سرریز کنگره ای مستطیلی. نشریه آب و خاک. ۲۹(۶): ۱۴۴۶-۱۴۳۸.

شکویی بناب، ب. ۱۳۹۱. طراحی بهینه سرریزهای کنگره ای با استفاده از الگوریتم های تکاملی، پایان نامه کارشناسی ارشد، سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

ضمیری، ا.، فرزین، س. و کرمی، ح. ۱۳۹۶. مطالعه عددی عوامل موثر بر عملکرد هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز کنگره ای. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱(۵): ۸۶۵-۸۷۵.

فردوسی، ا.، موسوی، س.ف.، فرزین، س.، کرمی، ح.، احترام، م. و ولیخن انارکی، م. ۱۳۹۷. طراحی بهینه و عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره ای با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته، نشریه

بر حسب داده‌های جدول فوق، در سناریو ۴، همان طور که از ۶ جمعیت انتخابی جبهه پارتو مشاهده می‌شود با افزایش دبی و افزایش هزینه‌ها، پارامترهای B،  $\alpha$ ، روند افزایشی داشته و پارامتر  $\alpha$  روند کاهشی در پیش گرفته است. در جمعیت ۱ و ۲ که بهترین جمعیت تابع صلاحیت نسل آخر جبهه پارتو از لحاظ کمینه بودن هزینه ساخت و بیشینه بودن کارایی هیدرولیکی می‌باشند مشاهده می‌شود که پارامتر B در کمترین هزینه تقریباً برابر ۲۵ متر و بیشینه‌ترین ظرفیت عبوری حول ۶۶ متر اتفاق می‌افتد و پارامتر  $\alpha$  در کمترین هزینه حول ۱۷ درجه و در بیش‌ترین ظرفیت عبوری این پارامتر حول ۷ درجه بهینه می‌شود. این سناریو از لحاظ تئوری قابل قبول بوده ولی از لحاظ عملیاتی، قابل اجرا نمی‌باشد.

## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک روش کاربردی برای طراحی بهینه سرریزهای کنگره‌ای ارائه شد. در رویکرد ارائه شده در مرحله طراحی علاوه بر کمینه‌نمودن هزینه‌های طراحی و احداث، بیشینه نمودن میزان دبی عبوری از روی سرریز کنگره‌ای مورد توجه قرار گرفت. در این راستا توانایی بهینه‌سازی دو الگوریتم جدید بهینه سازی علف‌های هرز IWO و الگوریتم چرخه آب WCA بررسی شده و نتایج خروجی آنها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. مدل‌ها در قالب سه سناریو مطرح شده و در هر سناریو برخی متغیرهای طراحی ثابت و در برخی دیگر به صورت متغیر در نظر گرفته شدند. در نهایت از بین سناریوهای انتخابی، بهترین سناریو به لحاظ نوع تابع هدف انتخاب و نتایج بهینه برای هندسه سرریز کنگره‌ای UTE ارائه شد. بر اساس معیارهای ارزیابی، نتایج نشان داد IWO در مقایسه با WCA دقت و سرعت بهتری برای رسیدن به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه در منحنی پارتو دارد. در خصوص روند بهینه‌سازی دو هدفه، نتایج زیر حاصل شد.

- پارامترهای ضریب گذردهی جریان و ضخامت دیوار تأثیر بسزایی در بهینه‌سازی سرریز کنگره‌ای دارند از اینرو در طراحی و بهینه سرریز کنگره‌ای باید توجه ویژه به این دو پارامتر گردد.
- با بررسی سناریوهای مختلف، با کاهش مقدار پارامترهای طول کفبند (B)، طول هر سیکل (Lc)، و طول کل تاج (Lc)، هزینه ساخت سرریز نیز کاهش می‌یابد، این در حالی است که افزایش زاویه دیواره ( $\alpha$ ) نتایج مشابهی را حاصل می‌کند.
- بیش‌ترین دبی تخلیه زمانی حاصل می‌شود که  $H_T/P$  بیش‌ترین مقدار خود را داشته باشد، یعنی با افزایش عملکرد هیدرولیکی سرریز این مقدار به  $0/9$  نزدیک می‌شود.
- با انتخاب ابعاد بهینه برای سرریز مطالعه موردی، علاوه بر

- of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 96(11): 2337-2357.
- Hosseini, K., Nodoushan, E.J., Barati, R. and Shahheydari, H. 2016. Optimal design of labyrinth spillways using meta-heuristic algorithms. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 20(1): 468- 477.
- Jafari-Asl, J., Ben Seghier, M. A., Ohadi, S. and Gelder, P.V. 2021. Efficient method using Whale Optimization Algorithm for reliability-based design optimization of labyrinth spillway. *Applied Soft Computing*. 101: 117-136.
- Kardan, N., Hassanzadeh, H. and Hakimzadeh, H. 2017. Shape optimization of trapezoidal labyrinth weirs using genetic algorithms. *Arabian Journal of Science and Engineering*. 42: 1219-1229.
- Khode, B.V., Tembhurkar, A.R., Porey, P.D. and Ingle, R.N. 2012. Experimental studies on ow over labyrinth spillway. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138(6): 548-552.
- Lux, F. 1989. Design and application of labyrinth weirs. *Design of Hydraulic Structures* 89, M. Alberson, and R. Kia, eds., Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Majedi Asl, M., Fuladpanah, M., Arun, V. and Tirpathi, R.P. (2022). Using data mining methods to improve discharge coefficient prediction in Piano Key and Labyrinth weirs. *Water Supply*, 22(2): 1964-1982.
- Mehrabian, A.R. and Lucas, C. 2007. A Novel Numerical Optimization Algorithm Inspired from Weed Colonization. *Journal of Ecological informatics*. 1(4): 355-366.
- Murphy, D.W. 1909. A reinforced-concrete spillway with concentrated crest length. *Engineering News*. 62(11): 278-279.
- Premkumar, M., Jangir, P., Sowmya, R., Alhelou, H., Heidari, A.A. and Chen, H. 2020. MOSMA: Multi-objective slime mould algorithm based on elitist non-dominated sorting. *IEEE Access*. 9: 3229-3248.
- Roushangar, K., Alami, M.T., Shiri, J. and Majedi Asl, M. 2018. Determining discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine. *Hydrology Journal*. 49(3): 924-938.
- Tullis, P., Amanian, N. and Waldron, D. 1995. Design of labyrinth weir spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 121(3): 247-255.
- Taylor, G. 1968. The performance of labyrinth weirs. Ph.D. thesis, University of Nottingham, Nottingham, England.
- Waldron, D. 1994. Design of labyrinth spillways. M.S. thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- Willmore, C. 2004. Hydraulic characteristics of labyrinth weirs. M.S. report, Utah State University, Logan, Utah.
- آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳۹۱: (۵)۱۲: ۱۰۸۶-۱۰۹۷.
- کشاوری، ت. ۱۳۹۱. مقایسه مدل دو هدفه و سه هدفه بهینه‌سازی پرتفوی با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب NSGA-II، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران.
- Bozorg Haddad, O., Mirmomeni, M. and Mariño, M.A. 2010. Optimal design of stepped spillways using the HBMO algorithm. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 81-94.
- Brinker, D. 2005. Boyd lake spillway – An innovative approach to using a labyrinth weir. *Proc. of the 2005 Dam Safety Conference, ASDSO*.
- Crookston, B.M. and Tullis, B. 2010. Hydraulic performance of labyrinth weirs. *Proc. of the Int. Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures (IJREWHS '10)*. Edinburgh, U.K.
- Crookston, B.M. 2010. Labyrinth weirs. Ph.D. Thesis, Utah state university, Logan, Utah.
- Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2012. Labyrinth weirs: Nappe interference and local submergence. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138(8): 757-765.
- Crookston, B.M and Tullis, B.P. 2013. Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: Discharge relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 139(5): 363-370.
- Darvas, L. 1971. Discussion of performance and design of labyrinth weirs, by Hay and Taylor. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 97(80): 1246-1251.
- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreinnejad, A. and Hamdi, M. 2012. Water Cycle Algorithm—A Novel metaheuristic Optimization Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems. *Journal of Computers and Structures*. 110: 151-166.
- Ferdowsi, A., Farzin, S., Mousavi, S.F. and Karami, H. 2019. Hybrid Bat & Particle Swarm Algorithm for optimization of labyrinth spillway based on half & quarter round crest shapes. *Flow Measurement and Instrumentation*. 66: 209-217.
- Ferdowsi, A., Valikhan-Anaraki, M., Mousavi, S.F., Farzin, S. and Mirjalali, S. 2021. Developing a model for multi-objective optimization of open channels and labyrinth weirs: Theory and application in Isfahan Irrigation Networks. *Flow Measurement and Instrumentation*. 80: 108-124.
- Gentilini, B. 1940. Stramazzi con cresta a planta obliqua e a zig-zag. *Memorie e Studi dell Istituto di Idraulica e Construzioni Idrauliche del Regil Politecnico di Milano*, No. 48 (in Italian).
- Hay, N. and Taylor, G. 1970. Performance and design

## Comparing the Performance of WCA and IWO Evolutionary Algorithms in Multi-Objective Optimization of Trapezoidal Labyrinth Spillways

N. Kardan<sup>1\*</sup>, T.habibi<sup>2</sup>

Received: Oct.23, 2023

Accepted: Jan.14, 2023

### Abstract

Considering the importance of designing the dam spillways in order to provide optimal dimensions while maintaining their optimal performance, an approach using weed algorithms (IWO) and water cycle (WCA) suggested to multi objective optimization of the trapezoidal labyrinth spillways. In designing the labyrinth spillways, the optimal model is to achieve a model with the highest possible flow passing through the spillway (efficiency) during flood times and the smallest possible volume, which represents the least amount of concreting and construction costs. In this regard, the effectiveness of two algorithms on the labyrinth spillway of the UTE dam investigated, and three different scenarios considered to evaluate the effect of different parameters on the results of optimization. The GD's value for the IWO algorithm is lower than the WCA ones; on the other hand, the WCA algorithm has the most value of standard deviation and average repetition based on the GD criteria. This shows that IWO algorithm has high accuracy. Based on the S criteria, the average value in IWO equals 0.102 and in WCA is 0.367, so, regarding to the criteria's values, IWA algorithm has more accuracy and convergence ratio comparing to the WCA algorithm in multi objective optimization of the labyrinth spillways. Applying the multi objective optimization method can provide a set of optimized answers for designers So that they would be able to select a suitable design in every condition and based on the defined values of costs and efficiency. In evaluating the proposed scenarios, the third one provides better optimal solutions than the second scenario by examining the optimal value for more variables. As a result, the variables of the discharge coefficient and the wall thickness have a significant effect on the optimization of the labyrinth spillways. In analyzing all of the scenarios it was revealed that reducing the value of the Leg of labyrinth weir, lead to decrease the value of weir's effective length, the total length of the crest and also the cost of the weir construction. However increasing the angle of  $\alpha$  provides similar results.

**Keywords:** Labyrinth spillways, Pareto curve, UTE dam's spillway, Weed Algorithms IWO, Water Cycle Algorithm WCA

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- M. Sc student, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

(\*- Corresponding Author Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir)