

توسعه مدل‌های ترکیبی GWO-DSO و PSO-DSO جهت بازطراحی ابعاد بهینه سرریز کنگره‌ای

محمود محمدرضا پورطبری^{۱*}معصومه هاشم‌پور^۲

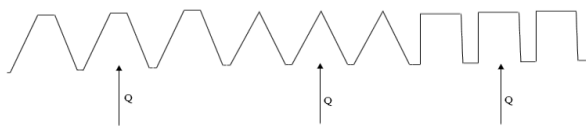
چکیده

با توجه به اهمیت بازطراحی سرریز سدها جهت ارائه ابعاد بهینه، رویکردی بر مبنای ترکیب الگوریتم‌های فراکاوشی ازدحام ذرات (PSO)، گرگ‌های خاکستری (GWO) و جستجوی مستقیم (DSO) پیشنهاد گردید. در این رویکرد حجم سرریز که بیانگر میزان بتن‌ریزی و هزینه است، به‌عنوان تابع هدف و ارتفاع و تعداد تناوب سرریز، طول دماغه و زاویه میان امتداد جریان و محور سرریز به‌عنوان متغیرهای تصمیم لحاظ شده‌اند. با اجرای مدل پیشنهادی بر اساس اطلاعات سرریز کنگره‌ای سد یوتی، ابعاد بهینه سرریز تعیین و با نتایج سایر مطالعات مقایسه گردید. نتایج بیانگر عملکرد بسیار مناسب رویکرد پیشنهادی در تولید مقادیر بهینه کلی بوده و استفاده غیرترکیبی از الگوریتم DSO با توجه به محدودیت اندازه شبکه به دلیل افزایش هزینه محاسباتی و عدم دستیابی به جواب نزدیک به بهینه محلی توصیه نمی‌شود. در روش پیشنهادی ابعاد بهینه ارائه‌شده توسط الگوریتم ترکیبی منجر به صرفه‌جویی در بتن‌ریزی و هزینه‌های آن به میزان ۶۴٪ نسبت به طراحی وضعیت موجود سد گردید. بررسی ابعاد بهینه سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای نشان‌دهنده افزایش ظرفیت دبی عبوری از سرریز به میزان ۱۵۷۶۰ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. در نهایت مقایسه ابعاد بهینه به‌دست‌آمده از دو مقطع دوزنقه‌ای و مثلثی نشان داد که بهینه‌ترین شکل برای سرریزهای کنگره‌ای، مثلثی است.

کلمات کلیدی

سرریز کنگره‌ای، بهینه‌سازی ابعاد سرریز، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم گرگ‌های خاکستری، سد یوتی

*^۱ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، mrtabari@eng.sku.ac.ir^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های هیدرولیکی و منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد



شکل (۱): به ترتیب از چپ به راست، سرریز دوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی (کروک استون، ۲۰۱۰)

مطالعات و روش‌های مختلفی جهت طراحی مناسب این نوع سرریز انجام گرفته است که به نظر می‌رسد اولین مطالعات پیرامون سرریزهای کنگره‌ای در سال ۱۹۶۸ توسط تیلور^۵ انجام گرفته باشد. این نوع سرریز در طی ۲۵ سال گذشته مورد استفاده فراوان قرار گرفته است (خوده و تمبهورکار^۶، ۲۰۱۰). در دوره حاضر نیز تمرکز بر نحوه طراحی و اجرای بهینه این نوع سرریز با در نظر گرفتن عملکرد مطلوب هیدرولیکی اهمیت یافت. به‌عنوان مثال با استفاده از روش رگرسیون آماری، منحنی مناسبی برای استنتاج مقادیر ضریب دبی جریان در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای ایجاد و باعث تشکیل رابطه‌ای برای افزایش دقت در تخمین آن گردید (قره^۷ و همکاران، ۲۰۰۸). اگرچه سرریزهای کنگره‌ای کناری لبه‌دار تیز از ضریب دبی جریان متفاوتی پیروی می‌کنند (امیروغلو^۸ و همکاران، ۲۰۱۱). نهایتاً بررسی رابطه ضریب دبی جریان با روش‌های آزمایشگاهی، حاکی از وابستگی آن به برخی پارامترهای بدون بعد سرریزهای کناری دوزنقه‌ای لبه‌دار (کلید پیانویی) می‌باشد (حدادی و رحیم‌پور^۹، ۲۰۱۲).

آیدین^{۱۰} نیز در سال ۲۰۱۲ طی مطالعاتی توانست با مدل کردن جریان سطح آزاد بر روی سرریز کنگره‌ای مستطیلی به کمک مدل حجم جریانات (VOF)^{۱۱} روشی را جهت توصیف مشخصات سطحی در جریان‌های زیربحرانی ارائه کند. همچنین استفاده از مدل‌های دینامیکی جریان (CFD)^{۱۲}، در سرریزهای کنگره‌ای کناری مستطیلی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نتایج با یکدیگر سازگاری داشته و این روش می‌تواند در سرریزهای کنگره‌ای با دقت مناسبی استفاده شود (آیدین و امیروغلو^{۱۳}، ۲۰۱۳). برای مثال در مدل‌سازی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با دو دوره تناوب با این روش، بهترین عملکرد مربوط به سرریزی

مقدمه

سرریزها از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده سد‌ها به‌شمار می‌آیند که از آن‌ها در جهت انتقال آب از سراب به پایاب استفاده می‌شود. تاکنون سرریزهای مختلفی جهت انتقال آب و متناسب با ظرفیت‌ها و شرایط توپوگرافی مختلف طراحی و اجرا شده‌اند که از آن جمله می‌توان به سرریز اوجی، لاله‌ای، سیفونی، کلید پیانو، کنگره‌ای و... اشاره کرد. همچنین این سرریزها برحسب موقعیت قرارگیری در سد نیز طبقه‌بندی می‌شوند برای مثال برخی در بدنه و برخی دیگر در خارج از آن قرار داده می‌شوند تا آب اضافی را با حداکثر راندمان منتقل نمایند. عموماً در لحظه وقوع سیلاب، سرریزهای بدنه، توانایی انتقال کامل آب را نداشته و این امر ممکن است پایداری سد را با مشکل مواجه کند، در این مواقع لازم است سرریزهای دیگری جهت کمک به فرآیند انتقال آب مورد استفاده قرار گیرند. لذا اهمیت سرریزهای خارجی دور از انتظار نبوده و لازم است سرریز مناسبی برای این امر انتخاب گردد. سرریز کنگره‌ای یا منقاری، سازی هیدرولیکی است که عموماً در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن ذخیره آب برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد (کروک استون و تالیس، ۲۰۱۲)^۱. در حالت کلی، این نوع سرریز متشکل از دیواره‌های به هم چسبیده با شکل هندسی متناوب در عرض جریان است که می‌تواند مثلثی، دوزنقه‌ای، مستطیلی و... باشد. این شکل غیرخطی و متناوب باعث تسهیل در حرکت جریان و افزایش گنجایش مخازن در جریان‌های پایه می‌شود (ورمیلتون و سوفیانی^۲، ۱۹۹۸ و ورمیلتون و تی سانگ^۳، ۲۰۰۰). همچنین استفاده از هندسه کنگره‌ای در این نوع سرریز، باعث افزایش ظرفیت انتقال جریان روی آن به ازای ارتفاع مشخصی از سطح آب موجود در بالادست می‌گردد (اژدری‌مقدم و جعفری ندوشن، ۱۳۹۲a و دارواس^۴، ۱۹۷۱). نمایی از این نوع سرریزها در شکل (۱) قابل مشاهده است.

^۷ Ghare

^۸ Emiroglu

^۹ Haddadi and Rahimpour

^{۱۰} Aydin

^{۱۱} Volume of Fluid Method

^{۱۲} Computational Fluid Dynamics

^{۱۳} Aydin and Emiroglu

^۱ Crookston

^۲ Wormleaton and Soufiani

^۳ Wormleaton and Tsang

^۴ Darvas

^۵ Taylor

^۶ Khode and Tembhurkar

همچنین در این مطالعه برخلاف روش‌های مطالعاتی پیشین، ساختار کلی سرریز کنگره‌ای (اعم از دوزنقه‌ای و مثلثی) مورد بهینه‌سازی قرار گرفت که نتایج بررسی هم‌زمان این دو نوع از سرریزهای منقاری بیانگر این است که استفاده از سرریز کنگره‌ای مثلثی به‌عنوان شکل بهینه این نوع از سرریزها پیشنهاد می‌شود. لذا در صورت استفاده از سرریز کنگره‌ای مثلثی می‌توان با بازدهی مشابه با سرریز دوزنقه‌ای، علاوه بر کاهش هزینه ساخت، میزان جریان عبوری از سرریز را نیز افزایش داد. به‌علاوه نتایج این مطالعه نشان داد در صورتی که هد آب به‌عنوان یک پارامتر ورودی در بهینه‌سازی سرریز در نظر گرفته شود و وارد متغیرهای تصمیم نشود، نتایج بهتری به نسبت مطالعات پیشین استخراج می‌شود. رویکرد ارائه‌شده در این مطالعه به‌عنوان مبنایی برای تعیین ابعاد و شکل بهینه سایر سازه‌های هیدرولیکی در جهت دستیابی به حداقل هزینه‌های ساخت و افزایش راندمان بهره‌برداری پیشنهاد می‌شود.

مواد و روش‌ها

ساختار پیشنهادی بازطراحی سرریزهای کنگره‌ای

از آنجاکه جهت بازطراحی سرریزهای کنگره‌ای نیاز به شناخت مناسب معیارها و ضوابط طراحی این نوع از سرریزها برای دستیابی به ابعاد بهینه می‌باشد، لذا ضروری است ابتدا الزامات طراحی و روابط حاکم بر آن شناسایی شده و سپس اقدام به ارائه رویکردی کارا در جهت تعیین ابعاد بهینه نمود.

الزامات طراحی سرریز کنگره‌ای

سرریز منقاری یا کنگره‌ای ضوابط ویژه‌ای برای طراحی دارند. برای انجام این منظور از ضوابط سرریز منقاره‌ای دوزنقه‌ای استفاده می‌شود که بر این اساس دارای سه مرحله اساسی است؛ لحاظ نمودن داده‌های ورودی از جمله دبی بیشینه و هد آب روی سرریز، تخمین داده‌هایی همچون دوره تناوب، ارتفاع سرریز و زاویه بین جریان آب و محور اصلی سرریز و محاسبات مرتبط با ابعاد سرریز (تولیس^{۱۱} و همکاران، ۱۹۹۵). به‌طور کلی سرریز منقاری دوزنقه‌ای دارای سطح عمود بر جریان و به شکل دوزنقه است. پلان این نوع سرریز

با زاویه ۳۰ درجه و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر بوده است (آیدین و امیروغلو، ۲۰۱۶).

از آنجایی که ساخت سرریز یکی از پرهزینه‌ترین بخش‌های اجرایی در ساخت سد می‌باشد لذا توجه به مسائل بهینه‌سازی در طراحی آن بسیار حائز اهمیت است (قره و همکاران، ۲۰۰۸ و حسینی^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). در این خصوص تاکنون الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی در جهت اجرای فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای سرریز کنگره‌ای بررسی شده است. به‌عنوان مثال استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی ژنتیک^۲ و تفاضلی^۳ بر روی سد یوتی^۴ نشان داد این الگوریتم‌ها می‌توانند هزینه‌های ساخت سرریز منقاری مثلثی را به ترتیب ۱۶/۶ و ۱۹/۳ درصد کاهش دهند (حسینی و همکاران، ۲۰۱۶). اگرچه در پژوهش دیگری با بررسی نمونه ذکر شده در حالتی که سرریز به‌صورت دوزنقه‌ای در سد بکار رفته باشد، الگوریتم ژنتیک باعث کاهش هزینه‌ها تا ۱۳/۳۴ درصد گردید (اژدری‌مقدم و جعفری ندوشن، ۱۳۹۲b). در یک بررسی جامع‌تر 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 نشان داده شد که می‌توان کل حجم بتن‌ریزی را تا ۲۱ درصد نسبت به طرح اصلی کاهش داد (کاردان^۵ و همکاران، ۲۰۱۷).

بررسی سوابق مطالعاتی قبلی بیانگر اهمیت بهینه نمودن ابعاد و شکل سرریزهای کنگره‌ای با توجه به محدودیت‌های هیدرولیکی این سازه می‌باشد. بر این اساس در این مطالعه با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های فراکاوشی گرگ خاکستری (GWO)^۶ و ازدحام ذرات (PSO)^۷ با الگوریتم فراکاوشی جستجوی مستقیم (DSO)^۸ اقدام به تعریف توابع هدف و محدودیت‌ها جهت بازطراحی ابعاد سرریز کنگره‌ای سد یوتی و مقایسه آن با ابعاد بهینه ارائه‌شده توسط محققین پیشین گردید. در واقع در رویکرد پیشنهادی از مزایای الگوریتم‌های PSO و GWO در دستیابی به مقادیر بهینه محلی^۹ با سرعت بالا و ترکیب آن با الگوریتم DSO دریافتن مقادیر نزدیک به بهینه کلی (NGS)^{۱۰} به‌صورت هم‌زمان استفاده شده است.

^۷ Particle swarm optimization

^۸ Direct Search Optimization

^۹ Local solution

^{۱۰} Near to global solution

^{۱۱} Tullis

^۱ Hosseini

^۲ Genetic algorithm

^۳ Differential algorithm

^۴ Ute

^۵ Kardan

^۶ Grey Wolf Optimization

در این تابع مقدار عرض سرریز در یک تناوب از رابطه (۴) محاسبه می‌شود که در سیستم SI واحد آن متر است.

$$w = 2L_1 \sin(\alpha) + A + D \quad (۴)$$

پارامترهای رابطه (۴) به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$L_1 = (B - T_w) / \cos(\alpha) \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، B عرض سرریز در امتداد جریان (موازی با آن) و بر اساس واحد طول (متر) بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$B = \left[\frac{L}{2N} + T_w \tan\left(45 - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \cos(\alpha) + T_w \quad (۶)$$

در این رابطه L طول مؤثر تاج (برحسب متر) است و از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$L = 1.5Q / [(C_d H_t^{1.5})(2g)^{0.5}] \quad (۷)$$

طول دیواره عمود بر جریان (عرض خارجی دماغه) نیز به صورت رابطه (۸) خواهد بود:

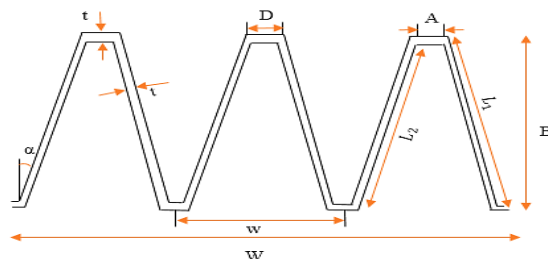
$$D = A + 2T_w \tan(45 - \alpha/2) \quad (۸)$$

زاویه جریان آب و محور سرریز در نظر گرفته شده در این مطالعه بین ۶ تا ۱۸ درجه می‌باشد. از آنجایی که انحراف استاندارد بین مقدار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای زوایای بین ۶ تا ۱۸ درجه کمتر از $\pm 3\%$ می‌باشد و همچنین بیشینه اختلاف نیز در این حالت حدوداً $\pm 6\%$ است، لذا در این حالت اگر مقدار نسبت هد آب به ارتفاع سرریز در محدوده مناسب یعنی بین ۰/۱ تا ۰/۹ باشد، دقت کافی در محاسبات وجود داشته و می‌توان از روابط موجود در مطالعات تولیس و همکاران (۱۹۹۵) برای ضریب دبی جریان استفاده نمود.

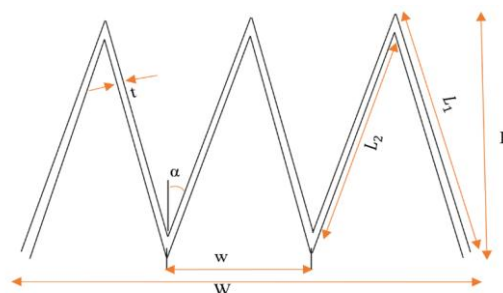
ساختار ریاضی تابع هدف و محدودیت‌های رویکرد پیشنهادی

در این مطالعه، هدف رویکردی جهت تعیین ابعاد بهینه سرریز منقاری دوزنقه‌ای با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های PSO و GWO با الگوریتم DSO، جهت حداقل نمودن هزینه ساخت سرریز با توجه به حجم بتن‌ریزی می‌باشد. برای این منظور با توجه به روابط حاکم بر طراحی سرریزهای منقاری، توابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی پیشنهادی تدوین گردید. مجهولات این مدل پیشنهادی که همان متغیرهای تصمیم مسئله می‌باشند و لازم است توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی تعیین شوند، عبارتند از: ارتفاع سرریز (P) (که در بازه ۱۰-۵ تغییر می‌کند و می‌تواند

در شکل (۲) ارائه شده است. سرریز منقاری مثلثی نیز مشابه سرریز منقاری دوزنقه‌ای بوده با این تفاوت که به علت مثلثی بودن سطح عمود بر جریان، پارامترهای A و D حذف می‌شوند (شکل (۳)).



شکل (۲): پلان سرریز منقاری دوزنقه‌ای



شکل (۳): پلان سرریز منقاری مثلثی

معادله دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای

به صورت کلی، معادله عمومی سرریز منقاری به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_3 \sqrt{2g} H_t^{1.5} \quad (۱)$$

که در آن Q دبی جریان برحسب مترمکعب بر ثانیه، C_d ضریب دبی جریان (بدون بعد) و H_t هد کل روی تاج سرریز (متر) است. همچنین L_3 طول کل دیواره‌های سرریز (متر) است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$L_3 = N(2L_1 + D + A) \quad (۲)$$

در این رابطه L_1 طول واقعی پایه کناری و D طول دیواره عمود بر جریان است که هر دو برحسب متر می‌باشند. ضریب دبی سرریز یک پارامتر بدون بعد است که مقادیر آن از طریق مدل‌سازی آزمایشگاهی تعیین می‌شود. این پارامتر تابعی از هد کل (H_t)، عرض سرریز در یک تناوب (w)، ضخامت دیواره (T_w)، ارتفاع سرریز (P)، زاویه جریان آب و محور سرریز (α)، طول دماغه (A) و شکل سرریز است (حسینی و همکاران، ۲۰۱۶ و سیمونز، ۲۰۱۴).

$$C_d = f(H_t, P, T_w, w, A, \alpha) \quad (۳)$$

$$V_s = (B + 2H_t) \times W \times T_s \quad (12)$$

که در رابطه بالا V_t حجم کل سرریز (مترمکعب)، V_w حجم دیواره (مترمکعب)، V_e حجم دیواره هد (مترمکعب) و V_s حجم دال بتنی (مترمکعب) است. همچنین F_b ، سطح آزاد جریان (متر) بوده که در این مطالعه، $0/6$ فرض می شود. W نیز عرض کل سرریز (برحسب متر) است و برابر است با:

$$W = N \cdot w \quad (13)$$

مقدار ضخامت دال یعنی T_s (متر) نیز در این مطالعه برابر با $0/3$ در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است که ضخامت پایه یا T_w (متر) در این مطالعه $0/5$ فرض شده و شکل آن به صورت نیم دایره می باشد. شکل های نیم دایره و ربع دایره در پایه سرریزهای منقاری، حالات متداولی هستند و در محدوده $0/05$ تا 1 برای نسب هد کل به ارتفاع سرریز و زاویه 6 تا 35 درجه آزموده شده اند (تولیس^۱ و همکاران، ۱۹۹۵). پارامترهای مؤثر در هندسه سرریز منقاری جهت محاسبه احجام سرریز در شکل (۴) نشان داده شده است.

به صورت اعشاری باشد)، سطح عمود بر جریان (A) (در بازه ۰-۲ متر متغیر بوده و می تواند غیر صحیح باشد)، زاویه میان امتداد جریان و محور سرریز (α) (با توجه به روابط تجربی مورداستفاده برای محاسبه ضریب دبی سرریز، این پارامتر می تواند مقادیر ۱۸-۶ درجه را در فرآیند بهینه سازی اتخاذ نماید) و تعداد تناوب سرریز (N) (بازه ۲۰-۱۰ سیکل برای این متغیر در نظر گرفته شده و به صورت عدد صحیح می باشد).

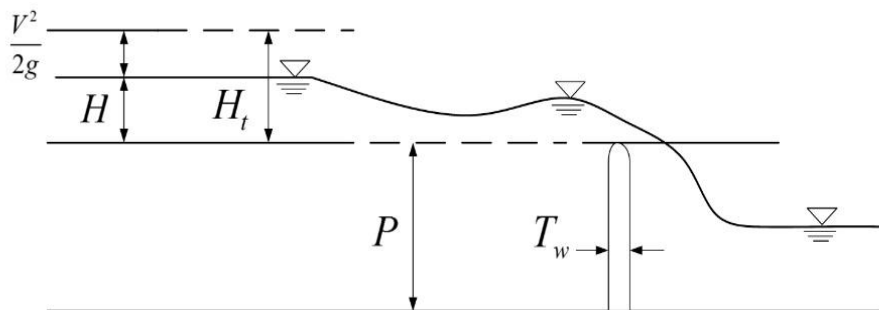
تابع هدف

از آنجاکه حجم کل بتن ریزی سرریز از مجموع حجم دیواره سرریز، حجم مرتبط با هد دیواره و حجم دال بتنی به دست می آید، لذا تابع هدف پیشنهادی به صورت ریاضی زیر در نظر گرفته شده است:

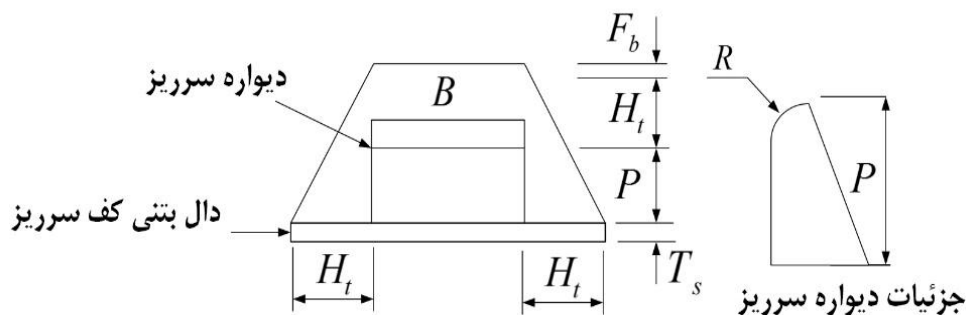
$$V_t = V_w + V_e + V_s \quad (9)$$

$$V_w = L_3 P T_w \quad (10)$$

$$V_e = 2 \times (P + H_t + F_b) \times (B + H_t) \times T_w \quad (11)$$



الف- مقطع طولی



ب- مقطع عرضی

شکل (۴): مشخصات هندسی سرریز منقاری (حسینی و همکاران، ۲۰۱۶)

محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی

جهت تعیین ابعاد بهینه سرریز منقاری می‌باید الزامات و محدودیت‌های هیدرولیکی مرتبط با این سرریز به نحوه مناسبی در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ گردد. بر این اساس این محدودیت‌ها را می‌توان در پارامترهای زیر تعریف نمود:

طول تداخلی^۱

ایندلکوفر و روو^۲ (۱۹۷۵) با بررسی سرریزهای منقاری به مفهومی با عنوان طول تداخلی دست‌یافتند. طول تداخلی می‌تواند با افزایش عمق آب، افزایش یابد. نسبت طول تداخلی به طول واقعی بازوهای سرریز مطابق رابطه زیر به ۰/۳ محدود می‌شود (حسینی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$\frac{L_{de}}{L_1} = \frac{H_t}{L_1} \times 6.1 \times e^{-0.052\alpha} \leq 0.3 \quad (14)$$

نسبت هد کل به ارتفاع سرریز

با توجه به اینکه ضریب دبی جریان در سرریزهای منقاری با افزایش هد کل آب روی سرریز، کاهش می‌یابد، لذا لازم است جهت افزایش عملکرد سرریز منقاری در طی فرآیند بهینه‌سازی این نسبت مطابق با نظریه تولیس و همکاران (۱۹۹۵) به مقدار ۰/۹ محدود شود، زیرا سرریز منقاری با افزایش هد آب به شدت ناکارآمد خواهد شد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۶. کاردان و همکاران، ۲۰۱۷، کروک استون و تولیس^۳، ۲۰۱۲). لازم به ذکر است حداقل مقدار این نسبت به جهت برآورده شدن دقت کافی محاسبات، ۰/۱ توصیه شده است (تولیس و همکاران، ۱۹۹۵)

$$0.1 < \frac{H_t}{P} < 0.9 \quad (15)$$

نسبت عرض سرریز به ارتفاع سرریز

این نسبت که بیانگر نسبت عرض سرریز در هر تناوب به ارتفاع سرریز می‌باشد، با کاهش خود می‌تواند منجر به کاهش ضریب دبی جریان در سرریز شود. مطابق مطالعه تیلور (۱۹۶۸)، جهت کاهش آشفتگی جریان در سرریزهای منقاری بهتر است این نسبت بیش از ۲ باشد. همچنین مطالعات لاکس و هینچلیف^۴ (۱۹۸۵) نشان می‌دهد که برای اهداف طراحی، این نسبت می‌توان برای سرریزهای مثلثی و دوزنقه‌ای به ترتیب برابر با ۲ و ۲/۵ در نظر گرفته شود. بررسی‌های تولیس و همکاران (۱۹۹۵) بیانگر این است که حداقل مقدار ۳ برای این نسبت می‌تواند منجر به طراحی

اقتصادی‌تر و از نظر هیدرولیکی مناسب‌تر گردد. حد بالای این نسبت نیز مطابق مطالعات لاکس^۵ (۱۹۸۹) برابر با ۴ پیشنهاد می‌شود.

$$3 \leq \frac{w}{p} \leq 4 \quad (16)$$

نسبت طول سرریز به عرض

با توجه به مطالعه تولیس و همکاران (۱۹۹۵)، جهت عملکرد بهینه سرریزهای منقاری لازم است نسبت طول سرریز به عرض آن به مقدار ۹/۵ محدود شود.

$$\frac{L_3}{W} < 9.5 \quad (17)$$

نسبت طول دماغه به عرض سرریز

مقدار طول دماغه بر روی ظرفیت سرریز اثرگذار است. افزایش این مقدار باعث کاهش طول خالص سرریز و کاهش ظرفیت آن می‌شود. این پارامتر باعث تسهیل فرآیند ساخت کنگره‌های بتنی سرریز منقاری می‌شود و لذا نقش بسیار مؤثری را در فرآیند بهینه‌سازی سرریز ایفا نمی‌کند (کروک استون، ۲۰۱۰) در این حالت نسبت طول دماغه به عرض سرریز به مقدار ۰/۰۸ محدود می‌شود. لازم به ذکر است که برای سرریز مثلثی به علت عدم وجود سطح عمود بر جریان، این نسبت صفر خواهد شد و بررسی نمی‌گردد (کاردان و همکاران، ۲۰۱۷ و تولیس و همکاران، ۱۹۹۵)

$$\frac{A}{w} \leq 0.08 \quad (18)$$

طول دماغه

جهت استفاده از روابط ۹ تا ۱۳ لازم است حداقل طول دماغه برابر با P/6 و حداکثر برابر با دو برابر آن باشد (تولیس و همکاران، ۱۹۹۵)

$$P/6 \leq A \leq 2P/6 \quad (19)$$

زاویه میان جریان و محور سرریز

این زاویه مطابق با نظریه تولیس و همکاران (۱۹۹۵) بین ۶ تا ۱۸ درجه در نظر گرفته شده است.

محدودیت دبی طراحی

در این محدودیت، مقدار دبی عبوری از روی سرریز که توسط رابطه ۱ محاسبه می‌شود می‌بایست بزرگ‌تر و یا مساوی حداکثر دبی سیلاب محتمل عبوری از روی سرریز منقاری، دبی طراحی (Q_d)، باشد:

^۴ Lux and Hinchliff

^۵ Lux

^۱ Interference Length

^۲ Indlekofer and Rouve

^۳ Crookston and Tullis

$$\frac{2}{3} C_d L_3 \sqrt{2gH_t^{1.5}} \geq Q_d \quad (20)$$

مطالعه موردی

جهت ارزیابی عملکرد رویکرد پیشنهادی جهت تعیین ابعاد و شکل بهینه سرریز کنگره‌ای، در این مطالعه از اطلاعات سرریز منقاری سد یوتی که بر روی رودخانه کانادین^۱ و در ۳/۲ کیلومتری لوگان نیومکزیکو^۲ واقع شده است، استفاده گردید. این سد دارای ارتفاع ۳۰ متر و طول تاج ۱۹۹۰ متر است که ساخت آن در سال ۱۹۶۲ به اتمام رسید. از لحاظ سازه‌ای این سد بزرگ‌ترین سرریز کنگره‌ای را در آمریکا داراست. این سرریز دارای طول ۱۰۲۴ متر، ۱۴ تناوب و عرض کل ۲۵۶ متر قابلیت آن را دارد که تحت بار هیدرولیکی ۵/۷۹ متر، سیلاب با دبی ۱۵۵۷۴ مترمکعب بر ثانیه را از خود عبور دهد. از منظر اقتصادی این سرریز با هزینه ۱۰ میلیون دلاری، باصرفه‌ترین سرریز پیشنهادی سد یوتی شناخته شده است (هوستون^۳، ۱۹۸۲).

ساختار مدل بهینه‌سازی ترکیبی پیشنهادی

با توجه به اینکه دستیابی به جواب بهینه سراسری در مدل‌هایی که در آن‌ها از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، لذا در این مطالعه بر پایه آخرین الگوریتم‌های فراکاوشی که از قابلیت‌های بالایی در ارائه جواب بهینه سراسری برخوردار می‌باشند اقدام به تولید الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی گردید. برای این منظور و با توجه به بررسی سوابق مطالعاتی قبلی، ساختاری بر پایه الگوریتم‌های PSO و GWO که از توانایی بالایی در ارائه جواب‌های محلی نزدیک به بهینه سراسری برخوردار می‌باشند به صورت ترکیب با الگوریتم جستجوی مستقیم DSO، جهت هدایت جواب‌های محلی تعیین شده به سمت جواب‌های بهینه سراسری توسعه داده شد. به‌طور کلی هدف ارائه رویکرد ترکیبی، بهبود مقادیر بهینه تولیدی توسط دو الگوریتم PSO و GWO و ارائه مقدار بهینه نزدیک به بهینه کلی با اطمینان زیاد می‌باشد. از آنجاکه در رویکرد پیشنهادی تعداد فراوانی محدودیت ارائه شده است، الگوریتم DSO به‌تنهایی قادر به تخمین صحیح مقدار بهینه نزدیک به بهینه کلی نبوده و در صورت استفاده منجر به

افزایش هزینه محاسباتی^۴ و عدم ارائه جواب بهینه مطلوب خواهد شد. نکته قابل توجه اینکه اجرای غیر ترکیبی الگوریتم DSO، زمان‌بر بوده و ممکن است منجر به تولید جواب NGS نشود. به عبارت دیگر در صورتی که بهترین جواب تولیدی توسط الگوریتم‌های PSO و GWO به‌عنوان جواب اولیه الگوریتم DSO مورد استفاده قرار گیرد می‌تواند منجر به تولید جواب NGS گردد که کاهش زمان دستیابی به مقدار بهینه را به دنبال دارد. در واقع استفاده از مزایای الگوریتم‌های فراکاوشی در قالب الگوریتم ترکیبی برای هر تعداد متغیر تصمیم می‌تواند در استخراج مقادیر بهینه کلی بسیار مؤثر باشد. در این بخش جزئیات ساختار پیشنهادی تشریح می‌گردد.

ساختار مدل ترکیبی PSO-DSO

با توجه کاربرد وسیع الگوریتم فراکاوشی PSO در ارائه مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر در موضوعات منابع آب، در این مطالعه نیز از این الگوریتم جهت تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مرتبط با مدل غیرخطی پیشنهادی ماسکینگام استفاده گردید. از آنجاکه این الگوریتم جواب‌های NGS را ارائه می‌نماید، مقادیر بهینه به‌دست آمده از این الگوریتم وارد الگوریتم فراکاوشی دیگری تحت عنوان DSO گردید. در واقع در الگوریتم DSO فضای جستجوی در اطراف بهترین جواب تولیدی با دقت بیشتری جهت یافتن مقدار بهینه‌تر بررسی می‌شود. با انجام این عمل می‌توان با احتمال بسیار بالایی بیان نمود که جواب بهینه به‌دست آمده همان جواب بهینه کلی است. جزئیات مرتبط با نحوه عملکرد الگوریتم PSO و DSO را به ترتیب می‌توان در مطالعات محمدرضا پور طبری^۵ (۲۰۱۶) و چو و چانگ^۶ (۲۰۰۹) یافت.

ساختار مدل ترکیبی GWO-DSO

گرگ‌های خاکستری از جمله حیوانات از گروه سگ‌سانان می‌باشند که با توجه به عدم وجود شکارچی طبیعی برای این نوع از حیوانات به‌عنوان بالاترین سطح شکار چپان در نظر گرفته می‌شوند. این حیوانات معمولاً به‌صورت گروهی و در گله‌های ۵ تا ۱۲ تایی زندگی می‌کنند. در هر گله ۴ رتبه

^۴ Computational cost

^۵ Mohammad Rezapour Tabari

^۶ Chu and Chang

^۱ Canadian river

^۲ Logan, New Mexico

^۳ Houston

اولین گام در الگوریتم GWO، تعیین نقاط اطراف طعمه و فرآیند حلقه زدن می‌باشد که به صورت روابط ریاضی زیر بیان می‌گردد (میرجلالی^۲ و همکاران، ۲۰۱۴):

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_p(t) - \bar{X}(t)| \quad (21)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_p(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (22)$$

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r}_1 - \bar{a} \quad (23)$$

$$\bar{C} = 2\bar{r}_2 \quad (24)$$

$$\bar{a} = 2 - (t \times 2/N) \quad (25)$$

در این روابط t شماره تکرار، N تعداد کل تکرارهای موردنیاز در فرآیند بهینه‌سازی، \bar{A} و \bar{C} بردارهای ضریب، $\bar{X}_p(t)$ بردار موقعیت شکار در تکرار t ام و $\bar{X}(t)$ بردار موقعیت هر یک از گرگ‌های خاکستری (گرگ‌های رده امگا) در تکرار t ام است. همچنین مؤلفه‌های \bar{a} نیز به صورت خطی و در طی تکرارهای متوالی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابند و \bar{r}_1 و \bar{r}_2 بردارهای تصادفی می‌باشند که در بازه ۰-۱ قرار دارند. بردار \bar{C} یکی از پارامترهایی است که در فرآیند جستجوی شکار بسیار مؤثر می‌باشد. این بردار بین ۰ و ۲ بوده و به عنوان موانع موجود در طبیعت که نزدیک شدن گرگ‌ها به شکار را کند می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. این بردار به شکار وزن داده و آن را برای گرگ‌ها غیرقابل دستیابی تر (برای $C > 1$) و یا آشکارتر (برای $C < 1$) می‌کند. این بردار برخلاف بردار \bar{a} به صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش نمی‌یابد. این پارامتر در ایجاد رفتار تصادفی گرگ‌ها در فرآیند بهینه‌سازی و جلوگیری از تولید جواب‌های محلی نقش زیادی را ایفا می‌نماید.

بر مبنای روابط ۲۱ تا ۲۵ می‌توان موقعیت هر یک از گرگ‌های خاکستری را نسبت به موقعیت طعمه بروز کرده و در جهت دستیابی به طعمه بهبود داد. از آنجاکه در جستجوی اولیه هیچ ایده‌ای در مورد موقعیت شکار وجود ندارد، با توجه به توانایی گرگ‌های خاکستری آلفا، بتا و دلتا در تخمین موقعیت شکار، ابتدا فرض می‌شود که این گرگ‌ها دانش اولیه بهتری در خصوص موقعیت شکار دارند. بر این اساس سایر گرگ‌ها مجبور به تغییر موقعیت خود بر اساس موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا و با توجه به روابط زیر خواهند شد:

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (26)$$

اصلی وجود دارد که در بین آن‌ها، سلسله‌مراتب اجتماعی بسیار سخت‌گیرانه‌ای حاکم می‌باشد؛ که این سلسله‌مراتب به صورت زیر است:

- گرگ‌های رهبر یا آلفا (α): مدیریت و رهبری گله
- گرگ‌های مشاور یا هماهنگ‌کننده یا بتا (β): کمک به گرگ آلفا در فرآیند تصمیم‌گیری و جایگزین گرگ آلفا پس از مرگ یا پیری آن‌ها
- پایین‌ترین رده و سپر دفاعی یا گرگ‌های امگا (ω): به‌عنوان سپر دفاعی گروه عمل کرده و همیشه مجبور به پیوستن به گرگ‌های رده بالاتر می‌باشند. این گرگ‌ها کمترین حق را نسبت به بقیه اعضای گروه دارند.
- گرگ‌های فرمان‌بردار یا دلتا (δ): از رده‌های آلفا و بتا پیروی نموده و بر گرگ‌های امگا غالب هستند. عضوهای مهم گروه نظیر پیشاهنگ، دیده‌بانان، بزرگان، شکارچیان و مراقبان به این دسته تعلق دارند. گرگ‌های پیشاهنگ وظیفه اطلاع‌رسانی گروه، دیده‌بانان از گروه حفاظت کرده و بزرگان، گرگ‌های باتجربه‌ای هستند که قابلیت حضور در رده‌های آلفا و بتا را دارند. شکارچیان به رده‌های آلفا و بتا در فراهم نمودن غذا کمک کرده و مراقبان مسئولیت نگهداری از گرگ‌های را بر عهده دارند (میرجلالی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). فرآیند شکار گرگ‌های خاکستری را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب و نزدیک شدن به طعمه
- دنبال کردن و نزدیک شدن به طعمه، محاصره و احاطه کردن به دور شکار و آزار و اذیت و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت بازماند
- حمله به سمت طعمه

جهت مدل‌سازی ریاضی الگوریتم شکار گرگ‌های خاکستری، ابتدا جمعیت تصادفی از راه‌حل‌ها (شامل متغیرهای تصمیم و مقدار تابع هدف) تولید می‌شود. بهترین راه‌حل از این جمعیت به‌عنوان گرگ آلفا و دومین و سومین جواب برتر از این جمعیت به‌عنوان گرگ‌های بتا و دلتا در نظر گرفته می‌شوند. سایر راه‌حل‌های باقیمانده نیز به‌عنوان گرگ‌های امگا در نظر گرفته می‌شوند. در واقع الگوریتم GWO با استفاده از این سه جواب به سمت شکار حرکت می‌نماید جواب‌های امگا نیز از آن تبعیت می‌نمایند.

با توجه به محتمل بودن جواب نهایی به دست آمده از الگوریتم GWO به عنوان جواب بهینه محلی، در این مطالعه مقدار بهینه به دست آمده از این الگوریتم وارد الگوریتم فراکاشی DSO می شود. ساختار ترکیبی الگوریتم GWO-DSO پیشنهادی در شکل (۵) ارائه شده است.

ارائه نتایج

بر مبنای ساختار پیشنهادی جهت تعیین شکل و ابعاد بهینه سرریزهای کنگره‌ای، ساختار ریاضی توابع هدف و محدودیت‌های توسعه داده شده در محیط نرم افزار MATLAB2016a کدنویسی گردید. با اجرای کد تهیه شده برای الگوریتم‌های PSO، DSO و GWO مقدار بهینه متغیرهای تصمیم برای سرریزهای منقاری ذوزنقه‌ای و مثلثی تعیین گردید سپس در اجرای الگوریتم‌های ترکیبی PSO-DSO و GWO-DSO، از مقادیر بهینه الگوریتم‌های PSO و GWO به عنوان مقادیر اولیه استفاده گردید. جهت بهینه‌سازی رویکرد پیشنهادی، در الگوریتم PSO، پارامترهای C_1, C_2 به ترتیب برابر با $1/5$ و $2/5$ در نظر گرفته شد. همچنین پارامترهای اینرسی و تعداد ذره نیز بر اساس روش سعی و خطا به ترتیب برابر با 3 و 35 در مدل اعمال گردید. در الگوریتم GWO نیز لازم است تنها تعداد گرگ‌ها امگا که برابر با 50 در نظر گرفته شده است، به مدل معرفی گردد. لازم به ذکر است برای هر دو الگوریتم بهینه‌ساز، 500 تکرار جهت دستیابی به مقدار بهینه در نظر گرفته شد. روند دستیابی به مقدار بهینه توسط ترکیب الگوریتم‌های فراکاشی در شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم PSO-DSO و GWO-DSO به ترتیب مقادیر بهینه $12349/6$ و $12353/05$ مترمکعب دست یافتند. با توجه به اختلاف اندک این دو مقدار می‌توان بیان نمود که در فضای محدودیت‌های تعریف شده، جواب‌های تولیدی، مقادیر بهینه کلی می‌باشند. مقایسه تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف و مدت‌زمان دستیابی به جواب بهینه توسط این دو الگوریتم ترکیبی نشان می‌دهد که الگوریتم GWO-DSO مشابه الگوریتم GWO، علی‌رغم جستجوی بیشتر فضای موجه، در یک‌سوم زمان همگرایی الگوریتم

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \quad \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t)| \quad (27)$$

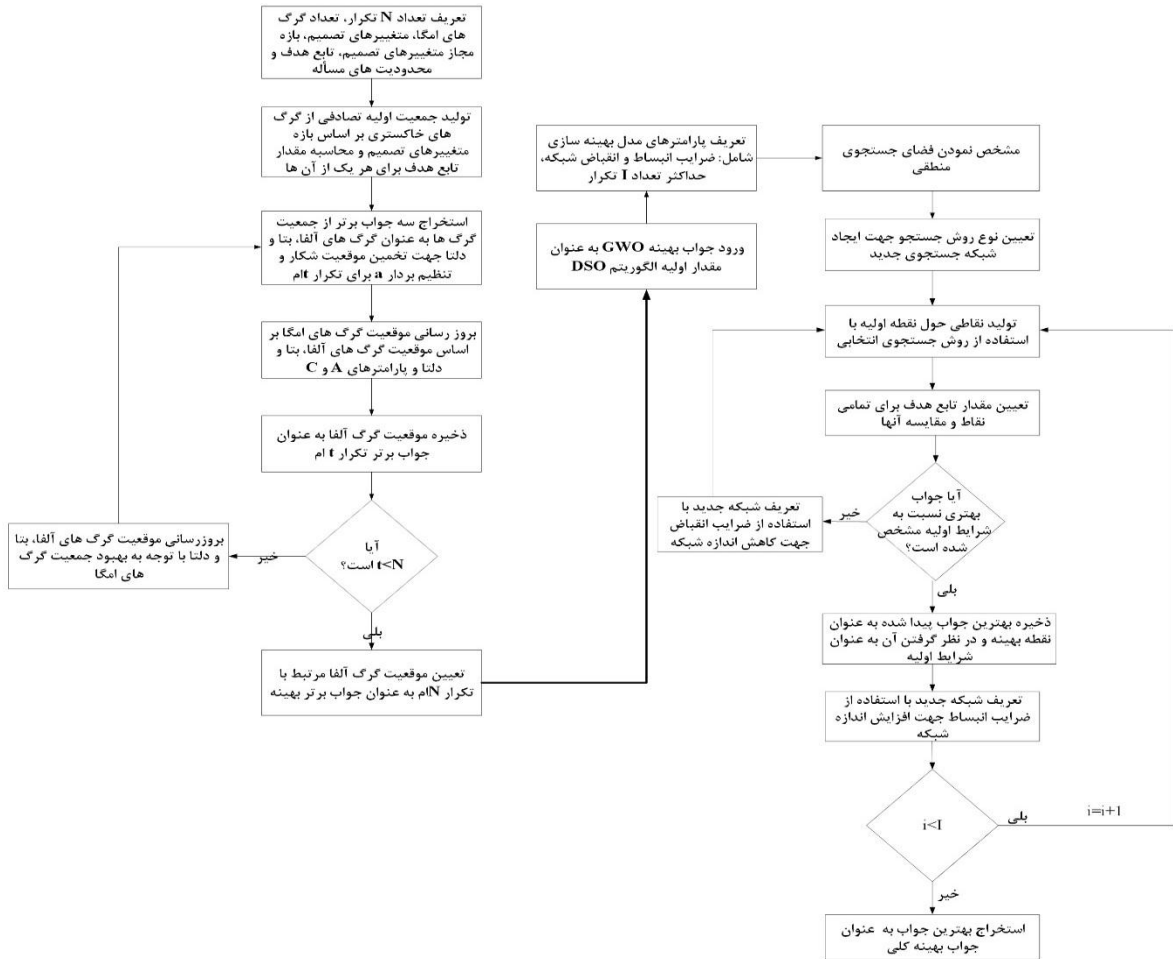
$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \quad \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t)| \quad (28)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta), \quad \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t)| \quad (29)$$

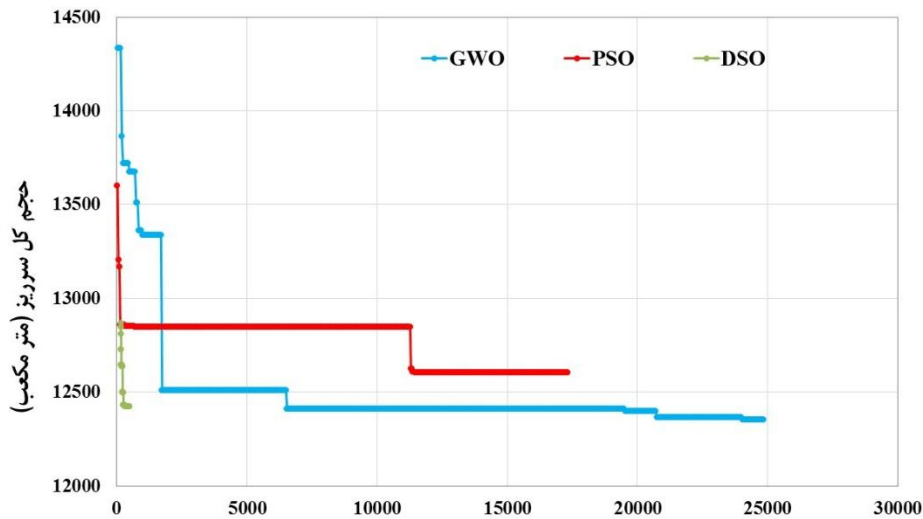
در این روابط $\vec{X}_\alpha(t)$ ، $\vec{X}_\beta(t)$ و $\vec{X}_\delta(t)$ به ترتیب بردار موقعیت گرگ‌های از نوع آلفا، بتا و دلتا می‌باشد که بر مبنای سه راه‌حل بهتر (سه موقعیت برتر) به دست آمده از جمعیت مرتبط با تکرار t ام تعیین می‌گردد. در واقع گرگ‌های از نوع آلفا، بتا و دلتا موقعیت شکار را تخمین می‌زنند اما بقیه گرگ‌ها موقعیت خود را به‌طور تصادفی و با توجه به موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا حول شکار به‌روز می‌نمایند. در آخرین مرحله، زمانی که شکار توسط گرگ‌های خاکستری احاطه گردید با رهبری گرگ آلفا به شکار حمله می‌شود. جهت تدوین مدل ریاضی شکار، لازم است مقدار بردار \vec{a} کاهش یابد. با توجه به وابستگی بردار \vec{A} به مقدار \vec{a} ، با کاهش مقدار بردار \vec{a} ، بردار \vec{A} هم کاهش می‌یابد. در واقع در طی تکرارهای متوالی که بردار \vec{a} از 2 تا 0 کاهش می‌یابد، بردار \vec{A} در بازه $[-2a, 2a]$ قرار می‌گیرد. زمانی که بردار تصادفی \vec{A} در بازه $[-1, 1]$ قرار گیرد، موقعیت بعدی گرگ‌ها می‌تواند هر موقعیتی بین موقعیت فعلی گرگ و موقعیت شکار باشد. در واقع اگر $|A| < 1$ باشد، گرگ آلفا به شکار (و سایر گرگ‌ها) نزدیک می‌شود و اگر $|A| > 1$ باشد، گرگ آلفا از شکار (و بقیه گرگ‌ها) دور خواهد شد. در این حالت برای مدل نمودن واگرایی (پراکندگی) گرگ‌ها برای یافتن موقعیت‌های احتمالی بهتر برای شکار، لازم است بردار \vec{A} بزرگ‌تر از یک و یا کوچک‌تر از -1 باشد. با توجه به عملگرهای الگوریتم GWO، فضای جستجوی گرگ‌ها بر مبنای موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا به‌روز می‌شود. فرآیند جستجو دقیقاً عکس فرآیند حمله است. در هنگام جستجو گرگ‌ها از یکدیگر دور می‌شوند تا شکار را ردیابی کنند ($|A| > 1$) در حالی که پس از ردیابی شکار، گرگ‌ها در مرحله حمله به یکدیگر نزدیک می‌شوند ($|A| < 1$). به این فرآیند واگرایی در جستجو و همگرایی در حمله می‌گویند.

PSO-DSO توانسته مقادیر بهینه کلی را در فضای موجه

بیابد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که استفاده از

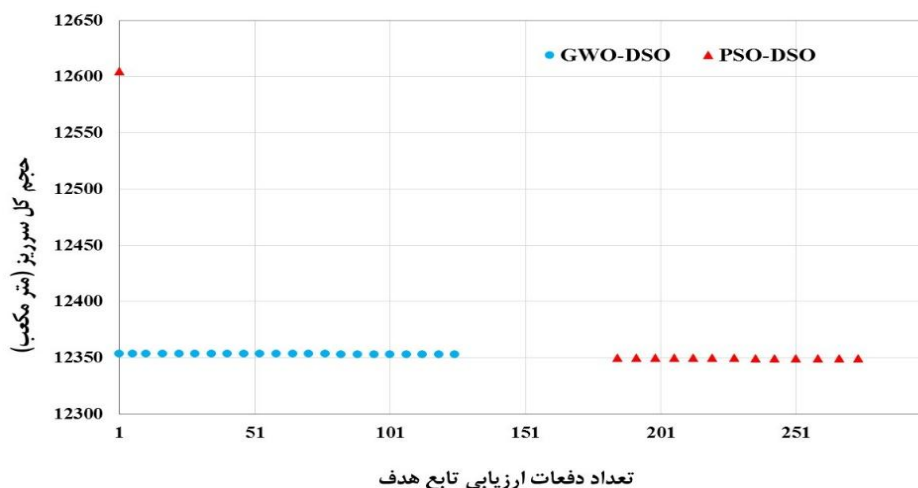


شکل (۵): ساختار ترکیبی الگوریتم GWO پیشنهادی



تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف

شکل (۶): نحوه همگرایی مقدار تابع هدف (حجم کل سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای) توسط الگوریتم‌های فراکاوشی



شکل (۷): نحوه همگرایی مقدار تابع هدف (حجم کل سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای) توسط ترکیب الگوریتم‌های فراکاوشی

بهینه بودن شکل مثلثی سرریز کنگره‌ای نسبت به شکل دوزنقه‌ای آن می‌باشد. لذا توصیه به به‌کارگیری این نوع از سرریزهای منقاری در طراحی برای دستیابی به عملکرد مطلوب می‌گردد. با اجرای مجدد الگوریتم پیشنهادی برای مقطع مثلثی، ابعاد بهینه سرریز منقاری برای این مقطع تعیین گردید. شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب روند همگرایی الگوریتم‌های فراکاوشی را به‌صورت غیر ترکیبی و ترکیبی نشان می‌دهد. همانند روند همگرایی تشریح شده برای مقطع دوزنقه‌ای، برای مقطع مثلثی نیز جواب‌های بهینه به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی PSO-DSO (با مقدار بهینه ۱۲۲۸۵/۹ مترمکعب) و GWO-DSO (با مقدار بهینه ۱۲۲۸۶/۳ مترمکعب) مشابه هم بوده اما مقدار بهینه الگوریتم PSO-DSO به میزان اندکی بهتر از الگوریتم GWO-DSO می‌باشد. بر این اساس، ابعاد بهینه به‌دست آمده با استفاده از این الگوریتم ترکیبی در استخراج نتایج استفاده شده است. مطابق جدول (۲)، با استخراج پارامترهای هیدرولیکی بهینه شده برای مقطع مثلثی، امکان مقایسه بین ابعاد موجود، نتایج مطالعات حسینی و همکاران (۲۰۱۶) برای الگوریتم‌های DE و GA و ابعاد به‌دست آمده با استفاده از رویکرد پیشنهادی این مطالعه فراهم گردید. در این بخش نیز مشابه نتایج مقطع دوزنقه‌ای، ابعاد بهینه به‌دست آمده با استفاده از ساختار پیشنهادی منجر به کاهش ۶۴، ۵۵/۶ و ۵۷ درصد حجم ساخت سرریز به ترتیب نسبت به وضعیت موجود طراحی، مطالعات حسینی و همکاران (۲۰۱۶) برای الگوریتم‌های تفاضلی و ژنتیک شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود

الگوریتم GWO نسبت به سایر الگوریتم‌های فراکاوشی کارا تر بوده و از توانایی بالایی در یافتن مقادیر بهینه کلی برخوردار می‌باشد. نکته قابل توجه اینکه جهت تولید مقادیر بهینه توسط اجرای غیر ترکیبی الگوریتم DSO، بیش از ۴۰ بار این الگوریتم مورد اجرا قرار گرفته است و همان‌طور که در نتایج سرریز کنگره‌ای با مقطع دوزنقه‌ای نشان داده شده است، این الگوریتم نتوانسته مقدار جواب NGS را به دلیل محدودیت اندازه شبکه جستجوی تعیین نماید. بر اساس مقادیر بهینه ارتفاع سرریز (P)، سطح عمود بر جریان (A)، زاویه میان امتداد جریان و محور سرریز (α) و تعداد تناوب سرریز (N)، پارامترهای هیدرولیکی بهینه شده مرتبط با سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای به‌صورت جدول (۱) استخراج گردید. با توجه به اینکه مقدار تابع هدف ارائه شده توسط الگوریتم

PSO-DSO کمتر از الگوریتم GWO-DSO می‌باشد، لذا پارامترهای بهینه شده مرتبط با این الگوریتم جهت مقایسه با مطالعات قبلی استفاده شده است. بر این اساس همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است ابعاد بهینه ارائه شده توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی منجر به صرفه‌جویی در بتن‌ریزی و هزینه‌های آن به میزان ۶۴ و ۵۶/۴۸ درصد به ترتیب نسبت به طراحی وضعیت موجود سد یوتی و مطالعه اژدری مقدم و جعفری ندوشن (۱۳۹۲b) شده است. لذا رویکرد پیشنهادی در بهینه‌سازی سرریز کنگره‌ای با مقطع دوزنقه‌ای، موفق عمل کرده است.

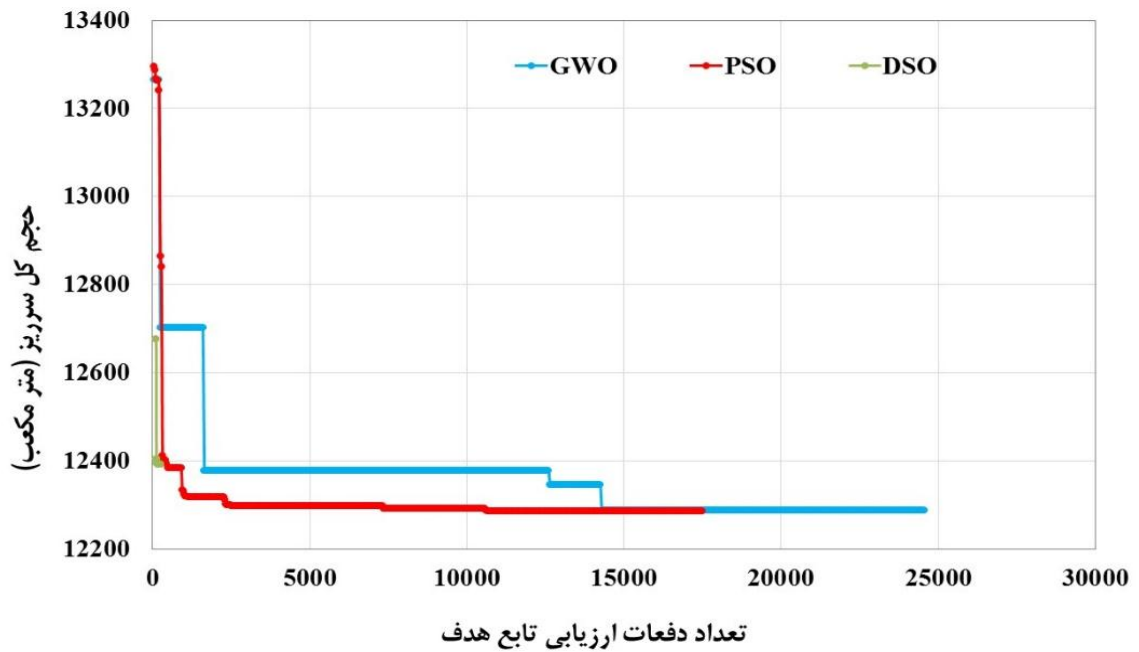
نکته قابل توجه دیگر این است که طول دماغه به‌دست آمده در این بهینه‌سازی بسیار اندک می‌باشد که این امر بیانگر

جریان از این نوع از سرریزها، کاهش قابل توجهی را در هزینه ساخت با توجه به کاهش حجم بتن‌ریزی ایجاد می‌کند. همچنین با توجه به مشابه بودن مقادیر ابعاد بهینه به دست آمده از دو مقطع دوزنقه‌ای و مثلثی می‌توان دریافت که مناسب‌ترین شکل برای این نوع از سرریزها، مثلثی است و منجر به بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز می‌گردد.

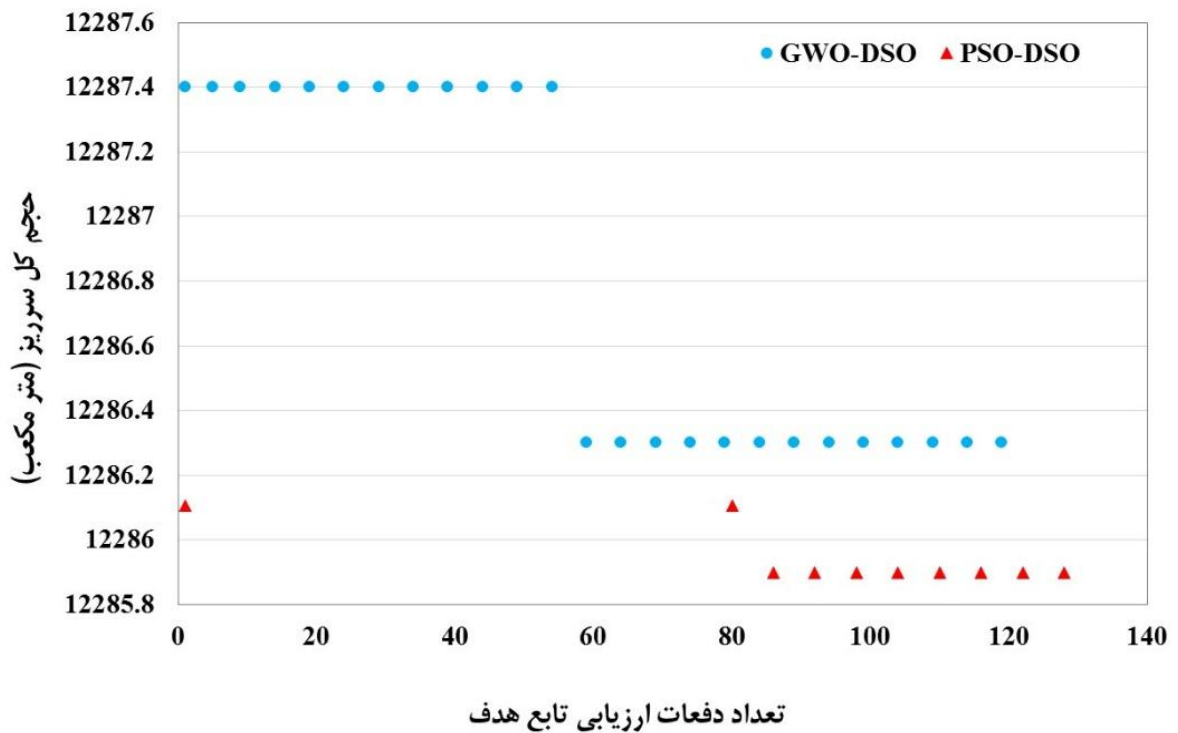
نتایج این مطالعه از برتری بالایی نسبت به آخرین مطالعات صورت گرفته در این زمینه برای طراحی ابعاد بهینه سرریزهای کنگره‌ای دارا می‌باشد. مقایسه نتایج به دست آمده از ابعاد بهینه مقاطع دوزنقه‌ای و مثلثی با استفاده از رویکرد مطالعه حاضر نشان می‌دهد که به کارگیری ابعاد توصیه شده در این مطالعه برای طراحی سرریزهای کنگره‌ای می‌تواند علاوه بر افزایش میزان عبور

جدول (۱): مقایسه نتایج ابعاد بهینه با مقادیر موجود سرریز منقاری دوزنقه‌ای

GWO-DSO	PSO-DSO	اژدری مقدم و جعفری ندوشن (۱۳۹۲b)	طراحی موجود	پارامترهای هیدرولیکی سرریز
۶/۴۳۷	۶/۴۳۳	۷/۸۵	۹/۱۰	ارتفاع سرریز (P) (متر)
۶/۴۵۷	۶/۴۶	-	۱۲/۵۰	زاویه دیواره (α) (درجه)
۵/۷۹	۵/۷۹	۵	۵/۷۹	هد کل سرریز (H_t) (متر)
۲۰/۰۲	۲۰/۰۳	۳۰	۱۸/۳	عرض هر تناوب (w) (متر)
۰/۱	۰/۱	۲/۶۴	۱/۵	طول دماغه (A) (متر)
۱۰	۱۰	۸/۵	۱۴	تعداد تناوب (N)
۸/۴۶	۸/۴۶	۳/۵۶	۴	نسبت طول سرریز به عرض ($\frac{L_3}{w}$)
۸۴/۱۱	۸۴/۱	۴۷/۶	۳۸/۸۳	عرض سرریز در جهت جریان (B) (متر)
۱۶۹۳/۹	۱۶۹۳/۷	۸۷۲/۷۶	۱۰۳۱/۸	طول کل سرریز (L_3) (متر)
۱۲۳۵۳	۱۲۳۴۹/۶۱	۲۹۷۳۶/۴۷۷	۳۴۳۱۰	حجم کل سرریز (V_t) (مترمکعب)



شکل (۸): نحوه همگرایی مقدار تابع هدف (حجم کل سرریز کنگره‌ای مثلثی) توسط الگوریتم‌های فراکاوشی



شکل (۹): نحوه همگرایی مقدار تابع هدف (حجم کل سرریز کنگره‌ای مثلثی) توسط ترکیب الگوریتم‌های فراکاوشی

جدول (۲): مقایسه نتایج ابعاد بهینه با مقادیر موجود سرریز منقاری مثلثی

پارامتر	طراحی موجود	(حسینی و همکاران، همکاران، ۲۰۱۶) (الگوریتم DE)	(حسینی و همکاران، ۲۰۱۶) (الگوریتم GA)	PSO-DSO	GWO-DSO
ارتفاع سرریز (P) (متر)	۹/۱۰	۷/۸۵	۷/۸۵	۶/۴۳	۶/۴۳
زاویه دیواره (α) (درجه)	۱۲/۵۰	۱۷/۸۷	۱۷/۱۶	۶/۴۶	۶/۴۵۹
هد سرریز (H _t) (متر)	۵/۷۹	۵/۸۳	۵/۸۳	۵/۷۹	۵/۷۹
عرض تناوب (w) (متر)	۱۸/۳	۲۱/۳	۲۱/۳	۱۹/۸۳	۱۹/۸۲۶
طول دماغه (A) (متر)	۱/۵	۰	۰	۰	۰
تعداد تناوب (N)	۱۴	۱۲	۱۲	۱۰	۱۰
نسبت طول سرریز به عرض ($\frac{L_3}{W}$)	۴	۳/۶۵	۳/۶۵	۸/۵۳	۸/۵۳
عرض سرریز در جهت جریان (B) (متر)	۳۸/۸۳	۳۷/۲۶	۳۷/۲۶	۸۴/۱	۸۴/۱
طول سرریز (L ₃) (متر)	۱۰۳۱/۸	۹۳۵	۹۳۵	۱۶۹۲	۱۶۹۱/۷
حجم سرریز (V _t) (مترمکعب)	۳۴۳۱۰	۲۷۶۹۱	۲۸۶۱۵	۱۲۲۸۵/۹	۱۲۲۸۶/۳

نتیجه‌گیری

طراحی سازه‌های هیدرولیکی از جمله سدها برخوردار می‌باشند. در این مطالعه رویکرد نوینی با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های فراکاوشی PSO, DSO و GWO تدوین گردید. در این رویکرد باهدف کاهش حجم سرریزهای کنگره‌ای که کاهش هزینه ساخت این نوع از سرریزها را به همراه دارد، مدلی با لحاظ نمودن الزامات طراحی هیدرولیکی مرتبط با

طراحی ابعاد بهینه سرریزهای کنگره‌ای (منقاری) به‌عنوان یکی از متداول‌ترین سرریزها در کنترل سیلاب‌ها به دلیل دارا بودن هوادهی مناسب، ظرفیت بالا در عبور جریان و دارا بودن نوسانات اندک بر روی تاج سرریز از اهمیت فراوانی در

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

۲- اژدری مقدم، م؛ و جعفری ندوشن، ا. (۱۳۹۲ب) "بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد Ute در ایالات متحده آمریکا)". نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۲۴(۲)، ۱۳۸-۱۲۹.

3- Aydin, M. C. (2012). "CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir". *Advances in Engineering Software*, 45(1), 159-166.

4- Aydin, M. C. and Emiroglu, M. E. (2013). "Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD". *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 1-8.

5- Aydin, M. C. and Emiroglu, M. E. (2016). "Numerical analysis of subcritical flow over two-cycle trapezoidal labyrinth side weir". *Flow Measurement and Instrumentation*, 48, 20-28.

6- Chu, H. and Chang, L. (2009). "Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model". *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*, 14(9), 1024-1027.

7- 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.

8- Darvas, L. A. (1971). "Performance and design of labyrinth weirs". *ASCE. Journal of Hydraulic Engineering*, 97(8), 1246-1251.

9- Emiroglu, M. E. Agaccioglu, H. and Kaya, N. (2011). "Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels". *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(4), 319-330.

10- Ghare, A. D. Mhaisalkar, V. A. and Porey, P. D. (2008). "An approach to optimal design of trapezoidal labyrinth weirs". *World Applied Sciences Journal*, 3(6), 934-938.

11- Haddadi, H. and Rahimpour, M. (2012). "A discharge coefficient for a trapezoidal broad-crested side weir in subcritical flow". *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, 63-67.

12- 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.

13- Houston, K. (1982). "Hydraulic model study of Ute Dam labyrinth spillway." Bureau of Reclamation Division of Research Hydraulics Branch, Denver.

14- Indlekofer, H. and Rouve, G. (1975). "Discharge over polygonal weirs". *Journal of the Hydraulics Division*, 101(HY3), 385-401.

15- Kardan, N. Hassanzadeh, Y. and Shakoei Bonab, B. (2017). "Shape Optimization of Trapezoidal Labyrinth Weirs Using Genetic Algorithm". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(3), 1219-1229.

16- Khode, B. V. and Tembhurkar, A. R. (2010). "Evaluation and analysis of crest coefficient for labyrinth weir". *World Applied Sciences Journal*, 11(7), 835-839.

17- Lux, F. (1989). "Design and application of labyrinth weirs". Paper presented at the International Symposium on Design of Hydraulic Structures.

این نوع سرریز توسعه داده شد. نتایج به دست آمده از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- الگوریتم‌های فراکاوشی ترکیبی پیشنهادی، عملکرد بسیار مناسبی در تولید مقادیر بهینه کلی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای برخوردار می‌باشند.
- سرعت همگرایی الگوریتم ترکیبی GWO در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی دیگر بسیار بالا می‌باشد.
- استفاده غیر ترکیبی از الگوریتم DSO به دلیل محدودیت تغییرات اندازه شبکه تعریف شده در فضای موجه به دلیل افزایش هزینه محاسباتی و عدم دستیابی به جواب بهینه نزدیک به بهینه محلی توصیه نمی‌شود.
- در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، ابعاد بهینه ارائه شده توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی منجر به صرفه‌جویی در بتن-ریزی و هزینه‌های آن به میزان ۶۴ و ۵۶/۴۸ درصد به ترتیب نسبت به طراحی وضعیت موجود سد یوتی و مطالعه اژدری مقدم و جعفری ندوشن (۱۳۹۲ب) شده است. همچنین ابعاد بهینه به دست آمده در سرریز کنگره‌ای مثلثی با استفاده از ساختار پیشنهادی منجر به کاهش ۶۴، ۵۵/۶ و ۵۷ درصد حجم ساخت سرریز به ترتیب نسبت به وضعیت موجود طراحی، مطالعات حسینی و همکاران (۲۰۱۶) برای الگوریتم‌های DE و GA شده است.

• مقایسه پارامترهای هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای در طراحی موجود و طراحی بهینه شده نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع سرریز به میزان ۲۹ درصد، افزایش عرض هر تناوب در سرریز به میزان ۹/۵ درصد، کاهش تعداد تناوب به مقدار ۲۸/۶ و افزایش طول سرریز به میزان ۶۴ درصد می‌تواند علاوه بر کاهش حجم مواد مصرفی جهت اجرای سرریز کنگره‌ای، افزایش ظرفیت دبی عبوری از سرریز به میزان ۱۵۷۶۰ مترمکعب در ثانیه را به همراه داشته باشد.

• نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با توجه به مشابه بودن مقادیر ابعاد بهینه به دست آمده از دو مقطع دوزنقه‌ای و مثلثی، مناسب‌ترین شکل برای سرریزهای کنگره‌ای، مثلثی است و منجر به بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره قرارداد 95GRN1M1156 از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد می‌باشد.

مراجع

- 18- Lux, F. L. and Hinchliff, D. (1985). "Design and construction of labyrinth spillways". Paper presented at the 5th International Congress on Large Dams, Paris, France.
- 19- Mirjalili, S. A. Mirjalili, A. M. and Lewis, A. (2014). "Grey Wolf Optimizer". *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- 20- Mohammad Rezapour Tabari, M. (2016). "Prediction of River Runoff Using Fuzzy Theory and Direct Search Optimization Algorithm Coupled Model". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(10), 4039-4051.
- 21- Seamons, T. R. (2014). "Labyrinth weirs: A look into geometric variation and its effect on efficiency and design method predictions". (MSc Thesis), Utah State University.
- 22- Taylor, G. (1968). "The performance of labyrinth weirs". (Ph.D Thesis), University of Nottingham, England.
- 23- Tullis, J. P. Amanian, N. and Waldron, D. (1995). "Design of labyrinth spillways". *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 247-255.
- 24- Wormleaton, P. and Soufiani, E. (1998). "Aeration performance of triangular planform labyrinth weirs". *Journal of Environmental Engineering. ASCE*, 124(8), 709-719.
- 25- Wormleaton, P. and Tsang, C. (2000). "Aeration performance of rectangular planform labyrinth weirs". *Journal of Environmental Engineering. ASCE*, 126(5), 456-465.

Development of GWO-DSO and PSO-DSO Hybrid Models to Redesign the Optimal Dimensions of Labyrinth Spillway

M. Mohammad Rezapour Tabari^{1*}

Masoumeh Hashempour^۲

Abstract

Considering the importance of redesign of dams spillways to provide optimum dimensions, the hybrid meta-heuristic based approach of Particle Swarm Optimization (PSO), Gray Wolves (GWO) and Direct Search Optimization (DSO) were proposed. In this approach, the spillway volume, which indicates the amount of concrete and cost, were considered as the objective function and spillway height, number of cycles, apex length and angle of wall were considered as decision variables. By implementing the proposed model, based on the Ute dam labyrinth spillway data, the spillway optimal dimensions were determined and compared with the other studies result. The results represent the very good performance of the proposed approach in generating global optimal solution, and non-hybrid use of DSO algorithm was not recommended due to network size constraint, increased computational cost and failure to achieve optimal solution. The optimal dimensions led to concrete saving and reduction of costs to 64% compared to the existing dam design. Investigating the optimal dimension of trapezoidal labyrinth spillway indicates that increase the flow capacity of the spillway to 15760 cubic meters per second. Finally, the comparison of the optimal dimensions obtained with two trapezoidal and triangular sections showed that the optimal form for labyrinth spillway is triangular.

Keywords

Labyrinth spillway, Optimization of labyrinth dimensions, PSO algorithm, Gray wolves algorithm, Ute dam

^{1*} Associate Prof. Dep. Of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, mrtabari@eng.sku.ac.ir

² M.Sc. Students in Civil Engineering – Water Resources and Hydraulic Structures, Shahrekord University, Shahrekord, Iran