

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی چندهدفه سرریز پلکانی با استفاده از الگوریتم‌های چرخه آب (WCA) و علف هرز (IWO) (مطالعه موردی: سد سیاه‌بیشه پائین)

مهدی کماسی^{۱*}، مهدی لک^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۳

چکیده

سرریزهای پلکانی به جهت عملکرد همزمان در انتقال و استهلاک انرژی، امروزه مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. در طراحی این سرریزها بهترین حالت، دستیابی به طرحی با بیشترین مقدار استهلاک انرژی در پایین‌دست و کمترین هزینه طراحی می‌باشد. در این مطالعه، از مدل بهینه‌سازی چندهدفه بر مبنای الگوریتم‌های علف‌های هرز (IWO) و چرخه آب (WCA) برای طراحی سرریزهای پلکانی با اهداف کمینه نمودن هزینه‌های اجرا و بیشینه نمودن میزان استهلاک انرژی استفاده شده است. در این راستا، کارایی دو الگوریتم بر روی سرریز سد سیاه‌بیشه پائین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد الگوریتم IWO دقت و سرعت همگرایی بهتری نسبت به الگوریتم WCA در حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه سرریزهای پلکانی دارد. همچنین مشخص گردید استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند مجموعه‌ای از پاسخ‌ها را در اختیار طراحان قرار دهد که بتوانند در هر شرایطی بسته به میزان هزینه و استهلاک انرژی مورد نظر طرح مناسبی برای اجرا انتخاب نمایند. مقایسه بین پاسخ‌های با کمترین حجم بتن ریزی ارائه شده توسط IWO در مقایسه با طرح اجرا شده سرریز، ۲۰ درصد حجم بتن ریزی را کاهش و ۱۲ درصد میزان استهلاک انرژی را افزایش داده است. همچنین برای WCA، حجم بتن‌ریزی را ۱۰ درصد کاهش و استهلاک انرژی را ۴/۸۹ درصد افزایش داده است.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، بهینه‌سازی چندهدفه، سرریزهای پلکانی، سیاه‌بیشه، فراکاوشی

مقدمه

استهلاک انرژی دارند (Pegram et al., 1999). چند دهه اخیر، پژوهش‌های فراوانی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی به‌منظور برآورد خصوصیات جریان و میزان استهلاک انرژی بر روی این سرریزها انجام شده است (اکبری‌فرد و همکاران، ۱۳۹۴؛ حجتی و همکاران، ۱۳۹۶؛ معینی و جزائری، ۱۳۹۷؛ علمدارلو و اژدری‌مقدم، ۱۳۹۷؛ سهرابی و همکاران، ۱۳۹۹؛ حسنعلی‌پور شهرآبادی، ۱۳۹۸).

اهوتسو و همکاران در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، روشی گام‌به‌گام برای طراحی سرریز پلکانی با بررسی مشخصات جریان رویه ای برای زاویه شیب کانال بین ۵/۷ تا ۵۵ درجه ارائه نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که انرژی باقی‌مانده در جریان یکنواخت، به شیب کانال و نسبت ارتفاع به عمق بحرانی بستگی دارد و در جریان غیریکنواخت، انرژی باقی‌مانده در پایین‌دست علاوه بر موارد شیب کانال و نسبت ارتفاع به عمق بحرانی، به ارتفاع سقوط نسبی سرریز نیز بستگی دارد (Ohtsu et al. 2004). چتایلا و جوردی در مطالعه‌ای با استفاده از یک مدل عددی، مقایسه دو سرریز صاف و پلکانی را انجام دادند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که تعداد پله‌ها، یک پارامتر

به‌منظور عبور جریان‌های اضافی و سیلاب از سرآب به پایاب سد و همچنین حفظ ایمنی آن از سازه‌ای به نام سرریز استفاده می‌شود. یکی از موثرترین نوع سرریزها، سرریزهای پلکانی می‌باشد که علاوه بر عبور آب اضافی مخزن سد، برای استهلاک انرژی آب نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ویژگی این نوع سرریزها موجب کاهش هزینه‌های ساخت سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایاب سد می‌گردد. نرخ استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی به پارامترهای هندسی همچون طول و ارتفاع پله‌ها، شیب سرریز و پارامترهای هیدرولیکی شامل دبی عبوری جریان و زبری سطح پله‌ها بستگی دارد که در این میان ارتفاع پله‌ها و شیب سرریز، بیشترین تاثیر را در

۱- دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، ایران
(* - نویسنده مسئول: E-mail: Komasi@abru.ac.ir)

شده به طور قابل توجهی منجر به کاهش هزینه‌های طراحی در مقایسه با رویکردهای تک هدفی گردید (Mooselu et al., 2019). سهرابی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه یک مدل برای طراحی سرریزهای چندهدفه توسعه دادند. در این مطالعه هزینه‌های طراحی به‌عنوان تابع هدف اول و میزان استهلاک انرژی به عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از اجرای مدل الگوریتم ژنتیک بر روی سرریز سد سیاه بیشه، نشان از کارایی بالای روش مورد استفاده در پژوهش داشت. همچنین مشخص گردید که استفاده از رویکرد چندهدفه در بهینه‌سازی این نوع از سرریزها موجب دستیابی به مجموعه‌ای از طرح‌ها می‌شود که علاوه بر حجم بتن‌ریزی، میزان استهلاک انرژی را نیز در نظر می‌گیرد.

در این زمینه درخشان علمدارلو و اژدری‌مقدم (۱۳۹۷) طراحی بهینه سرریزهای پلکانی جهت حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی و الگوریتم کرم شب‌تاب و ترکیب هر دو الگوریتم را انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش دبی جریان منجر به کاهش استهلاک نسبی انرژی و افزایش ارتفاع بهینه پله‌ها می‌شود. همچنین معینی و جزائری (۱۳۹۷) حداقل‌سازی هزینه احداث سرریز پلکانی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی را انجام دادند. زارعی و همکاران (۱۳۹۸) استفاده از الگوریتم علف‌های هرز مهاجم (IWO) و الگوریتم ژنتیک (GA^۲) در بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از سد طازران را بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که با استفاده از روش‌های IWO و GA و استفاده همزمان از آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه، این سد به ترتیب قادر به تأمین ۷۷/۲ درصد و ۷۶/۲۴ درصد از نیاز آبی کل اراضی پایین‌دست منطقه طازران می‌باشد. در چند سال اخیر، استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی به‌عنوان یک ابزار قوی برای طراحی انواع سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها (Ohadi and Jafari Asl., 2020; Ferdowsi et al., 2021; Jafari Asl et al., 2019; Sدها, 2022) و (معصومی و همکاران، ۱۳۹۹؛ خانسر و همکاران، ۱۴۰۰) و شبکه‌های توزیع آب (Jafari Asl et al., 2020; Jafari Asl et al., 2018; Latifi et al., 2021) مورد توجه قرار گرفته است. استقبال زیاد مهندسين و محققين علوم مختلف، منجر به توسعه و معرفی الگوریتم‌های جدید فراکاوشی تک و چندهدفه شده است. الگوریتم چرخه آب (WCA^۲) و الگوریتم علف‌های هرز (IWO)، دو الگوریتم بهینه‌سازی جدید می‌باشند که در حل مسائل گوناگون بهینه‌سازی به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین لازم به ذکر است تا به حال در مطالعات انجام شده از این دو الگوریتم (

مهم در توسعه انرژی جریان می‌باشد و می‌توان ابعاد حوضچه پایین‌دست در پایین‌دست سرریز را کاهش داد (Chatila and Jurdi., 2004). حداد و همکاران در مطالعه‌ای با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، بررسی بهترین ترکیب از متغیرهای طراحی در سرریز پلکانی با هدف کمینه نمودن حجم بتن مصرفی در سرریز را انجام دادند. نتایج پژوهش آنان، بیان‌گر کارایی بالای الگوریتم ژنتیک در یافتن بهترین ابعاد سرریزهای پلکانی بود (Hadad et al., 2005). اژدری‌مقدم و همکاران در یک مطالعه عددی، بررسی تاثیر دبی، شیب سرریز، نوع آرایش، تعداد پله‌ها و زبری پله‌ها بر روی میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی را انجام دادند. در این پژوهش از اطلاعات مربوط به ۱۱۲ مدل سرریز در محیط نرم‌افزار فلوئنت استفاده شد. نتایج نشان داد که دبی و شیب سرریز تاثیر به‌سزایی بر روی استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی دارد (Azhdari Moghadam et al., 2011).

شجاع و همکاران در پژوهشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، باز طراحی سرریز صاف سد ساروق را انجام دادند. در این مطالعه، سرریز به‌صورت پلکانی طراحی شد. در این مطالعه ارتفاع و شیب پله‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم و بیشینه نمودن میزان استهلاک انرژی، به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی طراحی شده علاوه بر کاهش حجم بتن‌ریزی، میزان استهلاک انرژی نیز به میزان چشم‌گیری افزایش یافت. همچنین بر اساس آنالیز حساسیت مشخص گردید که استهلاک انرژی، مستقل از ارتفاع بهینه پله‌ها بوده و با افزایش شیب سرریز، کاهش می‌یابد (Shoja et al., 2012).

سلماسی و اروناقی در مطالعه‌ای، تاثیر شیب پله‌ها بر روی میزان استهلاک انرژی با استفاده از یک مدل فیزیکی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد شیب پله‌ها و عدد رینولدز تاثیر به‌سزایی بر روی برآورد استهلاک انرژی دارند (Salmasi and Arvanghi., 2013). در این راستا سوری و مجتهدی در یک مطالعه عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D تاثیر پارامترهای مختلف بر روی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد با افزایش میزان دبی، استهلاک در سرریز کاهش یافته و با افزایش تعداد پله‌ها و شیب معکوس هر پله، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد (Sori and Mojtahedi., 2015). از سویی در مطالعه دیگری که توسط طبری و توکلی انجام شد؛ با یک مدل عددی بر اساس Flow-3D، مدل‌سازی استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی انجام شد و نتایجی مشابه با مطالعه سوری و مجتهدی (۲۰۱۵) حاصل شد (Tabari and Tavakoli, 2016). موسلو و همکاران با استفاده از مدل Flow-3D و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای طراحی سرریزهای پلکانی ارائه دادند. نتایج آنان نشان داد استفاده از مدل توسعه داده

- 1- Invasive Weed Optimization
- 2- Genetic Algorithms
- 3- Water Cycle Algorithm

مورد نیاز برای ایجاد جریان شبه‌یکنواخت است که با توجه به رابطه (۱) تعیین می‌گردد:

$$\frac{H_e}{y_c} = (-1.21 \times 10^{-5} \theta^3 + 1.6 \times 10^{-3} \theta^2 - 7.13 \times 10^{-2} \theta + 1.3)^{-1} \{5.7 + 6.7 \exp(-6.5 \frac{h}{y_c})\} \quad (1)$$

که در آن θ شیب کانال سرریز، y_c عمق بحرانی جریان، h ارتفاع پله و H_e بار آبی روی سرریز می‌باشد. اگر $\frac{H_e}{y_c} \geq \frac{H_{dam}}{y_c}$ جریان از نوع شبه‌یکنواخت و اگر $\frac{H_e}{y_c} \leq 0.5$ باشد، جریان غیریکنواخت می‌باشد که در آن H_{dam} ارتفاع سرریز می‌باشد. در این حالت میزان استهلاک انرژی به روش‌های زیر محاسبه می‌گردد. حالت غیریکنواخت:

در این حالت، انرژی باقی‌مانده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\frac{E_{res}}{y_c} = 1.5 + \left[\left(\frac{E_{res}}{y_c} \right)_u - 1.5 \right] \left(1 - \left(1 - \frac{H_{dam}}{H_e} \right)^m \right) \quad (2)$$

که در آن $m = -\frac{\theta}{25} + 4$ و θ بر حسب درجه می‌باشد (Ohtsu et al., 2004).

حالت شبه‌یکنواخت:

شرایط جریان رویه‌ای با تغییر شیب و پارامتر بدون بعد $\frac{h}{y_c}$ تغییر می‌کند. در این حالت، برای شیب کانال سرریز در حدود $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ پروفیل سطح آب مستقل از ارتفاع نسبی پله $\frac{h}{y_c}$ می‌باشد و سطح آب تقریباً موازی با بستر کاذب است که به این حالت پروفیل نوع A گفته می‌شود.

برای شیب کانال سرریز در حدود $5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$ بسته به این که پروفیل سطح آب به موازات بستر کاذب باشد یا خیر به دو نوع A و B تقسیم می‌شود. پروفیل نوع A برای مقادیر کوچک $\frac{h}{y_c}$ تشکیل می‌شود و با افزایش مقادیر $\frac{h}{y_c}$ پروفیل سطح آب تا حدی موازی قسمت افقی پله‌ها می‌گردد که به آن پروفیل نوع B می‌گویند (Ohtsu et al., 2004). مقدار انرژی باقی‌مانده جریان E_{res} در پایاب سرریز با استفاده از رابطه (۳) برای نوع A و رابطه (۴) برای نوع B تعیین می‌گردد.

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c} \right)_u = \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{\frac{1}{3}} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (3)$$

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c} \right)_u = \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (4)$$

در روابط بالا f ضریب اصطکاک سرریز می‌باشد که تابعی از θ و نسبت ارتفاع نسبی پله‌ها $\frac{h}{y_c}$ می‌باشد و از روابط زیر به دست می‌آید (Ohtsu et al., 2004).

$$0.1 \leq \frac{h}{y_c} \leq 0.5 \quad \text{برای}$$

$$f = f_{max} - A \left(0.5 - \frac{h}{y_c} \right)^2$$

$$0.5 \leq \frac{h}{y_c} \leq \left(\frac{h}{y_c} \right)_s \quad \text{برای}$$

GA و IWO) برای بهینه‌سازی فاکتورهای استهلاک انرژی و حجم بتن در سرریزهای پلکانی استفاده نشده است. از این رو هدف از پژوهش حاضر ارزیابی عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی مذکور برای طراحی سرریزهای پلکانی به صورت چند هدفه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، مساله طراحی سرریزهای پلکانی به صورت یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا توابع هدف، شامل کمینه‌سازی هزینه‌های طراحی و بیشینه‌سازی استهلاک انرژی می‌باشند. در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه بر خلاف مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، پاسخ نهایی یک نقطه بهینه نخواهد بود و مجموعه‌ای از جواب‌های مطلوب با عنوان جبهه پارتو، پاسخ مساله را تشکیل می‌دهند. در ادامه جزئیات مساله بهینه‌سازی چند هدفه سرریزهای پلکانی شامل توابع هدف، متغیرهای تصمیم، قیود بهینه‌سازی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده بیان شده است.

هیدرولیک سرریزهای پلکانی

جریان در سرریز پلکانی با توجه به ارتفاع پله، زاویه کانال، دبی، عرض، ارتفاع کل سد و شکل تاج تغییر می‌کند. به عبارتی، هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی در سه نوع دسته‌بندی می‌شود:

- جریان از نوع رویه‌ای که در آن جریان به صورت متغیر تدریجی می‌باشد و با تشکیل یک بستر کاذب، انتهای پله‌های پی در پی را به هم وصل می‌نماید که در زیر این بستر، جریان گردابی منجر به استهلاک انرژی تشکیل می‌شود.
- جریان ریزشی که در آن جریان به صورت فواره‌های پی در پی می‌باشد که در دبی‌های کم و ارتفاع پله‌های بزرگ ایجاد می‌شود و با ایجاد پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص، سبب استهلاک انرژی می‌گردد.
- جریان انتقالی که در آن جریان به صورت بینابینی می‌باشد و درصد چشم‌گیری هوا با آن مخلوط شده است و حالت ناپایدار دارد و حد بین دو جریان رویه‌ای و ریزشی می‌باشد. با توجه به این که در حالت عادی، دبی طراحی جریان بر روی سرریز در حالت رویه‌ای می‌باشد؛ بنابراین طراحی بهینه سرریز در شرایط جریان رویه انجام می‌گیرد. در حالت رویه‌ای، جریان به دو حالت شبه‌یکنواخت و غیریکنواخت بخش‌بندی می‌شود و نحوه محاسبه باقی‌مانده انرژی جریان در پنجه سرریز در این پژوهش با استفاده از روابط ارائه شده توسط اهوئسو و همکاران تعیین می‌گردد (Ohtsu et al., 2004). مرز بین جریان یکنواخت و غیریکنواخت بر روی سرریز پلکانی، ارتفاع سقوط نسبی

پاسخ‌ها تحت عنوان جبهه پارتو می‌باشد. در ادامه توابع هدف، متغیرهای تصمیم و قیود بهینه‌سازی تشریح می‌گردند.

هدف اول بهینه‌سازی این مسئله، حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از روابط ارائه شده در بالا می‌باشد. بیان ریاضی تابع هدف اول به صورت زیر می‌باشد (Ohtsu et al., 2004).

$$\max(f_1) = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1.5y_c} \quad (11)$$

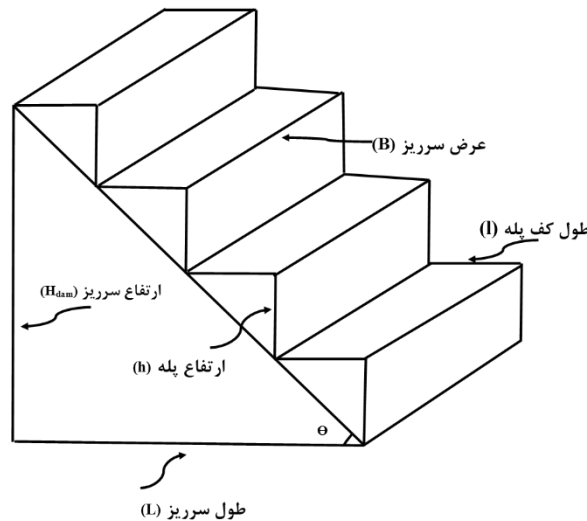
هدف دوم مسئله بهینه‌سازی، کاهش حجم بتن مصرفی می‌باشد که تابع ابعاد سرریز پلکانی است و بر کاهش هزینه ساخت آن تاثیر مستقیمی دارد و از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$V_t = B \times h \sum_{i=1}^N (L - l_i) \quad (12)$$

که در آن V_t حجم بتن سرریز، B عرض سرریز، L طول سرریز، h ارتفاع پله، l_i طول کف هر پله و N تعداد پله‌ها می‌باشند.

بیان ریاضی تابع هدف دوم، به صورت رابطه (۱۳) می‌باشد.

$$\min(f_2) = V_t \quad (13)$$



شکل ۱- پارامترهای طراحی سرریز پلکانی

$$\left(\frac{h}{y_c}\right)_s = \frac{7}{6} (\tan\theta)^{\frac{1}{6}} \quad (15)$$

۲- دبی عبوری بر روی سرریز نیز با استفاده از رابطه (۱۶) تعیین می‌گردد که در آن C ضریب تخلیه و H_t بار آبی روی سرریز می‌باشد. با توجه به این که عرض سرریز، جزو متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشد؛ تغییر در عرض سرریز باعث تغییر در مقادیر C و H_t می‌گردد. بنابراین رابطه (۱۷) باید به ازای دبی طراحی (Q_d) برقرار باشد (Ohtsu et al., 2004).

$$Q = C \times W \times H_t^{\frac{2}{3}} \quad (16)$$

$$Q \leq Q_d \quad (17)$$

الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب (WCA)

الگوریتم WCA، از رفتار چرخه آب در طبیعت الهام گرفته

$$f = f_{max}$$

که در آن f_{max} حداکثر ضریب اصطکاک و A ضریبی است که

از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\text{برای } 5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$$

$$A = -1.7 \times 10^3 \theta^2 + 6.4 \times 10^2 \theta - 1.5 \times 10^{-1} \quad (7)$$

$$f_{max} = -4.2 \times 10^{-4} \theta^2 + 1.6 \times 10^{-2} \theta + 3.2 \times 10^{-2} \quad (8)$$

$$\text{و برای } 19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$$

$$A = 0.452 \quad (9)$$

$$f_{max} = 2.32 \times 10^{-5} \theta^2 + 2.75 \times 10^{-3} \theta + 2.31 \times 10^{-1} \quad (10)$$

طراحی و بهینه‌سازی سرریز پلکانی

پژوهش حاضر، یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه می‌باشد و برای ارزیابی آن از دو تابع ارزیابی بیشینه‌سازی استهلاک انرژی و کمینه‌سازی حجم بتن مصرفی استفاده می‌شود. جواب نهایی در این گونه مسائل، یک نقطه بهینه نمی‌باشد؛ بلکه مجموعه‌ای از

متغیرهای تصمیم در این مسئله بهینه‌سازی وابسته به شیب کانال سرریز (θ) و پارامترهای هندسی شامل عرض سرریز (B)، ارتفاع پله‌ها (h)، ارتفاع سرریز (H_{dam}) و بار آبی (H_t) می‌باشد شکل (۱).

قیدهای بهینه‌سازی

قیدها محدودیت‌هایی می‌باشند که به هر کدام از پارامترهای تابع هدف اختصاص داده می‌شوند.

۱- جریان روی سرریز باید از نوع رویه‌ای باشد که شرط آن

برقراری رابطه زیر می‌باشد.

$$0.25 \leq \left(\frac{h}{y_c}\right) \leq \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \quad (14)$$

که عبارت $\left(\frac{h}{y_c}\right)_s$ از رابطه زیر برای شیب سرریز در حدود

$$5.7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \text{ تعیین می‌گردد.}$$

$$X = \epsilon(0, C \times d), \quad C > 1 \quad (22)$$

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 (۲۳) و (۲۴) محاسبه می‌گردد.

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (23)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + rand \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (24)$$

که $rand$ یک عدد تصادفی در بازه صفر و یک می‌باشد. اگر راه حل ارائه شده توسط جویبار بهتر از رودخانه باشد؛ موقعیت رودخانه و جویبار عوض می‌شود. این تبادل نیز می‌تواند به همین 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.

$$if |X_{Sea}^i - X_{River}^i| < d_{max}, i = 1, \dots, N_{SR} - 1 \quad (25)$$

اگر فاصله بین رود و دریا، کمتر از d_{max} باشد، بیان گر 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، به صورت رابطه (۲۶) کاهش می‌یابد.

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{Max\ Iteration} \quad (26)$$

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 (۲۷) استفاده می‌شود (Eskandar et al., 2012).

$$X_{Stream}^{new} = LB + rand \times (UB - LB) \quad (27)$$

که در آن UB و LB به ترتیب حد پایین و بالای متغیرهای تصمیم می‌باشد. بهترین قطرات باران به عنوان رود، بقیه قطرات باران جدید به عنوان جویبارهای جدید که به سمت رودها در جریان هستند و یا ممکن است به طور مستقیم به دریا برسند، در نظر گرفته می‌شود. برای افزایش سرعت همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم از رابطه (۲۸) استفاده می‌شود.

$$X_{Stream}^{new} = X_{sea} + \sqrt{\mu} \times randn(1, N_{var}) \quad (28)$$

در این رابطه، μ ضریب بیان کننده نزدیک بودن به دریا و $randn$ عدد تصادفی توزیع نرمال است. مقدار مناسب برای این ضریب در پژوهش‌های مختلف برابر $1/0$ پیشنهاد شده است (Eskandar et al., 2012).

شده است. بدین ترتیب که آب به شکل جویبارها و رودخانه‌ها از کوه‌ها به سمت دریاها حرکت می‌کند. در راه پایین آمدن، رودخانه‌ها، آب را از باران و دیگر جویبارها جمع‌آوری می‌کنند و آب رودخانه و دریاچه‌ها زمانی که گیاهان در طی فرآیند تبخیر، آب را پس می‌دهند؛ بخار می‌شود. هنگامی که آب بخار شده در اتمسفر بالا می‌رود، ابرها تشکیل می‌شوند. این ابرها در اتمسفر، آب را به شکل باران، باز پس داده و جویبارها و رودخانه‌های جدیدی تولید می‌نمایند.

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 برانزندی 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 راه حل، 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 برانزندی 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 بنا بر رابطه (۱۸) و (۱۹) انتخاب می‌گردند (Eskandar et al., 2012).

$$N_{sr} = Number\ of\ rivers + 1(sea) \quad (18)$$

$$N_{streams} = N_{pop} - N_{sr} \quad (19)$$

مقادیر قطرات باران با ارزیابی تابع هزینه (C) تعریف شده در رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

$$C_i = Cost_i = f(X_1^i, X_2^i, X_3^i, \dots, X_{N_{var}}^i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (20)$$

برای اختصاص قطرات باران به رودها و دریا، بر اساس شدت جریان از رابطه (۲۱) استفاده می‌گردد.

$$NS_n = round \left\{ \left\lfloor \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{sr}} Cost_i} \times N_{streams} \right\rfloor \right\}, \quad n = 1, \dots, N_{sr} \quad (21)$$

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 به طور تصادفی انتخاب می‌شود، جریان می‌یابد. این فاصله طبق رابطه (۲۲) بیان می‌شود.



شکل ۲- فلوجارت بهینه‌سازی چرخه آب WCA

الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز (IWO)

این الگوریتم برای نخستین بار توسط لوکاس و محرابین (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 (Lucas and Mehrabian., 2007). مراحل انجام این الگوریتم شامل مواردی است که در ادامه ارائه شده است.

۱. تولید جمعیت نخستین
- ابتدا یک سری جمعیت نخستین به صورت تصادفی تولید می‌گردد.
۲. تولید مثل

$$\sigma_{Iter} = \frac{(Iter_{max} - Iter)^n}{(Iter_{max})^n} (\sigma_{init} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (30)$$

که n شاخص نوسان غیرخطی می‌باشد.

۴. 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 می‌تواند 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 کم‌کم دانه‌ها به سمت بهینه همگرا شوند.

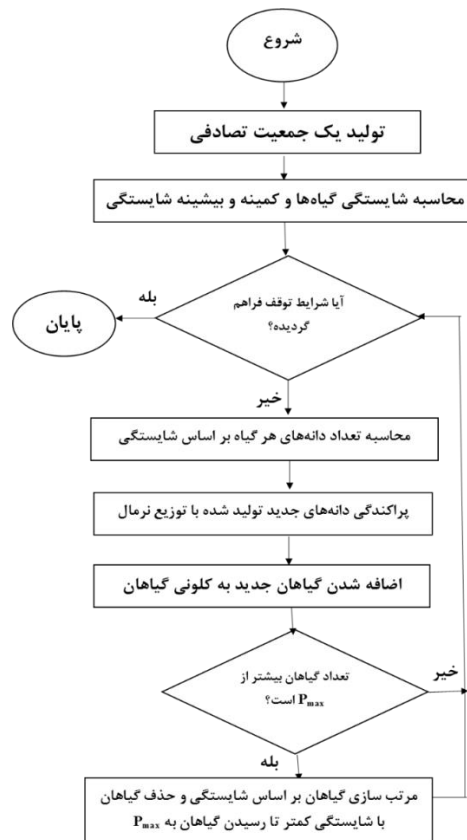
در این الگوریتم، هر عضو از جمعیت بر پایه توانایی‌هایش دانه تولید می‌کند. تعداد دانه‌هایی که توسط هر گیاه تولید می‌شود به گونه خطی از کم‌ترین تعداد دانه تا بیش‌ترین تعداد تغییر می‌یابد و علف هرز با سازگاری بهتر، دانه بیش‌تری طبق رابطه (۲۹) تولید می‌کند.

$$Seed_n = \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} (S_{max} - S_{min}) + S_{min} \quad (29)$$

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.

۳. پراکندگی فضایی

در این مرحله، دانه‌های تولید شده به صورت تصادفی بر حسب توزیع نرمال در فضای مسئله پراکنده می‌شوند. مقدار انحراف از معیار (σ_{Iter}) تابع توزیع نرمال در هر تکرار از مقدار اولیه (σ_{init}) تا مقدار نهایی (σ_{final}) تعریف شده کاهش می‌یابد. این ارتباط در رابطه (۳۰) نشان داده شده است.



شکل ۳- فلوجارت بهبودسازی علف‌های هرز IWO

معیارهای مقایسه

می‌گیرد. اما در الگوریتم‌های چندهدفه، با توجه به این که با دسته‌ای از پاسخ‌ها روبه‌رو هستیم، استفاده از برابری تابع هدف به عنوان معیار مقایسه منطقی نمی‌باشد. از این رو برای ارزیابی کارایی و سنجش

در مسائل بهبودسازی تک هدفه، مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس برابری جواب‌های به دست آمده برای تابع هدف، صورت

سد ساروق به یک سرریز پلکانی برای افزایش استهلاک انرژی پرداختند. در مطالعه مذکور، سرریز پلکانی برای دبی طراحی ۵۶۰/۲ متر مکعب بر ثانیه و طول افقی سرریز برابر ۲۳۰ متر بهینه‌سازی شد که در نهایت یک طرح بهینه با ۷۳ درصد استهلاک انرژی برای سرریز سد ساروق پیشنهاد گردید. شکل (۴) نمودار همگرایی به‌دست آمده در پژوهش حاضر با استفاده از مدل توسعه داده شده برای طراحی سرریزهای پلکانی بر روی سرریز سد ساروق با استفاده از سه الگوریتم WCA، IWO و GA را نشان می‌دهد.

مقدار تابع هدف به‌دست آمده در مطالعه شجاع و همکاران (۱۳۹۱) برابر ۷۳/۷۹ با استفاده از GA بود. همان‌گونه که مشخص است در این پژوهش نیز با استفاده از GA مقدار تابع هدف برابر ۷۱/۱۵ به‌دست آمد. مشخص است که مدل‌های توسعه داده شده، صحیح می‌باشد. 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

پس از صحت‌سنجی مدل، سرریز سد سیاه‌بیشه پائین به‌عنوان مطالعه موردی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشنهادی در طراحی چندهدفه سرریزهای پلکانی انتخاب شده است. این سد بر روی رودخانه چالوس در ۱۲۵ کیلومتری شمال تهران واقع شده است که شامل دو سد خاکی بالا و پایین با اختلاف ارتفاع ۵۰۰ متر می‌باشد؛ که در این پژوهش، سد سیاه‌بیشه پائین به‌عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. این سد از نوع سنگریزه‌ای با روکش بتنی و دارای سرریز پلکانی آزاد می‌باشد. ارتفاع سد سیاه‌بیشه پائین ۱۰۲ متر و طول تاج آن ۳۰۰ متر است. دبی طراحی سرریز و عرض آن به ترتیب ۸۶۰ متر مکعب بر ثانیه و ۳۰ متر می‌باشد شکل (۵).

عملکرد الگوریتم‌ها، از معیارهایی نظیر معیار فاصله (رابطه ۳۲) و معیار پراکندگی (رابطه ۳۳) استفاده می‌شود که در این مطالعه نیز از آن‌ها بهره‌برده شده است (Premkumar et al., 2020).

$$d_i = \text{Min}_j (\sum_k^M |f_k^i(x) - f_k^j(x)|), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (31)$$

که $f_k^i(x)$ نشان‌دهنده هدف k ام نقطه i ام و M ، تعداد اهداف می‌باشد. اندیس j ، شمارنده نقاط مجموعه به‌دست آمده می‌باشد که فاصله آن‌ها از نقطه i ام همین مجموعه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب d_i برابر است با حداقل فاصله بین نقطه i ام و سایر نقاط. سپس با استفاده از رابطه معیار S که در واقع فاصله است، به‌صورت رابطه (۳۲) محاسبه می‌گردد (Premkumar et al., 2020).

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^P (\bar{d} - d_i)^2} \quad (32)$$

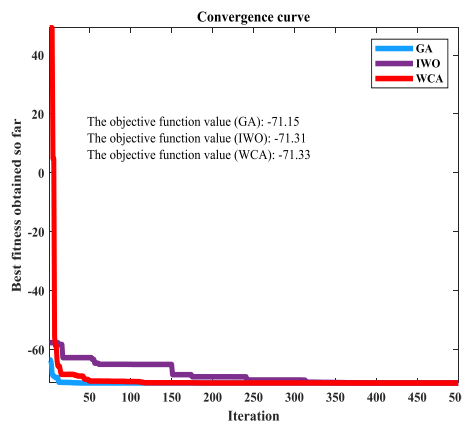
که در رابطه بالا P تعداد اعضای مجموعه به‌دست آمده (جبهه نامغلوب)، \bar{d} میانگین فواصلی که با استفاده از رابطه (۳۱) محاسبه شده است، می‌باشد. هرچه انحراف معیار فواصل، کمتر باشد؛ توزیع جواب به‌دست آمده، مناسب‌تر می‌باشد. مقدار پراکندگی پاسخ‌های موجود بر روی نمودار پارتو، با استفاده از رابطه (۳۳) محاسبه می‌شود (Premkumar et al., 2020).

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{n} \quad (33)$$

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

صحت‌سنجی مدل

برای صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده برای مدل‌سازی استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی در پژوهش حاضر، از اطلاعات مربوط به سرریز سد ساروق که توسط شجاع و همکاران (۱۳۹۱) معرفی شده است، استفاده شد. شجاع و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به توسعه یک مدل بهینه‌سازی با هدف تبدیل سرریز صاف



شکل ۴- نمودار همگرایی الگوریتم‌ها

جدول ۱- مقادیر بهینه به‌دست آمده از صحت‌سنجی مدل

پارامتر	شجاع و همکاران (۱۳۹۱)	GA	WCA	IWO
X_1 شیب سرریز	۱۱/۲۷	۱۰/۳۳	۱۰/۳۳	۱۰/۳۳
X_2 عرض سرریز	۲۵/۹	۲۶/۰۰	۲۵/۹۳	۲۶/۰۰
X_3 ارتفاع پله‌ها	۱/۸۱	۳/۰۰	۲/۹۷	۲/۰۹
X_4 ارتفاع شوت	۲۸/۵۸	۲۶/۰۰	۲۵/۹۹	۲۶/۰۰
X_5 بار آبی روی سرریز	۴/۶۵	۴/۶۳	۵/۶۴	۴/۶۳
تابع هدف	۷۳/۹۷	۷۱/۱۵	۷۱/۳۳	۷۱/۳۱



شکل ۵- سد سیاه‌بیشه پائین

نتایج و بحث

الگوریتم برابر ۱۰۰ و ۱۰۰۰ انتخاب شد. همچنین برای دستیابی به نتایج بهتر، هر الگوریتم ۳۰ مرتبه اجرا شد. نتایج حاصل از اجرای بهینه الگوریتم‌ها در جداول (۲) تا (۴) برای هر کدام از معیارها ارائه شده است.

طبق جدول (۳) مشخص است که الگوریتم IWO با کم‌ترین میانگین برای پارامتر GD توانسته است برتری خود را ثابت کند. همچنین مشخص است که الگوریتم WCA دارای بیش‌ترین مقدار انحراف از معیار و میانگین تکرارها بر اساس معیار GD می‌باشد؛ که این امر، دقت IWO را نشان می‌دهد.

برای دستیابی به بهترین پاسخ در استفاده از الگوریتم‌های فراکوشی، تنظیم بهینه پارامترهای ثابت این الگوریتم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به گونه‌ای که می‌توان با تنظیم صحیح پارامترهای تنظیمی این الگوریتم‌ها، باعث افزایش سرعت همگرایی و کاهش زمان محاسباتی آن‌ها شد. برای این منظور در این مطالعه پس از آنالیز حساسیت هر کدام از پارامترها، بهترین مقادیر برای این پارامترها در جدول (۲) ارائه شده است. پس از تعیین مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم‌ها، مدل بهینه‌سازی اجرا شد. برای مقایسه صحیح بین الگوریتم‌ها، تعداد جمعیت اولیه و حداکثر تکرار هر دو

جدول ۲- پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌های استفاده شده

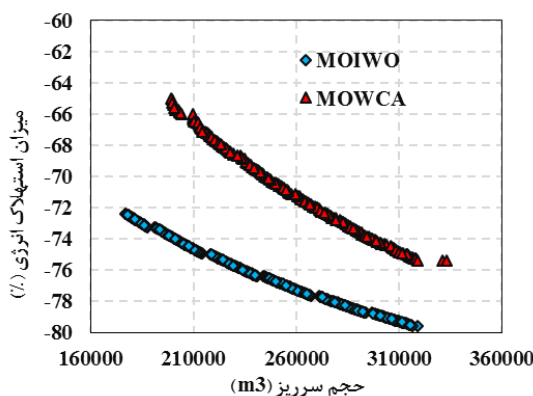
الگوریتم	پارامتر	دامنه
IWO	σ_{init}	۰/۵
	σ_{final}	10^{-2}
	S_{max}	۵
	S_{min}	۰
	شاخص نوسان غیرخطی	۲
WCA	d_{max}	10^{-16}
	N_{SR}	۴

جدول ۳- نتایج کلی بهترین الگوریتم از نظر معیار GD

انحراف از معیار	کم‌ترین	بیش‌ترین	میانگین	الگوریتم
۰/۰۱۵	۰/۱۱۳	۰/۲۵۶	۰/۱۲۵	WCA
۰/۰۱۰	۰/۰۹۰۵	۰/۱۴۴	۰/۱۱۰	IWO

جدول ۴- نتایج کلی بهترین الگوریتم از نظر معیار S

انحراف از معیار	کم‌ترین	بیش‌ترین	میانگین	الگوریتم
۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۲۱	۰/۱۶۲	۰/۰۰۹	WCA
۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۱۱	۰/۱۱۲	۰/۰۰۶۵	IWO



شکل ۶- نمودار پارتو بین توابع هدف با استفاده از WCA و IWO

۱۹۹۶۳۹/۲ متر مکعب و استهلاک انرژی آن‌ها به ترتیب برابر ۷۵/۳۷ و ۶۴/۹۹ می‌باشد. مقادیر متوسط حجم بتن‌ریزی و استهلاک انرژی در طرح‌های به‌دست آمده از هر دو الگوریتم نیز به ترتیب برابر با ۲۴۰۸۱۷/۲ متر مکعب و ۷۶/۳ درصد برای الگوریتم IWO است. ۲۵۲۸۴۶/۵ متر مکعب و ۷۰/۶۴ درصد برای الگوریتم WCA است. در مقایسه با طرح اجرا شده سرریز که دارای ۲۲۲۷۸۲/۴ متر مکعب حجم بتن‌ریزی و ۶۰/۱ درصد استهلاک انرژی می‌باشد؛ مشخص است که رویکرد پیشنهادی با استفاده از دو الگوریتم WCA و IWO توانسته است به طور قابل توجهی موجب کاهش حجم بتن مصرفی و افزایش استهلاک انرژی بر روی سرریز شود. به‌عنوان مثال کم‌ترین پاسخ به‌دست آمده با استفاده از IWO موجب کاهش ۲۰ درصدی حجم بتن مصرفی و افزایش ۱۲ درصدی استهلاک انرژی در مقایسه با طرح اجرا شده سرریز شده است. همچنین کم‌ترین پاسخ به‌دست آمده با استفاده از WCA باعث کاهش ۱۰ درصدی حجم بتن مصرفی و افزایش ۴/۸۹ درصدی استهلاک انرژی شده است.

طبق جدول (۴) نیز مشخص است که IWO عملکرد بهتری نسبت به WCA در طراحی بهینه سرریزهای پلکانی از خود نشان داده است. به‌گونه‌ای که میانگین معیار S در IWO، ۰/۰۵۶ و در WCA برابر ۰/۱۳۷ می‌باشد. در شکل (۴) پاسخ بهینه بهترین جبهه پارتو هر کدام از الگوریتم‌ها نیز با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است نیز کارایی IWO به خوبی نشان داده شده است. برای تحلیل نتایج، پاسخ‌های با هزینه طراحی بیش‌تر، کم و متوسط انتخاب و مورد بحث قرار گرفته است.

جدول (۵) مقادیر متغیرهای تصمیم برای طرح‌های با بیش‌ترین، کم‌ترین و متوسط هزینه طراحی را برای هر دو الگوریتم نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، پرهزینه‌ترین پاسخ به‌دست آمده از IWO دارای ۳۱۹۲۶۷/۳ متر مکعب حجم بتن‌ریزی و ۷۹/۵۴ درصد استهلاک انرژی می‌باشد. همچنین کم‌ترین پاسخ به‌دست آمده از این الگوریتم دارای ۱۷۶۸۹۸/۴ متر مکعب حجم بتن‌ریزی با ۷۲/۳۵ درصد استهلاک انرژی می‌باشد. اما در مقابل، بیش‌ترین و کم‌ترین حجم بتن‌ریزی برای الگوریتم WCA به ترتیب برابر ۳۳۱۱۷۶/۴ و

جدول ۵- جزئیات طراحی با الگوریتم‌های مذکور

پارامتر	WCA			IWO	
	کمتر	میان	حداکثر	کمتر	حداکثر
شیب سرریز (%)	۱۷/۵۴	۱۶/۷۱	۱۶/۶۵	۵/۹۵	۷/۷۹
عرض سرریز (m)	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۸/۵۷	۳۸/۵۷
ارتفاع پله‌ها (m)	۲/۸۷	۲/۹۲	۲/۷۳	۲/۸۲	۲/۹۹
ارتفاع شوت (m)	۲۴/۴۵	۳۰/۶۹	۳۸/۲۱	۲۴	۳۱/۴۹
بار آبی روی سرریز (m)	۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۷۴	۴/۷۴
انرژی مستهلک شده (%)	۶۴/۹۹	۷۰/۶۴	۷۵/۳۷	۷۲/۳۵	۷۶/۳۷
حجم ساخت سرریز (m ³)	۱۹۹۳۶۱/۴	۲۵۲۸۴۶/۵	۳۳۱۱۷۶/۸	۱۷۶۸۹۸/۴	۲۴۰۸۱۷/۲

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک رویکرد جدید برای طراحی سرریزهای پلکانی ارائه شد. در رویکرد ارائه شده در مرحله طراحی علاوه بر کمینه نمودن هزینه‌های طراحی و احداث، بیشینه نمودن میزان استهلاک انرژی نیز مورد توجه قرار گرفت. برای این منظور از توانایی‌های دو الگوریتم بهینه‌سازی جدید با نام‌های الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز و الگوریتم چرخه آب استفاده شد. مدل‌های توسعه داده بر اساس دو الگوریتم مذکور، بر روی سرریز سد سیاه بیشه پائین مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس معیارهای ارزیابی، نتایج نشان داد IWO در مقایسه با WCA دقت و سرعت بهتری برای رسیدن به مجموعه‌ای از جواب‌ها دارد. همچنین از بین پاسخ‌های موجود بر روی نمودار تعامل به دست آمده از IWO طرح دارای حجم بتن‌ریزی کمتر از طرح‌ها به عنوان طرح پیشنهادی انتخاب شد. جزئیات طرح انتخاب شده در مقایسه با طرح اجرا شده سرریز نشان داد، رویکرد پیشنهادی موجب افزایش ۱۲ درصد استهلاک انرژی و کاهش ۲۰ درصد حجم بتن‌ریزی سرریز نسبت به طرح موجود شده است که بیان‌گر کارایی رویکرد ارائه شده در طراحی سرریزهای پلکانی می‌باشد. همچنین برای WCA، حجم بتن‌ریزی را ۱۰ درصد کاهش و استهلاک انرژی را ۴/۸۹ درصد افزایش داده است. به عبارت دیگر الگوریتم WCA حجم بتن‌ریزی را به مقدار ۲۳۱۴۳،۲ مترمکعب کمتر از حجم اجرا شده‌ی سرریز برآورد کرده است در حالیکه این کاهش حجم برای الگوریتم IWO ۴۴۵۵۶،۴۸ مترمکعب نسبت به طرح اجرا شده سرریز است که نشان داده کارایی بهتر این الگوریتم نسبت به الگوریتم WCA می‌باشد.

منابع

اکبری فرد، س.، قادری، ک. و علیان نژاد، م.، ۱۳۹۴. بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن با استفاده از دو الگوریتم چرخه آب (WCA) و جستجوی گرانشی (GSA) (مطالعه موردی: حوضه آبریز گرگان‌رود). نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران. ۲(۵): ۳۷-۴۹.

اژدری مقدم، م. و درخشان علمدارلو، پ. ۱۳۹۷. طراحی بهینه

سرریزهای پلکانی جهت حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی و الگوریتم کرم شب‌تاب و ترکیب هر دو الگوریتم. نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران. ۵(۱۷): ۳۹-۴۹.

حسنعلی پور شهرآبادی، ا.، اژدری مقدم، م. و کاویان پور، م. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب سرریز پلکانی بر رژیم جریان و پارامترهای هیدرولیکی میدان (مطالعه موردی سرریز سدهای سیاه بیشه). مجله پژوهش آب ایران. ۱۳(۲): ۱۳۹-۱۴۹.

حجتی، ح.، احمدی، ح. و زراتی، ا. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی عددی سرریز پلکانی دریچه‌دار و پتانسیل وقوع پدیده کاویتاسیون در آن. نشریه سد و نیروگاه برق آبی. ۴(۱۴): ۱-۱۴.

زارعی، ر.، قدوسی، ح. و شاهوردی، ک. (۱۳۹۸). به کارگیری الگوریتم علف‌های هرز مهاجم (IWO) و الگوریتم ژنتیک (GA) در بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از سد طازران. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۹(۳۵): ۱۱۳-۱۲۴.

سهرابی، ز.، سروریان، ج. و مامی‌زاده، ج. ۱۳۹۹. توسعه مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز دوهدفه برای طراحی بهینه ابعاد هندسی و شیب سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا با استفاده از الگوریتم NSGA-II. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۲): ۴۶۹-۴۷۸.

شجاع، ف.، سلماسی، ف.، فرسادی‌زاده، د.، ناظمی، ا. و اشرف صدرالدینی، ع. ۱۳۹۱. طراحی بهینه سرریزهای پلکانی جهت حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله دانش آب و خاک. ۲۲(۴): ۶۹-۸۳.

قهرمانی، ب. و بیات، ب. ۱۳۹۶. بهینه‌سازی هندسی سرریز پلکانی سد پایین سیاه بیشه جهت حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات PSO. شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، اردبیل.

معینی، ر. و جزائری، پ. ۱۳۹۷. حداقل‌سازی هزینه احداث سرریز پلکانی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی. نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران. ۵(۱۸): ۳۶-۲۵.

Azhdary Moghaddam, M., Shahheydari, H. and Jafari

- Applied Soft Computing, 101: 1-15.
- Mehrabian, A. R. and Lucas, C. 2007. A Novel Numerical Optimization Algorithm Inspired from Weed Colonization. *Journal of Ecological informatics*. 1(4): 355-366.
- Mooselu, M. G., Nikoo, M. R., Rayani, N. B. and Izady, A. 2019. Fuzzy Multi-Objective Simulation Optimization of Stepped Spillways Considering Flood Uncertainty. *Journal of Water Resources Management*. 33(7): 1-15.
- Ohadi, S. and Jafari-Asl, J. 2021. Multi-Objective Reliability-Based Optimization for Design of Trapezoidal Labyrinth Weirs. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*. 77: 1-29.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Takahashi, M. 2004. Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(9): 860-869.
- Pegram, G. G., Officer, A. K. and Mottram, S. R. 1999. Hydraulics of Skimming Flow on Modeled Stepped Spillways. *Journal of hydraulic engineering*. 125(5): 500-510.
- 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.
- Salmasi, F. and Arvanaghi, H. 2013. Effect of Slope on Energy Dissipation over Stepped Spillway. *Iranian Journal of Water and Environmental engineering*. 1(1): 47-56.
- Sori, N. and Mojtahedi, A. 2015. Investigation of Effects of the Geometry on Rate of Energy Dissipation of the Flow over the Stepped Spillway using Fuzzy Inference Systems. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 45(3): 25-40.
- Tabari, M. M. R. and Tavakoli, S. 2016. Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 41(4): 1215-1224.
- Nodushan, E. 2011. Investigation on effect of Discharge, spillway's slope and step's characteristics on the Ogee-stepped spillway on energy dissipation by applying numerical models. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 1(4): 23-34.
- Chatila, J. G., and Jurdi, B. R. 2004. Stepped spillway as an energy dissipater. *Journal of Canadian Water Resources*. 29(3): 147-158.
- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, 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 and Particle Swarm Algorithm for Optimization of Labyrinth Spillway Based on Half and Quarter Round Crest Shapes. *Journal of Flow Measurement and Instrument*. 66: 209–217.
- Ghasemi Rad, M. J. G., Ohadi, S., Jafari-Asl, J., Vatani, A., Ahmadabadi, S. A. and Correia, J. A. 2022. GNDO-SVR: An Efficient Surrogate Modeling Approach for Reliability-Based Design Optimization of Concrete Dams. *Journal of Structures*. 35: 722-733.
- Haddad, O. B., Sharifi, F. and Naderi, M. 2005. Optimum design of stepped spillways using genetic algorithm. In *Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on Evolutionary Computing*, Lisbon, Portugal, 325-331.
- Jafari-Asl, J., Kashkooli, B. S. and Bahrami, M. 2020. Using Particle Swarm Optimization Algorithm to Optimally Locating and Controlling of Pressure Reducing Valves for Leakage Minimization in Water Distribution Systems. *Journal of Sustainable Water Resources Management*. 6(4): 1-11.
- Jafari-Asl, J., Seghier, M., Ohadi, S. and van Gelder, P. 2021. Efficient method using Whale Optimization Algorithm for Reliability-Based Design Optimization of Labyrinth Spillway. *Journal of*

Using Water Cycle (WCA) and Weed (IWO) Algorithms to Multipurpose Optimization Spillways of (Case Study: Down Siah Bisheh Dam)

M. Komasi*¹, M. Lak²

Recived: Aug.16, 2023

Accepted: Oct.05, 2023

Abstract

Stepped spillways have received special attention today for their simultaneous operation in energy transfer and dissipation. In designing these spillways, the best way is to achieve a design with the highest amount of energy dissipation in the downstream and the lowest design cost. In this study, a multi-objective optimization model based on weed algorithms (IWO) and water cycle (WCA) is used to design stepped spillways with the aim of minimizing implementation costs and maximizing energy dissipation. The efficiency of the developed model was tested on the spillway of the down Siah Bisheh Dam. The results showed that the IWO algorithm has better accuracy and convergence speed than the WCA algorithm in solving the problem of multi-objective stepped spillway optimization. It was also found that using a multi-objective optimization approach can provide a set of answers to designers who can choose a suitable design for implementation in any situation depending on the amount of cost and energy consumption. Comparison between the responses with the lowest concreting volume provided by the IWO compared to the Spillway plan implemented, reduced the concreting volume by 20% and increased the energy dissipation by 12%. For the WCA, it also reduced the volume of concreting by 10 percent and increased energy dissipation by 4.89 percent.

Keywords: Energy dissipation, Multi-Objective optimization, Metaheuristic, Siah Bisheh, Stepped spillways

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Iran
2- Masters student, Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Iran
(*- Corresponding Author E-mail: Komasi@abru.ac.ir)