Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
5th Year / No. 18 / December 2018

نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال پنجم / شماره هجدهم / پاییز ۱۳۹۷

حداقل‌سازی هزینه احداث سرریز پلکانی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی

سید پدرام جزائری فارسانی[۱]

رامتین معینی*[۲]

چکیده

در این تحقیق از یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی به نام الگوریتم جستجوی گرانشی به منظور طراحی بهینه اقتصادی سرریز پلکانی استفاده می‌شود. در حالت کلی، پروژه‌های سدسازی از پروژه‌های پرهزینه عمرانی می‌باشند که لازم است تا حد امکان هزینه‌های احداث آن‌ها کاهش یابد. از جمله سازه های پرهزینه احداثی سدها، سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی می‌باشد. استهلاک انرژی در سدها به وسیله سازه‌هایی چون سرریزها انجام می‌شود که در این تحقیق سازه مستهلک‌کننده انرژی، سرریز پلکانی می‌باشد؛ بنابراین در این تحقیق از الگوریتم جستجوی گرانشی به منظور بهینه‌سازی هزینه‌های خاکبرداری و بتن‌ریزی سرریز پلکانی و در نهایت کاهش هزینه‌های احداث آن استفاده شده است. با انجام کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب به عنوان مطالعه موردی کمترین هزینه احداث سرریز پلکانی سد تهری هندوستان با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی و با منظور نمودن محدودیت‌های هیدرولیکی و توپوگرافی تعیین می‌شود. در ادامه نتایج با نتایج روش ویتال‌وپوری و الگوریتم ژنتیک مقایسه می‌شود. مقایسه نتایج روش ویتال‌وپوری با دو الگوریتم مذکور نشان‌دهنده آن است که هنگامی که چهار پله منظور شود، نتایج الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی گرانشی نسبت به روش ویتال‌وپوری به ترتیب ۶ و ۷/۶ درصد بهبود می‌یابند و نتایج الگوریتم جستجوی گرانشی ۱/۸ درصد نسبت به نتایج الگوریتم ژنتیک بهبود یافتند.

واژه‌های کلیدی

سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، سرریز پلکانی، طراحی بهینه، الگوریتم جستجوی گرانشی، الگوریتم ژنتیک، سد تهری.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرلیکی، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان.

۲*. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، تلفن:۰۳۱-۳۷۹۳۵۲۹۳، r.moeini@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۲۵ تاریخ پذیرش:۹۶/۹/۱۸

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

مقدمه

سدها برای اهداف گوناگونی از جمله ذخیره آب سطحی، تأمین برق و آب آشامیدنی، ماهی‌گیری، تفریحی و غیره ساخته می‌شوند. سازه سدها از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که یکی از مهمترین آن‌ها، سازه‌های مستهلک کننده انرژی است. از آنجا که اختلاف آب سراب و پایاب سد زیاد است، انرژی پتانسیل زیادی در آب ذخیره می‌شود و لذا لازم است که مقدار قابل توجهی از این انرژی مستهلک شود تا از تخریب پایین‌دست سد و سایر مشکلات مالی و جانی جلوگیری شود. استهلاک انرژی می‌تواند توسط سازه‌هایی نظیر انواع سرریزها و حوضچه‌های آرامش انجام شود (جزائری‌فارسانی و معینی، ۱۳۹۵).

در حالت کلی سرریز سازه‌ای است که باعث انتقال آب اضافی از بالادست سد به پایین‌دست آن می‌شود. سرریز سدها انواع مختلفی دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به سرریزهای سیفونی، نیلوفری، جانبی، لبه‌آبریز و پلکانی اشاره کرد (حسینی و ابریشمی،۱۳۸۹). هنگامی که ارتفاع سد کم باشد از سرریز و حوضچه آرامش منفرد استفاده می‌شود ولی در سدهای بلند، سرریز و حوضچه آرامش منفرد کارآمد نمی باشد. به دلیل ارتفاع و سرعت زیاد جریان، عدد فرود در پنجه شوت سرریز بسیار بزرگ می شود و در نتیجه ابعاد خود حوضچه و دیواره آن بیش از اندازه افزایش می‌یابد. در این حالت سیستمی که بتواند متشکل از تعدادی سرریز و حوضچه آرامش متوالی باشد کار آمد می باشد. بدین منظور می‌توان از سرریزهای پلکانی بهره برد (افشار و دارائی‌خواه، ۱۳۸۹).

سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پاشنه پایین‌دست ادامه دارد. به دلیل کم‌هزینه بودن ساخت سرریز پلکانی، اغلب احداث این سرریز نسبت به سایر سرریزها برتری دارد. علاوه بر این، استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی از سرریزهای صاف بدون پله با همان ابعاد، بیشتر است که این افت انرژی بیشتر باعث کاهش طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیوارهای جانبی آن می شود. از دیگر مزایای سرریز پلکانی این است که این سرریز نسبت به سایر سرریزها در مقابل خلأزایی مقاوم‌تر بوده که این مسأله طراحان را به استفاده از این سرریز بیشتر ترغیب می‌کند (فریزل و رنا[1]، ۲۰۱۳). این نکته قابل ذکر است که اغلب سرریزهای پلکانی با مقطع منشوری طراحی می‌شوند لذا توجیه اقتصادی و هیدرولیکی بیشتری نسبت به سایر سرریزها دارند (بزرگ‌حداد و همکاران، ۲۰۰۵).

در طراحی بهینه سرریز پلکانی عوامل مختلفی از جمله حداقل‌سازی هزینه‌های ساخت و یا حداکثرسازی عملکرد هیدرولیکی سازه‌ای مورد توجه محققین می‌باشد. بدین منظور مسأله‌ی مذکور را می‌توان در قالب یک مسأله بهینه سازی فرمول‌بندی و با استفاده از یکی از روش‌های مرسوم بهینه‌سازی آن را حل نمود. در حالت کلی برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌توان از یکی از دسته‌بندی کلی روش‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم‌های فراکاوشی[2] استفاده نمود. هرکدام از این دسته روش‌ها مزایا و معایبی دارند. امروزه استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی با توجه به مزایای ویژه، بیش از پیش مورد توجه محققین در حل مسائل بهینه‌سازی قرارگرفته است. مهمترین مزایای این الگوریتم عبارتند از: (افشار و همکاران، ۱۳۹۳):

-تعیین جواب مسأله تنها از طریق اطلاعات محاسبات تابع هدف و قیدها صورت می‌گیرد و از سایر پیچیدگی‌های حل مسأله با استفاد از سایر روش‌ها از جمله گسسته‌سازی و مشتق‌گیری جلوگیری می‌شود.

-رفتار جستجوی هوشمندانه در این الگوریتم‌ها مانع به دام افتادن در نقاط بهینه محلی می‌گردد و بنابراین امکان یافتن نقطه بهینه مطلق افزایش می‌یابد.

-به علت درگیربودن با مجموعه‌ای از جواب‌ها به جای تعیین یک جواب، تعداد زیادی از جواب‌های بهینه یا نزدیک بهینه تعیین می‌شوند و در نهایت با مقایسه آن‌ها جواب بهینه مسأله تعیین می‌شود.

بررسی سوابق تحقیقاتی نشان می‌دهد که درسالیان اخیر چندین کار تحقیقاتی محدود در زمینه تعیین ابعاد بهینه (طراحی) سرریز پلکانی با استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی انجام شده است؛ از جمله در سال ۲۰۰۵ بزرگ‌حداد و همکاران از الگوریتم ژنتیک[3] به منظور طراحی

۱.Frizell and Renna

۲.Meta heuristic algorithm

۳.Genetic Algorithm

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

بهینه سرریز پلکانی استفاده نمودند. در ادامه، دارائی‌خواه و همکاران در سال ۲۰۰۹ از الگوریتم هوش جمعی ذرات[۱] برای بهینه‌سازی ابعاد حوضچه‌های آرامش آبشاری استفاده نمودند. همچنین، بزرگ‌حداد و همکاران در سال ۲۰۱۰ برای طراحی بهینه سرریز پلکانی از الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل[۲] استفاده نمودند. افشار و دارائی‌خواه در سال ۱۳۸۹ نیز از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ابعاد سرریز پلکانی استفاده نمودند. در نهایت جزائری‌فارسانی و معینی (۱۳۹۵) از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی[۳] به منظور طراحی بهینه سرریز پلکانی استفاده نمودند و نشان دادند که استفاده از این الگوریتم در بهینه‌سازی سرریز پلکانی مؤثر می‌باشد.

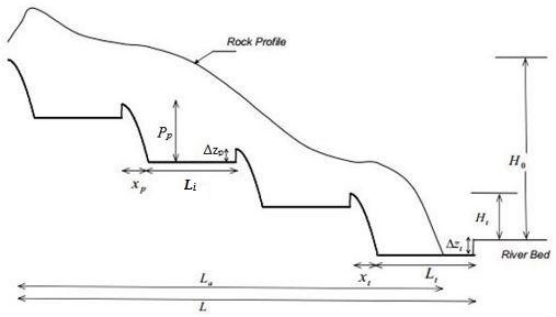
بررسی سابقه تحقیقاتی نشان‌دهنده آن است که فقط تعداد محدودی کار تحقیقاتی در زمینه طراحی بهینه سرریزها و به ویژه سرریز پلکانی انجام شده است. لذا در این تحقیق با استفاده از یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی به نام الگوریتم جستجوی گرانشی[۴]، مسأله طراحی بهینه سرریز پلکانی سد تهری[۵] هندوستان به عنوان مطالعه موردی حل شده و با نتایج روش ویتال‌وپوری[۶] و الگوریتم ژنتیک مقایسه می‌شود.

مواد و روش

در این تحقیق از روش ویتال‌وپوری، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی گرانشی برای طراحی بهینه سرریز پلکانی استفاده می‌شود و لذا در این بخش توضیحاتی در مورد این روش‌ها ارائه می‌شود.

روش ویتال‌وپوری

در این روش با توجه به عمق آب رودخانه پایین‌دست و سایر شرط‌های موجود، ابتدا طول و موقعیت حوضچه سرریز انتهایی مشخص می‌شود. سپس با توجه به طول باقیمانده‌ی سد (با توجه به توپوگرافی)، این طول باقیمانده بر تعداد خاصی (دو یا سه یا چهار) سرریز تقسیم می‌شود که در نهایت منجر به شکل‌گیری سرریزهای ماقبل با طول یکسان می‌شود. در نهایت، به این ترتیب شکل کلی سرریز سد و مقادیر سایر متغیرها مطابق شکل (۱) تحعیین می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷).



شکل (۱): مقطع طولی از سرریزهای متوالی (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷)

در این روش ابتدا دو منحنی معرفی می‌شوند. منحنی $FJHC$[۷] نشان‌دهنده تغییرات عمق مزدوج جریان پس از پرش هیدرولیکی در حوضچه سرریز انتهایی در برابر دبی متغیر جریان می‌باشد و منحنی $TWRC$[۸] منحنی عمق بر حسب دبی رودخانه است که برای محاسبه ارتفاع سرریز (پله) انتهایی باید این دو منحنی با همدیگر مطابقت داشته باشند. به بیان دیگر برای ایجاد پرش هیدرولیکی درون حوضچه سرریز انتهایی در دبی طرح، باید عمق رودخانه با عمق مزدوج (عمق ثانویه) جریان پس از پرش برابر یا بیشتر باشد. در این روش با استفاده از معادله منحنی $FJHC$ (شکل (۲))، ارتفاع سرریز (پله) انتهایی (H_t) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$H_t = \frac{g * y_{td}^4}{7.8 q_d^2} \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق، y_{td} عمق پایاب در دبی طرح، g شتاب گرانشی و q_d دبی طرح در واحد عرض سد می‌باشد.

در ادامه، با منظور نمودن رابطه برنولی برای دو مقطع (یکی در پای شوت[۹] سرریز (تنداب، قسمت انتهایی سرریز) و یکی

۱. Chute
۲.Particle Swarm Optimization
۳.Honey-Bee Mating Optimization
۴.Ant Bee Colony algorithm
۵.Gravitational Search Algorithm
۶.Tehri dam
۷.Vittal and Porey
۸.Free-Jump-Height Curve
۹.Tail Water-Rating Curve

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

قبل از شوت سرریز) و با درنظرگرفتن رابطه پیوستگی برای مقطع قبل از شوت سرریز، دو رابطه (۲) و (۳) حاصل می شود. شایان ذکر است که برای ساده‌سازی این دو رابطه از پارامترهای بدون بعد p_* و q_* استفاده شده که در روابط (۴) و (۵) ارائه شده است (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

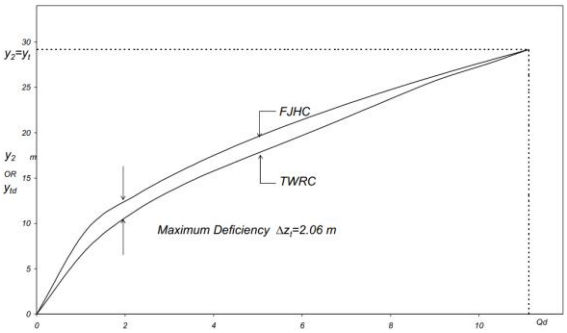
$$\frac{1}{q_*} = (0.5Fr_1^{\frac{4}{3}} + Fr_1^{\frac{-2}{3}} - \frac{1}{2^{\frac{1}{3}} * C^{\frac{2}{3}}})^{\frac{3}{2}} \quad (۲)$$

$$P_* = \frac{Fr_1^2}{2} - \frac{Fr_1^{\frac{2}{3}}}{2^{\frac{1}{3}} * C^{\frac{2}{3}}} + 1 \quad (۳)$$

$$P_* = \frac{P}{y_1} \quad (۴)$$

$$q_* = \frac{q_d}{g^{0.5} P^{1.5}} \quad (۵)$$

که در روابط فوق، Fr_1 مقدار عدد فرود اولیه در محل پرش، c ضریب جریان (C=0.47) و P ارتفاع سرریز (همان H_t) انتهایی می‌باشد. شایان ذکر است که در این روش ابتدا توسط رابطه (۵) مقدار q_* محاسبه شده و در ادامه توسط رابطه (۲)، Fr_1 با روش سعی و خطا محاسبه می‌شود. سپس توسط رابطه (۶) عمق اولیه پرش (y_1) در حوضچه سرریز انتهایی تعیین می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷).



شکل (۲): مقایسه بین منحنی‌های *FJHC* و *TWRC* برای سرریز انتهایی (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷)

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}} \quad (۶)$$

که در رابطه فوق، v_1 سرعت اولیه قبل از پرش بوده و سایر پارامترها از پیش تعیین شده‌اند. پس از تعیین عمق اولیه پرش، عمق ثانویه آن، y_2، توسط رابطه (۷) تعیین می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.5(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (۷)$$

با مشخص شدن اعماق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی، طول حوضچه سرریز انتهایی، L_t، با استفاده از رابطه پیشنهادی *USBR*[۱] از رابطه (۸) تعیین می‌شود (ویتال وپوری، ۱۹۸۷).

$$L_t = 4.25 * y_2 \quad (۸)$$

با مقایسه دو منحنی ارائه شده در شکل (۲)، بیشترین اختلاف تراز پایاب و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، ΔZ_t، تعیین می‌شود که برای ایجاد کامل پرش هیدرولیکی لازم است که کف حوضچه سرریز انتهایی به اندازه ΔZ_t باید پایین برود؛ بنابراین ارتفاع اصلاحی سرریز انتهایی، P_t، از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷).

$$P_t = H_t + \Delta Z_t \quad (۹)$$

در ادامه، با استفاده از مقدار دبی طرح، هد کل روی تاج سرریز توسط رابطه (۱۰) تعیین می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷).

$$h_{0d} = (\frac{q_d}{c\sqrt{2g}})^{2/3} \quad (۱۰)$$

که در رابطه فوق، h_{0d} هد کل روی سرریز است و سایر پارامترها از قبل تعریف شده‌اند.

پس از تعیین هد کل روی سرریز، طول افقی شوت سرریز انتهایی (x_t)، با استفاده از رابطه پیشنهادی *USBR* برای سرریز اوجی، توسط رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود (ویتال وپوری، ۱۹۸۷).

$$x_t = 1.455 h_{0d} (\frac{P_t}{h_{0d}})^{\frac{1}{1.85}} \quad (۱۱)$$

در ادامه، مقداری برای تعداد کل سرریزها (N) فرض می‌شود و رابطه (۱۲) با استفاده از منحنی *FJHC* و رابطه پیوستگی، برای تعیین ارتفاع سرریزهای ماقبل از سرریز انتهایی (P_p) با روش آزمون و خطا حل می‌شود (ویتال-وپوری، ۱۹۸۷).

$$P_p = \frac{H_0 - H_t}{N-1} + 1.671 \frac{q_d^{0.5} P_p^{0.25}}{g^{0.25}} - \left(\frac{q_d}{c\sqrt{2g}}\right)^{\frac{2}{3}} + 0.179 \frac{q_d}{g^{0.5} P_p^{0.5}} \quad (۱۲)$$

۱.United States Bureau of Reclamation

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

که در رابطه فوق، H_0 ارتفاع کلی سقوط جریان و سایر پارامترها از پیش تعریف شده‌اند. سپس با جایگذاری مقدار P_p در رابطه (۵) به جای P، مقدار q_* برای سرریزهای ماقبل محاسبه می‌شود. در ادامه با استفاده از رابطه (۲) عدد فرود اولیه در محل پرش برای سرریزهای ماقبل محاسبه می‌شود. همانند سرریز انتهایی، با استفاده از روابط (۶) و (۷)، اعماق پرش در سرریزهای ماقبل تعیین می‌شود. در ادامه با استفاده از رابطه (۱۳) طول افقی حوضچه سرریزهای ماقبل (L_i) تعیین می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$L_i = 6(y_2 - y_1) \qquad (۱۳)$$

شایان ذکر است که مجموع طول افقی حوضچه سرریز با طول افقی شوت سرریز، به عنوان طول افقی هر پله سرریز، L_i' منظور می‌شود. همچنین توسط رابطه (۱۱) و با جایگذاری P_p به جای P_t، مقدار طول افقی شوت سرریزهای ماقبل انتهایی، x_p، محاسبه می‌شود.

سپس با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۴)، مقدار برآمدگی انتهای حوضچه سرریزهای ماقبل (Δz_p) توسط رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$N\left(P_p - \Delta z_p\right) = H_0 - H_t \qquad (۱۴)$$

$$\Delta z_p = 1.671\frac{q_d^{0.5}P_p^{0.25}}{g^{0.25}} - \left(\frac{q_d}{c\sqrt{2g}}\right)^{\frac{2}{3}} + 0.179\frac{q_d}{g^{0.5}P_p^{0.5}} \qquad (۱۵)$$

که در این روابط تمامی پارامترها از پیش تعریف شده‌اند. در انتهای این روش، با استفاده از رابطه (۱۶) طول کلی احداث سرریز پلکانی، L، محاسبه می‌شود (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$L = (N-1)(x_p + L_i) + (x_t + L_t) \qquad (۱۶)$$

شایان ذکر است تا زمانی‌که برای N فرضی، مقادیر به گونه‌ای تعیین شوند که طول کل سرریز (L) برابر یا کمتر از طول مجاز احداث سرریز (L_a) بر حسب متر باشد، مراحل فوق تکرار می‌شوند.

در نهایت پروفیل طولی سرریزها از رابطه (۱۷) تعیین می‌شود. در انتها این نکته قابل ذکر است که مقادیر مورد استفاده در روابط این روش بر اساس ضوابط *USBR* منظور شده‌اند (USBR، ۱۹۸۵):

$$\frac{y}{h_{0d}} = 0.5\left(\frac{x}{h_{0d}}\right)^{1.85} \qquad (۱۷)$$

که در رابطه فوق، x و y مختصات نقاط سرریز و h_{0d} هد کل روی سرریز است.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از قدیمی‌ترین الگوریتم‌های فراکاوشی است که توسط جان هالند[۱] معرفی شد. این الگوریتم بر مبنای تکامل طبیعی موجودات زنده ابداع شده است (هالند، ۱۹۷۵)؛ به عبارت دیگر الگوریتم ژنتیک فرآیندی تکاملی است که اساسی‌ترین اصل تکامل وراثت است.

در این الگوریتم، در ابتدا جمعیتی از کروموزوم‌ها[۲] به تعداد معینی تولید می‌شوند. در فضای جستجوی مسأله هرکدام از کروموزوم‌ها یک جواب می‌باشند که هریک از کروموزوم‌ها، فرد نام دارد که مجموعه آن‌ها نسل فعلی را تشکیل می‌دهد. سپس به هر فرد برازندگی[۳]، بر اساس تابع هدف، تخصیص داده می‌شود که از این برازندگی متعاقباً برای انتخاب افراد برتر، جهت ادامه فرآیند استفاده می‌شود. هرچه این برازندگی بیشتر باشد احتمال انتخاب آن فرد برای تولید نسل بعدی بیشتر است (هالند، ۱۹۷۵).

پس از تعیین برازندگی اعضای جمعیت می‌توان آن‌ها را با احتمالی متناظر با برازندگی نسبی‌شان انتخاب و برای تولید نسل بعدی ترکیب کرد. در مرحله بعدی از عملگرهای آمیزش و جهش برای تولید نسل بعدی اجرا می‌شوند. سپس درصورت لزوم رشته‌های افراد جمعیت، کدگشایی شده و تابع هدف ارزیابی و مقدار برازندگی هر فرد تعیین می‌شود و افراد متناسب با برازندگی آن‌ها برای جفت‌گیری و تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند (هالند، ۱۹۷۵). فرآیند مذکور تا رسیدن به شرط توقف ادامه می‌یابد.

در انتها این نکته قابل ذکر است که الگوریتم ژنتیک دارای سه عملگر انتخاب[۴]، آمیزش[۵] و جهش[۶] می‌باشد که بر اساس آن بهترین جواب تعیین می‌شود. در ادامه به اختصار در مورد هریک از این عملگرها توضیحاتی ارائه می‌شود.

۱.John Holland
۲.Chromosome
۳.Fitness
۴.Selection
۵.Crossover
۶.Mutation

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

- عملگر انتخاب: پس از آنکه جمعیت کروموزوم‌ها (افراد) تعیین شد لازم است که تعدادی از آن‌ها برای تولید نسل بعد انتخاب شوند. انتخاب این افراد برای والد شدن توسط عملگر انتخاب انجام می‌شود به این گونه که هر فردی که برازندگی بیشتری دارد احتمال انتخابش بیشتر است. روش های چرخ‌گردان[۱]، تورنمنت[۲] و انتخاب یکنواخت[۳] از روش-های متداول عملگر انتخاب می‌باشند (گلدبرگ، ۱۹۸۹).

- عملگر آمیزش: پس از آنکه کروموزوم‌های والد انتخاب شدند لازم است که با هم ترکیب شوند تا کروموزوم (فرد) جدید تولید شود. عمل ترکیب کروموزوم‌ها توسط عملگر آمیزش انجام می‌شود تا کروموزوم جدیدی که تولید می‌شود ترکیبی از خصوصیات ژن‌های والدهای خود باشد.

عملگر آمیزش روی تمامی کروموزوم‌ها اعمال نمی‌شود بلکه با احتمال معینی روی کروموزوم‌های منتخب اعمال می‌شود که هرچه این احتمال بیشتر باشد در فضای جستجوی مسأله، الگوریتم جواب بهتری را پیدا می‌کند. ولیکن اگر این احتمال بسیار زیاد باشد هزینه محاسباتی زیاد شده و زمان زیادی برای انجام محاسبه‌ها هدر می‌رود (گلدبرگ، ۱۹۸۹). این عملگر انواع گوناگونی دارد که تفاوت عمده آن‌ها در چگونگی تبادل ژن‌ها بین کروموزوم‌های والد به منظور تولید کروموزوم مولد است.

- عملگر جهش: جهش فرآیندی است که ژنی را با ژن دیگر برای تولید یک ساختار ژنتیکی جدید تعویض می‌کند. به بیان دیگر عملگر جهش تغییری غیرمنتظره و کاملاً تصادفی در رشته ایجاد می‌کند. عملگر آمیزش در فرزند، کروموزوم های متفاوت با کروموزوم‌های والد ایجاد می‌کند درحالیکه کروموزوم‌های فرزند دارای ژن‌های مشترکی از دو والد هستند، ولیکن عملگر جهش ویژگی‌هایی ایجاد می‌کند که اصلاً در کروموزوم‌های والد وجود ندارند (گلدبرگ[۴]، ۱۹۸۹).

در انتها ذکر این نکته ضروری است که این الگوریتم نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراکاوشی مزایا و معایبی دارد که به مزایای کلی آنها در بخش مقدمه اشاره شد. ولیکن مهمترین معایب این الگوریتم عبارت است از:

۱) به حافظه و محاسبات نسبتاً زیادی نیاز دارد

۲) الگوریتم پشتوانه ریاضی ضعیفی دارد

۳) لزوماً به جواب بهینه مطلق همگرا نمی‌شود.

الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی یکی از جدیدترین الگوریتم های فراکاوشی است که در سال ۲۰۰۹ توسط راشدی و همکاران و با الهام از قانون گرانشی حاکم در طبیعت و بر اساس قانون‌های گرانش و حرکت نیوتون معرفی شد.

در این الگوریتم عامل‌های جستجوگر مجموعه‌ای از جسم‌ها (سیاره‌ها) هستند که منطقه جواب‌های بهینه همانند سیاه چاله‌ای این عامل‌ها را به سمت خود جذب می‌کند. اطلاعات مربوط به برازندگی هر جرم در قالب جرم‌های گرانشی و اینرسی ذخیره می‌شوند. اثرگذاری‌های متقابل سیاره‌ها بر همدیگر تحت نیروهای گرانش و قانون‌های حاکم بر آن انجام می‌شود (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹).

در این الگوریتم، محیط سیستم یک دستگاه مختصات چندبعدی در فضای تعریف مسأله می‌باشد. هر نقطه از این فضا یک جواب از مسأله است که از بین این جواب‌ها، جواب بهینه انتخاب می‌شود. بر اساس قانون‌های فیزیک، هر جرم چهار ویژگی شامل موقعیت جرم، جرم گرانشی فعال، جرم گرانشی غیر فعال و جرم اینرسی دارد. در این الگوریتم تنها قانون‌های گرانش و حرکت بر سیستم حاکی می‌باشند (زینگ[۵] و گاوو[۶]، ۲۰۱۳).

اگر در فضای جستجوی مسأله N جسم موجود باشد موقعیت جسم $i=1,2,\ldots,N$ در جهت بعد d با x_i^d نشان داده می‌شود و لذا خواهیم داشت:

$$x_i^d = (x_i^1, \ldots, x_i^d, \ldots, x_i^n) \qquad (۱۸)$$

نیرویی که به جسم i توسط جسم j در زمان t در جهت بعد d، F_{ij}^d وارد می‌شود توسط رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹).

$$F_{ij}^d = G(t)\frac{M_{pi}(t)*M_{ai}(t)}{R_{ij}^{Rpower}+\varepsilon}(x_j^d(t) - x_i^d(t) \qquad (۱۹)$$

۱.Roulette Wheel Selection Method

۲.Tournament

۳.Uniform

۴.Goldberg

۵.Xing

۶.Gao

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

که در رابطه فوق، $G(t)$ ثابت گرانشی در زمان t، $M_{pi}(t)$ و $M_i(t)$ به ترتیب جرم گرانشی غیرفعال و فعال جسم i در زمان t، R_{ij} فاصله بین دو جسم در زمان t، $Rpower$ توان فاصله بین دو جسم و ε عدد بسیار کوچک است. فاصله بین این دو جسم i و j توسط رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹):

$$R_{ij}(t) = \| x_i(t), x_j(t) \| = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t)} \qquad (۲۰)$$

که در رابطه فوق، $x_i(t)$ و $x_j(t)$ به ترتیب موقعیت جسم i و جسم j در زمان t می‌باشد.

در نهایت، مجموع نیروهای وارد به جسم i در جهت بعد d در زمان t، $F_i^d(t)$ برابر مجموع ضریب‌های تصادفی نیروهایی است که k جسم برتر به جسم i وارد می‌کنند؛ بنابراین خواهیم داشت (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹):

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in k_{best}, j \neq 1} (rand_j F_{ij}^d(t)) \qquad (۲۱)$$

که در رابطه فوق، k_{best} مجموعه متغیری از k عضو برتر سیستم، $rand_j$ عددی تصادفی در بازه [0,1] است. از آنجا چند جسم به جسم iام نیرو وارد می‌کنند بنابراین در این الگوریتم تمامی نیروهای وارد به جسم i منظور نمی‌شوند بلکه برای بهبود قدرت اکتشاف الگوریتم برای یافتن جواب بهینه تنها به k عضو برتر از تمامی نیروها اجازه اثرگذاری داده می‌شود (معمولاً ۲ درصد).

شایان ذکر است که در زمان‌های اولیه جستجو، الگوریتم به جستجوی فراگیر در فضای جستجوی مسأله می‌پردازد ولی با گذشت زمان قدرت کشف الگوریتم بهتر شده و جستجو به سمت نقاط بهینه هدایت می‌شود. این مفهوم‌ها با واژه های اکتشاف[۱] و بهره‌برداری[۲] تعریف می‌شوند که باید این دو عامل به صورت کارآمد تنظیم شوند. در اینجا با انتخاب جسم‌های تأثیرگذار، این دو عامل تنظیم می‌شود (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹).

با محاسبه نیروی وارد به جسم، جسم شتابی در جهت بعد d می‌گیرد که با نیروی وارد بر آن در جهت بعد d و معکوس جرم اینرسی آن متناسب است؛ بنابراین خواهیم داشت (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹):

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \qquad (۲۲)$$

که در آن، $a_i^d(t)$ شتاب جسم i در جهت بعد d در زمان t و $M_i(t)$ جرم اینرسی جسم i در زمان t می‌باشد.

با شتابدار شدن جسم، سرعت آن نیز تغییر می‌کند که سرعت جدید هر جسم با مجموع ضریبی از سرعت فعلی و شتاب جسم برابر است (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹):

$$v_i^d(t+1) = rand_i * v_i^d(t) + a_i^d(t) \qquad (۲۳)$$

که در رابطه فوق، $v_i^d(t+1)$، سرعت جدید جسم i در جهت بعد d، rad_i عددی تصادفی در بازه [0,1]، $v_i^d(t)$ سرعت قبلی جسم i در جهت بعد d می‌باشد.

درنهایت موقعیت جدید جسم مطابق توسط رابطه (۲۴) تعیین می‌شود (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹):

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \qquad (۲۴)$$

که در رابطه فوق، $x_i^d(t+1)$ موقعیت جدید جسم i در جهت بعد d، $x^d(t)$ موقعیت قبلی جسم i در جهت بعد d می‌باشد.

شایان ذکر است که در این الگوریتم ثابت گرانش توسط رابطه (۲۵) به صورت کاهشی محاسبه می‌شود (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹):

$$G(t) = G_0 * e^{\frac{\alpha t}{T}} \qquad (۲۵)$$

که در رابطه فوق، G_0 ثابت اولیه گرانش، α عدد ثابت مثبت و T تعداد کل تکرارهای الگوریتم است.

در الگوریتم جستجوی گرانشی، هر سه جرم گرانشی فعال، گرانشی غیرفعال و اینرسی طبق رابطه (۲۶) برابر فرض می‌شوند. همچنین برای تنظیم این جرم‌ها از رابطه (۲۷) استفاده شده و سپس این جرم‌ها توسط رابطه (۲۸) نرمالیزه می‌شوند. در طی این مرحله‌ها به جرم‌های با برازندگی بهتر، جرم بیشتری نسبت داده می‌شود (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹):

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i \qquad (۲۶)$$

$$q_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \qquad (۲۷)$$

۱.Exploration

۲.Exploitation

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

$$M_i(t) = \frac{q_i(t)}{\sum_{j=1}^{N} q_j(t)} \quad (۲۸)$$

که در رابطه‌های فوق، هر سه جرم گرانشی فعال و غیرفعال و اینرسی همگی با M_i (جرم کل جسم i) برابر در نظر گرفته شده‌اند. همچنین $q_i(t)$ مقدار تابع هدف جسم i در زمان t، $fit_i(t)$ میزان برازندگی جسم i در زمان t، $best(t)$ و $worst(t)$ به ترتیب بهترین و بدترین مقدار برازندگی تابع هدف در زمان t و $M_i(t)$ جرم نرمالیزه شده جسم i در زمان t است (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹).

در حالت کلی، در این الگوریتم با تعریف فضای جستجوی مسأله و معرفی پارامترها و به‌روزرسانی آن در طول گذر زمان، در هر لحظه جسم‌ها ارزیابی و تغییرمکان آن محاسبه می‌شود. در ادامه جرم‌های گرانشی فعال، غیرفعال، اینرسی و ثابت گرانشی به‌روزرسانی می‌شوند و این فرآیند تا رسیدن به شرط توقف ادامه می‌یابد.

در انتها ذکر این نکته ضروری است که این الگوریتم نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراکاوشی مزایا و معایبی دارد که به مزایای کلی آنها در بخش مقدمه اشاره شد. ولیکن مهمترین عیب این الگوریتم این است که این الگوریتم پیوسته بوده و لذا برای حل مسائل پیوسته مفید بوده و برای مسائل گسسته مناسب نمی‌باشد.

مدل بهینه‌سازی سرریز پلکانی

در این بخش مدل ریاضی بهینه‌سازی مسأله طراحی سرریز پلکانی تعریف می‌شود. هر مدل ریاضی بهینه‌سازی شامل متغیر(های) تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های (قیود) مسأله است.

در این مسأله متغیرهای تصمیم، ارتفاع سرریزها (P_i) و طول افقی حوضچه‌های آرامش (L_i) می‌باشند. تابع هدف مسأله معیاری است که میزان مطلوبیت هر مسأله را تحت حالت‌های مختلف ارزیابی می‌کند. در این تحقیق تابع هدف حداقل‌سازی هزینه‌های احداث سرریز پلکانی است که مطابق رابطه (۲۹) تعریف می‌شود (افشار و دارائی‌خواه، ۱۳۸۹):

$$\text{Minimize } f = \sum_{i=1}^{N}(f_1(P_i, l_i) + f_2(P_i, l_i)) \quad (۲۹)$$

که در رابطه فوق f کل هزینه‌های احداث سرریز سد می‌باشد که شامل دو زیرهزینه خاکبرداری (f_1) و بتن‌ریزی (f_2) است که هر یک از این هزینه‌ها خود تابع ارتفاع سرریزها و طول حوضچه‌ها هستند. در این تحقیق هزینه بتن‌ریزی وخاکبرداری در هر مترمکعب با توجه به فهرست بهای سال ۱۳۸۴ بـه ترتیـب برابر ۱۸۰۰۰۰ ریال و ۲۳۱۰۰ ریال منظـور شـده اسـت (افشار و دارایی‌خواه، ۱۳۸۹).

در ادامه محدودیت‌های مسأله بهینه‌سازی نیز تعریف می‌شود که شامل محدودیت‌های هیدرولیکی و توپوگرافی می‌باشد که به شکل زیر تعریف می‌شوند (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$H_0 - \sum_{p=1}^{N}(P_p - \Delta Z_p) - \Delta Z_t \geq 0 \quad (۳۰)$$

که در این رابطه ΔZ_p ارتفاع برآمدگی انتهای حوضچه‌های آرامش سرریزهای ماقبل می‌باشد. رابطه فوق بیانگر این است که مجموع ارتفاع سرریزها و برآمدگی‌های انتهای هر حوضچه از ارتفاع کلی سقوط جریان بیشتر نشود. همچنین، این محدودیت لازم است که برای سرریز انتهایی نیز رعایت شود، بنابراین خواهیم داشت (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$P_t - (H_t + \Delta Z_t) \geq 0 \quad (۳۱)$$

علاوه بر این، لازم است که طول افقی حوضچه‌ها از طول قابل دسترس کمتر باشد؛ بنابراین خواهیم داشت (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$L_a - \sum_{p=1}^{N}(L_i + x_p) \geq 0 \quad (۳۲)$$

همچنین برای ایجاد پرش هیدرولیکی کامل، محدودیت‌های هیدرولیکی نیز در این مسأله منظور می‌شود که عبارتند از (ویتال‌وپوری، ۱۹۸۷):

$$P_{max} - P_p \geq 0 \quad (۳۳)$$

$$P_p - P_{min} \geq 0 \quad (۳۴)$$

$$L_i - l_{i,min} \geq 0 \quad (۳۵)$$

که در این رابطه‌ها P_{max} و P_{min} و $l_{i,min}$ و L_i به ترتیب ارتفاع حداکثر سرریز، ارتفاع حداقل سرریز، طول افقی حداقل حوضچه و طول افقی حوضچه سرریزهای ماقبل می‌باشد که مقادیر آن توسط ضوابط $USBR$ انتخاب می‌شوند.

مطالعه موردی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

در این تحقیق، به منظور ارزیابی الگوریتم‌های جستجوی گرانشی در حل مسأله بهینه‌سازی سرریز پلکانی، از اطلاعات سرریز پلکانی سد تهری به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. این سد بر روی رود گنگ[۱] در کشور هندوستان واقع شده است. در سد تهری عرض کلی تاج سرریز اصلی (w) ۹۵ متر، تراز رأس سرریز اصلی ۸۱۸ متر، دبی طرح ۱۱۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه، طول تاج سرریز ۸۰ متر، تراز بستر رودخانه در پایین‌دست سد ۶۰۰ متر، مجموع ارتفاع سقوط جریان (H_0) ۲۱۸ متر، عمق پایاب رودخانه برای سیلاب طرح (y_{td}) ۲۹/۲ متر و طول مجاز احداث سرریز (L_a) ۷۷۸ متر می‌باشد (موهان[۲] و همکاران، ۱۹۸۵).

همچنین مقادیر حداقل و حداکثر ارتفاع سرریز بر اساس ضوابط $USBR$ بر حسب متر پیشنهاد شده است:

P_{max}=92.58 ،P_{min}=30.96

علاوه بر این مقدار حداقل طول افقی حوضچه آرامش سرریزهای ماقبل توسط ضابطه $USBR$ با استفاده از رابطه $l_{i,min}=6*(y_2-y_1)$ محاسبه می‌شود.

در این تحقیق، در ابتدا ابعاد بهینه سرریز پلکانی با استفاده از روش ویتال‌وپوری تعیین می‌شود. با استفاده از روش ویتال‌وپوری نتیجه می‌شود که تنها حالت‌های انتخابی مطلوب برای تعداد سرریزها (N)، سه و چهار سرریز می‌باشد چرا که فقط در این دو حالت است که اولاً پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش هریک از سرریزها به صورت کامل تشکیل می‌شود (به بیان دیگر محدودیت‌های هیدرولیکی اعمال شده ارضا می‌شوند) ثانیاً محدودیت‌های توپوگرافی که شامل طول در دسترس برای احداث سرریزها بود، رعایت شده است.

با استفاده از روش ویتال‌وپوری در حالتی که چهار سرریز منظور شود، مجموع طول کلی سرریز سد (L) تفاوت اندکی با طول مجاز احداث سرریز ($La = ۷۷۸$) دارد و این اختلاف حدود ۱۰ متر است. در حالیکه در زمانیکه سه سرریز منظور شود، طول کلی سرریز سد تفاوت زیادی با طول مجاز احداث سرریز ($La = ۷۷۸$) دارد و این اختلاف حدود ۱۳۶ متر می‌باشد که این اختلاف منجر به خاکبرداری بیشتری نسبت به حالت چهار سرریز می‌شود و لذا در این تحقیق $N=۴$ منظور شده است. در جدول (۱) مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامترها با استفاده از روش ویتال‌وپوری ارائه شده است.

جدول (۱): ابعاد سرریزها و حوضچه‌های به‌دست‌آمده از روش ویتال‌وپوری

N	P_p(m)	x_p(m)	L_i(m)	Δz_p(m)	L(m)
۴	۶۵/۷۵	۴۸/۰۶	۱۵۶/۶۱	۱۵/۲۵	۷۸۸/۲۵

مقادیر X_t و L_t به ترتیب طول افقی شوت سرریز انتهایی و طول حوضچه سرریز انتهایی می‌باشند که به ترتیب برابر با ۴۹/۱۶ و ۱۲۵/۰۴ متر می‌باشد. همچنین، هزینه احداث سرریز پلکانی زمانیکه چهار سرریز دارد ۹۹۴ میلیون ریال می‌باشد.

در ادامه این مسأله با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی گرانشی حل شده و نتایج تجریه و تحلیل می‌شود. بدین منظور کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب انجام شده و نتایج حاصل از ده بار اجرای برنامه ارائه می‌شود. دو الگوریتم ژنتیک و جستجوی گرانشی پارامترهایی دارند که لازم است برای تعیین بهترین مقادیر آنها، آنالیز حساسیت انجام شود. در این تحقیق نیز به منظور تعیین مقادیر مطلوب پارامترها، آنالیز حساسیت انجام شده است. با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده بهترین مقادیر این پارامترها مطابق جدول (۲) و (۳) می‌باشد. اعداد جدول (۲) نشان‌دهنده درصد احتمال هریک از عملگرها می‌باشد.

جدول (۲): بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک

جهش	انتخاب	آمیزش
۰/۱۵	*roulette*	۰/۸۵

شایان ذکر است که تمام الگوریتم‌ها به ازای ۱۰۰ هزار عملگر ارزیابی (حاصلضرب جمعیت (N_p) در تعداد تکرار ($Iter$)) حل شده است.

جدول (۳): بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم جستجوی گرانشی

$elitistcheck$	G_0	α	$rpower$
۲٪	۳۰۰	۰/۰۱	۱/۱

۱.Gang

۲.Mohan

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

مقدارهای حداقل، حداکثر، میانگین (همگی بر حسب میلیون ریال) و انحراف از معیار نرمالیزه‌شده ($StdN$) در ده بار اجرای برنامه با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی گرانشی برای هنگامی که چهار سرریز منظور می‌شود (N=۴) به ترتیب در جداول (۴) و (۵) ارائه شده‌اند:

جدول (۴): نتایج هزینه احداث سرریز با استفاده از الگوریتم ژنتیک

StdN	تابع هدف (هزینه احداث سرریز)			تعداد جمعیت و تکرار
	میانگین	حداکثر	حداقل	
۰/۰۲۱۶	۹۶۷	۱۰۰۹	۹۳۵	N_p=۵۰ Iter=۲۰۰۰
۰/۰۱۹۲	۹۶۳	۱۰۱۱	۹۴۵	N_p=۱۰۰ Iter=۱۰۰۰
۰/۰۱۸۲	۹۶۳	۱۰۰۴	۹۳۹	N_p=۲۰۰ Iter=۵۰۰

بررسی نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که بهترین جواب برای الگوریتم ژنتیک در N_p=۵۰ و $Iter$=۲۰۰۰ حاصل می‌شود و مقدار آن برابر ۹۳۵ میلیون ریال است.

جدول (۵): نتایج هزینه احداث سرریز با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی

StdN	تابع هدف (هزینه احداث سرریز)			تعداد جمعیت و تکرار
	میانگین	حداکثر	حداقل	
۰/۰۱۲۰	۹۳۶	۹۵۸	۹۲۰	N_p=۵۰ Iter=۲۰۰۰
۰/۰۱۰۰	۹۳۴	۹۴۹	۹۱۸	N_p=۱۰۰ Iter=۱۰۰۰
۰/۰۰۸۷	۹۳۵	۹۵۰	۹۲۲	N_p=۲۰۰ Iter=۵۰۰

همچنین بررسی جدول (۵) نشان می‌دهد که بهترین جواب برای الگوریتم جستجوی گرانشی در N_p=۱۰۰ و $Iter$=۱۰۰۰ حاصل می‌شود و مقدار آن برابر ۹۱۸ میلیون ریال است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی گرانشی نسبت به روش ویتال‌وپوری هزینه کمتری حاصل می‌شود که در آن کمترین هزینه با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی حاصل می‌شود.

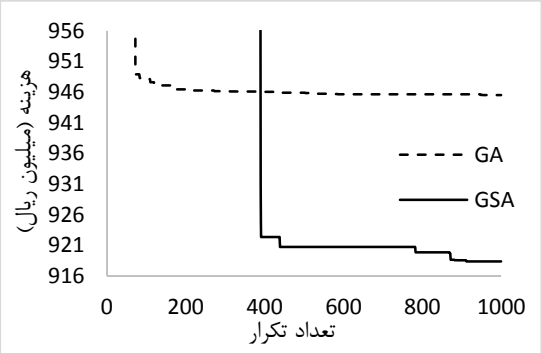
در ادامه جداول (۶) و (۷) به ترتیب ابعاد سرریزها و حوضچه‌های به دست‌آمده در بهترین جواب با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی گرانشی ارائه شده است که در آن L_i طول افقی حوضچه آرامش و L_i' طول کلی افقی هر پله سرریز (مجموع طول افقی حوضچه آرامش و شوت سرریز) است. همچنین طول کلی احداث سرریز پلکانی، (مجموع L_i' ها)، در الگوریتم ژنتیک و جستجوی گرانشی به ترتیب ۷۷۷/۰۸ و ۷۷۷/۵۷ متر می‌باشد.

جدول (۶): ابعاد سرریزها و حوضچه‌های به‌دست‌آمده با الگوریتم ژنتیک به ازای بهترین جواب

سرریز	P(m)	x(m)	L_i(m)	Δz(m)	L_i'(m)
اول	۳۸/۹۷	۳۶/۲۲	۱۳۵/۱۹	۱۱/۹۲	۱۷۱/۴۱
دوم	۵۹/۴۲	۴۵/۵۰	۱۵۳/۹۷	۱۴/۵۶	۱۹۹/۴۷
سوم	۷۸/۸۵	۵۳/۰۲	۱۶۶/۵۷	۱۶/۵۳	۲۱۹/۵۹
چهارم	۸۵/۶۱	۵۵/۴۳	۱۳۱/۴۵	۰	۱۸۶/۸۸

جدول (۷): ابعاد سرریزها و حوضچه‌های به‌دست‌آمده با الگوریتم جستجوی گرانشی به ازای بهترین جواب

سرریز	P(m)	x(m)	L_i(m)	Δz(m)	L_i'(m)
اول	۳۰/۹۲	۳۱/۹۶	۱۴۰/۰۸	۱۰/۶۲	۱۷۲/۰۴
دوم	۵۴/۵۲	۴۳/۴۳	۱۴۶/۷۳	۱۴/۰۰	۱۹۰/۱۶
سوم	۸۵/۰۴	۵۵/۲۳	۱۶۹/۵۷	۱۷/۰۸	۲۲۴/۸۰
چهارم	۹۱/۱۱	۵۷/۳۲	۱۳۳/۲۵	۰	۱۹۰/۵۷



شکل (۳): نمودار همگرایی بهترین جواب‌های به‌دست‌آمده در دو الگوریتم ژنتیک و جستجوی گرانشی

شکل (۳) به منظور مقایسه نحوه همگرایی بهترین جواب‌های به دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک و جستجوی گرانشی در تکرار ۱۰۰۰ ارائه شده است. مقایسه نتایج این شکل نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از الگوریتم جستجوی گرانشی از الگوریتم ژنتیک مناسب‌تر و با هزینه محاسباتی کمتر است.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

مسأله مذکور توسط جزائری‌فارسانی و معینی (۱۳۹۵) با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی نیز حل شد و جواب ۹۱۸ میلیون ریال برای حالت چهار سرریز (N=۴) حاصل شد. بررسی نتایج دو الگوریتم جستجوی گرانشی و کلونی زنبورعسل مصنوعی نشان می‌دهد که با استفاده از هر دو الگوریتم نتایج ۷/۶ درصد نسبت به نتایج روش ویتال‌وپوری بهبود می‌یابد و دو الگوریتم جواب‌های بسیار نزدیکی دارند. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک نتایج ۶ درصد نسبت به نتایج روش ویتال‌وپوری بهبود یافت. شایان ذکر است که اگرچه با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت به روش ویتال‌وپوری نتایج بهتری حاصل شد ولی این الگوریتم نسبت به الگوریتم جستجوی گرانشی که نتایج ۷/۶ درصد بهبود می‌یابد، عملکرد ضعیف‌تری دارد.

در انتها این نکته قابل ذکر است که از آنجا که روش ویتال‌وپوری امکان مانور زیادی برای انتخاب حالت‌های مطلوب سرریز انتهایی و به دنبال آن سرریزهای ماقبل انتهایی وجود ندارد بنابراین روش چندان کارآمدی نمی‌باشد و لذا پیشنهاد می‌شود که از سایر روش‌ها نظیر الگوریتم‌های فراکاوشی برای تعیین ابعاد بهینه استفاده شود.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی به نام الگوریتم جستجوی گرانشی به منظور بهینه‌سازی هزینه‌های خاکبرداری و بتن‌ریزی سرریز پلکانی و در نهایت کاهش هزینه‌ها در طراحی سرریز پلکانی استفاده شد. به عنوان مطالعه موردی از اطلاعات سرریز پلکانی سد تهری هندوستان استفاده گردید و مسأله مذکور با روش ویتال وپوری و الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی گرانشی حل شد. بررسی نتایج نشان داد که حالت چهار سرریز، جواب بهینه مسأله بوده و هزینه احداث آن با روش ویتال‌وپوری ۹۹۴ میلیون ریال بود. همچنین نتایج به دست آمده با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت به نتایج روش ویتال‌وپوری ۶ درصد بهبود یافت. همچنین با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی نیز نتایج ۷/۶ درصد نسبت به روش ویتال‌وپوری بهبود یافت؛ به عبارت دیگر مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی گرانشی نشان‌دهنده آن است که الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به روش ویتال‌وپوری داشته و در نهایت الگوریتم جستجوی گرانشی نیز عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد.

مراجع:

۱-افشار، م.ه؛ و دارائی‌خواه م. (۱۳۸۹). "کمینه سازی هزینه سرریزهای متوالی در سدهای بلند با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، *مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس*، ۱۰(۱).

۲-افشار، م.ه. رضایی‌سنگدهی، س.ا. و معینی، ر. (۱۳۹۳). "الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در مساله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها: مطالعه‌ی مقایسه‌ای چهار الگوریتم "، *نشریه مهندسی عمران فردوسی*، ۲۵(۲)، ۱۱۷-۱۳۴.

۳-جزائری‌فارسانی، س.پ. و معینی، ر. (۱۳۹۵). "استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی در طراحی بهینه سرریز پلکانی "، *پانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، قزوین.

۴-حسینی، م. و ابریشمی، ج. (۱۳۸۹). *هیدرولیک کانال‌های باز*. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.

5-Bozorg Haddad, O. Mirmomeni, M. and Mariño, M.A. (2010). "Optimal design of stepped spillways using the HBMO algorithm", *Civil Engineering and Environmental Systems*, 27, 81-94.

6-Bozorg Haddad, O. Sharifi, F. and Naderi, M. (2005). "Optimum Design of Stepped Spillways Using Genetic Algorithm", *Proceedings of the 6th WSEAS Int. conf. on evolutionary computing*, Lisbon, Portugal.

7-Daraeikhah, M. Meraji, S.H. and Afshar, M.H. (2009). " Application of Particle Swarm Optimization to Optimal Design of Cascade Stilling Basins". *Cientia Iranica Transaction A: Civil Engineering*, 16(1), 50-57.

8-Frizell, K.W. and Renna, F. (2013). "Cavitation potential of flow on stepped spillways". *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 630-636.

9-Goldberg, D.E. (1989). "*Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning".* Reading, MA: Addison-Wesley.

10-Holland, J. (1975). "*Adaptation in natural and artificial systems".* MIT Press, Cambridge Mass.

11-Mohan, J. Tiaga, S.S. and Gupta, P.P. (1985). "Energy dissipation and Tehri and Lakhwar Dams" *Journal of Institution of Engineers*, India, 64-68.

12-Rashedi, E. Nezamabad-pour, H. and Saryazdi, S. (2009). "GSA: Gravitional Search Algorithm". *Information Sciences*, 179, 2232-2248.

13-U.S. Bureau of Reclamation. (1985). "*Hydraulic design of stilling basins and bucket energy dissipaters*". Engineering Monograph, No.25, U.S. Dep of Interior, Bureau of reclamation Denver.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

14-Vittal, N. and Porey, P.D. (1987). "Design of cascade stilling basins for high dam spillways". *Journal of Hydraulic Division*, 113(9), 225-237.

15-Xing, B. Gao,W.J. (2013). “Gravitional Search algorithm” *Innovative Computational Intelligence: A Rough Guide to 134 Clever Algorithm*s, 355-364.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]

Minimization the construction cost of stepped spillway using Gravitational Search Algorithm

Sayyed Pedram Jazaeri Farsani[۱]
Ramtin Moeini*[۲]

Abstract

In this paper one of the newest meta-heuristic algorithms named Gravitational Search Algorithm (GSA) is used to optimal design of stepped spillway with minimizing cost. Generally, dam construction projects classify as expensive projects in which the related high costs should be reduced. Dams consist of different structures. One of these structures is energy dissipater structure. Generally, different structure such as spillway have been used for energy dissipation. Here, stepped spillway is considered as an energy dissipater structure. Therefore, GSA is used here for optimizing the excavation and concrete costs and reducing the final costs of this structure. With the use of MATLAB software for GSA coding, the Tehri dam in India is considered here as a case study and the construction cost is reduced using GSA so that all of the hydraulic constraints will be satisfied. In the following, the obtained results of GSA are compared with the results of Genetic Algorithm (GA) and Vittal and Porey (VP) approach. Comparing the results of VP approach with two used algorithms indicates that when the spillway has four steps, the results of GA and GSA are improved respectively 6% and 7.6% than the results of VP and the results of GSA are improved 1.8% than the results of GA.

Keywords

energy dissipater structures, stepped spillway, optimal design, Gravitational Search Algorithm, Genetic Algorithm, Tehri dam.

[1].M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan.
[2].Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan.Tel:031-37935293, r.moeini@eng.ui.ac.ir

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-01-31]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1397.5.18.3.5]