نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و هفتم /زمستان ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 27 / March 2021

بررسی قابلیت کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در تعیین ابعاد بهینه مقطع سدهای بتنی وزنی

فریبرز معصومی[۱]*
سارا اسفندمز[۲]،
نگین ظفری[۳]

چکیده

طراحی بهینه ابعاد سدهای بتنی وزنی با کاهش سطح مقطع سد به کاهش حجم بتن مصرفی و کاهش هزینه‌های ساخت می‌انجامد. به دلیل تعدد قیودات حاکم بر مسئله همچون قیدهای پایداری در مقابل واژگونی و لغزش که به پیچیده شدن فضای تصمیم می‌انجامد، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی فراکاوشی در طراحی بهینه سدهای بتنی وزنی گسترش‌یافته است. در این پژوهش برای نخستین بار قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در حل مسئله طراحی بهینه ابعاد سد بتنی وزنی کوینا موردبررسی قرارگرفته و ابعاد بهینه استخراجی با نتایج الگوریتم بهینه‌سازی هوش تجمعی ذرات مقایسه شد. مقایسه نشان داد که الگوریتم گرگ خاکستری با ۶۱/۵ درصد تعداد فراخوان کم‌تر نسبت به الگوریتم هوش تجمعی ذرات، توانسته میانگین توابع هدف محاسباتی را به میزان ۵/۲ درصد بهبود بخشد. ازنظر پایداری راه‌حل‌ها نیز انحراف معیار توابع هدف محاسبه‌شده با الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به الگوریتم هوش تجمعی ذرات کم‌تر است. هرچند ازنظر رسیدن به جواب بهینه مطلق در ده بار اجرای الگوریتم، جواب محاسبه‌شده توسط الگوریتم هوش تجمعی ذرات به میزان ۱/۶ درصد بهتر است. درمجموع نتایج نشان‌دهنده کارآیی الگوریتم گرگ خاکستری در محاسبه ابعاد سدهای وزنی بتنی از نظر دقت و پایداری جواب‌ها و سرعت همگرایی است.

واژه‌های کلیدی:

سد بتنی وزنی، بهینه‌سازی، الگوریتم گرگ خاکستری، نیروهای استاتیکی، نیروی زلزله، پایداری واژگونی، پایداری لغزشی

[۱]* استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی، f_masoumi@uma.ac.ir
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش مدیریت و مهندسی منابع آب، دانشگاه محقق اردبیلی
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش مدیریت و مهندسی منابع آب، دانشگاه محقق اردبیلی

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۱۸

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

مقدمه

سدهای مخزنی یکی از بزرگترین سازه‌های مهار و کنترل آب‌های سطحی هستند که برای اهداف مختلف همچون شرب، کشاورزی و صنعت، مهار سیلاب‌ها، مهار و کنترل رسوب و غیره ساخته می‌شوند. ساخت این سازه‌های غول-پیکر به دلیل ابعاد بالای آن‌ها، هزینه‌های زیادی را می‌طلبد و هرگونه تلاش برای کاهش این هزینه‌ها با لحاظ قیودات ایمنی و نیز مسائل بهره‌برداری، ازنظر فنی و مهندسی ارزشمند است.سدهای بتنی را می‌توان ازنظر شکل هندسی مقاطع به سه دسته وزنی، پشت‌بنددار و قوسی تقسیم نمود. سدهای وزنی تعادل خود را به کمک نیروهای خارجی، مانند نیروهای فشار آب، فشار موج، فشار رسوب، فشار بالابرنده و نیز به‌وسیله وزن خود سد برقرار می‌کنند (ارزیده، ۱۳۶۲).
با توجه به نقش مهم وزن سد در ایجاد پایداری سازه و ایجاد تعادل در برابر نیروهای محرک مانند زلزله و نیروهای بالابرنده، هزینه ساخت سدهای بتنی (با توجه به مصرف بتن در ساخت سد) بیش از سدهای دیگر است؛ بنابراین بهینه کردن ابعاد سد و درنتیجه کاهش حجم بتن مصرفی به کاهش هزینه‌های احداث طرح خواهد انجامید. به دلیل تعدد قیودات طراحی و نیز غیرخطی و پیچیده بودن آن‌ها، حل مسئله بهینه‌سازی ابعاد این سدها با روش‌های بهینه‌سازی ریاضیاتی معمول همچون روش برنامه‌ریزی خطی[1]، روش برنامه‌ریزی غیرخطی[2] و روش برنامه‌ریزی پویا[3] دارای مشکلات زیادی است (بانرجی و همکاران، ۲۰۱۵[4]). ازاین‌رو به نظر می‌رسد مدل‌های بهینه‌سازی فراکاوشی ابزار مناسبی برای این کار باشند. در تحقیقاتی که تاکنون انجام‌شده، کارآیی برخی از این الگوریتم‌ها در حل مسئله بهینه‌سازی ابعاد سد بتنی (چه وزنی و چه قوسی) موردبررسی قرارگرفته است. ازجمله می‌توان به تحقیق انجام‌شده توسط حمیدیان و سیدپور در سال ۲۰۱۰[5] اشاره کرد. آن‌ها در تحقیقشان الگوریتم هیبریدشده IPSO-ANFIS که ترکیب هوش تجمعی ذرات[6] بهبودیافته با سیستم استنتاجی عصبی-فازی[7] هست را با یک الگوریتم هیبریدی دیگر یعنی PSO-BPNN که ترکیب الگوریتم هوش تجمعی ذرات با نوعی شبکه عصبی بازگشتی[8] است در طراحی بهینه سدهای قوسی مقایسه نمودند و درنهایت نتیجه‌گیری کردند که مزایای IPSO-ANFIS پیشنهادشده برای طراحی بهینه سدها در مقایسه با روش PSO-BPNN بیش‌تر است. از دیگر تحقیقات انجام‌شده در زمینه بهینه‌سازی سدهای بتنی قوسی می‌توان به پوربخشیان و همکاران در سال ۲۰۱۶[9] اشاره کرد. در تحقیقی دیگر گلکار و همکاران در سال ۲۰۱۵[10] به طراحی و تعیین ابعاد سدهای بتنی وزنی با استفاده از الگوریتم هوش تجمعی ذرات پرداختند. مقایسه ابعاد به‌دست‌آمده در این روش با ابعاد پیشنهادشده از طریق روش‌های معمول نشان داد که الگوریتم هوش تجمعی ذرات قابلیت خوبی در طراحی ابعاد سدهای بتنی وزنی دارد. در یک تحقیق مهم، قدوسی و اسکوهی در سال ۱۳۹۵ به بهینه‌سازی ابعاد سدهای بتنی وزنی با استفاده از مدل بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل[11] پرداختند. مطالعه آن‌ها بر روی سد کوینا در هندوستان بود. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که حجم بتن مصرفی در ساخت این سد در حالت مقطع بهینه نسبت به حالت موجود می‌تواند به میزان ۸/۸۲ درصد کاهش یابد. اصلانی و همکاران در سال ۱۳۹۲ با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی ابعاد سدهای بتنی وزنی پرداختند. عمده تلاش آن‌ها بر تعیین مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک استوار بود. پیش از آن دهقانی و همکاران در سال ۱۳۸۵ با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی ابعاد سد بتنی وزنی پرداخته بودند. آن‌ها در تحقیق خود، از ترکیب الگوریتم ژنتیک با شبکه عصبی مصنوعی پایه شعاعی[12] همراه با قانون یادگیری انتشار خطای سریع برای تخمین هوشمند مقطع بهینه سدهای بتنی وزنی کمک گرفته بودند. در یک تحقیق دیگر، پورامینیان و قائمیان در سال ۲۰۱۷[13] با استفاده از مدل چندهدفه الگوریتم هوش تجمعی ذرات[14] به بررسی رابطه بین حجم بدنه سد و نیز مؤلفه‌های تنش وارده بر آن پرداختند.

[1] Linear Programming (LP)
[2] Non-Linear Programming (NLP)
[3] Dynamic Programming (DP)
[4] Banerjee et al., 2015
[5] Hamidian and Seyedpoor, 2010
[6] Particle Swarm Optimization(PSO)
[7] Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System(ANFIS)
[8] Back Propagation Neural Network(BPNN)
[9] Pourbakhshian et al, 2016
[10] Golkar et al, 2015
[11] Honey-Bee Mating Optimization(HBMO)
[12] Radial-Based Function(RBF)
[13] Pouraminian and Ghaemian, 2017
[14] Multi-Objective Particle Swarm Optimization(MOPSO)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

از جمع‌بندی تحقیقات پیشین نتیجه‌گیری می‌شود که هنوز یک الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی که بتوان با قاطعیت آن را نسبت به دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی برتر دانست وجود ندارد. ازاین‌رو ضروری است که قابلیت الگوریتم‌های جدید فراکاوشی نیز در حل این مسئله نسبت به الگوریتم‌های متداول فراکاوشی سنجیده شود. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری[1]، یک الگوریتم فراکاوشی الهام گرفته از طبیعت است که توسط میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ معرفی شده است. این الگوریتم تاکنون قابلیت خود را در حل تعداد زیادی از مسائل بهینه‌سازی ریاضیاتی و نیز مهندسی نشان داده است. رن و همکاران در سال ۲۰۱۸[2] به مقایسه الگوریتم‌های هوش تجمعی ذرات و گرگ خاکستری برای بهینه‌سازی چند مسئله محاسباتی با محدودیت‌های چندگانه و پیچیده پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که الگوریتم گرگ خاکستری دارای پتانسیل زیادی در حل مسائل بهینه‌سازی است. موسوی و همکاران در سال ۲۰۱۶[3] به ارزیابی دسته‌بندی امواج صوتی در مهندسی برق با الگوریتم شناخته‌شده هوش تجمعی ذرات و گرگ خاکستری پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها حاکی از برتری الگوریتم گرگ خاکستری در مقایسه با الگوریتم هوش تجمعی ذرات در مواردی همچون سرعت همگرایی، کمینه کردن کلی توابع و دقت دسته‌بندی بود. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که سرعت همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، نسبتاً بالا است.

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی نیز بیان گردید الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری علی‌رغم این‌که کمتر از پنج سال از معرفی آن می‌گذرد، توانسته در حل تعدادی از مسائل مهندسی و ریاضیاتی عملکرد قابل قبولی را نشان دهد. تحقیق حاضر تلاش می‌کند که برای اولین بار قابلیت این الگوریتم را در حل مسئله نسبتاً پیچیده ریاضیاتی یعنی تعیین ابعاد بهینه سدهای بتنی وزنی نشان دهد.

موارد و روش‌ها

معرفی الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری:

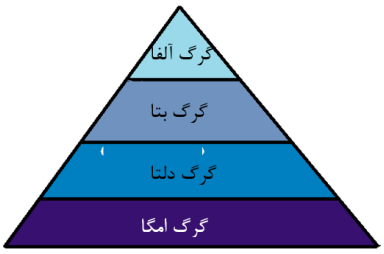
در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری به‌منظور دستیابی به بهترین ابعاد سد بتنی وزنی استفاده‌شده است تا سد موردمطالعه دارای مناسب‌ترین سطح مقطع و به‌تبع آن کم‌ترین حجم بتن مصرفی ممکن باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز ذکر شد، الگوریتم گرگ خاکستری، یک الگوریتم فراکاوشی الهام گرفته از طبیعت است که توسط میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ فرموله و ارائه شد. در این الگوریتم بهینه‌سازی، از رفتار گرگ‌های خاکستری و سلسله‌مراتب رهبری و روش شکار آن‌ها الگوبرداری می‌شود. در این الگوریتم از چهار نوع گرگ خاکستری شامل آلفا(α)، بتا (β)، دلتا (δ) و امگا (ω) برای شبیه‌سازی سلسله‌مراتب رهبری استفاده شده است. علاوه بر این، سه مرحله اصلی شکار شامل جستجوی طعمه، محاصره طعمه و حمله به طعمه شبیه‌سازی می‌شوند. در بحث طراحی الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، مدل‌سازی ریاضی سلسله‌مراتب اجتماعی به‌صورت شکل (۱) است:

α آلفا: مناسب‌ترین جواب

β بتا: مناسب‌ترین جواب با فاکتور گرفتن از α

δ دلتا: مناسب‌ترین جواب با فاکتور گرفتن از α و β

ω امگا: مابقی راه‌حل‌های کاندید شده



شکل (۱): ساختار سلسله‌مراتبی گرگ‌ها در الگوریتم گرگ خاکستری

در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، هدایت فرآیند شکار (بهینه‌سازی) را به‌ترتیب گرگ‌های α، β و δ به عهده‌دارند و گرگ‌های ω در رهبری نقش ندارند و همیشه مطیع این سه گروه غالب می‌باشند (موسوی و همکاران، ۲۰۱۶، مک، ۱۹۹۹[4]، میرجلیلی و همکاران، ۲۰۱۴).

جستجو برای طعمه (شناسایی)

[1] Grey Wolf Optimizer (GWO)
[2] Ren et al, 2018
[3] Mosavi et al, 2016
[4] Mech, 1999

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

موقعیت مکانی آلفا، بتا و دلتا در فرآیند جستجو گرگ‌های خاکستری مهم است. آن‌ها برای جستجوی شکار از یکدیگر فاصله گرفته و برای حمله به آن به یکدیگر نزدیک شده و همکاری می‌کنند. برای مدل کردن ریاضی این فرایند از $\vec{A}$ با مقدار تصادفی بزرگ‌تر از ۱ یا کوچک‌تر از ۱- استفاده می شود تا جستجوگر ملزم به حفظ فاصله از طعمه باشد. این پروسه به الگوریتم گرگ خاکستری اجازه می‌دهد عمل جستجو را به‌صورت سرتاسری انجام دهد. یک فاکتور مهم دیگر مقدار $\vec{C}$ است که از عوامل تأثیرگذار در فرآیند شناسایی است. $\vec{C}$ مقدار تصادفی در بازه [۰,۲] دارد. این فاکتور برای شکار وزن‌های تصادفی فراهم می‌کند تا در شدت (C>۱) ضعف (C<۱) موقعیت طعمه در تعیین فاصله مؤثر باشد. در حقیقت بردار C بسته به موقعیت یک گرگ، می‌تواند وزنی تصادفی به طعمه بدهد تا دست‌یابی گرگ‌ها به آن سخت‌تر یا آسان‌تر شود. به‌طور خلاصه در الگوریتم گرگ خاکستری، فرآیند جستجو با ایجاد یک جمعیت تصادفی از گرگ‌های خاکستری (راه‌حل‌های کاندید) شروع می‌شود. در طول دوره تکرار، گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا موقعیت احتمالی شکار را برآورد می‌کنند. هر راه‌حل(متغیر تصمیم، جواب) کاندید فاصله خود را از طعمه(شکار) به‌روزرسانی می‌نماید(میرجلیلی و همکاران، ۲۰۱۴).

محاصره طعمه

از دیگر رفتارهای گرگ‌های خاکستری، شکار به‌صورت گروهی بوده و شامل مراحل زیر است:

۱- ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه، ۲- تعقیب، محاصره و آزار طعمه تا زمانی که از حرکت بایستد، ۳- حمله به سمت طعمه. این خصوصیت با رفتار به‌صورت زیر مدل‌سازی ریاضی می‌شود:

$$\vec{D} = |\vec{C}.\vec{X}_p(t) - X(t)| \qquad (۱)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}.\vec{D} \qquad (۲)$$

در این معادلات t تعداد تکرار، $\vec{X}_p$ بردار موقعیت شکار و $\vec{X}$ بردار موقعیت گرگ خاکستری است. $\vec{A}$ و $\vec{C}$ نیز بردارهای ضریب هستند که به‌صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a}.\vec{r}_1 - \vec{a} \qquad (۳)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \qquad (۴)$$

در این معادلات $\vec{r}_2$ و $\vec{r}_1$ بردارهای تصادفی در بازه [۰,۱] هستند و $\vec{a}$ در طول تکرار از ۰ تا ۲ به‌صورت خطی کاهش می‌یابد (میرجلیلی و همکاران، ۲۰۱۴).

شکار

گرگ‌های خاکستری علاوه بر توانایی تشخیص محل طعمه به محاصره آن نیز می‌پردازند. عموماً هدایتگر اصلی در فرآیند شکار، گرگ آلفا است. البته گرگ‌های بتا و دلتا نیز گاهی اوقات ممکن است در این فرآیند شرکت نمایند. برای شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود آلفا، بتا و دلتا (بهترین راه‌حل‌های موجود با حفظ سلسله‌مراتب)، موقعیت شکار را برآورد می‌کنند و دیگر گرگ‌ها (گرگ‌های امگا) موقعیت خود را به‌صورت تصادفی در ناحیه اطراف شکار به‌روزرسانی می‌نمایند (میرجلیلی و همکاران، ۲۰۱۴):

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1.\vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2.\vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3.\vec{X}_\delta - \vec{X}| \qquad (۵)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1.(\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2.(\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3.(\vec{D}_\delta) \qquad (۶)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \qquad (۷)$$

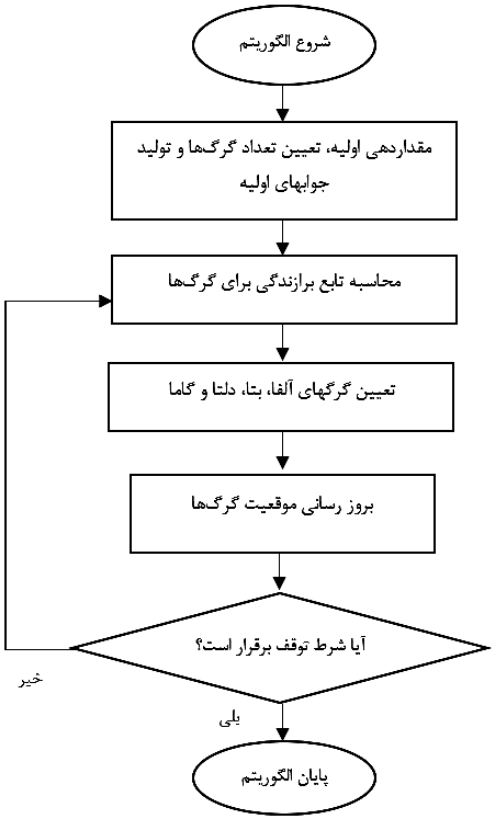
حمله به طعمه (بهره‌برداری)

با توقف طعمه، گرگ‌های خاکستری به آن حمله کرده و شکار پایان می‌پذیرد. در مدل ریاضی این مرحله با کاهش مقدار $\vec{a}$ نزدیک شدن به طعمه نشان داده می‌شود. با کاهش $\vec{a}$ محدوده نوسان $\vec{A}$ نیز کاهش می‌یابد. یعنی $\vec{A}$ مقداری تصادفی در بازه [-۲a ,۲a] است. درحالی‌که a در طول تکرارها از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد. هنگامی‌که مقادیر تصادفی در بازه [-۱,۱] قرار می‌گیرد، موقعیت بعدی یک عامل جستجو می‌تواند در هر موقعیتی مابین موقعیت فعلی آن و موقعیت طعمه باشد. یعنی در حقیقت $|A| < 1$ گرگ‌ها مجبور به حمله سمت طعمه می‌کند. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری به عوامل جستجوی خود اجازه می‌دهد موقعیت خود را بر اساس موقعیت آلفا، بتا و دلتا بروزرسانی کرده و به طعمه حمله کنند (میرجلیلی و همکاران، ۲۰۱۴). در

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

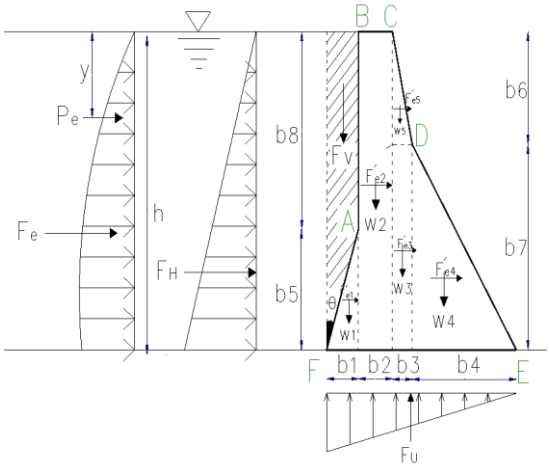
شکل (۲)، فلوچارت الگوریتم به‌صورت کلی و بدون ذکر جزئیات برابر واژگونی و لغزش محاسبه‌شده‌اند که در ادامه توضیح آورده شده است:



شکل (۲): فلوچارت کلی الگوریتم گرگ خاکستری

فرمولاسیون تعیین ابعاد سد بتنی وزنی

همان‌طور که گفته شد سد بتنی وزنی کوینا در هندوستان به‌عنوان مطالعه موردی در این تحقیق انتخاب‌شده است. بدیهی است که درصورتی‌که به‌جای سد بتنی وزنی، سد بتنی قوسی موردمطالعه قرار گیرد روابط مربوط به پایداری سد متفاوت می‌شود. همچنین درصورتی‌که به‌جای سد بتنی وزنی، سد خاکی موردمطالعه قرار می‌گرفت، تأثیرات تراوش از بدنه سد و نیز روابط نسبتاً پیچیده پایداری شیروانی‌های خاکی باید در مطالعه لحاظ می‌شد. شکل (۳) مقطع مورداستفاده سد بتنی وزنی موردمطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد. متغیرهای تصمیم در این مسئله عبارت‌اند از ابعاد اضلاع مختلف مقطع سد (b_1 تا b_8) سایر پارامترهای هندسی به‌طور وابسته به این متغیرها تعریف می‌شوند. کلیه نیروها و گشتاورهای لازم برحسب متغیرهای طراحی تعیین و تنش‌های نرمال در بالادست سد و نیز ضرایب اطمینان در داده خواهند شد.



شکل (۳): مقطع معمول سدهای بتنی وزنی و نیروهای اعمال‌شده (بیرامی، ۱۳۹۷، قدوسی و اسکوهی، ۱۳۹۵)

در حالت کلی نیروهای وارد سد وزنی عبارت‌اند از نیروهایی که در جهت پایداری سد عمل می‌کنند و نیروهایی که در خلاف جهت پایداری عمل می‌نمایند. نیروهایی که در جهت پایداری سد عمل می‌کنند شامل:

۱- ۱- نیروی ناشی از وزن سد (رو به پایین):

$$w_1 = \frac{1}{2} b_1 b_2 \gamma_c \quad (۸)$$

$$w_2 = b_2 (b_5 + b_8) \gamma_c \quad (۹)$$

$$w_3 = b_3 b_7 \gamma_c \quad (۱۰)$$

$$w_4 = \frac{1}{2} b_4 b_7 \gamma_c \quad (۱۱)$$

$$w_5 = \frac{1}{2} b_3 b_6 \gamma_c \quad (۱۲)$$

در روابط بالا، w_1 الی w_5 برابر با وزن قسمت‌های ۱ الی ۵ است. γ_c نیز وزن مخصوص بتن است.

۲- مؤلفه قائم نیروی هیدرواستاتیک فشار آب (رو به پایین):

$$F_V = \gamma_w (\frac{1}{2} b_1 b_5 + b_1 b_8) \quad (۱۳)$$

۳-نیروی ناشی از فشار رسوبات (رو به پایین) که به‌صورت قائم بر بدنه سد وارد می‌شود (در این مقاله برابر با صفر در نظر گرفته‌شده است).

نیروهایی که در خلاف جهت پایداری سد عمل می‌کنند شامل:

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

۱- مؤلفه افقی نیروی هیدرواستاتیک فشار آب مخزن:

$$F_H = \frac{1}{2}\gamma_w (b_1 + b_5)^2 \quad (۱۴)$$

۲-مؤلفه قائم و محرک نیروی زیر فشار:

$$F_u = \frac{1}{2}\gamma_w (b_8 + b_5)(b_1 + b_2 + b_3 + b_4) \quad (۱۵)$$

۳- نیروی زلزله در بدنه سد:

$$F'_e = \alpha W \quad (۱۶)$$

α ضریب زمین‌لرزه (شتاب ثقل/شتاب زمین‌لرزه=α). این ضریب در اکثر سدهای ایران حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲در درنظر گرفته‌شده است (در این مقاله ۰/۱۵=α).

$$F'_e = 0.15 \sum w \quad (۱۷)$$

نیروی زلزله در مخزن سدF_e تا عمق y:

$$F_e = 0.726 P_e y \quad (۱۸)$$

P_e عبارت است از فشار هیدرودینامیکی ناشی از زمین‌لرزه در ارتفاع y از سطح آب:

$$P_e = C \propto y\gamma \quad (۱۹)$$

$$C = \frac{C_m}{2}\left[\frac{y}{h}\left[2 - \frac{y}{h}\right] + \sqrt{\frac{y}{h}\left[2 - \frac{y}{h}\right]}\right] \quad (۲۰)$$

$$C_m = 0.73\left[\frac{90^\circ - \theta^\circ}{90^\circ}\right] \quad (۲۱)$$

ممان ناشی از نیروی هیدرودینامیکی زمین‌لرزه در مخزن سد در ارتفاع y به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M_e = 0.299 P_e y^2 \quad (۲۲)$$

که در معادلات بالا چنانچه کل ارتفاع آب در مخزن موردنظر باشد به‌جای y ، h قرار داده می‌شود.

$$C = C_m = 0.73\left[\frac{90^\circ - arctan\frac{b_1}{b_5}}{90^\circ}\right] \quad (۲۳)$$

$$P_e = C \times 0.15 \times (b_8 + b_5) \quad (۲۴)$$

$$F_e = 0.726 \times C_m \times 0.15 \times \gamma \times (b_8 + b_5)^2 \quad (۲۵)$$

$$M_e = 0.299 \times C_m \times 0.15 \times \gamma \times (b_8 + b_5)^3 \quad (۲۶)$$

۴-نیروی ناشی از فشار رسوبات که به‌صورت افقی بر بدنه سد وارد می‌شود:

بارگذاری سدها باید بر اساس بحرانی‌ترین حالت باشد و به همین دلیل در این پژوهش ترکیبات بارگذاری در حالت فوق‌العاده در نظر گرفته‌شده است (آنون، ۱۹۷۶ و۱۹۸۷[1]). همان‌طور که در قسمت‌های قبلی نیز بیان شد، تابع هدف مسئله به حداقل رساندن حجم بتن مصرفی در ساخت سد و درنتیجه آن کاهش هزینه است.

$$C = \mathrm{Min}\, v(x) \quad (۲۷)$$

$$C = Minimize\left[\left(\frac{1}{2} \times b_1 \times b_5\right) + \left(b_2 \times (b_8 + b_5)\right) + (b_3 \times b_7) + \left(\frac{1}{2} \times b_4 \times b_7\right)\right] \quad (۲۸)$$

که در آن‌ها $v(x)$ = حجم بتن مصرفی و پارامترهای b_1 تا b_8 متغیرهای تصمیم یا همان ابعاد مقطع سد بتنی وزنی هستند. همچنین همان‌طور که بیان شد باید قیود ضریب اطمینان در برابر لغزش، واژگونی و تنش در بدنه سد محاسبه و کنترل شود.

ضریب اطمینان در برابر لغزش:

عوامل مقاوم در برابر لغزش سد، عبارت‌اند از اصطکاک و مقاومت برشی موجود بین دو قطعه یا سد و فونداسیون در محل قاعده که مجموعاً نیروهای مقاوم در مقابل لغزش را تشکیل می‌دهند. هر سد باید به‌گونه‌ای طراحی شود که مقدار این نیروهای لغزشی تا حد امکان بیشتر باشد. بر این اساس، ضریب اطمینان در مقابل لغزش برابر خواهد بود با نسبت کل نیروهای قائم مقاوم در برابر لغزش به نیروهای افقی. این نسبت در دو حالت قابل‌بررسی است. حالت اول با صرف‌نظر کردن از مقاومت برشی مقطع که در این صورت

[1] Anon, 1976, 1987

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

ضریب اطمینان در مقابل لغزش از رابطه زیر به‌دست می‌آید (قدوسی و اسکوهی، ۱۳۹۵):

$$SF_s = \mu \frac{\sum F_V}{\sum F_H} \quad (۲۹)$$

که در آن:

$\sum F_V$ موع نیروهای قائم وارد بر مقطع؛ $\sum F_H$ مجموع نیروهای افقی وارد بر مقطع؛ و μ ضریب اصطکاک بین مصالح دو قطعه بالایی و پایینی است. مقدار μ برای بتن، مصالح بنایی و سنگ بین ۰/۶۵ و ۰/۸ متغیر است که عموماً ۰/۷۵ انتخاب می‌شود و در این مطالعه نیز مقدار آن برابر ۰/۷۵ انتخاب‌شده است. ضریب اطمینان در مقابل لغزش باید بزرگ‌تر از ۱ باشد و در این حالت اگر مقاومت برشی را نیز در نظر گرفته شود مقدار این ضریب بیشتر از ۱ خواهد بود (ابریشمی، ۱۳۸۰، قدوسی و اسکوهی، ۱۳۹۵). در این مقاله مقدار این ضریب برابر ۱/۱ لحاظ شده است. حالت دوم در صورتی است که ضریب اطمینان محاسبه‌شده کمتر از ۱ باشد. که در این صورت لازم است با اضافه کردن مقاومت برشی مقطع، ضریب اصطکاک برشی از رابطه زیر محاسبه شود:

$$SFF = \frac{f' \sum F_V + b\sigma}{\sum F_H} \quad (۳۰)$$

که در آن F_V نیروهای قائم وارد بر سد؛ F_H نیروهای افقی وارد بر سد؛ b طول قاعده در سطح موردمطالعه؛ σ تنش برشی مجاز مواد در سطح برش می‌باشند. تنش برشی مجاز بتن بین ۷ تا ۱۴ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله مقدار تنش برشی مجاز بتن برابر با ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع درنظر گرفته‌شده است. ضریب اصطکاکی f' برای حرکت بتن روی سنگ یا بتن در سطح بتنی اغلب بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ تغییر می‌یابد که به‌طور متوسط برابر با ۰/۷ لحاظ می‌شود. در این مقاله نیز مقدار ضریب اصطکاکی برابر ۰/۷ درنظر گرفته‌شده است. محدودیت دیگر در نظر گرفته‌شده در این مسئله مقدار تنش مجاز است. تنش‌های به وجود آمده در سازه سد باید در محدوده‌ای خاص از تنش باشد و طراحی به‌گونه‌ای صورت پذیرد که تنش در هر نقطه از سد و فونداسیون از حد تنش مجاز بیشتر نشود و بتوان در صورت امکان از تمام مقاومت سازه و فونداسیون استفاده کرد.

تنش قائم در سطح بدنه سد:

برای مطالعه تنش قائم در سطح بدنه سد در سراب و پایاب به ترتیب از دو رابطه ۳۱ و ۳۲ استفاده می‌شود:

$$\sigma_U = \frac{\sum F_V}{b} - \frac{6\sum M_0}{b^2} \quad (۳۱)$$

$$\sigma_d = \frac{\sum F_V}{b} + \frac{6\sum M_0}{b^2} \quad (۳۲)$$

که در آن‌ها، σ_u و σ_dبه ترتیب تنش قائم در سطح بدنه سد در سراب و پایاب؛ $\sum M_0$ مجموع گشتاور نیروهای وارد بر سد تا سطح موردبررسی نسبت به مرکز سطح؛ و $\sum F_V$ مجموع نیروهای قائم می‌باشند. نکته قابل‌ذکر این است که برای این‌که سد در برابر تنش قائم ایجادشده پایدار باشد باید σ_d و σ_U در شرایط پر یا خالی بودن مخزن مثبت باشند و نباید این مقدار از مقاومت فشاری مجاز بیشتر شود. معمولاً مقاومت فشاری آزموده بتن برای سدها را در محدوده ۱۴۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر می‌گیرند (آنون، ۱۹۷۶، قدوسی و اسکوهی، ۱۳۹۵).

پایداری در برابر واژگونی:

اگر لنگرهای مقاوم نسبت به پنجه سد حدود ۱/۵ تا ۱/۷ برابر مجموع لنگرهای واژگون‌کننده نسبت به همان نقطه باشند، سد در برابر واژگونی پایدار می‌ماند؛ رابطه آن در زیر ارائه‌شده است:

$$SF_O = \frac{\sum M_R}{\sum M_O} = 1.5 - 1.7 \quad (۳۳)$$

که در آن، M_Rگشتاور نیروهای مقاوم؛ و M_O گشتاور نیروهای محرک وارد بر سد است. در این مقاله مقدار ضریب اطمینان یادشده برابر با ۱/۷ در نظر گرفته‌شده است.

همان‌طور که گفته شد تخلف از قیدهای مطرح‌شده به‌صورت تابعی به تابع هدف اصلی افزوده شود و بدین ترتیب رعایت آن کنترل شود. به‌عنوان‌مثال درصورتی‌که تابع هدف اصلی با F نشان داده شود و از نوع حداقل‌سازی باشد و مسئله تعدادی قید داشته باشد تابع هدف به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$\min(F + \sum_{i=1}^{N} Penalty_i) \quad (۳۴)$$

در رابطه بالا F برابر با تعداد قیودات موجود است. در این صورت الگوریتم تلاش در جهت حداقل کردن هم‌زمان تابع هدف اصلی و نیز ترم جریمه تخلف از قیود خواهد کرد. بدیهی است که در یک مسئله جهت اطمینان از رعایت قیود

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

باید ترم جریمه برابر با صفر باشد. برای تعریف‌ترم جریمه راه‌های گوناگونی وجود دارد. در اینجا تابع هدف تخلف از قیود به‌صورت یک فرمول ریاضیاتی درجه دوم تعریف‌شده است. به‌عنوان‌مثال برای قید به فرم $g(x) \leq b$ باشد، در اینجا تابع جریمه به‌صورت زیر تعریف‌شده است:

$$Penalty_i = \begin{cases} \alpha_i (1 - \frac{g(x)}{b})^2 & if\ g(x) > b \\ 0 & else \end{cases} \qquad (۳۵)$$

که در اینجا α_i یک عدد نسبتاً بزرگ است که با سعی و خطا تعیین می‌شود.

نتایج و بحث

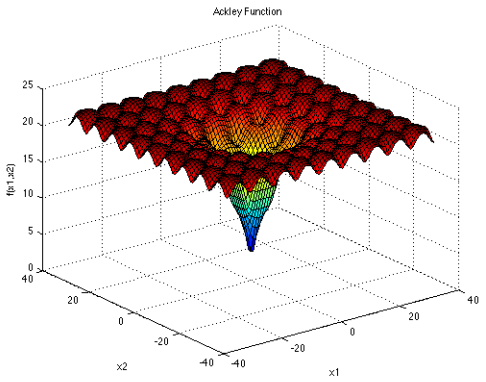
قبل از استفاده از هر کد کامپیوتری الگوریتم‌های فراکاوشی بهینه‌سازی، لازم است که صحت عملکرد آن‌ها با یک تابع ریاضی معتبر که جواب آن از قبل مشخص است کنترل شود. تابع اکلی[1] یک تابع آزمایشی پیوسته با توابع غیرخطی نمایی و کسینوسی و از نوع حداقل‌سازی است. از خصوصیات دیگر این تابع می‌توان به چند قله‌ای بودن و تفکیک‌ناپذیر بودن آن اشاره کرد (روابط ۳۶ و ۳۷). در این تحقیق از حداقل سازی تابع اکلی برای کنترل صحت عملکرد مدل‌های هوش تجمعی ذرات (PSO) و گرگ خاکستری (GWO) تدوین‌شده استفاده‌شده است.

$$f(x) = 20 + e - 20\ \exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos(2\pi x_i)\right) \qquad (۳۶)$$

$$-32.768 \leq x_i \leq +32.768 \qquad (۳۷)$$

$$(i = 1,2,\dots,n)$$

شکل (۴)، فرم کلی شماتیک تابع ریاضی اکلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل می‌توان متوجه شد و محاسبات انجام‌شده توسط محققان مختلف نیز آن را به اثبات رسانده، حداقل مقدار تابع اکلی برابر با صفر است.



شکل(۴): شکل کلی تابع اکلی

در جدول (۱)، نتایج الگوریتم‌های هوش تجمعی ذرات و نیز الگوریتم گرگ خاکستری به ازای ۵۰۰ بار ارزیابی تابع هدف به عددهایی بسیار نزدیک به صفر همگرا شده است که صحت کدهای کامپیوتری تدوین‌شده برای الگوریتم‌های مورداشاره را می‌رساند.

جدول(۱): نتایج الگوریتم‌های مختلف در مسئله حداقل سازی تابع ریاضی اکلی

الگوریتم	مقدار تابع اکلی
GWO	-۰/۰۰۰۵۵۶
PSO	۰/۰۰۰۱۸

همان‌طور که گفته شد در این تحقیق، ابعاد مقطع سد بتنی وزنی با استفاده از مدل بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهینه‌سازی شده و نتایج با نتایج حاصل از الگوریتم هوش تجمعی ذرات مقایسه شده است. همان‌طور که بیان شد سد کوینا در هندوستان که یک سد بتنی وزنی است به‌عنوان مطالعه موردی در این تحقیق انتخاب‌شده است. سد بتنی وزنی کوینا با ارتفاع ۱۰۳/۲ متر که بر روی رودخانه کوینا در کشور هندوستان واقع‌شده است در سال ۱۹۶۴ مورد بهره‌برداری قرارگرفته است. ارتفاع تراز سیلابی و نرمال این سد به ترتیب برابر ۱۰۳ و ۹۱/۷۵ متر است. عرض تاج سد برابر ۱۴/۸ متر و حجم مخزن برابر ۲۷۹۷/۴ میلیون مترمکعب هست (قدوسی و اسکوهی، ۱۳۹۵). نکته قابل‌ذکر

[1] Ackley Function

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

این است که به دلیل اینکه در طراحی اولیه این سد مقدار ضریب زلزله (α) بسیار کم و برابر با ۰/۰۵ درنظر گرفته‌شده بود و نیز به خاطر استفاده از مصالح نامرغوب در ساخت سد، این سد در جریان زلزله سال ۱۹۶۷ آسیب زیادی به خود دید (چوپرا و چاکرابارتی، ۱۹۷۲[1]) کلیه برنامه‌های مورداستفاده در این تحقیق در محیط Matlab R2017a تدوین و اجرا شده است. در ابتدا مدل‌های کامپیوتری تدوین‌شده با در نظر گرفتن کلیه قیودات به ازای تعداد گرگ‌های مختلف برای الگوریتم گرگ خاکستری و تعداد ذره‌های مختلف برای الگوریتم هوش تجمعی ذرات اجرا شدند. لازم به ذکر است که کلیه قیودات مطرح‌شده در بخش‌های قبلی به‌صورت توابع جریمه مناسب به تابع هدف اصلی مدل اضافه‌شده‌اند و کنترل لازم برای ارضا شدن کلیه قیودات انجام‌شده است. نتیجه سعی و خطاهای مختلف نشان داد که در نظر گرفتن جمعیت ۵۰ تایی برای تعداد دسته جواب‌های هر دو الگوریتم منطقی است. در جدول (۲)، نتیجه اجرای مدل برای هر دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول(۲): نتایج الگوریتم‌های مختلف در مسئله حداقل سازی حجم بدنه سد بتنی وزنی

الگوریتم	جمعیت	تعداد تکرار	حجم بدنه سد (مترمکعب)
GWO	۵۰	۵۰۰	۳۲۵۵
PSO	۵۰	۱۳۰۰	۳۲۰۲

نتیجه تا اینجا نشان‌دهنده این است که تابع هدف محاسبه‌شده توسط الگوریتم هوش تجمعی ذرات حدود ۱/۶ درصد از تابع هدف به‌دست‌آمده توسط الگوریتم گرگ خاکستری بهتر است. این درحالی‌که است که الگوریتم الگوریتم هوش تجمعی ذرات برای رسیدن به جواب فوق تقریباً به تعداد ۲/۶ برابر الگوریتم گرگ خاکستری به ارزیابی تابع هدف پرداخته و تقریباً به همان اندازه نیز زمان بیش‌تری جهت انجام محاسبات صرف نموده است که زمان قابل‌توجهی است. زمان اجرای مدل در کامپیوتر هشت هسته‌ای با حافظه ۴ گیگ برای الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) حدود ۴۱ دقیقه و برای الگوریتم هوش تجمعی ذرات (PSO) حدود ۱۰۳ دقیقه بوده است. البته هر دو الگوریتم PSO و GWO توانسته‌اند به ترتیب حجم بتن مصرفی سد را به ترتیب به میزان ۱۰/۴ و ۱۱/۹ درصد نسبت به وضعیت موجود کاهش دهند. درصورتی‌که تعداد تکرارها به حداکثر تعداد مورداستفاده توسط الگوریتم GWO یعنی ۵۰۰ تکرار محدود شود، نتایج دو الگوریتم به‌صورت جدول (۲) خواهد بود.

جدول (۳): نتایج الگوریتم‌های مختلف در مسئله حداقل سازی حجم بدنه سد بتنی وزنی با لحاظ محدودیت تعداد تکرار

الگوریتم	جمعیت	تعداد تکرار	حجم بدنه سد (مترمکعب)
GWO	۵۰	۵۰۰	۳۲۵۵
PSO	۵۰	۵۰۰	۴۱۷۶

نتیجه جدول (۳) بیانگر این است که در تعداد تکرارهای معین و به ازای جمعیت معین، الگوریتم GWO به مقدار قابل‌توجهی جواب بهتری را نسبت به الگوریتم PSO به دست می‌دهد (حدود ۲۸ درصد)؛ یعنی همگرایی در GWO سریع‌تر اتفاق می‌افتد. درصورتی‌که تعداد تکرارها و تعداد جمعیت اولیه برای هر دودسته به‌صورت شناور باشد و صرفاً تعداد ارزیابی تابع هدف که ضرب تعداد تکرار در تعداد جمعیت است به‌عنوان فاکتور انتخاب شود، نتایج مقایسه دو الگوریتم به‌صورت جدول (۴) خواهد بود. معیار مقایسه دو الگوریتم ازنظر تعداد ارزیابی تابع هدف برابر می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای مقایسه زمان اجرای مدل‌ها نیز به کار رود.

جدول (۴): نتایج الگوریتم‌های مختلف در مسئله حداقل سازی حجم بدنه سد بتنی وزنی با لحاظ تعداد ارزیابی تابع هدف برابر

الگوریتم	تعداد ارزیابی تابع هدف	حجم بدنه سد(مترمکعب)
GWO	۲۵۰۰۰	۳۲۵۵
PSO	۲۵۰۰۰	۴۰۰۹

همان‌طور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود، در این حالت، تابع هدف بهینه محاسبه‌شده با GWO تغییری نمی‌کند ولی برای الگوریتم PSO، بهبود تابع هدف به میزان ۳/۹ درصد خواهد بود. هرچند ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که بهترین حالت

[1] Chopra and Chakrabarti, 1972

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

برای مدل PSO نیز در تعداد تکرار ۱۳۰۰ و جمعیت ۵۰ اتفاق افتاده و در این تعداد تکرار، این مدل حساسیت مثبت چندانی نسبت به تغییر جمعیت اولیه ندارد.

در ادامه لازم است که تغییرات جواب‌های مسئله موردبحث به ازای اجراهای مختلف برای الگوریتم‌های PSO و GWO با یکدیگر مقایسه شود که بدین طریق می‌توان به پایداری مدل‌ها در تولید جواب‌های بهینه پی برد. در جدول (۵) نتایج تابع هدف به ازای اجراهای مختلف توسط دو الگوریتم موردبررسی آورده شده است.

جدول (۵): نتایج تابع هدف به ازای اجراهای مختلف توسط دو الگوریتم موردبررسی

شماره اجرا	PSO	GWO
۱	۳۲۰۲	۳۴۸۶
۲	۳۹۳۸	۳۹۵۲
۳	۴۱۷۳	۳۴۷۵
۴	۴۵۶۸	۳۴۸۲
۵	۳۴۶۲	۳۳۶۱
۶	۴۰۲۱	۴۳۳۰
۷	۳۵۶۶	۴۰۵۲
۸	۳۸۲۴	۳۲۵۵
۹	۳۹۰۸	۳۷۵۸
۱۰	۳۴۶۲	۳۳۳۹
تعداد فراخوانی تابع هدف	۶۵۰۰۰	۲۵۰۰۰
حداکثر	۴۵۶۸	۴۳۳۰
حداقل	۳۲۰۲	۳۲۵۵
میانگین	۳۸۴۸/۴۷	۳۶۴۸/۹۰
انحراف معیار	۳۷۲/۳۳	۳۵۷/۱۹

جدول (۵) نشان می‌دهد که هرچند الگوریتم PSO با تعداد اجراهای بیش‌تر (حدود ۲/۶ برابر) توانسته به میزان بسیار کمی به تابع هدف بهتری نسبت به الگوریتم GWO دست یابد (حدود ۱/۶ درصد بهتر) ولی میانگین توابع هدف محاسبه‌شده توسط الگوریتم GWO حدود ۵/۳ درصد از توابع هدف محاسبه‌شده توسط الگوریتم PSO بهتر است. همچنین ازنظر انحراف معیار توابع هدف محاسبه‌شده، عملکرد الگوریتم GWO حدود ۴/۱ درصد بهتر است. ازاین‌رو می‌توان گفت پایداری جواب‌های محاسبه‌شده توسط الگوریتم GWO به مقدار اندکی نسبت به الگوریتم PSO بهتر است. همچنین لازم است که متغیرهای تصمیم به‌دست‌آمده از هر دو الگوریتم با مقادیر واقعی مقایسه شوند تا نسبت به صحت و منطقی بودن پاسخ‌ها اطمینان کافی حاصل شود. در جدول (۶)، نتایج محاسباتی برای ابعاد اضلاع مختلف سطح مقطع توسط دو الگوریتم GWO و PSO با ابعاد کنونی سد مقایسه شده‌اند. نتایج این جدول بیانگر منطقی بودن متغیر تصمیم تولیدشده توسط دو الگوریتم یادشده است.

جدول (۶): نتایج متغیرهای تصمیم به ازای الگوریتم‌های مختلف (برحسب متر)

مقطع	اندازه فعلی	GWO	PSO
b1	۱/۶۳	۱/۳۲	۱/۲۸
b2	۱۴/۸۰	۱۳/۷۹	۱۳/۳۷
b3	۵/۶۰	۴/۲۲	۴/۱۹
b4	۴۸/۱۸	۴۳/۲۱	۴۳/۰۶
b5	۳۹	۳۹/۰۹	۳۸/۳۲
b6	۳۶/۵	۳۵/۰۸	۳۵/۲۳
b7	۶۶/۵	۶۷/۱۱	۶۷/۷۸
b8	۶۴	۶۳/۹	۶۴/۶۷

به‌عنوان جمع‌بندی، درصورتی‌که میانگین توابع هدف محاسباتی به‌عنوان حجم طراحی لحاظ شود، مقدار حجم بتن بدنه سد به‌صورت جدول (۷) درمی‌آید.

جدول (۷): نتایج حجم بتن بدنه سد در حالت فعلی و نیز با دو الگوریتم محاسباتی (مترمکعب)

حجم فعلی	GWO	PSO
۳۶۳۳	۳۲۰۲	۳۲۵۵

نکته قابل‌توجه این است که اگرچه دو الگوریتم PSO و GWO توانسته‌اند به ترتیب حجم بتن مصرفی سد را به ترتیب به میزان ۱۰/۴ و ۱۱/۹ درصد نسبت به وضعیت موجود کاهش دهند، لکن این به معنی کاهش هزینه‌های احداث سد بتنی به میزان درصدهای یادشده نیست؛ زیرا هزینه احداث سد تابع فاکتورهای متعددی است که حجم بتن مصرفی در بدنه سد یکی از آن‌هاست. اگرچه تأثیر این فاکتور نسبت به فاکتورهای دیگر به‌مراتب بیش‌تر است و با تقریب خوبی می‌توان صرفه‌جویی در هزینه‌های احداث سد را به اعداد فوق نزدیک دانست.

نتیجه‌گیری

در طراحی سدهای بتنی وزنی، حداقل کردن سطح مقطع سد که منجر به کمینه شدن حجم بتن مصرفی و درنتیجه هزینه‌های مربوط به احداث سد می‌شود از اهمیت زیادی برخوردار است. ازاین‌رو شناسایی یک مدل ریاضیاتی کارا که بتواند با لحاظ نمودن قیودات مختلف، حداقل حجم ممکن

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

را به دست دهد ضروری است. الگوریتم بهینه‌یابی گرگ[۶]- خاکستری یکی از جدیدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که در این پژوهش برای دستیابی به مقطع بهینه از این الگوریتم استفاده‌شده بود و سعی شده بود که قابلیت این الگوریتم با الگوریتم هوش تجمعی ذرات مقایسه شود. قیودات مربوط به لغزش و واژگونی سد با لحاظ کردن اثرات بارهای مرده و زنده و نیز بار زلزله به‌صورت توابع جریمه به تابع هدف اضافه‌شده و مدل‌های کامپیوتری تدوین‌شده به نحوی اجرا شدند که مقادیر تخطی از این قیودات برابر با صفر شود و اطمینان از رعایت کامل قیودات حاصل گردد. نتایج مطالعات نشان داد که در مقایسه با مدل PSO، مدل GWO دارای سرعت همگرایی نسبتاً بالاتری بوده و ازنظر پایداری جواب‌ها نیز با لحاظ کردن دو فاکتور میانگین و انحراف معیار جواب‌ها در اجراهای مختلف، مدل GWO برتری اندکی دارد. در ارتباط با رسیدن به جواب بهینه نیز با ثابت نگه‌داشتن تعداد ارزیابی توابع هدف، وضعیت GWO بهتر از PSO بود ولی بدون درنظر گرفتن این فاکتور، جواب نهایی به‌دست‌آمده توسط PSO حدود ۱/۶ درصد بهتر از GWO بود. به‌طورکلی می‌توان عملکرد GWO را در حل مسئله طراحی بهینه سطح مقطع سدهای بتنی مفید ارزیابی کرد. در ادامه پیشنهاد می‌شود کارآیی این الگوریتم در حل مسائل بزرگ‌مقیاس با متغیرهای تصمیم پیوسته (مانند مسئله بهره‌برداری درازمدت از مخازن) و نیز متغیرهای تصمیم گسسته (مانند مسئله طراحی شبکه فاضلاب شهری) بررسی و کارآیی آن در حل این مسائل با دیگر الگوریتم‌های متداول مقایسه شود.

مراجع

۱- ابریشمی، ج، وهاب رجایی، ن. (۱۳۸۹)، سدهای بتنی طرح و اجرا، انتشارات به نشر، چاپ چهارم

۲- ارزیده ف، (۱۳۶۲)، سدسازی یا مهار آب‌های سطحی، انتشارات دهخدا، تهران، ص ۱۸۰-۲۱۰

۳- اصلانی م، عمادی ع، نظرپور ه، (۱۳۹۲). تعیین مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی سدهای بتنی وزنی (گزارش کوتاه علمی). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، جلد بیستم، شماره پنجم، ص ۲۳۱-۲۳۹.

۴- بیرامی، م.ک، (۱۳۹۷)، سازه‌های انتقال آب، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان

۵- دهقانی ا ا، منتظر غ ع، نصیری ف، قدسیان م. (۱۳۸۵)، یادداشت تحقیقاتی: استفاده از الگوریتم ژنتیکی و شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه سازی مقاطع سدهای وزنی بتنی، نشریه فنی مهندسی مدرس، شماره بیست و پنجم، ص ۹۹-۱۱۲.

قدوسی ح، اسکوهی م، (۱۳۹۵)، بهینه‌سازی ابعاد سدهای بتنی وزنی با استفاده از توسعه مدل جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO)، مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، جلد ۱۷، شماره ۶۶، ۱۳۹۵، ص ۱۴-۱.

۷- موسوی، م ر، خویشه م، غمگسار ا، قلندری م ج، (۱۳۹۵)، دسته بندی دادگان سونار با استفاده از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری، فصلنامه صنایع الکترونیک دوره ۷ شماره ۱ بهار ۱۳۹۵.

۸- والامنش و اسمعیل پور استکانچی ه، وفایی ا ح، کاربرد روش زمان دوام در تحلیل و طراحی لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۲۶، ف شماره ۱، ص. ۱۰۵-۱۱۸

9- Anon. 1976. Design of Gravity Dams. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR). A Water Resources Technical Press. Colorado.

10- Anon. 1987. Design of Small Dams. United States Department of the Interior Bureau of -Reclamation (USBR). 1987. A Water Resources Technical Press. Colorado.

11- Banerjee, A., Paul, D. K., & Acharyya, A. (2015). Optimization and safety evaluation of concrete gravity dam section. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *19*(6), 1612-1619.

12- Chopra, A,K,. & Chakrabarti, P.(1972). The earthquake experience at Koyna Dam and stresses in concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1, 151-164.

13- Faneli, A., & Faneli, M. A. (1992). Optimal Proportioning of Arch Gravity Dams. *Journal of Water Power and Dam Construction*, *3*(4), 265-275.

14- Hamidian, D., & Seyedpoor, S. M. (2010). Shape optimal design of arch dams using an adaptive neuro-fuzzy inference system and improved particle swarm optimization. *Applied Mathematical Modelling*, *34*(6), 1574-1585.

15- Mech, L. D. (1999). Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs. *Canadian Journal of Zoology*, *77*(8), 1196-1203.

16- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, *69*, 46-61.

17- Pouraminian, M, & Ghaemian, M.(2017). Multi-criteria optimization of concrete arch dams. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 24(4), 1810-1820.

18- Pourbakhshian, S., Ghaemian, M., & Joghataie, A. (2016). Shape optimization of concrete arch dams considering stage construction. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, *23*(1), 21.

19- Ren, Y., Ye, T., Huang, M., & Feng, S. (2018). Gray Wolf Optimization Algorithm for Multi-Constraints Second-Order Stochastic Dominance Portfolio Optimization. *Algorithms*, *11*(5), 72.

20- Salajegheh, J., & Khosravi, S. (2011). Optimal shape design of gravity dams based on a hybrid meta-heruristic method and weighted least squares support vector machine. *Iran University of Science & Technology*, *1*(4), 609-632.

21- Yazd, H. G. H., Arabshahi, S. J., Tavousi, M., & Alvani, A. (2015). Optimal designing of concrete gravity Dam using particle swarm optimization algorithm (PSO). *Indian Journal of Science and Technology*, *8*(12), 1.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]

Investigate the Applicability of Gray Wolf Optimization Algorithm in Determining the Optimal Dimensions of Concrete Dams

Fariborz Masoumi[1], Sara Esfandmaz[2], Negin Zafari

Abstract

Acquiring optimal dimensions of concrete dams by reducing the cross section will reduce the volume of concrete used and consequently reduce construction costs. Due to multiplicity of constraints which leads to complexity of the decision space, meta-heuristic optimization algorithms have been increasingly used in optimal design of gravity dams. In this study, performance of Grey Wolf Optimizer was assessed in optimal design of Koyna concrete gravity dam and the results were compared to Particle Swarm Optimization. Results indicated that Grey Wolf Optimization was able to reach to a 5.2 percent lower mean optimal cost over 10 runs result with considerably a 61.5 percent smaller number of function evaluations compared to Particle Swarm Optimization and considering stability of the algorithm results obtained from Grey Wolf Optimization had smaller standard deviation than Particle Swarm Optimization. However, in 10 consecutive runs, the minimum optimal value reached using Particle Swarm Optimization was 1.6% smaller than the smallest optimal value obtained from Grey Wolf Optimization, considering overall performance of algorithms, Grey Wolf Optimization presented a promising performance having a faster and stable convergence.

KeyWords

Concrete gravity dam, Optimization, Gray Wolf Algorithm, Static forces, Earthquake force, Overturning stability, Slip Stability

[1] Assistant Professor in Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, f_masoumi@uma.ac.ir

[2]MSc student in Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.5.9]