

**Web site:**

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 3 (55)

Received:
2024-04-22

Accepted:
2024-11-02

Pages: 27-42

Optimizing the Cross-section of Diversion Dams Using Particle Swarm Optimization Algorithm

Shahab Naderi¹, Saeid Shabanlou^{2*}, Mohammad Reza Javaheri Tafti³ and Behrouz Yaghoobi⁴

1) Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Taft Branch, Islamic Azad University, Taft, Iran.

2) Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

3) Department of Civil Engineering, Taft Branch, Islamic Azad University, Taft, Iran

4) Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

*Corresponding author email: saeid.shabanlou@gmail.com

Abstract:

Introduction: The hydraulic design of diversion dams is traditionally very complicated and time-consuming and it is necessary for the designer to change the used assumptions several times in order to achieve a stable design with a suitable concreting volume. In today's advanced and competitive world, due to the lack of raw materials and the need for better efficiency, design engineers are forced to design more economically and optimally. Therefore, it is necessary to reduce the cost of concrete in the design of these dams and at the same time ensure the stability of the dam. In this research, the application of a meta-heuristic algorithm has been investigated in order to minimize the weight function of the diversion dam and, as a result, the cost of concreting the dam at the same time as providing the functions related to the dam's stability.

Methods: The algorithm used in this research is the particle swarm optimization (PSO) algorithm. According to the nature of this algorithm and the research problem, it is necessary to make changes in the execution steps of the algorithm. Therefore, by making changes in the PSO algorithm, this algorithm was developed to solve the dam weight optimization problem by considering the limitations of this problem. These changes include controlling the speed of searcher particles and normalizing the position of particles in the feasible space of the problem. The diversion dam studied in this research is the Nazelian dam located in Kermanshah province. The decision variables in the optimization problem include the height of the upstream and downstream dam cutoff walls, the length and thickness of the concrete apron at upstream and the thickness of the detention pond. In order to optimize these dimensions, by performing sensitivity analysis, the parameters with the greatest impact on the performance of the algorithm were identified.

Results and Discussion: In this research, based on the results of the sensitivity measurement of the number of particles or the population size of the PSO algorithm, the number of 20 particles was chosen for the size of the population of particles. According to the convergence graph of the PSO algorithm in different executions, to ensure finding the optimal global response and avoid additional calculations and evaluations, the number of iterations of the algorithm was equal to 1000. According to the best implementation of the PSO algorithm, the weight of the studied dam in the optimal response of this algorithm was equal to 52.80 tons per unit of dam width. The best answer to the problem of optimal design of the dam has dimensions of 7.6 meters for the length of the upstream apron, 0.6 meters for the thickness of the upstream apron, 0.6 meters for the thickness of the detention pond, 1 meter for the height of the upstream cutoff and 1.1 meters for the height of the downstream cutoff.

Conclusion: In general, the result of the present research indicates the optimal performance and speed of the PSO algorithm in finding the optimal solution to the problem of designing a diversion dam with the least weight of the dam along with the observance of stability indicators. Using this algorithm in order to find the optimal parameters for the design of diversion dams can provide useful information to the executives to provide the best and most optimal design with minimum cost and very little time while observing the safety factors of the stability of diversion dams. The program developed in this research provides the necessary and sufficient conditions for the optimal design of the cross-section of diversion dams and is reliable in terms of general and practical validity, but it has limitations. Among the limitations of this method is that the cross-section obtained based on the code developed in this study must be adjusted later for different stress criteria (using the finite element method) and be tested for specific conditions that are different in each project (earthquake, flood, sedimentation, etc.).

Keywords: particle swarm optimization, stability, Nazelian diversion dam



بهینه‌سازی مقطع سدهای انحرافی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

شهاب نادری^۱، سعید شعبانلو^{۲*}، محمد رضا جواهری تفتی^۳ و بهروز یعقوبی^۴

۱) دانشجوی دکتری عمران، گروه مهندسی عمران، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران.

۲) گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۳) گروه مهندسی عمران، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران.

۴) گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول: saeid.shabanlou@gmail.com

چکیده:

مقدمه و هدف پژوهش: طراحی هیدرولیکی سدهای انحرافی به طور سنتی بسیار پیچیده و زمان‌بر است و لازم است طراح چندین بار مفروضات استفاده شده را تغییر دهد تا به طراحی پایدار با حجم بتن‌ریزی مناسب دست یابد. در دنیای پیشرفته و پرقاب‌ت امروزی، به دلیل کمبود مواد اولیه و نیاز به راندمان بهتر، مهندسان طراح مجبور به طراحی بهینه و اقتصادی‌تر هستند. بنابراین لازم است هزینه بتن در طراحی این سدها کاهش یابد و در عین حال پایداری سد نیز تضمین شود. در این تحقیق، کاربرد یک الگوریتم فرا ابتکاری به منظور کمینه‌سازی تابع وزن سد انحرافی و در نتیجه هزینه بتن‌ریزی سد همزمان با تأمین تابع‌های مربوط به پایداری سد بررسی شده است.

مواد و روش‌ها: الگوریتم بکار گرفته شده در این پژوهش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) می‌باشد. با توجه به ماهیت این الگوریتم و مسئله‌ی مورد پژوهش، ایجاد تغییرات در مراحل اجرایی الگوریتم ضروری است. لذا با ایجاد تغییراتی در الگوریتم PSO، این الگوریتم برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی وزن سد با در نظر گرفتن محدودیت‌های این مسئله، توسعه داده شد. این تغییرات شامل کنترل سرعت ذرات جستجوگر و نرمال‌سازی موقعیت ذرات در فضای امکان‌پذیر مسئله می‌باشد. سد انحرافی مورد مطالعه در این پژوهش سد نازلان واقع در استان کرمانشاه است. متغیرهای تصمیم در مسئله‌ی بهینه‌سازی شامل ارتفاع دیوار آب بند بالادست و پایین‌دست، طول و ضخامت کف بند بتنی در بالادست و ضخامت حوضچه آرامش می‌باشد. به منظور بهینه‌سازی این ابعاد، با انجام تحلیل حساسیت، پارامترهای با بیشترین تأثیرگذاری بر روی عملکرد الگوریتم مشخص شدند.

نتایج و بحث: در این پژوهش براساس نتایج حساسیت‌سنجی تعداد ذرات یا اندازه‌ی جمعیت الگوریتم PSO، تعداد ۲۰ ذره برای اندازه‌ی جمعیت ذرات انتخاب شد. با توجه به نمودار همگرایی الگوریتم PSO در اجراهای مختلف، برای اطمینان از یافتن پاسخ بهینه سراسری و اجتناب از محاسبات و ارزیابی‌های اضافی، تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۱۰۰۰ به دست آمد. با توجه به بهترین اجرای الگوریتم PSO، وزن سد مورد مطالعه در پاسخ بهینه‌ی این الگوریتم برابر با ۵۲/۸۰ تن در واحد عرض سد به دست آمد. بهترین پاسخ به مسئله طراحی بهینه سد دارای ابعاد ۷/۶ متر برای طول کف‌بند بالادست، ۰/۶ متر برای ضخامت کف‌بند بالادست، ۰/۶ متر برای ضخامت حوضچه آرامش، ۱ متر برای ارتفاع آب‌بند بالادست و ۱/۱ متر برای ارتفاع آب‌بند پایین‌دست بود.

نتیجه‌گیری: به طور کلی نتیجه‌ی پژوهش حاضر حاکی از عملکرد و سرعت مطلوب الگوریتم PSO در یافتن پاسخ بهینه‌ی مسئله‌ی طراحی سد انحرافی با کمترین وزن سد همراه با رعایت شاخص‌های پایداری می‌باشد. استفاده از این الگوریتم به منظور یافتن پارامترهای بهینه برای طراحی سدهای انحرافی می‌تواند اطلاعات مفیدی را در اختیار مدیران اجرایی قرار دهد تا بهترین بهینه‌ترین طراحی را با حداقل هزینه و زمان بسیار کم با رعایت فاکتورهای ایمنی پایداری سدهای انحرافی ارائه دهند. برنامه تدوین شده در این تحقیق شرایط لازم و کافی را برای طراحی بهینه مقطع سدهای انحرافی فراهم می‌کند و از نظر اعتبار عمومی و عملی قابل اعتماد است اما دارای محدودیت‌هایی است. از جمله محدودیت‌های این روش این است که مقطع به‌دست‌آمده بر اساس کد توسعه‌یافته در این مطالعه باید بعداً برای معیارهای تنش مختلف (با استفاده از روش اجزای محدود) و برای شرایط خاص که در هر پروژه متفاوت است (زلزله، سیل، رسوب‌گذاری و غیره) مورد آزمایش قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی ازدحام ذرات، پایداری، سد انحرافی نازلان

مقدمه

سدهای انحرافی از نوع سدهای وزنی هستند. در سدهای وزنی، وزن سد نقش مهمی در پایداری سد دارد. از طرفی با افزایش وزن سد، هزینه ساخت آن افزایش می‌یابد. بنابراین باید بدنبال راهی بود تا با طراحی بهینه سد علاوه بر کم کردن هزینه ساخت، شاخص‌های پایداری رعایت شود. مهندسين طراحی در گذر زمان همواره با این چالش روبه رو بوده‌اند که سازه‌های کارا و کم هزینه بدون از دست رفتن صحت عملکرد آن طراحی نمایند. روش‌های سنتی در طراحی سدها اصولاً به دید فنی و تجربه و مهارت طراح بستگی دارد که گاهی می‌تواند به نتایج نادرستی نیز منتهی شود. محاسبات طراحی هیدرولیکی به صورت سنتی بسیار زیاد و زمان‌بر است و طراح چندین مرتبه فرضیات مورد استفاده را تغییر می‌دهد تا با طراحی بهینه سد، علاوه بر کاهش هزینه‌های ساخت سد بر اساس حجم بتن‌ریزی بهینه، معیارهای پایداری سد نیز لحاظ شود. از سوی دیگر، در دنیای پیشرفته و پر رقابت امروز به دلیل کمبود مواد اولیه و نیاز به بازدهی بهتر، مهندسين طراح وادار به طراحی بهینه و اقتصادی‌تر می‌باشند. در بندهای انحرافی با توجه به تعداد بالای قیود و متغیرهای هندسی مقطع، طراحی سنتی آن‌ها کار پیچیده و زمان‌بری می‌باشد. طراحی سد انحرافی شامل دو مرحله اصلی است. مرحله اول شامل طراحی هیدرولیکی سرریز اوجی، مشخصات حوضچه آرامش و تیپ حوضچه مورد استفاده و رقوم کف آن می‌باشد که برای انجام این محاسبات لازم است که دبی طرح، رقوم سطح آب مورد نیاز شبکه آبیاری و طول سرریز مشخص باشد. مرحله دوم شامل بررسی پایداری سد از لحاظ لغزش، واژگونی، شکست هیدرولیکی و گسیختگی پی می‌باشد، که در این مرحله با فرض مقادیری برای شیب وجه بالادست سد، ارتفاع دیواره آببند بالادست و پایین‌دست، ضخامت کف حوضچه آرامش و کف بند بتنی به بررسی پایداری سد پرداخته می‌شود.

روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و هوش مصنوعی به‌طور گسترده در حوزه منابع آب استفاده می‌شوند (Nourmohammadi Dehbalaei et al., 2023; Soltani & Azari, 2024) با این حال، به دلیل نیاز به سری‌های زمانی طولانی مدت پارامترهای ورودی، این روش‌ها معمولاً نتایج جامعی ارائه نمی‌دهند و برای استخراج پارامترهای طراحی سد کافی نیستند (Garsole et al., 2023; Sobhkhiz Foumani et al., 2023). استفاده از تکنیک بهینه‌سازی برای به دست آوردن ابعاد بهینه طراحی سدها یا سازه‌های بتنی این امکان را فراهم می‌کند که با رعایت ضوابط پایداری، بهترین مقدار پارامترهای طراحی را در مدت زمان کوتاهی با هدف کاهش هزینه اجرا به دست آورد (Mattias & Araujo, 2023;

Nourani et al., 2023). سدهای ثقلی بتنی به دلیل مزایای طراحی ساده و انتخاب مکان انعطاف پذیر به طور گسترده ساخته شده‌اند. این سدها به عنوان یکی از سازه‌های هیدرولیکی اصلی، مزایای جامعی را برای کنترل سیل، تولید برق و حمل و نقل فراهم می‌کنند (Chen et al., 2024). مهندسان هنگام طراحی سدهای ثقلی، کنترل‌های پایداری مانند مقاومت در برابر لغزش و واژگونی را در نظر می‌گیرند (Salmasi & Abraham, 2022).

در دو دهه اخیر تلاش‌های بسیاری توسط محققین جهت یافتن طرح اصولی و بهینه برای سدهای بتنی وزنی صورت گرفته است (Sartipi et al., 2021; Taheri Aghdam et al., 2021). کاهش حجم بتن و در نتیجه کاهش هزینه‌های ساخت چنین سدهای بتنی همواره مورد توجه محققان بوده است (Ghiasi et al., 2022). در سال‌های اخیر در بسیاری از مطالعات از روش بهینه‌سازی تک هدفه برای به دست آوردن سطح مقطع بهینه سدهای ثقلی استفاده شده است. برخی از این مطالعات از الگوریتم ژنتیک (Araujo et al., 2019; Salmasi & Abraham, 2022; Wang et al., 2021) یا الگوریتم PSO (Deshmukh & Magar, 2022; Ghasemi et al., 2024) با ساختار بهینه‌سازی تک هدفه استفاده کرده‌اند. سیمونز و لاپا (۱۹۹۴) و سیمونز (۱۹۹۵) با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم شکل بهینه سد بتنی وزنی را تحت تاثیر نیروهای استاتیکی و دینامیکی بدست آوردند (Simoes, & Lapa, 1994; Simoes, 1995). وو و همکاران (۲۰۰۸) با به کارگیری الگوریتم انبوه اجزا به همراه نرم افزار ANSYS به بهینه‌سازی مقطع سد وزنی تحت بارگذاری استاتیکی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از این روش می‌توان مشکلات مربوط به بهینه سراسری را در روش‌های مرسوم بهینه‌سازی کاهش داد. آن‌ها پارامترهای هندسی سد را به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته بودند و قیده‌های طراحی شامل قید لغزش، واژگونی و تنش بودند (Wu et al., 2008). لی و همکاران (۲۰۱۰) برای مدل‌سازی سد وزنی از نرم افزار ANSYS و به منظور بهینه‌سازی سد از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و به این نتیجه دست یافتند که با این روش می‌توان وزن سد را بیش از ۱۱/۹ درصد کاهش داد (Li et al., 2010).

نورزاد و رضایان (۲۰۱۱) از الگوریتم جامعه مورچگان در بهینه‌سازی مقطع سد خاکی استفاده کردند. متغیرهای طراحی شامل ارتفاع، تعداد، شیب و عرض هر ناحیه از سکوها در بالادست و پایین‌دست سد بوده و تابع هدف حداقل کردن مقطع سد خاکی در نظر گرفته شد (Noorzad & Rezaeian, 2011). یوسفی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود به بررسی عملکرد الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه مقطع سدهای

انتخاب کند. در این مدل تمام احجام خاکبرداری، خاکریزی، بتن‌ریزی و غیره محاسبه و بر اساس فهرست‌بهای اینیه ساختمانی، هزینه اجرای سد محاسبه و ابعادی از سد که کمترین هزینه را داشته باشد، انتخاب می‌شود. ورودی و خروجی‌های این برنامه به صورت فایل متنی است و کار کردن با این نرم افزار وقت‌گیر و سخت است (Amiri Tokaldany et al., 2016)

حیدری (۲۰۰۶) ضمن به‌روزرسانی مدل کامپیوتری TABDAM زیر برنامه‌های طراحی هیدرولیکی دهانه آبگیر، مجرای تخلیه رسوب و حوضچه ترسیب را به آن اضافه کرد. با توجه به آنکه مدل کامپیوتری TABDAM از روش کلاسیک برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند، ممکن است نقطه بهینه موضعی به جای نقطه بهینه سراسری انتخاب شده باشد و ابعاد سد به صورت دقیق بهینه نباشد (Heidari, 2006).

لین و همکاران (۲۰۱۰) با ترکیب الگوریتم ژنتیک با برنامه ANSYS به بهینه‌سازی مقطع سد وزنی تحت بارگذاری استاتیکی پرداختند و نشان دادند که انتخاب بهترین مقادیر عملگرها در این روش دقت محاسبات را افزایش خواهد داد (Lin et al., 2010)

کی (۲۰۱۲) به منظور بهینه‌سازی مقطع سد وزنی مدلی را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی در محیط برنامه‌نویسی C تهیه کرد. متغیرهای تصمیم شامل شیب سد در بالادست، پایین‌دست و عرض کف سد می‌باشد. تابع هدف در مدل کاهش حجم مصالح بود و گسیختگی پی و ضریب اطمینان در مقابل لغزش به عنوان قید پایداری در نظر گرفته شد. مدل ایشان برای یک سد وزنی حدود ۱۱ درصد کاهش حجم را همراه داشت. لازم به ذکر است ضریب اطمینان در مقابل واژگونی و آبستنگی در نظر گرفته نشده است (Qi, 2012).

اصلانی و همکاران (۲۰۱۳) از الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن مقطع و ابعاد بهینه سد وزنی استفاده کردند و مقادیری را برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهاد نمودند. ایشان از یک رابطه ریاضی ساده برای محاسبه وزن و حجم بتن‌ریزی استفاده کردند و حداقل کردن تابع ریاضی مربوطه را به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند (Aslani et al., 2013).

در خصوص کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیز می‌توان به مطالعات محقیقینی مانند Yosefvand et al., (2019)، Moghadam et al., (2018)، al., (2020) اشاره کرد.

با توجه به حجم بالا و زمانبر بودن طراحی سدهای انحرافی بر اساس روش‌های سنتی و حجم زیاد مصالح مصرفی و هزینه بالای اجرای این سازه‌ها، هدف از انجام این تحقیق استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی طراحی سدهای انحرافی می‌باشد که علاوه بر افزایش ضرایب اطمینان

انحرافی پرداخت. در این پژوهش پس از حساسیت‌سنجی و تعیین پارامترهای الگوریتم ژنتیک نتایج برای طرح بهینه‌ی دو سد انحرافی نایت و نازلین حاکی از عملکرد مطلوب این الگوریتم در حل مسئله‌ی طرح بهینه‌ی مقطع سد می‌باشد (Yousefi et al., 2017). دیبیکا و سوریبابو (۲۰۱۵) به بهینه‌سازی سد وزنی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی پرداختند. پاسخ بهینه‌ی به‌دست‌آمده با روش تحلیلی مقایسه شده و مشخص شد که ۲۰/۴۴ درصد کاهش در نیاز بتن پیش‌بینی می‌شود (Deepika & Suribabu, 2015).

خرم شکوه و همکاران (۲۰۱۸) با بکارگیری مدل هوش مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP) به عنوان یک مدل شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی دیوارهای آب‌بند، همراه با الگوریتم چندهدفه‌ی ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)، به طراحی دیواره‌های آب‌بند سد انحرافی پرداختند (Khoramshokoo et al., 2018).

فردوسی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود با بکارگیری الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه (SFLA) مدلی را برای یافتن شکل بهینه‌ی سرریز سد تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی (تغییر اقلیم)، با در نظر گرفتن یک سرریز نوک اردکی مرجع ارائه دادند. نتایج این الگوریتم نشان داد که حجم بتن مصرفی در طرح بهینه‌ی این سرریز در شرایط سیلاب واقعی ۳۷ درصد و در شرایط تغییرات اقلیمی ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. بررسی تحقیقات گذشته نشان داد بیشتر الگوریتم‌های بکار گرفته شده برای بهینه‌سازی مقطع سدهای انحرافی بصورت تک هدفه تدوین شده اند و بیشتر تمرکز آن‌ها بر روی کاهش هزینه اجرا یا کاهش حجم بتن ریزی بوده است (Ferdowsi et al., 2020).

بهینه‌سازی طراحی سد بر اساس معیارهای قابلیت اطمینان و پایداری اغلب به عنوان ابزاری برای اطمینان از جنبه‌های اقتصادی بدون به خطر انداختن ایمنی استفاده می‌شود (Abdollahi et al., 2022; Pirzadeh et al., 2022). در ساختار بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، معیارهای پایداری سد به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شوند که باعث می‌شود بسیاری از راه‌حل‌های نزدیک به آستانه مجاز به دلیل نقض این محدودیت‌ها نادیده گرفته شوند (Khatibinia & Khosravi, 2014; Aljuboori & Datta, 2019; Habibi et al., 2021). لذا در این تحقیق سعی شد تا الگوریتم چندهدفه‌ی توسعه داده شود تا علاوه بر در نظر گرفتن اهداف متناقض و در تضاد با هم، معیارهای پایداری سد در آن رعایت شود.

امیری توکالدانی و همکاران (۲۰۱۶) نرم افزار TABDAM را در محیط Dos برای طراحی هیدرولیکی سد انحرافی و تحلیل پایداری آن توسعه دادند. مدل کامپیوتری مزبور قادر است بهینه‌ترین مقطع سد را با استفاده از روش کلاسیک

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی سد نازلان

پارامتر	واحد	مقدار
دبی طراحی (شرایط سیلابی)	متر مکعب بر ثانیه	۲۶۰
طول موثر سرریز	متر	۷۰
رقوم سرریز در بالادست	متر	۱۳۱۳
ارتفاع تاج سرریز	متر	۳
رقوم سطح آب در بالادست	متر	۱۳۱۴/۳۹
رقوم سطح آب در پایین‌دست	متر	۱۳۱۱/۸۷
ارتفاع دیواره آب بند بالادست	متر	۴
ارتفاع دیواره آب بند پایین‌دست	متر	۲
شیب دیواره های آب بند	درجه	۸۰
ضخامت دیواره آب بند بالادست	متر	۰/۵
ضخامت دیواره آب بند پایین‌دست	متر	۰/۵
وزن در واحد حجم بتن	تن بر متر مکعب	۲/۴
وزن واحد حجم خاک مستغرق	تن بر متر مکعب	۲

معیارهای ارزیابی پایداری سد

بعد از طراحی هیدرولیکی سد و محاسبه کلیه نیروهای وارد بر آن در شرایط بارگذاری مختلف، لازم است پایداری سد در برابر پدیده‌های لغزش، واژگونی، آبشستگی و گسیختگی بررسی گردد. برای طراحی یک سد باید ابتدا کلیه شکل‌های خرابی آن بررسی شده و سپس هندسه سد به نحوی طراحی شود که ضریب اطمینان پایداری برای همه آنها بیش از حد مجاز باشد.

ضریب اطمینان در برابر لغزش^۱

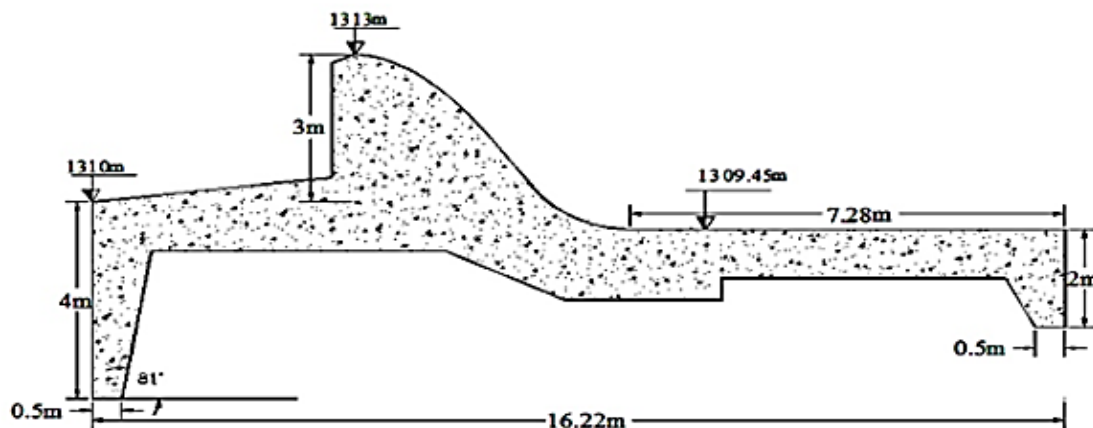
نیروهای مقاوم هر سد باید به نحوی باشد که از آن در برابر لغزش ایجاد شده توسط نیروهای لغزشی محافظت کند. خرابی سد انحرافی می‌تواند در اثر لغزش سد بر روی قاعده و محل تماس سد با پی باشد. عواملی که می‌توانند در مقابل لغزش

پایداری سد انحرافی، حجم مصالح مصرفی را کاهش داده و در نتیجه هزینه اجرای سد نیز کاهش یابد. نوآوری این پژوهش، اصلاح ساختار الگوریتم PSO برای طراحی بهینه مقطع سد انحرافی با در نظر گرفتن توابع تک هدفه با اعمال جریمه می-باشد. این اصلاحات شامل کنترل سرعت ذرات جستجوگر و نرمال‌سازی موقعیت ذرات در فضای امکان‌پذیر مسئله است. با توجه به ماهیت الگوریتم PSO و از آنجایی که میزان سرعت محاسبه شده‌ی ذرات اثر قابل توجهی در موقعیت جدید ذرات و روند همگرایی الگوریتم در فرآیند بهینه‌سازی اعمال می‌کند، در این پژوهش با توجه به محدوده‌ی مجاز متغیرهای تصمیم، مقادیر سرعت ذرات که در هر مرتبه اجرای الگوریتم محاسبه و اثر داده می‌شدند با اعمال یک ضریب کاهش کنترل شد. همچنین در این پژوهش، به‌منظور کنترل بیشتر موقعیت جدید ذرات و قرارگیری آنها در محدوده‌ی مجاز یک تابع نرمال‌ساز نیز به الگوریتم PSO اضافه شد تا باعث افزایش سرعت همگرایی گردد.

مواد و روش‌ها

سد انحرافی مورد مطالعه

سد انحرافی مورد مطالعه در این پژوهش سد نازلان واقع در استان کرمانشاه در ایران می‌باشد. دبی طراحی کانال اصلی شبکه تحت پوشش آن ۲/۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. تیپ حوضچه آرامش سد نازلان از نوع تیپ جایگزین‌شونده است. به منظور کاهش آبشستگی در بالادست و پایین‌دست سد از دیواره‌های آب‌بند استفاده شده است. در شکل ۱ مقطع اجرایی سد انحرافی نازلان به نمایش گذاشته شده است. مشخصات هیدرولیکی سد نازلان که در گذشته ساخته شده است در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. مقطع اجرایی سد انحرافی نازلان

R_v : نیروی برآیند قائم.

b : عرض پی بند

σ : تنش در زیر پی

M : لنگر نیروی های وارد بر بدنه حول پنجه بند

ظرفیت باربری مجاز پی را می توان با توجه به خصوصیات

خاک مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک تعیین

کرد. این پارامترها توسط آزمایش هایی بر روی نمونه دست

نخورده تعیین می شوند. ظرفیت باربری مجاز از تقسیم ظرفیت

باربری نهایی بر ضریب اطمینان به دست می آید. ضریب

اطمینان برابر ۳ در نظر گرفته می شود.

پایداری در مقابل آبشستگی

به دلیل اختلاف تراز سطح آب بین سراب و پایاب در پی

سدهای انحرافی، جریان تراوشی در زیر سد برقرار می شود. اگر

گرادیان هیدرولیکی بین سراب و پایاب سد از گرادیان

هیدرولیکی بحرانی بیشتر شود، پدیده آبشستگی ایجاد خواهد

شد که باعث شسته شدن مصالح زیر سد و واژگونی می گردد.

لین (۱۹۳۵) تئوری خزش- وزنی را ارائه نمود. بر اساس این

تئوری افت بار در جهت قائم بیشتر از افت بار در جهت افقی

می باشد. برای بررسی آبشستگی از ضریب خزش بلای مطابق

رابطه ۶ و ضریب تراوش لین مطابق رابطه ۷ استفاده می شود.

$$C = \frac{L}{H_s} \quad (6)$$

$$PF = \frac{Lw}{H_s} \quad (7)$$

در روابط بالا، C ضریب خزش بلای، PF ضریب تراوشی

لین، L طول خزش بلای و Lw طول خزش لین می باشد.

چنانچه ضریب خزش بلایی و یا ضریب تراوش لین از مقدار داده

شده در جدول ۲ بیشتر یا حداقل مساوی آن باشد سد انحرافی

در برابر آبشستگی مقاوم خواهد بود.

جدول ۲. مقادیر حداکثر مجاز گرادیان هیدرولیکی برای انواع خاکها

گرادیان هیدرولیکی مطمئن		جنس بستر
روش بلای	روش لین	
۱۸	۸/۵	ماسه بادی
۱۵	۷	ماسه ریز
-	۶	ماسه متوسط
۱۲	۵	ماسه درشت
-	۴	شن ریز
-	۳/۵	شن متوسط
-	۳	شن درشت
۹	۳	شن و ماسه
۴-۶	۲/۵	شن با قلوه سنگ
-	۳	رس نرم
-	۲	رس متوسط
-	۱/۸	رس سخت
-	۱/۶	رس خیلی سخت

مقاومت کنند شامل مقاومت برشی و اصطکاک موجود بین دو

قطعه پایین سد و پی می باشند. بنابراین ضریب اطمینان در مقابل

لغزش را می توان نسبت کل نیروهای افقی مقاوم در مقابل لغزش

به نیروهای افقی لغزشی بیان کرد و با استفاده از رابطه زیر

محاسبه می شود (Beyrami, 2022).

$$SF_s = \frac{CA + \tan\Phi \sum FV}{\sum FH} \quad (1)$$

در رابطه فوق، SF_s مقدار ضریب اطمینان در برابر لغزش

محاسبه شده، $\sum FV$ برآیند نیروهای عمودی وارد بر سد، $\sum FH$

برآیند نیروهای افقی وارد بر سد، C ضریب چسبندگی خاک

پی سد، A سطح مقطع تماس پی و کف سد و Φ زاویه

اصطکاک داخلی سد می باشد.

پایداری در مقابل واژگونی سد

یکی دیگر از قیدهای بهینه سازی ابعاد سد انحرافی، قید

ضریب اطمینان پایداری در مقابل واژگونی است که باید مقدار

آن برای پایداری بیش از حد مجاز باشد که مقدار آن عبارت

است از نسبت گشتاور نیروهای مقاوم گشتاور نیروهای محرک

حول پنجه سد و از رابطه زیر محاسبه می شود (بیرامی، ۱۴۰۱).

$$SF_o = \frac{\sum M_r}{\sum M_o} \quad (2)$$

در رابطه فوق، SF_o ضریب اطمینان واژگونی محاسبه شده

می باشد، $\sum M_o$ و $\sum M_r$ به ترتیب مجموع گشتاور نیروهای

مقاوم و محرک هستند. حداقل ضریب اطمینان در برابر واژگونی

باید ۱/۵ باشد.

پایداری در مقابل گسیختگی پی

یکی از اصلی ترین معیارهای کنترل پایداری در سدهای

وزنی قرار گرفتن محل اثر بر آیند نیروها در $\frac{1}{3}$ (یک سوم) میانی

قاعده سد است که به منظور کنترل این شرط مقدار e خروج از

محوریت نیروی بر آیند نباید از $b/6$ بزرگتر باشد. برای کنترل

تنش در زیر پی با استفاده از رابطه زیر مقادیر تنش کمینه و

بیشینه محاسبه گردید (بیرامی، ۱۴۰۱).

$$\sigma = \frac{R_v}{b} \left(1 \pm \frac{6 \times e}{b}\right) \quad (3)$$

$$L = \frac{M}{R_v} \quad (4)$$

$$e = L - b/2 \quad (5)$$

برای کنترل خروج از مرکزیت بند باید مقدار e کوچکتر از $b/6$ باشد.

در رابطه فوق:

L : محل اثر نیروی برآیند R_v

e : خروج از مرکزیت نیروی برآیند.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ (PSO) استفاده گردید که به صورت تک‌هدفه تدوین شده است. الگوریتم تک‌هدفه PSO یکی از روش‌های الگوریتم‌های هوش جمعی^۵ می‌باشد که کندی و ابره‌هات (۱۹۹۵) آن را معرفی نمودند. اساس این الگوریتم بر جستجو و تکرار در محیط مساله استوار است. در این الگوریتم هر جواب به صورت یک پرنده یا ذره در نظر گرفته می‌شود که در محیط مساله در حال جستجو است. در الگوریتم PSO فرآیند با یک مجموعه از جواب‌های تصادفی شروع می‌شود و با ارزیابی تابع برازش بهترین موقعیت هر ذره و بهترین موقعیت تمام ذرات مشخص شده و در مرحله بعد با به روز کردن موقعیت و سرعت هر ذره برای یافتن جواب بهینه در محیط مساله به جستجو می‌پردازد.

در یک مسئله D بعدی موقعیت i امین ذره در جمعیت با $V_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T$ و سرعت این ذره را با $(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})^T$ نمایش می‌دهند اگر شماره تکرار را با n نمایش دهیم خواهیم داشت:

$$V_{id}^{n+1} = \chi \cdot [w \cdot V_{id}^n + c_1 r_1^n (pbest_{id}^n - X_{id}^n) + c_2 r_2^n (gbest_d^n - X_{id}^n)] \quad (8)$$

$$X_{id}^{n+1} = X_{id}^n + V_{id}^{n+1} \quad (9)$$

که در روابط (۸) و (۹)، χ ثابت انقباض نام دارد، c_1 و c_2 ضرایب ثابت و مثبت می‌باشند که معمولاً مقدار آن‌ها بین ۱/۵ تا ۲ در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۰، ۱) می‌باشند. برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم مقدار نهایی سرعت ذره در بازه $[-V_{max}, V_{max}]$ محدود می‌شود. پارامتر w وزن اینرسی نامیده می‌شود که برای کنترل تاثیر سرعت‌های قبلی در همگرایی الگوریتم می‌باشد. در واقع تعادلی بین اکتشافات کلی و محلی برقرار می‌کند. می‌توان گفت که همگرایی شدیداً به این پارامتر بستگی دارد و بهتر است به صورت دینامیک تعریف شود. هر چه این مقدار بیشتر باشد جستجوی کلی افزایش می‌یابد و هر چه مقدار آن کم باشد میزان جستجوی محلی افزایش می‌یابد. مقدار w در هر تکرار طبق رابطه (۱۰) تعریف می‌گردد.

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times n}{Iter_{max}} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) w_{max} وزن اینرسی در ابتدای جست و جو، w_{min} وزن اینرسی در انتهای جستجو، n شماره تکرار فعلی و $Iter_{max}$ تعداد کل تکرارها می‌باشد.

اگر $w \geq 1$ باشد، سرعت در طول زمان افزایش می‌یابد و به سمت حداکثر سرعت شتاب می‌گیرد و جمعیت واگرا می‌شود.

در این حالت ذرات قادر به تغییر جهت نیستند تا به سمت مناطق امیدوارکننده برگردند (Engelbrecht, 2007). از سوی دیگر، اگر $0 \leq w < 1$ باشد، ذرات قادر خواهند بود به منطقه دیگری در ناحیه جستجو بروند. بنابراین، با توجه به کاهش پارامتر وزن اینرسی، ازدحام ممکن است نواحی بیشتری را در ناحیه جستجو مورد اکتشاف قرار دهد و این یعنی شانس پیدا کردن بهینه سراسری افزایش پیدا می‌کند. اگرچه، در حالاتی که از مقادیر w خیلی کم استفاده می‌شود نیز هزینه‌ای وجود دارد که شبیه‌سازی‌ها را زمان‌برتر خواهد کرد.

ضرایب شتاب، c_1 و c_2 ، همراه با بردارهای تصادفی r_1 و r_2 سرعت کلی یک ذره را کنترل می‌کنند. مطالعه گسترده‌ای در مورد پارامترهای شتاب برای اولین نسخه PSO توسط کندی و ابره‌هات انجام گرفته است (کندی و ابره‌هات، ۱۹۹۵).

ثابت‌های c_1 و c_2 همچنین به عنوان پارامترهای اعتماد شناخته می‌شوند. c_1 میزان اطمینان یک ذره به خود را بیان می‌کند، در حالی که c_2 بیانگر میزان اطمینان یک ذره به همسایگان خود است. با $c_1 = c_2 = 0$ ، ذرات با سرعت فعلی خود به حرکت

ادامه می‌دهند تا زمانی که به مرز فضای جستجو برسند (با فرض عدم اینرسی). اگر $c_1 > 0$ و $c_2 = 0$ ، همه ذرات به طور مستقل به جستجوی خود می‌پردازند. در این حالت اگر موقعیت جدید یک ذره بهتر باشد، با جایگزینی بهترین موقعیت فعلی، بهترین موقعیت را در همسایگی خود پیدا می‌کند و ذرات یک جستجوی محلی انجام می‌دهند. از سوی دیگر، اگر $c_2 > 0$ و $c_1 = 0$ ، کل جمعیت ذرات به یک نقطه منفرد، جذب می‌شود.

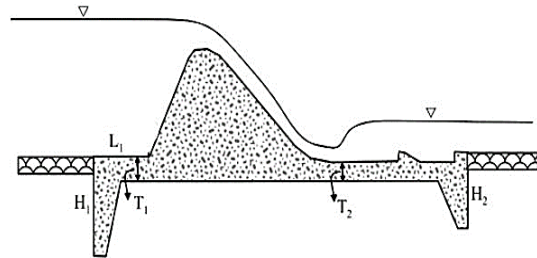
در این حالت کل جمعیت به جستجوگرهای تصادفی تبدیل می‌شوند. اگر c_1 خیلی بزرگ‌تر از c_2 باشد ($c_1 \gg c_2$) باشد، هر ذره بسیار بیشتر جذب بهترین موقعیت شخصی خود می‌شود که منجر به سرگردانی بیش از حد ذره می‌شود. از سوی دیگر، اگر c_2 خیلی بزرگ‌تر از c_1 باشد ($c_2 \gg c_1$)، ذرات به شدت به سمت بهترین موقعیت سراسری جذب می‌شوند و باعث می‌شوند که ذرات پیش از موعد به سمت بهینه بشتابند و در بهینه‌های محلی به دام بیفتند (Engelbrecht, 2007). به-

عنوان پیش فرض، مقادیر $c_1 = c_2 = 2$ پیشنهاد شده است، اما نتایج تجربی نشان می‌دهد که مقادیر ۵، $c_1 = c_2 = 0$ ممکن است نتایج بهترین را حاصل نماید. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که ممکن است انتخاب پارامتر شناختی c_1 ، بزرگ‌تر از پارامتر اجتماعی c_2 ، با این شرط که $c_1 + c_2 \leq 4$ باشد، منجر به نتایج بهتری شود (Carlisle and Dozier, 2001).

r_1 یک پارامتر مقدار تصادفی با طیف [۰، ۱] است. این پارامتر تصادفی، نقش مهمی را بازی می‌کند، زیرا از همگرایی پارامترها ممانعت و بهینه سراسری احتمالی را بیشینه می‌کند. همچنین، r_2 نیز نقشی مشابه با r_1 دارد.

متغیرهای تصمیم

در این پژوهش متغیرهای تصمیم در طراحی سد انحرافی شامل ارتفاع دیوار آب بند بالادست و پایین دست (H_1 و H_2)، ضخامت کف بند بتنی در بالادست (T_1)، ضخامت حوضچه آرامش (T_2) و طول کف بند بتنی بالا دست (L_1) می باشد. در شکل ۲ متغیرهای طراحی نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایی از متغیرهای طراحی در این پژوهش

تابع هدف

در این تحقیق تابع هدف حداقل سازی وزن سد است. مساحت بدنه‌ی سد به صورت زیر محاسبه می شود.

$$S = 0.5 \left| \sum_{i=1}^n X_i (Y_{i+1} - Y_{i-1}) \right| \quad (11)$$

که در این رابطه S مساحت بدنه‌ی سد در واحد عرض (متر مربع)، X_i فاصله‌ی افقی نقاط بدنه‌ی سد، Y_i فاصله‌ی عمودی نقاط بدنه‌ی سد و n تعداد نقاط در نظر گرفته شده در بدنه‌ی سد می باشد. به این ترتیب با استفاده از S (مساحت بدنه‌ی سد در واحد عرض بر حسب متر مربع) تابع هدف اول در به صورت زیر تعریف می شود.

$$F_1 = \text{Minimize}(\gamma_{con} \times S) \quad (12)$$

که در آن γ_{con} وزن مخصوص بتن (تن بر مترمکعب) می باشد. از طرفی ابعاد سد باید به گونه ای طراحی شود که سد دارای پایداری لازم در برابر نیروهای وارد بر آن باشد. از اینرو در پژوهش حاضر چهار پارامتر دیگر که شامل ضرایب اطمینان پایداری در برابر لغزش (SF_s)، ضریب اطمینان در برابر واژگونی (SF_o)، ضریب اطمینان در برابر گسیختگی (SF_p) و ضریب اطمینان در برابر آبشستگی (SF_i) می باشد، به عنوان قیود بهینه سازی در نظر گرفته شد.

قیود:

ضریب اطمینان در برابر لغزش به صورت $SF_s \geq 2.5$ تعریف می شود. ضریب اطمینان در برابر واژگونی به صورت $SF_o \geq 1.7$ تعریف می شود. - ضریب اطمینان در برابر گسیختگی به صورت $SF_p \geq 1$ تعریف می شود. این ضریب به صورت زیر محاسبه می شود.

$$SF_p = \frac{p_c}{\text{Max} \left[\frac{R}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) \right]} \quad (13)$$

که در این رابطه SF_p ضریب اطمینان واقعی سد در مقابل گسیختگی پی، p_c فشار مجاز وارد بر مصالح پی، R برآیند نیروهای قائم وارد بر سد، B عرض کف سد و e خروج از مرکز تنش های وارده بر سد می باشد.

ضریب اطمینان در برابر شکست هیدرولیکی به صورت $SF_i \geq 1$ تعریف می شود. این ضریب به صورت زیر محاسبه می شود.

$$SF_i = \frac{C_a}{C_s} - 1 \geq 0 \quad (14)$$

$$C_a = \frac{l_w}{\Delta H} \quad (15)$$

در روابط فوق C_s و C_a به ترتیب ضریب خزش واقعی و مجاز سد در مقابل شکست هیدرولیکی است. ضریب خزش مجاز در مقابل آبشستگی به جنس و بافت مصالح پی وابسته است. همچنین l_w طول خزش بلای و ΔH اختلاف تراز سطح آب در بالادست و پایین دست سد است.

برای افزایش زمان همگرایی و سرعت الگوریتم برخی از این ضرایب (ضرایب اطمینان در برابر لغزش، گسیختگی و شکست هیدرولیکی) با در نظر گرفتن جریمه تعدی از آنها به معادله تابع هدف اضافه شدند. بنابراین در نهایت تابع هدف به صورت زیر تعریف شد.

$$F_1 = \text{Minimize} \left(\gamma_{con} S + \vartheta * \sum_{j=1}^{N_j} v(SF_j) \right) \quad (16)$$

که در اینجا S مساحت بدنه‌ی سد در واحد عرض (متر مربع)، γ_{con} وزن مخصوص بتن (تن بر مترمکعب)، $v(SF_j)$ تابع میزان تخطی از مقادیر مجاز ضرایب اطمینان پایداری لغزش، گسیختگی و شکست هیدرولیکی، N_j تعداد ضریب اطمینان های پایداری مورد بررسی می باشند. همچنین ϑ ضریب جریمه است و میزان افزایش تابع هدف در پاسخ هایی که دارای تخطی از محدودیت ها می باشد را نشان می دهد. رابطه ای که برای محاسبه مقدار جریمه در ساختار الگوریتم مورد استفاده قرار گرفت در زیر ارائه شده است.

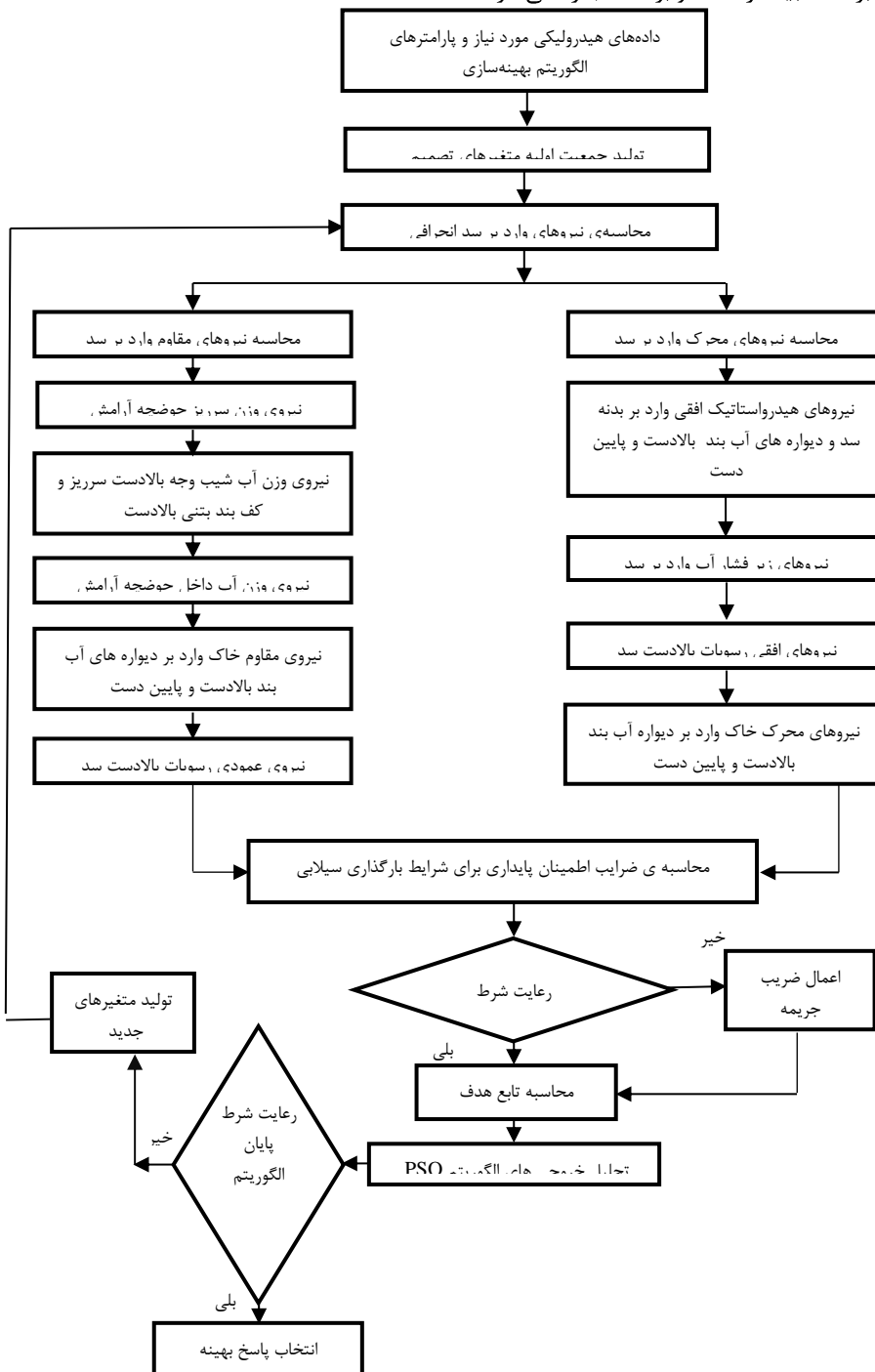
$$\text{If } SF_j < (SF_j)_{min} \rightarrow v(SF_j) = \text{Max} (0, (SF_j)_{min} - SF_j) \quad (17)$$

استفاده از این روش مستلزم معلوم بودن مقدار ϑ (ضریب جریمه) می باشد. کیفیت جواب مسئله‌ی بهینه سازی بستگی زیادی به مقدار این ضریب دارد. اگر ضریب جریمه کوچک باشد، ممکن است جواب مسئله یک جواب نشدنی باشد و اگر خیلی بزرگ باشد، جواب به دست آمده کیفیت خوبی نخواهد داشت. مقدار مناسب ضریب جریمه از مسئله ای به مسئله دیگر فرق می کند و لذا مقدار آن از قبل معلوم نیست. روش متداول در تعیین مقدار مناسب این ضریب مبتنی بر سعی و خطا و یا تعیین آن بصورت تصادفی می باشد که ممکن است مدت زمان فرآیند بهینه سازی را افزایش دهد (Afshar et al., 2009).

ساختار مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

در این تحقیق تمامی مراحل طراحی بند انحرافی و محاسبه نیروهای وارده به آن و محاسبات ضرایب اطمینان پایداری در قالب یک برنامه شبیه‌ساز در محیط MATLAB کدنویسی شد. سپس الگوریتم PSO در نرم افزار MATLAB توسعه داده شده و به برنامه شبیه‌ساز طراحی سد انحرافی متصل گردید. در این مدل توسعه داده شده، ابتدا توسط الگوریتم PSO بر اساس محدودیت‌های نوشته شده در مدل، مقادیر متغیرهای تصمیم ایجاد شده و وارد برنامه شبیه‌ساز گشته و برنامه اجرا می‌گردد.

سپس نتایج حاصل از آن بر اساس تابع هدف و قیود تعریف شده توسط الگوریتم بهینه‌ساز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورت عدم تأمین هدف مورد نظر، دوباره الگوریتم بهینه‌ساز اجرا شده و جمعیت جدیدی تولید شده و وارد برنامه شبیه‌ساز می‌گردد و این چرخه تا رسیدن به جواب‌های بهینه ادامه می‌یابد. برای روشن شدن مراحل انجام کار مراحل تعیین مقطع بهینه‌ی سد انحرافی با استفاده از الگوریتم PSO در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. مراحل تعیین مقطع بهینه‌ی سد انحرافی با استفاده از الگوریتم PSO

نتایج و بحث

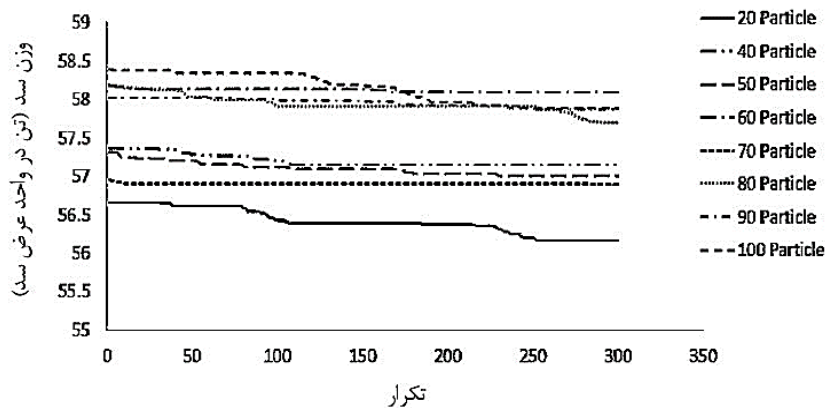
حساسیت‌سنجی پارامترهای الگوریتم PSO

از آنجایی که الگوریتم PSO می‌تواند هر تعداد ذرات یا اندازه‌ی جمعیت را داشته باشد بهترین کار این است که تعداد بهینه‌ی ذرات برای هر مسئله‌ی خاص مشخص شود (Engelbrecht, 2007). از اینرو به‌منظور یافتن تعداد ذرات یا جمعیت مناسب برای الگوریتم PSO این الگوریتم با تعداد ذرات مختلف اجرا شده است. تحلیل حساسیت تعداد ذرات در بازه‌ی [15-100] و تعداد ۳۰۰ مرتبه تکرار الگوریتم انجام شد که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ نتایج حساسیت‌سنجی تعداد ذرات آورده شده است. همچنین با توجه به تعداد متغیرهای تصمیم که در این پژوهش پنج متغیر می‌باشد هر ذره دارای پنج بعد است که مقادیر اولیه‌ی

آنها با استفاده از تابع `unifrnd` در نرم‌افزار متلب به صورت تصادفی مشخص شد. در انجام تحلیل حساسیت تعداد ذرات، مقادیر سایر پارامترهای الگوریتم ثابت و به صورت زیر $c1 = 1$ و $c2 = 0.4$ و در نظر گرفته شد.

با توجه به جدول ۳ و شکل ۴ به منظور کاهش تعداد ارزیابی‌های تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی و کاهش زمان اجرای مدل تعداد ذرات بهینه (جمعیت اولیه‌ی) در سد نازلین ۲۰ ذره در نظر گرفته شد که ۴ برابر تعداد متغیرهای تصمیم است.

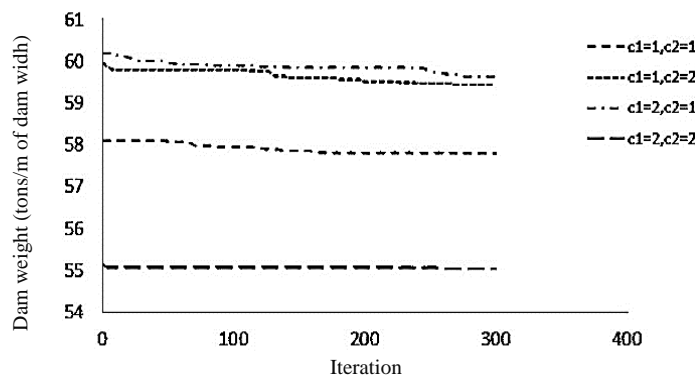
همچنین حساسیت‌سنجی مقادیر $c1$ و $c2$ در بازه‌ی [۱ ۲]، با در نظر گرفتن ۲۰ ذره به عنوان جمعیت اولیه، مقدار w برابر با ۰/۴ و تعداد ۳۰۰ تکرار الگوریتم انجام شد. نتایج این بررسی در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به شکل ۵، مقدار $c1$ و $c2$ به‌منظور افزایش کارایی الگوریتم PSO به ترتیب ۲ و ۲ تعیین شد.



شکل ۴. نمودار همگرایی الگوریتم PSO با تعداد ذرات مختلف به‌منظور بهینه‌سازی وزن سد نازلین

جدول ۳. نتایج حساسیت‌سنجی وزن سد نازلین نسبت به تعداد ذرات در ۳۰۰ تکرار الگوریتم PSO

تعداد ذرات	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
کمترین وزن سد	۵۶/۱۵	۵۷/۵۰	۵۷/۱۴	۵۷/۰۱	۵۸/۰۹	۵۶/۸۹	۵۷/۷۰	۵۷/۸۶	۵۷/۸۸



شکل ۵. نمودار همگرایی الگوریتم PSO در مقادیر مختلف $c1$ و $c2$ به‌منظور بهینه‌سازی وزن سد نازلین

جدول ۴. مقدار بهینه‌ی پارامترهای الگوریتم PSO

پارامتر	مقدار بهینه
تعداد ذرات	۲۰
c1	۲
c2	۲
w	۰,۵

نمودار همگرایی بهترین اجرا ی الگوریتم در یافتن پاسخ بهینه در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین نمودارهای ۵ اجرای الگوریتم PSO به همراه نمودار بهترین اجرای این الگوریتم در شکل ۸ نشان داده شده است. با استفاده از این نمودارها مقدار بهینه‌ی تابع هدف که وزن سد مورد مطالعه می- باشد در بهترین اجرای الگوریتم PSO و میانگین مقدار این تابع در ۵ اجرای الگوریتم در جدول ۵ آورده شده است.

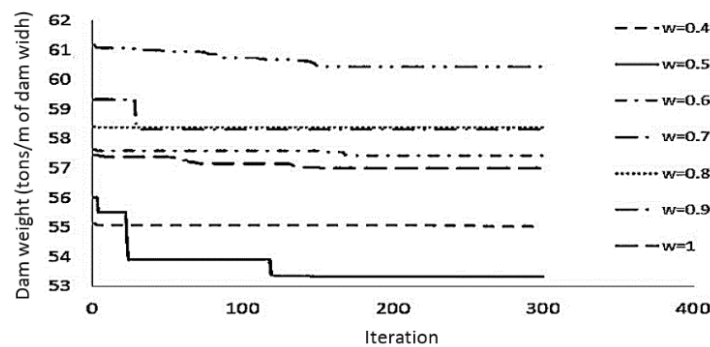
جدول ۵. مقدار بهینه‌ی وزن سد در بهترین اجرا و میانگین ۵ اجرای الگوریتم PSO

اجرای الگوریتم	کمترین وزن سد (تن در واحد عرض سد)
بهترین اجرای الگوریتم	۵۲/۸۰
میانگین ۵ اجرای الگوریتم	۵۲/۹۵

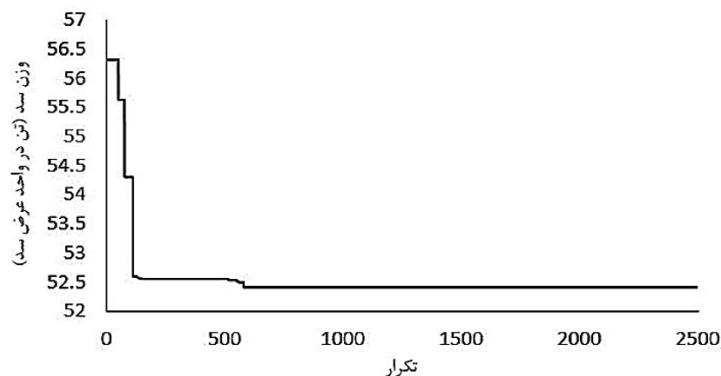
پس از مشخص شدن تعداد ذرات و مقادیر c1 و c2، تحلیل حساسیت به منظور تعیین مقدار w انجام شد. مقدار w برای اطمینان از رفتار همگرا و بهینه‌سازی اکتشاف و بهره‌برداری بسیار مهم است. بر اساس پژوهش‌های پیشین مقدار w می‌تواند در بازه‌ی [۰,۴ ۱] در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن مقادیر مختلف این بازه نتایج تحلیل حساسیت مقدار w با اجرای الگوریتم PSO با تعداد ۳۰۰ تکرار در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج این حساسیت‌سنجی مقدار w به‌منظور افزایش کارایی الگوریتم PSO برابر با ۰,۵ در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم PSO

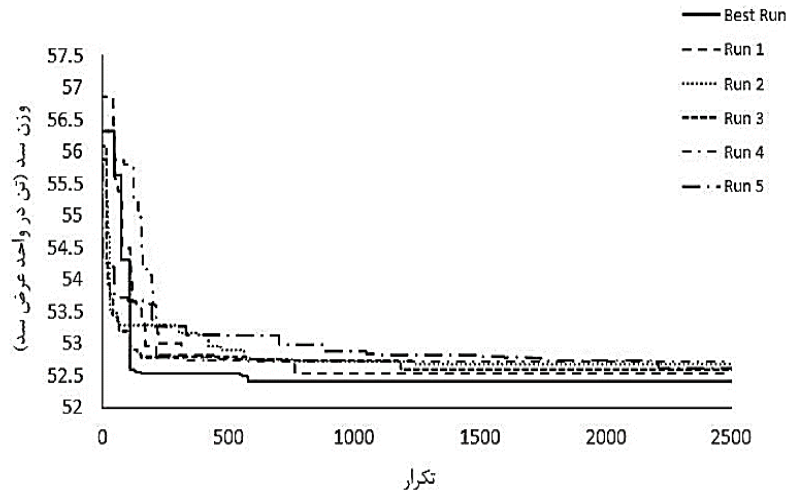
با توجه به نتایج حساسیت‌سنجی، پارامترهای الگوریتم PSO به صورت مقادیر آورده شده در جدول ۴ مشخص و در کد الگوریتم در نرم‌افزار متلب مقاردهی شد. به منظور اجرای الگوریتم با هدف بهینه‌سازی وزن سد نازلان تعداد ۱۰۰۰ تکرار به عنوان حداکثر تعداد تکرار الگوریتم و تعداد ۲۰ ذره به عنوان جمعیت اولیه در نظر گرفته شد. انتخاب تعداد ۱۰۰۰ تکرار برای الگوریتم PSO با انجام حساسیت‌سنجی در بازه‌ی [۳۵۰۰ ۱۰۰] تعیین شد. همچنین در اینجا تعداد تکرارها شرط توقف الگوریتم در نظر گرفته شد.



شکل ۶. نمودار همگرایی الگوریتم PSO در مقادیر مختلف w بمنظور بهینه‌سازی وزن سد نازلان



شکل ۷. نمودار همگرایی الگوریتم PSO در بهترین اجرا بمنظور بهینه‌سازی وزن سد نازلان

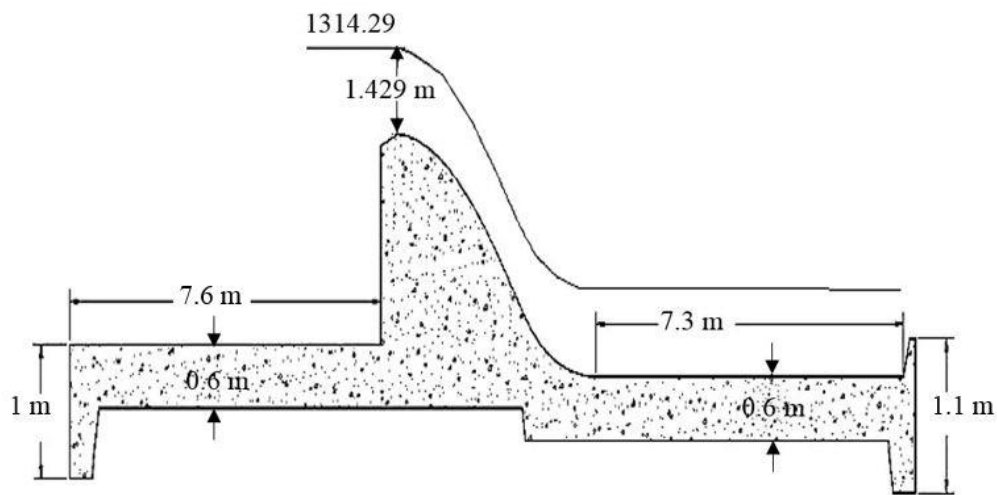


شکل ۸. نمودارهای همگرایی اجراهای مختلف الگوریتم PSO در بهینه‌سازی وزن سد نازلین

جدول ۷ آورده شده است. به علاوه مقادیر ضرایب اطمینان پایداری سد در این پاسخ بهینه در جدول ۸ آورده شده است. به منظور هم‌سنجی نتایج این پژوهش با پژوهش‌های پیشین که سد نازلین مورد مطالعه قرار گرفته است، مقادیر وزن سد و ضریب اطمینان در مقابل واژگونی در پژوهش حاضر و پژوهش یوسفی (۱۳۹۳) در جدول ۹ آورده شده است.

مقطع بهینه سد

با توجه به بهترین اجرای الگوریتم PSO وزن سد مورد مطالعه در پاسخ بهینه‌ی این الگوریتم برابر با ۵۲/۸۰ تن در واحد عرض سد به دست آمد. ابعاد سد نازلین در این وزن بهینه در شکل ۹ نشان داده شده است همچنین مقدار این ابعاد در جدول ۶ آورده شده است. با در نظر گرفتن این ابعاد مشخصات نیروهای وارد بر سد که طی فرآیند بهینه‌سازی محاسبه شده در



شکل ۹. مقطع بهینه‌ی بدست آمده توسط الگوریتم PSO برای سد نازلین

جدول ۶. مقدار بهینه‌ی ابعاد سد در بهترین اجرای الگوریتم PSO (متر)

طول کفبند بالادست	ضخامت کفبند بالادست	ضخامت حوضچه‌ی آرامش	ارتفاع آببند بالادست	ارتفاع آببند پایین‌دست	طول کفبند بالادست
۷/۶	۰/۶	۰/۶	۱	۱/۱	۷/۶

جدول ۷. مشخصات نیروهای وارد بر مقطع بهینه‌ی سد نازلان در این پژوهش

نوع نیرو	مقدار نیرو (تن در واحد عرض سد)	گشتاور نیرو (تن در متر)
نیروی وزن سد	۵۲/۴۰	۵۰۲/۴۲۳۴
نیروی وزن آب داخل حوضچه‌ی آرامش	۱۷/۵۶	۶۳/۷۷
نیروی وزن آب روی کفبند بالادست سد	۳۳/۳۸	۵۳۴/۹۵
نیروی هیدرواستاتیک وارد بر وجه	۸/۶۷	۲۳/۳۵
نیروی هیدرواستاتیک وارد بر آببند	۳/۸۳	۲/۹۹
نیروی هیدرواستاتیک وارد بر آببند	۲/۰۸	۰/۸۷
نیروی هیدرواستاتیک آب داخل	۱/۷۴	۲/۶۶
نیروی زیر فشار	۷۹/۴۳	۸۳۲/۷۴
نیروی محرک خاک وارد بر آببند	۱/۱۶	۱/۰۸
نیروی محرک خاک وارد بر آببند پایین-	۰/۵۶	۰/۱۷
نیروی مقاوم خاک وارد بر آببند	۰/۲۴	۰/۳۸
نیروی مقاوم خاک وارد بر آببند پایین-	۱/۲۲	۰/۳۶
نیروی افقی ناشی از رسوبات	۱/۵۰	۳/۶۷
نیروی عمودی ناشی از رسوبات	۲۲/۸۰	۳۶۵/۳۴

جدول ۸. مقدار ضرایب اطمینان پایداری در مقطع بهینه‌ی سد نازلان در این پژوهش

ضریب اطمینان در مقابل لغزش	ضریب اطمینان در مقابل واژگونی	ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی	ضریب اطمینان در مقابل شکست هیدرولیکی
۵/۶	۱/۷۵	۲/۶۳	۱/۱

جدول ۹. نتایج در مقطع بهینه‌ی سد نازلان در پژوهش‌های مختلف

پژوهش	وزن سد (تن در واحد عرض سد)	ضریب اطمینان در مقابل واژگونی
پژوهش حاضر	۵۲/۸۰	۱/۷۵
یوسفی (۱۳۹۳)	۵۳/۰۴	۱/۸
مدل واقعی سد	۶۸/۷۸	۲/۴

نتیجه گیری

در این پژوهش بر اساس نتایج حساسیت‌سنجی تعداد ذرات یا اندازه‌ی جمعیت الگوریتم PSO، تعداد ۲۰ ذره برای اندازه‌ی جمعیت ذرات انتخاب شد که با توجه به پژوهش‌های پیشین که الگوریتم PSO به عنوان الگوریتمی که با اندازه‌ی جمعیت کم به بهترین پاسخ‌ها می‌رسد معرفی شده است (Engelbrecht, 2007)، به نظر مطلوب می‌باشد. هر چند که تعداد ذرات بیشتر ممکن است منجر به تکرارهای کمتری برای رسیدن به یک

پاسخ خوب در مقایسه با جمعیت‌های کوچکتر شود، ولی با توجه به نمودار حساسیت‌سنجی در مسئله‌ی پژوهش حاضر و ماهیت تصادفی بودن این الگوریتم و فاقد بودن روند معنی‌داری در ارتباط با اندازه‌ی جمعیت و پاسخ بهینه، به نظر می‌رسد تعداد کمتر ذرات نمی‌تواند مانع رسیدن الگوریتم به بهینه‌ی سراسری باشد. نتایج حساسیت‌سنجی دو ضریب شتاب c1 و c2 که به طور مستقیم بر سرعت کلی ذرات اثر می‌گذارند، نشان داد که وقتی مقدار این دو ضریب یکسان و برابر با ۲ در نظر

دیگری نیز بهینه‌سازی طراحی سد بر اساس معیارهای قابلیت اطمینان و پایداری به عنوان ابزاری برای اطمینان از جنبه‌های اقتصادی بدون به خطر انداختن ایمنی انجام شده است (Abdollahi et al., 2022; Pirzadeh et al., 2022). در تحقیق حاضر برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم معیارهای پایداری سد با در نظر گرفتن جریمه تخطی از آن‌ها در معادله تابع هدف وارد شده است. اما در برخی تحقیقات این معیارها به‌عنوان قید در نظر گرفته شده که سیستم اجازه تخطی از آن را ندارد (Khatibinia & Khosravi, 2014; Aljuboori & Datta, 2019; Habibi et al., 2021).

بکارگیری الگوریتم توسعه داده شده در این تحقیق به‌منظور یافتن پارامترهای بهینه طراحی سدهای انحرافی می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار مدیران اجرایی قرار دهد تا با حداقل هزینه و صرف زمان بسیار کم با رعایت معیارهای اطمینان‌پذیری پایداری سدهای انحرافی بهترین و بهینه‌ترین طراحی را ارائه دهند. برنامه تدوین شده در این تحقیق شرایط لازم و کافی را برای طراحی بهینه مقطع سدهای انحرافی فراهم می‌کند و از نظر اعتبار عمومی و عملی قابل اعتماد است، اما دارای محدودیت‌هایی است. در شرایط طراحی واقعی، مقطع به‌دست‌آمده بر اساس کد توسعه‌یافته در این مطالعه باید بعداً برای معیارهای تنش مختلف (با استفاده از روش اجزای محدود) و برای شرایط خاص که در هر پروژه متفاوت است (زلزله، سیل، رسوب‌گذاری، و غیره) مورد آزمایش قرار گیرد. یکی دیگر از محدودیت‌های این کد این است که برای سرریز اوجی توسعه داده شده و پیشنهاد می‌شود کد برای انواع سرریزها بهبود یابد. در این تحقیق از روابط تجربی برای نیروی زیر فشار (بالا بردن) و پدیده رگاب استفاده شده است و پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از روش‌های عددی (حجم محدود یا اختلاف محدود) استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود طول بهینه سرریز بر اساس ترکیبی از پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و پارامترهای اقتصادی محاسبه شود.

گرفته شود بهترین عملکرد الگوریتم نتیجه می‌شود. که با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین، که ذرات قدرت خود را از ماهیت تعادلی خود می‌گیرند و زمانی موثرترند که ضرایب c_1 و c_2 در یک تعادل خوب با هم وجود داشته باشند (Engelbrecht, 2007)، یعنی تقریباً با هم مساوی باشند ($c_1 \approx c_2$)، در اینجا نیز مقدار یکسان برای این دو ضریب انتخاب شد که هم از سرگردانی ذرات جلوگیری می‌شود و هم با شتاب مناسبی به سمت بهینه‌ی سراسری حرکت خواهند کرد. مقدار بهینه برای وزن اینرسی وابسته به مسئله‌ی مورد پژوهش می‌باشد که در اینجا با توجه به نتایج حساسیت‌سنجی این پارامتر مقدار 0.5 انتخاب شد که در بازه‌ی مجاز تعریف شده توسط پژوهش‌های پیشین قرار دارد. همچنین این مقدار w باعث اثرگذاری متعادل سرعت پیشین ذرات و استفاده از حافظه‌ی حرکت‌ها می‌شود. تعداد تکرارها برای رسیدن به یک پاسخ خوب نیز وابسته به مسئله‌ی مورد پژوهش می‌باشد. تکرارهای بسیار کم ممکن است جستجوی الگوریتم را پیش از رسیدن به بهینه‌ی سراسری خاتمه دهد. همچنین تعداد بیش از حد تکرارها بخصوص در پژوهش حاضر که تعداد تکرارها تنها شرط توقف است، پیامد پیچیدگی محاسبات غیر ضروری را ایجاد می‌کند. در اینجا با توجه به نمودار همگرایی الگوریتم PSO در بهترین اجرا و همچنین در اجراهای مختلف، تعداد 1000 تکرار به منظور اطمینان از یافتن پاسخ بهینه‌ی سراسری و جلوگیری از محاسبات و ارزیابی‌های اضافی مناسب بنظر می‌رسد. پس از تنظیم مقادیر پارامترهای الگوریتم PSO با اجرای این الگوریتم به تعداد 1000 تکرار، بهترین پاسخ مسئله‌ی طراحی بهینه‌ی سد با ابعاد $7/6$ متر برای طول کفبند بتنی بالادست، $0/6$ متر برای ضخامت این کفبند، $0/6$ متر برای ضخامت حوضچه‌ی آرامش پایین‌دست، 1 متر برای ارتفاع آببند بالادست و $1/1$ متر برای ارتفاع آببند پایین دست که دارای وزن $52/8$ تن در واحد عرض سد می‌باشد، حاصل شد. در پاسخ بهینه‌ی ارائه شده در این تحقیق بر اساس تابع هدف تعریف شده، معیارهای پایداری رعایت شده و در محدوده مجاز قرار دارد. در تحقیقات

Reference:

- Abdollahi, A., Amini, A. and Hariri-Ardebili, M. A. 2022. An uncertainty-aware dynamic shape optimization framework: Gravity dam design. *Reliability Engineering & System Safety*. 222: 108402. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108402>
- Afshar, MH., Afshar, A., Marino, MA., & Hon, M. (2009). An Iterative Penalty Method for the Optimal Design of Pipe Networks. *International Journal of Civil Engineering*, 7(2), 109-123. (In Persian)
- Aljuboori, M. and Datta, B. 2019. Improved optimal design of concrete gravity dams founded on anisotropic soils utilizing simulation-optimization model and hybrid genetic algorithm. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 27(2):1-18. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1574614>
- Amiri Tokaldany, A. (1996). TABDAM software for designing of diversion dams. In: Proceedings of the 8th Conference National Committee on Irrigation and Drainage, Tehran, Iran, pp. 31-58. (In Persian)
- Araujo, L. J., Vieira, A. and Gutstein, D. 2019. Optimization Study For The Cross-Section Of A Concrete Gravity Dam: Genetic Algorithm Model And Application. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*. 35(3): 1-8. <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2019.06.002>

- Aslani, M., Emadi, AR., & Nazarpour, H. (2013). Determination of appropriate values of genetic algorithm parameters in optimization of gravity dams cross section. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(5), 231-239. (In Persian)
- Bayrami, M. K., 1401. *Water Conveyance Structures*. 15th edition. Isfahan University of Technology Press. 476 pages. (In Persian).
- Carlisle, A. & Dozier, G. (2001). An Off-The-Shelf PSO. *Proc. of the Particle Swarm Optimization Workshop*, 1-6.
- Chen, Z. Q., Wu, H. and Cheng, Y. H. 2024. Dynamic behaviors of concrete gravity dam against combined blast wave and bubble pulsation of underwater explosion. *Ocean Engineering*. 302: 117677. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117677>
- Deepika, R., & Suribabu, CR., (2015). Optimal design of gravity dam using differential evolution algorithm. *Iran University of Science & Technology*, 5(3), 255-266.
- Deshmukh, M. A. and Magar R. B. 2022. Gravity dam analysis using particle swarm optimization method. *Materials Today: Proceedings*. 69 (3): 1233-1237. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.295>
- Engelbrecht, AP. (2007). *Computational intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Ferdowsi, A., Mousavi, SF., Farzin, S., & Karami, H. (2020). Optimization of dam's spillway design under climate change conditions. *Journal of Hydroinformatics*, 22(4), 916-936.
- Garsole, P. A., Bokil, S., Kumar, V., Pandey, A. and Topare, N. S. 2023. A review of artificial intelligence methods for predicting gravity dam seepage, challenges and way-out. *Water Infrastructure, Ecosystems and Society*. 72 (7): 1228–1248. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.042>
- Ghasemi, M. R., Salaria, A. and Ghasri, M. 2024. Optimal Design of Steel Structures Using Innovative Black Widow Algorithm Hybridized with Greedy Sensitivity-Based Particle Swarm Optimization Technique. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*. 8(1): 55-84. <https://doi.org/10.22115/SCCE.2023.370472.1568>
- Ghiasi, V., Alborzi Moghadam, M. and Koushki, M. 2022. Optimization of Invasive Weed for Optimal Dimensions of Concrete Gravity Dams. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*. 6(4): 95-111. <https://doi.org/10.22115/SCCE.2022.340697.1432>
- Habibi, A., Zarei, S. and Khaledy, N. 2021. Optimum design of concrete gravity dams using sequential quadratic programming algorithm. *Dams and Reservoirs*. 31(1): 10-20. <https://doi.org/10.1680/jdare.21.00003>
- Heidari, M M. (2006). Development of a perfect software for designing diversion dams, including: the computations of hydraulic, stability and economic aspects and hydraulic design of intake and sluiceway. M.Sc. dissertation, University of Tehran. (In Persian).
- Kennedy, J. and Eberhart, R. 1995. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948. <http://dx.doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Khatibinia, M. and Khosravi, S. 2014. A hybrid approach based on an improved gravitational search algorithm and orthogonal crossover for optimal shape design of concrete gravity dams. *Applied Soft Computing*. 16: 223-233. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.12.008>
- Khoramshokoh, N., Veiskarami, M., Nikoo, MR. & Pourvahedi Roshandeh, S. (2018). Multi-objective hydraulic optimization of diversion dam's cut-off. *Water Resources Management*, 32(11), 3723-3736.
- Lane, E. W. 1935. Security from under-seepage masonry dams on earth foundations, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 100 (1). <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004655>
- Li, SH., Jing, L., & Zhou, IJ. (2010). The shape optimization of concrete gravity dam based on GA-APDL. In *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 982–986. China.
- Lin, G., Wang, Y., & Hu, Z. (2010). Hydrodynamic pressure on arch dam and gravity dam including absorption effect of reservoir sediments *OP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 19–23 July, Sydney, Australia, 1-10.
- Mattias, L.W.A. and Araujo, L.J. 2023. Optimization of reinforced concrete columns with variable circular cross-section hollowed using the criterion of instability and mechanical strength. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 19(4): 604-616. <https://doi.org/10.1108/MMMS-01-2023-0017>
- Moghadam, RG., Shabanlou, S., Yosefvand, F. (2020). Optimization of ANFIS Network Using Particle Swarm Optimization Modeling of Scour around Submerged Pipes. *J. Marine. Sci. Appl*. 19, 444–452.
- Noorzad, R., & Rezaeian, A. (2011). Optimizing the cross-section of earthen dams with ant colony optimization algorithm. *The 6th National Congress of Civil Engineering*. Semnan University. Iran. (In Persian)
- Nourani, B., Salmasi, F. and Ghorbani, M. A. 2023. Development of a new hybrid technique for estimating of relative uplift force in gravity dams based on whale optimization algorithm. *Journal of Hydraulic Structures*. 9 (23): 43-62. <https://doi.org/10.22055/JHS.2023.41889.1230>

- Nourmohammadi Dehbalaei, F., Azari, A. and Akhtari, A. A.. 2023. Development of a linear–nonlinear hybrid special model to predict monthly runoff in a catchment area and evaluate its performance with novel machine learning methods. *Applied Water Science*, 13 (5), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01917-2>
- Pirzadeh, B., Jafari-asl, J., Mohtashami, A. and Ohadi, S. 2022. Determination of the optimal dimensions of concrete gravity dam by using metaheuristic algorithms (Comparison of algorithms). *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 12 (46): 203-222. <https://doi.org/10.22125/IWE.2021.142105>
- Qi, G. (2012). Optimized program design of gravity dam section. In: *Proceedings of the International Conference on Modern Hydraulic Engineering*, 9-11 Mar., Nanjing, China, 419-423.
- Salmasi, F. and Abraham, J. P. 2022a. Computation of Optimal Cross Section of Gravity Dams Using Genetic Algorithms. *Current Overview on Science and Technology Research*. 6: 1-23. <https://doi.org/10.9734/bpi/costr/v6/4048A>
- Salmasi, F. and Abraham, J. P. 2022b. Drainage Gallery in Concrete Gravity Dams and Its Effect on Reduction of Uplift Forces. *Novel Perspectives of Engineering Research*. 10: 43-62. <https://doi.org/10.9734/bpi/nper/v10/2222B>
- Sartipi, N., Salmasi, F., Abraham, J. and Dalir A. H. 2021. Investigation of the effect of depth and distance between cutoff walls on uplift force for gravity dams. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 18, 1361–1378. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02867-x>
- Shahbazbigi, E., shabanlou, S., & Izadbakhsh, M. (2018). Modeling the Length of Hydraulic Jump on Sloping Rough Bed Using Hybrid Model based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems and Particle Swarm Optimization. *Iranian Water Researches Journal*, 12(3), 109-118.
- Simoes, LMC., & Lapa, JAM. (1994). Optimal shape of dams subject to earthquakes, *Proc. Of International conference on computational structures thechnology, Advances in structural optimization*, 119 - 130.
- Simoes, LMC. (1995). Shape optimization of dams for static and dynamic loading, *International course on hydroelectric power plants, Coimbra, Portugal*.
- Sobhkhiz Foumani, R., Mardookhpour, A. and Saberi. S. 2023. Optimization of time and temperature of dam construction for thermal analysis of roller compacted concrete dam. *Numerical Methods in Civil Engineering*. 7(4): 1-11. <https://doi.org/10.61186/NMCE.2022.599.1>
- Soltani, K., and Azari, A. 2024. Terrestrial water storage anomaly estimating using machine learning techniques and satellite-based data (a case study of Lake Urmia Basin). *Irrigation and Drainage*, 73 (1), 215-229. <https://doi.org/10.1002/ird.2863>
- Taheri Aghdam, A., Salmasi, F., Abraham, J. Arvanaghi, H. 2021. Effect of Drain Pipes on Uplift Force and Exit Hydraulic Gradient and the Design of Gravity Dams Using the Finite Element Method. *Geotechnical and Geological Engineering* 39, 3383–3399. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01699-x>
- Wang, Y., Liu, Y. and Ma, X. 2021. Updated Kriging-Assisted Shape Optimization of a Gravity Dam. *Water* 13(1):87. <https://doi.org/10.3390/w13010087>
- Wu, X., Qie, Z., Zhou, Z., & Zhang, H. (2008). Application of improved PSO to optimization of gravity dam and sluice gate. In: *Proceedings of the 7thWorld Congress on Intelligent Control and Automation*, 25-27 Jun., Chongqing international convention, Chongqing, China, pp. 6178-6182
- Yousefi, S., Heidari, MM., & Adib Rad, MH. (2017). Optimization of Diversion Dam Section Based on Genetic Algorithm. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 839-848. (In person).
- Yosefvand, F., Shabanlou, S., & Kardar, S. (2019). ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM OPTIMIZATION USING PSO FOR PREDICTING SEDIMENT TRANSPORT IN SEWERS. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 9(2), 331-342.

یادداشت‌ها

¹ sliding stability² stability against overturning³ stability against failure⁴ Particle Swarm Optimization⁵ Swarm Intelligence