

Optimum Design of Rock Toe Earth Dam Using MOPSO Algorithm

Abdolhossein Baghlani¹ , Arash Ebrahimnezhad²  , Ali Khoshfetrat³ 

1. *Department of Civil Engineering, Isf.C, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.* Email: pendarnik406@gmail.com
2. *Department of Civil Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.* Email: andishelroshan2222@gmail.com
3. *Department of Civil Engineering, Isf.C, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.* Email: 6499687014@iau.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history:

Received: July 29, 2026
Revised: August 10, 2026
Accepted: September 21, 2026
Published online:
September 23, 2026

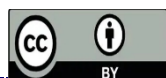
Keywords:

Multi-Objective Particle Swarm Optimization; homogeneous earth dam with a rock toe; slope stability; seepage; GeoStudio.

Abstract

Dams are highly important structures used for irrigation, flood control, power generation, water supply, and other purposes. Since dam construction is both costly and time-consuming, optimizing dam designs to minimize construction costs is essential, yet challenging. This study aims to optimize the design of a homogeneous earth dam with a rock toe by considering its construction cost. In this type of dam, the cost of rockfill operations at the dam toe is typically 2 to 20 times higher than that of earthwork operations in the dam body. It should also be noted that seepage through the dam body must be minimized to prevent structural damage and excessive water loss. This can generally be achieved by increasing the dimensions of the dam body. The proposed design considers the hydraulic gradient criterion as well as the stability of the upstream and downstream slopes under full-reservoir, empty-reservoir, and rapid-drawdown conditions. To solve this multi-objective optimization problem involving nonlinear constraints, the Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm was employed. To derive appropriate equations for applying the constraints, more than 350 dam models were developed and analyzed using GeoStudio software. The constraint equations were subsequently obtained through regression analysis. These equations were then incorporated into the aforementioned metaheuristic algorithm to optimize the dam design. The results demonstrate that the proposed method is efficient and provides satisfactory solutions.

How to cite: Baghlani, A., Ebrahimnezhad, A. & Khoshfetrat, A. (2026). Optimum Design of Rock Toe Earth Dam Using MOPSO Algorithm. *Geography and Regional Planning*, 15 (61), 242-255. <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.594446.4513>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
DOI: <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.594446.4513>

Publisher: Qeshm Institute of Higher Education

Introduction

Earth dams are among the most important hydraulic structures, widely used for irrigation, flood control, hydropower generation, and water supply. However, their construction is both costly and time-consuming, making optimization essential to minimize expenses while maintaining safety and performance. Homogeneous earth dams with rock toe are particularly common; the rock toe prevents piping caused by seepage and enhances overall stability, yet rock operations typically cost 2 to 20 times more than earthwork in the dam body. Consequently, the combination of earth and rock materials must be carefully balanced to achieve minimum cost and desirable performance. Seepage through the dam body must also be minimized to prevent water loss and potential failure, which generally requires enlarging the dam body—conflicting with cost reduction. This paper addresses the optimal design of a homogeneous earth dam with rock toe as a multi-objective optimization problem with two objective functions (construction cost and seepage) and six nonlinear constraints, including slope stability under various reservoir conditions and hydraulic gradient criteria. The multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm is employed, with constraints derived through regression analysis of over 350 dam models simulated in Geo-Studio. The results demonstrate that the proposed method is efficient and yields satisfactory designs.

Methodology

The multi-objective problem is solved using the MOPSO algorithm: random solutions are initialized within variable bounds, and an external archive stores non-dominated solutions. Each particle updates its velocity and position based on personal best and a leader selected from the archive via roulette wheel; mutation and constraint-handling ensure feasibility. Over 350 Geo-Studio models were regressed into constraint formulas for slope stability and hydraulic gradient.

Results and Discussion

In this study, new regression models were first developed to predict seepage through the dam body, hydraulic gradient, and five slope stability safety factors, with statistical analysis confirming their accuracy ($R^2 = 0.89\text{--}0.967$) for use in place of direct numerical analysis. Two objective functions—construction cost and seepage loss—were then minimized subject to design criteria using the MOPSO algorithm coded in MATLAB, yielding optimal design variables for input data including c , ϕ , γ , H , and N ; Table 2 presents the optimal results for 14 dams. Model verification (Table 3) reports safety factors, seepage values, and hydraulic gradients, confirming that all design constraints were satisfied in every case. The findings show that for a dam with fixed height H , increasing soil cohesion c and friction angle ϕ reduces the upstream and downstream slopes m_1 and m_2 , thereby decreasing dam size, consistent with the principle that slope stability is higher in soils with greater cohesion and internal friction angle. Increasing the mechanical properties (c , ϕ) also slightly decreases H_1/H . Moreover, as N (the ratio of earthwork cost in the dam body to rock operation cost in the toe) increases for a given dam, H_1/H decreases: approximately 0.4 for $N = 1$ (near the upper bound), 0.25 for $N = 20$ (near the lower bound), and 0.3 for $N = 10$, as also observable in Table 2. Overall, the results demonstrate that the proposed MOPSO-based approach is efficient and provides balanced designs minimizing both construction cost and seepage while satisfying all stability and hydraulic gradient constraints.

Conclusion

In this paper, new regression models were first developed to calculate seepage through the dam body, the hydraulic gradient, and five slope stability safety factors, and statistical analysis showed that the proposed formulas can be used accurately and satisfactorily in place of direct numerical analysis. Two objective functions were then defined—the dam construction cost and the water seepage from the dam—both of which must be minimized according to the design criteria,

and this multi-objective optimization problem was solved using the MOPSO algorithm coded in MATLAB. Based on the findings, the following results were obtained: 1) For a dam with a certain height (constant H), as the soil c and ϕ increase, the values of m_1 and m_2 decrease, and therefore the dam size also decreases; this is consistent with scientific concepts, meaning that slope stability is higher in soils with greater cohesion and internal friction angle. 2) For a dam with constant height H , as the mechanical

properties of the soil (c , ϕ) increase, the value of H_1/H decreases slightly. 3) As N (the cost of one cubic meter of earthwork in the dam body divided by the cost of one cubic meter of rock operations in the dam toe) increases for a given dam with constant height and materials, the value of H_1/H decreases—for example, approximately 0.4 for $N = 1$ (near the upper bound), 0.25 for $N = 20$ (near the lower bound), and 0.3 for $N = 10$, as also visible in Table 2. Overall, the proposed method proved efficient and yielded suitable results.

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Second author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting

data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Ethical Considerations

The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



انجمن ژئوپلیتیک ایران

فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای

شاپا چاپی: ۶۴۶۲-۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲-۲۷۸۳

Homepage: <https://www.jgeoqeshm.ir/>



طراحی بهینه سد خاکی همگن با پنجه سنگی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات

عبدالحسین بغلانی^۱، آرش ابراهیم نژاد^۲، علی خوش فطرت^۳

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوارسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. رایانامه:

pendarnik406@gmail.com

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: andishelroshan2222@gmail.com

۳. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوارسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. رایانامه: 6499687014@iau.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
سدها سازه های بسیار مهمی هستند که برای آبیاری، کنترل سیلاب، تولید برق و آب و غیره استفاده می شوند. ساخت سد بسیار پرهزینه و زمان بر است. از این رو، بهینه سازی سدها برای به حداقل رساندن هزینه ضروری و امری چالش برانگیز است. هدف این مقاله بهینه سازی سد خاکی همگن با پنجه سنگی با توجه به هزینه ساخت می باشد. در این نوع سد هزینه عملیات سنگی که در بستر استفاده می شود معمولاً ۲ تا ۲۰ برابر بیشتر از عملیات خاکی در بدنه سد است. باید توجه داشت برای جلوگیری از آسیب و از دست دادن آب اضافی، تراوش در داخل بدنه سد باید کمترین حد ممکن را داشته باشد و این امر با بزرگ شده بدنه امکان پذیر است. این طراحی شامل معیار گرا دیان هیدرولیکی و معیار پایداری شیب در بالادست و پایین دست سد در حالت های مخزن پر و مخزن خالی و تخلیه سریع مخزن است. برای حل این مسئله که یک مسئله چند هدفه با محدودیت های غیر خطی است الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات با چند تابع هدف (MOPSO) مورد استفاده قرار گرفته است. برای به دست آوردن فرمول های مناسب برای اعمال قیود بیش از ۳۵۰ مدل سد در نرم افزار ژئو- استودیو (Geo-Studio) مدل سازی و با استفاده از تحلیل رگرسیون، قیود حاصل شده است. سپس این فرمولها برای بهینه سازی سد در الگوریتم فراابتکاری فوق الذکر مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی کارآمد بوده و نتایج مناسبی ارائه می دهد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه ها: بهینه سازی گروه ذرات با چند تابع هدف، سد خاکی پنجه سنگی، پایداری شیب، تراوش، ژئو استودیو

استناد: بغلانی، عبدالحسین، ابراهیم زاده، آرش و خوش فطرت، علی. (۱۴۰۵). طراحی بهینه سد خاکی همگن با پنجه سنگی با استفاده

از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات. جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای، ۱۶(۳)، ۲۴۲-۲۵۵.

<https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.594446.4513>



© نویسندگان

ناشر: موسسه آموزش عالی قشم

۱. مقدمه

سدهای خاکی از دیرباز با مصالح طبیعی ساخته می شده اند. این سدها به لحاظ اندازه و نوع مصالح مورد استفاده در بدنه آنها بسیار متنوع هستند. مصالح مورد استفاده در بدنه سد بر هزینه نهایی ساخت سد تاثیر می گذارد. در سد خاکی پنجه سنگی از قطعات سنگ در اندازه های مختلف و بزرگتر از ۲۰ سانتی متر برای پنجه و خاک مناسب و همگن برای بقیه بدنه سد استفاده می شود. پنجه سنگی که به منظور جلوگیری از پدیده پاپینگ به واسطه تراوش می باشد به افزایش پایداری کلی سد نیز کمک می کند. با توجه به اینکه هزینه کارهای سنگی و خاکی متفاوت است، ترکیب این مصالح باید به گونه ای باشد که با حداقل هزینه و همچنین عملکرد مطلوب برای سد همراه باشد. از سوی دیگر، نشت از بدنه سد سبب هدر رفتن آب می شود و در موارد کنترل نشده حتی می تواند به آسیب و شکست سد منجر شود. هزینه سنگ استفاده شده در پنجه معمولاً ۲ تا ۲۰ برابر بیشتر از خاک است. بنابراین، باید بین هزینه نشت آب از سد و هزینه ساخت آن توازن برقرار گردد.

در بسیاری از مسائل مهندسی با مسئله طراحی بهینه یا همان بهینه سازی روبرو هستیم. به عنوان مثال، طراحی سازه ها، ماشین آلات مکانیکی، ابزارهای الکتریکی می تواند یک مسئله بهینه سازی باشد. به طور کلی هدف اصلی بهینه سازی دستیابی به حداقل یا حداکثر مقادیر یک یا چند تابع هدف با توجه به برخی محدودیت ها (قیود) است.

مسئله بهینه سازی کلاسیک را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\text{Minimize } F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (1)$$

Subject to:

$$g_i(x) \geq 0 \quad i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$$

$$h_i(x) = 0 \quad i \in \{1, 2, 3, \dots, p\}$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max}$$

$F(x)$ تابع هدف است و برای ارزیابی مناسب بودن راه حل های یافته شده توسط الگوریتم مورد استفاده قرار می گیرد. اگر $k = 1$ ، در این صورت موضوع به عنوان یک مسئله با یک تابع هدف شناخته می شود. یک مسئله چند تابع هدف باید به ازای $k > 1$ حل شود. $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ بردار متغیرهای تصمیم یا طراحی است. $g_i(x)$ و $h_i(x)$ به ترتیب قیود نابرابری و کیفیت را نشان می دهند. x_{min} و x_{max} کران های متغیر هستند.

مسئله مورد نظر در این مقاله از نوع بهینه سازی چند هدفه (MOOP) است که در آن هزینه نشت آب باید در برابر هزینه کل ساخت سد خاکی پنجه سنگی حداقل باشد. معمولاً حل مسائل MOOP دشوار است. اخیراً الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری نشان داده اند که آنها می توانند مسائل دشوار را با دقت و سرعت مناسب حل کنند. اخیراً انواع مختلفی از الگوریتم های چند هدفه توسعه یافته اند. کوئلو (۲۰۰۶) بررسی جامعی از الگوریتم های MOOP را ارائه کرده است. الگوریتم سریع مرتب سازی نامغلوب ها^۱ (NSGA) II (دب و همکاران، ۲۰۰۴)، بهینه سازی گروه ذرات چند هدفه^۲ (MOPSO) (کوئلو، ۲۰۰۴)، کلونی زنبور عسل مصنوعی چند هدفه^۳ (MOABC) (اکبری و همکاران، ۲۰۱۲) و الگوریتم مبتنی بر آموزش-یادگیری چند هدفه^۴ (MOTLBO) (رائو و پاتل، ۲۰۱۴) از پرطرفدارترین مسائل بهینه سازی چند هدفه هستند که بر اساس روش های فراابتکاری طراحی شده اند.

¹Fast elitist non-dominated sorting algorithm II

² Multi-Objective Particle Swarm Optimization

³ multi-objective artificial bee colony

⁴Multi-objective teaching-learning based algorithm

در این مقاله، مسئله کمینه سازی هزینه سد خاکی پنجه سنگی به صورت یک مسئله چند هدفه با دو تابع هدف و شش قید مطرح شده است. سپس، الگوریتم MOPSO برای حل این مسئله استفاده شده است. قیود این مسئله عبارتند از: پایداری شیب در دامنه های بالا دست و پایین دست در شرایط مخزن خالی پس از ساخت و همچنین در حالت مخزن پر (۴ محدودیت)، پایداری شیب در دامنه بالادست در حالت تخلیه سریع مخزن (۱ محدودیت) و گرادیان هیدرولیکی (۱ محدودیت در دو شکل). هزینه های ساخت و نشت توابع هدف هستند که باید به حداقل برسند. ادامه مقاله به شرح زیر است: بخش دوم به بررسی پیشینه نظری تحقیق می پردازد. مدل سد در بخش سوم ارائه شده است. بخش چهارم جزئیات روش پیشنهادی MOPSO را ارائه می دهد. نتایج و خلاصه در بخش پنجم آمده است. در نهایت بخش ششم با نتیجه گیری این بررسی را به پایان می رساند.

۲. پیشینه نظری

تا کنون روش های مختلف عددی به طور گسترده ای برای شناسایی ابعاد مختلف مسائل سد مورد استفاده قرار گرفته است. گلدین و راکساز (۱۹۸۵) به بررسی بهینه سازی هسته خاک رس سدهای خاکی پرداخته اند. آنها روش تحلیل فاکتور^۱ را برای بهینه سازی سد با توجه به حالت های مختلف بکار برده اند. پولوفسکی (۱۹۵۶) یک روش تقریبی ارائه کرد که اجازه می داد قطعات شبکه جریان را کنار هم قرار گیرد تا برای کل مسئله تراوش یک شبکه جریان به وجود بیاورد. این روش "روش قطعات" نامیده می شود که امکان حل مسائل پیچیده تراوش را با شکستن آنها به قطعات کوچک، تجزیه و تحلیل الگوهای جریان برای هر قطعه، و جمع آوری قطعات به منظور ارائه یک راه حل کلی میسر می کند. هیلو (۱۹۹۳) از روش اجزا محدود برای تراوش در زیر سازه های هیدرولیکی واقع بر خاک ناهمسان استفاده کرد. شکل ظاهری این سد توسط هیتاشی (۱۹۹۶) با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفت. اوبرتین و همکاران اندرو و انوپ (۲۰۰۹) الگوریتم ژنتیک را برای تعیین سطح شکست بحرانی در تجزیه و تحلیل پایداری شیب به کار گرفتند. علاوه بر این، نظری گیگلو و زراعت پرور (۲۰۱۲) عوامل فیزیکی و هندسی سد خاکی مانند نفوذپذیری، شیب بالادست و پایین دست سد را برای حل مسئله تراوش ارائه کردند. محمدی (۲۰۱۳) سد خاکی با هسته رسی را با الگوریتم تکاملی بهینه سازی کرد. او با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه سازی شده^۲ (SA) و الگوریتم تکاملی^۳ (EA)، ابعاد مطلوب هسته رسی سد خاکی را با دو هدف و سه قید تعیین کرد. عمران و محمد (۲۰۱۷) منیر تحلیل عددی پایداری دامنه و نشت از بدنه را بررسی کردند [24]. ربیعی و همکاران (۲۰۲۶) پایداری دامنه و نشت از بدنه را در سدهای خاکی همگن مورد بررسی قرار دادند [25]. وکیلی^۱ و همکاران (۱۴۰۴) بررسی تاثیر ویژگی های هندسی هسته بر الگوی جریان و میزان تراوش در سدهای خاکی را انجام دادند [26].

مطالعات قبلی قدرت و توانمندی روشها و الگوریتمهای فرا ابتکاری را در بهینه سازی مهندسی نشان داد همچنین نشان داد که این نوع روش ها کارآمد بوده و نتایج خوبی بدست می دهند. از این رو، در تحقیق حاضر، یکی از روش های موفق به نام MOPSO برای این بهینه سازی استفاده شده است.

¹ factor analysis method

² Simulated Annealing

³ Evolutionary Algorithm

۳. مدل سد

ساختار سد مورد بررسی در این مطالعه در شکل ۱ آمده است. مدل سد با توجه به شکل و مفاهیم زیر ایجاد شده است:

C: چسبندگی خاک (KN/m^2)

Φ : زاویه اصطکاک داخلی خاک (Deg)

γ : وزن مخصوص خاک (KN/m^3)

k: ضریب نفوذ پذیری خاک (m/s)

q: تراوش در واحد طول سد ($\text{m}^3 / \text{s} / \text{m}$)

h_w : فاصله آزاد (m)

H: ارتفاع سد (m)

H_w : ارتفاع آب در پشت سد (m)

H_1 : ارتفاع پنجه سنگی (m)

L_d : عرض پنجه سنگی (m)

m_1 : شیب بالادست 1: m_1 (عمودی: افقی)

m_2 : شیب پایین دست 1: m_2 (عمودی: افقی)

L_2 : عرض تاج سد (m)

L: عرض قاعده سد (m)

L_1 : عرض افقی شیب بالادست (m)

L_3 : عرض افقی شیب پایین دست (m)

V_1 : حجم بدنه خاکی سد (m^3)

V_2 : حجم سنگ در پنجه سنگی (m^3)

$$h_w = 0.085H \quad (2)$$

$$L_2 = 1.104\sqrt{H} + 0.915 \quad (\text{USBR, [13]}) \quad (3)$$

$$m_1 = \frac{L_1}{H} \quad (4)$$

$$m_2 = \frac{L_3}{H} \quad (5)$$

$$H_w = H - h_w \quad (6)$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (7)$$

$$L_d = H_1(1 + m_2) \quad (8)$$

برای مصالح پنجه سنگی با مقادیر ثابت $k = 1 (\text{cm.s}^{-1})$ داریم: $\phi = 45^\circ$, $C = 0$, $\gamma = 19 (\text{KNm}^{-3})$

دامنه تغییرات در مدل های ایجاد شده در ژئو-استودیو:

$$0.25H \leq H_1 \leq 0.45H$$

$$15m \leq H \leq 60m$$

$$0.45 \leq m_1, m_2 \leq 4$$

طراحی سدهای خاکی شامل معیارهایی است که حتما باید لحاظ شود. پایداری شیب‌های بالادست و پایین دست در حالت‌های مختلف و کنترل نشست در بدنه سد باید در نظر گرفته شود. در روند بهینه‌سازی، معیارهای طراحی را می‌توان از طریق برخی قیود اعمال کرد. از این رو لازم است ابتدا روابط (فرمول‌های) مناسب جهت تعیین این قیود بدست آورد. در این مطالعه بیش از ۳۵۰ مقطع با مصالح و ابعاد مختلف با استفاده از $SEEP / W$ برای محاسبه تراوش و $SLOPE / W$ برای تعیین ضریب اطمینان پایداری دامنه‌ها مدل‌سازی شد. جهت مدل‌سازی ابعاد سد و خصوصیات مصالح بدنه متغیر فرض شده است. آنگاه با استفاده از تحلیل رگرسیون مناسب، روابط مورد نیاز به صورت فرمول‌هایی ایجاد شده است. نتایج روند مذکور در بخش بعدی ارائه خواهد شد.

۴. روش MOPSO پیشنهادی

افزایش نشست از بدنه سد در مدت زمان طولانی باعث تلف شدن آب می‌شود و در موارد شدید می‌تواند منجر به شکست سد گردد. بدیهی است که در سدهای با بدنه لاغر به علت گرادیان بالای هیدرولیکی میزان نشست زیاد است. بدین ترتیب، با افزایش بدنه سد، تراوش کاهش می‌یابد. با این وجود، هزینه ساخت با بزرگ شدن بدنه سد بیشتر می‌شود. از این رو، مشکل موجود به برقراری تعادل بین تراوش (مربوط به بزرگی بدنه سد) و هزینه (مربوط به کوچکی بدنه سد) مربوط می‌شود تا یک راه حل متعادل ارائه گردد. این کار با حل مسئله بهینه‌سازی چند منظوره میسر می‌شود.

بهینه‌سازی گروه ذرات^۱ (PSO) یک روش هوش جمعی است که تقریباً رفتار اجتماعی گروه‌ها را مدل‌سازی می‌کند (کندی و ابراهارت، ۲۰۰۱). بسیاری از ویژگی‌های PSO با الگوریتم‌های تکاملی مشترک است و از این رو کاربرد آن در مسائل با چند تابع هدف آسان می‌شود. اگر چه می‌توان چند ایده را به طور مستقیم از الگوریتم‌های تکاملی اتخاذ کرد، خصوصیات ویژه‌ای که PSO را از آنها متمایز می‌کند، مانند جهش هدایت شده، نمایندگی جمعیت و اپراتورها باید در نظر گرفته شود تا طرح‌هایی به وجود آیند که از مزایای کارآمدی PSO به طور کامل استفاده کنند.

بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO) توسط ریس-سپرا و کوئلو در سال ۲۰۰۶ ارائه شد. همانند PSO، ذره در MOPSO اطلاعات را به اشتراک می‌گذارد و به سوی بهترین ذرات مطلق و بهترین حافظه شخصی آنها (محلی) حرکت می‌کند. الگوریتم پیشنهادی MOPSO برای بهینه‌سازی سد در شکل ۲ نشان داده شده است.

این الگوریتم توسط دسته‌ای از راه حل‌های اولیه آغاز می‌شود که به صورت تصادفی تولید می‌شوند. در اینجا، راه حل‌های تصادفی با توجه به کران متغیرها ایجاد می‌شود. همچنین آرشیو خارجی با اندازه ثابت ایجاد می‌شود. این آرشیو برای حفظ بهترین راه حل‌های موجود برای مسئله استفاده می‌شود که به راه حل‌های نامغلوب معروف اند. سپس، راه حل‌های اولیه ارزیابی می‌شوند و آرشیو با راه حل‌های نامغلوب پر می‌شود.

پس از مقدار دهی اولیه، الگوریتم شروع و مراحل زیر اجرا می‌شوند تا زمانی که شرایط خاتمه برآورده شود. روش پیشنهاد شده از حداکثر تعداد تکرارها به عنوان معیارهای خاتمه استفاده می‌کند. در هر چرخه الگوریتم، موقعیت هر ذره باید با در نظر گرفتن موقعیت فعلی، بهترین موقعیت قبلی، سرعت فعلی و موقعیت رهبر آن (یا راهنما) به روز می‌شود. در اینجا، رهبر از آرشیو انتخاب می‌شود، زیرا بهترین راه حل‌های موجود که همیشه در آرشیو نگهداری می‌شود معلوم است. برای این منظور، تناسب اعضای آرشیو ارزیابی می‌شود و رهبر ذره جاری با استفاده از روش چرخ رولت انتخاب می‌شود.

پس از انتخاب رهبر، سرعت و موقعیت ذره جاری با استفاده از فرمول کلاسیک پیشنهادی توسط PSO اصلی به روز می‌شود. فرمول‌های به روز رسانی برای ذره i در گروه عبارتند از:

$$v_{t+1} = v_t + c_1 r_1 (p_{best} - x_t) + c_2 r_2 (g_{best} - x_t) \quad (9)$$

¹ Particle Swarm Optimization

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \quad (10)$$

که x_t و x_{t+1} موقعیت فعلی و موقعیت بعدی ذره؛ v_t و v_{t+1} سرعت جاری و بعدی ذره؛ C_1 و C_2 دو ضریب ثابت؛ r_1 و r_2 دو متغیر تصادفی؛ p_{best} بهترین جایگاه فعلی یافته شده توسط ذره و g_{best} موقعیت رهبر آن است. سپس، فرایند جهش در موقعیت های جدید اعمال می شود. این فرآیند یک بُعد از ذره را به طور تصادفی انتخاب می کند. در ادامه، مقدار بُعد انتخاب شده به طور تصادفی در محدوده معتبر آن متغیر تغییر می کند. مسئله موجود یک مسئله بهینه سازی با قید است. از این رو، راه حل های به دست آمده باید با تمام قیدها کنترل شود. روش مقابله با محدودیت در روش پیشنهادی راه حل ها را بررسی و هر راه حلی را که از محدودیت ها تخطی می کند، حل می نماید. این فرآیند تضمین می کند که هر راه حل پس از به روز رسانی امکان پذیر است. با انجام به روز رسانی، الگوریتم آماده به روز رسانی اعضای آرشیو خارجی است. به همین دلیل، هر راه حل جدید با اعضای آرشیو مقایسه می شود. اگر راه حل جدید مغلوب حداقل یک عضو آرشیو باشد، نادیده گرفته می شود. اگر راه حل جدید مغلوب اعضای آرشیو نباشد، راه حل جدید به آرشیو اضافه می شود و تمام اعضای مغلوب آرشیو حذف می شوند. برای آرشیو کامل، پس از اضافه کردن راه حل جدید، یکی از اعضای آرشیو به صورت تصادفی انتخاب شده و حذف می شود. پس از آن حافظه هر ذره که با p_{best} نشان داده می شود به روز شده، چرخه بعدی شروع می گردد. پس از خاتمه، آرشیو خارجی به عنوان خروجی بازگردانده می شود. این آرشیو حاوی مجموعه ای از راه حل های نامغلوب است که هر کدام از آن ها یکی از بهترین تعادل های بین هزینه نشت و هزینه ساخت را نشان می دهد.

A. مدل عمومی مسئله

مسئله موجود بصورت یک MOOP با دو هدف مدل سازی می شود:

$$F(x) = \begin{cases} \text{Minimize} & q \\ \text{Minimize} & V \end{cases} \quad (11)$$

که q تراوش از بدنه سد و V حجم سد است.

C1: قید پایداری شیب برای دامنه بالادست در حالت مخزن پر

C2: قید پایداری شیب برای دامنه بالادست در حالت مخزن خالی

C3: قید پایداری شیب برای تخلیه سریع مخزن

C4: قید پایداری شیب برای دامنه پایین دست در حالت مخزن پر

C5: قید پایداری شیب برای دامنه پایین دست در حالت مخزن خالی

C6: فرمولهای گرادیان هیدرولیکی

جزئیات توابع هدف و محدودیت ها در ادامه آمده است.

B. توابع هدف

همانطور که قبلاً ذکر شد، مسئله طراحی سد از نوع بهینه سازی با چند تابع هدف است. دو تابع هدف در نظر گرفته می شود: تراوش از بدنه در طول واحد سد (q) و هزینه ساخت برای واحد طول سد که متناسب با حجم سد (V) است، هر دو باید به حداقل برسد.

B1) تراوش به ازای طول واحد سد (q)

در طراحی سدهای خاکی، مطلوب است که تراوش از بدنه سد به حداقل برسد تا هدر رفت آب نیز به کمترین مقدار تقلیل یابد. با تجزیه و تحلیل انواع مدل های سد در نرم افزار ژئو- استودیو با ابعاد و مصالح مختلف، فرمول زیر از رگرسیون غیرخطی بدست آمد ($R^2 = 0.967$):

$$\frac{q}{kH_w} = 2.0407 \left(\frac{L}{H_1} \right)^{0.795} \quad (12)$$

شکل ۳ عملکرد عددی معادله (۱۲) را در پیش بینی تراوش از بدنه سد در مقابل مقادیر حاصل از تجزیه و تحلیل مستقیم نشان می دهد.

B2) حجم بدنه سد (V)

تابع هدف دوم و در واقع هدف اصلی به حداقل رساندن حجم سد خاکی همگن پنجه سنگی با توجه به هزینه است. این امر زمانی برجسته تر می شود که متوجه شویم که در این نوع سدها هزینه عملیات سنگی که در بستر مورد استفاده قرار می گیرد بین ۲ تا ۲۰ برابر بیشتر از عملیات خاکی در بدنه سد است. به راحتی می توان فرمول زیر را برای V پیدا کرد:

$$V = \frac{HL_1}{2} + \frac{HL_3}{2} + 1.104\sqrt{H^2} + 0.915H + (N-1)H_1^2 \times \left(1 + \frac{L_3}{H}\right) \quad (13)$$

که در آن (هزینه یک متر مکعب عملیات خاکی در بدنه سد) / (هزینه یک متر مکعب عملیات سنگی در پنجه) = N.

C. قیود مسئله

همانطور که قبلاً ذکر شد، طراحی سد خاکی یک مسئله بهینه سازی است با چند تابع هدف و مقید. روش پیشنهادی زیر این مسئله را با توجه به قید های زیر حل می کند. نحوه بدست آوردن روابط در بخش سوم شرح داده شد.

۱) قید پایداری شیب برای دامنه بالادست در حالت مخزن پر

بر اساس پیشنهاد مهندسان ارتش ایالات متحده^۱، ضریب اطمینان حداقل در این حالت باید ۱.۵ باشد.

پس از مدل سازی های مختلف در نرم افزار SLOPE / W، معادله زیر از تحلیل رگرسیون دست آمده است:

$$F.S_1 = -0.557 + 14.66 \frac{c}{\gamma H} + 2.306 \tan \varphi + 0.513 m_1 \quad (14)$$

روش Morgenstern-Price برای تحلیل پایداری دامنه ها در ژئو استودیو مورد استفاده قرار گرفته است. عملکرد معادله (۱۴) در

پیش بینی ضریب اطمینان پایداری شیب قابل قبول است. ($R^2 = 0.9196$ و $Std = 0.056$)

۲) قید پایداری شیب برای دامنه بالادست در حالت مخزن خالی

¹ US-Army Corps

حداقل ضریب اطمینان پایداری شیب توصیه شده در این شرایط ۱.۳ است (مهندسان ارتش ایالات متحده). فرمول زیر برای این شرایط پس از تجزیه رگرسیون بدست آمده است:

$$F.S_2 = -0.935 + 9.183 \frac{c}{\gamma H} + 2.596 \tan \varphi + 0.474 m_1 \quad (15)$$

(اطمینان $R^2 = 0.933$ و $Std = 0.065$)

۳) قید پایداری شیب برای دامنه بالادست در حالت تخلیه سریع مخزن حداقل ضریب اطمینان در این شرایط $1.1 \sim 1.4$ است (مهندسان ارتش ایالات متحده). فرمول بدست آمده به شکل زیر است.

$$F.S_3 = 0.8613 + 8.79 \frac{c}{\gamma H} \tan \varphi + 0.059 m_1 \quad (16)$$

($R^2=0.890$ and $Std=0.0699$)

۴) قید پایداری شیب برای دامنه پایین دست در حالت مخزن خالی: بر اساس پیشنهاد مهندسان ارتش ایالات متحده، ضریب اطمینان در این شرایط باید حداقل ۱.۳ باشد. فرمول زیر در این حالت پیشنهاد می شود:

$$F.S_4 = 1.142 + 0.0031 m_2 \frac{c}{\gamma H} \tan \varphi - 2.7 \frac{H_1}{L} m_2 + 0.441 m_2 \quad (17)$$

($R^2=0.90$ and $Std=0.7109$).

۵) قید پایداری شیب برای دامنه پایین دست در حالت مخزن پر: انجمن مهندسان ارتش ایالات متحده پیشنهاد می کند که ضریب اطمینان برای این وضعیت حداقل باید 1.4 تا 1.5 باشد. با استفاده از تحلیل رگرسیون داده ها معادله زیر برای این شرایط به دست آمد:

$$F.S_5 = 0.8613 + 8.79 m_2 \frac{c}{\gamma H} \tan \varphi + 0.059 \frac{H_w}{H_1} \quad (18)$$

($R^2=0.8903$ and $Std=0.0495$)

۶) مدل های گرادیان هیدرولیکی (دو مدل) (A) در مدل اول، بیش از ۳۵۰ مقطع با مصالح و ابعاد مختلف با استفاده از نرم افزار SEEP / W مدل سازی شد. پارامترهای هندسی و ویژگی های مصالح متغیرهای مستقل بوده و آهنگ تراوش متغیر وابسته بود. فرمول زیر پس از تجزیه و تحلیل رگرسیون بدست آمد:

$$i_1 = 0.443 - 4.11 m_1 + 0.561 \frac{H_1}{L} + 0.0396 \frac{H_1}{H} \quad (19)$$

$$i_1 \leq 0.85 \sim 1.2$$

که با توجه به [2]، باید داشته باشیم:

$R^2 = 0.942$ و $Std = 0.0493$ برای پیش بینی شیب هیدرولیکی از معادله (۱۹) حاصل می شود.

(B) فرمول دوم بر مبنای تئوری تراوش است.

دوپویت (۱۸۶۳) فرض کرد که شیب هیدرولیکی i با شیب سطح آزاد برابر و عمق آن ثابت است، یعنی $i = dy / dx$ ؛ y, x محورهای افقی و عمودی در شکل ۱ است.

در $x = d / 2$ ، فرمول گرادیان هیدرولیکی به صورت زیر است:

$$i_2 = \frac{\sqrt{d^2 + H_w^2} - d}{\sqrt{d^2 + H_w^2} - d \sqrt{d^2 + H_w^2}} \quad (20)$$

$$i_2 \leq 0.85 \sim 1.2$$

$$\begin{cases} d = 0.3L' + m_1(H - H_w) + L_2 + L_3 - L_d \\ L' = m_1.H_w \\ L_d = H_1(1 + m_2) \end{cases} \quad (21)$$

d فاصله افقی بین محل تقاطع سطح آزاد و دامنه بالادست با انتهای دامنه پایین دست است.

۵. نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از بهینه سازی سد های خاکی با پنجه سنگی ارائه می شود.

A. پارامترهای MOPSO

الگوریتم پیشنهادی MOPSO مسئله را با استفاده از پارامترها (تنظیمات) ارائه شده در جدول ۱ حل می کند.

B. نتایج بهینه

این روش جهت بدست آوردن متغیرهای طراحی شامل L_1, L_3, H_1, m_1, m_2 براساس دادهای ورودی (c, ϕ, γ, H, N) بدست آمده است. جدول ۲ نتایج بدست آمده برای طراحی بهینه ۱۴ سد را نشان می دهد.

C. تایید صحت مدل

جدول ۳ مقادیر ضریب اطمینان را که قبلا در طراحی سد تعریف شد نشان می دهد. علاوه بر این، مقادیر تراوش و گرادیان هیدرولیکی را نیز گزارش می کند. همانطور که جدول مشاهده میشود، همه قیود طراحی در طرح های بهینه اعمال شده است.

نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا مدل های رگرسیون جدید برای محاسبه تراوش از بدنه سد، گرادیان هیدرولیکی و پنج ضریب اطمینان پایداری ایجاد شد. تجزیه و تحلیل آماری نشان می دهد که می توان فرمول های ارائه شده را به طور دقیق و رضایت بخش بجای تحلیل مستقیم به کار گرفت. سپس، دو تابع هدف به عنوان هزینه احداث سد و نشست آب از سد تعریف شد که هر دو باید با توجه به معیارهای طراحی به حداقل برسد. این مسئله بهینه سازی با چند تابع هدف با استفاده از الگوریتم MOPSO که در MATLAB کدگذاری شد، حل گردید. بر اساس یافته ها، نتایج زیر حاصل شد:

(۱) برای سدی با ارتفاع معین (H یعنی ثابت) با افزایش c و ϕ خاک، مقدار $m1$ و $m2$ کاهش می یابد. بنابراین، اندازه سد نیز کاهش می یابد. این نتیجه با مفاهیم علمی سازگار است یعنی پایداری شیب در خاکهایی که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشتر دارند، بیشتر است.

(۲) برای سدی با ارتفاع معین (ثابت H) با افزایش خواص مکانیکی خاک (c ، ϕ)، مقدار (H_1 / H) کمی کاهش می یابد.

(۳) با افزایش N (هزینه یک متر مکعب عملیات خاکی در بدنه سد / هزینه یک متر مکعب عملیات سنگی در پنجه سد) برای یک سد معین (ارتفاع و مصالح ثابت) مقدار (H_1 / H) کاهش می یابد. به عنوان مثال برای $N = 1$ ، مقدار (H_1 / H) تقریباً ۰.۴ (نزدیک به کران بالا) و برای $N = 20$ مقدار (H_1 / H) تقریباً ۰.۲۵ (نزدیک به کران پایین) است. وقتی $N = 10$ است، مقدار (H_1 / H) تقریباً ۰.۳ می باشد. این مورد در جدول ۲ نیز قابل مشاهده است.

منابع

وکیلی، ا.، آقا مجیدی، ر.، و احمدی، م. ح. (۱۴۰۴). بررسی تأثیر ویژگی‌های هندسی هسته بر الگوی جریان و میزان تراوش در سدهای خاکی. مهندسی منابع آب.

References

Vakili, A., Aghamajidi, R., & Ahmadi, M. H. (2025). Investigating the effect of core geometric characteristics on flow patterns and seepage rates in earth dams. *Mohandesi-ye Manabe Ab* [in Persian]

Lam, Sameer. (2008). *Multi-Objective Optimization in Computational Intelligence*. New York, Information Science Reference.

Braja M. Das. (2008). *Advanced Soil Mechanics*. Third edition, New York Taylor & Francis.

Mohammadi, M., Barani, G. A., Ghaderi, K., & Haghighatandish, S. (2013). Optimization of earth dams clay core dimensions using evolutionary algorithms. *European Journal of Experimental Biology*, 3(3), 350-361.

Mohammadi, M., Barani, G. A., & Qaderi, K. (2013). Using Simulated Annealing (SA), Evolutionary Algorithm To Determine Optimal Dimensions of Clay Core in Earth Dams. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(4), 382-397.

Giglou, A. N., & Zeraatparvar, A. (2012). Seepage estimation through earth dams. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(8), 7861-7865.

Fakhari, A., & Ghanbari, A. (2013). Note: A simple method for calculating the seepage from earth dams with clay core. *Journal of GeoEngineering*, 8(1), 27-32.

Delvari, A., Kamanbedast, A., & Hasoni, H. (2012). Investigation of stability in earth dam using ansys, and geo-studio software.

Abhilasha ;Ashwini Suresh; Stability Analysis of an embankment dam. 2014 IJSRD Arshad, I; Babar, M.M; Javed, N; Numerical Analysis of seepage and slope stability in an earthen dam by using Geo-Slope software. 2017 PSM

Mohammed Ehteram; Hojat Karami; Sayed-Farhad Mousavi; Ahmed El-Shafie; Zahra Amini; Optimizing dam and reservoirs operation based model utilizing shark algorithm approach. 2017 Elsevier

- Yanlong Li; Jing Wang; and Zengguang Xu; Design optimization of a concrete face rock Fill dam by using genetic algorithm.2015Hindawi
- Magdy M. Aboelela; Control of seepage through earth dams based on pervious foundation using toe drainage Systems.2016Scirp
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Embankment Dams. Design Standards No. 13,2012
- US Army Corps of Engineers, General design and construction considerations for earth and rock-fill dams. EM 1110-2-2300 ,2004
- US Army Corps of Engineers, Slope stability. EM 1110-1902 ,2003
- US Army Corps of Engineers, Seepage analysis and control for dams. EM 1110-2-1901,1993
- Design Standards No. 13, Embankment Dams. Chapter 1 to 8,2011
- Indian Standard, Code of practice for stability analysis of earth dams, 2002.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000, September). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In international conference on parallel problem solving from nature (pp. 849-858). Springer Berlin Heidelberg.
- Coello, C. A. C., Pulido, G. T., & Lechuga, M. S. (2004). Handling multiple objectives with particle swarm optimization. IEEE Transactions on evolutionary computation, 8(3), 256-279.
- Akbari, R., Hedayatzadeh, R., Ziarati, K., & Hassanizadeh, B. (2012). A multi-objective artificial bee colony algorithm. Swarm and Evolutionary Computation, 2, 39-52.
- Rao, R., & Patel, V. (2014). A multi-objective improved teaching-learning based optimization algorithm for unconstrained and constrained optimization problems. International journal of industrial engineering computations, 5(1), 1-22.
- Coello, C. C. (2006). Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. IEEE computational intelligence magazine, 1(1), 28-36
- B. AL-Rabeei , F. Kassou , A. Ghafiri , A. Naji , Probabilistic Study and Analysis of Slope Stability and Seepage-Induced Pore Pressure in Earth Dams (2026). International journal of engineering
- Doaa A. El-Molla , Seepage and slope stability analysis of earth dams with different drain types under surface and internal modes of clogging(2026). Science direct