

Research Paper

The Optimum Design of Arch Dam Shape Using Particle Swarm Optimization Algorithm

Seyed Reza Mosavi¹, Nader Barahmand^{*1}, Akbar Ghanbari¹, Arash Totonchi²

1- Department of Civil Engineering, Larestan Branch, Islamic Azad University, Lar, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

Received: 2023/06/12

Revised: 2023/07/25

Accepted: 2023/09/08

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/wej.2024.32130.2393](https://doi.org/10.30495/wej.2024.32130.2393)

Keywords:

Arched Dams, PSO algorithm, Moropoint dam, Optimal dam shape.

Abstract

Introduction: Considering the effects of building dams in downstream basins, the need to investigate their condition and effects is one of the important issues. In this study, the optimal form of concrete double-arched dams was investigated under various interactions against earthquakes.

Methods: The volume of concrete used was considered as the goal function of the optimization problem and the design variables were the geometric parameters of the dam. The twenty geometrical parameters were investigated. First, the dam-water-foundation system was simulated using the finite element method. Then the optimization was done using the particle swarm optimization (PSO).

Results: To check the performance of the method used to optimize arch dams, the Moropont dam was selected as a real structure and optimized under different conditions against the Centro earthquake. The calculation parameters of the PSO algorithm showed the proper performance of this algorithm.

Conclusion: To check the random nature of the optimization algorithm, four independent executions were performed for the PSO method and their results were analyzed separately. The results showed that with the number of 10,000 analyzes, the volume of concrete used was equal to 346,000 m³.

Citation: Mosavi S. R., Barahmand N., Ghanbari A., Totonchi A. The Optimum design of arch dam shape using Particle Swarm optimization algorithm. Water Resources Engineering Journal. 2025; 17(63): 53-64.

***Corresponding author:** Nader Barahmand

Address: Department of Civil Engineering, Larestan Branch, Islamic Azad University, Lar, Iran.

Tell:

Email: nader_barahmand@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

Researchers are always looking for ways to accurately estimate the response of dams and their safe design without causing a significant increase in their computational and operational costs. Among concrete dams, arch dams are more sensitive and important. An arched dam is generally a concrete structure that is curved in plan and towards the upstream direction, and with its arched function, it transfers most of the forces on the dam to the supports on its two sides, and also the remaining part of the forces to the device transfers a design to its bedrock. Sharpe (1992) (27) was the first researcher who has done a complete study on the optimization of cross-section shapes in arch dams. They defined the geometry of the dam by using special polynomials for the middle surface and thickness of the structure. It should be noted that they used the sequential linear programming process for optimization. The main purpose of this study is to design the optimal form of concrete double-arched dams considering the dam-water-foundation interaction against earthquakes. Loaded modes include gravity loads, hydrostatic pressure, hydrodynamic pressure, and earthquake force.

Materials and Methods

Morrow Pont Double Arch Dam is located 263 km southeast of Denver, Colorado on the Gunnison River. The height of the dam structure is 143 meters and the length of its crest is 221 meters. The thickness of the dam varies from 3.7 meters at the top to 16 meters at its base. The volume of concrete used for the structure is 273,600 m³. To create the geometry of the dam, three functions of the 5th order have been used for $t_c(z)$, $r_u(z)$, and $r_d(z)$, respectively. So, taking into account the two parameters needed to define the upstream curve of the central section, the

dam can be created with the following 20 geometric variables. The first step in the optimal design of an arched dam is to choose a suitable geometric model for the dam. The desired model should be compatible with the stress situation in the dam so that the maximum use of the material's resistance is included in it. Also, the geometric model should be simple and easy to install. It is better to choose the geometric variables of the dam so that they have a physical meaning. Choosing thicknesses and radii of curvature of different dam levels as design variables are often appropriate. Based on this, various mathematical models have been presented to create the geometry of arched dams, the most important of which can be mentioned in the studies of Bofeng Zhu (Zhu, 1987, 1990). There are different methods to solve the optimization problem. In general, optimization methods can be divided into two categories: traditional or deterministic and new or random methods. Among the most important methods of the first category, we can mention the steepest reduction method, the conjugate gradient method, the linear or simplex programming method, the sequential linear programming method, the second-order sequential programming method, etc. (Vanderplaats, 1984) (28). These methods are usually based on the calculations of derivatives of goal functions and adverbs, which will increase the amount of mathematical calculations. Among the most important methods of the second category, we can mention the genetic algorithm, the bird's clothing algorithm (particle swarm), and... The methods of the second category only need the evaluation of the goal function and constraints, and due to their random nature, they increase the probability of reaching the overall optimal point. The main weakness of these methods is that they need more function evaluations to reach the optimal point. Recently, more

effective methods that are obtained from the combination of several optimization algorithms and are known as hybrid methods have been introduced.

Results

In this study, the optimal form of concrete double-arched dams was investigated considering various interactions against earthquakes. The volume of concrete used was considered as the goal function of the optimization problem and the design variables were the geometric parameters of the dam. A number of 20 geometrical parameters were investigated. First, the dam-water-foundation system was simulated using the finite element method. Then the optimization was done using the particle swarm optimization (PSO). The target function in this study is the volume of concrete required for the dam body (Relation 2), which can be defined by integrating the upstream y_d and downstream y_d levels of the arched dam as follows: where vol is the concreting volume The dam is an arc expressed in terms of a vector of design variables X . Also, Area is the surface that is obtained from the image of the dam on the xy plane. The north-south component of the Centro earthquake (Peer, 2009) (23) was applied to the model as the acceleration mapping of ground motion along the water flow. The optimization was done by a personal computer using the PSO algorithm. The specifications and required parameters of the optimization algorithm are presented in Table 4. In order to consider the random nature of the optimization algorithms, four independent implementations were performed for the PSO method and the results are presented in Table 5.

Conclusion

This research was carried out to optimally design the shape of the double-arched dam. The volume of concrete consumed was

considered as the goal function of the optimization problem, and the design variables were the geometric parameters of the dam. For this purpose, the PSO algorithm was used. In this case, the amount of concrete used was 346,000 m³ in 10,000 repetitions. It is suggested that this research be done with other optimization algorithms and that the results be compared with the results of this research.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

طراحی بهینه شکل سدهای قوسی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

سیدرضا موسوی^۱، نادر برهمند*^۲، اکبر قنبری^۱، آرش توتونچی^۲

۱- گروه مهندسی عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لار، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.

چکیده

مقدمه: با توجه به اثرات احداث سدها در حوضه‌های پایین دست، لزوم بررسی وضعیت و اثرات آنها یکی از مسائل مهم می‌باشد. در این مطالعه شکل بهینه سدهای دو قوسی بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش‌های مختلف در برابر زلزله مورد بررسی قرار گرفت.

روش شناسی: حجم بتن مصرفی به عنوان تابع هدف مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و متغیرهای طراحی پارامترهای هندسی سد بودند. تعداد ۲۰ پارامتر هندسی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا سیستم سد-آب-پی با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد. سپس بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) صورت گرفت.

یافته‌ها: برای ارزیابی عملکرد روش استفاده شده برای بهینه‌سازی سدهای قوسی، سد مورویونت به عنوان یک سازه واقعی انتخاب و تحت شرایط مختلف در برابر زلزله الاسترو بهینه‌سازی شد. پارامترهای محاسباتی الگوریتم بهینه‌سازی PSO نشان از عملکرد مناسب این الگوریتم داشت.

نتایج: به منظور در نظر گرفتن ماهیت تصادفی الگوریتم بهینه‌سازی، چهار اجرای مستقل از هم برای روش PSO انجام شد و نتایج آنها جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با تعداد ۱۰۰۰۰ تحلیل حجم بتن مصرفی برابر ۳۴۶۰۰۰ مترمکعب بدست آمد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/wej.2024.32130.2393](https://doi.org/10.30495/wej.2024.32130.2393)

واژه‌های کلیدی:

سدهای قوسی، الگوریتم PSO، سد مورویونت، شکل بهینه سد.

* نویسنده مسئول: نادر برهمند

نشانی: گروه مهندسی عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لار، ایران.

تلفن:

پست الکترونیکی: nader_barahmand@yahoo.com

مقدمه

قرار دادند. آنها نشان دادند که مؤلفه پیچشی زمین لرزه می‌تواند پاسخ ها را افزایش یا کاهش دهد و این امر به محتوای فرکانسی و دامنه زلزله و نیز به فرکانس طبیعی سازه بستگی دارد.

(Eslami et al. (2013) اسلامی و همکاران (۱۰) بهینه‌سازی شکل سد دوقوسی بتنی با روش تحلیلی آیزوژئومتریکی را مورد بررسی قرار داد. در روش تحلیل آیزوژئومتریکی، تعریف هندسه مسئله با دقت بالایی انجام می‌شود. همچنین تغییرات سطوح مرزی در حین بهینه‌سازی خللی در یکنواخت و صاف بودن آن‌ها ایجاد نمی‌کند؛ همچنین مزیت این روش، حذف مرحله‌ی ساخت شبکه اجزای محدود در حین مراحل بهینه‌سازی است. این کار سبب کاهش قابل ملاحظه حجم محاسبات به خصوص در مسائل سه بعدی نظیر سد دوقوسی شده است. در ضمن به علت انعطاف پذیری نرزه‌ها در روش آیزوژئومتریکی تغییرات مرزها سبب از بین رفتن پایداری حل نمی‌شود؛ بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که این روش بسیار ارزان‌تر و دقیق‌تر از روش‌های متداول ارزیابی می‌شود.

(Pasbani-Khiavi et al. (2014) پاسبانی و همکاران (۲۲) بررسی تأثیر مؤلفه پیچشی زلزله روی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی دوقوسی را با استفاده از مدل اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. برای انجام آنالیز از نرم افزار Ansys که مبتنی بر روش اجزای محدود می‌باشد، استفاده شده و تأثیر اندرکنش سد، مخزن و فونداسیون در مدل لحاظ شده است. با توجه به رفتار و هندسه سدهای دو قوسی، مدل سازی به صورت سه بعدی انجام گرفته و برای حل معادلات دینامیکی استخراج شده نیز از روش Newmark که یک روش ضمنی و پایدار از لحاظ عددی می‌باشد، استفاده شده است. به عنوان یک مطالعه موردی، آنالیز لرزه‌ای سد قوسی ماروپوینت مورد توجه قرار گرفته است. می‌توان گفت که مؤلفه پیچشی با توجه به شدت زلزله و محتوای فرکانسی آن می‌تواند پاسخ لرزه‌ای را افزایش یا کاهش دهد. بنابراین برای طراحی ایمن سدهای قوسی لازم است که با انتخاب شتاب نگاشت‌های مناسب زمین لرزه، اثرات مؤلفه پیچشی را مورد توجه قرار داد.

(Hariri Ardebili and Kianoush (2014) حریری اردبیلی و کیانوش (۱۴) به بررسی تحلیل رفتار لرزه‌ای غیرخطی سد دز پرداختند. نتایج نشان داد که سد تحت حداکثر سناریوی زلزله معتبر شکست خواهد خورد. به نظر می‌رسد که سد با ترک‌خوردگی شدید آسیب دیده است و درزه‌ها دچار باز شدن/لغزش می‌شوند.

(Kalani Sarokolayi et al. (2015) کلانی و همکاران (۱۵) با تحلیل دینامیکی غیر خطی به تأثیر کاهنده یا افزایشنده مؤلفه پیچشی روی پاسخ سدهای بتنی وزنی پرداخته و نشان دادند که افزایش یا کاهش پاسخ‌ها وابسته به فرکانس سیستم سد- مخزن و فرکانس غالب زمین لرزه است.

(Asghari Niar (2018) اصغری نیار (۳) ارزیابی عملکرد سد بتنی قوسی کارون ۴ تحت اثر بارگذاری انفجار از نوع TNT به جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم پرداخت. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان دهنده وجود ضعف در محل تماس بدنه سد با دیواره‌های کناری (سمت چپ بالادست فونداسیون) می‌باشد که در هر سه حالت از بارگذاری، فشار و تنش فشاری وارده به آن قسمت زیاد بوده و در نتیجه دچار آسیب می‌شود.

بسیاری از کشورها به خصوص ایران بر پهنه‌ای با لرزه خیزی بالا قرار گرفته‌اند و سدسازی در این مناطق با خطر پذیری بیشتری همراه است. زیرا از یک طرف رفتار واقعی یک سد تحت حرکت زمین با در نظر گرفتن اثرات آب، دیواره‌ها و بسترهای سنگی بسیار پیچیده است و از طرف دیگر خرابی احتمالی یک سد نه تنها خسارت مالی فراوانی را به بار می‌آورد بلکه در صورت وجود مناطق مسکونی در پایین دست سد فاجعه انسانی جبران ناپذیری نیز به وقوع خواهد پیوست. بنابراین محققین همواره در پی یافتن راهکارهایی برای تخمین دقیق پاسخ سدها و طراحی ایمن آنها هستند بدون آنکه موجب افزایش چشمگیری در هزینه‌های محاسباتی و اجرایی آنها شوند. در میان سدهای بتنی، سدهای قوسی از حساسیت و اهمیت بیشتری برخوردارند. یک سد قوسی عبارت است از عموماً یک سازه بتنی که در پلان و رو به سمت بالادست جریان دارای انحنا بوده و با عملکرد قوسی خود قسمت عمده نیروهای وارده بر سد را به تکیه‌گاه‌های دو طرف خود و همچنین قسمت باقیمانده نیروها را به وسیله عملکرد طره ای به سنگ بستر خود منتقل می‌کند. (Sharpe (1992) شارپ (۲۷) نخستین محقق بود که در سدهای قوسی بر روی بهینه‌سازی شکل مقطع مطالعه کاملی انجام داده است. ایشان با استفاده از چند جمله‌ای‌های ویژه برای سطح میانی و ضخامت سازه، هندسه سد را تعریف نمودند. لازم به ذکر است که ایشان جهت انجام بهینه‌سازی از فرآیند برنامه ریزی خطی پیاپی استفاده نمودند.

پژوهش‌های بیشتر توسط (Bofang (1992) بوفانگ (۶) نیز در رابطه با بهینه‌سازی شکل مقطع سدهای قوسی انجام شده است. ایشان جهت ایجاد هندسه سد در مقطع‌های افقی، الگوهای دایره‌ای یک و چند مرکزی، سهمی و بیضوی را پیشنهاد نمودند. (Hamidian and Seyedpoor (2010) حمیدیان و سید پور (۱۳) جهت بهینه‌سازی شکل سدهای دو قوسی بتنی از روش برنامه‌ریزی درجه دوم کمک گرفتند. ایشان جهت مدل‌سازی تنش‌ها در پروسه بهینه‌سازی از نرم افزار انسیس و المان بیست گرهی استفاده نمودند. همچنین (Gholizadeh and Seyedpoor (2011) قلی زاده و سید پور (۱۲) با استفاده از روش‌های تکاملی، تواتر طبیعی سازه سد را پیش‌بینی نموده و با محدود ساختن آن به طرح بهینه سد قوسی دست پیدا نمودند.

(Bakhtiarinejad et al. (2012) بختیاری نژاد (۴) تحلیل بدنه سد دوقوسی بتنی بختیاری را با کدنویسی المان محدود سه بعدی بررسی کردند. برای این منظور برنامه AD SHAPE که قادر به مدل‌سازی بدنه انواع سد بتنی می‌باشد، تحت محیط برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی شد. سپس اطلاعات خروجی آن، به برنامه کدنویسی شده AD ANALYSIS داده شد که قادر به تحلیل المان سه بعدی بدنه سد می‌باشد. برای صحت سنجی و کالیبره کردن برنامه از مدل تیر طره با نتایج معلوم استفاده شد. نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول برنامه‌های کدنویسی شده در مدل‌سازی و تحلیل المان محدود سه بعدی سد بتنی بختیاری است.

(Ghazvini et al. (2013) قزوینی و همکاران (۱۱) پاسخ لرزه‌ای مخازن ذخیره استوانه‌ای را با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش مورد بررسی

(DCS-DAE) با بررسی رابطه نگاهت بین داده‌های نظارت و وضعیت ساختاری پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که چارچوب شناسایی آسیب بر اساس DCS-DAE چند هدفه ساخته شده در این مقاله تنها به اطلاعات ارتعاش سازه در سناریوی دست نخورده نیاز دارد که راه حلی با پایداری و استحکام بالاتر برای شناسایی آسیب لرزه‌ای قوس بالای سدها تحت آلودگی شدید صوتی ارائه می‌کند.

هدف اصلی از این مطالعه طراحی شکل بهینه سدهای دو قوسی بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش سد-آب-پی در برابر زلزله می‌باشد. حالت‌های بارگذاری شده شامل بارهای ثقلی، فشار هیدرواستاتیک، فشار هیدرودینامیک و نیروی زلزله می‌باشد.

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

سد دو قوسی مورو پونت ۴ در ۲۶۳ کیلومتری جنوب شرق دنور، کلرادو بر روی رودخانه گانیسون واقع شده است. ارتفاع سازه سد ۱۴۳ متر و طول تاج آن ۲۲۱ متر می‌باشد. ضخامت سد از ۳/۷ متر در تاج تا ۱۶ متر در پای آن متغیر است. حجم بتن مصرفی سازه ۲۷۳۶۰۰ مترمکعب است. در شکل ۱، تصویری از سد دو قوسی موروپونت ارائه شده است.



شکل ۱- تصویری از سد موروپونت.

برای ایجاد هندسه سد از سه تابع مرتبه ۵ ام به ترتیب برای $t_c(z)$ ، $r_u(z)$ و $r_d(z)$ استفاده شده است. بنابراین با احتساب دو پارامتر مورد نیاز برای تعریف منحنی بالادست مقطع مرکزی، سد را می‌توان با ۲۰ متغیر هندسی زیر ایجاد نمود. در رابطه ۱، X_m^T ترانهاده بردار متغیرهای طراحی X می‌باشد. مقادیر ۲۰ متغیر هندسی سد در جدول ۱ و مشخصات آب، بتن مصرفی و پی در جدول ۲ ارائه شده است. r_{u1} تا r_{u6} مقادیر شعاع‌های انحناء نظیر وجوه بالادست در ترازهای یک تا r_{d1} تا r_{d6} مقادیر شعاع‌های انحناء نظیر وجوه پایین‌دست در ترازهای یک تا ۶ شکل ۲ شعاع‌های بالادست و پایین دست را نشان می‌دهد. t_{c1} تا t_{c6} مقادیر ضخامت مقطع مرکزی در در ترازهای یک تا ۶ شیب سد، β دارای مقادیری بین صفر تا یک است.

$$X_m^T = \{s \beta t_{c1} t_{c2} t_{c3} t_{c4} t_{c5} t_{c6} r_{u1} r_{u2} r_{u3} r_{u4} r_{u5} r_{u6} r_{d1} r_{d2} r_{d3} r_{d4} r_{d5} r_{d6}\} \quad (1)$$

^۱-Denoising contractual sparse deep auto-encoder

^۴-Morrow Point

(2019) Rezaei Pazhand and Khaleghi رضایی پزند و خالقی (۲۵) الگوی هندسه‌ی بهینه‌ی شکل سدهای قوسی بتنی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، نویسندگان چندین الگو هندسی برای بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی به کار بردند. روش اجزای محدود و برنامه ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتنی برای تحلیل و بهینه‌سازی به کار رفت و شکل بهینه چند سد به دست آمد. نتیجه‌ها آشکار می‌سازند که الگوی سهمی گونه، افزون بر دادن کمترین حجم سد، به شمار تکرار بهینه‌سازی کمتری نسبت به سایر شکل‌ها نیاز دارد.

(2019) Davodi and Iqbali داوودی و اقبالی (۹) مشخصات دینامیکی سد بتنی دو قوسی دز را با استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی به وسیله سه روش مختلف پردازش سیگنال، چهار طیفی، تجزیه دامنه فرکانس و تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته تعیین کردند. در این راستا تعداد ۱۹ حسگر لرزه‌نگار و شتاب‌نگار در چهار آرایه مختلف بر روی بدنه سد قرار گرفتند. در این مطالعه سعی شد تا با تحلیل نگاهت‌های آزمایش ارتعاش محیطی، مشخصات دینامیکی سد شامل فرکانس‌های مودی، اشکال مودی و میرایی‌های مودی استخراج شوند. در نهایت شش مود اول سد شناسایی و برای پنج مود اشکال مودی ترسیم گردید و نتایج آن با نتایج سایر تحقیقات انجام شده مقایسه شد. از نتایج این تحقیق می‌توان برای کالیبره کردن مدل‌های عددی سد دز جهت بررسی رفتار دینامیکی آن استفاده نمود.

(2021) Pereira et al. پیرا و همکاران (۲۴) پایش سلامت سازه مبتنی بر ارتعاش سد قوسی بایکسو سابور، در پرتغال را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتایج حاصل از چندین مرحله پردازش را برای دستیابی به توانایی تشخیص آسیب شرح دادند. در این مطالعه، از مجموعه‌ای کاملاً منحصر به فرد از داده‌های تجربی برای آزمایش برای اولین بار توانایی یک سیستم SHM مبتنی بر ارتعاش برای شناسایی آسیب‌های واقعی در یک سد قوسی استفاده شد. بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی، ابعاد بزرگ و شمار زیادی متغیر طراحی دارد. به این سبب آرایه الگوی هندسی مناسب و روش بهینه‌یابی کارا برای تحلیل این سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

(2023) Li et al. لی و همکاران (۱۹) یک روش جدید ترکیبی از شناسایی زیرفضای تصادفی (SSI)، الگوریتم جستجوی گنجشک (SSA) و الگوریتم K-means را برای شناسایی خودکار پارامترهای مودال سدهای قوس بلند پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که روش جدید از نظر دقت و کارایی برتر از روش‌های دیگر است. مطالعه حاضر می‌تواند به طور قابل توجهی نویز را سرکوب کند، حالت‌های کاذب را حذف و به طور خودکار پارامترهای مودال واقعی را بدون دخالت انسان تحت نسبت سیگنال به نویز کم شناسایی کند. (2023) Cao et al. کاوو و همکاران (۸) با هدایت مستقیم ویژگی‌های حساسیت آسیب از سیگنال‌های پاسخ شتاب سد قوسی، یک رویکرد شناسایی آسیب لرزه‌ای سدهای قوسی بلند را براساس یادگیری بدون نظارت توسعه دادند. یک مدل رمزگذار خودکار عمیق پراکنده قراردادی نویز زدایی ۳

^۱-Stochastic subspace identification

^۲-Sparrow search algorithm

جدول ۱- مقادیر متغیرهای هندسی سد

پارامتر هندسی	s	β	t_{c1}	t_{c2}	t_{c3}	t_{c4}	t_{c5}	t_{c6}	r_{u1}	r_{u2}
مقدار	۰.۳	۰.۶	۳.۷	۱۰.۸	۱۴.۴	۱۵.۳	۱۵.۸	۱۵.۹	۱۱۴.۳	۱۰۷.۵
پارامتر هندسی	r_{u3}	r_{u4}	r_{u5}	r_{u6}	r_{d1}	r_{d2}	r_{d3}	r_{d4}	r_{d5}	r_{d6}
مقدار	۹۹.۵	۹۰.۴	۸۱.۳	۷۱.۶	۱۱۰.۶	۹۶.۴	۷۸.۶	۶۴.۳	۵۲.۲	۴۱.۶

جدول ۲- مشخصات بتن، آب و پی

بتن	مدول الاستیسیته بتن	27580 MPa
	ضریب پواسون بتن	0.20
	دانسیته جرمی بتن	2483 kg/m^3
	مقاومت فشاری تک محوره بتن	30 MPa
	مقاومت کشش تک محوره بتن	1.5 MPa
	مقاومت فشاری دو محوره بتن	36 MPa
آب	دانسیته جرمی آب	1000 kg/m^3
	سرعت موج فشاری	1440 m/s
	ضریب بازتاب موج	0.90
پی	مدول الاستیسیته پی	27580 MPa
	ضریب پواسون پی	0.20
	دانسیته جرمی	0.00

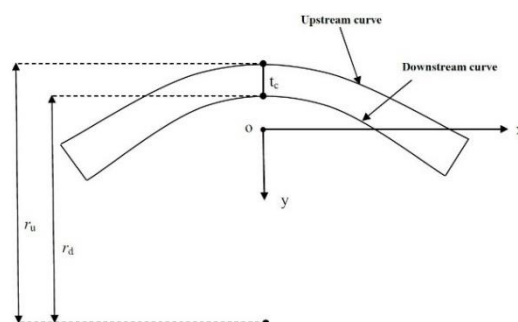
موقعیت $z = \beta h$ است که $0 < \beta \leq 1$ مقدار ثابتی می‌باشد. t_{ci} ضخامت مقطع مرکزی در تراز i ام می‌باشد. همچنین $L_i(z)$ تابع درون‌یاب لاگرانژ متناظر با تراز i ام است.

مدل هندسی سد قوسی

در فرآیند بهینه سازی سدهای دو قوسی علاوه بر کاهش حجم بدنه سد باید کلیه قیدهای طراحی و اجرایی مورد نیاز برای رسیدن به یک طرح مناسب نیز در نظر گرفته شود (۲).

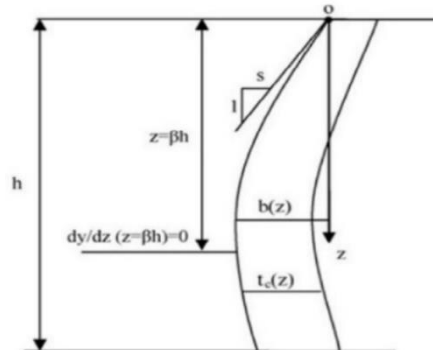
اولین قدم در طراحی بهینه شکل یک سد قوسی انتخاب یک مدل هندسی مناسب برای سد می‌باشد. مدل مورد نظر باید با وضعیت تنش در سد سازگار باشد به طوری که حداکثر استفاده از مقاومت مصالح در آن لحاظ شده باشد. همچنین مدل هندسی باید ساده و از سهولت اجرایی خوبی برخوردار باشند. بهتر است متغیرهای هندسی سد طوری انتخاب شوند که دارای مفهوم فیزیکی باشند. انتخاب ضخامت‌ها و شعاع‌های انحنا ترازهای مختلف سد به عنوان متغیرهای طراحی اغلب مناسب می‌باشند. بر این اساس مدل‌های ریاضی مختلفی برای ایجاد هندسه سدهای قوسی ارائه شده‌اند که می‌توان به مهمترین آنها در مطالعات بوفنگ زو اشاره نمود (۵): (۷).

علاوه بر برخی از محدودیت‌های اشاره شده در فوق، تعدادی محدودیت هندسی نیز بر سدهای قوسی باید اعمال شوند. این محدودیت‌ها شامل محدودیت‌هایی است که ضخامت، شعاع‌های انحنا بالادست و پایین دست در ترازهای ارتفاعی مختلف اعمال می‌شوند. بسیاری از این محدودیت‌ها را می‌توان از اطلاعات طراحی سدهای موجود و همچنین دستورالعمل‌های موجود در آیین‌نامه‌های طراحی سدها بدست آورد (۱). در بیشتر موارد دیده شده است که شعاع‌های انحنای نظیر قوس‌های



شکل ۲-مقطع افقی از سد قوسی

در این مطالعه برای منحنی بالادست مقطع مرکزی از یک منحنی درجه دوم استفاده شد. در شکل ۳ مقطع سد نشان داده شده است.



شکل ۳- مقطع مرکزی سد

در این شکل، h و s به ترتیب ارتفاع سد و شیب در تاج سد هستند. همچنین نقطه‌ای که شیب منحنی بالادست برابر صفر است دارای

یک سد دوقوسی از حدود ۰/۷۰۷ تا ۰/۵۲۲ برابر دهانه قوس تغییر می‌کند (۲۹). ضخامت تاج سد علاوه بر تأمین سختی بالای سد باید حداقل عرض لازم برای عبور مرور وسیله نقلیه را فراهم نماید.

معادله دینامیکی اجزا محدود آب

با فرض تراکم پذیر و غیرلزج بودن آب، فشار هیدرودینامیک ناشی از حرکت سد قوسی تحت اثر حرکت زمین معادله سه بعدی آکوستیک را ارضاء می‌کند (۱۸). جهت آشنایی بیشتر با این مبحث می‌توان به منبع ۱۸ مراجعه نمود.

بهینه‌سازی مهندسی

امروزه کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در مهندسی به طور چشمگیری رشد یافته است و در هر شاخه از مهندسی ردپای بهینه‌سازی نیز مشاهده می‌شود. گوشه ای از کاربردهای بهینه‌سازی در مهندسی عبارتند از طراحی بهینه سازه‌های مهندسی عمران از قبیل خرابها، قاب‌ها، پل‌ها، سدها و ... با هزینه کمینه می‌باشد. روش‌های مختلفی برای حل مسأله بهینه‌سازی وجود دارد. در حالت کلی روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته سنتی یا قطعی و روش‌های جدید یا تصادفی تقسیم‌بندی نمود. از مهمترین روش‌های دسته اول می‌توان به روش تندترین کاهش، روش گرادیان مزدوج، روش برنامه‌ریزی خطی یا سیمپلکس، روش برنامه‌ریزی خطی متوالی، مرتبه دوم متوالی و ... اشاره نمود. (۲۸). این روش‌ها معمولاً مبتنی بر محاسبات مشتقات توابع هدف و قیدها می‌باشند که این مسئله موجب افزایش حجم محاسبات ریاضی مورد نظر خواهد شد. از مهمترین روش‌های دسته دوم می‌توان به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ... اشاره نمود. روش‌های دسته دوم فقط به ارزیابی تابع هدف و قیدها نیازمندند و به علت ماهیت تصادفی خود احتمال رسیدن به نقطه بهینه کلی را افزایش می‌دهند. نقطه ضعف اصلی این روش‌ها این است که به تعداد زیادتر ارزیابی‌های تابع برای رسیدن به نقطه بهینه نیازمند هستند. اخیراً روش‌های مؤثرتری که از ترکیب چند الگوریتم بهینه‌سازی بدست می‌آیند و به نام روش‌های ترکیبی شناخته می‌شوند، معرفی شده‌اند (۱۶ و ۲۶). به عنوان نمونه می‌توان به ترکیب الگوریتم ژنتیک با بهینه‌سازی ازدحام ذرات اشاره نمود (۱۶). مزیت مهم این روش‌ها در این است که ضمن بهره‌مندی از مزایای دو دسته روش مذکور، نقاط ضعف آنها را ندارند. در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی مقطع عرضی سد بتنی دو قوسی استفاده شد.

الگوریتم PSO

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهات و کندی معرفی شد (۱۷). این الگوریتم از زندگی اجتماعی برخی حیوانات مانند پرندگان الهام گرفته شده است که به صورت گروهی زندگی می‌کنند و بسیاری از احتیاجات خود از جمله جستجو و یافتن غذا را به صورت دسته جمعی و با کمک یکدیگر انجام می‌دهند. در این الگوریتم هر جواب مسئله، مانند یک پرنده در فضای جستجو است که ذره^۱ نام دارد و به گروه ذرات یا پرندگان، گله^۲ گفته می‌شود. هر ذره

دارای یک مقدار شایستگی است که توسط تابع شایستگی مسئله بدست می‌آید. بر این اساس پرنده‌ای که به غذا نزدیک‌تر است، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک بردار سرعت است که جهت حرکت آن و اندازه سرعت را نشان می‌دهد. در طول فرآیند بهینه‌سازی هر ذره جهت خود را بر اساس تجربه شخصی و تجربه دیگران اصلاح می‌کند. الگوریتم PSO در بین الگوریتم‌های مشابه خود بسیار قوی ظاهر شده است و به خوبی با توابع غیرخطی، غیرمحدب و ناپیوسته وفق یافته است (۲۱). الگوریتم PSO به آسانی می‌تواند با متغیرهای پیوسته، ناپیوسته و عدد صحیح کار کند. این الگوریتم در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی دیگر، برای رسیدن به نتایج بهتر و یا مشابه، به فراخوانی تابع کمتری نیاز دارد. از جمله مزایای این الگوریتم می‌توان به پیاده‌سازی آسان آن اشاره نمود که به راحتی با شرایط قیود و متغیرها در یک حالت خاص منطبق می‌شود. این الگوریتم در آزمایش‌های متعددی قابلیت‌های بالای خود را ثابت کرده و در بسیاری از کاربردهای مهندسی استفاده شده است (۲۰).

نتایج و بحث

در این مطالعه شکل بهینه سدهای دو قوسی بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش‌های مختلف در برابر زلزله مورد بررسی قرار گرفت. حجم بتن مصرفی به عنوان تابع هدف مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و متغیرهای طراحی پارامترهای هندسی سد بودند. تعداد ۲۰ پارامتر هندسی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا سیستم سد-آب-پی با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد. برای این منظور ابتدا معادلات دینامیکی اجزاء محدود آب و سپس سازه که خود شامل سد، پی، و کوله‌ها می‌شود به صورت مجزا استخراج شده سپس دو معادله با استفاده از متغیرهای مشترک موجود به یک معادله دینامیکی واحد تبدیل شد. سپس بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم جامعه پرندگان (PSO) صورت گرفت. تابع هدف در این مطالعه حجم بتن مورد نیاز بدنه سد می‌باشد (رابطه ۲) که می‌تواند بوسیله انتگرال‌گیری از سطوح بالادست y_a و پایین دست y_b سد قوسی به صورت زیر تعریف می‌شود: که vol حجم بتن ریزی سد قوسی است که بر حسب بردار متغیرهای طراحی X بیان شده است. همچنین $Area$ سطحی است که از تصویر سد بر صفحه xy حاصل می‌شود.

طرح بهینه یک سد قوسی با تحلیل دقیق و الگوریتم بهینه سازی PSO

به منظور بررسی کارایی الگوریتم PSO، سد دو قوسی مورپوینت به عنوان یک سازه واقعی مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصات کامل سد در بخش‌های قبل بیان شده است. در این مثال پی را به عنوان صلب در نظر گرفته و برای ایجاد هندسه سد قوسی مطابق رابطه ۱، ۲۰ متغیر طراحی در نظر گرفته شد. کرانه‌های بالا و پایین متغیرهای طراحی که در طول فرآیند بهینه‌سازی مورد نیاز می‌باشند، با استفاده از برخی روش‌های طراحی مقدماتی سد دوقوسی تعیین می‌شوند (۲۹).

^۲ -Swarm

^۱ -Particle

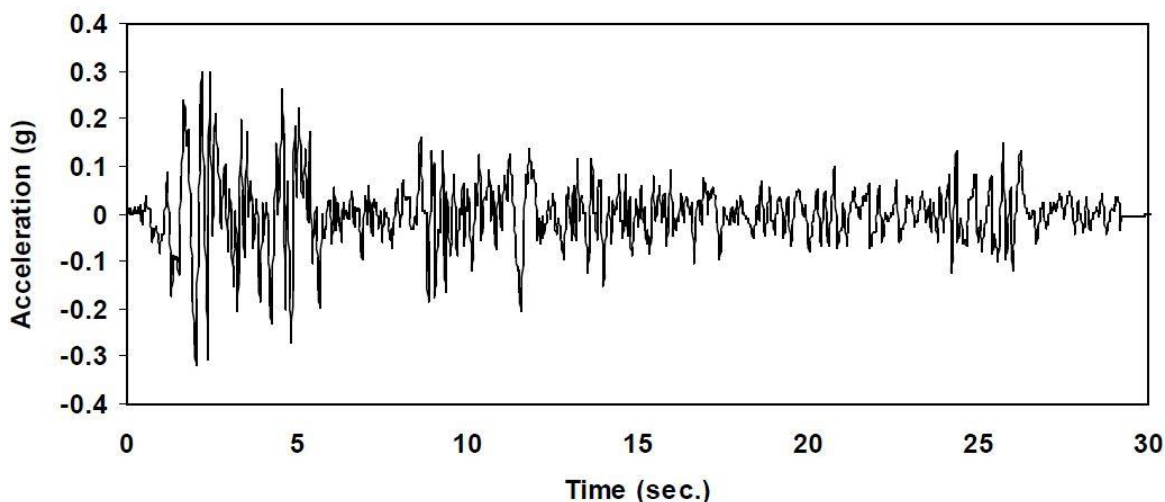
$$f(X) = \text{vol}(X) = \iint_{\text{Area}} |y_d(x, z) - y_u(x, z)| dx dz \quad (2)$$

جدول ۳- مقادیر متغیرهای هندسی سد

پارامتر هندسی	s	β	t_{c1}	t_{c2}	t_{c3}	t_{c4}	t_{c5}	t_{c6}	r_{u1}	r_{u2}
حدبالا	۰.۳	۱.۰	۱۰.۰	۱۵.۰	۲۰.۰	۲۵.۰	۳۰.۰	۳۵.۰	۱۳۵.۰	۱۱۵.۰
حدپایین	۰.۰	۰.۵	۳.۰	۵.۰	۱۰.۰	۱۵.۰	۲۰.۰	۲۵.۰	۱۰۰.۰	۸۵.۰
پارامتر هندسی	r_{u3}	r_{u4}	r_{u5}	r_{u6}	r_{d1}	r_{d2}	r_{d3}	r_{d4}	r_{d5}	r_{d6}
حدبالا	۱۰۰.۰	۸۰.۰	۶۰.۰	۴۵.۰	۱۳۵.۰	۱۱۵.۰	۱۰۰.۰	۸۰.۰	۶۰.۰	۴۵.۰
حدپایین	۷۰.۰	۶۰.۰	۴۵.۰	۳۰.۰	۱۰۰.۰	۸۵.۰	۷۰.۰	۶۰.۰	۴۵.۰	۳۰.۰

چهار اجرای مستقل از هم برای روش PSO انجام شد و نتایج بدست آمده در جدول ۵ ارائه شد. مقادیر حجم بتن مصرفی نیز در هر اجرا در ردیف پایانی جدول ۵ ارائه شده است. در شکل ۵، نمودار همگرایی برای اجرای الگوریتم PSO ارائه شده است.

مولفه شمالی-جنوبی زلزله السترو پیر (۲۳) (Peer, 2009) چنانچه در شکل ۴ نشان داده شده به عنوان شتاب نگاشت حرکت زمین در امتداد جریان آب بر مدل اعمال شد. بهینه‌سازی بوسیله یک کامپیوتر شخصی با استفاده از الگوریتم PSO در محیط نرم افزار MATLAB انجام شد. مشخصات و پارامترهای مورد نیاز الگوریتم PSO در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور در نظر گرفتن ماهیت تصادفی الگوریتم‌های بهینه‌سازی،



شکل ۴- مولفه شمالی-جنوبی زلزله السترو (۱۹۴۰).

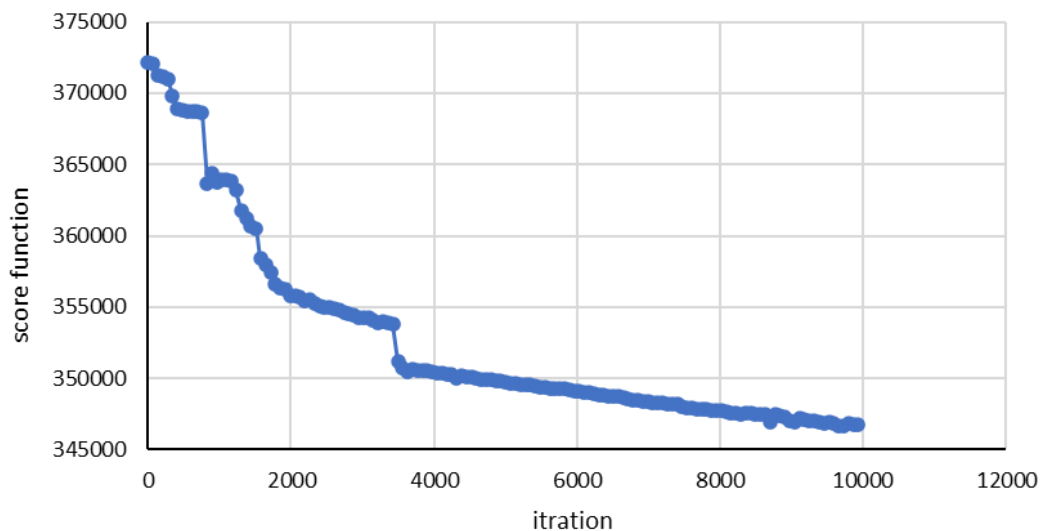
جدول ۴- پارامترهای الگوریتم PSO

Swarm size	۱۰۰
Cognitive parameter	۲.۰
Social parameter	۲.۰
Minimum of inertia weight	۰.۰۵
Maximum of inertia weight	۰.۹۰
Maximum number of iterations	۲۰۰

جدول ۵- طرح بهینه سد قوسی بوسیله الگوریتم PSO برای ۴ اجرای مستقل

Variables	1 Sample	2 Sample	3 Sample	Sample 4
$s(m/m)$	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۲۹	۰.۳۰
$\beta(m/m)$	۰.۷۳	۰.۷۳	۰.۶۷	۰.۷۳
$t_{c1}(m)$	۴.۰۰	۴.۰۵	۴.۰۸	۴.۰۹

Variables	1 Sample	2 Sample	3 Sample	Sample 4
$t_{c1}(m)$	۷.۰۱	۷.۲۰	۷.۲۳	۷.۳۵
$t_{c2}(m)$	۱۰.۹۱	۱۱.۱۸	۱۱.۲۷	۱۱.۲۵
$t_{c3}(m)$	۱۶.۲۱	۱۶.۷۸	۱۶.۵۲	۱۵.۸۶
$t_{c4}(m)$	۲۲.۴۸	۲۳.۵۳	۲۴.۱۱	۲۲.۶۶
$t_{c5}(m)$	۳۰.۵۴	۳۰.۶۷	۳۱.۶۹	۲۹.۵۷
$t_{c6}(m)$	۱۰۱.۸۴	۱۰۴.۶۷	۱۰۸.۱۵	۱۰۱.۰۶
$r_{u1}(m)$	۱۱۰.۱۵	۹۹.۷۶	۱۰۹.۰۳	۱۰۷.۷۱
$r_{u2}(m)$	۹۲.۷۰	۹۴.۴۴	۹۰.۵۶	۹۲.۲۱
$r_{u3}(m)$	۷۱.۸۲	۷۰.۶۳	۷۰.۵۳	۷۲.۳۵
$r_{u4}(m)$	۵۷.۶۶	۵۳.۳۰	۵۴.۵۴	۵۵.۷۲
$r_{u5}(m)$	۴۱.۰۹	۳۸.۲۲	۳۹.۳۲	۴۰.۰۲
$r_{u6}(m)$	۱۰۹.۵۱	۱۰۱.۸۷	۱۰۶.۶۹	۱۰۴.۸۴
$r_{d1}(m)$	۹۸.۲۱	۹۰.۸۳	۹۵.۷۵	۹۸.۲۸
$r_{d2}(m)$	۸۸.۲۹	۸۶.۳۷	۸۷.۲۱	۸۷.۱۶
$r_{d3}(m)$	۶۶.۶۷	۷۰.۳۴	۶۷.۳۴	۶۷.۴۰
$r_{d4}(m)$	۴۶.۳۳	۴۹.۰۵	۴۹.۵۴	۴۵.۹۹
$r_{d5}(m)$	۳۵.۷۰	۳۳.۲۵	۳۳.۶۰	۳۵.۵۸
$r_{d6}(m)$	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۲۹	۰.۳۰
concrete volume (m ³)	۲۳۶,۷۹۵.۹۲	۲۴۴,۲۲۴.۴۵	۲۳۵,۰۵۳.۴۳	۲۲۶,۹۶۵.۸۴



شکل ۵- نمودار همگرایی بهترین حل بدست آمده بوسیله الگوریتم PSO

شده باشد. همچنین مدل هندسی باید ساده و از سهولت اجرایی خوبی برخوردار باشند. بهتر است متغیرهای هندسی سد طوری انتخاب شوند که دارای مفهوم فیزیکی باشند. برای ایجاد هندسه سد از سه تابع مرتبه ۵ ام به ترتیب برای $t_c(z)$ ، $r_u(z)$ و $r_d(z)$ استفاده شد. بنابراین با احتساب دو پارامتر مورد نیاز برای تعریف منحنی بالادست مقطع مرکزی، سد را می‌توان با ۲۰ متغیر هندسی ایجاد نمود. حجم بتن مصرفی به عنوان تابع هدف مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و متغیرهای طراحی پارامترهای هندسی سد بودند. برای این منظور از الگوریتم PSO استفاده شد. در این حالت حجم بتن مصرفی برابر ۳۴۶۰۰۰ مترمکعب در ۱۰۰۰۰ تکرار بدست آمد. پیشنهاد می‌شود این تحقیق با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر نیز انجام شده و نتایج با

بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۵، نشان می‌دهد که در اجرای اول بیشترین مقدار بتن مصرفی و در اجرای چهارم کمترین مقدار مصرفی حاصل شده، همچنین در اجرای دوم تقریباً میانگین مقدار بتن مصرفی در چهار اجرا بدست آمده است. همانطوری که در شکل ۵ دیده می‌شود بعد از ۱۰۰۰۰ تحلیل حجم بتن مصرفی برابر ۳۴۶۰۰۰ مترمکعب بدست آمده است.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور طراحی بهینه شکل سد دو قوسی انجام شد. اولین قدم در طراحی بهینه شکل یک سد قوسی انتخاب یک مدل هندسی مناسب برای سد می‌باشد. مدل مورد نظر باید با وضعیت تنش در سد سازگار باشد به طوری که حداکثر استفاده از مقاومت مصالح در آن لحاظ

نتایج این تحقیق مورد مقایسه قرار گیرد. برای افزایش دقت الگوریتم-های بهینه‌سازی، توصیه به استفاده از روش‌های ترکیبی با ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی به عنوان مثال الگوریتم زنبورعسل و PSO می-باشد.

References

1. Yao TM, Choi KK. Shape optimal design of an arch dam. *Journal of structural engineering*. 1992;115(9):2401-5.
2. Zhu B, Bin R, Jia J, Li Y. Shape Optimization of Arch Dams for Static and Dynamic Loads. *International Water Power & Dam Construction*. 1992;18(11):1310-30.
3. Rezaei Pazhand M, Khaleghi K. Optimal geometry pattern of concrete arch dams. *Journal of modeling in engineering (In Persian)*. 2010;8(20):1-15.
4. Eslami R. Optimizing the shape of concrete double-arched dam with isogeometric analytical method.. Shahrood: Shahrood University of Technology (In Persian); 2013.
5. Bakhtiarinejad A, Hassounizadeh H, Derikund A. Analysis of Bakhtiari double-walled concrete dam body by 3D finite element coding. *Two Quarterly Journal of Water Engineering (In Persian)*. 2012;1(1):1-10.
6. Pasbani-Khiavi M, Ghorbani, M. A., Abuli A. Investigating the influence of earthquake torsional component on the seismic behavior of double arched concrete dams using finite element model. *Iranian hydroelectric dam and power station magazine (In Persian)*. 2015;2(4):34-45.
7. Asghari Niari I. Performance evaluation of arched concrete dam under the effect of blast loading. Ardabil, Iran (In Persian): Mohaghegh Ardabili University; 2019.
8. Davodi M, Iqbali D. Determining the dynamic characteristics of Dez double-arched concrete dam using environmental vibration testing by three different signal processing methods. *Earthquake Science and Engineering (In Persian)*. 2019;9(1):13-30.
- Hamidian D, Seyedpoor, S.M. Shape optimal design of arch dams using an adaptive neuro-fuzzy inference system and improved particle swarm optimization. *Applied mathematical modeling*. 2010;34:1574-85.
9. Kalani Sarokolayi L, Navayi Neya B, Vaseghi Amiri J. Nonlinear dynamic analysis of concrete gravity dams considering rotational component of ground motion. *International journal of civil engineering*. 2015;13(1):16-29.
10. Pereira S, Magalhaes F, Gomes JP, Cunha A, Lemos JV. Vibration-based damage detection of a concrete arch dam. *Engineering Structures*. 2021;235(4):112032.
11. Xiangyu C, Liang C, Jianyun C, Jing L, Wenyan L, Haixiang L, et al. Seismic damage identification of high arch dams based on an unsupervised deep learning approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023;168(107834).
12. Li B, Liang W, Yang SH, Zhang L. Automatic identification of modal parameters for high arch dams based on SSI incorporating SSA and K-means algorithm. *Applied Soft Computing*. 2023;138(110201).
13. Antoniou A, Lu WS. Practical optimization: algorithm and engineering practical. Secend, editor. New York: Springer; 2007.
14. Zhang XF, Li SY, Chen YL. Optimization of geometric shape of Xiamen arch dam. *Advances in engineering software*. 2009;40(2):105-9.
15. Seyedpoor SM, Salajegheh J, Salajegheh E, Golizadeh S. Optimum shape design of arch dams for earthquake loading using a fuzzy inference system and wavelet neural networks. *Engineering Optimization*. 2009;41(5):473-93.
16. Varshney RS. Concrete Dams. ed. s, editor. New Delhi. : Oxford and IBH Publishing Co.; 1982.
17. Gholizadeh S, Seyedpoor SM. Optimum design of arch dams for frequency limitations. *International journal of optimization in civil engineering*. 2011;1:1-14.
18. Seyedpoor SM, Gholizadeh S. Optimum shape design of arch dams by a combination of simultaneous perturbation stochastic approximation and genetic algorithm methods.

- Advances in structural engineering. 2008;11(5):501-10.
19. Abrishami J, Rajaei NV. Concrete arch dams: design and construction. Mashhad, Iran. (In Persian): Astan Ghods Razavi Publications; 2001.
20. McCulloch WS, Pitts W. A logic calculus of the ideas imminent in nervous activity. Bull Math Biophys. 1943;5:115-33.
21. Rosenblatt F. Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Arch Gen Psychiatry. 1962;7(3):218-9.
22. Gallant SI. Neural Network Learning and Expert Systems: MIT Press Direct; 1993.
- Smith M. Neural Networks for Statistical Modelling: Van Nostrand Reinhold; 1994.
23. Singh KP, Basant A, Malik A, Jain G. Artificial neural network modeling of the river water quality-A case study. Ecological Modelling. 2009;220(6):888-95.
24. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical report-TR06. 2005.
25. Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. Journal of Global Optimization. 2007;39:459-71.
- Peer.: Pacific Earthquake Engineering Research Center 2009 .