Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 57-60
DOI: 10.22060/ceej.2022.21205.7651

Optimization of the Clay Core of Earth Dams with Regression Method

M. Zalnezhad, S. Sh. Emamzadeh*

Faculty of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

ABSTRACT: In the optimal design for the core cross-section of an earth dam, the type of material, its dimensions, and its shape are very important. So with the least volume of materials, it has the greatest effect in reducing the amount of seepage from the dam body and maintaining its stability. The purpose of this research is to develop a model for optimizing the core geometry of Hajilerchai dam near Tabriz City based on the integration of the equations obtained from the simulation of seepage, hydraulic gradient, and stability reliability factor with the Simplex algorithm. In this study, two objective functions were considered, one is the volume of soil material per unit length of the dam and the other is the seepage rate from the dam body. Then, by defining 50 different sections of the core of the earth dam and using the results of numerical analysis of seepage regression relationships, stability coefficient and hydraulic gradient were obtained. To validate the regression relationships, the values of stability coefficient, hydraulic gradient, and seepage obtained from the optimal core model were compared with the results obtained from GeoStudio software models in three sections. This comparison showed a high correlation of about 99%. The results of the model developed to determine the optimal dimensions of the earth dam core were compared with the actual dimensions of the Hajilerchai dam which indicated a reduction in the volume of materials required for the construction of the dam core by about 12%, which also provides the necessary stability.

Review History:

Received: Mar. 11, 2022
Revised: Nov. 08, 2022
Accepted: Nov. 29, 2022
Available Online: Dec. 20, 2022

Keywords:

Earth dams
Optimization
Hydraulic fracturing
Regression method
GeoStudio.

1- Introduction

One of the basic steps in the design of earth dams is stability and safety check under different conditions. Hydraulic failure is one of the important reasons for the deterioration of earth dams, which occurs for various reasons such as cracking, arching [1-2], and piping. The core of earth dams is important in seepage control from the dam body. Therefore, choosing the type of materials, dimensions, and shape of the dam core cross section is very important [3]. Since the core must be made of fine-grained materials due to the need for very low permeability, its shear resistance is inevitably lower than other parts of the dam body. Therefore, in terms of the stability of the dam, the thinner the core is, the better, on the other hand, the thicker the core of the dam, the greater its resistance to water leakage and internal erosion, and the risk of breach or cracks resulting from the differential settlement is reduced [4-5]. In addition, economic considerations are one of the most important factors in choosing the geometry of the dam core. Usually, the design of earth dams is done experimentally and based on the opinion of the designer. The use of different optimization methods in the problems of earth dams has attracted the attention of researchers in the last few decades [6-8].

2- Methodology

2- 1- Regression equations

A regression model has been used to calculate seepage from the dam body in the optimization problem. This model was obtained based on seepage values calculated from 50 dam cross-sections with different geometries that have been analyzed by SEEP/W software by numerically solving the Laplace seepage equation. Equation (1) shows the flow rate per unit length of the dam:

$$\frac{q}{kl} = -21.933\frac{b}{H} + 2.234 \quad (1)$$

where q is the flow rate per unit length of the dam (m^3/s.m), k is the permeability coefficient of the core (m/s), l is the height of the reservoir water (m), h is the height of the dam (m) and b is the crest width of the core (m). In the same way, equations (2) and (3) show the regression relation of the stability coefficient of the slope and hydraulic gradient:

*Corresponding author's email: shemamzadeh@khu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Comparison of the optimal results obtained for the Hajilerchai dam with its actual dimensions

	Actual dimensions	Optimum dimensions
Crest width of the core (*m*)	4	3.5
Base Width of the core (*m*)	50	44
The slope of the core faces	1:4	1:4/6
Core material volume (m^3/m)	2565	2256

Table 2. Pearson's correlation coefficient between the data calculated from the implementation of SPSS and GeoStudio model

Geostudio	SPSS	Model
0.991	1	SPSS
1	0.991	GeoStudio

$$SF = 1.975 - 0.169\frac{d}{x} + 0.003\frac{b}{y} \quad (2)$$

where d is the width of the core on the foundation (m), x is the width of the dam (m) and y is the crest width of the dam (m).

$$i = 2.42 + 0.97\frac{b}{l} - 2.08\frac{d}{l} \quad (3)$$

where i is the hydraulic gradient, d is the width of the core on the foundation (m) and l is the height of the reservoir water (m).-.ping

2- 2- Objective functions and constraints

In this study, two objective functions are discussed. The volume of soil and the amount of seepage from the dam body. Also, two constraints have been considered as 1.5 for the safety factor against static stability [9] and the constraint of the hydraulic gradient, whose value must be less than the critical value.

3- Results and Discussion

Regression models were prepared using SPSS software to calculate design variables including seepage as Equation (1), stability factor as Equation (2), and hydraulic gradient as Equation (3). After determining the design variables as well as the objective functions and constraints, the optimization of the clay core dimensions of the earth dams was done in the Simplex space. To implement the program, the characteristics of the dam body materials and a series of known parameters such as the height and width of the dam core crest were used. The results obtained from the optimization program of the clay core dimensions of this dam compared to the actual dimensions of its clay core are shown in Table 1.

For example, the actual values of the crest width of the core have decreased from 4 meters to 3.5 meters and the width of the core on the foundation has decreased from 50 meters to 44 meters in the optimization model. This fact shows a decrease in the amount of soil required for the construction of the dam core by about 12%. Also, to validate the results of the research, the reliability coefficient values of stability, seepage, and hydraulic gradient were modeled and calculated once in the SPSS space and once again in the GeoStudio software. The comparison showed that the values calculated from the implementation of the program and the implementation of GeoStudio software models have a high correlation of about 99% and there is no significant difference between them as in Table 2.

4- Conclusion

The proposed method in this research is capable of optimal design of the dam core, and this method reduces the extra effort to achieve an optimal design and leads to a reduction in the time required for trial and error. In this method, while minimizing the size and volume of the clay core, the stability of the dam was also checked. Due to the mutual influence of different parts of a dam on each other, the reduction of core dimensions has affected different parts of the dam and has caused a reduction in their volume and implementation costs, which are important factors in choosing a plan and making it operational. The results show that the new regression model has a successful performance in estimating the amount of

seepage, hydraulic gradient, and reliability factor of dam stability, under constant seepage conditions, and the existing optimization model can prepare the optimal clay core design for regional earth dams.

References

[1] M. Komasi, B. Beiranvand, Study of hydraulic failure mechanism in the core of Eyvashan earth dam with the effect of pore water pressure and arching, Journal of Stress Analysis. 4(2), (2020) 55-67.

[2] A. Asadi, and H. Saba, Evaluation of the effect of modulus of elasticity in clay core on the arching in the crest of earth dams, Computational Engineering and Physical Modeling. 3(3), (2020) 12-20.

[3] M. Mohammadi, Gh. Barani, and K. Ghaderi, Optimization of the core of earth dams using simulated annealing (SA) algorithm, Amirkabir Journal of Science and Research. 47(1), (2015) 119-130.

[4] S. Poudel, S.J. Abby. and S. Ngambi, Mechanism of hydraulic fracturing in cohesive zone of embankment dam cores – A Review, International of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 8(7), (2017).

[5] T. Sadettin, Estimation of Hydraulic Fracturing Potential for Clay–Core Rock Fill Dams, Dumlupinar University. S, T. (2017).

[6] SM. Ferdowsi, S. Hoseini, , M. Farzin, S, Faramarzpour, F. Mousavi . Shape Optimization of gravity dam using a nature–inspired approach, Journal of Soft Computing in Civil Engineering. (2020).

[7] A. Rezaian, M, Davoodi, M.k, Jafari . Determination of optimum cross–section of earth dams using ant colony optimization algorithm, Sharif University of Technology. Scientia Iranica. (2018).

[8] A.L. Goldin, L.N. Rasskasove, Design of earth dams, A.A. Balkema, Netherlands. (1992).

[9] U.S.Army Corps of Engineering, Engineering and Design Stability of Earth and Rockfill Dams. Department the Army, Engineer Manual EM, (2003) 1110-1902.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Zalnezhad, S. Sh. Emamzadeh, Optimization of the Clay Core of Earth Dams with Regression Method, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 57-60.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21205.7651

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۲، سال ۱۴۰۲، صفحات ۲۶۵ تا ۲۷۸
DOI: 10.22060/ceej.2022.21205.7651

بهینه‌سازی هسته رسی سدهای خاکی با استفاده از روش رگرسیونی

مصطفی زال نژاد، سید شهاب امامزاده*

گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

خلاصه: در طراحی بهینه هسته سدهای خاکی، نوع مصالح، ابعاد و شکل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. به طوری که با کمترین حجم مصالح بیشترین تأثیر را در کاهش میزان تراوش از بدنه سد و حفظ پایداری آن داشته باشد. هدف از انجام تحقیق حاضر توسعه مدلی برای بهینه سازی هندسه هسته سد حاجیلرچای تبریز بر اساس تلفیق معادلات حاصل از شبیه سازی تراوش، گرادیان هیدرولیکی و ضریب اطمینان پایداری با الگوریتم Simplex است. در این مطالعه دو تابع هدف یکی حجم مصالح خاکی در واحد طول سد و دیگری میزان تراوش از بدنه سد در نظر گرفته شد. سپس با تعریف ۵۰ مقطع مختلف از هسته سد خاکی و با استفاده از نتایج تحلیل عددی، روابط رگرسیونی تراوش، ضریب پایداری و گرادیان هیدرولیکی به دست آمد. جهت صحت سنجی روابط رگرسیونی، مقادیر ضریب پایداری، گرادیان هیدرولیکی و تراوش به دست آمده از مدل بهینه هسته با نتایج حاصل از مدل های نرم‌افزاری GeoStudio در سه مقطع مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه نشان دهنده همبستگی بالا در حدود ۹۹٪ بود. نتایج مدل توسعه داده شده برای تعیین ابعاد بهینه هسته سد خاکی با اندازه‌های واقعی سد حاجیلرچای تبریز مورد مقایسه قرار گرفت که بیانگر کاهش حجم مصالح مورد نیاز جهت ساخت هسته سد در حدود ۱۲٪ بود که تأمین کننده پایداری لازم نیز است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

کلمات کلیدی:
سدهای خاکی
بهینه‌سازی
شکست هیدرولیکی
روش رگرسیونی
GeoStudio

۱- مقدمه

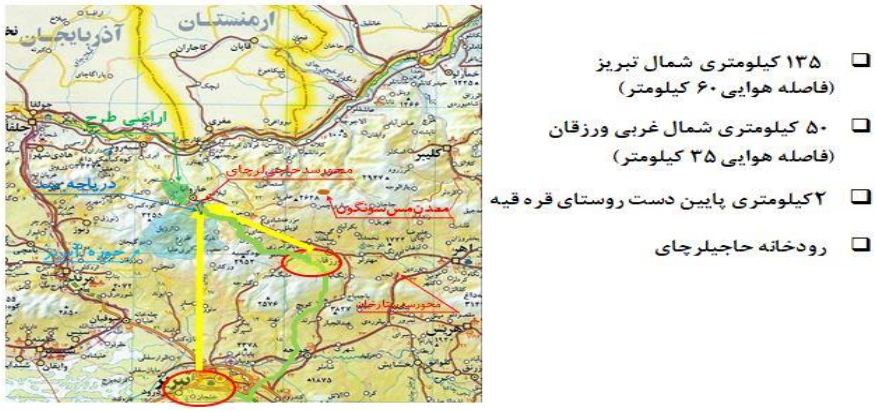
از مباحث و مراحل اساسی در طراحی و اجرای سدهای خاکی بررسی پایداری و ایمنی تحت شرایط مختلف است. شکست هیدرولیکی یکی از دلایل مهم تخریب سدهای خاکی است که به دلایل مختلفی از جمله ترک خوردگی، قوس زدگی [۲ و ۱] و رگاب اتفاق می‌افتد. هسته سدهای خاکی عامل مهم آب‌بندی و کنترل تراوش از بدنه سد است. از این رو انتخاب نوع مصالح، ابعاد و شکل هسته سد از اهمیت زیادی برخوردار است [۳]. از آنجا که هسته به دلیل نیاز به نفوذپذیری بسیار کم الزاماً باید از مصالح ریزدانه ساخته شود، به ناچار مقاومت برش آن کمتر از سایر قسمت‌های بدنه سد است. بنابراین از لحاظ پایداری سد، هر چه هسته آن نازک‌تر باشد بهتر است از طرف دیگر هر چه هسته سد ضخیم‌تر باشد مقاومت آن در برابر نشت آب و فرسایش داخلی بیشتر خواهد بود و خطر ایجاد شکاف یا ترک حاصل از نشست غیریکنواخت کاهش می‌یابد [۵ و ۴]. علاوه بر اهمیت عوامل یاد شده در تعیین هندسه هسته، امروزه ملاحظات اقتصادی یکی از مهم‌ترین عوامل در انتخاب هندسه هسته سد است. از این رو هنگامی که تصمیم گرفته می‌شود از مصالح طبیعی برای ساخت هسته سد استفاده گردد، لازم است علاوه بر خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی این مصالح در دسترس بودن آن نیز مورد توجه قرار گیرد.

معمولاً طراحی سدهای خاکی به صورت تجربی و بر اساس نظر مهندس طراح انجام می‌شود. استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی در مسائل سدهای خاکی در چند دهه اخیر مورد توجه محققین امر بوده است [۷ و ۶]. مطالعات مربوط به بهینه‌سازی هسته رسی سدهای خاکی همگن اولین بار در سال ۱۹۸۵ توسط گلدین و راسکازو[1] با استفاده از روش‌های آزمون عامل کامل و تحلیل عوامل انجام شد. روش مورد نظر برای سدی با ارتفاع ۷۰ متر به کار برده شده است. عواملی چون عرض سد، زاویه محور هسته نسبت به خط شاقول، وزن واحد حجم خشک مصالح هسته و زاویه شیب بالادست و پایین‌دست به عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته شد بنابراین به عنوان یک نتیجه نهایی برای مسئله طرح بهینه یک سد ۷۰ متری، چهار گزینه مختلف برای منابع قرضه و شیب‌های متفاوت طرفین سد ارائه گردیده است [۸].

1 Rasskazove and Goldin

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shemamzadeh@khu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. موقعیت محور سد حاجیلرچای تبریز

Fig. 1. The location of Hajilerchai dam axis in Tabriz

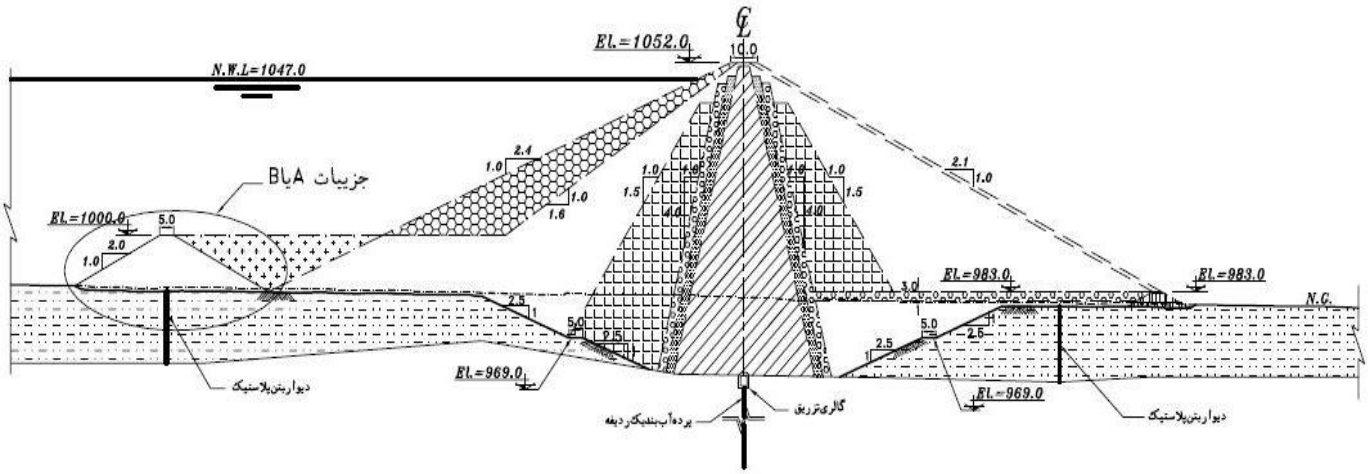
ووی[1] برای تحلیل تراوش در پی سدهای خاکی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم دیگری به نام برنامه‌ریزی تکاملی[2] (EP) استفاده کرد [۹]. آکیوز و مردان[3] با نوشتن یک کد کامپیوتری، تراوش در سدهای خاکی را پیش‌بینی کردند [۱۰]. نظری گیزلو[4] و زراعت پرور با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی و فیزیکی مانند نفوذپذیری، شیب بالادست و پایین‌دست سد تراوش در سدهای خاکی را بررسی کردند که نتایج به دست آمده نشان دهنده تأثیر قابل توجه این پارامترها در تراوش در سد خاکی بوده است [۱۱]. همچنین منتصری و همکاران به بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند [۱۲]. با مطالعه پیشینه تحقیق مشخص می‌شود که در خصوص بهینه‌سازی هسته سدهای خاکی روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی نیز وجود دارد که محققان در سال‌های اخیر نیز از آن‌ها استفاده نموده‌اند [۱۵-۱۳]. در این بین می‌توان علاوه بر شبیه‌سازی عددی به روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم اشاره کرد [۱۶]. در اکثر تحقیقات با فرض ثابت بودن پارامترهای هسته و بنا بر تجارب گذشته و تحلیل شبکه جریان به تحلیل و طراحی هسته سدهای خاکی پرداخته شده و مشکلات داخلی مانند شکست هیدرولیکی در شرایط مختلف نظر گرفته نمی‌شوند. در تحقیق حاضر ابعاد هسته، مایل یا قائم بودن هسته و جنس هسته رسی به عنوان متغیرهایی در طراحی در نظر گرفته شده و با تعریف قیود شکست هیدرولیکی یک مسئله بهینه‌سازی تعریف شده است. نتایج طرح بهینه به روش رگرسیونی به دست آمده که نشان می‌دهد نسبت به طراحی‌های معمول اقتصادی‌تر است. در برخی تحقیقات مسئله بهینه‌سازی هسته مطرح شده اما پدیده شکست هیدرولیکی در نظر گرفته نشده است. یا در برخی تحقیقات شکست هیدرولیکی در هسته سد بررسی شده اما هسته سد برای آن بهینه نشده است. در این تحقیق خلأهای موجود لحاظ شده است.

۲- مشخصات سد خاکی حاجیلرچای

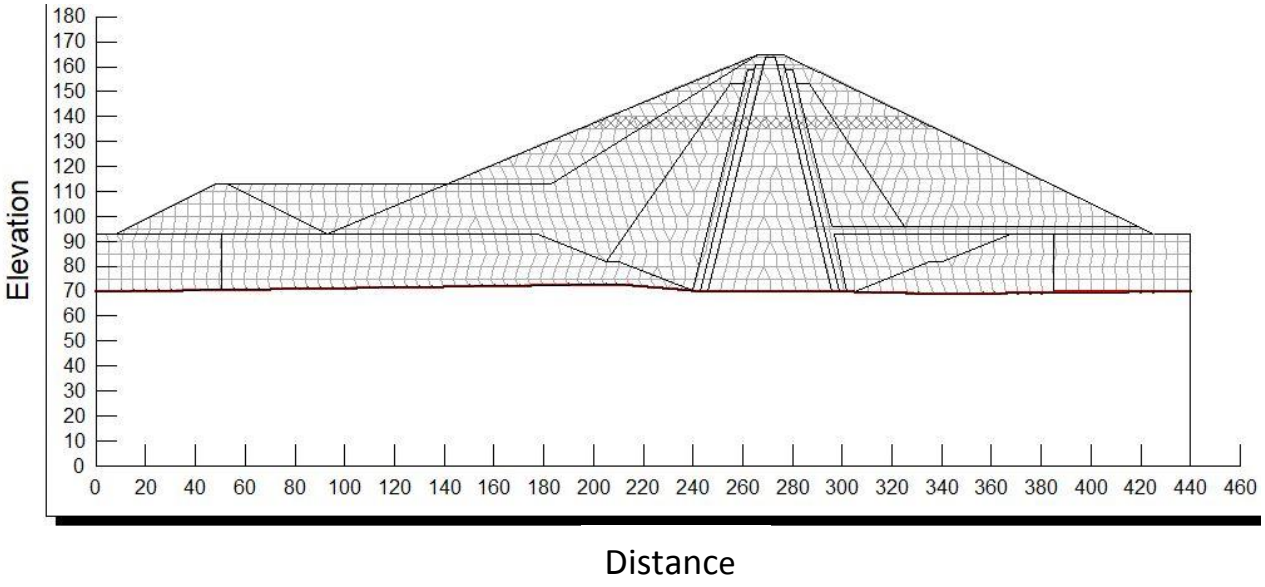
سد مخزنی حاجیلرچای بر روی رودخانه‌ای به همین نام از سرشاخه‌های رودخانه ارس در مدت ۱۰ سال ساخته شده و مساحت حوضه آبریز تا محل سد ۵۳۶ km^2 است که در ۱۳۵ km شمال تبریز و ۵۰ km شمال غربی ورزقان و km^2 روستای قره‌قیه قرار دارد. سد مخزنی حاجیلرچای سد خاکی با هسته ناتراوای رسی و حجم مخزن با ظرفیت ۴۸/۹ میلیون متر مکعب است که ساخت آن از سال ۱۳۸۸ آغاز شد. شکل ۱ و ۲ موقعیت سد و بلندترین مقطع سد را نشان می‌دهد. مشخصات هندسه سد نیز در جدول ۱ ارائه شده است [۱۷]. در جدول‌های ۲ و ۳ نیز خلاصه‌ای از خصوصیات مصالح بدنه در تحلیل پایداری و همچنین ضرایب نفوذپذیری و مکش Matric مصالح آورده شده است.

بسیاری از مدل‌های ژئوتکنیکی با خاک غیراشباع تحلیل می‌شوند، این در حالی است که مکانیک خاک غیراشباع به دلیل پیچیده بودن رفتار خاک در این وضعیت با ابهامات فراوانی روبه‌رو است. با توجه به اینکه در خاک غیراشباع فضای بین حفره‌ها تا حدی با آب و تا حدی با هوا پر شده است و این امر منجر به فشار آب منفذی یا مکش در خاک می‌شود، تفسیر مکش

1 Wei
2 Evolutionary Programming (EP)
3 Akyuz and Merdun
4 Gizlu



الف)



ب)

شکل ۲. الف) مدل واقعی مقطع-عرضی بزرگ‌ترین مقطع سد حاجیلرچای شامل نمایش زون‌های مختلف بدنه و پی [۱۷]. ب) مدل اجزای محدود مش‌بندی بدنه و بستر سد توسط المان‌های مثلثی سه و چهار گرهی

Fig. 2. a) The real cross-sectional model of the largest section of the Hajilerchai dam, including the display of different zones of the body and foundation [17], b) Finite element model of meshing the body and bed of the dam by three- and four-node triangular elements

جدول ۱. مشخصات هندسی سد خاکی حاجیلرچای

Table 1. Geometric characteristics of Hajilerchai earth dam

طول تاج (m)		۲۶۵
عرض تاج (m)		۱۰
ارتفاع سد (m)	از بستر رودخانه	۷۱
	از پی	۹۵
عرض فوقانی هسته (m)		۴
عرض هسته روی پی (m)		۵۰
شیب وجوه سد	بالادست	۱ : ۲٫۴
	پایین‌دست	۱ : ۲٫۱
شیب وجوه هسته	بالادست	۱ : ۴
	پایین‌دست	۱ : ۴

جدول ۲. خصوصیات مصالح بدنه سد در تحلیل پایداری

Table 2. Properties of dam body materials in stability analysis

پارامتر	پوسته	هسته	فیلتر	پی
وزن مخصوص (kN/m^3)	۱۸	۲۲٫۲	۱۸	۲۴
چسبندگی (kN/m^2)	۳	۱۵	۱	۱۰۰۰
زاویه اصطکاک داخلی	۳۶	۳۰	۳۴	۳۵
درصد رطوبت حجمی اشباع (Saturated Wc)	۰/۳	۰/۵	۰/۲۸	۰/۲۵
درصد رطوبت باقی‌مانده(Residual water content)	۱	۱۵	۰	۱

جدول ۳. ضریب نفوذپذیری و مکش Matric مصالح بدنه

Table 3. Matric permeability and suction coefficient of body materials

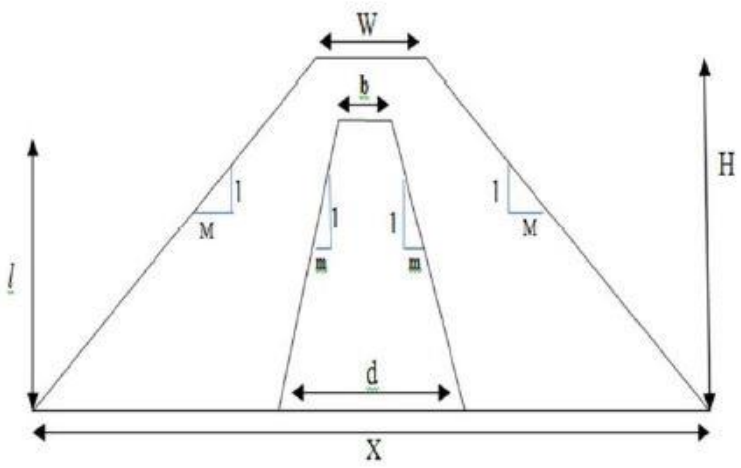
(مکش Matric)	K_x (m/s)			
	پوسته	هسته	زهکش	فونداسیون
۰/۰۱	10^{-5}	10^{-7}	۰/۰۰۰۱	10^{-8}
۰/۱۷۲	8×10^{-6}	8×10^{-8}	8×10^{-5}	8×10^{-9}
۳۱	5×10^{-7}	5×10^{-9}	5×10^{-6}	5×10^{-10}
۵۰۰	10^{-8}	10^{-10}	10^{-7}	10^{-11}

خاک برای درک رفتار خاک‌های غیراشباع ضروری است. مکش خاک در تمامی خاک‌هایی که در بالای سطح آزاد نشت[1] قرار گرفته‌اند، یافت می‌شود و از مهم‌ترین پارامترهایی است که شرایط فشار رطوبت خاک‌های غیراشباع را توصیف می‌کند. در خاک‌های غیراشباع، حجمی از آب که در حفرات خاک ذخیره می‌شود به مکش Matric وابسته است. نیرویی که آب را به خاک جذب می‌کند اصطلاحاً نیروی مکش رطوبتی خاک نام دارد. هر چه خاک، آب بیشتر داشته باشد، نیروی مکش آن کمتر است. چنانچه خاکی از آب اشباع شده باشد این نیرو به صفر می‌رسد و هر چه خاک خشک‌تر شود، این نیرو افزایش می‌یابد. تحت نیروی مکش مساوی، خاک‌های رسی به علت نفوذپذیری کم در قیاس با خاک‌های درشت‌دانه و به خصوص شن مقدار بسیار زیادتری آب در خود نگه می‌دارند، بنابراین تحت درصد برابری از رطوبت، خاک شنی آب را با نیروی مکش بسیار کمتری در قیاس با خاک رسی در خود نگه می‌دارد. در جدول ۳ ضرایب نفوذپذیری و مکش Matric مصالح آورده شده است.

۳- تعریف مسئله بهینه‌سازی

در مطالعه حاضر با توجه به کاربردهای روش Simplex (حل‌گر مستقیم) [۱۹ و ۱۸] در زمینه علوم آب و اهمیت دستیابی به یک هندسه بهینه برای هسته سد خاکی، قیدهایی مانند تراوش از بدنه، گرادیان هیدرولیکی و ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها در نظر گرفته شده است. برای معرفی این قیود به برنامه ۵۰ مقطع سد با ابعاد فرضی بر روی یک بستر نفوذناپذیر با استفاده از بسته نرم‌افزاری GeoStudio که از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان محدود بوده، استفاده گردیده است. محدوده تغییرات ابعاد هندسه سد در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. در شکل ۳ نمونه‌ای از سدهای مدل شده در نرم‌افزار ارائه گردیده است. در این شکل، H ارتفاع سد، I تراز آب، X عرض سد بر روی پی، d عرض هسته بر روی پی، b عرض تاج هسته، W عرض تاج سد، M شیب پوسته و m شیب هسته است. تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار آماری SPSS انجام می‌شود. این برنامه قادر به انجام تحلیل‌های آماری و ساخت مدل رگرسیونی است. به منظور معرفی قیود مسئله به برنامه، مدل‌های ساده به روش رگرسیون خطی تهیه شده و محدوده مجاز برای هر کدام از قیود تعریف می‌گردد. برای توسعه مدل بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سد خاکی نیاز به تعیین تعدادی قید وجود دارد که سعی شده است در طراحی، قیودی در نظر گرفته شوند که نتایج به دست آمده‌ی سد بهینه تمام شرایط لازم یک سد واقعی را داشته باشد و بتواند به عنوان یک طرح اولیه و کامل مورد استفاده عملی قرار گیرد. بدین منظور قیودی از قبیل قید پایداری، گرادیان هیدرولیکی و تراوش در نظر گرفته شده‌اند.

1 Phreatic Line



شکل ۳. نمونه‌ای از مقطع مدل شده در نرم‌افزار

Fig. 3. An example of a section modeled in the software

جدول ۴. محدوده تغییرات پارامترهای هندسی

Table 4. The range of changes in geometric parameters

پارامتر	حد پایین	حد بالا
ارتفاع هسته (m)	۹۴	۹۴
عرض فوقانی هسته (m)	۲	۶
عرض هسته روی پی (m)	۴۰٫۵	۸۶
شیب بالادست هسته	۱ : ۲٫۳	۱ : ۵٫۱
شیب پایین‌دست هسته	۱ : ۲٫۳	۱ : ۵٫۱
شیب بالادست پوسته	۱ : ۲٫۴	۱ : ۲٫۴
شیب پایین‌دست پوسته	۱ : ۲٫۱	۱ : ۲٫۱

جدول ۵. مشخصات ۵۰ مقطع فرضی تعریف شده در مدل سازی

Table 5. Specifications of 50 hypothetical sections defined in the modeling

L	d	b	Model	L	d	b	Model
95	54	4	26	95	26	2	1
95	54.5	4.5	27	95	28	3	2
95	55	5	28	95	29	3	3
95	56	6	29	95	31	3	4
95	59	4	30	95	38	2	5
95	59.5	4.5	31	95	40.5	2	6
95	60	5	32	95	40.5	3	7
95	61	6	33	95	40.5	3.5	8
95	64	4	34	95	42.5	2	9
95	64.5	4.5	35	95	41.5	3.5	10
95	65	5	36	95	42.5	3	11
95	66	6	37	95	42	4	12
95	69	4	38	95	44.5	2	13
95	69.5	4.5	39	95	43.5	3.5	14
95	70	5	40	95	44.5	3	15
95	71	6	41	95	44	4	16
95	74	4	42	95	46.5	2	17
95	74.5	4.5	43	95	45.5	3.5	18
95	75	5	44	95	46.5	3	19
95	76	6	45	95	46	4	20
95	78	6	46	95	47.5	3.5	21
95	80	6	47	95	48.5	3	22
95	82	6	48	95	48	4	23
95	84	6	49	95	49.5	3.5	24
95	86	6	50	95	50	4	25

۴- مشخصات مدل اجزای محدود سد خاکی

برای تحلیل دقیق جریان در بدنه سدهای خاکی و برآورد میزان تراوش در آن از شبکه جریان استفاده می‌شود. به طور معمول تهیه و ترسیم شبکه جریان یک پروسه وقت‌گیر و پرهزینه‌ای را شامل شده و در صورت هرگونه تغییر در مقطع و مصالح سد خاکی این پروسه بایستی تکرار گردد. لذا در این مطالعه برای تخمین اولیه میزان تراوش یک مدل ریاضی تهیه شده است که می‌توان به آسانی و بدون استفاده از شبکه جریان مقدار تراوش از بدنه سد را محاسبه نمود. عوامل مؤثر در تهیه مدل، ارتفاع آب بالادست، عرض هسته روی پی، ارتفاع سد و ضریب هدایت هیدرولیکی مصالح هسته در نظر گرفته شده است.

برای شبکه‌بندی مدل می‌توان از دو نوع شبکه‌بندی ساختاریافته و غیرساختاریافته استفاده کرد. در تحقیق حاضر از شبکه‌بندی غیرساختاریافته

با المان‌های چهار ضلعی و مثلثی استفاده شده است. در این حالت ابتدا المان‌های چهار ضلعی توسط نرم‌افزار ایجاد می‌شود سپس هر جا که ضرورت داشته باشد نرم‌افزار از المان‌بندی مثلثی برای دقت بیشتر استفاده می‌کند. این نوع المان‌بندی برای نواحی مختلف برای هر نوع شکلی قابل استفاده است. اندازه المان‌ها ۲ متر بوده و مرتبه انتگرال‌گیری برای المان‌های چهار ضلعی و مثلثی به ترتیب ۹ و ۳ است. البته باید به این نکته توجه داشت که برای المان‌های چهار ضلعی با گره‌های ثانویه می‌توان از چهار نقطه نیز برای مرتبه انتگرال‌گیری استفاده نمود. معمولاً استفاده از چهار نقطه نیز نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. استفاده از چهار نکته برای مرتبه انتگرال‌گیری، به صورت قابل‌توجهی میزان محاسبات و به تبع آن مدت زمان تحلیل را کاهش می‌دهد. و به همین ترتیب استفاده از انتگرال‌گیری سه نقطه‌ای برای المان‌های مثلثی حتی اگر از گره‌های ثانویه استفاده نشود، می‌تواند موجب بهبود نتایج حاصل از نرم‌افزار شود. ذکر این نکته ضروری است که انتگرال‌گیری یک نقطه‌ای برای المان‌های مثلثی، عملکرد مناسبی برای المان‌ها به خصوص زمانی که المان‌ها در نواحی غیراشباع واقع شده‌اند، ارائه نداده و لذا پیشنهاد نمی‌شود. شایان ذکر است که جهت همگرایی المان‌بندی، از گره‌های ثانویه نیز استفاده شده است. این کار باعث می‌شود که گره‌های ثانویه در وسط هر یک از لبه‌های المان‌های مختلف اعمال شود. همگرایی المان‌بندی زمانی اتفاق می‌افتد که با کاهش هر چه بیشتر اندازه المان‌ها دیگر تغییرات محسوسی در جواب مسئله مشاهده نشود.

در تحلیل‌های مربوط به تنش و کرنش (Sigma/w)، از مهم‌ترین شرایط مرزی اعمال شده به مدل می‌توان به شرط مرزی گیرداری در کف سد اشاره کرد. در واقع اعمال شرط مرزی مذکور به کف سد باعث می‌شود که کف سد در راستای قائم و افقی جابه‌جایی نداشته باشد. این نوع شرط مرزی از نوع جابه‌جایی است که مؤلفه‌های قائم و افقی آن برای کف سد صفر در نظر گرفته شده است. با این حال در این تحقیق با مدل‌سازی پی سد، گیرداری کف سد به سختی پی وابسته است. شرط مرزی دیگر مربوط به شرط مرزی بار مخزن است. این نوع شرط مرزی از نوع تنش بوده و مقدار آن ثابت و برابر با ارتفاع نرمال آب در مخزن سد در نظر گرفته شده است. در تحلیل‌های مربوط به تراوش (Seep/w) نیز از شرایط مرزی هد بالادست جهت اعمال بار مخزن به مدل، فشار صفر[1]، سطح مستعد تراوش[2] و مقطع جریان[3] جهت تخمین دبی عبوری از یک مقطع مشخص استفاده شده است.

1 Zero pressure
2 Potential seepage face
3 Flux Section

پوسته سد به صورت الاستیک مدل شده و هسته رسی سد با استفاده از مدل رفتاری مورکولمب، به صورت الاستیک–پلاستیک کامل مدل گردیده است.

۵- روابط رگرسیونی

۵- ۱- رابطه رگرسیونی تراوش

به منظور محاسبه تراوش از بدنه سدهای خاکی و معرفی آن به عنوان قید در طرح مسئله بهینه‌سازی از یک مدل رگرسیونی استفاده شده است. این مدل بر اساس مقادیر تراوش محاسبه شده از ۵۰ مقطع سد با هندسه فرضی مختلف توسط نرم‌افزار SEEP/W با حل عددی معادله تراوش لاپلاس به دست آمده است. در مدل اجزای محدود از المان‌های مستطیلی چهار گرهی و مثلثی سه گرهی استفاده شده است. شرایط مرزی اول مربوط به نقاط بالادست سد است که زیر بار آب قرار گرفته‌اند، به این نقاط مقادیری از بار کلی برابر با ارتفاع آب پشت سد تعلق گرفت و شرایط مرزی دوم مربوط به نقاط پایین‌دست سد است که به این نقاط بار آبی صفر تعلق می‌گیرد. داده‌های تولید شده با نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل می‌شوند. رابطه (۱) دبی عبوری در واحد طول سد را نشان می‌دهد.

$$\frac{q}{kl} = -21.933\frac{b}{H} + 2.234 \qquad (۱)$$

که q دبی عبوری در واحد طول سد $(m^3/s.m)$، k ضریب نفوذپذیری هسته (m/s)، l ارتفاع آب مخزن (m)، H ارتفاع سد (m) و b عرض هسته در قسمت فوقانی (m) است.

۵- ۲- رابطه رگرسیونی ضریب پایداری شیروانی

یکی از عوامل مهم که در طراحی سدهای خاکی باید مورد بررسی قرار گیرد پایداری شیروانی سدهای خاکی در شرایط بحرانی است. برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری، پارامترهای (c و Φ) مصالح خاکی، ارتفاع سد، عرض هسته روی پی، عرض تاج هسته، عرض سد روی پی و شیب پایین‌دست و بالادست در نظر گرفته شده است. در اینجا پایداری سدهای خاکی تحت شرایط تراوش دائم با استفاده از روش تعادل حدی مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور محاسبه ضریب پایداری شیروانی‌های سد و معرفی آن به عنوان قید در طرح بهینه‌سازی از مدل رگرسیونی استفاده شده است. مدل موجود بر اساس ضرایب اطمینان محاسبه شده برای ۵۰ مقطع سد توسط

نرم‌افزار SLOPE/W که برخلاف سایر بخش‌های بسته نرم‌افزاری GeoStudio از روش اجزا محدود استفاده نمی‌کند شامل مجموعه‌ای از روش‌های ترسیمی برای آنالیز پایداری شیب‌های خاکی است. این فرآیند از طریق روش‌های تعادل حدی انجام می‌شود. نرم‌افزار SLOPE/W همچنین قابلیت تحلیل پایداری با اکثر روش‌های مربوط به تعادل حدی از جمله روش مورگن اشترن و پرایس و بیشاپ را دارد. برای تحلیل پایداری با نرم‌افزار مذکور از المان‌های مستطیلی چهار گرهی و مثلثی سه گرهی استفاده شده است. سپس بار آبی بالادست و پایین‌دست به عنوان شرایط مرزی تعیین گردید، تهیه شده است. رابطه (۲) ضریب پایداری سد SF پس از تجزیه تحلیل بر روی داده‌های تولید شده با نرم‌افزار SPSS طبق رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$SF = 1.975 - 0.169\frac{d}{x} + 0.003\frac{b}{y} \qquad (۲)$$

که d عرض هسته روی پی (m)، x عرض سد (m)، b عرض هسته در قسمت فوقانی (m) و y: تاج سد (m) است. یکی از موارد دیگر که در حین طراحی سدهای خاکی مورد نظر طراحان و متخصصین امر قرار می‌گیرد مسئله گرادیان هیدرولیکی جریان عبوری از بدنه سد است. چنانچه گرادیان هیدرولیکی از مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی بیشتر شود نیروی بین ذرات خاک کاهش یافته و شروع به حرکت می‌کند و در واقع ذرات خاک مانند مایعات عمل می‌کند، به تدریج سرعت حرکت آب بیشتر شده و ذرات بیشتری شسته و به خارج حمل می‌شوند که در نتیجه تونل ایجاد شده بزرگ و بزرگ‌تر شده، فرسایش داخلی گسترش یافته و در نهایت سبب تخریب سد خاکی می‌گردد. در اینجا برای تخمین گرادیان هیدرولیکی سدهای خاکی با هسته مرکزی یک مدل ریاضی جدید تهیه شده است.

۵- ۳- رابطه رگرسیونی گرادیان هیدرولیکی

گرادیان هیدرولیکی ۵۰ مقطع سد توسط نرم‌افزار SEEP/W محاسبه شده و داده‌های تولید شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شدند. برای تعیین رابطه رگرسیونی دو فرض وجود دارد: بر اساس فرض اول محاسبات بر روی مدل هسته به عنوان یک سد خاکی همگن انجام می‌شود. و در فرض دوم خط نشت به صورت مستقیم در نظر گرفته شده است. هر چند که در نظر گرفتن فرض دوم ممکن است در محاسبه طول خط نشت و شیب هیدرولیکی مقداری خطا ایجاد کند ولی به علت اینکه محاسبه طول واقعی خط نشت کار مشکلی بوده و به راحتی قابل محاسبه نیست می‌توان از مقدار خطای ایجاد شده که با توجه به بررسی‌های انجام شده مقدار جزئی است چشم‌پوشی کرد. رابطه (۳) تابع گرادیان هیدرولیکی را نشان می‌دهد:

$$i = 2.42 + 0.97\frac{b}{l} - 2.08\frac{d}{l} \qquad (۳)$$

که i گرادیان هیدرولیکی، b عرض هسته در قسمت فوقانی (m)، d عرض هسته روی پی (m) و l ارتفاع آب مخزن (m) است.

۶- بهینه‌سازی هسته رسی

بدنه سدهای خاکی به علت نوع مصالحی که در ساخت آن‌ها استفاده می‌شود و نیز به منظور کنترل تراوش، حفظ پایداری و جلوگیری از نشست و ترک از نواحی مختلفی تشکیل شده‌اند. انتخاب هندسه و مصالح هر ناحیه باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر رعایت ملاحظات طراحی، از نظر ملاحظات اقتصادی نیز قابل توجیه باشد. برای جلوگیری از تراوش آب از داخل بدنه سدهای خاکی و یا کاهش مقدار آن، در صورت در دسترس بودن مصالح مناسب، عموماً از یک هسته متشکل از مصالح با نفوذپذیری بسیار کم استفاده می‌شود که ممکن است با اشکال و هندسه مختلفی در بدنه سد قرار بگیرند [۲۰]. گاهی در عین تعیین هندسه مناسب برای هسته، بر اساس عوامل مؤثر و مهم در طراحی سد، تهیه مصالح مناسب برای این هسته با مشکل مواجه شده و یا تهیه این مصالح از لحاظ ملاحظات اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. همچنین دلایل دیگری نیز ممکن است وجود داشته باشد که ایجاب نمایند مصالح کمتری مورد استفاده قرار گیرد. از این رو تهیه هندسه مناسب و بهینه‌ای که علاوه بر تأمین محدودیت‌ها و الزامات طراحی و نیز در بر داشتن خصوصیات لازم فیزیکی و ژئوتکنیکی مصالح، توجیه اقتصادی نیز داشته باشد از اهمیت بسزایی برخوردار است [۲۱].

متغیرهای طراحی

به طور کلی در طراحی مقطع سدهای خاکی دو نوع متغیر وجود دارد. اول، متغیرهای محیطی که وابسته به محل اجرای طرح می‌باشند مانند منابع قرضه و خصوصیات مصالح که در اینجا به صورت متغیرهای پارامتری در برنامه تعریف شده‌اند و دیگری متغیرهای هندسی مقطع سد که بعضی

از آن‌ها مانند زاویه محور هسته ثابت بوده و بعضی دیگر مانند ارتفاع و عرض تاج سد به عنوان متغیرهای پارامتری تعریف شده و تعدادی دیگر به عنوان متغیرهای طراحی در تابع هدف ادغام شده‌اند. بردار متغیرهای طراحی (متغیرهای تصمیم، $X:\{X_1,X_2,X_3\}$) شامل X_1(عرض تاج هسته)، X_2(عرض قاعده هسته روی پی) و X_3(عرض سد روی پی) هستند.

توابع هدف

در این مطالعه دو تابع هدف به شرح زیر مطرح است.

۱-حجم مصالح خاکی در واحد طول سد

برای حداقل کردن حجم مصالح هسته و تأمین پایداری آن با توجه به هندسه سد می‌توان از رابطه (۵) استفاده نمود. با توجه به اینکه قید پایداری تابعی از پارامترهای بدنه سد است، بنابراین علاوه بر بهینه نمودن ابعاد هسته، شیب مناسب پایداری به دست می‌آید.

$$F=\frac{1}{2}(X_3+W)H-\frac{1}{2}(X_2+X_1)H \qquad (۴)$$

که در آن F حجم مصالح خاکی (m^3/m)، H ارتفاع سد (m) و W عرض تاج سد (m) است.

۲-میزان تراوش از بدنه سد

برای حداقل نمودن میزان تراوش از بدنه سد معادله (۱)، به صورت معادله (۵) به عنوان یک تابع هدف وارد مسئله شده است.

$$\frac{q}{kl}=-21.933\frac{b}{H}+2.234 \qquad (۵)$$

قیود طراحی

۱-قید ضریب اطمینان پایداری در شرایط تراوش پایدار که حداقل مقدار آن برای پایداری استاتیکی سدهای خاکی ۱٫۵ است [۲۲].

$$SF\geq 1.5$$

۲-قید گرادیان هیدرولیکی که مقدار آن باید کمتر از مقدار بحرانی باشد.

$$i\leq i_{cr}$$

$$1\leq i\leq 3$$

۷- نتایج و بحث

در این بخش از تحقیق، ابتدا مدل‌های رگرسیونی جدید با استفاده از نرم‌افزار SPSS برای محاسبه متغیرهای طراحی شامل: تراوش (معادله ۱)، ضریب اطمینان پایداری (معادله ۲) و گرادیان هیدرولیکی (معادله ۳) تهیه گردید. پس از تعیین متغیرهای طراحی و همچنین توابع هدف و قیود، بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی در محیط Simplex انجام گردید. به منظور اجرای برنامه از مشخصات مصالح بدنه سد و یک سری از پارامترهای معلوم مانند ارتفاع و عرض تاج هسته سد استفاده شد. نتایج به دست آمده از اجرای برنامه بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی این سد در مقایسه با ابعاد واقعی هسته رسی آن در جدول ۶ آمده است.

برای نمونه مقادیر واقعی عرض فوقانی هسته از ۴ متر به ۳٫۵ متر و عرض هسته روی پی از ۵۰ متر به ۴۴ متر در مدل بهینه‌سازی کاهش داشته است. که این واقعیت نشان دهنده کاهش حجم مصالح مورد نیاز جهت ساخت هسته سد در حدود ۱۲٪ است.

۸- صحت‌سنجی و بررسی دقت مدل

به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحقیق، ابتدا از بین ۵۰ مقطع فرضی مختلف سه مقطع به صورت تصادفی (با ابعاد بزرگ‌تر، کوچک‌تر و برابر نمونه اصلی) انتخاب گردیده است. سپس مقادیر ضریب اطمینان پایداری، تراوش و گرادیان هیدرولیکی برای هر سه مقطع مذکور یک بار در فضای SPSS و یک بار دیگر در محیط نرم‌افزار GeoStudio مدل‌سازی و محاسبه گردیده است (جدول ۷). محاسبات در فضای SPSS منجر به تولید معادلات رگرسیونی شده و جهت مدل‌سازی مقاطع در نرم‌افزار GeoStudio از مشخصات مصالح و یک سری پارامترهای معلوم مانند ارتفاع هسته و عرض تاج هسته سد استفاده گردیده است. نهایتاً ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های به دست آمده از اجرای برنامه SPSS و اجرای مدل‌های نرم‌افزاری GeoStudio محاسبه می‌گردد. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود مقادیر محاسبه شده از اجرای برنامه و اجرای مدل‌های نرم‌افزاری GeoStudio برای مقاطع مختلف، دارای همبستگی بالا و در حدود ۹۹ درصد است و اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین آن‌ها وجود ندارد.

جدول ۶. مقایسه نتایج بهینه به دست آمده برای سد حاجیلرچای با ابعاد واقعی آن

Table 6. Comparing the optimal results obtained for the Hajilerchai dam with its actual dimensions

	ابعاد واقعی هسته رسی	ابعاد بهینه هسته رسی
عرض فوقانی هسته (متر)	۴	۳٫۵
عرض هسته روی پی (متر)	۵۰	۴۴
شیب وجوه هسته	۱ : ۴	۱ : ۴٫۶
حجم مصالح هسته (m^3/m)	۲۵۶۵	۲۲۵۶

جدول ۷. مقادیر پارامترهای ضریب اطمینان پایداری، گرادیان هیدرولیکی و میزان تراوش محاسبه شده از برنامه SPSS و مدل‌های نرم‌افزاری GeoStudio برای چند مقطع سد خاکی حاجیلرچای

Table 7. The values of parameters of reliability coefficient of stability, hydraulic gradient, and seepage rate were calculated from SPSS program and GeoStudio software models for several sections of Hajilrechai earth dam

عرض فوقانی هسته	عرض هسته روی پی	مدل	گرادیان هیدرولیکی	تراوش	ضریب پایداری
b(m)	**d(m)**			**m^3/year.m**	
۲	۳۸	GeoStudio	۱/۵۸	۵/۵۴	۱/۹۷
		SPSS	۱/۵۶	۵/۲۷	۱/۹۶
۴	۵۰	GeoStudio	۱/۲	۳/۹۸	۱/۹۶
		SPSS	۱/۳	۳/۹۱	۱/۹۵
۵	۷۵	GeoStudio	۰/۸	۲/۷۴	۱/۹۴
		SPSS	۰/۷۳	۳/۲۲	۱/۹۵
			۱ ≤ i≤ ۳		FS≥۱/۵

جدول ۸. ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های محاسبه شده از اجرای مدل SPSS و GeoStudio

Table 8. Pearson's correlation coefficient between the data calculated from the implementation of SPSS and GeoStudio model

مدل	SPSS	Geostudio
SPSS	۱	۰/۹۹۱
GeoStudio	۰/۹۹۱	۱

۹- نتیجه‌گیری

روش پیشنهادی حاضر در این تحقیق در کنار در نظر گرفتن جنبه‌های مناسب مسئله، قادر به طراحی بهینه هسته سد بوده و این روش تلاش اضافی برای دستیابی به یک طرح بهینه را کاهش داده و منجر به کاهش صرف زمان لازم برای انجام سعی و خطا می‌شود. در این روش در حین حداقل‌سازی ابعاد و حجم هسته رسی، پایداری سد نیز بررسی گردید. با توجه به تأثیر متقابل بخش‌های مختلف یک سد بر روی یکدیگر، کاهش ابعاد هسته بر روی بخش‌های مختلف سد تأثیر گذاشته و سبب کاهش حجم آن‌ها و هزینه‌های اجرایی شده است که فاکتور مهمی در انتخاب یک طرح و عملیاتی شدن آن هستند. نتایج نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی جدید عملکرد موفقی در تخمین مقدار تراوش، گرادیان هیدرولیکی و ضریب اطمینان پایداری سدها، تحت شرایط تراوش دائم داشته و مدل بهینه‌سازی موجود قادر به تهیه طرح بهینه هسته رسی سدهای خاکی منطقه‌ای است.

منابع

[1] M. Komasi, B. Beiranvand, Study of hydraulic failure mechanism in the core of Eyvashan earth dam with the effect of pore water pressure and arching, Journal of Stress Analysis. 4(2), (2020) 55-67.

[2] A. Asadi, and H. Saba, Evaluation of the effect of modulus of elasticity in clay core on the arching in the crest of earth dams, Computational Engineering and Physical Modeling. 3(3), (2020) 12-20.

[3] M. Mohammadi, Gh. Barani, and K. Ghaderi, Optimization of the core of earth dams using simulated annealing (SA) algorithm, Amirkabir Journal of Science and Research. 47(1), (2015) 119-130.

[4] S. Poudel, S.J. Abby. and S. Ngambi, Mechanism of hydraulic fracturing in cohesive zone of embankment dam cores – A Review, International of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 8(7), (2017).

[5] T. Sadettin, Estimation of Hydraulic Fracturing Potential for Clay – Core Rock Fill Dams, Dumlupinar University. S, T. (2017).

[6] SM. Ferdowsi, S. Hoseini, , M. Farzin, S, Faramarzpour, F. Mousavi . Shape Optimization of gravity dam using a nature – inspired approach, Journal of Soft Computing in Civil Engineering. (2020).

[7] A. Rezaian, M, Davoodi, M.k, Jafari . Determination of optimum cross – section of earth dams using ant colony optimization algorithm, Sharif University of Technology. Scientia Iranica. (2018).

[8] A.L. Goldin, L.N. Rasskasove, Design of earth dams, A.A. Balkema, Netherlands. (1992).

[9] G. Wei, Seepage Parameters Back Analysis for Dam Foundation Based on Bionic Algorithms, Proceeding of the International Conference on Dam Engineering, (2004). 369-376.

[10] A. Akyuz, H. Merdun, Seepage through an earth dam on impervious based with Hele Shaw, viscous liquid Physical Madel. EJGE. (2003).

[11] A. Nazari Giglou, A. Zeraatparvar, Seepage Estimation

through Earth Dams, Based on Applied Scientific Research. 2(8), (2012). 7861-7865.

[12] M. Montaseri, A. Deiminiat, AA. Ghezelsofloo, Optimization of Clay Core Dimension in Earth Dams using Genetic Algorithm, Journal of water and soil science. (3), (2010). 73-86.

[13] N. Shahkarami, Sh. Mokhtari, Investigation of a modeling – based framework for optimizing the cross- section of cored earth dam, Journal of Civil and Environmental Engineering. (2022).

[14] M. Jose, G. Ruben, A. Carlos, and K. Liliya, Optimized Design of Earth Dams: Analysis of Zoning and Heterogeneous Material in Its Core, Department of Geotechnical Engineering, Escuela , Universidad de Madrid, 28040 Madrid, Spain . (2020).

[15] D. Zelin, X. Jianghan, Z. Xuanyi, and W. Jing, Optimization of dam profile based on response surface methodology, International Case Studies in Construction Materials. (2022).

[16] A. Rezaeein, , M. Davoodi, and M. Jafari, Determination of optimum cross-section of earth dam using ant colony optimization algorithm. International Institute of Earthquacke Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran. (2018).

[17] Bandab Consulting Engineering, Development of Water Resource of Hajilar Dam River in 2th Phase Studies. Regional Water Company of East Azarbayjan. (2008).

[18] R.H Mohammad, and E.H. Mohammad, Simplex method to optimization mathematical manipulation. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), (2019).

[19] A.d Quria , M. Tofigh. Application of Nelder-Mead Simplex Method for Unconfined Seepage Problems, Delft University of Technology. Delft, the Netherland. (2009).

[20] S.M Jose, R. Galindo, Optimization Design of Earth Dams: Analysis of zoning and heterogeous material in its core, Department of Construction Mining Enterprises and Underground Structures, Saint – Petersburg Mining University, 199106 Saint – Petersburg, Russia. (2020).

[21] V. Queipo, J. Verd, J. Canelo, S. Pintos, Efficient global optimization for hydraulic fracturing treatment design, Journal of Petroleum Science and Engineering, 45, (2002) 1-2.

[22] U.S.Army Corps of Engineering, Engineering and Design Stability of Earth and Rock fill Dams". Department the Army, Engineer Manual EM, (2003) 1110-190.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Zalnezhad, S. Sh. Emamzadeh, Optimization of the Clay Core of Earth Dams with Regression Method, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 265-278.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21205.7651

این صفحه عمداً خالی است