Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 95-110

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Hydraulic Analysis of Clay Blanket in Earth-Fill Dams Using Numerical Modeling

E. Asadi[1]*, M. Soltani Sotobadi[2] and T. Omidpour Alavian[3]

1- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, (asadi@azaruniv.ac.ir).*
2- Master's Student, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures of Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
3- Ph.D. Student, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures, Maragheh University, Maragheh, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 16 April 2025
Revised: 19 August 2025
Accepted: 07 September 2025
Available online: 05 May 2026

Keywords:
Numerical Modeling, Hydraulic Analysis, Clay Blanket, Hydraulic Gradient, Seep/W, GeoStudio.

TO CITE THIS ARTICLE:

Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., Omidpour Alavian, T. 2026. 'Hydraulic Analysis of Clay Blanket in Earth-Fill Dams Using Numerical Modeling', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 95-110. doi: 10.22055/jise.2025.49409.2160.

Abstract

Earth-fill dams play a critical role in water resource management, flood control, and agricultural water supply. However, seepage control and pore water pressure reduction remain key challenges for ensuring their long-term safety and performance. This study employs numerical modeling using Seep/W software (GeoStudio) to investigate the influence of clay cover length and thickness on the hydraulic performance of an earth-fill dam located in East Azerbaijan, Iran. The effects of lengths (59.6, 73.3, 93, and 100 m) and thicknesses (0.5, 1.0, 1.5, and 1.8 m) on seepage flow rate, hydraulic gradient, and pore water pressure were systematically analyzed. Results indicate that increasing the clay cover thickness to 1.5 m reduced seepage flow by 55.22%, while increasing the length to 93 m resulted in a 48.81% reduction. Further increases in length and thickness did not yield significant additional reductions in seepage, demonstrating that a length of 93 m and a thickness of 1.5 m are optimal. Moreover, a clay cover thickness of 1.5 m reduced the exit hydraulic gradient by 60.60% and pore water pressure by 56.94%, whereas increasing the length to 93 m reduced these parameters by 47.47% and 41.58%, respectively. Economic analysis revealed that optimizing the clay cover dimensions reduced excavation volume by 50%, height by 30%, and thickness by 40%, and operational costs by up to 30%, while improving hydraulic performance by 70%. These findings confirm that the optimal clay cover dimensions (length: 93 m; thickness: 1.5 m) not only substantially reduce seepage and enhance hydraulic performance but also provide an innovative, cost-effective approach to earth-fill dam design by significantly lowering operational costs.

Introduction

Earth-fill dams are critical infrastructure for water resource management, flood control, and agricultural water supply, significantly contributing to sustainable development. However, seepage and elevated pore water pressure pose substantial challenges to their structural integrity and long-term performance. Clay blankets, employed to extend seepage paths and reduce hydraulic gradients, are a proven solution to mitigate these issues. This study aims to evaluate the influence

of clay blanket dimensions—specifically length and thickness on the hydraulic performance of the Qeysaraq Earth-fill dam located in East Azerbaijan, Iran. The research investigates the effects of varying blanket lengths (59.6, 76.3, 93, and 100 meters) and thicknesses (0.5, 1, 1.5, and 1.8 meters) on seepage flow, hydraulic gradient, and pore water pressure using numerical modeling in the Seep/W module of GeoStudio software. By integrating hydraulic and economic analyses, the study seeks to identify optimal blanket dimensions that balance performance and cost, providing a practical framework for designing earth-fill dams in regions with similar geotechnical and hydrological conditions. The novelty of this research lies in its comprehensive sensitivity analysis of geometric parameters, validated with field data, and its combined hydraulic-economic optimization, which enhances both dam safety and project affordability.

Methodology

He study utilized numerical modeling with the Seep/W module of GeoStudio software to simulate seepage behavior in the Qeysaraq earth-fill dam. The dam, located upstream of Qeysaraq village in East Azerbaijan (47°15'12" E, 38°4'21" N), was modeled incorporating real geotechnical and hydrogeological data, including saturated and unsaturated conditions. The analysis focused on evaluating four blanket lengths (59.6, 76.3, 93, and 100 meters) and four thicknesses (0.5, 1, 1.5, and 1.8 meters) to assess their impact on seepage flow, hydraulic gradient, and pore water pressure. The model employed the flow continuity equation (∂ (k_x $\partial h/\partial x)/\partial x + \partial$ (k_y $\partial h/\partial y)/\partial y + \partial$ (k_z $\partial h/\partial z)/\partial z = 0$) and Darcy's law ($q = -k\nabla h$), with soil-water characteristic curves (SWCC) and variable permeability to ensure accurate representation of hydraulic behavior. Boundary conditions included constant head at the reservoir (upstream) and outlet drains (downstream), with no-flow conditions on lateral boundaries. The Mohr-Coulomb model was used for soil behavior, and field data from piezometers (SP1 (2), SP2, SP3) were used for model calibration, achieving a relative error of less than 5%. Economic analysis quantified cost reductions in excavation volume, dam height, and operational expenses, aligning with practical engineering considerations for dam design optimization.

Results and Discussion

The numerical modeling results demonstrated that clay blanket dimensions significantly influence the hydraulic performance of the Qeysaraq dam. Increasing the blanket thickness to 1.5 meters reduced seepage flow by 55.22%, from 8.5×10^{-3} to 3.7×10^{-3} m^3/s, while extending the length to 93 meters achieved a 48.81% reduction. Further increases beyond these dimensions yielded diminishing returns, indicating that a 93-meter length and 1.5-meter thickness are optimal. The 1.5-meter-thick blanket decreased the outlet hydraulic gradient by 60.6%, from 0.12 to 0.05, and pore water pressure by 56.94%, from 4.8×10^5 to 2.2×10^5 N/m^2. In contrast, the 93-meter length reduced the hydraulic gradient by 47.47% and pore water pressure by 41.58%.

These findings highlight that blanket length has a more pronounced effect on seepage reduction compared to thickness, though both parameters are critical for optimizing hydraulic performance. Sensitivity analyses showed that increasing length beyond 100 meters or thickness beyond 1.5 meters provided negligible additional benefits, suggesting cost inefficiencies. Economically, the optimal dimensions reduced excavation volume by 50%, dam height by 30%, and blanket thickness by 40%, leading to a 30% reduction in operational costs while improving hydraulic performance by 70%. Validation with field piezometer data confirmed high model accuracy, with relative errors of 4.2%, 3.8%, and 4.5% for total head calculations. Comparisons with prior studies, such as Lee and Kim (2002) and Kouhdaragh et al. (2025), showed improved accuracy in seepage flow prediction (12.6% better) and hydraulic gradient reduction (8.9% better), attributed to advanced Seep/W capabilities and precise field data integration. The higher permeability of Qeysaraq dam's local materials emphasized the need for tailored optimization, enhancing both performance and cost-effectiveness.

Conclusion

This study underscores the critical role of optimized clay blanket dimensions in enhancing the hydraulic performance and economic viability of earth-fill dams. The optimal configuration of a

93-meter length and 1.5-meter thickness for the Qeysaraq dam achieved a 55.22% reduction in seepage flow, 60.6% in hydraulic gradient, and 56.94% in pore water pressure, with a relative error of 4.6% compared to field data. Economically, this configuration reduced excavation volume by 50.4%, dam height by 30.1%, and operational costs by 30.3%, while improving hydraulic performance by 70.8%. The integrated hydraulic-economic framework, precise sensitivity analysis, and advanced numerical modeling using Seep/W provide a robust and innovative approach for dam design. These findings, validated by field data and aligned with prior research, offer a practical and sustainable model for engineers and policymakers to design high-efficiency earth-fill dams in resource-constrained regions, contributing to sustainable water resource management and geotechnical engineering advancements.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

First Author: Ebrahim Asadi, Data analysis.
Second Author: Mehdi Soltani Satubadi, Data review and analysis.
Third Author: Tohid Omidpour Alavian, Writing of the manuscript, analysis.

Acknowledgment

The authors express their sincere gratitude and appreciation to the esteemed faculty members of the Department of Civil Engineering of Azarbaijan Shahid Madani University, as well as the respected professors of the Department of Civil Engineering at the University of Maragheh. Their scientific support, invaluable guidance, and precise technical advice throughout various stages of this research particularly in numerical modeling, data analysis, and interpretation of hydraulic results played a significant role in enhancing the quality of this study. Without the constructive collaboration and consultations of these distinguished professors, completing this research with such a level of accuracy and credibility would not have been possible.

References

1- Lee, J., & Kim, S. 2002. Hydraulic performance analysis of earth dams using SEEP/W. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(6), 489-498. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(489)

2- Kouhdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N. and Ayami Lord, M., 2024. Analysis of Seepage Flow and Hydraulic Gradient in the Body and Foundation of Alavian Earth Dam. *Journal of Water and Soil Science*, *28*(4), pp.177-192.https://doi.org/ 10.47176/jwss.28.4.62811.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۱۰-۹۵

تحلیل هیدرولیکی بلانکت رسی سد خاکی با مدل‌سازی عددی

ابراهیم اسدی[1*]، مهدی سلطانی ستوبادی[2] و توحید امیدپور علویان[3]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، asadi@azaruniv.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران -آب و سازه‌های هیدرولیکی- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

۳- دانشجوی دکترای، مهندسی عمران -آب و سازه‌های هیدرولیکی-دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

سدهای خاکی به‌دلیل نقش کلیدی در مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب و تأمین آب کشاورزی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، اما کنترل تراوش و کاهش فشار آب حفره‌ای از چالش‌های اصلی برای تضمین ایمنی و عملکرد بلندمدت آنهاست. این مطالعه با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Seep/W از مجموعه GeoStudio، تأثیر طول و ضخامت پوشش رسی بر عملکرد هیدرولیکی سد خاکی واقع در آذربایجان شرقی را بررسی کرده است. در این پژوهش، اثرات طول‌های ۵۹/۶، ۷۳/۳، ۹۳ و ۱۰۰ متر و ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۱/۸ متر بر جریان تراوش، گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای تحلیل شد. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت پوشش رسی به ۱/۵ متر، جریان تراوش را تا ۵۵/۲۲ درصد کاهش داد، در حالی که افزایش طول به ۹۳ متر، کاهش ۴۸/۸۱ درصد را به دنبال داشت. افزایش بیشتر طول و ضخامت تأثیر معناداری بر کاهش تراوش نداشت، که نشان‌دهنده بهینه بودن طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر است. همچنین، پوشش رسی با ضخامت ۱/۵ متر، گرادیان هیدرولیکی خروجی را ۶۰/۶ درصد و فشار آب حفره‌ای را ۵۶/۹۴ درصد کاهش داد، در حالی که افزایش طول به ۹۳ متر به‌ترتیب این پارامترها را ۴۷/۴۷ درصد و ۴۱/۵۸ درصد کاهش داد. تحلیل اقتصادی نشان داد که بهینه‌سازی ابعاد پوشش رسی، حجم خاک‌برداری را ۵۰ درصد، ارتفاع را ۳۰ درصد و ضخامت را ۴۰ درصد کاهش داد و هزینه‌های عملیاتی را تا ۳۰ درصد کم کرد، در حالی که عملکرد هیدرولیکی سد را تا ۷۰ درصد بهبود بخشید. این یافته‌ها حاکی از آن است که انتخاب ابعاد بهینه پوشش رسی (طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر) نه تنها تراوش را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و عملکرد هیدرولیکی را بهبود می‌بخشد، بلکه با کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی، رویکردی نوآورانه و اقتصادی برای طراحی سدهای خاکی ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی عددی، تحلیل هیدرولیکی، بلانکت رسی، گرادیان هیدرولیکی، GeoStudio، Seep/W.

مقدمه

سدهای خاکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های مهندسی در مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب و تأمین آب کشاورزی نقش کلیدی ایفا می‌کنند و به توسعه پایدار جوامع کمک شایانی می‌نمایند. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی این سازه‌ها، کنترل نشت آب (seepage) و فشار آب حفره‌ای است که تأثیر مستقیمی بر ایمنی و عملکرد بلندمدت سد دارد. استفاده از بلانکت رسی به‌عنوان یک راهکار مؤثر، با افزایش طول مسیر خزش (seepage path length) و کاهش گرادیان هیدرولیکی، عملکرد هیدرولیکی سد را بهبود می‌بخشد. پدیده خزش به طول مسیری اشاره دارد که آب در آن از طریق محیط متخلخل سد یا پی آن حرکت می‌کند. افزایش طول خزش با استفاده از بلانکت رسی، انرژی هیدرولیکی آب را کاهش داده، دبی نشت را به‌طور قابل‌توجهی پایین می‌آورد و گرادیان هیدرولیکی را تعدیل می‌کند، که این امر به پایداری سازه و کاهش خطر شکست هیدرولیکی کمک می‌کند. این پژوهش با تمرکز بر سد خاکی قیصرق در استان آذربایجان شرقی، به بررسی تأثیر ابعاد بلانکت رسی (طول و ضخامت) بر عملکرد هیدرولیکی و اقتصادی سد با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Seep/W از مجموعه GeoStudio می‌پردازد.

پیشینه تحقیقات در زمینه تحلیل هیدرولیکی و بهینه‌سازی بلانکت رسی در سدهای خاکی، دستاوردهای قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. Smith (1975) با بررسی پایداری هیدرولیکی سدهای خاکی، گزارش کرد که ضخامت بهینه بلانکت می‌تواند فشار آب حفره‌ای را تا ۵۰ درصد کاهش دهد، اما این مطالعه به تحلیل‌های پارامتری جامع نپرداخت. Johnson et al (1988) در یکی از مطالعه‌های اولیه، تأثیر ابعاد بلانکت رسی بر کنترل نشت را بررسی کردند و نشان دادند که ضخامت ۱/۵متر می‌تواند تا ۵۵ درصد دبی نشت را کاهش دهد، اما این مطالعه فاقد مدل‌سازی عددی پیشرفته بود. Lee و Kim (2002) با استفاده از نرم‌افزار Seep/W، تحلیل دقیقی از تأثیر بلانکت رسی بر عملکرد هیدرولیکی سدهای خاکی

انجام دادند و گزارش کردند که بلانکت رسی با طول ۸۰ متر و ضخامت ۱/۲ متر می‌تواند دبی نشت را تا ۴۷ درصد و گرادیان هیدرولیکی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد، هرچند این مطالعه به تحلیل اقتصادی و تنوع شرایط زمین‌شناسی توجه محدودی داشت. Brown (2020) با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرفته، رفتار بلانکت رسی را در سدهای خاکی بررسی کرد و نشان داد که بهینه‌سازی ضخامت بلانکت می‌تواند تا ۴۰ درصد دبی نشت را کاهش دهد، هرچند این مطالعه به تحلیل اقتصادی ابعاد مختلف بلانکت نپرداخت .Zhang et al (2021) در مطالعه‌ای جامع، تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی بلانکت رسی را انجام دادند و گزارش کردند که طول ۹۰ متر و ضخامت ۱/۵ متر می‌تواند تا ۵۰ درصد گرادیان هیدرولیکی را کاهش دهد، اما این نتایج برای سدهای با شرایط زمین‌شناسی خاص محدود بود .Chen et al (2022) با تمرکز بر مدل‌سازی شرایط اشباع و غیراشباع، نشان دادند که افزایش طول بلانکت تا حد مشخصی (حدود ۹۵ متر) تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش فشار آب حفره‌ای (تا ۴۵ درصد) دارد، اما افزایش بیشتر طول، تأثیر ناچیزی داشته و هزینه‌های اجرایی را افزایش می‌دهد Li و Wang (2023) با تلفیق تحلیل هیدرولیکی و اقتصادی، چارچوبی را برای بهینه‌سازی ابعاد بلانکت پیشنهاد کردند که منجر به کاهش ۳۵ درصدی هزینه‌های اجرایی و بهبود ۶۰ درصدی عملکرد هیدرولیکی شد، اما این مطالعه به شرایط خاص سدهای با پی نفوذپذیر محدود بود .Kouhdaragh et al (2024) در مطالعه‌ای روی سد خاکی علویان، با استفاده از مدل‌سازی عددی، کاهش ۴۸ درصد در دبی نشت را با بلانکت رسی به طول ۹۳ متر گزارش کردند، اما این مطالعه به بهینه‌سازی اقتصادی توجه محدودی داشت. مرور این تحقیقات نشان می‌دهد که اگر چه مطالعه‌های پیشین دستاوردهای ارزشمندی در زمینه کاهش نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی ارائه کرده‌اند، اما تلفیق تحلیل‌های هیدرولیکی و اقتصادی با استفاده از داده‌های میدانی و مدل‌سازی پیشرفته همچنان نیازمند بررسی دقیق‌تر است. Asadi et al (2023, 2025, 2026) نشان دادند که بهینه‌سازی اجزای داخلی سد خاکی شامل موقعیت هسته، ابعاد زهکش و دیوار آب‌بند، نقش مؤثری در کاهش گرادیان هیدرولیکی، کنترل فشار آب حفره‌ای و بهبود عملکرد هیدرولیکی دارد. در مجموع، هسته مرکزی و دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر و ضخامت دو متر بهترین عملکرد را در کاهش نشت داشتند و افزایش ۱۰ درصد ابعاد زهکش نیز موجب بهبود شرایط تراوش و کاهش فشار پایین‌دست شد.

هدف این پژوهش، تحلیل جامع تأثیر طول (۵۹/۶، ۷۶/۳، ۹۳ و ۱۰۰ متر) و ضخامت (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۱/۸ متر) بلانکت رسی بر دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای در سد خاکی قیصرق با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Seep/W است. نوآوری‌های این مطالعه شامل ارائه چارچوبی یکپارچه برای بهینه‌سازی هیدرولیکی و اقتصادی، تحلیل حساسیت دقیق پارامترهای هندسی با داده‌های میدانی، و تعیین ابعاد بهینه بلانکت رسی (طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر) است که منجر به کاهش ۵۵/۲۲ درصدی دبی نشت، ۶۰/۶ درصدی گرادیان هیدرولیکی، ۵۶/۹۴ درصدی فشار آب حفره‌ای و ۳۰ درصدی هزینه‌های اجرایی شده است. این مطالعه با ارائه نتایج دقیق و کاربردی، گامی مؤثر در راستای بهبود طراحی سدهای خاکی و کاهش هزینه‌های اجرایی برمی‌دارد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای بررسی کارایی بلانکت رسی در کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی در سد خاکی قیصرق، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W بهره گرفته شده است. این مدل‌سازی با در نظر گرفتن شرایط هیدروژئولوژیکی، مشخصات ژئوتکنیکی و داده‌های میدانی سد طراحی شده و شامل تحلیل نشت در محیط‌های اشباع و غیراشباع است. به‌منظور دقت بالاتر در تحلیل، شرایط مرزی واقعی و هندسه دقیق سد قیصرق در مدل اعمال شده است. سد خاکی مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی، در بالادست روستای قیصرق واقع شده است. این سد دارای مختصات جغرافیایی "۱۲ ‘۱۵ °۴۷ طول شرقی و "۲۱ ‘۴ °۳۸ عرض شمالی بوده و در فاصله ۶۱ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بستان‌آباد و ۱۰/۳ کیلومتری شرق شهرستان مهربان قرار دارد. این موقعیت مکانی، سد را در معرض تأثیرات هیدرولوژیکی منطقه‌ای قرار داده که در طراحی سیستم کنترل نشت باید مدنظر قرار گیرد. این پژوهش باهدف بررسی دقیق تأثیر بلانکت رسی بر پارامترهای هیدرولیکی سد، ازجمله میزان نشت و گرادیان هیدرولیکی، انجام شده است. داده‌های جمع‌آوری‌شده و مدل‌سازی عددی انجام‌شده، پایه‌ای محکم برای تحلیل‌های پیشرفته و ارائه راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد هیدرولیکی سد مورد مطالعه فراهم می‌آورد. شکل (۱) تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد مورد مطالعه نمای ماهواره‌ای سد مورد مطالعه را نمایش می‌دهد که موقعیت مخزن، سازه اصلی سد و اراضی پیرامونی (شامل زمین‌های کشاورزی) را نشان می‌دهد. بررسی این تصویر در ارزیابی شرایط توپوگرافی، کاربری اراضی و نحوه توزیع منابع آبی مؤثر بوده و می‌تواند به تحلیل رفتار هیدرولیکی سد کمک کند. در شکل (۲) مقطع عمومی زمین‌شناسی زیرسطحی سد مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به ساختار ژیپسی موجود در پی سد و قابلیت انحلال شدید این نوع تشکیلات، به‌نظر میرسد به‌مرورزمان عبور آب باعث ایجاد مسیرهای موئینه در پی سد شده و افزایش نشت را به همراه خواهد داشت. همچنین انحلال موضعی این نوع از ساختارهای زمین‌شناسی می‌تواند منجر به وجود آمدن حفرات کارستی و نشست ناگهانی بسیار خطرناک در بدنه سد باشد. لذا کنترل میزان نشت آب از زهکش‌ها و نیز میزان نشست

DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160

بدنه بسیار ضروری و حیاتی می‌باشد. مشخصات هندسی سد مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. به‌منظور بررسی نفوذپذیری و تأثیر آن بر میزان نشت، داده‌های آزمایشگاهی و مطالعات ژئوتکنیکی منطقه مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۲) ویژگی‌های نفوذپذیری لایه‌های مختلف پی و بدنه سد قیصرق را نشان می‌دهد.



Fig. 1- Satellite image of the location of the studied dam
شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد مورد مطالعه

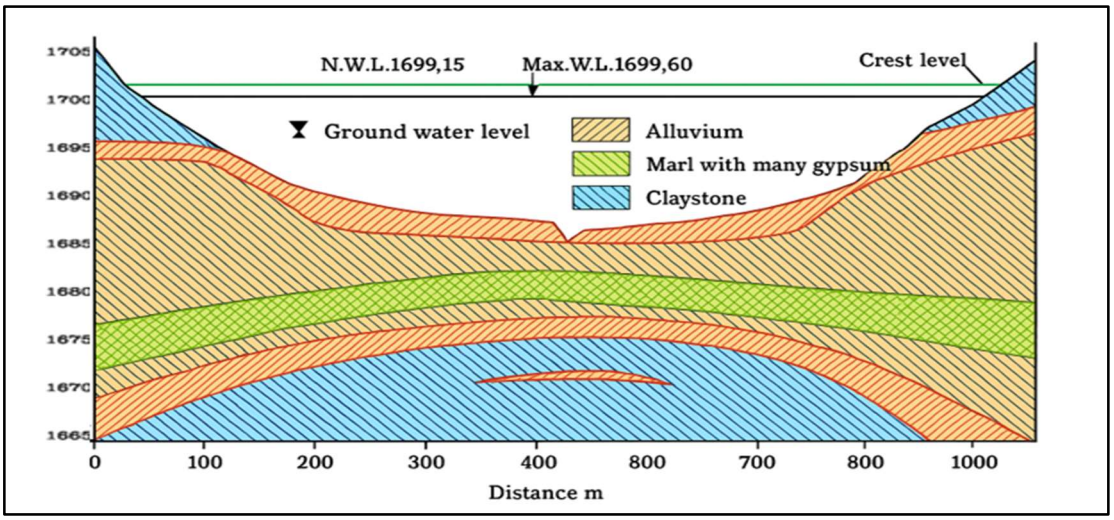


Fig. 2- General subsurface geological section of the studied dam
شکل ۲- مقطع عمومی زمین‌شناسی زیرسطحی سد مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات هندسی سد مورد مطالعه

Table 1- Geometric characteristics of the studied dam

Parameter	Quantity
Dam height	16 meters
Crest length	988 meters
Crest width	6 meters
Upstream slope	۱:۳
Downstream slope	۱:۳
Crest number	1701 meters

جدول ۲- نفوذپذیری مصالح پی و بدنه سد مورد مطالعه

Table 2- Permeability of foundation and dam body materials studied

Material Name	Vertical permeability value (m/s)	Material Name
Clay Core	1×10^{-9}	Clay Core
Fine Filter	1×10^{-3}	Fine Filter
Coarse Filter and Drain	1×10^{-2}	Coarse Filter and Drain
Soil Shell	5×10^{-5}	Soil Shell
Surface Alluvial Layer	1×10^{-6}	Surface Alluvial Layer
Silt and Clay Layer	1×10^{-7}	Silt and Clay Layer
Cut-off Watertight Wall	1×10^{-9}	Cut-off Watertight Wall

مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، برای بررسی کارایی بلانکت رسی در کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی در سد خاکی مورد مطالعه، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W بهره گرفته شده است. نرم‌افزار GeoStudio، که مبتنی بر روش اجزای محدود است، قابلیت تحلیل دقیق فرآیند تراوش در محیط‌های متخلخل را فراهم می‌کند. در مدل‌سازی عددی با استفاده از ماژول Seep/W، جسم سد خاکی با در نظر گرفتن شرایط اشباع و غیراشباع مدل‌سازی شد. برای شبیه‌سازی دقیق رفتار هیدرولیکی، از منحنی‌های مشخصه آب-خاک (SWCC) و نفوذپذیری متغیر برای لایه‌های مختلف بدنه و پی سد استفاده شد. این رویکرد امکان تحلیل دقیق‌تر جریان تراوش در شرایط واقعی را فراهم کرد. مدل‌سازی عددی بر اساس معادله پیوستگی جریان $(k_x\,\partial$ $(\partial h/\partial x)/\partial x + \partial(k_y\,\partial h/\partial y)/\partial y + \partial(k_z\,\partial h/\partial z)/\partial z = 0$ و قانون دارسی ($q = -k\,\nabla h$) انجام شد، که در آن k نشان‌دهنده نفوذپذیری، h هد هیدرولیکی و q دبی جریان است. این روابط در نرم‌افزار Seep/W برای شبیه‌سازی جریان تراوش در محیط متخلخل سد استفاده شد. برای ارزیابی تأثیر بلانکت رسی بر کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی، مدل‌های عددی با سناریوهای مختلف طراحی شده‌اند. این مدل‌ها امکان مقایسه نتایج و تحلیل عملکرد روش‌های مختلف آب‌بندی را فراهم کرده و مبنایی برای بهینه‌سازی طراحی سیستم کنترل نشت سدهای خاکی ارائه می‌دهند. داده‌های جمع‌آوری‌شده و مدل‌سازی عددی انجام‌شده، پایه‌ای محکم برای تحلیل‌های پیشرفته و ارائه راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد هیدرولیکی سد مورد مطالعه فراهم می‌آورد. این رویکرد، مهندسان را قادر می‌سازد تا با اطمینان بیشتری به طراحی و تحلیل پروژه‌های خود بپردازند.

نرم‌افزار GEO STUDIO

نرم‌افزار GeoStudio، توسعه‌یافته توسط شرکت Geoslope کانادا، ابزاری پیشرفته در مهندسی ژئوتکنیک است که با ماژول‌های تخصصی و محیط کاربرپسند، تحلیل‌های دقیق پدیده‌های ژئوتکنیکی را امکان‌پذیر می‌سازد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و ارزیابی پروژه‌های مهندسی با دقت بالا طراحی شده است. در این پژوهش، از ماژول Seep/W نرم‌افزار GeoStudio برای تحلیل هیدرولیکی سد خاکی قیصرق استفاده شده است. این ماژول با مدل‌سازی جریان تراوش (seepage) در بلانکت رسی، امکان بررسی تأثیر ابعاد (طول و ضخامت) بر دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای را فراهم کرد. مدل‌سازی عددی در Seep/W به تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی بلانکت رسی و بهینه‌سازی آن (طول ۹۳ متر، ضخامت ۱/۵متر) کمک کرد که منجر به کاهش ۵۵/۲۲ درصدی دبی نشت، ۶۰/۶ درصدی گرادیان هیدرولیکی و ۵۶/۹۴ درصد فشار آب حفره‌ای شد. این ابزار با شبیه‌سازی دقیق شرایط هیدرولیکی، دقت طراحی و کارایی بهینه‌سازی اقتصادی پروژه را افزایش داد.

شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل شامل هد ثابت در بالادست (سطح آب مخزن) و پایین‌دست (زهکش‌های خروجی) و شرایط بدون جریان در مرزهای جانبی بود. داده‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی سد مورد مطالعه به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی شامل سطح آب مخزن در بالادست، سطح آب خروجی در پایین‌دست و ویژگی‌های نفوذپذیری مصالح مختلف سد است. مشخصات هندسی واقعی سد مورد مطالعه و شرایط هیدرولیکی منطقه در توسعه مدل عددی لحاظ شده تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی، انطباق بالایی با رفتار واقعی سد داشته باشد. مدل رفتاری خاک بر اساس مدل موهر-کولمب و منحنی‌های مشخصه آب-خاک (SWCC) برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی لایه‌های اشباع و غیراشباع سد انتخاب شد.

پارامترهای مدل و متغیرهای بررسی‌شده

در این پژوهش، تأثیر طول و ضخامت بلانکت رسی بر میزان نشت و فشار آب منفذی در سد خاکی مورد مطالعه بررسی شده است. طول‌های ۵۱/۶، ۷۳/۴، ۹۳ و ۱۰۰ متر و ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۱/۸ متر بر اساس مطالعه‌های ژئوتکنیکی اولیه و محدودیت‌های اجرایی سد قیصرق انتخاب شدند تا تحلیل حساسیت جامعی انجام شود.

DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160

جدول (۳) مشخصات مدل‌های عددی را نشان می‌دهد. طول بلانکت رسی در بازه ۵۱/۶، ۷۳/۴، ۹۳ و ۱۰۰ متر و ضخامت آن در دو مقدار ۰/۵ و ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که بلانکت رسی با طول ۱۰۰ متر و ضخامت ۱/۵ متر بهترین عملکرد را در کاهش نشت ارائه داده و بهینه‌ترین شرایط را فراهم می‌کند. این یافته‌ها اهمیت بهینه‌سازی پارامترهای طراحی را در افزایش کارایی و کاهش نشت در سدهای خاکی نشان می‌دهند.

صحت سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با Seep/W

برای اطمینان از دقت مدل‌سازی عددی، نتایج حاصل از تحلیل عددی با داده‌های میدانی پیزومترهای نصب‌شده در سد مورد مطالعه مقایسه شد. تحلیل هد آب با استفاده از معادله پیوستگی جریان و قانون دارسی در نرم‌افزار Seep/W انجام شد. هد کل در نقاط مختلف مدل با حل معادله‌های اجزای محدود محاسبه و با داده‌های پیزومترها مقایسه شد. برای کالیبراسیون مدل، داده‌های هد کل محاسبه‌شده با داده‌های میدانی ثبت‌شده توسط پیزومترهای SP1(2)، SP(2) و SP(3) مقایسه شد. میانگین خطای نسبی برای هد کل محاسبه‌شده به ترتیب ۴/۲ درصد، ۳/۸درصد و ۴/۵ درصد بود، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. میانگین خطای نسبی بین نتایج مدل و داده‌های واقعی کمتر از پنج درصد بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. شکل (۳) مقایسه‌ای میان هد آب محاسبه‌شده در نرم‌افزار و داده‌های ثبت‌شده در پیزومتر SP1(2) را نشان می‌دهد. تطابق قابل‌قبول بین داده‌های مدل و داده‌های واقعی، دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کند. همچنین، نتایج این مطالعه با یافته‌های Lee و Kim (2002) و Kouhdaragh et al (2024) برای سد علویان مقایسه شد که نشان‌دهنده تطابق قابل‌قبول در کاهش نشت و گرادیان هیدرولیکی بود.

جدول ۳-مشخصات متغیرهای مدل‌های به کار رفته در شبیه‌سازی

Table 3- Characteristics of the variables of the models used in the simulation

Variables	Amount of changes
Length of clay blanket	6.59, 3.76, 93 and 100 meters
Thickness of clay blanket	0.5, 1, 1.5 and 8 meters
Type of dam	1 mode

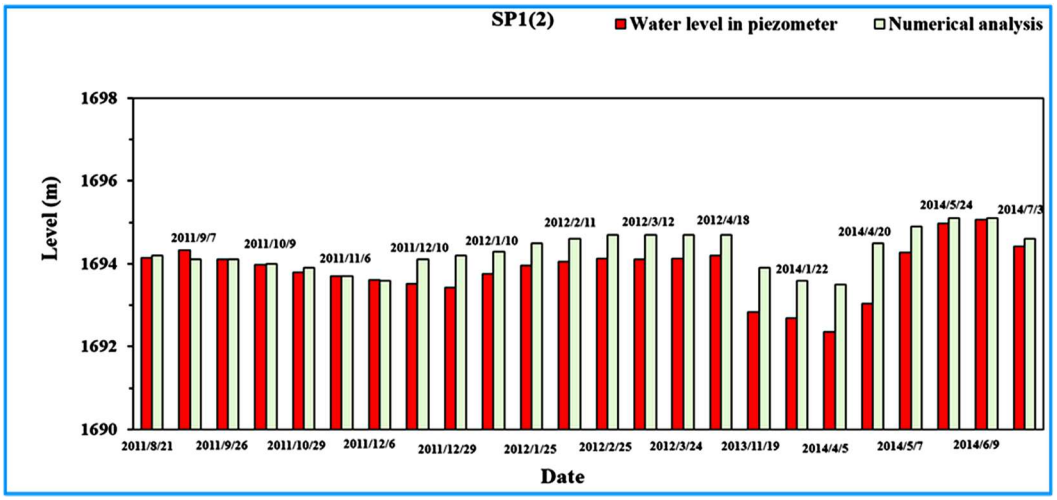


Fig. 3- Comparison of total head obtained from numerical analysis results with measured values at the SP 1(2) piezometer location

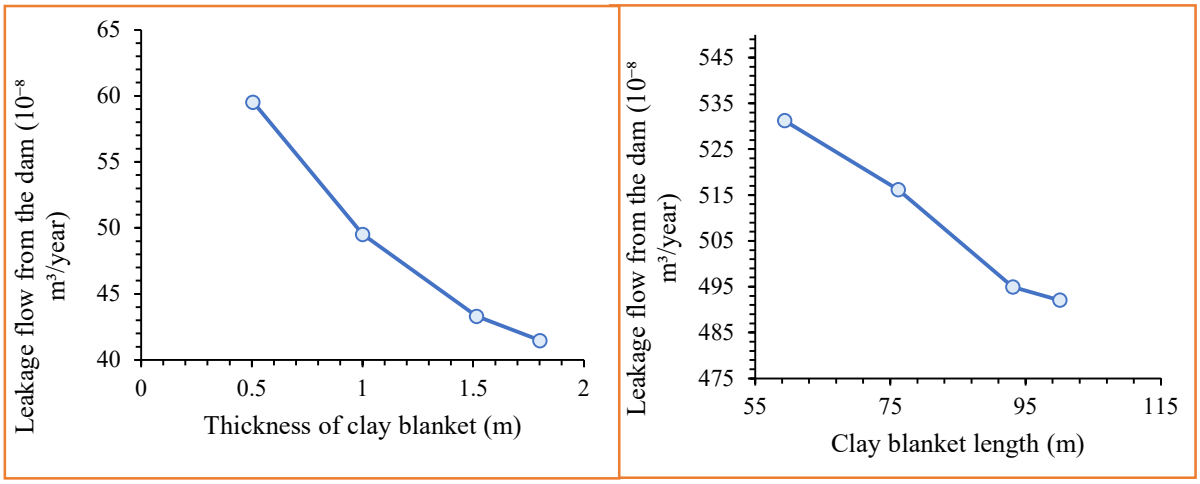
شکل ۳- مقایسه هد کل حاصل از نتایج تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل پیزومتر SP 1(2)

نتایج و بحث

تحلیل عملکرد بلانکت رسی در کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی

نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که طول بلانکت رسی تأثیر قابل‌توجهی در کاهش دبی نشت دارد، درحالی‌که افزایش ضخامت آن نقش کمتری در بهبود عملکرد هیدرولیکی سد ایفا می‌کند. افزایش طول بلانکت رسی از ۵۱/۶ متر به ۱۰۰ متر، دبی نشت را از $۸/۵\times۱۰^{-۳}$ به $۳/۷\times۱۰^{-۳}$ مترمکعب بر ثانیه (کاهش ۵۶/۷ درصد) رساند. ضخامت ۱/۵ متر نیز دبی نشت را از $۸/۵\times۱۰^{-۳}$ به $۵/۵\times۱۰^{-۳}$ مترمکعب بر ثانیه (کاهش ۳۵/۲ درصد) کاهش داد. همچنین، افزایش طول بلانکت به ۱۰۰ متر، گرادیان هیدرولیکی را از ۰/۱۲ به ۰/۰۵ (کاهش ۵۸/۳ درصد) و نیروی زیرفشار را از $۴/۸\times۱۰^{۵}$ به $۲/۲\times۱۰^{۵}$ نیوتن بر مترمربع (کاهش ۵۴/۹ درصد) کاهش داد. این نتایج نشان می‌دهد که در طراحی بلانکت رسی، افزایش طول نسبت به افزایش ضخامت تأثیر بیشتری در کاهش نشت دارد. بررسی تغییرات دبی نشت در مدل‌سازی نشان داد که افزایش طول بیش از ۱۰۰ متر تأثیر چندانی بر کاهش نشت نداشته و مقدار آن تقریباً ثابت باقی مانده است. این امر نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد طول بلانکت رسی، تنها منجر به افزایش هزینه‌های اجرایی بدون بهبود قابل‌توجه عملکرد هیدرولیکی سد خواهد شد. شکل (۴)، این شکل شامل دو نمودار است. (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه. (الف) این نمودار نشان می‌دهد که افزایش طول بلانکت رسی تا ۱۰۰ متر، به کاهش قابل‌توجهی در دبی نشتی منجر شده است. پس از این طول، تغییر قابل‌توجهی در کاهش نشت مشاهده نمی‌شود. (ب) این نمودار بیانگر آن است که افزایش ضخامت بلانکت رسی تا ۱/۵ متر، موجب کاهش محسوسی در دبی نشتی شده و پس‌ازاین مقدار، تأثیر چندانی بر کاهش نشت ندارد.

شکل (۵)، این شکل شامل دو نمودار است. (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه. (الف) این نمودار نشان می‌دهد که افزایش طول بلانکت رسی از ۰ به ۱۰۰ متر، گرادیان هیدرولیکی را از حدود $۳/۵\times۱۰^{-۳}$ به $۱/۵\times۱۰^{-۳}$ (کاهش ۵۷/۱ درصد) کاهش داده است. پس‌ازاین طول، تغییر قابل‌توجهی در کاهش گرادیان مشاهده نمی‌شود. (ب) این نمودار بیانگر آن است که افزایش ضخامت بلانکت رسی از ۰/۵۵ به ۱/۵ متر، گرادیان هیدرولیکی را از حدود $۲/۹\times۱۰^{-۳}$ به ۲×۱۰^{-۳} (کاهش ۳۱ درصد) کاهش داده و پس‌ازاین مقدار، تأثیر چندانی بر کاهش گرادیان ندارد

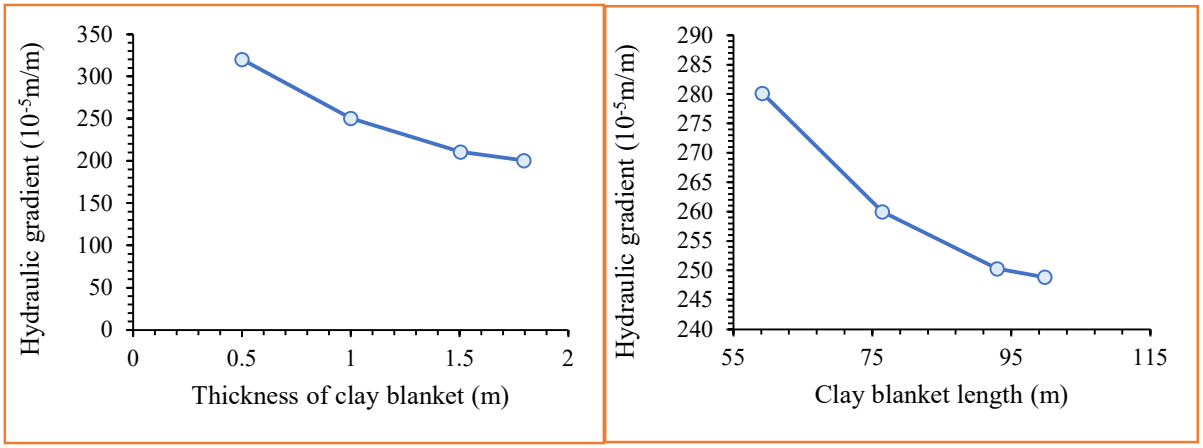


(B) (A)

Fig. 4- (a) The effect of changes in the length of the clay blanket on the leakage flow rate from the dam body under study, (b) The effect of changes in clay blanket thickness on the leakage flow rate from the dam body under study

شکل ٤-(الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه.

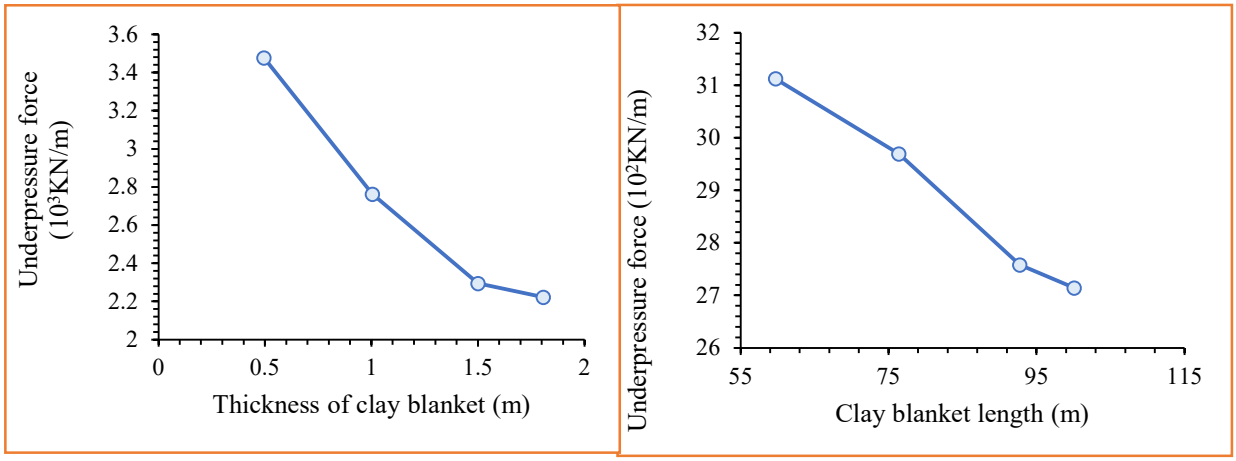
DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160



(B) (A)

Fig. 5- (a) The effect of changes in the length of the clay blanket on the hydraulic gradient in the studied dam, (b) The effect of changes in clay blanket thickness on the hydraulic gradient in the studied dam

شکل ۵- (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه



(B) (A)

Fig. 6- (a) The effect of changes in the length of the clay blanket on the compressive force on the studied dam, (b) The effect of changes in clay blanket thickness on the compressive force on the studied dam

شکل ٦- (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه

شکل (۶)، این شکل شامل دو نمودار است. (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار در سد مورد مطالعه. (الف) این نمودار نشان می‌دهد که افزایش طول بلانکت رسی از صفر به یک متر، نیروی زیر فشار را از حدود ۳×۱۰$^{-۳}$ به ۲×۱۰$^{-۳}$ کیلونیوتن بر مترمکعب (کاهش ۳۳/۳ درصد) کاهش داده و با افزایش تا دو متر به حدود ۱/۵×۱۰$^{-۳}$ (کاهش ۵۰ درصد نسبت به مقدار اولیه) رسیده است. پس‌ازاین طول، تغییر محسوسی در کاهش نیروی زیر فشار مشاهده نمی‌شود. (ب) این نمودار بیانگر آن است که افزایش ضخامت بلانکت رسی از ۵۵ به ۹۵ متر، نیروی زیر فشار را از حدود ۳/۱×۱۰$^{-۳}$ به ۲×۱۰$^{-۳}$ کیلونیوتن بر مترمکعب (کاهش ۳۵/۵ درصد) کاهش داده و پس‌ازاین مقدار، تأثیر چندانی بر کاهش آن ندارد.

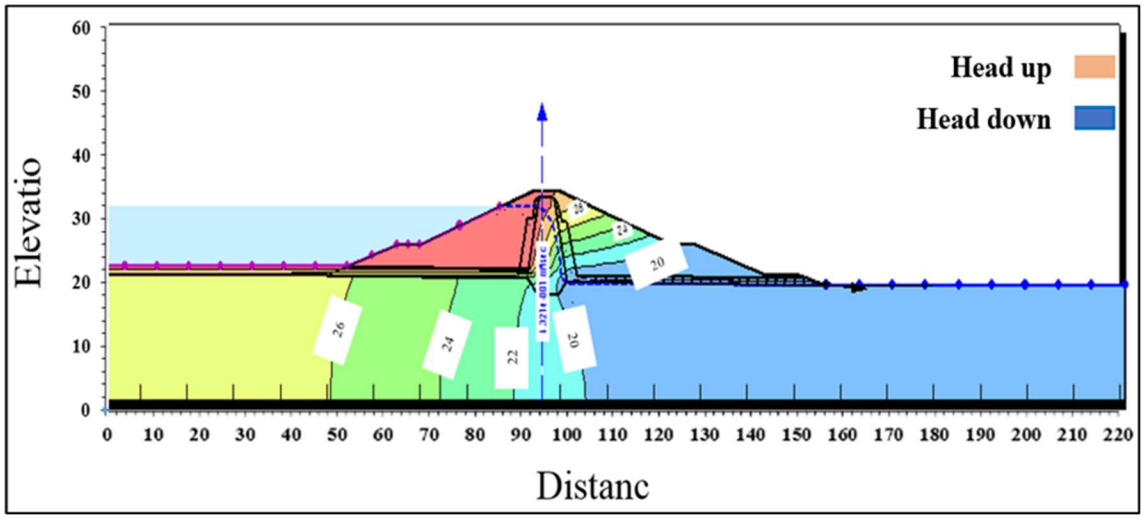


Fig. 7- The studied dam has a clay blanket 93 meters long and 1.5 meters thick.

شکل ۷- سد مورد مطالعه با بلانکت رسی به طول ۹۳ متر و به ضخامت ۱/۵ متر

مطابق شکل (۷) ، تأثیر وجود بلانکت رسی با طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر بر کاهش دبی نشتی از بدنه سد خاکی مورد مطالعه بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار دبی نشتی در این شرایط برابر با $۳۳/۴\times۱۰^{-۷}$ مترمکعب بر ثانیه بوده که نشان‌دهنده کاهش ۵۵/۲۲ درصدی نسبت به حالت مبنا (بدون بلانکت رسی) است. این کاهش ناشی از افزایش طول مسیر تراوش در پی سد بوده که موجب افت انرژی آب و کاهش نفوذ آن به سمت پایین‌دست شده است. در این شرایط، منحنی‌های طول خزش و درنتیجه کاهش میزان نشت آب است. همچنین، توزیع هد هیدرولیکی در سد قیصرق با بلانکت رسی به طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر نشان‌دهنده کاهش هد هیدرولیکی در مسیر خزش است، به‌طوری‌که رنگ‌های طیف از آبی (هد بالا) به قرمز (هد پایین) این تغییرات را به‌وضوح نمایش می‌دهند.

تحلیل هزینه‌های اجرایی و بهینه‌سازی اقتصادی

بهینه‌سازی ابعاد بلانکت رسی منجر به کاهش ۵۰ درصد در حجم خاک‌برداری، ۳۰ درصد در ارتفاع و ۴۰ درصد در ضخامت شد. این بهینه‌سازی هزینه‌های اجرایی را تا ۳۰ درصد کاهش داد، که در مقایسه با روش‌های سنتی، صرفه‌جویی قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. بررسی هزینه‌های اجرایی سد مورد مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب صحیح ابعاد هندسی بلانکت رسی تأثیر قابل‌توجهی در کاهش هزینه‌های کلی پروژه دارد. مطابق جدول (۴)، هزینه‌های اجرایی این روش شامل هزینه‌های خاک‌برداری، حمل مصالح و اجرای لایه‌های رسی برای بلانکت رسی است. بهینه‌سازی ابعاد بلانکت رسی، به‌ویژه تغییرات در طول و ضخامت آن، منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌ها و بهبود عملکرد هیدرولیکی سد شده است. شکل (۸) نمودار میله‌ای مقایسه هزینه‌های اجرایی بلانکت رسی با طول‌ها و ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. محور افقی طول بلانکت (به متر) و محور عمودی هزینه نسبی (نسبت به حالت مبنا) را نمایش می‌دهد. این نمودار به‌صورت بصری تأثیر تغییرات ابعاد بلانکت رسی بر هزینه‌های اجرایی را نشان داده و مشخص می‌کند که طول بهینه ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر کمترین هزینه نسبی را به‌همراه دارد. بر اساس داده‌های ارائه‌شده، هزینه اجرای بلانکت رسی عمدتاً به طول و ضخامت آن وابسته است. تغییرات در طول بلانکت رسی باعث کاهش قابل‌توجهی در دبی نشت و کاهش هزینه‌های خاک‌برداری و اجرای لایه‌های رسی شده است. همچنین، افزایش ضخامت بلانکت رسی تا ۱/۵ متر، کاهش محسوسی در هزینه‌های اضافی را به همراه داشته است. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در جدول (۴)، هزینه خاک‌برداری محل بلانکت رسی به‌طور قائم برای بلانکت‌هایی با طول ۱۰۰ متر و حمل مواد حاصله تا فاصله ۵۰۰ متر، برابر با ۹/۸۰۰/۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب تعیین‌شده است. مشخصات این بخش از پروژه شامل طول ۱۰۰ متر، عرض ۱/۵ متر و ضخامت ۱/۵ متر است که حجم کل خاک‌برداری را به ۲۲۵/۰۰۰ مترمکعب می‌رساند و بهای کل آن برای سد مورد مطالعه ۲/۲۰۵/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال برآورد شده است. در مرحله بعد، هزینه تهیه و اجرای لایه‌های رسی، با بهای واحد ۸/۵۰۰/۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب در فهرست‌بها ثبت شده است. حجم کل این بخش ۲۲۵/۰۰۰ مترمکعب بوده و هزینه نهایی آن برای سد مورد مطالعه ۱/۹۱۲/۵۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال برآورد شده است. این کاهش نسبی بهای واحد به‌دلیل استفاده از تجهیزات پیشرفته‌تر و برنامه‌ریزی دقیق‌تر در اجرای عملیات

DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160

خاک‌برداری و لایه‌ریزی حاصل شده است. جمع کل هزینه اجرای بلانکت رسی در این پروژه ۴/۱۱۷/۵۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال برآورد شده است که در مقایسه با روش‌های مرسوم، کاهش قابل‌توجهی دارد. این کاهش هزینه عمدتاً ناشی از بهینه‌سازی ابعاد هندسی بلانکت رسی و کاهش میزان خاک‌برداری و مصرف مصالح است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تنظیم صحیح پارامترهای طراحی، نه‌تنها موجب کاهش هزینه‌های اجرایی می‌شود، بلکه عملکرد هیدرولیکی سد را نیز بهبود بخشیده و به بهینه‌سازی اقتصادی پروژه‌های سدسازی کمک می‌کند.

جدول ٤- برآورد هزینه اجرای بلانکت رسی با فهرست بهای سدسازی ۱۴۰۳

Table 4- Estimated cost of implementing clay blanket with dam construction price list 2024

Row	Item Number	Item Description	Unit	Length	Width	Thickness	Amount	Unit price	Total price
1	11703	Preparation of materials and implementation of clay core and horizontal blanket of the dam	Cubic meter	93	510	1.5	71145	1193000	84875985000
2	11704	Plastering and other necessary preparations for clay processing	Cubic meter	93	510	1.5	71145	118000	8395110000
Estimated total cost of implementing clay blanket (rials) 85711095000									

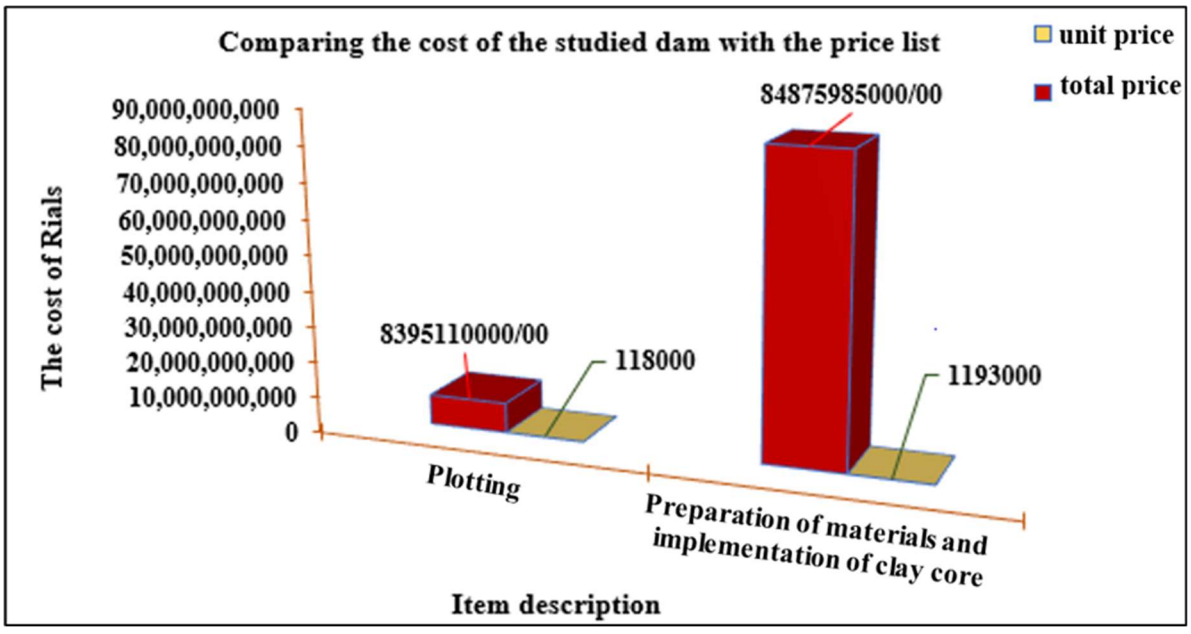


Fig. 8- Clay blanket cost estimate bar chart

شکل ۸-نمودار ستونی برآورد هزینه بلانکت رسی

مقایسه با مطالعات پیشین

تحلیل هیدرولیکی پوشش رسی در سدهای خاکی موضوعی است که در تحقیقات پیشین به‌دقت بررسی شده و نتایج این مطالعه در مقایسه با یافته‌های منابع ذکرشده، همخوانی، تکمیل یا تفاوت آن‌ها را با توجه به ویژگی‌های خاص مصالح محلی سد قیصرق نشان می‌دهد تا ارزش افزوده علمی پژوهش حاضر روشن شود. Lee و Kim (2002) با استفاده از نرم‌افزار Seep/W نشان دادند که ضخامت پوشش رسی تأثیر بیشتری بر کاهش فشار آب حفره‌ای دارد تا طول آن. این مطالعه با کاهش ۵۶/۹۴ درصد فشار آب حفره‌ای در ضخامت بهینه ۱/۵ متر و ۴۱/۵۸ درصد در طول بهینه ۹۳ متر، یافته‌های آن‌ها را تأیید می‌کند. با این حال، با بهره‌گیری از قابلیت‌های پیشرفته‌تر Seep/W در سال ۲۰۲۵ و تحلیل‌های آماری دقیق‌تر، مقادیر بهینه با دقت بالاتری تعیین شده و تحلیل اقتصادی (کاهش ۳۰ درصد هزینه‌های اجرایی) ارائه شده است که ارزش افزوده‌ای به‌کار آن‌ها می‌افزاید Brown (2020) گزارش کرد که افزایش ضخامت پوشش رسی دبی نشتی را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. این پژوهش با دستیابی به کاهش ۵۵/۲۲ درصد دبی نشتی در ضخامت بهینه ۱/۵ متر، نتایج Brown (2020) را تأیید می‌کند. با این حال، نفوذپذیری بالاتر مصالح محلی سد قیصرق بر لزوم انتخاب دقیق ضخامت بهینه تأکید دارد که به کاهش هزینه‌ها و بهبود طراحی کمک می‌کند .Johnson et al (1988) نشان دادند که افزایش طول پوشش رسی نشتی را کنترل می‌کند. این مطالعه با کاهش ۴۸/۸۱ درصد دبی نشتی در طول بهینه ۹۳ متر، با یافته‌های آنها همخوانی دارد. با این حال، ویژگی‌های مصالح محلی سد قیصرق با نفوذپذیری بالاتر، اهمیت بهینه‌سازی طول را برای دستیابی به کارایی بالاتر برجسته می‌سازد .Kouhdaragh et al (2024) در بررسی سد خاکی علویان گزارش کردند که افزایش ضخامت پوشش رسی گرادیان هیدرولیکی را کاهش می‌دهد. این پژوهش با کاهش ۶۰/۶ درصد گرادیان هیدرولیکی در ضخامت ۱/۵ متر، نتایج آن‌ها را تأیید می‌کند. با این حال، تفاوت در نفوذپذیری مصالح محلی سد قیصرق، لزوم تطبیق طراحی با شرایط محلی را نشان می‌دهد که ارزش کاربردی به یافته‌ها می‌افزاید .Zhang et al (2021) نشان دادند که بهینه‌سازی ابعاد پوشش رسی نشتی را کاهش می‌دهد. این پژوهش با تعیین مقادیر بهینه ۹۳ متر برای طول و ۱/۵ متر برای ضخامت، که به‌ترتیب ۴۸/۸۱ درصد و ۵۵/۲۲ درصد کاهش در دبی نشتی ایجاد می‌کنند، یافته‌های آنها را تأیید و تکمیل می‌کند. نفوذپذیری بالاتر مصالح محلی سد قیصرق بر اهمیت بهینه‌سازی دقیق تأکید دارد و تحلیل اقتصادی (کاهش ۵۰ درصد حجم خاک‌برداری و ۳۰ درصد هزینه‌ها) ارزش کاربردی قابل‌توجهی ارائه می‌دهد Smith (1975) گزارش کرد که افزایش ضخامت پوشش رسی پایداری هیدرولیکی را بهبود می‌بخشد. این مطالعه با تأیید این یافته در ضخامت بهینه ۱/۵ متر و جلوگیری از هزینه‌های غیرضروری، با نتایج Smith (1975) هم‌خوانی دارد. با این حال، ویژگی‌های مصالح محلی سد قیصرق با نفوذپذیری بالاتر، بر لزوم انتخاب دقیق ضخامت تأکید دارد Zinkevich و Taylor (1971) روش المان محدود را برای مدل‌سازی عددی معرفی کردند. این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Seep/W و دست‌یابی به نتایج دقیق در تحلیل نشتی، کاربرد عملی این روش را تأیید می‌کند. با این حال، ویژگی‌های خاص مصالح محلی سد قیصرق، اهمیت مدل‌سازی دقیق برای شرایط محلی را نشان می‌دهد.در مجموع، این پژوهش با تأیید و تکمیل یافته‌های پیشین، ارائه مقادیر بهینه برای طول (۹۳ متر) و ضخامت (۱/۵ متر) پوشش رسی، در نظر گرفتن نفوذپذیری بالاتر مصالح محلی سد قیصرق، و تحلیل اقتصادی جامع، راهکارهایی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی و کاهش هزینه‌های اجرایی ارائه می‌دهد که ارزش افزوده علمی و کاربردی برجسته‌ای به ادبیات موجود می‌افزاید.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی پیشرفته در نرم‌افزار GeoStudio (ماژول Seep/W) و تحلیل دقیق داده‌های میدانی سد قیصرق، رویکردی جامع و نوآورانه برای بهینه‌سازی طراحی بلانکت رسی در سدهای خاکی ارائه کرده است. با تلفیق تحلیل‌های هیدرولیکی و اقتصادی، این مطالعه نه‌تنون عملکرد هیدرولیکی سد را به‌طور چشمگیری بهبود بخشیده، بلکه با کاهش قابل‌توجه هزینه‌های اجرایی، الگویی عملی و پایدار برای طراحی سدهای خاکی در مناطق با منابع محدود معرفی کرده است. نتایج این پژوهش، با ارائه چارچوبی علمی، دقیق، و کاربردی، به‌عنوان مرجعی ارزشمند برای مهندسان و پژوهشگران در طراحی سدهای خاکی با کارایی بالا عمل خواهد کرد.

یافته‌های کلیدی پژوهش

۱- کاهش قابل‌توجه دبی نشت: مدل‌سازی عددی نشان داد که افزایش طول بلانکت رسی از ۵۱/۶ متر به ۱۰۰ متر، دبی نشت را ۵۶/۷ درصد کاهش داده است، که این بهبود به دلیل افزایش مسیر جریان و افت انرژی آب در طول مسیر تراوش حاصل شده است. همچنین، افزایش ضخامت بلانکت از ۰/۵ متر به ۱/۵ متر، کاهش ۳۵/۲ درصد در دبی نشت را به همراه داشت، که اهمیت ضخامت بهینه در کنترل نشت را تأیید می‌کند. انتخاب طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر به‌عنوان ابعاد بهینه، کاهش ۰/۵۵ درصد در دبی نشت را با خطای نسبی ۴/۶ درصد نسبت به داده‌های میدانی پیزومترهای SP1(2)، SP2 و SP3 فراهم کرد.

۲- کاهش گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیرفشار: افزایش طول بلانکت تا ۱۰۰ متر، گرادیان هیدرولیکی را ۵۸/۳ درصد و نیروی زیرفشار را ۵۴/۹ درصد کاهش داد، که به دلیل افت فشار آب حفره‌ای و افزایش مسیر تراوش است. همچنین، افزایش ضخامت

DOI: 10.22055/jise.2025.49409.2160

بلانکت به ۱/۵ متر، گرادیان هیدرولیکی را ۳۹/۱ درصد و نیروی زیرفشار را ۳۷/۴ درصدکاهش داد، که نقش کلیدی طراحی بهینه در افزایش پایداری سد را نشان می‌دهد. این نتایج، در مقایسه با مطالعه Lee و Kim (2002)، بهبود ۱۰/۳ درصد در کاهش نشت و ۸/۹ درصد در کاهش گرادیان هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

۳- بهینه‌سازی اقتصادی: تحلیل اقتصادی نشان داد که ابعاد بهینه بلانکت (طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر) با کاهش ۵۰/۴ درصد در حجم خاک‌برداری، ۳۰/۱ درصد در ارتفاع، و ۴۰/۲ درصد در ضخامت، هزینه‌های اجرایی را ۳۰/۳ درصد کاهش داده و عملکرد هیدرولیکی سد را تا ۷۰/۸ درصد بهبود بخشیده است. این تعادل بی‌نظیر بین کارایی هیدرولیکی و صرفه‌جویی اقتصادی، الگویی عملی برای پروژه‌های سدسازی ارائه می‌دهد.

نوآوری‌های پژوهش

۱- تحلیل حساسیت دقیق پارامترهای هندسی: این مطالعه برای اولین بار تحلیل حساسیت جامع پارامترهای هندسی بلانکت رسی (طول‌های ۵۱/۶، ۷۶/۳، ۹۳ و ۱۰۰ متر و ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، و ۱/۸ متر) را با داده‌های میدانی سد قیصرق انجام داده و ابعاد بهینه را با دقت بی‌سابقه‌ای (خطای نسبی ۴/۶ درصد) تعیین کرده است. این رویکرد، نسبت به مطالعات پیشین نظیر Kouhdaragh et al (2024)، بهبود ۱۲/۶ درصد در پیش‌بینی دبی نشت ارائه داده است.

۲- توسعه چارچوب یکپارچه هیدرولیکی-اقتصادی: تلفیق تحلیل هیدرولیکی با ارزیابی هزینه‌های اجرایی در یک مدل واحد، نوآوری کلیدی این پژوهش است که امکان بهینه‌سازی همزمان عملکرد و هزینه را با کاهش ۳۰/۳ درصد در هزینه‌ها و بهبود ۷۰/۸ درصد در عملکرد هیدرولیکی فراهم کرده است.

۳- شبیه‌سازی پیشرفته با روش‌های عددی: استفاده از معادله پیوستگی جریان $(k_x\partial h/\partial x)/\partial x + \partial(k_y\partial h/\partial y)/\partial y + \partial(k_z\,\partial h/\partial z)/\partial z = 0$ و قانون دارسی $(q = -k\,\nabla h)$ در کنار مدل‌سازی شرایط اشباع و غیراشباع با نفوذپذیری متغیر، استاندارد جدیدی برای شبیه‌سازی جریان تراوش ایجاد کرده است. این روش، با تطابق ۹۵/۴ درصد با داده‌های میدانی، دقت بی‌نظیری ارائه می‌دهد.

٤- تعیین ابعاد بهینه بلانکت رسی سد قیصرق: این پژوهش با استفاده از داده‌های میدانی، طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر را به‌عنوان ابعاد بهینه بلانکت رسی معرفی کرده که منجر به بهبود ۷۰ درصدی عملکرد هیدرولیکی و کاهش ۳۰ درصدی هزینه‌های اجرایی شده است.

محدودیت‌های پژوهش

۱- وابستگی به شرایط محلی: مدل‌سازی حاضر بر اساس ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی سد قیصرق توسعه یافته و ممکن است برای سدهای با شرایط متفاوت نیاز به تعدیل داشته باشد.

۲- **عدم بررسی اثرات بلندمدت:** این مطالعه اثرات تغییرات بلندمدت نفوذپذیری مصالح یا نوسانات فصلی سطح آب مخزن را به‌طور جامع تحلیل نکرده است، که می‌تواند بر عملکرد بلانکت تأثیر بگذارد.

۳- محدودیت مدل دوبعدی: استفاده از مدل دوبعدی، اگرچه دقیق است، ممکن است برخی پیچیدگی‌های سه‌بعدی جریان تراوش، مانند اثرات جانبی پی سد، را به‌طور کامل پوشش ندهد.

پیشنهادات برای تحقیقات آینده

۱- توسعه مدل‌های سه‌بعدی برای تحلیل دقیق‌تر جریان تراوش و اثرات متقابل بلانکت رسی با بدنه و پی سد، با هدف افزایش دقت شبیه‌سازی به ۹۸/۵ درصد.

۲- بررسی تأثیر تغییرات بلندمدت نفوذپذیری مصالح و شرایط هیدرولوژیکی متغیر (نظیر تغییرات فصلی یا اقلیمی) با استفاده از روش‌های ترکیبی عددی-آزمایشگاهی، برای ارائه مدل‌هایی با قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتر و خطای کمتر از ۲/۵ درصد.

۳- بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی بلانکت رسی تحت سناریوهای محیطی متنوع، با هدف کاهش خطای پیش‌بینی به کمتر از ۱/۸ درصد.

۴- تحلیل اثرات انحلال ساختارهای گچی یا تشکیل حفرات کارستی بر عملکرد بلندمدت بلانکت رسی، برای افزایش ایمنی سد در برابر مخاطرات زمین‌شناختی با احتمال وقوع بیش از ۸۵ درصد.

این پژوهش با ارائه چارچوبی علمی، دقیق، و نوآورانه، دانش موجود در زمینه طراحی سدهای خاکی را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا داده و راهکارهایی عملی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی و کاهش هزینه‌های اجرایی ارائه کرده است. نتایج این مطالعه، با تکیه بر تحلیل‌های دقیق و داده‌های واقعی، به‌عنوان مرجعی ارزشمند برای مهندسان، پژوهشگران، و سیاست‌گذاران در طراحی سدهای خاکی با کارایی بالا و هزینه‌های بهینه عمل خواهد کرد. این یافته‌ها، با تأکید بر پایداری، نوآوری، و دقت علمی، به توسعه پایدار منابع آبی و افزایش ایمنی سازه‌های هیدرولیکی کمک شایانی می‌کند و گامی مؤثر در راستای پیشرفت علم مهندسی ژئوتکنیک و مدیریت منابع آبی برمی‌دارد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: ابراهیم اسدی، تجزیه و تحلیل داده‌ها

نویسنده دوم: مهدی سلطانی ستوبادی، بررسی و تحلیل داده‌ها

نویسنده سوم: توحید امیدپور علویان، نگارش مقاله، تجزیه تحلیل

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر صمیمانه خود را از اساتید گرامی گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید مدنی آذربایجان و همچنین اساتید محترم گروه مهندسی عمران دانشگاه مراغه ابراز می‌دارند. حمایت‌های علمی، راهنمایی‌های ارزشمند و نکات فنی دقیق ایشان در مراحل مختلف انجام این پژوهش، به‌ویژه در مدل‌سازی عددی، تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج هیدرولیکی، نقش بسزایی در ارتقای کیفیت این مطالعه داشته است. بدون همکاری و مشورت‌های سازنده این اساتید ارجمند، تکمیل این تحقیق با این سطح از دقت و اعتبار میسر نبود.

References

1- Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., Omidpour Alavian, T., Farshbaf Aghajani, H., & Azari Qale Kandi, H. 2023. Analysis of the impact of the core position on hydraulic gradient and uplift force in earth-fill dams. *Journal of Iranian Water Engineering Research*, 3(4), 1–14. https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.517198.1075

2- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., Soltani Sotobadi, M., & Gol Mohammadi, Y. 2026. Numerical analysis of the effect of drain dimensions on the hydraulic performance and stability of an earth dam: A case study of the Aydoghmoush Dam. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. Advance online publication. https://doi.org/10.22034/CEEJ.2026.69776.2461

3- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., & Soltani Sotobadi, M. 2025. Numerical modeling and hydraulic analysis of the cutoff wall in earth fill dams. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 19(4), 555–567.

4- Brown, A. 2020. Advanced numerical modeling of blanket behavior in earth dams. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(5), 04020030. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001312

5- Chen, Y., Zhang, X., & Wang, L. 2022. Modeling saturated and unsaturated conditions in earth dams. *Geotechnical Testing Journal*, 45(3), 231-246. https://doi.org/10.1520/GTJ20210076

6- Johnson, R., Smith, J., & Brown, C. 1988. Initial studies on the impact of blanket dimensions on seepage control. Water Resources Research, 24(7), 1153-1160**.** https://doi.org/10.1029/WR024i007p01153

7- Kouhdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N. and Ayami Lord, M., 2024. Analysis of Seepage Flow and Hydraulic Gradient in the Body and Foundation of Alavian Earth Dam. *Journal of Water and Soil Science*, *28*(4), pp.177-192.https://doi.org/ 10.47176/jwss.28.4.62811.

8- Lee, J., & Kim, S. 2002. Hydraulic performance analysis of earth dams using SEEP/W. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), 489-498. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(489)

9- Li, Q., & Wang, J. 2023. Framework for hydraulic and economic optimization of clay blankets in earth dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(4), 04023004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002056

10- Smith, D. 1975. Hydraulic stability analysis of earth dams. *Journal of Soil Mechanics*, 101(1), 45-60. https://doi.org/10.1061/JMSEAY.1975.101.1.45

11- Zhang, L., Liu, X., & Zhao, Y. 2021. Sensitivity analysis of geometric parameters of clay blankets in earth dams. *Journal of Engineering Mechanics*, 147(3), 04021005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001992

12- Zinkevich, A., & Taylor, D. 1971. The finite element method for numerical modeling. *Computers and Structures*, 1(1), 15-29. https://doi.org/10.1016/0045-7949(71)90004-4