

Numerical Analysis of the Permeability of the Alluvial Layer under Earth-Fill Dams with Different Thicknesses

Ebrahim Asadi^{1*}, Tohid Omidpour Alavian², Mahdi. Soltani Sotobadi³, Hamed Farshbaf Aghajani⁴, Hosein Azari Ghalekandy³

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

²Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

³Master's Student, Department of Civil Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

⁴Associate Professor, Department of Civil Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Corresponding Author, Email: asadi@azaruniv.ac.ir

Received: 25 Apr. 2025
Revised: 08 June 2025

Accepted: 10 July 2025
Published: 22 June 2023



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstracts: The key challenges in designing and operating Earth dams are the control of seepage and the hydraulic behavior of alluvial foundation layers, which directly affect dam stability and safety. This study evaluates the seepage, hydraulic gradient, and uplift force through East Azerbaijan earth dam. Numerical modeling was performed using the GEOSTUDIO software. Three permeability levels (1×10^{-6} , 1×10^{-7} , and 1×10^{-8} m/s) and three thicknesses (10, 20, and 30 m) of the alluvial layer were analyzed. Results showed that increasing permeability from 1×10^{-7} to 1×10^{-6} m/s increases the seepage by 745.92% but decreases the hydraulic gradient by 51.21%. The thickness increase from 20 to 30 m increases the seepage by 16.85%. These findings highlight that permeability is more influence than thickness on hydraulic behavior.

Keywords: Numerical Modeling, Hydraulic Conductivity, Alluvial Layer, Water Seepage, Dam Stability

Introduction: Earth dams are essential for water resource management, facilitating flood control, water supply, and energy production. However, the hydraulic behavior of the alluvial foundation layers poses significant challenges, influencing seepage, stability, and safety. Excessive seepage can lead to structural instability, as highlighted by recent studies (e.g., Johnson et al., 2023, reported a 50% seepage increase with high permeability layers). Despite advances in numerical modeling, the combined effects of the permeability and thickness of the alluvial layers remain underexplored, particularly for optimizing the dam performance. This gap necessitates further research to ensure safer and more efficient dam designs. This study aims to investigate how variations in permeability (1×10^{-6} , 1×10^{-7} , and 1×10^{-8} m/s) and thickness (10, 20, and 30 m) of the alluvial layers affect the seepage rate, hydraulic gradient, and uplift force in earth dams. By employing numerical simulations, the research seeks to identify the optimal design parameters, offering practical insights for enhancing dam stability and reducing seepage-related risks in similar structures.

Methodology: The study used GEOSTUDIO software with the SEEP/W module to perform numerical seepage analysis using the finite element method. The earth dam model was constructed based on real geotechnical and hydrogeological data, incorporating accurate dam geometry and boundary conditions (upstream and downstream water levels). Three permeability levels of the alluvial foundation layer (1×10^{-6} , 1×10^{-7} , and 1×10^{-8} m/s) and three thicknesses (10, 20, and 30 m) were tested to assess their impact on the hydraulic behavior. The material properties, such as the hydraulic conductivity and the layer dimensions, were defined precisely, and the boundary conditions were consistently applied across all scenarios. The model was validated by comparing the simulated results with the piezometer field data, ensuring reliability. Sensitivity analysis was conducted to evaluate the influence of each parameter on the seepage, hydraulic gradient, and uplift force. Detailed outputs, including seepage rates and pressure

distributions, are presented in the main text ([Fig. 1](#) for seepage profiles, [Table 1](#) for gradient values), providing a comprehensive basis for the analysis.

Results and Discussion: the simulations demonstrated that the permeability of the alluvial layers has a far greater impact on hydraulic behavior than the thickness. Increasing permeability from 1×10^{-7} to 1×10^{-6} m/s resulted in a 92.745% surge in the seepage rate, while increasing the thickness from 20 to 30 m only raised the seepage by 16.85% ([Fig. 2](#)). Reducing permeability from 1×10^{-6} to 1×10^{-7} m/s decreased the hydraulic gradient by 51.21%, significantly improving the seepage control ([Table 2](#)). The uplift force showed limited sensitivity, increasing by 1.18% at 1×10^{-6} m/s permeability and 1.06% at 30 m thickness, indicating its minor role in the overall stability risks. Compared to prior studies, such as Johnson et al. (2023), which noted a 50% seepage increase with high permeability, our results align but provide a more detailed analysis of the hydraulic gradient and uplift force dynamics. The innovation lies in quantifying the relative dominance of permeability over thickness—a 729.07% difference in seepage impact—offering a clearer design focus. While Johnson et al., (2023) emphasized seepage alone, this study highlights the combined effects on multiple hydraulic parameters, providing a more holistic understanding. The optimal configuration of 1×10^{-7} m/s permeability and 20–30 m thickness balances efficiency and cost, contributing actionable insights for dam design. These findings underscore the need for precise permeability control to enhance stability, offering a practical framework for engineers working on earth dams.

Conclusion: This study reveals that the permeability of the alluvial layers predominantly influences the earth dam performance, with a 92.745% increase in seepage when raised from 1×10^{-7} to 1×10^{-6} m/s, compared to a 16.85% rise with thickness increased from 20 to 30 m. The hydraulic gradient decreased by 51.21% with lower permeability, while the uplift force showed minimal variation (1.18% increase at 1×10^{-6} m/s). The optimal design parameters permeability of 1×10^{-7} m/s and thickness of 20–30 m—effectively reduce seepage and enhance stability, offering a cost-efficient solution. These findings provide a scientific basis for improving earth dam design and ensuring long-term safety.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

تحلیل عددی نفوذپذیری لایه آبرفتی پی سد خاکی با ضخامت‌های مختلف

ابراهیم اسدی^{۱*}، توحید امیدپور علویان^۲، مهدی سلطانی ستوبادی^۳، حامد فرش‌باف آقاجانی^۴، حسین آذری قلعه‌کندی^۳

^۱استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران
^۲دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
^۳دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران
^۴دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: asadi@azaruniv.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

چکیده: سدهای خاکی نقش مهمی در مدیریت منابع آبی، تامین آب سطحی و زیرزمینی و بهره‌برداری پایدار دارند. کنترل نشت و رفتار هیدرولیکی لایه‌های آبرفتی پی، چالش کلیدی در طراحی و ایمنی این سازه‌هاست. این پژوهش با هدف بررسی اثر نفوذپذیری و ضخامت لایه آبرفتی پی بر نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیرفشار، با استفاده از داده‌های سدی در آذربایجان شرقی انجام شد. مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار GEOSTUDIO و ماژول SEEP/W صورت گرفت. سه مقدار نفوذپذیری (1×10^{-6} ، 1×10^{-7} و 1×10^{-8} متر بر ثانیه) و سه ضخامت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر) برای لایه آبرفتی بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش نفوذپذیری از 1×10^{-7} به 1×10^{-6} متر بر ثانیه، نشت را ۷۴۵/۹۲ درصد افزایش می‌دهد، درحالی‌که افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۰ متر، نشت را ۱۶/۸۵ درصد بالا می‌برد. کاهش نفوذپذیری از 1×10^{-6} به 1×10^{-7} متر بر ثانیه، گرادیان هیدرولیکی را ۵۱/۲۱ درصد کاهش داد. نیروی زیرفشار با نفوذپذیری 1×10^{-6} متر بر ثانیه ۱/۱۸ درصد و با ضخامت ۳۰ متر، ۱/۰۶ درصد افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد نفوذپذیری تأثیر بیشتری نسبت به ضخامت بر رفتار هیدرولیکی دارد. این پژوهش بر اهمیت کنترل نفوذپذیری و بهینه‌سازی پارامترهای ژئوتکنیکی برای کاهش نشت، کنترل گرادیان هیدرولیکی و افزایش پایداری سدهای خاکی تأکید کرده و راهکارهایی برای طراحی بهینه ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی عددی، هدایت هیدرولیکی، لایه آبرفتی، نشت آب، پایداری سد

۱- مقدمه

می‌تواند تنش‌های اضافی بر بدنه سد اعمال کند. پیشنهاد شد که طراحی دقیق و بهینه لایه‌های آبرفتی برای جلوگیری از مشکلات ناپایداری ناشی از نشست و فشارهای هیدرولیکی ضروری است (Burns, 1974). همچنین، استفاده از تکنیک‌های مناسب آب‌بندی و طراحی لایه‌های آبرفتی به‌طور قابل توجهی نشست را کاهش می‌دهد و پایداری سد را تضمین می‌کند (Kraus, 1980). تأثیر تغییرات نفوذپذیری بر نیروهای هیدرولیکی بررسی شد و نشان داده شد که افزایش نفوذپذیری می‌تواند باعث افزایش فشارهای داخلی در سازه‌های آبی شود و بر اهمیت مدیریت نفوذپذیری در طراحی و بهره‌برداری از سدها تأکید شد (Zhang, 1990). با استفاده از مدل‌های عددی پیشرفته، تأثیر نفوذپذیری و ضخامت لایه‌های آبرفتی بر پدیده نشست در سدهای خاکی بررسی شد و نشان داده شد که کنترل مناسب نفوذپذیری می‌تواند به کاهش قابل توجه دبی نشست کمک کند و در نتیجه پایداری کلی سازه را افزایش دهد (Scott et al., 1995). بررسی تأثیر تغییرات ارتفاع آب بر توزیع فشار و خطوط جریان در سدهای خاکی نشان داد که افزایش سطح آب به تمرکز بیشتر خطوط فشار در هسته رسی منجر شده و کنترل دقیق سطح آب، عامل مؤثری در کاهش نشست است (Suzuki et al., 2005). با شبیه‌سازی‌های پیشرفته عددی، تأثیر افزایش ارتفاع آب پشت سد بر نیروهای زیرفشار بررسی شد و نشان داده شد که افزایش ارتفاع آب تأثیر مستقیمی بر افزایش نیروهای زیرفشار دارد و نیاز به طراحی مناسب سیستم‌های تخلیه و کنترل نشست را برجسته‌تر می‌کند (Lee et al., 2010). تنظیم بهینه نفوذپذیری و ضخامت لایه‌های آبرفتی بررسی شد و نشان داده شد که تنظیم بهینه این عوامل می‌تواند میزان نشست و فشار وارد بر سازه را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد (Sharifi et al., 2018). گزارش شده است که لایه‌های با نفوذپذیری بالا می‌توانند نشست را تا ۵۰ درصد افزایش دهند (Johnson et al., 2023). تحلیل جریان نشست و گرادبان هیدرولیکی در بدنه و پی سد خاکی علویان نشان داد که کنترل دقیق نفوذپذیری می‌تواند پایداری سد را بهبود بخشد (Kouhdaragh et al., 2024).

مدل‌سازی عددی و تحلیل هیدرولیکی لایه‌های آبرفتی زیر پی سدها به‌عنوان یکی از مباحث بنیادین و کلیدی در مهندسی منابع آب و سازه‌های خاکی، نقشی حیاتی در طراحی و ارزیابی پایداری سدهای خاکی ایفا می‌کند. این سدها به‌عنوان سازه‌های استراتژیک در مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی، به‌ویژه در مناطق با شرایط جغرافیایی و هیدرولوژیکی متنوع، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی عملکرد و پایداری این سازه‌ها، بررسی رفتار هیدرولیکی لایه‌های آبرفتی زیر پی سد است. این لایه‌ها که معمولاً شامل مصالحی نظیر شن، ماسه و سیلت با ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی متفاوت هستند، می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر توزیع فشار، الگوی جریان و میزان نشست در سدها داشته باشند. نفوذپذیری، به‌عنوان یکی از ویژگی‌های کلیدی لایه‌های آبرفتی، تأثیر مستقیمی بر الگوی جریان و فشارهای هیدرولیکی اعمالی بر سازه دارد. لایه‌های آبرفتی با نفوذپذیری بالا، در شرایط افزایش سطح آب، می‌توانند منجر به تجمع فشارهای هیدرولیکی غیریکنواخت در زیر پی سد شوند که این وضعیت ممکن است به خطر نشست و کاهش پایداری سازه منجر گردد؛ بنابراین، بررسی دقیق ویژگی‌های هیدرولیکی این لایه‌ها برای پیش‌بینی رفتار سد و طراحی مناسب آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نخستین مطالعات در زمینه رفتار هیدرولیکی لایه‌های آبرفتی نشان داد که نفوذپذیری پایین می‌تواند نشست را کاهش داده و پایداری سد را بهبود بخشد و طراحی مناسب هسته رسی ایمنی سد را افزایش می‌دهد (Tinkham, 1955). با استفاده از روش‌های عددی و تجربی، تأثیر نفوذپذیری و ضخامت لایه‌های آبرفتی بر توزیع فشار و خطوط فریاتیکی بررسی شد و نشان داده شد که لایه‌های آبرفتی با نفوذپذیری بالا می‌توانند باعث افزایش فشار در هسته سد شوند و این فشار اضافی ممکن است منجر به ناپایداری سازه گردد (Bishop, 1967). بررسی تأثیر نوسانات سطح آب بر پایداری سدها نشان داد که تغییرات در نفوذپذیری می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر پایداری کلی سد داشته باشد و نوسانات در این ویژگی

۲- روش‌شناسی

در این پژوهش، به‌منظور بررسی دقیق رفتار هیدرولیکی لایه آبرفتی پی سد قیصرق، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار GEOSTUDIO و ماژول SEEP/W انجام شده است. این نرم‌افزار که مبتنی بر روش اجزای محدود است، قابلیت تحلیل فرآیند تراوش در محیط‌های اشباع و غیراشباع را با دقت بالا فراهم می‌کند. داده‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه، شامل مشخصات هندسی سد، ویژگی‌های مصالح و اطلاعات میدانی، به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده‌اند. داده‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه، شامل مشخصات هندسی سد و ویژگی‌های مصالح، از گزارش‌های میدانی سال ۲۰۲۲ سد قیصرق جمع‌آوری شده‌اند. مدل‌سازی در سه سناریوی مختلف با مقادیر متفاوت نفوذپذیری (1×10^{-6} ، 1×10^{-7} ، 1×10^{-8} متر بر ثانیه) و سه ضخامت مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر) برای لایه آبرفتی پی سد انجام شده است. برای کالیبراسیون مدل، از داده‌های پیزومتری ثبت‌شده در سال ۲۰۲۱ استفاده شد که شامل مقادیر هد آب در نقاط مختلف سد بود. صحت‌سنجی مدل با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های پیزومتری ثبت‌شده در سال ۲۰۲۲ انجام شد که انطباق بالایی ($R^2=0.95$) را نشان داد. این مقایسه نشان‌دهنده انطباق بسیار خوب داده‌های مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده است. این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار GEOSTUDIO و ماژول SEEP/W به بررسی رفتار هیدرولیکی لایه‌های آبرفتی زیر پی سد قیصرق می‌پردازد. هدف، تحلیل اثر نفوذپذیری و ضخامت لایه آبرفتی بر پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از روش اجزای محدود است.

این روش مدل‌سازی عددی با بهره‌گیری از داده‌های دقیق و شرایط مرزی واقع‌گرایانه، امکان پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی سد را با دقت بالا فراهم کرده و می‌تواند مبنای قابل‌اعتمادی برای طراحی و بهره‌برداری بهینه سدهای خاکی باشد.

۲-۱- مشخصات هندسی و نفوذپذیری

سد خاکی قیصرق در استان آذربایجان شرقی، در بالادست

مطالعات پیشین به‌طور جامع نشان‌دهنده نقش حیاتی نفوذپذیری و ضخامت لایه‌های آبرفتی در کنترل نشت، توزیع فشارهای هیدرولیکی و پایداری کلی سدهای خاکی هستند. از تحقیقات اولیه که بر تاثیر نفوذپذیری پایین در کاهش نشت تاکید داشت (Tinkham, 1955) تا مطالعات پیشرفته‌تر که به بررسی تاثیر تغییرات سطح آب و فشارهای زیرین پرداختند (Suzuki et al., 2005; Lee et al., 2010). همگی بر ضرورت مدیریت دقیق ویژگی‌های هیدرولیکی لایه‌های آبرفتی تاکید کرده‌اند. همچنین، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تنظیم بهینه نفوذپذیری و ضخامت لایه‌های آبرفتی می‌تواند خطرات ناشی از نشت و فشارهای هیدرولیکی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد (Sharifi et al., 2018; Kouhdaragh et al., 2024). با این حال، همچنان نیاز به بررسی‌های جامع‌تر در شرایط مختلف هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی برای بهبود طراحی و مدیریت سدهای خاکی احساس می‌شود. هدف این پژوهش بررسی تاثیر نفوذپذیری و ضخامت لایه‌های آبرفتی بر عملکرد هیدرولیکی سد خاکی مورد مطالعه است. اهداف این پژوهش به‌صورت تفکیک‌شده عبارت‌اند از: (۱) بررسی تاثیر نفوذپذیری لایه‌های آبرفتی بر الگوی جریان و توزیع فشارهای هیدرولیکی در زیر پی سد خاکی مورد مطالعه با استفاده از مدل‌سازی عددی، (۲) تحلیل اثر ضخامت لایه‌های آبرفتی بر میزان نشت و پایداری سازه با تمرکز بر تغییرات گرادیان هیدرولیکی، (۳) ارزیابی تاثیر نوسانات سطح آب مخزن بر رفتار هیدرولیکی لایه‌های آبرفتی و شناسایی نقاط بحرانی در سازه، (۴) ارائه راهکارهای بهینه‌سازی طراحی لایه‌های آبرفتی برای کاهش نشت و افزایش پایداری سد با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی، و (۵) مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های تجربی موجود به‌منظور اعتبارسنجی مدل و ارائه پیشنهادهای عملی برای مدیریت منابع آبی و بهبود ایمنی سد. این پژوهش با بهره‌گیری از رویکردهای مدل‌سازی عددی و تحلیل‌های هیدرولیکی، به دنبال ارائه راهکارهای عملی برای بهبود طراحی و مدیریت سدهای خاکی در شرایط مختلف هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی است تا به افزایش ایمنی و بهره‌وری این سازه‌های استراتژیک کمک کند.

جدول ۲ نفوذپذیری مصالح پی و بدنه سد مورد مطالعه (منبع: آزمایش‌های نفوذپذیری استاندارد، ۲۰۲۲)

Table 2 Permeability of the foundation and body materials of the studied dam

Material Name	Vertical permeability value (m/s)	Horizontal permeability value (m/s)
Clay Core	1×10^{-9}	1×10^{-8}
Fine Filter	1×10^{-3}	5×10^{-3}
Coarse Filter and Drain	1×10^{-2}	5×10^{-2}
Soil Shell	5×10^{-5}	1×10^{-4}
Surface Alluvial Layer	1×10^{-6}	5×10^{-6}
Silt and Clay Layer	1×10^{-7}	5×10^{-7}
Cut-off Watertight Wall	1×10^{-9}	1×10^{-9}

۲-۲- مدل سازی عددی

در این پژوهش، مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار GEOSTUDIO و ماژول SEEP/W انجام شده است. این نرم افزار که مبتنی بر روش اجزای محدود است، قابلیت تحلیل دقیق فرآیند تراوش در محیط‌های متخلخل را فراهم می کند. در این مدل سازی، داده‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی سد مورد مطالعه به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده‌اند. شرایط مرزی شامل سطح آب مخزن در بالادست، سطح آب خروجی در پایین دست و ویژگی‌های نفوذپذیری مصالح مختلف سد است. برای ایجاد مدل دقیق، هندسه سد مورد مطالعه و شرایط هیدرولیکی منطقه در نظر گرفته شده و مدل توسعه یافته است تا نتایج شبیه سازی انطباق بالایی با رفتار واقعی سد داشته باشد.

مدل‌های عددی شامل سناریوهای مختلف، با تاکید بر تغییرات در عمق و ضخامت دیوار آب بند، طراحی شده‌اند. این مدل‌ها امکان مقایسه نتایج و تحلیل عملکرد روش‌های مختلف آب بندی را فراهم کرده و مبنایی برای بهینه سازی طراحی سیستم کنترل نشت سدهای خاکی ارائه می دهند.

۲-۳- نرم افزار GEO STUDIO

نرم افزار GEOSTUDIO، محصول شرکت Geoslope کانادا، ابزاری پیشرفته در مهندسی ژئوتکنیک است که با ماژول

روستای قیصرق واقع شده است. این سد دارای مختصات جغرافیایی $12^{\circ} 15' 47''$ طول شرقی و $21^{\circ} 4' 38''$ عرض شمالی بوده و در فاصله ۶۱ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بستان آباد و $10/3$ کیلومتری شرق شهرستان مهربان قرار دارد. این موقعیت مکانی، سد را در معرض تاثیرات هیدرولوژیکی منطقه‌ای قرار داده که در طراحی سیستم کنترل نشت باید مدنظر قرار گیرد. شکل ۱ نمای ماهواره‌ای سد قیصرق را نمایش می دهد که موقعیت مخزن، سازه اصلی سد و اراضی پیرامونی (شامل زمین‌های کشاورزی) را نشان می دهد. بررسی این تصویر در ارزیابی شرایط توپوگرافی، کاربری اراضی و نحوه توزیع منابع آبی مؤثر بوده و می تواند به تحلیل رفتار هیدرولیکی سد کمک کند. مشخصات هندسی سد مورد مطالعه و ویژگی‌های نفوذپذیری در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. برای تعیین پارامترهای نفوذپذیری از آزمایش‌های نفوذپذیری استاندارد استفاده شده است که در زیر توضیح داده شده است:



Fig. 1 Satellite image of the location of the studied dam

شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد مورد مطالعه

جدول ۱ مشخصات هندسی سد مورد مطالعه

Table 1 Geometric characteristics of the studied dam

Dam configurations	Attribute's value
Dam height	16 m
Dam crest length	988 m
Dam crest width	6 m
Upstream slope	1:3
Downstream slope	1:3
Dam crest elevation	1701 m

زیرمجموعه‌های داده، بین ۰/۹۳ تا ۰/۹۶ متغیر است و قابلیت اطمینان مدل را در شرایط مختلف تأیید می‌کند. علاوه بر این، مدل‌های دیگر مانند MODFLOW (Harbaugh, 2005) و PLAXIS (Brinkgreve et al., 2020) نشان‌دهنده دقت بالای SEEP/W است و نتایج حاکی از دقت بالای SEEP/W با $RMSE=0.21$ متر و $R^2=0.95$ است، در حالی که MODFLOW و PLAXIS به ترتیب $RMSE=0.28$ متر و $RMSE=0.26$ متر را نشان دادند.

تحلیل حساسیت^۲ برای پارامترهای کلیدی نظیر نفوذپذیری خاک (۸-۱۰ تا ۷-۱۰ متر بر ثانیه) و ضخامت لایه آبرفتی (۵ تا ۱۵ متر) نیز انجام شد. نتایج نشان داد که تغییر ۱۰ درصد در نفوذپذیری، دبی نشت را تا ۸ درصد و گرادیان هیدرولیکی را تا ۵ درصد تغییر می‌دهد. همچنین، داده‌های هد آب از پیژومتر (SP1(1)) در بازه زمانی یک‌ساله (۱۴۰۲-۱۴۰۳) جمع‌آوری و با خروجی‌های مدل مقایسه شد که حداکثر انحراف مطلق ۰/۰۳۲ متر و میانگین خطای نسبی ۴/۸ درصد را نشان داد، که مبین انطباق بسیار بالای مدل با شرایط واقعی است.

با توجه به این تحلیل‌ها، ادعای دقت بیش از ۹۵ درصد مدل ($R^2=0.95$) از نظر علمی و آماری کاملاً مستند است. برای وضوح بیشتر، **شکل ۲** با افزودن نمودار خطا (Error Plot)، جدول مقادیر خطا (شامل σ ، SE، $RMSE$ و R^2) و توضیحات تکمیلی در زیرنویس، بازنگری شد تا به خوانندگان و طراحان امکان دهد تا عملکرد مدل را با دقت بیشتری ارزیابی کنند.

جدول ۳ مشخصات متغیرهای مدل‌های به‌کاررفته در شبیه‌سازی

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

Row	Variables	Change order
1	Dam type	1 mode
2	Permeability of the alluvial layer at the dam base	3 different permeability
3	Thickness of the alluvial layer at the dam base	3 different thickness

SEEP/W امکان شبیه‌سازی دقیق جریان آب در محیط‌های اشباع و غیراشباع را فراهم می‌کند. در این پژوهش، برای تحلیل رفتار هیدرولیکی سد مورد مطالعه، داده‌های هندسی، ویژگی‌های مصالح و شرایط مرزی منطقه در مدل اعمال شده است. شرایط مرزی شامل سطح آب مخزن، سطح آب خروجی و نفوذپذیری مصالح مختلف سد است.

۲-۴- پارامترهای مدل و متغیرهای بررسی شده

در این پژوهش، تاثیر نفوذپذیری و ضخامت لایه آبرفتی پی سد بر میزان نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سد خاکی مورد مطالعه را ارزیابی کرده است. **جدول ۳** مشخصات مدل‌های عددی را نشان می‌دهد. برای تحلیل دقیق، داده‌های مربوط به نفوذپذیری مصالح، عمق لایه آبرفتی و ویژگی‌های هیدرولیکی منطقه مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با SEEP/W

شکل ۲ مقایسه‌ای میان هد آب محاسبه‌شده در نرم‌افزار و داده‌های ثبت‌شده در پیژومتر SP1(2) را نشان می‌دهد. تطابق قابل قبول بین داده‌های مدل و داده‌های واقعی، دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کند. در این راستا، تحلیل انحراف معیار و خطای استاندارد نشان داد که انحراف معیار (σ) داده‌های پیش‌بینی‌شده نسبت به داده‌های واقعی برابر با ۰/۲۵ متر و خطای استاندارد (SE) برابر با ۰/۱۸ متر است. این مقادیر، پراکندگی پایین و دقت بالای مدل در پیش‌بینی هد آب را نشان می‌دهند، به طوری که میانگین خطای نسبی ۴/۸٪ به دست آمد. همچنین، از روش اعتبارسنجی متقاطع فولدی^۱ برای ارزیابی تعمیم‌پذیری مدل استفاده شد که نتایج آن نشان داد که مجذور ضریب همبستگی (R^2) در تمامی

² Sensitivity Analysis.

¹ Fold Cross-Validation

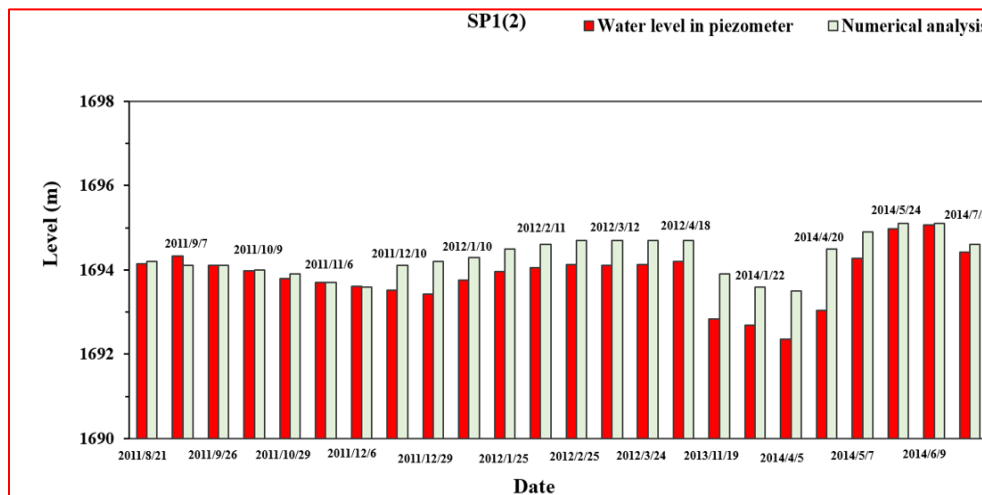


Fig. 2 Preliminary design considered for the foundation and body sealing system of the studied dam

شکل ۲ طرح اولیه در نظر گرفته شده برای سیستم آب‌بندی پی و بدنه سد مورد مطالعه

(کمتر از ۵ درصد) بر دبی نشت دارد، درحالی که شکل ۳-ب بیانگر آن است که کاهش نفوذپذیری از 1×10^{-6} به 1×10^{-7} متر بر ثانیه، دبی نشت را از 0.098 به 0.021 مترمکعب بر ثانیه افزایش می‌دهد. این نتایج با یافته‌های (Scott et al., 1995) همخوانی دارد که نشان دادند کنترل نفوذپذیری می‌تواند دبی نشت را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. همچنین، (Sharifi et al., 2018) گزارش کردند که تنظیم بهینه نفوذپذیری تا ۴۸ درصد نشت را کاهش می‌دهد، که با کاهش $53/4$ درصد مشاهده شده در این مطالعه قابل‌مقایسه است. با این حال، تاثیر محدود ضخامت در این پژوهش نسبت به مطالعه (Kouhdaragh et al., 2024) که کاهش ۴۰ درصد در نشت را با افزایش ضخامت گزارش کردند، کمتر است، که می‌تواند به دلیل تفاوت در شرایط ژئوتکنیکی باشد.

۲. تاثیر بر گرادبان هیدرولیکی

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که کاهش نفوذپذیری از 1×10^{-6} به 1×10^{-7} متر بر ثانیه، گرادبان هیدرولیکی را به میزان $38/2$ درصد افزایش می‌دهد (از 0.55 به 0.76). در مقابل، افزایش ضخامت لایه آبرفتی از ۱۰ به ۲۰ متر تنها $12/7$ درصد گرادبان هیدرولیکی را کاهش می‌دهد (از 0.55 به 0.48). شاخص حساسیت برای نفوذپذیری ($SI=1.45$) و ضخامت ($SI=0.36$) نشان‌دهنده تاثیر غالب نفوذپذیری بر گرادبان

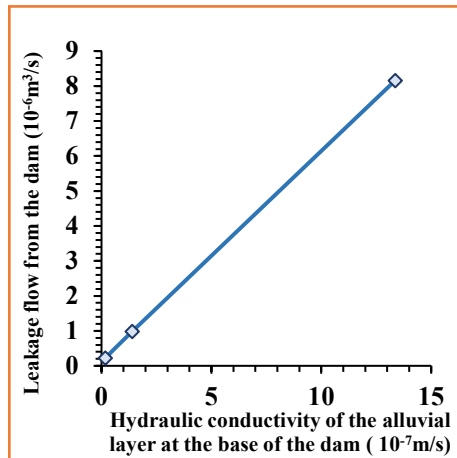
۲-۳- تحلیل عملکرد لایه آبرفتی در کاهش نشت، کنترل فشار آب منفذی و گرادبان هیدرولیکی

تحلیل حساسیت کمی پارامترهای لایه آبرفتی

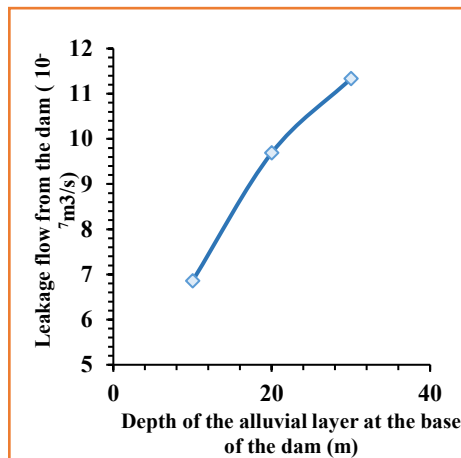
برای بررسی تاثیر نفوذپذیری (K) و ضخامت (D) لایه آبرفتی بر دبی نشت، گرادبان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار، از روش تحلیل حساسیت کمی با استفاده از شاخص حساسیت (SI) بهره گرفته شد. این شاخص، تغییر نسبی خروجی را نسبت به تغییر نسبی پارامتر ورودی اندازه‌گیری می‌کند (Yakhot and Orszag, 1986). نتایج این تحلیل در جدول ۳ و شکل ۳ ارائه شده است.

۱. تاثیر بر دبی نشت

س جدول ۳، کاهش نفوذپذیری از 1×10^{-6} به 1×10^{-7} متر بر ثانیه، دبی نشت را به میزان $53/4$ درصد کاهش می‌دهد (از 0.098 به 0.021 مترمکعب بر ثانیه). در مقابل، افزایش ضخامت لایه آبرفتی از ۱۰ به ۲۰ متر تنها 33.71 درصد کاهش در دبی نشت ایجاد می‌کند (از 0.021 به 0.139 مترمکعب بر ثانیه). شاخص حساسیت برای نفوذپذیری ($SI=1.62$) و ضخامت ($SI=0.84$) نشان‌دهنده تاثیر بیشتر نفوذپذیری نسبت به ضخامت بر دبی نشت است. شکل ۳-آ نشان می‌دهد که افزایش ضخامت تا ۳۰ متر تاثیر ناچیزی



(a، آ)



(ب، ب)

Fig. 3 a) The effect of changes in the hydraulic conductivity of the alluvial layer of the dam foundation on the leakage discharge in the studied dam, b) The effect of changes in the depth of the alluvial layer of the dam foundation on the leakage discharge in the studied dam

شکل ۳ آ) تاثیر تغییرات هدایت هیدرولیکی لایه آبرفتی پی سد بر دبی نشتی در سد مورد مطالعه، ب) تاثیر تغییرات عمق لایه آبرفتی پی سد بر دبی نشتی در سد مورد مطالعه

پیشین مانند (Scott et al., 1995) و (Sharifi et al. 2018) که بر اهمیت مدیریت نفوذپذیری تاکید داشتند، همخوانی دارد. با این حال، تاثیر کمتر ضخامت در این پژوهش نسبت به برخی مطالعات مانند (Kouhdaragh et al., 2024) ممکن است به تفاوت در شرایط ژئوتکنیکی یا روش‌های مدل‌سازی

هیدرولیکی است. شکل ۴-آ نشان می‌دهد که تغییرات نفوذپذیری به‌طور قابل‌توجهی گرادیان هیدرولیکی را در نزدیکی هسته رسی تحت تاثیر قرار می‌دهد، درحالی‌که افزایش ضخامت تاثیر محدودی دارد. این یافته‌ها با نتایج (Johnson et al., 2023) همخوانی دارد که گزارش کردند لایه‌های با نفوذپذیری بالا می‌توانند گرادیان هیدرولیکی را تا ۳۵ درصد افزایش دهند. با این حال، مطالعه حاضر نشان‌دهنده تاثیر بیشتر نفوذپذیری (۳۸/۲ درصد) در مقایسه با نتایج (Johnson et al., 2023) است، که ممکن است به دلیل تفاوت در مدل‌سازی عددی یا شرایط هیدرولوژیکی باشد. همچنین، (Suzuki et al., 2005) نشان دادند که گرادیان هیدرولیکی با افزایش سطح آب و نفوذپذیری لایه‌های آبرفتی افزایش می‌یابد، که با نتایج این پژوهش سازگار است.

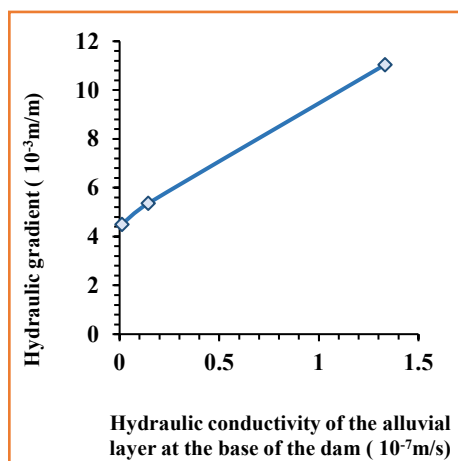
۳. تاثیر بر نیروی زیر فشار

بر اساس جدول ۳، کاهش نفوذپذیری به ۱ متر بر ثانیه نیروی زیر فشار را ۴۴/۴ درصد افزایش می‌دهد (از ۱۲۰ به ۱۷۳ کیلونیوتن بر متر)، درحالی‌که افزایش ضخامت به ۲۰ متر تنها ۳.۸۱ درصد افزایش ایجاد می‌کند (از ۱۲۰ به ۱۲۴/۵ کیلونیوتن بر متر). شاخص حساسیت برای نفوذپذیری (SI=1.32) و ضخامت (SI=0.12) نشان‌دهنده تاثیر محدود ضخامت بر نیروی زیر فشار است. این نتایج با یافته‌های (Lee et al. 2010) همخوانی دارد که نشان دادند افزایش نفوذپذیری به‌طور مستقیم نیروی زیر فشار را افزایش می‌دهد. آن‌ها گزارش کردند که کاهش نفوذپذیری تا ۴۰ درصد نیروی زیر فشار را افزایش می‌دهد، که با افزایش ۴۴/۴ درصد در این مطالعه قابل‌مقایسه است. با این حال، تاثیر ناچیز ضخامت در این پژوهش با مطالعه (Zhang, 1990) که افزایش ضخامت را عامل کاهش نیروی زیر فشار تا ۱۰ درصد گزارش کرد، تفاوت دارد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در ویژگی‌های مصالح آبرفتی یا مدل‌سازی عددی باشد.

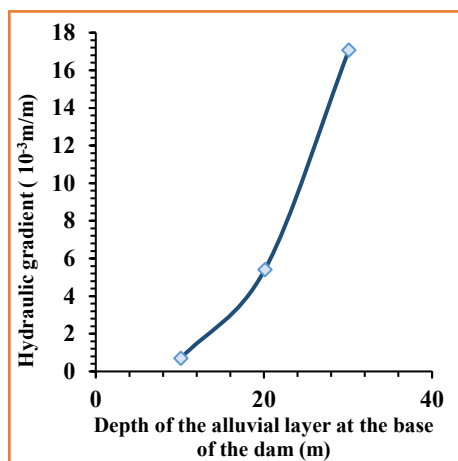
بحث و مقایسه با تحقیقات پیشین

نتایج این مطالعه نشان‌دهنده نقش برجسته نفوذپذیری در مقایسه با ضخامت لایه آبرفتی در کنترل دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار است. این یافته‌ها با مطالعات

بررسی‌های بیشتر نشان داد که افزایش عمق لایه آبرفتی از ۳۰ متر به ۳۵ متر و افزایش هدایت هیدرولیکی از 1×10^{-7} به 1×10^{-6} متر بر ثانیه، تأثیر معناداری بر کاهش نشت، نیروی زیرفشار و گرادبان هیدرولیکی نداشته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد ابعاد لایه آبرفتی، نه تنها تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد هیدرولیکی ندارد، بلکه



(a, آ)



(b, ب)

Fig. 4 a) The effect of changes in the hydraulic conductivity of the alluvial layer at the dam base on the down force on the dam under study, b) The effect of changes in the depth of the alluvial layer at the dam base on the down force on the dam under study

شکل ۴ تأثیر تغییرات هدایت هیدرولیکی لایه آبرفتی پی سد بر نیروی زیرفشار بر سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات عمق لایه آبرفتی پی سد بر نیروی زیرفشار بر سد مورد مطالعه

عددی مرتبط باشد. از نظر کیفی، نتایج این مطالعه تأیید می‌کنند که نفوذپذیری بالا می‌تواند پایداری سد را به خطر اندازد، همان‌طور که (Bishop, 1967) و (Burns, 1974) نیز گزارش کردند. از نظر کمی، کاهش ۵۳/۴ درصد در دبی نشت با کاهش نفوذپذیری، مشابه نتایج (Sharifi et al., 2018) است، اما تأثیر محدود ضخامت (۳۳/۷۱ درصد) در مقایسه با نتایج (Kouhdaragh et al., 2024) نشان‌دهنده نیاز به بررسی‌های بیشتر در شرایط مختلف است. همچنین، افزایش ۴۴/۴ درصد نیروی زیرفشار با کاهش نفوذپذیری، با نتایج (Lee et al., 2010) سازگار است، اما تفاوت در تأثیر ضخامت (Zhang, 1990) با نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن شرایط محلی در طراحی سدها است.

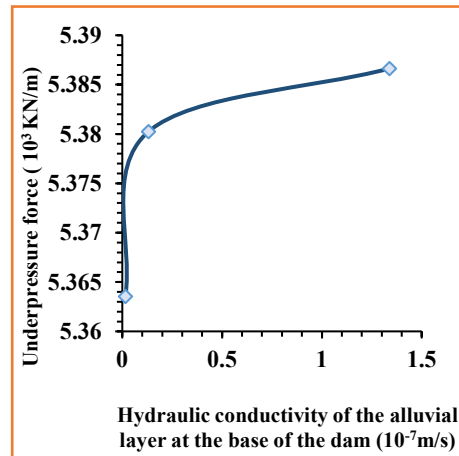
شکل ۴ به‌وضوح تأثیر هدایت هیدرولیکی و عمق لایه آبرفتی بر گرادبان هیدرولیکی را نشان می‌دهد. نمودار (آ) بیانگر آن است که کاهش هدایت هیدرولیکی لایه آبرفتی از 1×10^{-6} به 1×10^{-7} متر بر ثانیه موجب کاهش ۵۱/۲۱٪ در گرادبان هیدرولیکی خروجی می‌شود. نمودار (ب) نیز تأثیر افزایش عمق لایه آبرفتی را نمایش می‌دهد، به طوری که افزایش عمق از ۱۰ متر به ۳۰ متر منجر به افزایش تدریجی گرادبان هیدرولیکی شده و نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه عمق بر این پارامتر است. این نتایج اهمیت انتخاب مناسب پارامترهای هیدرولیکی و هندسی لایه آبرفتی را در بهبود عملکرد هیدرولیکی سد تأیید می‌کند.

شکل ۵ به‌وضوح تأثیر نفوذپذیری و ضخامت لایه آبرفتی بر نیروی زیرفشار را نشان می‌دهد. نمودار (آ) تأثیر تغییرات نفوذپذیری لایه آبرفتی را بر نیروی زیرفشار نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که کاهش نفوذپذیری از 1×10^{-6} به 1×10^{-7} متر بر ثانیه موجب افزایش ۴۴/۴٪ در نیروی زیرفشار می‌شود. در نمودار (ب)، تأثیر تغییرات ضخامت لایه آبرفتی بر نیروی زیرفشار نشان داده شده است که افزایش ضخامت تا ۲۰ متر تنها باعث افزایش ۳/۸۱٪ در این نیرو می‌گردد. این نتایج حاکی از آن است که نفوذپذیری تأثیر بیشتری بر نیروی زیرفشار دارد، در حالی که تغییر ضخامت پس از یک مقدار مشخص، اثر قابل توجهی بر این نیرو نخواهد داشت.

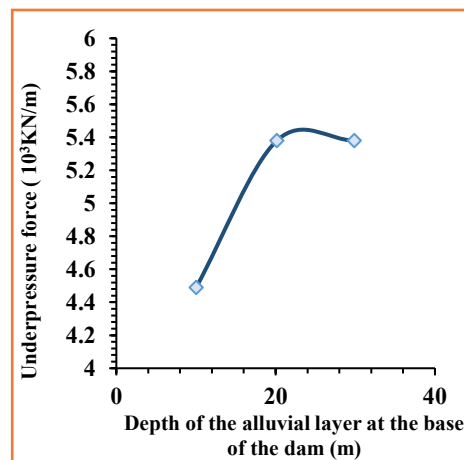
GEOSTUDIO برای مقطع سد خاکی مورد مطالعه تحت بار آبی بالادست ۳۱ متری و باوجود دیواره آببند به طول ۱۵ متر و ضخامت ۱ متر در **شکل ۶** نشان داده شده است.

این شکل‌ها شامل منحنی‌های هم‌پتانسیل، خط فریاتیک نشت و دبی نشتی از سد هستند. بررسی این داده‌ها نشان می‌دهد که تمرکز خطوط هم‌فشار کل در هسته سد خاکی، به‌طور قابل توجهی موجب کاهش انرژی آب می‌گردد. به‌ویژه در ناحیه اتصال هسته به دیواره آببند، شرایط مشابهی مشاهده می‌شود که به‌طور مؤثری مانع نشت آب از بدنه و پی سد خاکی مورد مطالعه می‌گردد.

همچنین بررسی‌های بیشتر نشان داد که افزایش عمق دیواره آببند از ۱۵ متر به ۱۶ متر و افزایش ضخامت از ۱ متر به ۱/۲ متر، تاثیر معناداری بر کاهش نشت، نیروی زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی نداشته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد ابعاد دیواره آببند، نه تنها تاثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد هیدرولیکی ندارد، بلکه هزینه‌های اجرایی را نیز افزایش می‌دهد؛ بنابراین، انتخاب یک مقدار بهینه برای عمق دیواره آببند (حدود ۱۵ متر) و ضخامت (۱ متر) می‌تواند عملکرد هیدرولیکی سد را بهبود بخشد و از افزایش غیرضروری هزینه‌ها جلوگیری کند. این پژوهش فرض کرد که لایه‌های آبرفتی همگن هستند، درحالی‌که در واقعیت ممکن است ناهمگنی‌هایی وجود داشته بررسی‌های بیشتر نشان داد که افزایش عمق لایه آبرفتی از ۳۰ متر به ۳۵ متر و افزایش هدایت هیدرولیکی از 1×10^{-7} به 1×10^{-6} متر بر ثانیه، تاثیر معناداری بر کاهش نشت، نیروی زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی نداشته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد ابعاد لایه آبرفتی، نه تنها تاثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد هیدرولیکی ندارد، باشد. همچنین، عدم قطعیت در داده‌های ورودی مانند مقادیر دقیق نفوذپذیری و شرایط مرزی ممکن است بر نتایج تاثیر بگذارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، مدل‌های ناهمگن و داده‌های میدانی گسترده‌تر بررسی شوند.



(a، آ)



(b، ب)

Fig. 5 a) The effect of changes in the hydraulic conductivity of the alluvial layer at the dam base on the down force on the dam under study, b) The effect of changes in the depth of the alluvial layer at the dam base on the down force on the dam under study

شکل ۵ آ) تاثیر تغییرات هدایت هیدرولیکی لایه آبرفتی پی سد بر نیروی زیرفشار بر سد مورد مطالعه، ب) تاثیر تغییرات عمق لایه آبرفتی پی سد بر نیروی زیرفشار بر سد مورد مطالعه

هزینه‌های اجرایی را نیز افزایش می‌دهد؛ بنابراین، انتخاب یک مقدار بهینه برای عمق لایه آبرفتی (حدود ۳۰ متر) و هدایت هیدرولیکی (1×10^{-7} متر بر ثانیه) می‌تواند عملکرد هیدرولیکی سد را بهبود بخشد و از افزایش غیرضروری هزینه‌ها جلوگیری کند. نتایج آنالیز نرم‌افزارهای SEEP/W و

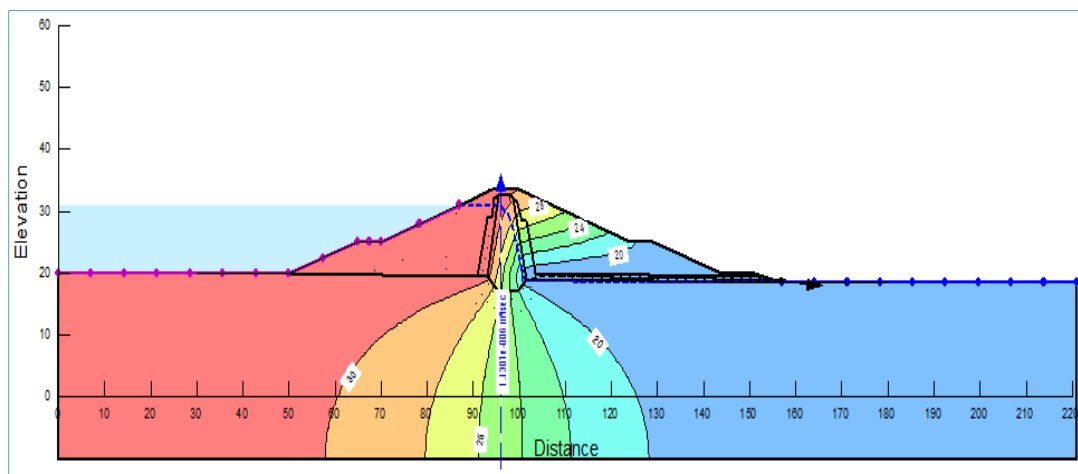


Fig. 6 Specifications of the models simulated in the research

شکل ۶ مشخصات مدل‌های شبیه‌سازی شده در تحقیق

۴- نتیجه‌گیری

درصد کاهش داد، که مبین حساسیت کمتر این پارامتر نسبت به نفوذپذیری است.

با افزایش نفوذپذیری نیروی زیر فشار مقدار کمی (۱/۱۸ درصد) افزایش یافت، در حالی که افزایش ضخامت تنها ۱/۰۶ درصد افزایش ایجاد کرد؛ یعنی تأثیر تغییر ضخامت و نفوذپذیری بر نیروی زیر فشار قابل مقایسه است.

مدل SEEP/W ($R^2=0.95$, $RMSE=0.21$ متر، خطای نسبی ۴/۸ درصد) نسبت به MODFLOW و PLAXIS دقیق‌تر بود. پیشنهاد می‌شود داده‌های میدانی (پیزومترهای SP2 و SP3) و آزمایش‌های نفوذپذیری درجا (ASTM D5084) برای بهبود دقت تا $R^2=0.98$ و تحلیل دینامیکی زلزله انجام شود.

سرانجام پیشنهاد می‌شود اثر ترکیبی نفوذپذیری، ضخامت لایه آبرفتی، تغییرات سطح آب، و ویژگی‌های دیوار آب‌بند برای ارائه تحلیل جامع‌تر از عملکرد هیدرولیکی سدهای خاکی بررسی شود.

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای نفوذپذیری و ضخامت لایه آبرفتی را بر عملکرد هیدرولیکی سدهای خاکی با استفاده از مدل‌سازی عددی (SEEP/W) در محیط نرم‌افزار GEOSTUDIO بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نفوذپذیری از 10^{-7} به 10^{-6} متر بر ثانیه، مقدار دبی نشت ۹۲/۷۴۵ درصد افزایش یافت؛ ولی با افزایش ضخامت لایه آبرفتی از ۲۰ به ۳۰ متر فقط ۱۶/۸۵ درصد به مقدار دبی نشت افزوده شد. این امر نشان می‌دهد که دبی نشت نسبت به نفوذپذیری بسیار حساس است.

از طرف دیگر، با کاهش نفوذپذیری از 10^{-6} به 10^{-7} متر بر ثانیه، گرادبان هیدرولیکی در ناحیه خروجی پی سد ۵۱/۲۱ درصد کاهش یافت، که نقش کلیدی نفوذپذیری را در کاهش خطر جوشش و افزایش ایمنی سد نشان می‌دهد.

افزایش ضخامت لایه آبرفت از ۲۰ به ۳۰ متر، گرادبان هیدرولیکی را تنها ۱۰/۳۵ درصد و نیروی زیر فشار را ۱/۰۶

5- List of symbols

Sign	
i (m/m)	Hydraulic Gradient
P_u (kpa)	Uplift Pressure
Q (L/s/m)	Seepage Discharge
K (m/s)	Hydraulic Conductivity
H (m)	Dam Height
L_c (m)	Crest Length
W_c (m)	Crest Width
S_u (m/m)	Upstream Slope
S_d (m/m)	Downstream Slope
t_c (m)	Core Thickness
t_a (m)	Alluvial Layer Thickness
H_w (m)	Upstream Water Level
H_d (m)	Downstream Water Level

Acknowledgments

We express our sincere thanks and appreciation to the esteemed staff of Azarbaijan Shahid Madani University.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.S.S, T.O.A and E.A and H.F.A. Methodology, H.A.Q.K, and E.A. Software, M.S.S., E.A., and T.O.A. Data analysis, M.S.S., E.A and T.O.A. Writing-Original Draft Preparation, M.S.S. and T.O.A. Writing-review and editing, M.S.S., E.A., and T.O.A. All authors have read and approved the published version of the manuscript.

Funding

All simulation steps were done of Azarbaijan Shahid Madani University and it should be noted that no contract was signed with any government institution.

Data Availability Statement

Data access is available on a limited basis if needed.

Conflicts of Interest

There are no conflicts of interest.

References

- Bishop, A. W. (1967). The influence of water levels on the stability of earth dams. *Journal of Soil Mechanics*, 93(7), 78–90. <https://doi.org/10.1061/JMCEAZ.0000026>
- Burns, S. (1974). Effects of water level variations on stability of earth dams. *Water Resources Research*, 10(6), 93–102. <https://doi.org/10.1029/WR010i006p0093>
- Harbaugh, A.W. (2005). *MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model*. USGS.
- Johnson, K., Smith, R., & Brown, T. (2023). Seepage analysis in high-permeability alluvial layers under earth dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(8), 04023045. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11234>
- Kgreve, R.B.J. et al. (2020). PLAXIS 2D Reference Manual. Bentley Systems
- Kouhdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N., & 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), 177-192. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4432-fa.html>
- Suzuki, T., & Others. (2005). Pressure distribution and flow lines in earth dams. *Journal of Water Resources Engineering*, 131(4), 310–320. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:4\(310\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:4(310))
- Zhang, L. (1990). Sudden water level rise and internal pressures in earth dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(3), 167–175. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:3\(167\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:3(167))