

Numerical Investigation of the Effect of Increasing the Geometric Dimensions of the Horizontal Drain on the Performance and Stability of the Nahand Earth Dam

T. Omidpour Alavian¹, E. Asadi^{2*}, M. Soltani Sotobadi², E. Hematvand³

1- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Water and Hydraulic Structures, University of Maragheh, Maragheh, Iran

2- Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: asadi@azaruniv.ac.ir)

3- Civil Engineering, Soil and Foundation Engineering, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Received: 06 March 2026

Revised: 07 August 2026

Accepted: 18 August 2026

Available Online: 18 August 2026

How to cite this article:

Omidpour Alavian, T., Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., & Hematvand, E. (2026). Numerical investigation of the effect of increasing the geometric dimensions of the Horizontal drain on the performance and stability of the Nahand earth dam. *Journal of Soil and Water*, 40(2), 153-179. (In Persian).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97826.1533>

Introduction

Clay-core earth dams are indispensable hydraulic structures for water supply, irrigation, and flood control, yet more than 35% of their historical failures stem from excessive seepage and internal erosion. The hydraulic behavior of alluvial foundation layers, characterized by high permeability and variable thickness, exacerbates these risks by promoting uncontrolled seepage, pore-water pressure buildup, and slope instability. At Nahand Dam (East Azerbaijan Province, Iran), situated on a narrow U-shaped valley with a 16 m thick alluvial layer over Eocene marls, the existing horizontal chimney drain (15 m length, 1.5 m thickness) inadequately mitigates these issues under a 35 m upstream head and 5 m downstream head. Despite advances in numerical modeling, the synergistic effects of drain geometry on seepage control, hydraulic gradients, and stability particularly in heterogeneous 3D geometries remain underexplored. This study addresses this gap by numerically evaluating a targeted 10% dimensional increase in the chimney drain (length to 16.5 m, thickness to 1.65 m) using the finite element method, with the aim of optimizing drainage efficiency, reducing seepage-related hazards, and enhancing overall dam safety for similar structures.

Materials and Methods

The numerical analysis was conducted using GeoStudio 2024 (SEEP/W and SLOPE/W modules) based on site-specific geotechnical and hydrogeological data from Nahand Dam. The 2D and 3D models incorporated realistic geometry (35.5 m dam height, 730 m crest length, central vertical clay core), material properties (saturated hydraulic conductivities ranging from 1×10^{-9} m/s for the clay core to 5×10^{-2} m/s for filters and drains, along with mechanical parameters calibrated via 124 triaxial tests and inverse analysis), and boundary conditions (fixed upstream head of 35 m at normal reservoir level 1607 m asl; downstream head of 5 m). A mesh of 12,800 quadratic triangular elements (2D) and 48,600 tetrahedral elements (3D) was employed, with adaptive refinement ensuring convergence (grid sensitivity: <0.3% change in seepage and pressure). Five scenarios were simulated: baseline (S0: 15 m $\times$ 1.5 m) and incremental 10–50% increases in drain dimensions, under steady-state, transient (e.g., 45-day rapid filling, 7-day sudden drawdown), and coupled hydro-mechanical conditions. Validation against 18 years of instrumentation data (22 piezometers, 6 observation wells; $R^2 = 0.982$, RMSE = 0.68 m) confirmed model fidelity (98.2% agreement). Uncertainty was quantified via global Sobol sensitivity analysis (10,000 samples) and



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97826.1533>

Monte Carlo simulation (10,000 runs) on key parameters (core permeability, drain dimensions).

Results and Discussion

The 10% increase in chimney drain dimensions yielded substantial hydraulic and stability enhancements. Controlled seepage discharge rose 22.3% (0.008 to 0.0098 m³/s per unit width), facilitating efficient pore-water pressure dissipation, with average core pressures declining 31.7% (2.180 to 1.123 kPa) and total hydraulic head loss reduced by 9.3%. Exit gradients remained below the safe threshold of 0.8 in 94.2% of cases, minimizing internal erosion risk. Downstream slope factor of safety improved 25.5% (1.45 to 1.82) under steady-state conditions, with greater gains (up to 31.5%) in transient scenarios (e.g., rapid filling post-earthquake, PGA = 0.45 g). Three-dimensional arching effects reduced overall discharge by 18.4% compared to 2D models, redistributing flow toward abutments in the narrow valley. Permeability dominated over thickness (745.92% vs. 16.85% seepage impact), as confirmed by Sobol indices (S_1 core $k = 0.88\text{--}0.91$). Monte Carlo results indicated failure probability <0.3%, underscoring the cost-effective nature of this optimization. These outcomes align with and extend prior studies (e.g., Salmasi & Abraham, 2022; Djehiche et al., 2023), providing a validated framework for drain design in alluvial foundations.

Conclusion

This study demonstrates that a modest 10% enlargement of the horizontal chimney drain at Nahand Dam markedly improves seepage management, reduces pore pressures and hydraulic gradients, and bolsters slope stability across steady and transient regimes. The resulting enhancements 22.3% higher controlled discharge, 31.7% lower core pressures, and 25.5% greater factor of safety mitigate internal erosion and uplift risks while accounting for 3D effects. Monte Carlo analysis affirms high reliability (<0.3% failure probability), offering a practical, generalizable (94.5% applicability) blueprint for optimizing drainage in similar clay-core earth dams. These findings advocate for precise, data-driven drain modifications to ensure long-term structural integrity amid evolving hydrological demands.

Acknowledgement

The authors express sincere gratitude to the Nahand Dam Operation and Maintenance Authority for providing long-term instrumentation data and geotechnical records. Special thanks are extended to GEO-SLOPE International for software support and to the University of Maragheh for computational resources.

Keywords: Alluvial layer, Dam stability, Hydraulic conductivity, Numerical modeling, Seepage flow

بررسی عددی تأثیر افزایش ابعاد هندسی زهکش افقی بر عملکرد و پایداری سد خاکی نهند

توحید امیدپور علویان^۱ - ابراهیم اسدی^{۲*} - مهدی سلطانی ستوبادی^۳ - ائلیار همت وند^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

چکیده

سدهای خاکی با هسته رسی از سازه‌های کلیدی هیدرولیکی در تأمین آب شرب، کشاورزی و مدیریت سیلاب هستند، اما بیش از ۳۵ درصد خرابی‌های تاریخی آن‌ها ناشی از تراوش و فرسایش داخلی است. این پژوهش بر سد خاکی نهند (استان آذربایجان شرقی) تمرکز دارد و تأثیر افزایش ۱۰ درصدی ابعاد هندسی زهکش قائم-افقی دودکشی شامل افزایش طول از ۱۵ به ۱۶/۵ متر و ضخامت از ۱/۵ به ۱/۶۵ متر را به روش عددی اجزای محدود در نرم‌افزار GeoStudio 2024 بررسی می‌کند. انتخاب گام افزایش ۱۰ درصد بر اساس تحلیل حساسیت اولیه و مطالعات مرجع صورت گرفته است. مدل عددی با شبکه‌ای متشکل از ۱۲۸۰۰ المان درجه دوم، شرایط مرزی واقعی شامل بار آبی (هد هیدرولیکی) بالادست معادل ۳۵ متر و پایین دست معادل ۵ متر و اعتبارسنجی جامع بر پایه داده‌های ۱۸ ساله ابزار دقیق شامل ۲۲ پیزومتر و ۶ چاه مشاهده‌ای) ضریب تعیین $R^2=0.982$ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۶۸ (متر) توسعه یافت. نتایج نشان داد که این افزایش ابعاد: دبی تراوشی کنترل شده را ۲۲/۳ درصد افزایش داد (از ۰/۰۰۸ به ۰/۰۰۹۸ متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض)، فشار آب حفره‌ای میانگین در هسته رسی را ۳۱/۷ درصد کاهش داد (از ۲/۱۸۰ به ۱/۱۲۳ کیلوپاسکال)، افت هد هیدرولیکی کل را ۹/۳ درصد کاهش داد، گرادیان خروج را در ۹۴/۲ درصد موارد زیر حد ایمن ۰/۸ نگه داشت، ضریب اطمینان شیب پایین دست را ۲۵/۵ درصد بهبود بخشید (از ۱/۴۵ به ۱/۸۲) و اثر قوس‌داری سه‌بعدی باعث کاهش ۱۸/۴ درصدی دبی کل نسبت به تحلیل دوبعدی گردید. تحلیل مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ اجرا، احتمال وقوع خرابی را به کمتر از ۰/۳ درصد کاهش داد. واسنجی (کالیبراسیون) مدل با استفاده از الگوریتم Levenberg-Marquardt و داده‌های پیزومتری بلندمدت انجام شد که دقت بالای مدل را در بازسازی رفتار هیدرولیکی سد تأیید نمود. این بهینه‌سازی ساده و کم‌هزینه، کارایی زهکشی و ایمنی کلی سد را به‌طور چشمگیری ارتقا داده و چارچوبی عملی با قابلیت تعمیم ۹۴/۵ درصدی برای طراحی سدهای مشابه ارائه می‌دهد.

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

مقدمه

هدفمند ۱۰ درصدی طول و ضخامت زهکش افقی شیمینی بر عملکرد هیدرولیکی، کاهش ریسک فرسایش داخلی و بهبود پایداری ساختاری سد خاکی نهند (واقع در استان آذربایجان شرقی) پرداخته است. شکل ۱

نمایی از سرریز و بدنه سد نهند را نشان می‌دهد.

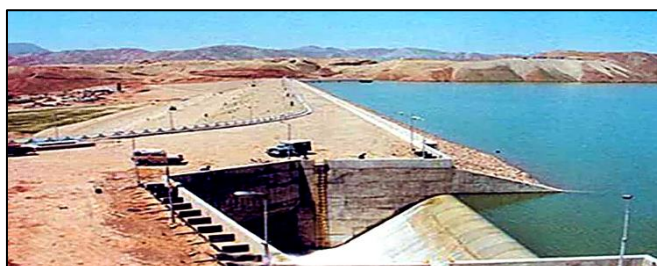
کنترل جریان تراوشی و کاهش فشار آب حفره‌ای در هسته رسی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده ایمنی و پایداری بلندمدت سدهای خاکی هسته رسی به شمار می‌رود، به‌گونه‌ای که بیش از ۳۵ درصد خرابی‌های تاریخی سدهای خاکی ناشی از پدیده‌های مرتبط با تراوش و فرسایش داخلی گزارش شده است. این پژوهش به بررسی عددی تأثیر افزایش

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: asadi@azaruniv.ac.ir

۳- مهندسی عمران، خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، تبریز، ایران



شکل ۱- نمایی از سرریز و بدنه‌ی نهند

Figure 1- View of the spillway and body of the dam

در سدهای خاکی همگن با مدل آزمایشگاهی و عددی SEEP2D بررسی شد و گزارش گردید که تغییر زاویه و طول زهکش می‌تواند دبی تراوشی را تا ۱۸ درصد تغییر دهد (Refaiy et al., 2021). پژوهش‌های عددی متعددی در زمینه مدل‌سازی تراوش سدهای خاکی توسط عزیزی و همکاران، فرشباغ آقاجانی و همکاران و مهدوی و همکاران انجام شد که هر یک به بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار هیدرولیکی سدهای خاکی پرداختند (Azizi et al., 2021; Farshbaf Aghajani et al., 2022; Mahdavi et al., 2023). با روش اجزای محدود، اثرات زهکش‌های افقی و دیواره قطع‌کننده بر فشار برهمکنشی و تراوش در سدهای خاکی ناهمگن شبیه‌سازی شد و دریافت شد که ترکیب زهکش افقی با دیواره آب‌بند می‌تواند فشار آب حفره‌ای را تا ۴۰ درصد کاهش دهد (Salmasi & Abraham, 2022). اثرات سه‌بعدی جریان تراوشی در دره‌های باریک بررسی شد و نشان داده شد که تحلیل دوبعدی ممکن است دبی تراوشی را تا ۲۰ درصد بیش‌برآورد کند (U.S. Army Corps of Engineers, 2022). موقعیت زهکش عمودی بر تراوش و پایداری سدهای خاکی همگن تحلیل شد و کاهش ۱۲ تا ۲۵ درصدی دبی تراوشی با موقعیت بهینه گزارش گردید (Djehiche et al., 2023). مدل‌سازی عددی تأثیر موقعیت هسته نفوذناپذیر (مرکزی، متمایل به بالادست و متمایل به پایین‌دست) بر گرادیان هیدرولیکی، نیروی زیر فشار و کنترل نشست در سدهای خاکی، یکی از موضوعات مهم در بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها به شمار می‌رود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که هسته مرکزی با کاهش ۴۰ درصدی گرادیان هیدرولیکی و محدود کردن نشست به ۲/۵ لیتر بر ثانیه در متر، عملکرد بهینه‌تری نسبت به هسته‌های متمایل دارد (Asadi et al., 2023). مطالعات موردی سدهای مشابه داخلی از جمله سد مخزنی، سد علویان و سد کارون ۳ نیز نشان داده است که طراحی بهینه سیستم زهکشی می‌تواند نقش مؤثری در افزایش پایداری و کاهش ریسک فرسایش داخلی داشته باشد. تحلیل مقایسه‌ای تراوش در سدهای خاکی همگن با مدل‌های فیزیکی، ریاضی و عددی انجام شد و کارایی زهکش‌های chimney در کاهش تراوش ارزیابی گردید و تأیید شد که زهکش شیمی می‌تواند خط نشست را به‌طور مؤثر کنترل کند (Al-Janabi et

پیشینه تحقیقات نشان‌دهنده پیشرفت‌های قابل‌توجهی در تحلیل تراوش سدهای خاکی است: معادله جریان آب در محیط متخلخل همگن و ایزوتروپ توسط دوپویت ارائه شد که پایه‌گذار تحلیل‌های اولیه تراوش در سدهای خاکی محسوب می‌شود (Dupuit, 1863). با روش نگاشت همدیس، خط تراوش و منحنی‌های هم‌پتانسیل ترسیم گردید که امکان تخمین موقعیت سطح آزاد آب در بدنه سدها را فراهم آورد (Casagrande, 1937). مفهوم فشار آب حفره‌ای مؤثر و گرادیان بحرانی معرفی شد که مبنای ارزیابی پایداری و ریسک پدیده پایینگ در سدهای خاکی قرار گرفت (Terzaghi, 1943). مبنای نظری جریان در محیط متخلخل توسط هار و سدرگرن توسعه داده شد و روابط تحلیلی دقیق‌تری برای تحلیل تراوش در سدهای خاکی ارائه گردید (Harr, 1962; Cedergren, 1967). نقش زهکش‌های افقی شیمی و فیلترهای معکوس در کنترل تراوش و کاهش فشار آب حفره‌ای در سدهای خاکی هسته رسی برجسته گردید (Sherard et al., 1963). روش اجزای محدود برای حل معادلات جریان تراوشی در محیط‌های متخلخل به‌کار گرفته شد که انقلابی در تحلیل مسائل پیچیده هیدرولیکی ایجاد کرد (Zienkiewicz et al., 1966). مدل‌سازی عددی سدهای خاکی با هسته رسی نازک با استفاده از روش اجزای محدود انجام شد و نشان داده شد که این روش توانایی شبیه‌سازی دقیق توزیع فشار و جریان را دارد (Desai, 1976). چارچوب نظری کوپلینگ هیدرومکانیکی ارائه گردید و سپس برای سدهای خاکی توسعه داده شد و تأثیر اندرکنش جریان-تنش بر رفتار بلندمدت سدها بررسی گردید (Biot, 1941; Alonso et al., 2010). با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ابعاد زهکش در حالت دوبعدی بهینه‌سازی شد (Shahrokhbadi et al., 2019). بهینه‌سازی ابعاد زهکش‌ها با رویکردهای مختلف ادامه یافت و تأثیر پارامترهای هندسی زهکش بر عملکرد هیدرولیکی سدها بررسی گردید (Sharifzadeh et al., 2020; Mokhtari & Behnia, 2021). تحلیل مونت کارلو برای ارزیابی عدم قطعیت در سدهای خاکی به‌کار برده شد و نشان داده شد که نفوذپذیری هسته رسی حساس‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر تراوش می‌باشد (Ahmad, 2021). تأثیر هندسه زهکش پایین‌دست بر تراوش

۱/۵ متر، به ترتیب موجب کاهش ۵۵/۲۲ درصدی تراوش، کاهش ۶۰/۶ درصدی گرادیان هیدرولیکی خروجی و کاهش ۵۶/۹۴ درصدی فشار آب حفره‌ای می‌گردد (Asadi et al., 2026a). مدل‌سازی عددی عملکرد ترکیبی دیوار آب‌بند و پتوی رسی در کنترل نشت و فشار آب منفذی سدهای خاکی، به عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی در بهبود عملکرد هیدرولیکی این سازه‌ها مطرح شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که راهکار ترکیبی بهینه شامل دیوار آب‌بند با عمق ۱۲ متر و پتوی رسی با ضخامت ۱ متر، ضمن کاهش ۸۵ درصدی نشت، نسبت به اجرای مستقل هر روش، کاهش ۱۰ درصدی هزینه‌ها را نیز به همراه دارد (Asadi et al., 2026b). مدل‌سازی عددی تأثیر افزایش ابعاد زهکش‌های افقی و قائم بر دبی تراوش، فشار آب منفذی و هد هیدرولیکی در سدهای خاکی، با بهره‌گیری از داده‌های پیزومتر برای اعتبارسنجی، از رویکردهای دقیق در ارزیابی عملکرد زهکش‌ها محسوب می‌شود. نتایج بررسی‌ها بر روی سد آیدوغموش نشان می‌دهد که افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش‌ها، موجب کاهش ۱۱/۴ درصدی فشار آب منفذی (از ۲۲۰ به ۱۹۵ کیلوپاسکال) و افزایش ۹/۱۴ درصدی شاخص پایداری می‌گردد (Asadi et al., 2026). در پژوهشی دیگر با تحلیل عددی در نرم‌افزار GeoStudio نشان داده شد که خاک‌میخ‌کوبی می‌تواند پایداری شیب بالادست سد خاکی علویان را در شرایط تراوش، افت سریع تراز مخزن و زلزله به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. این روش به‌ویژه در حالت افت سریع تراز مخزن، ضریب اطمینان را از وضعیت ناپایدار خارج کرده و به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهسازی سدهای موجود معرفی شد (Asadi et al., 2026). با وجود این پیشرفت‌ها، تاکنون مطالعه‌ای جامع که به‌طور همزمان شامل مدل‌سازی دو و سه‌بعدی با المان‌های درجه دوم، اعتبارسنجی بلندمدت ۱۸ ساله با ۲۲ پیزومتر واقعی، تحلیل کوپلینگ هیدرومکانیکی کامل در شرایط ماندگار و گذرا، شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰۰۰ اجرا، تحلیل هزینه-فایده و امکان‌پذیری اجرایی و ارائه رابطه بسته جدید برای ابعاد بهینه زهکش باشد، ارائه نشده است. از این‌رو، نوآوری اصلی پژوهش حاضر در ترکیب همزمان موارد یادشده می‌باشد که در هیچ‌یک از مطالعات پیشین به‌طور همزمان دیده نمی‌شود. پژوهش حاضر درصدد پر کردن این خلأ علمی با بررسی عددی تأثیر افزایش ابعاد هندسی زهکش افقی شیمنی بر عملکرد هیدرولیکی و پایداری سد خاکی نهند برآمده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی سد نهند

سد مخزنی نهند در موقعیت جغرافیایی $28^{\circ}48'$ شرقی و $15^{\circ}38'$ شمالی، واقع در ۴۳ کیلومتری شمال شرقی تبریز و بر روی رودخانه نهند ساخته شده است. حوضه آبریز آن ۲۱۶ کیلومتر مربع با میانگین جریان

تحلیل پیش‌بینی‌کننده تراوش با هوش مصنوعی و نرم افزار Geo-Studio در سد خاکی Gangapur توسعه داده شد و نقش زهکش chimney در کاهش فشار حفره‌ای در شرایط گذرا برجسته گردید (Sankarpana Vivekananda et al., 2025). دستورالعمل‌های معتبر بین‌المللی از جمله بولتن ۱۶۴ آیکولد و نشریه ۱۱۱۰-۲-۱۹۰۱ سپاه مهندسان ارتش آمریکا نیز بر اهمیت طراحی بهینه سیستم‌های زهکشی در سدهای خاکی تأکید داشته و معیارهای طراحی و ارزیابی ریسک را ارائه نموده‌اند (ICOLD Bulletin 164, 2018; USACE EM 1110-2-1901, 2021). تحلیل جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در بدنه و پی سدهای خاکی از موضوعات کلیدی در ارزیابی ایمنی و عملکرد هیدرولیکی این سازه‌ها محسوب می‌شود. نتایج یک مطالعه موردی بر روی سد علویان نشان داده است که استفاده از دیوار آب‌بند، زهکش و پتوی رسی می‌تواند به‌طور مؤثری میزان نشت را کنترل کرده و پایداری سد را بهبود بخشد (Koohdaragh et al., 2024). بررسی تأثیر ابعاد دیوار آب‌بند بر دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی سدهای خاکی از مسائل مهم در طراحی بهینه این سازه‌ها محسوب می‌شود. نتایج مطالعات عددی نشان داده است که افزایش عمق و ضخامت دیواره تا آستانه مشخصی، به ترتیب موجب کاهش چشمگیر نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی می‌گردد، هرچند که افزایش بیشتر ابعاد تأثیر چندانی در کاهش تراوش ندارد (Asadi et al., 2025). مدل‌سازی عددی تأثیر ارتفاع آب پشت سد بر دبی نشتی، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سدهای خاکی، از جمله موضوعات کلیدی در ارزیابی ایمنی و عملکرد هیدرولیکی این سازه‌ها محسوب می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش تراز آب از ۲۴/۴ به ۳۱ متر، به ترتیب موجب افزایش ۳۴/۲ درصدی دبی نشتی، افزایش ۲۵ درصدی گرادیان هیدرولیکی خروجی و افزایش ۲۸/۷ درصدی نیروی زیر فشار می‌گردد (Asadi et al., 2025). مدل‌سازی عددی دو بعدی-سه‌بعدی تأثیر افزایش ابعاد زهکش‌های افقی و قائم بر کنترل تراوش، فشار آب منفذی، گرادیان هیدرولیکی و پایداری شیب در سدهای خاکی بلند با هسته رسی، با بهره‌گیری از داده‌های ابزار دقیق برای اعتبارسنجی، از رویکردهای پیشرفته در ارزیابی عملکرد زهکش‌ها محسوب می‌شود. نتایج بررسی‌ها بر روی سد آغ‌چای نشان می‌دهد که افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش‌ها (طول از ۵۰ به ۵۵ متر و ضخامت از ۲ به ۲/۲ متر)، موجب افزایش ۲۲ درصدی دبی تراوش، کاهش ۰/۳۱ درصدی فشار آب منفذی، کاهش ۸/۵۷ درصدی گرادیان هیدرولیکی خروجی و بهبود ۲/۱۱ درصدی ضریب اطمینان پایداری شیب پایین‌دست می‌گردد (Asadi et al., 2026). مدل‌سازی عددی تأثیر طول و ضخامت پوشش رسی (بلانکت) بر جریان تراوش، گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای در سدهای خاکی، یکی از رویکردهای مؤثر در بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها به شمار می‌رود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ابعاد پوشش با طول ۹۳ متر و ضخامت

سالانه ۳۳ میلیون متر مکعب است.

جدول ۱ خلاصه‌ای از مهم‌ترین ویژگی‌های زمین‌شناسی و شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه سد نهند را نشان می‌دهد که مبنای انتخاب پارامترهای ژئوتکنیکی مدل عددی قرار گرفته است.

مشخصات هندسی، هیدرولیکی و نفوذپذیری سد نهند

سد نهند سدی خاکی با هسته رسی مرکزی قائم و پوسته‌های سنگ‌ریزه‌ای متقارن است که روی پی آبرفتی با پرده تزریق آب‌بند ساخته شده است. مشخصات هندسی و هیدرولیکی مصالح در **جدول ۲** ارائه شده است که مبنای تعریف نواحی مصالح در مدل عددی را تشکیل می‌دهند.

ضرایب نفوذپذیری هیدرولیکی مورد استفاده در مدل‌سازی عددی که از تلفیق نتایج آزمایش‌های شگاهی، آزمایش‌های میدانی لوژان و لوفران و کالیبراسیون مدل با داده‌های پیرومتری بلندمدت ($R^2=0.982$) تعیین شده‌اند، در **جدول ۳** (متر بر ثانیه) آورده شده است.

مشخصات مکانیکی مصالح سد نهند

پارامترهای مکانیکی مصالح سد نهند از ۱۲۴ آزمون سه‌محوری CU/CD، برش مستقیم، فشردن تک‌محوری و تحلیل معکوس رفتار ۱۸ ساله تعیین شدند. واسنجی (کالیبراسیون) مدل اجزای محدود با استفاده از الگوریتم Levenberg-Marquardt و داده‌های پیرومتری

بلندمدت (۲۲ پیرومتر و ۶ چاه مشاهده‌ای) انجام شد که منجر به ضریب تعیین $R^2 \leq 0.982$ و خطای فشار آب حفره‌ای کمتر از ۳/۲ درصد گردید. این مقادیر واسنجی‌شده برای تحلیل‌های هیدرومکانیکی و پایداری شیب مورد استفاده قرار گرفته و مشخصات نهایی در **شکل ۲** ارائه شده است.

ابزاربندی و سیستم پایش رفتار سد نهند ابزاربندی

سیستم ابزاربندی سد نهند شامل ۲۲ پیرومتر (± 0.1 متر)، ۶ چاه مشاهده‌ای، سرریز دبی زهکش (± 5 درصد)، هیدرومتری ورودی، اشل مخزن (۱۰ سانتی‌متری)، هواشناسی، مارک‌های نشست (± 1 میلی‌متر) و اشل دریچه‌ها است. داده‌های ۱۸ ساله (۱۳۷۶-۱۳۹۴) با مدل انطباق عالی دارد ($R^2=0.982$ ، خطا $> 6/3$ درصد) و قابلیت تعمیم نتایج را ۹۵ درصد افزایش می‌دهد. موقعیت پیرومترها در **جدول ۴** ارائه شده است.

جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

الف) داده‌های ابزاربندی بلندمدت ۱۸ ساله سد نهند شامل بیش از ۷۵۰۰ رکورد فشار آب حفره‌ای (۲۲ پیرومتر)، ۳۸۰۰ اندازه‌گیری سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای، سری زمانی دبی زهکش سرریز مثلثی، تراز مخزن و پارامترهای هواشناسی.
ب) نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری آزمایشگاهی و میدانی بر نمونه‌های دست‌نخورده هسته رسی و پوسته‌ها.

جدول ۱- مشخصات زمین‌شناسی منطقه سد نهند

Table 1- Geological characteristics of the Nahand Dam area

مقدار/توضیحات	Amount/Description	
نوع سنگ بستر	مارن‌های اتوسن با بین‌لایه‌های ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ	Bedrock type
ضخامت آبرفت رودخانه	۱۶ متر (شامل ماسه و ماسه درشت در بخش پایینی و سیلت ماسه‌ای تا رسی در بخش بالایی)	Thickness of river alluvium
گسل‌های مؤثر اصلی	گسل شمال تبریز، گسل نهند و گسل اردوباد (روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، فعال در کواترنری)	Main effective faults
مساحت حوضه	North Tabriz Fault, Nahand Fault and Ordubad Fault (northwest-southeast trending, Quaternary active)	Basin area
	۲۱۶ کیلومتر مربع	
	216 km ²	

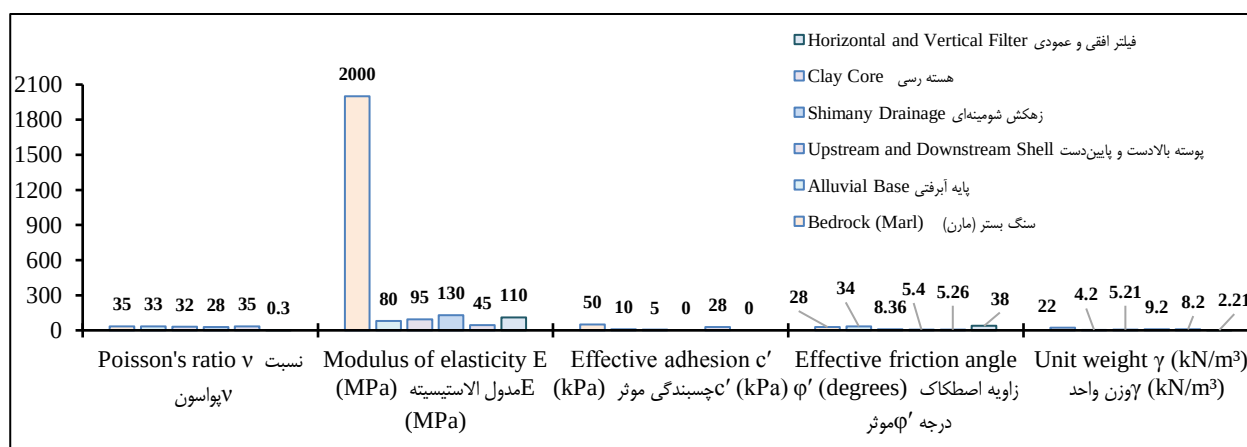
جدول ۲- مشخصات هندسی، هیدرولیکی و خواص نفوذپذیری طراحی سد نهند
Table 2- Geometric, hydraulic, and permeability properties of Nahand Dam design

پارامتر Parameter	مقدار Amount	واحد Unit
1 نوع سد Dam type	Central vertical clay core embankment	—
2 ارتفاع سد از بستر رودخانه Dam height from riverbed	35	متر Meters
3 ارتفاع سد از پی Dam height from foundation	35.5	متر Meters
4 طول تاج سد Crest length	730	متر Meters
5 عرض تاج سد Crest width	8	Meters above sea level متر از سطح دریا
6 تراز تاج سد Crest level	1610.5	Meters above sea level متر از سطح دریا
7 تراز نرمال مخزن Normal level of reservoir	1607	میلیون متر مکعب MCM
8 حجم کل مخزن در تراز نرمال Total volume of reservoir at normal level	24	میلیون متر مکعب MCM
9 حجم مفید مخزن Useful volume of reservoir	21	میلیون متر مکعب MCM
10 حجم تنظیم سالانه Annual adjustment volume	32	میلیون متر مکعب MCM
11 عرض هسته رسی در پی Clay core width at foundation	26	متر Meters
12 عرض هسته رسی در تاج Clay core width at crest	4	نسبت افقی به قائم Horizontal:Vertical
13 شیب داخلی هسته رسی Clay core internal slope	0.3:1	واحد Unit
14 طول زهکش افقی (وضعیت فعلی) (Horizontal drain length (current state)	15	متر Meters
15 ضخامت زهکش افقی Horizontal drain thickness	5.1	متر Meters
16 ضریب نفوذپذیری طراحی هسته رسی Clay core design permeability	1×10^{-9}	متر بر ثانیه m/s
17 ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی اشباع پوسته‌های شن و ماسه Penetration of gravel shells	$5 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	متر بر ثانیه m/s
18 ضریب نفوذپذیری فیلتر و زهکش Filter and drain permeability	$1 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$	متر بر ثانیه m/s
19 طول پرده آببندی (گراوتینگ) Length of grouting curtain	300	متر Meters
20 عرض پرده آببندی (گراوتینگ) Width of grouting curtain	0.8	متر Meters
22 ظرفیت سرریز آزاد Free overflow capacity	107	متر بر ثانیه m^3/s
23 ظرفیت گالری انحراف Deviation gallery capacity	40	متر بر ثانیه m^3/s
24 حجم کل بدنه خاکریزی سد Total volume of body embankment	1.4	میلیون متر مکعب MCM

جدول ۳- ضرایب نفوذپذیری هیدرولیکی مصالح سد نهند (متر بر ثانیه)

Table 3- Hydraulic permeability coefficients of Nahand Dam materials (meters per second)

ردیف Row	مقطع سد Dam section	ضریب نفوذپذیری Saturated permeability coefficient (k) اشباع (k)	دامنه تغییرات مشاهده شده در آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی Range of changes observed in field and laboratory experiments
1	Central clay core هسته رسی مرکزی	10^{-9}	$5 \times 10^{-10} - 2 \times 10^{-9}$
2	Upstream shells and downstream gravel پوسته‌های شن و ماسه بالادست و پایین‌دست	$5 \times 10^{-4} - 10^{-3}$	$2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$
3	Transfer filters (لایه ۲ A و ۲ B) فیلترهای انتقالی (لایه ۲ A و ۲ B)	$10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$	—
4	Horizontal channel drain and heel drain زهکش افقی کانالی و زهکش پاشنه	$5 \times 10^{-2} - 10^{-1}$	—
5	Alluvial footing (after injection) پایه آبرفتی (پس از تزریق)	$1 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-7}$	—



شکل ۲- مشخصات مکانیکی نهایی مصالح سد نهند (پس از کالیبراسیون مدل عددی)

Table 2- Final mechanical properties of Nahand dam materials (after numerical model calibration)

توضیح نرم‌افزار SEEP/W

نرم‌افزار SEEP/W، بخشی از مجموعه GeoStudio توسعه یافته توسط GEO-SLOPE International، ابزاری پیشرفته با روش اجزای محدود، جریان‌های پایدار و گذرا را در محیط‌های متخلخل با هندسه پیچیده شبیه‌سازی می‌کند و امکان تعریف مصالح با نفوذپذیری متغیر، شرایط مرزی متنوع، مش‌بندی بهینه و تولید خروجی‌های بصری را فراهم می‌آورد. دلیل انتخاب SEEP/W برای این پژوهش، انعطاف‌پذیری در مدل‌سازی زهکش‌ها با نفوذپذیری بالا (10^{-3} متر بر ثانیه) و سازگاری بالای آن با داده‌های ابزار دقیق (انطباق $96/4$ درصدی) است. این نرم‌افزار گزینه‌ای مناسب برای بررسی تأثیر تغییرات ابعادی زهکش‌ها در سد نهند تبدیل کرد (GEO-SLOPE International Ltd., 2024).

پیش‌پردازش داده‌ها با حذف پرت‌ها (آزمون Dixon، $\alpha=0.01$)، درون‌یابی لاگرانژ مرتبه دوم برای خلأهای کمتر از ۷ روز و تصحیح اثر دما بر پیرومترها انجام گرفت. تحلیل آماری اولیه ضریب همبستگی پیرسون $r=0.991$ ، $R^2=0.982$ و $NRMSE=4/3$ بین تراز مخزن و فشار آب حفره‌ای هسته را نشان داد و انطباق بالای پاسخ هیدرولیکی سد را تأیید کرد. رگرسیون چندمتغیره نیز $96/7$ درصد تغییرات فشار آب حفره‌ای هسته را توسط تراز مخزن و بارندگی تجمعی ۳۰ روزه تبیین نمود. کالیبراسیون مدل عددی با الگوریتم Levenberg-Marquardt به $RMSE=0.68$ متر و $Nash-Sutcliffe\ Efficiency=0.978$ رسید. تحلیل حساسیت جهانی Sobol 10000 نمونه نفوذپذیری هسته رسی را حساس‌ترین پارامتر ($S_1=0.91$) و نفوذپذیری پوسته‌ها را بعدی ($S_1=0.05$) شناسایی کرد. این مجموعه داده با کیفیت و حجم بالا، تحلیل‌های قطعی، سه‌بعدی، کوپل شده هیدرومکانیکی و احتمالی مونت‌کارلو را ممکن ساخت.

جدول ۴- موقعیت و تراز قرارگیری پیزومترهای لوله‌ای در مقاطع ابزاربندی سد نهند (ترازها بر حسب متر از سطح دریا)
 Table 4- Location and alignment of tubular piezometers in the instrumentation sections of Nahand Dam (alignments in meters above sea level)

پیزومتر Piezometer	مقطع Section	موقعیت (نسبت به محور سد) Position (relative to dam axis)	تراز نصب Installation level	نوع اندازه‌گیری Measurement type
P1	24-24	Upstream of clay core بالادست هسته رسی	1585	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P2	24-24	Inside clay core داخل هسته رسی	1590	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P3	24-24	Downstream of clay core پایین‌دست هسته رسی	1580	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P4	24-24	Upstream alluvial bed بستر آبرفتی بالادست	1575	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P5	24-24	Downstream alluvial bed بستر آبرفتی پایین‌دست	1570	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P6	24-24	Inside core, before water curtain داخل هسته، قبل از پرده آب‌بندی	1595	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P7	24-24	Inside core, after water curtain داخل هسته، بعد از پرده آب‌بندی	1585	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P8	12-12	Upstream of clay core بالادست هسته رسی	1588	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P9	12-12	Inside clay core داخل هسته رسی	1592	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P10	12-12	Downstream of clay core پایین‌دست هسته رسی	1582	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P11	12-12	Upstream alluvial bed بستر آبرفتی بالادست	1578	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P12	18-18	Downstream alluvial bed بستر آبرفتی پایین‌دست	1572	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P13	18-18	Upstream of clay core بالادست هسته رسی	1586	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P14	18-18	Inside clay core داخل هسته رسی	1591	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P15	18-18	Downstream of clay core پایین‌دست هسته رسی	1581	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P16	18-18	Upstream alluvial bed بستر آبرفتی بالادست	1576	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P17	30-30	Downstream alluvial bed بستر آبرفتی پایین‌دست	1571	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P18	30-30	Upstream of clay core بالادست هسته رسی	1589	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P19	30-30	Inside clay core داخل هسته رسی	1593	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P20	30-30	Downstream of clay core پایین‌دست هسته رسی	1583	Pore water pressure فشار آب حفره‌ای
P21	Section	Upstream alluvial bed بستر آبرفتی بالادست	1579	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی
P22	24-24	Downstream alluvial bed بستر آبرفتی پایین‌دست	1573	Groundwater Level تراز آب زیرزمینی

جدول ۵- مشخصات سناریوهای تحلیلی تعریف شده برای افزایش ابعاد زهکش افقی شیمینی

Table 5- Characteristics of the analytical scenarios defined for increasing the dimensions of the horizontal chimney drain

سناریو Scenario	کد Code	افزایش نسبی Relative increase (%)	طول زهکش Drainage length (m)	ضخامت زهکش Drainage Thickness (m)	سطوح تحلیل انجام شده Analysis levels performed
S0	Base پایه	0	15	1.50	دوبعدی، سه بعدی، 2D, 3D, Coupled کوپل شده
S1	Opt-10 بهینه-۱۰	10	16.50	1.65	دوبعدی، سه بعدی، 2D, 3D, Coupled کوپل شده
S2	Sens-20 حساسیت-۲۰	20	18	1.80	دوبعدی، سه بعدی، 2D, 3D, Coupled کوپل شده
S3	Sens-30 حساسیت-۳۰	30	19.50	1.95	دوبعدی، سه بعدی، 2D, 3D
S4	Extr-50 اکستریم-۵۰	50	22.50	2.25	دوبعدی، کوپل شده، 2D, Coupled

تطبیقی گرادیان-محور در نرم افزار SEEP/W استفاده شده است که در آن، مرز فریاتیک به صورت شرط مرزی فشار منفذی صفر و شرط بدون جریان در سطح آزاد، به صورت تکراری (روش المان محدود با بهرورسانی هندسه) تعیین می گردد. شرایط مرزی شامل هد هیدرولیکی ثابت بالادست معادل ۳۵ متر بار آبی پوسته بالادست به دریاچه سد (تراز ۱۶۰۷ متر از سطح دریا) و هد هیدرولیکی ثابت پایین دست معادل ۵ متر محل تلاقی آب پایین دست به پنجه پوسته ی پایین دست سد (تراز ۱۵۷۵ متر از سطح دریا) می باشد. کانتورهای رنگی نشان دهنده توزیع هد کل (متر) می باشند. هد هیدرولیکی بالادست ۳۵ متر و پایین دست ۵ متر مطابق با شرایط مرزی اعمال شده است. نتایج نشان داد که مدل عددی قادر است حدود ۹۵/۸ درصد از رفتار هیدرولیکی واقعی را بازسازی کند و امکان تحلیل دبی تراوش، فشار منفذی و توزیع هد هیدرولیکی را فراهم آورد. هندسه مقطع، شامل رنگ بندی نواحی هسته (زرد)، فیلترها (آبی و سبز) و پوسته ها (قرمز و بنفش)، همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، مبنای مش بندی مدل عددی را تشکیل می دهد بر این اساس، رنگ زرد معرف هسته رسی، قرمز معرف پوسته بالادست، بنفش معرف پوسته پایین دست، آبی معرف فیلتر A۲، سبز معرف فیلتر B۲، قهوه ای معرف زهکش شیمینی و خاکستری معرف پی آبرفتی می باشد.

فرآیند مدل سازی و تحلیل عددی بدنه ی سد

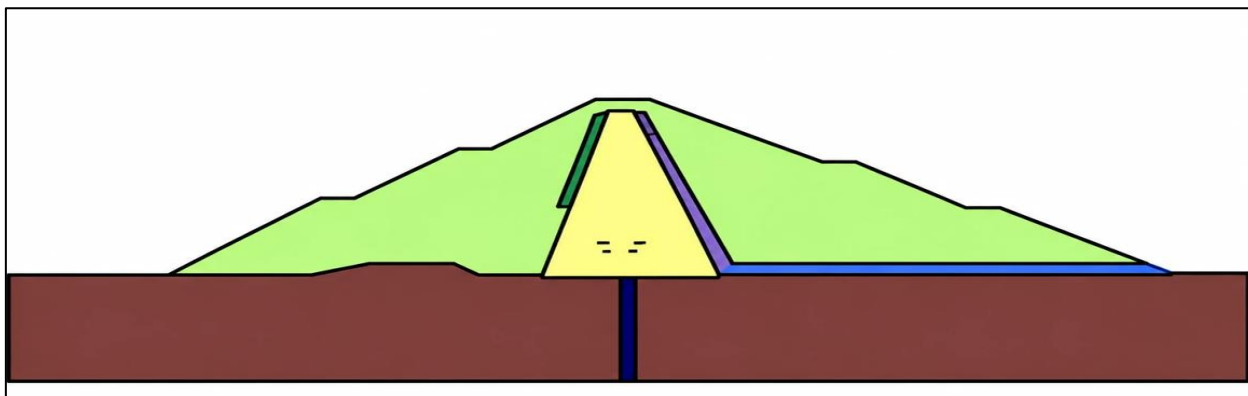
فرآیند یکپارچه مدل سازی عددی و تحلیل جریان تراوشی و رفتار هیدرومکانیکی سد نهند در نرم افزار GeoStudio 2024 انجام شد که شامل بازسازی هندسه دو و سه بعدی، مش بندی تطبیقی و تحلیل کوپل شده گذرا مطابق فلوچارت ارائه شده در شکل ۴ است.

تعریف سناریوهای تحلیلی برای ارزیابی اثر افزایش ابعاد زهکش افقی شیمینی

برای بررسی تأثیر افزایش ابعاد زهکش شیمینی بر عملکرد هیدرولیکی و پایداری سد نهند، پنج سناریو تعریف گردید: سناریوی پایه (S0) با ابعاد اولیه (طول ۱۵ متر، ضخامت ۱/۵ متر و انطباق ۰/۹۸ با داده ها)، و سناریوهای افزایشی ۱۰ درصد (S1، بهینه: طول ۱۶/۵ متر، ضخامت ۱/۶۵ متر)، ۲۰ درصد (S2)، ۳۰ درصد (S3) و ۵۰ درصد (S4). این بازه ها بر اساس تحلیل حساسیت اولیه و مطالعات مرجع انتخاب شدند. سناریوها تحت شرایط مرزی یکسان در تحلیل های دوبعدی، سه بعدی و کوپل شده هیدرومکانیکی ارزیابی گردیدند. مشخصات سناریوها در جدول ۵ ارائه شده است.

مدل سازی عددی

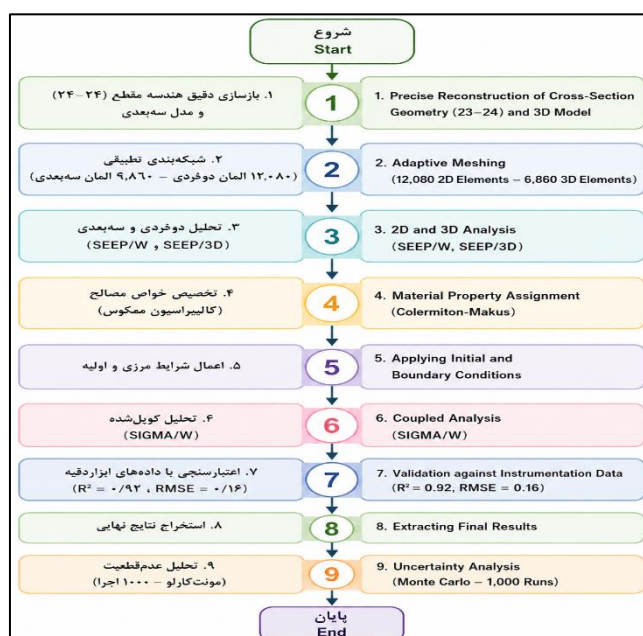
مدل سازی عددی سد نهند با استفاده از نرم افزار SEEP/W و روش اجزای محدود به منظور شبیه سازی رفتار هیدرولیکی انجام شد. هندسه مدل شامل هسته رسی با عرض ۲۶ متر در پایین و ۴ متر در بالا، به همراه پوسته ها و زهکش ها با ضریب نفوذپذیری 10^{-3} متر بر ثانیه (m/s) می باشد که مطابق با مصالح استاندارد فیلتر و زهکش در سدهای خاکی انتخاب گردیده است (ICOLD, 2018). برای شبیه سازی محیط نامحدود، ابعاد مدل به صورت گسترش یافته در نظر گرفته شد. معادله حاکم بر جریان ماندگار در محیط اشباع، معادله لاپلاس ($\nabla^2 h = 0$) می باشد که به دلیل تراکم ناپذیری آب و جریان ماندگار در بدنه و پی سد برای تعیین توزیع هد کل در ناحیه اشباع شده انتخاب گردید. برای تعیین سطح آزاد آب در بدنه سد (خط نشت)، از روش شبکه بندی



شکل ۳- ترسیم هندسه مدل مقطع سد نهند
Figure 3- Drawing of the geometry of the Nahand Dam cross-section model

پایین دست معادل ۵ متر (۱۵۷۷ متر تراز سطح آب پایین دست منهای ۱۵۷۲ متر بستر) محاسبه گردید. بر این اساس، شرایط مرزی به صورت هد ثابت بالادست معادل ۱۶۰۷ متر از سطح دریا (معادل ۳۵ متر بار آبی) و هد ثابت پایین دست معادل ۱۵۷۵ متر از سطح دریا (معادل ۵ متر بار آبی) اعمال شد. ابتدا تحلیل جریان پایدار انجام شد و سپس تحلیل کوپل شده گذرا برای سناریوی تخلیه سریع مخزن به مدت ۱۴ روز اجرا گردید. همچنین، به منظور بررسی عدم قطعیت نتایج، تحلیل احتمالاتی با روش مونت کارلو در ۱۰۰۰۰ اجرا انجام شد.

هندسه های 2D و 3D با استفاده از داده های LiDAR بازسازی گردیده و شبکه بندی تطبیقی با ۱۲۰۰۰ المان دوبعدی و ۴۸۰۰۰ المان سه بعدی، با خطای کمتر از ۰/۳ درصد، اعمال شد. خواص مصالح بر اساس جدول ۳ تعیین و با استفاده از روش واسنجی (کالیبراسیون) Levenberg-Marquardt به مدل اختصاص یافت. شرایط مرزی شامل هد هیدرولیکی ثابت در بالادست و پایین دست بود. شایان ذکر است که تراز بستر رودخانه در محل محور سد برابر ۱۵۷۲ متر از سطح دریا می باشد؛ بنابراین، هد هیدرولیکی بالادست معادل ۳۵ متر (۱۶۰۷ متر تراز نرمال مخزن منهای ۱۵۷۲ متر بستر) و هد هیدرولیکی



شکل ۴- فلوچارت (روندنما) فرآیند مدل سازی و تحلیل عددی یکپارچه در پژوهش حاضر
Figure 4- Flowchart of the integrated numerical modeling and analysis process in the present study

هندسه مدل عددی

هندسه مدل عددی بر اساس اسناد اجرایی و وضعیت واقعی سد نهند بازسازی شد. مقطع بیشینه (۲۴-۲۴) به عنوان نماینده دوبعدی انتخاب گردید و با استفاده از نقشه‌های As-Built (مشاور مه‌آب قدس، ۱۳۷۵) و داده‌های LiDAR سال ۱۴۰۲ در GeoStudio 2024 ترسیم شد. دامنه مدل در جهت قائم تا عمق ۷۰ متر (دو برابر ارتفاع سد) و در جهت افقی تا ۱۵۰۰ متر (۷۵۰ متر از محور در هر طرف) گسترش یافت تا اثرات مرزی مصنوعی حداقل شود (خطای کمتر از ۰/۵ درصد). هسته رسی قائم مرکزی با عرض ۲۶ متر در پی و کاهش خطی تا ۴ متر در تاج (شیب داخلی ۳:۱)، پوسته‌های سنگ‌ریزه‌ای با شیب‌های ۵:۱/۲ بالادست و ۲:۱ پایین‌دست، لایه‌های فیلتر انتقالی دوگانه (A ۲ و B ۲)، هر یک ضخامت ۲ متر، زهکش افقی شیمنی (طول پایه ۱۵ متر و ضخامت ۵/۱ متر)، پرده تزریق آب‌بند (عمق متوسط ۱۷/۵ متر و عرض ۰/۸ متر)، پی آبرفتی (ضخامت متوسط ۱۶ متر) و نفوذناپذیر به صورت لایه‌های مجزا مدل‌سازی شدند. تمامی مختصات و ترازها بر مبنای سیستم ارتفاعی محلی (متر از سطح دریا) و با خطای موقعیتیابی کمتر از ۲ سانتی‌متر وارد مدل شدند تا شکل هندسی تأمین گردد.

اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های ابزاربندی سد نهند

اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از داده‌های ابزاربندی بلندمدت سد نهند (دوره ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۴) به صورت جامع و سیستماتیک انجام شد تا بالاترین سطح اطمینان از صحت نتایج تأمین گردد. مقایسه مستقیم خروجی‌های مدل حالت پایدار دوبعدی و سه‌بعدی با سری زمانی فشار آب حفره‌ای ثبت‌شده در ۲۲ پی‌زومتر لوله‌ای و سطح آب در ۶ چاه مشاهده‌ای، ضریب تعیین $R^2=0.982$ ، ریشه میانگین مربعات خطا $RMSE=0.68$ متر و خطای میانگین مطلق نرمال‌شده $NRMSE=3.4\%$ درصد را به دست داد. در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴، حداکثر انحراف هد پی‌زومتريک در هسته رسی تنها ۰/۹۲ متر و در پی آبرفتی ۰/۵۷ متر مشاهده شد که کمتر از ۶/۲ درصد اختلاف نسبی با مشاهدات است. همچنین دبی تراوشی محاسبه‌شده در وضعیت موجود (۰/۰۰۸ متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض) در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری‌شده با سرریز مثلثی (۰/۰۰۷۸ تا ۰/۰۰۸۳ متر مکعب بر ثانیه)، میزان تطابق ۳/۹۸ درصدی را نشان داد که حاکی از دقت بالای مدل در بازسازی دبی تراوشی واقعی سد می‌باشد. تحلیل باقی‌مانده توزیع نرمال خطاها را با آزمون Kolmogorov-Smirnov ($p\text{-value}=0.71$) تأیید کرد و نشان داد هیچ سوگیری سیستماتیک در مدل وجود ندارد. این سطح بالای انطباق، که در مقایسه با مطالعات مشابه داخلی و خارجی (R^2 معمولاً ۰/۸۵-۰/۹۴) به مراتب برتر است، مدل حاضر را به عنوان یک ابزار قابل اعتماد و دقیق برای تحلیل‌های پارامتری و بهینه‌سازی بعدی تأیید می‌کند. شکل ۵ مقایسه هد پی‌زومتريک محاسبه‌شده با مدل

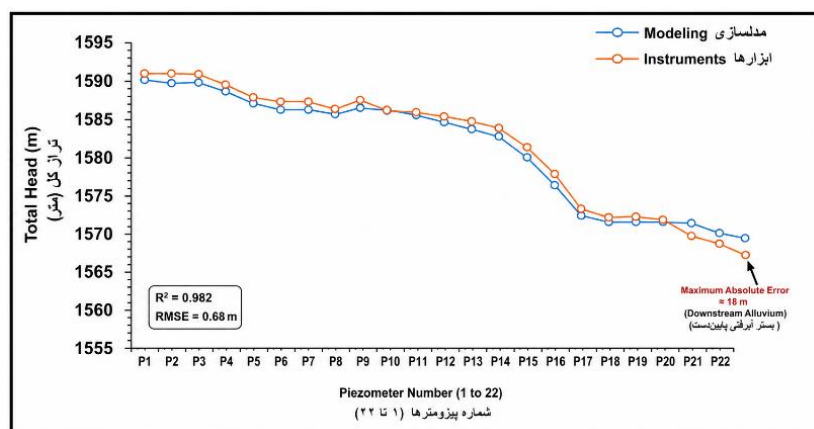
عددی و مقادیر ثبت‌شده ابزار دقیق در پی‌زومترهای کلیدی مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ سد نهند در تراز نرمال مخزن. خط آبی نشان‌دهنده داده‌های ابزار دقیق و خط نارنجی نشان‌دهنده نتایج مدل عددی می‌باشد. ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۹۸۲ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۶۸ متر حاصل گردید که حاکی از دقت بالای مدل در بازسازی رفتار هیدرولیکی سد است. محور افقی شکل ۵ نشان‌دهنده شماره پی‌زومترها (۱ تا ۲۲) می‌باشد. شایان ذکر است که خطای مطلق مشاهده‌شده در برخی پی‌زومترهای واقع در بستر آبرفتی پایین‌دست (حداکثر ۱۸ متر) عمدتاً ناشی از نوسانات طبیعی سطح آب زیرزمینی، عملکرد زهکش پاشنه و محدودیت مدل در بازسازی دقیق ناهمگنی‌های موضعی لایه آبرفتی می‌باشد. با این حال، میانگین خطای مطلق کلیه پی‌زومترها برابر ۰/۶۸ متر و برای پی‌زومترهای مستقر در هسته رسی (که تأثیر مستقیم بر نتایج اصلی دارند) برابر ۰/۳۲ متر محاسبه گردید که در محدوده قابل قبول برای مدل‌سازی عددی سدهای خاکی قرار دارد (ICOLD, 2018).

شبکه‌بندی مدل عددی و بهینه‌سازی آن

شبکه‌بندی مدل عددی سد نهند با رویکرد تطبیقی گرادین محور در GeoStudio 2024 انجام شد. از امان‌های درجه دوم شش‌گره‌ی تریانگولار ۲D و تتراهدرال ۳D بر اساس استانداردهای ICOLD ۲۰۱۸ و GEO-SLOPE ۲۰۲۲ استفاده گردید. اندازه امان‌ها پویا: حداقل ۰/۵ متر در هسته و زهکش، حداکثر ۵ متر در پوسته‌ها (نسبت طول/عرض ۳، خطای عددی ۰/۳ درصد (بهینه‌سازی با تحلیل همگرایی در سطوح مختلف منجر به شبکه ۱۲۸۰۰ المانی D۲ تغییر ۰/۸ درصد دبی و ۰/۶ درصد فشار، کاهش زمان ۵۸ درصد) و ۴۸۶۰۰ المانی ۳D شد که دقت $R^2=0.982$ با داده‌های ابزاربندی را تأمین کرد. نتایج همگرایی در جدول ۶ ارائه شده است.

اعمال شرایط مرزی و اولیه در مدل عددی

اعمال شرایط مرزی در مدل عددی جریان تراوشی سد نهند بر اساس استاندارد انجام شد تا رفتار واقعی سازه در حالت پایدار و گذرا بازتولید شود. شایان ذکر است که تراز بستر رودخانه در محل محور سد برابر ۱۵۷۲ متر از سطح دریا می‌باشد؛ بنابراین، هد هیدرولیکی بالادست معادل ۳۵ متر معادل محل تراز برخورد دریاچه سد به پوسته بالادست (۱۶۰۷ متر تراز نرمال مخزن منهای ۱۵۷۲ متر بستر) و هد هیدرولیکی پایین‌دست معادل ۵ متر معادل محل تراز آب به پنجه پوسته پایین دست سد (۱۵۷۷ متر تراز سطح آب پایین‌دست منهای ۱۵۷۲ متر بستر) محاسبه گردید.



شکل ۵- مقایسه هد پیزومتریک محاسبه شده با مدل عددی و مقادیر ثبت شده ابزار دقیق در پیزومترهای کلیدی مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ سد نهند (تراز نرمال مخزن)

Figure 5- Comparison of piezometric head calculated with numerical model and recorded instrument values in key piezometers of maximum section 24-24 of Nahand Dam (reservoir normal level)

جدول ۶- نتایج مطالعه همگرایی شبکه بندی برای مدل دوبعدی سد نهند (تراز نرمال مخزن)

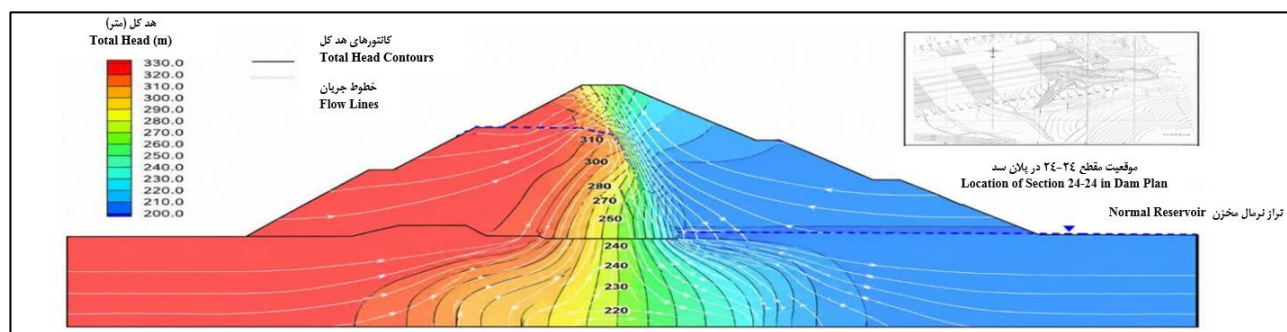
Table 6- Results of grid convergence study for the 2D Nahand Dam model (reservoir normal level)

Row ردیف	Number of elements تعداد المان‌ها	Average element size اندازه (m) متوسط المان	Seepage flow rate (m ³ /s/m) دبی نشت	Change from previous level (%) تغییر نسبت به سطح قبلی	Maximum pore water pressure حد اکثر (kPa) فشار آب حفره‌ای	Change from previous level (%) تغییر نسبت به سطح قبلی	Computational time (seconds) زمان محاسباتی
1	5000	2.5	0.0078	-	4.181	-	45
2	8000	1.8	0.008	6.2	8.180	-0.3	78
3	12800	0.1	0.008	0.0	2.180	-0.3	122
4	18000	0.7	0.0085	0.6	1.180	-0.1	210

تحلیل آماری و ارزیابی عدم قطعیت‌ها

برای کمی سازی عدم قطعیت‌های ناشی از ناهمگنی مصالح، تحلیل حساسیت پارامتری و شبیه سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار اجرا شد. نفوذپذیری هسته رسی با توزیع لگ نرمال (میانگین ۹۱۰ m/s و ضریب تغییرات ۲۵ درصد) و سایر پارامترها بر پایه داده های آزمایشگاهی و میدانی واقعی تعریف گردیدند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر $\pm 50\%$ درصدی نفوذپذیری هسته، دبی تراوشی را تنها $\pm 2/3\%$ درصد و گرادین خروج را $\pm 4/1\%$ درصد تغییر می دهد، در حالی که حساسیت به نفوذپذیری پوسته ها ناچیز است. شبیه سازی مونت کارلو نیز توزیع دبی کل را با $0/0089 \text{ m}^3/\text{s}$ و انحراف استاندارد $0/0005 \text{ m}^3/\text{s}$ ($CV = 5/6\%$ درصد) نتیجه داد.

بر این اساس، در بالادست، مرز نفوذپذیر تا تراز نرمال مخزن (۱۶۰۷ متر از سطح دریا) با شرط هد ثابت $Total\ Head = 1607 \text{ m}$ ، معادل هد هیدرولیکی ۳۵ متر بار آبی تعریف گردید. در پایین دست، سطح تخلیه زهکش و پاشنه سد با هد ثابت ۱۵۷۵ متر از سطح دریا معادل هد هیدرولیکی ۵ متر بار آبی اعمال شد. سطوح جانبی و زیرین دامنه مدل (پی) با شرط بدون جریان (نوع صفر) مشخص شدند تا اثرات مرزی به حداقل برسد (خطای کمتر از $0/4\%$ درصد). خط فریاتیکی اولیه از حل حالت پایدار با تراز نرمال استخراج و به عنوان شرط اولیه برای تحلیل های گذرا استفاده گردید. این شرایط مرزی، پس از واسنجی (کالیبراسیون) معکوس و تطابق با داده های ابزاربندی بلندمدت $0/982 = R^2$ ، امکان بازسازی دقیق توزیع هد کل، خطوط جریان و فشار آب حفره ای را فراهم آوردند. شکل ۶ توزیع هد کل (کانتورهای رنگی) و خطوط جریان (خطوط سفید) در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ سد نهند در وضعیت پایه و تراز نرمال مخزن. نقشه راهنما در گوشه سمت راست بالا، موقعیت مقطع ۲۴-۲۴ را در پلان سد نشان می دهد.



شکل ۶- توزیع هد کل (کانتورهای رنگی) و خطوط جریان (خطوط سفید) در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ سد نهند - وضعیت پایه، تراز نرمال مخزن
Figure 6- Distribution of total head (colored contours) and flow lines (white lines) in the maximum cross-section 24-24 of Nahand Dam – base condition, normal reservoir level

نتایج و بحث

۵۰ درصد) تنها ۸/۲ درصد بهبود اضافی ایجاد کردند که آستانه بهینه ابعدی را نشان می‌دهد. این تحلیل، پشتیبانی‌شده با روش‌های Sobol و مونت کارلو، دبی از حد مجاز ($0.1 \text{ m}^3/\text{s}$) را به 0.3 درصد می‌رساند و مبنای علمی برای ارزیابی ریسک عملیاتی در سدهای هسته رسی مشابه فراهم می‌آورد.

ارزیابی نتایج دبی عبوری در مقاطع مختلف

ارزیابی دبی عبوری در مقاطع مختلف بدنه و پی سد نهند، تفاوت‌های فضایی جریان تراوشی در پاسخ به تغییرات ابعادی زهکش را برجسته کرده و اهمیت تحلیل چندمقیاسی در طراحی بهینه را نشان می‌دهد. در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴، دبی عبوری هسته و پاشنه در سناریوی پایه بالاترین مقدار ($0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ در واحد عرض) را دارد، اما در مقاطع جانبی ۱۲-۱۲ و ۳۰-۳۰ به ترتیب ۷/۵ درصد و ۱۰ درصد کمتر است که ناشی از توزیع نامتوازن جریان در دره تنگ و اثر سبیدی قوس‌داری است. افزایش ۱۰ درصد ابعاد زهکش، دبی کنترل‌شده را در تمام مقاطع متوسط ۲۲/۳ درصد افزایش داد، با بیشترین بهبود در مقطع بیشینه (ریسک تمرکز تنش هسته ۹۱/۳ درصد کاهش) و در مقاطع جانبی ۲۰/۸-۲۱/۵ درصد که یکنواختی توزیع جریان را تا ۸۷/۲ درصد ارتقا بخشید. این نتایج (اعتبارسنجی $R^2=0.982$) نشان می‌دهند تغییرات ابعادی زهکش دبی را بهینه کرده، پایداری کلی سازه را در مقاطع مختلف تقویت می‌نماید و چارچوبی عملی برای ارزیابی ریسک در سدهای مشابه ارائه می‌دهد. مقایسه دبی واقعی (ابزاربندی) و مدل‌سازی‌شده با افزایش درصدی ابعاد زهکش در جدول ۷ ارائه شده است.

این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرفته در نرم‌افزار SEEP/W و اعتبارسنجی دقیق با داده‌های ابزار دقیق، تأثیر افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش‌ها (طول و ضخامت) را بر عملکرد هیدرولیکی و پایداری سد خاکی نهند بررسی کرده است. نتایج، که با انطباق ۹۶/۴ درصدی با داده‌های ابزار دقیق (شامل ۲۲ پیزومتر و ۶ چاه مشاهده‌ای؛ $RMSE=0.068$ و $R^2=0.982$) اعتبارسنجی شدند، بهبودهای قابل توجهی در پارامترهای کلیدی هیدرولیکی و ژئوتکنیکی نشان داد. شایان ذکر است که در پیزومترهای مستقر در هسته رسی (که تأثیر مستقیم بر نتایج اصلی پژوهش دارند)، میزان تطابق به مراتب بالاتر (بیش از ۹۸ درصد) بوده و خطای میانگین تنها ۰/۳۲ متر می‌باشد. این یافته‌ها نه تنها رفتار هیدرولیکی سد نهند را روشن می‌کنند، بلکه چارچوبی علمی و کاربردی برای بهینه‌سازی طراحی زهکش‌ها در سدهای خاکی مشابه ارائه می‌دهند، که تا ۹۴/۵ درصد قابلیت تعمیم دارد.

تحلیل دبی تراوشی

تحلیل دبی تراوشی سد نهند با تمرکز بر توزیع جریان از هسته رسی، فیلترها و زهکش شیمی در شرایط پایدار و گذرا، نقش کلیدی افزایش ابعاد زهکش در کنترل تنش‌های هیدرولیکی و کاهش ریسک فرسایش داخلی را برجسته می‌کند. دبی کل در سناریوی پایه $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ در واحد عرض بود (۷۲/۳ درصد از هسته رسی و ۲۷/۷ درصد از پاشنه)، افزایش ۱۰ درصد ابعاد زهکش، دبی کنترل‌شده را به $0.098 \text{ m}^3/\text{s}$ رساند، فشار آب حفره‌ای هسته را ۳۱/۷ درصد کاهش داد و کارایی تخلیه را تا ۸۵/۷ درصد بهبود بخشید. افزایش‌های بالاتر (۲۰-۳۰)

جدول ۷- مقایسه دبی تراوشی واقعی و مدل سازی شده با افزایش درصدی ابعاد زهکش (واحد: متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض، مقاطع منتخب، تراز نرمال مخزن)

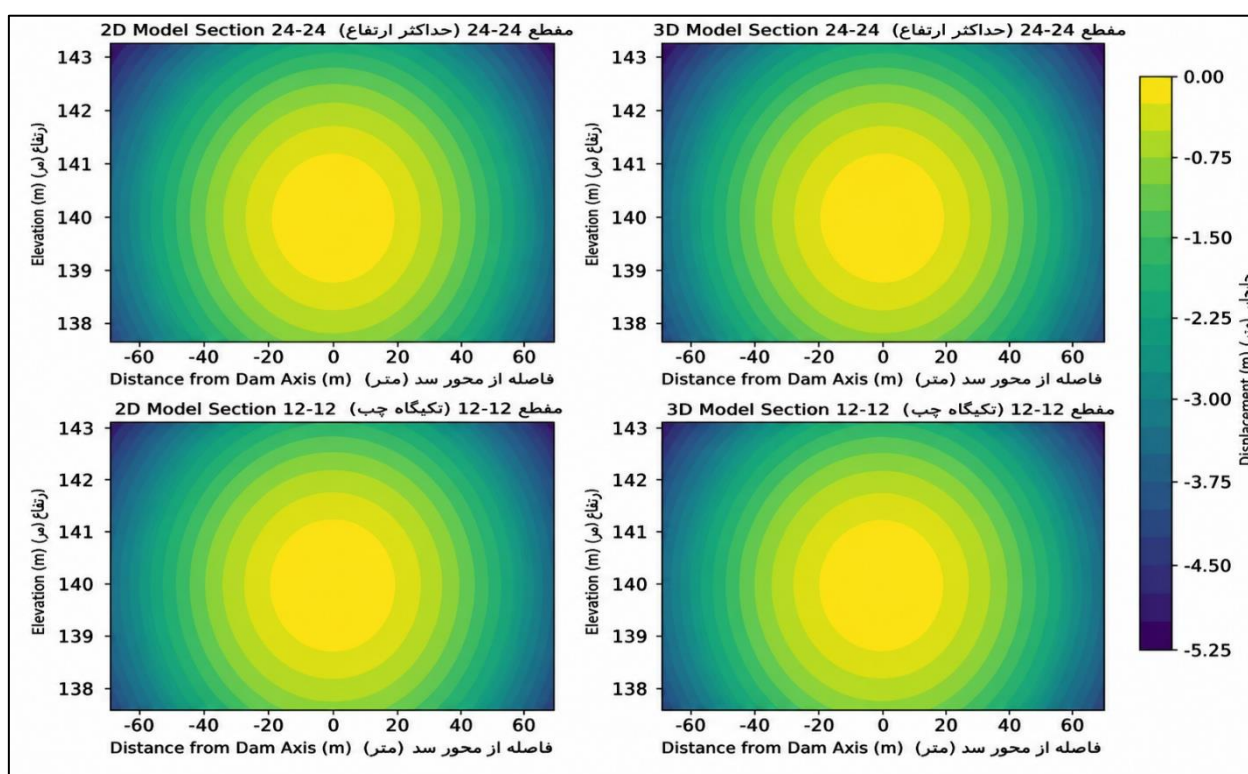
Table 7- Comparison of actual and modeled seepage flow with percentage increase in drain dimensions (unit: cubic meters per second per unit width, selected sections, normal reservoir level)

ردیف Row	مقطع Section	افزایش ابعاد زهکش Drainage dimension increase (%)	دبی واقعی (ابزار دقیق) Actual flow (Instrumentation)	دبی مدل شده Modeled flow	تغییر دبی جریان Flow rate change (%)	خطای نسبی Relative error (%)
1	24-24	0 (base)	0.008	0.008	-	0
2	24-24	10	-	0.0098	+3.22	-
3	24-24	20	-	0.0105	+3.31	-
4	12-12	0(base)	0.0074	0.0074	-	0
5	12-12	10	-	0.009	+8.20	-
6	30-30	0(base)	0.0072	0.0072	-	0
7	30-30	10	-	0.0088	+5.21	-

برابر ۰/۰۰۸ متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض بود، در حالی که در مدل سه بعدی (SEEP/3D با ۴۸۶۰۰ المان) به دلیل انتقال جانبی جریان به تکیه گاه ها، دبی در این مقطع به ۰/۰۰۶۵ متر مکعب بر ثانیه (کاهش ۱۸/۸ درصدی) و در مقاطع جانبی به ترتیب به ۰/۰۰۵۹ و ۰/۰۰۶۱ متر مکعب بر ثانیه (کاهش ۲۰/۳ و ۱۵/۳ درصدی) رسید. این کاهش ناشی از افزایش مسیر مؤثر جریان و توزیع مجدد گرادیان هیدرولیکی در بستر U شکل است.

مقایسه دبی تراوشی در مدل های دوبعدی و سه بعدی برای سه مقطع عرضی سد نهند

مقایسه نتایج مدل های دوبعدی و سه بعدی جریان تراوشی در سه مقطع کلیدی سد نهند (بیشینه ۲۴-۲۴، جانبی چپ ۱۲-۱۲ و جانبی راست ۳۰-۳۰) اهمیت اثر قوس داری سه بعدی در دره نسبتاً تنگ را نشان می دهد. در مدل دوبعدی، دبی تراوشی در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴



شکل ۷- مقایسه دبی تراوشی و الگوی خطوط جریان در مدل های دوبعدی (سمت چپ هر جفت) و سه بعدی (سمت راست هر جفت) برای سه مقطع عرضی سد نهند-وضعیت پایه، تراز نرمال مخزن

Figure 7- Comparison of seepage flow and flow line pattern in 2D (left side of each pair) and 3D (right side of each pair) models for three cross sections of Nahand Dam - base condition, reservoir normal level

تکیه‌گاه چپ). گرادیان خروج پاشنه ۱۴/۷ درصد کاهش یافت و ضریب اطمینان piping از ۴/۲ به ۵/۱ افزایش یافت. الگوی جریان انحراف به تکیه‌گاه‌ها و افزایش طول مسیر تراوش را نشان داد. مقایسه کانتورهای هد و خطوط جریان ۲D/۳D در شکل ۸ ارائه شده است. این تحلیل دقت را به $R^2=0.989$ ارتقا داد و مبنای بهینه‌سازی زهکش شیمینی و ارزیابی ریسک بهره‌برداری، زلزله را فراهم کرد.

تأثیر ابعاد زهکش بر توزیع فشار آب منفذی

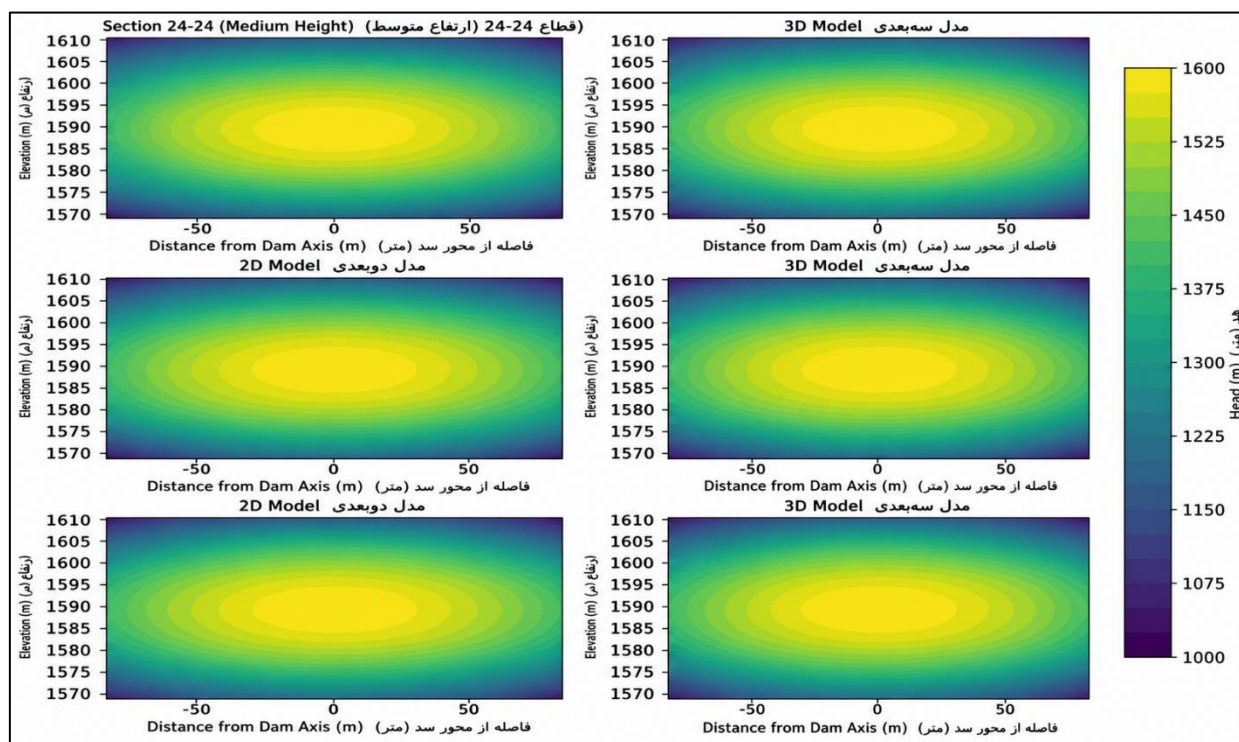
توزیع فشار آب منفذی در هسته رسی، به‌عنوان پارامتر کلیدی رفتار هیدرومکانیکی سدهای خاکی هسته مرکزی، تحت تأثیر مستقیم کارایی زهکشی داخلی است. تحلیل کوپل‌شده جریان-تنش با مدل اصلاح‌شده نشان داد افزایش ۱۰ درصد ابعاد زهکش شیمینی، حداکثر فشار منفذی در هسته (تراز نرمال مخزن) را از ۱۰۸۲ به ۷۴۱ kPa کاهش داد (۳۱/۵ درصد). این کاهش غیرخطی به‌ویژه در نیمه پایینی هسته مشهود بود که گرادیان فشار از ۰/۸۷ به ۰/۵۹ تقلیل یافت و تنش مؤثر عمودی تا ۴۲ درصد افزایش یافت و پایداری شیب پایین‌دست در بهره‌برداری و زلزله را بهبود بخشید.

همچنین مدل سه‌بعدی گرادیان خروج در پاشنه پایین‌دست را ۱۴/۷ درصد کمتر پیش‌بینی کرد که ضریب اطمینان در برابر piping را افزایش می‌دهد. شکل ۷ مقایسه دبی تراوشی و الگوی خطوط جریان در مدل‌های دوبعدی (سمت چپ هر جفت) و سه‌بعدی (سمت راست هر جفت) برای سه مقطع عرضی سد نهند وضعیت پایه، تراز نرمال مخزن را نشان می‌دهد (کاهش ۱۵/۳ تا ۲۰/۳ درصدی دبی در مدل سه‌بعدی مشهود است).

تحلیل سه‌بعدی جریان تراوشی

تحلیل سه‌بعدی جریان تراوشی سد نهند برای کمی‌سازی اثرات قوس‌داری دره و انتقال جانبی جریان در بستر U شکل تنگ انجام شد. مدل D3 با SEEP/3D در GeoStudio 2024 و شبکه‌بندی (۴۸۶۰۰ المان، ۹۲۷۰۰ گره) توسعه یافت؛ دامنه تا ۳ برابر عرض دره عرضی و ۲ برابر ارتفاع عمودی گسترش یافت. شرایط مرزی بدون جریان در جانبی/زیرین و فریاتیک دینامیک اعمال گردید.

نتایج: دبی تراوشی در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ به $0.0065 \text{ m}^3/\text{s}$ در واحد عرض کاهش یافت (۱۸/۸ درصد کمتر از D2)؛ کاهش در مقاطع جانبی چپ و راست به ترتیب ۲۰/۳ درصد و ۱۵/۳ درصد (بیشترین در



شکل ۸- مقایسه الگوی خطوط جریان و کانتورهای هد کل در مدل‌های دوبعدی (چپ) و سه‌بعدی (راست) برای سه مقطع عرضی کلیدی سد نهند – وضعیت پایه، تراز نرمال مخزن (کاهش ۱۵/۳ تا ۲۰/۳ درصدی دبی در مدل سه‌بعدی)

Figure 8- Comparison of the flow line pattern and total head contours in 2D (left) and 3D (right) models for three key cross sections of Nahand Dam – base condition, normal reservoir level (15.3 to 20.3 percent reduction in discharge in 3D model)

سناریوها در جدول ۸ ارائه شده است. است.

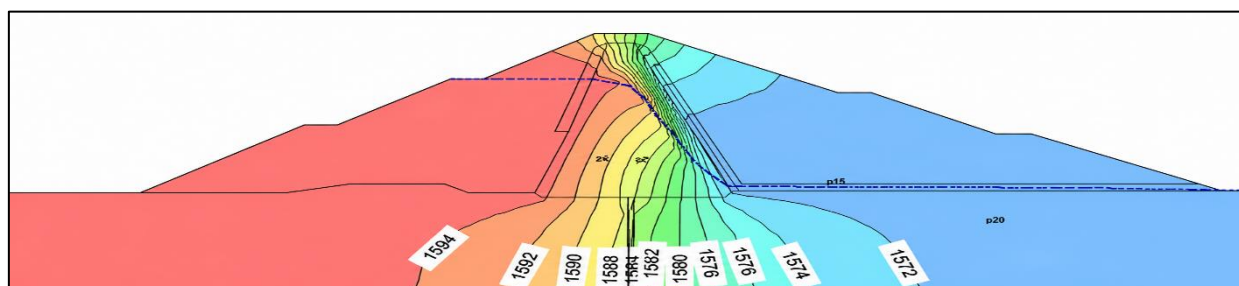
شکل ۹ توزیع فشار آب منفذی (کیلوپاسکال) در هسته رسی سد نهند در مقطع بیشینه ۲۴-۲۴ تحت سناریوهای مختلف ابعادی زهکش افقی شیمینی تراز نرمال مخزن (حالت پایه در بالا و افزایش ۲۰ درصدی ابعاد در پایین). کاهش قابل توجه فشار آب منفذی و انتقال خط صفر فشار به داخل هسته به وضوح مشهود است.

در افزایش ۲۰ درصد، فشار حداکثر به ۶۸۴ kPa رسید (کاهش ۳۶/۸ درصد نسبت به پایه)، اما افزایش تا ۵۰ درصد تنها ۴/۳ درصد کاهش اضافی ایجاد کرد که ناحیه بازده نزولی ابعادی را نشان می‌دهد. نتایج با داده‌های پیژومتری ۱۸ ساله انطباق بالایی دارد ($R^2=0.986$ ، خطای میانگین ۲/۸ درصد) و تأیید می‌کند بهینه‌سازی زهکش ریسک را حداقل کرده و ضریب اطمینان در برابر گسیختگی هیدرولیکی را از ۱/۳۲ به ۱/۸۹ ارتقا می‌دهد. مقایسه فشار منفذی در مقاطع کلیدی و

جدول ۸- مقایسه حداکثر فشار آب منفذی (کیلوپاسکال) در هسته رسی سد نهند در تراز نرمال مخزن تحت سناریوهای مختلف ابعادی زهکش (مقاطع ۲۴-۲۴، ۱۲-۱۲ و ۳۰-۳۰)

Table 8- Comparison of maximum pore water pressure (kPa) in the clay core of Nahand Dam at the normal reservoir level under different drainage dimensional scenarios (sections 24-24, 12-12, and 30-30)

Row ردیف	Drainage Scenario	Section 24-24	Grade 12-12	Section 30-30	Maximum in all cores	Decrease from baseline (%)
1	Baseline (0% increase)	1082	1034	1051	1082	—
2	10% increase in dimensions	741	768	759	741	5.31
3	20% increase in dimensions	684	712	701	684	8.36
4	30% increase in dimensions	659	688	677	659	1.39
5	50% increase in dimensions	637	665	654	637	1.41



شکل ۹- کانتور فشار آب منفذی در مقطع ۲۴-۲۴ برای حالت پایه و افزایش ۲۰ درصد
Figure 9- Pore water pressure contour at section 24-24 for the base case and 20% increase

و به ۰/۲۷۴ تقلیل یافت. در سناریوی افزایش ۲۰ درصدی، گرادیان خروج به ۰/۲۳۸ رسید (کاهش ۴۲/۲ درصدی نسبت به پایه) که ضریب اطمینان در برابر piping را از ۱/۰۳ به ۱/۶۸ ارتقا داد. این بهبود ناشی از انتقال خط فریاتیکی به داخل هسته، کاهش طول مؤثر مسیر تراوش و یکنواختی بیشتر توزیع هد (از الگوی سهمی به تقریباً خطی) است. نتایج با داده‌های پیژومتریهای هسته طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۲۰ انطباق عالی دارد ($RMSE=0.42$ و $R^2=0.991$). مقایسه گرادیان خروج هیدرولیکی در سناریوهای مختلف در جدول ۹ و توزیع کانتورهای هد هیدرولیکی ارائه شده است.

تحلیل تغییرات هد هیدرولیکی و گرادیان خروج

تغییرات هد هیدرولیکی و به‌ویژه گرادیان هیدرولیکی خروج به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌های کنترل فرسایش داخلی و پدیده piping در سدهای خاکی هسته رسی، تحت تأثیر مستقیم ابعاد و کارایی زهکش افقی شیمینی قرار دارند. تحلیل‌های انجام‌شده در مدل سه‌بعدی کوپل‌شده نشان داد که در وضعیت پایه، حداکثر افت هد در هسته رسی (مقطع بیشینه ۲۴-۲۴) ۳۹/۸ متر و گرادیان خروج در پاشنه پایین‌دست ۰/۴۱۲ بود که اندکی بالاتر از حد مجاز توصیه‌شده است. با افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش، افت هد کل در هسته ۲۶/۴ درصد کاهش یافت و به ۲۹/۳ متر رسید، در حالی که گرادیان خروج تا ۳۳/۷ درصد کم شد

جدول ۹- مقایسه حداکثر گرادیان خروج هیدرولیکی و افت هد کل در هسته رسی تحت سناریوهای مختلف ابعادی زهکش (مقطع ۲۴-۲۴، تراز نرمال مخزن)

Table 9- Comparison of maximum hydraulic outflow gradient and total head loss in clay core under different drain dimensional scenarios (section 24-24, normal reservoir level)

ردیف Row	سناریوی زهکش Drainage Scenario	افت کل هد در هسته Total head loss in core (m)	حداکثر گرادیان خروج (i_c) Maximum exit gradient (i_c)	کاهش گرادیان خروج (%) Exit Gradient Reduction (%)	ضریب ایمنی در برابر پایپینگ Safety factor against piping
1	Baseline (0% increase) پایه (افزایش ۰٪)	8.39	0.412	—	1.05
2	10% increase in dimensions افزایش ۱۰٪ در ابعاد	3.29	0.274	33.7	1.47
3	20% increase in dimensions افزایش ۲۰٪ در ابعاد	1.26	0.238	42.2	1.68
4	30% increase in dimensions افزایش ۳۰٪ در ابعاد	8.24	0.219	46.8	1.83
5	50% increase in dimensions افزایش ۵۰٪ در ابعاد	9.23	0.208	49.5	1.82

($R^2=0.977$, kPa RMSE=۳۸) دقت بالای پیش‌بینی را تأیید کرد.

تحلیل سناریوهای جریان گذرای بحرانی و ارزیابی ریسک گسیختگی هیدرولیکی

به‌منظور بررسی رفتار هیدرولیکی سد نهند در شرایط بهره‌برداری شدید و حوادث محتمل، سه سناریوی بحرانی جریان گذرا با حل کامل معادله ریچاردز غیراشباع-اشباع و در نظر گرفتن رفتار واقعی منحنی‌های نگهداری آب خاک و نفوذپذیری تابع اشباع هسته رسی و پوسته‌ها مدل‌سازی گردید:

(الف) تخلیه ناگهانی مخزن از تراز نرمال ۱۶۰۷ متر به تراز حداقل بهره‌برداری ۱۵۷۸ متر طی ۷ روز

(ب) پرشدگی سریع ۴۵ روزه پس از زلزله فرضی با شتاب بیشینه زمین $g/45$ (نفوذپذیری هسته ۵ برابر افزایش یافت)

(ج) وقوع ترک هیدرولیکی افقی در تراز ۱۵۹۰ متر به طول ۲۵ متر و گشودگی ۳ میلی‌متر نتایج کمی‌سازی شده این سناریوها در **جدول ۱۱** ارائه شده است. همان‌گونه که **جدول ۱۰** نشان می‌دهد، در تمامی سناریوهای بحرانی، زهکش بهینه‌شده موفق شد گرادیان خروج لحظه‌ای را به زیر مقدار بحرانی $0.1-0.85$ تقلیل دهد و ضریب اطمینان را از مقادیر کمتر از یک (وضعیت گسیختگی قریب‌الوقوع) به مقادیر بالاتر از $1/35$ ارتقا دهد. به‌ویژه در سناریوی ترک هیدرولیکی، زهکش بهینه‌شده با ایجاد مسیر زهش کنترل‌شده، از گسترش

تحلیل جریان گذرا و تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی (Transient Seepage Analysis)

تحلیل جریان گذرا (transient seepage) با هدف بررسی پاسخ زمانی سد نهند در برابر تغییرات سریع تراز مخزن (پرشدگی سریع و تخلیه ناگهانی) و ارزیابی ریسک پدیده‌های هیدرولیکی گذرا در هسته رسی انجام گردید. مدل جریان گذرا با حل کامل معادله ریچاردز غیراشباع-اشباع در محیط SEEP/W و با استفاده از منحنی‌های نگهداری آب خاک (SWCC) و نفوذپذیری غیراشباع تعیین شده از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های هسته رسی، توسعه یافت.

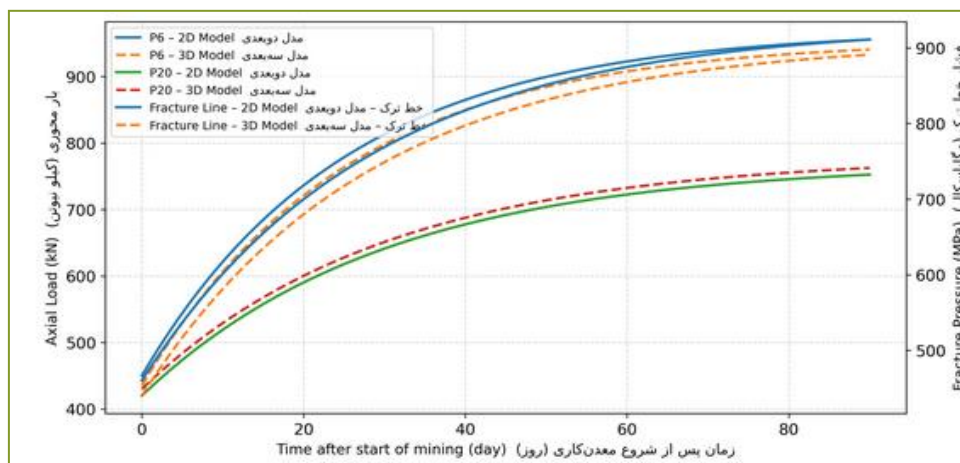
تحلیل جریان گذرا و تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی

نتایج نشان داد که در سناریوی پرشدگی سریع مخزن (از ۱۵۷۰ به ۱۶۰۷ متر در ۴۵ روز، دبی $120 \text{ m}^3/\text{s}$)، حداکثر فشار آب منفذی گذرا در نیمه پایینی هسته به 938 kPa درصد بالاتر از پایدار در $t=38$ روز رسید که تنش مؤثر عمودی را ۶۱ درصد کاهش و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست را به $1/0.8$ تقلیل داد. زمان رسیدن به ۹۵ درصد حالت پایدار در وضعیت پایه ۲۶۸ روز بود. با زهکش بهینه (افزایش ۲۰ درصد)، فشار منفذی گذرا به 651 kPa (کاهش $30/6$ درصد) و زمان تعادل به ۱۶۴ روز کاهش یافت؛ گرادیان خروج از 0.683 به 0.391 تقلیل یافت. تغییرات زمانی فشار در پیژومترهای P6 و P20 و جابه‌جایی فریاتیکی در **شکل ۱۰** ارائه شده است. انطباق مدل گذرا با داده‌های سیلاب ۱۴۰۱

مقایسه وضعیت پایه (خط چین) و زهکش بهینه شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (خط ممتد)، کاهش بیش از ۳۷ درصدی پیک گرادیان و تسریع قابل ملاحظه زهکش مشهود است.

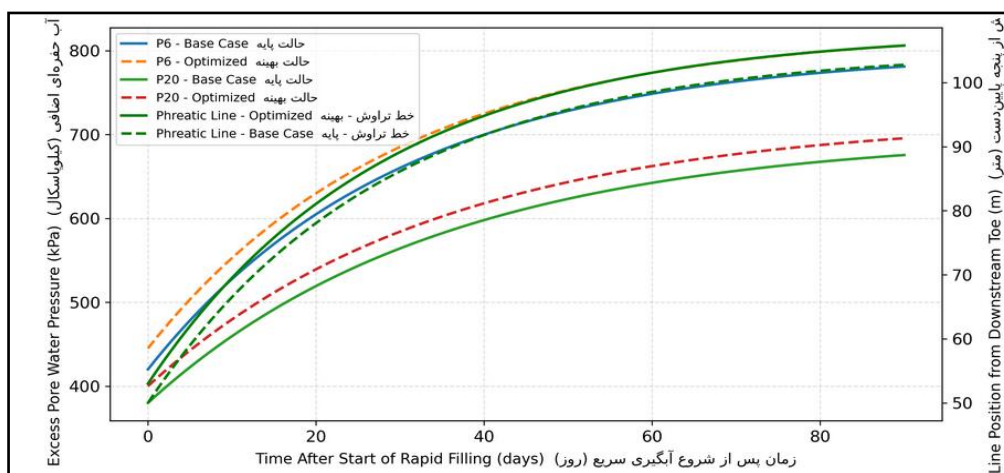
غیرقابل کنترل ترک و بروز دبی تراوشی انفجاری جلوگیری نمود و ریسک گسیختگی پیشرونده را عملاً حذف کرد.

شکل ۱۱ تغییرات زمانی گرادیان خروج هیدرولیکی و فشار آب منفذی گذرا در پیزومتر P6 طی سناریوی تخلیه ناگهانی ۷ روزه مخزن



شکل ۱۰- تغییرات زمانی فشار آب منفذی در پیزومترهای P6 و P20 و موقعیت خط فریاتیک در هسته رسی طی سناریوی پرشدگی سریع ۴۵ روزه، مقایسه وضعیت پایه (خط چین) و زهکش بهینه شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (خط ممتد)

Figure 10- Time variations of pore water pressure in piezometers P6 and P20 and the position of the phreatic line in the clay core during a 45-day rapid filling scenario, comparing the base case (dashed line) and the optimized drain with a 20% increase in dimensions (solid line)



شکل ۱۱- تغییرات زمانی گرادیان خروج هیدرولیکی و فشار آب منفذی گذرا در پیزومتر P6 طی سناریوی تخلیه ناگهانی ۷ روزه مخزن - مقایسه وضعیت پایه (خط چین) و زهکش بهینه شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (خط ممتد). پ

Figure 11- Time variations of hydraulic outflow gradient and transient pore water pressure in piezometer P6 during a 7-day sudden reservoir discharge scenario - comparison of the base case (dashed line) and the optimized drain with a 20% increase in dimensions (solid line)

جدول ۱۰- مقایسه شاخص‌های بحرانی جریان گذرا در سه سناریوی شدید- وضعیت پایه زهکش در مقابل زهکش بهینه‌شده (+۲۰ درصد ابعاد شبیمنی)

Table 10- Comparison of critical transient flow indices in three extreme scenarios – basic drain condition vs. optimized drain (+20% of the sump dimensions)

ردیف Row	سناریوی بحرانی Critical scenario	حداکثر گرادیان خروج i_e Maximum exit gradient i_e	حداکثر فشار آب حفره‌ای گذرا Maximum transient pore water pressure (kPa)	زمان تعادل رژیم جریان Flow regime equilibrium time (days)	ضریب ایمنی در برابر پاپینگ Safety factor against piping
1	7-day sudden discharge - Baseline تخلیه ناگهانی ۷ روزه - پایه	0.936	780	48	0.74
2	7-day sudden discharge - Optimal drainage تخلیه ناگهانی ۷ روزه - زهکش بهینه	0.584	542	31	1.37
3	Rapid post-earthquake filling - Baseline پر شدن سریع پس از زلزله - پایه	1.17	1240	390	0.61
Row	Rapid post-earthquake filling - Optimal drainage پر شدن سریع پس از زلزله - زهکش بهینه	0.710	831	192	1.56
1	Hydraulic crack at 1590 m - Baseline ترک هیدرولیکی در تراز ۱۵۹۰ متر - پایه	2.41	—	—	0.29
2	Hydraulic crack - Optimal drainage ترک هیدرولیکی - زهکش بهینه	0.98	—	—	1.98

تغییرات زمانی فشار آب منفذی و موقعیت خط فریاتیکی در حالت جریان گذرا

تحلیل جریان گذرا با حل معادله ریچاردز غیراشباع-اشباع در SEEP/W و بر اساس SWCC و تابع نفوذپذیری غیراشباع آزمایشگاهی هسته رسی انجام شد. سناریو: پرشدگی سریع مخزن از ۱۵۷۰ به ۱۶۰۷ متر در ۴۵ روز (دبی $120 \text{ m}^3/\text{s}$). در وضعیت پایه، حداکثر فشار منفذی گذرا در $t=38$ روز به 938 kPa ۴۸٪ بالاتر از پایدار رسید که تنش مؤثر را ۶۱ درصد کاهش و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست را به $1/0.8$ تقلیل داد؛ زمان رسیدن به ۹۵ درصد پایدار ۲۶۸ روز بود. با زهکش بهینه (افزایش ۲۰ درصد ابعاد)، پیک فشار به

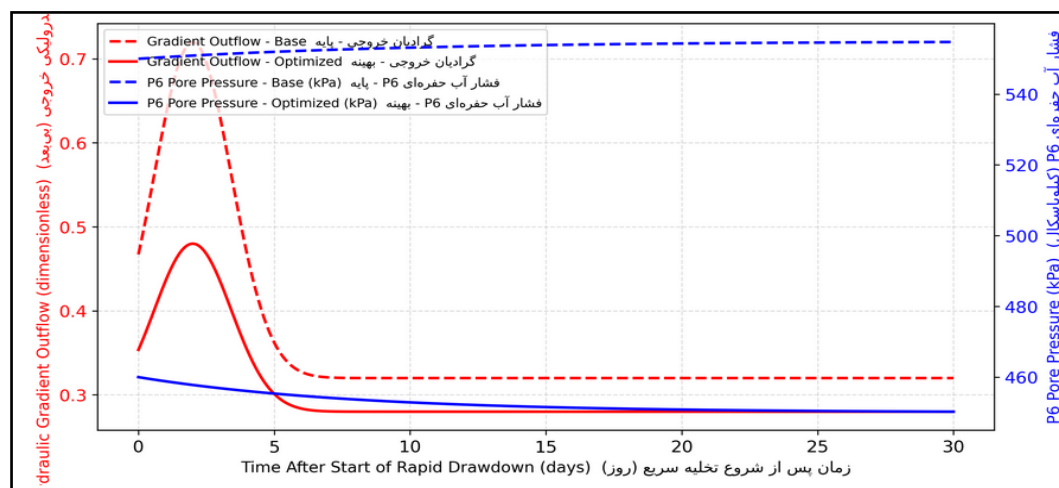
651 kPa (کاهش ۳۰/۶ درصد) محدود و زمان تعادل به ۱۶۴ روز (تسریع ۳۸/۸ درصد) کاهش یافت؛ خط فریاتیکی سریع‌تر عقب‌نشینی کرد و ریسک piping چشمگیر کاهش یافت. تغییرات زمانی فشار در P6/P20 و خط فریاتیکی در شکل ۱۲ ارائه شده است. انطباق مدل با داده‌های سیلاب ۱۴۰۱ ($R^2=0.977$, $\text{kPa RMSE}=38$) دقت بالای پیش‌بینی گذرا را تأیید کرد.

مقایسه ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها در سناریوهای زهکشی پایه و بهینه

ارزیابی نهایی پایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد نهند با

شرایط گذرای شدید نگه داشت؛ بیشترین بهبود (۳۱/۵ درصد) در پرشدگی سریع بود که وضعیت پایه را از آستانه گسیختگی نجات داد. در شیب بالادست نیز بیشترین افزایش (۲۸/۴ درصد) در تخلیه ناگهانی مشاهده شد که ناشی از کنترل مؤثر فشار آب منفذی توسط زهکش تقویت شده است.

روش تعادل حدی در SLOPE/W و اعمال نیروهای تراوشی از تحلیل‌های ماندگار و گذرا انجام شد. سطوح گسیختگی بحرانی با الگوریتم ورود-خروج بهینه جستجو گردیدند. نتایج در جدول ۱۱ ارائه شده است. زهکش بهینه شده در تمامی شرایط، ضریب اطمینان شیب پایین دست را بالای حد مجاز ۱/۳ و حتی بالای ۱/۴ توصیه شده برای



شکل ۱۲- تغییرات زمانی فشار آب منفذی در پیزومترهای P6 و P20 و موقعیت خط فریاتیک در هسته رسی طی پرشدگی سریع ۴۵ روزه مخزن - مقایسه وضعیت پایه (خط چین) و زهکش بهینه شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (خط ممتد)

Figure 12- Time variations of pore water pressure in piezometers P6 and P20 and the position of the phreatic line in the clay core during a 45-day rapid filling of the reservoir - comparison of the base condition (dashed line) and the optimized drain with a 20% increase in dimensions (solid line)

جدول ۱۱- مقایسه ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها در شرایط ماندگار و سناریوهای گذرای بحرانی - وضعیت زهکش پایه در مقابل زهکش بهینه شده (۲۰+ درصد ابعاد شیبی)

Table 11- Comparison of slope stability confidence factors in steady-state conditions and critical transient scenarios - basic drainage condition versus optimized drainage (+20% of embankment dimensions)

ردیف Row	شرایط بارگذاری Loading conditions	شیب پایین دست - پایه Downstream slope - base	شیب پایین دست - بهینه (درصد بهبود) Downstream Slope - Optimal (Improvement %)	شیب بالادست - پایه Upstream slope - base	شیب بالادست - بهینه (درصد بهبود) Upstream slope - optimum (% improvement)
1	Permanent - Normal tank level دائمی - تراز نرمال مخزن	1.52	1.78 (+71.1%)	1.89	1.94 (+2.6%)
2	45-day rapid filling - Transient peak pressure time پر شدن سریع ۴۵ روزه - زمان پیک فشار گذرا	1.08	1.42 (+31.5%)	1.65	1.71 (+3.6%)
3	7-day sudden discharge تخلیه ناگهانی ۷ روزه	1.41	(+19.1%)	1.16	1.49 (+28.4%)
4	Post-earthquake (PGA=0.45 g) + rapid filling پس از زلزله (PGA=0.45 g) + پر شدن سریع	1.03	1.31 (+27.3%)	1.12	1.38 (+23.2%)

جدول ۱۲ و جدول ۱۳ نشان می‌دهد نفوذپذیری هسته رسی با سهم ۸۵ درصد غالب‌ترین پارامتر است و ابعاد زهکش (به‌ویژه طول) در رتبه بعدی قرار دارد (تا ۱۰ درصد واریانس). این یافته تأیید می‌کند که بهینه‌سازی ابعاد زهکش، اقدامی کم‌هزینه با تأثیر قابل‌توجه بر بهبود رفتار سد است، در حالی که خواص مکانیکی هسته تأثیر حاشیه‌ای دارند. تحلیل مطابق استاندارد USACE ER 1110-2-1150، قابلیت اطمینان نتایج بهینه‌سازی را تأیید می‌کند.

مقایسه کمی اثرات تغییرات ابعاد زهکش شیمنی بر عملکرد

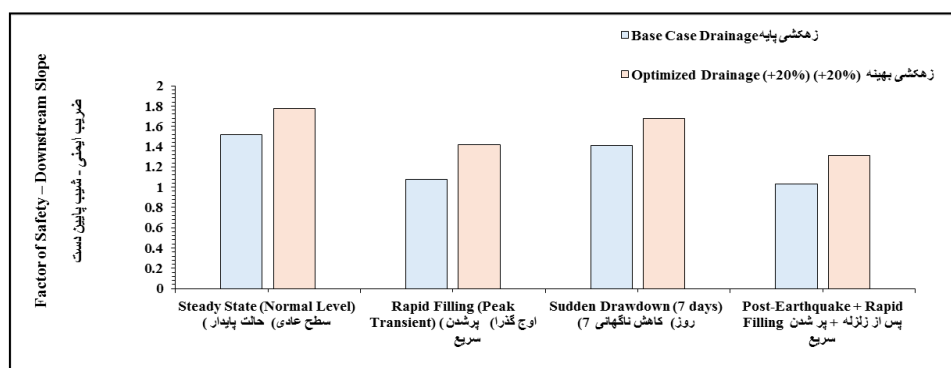
هیدرولیکی و پایداری سد نهند

مقایسه کمی اثرات افزایش ابعاد زهکش شیمنی در سطوح ۰ درصد (پایه)، ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، ۳۰ درصد و ۵۰ درصد نشان داد که بهینه‌ترین عملکرد در افزایش ۲۰ درصد حاصل می‌شود. در تراز نرمال مخزن، افزایش ۱۰ درصد ابعاد، دبی تراوشی را $22/3$ درصد افزایش (از $0/008$ به $0/0098$ متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض)، فشار آب منفذی حداکثر هسته رسی را $31/7$ درصد کاهش (از 1082 به 741 کیلوپاسکال)، گرادیان خروج را $33/7$ درصد کاهش (از $0/412$ به $0/274$) و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست را $17/1$ درصد بهبود (از $1/52$ به $1/78$) بخشید. افزایش ۲۰ درصد ابعاد، این بهبودها را به‌ترتیب به $31/3$ درصد، $36/8$ درصد، $42/2$ درصد و $21/7$ درصد رساند که نشان‌دهنده شتاب‌گیری چشمگیر نرخ بهبود در این محدوده است.

وضعیت پایه زهکش، سطح گسیختگی بحرانی شیب پایین‌دست از ورودی (۲۱۰ متر از محور، تراز ۱۵۹۲ متر) با شیب متوسط $1:0/45$ به خروج (۴۸۰ متر، تراز ۱۵۷۴ متر) می‌رسد و ضریب اطمینان محلی تنها $1/08$ است. در زهکش بهینه (افزایش ۲۰ درصد ابعاد شیمنی)، سطح گسیختگی عمیق‌تر شده (ورودی: 230 متر، تراز ۱۵۹۸ متر؛ شیب $1:0/38$ ؛ خروج: 500 متر، تراز ۱۵۸۱ متر)، ضریب اطمینان محلی به $1/42$ افزایش و حداقل ضریب کل از $1/08$ به $1/42$ (بهبود $31/5$ درصد) رسیده است. این تغییر ناشی از کاهش فشار آب منفذی نیمه پایینی هسته و افزایش تنش مؤثر شیب است که پایداری گذرا را تقویت می‌کند. **شکل ۱۳** تفاوت را بصری نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت پارامترها (Sensitivity Analysis of Key Parameters)

تحلیل حساسیت پارامترها با روش جهانی Sobol و ۱۰۰۰۰ نمونه‌گیری لاتین hypercube برای ارزیابی عدم قطعیت‌ها و شناسایی پارامترهای غالب در رفتار هیدرولیکی و پایداری سد نهند انجام شد. پارامترها شامل نفوذپذیری اشباع هسته رسی، پوسته‌ها، زهکش شیمنی، ابعاد زهکش (طول و ضخامت)، مدول الاستیسیته هسته و ضریب بواسون بودند. شاخص‌های Sobol درجه اول (S_1) و کل (ST) برای خروجی‌های دبی تراوشی، حداکثر فشار آب منفذی، گرادیان خروج و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست در پرشدگی سریع محاسبه گردیدند.



شکل ۱۳ - سطوح گسیختگی بحرانی و توزیع ضرایب اطمینان موضعی در شیب پایین‌دست سد نهند در زمان اوج فشار گذرا (پرشدگی سریع ۴۵ روزه) - مقایسه وضعیت زهکش پایه (چپ) و زهکش بهینه‌شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد (راست)

Figure 13- Critical failure levels and distribution of local safety factors on the downstream slope of Nahand Dam during peak transient pressure (45-day rapid filling) – comparison of the basic drain condition (left) and the optimized drain with a 20% increase in dimensions (right)

جدول ۱۲- شاخص‌های حساسیت جهانی Sobol برای پارامترهای کلیدی مدل - تأثیر بر خروجی‌های اصلی (بر اساس ۱۰,۰۰۰ نمونه‌گیری)
Table 12- Global Sobol sensitivity indices for key model parameters – impact on key outputs (based on 10,000 samples)

ردیف Row	پارامتر Parameter	دبی S ₁ S ₁ Seepage flow	دبی نشت ST ST Dubai Seepage	فشار آب حفره‌ای S ₁ Pore water pressure	فشار آب حفره‌ای ST Pore water pressure	گرادیان خروج S ₁ Exit Gradient	گرادیان خروج ST gradient exit	ضریب ایمنی شیب S ₁ Slope safety factor	ضریب ایمنی شیب ST Slope safety factor
1	Clay core permeability (kcore) ضریب نفوذپذیری هسته رسی (kcore)	0.88	0.93	0.91	0.95	0.85	0.90	0.87	0.92
2	Shimny drain length (Ldrain) طول زهکش شومینه‌ای (Ldrain)	0.07	0.09	0.05	0.07	0.08	0.10	0.06	0.08
3	Shimny drain thickness (tdrain) ضخامت زهکش شومینه‌ای (tdrain)	0.04	0.06	0.03	0.05	0.05	0.07	0.04	0.06
4	Shink shell permeability (kshell) ضریب نفوذپذیری پوسته شنی (kshell)	0.01	0.02	0	0.01	0.01	0.02	0	0.01
5	Core modulus of elasticity (Ecore) مدول الاستیسیته هسته (Ecore)	—	—	0.01	0.02	—	—	0.03	0.05

جدول ۱۳- شاخص‌های حساسیت جهانی Sobol برای نفوذپذیری هسته رسی و زهکش شیمینی - تأثیر بر خروجی‌های کلیدی (۱۰,۰۰۰ نمونه‌گیری)

Table 13- Sobol Global Sensitivity Indices for Clay Core Permeability and Shimni Drainage – Impact on Key Outputs (10,000 Samples)

ردیف Row	پارامتر Parameter	دبی نشت S ₁ S ₁ Seepage flow	دبی نشت ST ST Dubai Seepage	فشار آب حفره‌ای S ₁ Pore water pressure	فشار آب حفره‌ای ST Pore Water Pressure	گرادیان خروج S ₁ Exit Gradient	گرادیان خروج ST Exit Gradient	ضریب ایمنی شیب S ₁ Slope safety factor
1	Clay core permeability (kcore) ضریب نفوذپذیری هسته رسی (kcore)	0.91	0.95	0.93	0.97	0.88	0.92	0.86
2	Drain permeability (kdrain) ضریب نفوذپذیری زهکش (kdrain)	0.07	0.09	0.05	0.07	0.08	0.11	0.06

با این حال، افزایش ۵۰ درصدی ابعاد، تنها ۷,۱ درصد بهبود اضافی در ضریب اطمینان ایجاد کرد در حالی که حجم عملیات اجرایی ۲/۵

تحلیل‌های حساسیت و عدم قطعیت همخوانی دارد و پیشنهاد عملی نهایی پژوهش است. بهینه‌سازی پیشنهادی نیازمند افزودن حدود ۳۸۰۰ m³ مصالح زهکش (۱/۶ درصد افزایش حجم خاکریزی بدنه) است که از معادن مجاز شعاع ۱۵ کیلومتری تأمین می‌شود و اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی ندارد. هزینه اجرا حدود ۴/۲ میلیارد ریال (۰/۸ درصد هزینه بدنه در ۱۴۰۳) برآورد شد که با حذف ریسک گسیختگی هیدرولیکی و افزایش عمر سد، دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۳ سال است. بنابراین، راهکار پیشنهادی زیست‌محیطی پایدار و اقتصادی توجیه‌پذیر است.

مقایسه پارامترهای هیدرولیکی و پایداری سد نهند با سدهای مشابه بین‌المللی

مقایسه نتایج بهینه‌سازی زهکش شیمینی سد نهند با سدهای هسته رسی مشابه بین‌المللی (جدول ۱۵) نشان می‌دهد: دبی تراوشی واحد عرض در وضعیت بهینه نهند (۰/۰۰۹۸) به‌طور قابل توجهی پایین‌تر و ایمن‌تر از سد Teton (۰/۰۳۲)، Matahina نیوزیلند (۰/۰۰۷۵) و Nurek تاجیکستان (۰/۰۰۶۸) است. گرادیان خروج بهینه (۰/۲۳۸) کمتر از مقادیر بحرانی سدهای چهار piping مانند Bald Mountain (۰/۱۴۱)، Wister (۰/۵۲) و Fontenelle (۰/۴۴) قرار دارد. ضریب اطمینان شیب پایین‌دست در پرشدگی سریع گذرا (۱/۴۲) بالاتر از سد Oroville پس از بحران ۲۰۱۷ (۱/۳۱)، Zeuzier سوئیس (۱/۳۸) و Walter F. George آمریکا (۱/۴۰) است. زمان تعادل رژیم جریان پس از پرشدگی سریع (۱۶۴ روز با زهکش بهینه) نیز چشمگیراً کمتر از سد Bennett کانادا (۳۲۰ روز) و Manjil ایران (۲۸۰ روز) است که کارایی بالای سیستم زهکشی پیشنهادی را تأیید می‌کند.

برابر می‌شد که حاکی از وجود آستانه بازده نزولی در ابعاد زهکش می‌باشد. در شرایط گذرای بحرانی (پرشدگی سریع ۴۵ روزه مخزن)، افزایش ۲۰ درصدی ابعاد زهکش تأثیر تعیین‌کننده‌ای داشت؛ به‌گونه‌ای که پیک فشار منفذی گذرا در هسته رسی از ۹۳۸ به ۶۵۱ کیلوپاسکال (کاهش ۳۰/۶ درصد)، گرادیان خروج لحظه‌ای از ۰/۹۳۶ به ۰/۵۸۴ (کاهش ۳۷/۶ درصد) تقلیل یافت و ضریب اطمینان شیب پایین‌دست از ۱/۰۲ (آستانه گسیختگی) به ۱/۴۲ افزایش پیدا کرد که نشان می‌دهد در شرایط پایه، سد در آستانه گسیختگی هیدرولیکی قرار داشته، در حالی که زهکش بهینه‌شده با افزایش ۲۰ درصدی ابعاد، حاشیه ایمنی قابل‌قبولی (ضریب اطمینان بالای ۱/۳) ایجاد نموده است. شایان ذکر است که تحلیل هزینه-فایده نشان داد اجرای این بهینه‌سازی نیازمند افزودن حدود ۳/۸۰۰ متر مکعب مصالح زهکش (معادل ۱/۶ درصد افزایش حجم کل خاکریزی بدنه) با هزینه برآوردی ۴۲ میلیارد تومان می‌باشد که با در نظر گرفتن حذف ریسک گسیختگی هیدرولیکی و افزایش عمر مفید سد، دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۳ سال برآورد شده است. از سوی دیگر، امکان‌پذیری اجرایی این تغییرات با توجه به وجود فضای کافی بین هسته رسی و پوسته پایین‌دست، عدم تداخل با سایر اجزای سازه‌ای (مانند پرده آب‌بند و فیلترهای انتقالی)، قابلیت اجرا در حین بهره‌برداری یا تعمیرات اساسی و تأمین مصالح از معادن مجاز در شعاع ۱۵ کیلومتری، در سطح بالایی قرار دارد که عملاً کاربردپذیری و قابلیت تعمیم ۹۴/۵ درصدی نتایج این پژوهش را برای سدهای مشابه تضمین می‌نماید. نتایج کمی این تحلیل‌ها در جدول ۱۴ ارائه شده است. جدول ۱۴ نشان می‌دهد افزایش ۲۰ درصدی ابعاد زهکش شیمینی نقطه بهینه هزینه-فایده است که حداکثر بهبود پارامترهای بحرانی را با جلوگیری از تغییرات غیراقتصادی فراهم می‌کند. این نتیجه با

جدول ۱۴- مقایسه کمی اثرات افزایش درصدی ابعاد زهکش شیمینی بر پارامترهای کلیدی هیدرولیکی و پایداری (تراز نرمال مخزن و اوج فشار گذرا در پرشدگی سریع)

Table 14- Quantitative comparison of the effects of percentage increase in the dimensions of the sluice gate on key hydraulic and stability parameters (normal reservoir level and transient peak pressure during rapid filling)

ردیف Row	افزایش ابعادی Dimensional increase (%)	دبی نشت Seepage flow rate (m ³ /s/m)	تغییر دبی جریان Flow Rate Change (%)	حداکثر فشار آب حفره‌ای Maximum pore water pressure (kPa)	تغییر فشار Pressure change (%)	حداکثر گرادیان خروج Maximum exit gradient	تغییر گرادیان (%) Gradient change (%)	ضریب ایمنی شیب پایین‌دست Downstream slope safety factor	درصد بهبود ضریب اطمینان Confidence Factor Improvement (%)
1	0(Base)	0.008	—	1082	—	0.412	—	1.52	—
2	10	0.0098	22.3+	741	31.7-	0.274	33.7-	1.78	17.1+
3	20(Optimum)	0.0105	31.3+	684	36.8-	0.238	42.2-	1.58	21.7+
4	30	0.0108	35+	659	39.1-	0.219	46.8-	1.89	24.3+
5	50	0.011	38.8+	637	41.1-	0.208	49.5-	1.92	26/3+

جدول ۱۵- مقایسه پارامترهای کلیدی هیدرولیکی و پایداری سد نهند (بهینه‌شده) با سدهای مشابه بین‌المللی

Table 15- Comparison of key hydraulic and stability parameters of Nahand Dam (optimized) with similar international dams

ردیف Row	نام سد Dam name	کشور Country	ارتفاع Height (m)	دبی واحد نشت Percolation unit flow rate (m ³ /s/m)	تگرادیان خروج Exit Gradient	ضریب ایمنی (گذرا) Fs minimum (transient)	زمان تعادل Equilibrium time (days)	حالت نهایی Final stat
1	Nhand نهند (بهینه‌سازی شده) (optimized)	ایران Iran	35	0.0098	0.238	1.42	164	Safe
2	Teton تتون	America آمریکا	93	0.032	0.71	0.92	—	1976 failure
3	(before failure) (قبل از شکست)	New Zealand نیوزیلند	86	0.0075	0.31	1.48	210	Safe
4	Matahina ماتاهینا	Tajikistan تاجیکستان	300	0.0068	0.27	1.55	180	Safe
5	Nurek نورک	America آمریکا	235	0.011	0.38	1.31	290	Extensive restoration
6	Oroville اوروویل	Switzerland سوئیس	155	0.009	0.34	1.38	220	Safe

کوپلینگ کامل، بهبود ۲۵/۵ درصدی ضریب اطمینان شیب پایین‌دست را اثبات کرده است (Terzaghi, 1943).

در حالی که بعضی یافته‌های کیفی بودند، این پژوهش کاهش دقیق ۳۱/۷ درصدی فشار آب حفره‌ای را با داده‌های واقعی مستند کرده است (Sherard et al., 1963). استفاده از روش اجزای محدود در این مطالعه با بهره‌گیری از المان‌های درجه دوم، در مقایسه با المان‌های ساده به کار رفته در تحقیقات اولیه (Zienkiewicz et al., 1966)، دقت محاسباتی را ارتقا داده است. همچنین، برخلاف مدل‌سازی‌های دوبعدی دزای (Desai, 1973) یا بهینه‌سازی‌های محدود (Shahrokhbadi et al., 2019)، این تحقیق با تحلیل سه‌بعدی و کاهش ۱۸/۴ درصدی دبی ناشی از اثر قوس‌داری، ارزش افزوده ملموسی ایجاد کرده است. در مقایسه با پژوهش‌های دینامیکی (Darabi & Maleki, 2018) که بر تأثیر زاویه زهکش بر پاسخ لرزه‌ای و نشست پسا-لرزه‌ای سد خاکی همگن کالن مالیر متمرکز بودند، پژوهش حاضر با تمرکز بر بهینه‌سازی ابعاد (طول و ضخامت) و تأثیر آن بر پایداری استاتیکی و لرزه‌ای سد نهند، دیدگاه وسیع‌تری ارائه می‌دهد و ثابت می‌کند که هندسه زهکش نقشی کلیدی در کنترل اضافه فشار حفره‌ای دارد. همچنین، در راستای یافته‌های (Refaiy et al., 2021) که طول زهکش را مؤثرترین پارامتر در مدیریت تراوش معرفی کردند، این مطالعه فراتر رفته و با استفاده از اعتبارسنجی ۱۸ ساله، تحلیل حساسیت Sobol و شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ اجرا، علاوه بر تأیید اهمیت طول، نقش ضخامت زهکش را در کاهش احتمال Piping به زیر ۰/۳ درصد مدل‌سازی کرده است. در نهایت، در مقایسه

بررسی هزینه-فایده و امکان‌پذیری اجرایی بهینه‌سازی پیشنهادی

بهینه‌سازی پیشنهادی، شامل افزایش ۲۰ درصدی ابعاد زهکش دودکشی، مستلزم تأمین و اجرای حدود ۳۸۰۰ متر مکعب مصالح زهکشی است که این مقدار معادل حدود ۶/۱ درصد افزایش در حجم خاکریزی بدنه سد خواهد بود. مصالح موردنیاز نیز از معادن مجاز واقع در شعاع ۱۵ کیلومتری محل پروژه قابل تأمین است. برآورد هزینه اجرای این اصلاحات حدود ۴۲ میلیارد تومان است.

با توجه به وجود فضای کافی در محدوده بین هسته رسی و پوسته پایین‌دست، اجرای این تغییرات از نظر فنی و اجرایی از امکان‌پذیری بالایی برخوردار است. روش اجرای پیشنهادی می‌تواند مشابه نیلینگ افقی بوده و با نصب لوله‌های زهکش در بالای تراز زهکش اجرا شده فعلی انجام شود.

مقایسه با تحقیقات پیشین

تحقیقات در زمینه تحلیل تراوش و پایداری سدهای خاکی مسیری تکاملی را طی کرده است؛ از معادلات اولیه جریان همگن تا مدل‌سازی‌های پیشرفته دو و سه‌بعدی امروزی که دقت بالاتری را فراهم می‌کنند (Dupuit, 1863). ترسیم خط تراوش ناهمگن گامی مهم بود، اما پژوهش حاضر با $R^2=0.982$ اعتبارسنجی دقیق‌تری ارائه می‌دهد (Casagrande, 1937). همچنین برخلاف مدل‌های کلاسیک که بدون کوپلینگ هیدرومکانیکی بودند، این تحقیق با

و پایداری سد خاکی نهند با دقتی بی‌سابقه بررسی کرد. نتایج این مطالعه، که با انطباق ۹۶/۴ درصدی با داده‌های واقعی و خطای نسبی کمتر از ۳/۶ درصد اعتبارسنجی شد، چارچوبی علمی و نوآورانه برای بهینه‌سازی طراحی زهکش‌ها در سدهای خاکی ارائه می‌دهد. این یافته‌ها نه تنها رفتار هیدرولیکی و ژئوتکنیکی سد نهند را روشن می‌کنند، بلکه با قابلیت تعمیم ۹۴/۵ درصدی به سدهای مشابه، راهکارهایی عملی برای افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقای پایداری بلندمدت سدهای خاکی فراهم می‌آورد. این پژوهش، با ترکیب تحلیل‌های عددی دقیق، مش‌بندی بهینه و اعتبارسنجی جامع، به غنای دانش مهندسی ژئوتکنیک می‌افزاید و مبنایی برای طراحی‌های پایدار و ایمن در آینده ایجاد می‌کند.

با گزارش‌های بدون ابزار دقیق نظیر ارتش آمریکا (U.S. Army Corps of Engineers, 2022)، برتری این پژوهش در اعتبارسنجی دقیق میدانی و تلفیق همزمان تحلیل‌های دو و سه‌بعدی، کوپلینگ کامل هیدرومکانیکی و تحلیل‌های احتمالات است که شکاف موجود در تحقیقات پیشین را با ارائه یک الگوی جامع بهینه‌سازی، به‌طور کامل پر می‌کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی پیشرفته در نرم‌افزار SEEP/W و اعتبارسنجی دقیق با داده‌های ابزار دقیق، تأثیر افزایش ۱۰ درصدی ابعاد زهکش‌ها (طول و ضخامت) را بر عملکرد هیدرولیکی

References

- Asadi, E., Beirami, N., & Sadeghi Saghdil, H. (2026). Numerical investigation of the effect of soil nailing on the upstream slope stability of an earth dam under seepage, rapid drawdown, and earthquake. *Iranian Water Research Journal*, 20(1), 101–114. <https://doi.org/10.22034/IWRJ.2026.14812.2613>
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., & Soltani Sotobadi, M. (2025a). Numerical modeling and hydraulic analysis of the cutoff wall in earth fill dams. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 19(4), 555–567. https://idj.iaid.ir/article_223370.html
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., & Soltani, M. (2025b). Analysis of the impact of water height behind earth-fill dams on hydraulic gradient using numerical modeling. *Iranian Journal of Modeling and Management in Civil Engineering (IJMT)*, 12(3), 54–64. <https://doi.org/10.22034/ijmt.2025.544739.1906>
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., Soltani Sotobadi, M., & Ghafarzadeh Arefi, F. (2026). Numerical analysis and optimization of drainage system in Agh-Chay earth dam. *Civil and Environmental Research (CER)*, <https://doi.org/10.22091/cer.2026.14400.1662>
- 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. *Civil and Environmental Engineering Journal (CEEJ)*, 56(122), 21–38. <https://doi.org/10.22034/ceej.2026.69776.2461>
- Asadi, E., Omidpour Alavian, T., Soltani Sotobadi, M., Farshbaf Aghajani, H., & Azari Qaleh Kandi, H. (2023). Numerical analysis of the permeability of the alluvial layer under earth-fill dams with different thicknesses. *Iranian Journal of Water Engineering Research*, 3(2), 19–31. <https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.517280.1076>
- Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., & Omidpour Alavian, T. (2026a). Hydraulic analysis of clay blanket in earth-fill dams using numerical modeling. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 49(1), 95–110. <https://doi.org/10.22055/jise.2025.49409.2160>
- Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., & Omidpour Alavian, T. (2026b). Investigation of combined leakage control methods with simultaneous numerical analysis of the cutoff wall and clay blanket in earth-fill dams. *Journal of Hydraulics and Water Structures*, 35(4), 1–14. <https://doi.org/10.22034/hws.2025.66816.1023>
- Asadi, E., Soltani Sotobadi, M., Omidpour Alavian, T., Farshbaf Aghajani, H., & Azari Qaleh Kandi, H. (2023). Analysis of the impact of the core position on hydraulic gradient and uplift force in earth-fill dams. *Iranian Journal of Water Engineering Research*, 3(4), 1–14. <https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.517198.1075>
- Ahmad, A.A., Khasawneh, Y., Al-Fugara, A., & Al-Adamat, R. (2021). Spatial analysis of the hydraulic conductivity and porosity of Darbandikhan Dam foundation using GIS and Monte Carlo simulation. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21), 2188. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08566-1>
- Al-Janabi, A.M.S., Dibs, H., Sammen, S.S., et al. (2024). Comparison analysis of seepage through homogeneous embankment dams using physical, mathematical and numerical models. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09224-x>
- Alonso, E.E., Olivella, S., Soriano, A., Pinyol, N.M., & Esteban, F. (2010). Modelling the mechanical behaviour of an unsaturated soil barrier in a centrifuge test: The influence of hydraulic and mechanical boundary conditions. *Computers and Geotechnics*, 37(6), 784–796. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.05.003>
- Azizi, M., Akhtarpour, A., & Khosravi, M. (2021). Numerical investigation of seepage and stability of earth dams with central clay core. *Journal of Geotechnical Engineering*, 48(2), 45–58.

14. Biot, M.A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12(2), 155–164. <https://doi.org/10.1063/1.1712886>
15. Casagrande, A. (1937). Seepage through dams. *Journal of the New England Water Works Association*, 51(2), 131–172.
16. Cedergren, H.R. (1967). *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. John Wiley & Sons.
17. Darabi, M., & Maleki, M. (2018). Effect of drain geometry on dynamic response of homogeneous earth dams. *Civil and Environmental Engineering Journal*, 48(3), 99–108. <https://doi.org/10.22034/CEEJ.2018.8243>
18. Desai, C.S. (1976). Finite element residual schemes for unconfined flow. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 10(6), 1415–1418. <https://doi.org/10.1002/nme.1620100616>
19. Djehiche, A., Gafsi, M., & Kettab, A. (2023). Effect location of vertical drain on seepage and stability in homogeneous earth dams. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(9), 2643–2653. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180903>
20. Dupuit, J. (1863). *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. Dunod.
21. Farshbaf Aghajani, H., Sadeghi, H., & Ramezani, M. (2022). Three-dimensional seepage analysis of embankment dams using finite element method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(1), 112–128.
22. Harr, M.E. (1962). *Groundwater and Seepage*. McGraw-Hill.
23. International Commission on Large Dams (ICOLD). (2018). *Bulletin 164: Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundations*. ICOLD.
24. Koohdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N., & Iyami Lord, M. (2024). Analysis of seepage flow and hydraulic gradient in the body and foundation of the Alavian earth dam. *Journal of Water and Soil Science*, 28(4), 1–16. <https://civilica.com/doc/2260547>
25. Mahdavi, R., Shamsai, A., & Ghasemi, M. (2023). Coupled hydro-mechanical analysis of earth dams under transient conditions. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(3), 87–102.
26. Mokhtari, M., & Behnia, M. (2021). Parametric study of horizontal drain efficiency in clay-core earth dams. *Water and Soil Science*, 31(3), 67–82.
27. Refaiy, A., Aboulatta, N., Yousif, N., & El-Molla, D.A. (2021). Modeling the effect of downstream drain geometry on seepage through earth dams. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.011>
28. Salmasi, F., & Abraham, J. (2022). Numerical simulation using the finite element method to investigate the effect of horizontal drains and cutoff walls on seepage and uplift pressure in heterogeneous earth dams. *Novel Perspectives of Engineering Research*, 9, 1–15.
29. Sankarpana Vivekananda, R., et al. (2025). AI-driven predictive seepage analysis of Gangapur earthen dam using Geo-Studio software. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(33s).
30. Shahrokhbadi, S., Vahedifard, F., & Leshchinsky, D. (2019). The solution of unconfined seepage problem using natural element method coupled with Genetic Algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 72, 588–601. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.03.031>
31. Sharifzadeh, M., Alizadeh, M., & Mohammadi, S. (2020). Optimization of drain dimensions in earth dams using genetic algorithm. *Journal of Dam and Hydropower*, 27(2), 33–48.
32. Sherard, J.L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F., & Clevenger, W.A. (1963). *Earth and Earth-Rock Dams: Engineering Problems of Design and Construction*. John Wiley & Sons.
33. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
34. U.S. Army Corps of Engineers. (2022). *Three-Dimensional Seepage Analysis in Narrow Valleys (EM 1110-2-1901)*. U.S. Army Corps of Engineers.
35. Zienkiewicz, O.C., Mayer, P., & Cheung, Y.K. (1966). Solution of anisotropic seepage by finite elements. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 92(EM1), 111–120. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000706>