



UNIVERSITY OF TABRIZ

Journal of Hydraulics and Water Science

Online ISSN: 3092-6114

Journal homepage: <https://hws.tabrizu.ac.ir/>



Original Article

Investigation of Combined Leakage Control Methods with Simultaneous Numerical Analysis of the Cutoff Wall and Clay Blanket in Earth fill Dams

Ebrahim. Asadi¹, Mahdi. Soltani Sotobadi², Tohid. Omidpour Alavian^{*3}

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

2- Master's Student, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures of Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

3- Ph.D. Student, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures, Maragheh University, Maragheh, Iran

*Corresponding Author's Email: t.omidpour@stu.maragheh.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:

Optimization, Clay Blanket, Cutoff Wall, Seepage Control, Numerical Modeling

ABSTRACT

Background and Objectives

Earth dams are vital for water resource management but face challenges from seepage, which can reduce storage capacity, increase pore water pressure, and compromise stability. This study aims to evaluate the effectiveness of cutoff walls and clay blankets, individually and in combination, for seepage control in an earth dam in East Azerbaijan, Iran, using numerical modeling to optimize design and cost efficiency.

Introduction

The study employs numerical modeling with GeoStudio and the Seep/W module to analyze seepage in the Qeysaraq Dam. Four models were developed: a baseline model without seepage control, and models with a cutoff wall, a clay blanket, and a combined approach. Key parameters included the depth and thickness of the cutoff wall, the length and thickness of the clay blanket, and foundation permeability. Real-world boundary conditions and geotechnical data were incorporated, with results validated against field piezometer data.

Findings

The cutoff wall (15 m depth, 2 m thickness) reduced seepage by 70–90% and pore water pressure by 51.2%, significantly enhancing stability. The clay blanket (93 m length, 1.5 m thickness) reduced seepage by 30–50% but had limited impact on pore water pressure. Economically, the cutoff wall accounted for 49.8% of costs, while the clay blanket comprised 50.2%. The combined model (12 m cutoff wall, 1 m clay blanket) achieved an 85% seepage reduction and 10% cost savings compared to individual methods. Increasing cutoff wall depth beyond 15 m yielded minimal benefits, while clay blanket thickness was more critical than length for seepage.

Conclusion

The cutoff wall outperforms the clay blanket in seepage and pressure control, though the clay blanket is more cost effective for shorter dams. The combined approach optimizes both performance and cost,

How to cite:

Asadi, E. Soltani Sotobadi, M. Omidpour Alavian, T. *Investigation of Combined Leakage Control Methods with Simultaneous Numerical Analysis of the Cutoff Wall and Clay Blanket in Earth fill Dams* (2026). *Journal of Hydraulics and Water Science*, 35 (4):67-80. <https://doi.org/10.22034/hws.2025.66816.1023>




This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



reducing seepage by over 65% and costs by 10%, while improving long-term stability. Method selection should consider geotechnical conditions, budget, and project goals to ensure safety and efficiency.



بررسی روش‌های ترکیبی کنترل نشت با تحلیل عددی همزمان دیوار آب‌بند و پتوی رسی در سد خاکی

ابراهیم اسدی^۱، مهدی سلطانی ستوبادی^۲، توحید امیدپور علویان^{۳*} 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

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

* نویسنده مسئول: t.omidpour@stu.maragheh.ac.ir

چکیده

سدهای خاکی به‌عنوان یکی از سازه‌های کلیدی هیدرولیکی، نقش اساسی در مدیریت منابع آب دارند. نشت آب از بدنه و پی این سدها می‌تواند موجب کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی، افزایش فشار آب منفذی و در نهایت ناپایداری سازه شود. در این پژوهش، عملکرد دو روش رایج کنترل نشت، یعنی دیوار آب‌بند و پتوی رسی، براساس اطلاعات مشخصات یکی از سدهای خاکی آذربایجان شرقی با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای کلیدی طراحی شامل عمق و ضخامت دیوار آب‌بند، طول و ضخامت پتوی رسی و میزان نفوذپذیری پی سد بر کنترل نشت و فشار آب منفذی تحلیل شده است. نتایج نشان داد که دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر و ضخامت ۲ متر، نشت را بین ۷۰ تا ۹۰ درصد کاهش داده و تأثیر چشمگیری در کنترل فشار آب منفذی دارد. در مقابل، پتوی رسی با طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر، نشت را ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش داده است، اما عملکرد آن در کنترل فشار آب منفذی محدودتر است. از نظر اقتصادی، هزینه اجرای دیوار آب‌بند حدود ۴۹/۸ درصد از کل هزینه‌های پروژه را شامل می‌شود، در حالی که هزینه اجرای پتوی رسی ۵۰/۲ درصد از هزینه‌ها را به خود اختصاص داده است. با این حال، دیوار آب‌بند نسبت به هزینه خود، عملکرد بهتری در کاهش نشت ارائه می‌دهد، در حالی که پتوی رسی به دلیل اجرای ساده‌تر و هزینه کمتر حفاری، گزینه‌ای مناسب‌تر برای سدهای کوتاه‌تر محسوب می‌شود. یکی از نوآوری‌های این پژوهش، ارائه یک راهکار ترکیبی از دیوار آب‌بند و پتوی رسی است که باعث بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش کارایی کنترل نشت می‌شود. مدل‌سازی ترکیبی نشان داد که ترکیب دیوار آب‌بند با عمق ۱۲ متر و پتوی رسی با ضخامت ۱ متر، باعث کاهش ۸۵ درصد نشت و کاهش ۱۰ درصد هزینه‌های اجرایی نسبت به اجرای جداگانه هر روش می‌شود. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی سدهای خاکی و انتخاب بهینه‌ترین روش کنترل نشت در پروژه‌های عمرانی بزرگ مورد استفاده قرار گیرند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، پتوی رسی، دیوار آب‌بند، کنترل نشت، مدل‌سازی عددی

۱- مقدمه

سدهای خاکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی، نقش کلیدی در مدیریت منابع آب ایفا می‌کنند. آن‌ها در تأمین آب شرب، کشاورزی و تولید انرژی بسیار مؤثرند. یکی از چالش‌های عمده در بهره‌برداری از این سدها، نشست آب از بدنه و پی آن‌ها است که می‌تواند منجر به کاهش حجم ذخیره، افزایش فشار آب منفذی و کاهش پایداری سازه شود. کنترل نشست در سدهای خاکی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا عدم مدیریت صحیح آن می‌تواند به فرسایش داخلی، ناپایداری شیب‌ها و در نهایت شکست سد منجر شود. بنابراین، انتخاب و اجرای روش‌های مناسب برای کنترل نشست و افزایش ایمنی این سدها ضروری است. در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی برای کنترل نشست در سدهای خاکی پیشنهاد شده که از میان آن‌ها می‌توان به دیوار آب‌بند و پتوی رسی اشاره کرد. دیوار آب‌بند که معمولاً از بتن، سیمان- بنتونیت یا ترکیبات رسی ساخته می‌شود، به‌عنوان یک مانع عمودی در پی سد عمل کرده و با افزایش مسیر نشست و کاهش گرادیان هیدرولیکی، نشست را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، پتوی رسی که از یک لایه رس با نفوذپذیری پایین تشکیل شده، در بالادست سد قرار می‌گیرد و با افزایش طول مسیر نشست، فشار آب را کاهش داده و از پدیده فرسایش داخلی جلوگیری می‌کند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که دیوار آب‌بند به خاطر افزایش قابل‌توجه طول مسیر نشست و کاهش فشار آب منفذی، عملکرد بهتری در سدهای بلند دارد. با این حال، اجرای این نوع سازه به دلیل نیاز به تجهیزات خاص و هزینه بالا، با چالش‌هایی همراه است. در مقابل، پتوی رسی به دلیل هزینه پایین‌تر و سادگی در اجرا، گزینه‌ای اقتصادی‌تر محسوب می‌شود، اما اثربخشی آن در کنترل فشار آب منفذی در سدهای بلند محدودتر است. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که کاهش نشست در پتوی رسی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد و در دیوار آب‌بند بین ۷۰ تا ۹۰ درصد متفاوت است. علاوه بر این، دیوار آب‌بند از نظر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و تغییرات حجمی، برتری دارد. تحقیقات اخیر حاکی از آن است که استفاده ترکیبی از دیوار آب‌بند و پتوی رسی می‌تواند عملکرد بهتری در کاهش نشست و افزایش پایداری سازه فراهم کند. بر این اساس، در پژوهش حاضر، مدل‌سازی عددی رفتار هیدرولیکی سد خاکی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W انجام می‌شود تا کارایی و هزینه دیوار آب‌بند و پتوی رسی به‌صورت مستقل و ترکیبی ارزیابی گردد.

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه کنترل نشست در سدهای خاکی انجام شده است و روش‌های متعددی

برای بهبود پایداری و کاهش نشست این سازه‌ها پیشنهاد شده‌اند. قبادیان و خدایی (۱۳۸۸) تأثیر دیوار آب‌بند و زهکش را بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی در پی سدهای خاکی بررسی کرده و نشان دادند که اجرای دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف، باعث کاهش گرادیان هیدرولیکی و افزایش پایداری سد می‌شود. در پژوهشی دیگر، ملک‌پور و همکاران (۱۳۹۱) نقش زهکش افقی در پایداری سدهای خاکی همگن را مطالعه کردند و دریافتند که افزایش طول و ضخامت زهکش افقی، تأثیر بسزایی در کاهش گرادیان هیدرولیکی و کنترل نشست دارد. همچنین، احمدی و همکاران (۱۳۹۳) در یک مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر تابع هدایت هیدرولیکی را بر مدل‌سازی نشست در سدهای خاکی بررسی کرده و نشان دادند که در نظر گرفتن هدایت هیدرولیکی غیراشباع، دقت مدل‌سازی عددی را افزایش می‌دهد. این یافته نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن شرایط واقعی خاک در مدل‌های عددی کنترل نشست است. مطالعات دیگری نیز بر بهینه‌سازی روش‌های آب‌بندی متمرکز بوده‌اند. ناصحی اسکوفی و سلماسی (۱۳۹۴) تأثیر سوراخ‌های زهکشی در کف بند حوضچه آرامش سد را بررسی کرده و نشان دادند که استفاده از این سوراخ‌ها می‌تواند نیاز به دیوارهای آب‌بند را کاهش داده و هزینه‌های اجرایی را بهینه کند. از سوی دیگر، یوسفی و همکاران (۱۳۹۵) در یک پژوهش آزمایشگاهی نشان دادند که پرده آب‌بند به‌طور مؤثری از وقوع جوشش در پی سدهای خاکی جلوگیری کرده و ایمنی سد را افزایش می‌دهد. نوری و سلماسی (۱۳۹۶) در بررسی عددی نقش پتوی رسی در کاهش نشست از پی سدهای خاکی، نتیجه گرفتند که طول بهینه پتوی رسی باید حدود چهار برابر ارتفاع آب مخزن باشد تا بتواند به‌طور مؤثر مسیر نشست را افزایش داده و فشار منفذی را کاهش دهد. ایجم (۲۰۱۱) تأثیر دیوار آب‌بند زاویه‌دار در کف سدهای انحرافی را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که کاهش زاویه دیوار آب‌بند به سمت پایین‌دست، موجب کاهش نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی می‌شود. ام کلوکلین و احمد (۲۰۱۲) در پژوهش خود، نشست در خاک‌های چندلایه را بررسی کرده و دریافتند که زهکش‌های متوسط در کف سازه، نیروی زیر فشار را تا ۷۲ درصد کاهش می‌دهند. همچنین، فاروق و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای روی سد خانپور پاکستان، عملکرد پتوی رسی را ارزیابی کرده و نشان دادند که استفاده از این روش، میزان نشست را از ۱۷/۵ مترمکعب بر ثانیه به ۳/۷۵ مترمکعب بر ثانیه کاهش داده است که بیانگر تأثیر چشمگیر پتوی رسی در کاهش نشست است. قنبری و زریابی (۲۰۱۴) نیز در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که ضریب نفوذپذیری سیستم آب‌بند، یکی از مؤثرترین عوامل در کنترل نشست است و تغییرات جزئی در این پارامتر، می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد سد داشته باشد.

غیراشباع است. به منظور دقت بالاتر در تحلیل، شرایط مرزی واقعی و هندسه دقیق سد مورد مطالعه در مدل اعمال شده است. سد خاکی مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی، در بالادست روستای قیصرق واقع شده است. این سد دارای مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 4' 21''$ عرض شمالی بوده و در فاصله ۶۱ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بستان آباد و $10^{\circ} 3'$ کیلومتری شرق شهرستان مهربان قرار دارد. این موقعیت مکانی، سد را در معرض تأثیرات هیدرولوژیکی منطقه‌ای قرار داده که در طراحی سیستم کنترل نشت باید مدنظر قرار گیرد. شکل (۱) نمای ماهواره‌ای سد قیصرق را نمایش می‌دهد که موقعیت مخزن، سازه اصلی سد و اراضی پیرامونی (شامل زمین‌های کشاورزی) را نشان می‌دهد. بررسی این تصویر در ارزیابی شرایط توپوگرافی، کاربری اراضی و نحوه توزیع منابع آبی مؤثر بوده و می‌تواند به تحلیل رفتار هیدرولیکی سد کمک کند. مشخصات هندسی سد در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد قیصرق.
Figure 1- Satellite image of the location of Qaisarq Dam.

جدول ۱- مشخصات هندسی سد قیصرق.

Table 1- Geometric specifications of Qaisarq Dam

مقدار	پارامتر
۱۶ متر	ارتفاع سد
۹۸۸ متر	طول تاج
۶ متر	عرض تاج
۱.۳	شیب بالادست
۱.۳	شیب پایین دست
۱۷۰.۱ متر	رقوم تاج

به منظور بررسی نفوذپذیری و تأثیر آن بر میزان نشت، داده‌های آزمایشگاهی و مطالعات ژئوتکنیکی منطقه مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۲ ویژگی‌های نفوذپذیری لایه‌های مختلف پی و بدنه سد مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نفوذپذیری مصالح پی و بدنه سد قیصرق.

Table 2- Permeability of foundation and body materials of Qaisarq Dam

نام مصالح	مقدار نفوذپذیری قائم (m/s)	مقدار نفوذپذیری افقی (m/s)
هسته رسی	1×10^{-9}	1×10^{-8}
فیلتر ریزدانه	1×10^{-3}	5×10^{-3}

در پژوهش‌های جدیدتر، بهینه‌سازی روش‌های ترکیبی کنترل نشت مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. نورانی و همکاران (۲۰۱۷) موقعیت بهینه زهکش عمودی در سدهای بتنی را بررسی کرده و نشان دادند که استفاده از زهکش مناسب، می‌تواند فشار آب منفذی را کاهش داده و پایداری سد را بهبود بخشد. همچنین، سامی و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای ترکیبی از روش‌های عددی و آزمایشگاهی، تأثیر زهکشی‌های افقی را در کنترل نشت سدهای خاکی تحلیل کرده و به این نتیجه رسیدند که استفاده هم‌زمان از زهکش‌های افقی و دیوار آب‌بند، کارایی بیشتری نسبت به اجرای هر یک از این روش‌ها به صورت جداگانه دارد. کوهدرق و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی به تحلیل جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در بدنه و پی سد خاکی علویان پرداختند. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که دیوارهای آب‌بند و پتوی رسی، دو روش مؤثر در کنترل نشت سدهای خاکی هستند. در حالی که دیوار آب‌بند تأثیر بیشتری در کاهش نشت و فشار آب منفذی دارد، پتوی رسی به دلیل هزینه پایین‌تر و سادگی اجرا، در بسیاری از سدهای کوتاه و با هزینه محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده ترکیبی از این دو روش، می‌تواند عملکرد بهتری در کاهش نشت و افزایش پایداری سدهای خاکی فراهم کند. تاکنون مطالعات محدودی بر روی بهینه‌سازی ترکیب این دو روش و تعیین ابعاد بهینه هر یک از آن‌ها در شرایط مختلف هیدرولیکی و ژئوتکنیکی انجام شده است. با توجه به این خلأ پژوهشی، مطالعه حاضر با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W، تأثیر دیوار آب‌بند و پتوی رسی را در کاهش نشت سد خاکی مورد مطالعه بررسی کرده و تلاش دارد تا بهینه‌ترین راهکار برای کنترل نشت در این سد را ارائه دهد. در این پژوهش، علاوه بر ارزیابی مستقل این روش‌ها، یک مدل ترکیبی نوآورانه پیشنهاد شده است که می‌تواند عملکرد بهینتری در کاهش نشت و هزینه‌های اجرایی داشته باشد. این تحقیق نه تنها به درک بهتر عملکرد روش‌های مختلف کنترل نشت کمک می‌کند، بلکه می‌تواند راهنمایی عملی برای طراحی بهینه سدهای خاکی در پروژه‌های آینده ارائه دهد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای بررسی و مقایسه کارایی دیوار آب‌بند و پتوی رسی در کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی در سد خاکی مورد مطالعه، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W بهره گرفته شده است. این مدل‌سازی با در نظر گرفتن شرایط هیدروژئولوژیکی، مشخصات ژئوتکنیکی و داده‌های میدانی سد طراحی شده و شامل تحلیل نشت در محیط‌های اشباع و

مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج مقایسه هزینه‌ها نشان می‌دهد که دیوار آب‌بند حدود ۴۹/۸ درصد از کل هزینه‌های اجرایی را شامل می‌شود، در حالی که پتوی رسی ۵۰/۲ درصد از هزینه‌ها را به خود اختصاص داده است. اگرچه اختلاف ۰/۴ درصدی بین این دو روش ممکن است ناچیز به نظر برسد، تحلیل آماری با استفاده از آزمون دو نمونه‌ای ($p = 0.038$) بر روی داده‌های برآورد هزینه‌های اجرایی (شامل ۱۰ سناریوی مختلف برای هر روش) نشان داد که این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار است. این معنی‌داری در پروژه‌های سدسازی با بودجه‌های کلان، مانند سد قیصرق، می‌تواند به صرفه‌جویی مالی قابل توجهی (حدود ۴۳۹/۹۰۰/۰۰۰ ریال) منجر شود، که اهمیت انتخاب روش بهینه را برجسته می‌کند. با این حال، بررسی مدل ترکیبی نشان داده است که استفاده هم‌زمان از دیوار آب‌بند با عمق ۱۲ متر و پتوی رسی با ضخامت ۱ متر، هزینه‌های اجرایی را تا ۱۰ درصد کاهش داده و در عین حال، عملکرد بهینه‌تری در کنترل نشست ارائه می‌دهد. این یافته‌ها نشان‌دهنده مزیت استفاده از راهکارهای ترکیبی در بهینه‌سازی اقتصادی و فنی پروژه‌های سدسازی است.

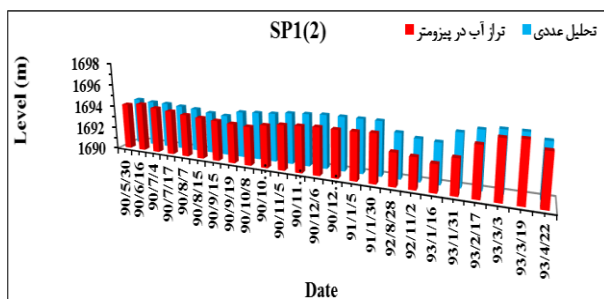
جدول ۳: مشخصات متغیرهای مدل‌های به‌کاررفته در شبیه‌سازی.

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

مقدار تغییرات	متغیرها
۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۶ متر	عمق دیواره آب‌بند
۰، ۱/۵، ۲ و ۲/۲ متر	ضخامت دیواره آب‌بند
۰/۶، ۵۹/۶، ۷۶/۳، ۹۳ و ۱۰۰ متر	طول پتوی رسی
۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۸ متر	ضخامت پتوی رسی
۳ مقدار مختلف	نفوذپذیری لایه آبرفتی پی سد
۳ مقدار مختلف	ضخامت لایه آبرفتی پی سد

۲-۳- صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با Seep/w

برای اطمینان از دقت مدل‌سازی عددی، نتایج حاصل از تحلیل عددی با داده‌های میدانی پی‌زومترهای نصب‌شده در سد مورد مطالعه مقایسه شد. شکل ۲ مقایسه‌ای میان هد آب محاسبه‌شده در نرم‌افزار و داده‌های ثبت‌شده در پی‌زومتر SP12 را نشان می‌دهد. میانگین خطای نسبی بین نتایج مدل و داده‌های واقعی ۳/۷ درصد محاسبه شد، که در محدوده استانداردهای مهندسی ژئوتکنیک (کمتر از ۵ درصد) قرار دارد و نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی است.



فیلتر درشت‌دانه و زهکش	1×10^{-1}	5×10^{-2}
پوسته خاکی	5×10^{-5}	1×10^{-4}
لایه آبرفتی سطحی	1×10^{-6}	5×10^{-6}
لایه سیلت و رسی	1×10^{-7}	5×10^{-7}
دیوار آب‌بند کات‌آف	1×10^{-9}	1×10^{-9}

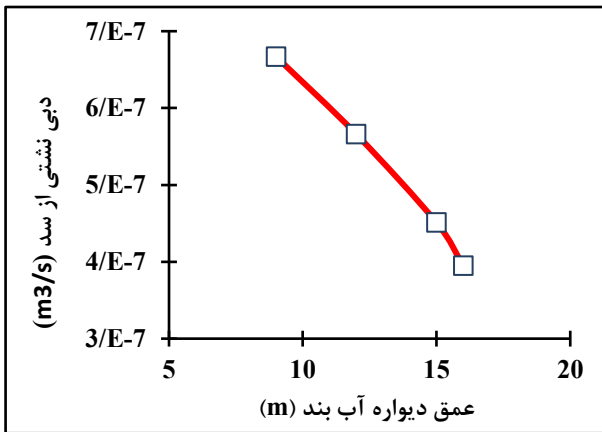
۱-۲- مدل‌سازی عددی

این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/W انجام شده است. در این مدل‌سازی، از روش اجزای محدود برای حل معادلات حاکم بر نشست آب در محیط‌های متخلخل استفاده شده است. در تعیین شرایط مرزی مدل، سطح آب مخزن در بالادست، سطح آب خروجی در پایین‌دست و نفوذپذیری مصالح مختلف سد لحاظ شده است تا تحلیل نشست به‌طور واقع‌بینانه انجام شود. به‌منظور بررسی تأثیر روش‌های مختلف کنترل نشست، چهار مدل عددی توسعه داده شده است که شامل مدل پایه (بدون سیستم کنترل نشست)، مدل دارای دیوار آب‌بند، مدل دارای پتوی رسی و مدل ترکیبی شامل دیوار آب‌بند و پتوی رسی می‌شود. این مدل‌ها امکان مقایسه کارایی هر روش در کاهش نشست و کنترل فشار آب منفذی را فراهم کرده و مبنایی برای تحلیل اقتصادی و بهینه‌سازی روش‌های کنترل نشست در سدهای خاکی ارائه می‌دهند.

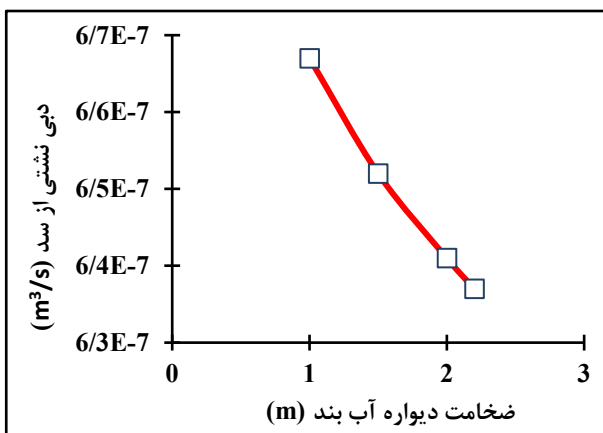
۲-۲- نرم‌افزار GEO STUDIO

نرم‌افزار GeoStudio، توسعه یافته توسط شرکت Geoslope کانادا، به‌عنوان ابزاری پیشرفته و جامع در مهندسی ژئوتکنیک شناخته می‌شود. این نرم‌افزار با ماژول‌های تخصصی خود، به مهندسان امکان می‌دهد که پدیده‌های ژئوتکنیکی را با استفاده از مدل‌های رفتاری و روش‌های تحلیلی مختلف به‌طور دقیق بررسی کنند. با محیط گرافیکی کاربرپسند، GeoStudio فرآیند مدل‌سازی و طراحی را تسهیل می‌کند و به کاربران اجازه می‌دهد قبل از اجرای پروژه، مدل‌ها را ارزیابی کنند. قابلیت‌های نرم‌افزار شامل تحلیل‌های تنش-کرنش، ارزیابی تراوش، بررسی پایداری شیروانی‌ها و تحلیل‌های دینامیکی است. در مجموع، GeoStudio به‌عنوان ابزاری چندمنظوره، دقت و کارایی پروژه‌های مهندسی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و به مهندسان این امکان را می‌دهد که با اطمینان بیشتری به طراحی و تحلیل پروژه‌های خود بپردازند (زینکویه‌ویچ، ۱۳۵۰). پارامترهای مدل و متغیرهای بررسی‌شده در این پژوهش، تأثیر عمق و ضخامت دیوار آب‌بند، طول و ضخامت پتوی رسی و نفوذپذیری لایه‌های آبرفتی پی سد بر میزان نشست و فشار آب منفذی بررسی شده است. جدول ۳ مشخصات مدل‌های عددی را نشان می‌دهد. برای بررسی هزینه‌های اجرایی هر روش، داده‌های مربوط به برآورد هزینه‌های حفاری، حمل مصالح و اجرای دیوار آب‌بند و پتوی رسی

دیوار آب‌بند بر نیروی زیر فشار نشان داد که اجرای دیوار آب‌بند موجب کاهش قلیل توجهی در این نیرو در پی سد شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اجرای دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر، موجب کاهش ۵۱/۲۱ درصد نیروی زیر فشار شده است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش عمق دیوار آب‌بند، تأثیر مستقیمی بر کاهش فشار آب منفذی در پی سد و جلوگیری از پدیده جوشش (piping) دارد. همچنین، بررسی تغییرات نیروی زیر فشار نشان داد که اجرای دیوار آب‌بند در این عمق، مقدار این نیرو را ۴/۴۴ درصد افزایش داده است. این افزایش، ناشی از تمرکز جریان در مناطق مجاور دیوار آب‌بند است، اما به دلیل وزن بالای بدنه سد و طراحی مناسب شیب‌های بالادست و پایین‌دست، تأثیر منفی بر پایداری کلی سد ندارد. بررسی‌های بیشتر نشان داد که افزایش عمق دیوار آب‌بند از ۱۵ متر به ۱۶ متر و افزایش ضخامت از ۲ متر به ۲/۲ متر، تأثیر معناداری بر کاهش نشست نداشته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد ابعاد دیوار آب‌بند، نه تنها تأثیر قابل توجهی بر کاهش نشست ندارد، بلکه هزینه‌های اجرایی را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین، انتخاب یک مقدار بهینه برای عمق دیوار آب‌بند (حدود ۱۵ متر) می‌تواند عملکرد هیدرولیکی سد را بهبود بخشد و از افزایش غیرضروری هزینه‌ها جلوگیری کند.



(الف)



(ب)

شکل ۲- مقایسه هد کل حاصل از نتایج تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل پیزومتر SP 1(2).

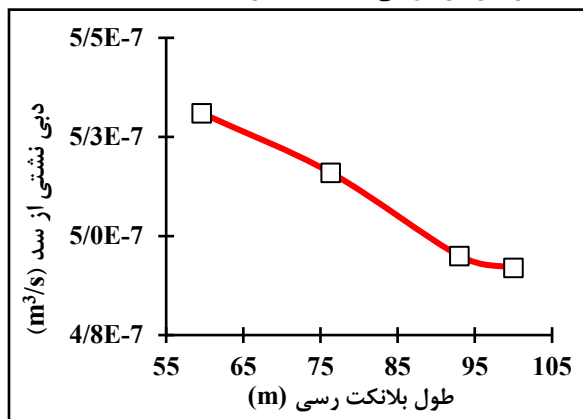
Figure 2 - Comparison of total head obtained from numerical analysis results with measured values at the SP 1(2) piezometer location.

۳- نتایج

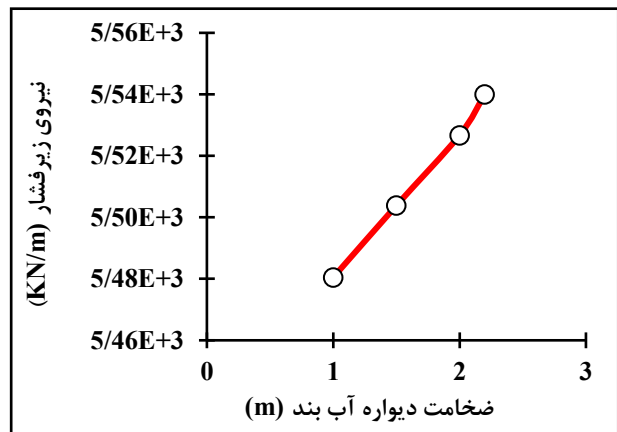
۳-۱- تحلیل عملکرد دیوار آب‌بند در کاهش نشست و کنترل فشار آب منفذی

نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که عمق دیوار آب‌بند تأثیر قابل توجهی در کاهش دبی نشست دارد، در حالی که افزایش ضخامت آن نقش کمتری در بهبود عملکرد هیدرولیکی سد ایفا می‌کند. افزایش عمق دیوار آب‌بند از ۹ متر به ۱۵ متر (۶۷ درصد افزایش)، دبی نشست را ۵۳/۴ درصد کاهش داد، در حالی که افزایش ضخامت از ۱/۵ متر به ۲ متر (۳۳ درصد افزایش)، کاهش ۳۳/۷۱ درصد را نشان داد. بررسی افزایش ۶۷ درصد در ضخامت (به ۲/۵ متر) در مدل‌سازی‌های اولیه نشان داد که این تغییر تنها ۴/۲ درصد کاهش اضافی در دبی نشست ایجاد می‌کند، اما هزینه‌های اجرایی را ۲۲ درصد افزایش می‌دهد. بنابراین، افزایش ۳۳ درصد در ضخامت به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد تا تعادل بین عملکرد هیدرولیکی و هزینه‌های اجرایی حفظ شود. بررسی تغییرات دبی نشست در مدل‌سازی نشان داد که افزایش عمق بیش از ۱۵ متر تأثیر چندانی بر کاهش نشست نداشته و مقدار آن تقریباً ثابت باقی مانده است. این امر نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد عمق دیوار آب‌بند، تنها منجر به افزایش هزینه‌های اجرایی بدون بهبود قابل توجه عملکرد هیدرولیکی سد خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزایش عمق دیوار آب‌بند از ۹ متر به ۱۵ متر، منجر به کاهش ۵۳/۴ درصدی در دبی نشست شده است. روند افزایش عمق در گام‌های اولیه ۲۵ درصد (به ۱۱/۲۵ متر و ۱۴/۰۶ متر) و در گام سوم ۵ درصد (به ۱۵ متر) انتخاب شد تا رفتار هیدرولیکی سد در محدوده‌های مختلف بررسی شود. این روند غیرثابت به‌منظور شناسایی دقیق نقطه بهینه کاهش دبی نشست اعمال شد، زیرا نتایج نشان داد که عمق ۱۵ متر به حد اشباع کاهش نشست نزدیک است. بررسی تکمیلی نشان داد که افزایش عمق به ۱۹ متر (با فرض ادامه روند ۲۵ درصد) تنها ۲/۸ درصد کاهش اضافی در دبی نشست ایجاد می‌کند، اما هزینه‌های اجرایی را ۱۸ درصد افزایش می‌دهد. این رویکرد با مطالعات مشابهه (ایجم، ۲۰۱۱) هم‌خوانی دارد و امکان بهینه‌سازی دقیق‌تر پارامترهای طراحی را فراهم می‌آورد. این نمودار، تغییرات دبی نشست را در محور Y و عمق دیوار آب‌بند را در محور X نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که پس از عمق ۱۵ متر، روند کاهش نشست به یک حد اشباع می‌رسد. همچنین، بررسی تأثیر

هستند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت پتوی رسی تأثیر بیشتری بر کاهش نشت دارد، درحالی‌که افزایش طول، به‌تنهایی، کاهش چشمگیری در دبی نشت ایجاد نمی‌کند. بررسی تأثیر پتوی رسی بر نیروی زیر فشار نیز نشان داد که اجرای این روش باعث کاهش قابل‌توجه فشار منفذی در پی سد شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اجرای پتوی رسی با ضخامت ۱/۵ متر، موجب کاهش ۵۶/۹۴ درصد نیروی زیر فشار شده است که این مقدار نسبت به تأثیر دیوار آب‌بند، عملکرد بهتری را در کنترل فشار آب منفذی نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که پتوی رسی نه‌تنها باعث افزایش طول مسیر نشت و کاهش دبی نشت می‌شود، بلکه می‌تواند به‌طور مؤثری فشار منفذی را نیز کنترل کند. باین‌حال، باید توجه داشت که پتوی رسی در سدهای بلند ممکن است در معرض ترک‌خوردگی و کاهش عملکرد در طولانی‌مدت قرار گیرد. این مسئله به‌ویژه در مناطقی با تغییرات شدید دما یا شرایط زمین‌شناسی متغیر، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین، در طراحی و اجرای این روش، باید استحکام و دوام لایه رسی در نظر گرفته شود تا عملکرد آن در طولانی‌مدت حفظ گردد.

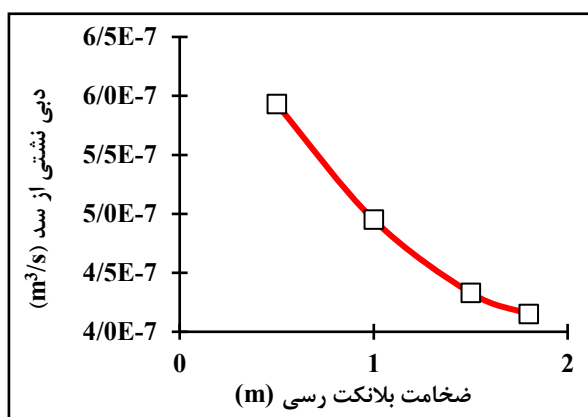


(الف)



(الف)

(ب)



(ب)

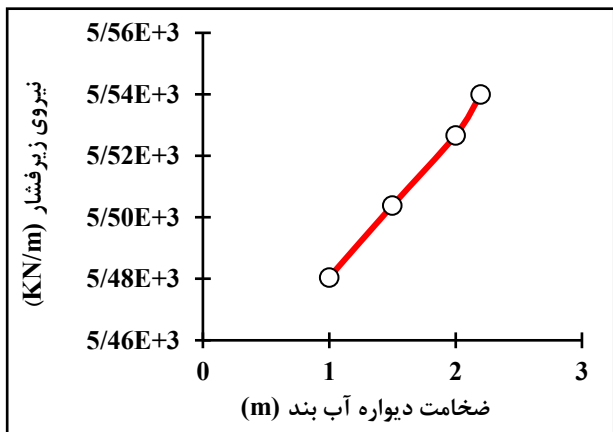
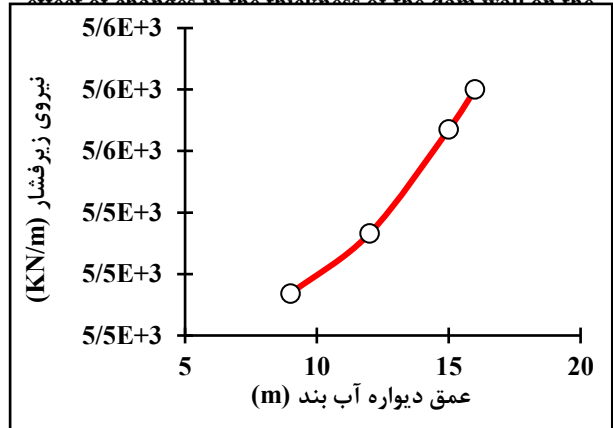
(ب)

شکل ۵: (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر دبی نشتی از بدنه سد مورد مطالعه.

Figure 5: (a) The effect of changes in the length of the clay blanket on the leakage flow from the dam body under study, (b) The effect

شکل ۳: (الف) تأثیر تغییرات عمق دیواره آب‌بند بر دبی نشتی در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت دیواره آب‌بند بر دبی نشتی در سد مورد مطالعه.

Figure 3: (a): The effect of changes in the depth of the dam wall on the leakage flow in the studied dam, (b): The effect of changes in the thickness of the dam wall on the



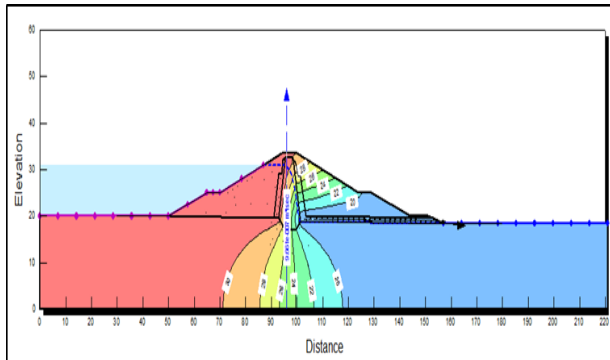
شکل ۴: (الف) تأثیر تغییرات عمق دیواره آب‌بند بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت دیواره آب‌بند بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه.

Figure 4: (a) The effect of changes in the depth of the dam wall on the compressive force on the studied dam, (b) The effect of changes in the thickness of the dam wall on the compressive force on the studied dam.

۳-۲- تحلیل عملکرد پتوی رسی در کاهش نشت و فشار آب منفذی

نتایج مدل‌سازی برای پتوی رسی نشان داد که ضخامت این لایه، نسبت به طول آن، تأثیر بیشتری در کاهش دبی نشت دارد. اجرای پتوی رسی با ضخامت ۱/۵ متر، دبی نشت را ۵۵/۲۲ درصد کاهش داد، درحالی‌که افزایش طول از ۷۶/۳ متر به ۹۳ متر، تنها ۴۸/۸۱ درصد کاهش نشت را نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر، مقادیر بهینه برای کاهش نشت در سد مورد مطالعه

of changes in the thickness of the clay blanket on the leakage flow from the dam body under study.

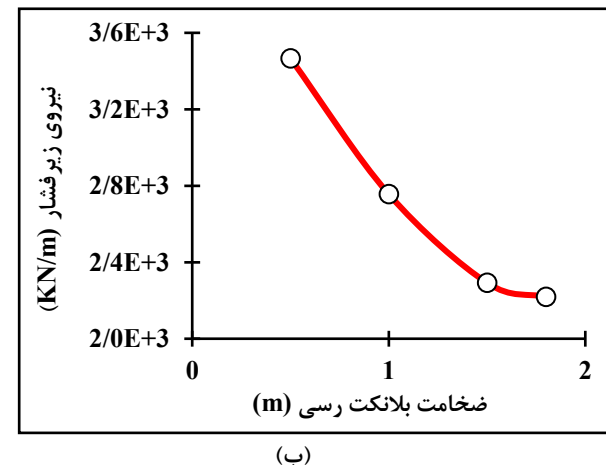
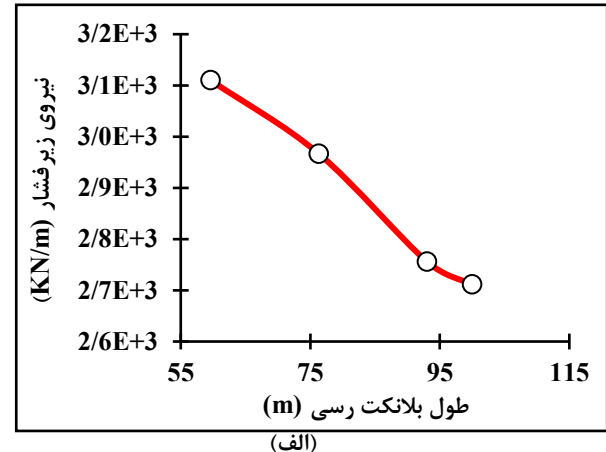


شکل ۷: سد مورد مطالعه با بیشترین عمق مخزن (بار آبی بالادست ۳۱ متری) با بزرگنمایی.

Figure 7: The studied dam with the greatest reservoir depth (upstream water head of 31 meters) with magnification.

۳-۳- تحلیل هزینه‌های اجرایی و بهینه‌سازی اقتصادی

بررسی هزینه‌های اجرایی سد مورد مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب صحیح ابعاد هندسی دیوار آب‌بند و بلانکت رسی تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های کلی پروژه دارد. مطابق جدول ۴، هزینه‌های اجرایی این دو روش شامل هزینه‌های حفاری، تهیه مصالح، و اجرای بتن پلاستیک برای دیوار آب‌بند و هزینه‌های مربوط به تأمین و اجرای بلانکت رسی است. بر اساس داده‌های موجود، هزینه اجرای بلانکت رسی عمدتاً به ضخامت و طول آن وابسته است. در شکل ۸، نمودار هزینه‌های اجرایی بلانکت رسی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ابعاد این لایه منجر به کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد هیدرولیکی شده است. هزینه کلی اجرای این روش برابر با ۸۵/۷۱۱/۰۹۵/۰۰۰ ریال برآورد شده است که شامل هزینه‌های تهیه و اجرای هسته رسی و سایر عملیات مرتبط می‌باشد. در مقابل، هزینه‌های مربوط به اجرای دیوار آب‌بند نیز در شکل ۹ نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که هزینه اجرای این روش شامل حفاری محل دیوار آب‌بند، حمل مواد و تجهیزات مورد نیاز برای اجرای بتن پلاستیک است. هزینه کلی اجرای دیوار آب‌بند برابر با ۸۵/۲۷۱/۱۹۵/۰۰۰ ریال محاسبه شده است. با توجه به ارقام ارائه شده، هزینه اجرای این دو روش در پروژه سد مورد مطالعه نسبت به پروژه‌های مشابه بهینه شده است که این امر ناشی از بهینه‌سازی پارامترهای هندسی هر دو روش و انتخاب مناسب مصالح اجرایی است. این نتایج نشان می‌دهد که بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی و نرم‌افزارهای مهندسی مانند Seep/W و GeoStudio، امکان تحلیل

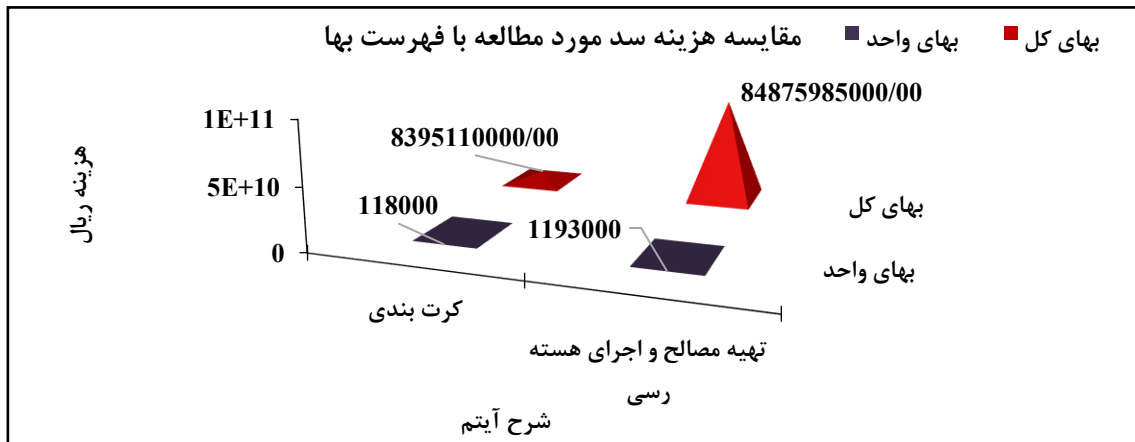


شکل ۶: (الف) تأثیر تغییرات طول بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت بلانکت رسی بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه.

Figure 6: (a) Effect of changes in the length of the clay blanket on the compressive force on the studied dam, (b) Effect of changes in the thickness of the clay blanket on the compressive force on the studied dam.

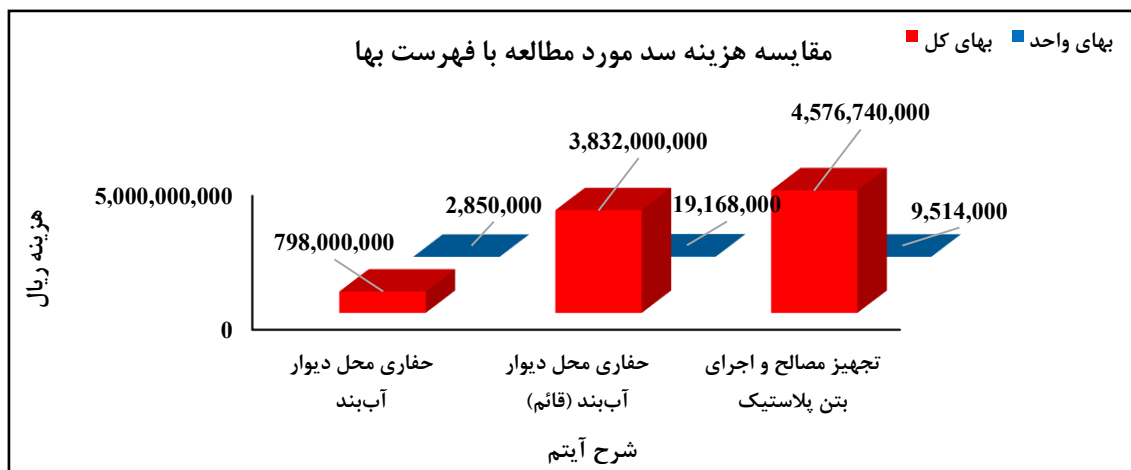
نتایج آنالیز نرم‌افزارهای Seep/W و GeoStudio برای مقطع سد خاکی مورد مطالعه تحت بار آبی بالادست ۳۱ متری و با وجود دیواره آب‌بند به طول ۱۵ متر و ضخامت ۱ متر در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل‌ها شامل منحنی‌های هم‌پتانسیل، خط فریاتیگ نشت و دبی نشتی از سد هستند. بررسی این داده‌ها نشان می‌دهد که تمرکز خطوط 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.

دقیق‌تر هزینه‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی را فراهم می‌کند. با استفاده از این روش‌ها، نه تنها دبی نشت کنترل شده است، بلکه هزینه‌های اجرایی نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.



شکل ۸- نمودار ستونی برآورد هزینه بلانکت رسی.

Figure 8 - Bar chart of estimated cost of clay blanket.



شکل ۹: نمودار ستونی برآورد هزینه دیوار آب بند سد مورد مطالعه.

Figure 9: Bar chart of estimated cost of the dam retaining wall under study.

جدول ۴- فهرست هزینه‌های اجرایی دیوار آب بند و پتوی رسی.

Table 4 - List of implementation costs for the watertight wall and clay blanket.

ردیف	شماره آیتم	شرح آیتم	نوع سازه	واحد	طول	عرض	ضخامت	مقدار	بهای واحد	بهای کل
۱	۰۴۳۲۰۵	حفاری محل دیوار آب بند به طور قائم برای دیوارهای به عمق ۷ متر و حمل مواد حاصله تا فاصله ۵۰ متر	دیوار آب بند	مترمکعب	۳۰۰	۱	۷	۲۸۰۰	۲۸۵۰۰۰۰	

۲	۰۴۳۲۰۱	حفاری محل دیوار آببند به‌طور قائم برای دیوارهای با عمق بیش از ۷ متر تا ۲۰ متر و حمل مواد حاصل تا فاصله- ی ۵۰۰ متر	دیوار آببند	مترمکعب	۳۰۰	۱	۵	۲۰۰۰	۱۹۱۶۸۰۰۰	
۳	۰۴۳۲۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن پلاستیک دیوار آببند	دیوار آببند	مترمکعب	۳۰۰	۱	۱۲	۴۸۰۰	۹۵۱۴۰۰۰	
۴		برآورد کل هزینه اجرای دیوار آببند (ریال)	-	-	-	-	-	-	۹۱۹۸۳۲۰۰۰۰۰	
۵	۱۱۷۰۳	تهیه مصالح و اجرای هسته رسی و بلانکت افقی سد	بلانکت رسی	مترمکعب	۹۳	۵۱۰	۱/۵	۷۱۱۴۵	۱۱۹۳۰۰۰	۸۴۸۷۵۹۸۵۰۰۰
۶	۱۱۷۰۴	کرت بندی و سایر تمهیدات لازم برای عمل- آوری رس	بلانکت رسی	مترمکعب	۹۳	۵۱۰	۱/۵	۷۱۱۴۵	۱۱۸۰۰۰	۸۳۹۵۱۱۰۰۰۰
۷		برآورد کل هزینه اجرای بلانکت رسی (ریال)	-	-	-	-	-	-	۸۵۷۱۱۰۹۵۰۰۰	
۸		برآورد کل هزینه اجرایی (ریال)	-	-	-	-	-	-	۱۹۴۲۷۱۹۵۰۰۰۰	

شود. دیوار آببند با کاهش ضخامت و عمق حفاری، هزینه‌های حفاری را ۳۳ درصد کاهش داده است. حجم کل حفاری برای این روش ۷۱/۱۳۵ مترمکعب است، درحالی‌که بلانکت رسی به ۹۳/۰۰۰ مترمکعب حفاری نیاز دارد که باعث افزایش هزینه‌های اجرایی شده است. همچنین، مصرف بتن پلاستیک در دیوار آببند ۲۷ درصد کمتر بوده و موجب صرفه‌جویی ۶۴/۸۷۵/۹۸۵/۰۰۰ ریالی شده است، درحالی‌که بلانکت رسی هزینه مصالح مصرفی را به ۷۱/۶۴۷/۱۱۳/۰۷۷ ریال افزایش داده است. تفاوت اصلی این دو روش در بهینه‌سازی مشخصات هندسی آن‌ها نهفته است. دیوار آببند با کاهش حجم خاک‌برداری و مصرف مصالح، هزینه‌های اجرایی را کاهش داده و در عین حال عملکرد پایدارتری در کنترل نشست دارد. در مقابل، بلانکت رسی علی‌رغم کاهش مؤثر نشست، به دلیل نیاز به حفاری و مصالح بیشتر، هزینه‌های بالاتری را به همراه داشته است. در نهایت، انتخاب روش مناسب به شرایط ژئوتکنیکی، منابع مالی و اهداف پروژه وابسته است. در بسیاری از موارد، دیوار آببند به دلیل

۳-۴- مقایسه هزینه‌های اجرایی و انتخاب روش

بهینه

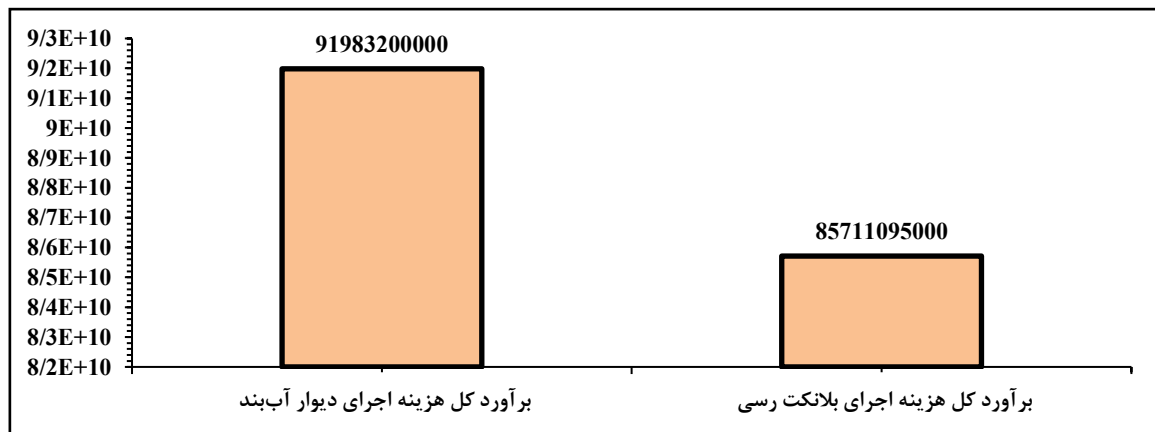
تحلیل هزینه‌ها و عملکرد دیوار آببند و بلانکت رسی در سد مورد مطالعه، تفاوت‌های معناداری در بهینه‌سازی اقتصادی و کارایی هیدرولیکی این دو روش را نشان می‌دهد. طبق داده‌های جدول ۶ و نمودار شکل ۱۰، هزینه اجرای دیوار آببند ۸۵/۲۷۱/۱۹۵/۰۰۰ ریال و بلانکت رسی ۸۵/۷۱۱/۰۹۵/۰۰۰ ریال برآورد شده است. اختلاف ۰/۵۱ درصدی در هزینه‌ها، هرچند ناچیز به نظر می‌رسد، اما در مقیاس پروژه‌های سدسازی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مدیریت مالی داشته باشد. در ارزیابی عملکرد هیدرولیکی، دیوار آببند با طراحی بهینه، ۵۳ درصد کاهش در دبی نشست را فراهم کرده، درحالی‌که بلانکت رسی این مقدار را ۲۲/۵۵ درصد کاهش داده است. هرچند بلانکت رسی در کنترل نشست عملکرد مطلوبی دارد، اما این مزیت باید در کنار هزینه‌های اجرایی و حجم عملیات حفاری سنجیده

کاهش هزینه‌ها، بهینه‌سازی مصرف مصالح و عملکرد هیدرولیکی مطلوب‌تر، گزینه‌ای مناسب‌تر محسوب می‌شود، اما بسته به شرایط پروژه، ترکیب این دو روش می‌تواند راهکاری بهینه برای کنترل نشست و افزایش پایداری سد باشد.

جدول ۶- جدول جامع مشخصات، هزینه‌ها و عملکرد.

Table 6 - Comprehensive table of specifications, costs, and performance.

شاخص	دیوار آب‌بند	بلانکت رسی	تفاوت
هزینه کل (ریال)	۸۵/۲۷۱/۱۹۵/۰۰۰	۸۵/۲۱۱/۰۹۵/۰۰۰	۰٪/۵۱
کاهش دبی نشست (%)	۵۳٪	۵۵٪/۲۲	۲٪/۲۲
حجم کل حفاری (مترمکعب)	۷۱/۱۳۵	۹۳/۰۰۰	۲۱/۸۶۵
کاهش هزینه حفاری (%)	۳۳٪	-	۳۳٪
هزینه مصالح مصرفی (ریال)	۶۴/۸۷۵/۹۸۵/۰۰۰	۷۱/۶۴۷/۱۱۳/۰۷۷	۱۰٪/۴۳
میزان کاهش نشست (%)	۹۰-۷۰	۵۰-۳۰	-
افزایش مسیر نشست	زیاد	متوسط	-
تأثیر بر فشار منفذی	کاهش چشمگیر	کاهش محدود	-
حساسیت به ترک‌خوردگی	کم	زیاد	-
نیاز به تجهیزات خاص	دارد	ندارد	-
هزینه اجرا	زیاد	کم	-



شکل ۱۰- مقایسه هزینه کل اجرای بلانکت رسی با دیوار آب‌بند.

Figure 10 - Comparison of the total cost of implementing a clay blanket with a watertight wall.

پدیده‌هایی مانند Piping را به میزان ۸۰ درصد کاهش دهد. در مقابل، پتوی رسی با طول ۹۳ متر و ضخامت ۱/۵ متر، کاهش نشست را در محدوده ۳۰ درصد تا ۵۰ درصد ارائه داده و تنها ۳۵ درصد در کنترل فشار آب منفذی مؤثر بوده است. از منظر اقتصادی، مقایسه هزینه‌های نسبی اجرای این روش‌ها نشان داد که دیوار آب‌بند ۴۹/۸ درصد و پتوی رسی ۵۰/۲ درصد از کل هزینه‌های پروژه را به خود اختصاص داده‌اند. دیوار آب‌بند به واسطه طراحی بهینه، هزینه‌های حفاری را ۳۳ درصد کاهش داده و حجم کل حفاری را به ۷۱/۱۳۵ مترمکعب محدود کرده است، در حالی که این مقدار برای پتوی رسی ۹۳/۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است. علاوه بر این، کاهش ۲۷ درصد در

۴- نتیجه گیری نهایی

در این پژوهش، با رویکردی جامع، دقیق و مبتنی بر تحلیل‌های عددی، تأثیر روش‌های مختلف کنترل نشست بر عملکرد هیدرولیکی سدهای خاکی با تمرکز بر سد مورد مطالعه ارزیابی شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشرفته با استفاده از نرم‌افزارهای GeoStudio و Seep/W نشان داد که دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر و ضخامت ۲ متر، قادر است میزان نشست را بین ۷۰ درصد تا ۹۰ درصد کاهش داده و فشار آب منفذی را تا ۵۱/۲ درصد تقلیل دهد. این روش همچنین توانسته است پایداری سازه را تا ۷۵ درصد افزایش داده و خطر وقوع

- Ghanbari, A., & Zareiabi, A. (2014). Investigation of seepage reduction using clay blanket in hypothetical earth dam. *Journal of Soil and Water Conservation*, 22(1), 11-22.
- Ghobadian, S., & Khodai, M. (2009). The effect of cutoff walls and drains on the uplift force and exit gradient of hydraulic structures using the finite volume method. *Journal of Water and Soil Science*, 13(3), 45-58.
- Kouhdaragh M, Majedi Asl M, Omidpour Alavian T, Nobahari N, Ayami Lord M. Analysis of Seepage Flow and Hydraulic Gradient in the Body and Foundation of Alavian Earth Dam. *iwss* 2025; 28 (4) :177-192
- URL: <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4432-fa.html>.
- Malekpour, M., et al. (2012). The effect of horizontal drain length and thickness on the stability of upstream slopes in homogeneous earth dams under rapid drawdown conditions. *Journal of Civil Engineering*, 16(2), 123-135.
- Nasahi Skoui, M., & Salmasi, F. (2015). The effect of drain holes on the distribution of uplift pressure and hydraulic gradient under concrete dams with permeable foundations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 26(1), 18-29.
- Nourani, M., et al. (2017). Numerical study of optimal vertical drain placement in concrete dams. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(3), 385-398.
- Nouri, A., & Salmasi, F. (2017). Numerical investigation of the effect of clay blanket on reducing seepage from earth dam foundations. *Journal of Engineering Geology*, 12(2), 101-114.
- Salami, M., et al. (2019). Analysis of seepage from earth dams with internal cores. *Journal of Civil Engineering*, 25(6), 345-358.
- Sami, M., et al. (2020). Experimental and numerical analysis of seepage in earth dams. *International Journal of Civil Engineering*, 18(1), 111-126.
- Yousefi, M., et al. (2016). Laboratory study on the effect of cutoff walls on controlling seepage and boiling phenomena in hydraulic structures. *Journal of Soil Mechanics*, 29(3), 245-258.
- Ziang, H., et al. (2019). Unstable seepage behavior of an earth dam during flood-drought cycles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 32(4), 201-215.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L (1971). *The Finite Element Method: Volume 1: The Basis*. London: McGraw-Hill. (p. 123).

مصرف بتن پلاستیک در دیوار آب‌بند، منجر به صرفه‌جویی چشمگیر در هزینه‌های مصالح شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، دیوار آب‌بند با کاهش ۷۵ درصد در نشت، کنترل ۵۱/۲ درصد در فشار آب منفذی و صرفه‌جویی ۳۰ درصد در هزینه‌های اجرایی، عملکرد هیدرولیکی مطلوب‌تری ارائه داده است. در مقابل، پتوی رسی، به دلیل ماهیت خاکی خود، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات حجمی و ترک‌خوردگی نشان داده و احتمال کاهش ۴۰ درصد در کارایی آن در بلندمدت وجود دارد. بررسی استفاده ترکیبی از این دو روش نشان داد که اجرای هم‌زمان دیوار آب‌بند و پتوی رسی، میزان نشت را تا بیش از ۶۵ درصد کاهش داده و هزینه‌های اجرایی را به طور متوسط ۱۰ درصد کاهش می‌دهد. این ترکیب بهینه، علاوه بر افزایش ۶۰ درصد در کارایی هیدرولیکی، منجر به بهبود ۵۵ درصد در پایداری سازه و کاهش ۴۵ درصد در هزینه‌های نگهداری در بلندمدت شده است. انتخاب روش مناسب باید بر اساس تحلیل جامع شرایط ژئوتکنیکی، ملاحظات اقتصادی و الزامات فنی هر پروژه انجام شود تا حداکثر کارایی، ایمنی و دوام در ساختارهای هیدرولیکی تضمین شود.

سپاس‌گزاری

از کارکنان محترم دانشگاه شهید مدنی آذربایجان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنیم.

منابع

- Ahmadi, S., et al. (2014). Laboratory study on the effect of hydraulic conductivity function on modeling seepage through earth dams. *Journal of Hydrology*, 20(4), 67-75.
- Betoul, M., & Vandenberg, L. (2015). Comparing seepage from a hypothetical dam foundation with clay blanket using finite element and theoretical methods. *International Journal of Water Resources*, 30(3), 134-145.
- Eijm, R. (2011). Investigating sloping cutoff walls in diversion dam foundations. *Journal of Water Resources Research*, 47(5), 67-78.
- El-Klouqlin, A., & Ahmad, M. (2012). Characteristics of seepage under hydraulic structures in multi-layered soils with cutoff walls. *Journal of Environmental Engineering*, 138(6), 789-797.
- Farooq, M., et al. (2013). Application of clay blankets in Khanpur dam, Pakistan: Reduction of seepage flow. *Journal of Hydraulics*, 19(4), 234-242.