

Numerical investigation of the effect of soil nailing on the upstream slope stability of an earth dam under seepage, rapid drawdown, and earthquake

E. Asadi^{1*}, N. Beirami² and H. Sadeghi Saghdil³

Extended Abstract

Introduction:

Earth dams play a critical role in water storage and resource management worldwide. The stability of upstream slopes in earth dams is one of the most significant safety concerns, particularly under critical operating conditions such as steady-state seepage, rapid reservoir drawdown, and earthquake. Rapid drawdown and earthquake loading have historically been identified as primary causes of slope instability and dam failures. Although drainage improvements and geometric modifications have commonly been employed to enhance slope stability, these approaches are often impractical for operating dams. Soil nailing has emerged as an effective structural reinforcement method for slope stabilization. By introducing tensile resistance within the soil mass and restricting the development of critical slip surfaces, soil nailing can improve shear strength without requiring substantial geometric modifications or reservoir evacuation. This study numerically investigated the feasibility and effectiveness of soil nailing in improving the upstream slope stability of the Alavian Earth Dam in East Azerbaijan Province, Iran, under static, seepage, rapid drawdown, and dynamic loading conditions.

Material and Methods:

The numerical analyses in this study were performed using the GeoStudio software package, integrating SEEP/W for seepage modeling and SLOPE/W for slope stability evaluation. This coupled framework enables the direct transfer of pore-water pressure distributions from seepage analysis into stability calculations, thereby providing a consistent hydraulic–mechanical assessment of upstream slope behavior. The geometric configuration and geotechnical properties of the Alavian Earth Dam were obtained from the archive data of East Azerbaijan Regional Water Company. The required soil parameters, including unit weight, permeability coefficient, cohesion, and internal friction angle, were defined according to archived laboratory test results and validated design documentation. Seepage analysis was conducted under steady-state and transient hydraulic conditions to determine pore-water pressure distribution within the dam body. The finite element method implemented in SEEP/W was employed to simulate saturated and unsaturated flow regimes. The resulting pore-water pressure fields were subsequently imported into SLOPE/W for limit equilibrium analysis. Slope stability was evaluated using established limit equilibrium methods. Four loading scenarios were investigated: (i) end-of-construction static condition without seepage, (ii) steady-state seepage condition, (iii) rapid drawdown condition, and (iv) dynamic loading under steady seepage conditions. For dynamic analysis, the El Centro acceleration record was applied as the input ground motion. The soil nailing system was modeled using steel bars with a diameter of 32 mm, a bond diameter of 0.1 m, and a uniform spacing of 1 m. For each loading condition, the factor of safety was calculated with and without soil nailing, and the percentage improvement was determined.

Results and Discussion:

The numerical analyses provided a comprehensive evaluation of the upstream slope stability of the Alavian Earth Dam under different hydraulic and loading conditions. The results demonstrated that slope behavior was strongly influenced by pore-water pressure distribution and external loading type, and that soil nailing consistently improved stability performance. These findings confirmed that hydraulic conditions played a fundamental role in governing the mechanical response and overall safety of earth dam slopes. Under end-of-

1- Assistant Professor, Department of Engineering, Faculty of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

2- Former M.Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

3- Former M.Sc., Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* Corresponding Author: asadi@azaruniv.ac.ir , asadi47e@gmail.com

Received: 2025/12/21

Accepted: 2026/02/15

construction conditions without seepage, the calculated factor of safety (FoS) was 1.757. Although this value satisfied conventional design recommendations, it reflected a limited safety margin against potential future adverse loading conditions. After implementing soil nailing, the FoS increased to 2.083, representing an 18.5% improvement. The reinforcement altered the failure mechanism by transferring tensile resistance across the potential slip surface and reducing mobilized shear stress within the upstream shell. In the steady-state seepage scenario, the FoS without reinforcement was 1.775. The slight increase compared with the dry static condition is attributed to the stabilizing hydrostatic pressure exerted by the reservoir on the upstream face, which partially counteracts driving forces. When soil nailing was introduced, the FoS increased to 2.09, corresponding to a 17.7% improvement. The results indicated that even in the presence of pore-water pressure, soil nailing effectively enhanced shear resistance and restrained the development of critical slip surfaces. The redistribution of effective stresses along the upstream face further explains the moderate yet consistent improvement observed in this condition. Rapid drawdown was identified as the most critical loading condition. Without soil nailing, the FoS dropped to 0.961, indicating instability. The sudden removal of hydrostatic support, combined with elevated internal pore-water pressure, led to a significant reduction in effective stress and shear strength. After reinforcement, the FoS increased to 1.174, representing a 22.1% improvement and restoring stability. This result highlighted the decisive role of soil nailing under transient hydraulic conditions, where traditional drainage measures alone might not provide sufficient safety margins. Under seismic loading using the El Centro acceleration record, combined with steady seepage conditions, the FoS was calculated to be 1.224 without reinforcement. Although greater than unity, the safety margin was relatively small due to inertial forces and cyclic stress redistribution. With soil nailing, the FoS increased to 1.366, reflecting a 14.2% improvement. The reinforcement system contributed to increased stiffness and limited deformation, thereby enhancing dynamic stability. From a practical perspective, this demonstrates the suitability of soil nailing as a retrofit strategy for dams subjected to multi-hazard loading environments.

Conclusion:

This study demonstrated that soil nailing significantly enhances the upstream slope stability of earth dams under static, rapid drawdown, and earthquake conditions. Rapid drawdown was identified as the controlling design condition, where the slope was unstable without reinforcement. Nailing successfully restored stability without altering dam geometry or requiring reservoir evacuation. Even under dynamic loading, soil nailing provided meaningful improvements in safety margin. The findings highlight the feasibility of soil nailing for aging earth dams. Therefore, nailing can be considered an effective, practical, and structurally efficient retrofitting method for existing earth dams, particularly in seismic regions and under critical hydraulic conditions.

Keywords: Earth Dam, Factor of Safety, Pore Water Pressure, Seismic Loading

Citation:

Asadi, E., Beirami, N., Sadeghi Saghdi, 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(60), pp. 101-114. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14812.2613>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



بررسی عددی تاثیر نیلینگ بر پایداری شیروانی بالادست سد خاکی در حالت تراوش، تخلیه سریع و زلزله

ابراهیم اسدی^{۱*}، ندا بیرامی^۲ و حسن صادقی سقدیل^۳

چکیده

پایداری شیروانی سدهای خاکی در حالت‌های مختلف بهره‌برداری از جمله تراوش پایدار، تخلیه سریع مخزن و بارگذاری لرزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق، پایداری شیب بالادست سد خاکی تحت بارگذاری دینامیکی قبل و بعد از اجرای نیلینگ محاسبه، مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، یک راهکار مؤثر، سریع و ساده‌ای به منظور افزایش ضریب اطمینان پایداری شیروانی و جلوگیری از ایجاد ترک در سدهای خاکی قدیمی و در حال بهره‌برداری ارائه شده است. بدین منظور، مدل‌سازی عددی سد خاکی علویان در استان آذربایجان شرقی با نرم‌افزار GEOSTUDIO/W انجام شد. نتایج عددی نشان می‌دهد که استفاده از نیلینگ موجب افزایش قابل‌ملاحظه پایداری شیروانی سد خاکی در تمامی حالات مورد بررسی شده است؛ به طوری که ضریب اطمینان به میزان ۱۸/۵۵۴ درصد در حالت استاتیکی پایان ساخت، ۱۷/۷۴۶ درصد در حالت تراوش پایدار، ۲۲/۱۶۴ درصد در حالت تخلیه سریع و ۱۱/۶ درصد در حالت دینامیکی افزایش یافته است. بنابراین، اجرای نیلینگ با افزایش مقاومت برشی توده خاک و محدود کردن توسعه سطح لغزش بحرانی، موجب بهبود رفتار پایداری شیروانی بالادست شده است. بر اساس نتایج، نیلینگ می‌تواند به‌عنوان یک راهکار ساده‌ای مؤثر، سریع و قابل‌اجرا برای افزایش ایمنی سدهای خاکی تحت شرایط بحرانی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری لرزه‌ای، سد خاکی، ضریب اطمینان، فشار آب منفذی

ارجاع: اسدی، ا.، بیرامی، ن.، صادقی سقدیل، ح.، ۱۴۰۵. بررسی عددی تاثیر نیلینگ بر پایداری شیروانی بالادست سد خاکی در حالت تراوش، تخلیه سریع و زلزله. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۰)، صص. ۱۰۱-۱۱۴.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه پلی تکنیک امیرکبیر، تهران، ایران.

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول: asadi47e@gmail.com ، asadi@azaruniv.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

مقدمه

سد‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی برای ذخیره و مدیریت منابع آب می‌باشند و با افزایش نیاز به منابع پایدار و اهمیت مسائل اقتصادی، طراحی سدها باید به‌گونه‌ای انجام شود که ضمن تأمین ایمنی و پایداری سازه، از نظر اقتصادی نیز بهینه باشد (Asadi et al., 2025). یکی از مهم‌ترین فاکتورهای سد خاکی عملکرد شیروانی سد در شرایط بحرانی مثل تخلیه سریع و زلزله است (Saeedpanah and Aghazadeh, 2017; Bolouri Bazaz and Mobinizad, 2010). سد خاکی به عنوان یک مخزن نگهداری آب باید در این شرایط، پایداری خود را حفظ کند تا از خسارت‌های جانی و مالی احتمالی جلوگیری شود. مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D نشان داده‌اند که در دبی‌های بالا، افزایش سرعت و افت فشار در اجزای سرریز می‌تواند منجر به وقوع پدیده‌هایی نظیر کاویتاسیون شود که ضرورت ارزیابی ایمنی جامع سامانه سد را برجسته می‌سازد (Tabrizchi et al., 2024). در شرایط تخلیه سریع، سدهای خاکی مستعد ناپایداری شیب بالادست هستند و طراحی زهکش‌های افقی از جمله روش‌های مؤثر برای بهبود پایداری محسوب می‌شود (Zomorodian and Abodollahzadeh, 2012). تراوش یکی از عوامل کلیدی در ایمنی سدهای خاکی است و مطالعات عددی مبتنی بر المان محدود نشان داده‌اند که کنترل مناسب آن نقش مهمی در کاهش فشار آب منفذی، گرازیان هیدرولیکی و بهبود پایداری کلی سد دارد (Roushangar et al., 2023; Roushangar et al., 2025). بهبود سامانه‌های زهکشی از جمله استفاده از زهکش‌های مایل و افقی، یکی از روش‌های مؤثر در کنترل تراوش و افزایش پایداری شیروانی در سدهای خاکی است (Imani and Negahdar, 2013). تعبیه زهکش‌های افقی در شیروانی بالادست سدهای خاکی می‌تواند با کاهش فشار آب حفره‌ای، موجب افزایش قابل توجهی در ضریب اطمینان پایداری در شرایط تخلیه سریع شود.

شکست سد بر اساس تعریف ارائه شده توسط کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ عبارت است از: فروریختن یا جابه‌جایی بخشی از سد یا شالوده آن، آن‌گونه که سد توانایی نگهداری آب را نداشته باشد. نتایج آماری نشان می‌دهد که حدود یک چهارم خرابی‌های سدها به علت گسیختگی شیب دامنه‌ها می‌باشد که تقریباً تمام این گسیختگی‌ها به یکی از علل تخلیه سریع مخزن یا زلزله بوده است.

تأثیر طول و ضخامت زهکش افقی بر پایداری شیب بالادست سدهای خاکی در شرایط تخلیه سریع مخزن توسط Malekpour et al. (2011) بررسی شد. این پژوهشگران با مدل‌سازی یک سد خاکی همگن، تغییرات ضریب اطمینان در برابر لغزش سطحی و عمقی را در زمان‌های مختلف پس از افت ناگهانی سطح آب تحلیل کردند. نتایج نشان داد که استفاده از زهکش افقی با طول و ضخامت مناسب موجب افزایش تدریجی ضریب اطمینان و بهبود پایداری شیب می‌شود.

تأثیر زهکش افقی بر میزان تراوش در بدنه سد خاکی ناهمگن جغناپ همراه با تحلیل تراوش با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W و روش المان محدود توسط Imani et al. (2014) انجام و دو حالت مختلف سد همگن با زهکش افقی و سد ناهمگن با هسته رسی و زهکش افقی در پایین‌دست بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش طول و ضخامت زهکش، مقدار تراوش افزایش می‌یابد، اما تأثیر طول زهکش در افزایش دبی تراوش بسیار بیشتر از ضخامت آن است. همچنین در سدهای ناهمگن (دارای هسته رسی)، میزان دبی تراوش کمتر از سدهای همگن است، زیرا بیشترین افت بار هیدرولیکی در هسته رخ می‌دهد. (Baghali and Manafpour, 2013) به مطالعه رفتار تراوشی سد خاکی ستارخان اهر با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار GEOSTUDIO پرداخته و نتایج حاصل را با داده‌های ابزار دقیق (پیزومترها) مقایسه کرده‌اند. هدف از این کار، ارزیابی میزان نشست آب، بررسی فشارهای آب حفره‌ای و تشخیص عملکرد سد در برابر تراوش بوده است. این مطالعه توانست ابزارهای دقیق معیوب یا از کار افتاده را شناسایی کند. (Hedayatifar et al., 2014) به مطالعه سد سهند که به علت وجود لایه‌ی آب شور تحت فشار در زیر پی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است با مدل‌سازی المان محدود پرداخته‌اند. پژوهشگران داده‌های ابزار دقیق شامل پیزومترهای الکتریکی، چاه‌های مشاهده‌ای و پیزومترهای عمیق پایین‌دست را با نتایج مدل عددی مقایسه کردند تا پارامترهای نفوذپذیری مصالح را اصلاح و تطبیق دهند. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی سلامت و عملکرد پی و بدنه سد پس از چند سال بهره‌برداری و کنترل رفتار تراوش در آن بوده است.

(Asadi et al., 2023) به مطالعه پایداری طرح‌های مختلف سدهای بتن غلتکی به روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس پرداختند. نتایج نشان داد که برای کاهش تمرکز تنش در سدها و افزایش ایمنی آن‌ها، شکل هندسی مقاطع سدها اهمیت دارند. همچنین مقطع‌های مختلف در طرح‌های متفاوت

مهندسیین فراهم می‌کنند که عملکرد سدها در شرایط بحرانی را مدل کرده و نتایج را با استانداردهای روز مقایسه کنند که اگر طرح مدل شده عملکرد مناسبی در شرایط بحرانی نداشته باشد، مهندس می‌تواند طرح مورد نظر را اصلاح کند. حال اگر بررسی‌ها روی سدهای قدیمی و در حال بهره‌برداری صورت بگیرد و این طرح‌ها عملکرد ضعیفی در شرایط بحرانی داشته باشند، باید راهکارهایی برای اصلاح سازه سد و افزایش مقاومت آن‌ها ارائه شود.

به منظور نزدیک بودن نتایج مدل‌سازی عددی به واقعیت، از مقطع عرضی سد علویان واقع در استان آذربایجان شرقی استفاده شده است. در مدل‌سازی این مطالعه، تنها از یک نوع آرایش نیلینگ و مصالح استفاده گردیده تا نتایج قابل مقایسه باشند. هدف از تحقیق در این بخش ارائه بهترین آرایش نیلینگ برای اجرا در بدنه سد خاکی نیست بلکه در این پژوهش به امکان‌سنجی اجرا و تاثیر نیلینگ بر عملکرد شیب بالادست سد خاکی پرداخته شده است. بدیهی است برای دستیابی به بهترین روش نیلینگ در سد خاکی لازم است مطالعات جامع‌تری انجام شود و آزمون و خطاهای متعددی انجام گیرد. در مدل‌سازی این مطالعه در هر مرحله تنها یک مؤلفه تغییر داده شد تا بتوان تأثیر این مؤلفه را از عوامل دیگر مجزا نموده و در نتیجه خروجی‌ها را با فرضیات مقایسه کرد.

با توجه به پیامدهای فاجعه‌بار شکست سدهای خاکی در شرایط بحرانی نظیر تخلیه سریع مخزن و بارگذاری لرزه‌ای، که می‌تواند منجر به خسارات گسترده جانی و مالی در پایین‌دست شود، ارائه راهکارهای تقویتی سریع، اجرایی و قابل پیاده‌سازی برای سدهای موجود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سدهای خاکی، ایجاد و گسترش ترک در بدنه، به‌ویژه تحت اثر زلزله و ناپایداری‌های گذرا، یکی از مکانیسم‌های اصلی آغاز شکست محسوب می‌شود. در زلزله به وقوع پیوسته سال ۱۳۶۹ در رودبار اگر سد رودبار خاکی بود خسارت‌های مالی و جانی دربرداشت. بنابراین پیدا کردن راهکاری سریع و کارآمد برای جلوگیری از ترک در سدهای خاکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نوآوری تحقیق حاضر، امکان‌سنجی به‌کارگیری نیلینگ خاک به‌عنوان یک راهکار سازه‌ای مؤثر و سریع برای کنترل ترک‌خوردگی، افزایش مقاومت برشی توده خاک و جلوگیری از گسترش سطوح لغزش بحرانی در شیروانی بالادست سد خاکی تحت شرایط بهره‌برداری واقعی است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر بهبود سامانه‌های زهکشی یا اصلاح هندسه شیب

می‌توانند هزینه ساخت سد را بدون کاهش مقاومت سد کاهش دهند.

اگرچه بهینه‌سازی سامانه‌های زهکشی و آب‌بندی می‌تواند فشار آب منفذی را کاهش دهد، اما در بسیاری از سدهای خاکی قدیمی یا در حال بهره‌برداری، امکان اصلاح گسترده هندسه یا اجرای المان‌های جدید تراوش گیر وجود ندارد. از سوی دیگر، مطالعات عددی پیشرفته در زمینه تحلیل تراوش، از جمله استفاده از روش‌های بدون شبکه و روش‌های نوین عددی، نشان داده‌اند که دقت پیش‌بینی میدان فشار و هد هیدرولیکی افزایش یافته است، اما این مطالعات عمدتاً به تحلیل جریان محدود شده و کمتر به تقویت مکانیکی شیروانی‌ها پرداخته‌اند (Daneshfarz et al., 2023).

تغییر شرایط اقلیمی و افزایش وقوع رخدادهای حدی مانند نوسانات شدید تراز آب مخزن، ضرورت بازنگری در روش‌های متداول پایداری‌سازی شیب‌های سد را دوچندان کرده است. در این راستا، روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌ای نظیر نیلینگ خاک به‌عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی برای افزایش پایداری شیب‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نیلینگ با ایجاد نیروی مقاوم کششی در داخل توده خاک و محدود کردن توسعه سطوح لغزش، می‌تواند بدون نیاز به تغییر هندسه شیب یا تخلیه کامل مخزن، ایمنی سدهای خاکی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهد (Li et al., 2023).

بنابراین لازم است که ایمنی شیروانی سد خاکی توسط مهندسیین کنترل گردد. در این کنترل باید تنش‌های برشی ایجاد شده در امتداد سطح لغزش بحرانی محاسبه شده و با مقاومت برشی خاک مقایسه گردد. به چنین فرایندی تحلیل پایداری شیروانی^۱ اطلاق می‌گردد. وظیفه مهندس کنترل‌کننده پایداری شیروانی، تعیین ضریب ایمنی است که در حالت کلی به صورت حاصل تقسیم مقاومت برشی متوسط خاک بر تنش برشی کل در سطح لغزش می‌باشد که در معادله شماره ۱ نشان داده شده است.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

که در آن: F_s ، ضریب ایمنی کلی؛ τ_f ، مقاومت برشی متوسط خاک و τ_d ، تنش برشی متوسط بسیج شده در سطح لغزش بحرانی است.

در اینجا عامل تخلیه سریع مخزن می‌تواند باعث افزایش تنش برشی در بدنه سد خاکی شود در نتیجه ضریب ایمنی را کاهش دهد. روش‌های مدل‌سازی رایانه‌ای این امکان را برای

¹ Slope Stability Analysis

محاسبه فشار آب منفذی در بدنه و پی سد، شار تراوش پایدار و گذرا، اثر بارگذاری هیدرولیکی، تغییر سطح آب مخزن و شرایط مرزی پیچیده را تحلیل کند.

زیربرنامه SLOPE/W برای تحلیل پایداری شیب با استفاده از روش‌های تعادل حدی^۲ توسعه یافته است. این زیربرنامه مجموعه‌ای از روش‌های معتبر شامل جانبو^۳، اسپنسر^۴ و بیسپ^۵ است. با استفاده از این زیربرنامه می‌توان شیب را در شرایط استاتیکی، تراوش پایدار، تخلیه سریع، شرایط بارگذاری مخزن، زلزله و شرایط گذرا تحلیل کرد.

برای بررسی پایداری سطوح شیب‌دار و تعیین ضریب اطمینان^۶ در طراحی شیب از قسمت SLOPE/W نرم‌افزار و روش تعادل حدی استفاده شده است. نکته‌ی حائز اهمیت این است که در این قسمت از روش المان محدود استفاده نمی‌شود. عمق سطوح لغزش به صورت خودکار بسیار کم و برابر ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و این موضوع باعث می‌شود که سطوح لغزش خیلی سطحی و با ضریب اطمینان بالاتری به دست آیند. در این تحقیق مقدار حداقل عمق گوهی گسیختگی برابر ۵ متر در نظر گرفته شده است.

این مطالعه به منظور بررسی تأثیر نیلینگ بر ضریب ایمنی شیب بالادست سد در شرایط بحرانی توسط نرم‌افزار ژئواستادیو انجام گرفته است که برای بدست آوردن نتایج منطقی و قابل مقایسه، سد باید در شرایط گوناگون مورد آزمایش ایزوله (مدل‌سازی رایانه‌ای) قرار بگیرد. با توجه به هدف‌های تحقیق، موارد زیر بررسی شدند:

الف- بررسی پایداری شیب بالادست در حالت استاتیکی در پایان ساخت و با و بدون نیلینگ.

ب- بررسی پایداری شیب بالادست در حالت استاتیکی در حالت تراوش پایدار و با و بدون نیلینگ.

ج- بررسی پایداری شیب بالادست در حالت استاتیکی و تخلیه سریع مخزن و با و بدون نیلینگ.

د- بررسی پایداری شیب بالادست در حالت دینامیکی پس از تراوش پایدار و با و بدون نیلینگ.

برای به دست آوردن داده‌های واقعی به منظور امکان مقایسه نتایج مدل، از اطلاعات مقطع عرضی سد خاکی علویان واقع در استان آذربایجان شرقی در دامنه کوه سهند و به فاصله ۱۲۰ کیلومتری جنوب غربی تبریز و ۳/۵ کیلومتری شمال شهرستان مراغه استفاده شد. دلیل انتخاب سد علویان انجام

تمرکز داشته‌اند، این تحقیق نشان می‌دهد که نیلینگ می‌تواند بدون تغییر هندسه سد و بدون نیاز به تخلیه مخزن، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش خطر شکست سدهای خاکی در شرایط بحرانی ایفا نماید.

مواد و روش‌ها

تحلیل‌های مورد نظر در این تحقیق با استفاده از بسته نرم‌افزاری ژئواستادیو انجام گرفته است. انتخاب این نرم‌افزار در این پژوهش به دلیل قابلیت اتصال مستقیم تحلیل تراوش (SEEP/W) و تحلیل پایداری شیب (SLOPE/W) صورت گرفته است و هدف از آن، ایجاد یک چارچوب تحلیلی سازگار برای بررسی اثر نیلینگ تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری بود. بدیهی است که تمرکز این تحقیق بر ارزیابی رفتار مهندسی شیب بالادست و تأثیر مداخله تقویتی بوده و نتایج به نرم‌افزار خاصی محدود نمی‌شود. نرم‌افزار SEEP/W یکی از نرم‌افزارهای این بسته است که در زمینه بررسی تراوش خاک قابلیت دارد. از نرم‌افزار SLOPE/W برای تحلیل پایداری و تعیین ضریب اطمینان شیب‌های بدنه سد استفاده شد. نرم‌افزار ژئواستادیو شامل مجموعه‌ای از برنامه‌های تحلیل ژئوتکنیکی است که به صورت یکپارچه برای تحلیل‌های همزمان جریان آب زیرسطحی، پایداری شیب‌ها و تنش و کرنش در زمین طراحی شده است (Heitland and Donaghy, 2021). این بسته شامل مجموعه‌ای از زیربرنامه‌های تخصصی است که امکان تحلیل‌های یکپارچه ژئوتکنیکی همچون تراوش آب زیرسطحی، پایداری شیب، تنش و کرنش خاک، تحلیل تحکیم، انتقال حرارت، ماندگاری یخ، و مدل‌سازی دینامیکی را فراهم می‌کند. از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به اتصال زیربرنامه‌ها به یکدیگر اشاره کرد. به طوری که خروجی یک تحلیل مانند میدان فشار آب منفذی از SEEP/W می‌تواند به صورت مستقیم به عنوان ورودی تحلیل دیگری مانند SLOPE/W استفاده شود. این رویکرد باعث می‌شود مدل‌سازی سدها و سازه‌های خاکی با دقت بیشتری انجام شود.

زیربرنامه SEEP/W برای تحلیل جریان آب در محیط‌های متخلخل طراحی شده و قادر به مدل‌سازی شرایط اشباع و غیراشباع است. این زیربرنامه از روش اجزای محدود^۱ استفاده می‌کند و می‌تواند پدیده‌هایی نظیر تعیین خط مرز تراوش،

⁴ Spencer

⁵ Bishop

⁶ Factor of Safety

¹ Finite Element Method

² Limit Equilibrium Method

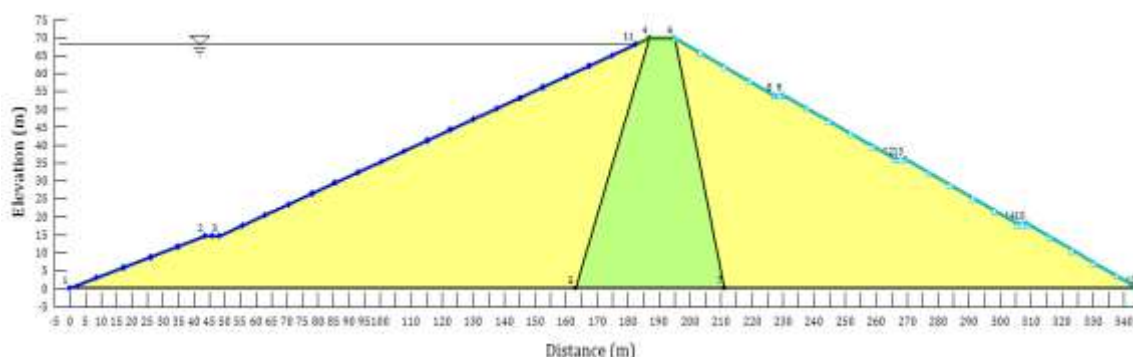
³ Janbu

در این تحقیق آرایشی از نیلینگ نیز ارائه شده است که برای افزایش پایداری شیب بالادست می‌تواند کمک کند. در شکل ۲، کمیت‌های مقاومتی و مشخصات مکانیکی نیل‌ها که در نرم‌افزار SLOPE/W برای تحلیل پایداری تعریف شده‌اند، آورده شده است. قطر میلگرد فرضی بکار رفته ۳۲ میلی‌متر است که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت کششی مناسب برای شرایط بارگذاری مختلف می‌باشد و قطر پیوند نیز ۰/۱ متر در نظر گرفته شده است که بیانگر قطر مؤثر ناحیه‌ی درگیر بین دوغاب و خاک اطراف نیل است (FHWA, 2003; Lazarte et al., 2015). فاصله‌ی بین نیل‌ها ۱ متر در نظر گرفته شده؛ چرا که این موضوع منجر به توزیع یکنواخت نیروی مقاوم در توده خاک می‌شود (FHWA, 2003; Elias and Juran, 1991)

مطالعات نسبتاً کامل روی این سد در گذشته و همچنین، در دسترس بودن مشخصه‌های مکانیکی و مقاومتی آن است. مقادیر کمی مقطع عرضی سد در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر و ویژگی‌های مصالح مورد نیاز در این تحقیق نیز از بایگانی شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ و در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- شاخص‌های مکانیک خاکی مصالح ساخت سد علویان

موقعیت	γ_{dry} (KN/m ³)	K (cm/s)	C (KN/m ²)	ν	ϕ
هسته	۱۶/۷۵	$2/25 \times 10^{-10}$	۱۰۰	۰/۲۸	۹
پوسته	۲۰/۷۵	$2/75 \times 10^{-10}$	۰	۰/۲۲	۳۵



شکل ۱- مشخصات هندسی مقطع عرضی سد علویان

1	Nail	182.5 m	68 m	183.76785 m	65.281077 m
F of S Dependent:	No	Load Distribution:	Conc. in 1 slice		
Bond Diameter:	0.1 m	Bar Capacity:	338 kN		
Bond Safety Factor:	1	Bar Safety Factor:	1.8		
Bond Skin Friction (F/Area):	250 kPa	Shear Capacity:	20 kN		
Nail Spacing:	1 m	Shear Safety:	1		
		Apply Shear:	Parallel to Slip		

شکل ۲- مقادیر استفاده شده شاخص‌های مقاومتی نیلینگ

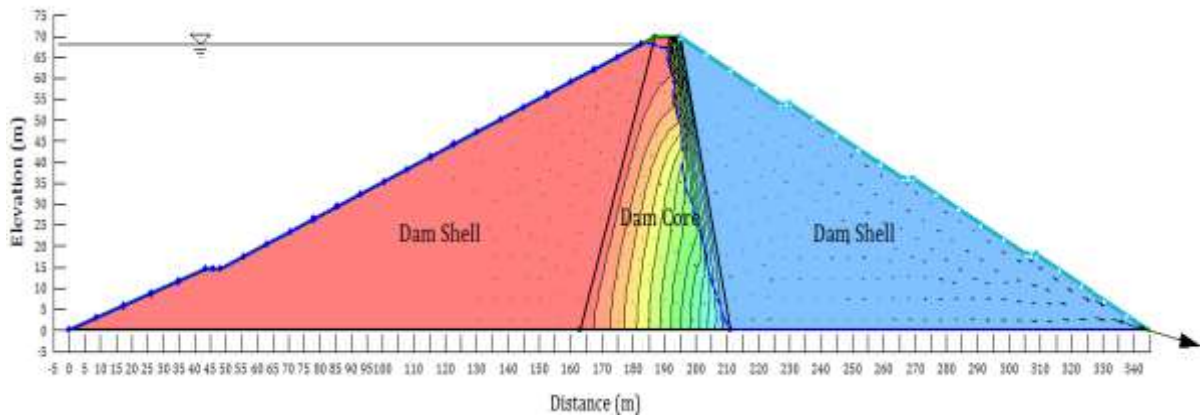
نتایج و بحث

همانگونه که مشاهده می‌شود بعضی از خطوط جریان بالاتر از سطح تراز فشار آب صفر است و دلیل این است که نرم‌افزار SEEP دقیقاً شبکه جریان را رسم نمی‌کند و فقط مسیری از بردارهای بهم پیوسته را می‌دهد. در این مطالعه از خروجی نرم‌افزار SEEP به عنوان ورودی برای نرم‌افزار SLOPE استفاده گردیده و خطوط جریان و دبی تراوش مورد مطالعه قرار نگرفته است. خطوط جریان نشان می‌دهند که مسیر اصلی عبور آب عمدتاً از ناحیه‌ی هسته‌ی سد و نواحی مجاور آن بوده و سپس به

این بخش شامل مقادیر خروجی نرم‌افزار SLOPE/W می‌باشد که بیانگر تغییر ضریب اطمینان با افزودن نیلینگ است. همچنین این مقادیر در جداول و نمودارها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۳ شبکه‌ی جریان تراوش شامل خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل را برای مقطع سد خاکی نشان می‌دهد که در آن بدنه سد شامل پوسته‌های بالادست و پایین‌دست و هسته‌ی نفوذناپذیر مرکزی است. تراز آب بالادست در حدود ۷۰ متر قرار داشته و جریان تراوش از سمت بالادست به پایین‌دست هدایت می‌شود.

در شرایط بهره‌برداری، ایفا می‌کند. در پوسته‌ی بالادست، فاصله‌ی بیشتر بین خطوط هم‌پتانسیل بیانگر گرادیان هیدرولیکی کمتر و توزیع یکنواخت‌تر فشار آب منفذی است، در حالی که در ناحیه‌ی پایینی هسته و ابتدای پوسته‌ی پایین‌دست، تراکم نسبی خطوط هم‌پتانسیل مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی افزایش گرادیان هیدرولیکی و حساسیت این ناحیه از نظر پایداری می‌باشد.

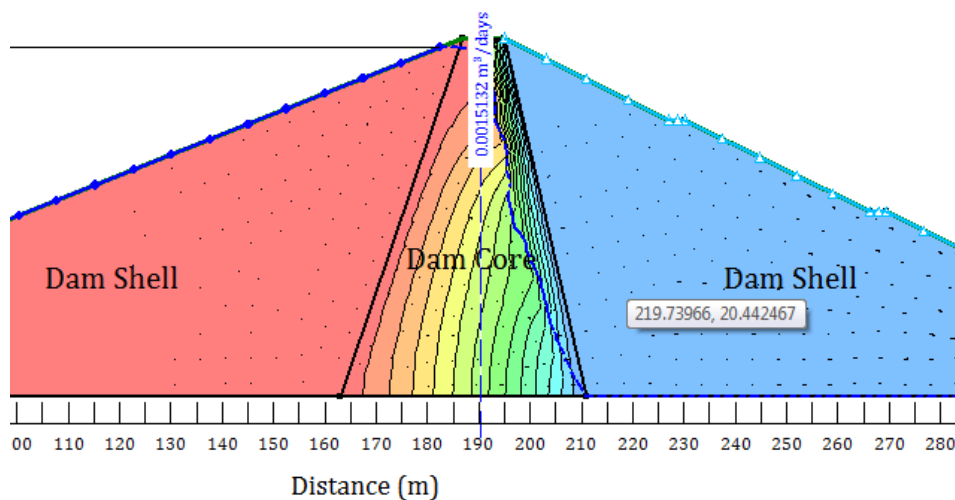
سمت پایین‌دست منحرف می‌شود. تمرکز خطوط هم‌پتانسیل در مجاورت هسته بیانگر افت شدید هد هیدرولیکی در این ناحیه است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب هسته در کاهش دبی تراوش می‌باشد. این توزیع هد هیدرولیکی باعث می‌شود که فشار آب منفذی در پوسته بالادست به‌صورت یکنواخت‌تری پخش شده و تمرکز تنش مؤثر در ناحیه شیروانی کاهش یابد، امری که نقش مهمی در رفتار پایداری شیب بالادست، به‌ویژه



شکل ۳- شبکه‌ی جریان (خطوط جریان و هم پتانسیل) در سد

کلی سازه می‌باشد. با این وجود، پایین بودن دبی تراوش به‌تنهایی به‌معنای حذف اثرات منفی فشار آب منفذی بر پایداری شیروانی نیست، زیرا توزیع فشار آب در داخل بدنه سد، به‌ویژه در شرایط گذرا مانند تخلیه سریع و زلزله، می‌تواند همچنان موجب کاهش تنش مؤثر و افزایش تمایل به لغزش شود.

شکل ۴، دبی تراوش از بدنه‌ی سد را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل تراوش در نرم‌افزار SLOPE/W، دبی تراوش عبوری از بدنه سد، با فرض عرض واحد مقطع (۱ متر)، برابر با $0.0015132 \text{ m}^3/\text{days}$ مترمکعب در روز بر متر عرض محاسبه شد. مقدار بسیار پایین دبی تراوش بیانگر عملکرد مناسب هسته سد در کنترل جریان آب و کاهش نفوذپذیری



شکل ۴- شبکه‌ی میزان دبی تراوش شده از سد

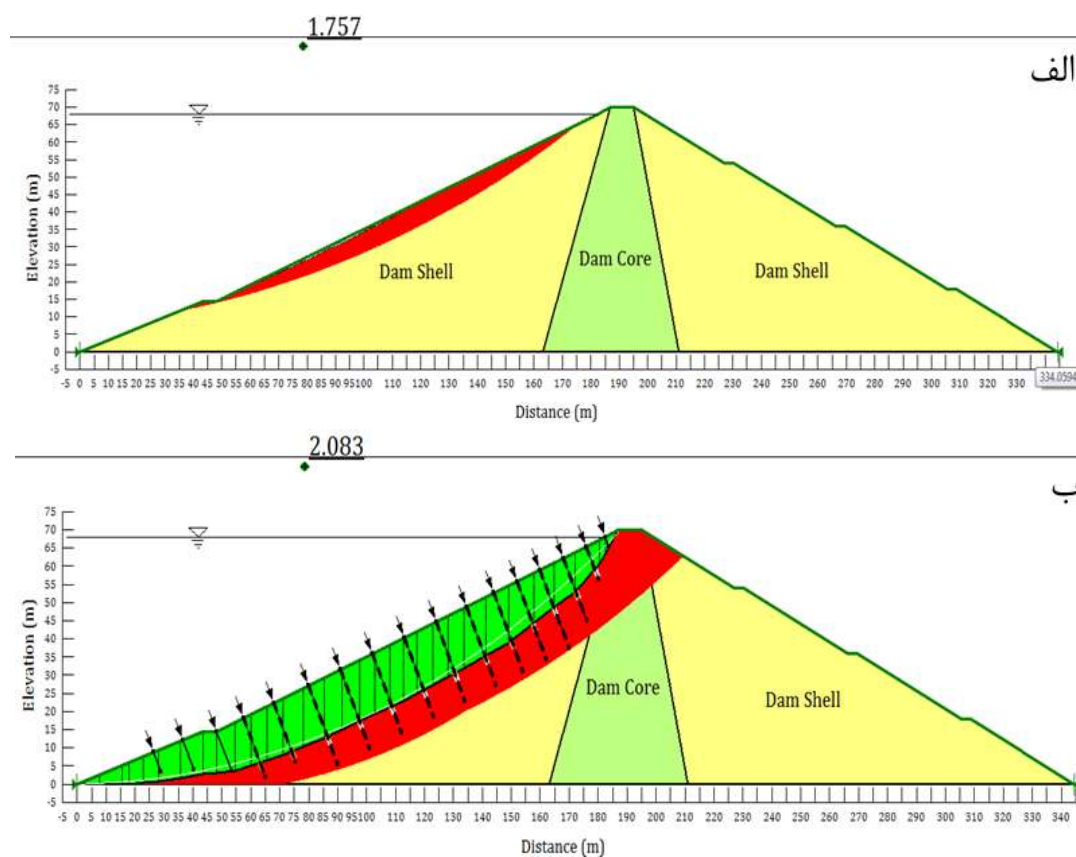
پایداری استاتیکی شیب بالادست سد در حالت بعد از ساخت

بدون تراوش

ضریب اطمینان پایداری استاتیکی شیروانی در حالت پایان ساخت برای شیب بالادست و بدون در نظر گرفتن تراوش در شکل ۵، نشان داده شده است. در این تحلیل، رفتار سد تحت اثر وزن خود و بدون تأثیر فشار آب منفذی بررسی شده است. مطابق شکل ۵-الف، در مدل استاتیکی بدون نیلینگ، سطح لغزش بحرانی عمدتاً در پوسته‌ی بالادست توسعه یافته و ضریب اطمینان پایداری برابر با $1/757$ به دست آمد. اگرچه این مقدار بر اساس معیارهای متداول طراحی شیروانی سدهای خاکی در حالت پایان ساخت، در محدوده قابل قبول آیین‌نامه‌ای قرار دارد (USACE, 2003; ICOLD, 2011)، اما با توجه به کاهش مورد انتظار ضریب اطمینان در شرایط بحرانی بهره‌برداری نظیر تراوش پایدار، تخلیه سریع مخزن و بارگذاری لرزه‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که حاشیه‌ی ایمنی شیروانی در این حالت محدود بوده و نیازمند بررسی و تقویت در سناریوهای بحرانی‌تر است.

در شکل ۵-ب، با افزودن سیستم نیلینگ خاک به شیب بالادست، تغییر قابل توجهی در مکانیزم گسیختگی مشاهده

می‌شود. نیل‌ها با ایجاد نیروی مقاوم کششی و مهار توده خاک در امتداد سطح لغزش، باعث کاهش تمایل به لغزش و انتقال سطح لغزش به نواحی پایدارتر شده‌اند. در نتیجه، ضریب اطمینان پایداری به مقدار $2/083$ افزایش یافته است که نشان‌دهنده‌ی افزایش حدود $18/5$ درصدی پایداری شیروانی بالادست در حالت استاتیکی پایان ساخت می‌باشد. بر اساس ادبیات ژئوتکنیکی، کارایی روش‌های پایدارسازی شیب معمولاً بر مبنای میزان افزایش نسبی ضریب اطمینان و بهبود حاشیه ایمنی نسبت به حالت پایه ارزیابی می‌شود (Abramson et al., 2002; Duncan et al., 2014). از این منظر، افزایش مشاهده‌شده در این پژوهش در محدوده افزایش‌های گزارش‌شده برای نیلینگ خاک قرار داشته و نشان‌دهنده اثر مؤثر این روش در بهبود پایداری شیب بالادست حتی در شرایط بدون تراوش است. این موضوع نشان می‌دهد که نیلینگ حتی در غیاب فشار آب منفذی نیز با اصلاح مکانیزم گسیختگی و افزایش پیوستگی توده خاک، می‌تواند نقش مؤثری در افزایش پایداری شیروانی بالادست و کاهش حساسیت آن نسبت به بارگذاری‌های آتی ایفا کند.



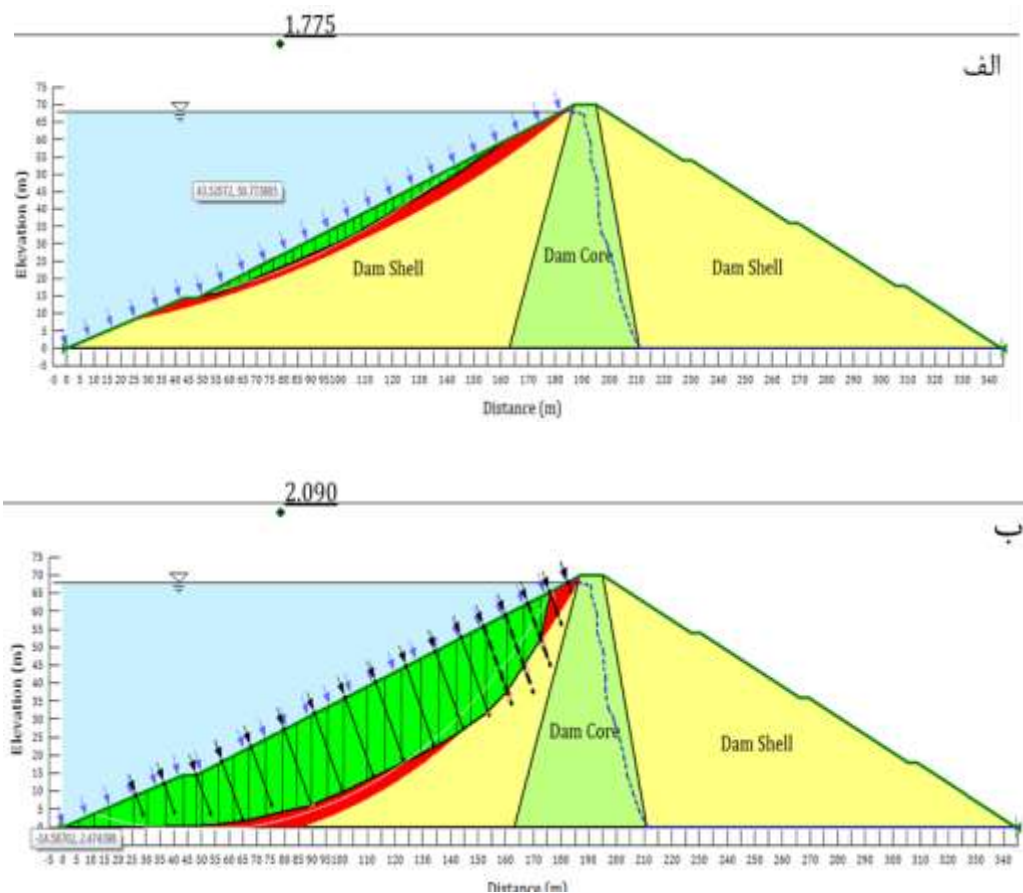
شکل ۵- ضریب اطمینان پایداری استاتیکی شیروانی شیب بالادست در حالت پایان ساخت (بدون تراوش)، الف- بدون نیلینگ ب- با نیلینگ

کرده و منجر به افزایش ضریب اطمینان گردد. چنین رفتاری در برخی مطالعات عددی پیشین نیز گزارش شده است و نشان می‌دهد که اثر تراوش بر پایداری شیب کاهشی نبوده، بلکه به توزیع فشار آب و شرایط مرزی مخزن وابسته است؛ نتیجه‌ای که در این پژوهش برای شرایط واقعی بهره‌برداری سد علویان تأیید شده است.

در شکل ۶-ب، با اعمال سیستم نیلینگ، سطح لغزش بحرانی مهار شده و نیل‌ها با ایجاد نیروی مقاوم کششی در امتداد سطح لغزش، نقش مؤثری در افزایش پایداری ایفا کرده‌اند. در این حالت، ضریب اطمینان به مقدار $2/09$ افزایش یافته است که بیانگر بهبود قابل توجه پایداری شیب بالادست در حضور تراوش پایدار می‌باشد. افزایش حدود $17/7$ درصدی ضریب اطمینان مشاهده شده در این پژوهش، در بازه بهبودهای گزارش شده در مطالعات عددی و تجربی پیشین در زمینه پایدارسازی شیب‌ها با استفاده از نیلینگ خاک قرار دارد و به‌عنوان یک بهبود قابل توجه در پایداری شیب تلقی می‌شود (FHWA, 2003; Duncan et al., 2014; Lazarte et al., 2015).

پایداری استاتیکی شیب‌های سد در حالت بعد از ایجاد تراوش پایدار

شکل ۶، نتایج تحلیل پایداری استاتیکی شیب بالادست سدهاکی را در حالت تراوش پایدار^۱ نشان می‌دهد. در این حالت، مخزن در تراز بهره‌برداری قرار داشته و توزیع فشار آب منفذی ناشی از تراوش به‌طور کامل در بدنه سد برقرار شده است. مطابق شکل ۶-الف، در مدل بدون نیلینگ، سطح لغزش بحرانی عمدتاً در پوسته‌ی بالادست توسعه یافته و ضریب اطمینان برابر با $1/775$ محاسبه شده است. در مقایسه با حالت پایان ساخت بدون تراوش، افزایش جزئی ضریب اطمینان مشاهده می‌شود که این امر ناشی از اثر نیروی هیدرواستاتیکی مخزن و ایجاد فشار جانبی آب بر شیب بالادست می‌باشد. این فشار باعث کاهش نیروی محرک لغزش در جهت پایین دست و در نتیجه افزایش پایداری شیروانی بالادست می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که اثر تراوش بر پایداری شیب بالادست همواره کاهشی نیست و در شرایطی که فشار هیدرواستاتیکی مخزن به‌طور مؤثر بر شیب اعمال شود، می‌تواند بخشی از اثر منفی فشار آب منفذی را جبران



شکل ۶- ضریب اطمینان پایداری استاتیکی شیب بالادست در حالت تراوش پایدار، الف- بدون نیلینگ ب- با نیلینگ

¹ Steady-state Seepage

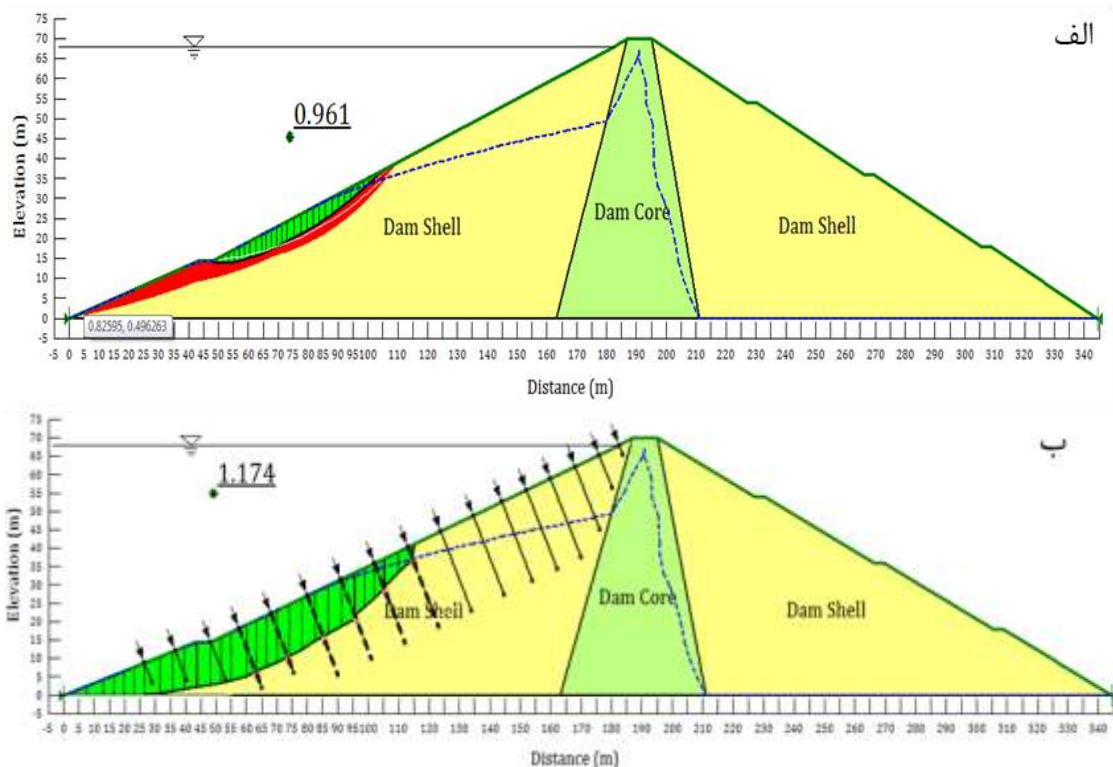
شیروانی شده است. این عدم تعادل هیدرولیکی موجب کاهش قابل توجه تنش مؤثر در امتداد سطح لغزش بحرانی شده و شرایطی را فراهم می‌کند که حتی شیب‌های پایدار در حالت بهره‌برداری عادی، در برابر تخلیه سریع مخزن دچار ناپایداری شوند.

در شکل ۷-ب، با اعمال سیستم نیلینگ، تغییر قابل توجهی در رفتار شیب مشاهده می‌شود. نیل‌ها با ایجاد نیروی مقاوم کششی و مهار توده خاک در امتداد سطح لغزش، باعث کنترل مکانیزم گسیختگی شده‌اند. در این حالت، ضریب اطمینان به مقدار $1/174$ افزایش یافته است که بیانگر خروج شیب از حالت ناپایدار و دستیابی به پایداری قابل قبول می‌باشد. در این شرایط بحرانی، نیلینگ با تأمین نیروی مقاوم کششی مستقل از فشار آب منفذی، توانسته است اثر منفی تخلیه سریع مخزن را تا حد زیادی جبران کرده و نقش مؤثری در کنترل مکانیزم گسیختگی شیب بالادست ایفا نماید. در حالی که بسیاری از مطالعات پیشین صرفاً افزایش نسبی ضریب اطمینان ناشی از روش‌های مختلف پایدارسازی را گزارش کرده‌اند، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نیلینگ می‌تواند به‌طور مؤثر شیب را از وضعیت ناپایدار به محدوده پایداری قابل قبول منتقل کند که از نظر تصمیم‌گیری مهندسی اهمیت ویژه‌ای دارد.

پایداری استاتیکی شیب‌های سد در حالت تخلیه سریع

شکل ۷، نتایج تحلیل پایداری استاتیکی شیب بالادست سد خاکی را در حالت تخلیه سریع مخزن^۱ نشان می‌دهد. این حالت یکی از بحرانی‌ترین شرایط بهره‌برداری سدهای خاکی محسوب می‌شود، زیرا با کاهش ناگهانی تراز آب مخزن، فشار جانبی آب حذف شده، در حالی که فشار آب منفذی در بدنه سد فرصت کافی برای کاهش ندارد.

مطابق شکل ۷-الف، در مدل بدون نیلینگ، سطح لغزش بحرانی در پوسته‌ی بالادست توسعه یافته و ضریب اطمینان برابر با $0/961$ محاسبه شده است. این مقدار کمتر از یک بوده و نشان‌دهنده‌ی ناپایداری شیب بالادست در حالت تخلیه سریع می‌باشد. کاهش شدید ضریب اطمینان در حالت تخلیه سریع با نتایج مطالعات پیشین در زمینه سدهای خاکی هم‌راستا است که این حالت را به‌عنوان بحرانی‌ترین وضعیت بهره‌برداری معرفی کرده‌اند؛ با این تفاوت که در این پژوهش، این ناپایداری به‌صورت کمی و در مقیاس یک سد واقعی در حال بهره‌برداری نشان داده شده است. در این شرایط، باقی‌ماندن فشار آب منفذی بالا در داخل شیب و حذف نیروی مقاوم هیدرواستاتیکی مخزن منجر به افزایش نیروی محرک لغزش و کاهش شدید پایداری



شکل ۷- ضریب اطمینان پایداری استاتیکی شیروانی شیب بالادست سد در حالت تخلیه سریع مخزن، الف- بدون نیلینگ ب- با نیلینگ

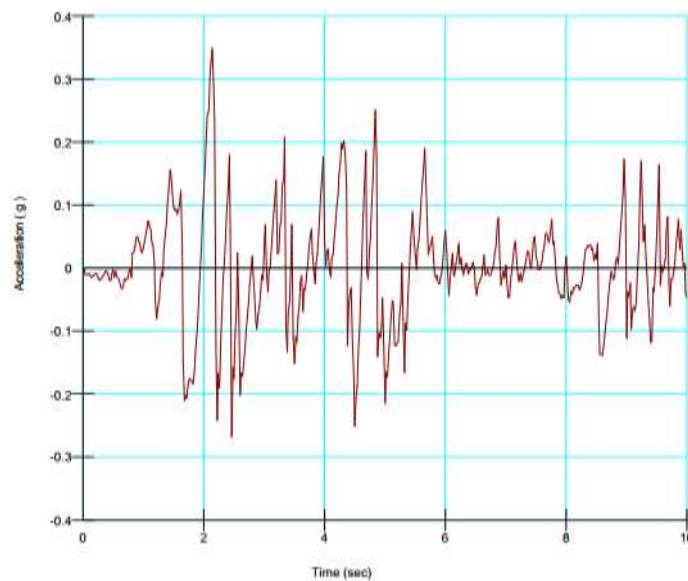
¹ Rapid Drawdown

نسبت به زمان (ثانیه) نمایش می‌دهد. این رکورد شامل نوسانات رفت و برگشتی و پالس‌های با دامنه نسبتاً قابل توجه در بخش میانی شتاب‌نگاشت است که بر اساس دستورالعمل‌ها و مطالعات مرجع تحلیل دینامیکی سدهای خاکی، به‌منظور بازنمایی مناسب اثر بارگذاری لرزه‌ای بر شیب‌های اشباع و تحت تراوش پایدار توصیه شده است. (USACE, 2003; Kramer, 1996)

از این رو، این رکورد برای ارزیابی پاسخ دینامیکی شیب بالادست در شرایط اشباع و تراوش پایدار به کار گرفته شد.

پایداری دینامیکی شیب‌های سد در حالت بعد از ایجاد تراوش پایدار

در تحلیل پایداری دینامیکی شیب‌های سد در حالت تراوش پایدار، لازم است یک رکورد لرزه‌ای به مدل اعمال شود. در این پژوهش، شتاب‌نگاشت زلزله‌ی El Centro به‌عنوان ورودی بارگذاری دینامیکی در محیط مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۸، شتاب‌نگاشت اعمال‌شده را در قالب تغییرات شتاب زمین (g)

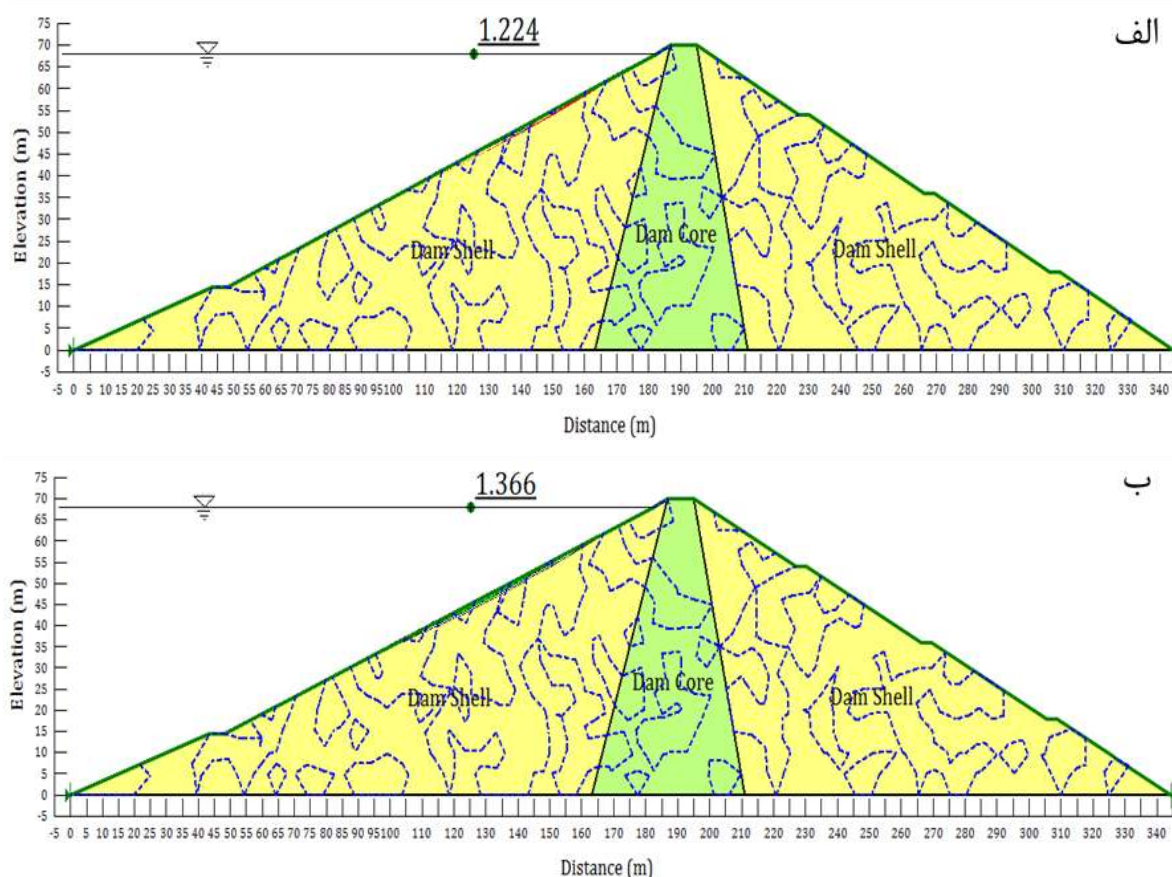


شکل ۸- شتاب‌نگاشت زلزله استفاده‌شده به‌عنوان ورودی تحلیل دینامیکی

با افزودن سامانه نیلینگ، رفتار دینامیکی شیب بهبود یافته و نیل‌ها با ایجاد نیروی مقاوم کششی و مهار تغییرشکل‌های ناشی از زلزله، موجب افزایش پایداری شده‌اند. در این حالت، ضریب اطمینان دینامیکی به مقدار ۱/۳۶۶ افزایش یافته است که نشان‌دهنده‌ی بهبود قابل توجه پایداری شیب بالادست تحت بارگذاری لرزه‌ای می‌باشد، افزایش ۱۰ تا ۳۰ درصدی در ضریب اطمینان به‌عنوان بهبود مؤثر در پایداری شیب در شرایط بارگذاری لرزه‌ای محسوب می‌شود (FHWA, 2003; Duncan et al., 2014; Lazarte et al., 2015). افزایش ضریب اطمینان در حضور نیلینگ نشان می‌دهد که این سامانه با محدود کردن تغییرشکل‌های دینامیکی و افزایش سختی مؤثر توده خاک، می‌تواند نقش تکمیلی مهمی در بهبود پایداری شیب بالادست تحت بارگذاری لرزه‌ای ایفا کند، هرچند میزان تأثیر آن نسبت به حالت تخلیه سریع کمتر است.

شکل ۹ نتایج تحلیل پایداری دینامیکی شیب بالادست سد خاکی را به‌ترتیب در حالت بدون نیلینگ و با نیلینگ و تحت اثر زلزله در شرایط تراوش پایدار نشان می‌دهند. خطوط نقطه‌چین آبی، توزیع پاسخ دینامیکی و تغییرات ناشی از بارگذاری لرزه‌ای در بدنه سد را نمایش می‌دهند.

در شکل ۹، ضریب اطمینان دینامیکی شیب بالادست برابر با ۱/۲۲۴ محاسبه شده است. اگرچه این مقدار بزرگ‌تر از یک بوده و نشان‌دهنده‌ی پایداری نسبی شیب است، اما با توجه به ماهیت دینامیکی بارگذاری و هم‌زمانی اثر زلزله و فشار آب منفذی ناشی از تراوش پایدار، حاشیه ایمنی شیب محدود بوده و امکان گسترش ناپایداری در شرایط شدیدتر وجود دارد. ماهیت سیکی نیروهای اینرسی ناشی از زلزله و توزیع ناپایدار فشار آب منفذی باعث می‌شود که رفتار دینامیکی شیب پیچیده‌تر از حالت‌های استاتیکی گردد و حتی مقادیر ضریب اطمینان بالاتر از یک نیز لزوماً بیانگر ایمنی کافی در برابر تغییرشکل‌های تجمعی نباشند.



شکل ۹- ضریب اطمینان پایداری دینامیکی شیب بالادست سد تحت زلزله، الف- بدون نیلینگ ب- با نیلینگ

اطمینان از ۱/۲۲۴ به ۱/۳۶۶ افزایش یافته است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تخلیه سریع مخزن به‌عنوان حالت کنترل‌کننده طراحی شیب بالادست سدهای خاکی مطرح بوده و نقش نیلینگ در این حالت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این روش می‌تواند بدون نیاز به تغییر هندسه سد، ایمنی شیروانی را در بحرانی‌ترین شرایط بهره‌برداری به‌طور مؤثری افزایش دهد. مقایسه این نتایج با گزارش‌های پیشین نشان می‌دهد که اگرچه روند کلی تغییرات ضریب اطمینان مشابه است، اما تمرکز پژوهش حاضر بر شناسایی شرایطی است که در آن نیلینگ از یک گزینه بهبوددهنده به یک راهکار تعیین‌کننده برای تأمین ایمنی شیب بالادست تبدیل می‌شود. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش از نظر میزان افزایش ضریب اطمینان، با نتایج مطالعات عددی پیشین در زمینه پایدارسازی شیب‌ها با استفاده از نیلینگ خاک هم‌خوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که در پژوهش‌های مشابه، افزایش ضریب اطمینان در بازه ۱۵ تا ۳۰ درصد به‌عنوان عملکرد مؤثر سیستم نیلینگ گزارش شده است (Yang et al., 2020; Ramayanti et al., 2024).

جدول ۲، خلاصه‌ای از نتایج تحلیل‌های انجام‌شده برای پایداری شیب بالادست سد خاکی را در چهار حالت مختلف شامل تحلیل استاتیکی، تراوش پایدار، تخلیه سریع و تحلیل دینامیکی ارائه می‌دهد. در این جدول، مقادیر ضریب اطمینان برای حالت بدون نیلینگ و با نیلینگ به‌همراه درصد تغییرات آن‌ها مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی حالات تحلیلی، استفاده از نیلینگ منجر به افزایش ضریب اطمینان شیب بالادست شده است. بیشترین افزایش ضریب اطمینان مربوط به حالت استاتیکی پایان ساخت با افزایش حدود ۱۸/۵ درصد و حالت تراوش پایدار با افزایش حدود ۱۷/۷ درصد می‌باشد. در حالت تخلیه سریع مخزن که بحرانی‌ترین وضعیت پایداری شیب بالادست محسوب می‌شود، ضریب اطمینان بدون نیلینگ به مقدار ۰/۹۶۱ کاهش یافته است، در حالی که با اعمال نیلینگ، این مقدار به ۱/۱۷۴ افزایش یافته و شیب از حالت ناپایدار خارج شده است. همچنین، در تحلیل دینامیکی تحت اثر زلزله، اگرچه میزان افزایش ضریب اطمینان نسبت به حالت‌های استاتیکی کمتر است، اما نیلینگ همچنان باعث بهبود قابل توجه پایداری شده و ضریب

موضعی، باعث انتقال سطح لغزش بحرانی به نواحی پایدارتر می‌شوند.

در شرایط بحرانی مانند تخلیه سریع مخزن و بارگذاری لرزه‌ای، که فشار آب منفذی و نیروهای اینرسی به‌طور هم‌زمان بر شیب اثر می‌گذارند، نیلینگ توانسته است حاشیه ایمنی لازم را تأمین کرده و شیب را از حالت ناپایدار خارج نماید. این موضوع نشان می‌دهد که نیلینگ می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مقاوم‌سازی مؤثر برای سدهای خاکی موجود و در حال بهره‌برداری مورد استفاده قرار گیرد، به‌ویژه در مواردی که امکان اصلاح هندسه شیب یا اجرای سیستم‌های زهکشی گسترده وجود ندارد.

استفاده از نیلینگ به‌عنوان یک روش مقاوم‌سازی، به‌ویژه در سدهای قدیمی که در زمان طراحی اولیه الزامات لرزه‌ای یا شرایط تخلیه سریع به‌طور کامل در نظر گرفته نشده است، می‌تواند نقش مؤثری در افزایش ایمنی سازه ایفا کند.

نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل تراوش نشان داد که دبی تراوش عبوری از بدنه سد مقدار بسیار کمی داشته و هسته‌ی سد عملکرد مناسبی در کنترل جریان آب ایفا می‌کند. با این حال، فشار آب منفذی ناشی از تراوش نقش مهمی در رفتار پایداری شیب بالادست، به‌ویژه در شرایط بحرانی، دارد. در حالت پایان ساخت و بدون تراوش، شیب بالادست در وضعیت پایدار قرار داشته و ضریب اطمینان برابر با ۱/۷۵۷ محاسبه شد. با افزودن نیلینگ، این مقدار به ۲/۰۸۳ افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی افزایش قابل توجه حاشیه ایمنی شیب حتی در شرایط استاتیکی پایه است. در حالت تراوش پایدار، به دلیل اثر فشار هیدرواستاتیکی مخزن، ضریب اطمینان شیب بالادست نسبت به حالت بدون تراوش افزایش یافته و مقدار آن برابر با ۱/۷۵۷ به دست آمد. استفاده از نیلینگ در این حالت موجب افزایش ضریب اطمینان به ۲/۰۹ گردید که بیانگر نقش مؤثر نیلینگ در بهبود پایداری شیب در حضور فشار آب منفذی است.

بحرانی‌ترین وضعیت پایداری مربوط به حالت تخلیه سریع مخزن بود، به‌طوری که ضریب اطمینان شیب بالادست بدون نیلینگ به مقدار ۰/۹۶۱ کاهش یافت که نشان‌دهنده‌ی ناپایداری شیب است. در این حالت، حذف ناگهانی فشار جانبی آب مخزن و باقی‌ماندن فشار آب منفذی در داخل بدنه سد عامل اصلی کاهش پایداری می‌باشد. با اعمال نیلینگ، ضریب اطمینان به ۱/۱۷۴ افزایش یافته و شیب از حالت ناپایدار خارج شد.

جدول ۲- مقایسه ضریب اطمینان شیب بالادست سد در حالت‌های

مختلف تحلیلی با و بدون نیلینگ

حالت‌های مختلف تحلیل	ضریب اطمینان بدون نیلینگ	ضریب اطمینان با نیلینگ	درصد تغییرات ضریب اطمینان
تحلیل استاتیکی	۱/۷۵۷	۲/۰۸۳	۱۸۱/۵۵۴
تحلیل تراوش پایدار	۱/۷۷۵	۲/۰۹	۱۷۱/۷۴۶
تحلیل تخلیه سریع	۰/۹۶۱	۱/۱۷۴	۲۲۱/۱۶۴
تحلیل دینامیکی	۱/۲۲۴	۱/۳۶۶	۱۴۱/۲

تحلیل فیزیکی نتایج پایداری شیب بالادست

بررسی نتایج تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که رفتار پایداری شیب بالادست سد خاکی به‌شدت تحت تأثیر شرایط هیدرولیکی و نوع بارگذاری قرار دارد. در حالت پایان ساخت و بدون تراوش، رفتار شیب عمدتاً تابع وزن خود خاک و پارامترهای مقاومتی مصالح بوده و فشار آب منفذی نقش مؤثری در کاهش تنش مؤثر ایفا نمی‌کند. به همین دلیل، ضریب اطمینان در این حالت نسبتاً مناسب بوده، اما حاشیه ایمنی آن محدود است.

در حالت تراوش پایدار، اگرچه فشار آب منفذی در بدنه سد افزایش می‌یابد، اما وجود فشار هیدرواستاتیکی مخزن در شیب بالادست موجب ایجاد نیروی مقاوم جانبی شده و در نتیجه، ضریب اطمینان پایداری افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که اثر تراوش بر پایداری شیب بالادست مثبت بوده و از آنجا که فشار هیدرواستاتیکی در این ناحیه غالب است، تأثیر آن بر پایداری شیب مثبت ارزیابی می‌شود. در مقابل، اثر تراوش بیشتر بر پایداری شیب پایین دست اعمال می‌شود، جایی که تراوش می‌تواند موجب کاهش پایداری گردد. در شرایط تخلیه سریع، پدیده تحکیم و فشار آب منفذی باقی‌مانده می‌تواند باعث کاهش ضریب اطمینان و ناپایداری موقتی در شیب بالادست شود. عدم تعادل هیدرولیکی موجب افزایش نیروی محرک لغزش و کاهش شدید تنش مؤثر شده و شیب بالادست را به وضعیت بحرانی ناپایداری می‌رساند. نتایج این تحقیق نیز تأیید می‌کند که تخلیه سریع مخزن بحرانی‌ترین حالت پایداری شیب بالادست سد خاکی است.

نقش نیلینگ در کنترل مکانیزم گسیختگی

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سیستم نیلینگ با ایجاد نیروی مقاوم کششی در امتداد سطح لغزش، نقش مؤثری در کنترل مکانیزم گسیختگی شیب بالادست ایفا می‌کند. نیل‌ها با افزایش مقاومت برشی کلی توده خاک و محدود کردن تغییرشکل‌های

منابع

1. Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. and Boyce, G.M., 2002. Slope Stability and Stabilization Methods. *John Wiley and Sons*, New York, USA.
2. Asadi, E., Beirami, N., Salami, E. and Ghahremanzadeh, A.R., 2025. Numerical Analysis of the Optimized Cross-Section of Roller-Compacted Concrete Dams Using the Finite Element Method. *Journal of Hydraulics and Water Science*. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/hws.2025.66495.1018>
3. Asadi, E., Beirami, N., Salami, E. and Ghahremanzadeh, A.R., 2023. Numerical Analysis of the Optimal Cross-Section with Various Shapes in Roller-Compacted Concrete Dams by Comparing Stress and Strain by ABAQUS Software. *Journal of Iranian Water Engineering Research*, 3(3). [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.517500.1077>
4. Baghali, S. and Manafpour, M., 2013. Evaluation of Seepage Flow through the Foundation and Body of the Sattarkhan Earth Dam Using Numerical Analysis and Instrumentation Data. Proceedings of the 7th National Congress on Civil Engineering, Zahedan, Iran. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/217334>
5. Bolouri Bazaz, J. and Mobinizad, M., 2010. Evaluation of the Behavior of an Earth Dam During Construction Using the Finite Element Method and Comparison with Real Data Obtained from Precise Instrumentation. *Iranian Water Research Journal*, 4(1), pp. 1-10. [In Persian]. https://iwj.sku.ac.ir/article_10808.html
6. Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Adami, R. and Abbaszadeh, H., 2023. Numerical Analysis of Seepage in Steady and Transient Flow State by the Radial Basis Function Method. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 8(1), pp. 58-68. <https://doi.org/10.61186/NMCE.2023.561>
7. Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L., 2014. Soil Strength and Slope Stability. *John Wiley and Sons*, Hoboken, New Jersey, USA.
8. East Azerbaijan Regional Water Company, n.d. Internal Reports and Data Files. Tabriz, Iran. azarwater.ir
9. Elias, V. and Juran, I., 1991. Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations. *Federal Highway Administration (FHWA)*, U.S. Department of Transportation.
10. FHWA, 2003. Soil Nail Walls – Reference Manual. *Federal Highway Administration*, U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-NHI-03-017.
11. Hedayatifar, B., Rahimi, L. and Tamanai, H., 2014. Seepage Analysis in Sahand Dam and Comparison of Results with Instrumentation Data. Proceedings of the First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tehran, Iran. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/332795>

در تحلیل دینامیکی تحت اثر زلزله El Centro و در شرایط تراوش پایدار، ضریب اطمینان بدون نیلینگ برابر با ۱/۲۲۴ محاسبه شد. افزودن نیلینگ موجب افزایش این مقدار به ۱/۳۶۶ گردید که نشان می‌دهد نیلینگ حتی تحت بارگذاری لرزه‌ای نیز نقش مؤثری در افزایش ایمنی شیب ایفا می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از نظر روند کلی با مطالعات عددی پیشین در زمینه تقویت شیب‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای هم‌خوانی دارد، با این تفاوت که در این پژوهش، اثر هم‌زمان بارگذاری لرزه‌ای و فشار آب منفذی ناشی از تراوش پایدار برای یک سد خاکی واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. این ویژگی، نیلینگ را به گزینه‌ای کلیدی برای افزایش ایمنی سدهای خاکی موجود در مناطق لرزه‌خیز تبدیل می‌کند.

به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که نیلینگ به‌عنوان یک روش مقاوم‌سازی مؤثر، در تمامی حالات تحلیلی موجب افزایش ضریب اطمینان شیب بالادست سد خاکی شده است. انجام تحلیل اقتصادی در کنار تحلیل فنی در آینده می‌تواند دید جامع‌تری به مهندسیین در این زمینه ارائه دهد.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: راهنمایی، بازبینی متن مقاله، تحلیل داده‌ها و کنترل نتایج

نویسنده دوم: انجام تحلیل آماری، نگارش، ویرایش و بازبینی متن مقاله

نویسنده سوم: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها و انجام مراحل نرم‌افزاری

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

- Geosciences*.
<https://doi.org/10.1007/s12517-025-12219-z>
23. Saeedpanah, I. and Aghazadeh Garehbagh, B., 2018. Upstream Slope Stability Analysis of Earth Dams under Rapid Reservoir Drawdown (Case Study: Shahr Chay Dam). *Iranian Water Research Journal*, 11(26), pp. 37-47. [In Persian].
https://iwri.sku.ac.ir/article_10553.html
 24. Tabrizchi, M., Hassanzadeh, Y., Aalami, M.T. and Abbaszadeh, H., 2024. Investigation of Flow Parameters in a Chute Spillway Using FLOW-3D Software. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(2), pp. 411-431. [In Persian].
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.385048.669829>
 25. USACE, 2003. Slope Stability. U.S. Army Corps of Engineers, *Engineer Manual EM 1110-2-1902*.
 26. Yang, T., Zou, J.F. and Pan, Q.J., 2020. Three-Dimensional Seismic Stability of Slopes Reinforced by Soil Nails. *Computers and Geotechnics*, 127, 103768.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103768>
 27. Zomorodian, S.M.A. and Abodollahzadeh, S.M., 2012. Effect of Horizontal Drains on Upstream Slope Stability During Rapid Drawdown Condition. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2(1), pp. 29-34. [In Persian].
 12. Heitland, J. and Donaghy, H., 2021. Seepage and Stability Modeling Guidance for Embankment Dams. *Dam Safety Program*, Aecom.
 13. ICOLD (International Commission on Large Dams), 2011. Dam Safety Guidelines. *International Commission on Large Dams (ICOLD)*.
<https://www.icold-cigb.org/>
 14. Imani, O., Merufinia, E. and Siosemarde, M., 2014. The Impact of Horizontal Drainage on Persistent Leakage of Non-Homogeneous Soil Dam Body. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 4(4), pp. 435-439.
 15. Imani, O. and Negahdar, R., 2013. The Effect of Inclined Drain Length on the Seepage Discharge of a Core Earth Dam. Proceedings of the National Conference on Applied Civil Engineering and Modern Achievements, Karaj, Iran. [In Persian].
<https://civilica.com/doc/255494>
 16. Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. *Prentice Hall, Upper Saddle River*, New Jersey, USA.
 17. Lazarte, C.A., Robinson, H., Gómez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R., 2015. Soil Nail Walls: Reference Manual. *Federal Highway Administration (FHWA)*, U.S. Department of Transportation, Geotechnical Engineering Circular No. 7 (GEC 7), FHWA-NHI-14-007.
 18. Li, X., Zhou, W. and Tang, H., 2023. Application of Soil Nailing for Slope Stabilization under Complex Loading Conditions. *Engineering Geology*, 318, 107012.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107012>
 19. Malekpour, A., Hosseinzadeh, D.A., Farsadzadeh, D. and Sadr, K.J., 2011. Effect of Horizontal Drain on the Stability of Homogeneous Earth Dam under Rapid Drawdown Conditions. *Journal of Water and Soil Knowledge*, 22(2), pp. 107-119. [In Persian].
<https://civilica.com/doc/1616078>
 20. Ramayanti, A., Faris, F. and Hardiyatmo, H.C., 2024. Effect of Parametric Soil Nailing under Seismic Behavior. *Inersia*, 20(2).
<https://doi.org/10.21831/inersia.v20i2.74144>
 21. Roushangar, K., Aboueshagh, F.A. and Abbaszadeh, H., 2023. Numerical Investigation of the Influence of the Combined Seepage Reduction Scenarios on the Hydraulic Performance of the Alborz Dam Body. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(10), pp. 1467-1483. [In Persian].
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365336.669573>
 22. Roushangar, K., Amanzadeh, F., Abbaszadeh, H. and Abraham, J., 2025. Investigating Seepage Flow Characteristics with Different Sealing Elements (Case Study: Lafour Dam). *Arabian Journal of*

