

The effect of asphalt concrete core location in a rockfill dam on probabilistic analysis of downstream slope stability under steady-state flow conditions

Seyed Ali Asghari Pari ^{1✉} , and Seyed Amin Asghari Pari ² 

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: asghari pari@bkatu.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: asghari_amin@bkatu.ac.ir

Article Info.

Article type:

Research Article

Article history:

Received 28 May 2025

Received in revised form 30

September 2025

Accepted 06 December 2025

Available online 22 June 2026

Keywords:

asphalt concrete core,

rockfill dam,

probabilistic analysis,

steady-state flow,

sensitivity analysis.

ABSTRACT

Objective: This study investigates the influence of asphalt concrete core positioning in rockfill dams on seepage discharge rates and downstream slope stability under steady-state flow conditions. Additionally, it performs sensitivity analysis to identify key parameters affecting dam stability, particularly focusing on the friction angle of the shell materials.

Method: The research employs numerical modeling and hydraulic-mechanical analyses to assess the effects of core placement. The study evaluates how shifting the asphalt core from the upstream to the downstream side impacts seepage flow, safety factors, and the reliability index of the downstream slope under static and pseudo-static conditions. A sensitivity analysis is conducted to determine the most critical parameters influencing dam stability.

Results: Relocating the asphalt core toward the downstream side increases seepage discharge through the dam. This shift reduces the safety factor and reliability index of the downstream slope under both static and pseudo-static conditions. Sensitivity analysis reveals that the friction angle of the shell materials has the most significant impact on downstream slope stability.

Conclusions: The placement of the asphalt concrete core plays a crucial role in the hydraulic performance and structural stability of rockfill dams. Positioning the core on the upstream side not only minimizes seepage but also enhances downstream slope stability. Moreover, the friction angle of the shell materials is identified as a key parameter in dam design. These findings provide valuable insights for optimizing the design of rockfill dams with asphalt concrete cores.

Cite this article: Asghari Pari, Seyed Ali., Asghari Pari, Seyed Amin., (2025). The effect of asphalt concrete core location in a rockfill dam on probabilistic analysis of downstream slope stability under steady-state flow conditions. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(2), 84-101. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12240.1169>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12240.1169>

Publisher: Razi University.

Introduction

The use of asphalt concrete cores for sealing embankments and rockfill dams is an optimal method in the construction of such structures. The self-healing properties of bitumen, ease of construction in cold and rainy conditions compared to clay cores, flexibility, and effective bonding with embankment materials are key advantages of asphalt concrete, promoting its increasing global adoption. A critical aspect of using asphalt concrete cores is their placement within the dam. This study investigates the probabilistic impact of the asphalt core's location in rockfill dams on the reliability of upstream slope stability under rapid reservoir drawdown conditions. Findings reveal that shifting the core from the upstream to the downstream side reduces seepage flow, the safety factor, and the reliability of the downstream slope under both static and pseudo-static conditions. Sensitivity analysis further highlights that the friction angle of the shell materials most significantly influences downstream slope stability.

Method

The study focuses on the Seydon rockfill dam in Iran, featuring an asphalt concrete core. Five core placement scenarios were analyzed using the probabilistic slope stability software Slide2. The dam's materials were modeled with unsaturated soil properties to enhance seepage and stability analysis accuracy. Key parameters, including unit weight, shear strength, and permeability, were derived from laboratory tests. The analysis incorporated both steady-state and transient conditions, with a drawdown rate of 3 meters per day. The Latin Hypercube sampling method was employed for probabilistic analysis, generating 1000 samples to ensure convergence. The reliability index (RI) and probability of failure (PF) were calculated to assess stability under static and pseudo-static conditions, including seismic effects with a horizontal coefficient of 0.15.

Results

1. Seepage Analysis: Moving the asphalt core from upstream to downstream reduced seepage flow, with the most notable decrease observed in Cases 1 to 3.
2. Overall Slope Stability: The safety factor (F.S) for the downstream slope remained stable when the core was upstream but decreased when shifted downstream. The reliability index (RI) exceeded 3 in all cases, confirming high stability.
3. Minimum Reliability Analysis: This method identified deeper critical slip surfaces with higher F.S but lower RI compared to the overall slope method, emphasizing the need for comprehensive probabilistic assessment.
4. Sensitivity Analysis: The friction angle of the shell materials had the most significant linear correlation with slope stability, while other parameters showed negligible effects

Conclusions

The study underscores the importance of asphalt core placement in rockfill dams, demonstrating that upstream positioning enhances stability and reliability. The friction angle of shell materials is the dominant factor influencing slope stability. Probabilistic analyses, including minimum reliability assessment, provide a robust framework for evaluating dam safety under uncertainty. These findings offer valuable insights for engineers and policymakers in dam design, construction, and maintenance, ensuring safer and more reliable infrastructure.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

We are very grateful to Khuzestan Province Water and Electricity Organization for their sincere cooperation and providing the Seydon Dam reports.

Ethical Considerations

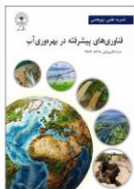
The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



تأثیر مکان هسته بتن آسفالتی در سد سنگریزه‌ای بر تحلیل احتمالاتی پایداری شیب پایین‌دست در شرایط جریان پایدار

سید علی اصغری پری^۱ و سید امین اصغری پری^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: asgharipari@bkatu.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: asghari_amin@bkatu.ac.ir

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	هدف: هدف این مقاله، بررسی تأثیر موقعیت هسته آسفالتی در سدهای سنگریزه‌ای بر میزان دبی عبوری و پایداری شیب پایین‌دست در شرایط جریان پایدار است. همچنین، تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر پایداری سد، به‌ویژه زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد، مورد توجه قرار گرفته است. روش پژوهش: این مطالعه با استفاده از تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی شرایط هیدرولیکی و مکانیکی سد انجام شده است. تأثیر جابه‌جایی هسته آسفالتی از سمت بالادست به پایین‌دست بر روی دبی نشت، ضریب ایمنی و قابلیت اطمینان شیب پایین‌دست در شرایط استاتیکی و شبه‌استاتیکی بررسی شده است. همچنین، تحلیل حساسیت برای تعیین پارامترهای کلیدی مؤثر بر پایداری سد انجام گرفته است. یافته‌ها: جابه‌جایی هسته آسفالتی به سمت پایین‌دست، باعث افزایش دبی عبوری از سد می‌شود. این جابه‌جایی، ضریب ایمنی و قابلیت اطمینان شیب پایین‌دست را در شرایط استاتیکی و شبه‌استاتیکی کاهش می‌دهد. بر اساس تحلیل حساسیت، زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد بیشترین تأثیر را بر پایداری شیب پایین‌دست دارد. نتیجه‌گیری: موقعیت هسته آسفالتی در سدهای سنگریزه‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد هیدرولیکی و پایداری سازه دارد. قرارگیری هسته در سمت بالادست، نه تنها نشت آب را کاهش می‌دهد، بلکه پایداری شیب پایین‌دست را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین، زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد به‌عنوان پارامتر کلیدی در طراحی این نوع سدها باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. این یافته‌ها می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی سدهای سنگریزه‌ای با هسته آسفالتی مؤثر باشند.

استناد: اصغری پری، سیدعلی؛ اصغری پری، سیدامین (۱۴۰۴). تأثیر مکان هسته بتن آسفالتی در سد سنگریزه‌ای بر تحلیل احتمالاتی پایداری شیب پایین‌دست در شرایط جریان پایدار. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۲)، ۸۴-۱۰۱.

10.22126/atwe.2025.12240.1169



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

برای مدت طولانی، هسته‌های رسی معمولاً در سدهای خاکی به عنوان یک جزء آب‌بندی در ساختار سد استفاده می‌شوند. سدهای با هسته بتنی آسفالتی یکی از گزینه‌های مهم در طراحی سدهای خاکی و سنگ‌ریزی به‌ویژه در مناطقی است که با مسائل مانند تهیه مصالح غیرقابل نفوذ برای هسته، الزامات کنترلی دقیق، حساسیت بالا به شرایط آب‌وهوایی و وقوع پدیده‌هایی مانند شکستگی هیدرولیکی رنج می‌برند، است (کمپته سدهای بزرگ ایران^۱، ۱۹۸۲). از مزایای این نوع سدها می‌توان به نداشتن ترک، حساس نبودن به شرایط آب‌وهوایی مختلف، قابلیت خودترمیم شدن مصالح هسته، انعطاف‌پذیری و تغییرشکل‌پذیری، دوام و مقاومت در برابر نشست، مقاومت نسبی در برابر زلزله و اتصال رضایت‌بخش با مصالح خاکریز و امنیت بالا در شرایط جنگی اشاره کرد (هوگ^۲، ۱۹۹۳). در این تحقیق اثر مکان (یا شیب) هسته آسفالتی در سد سنگ‌ریزه‌ای، با تمرکز بر نرخ نشست در حالت جریان پایدار، تأثیر تغییرات پارامترهای مقاومتی سد بر نتایج آنالیز پایداری شیب و تأثیر زلزله بر نتایج تحلیل پایداری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این مطالعه پارامترهای خاک سد به صورت غیراشباع در نظر گرفته شده تا بینش دقیق‌تری نسبت به آنالیز نشست و پایداری ایجاد شود. از طرفی با استفاده از آنالیز تغییرات مکانی و تجزیه و تحلیل حساسیت پایداری تحت شرایط مختلف بررسی و اثر تغییرات در پارامترهای مصالح سد در نتایج آنالیز پایداری بررسی می‌شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

تا کنون، آنالیزهای عددی زیادی برای ارزیابی رفتار استاتیکی و دینامیکی سدهای سنگ‌ریزه‌ای با هسته‌های بتن آسفالتی انجام شده است.

والستاد و همکاران^۳ (۱۹۹۱) سد استوراتن در نروژ را بررسی نمود. آنها تغییر شکل دائمی سد با استفاده از روش نیومارک را محاسبه کردند که نتایج نشان می‌دهد که رفتار سد در برابر زلزله خوب است. گوردیل^۴ (۱۹۹۹) سد کوپرا را برای هر دو حالت سطوح زمین‌لرزه OBE و MCE مورد تحلیل قرارداد. در این تحلیل‌ها از روش اجزا محدود و مدل هاپیربولیک برای محاسبه تنش‌ها استفاده کردند. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که با وجود اینکه ترک‌هایی در هسته سد به وجود آمد؛ اما با توجه به قابلیت خودترمیمی قیر، نشست در مدت زمان کوتاهی متوقف شد. منیتز و جونز^۵ (۱۹۹۹) سد سرس در آفریقای جنوبی را با شبه‌استاتیکی و دینامیکی تحلیل کردند. هر دو نتایج شبه‌استاتیکی و دینامیکی نشان می‌دهد که یک سد با شیب بالادست ۱ تا ۱.۶ و شیب پایین دست ۱ تا ۱/۵ و تاج با عرض ۷ متر تمام استانداردهای ایمنی را برآورده می‌کند. مهابادی و روستا^۶ (۲۰۰۲) به بررسی جنبه‌های دینامیکی یک سد سنگ‌ریزه به ارتفاع ۱۱۵ متر پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تنوع زیادی در رفتار نشست بین مصالح هسته و منطقه انتقالی وجود دارد. بررسی اثرات هندسه سد بر تحلیل‌های دینامیکی یک سد خاکی با هسته بتن آسفالتی توسط گاتمیری و مکرم^۷ (۲۰۰۳) نشان داد که پارامترهای هندسی برای سدها باید بر اساس رفتار لرزه‌ای یک سد انتخاب شوند. آنالیز عددی و آزمایش‌ها تجربی دیگری توسط بازیار و همکاران (۲۰۰۶) برای بررسی ایمنی یک سد سنگ‌ریزه‌ای با هسته آسفالتی انجام شد. مطالعات آنها نشان می‌دهد که یک سد سنگ‌ریزه در برابر زلزله‌های بزرگ یا حتی چندین زلزله عملکرد رضایت‌بخشی دارد. فیضی و همکاران (۲۰۰۸) رفتار لرزه‌ای بتن آسفالتی در سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله را مورد مطالعه قرارداد. تست‌های یکنواخت و چرخه‌ای متعدد برای ارزیابی نمونه‌های بتن آسفالتی مورد استفاده در سازه‌های هیدرولیکی استفاده شد. رفتار سد گرمروود توسط

¹ ICOLD² Hoeg³ Walstad et al⁴ Gurdal⁵ Meintjes & Jones⁶ Mahabadi & Roosta⁷ Gatmiri & Mokarram

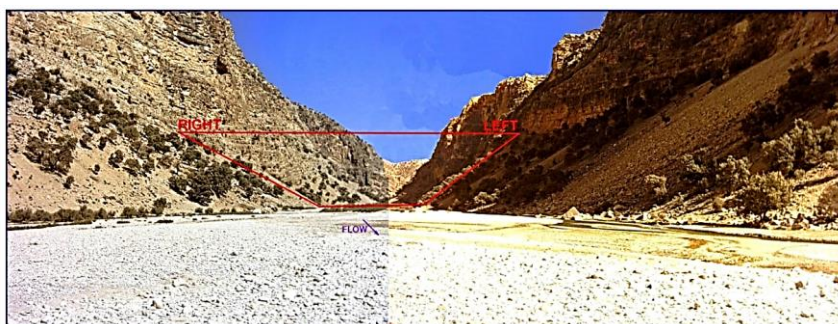
فیضی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش اجزا محدود، تحلیل‌های عددی و آزمون میز لرزه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مصالح بتن آسفالتی بادوام بوده و تنها در اثر زلزله‌های قوی در آن ترک ایجاد می‌شود. نتایج عددی و تجربی بر این نکته تأکید دارد که سد گرم‌رود عملکرد خوبی در برابر زلزله دارد. قهرمان نژاد و همکاران (۲۰۱۰) تغییر شکل لرزه‌ای سد رودخانه شور با هسته بتنی قیری را بررسی کرد. به‌عنوان مطالعه موردی آنها حداکثر نشست تاج سد را تحت حالات بارگذاری زلزله با روش‌های ساده و تحلیل‌های عددی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که شکست هسته آسفالتی بعید است رخ دهد. اختراپور و خدایی (۲۰۱۳) رفتار بتن آسفالتی مورد استفاده به‌عنوان یک هسته غیرقابل نفوذ یک سد سنگ‌ریزه‌ای را بررسی کردند. آنها مجموعه گسترده‌ای از تست‌های سه محوری یکنواخت و چرخه‌ای را برای ارزیابی رفتار دینامیکی انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که برش دینامیکی کرنش‌ها برای همه آزمایش‌ها کمتر از 0.4% درصد هستند و هیچ ترکی روی سطوح نمونه رخ نداده است. لیو و همکاران^۱ (۲۰۱۵) مکانیسم شکست در سدهای سنگ‌ریزه‌ای را با تست میز لرزه‌ای در مقیاس بزرگ مورد بررسی قرارداد. نتایج آزمایش‌های میز لرزه‌ای با نتایج عددی مطابق بود. تابلان و همکاران^۲ (۲۰۱۷) رفتار سد دریدرسی را تحت بارهای مختلف زلزله تحلیل کرد. روش اجزای محدود و نرم‌افزار انسیس برای انعکاس واقعی‌تر رفتار سد استفاده شد. علاوه بر این، برخی از محققان اخیراً از اجزا محدود برای ارزیابی استاتیکی و رفتار دینامیکی یک سد سنگ‌ریزه بتنی آسفالتی استفاده کردند. وو و همکاران^۳ (۲۰۱۸) دریافتند که توزیع تنش و تغییر شکل هسته آسفالتی در طول دوره ساخت و بهره‌برداری مناسب بوده و عدم ایجاد شکست برشی در هسته آسفالتی یا خرابی هیدرولیک قابل تأیید توسط آنالیز عددی است. علاوه بر این، پس از اعمال بار لرزه‌ای، اثر نشست قابل توجهی در تاج سد وجود ندارد. فنگ و همکاران^۴ (۲۰۲۰) روش‌های طراحی و بهره‌برداری از سد سنگی آسفالتی اوکسی به ارتفاع ۱۷۴ متر را مورد بررسی قرار دادند. عملکرد سد نشان داد که سد سنگ‌ریزه‌ای با هسته بتن آسفالتی در دره‌های باریک با تکیه‌گاه‌های شیب‌دار ایمن است. همچنین هسته انعطاف‌پذیر بوده و در آن هیچ شکافی رخ نداده و فرسایش داخلی مشکلی ایجاد نکرد. دارماز و همکاران^۵ (۲۰۲۰) توسعه یک روش طراحی اولیه با در نظر گرفتن جابه‌جایی دائمی ناشی از زلزله و پاسخ لرزه‌ای سدهای سنگ‌ریزه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، مدل‌های عددی با خواص هندسی و مواد مختلف تهیه شد و تحلیل دینامیکی با نرم‌افزار بر اساس روش اجزای محدود انجام شده است. کیو و همکاران^۶ (۲۰۲۱) رفتار سد اوکسی در چین که بلندترین سد با هسته بتنی آسفالتی در جهان است را به‌صورت موردی مورد مطالعه قرار دادند. آنالیز اجزا محدود غیرخطی سه‌بعدی برای سد انجام شد و نتایج با نتایج محاسبه شده توسط تجزیه و تحلیل دوبعدی مقایسه شد. در نهایت، نتایج محاسبه شده با داده‌های پایش از ساخت سد مقایسه شد. نتایج نشان داد که نگرانی‌های ابراز شده در مورد ایمنی و رفتار هسته آسفالتی درست نیست و این نوع هسته ایمن است. در مطالعه خلیج و همکاران (۲۰۲۲)، سد میجران در ایران به‌عنوان مطالعه موردی برای سدهای سنگ‌ریزه دارای هسته بتنی آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق تأثیر سه زاویه هسته مختلف ۹۰ درجه، ۶۰ درجه و ۴۵ درجه را بر روی رفتارهای استاتیکی و دینامیکی سد بررسی می‌کند. هدف این مطالعه این بود که چگونه تغییرات در زوایای هسته بر عملکرد سد تحت شرایط بارگذاری مختلف تأثیر می‌گذارد.

¹ Liu et al² Taylan et al.³ Wu et al.⁴ Feng et al.⁵ Dharmaz et al.⁶ Qiu et al.

روش پژوهش

۱. مشخصات و موقعیت پروژه مورد بررسی

سد مخزنی صیدون که یک پروژه مهندسی مهم است، هم اکنون در حدود ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی باغملک و بر روی یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه علا در استان خوزستان در حال ساخت است. حوضه آبریز این سد که در یک منطقه کوهستانی قرار دارد، به مساحت چشمگیر ۴۹۶.۵ کیلومترمربع است. محل ساخت سد مخزنی صیدون در دره‌ای V شکل با بازوی ناقص نسبتاً متقارن، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، قرار دارد. خلاصه ویژگی‌های سد مخزنی صیدون در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. محل دره‌ای که سد صیدون در آن قرار دارد

سد صیدون از نوع سنگریزه‌ای با هسته آسفالتی در نظر گرفته شده است. هسته بتن آسفالتی به‌عنوان یک عنصر آب‌بندی در مرکز سد قرار دارد و ضخامت آن ۱ متر است و دو فیلتر در پایین و بالای هسته قرار دارد. مصالح فیلتر و زهکش از جنس SM بوده و در دو طرف هسته قرار می‌گیرند. مصالح بدنه سد بیشتر از نوع GP-GM بوده و دارای شیب ۱ تا ۲/۵ در بالادست و ۱ به ۲ در پایین‌دست است. نکته اینکه دره‌های V شکل به دلیل هندسه تنگ و دیواره‌های شیب‌دار، اثر قوس زدگی را در هسته آسفالتی سدها تشدید می‌کنند. این موضوع منجر به کاهش تنش عمودی مؤثر و افزایش خطر ترک‌خوردگی می‌شود؛ بنابراین، در طراحی سدهای با هسته آسفالتی در چنین دره‌هایی، باید تمهیدات ویژه‌ای برای کنترل تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در نظر گرفته شود.

جدول ۱. ویژگی‌های سد مخزنی صیدون

مقدار	خصوصیات سد
۶۵/۹ میلیون متر مکعب	حجم کل مخزن
۵۰/۵ میلیون متر مکعب	حجم مفید
۱۲۹۰ متر بالاتر از سطح دریا	سطح نرمال آب مخزن
۱۲۴۵ متر از سطح دریای آزاد	حداقل سطح بهره‌برداری
۱۵۶۶۸ هکتار	مساحت کل زمین شبکه صیدون
۶/۷۷ میلیون متر مکعب	حجم آب تنظیمی سد صیدون

۲. آنالیز پایداری شیب و نشست

آنالیز نشست یک بخش حیاتی در تضمین پایداری طولانی مدت سدهای سنگریزه‌ای است. این آنالیز، فشار آب منفذی را که به طور قابل توجهی بر پایداری کلی سد تأثیر می‌گذارد در نقاط مختلف سد تعیین می‌کند. فشار آب منفذی، از تجزیه و تحلیل المان محدود جریان آب زیرزمینی با استفاده از نرم افزار تخصصی Slide2 به دست می‌آید. Slide2 یک نرم افزار کاربردی است که برای ارزیابی پایداری شیب‌ها در خاک یا سنگ استفاده می‌شود. ضریب ایمنی یا احتمال شکست را برای سطوح شکست دایره‌ای یا غیر دایره‌ای محاسبه می‌کند. این برنامه از روش‌های تعادل حدی دوبعدی برای بررسی پایداری سطوح لغزش استفاده می‌کند که شامل برش‌های عمودی و غیر عمودی می‌شود. علاوه بر این، Slide2 امکان تجزیه و تحلیل نشست آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های المان محدود تحت شرایط حالت پایدار و گذرا را فراهم می‌کند.

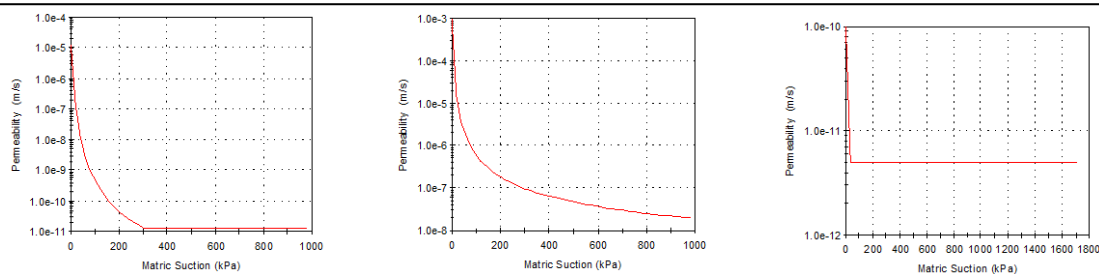
۳. داده‌های ورودی برای تجزیه و تحلیل سد

در این مقاله از پارامترهای خاکی استفاده شده است که با پارامترهای خاک مورد استفاده در سد سنگریزه‌ای صیدون مطابقت دارد. آزمایش دقیق آزمایشگاهی در منطقه مورد مطالعه، اطلاعات جامعی را در مورد مقادیر میانگین خواص مختلف خاک، از جمله وزن واحد، پارامترهای مقاومت برشی، نفوذپذیری و پارامترهای خاک غیراشباع ارائه کرده است. نتایج این آزمایش‌ها دقیق به تحلیل و ارزیابی پایداری شیب و ملاحظات ژئوتکنیکی مربوط به سد کمک فراوانی می‌کند. مدل خاک اشباع-غیراشباع برای تجزیه و تحلیل دقیق تر نشست و تجزیه و تحلیل پایداری شیب استفاده شده است. خواص مصالح بخش‌های مختلف سد در جدول (۲) آورده شده است. ضریب نفوذپذیری بر حسب مکش خاک برای مصالح مختلف در شکل (۲) آورده شده است. مقدار ورودی هوا (AEV) که توسط فردلوند^۱ (۲۰۰۰) تعریف شده است، آستانه مکش ماتریکی مورد نیاز را نشان می‌دهد. هنگامی که مکش ماتریک از مقدار ورودی هوا (AEV) فراتر می‌رود، خاک به دلیل وجود فشار آب منفذی منفی شروع به افزایش مقاومت می‌کند. پوش خطی با زاویه اصطکاک به نام Φb نشان می‌دهد که مقاومت برشی خاک را می‌توان با استفاده از یک رابطه خطی توصیف کرد تا زمانی که خاک اشباع شود (فردلوند، ۲۰۰۰). شکل (۳) تأثیر مقدار ورودی هوا بر استحکام خاک‌های غیراشباع نشان می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه مقاومت با تغییر مکش ماتریکی تغییر می‌کند.

جدول ۲. خواص مصالح بخش‌های مختلف سد

Material Name	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Phi b (deg)	Air Entry (kPa)	Ks (m/s)
Asphalt Core	23.5	Mohr-Coulomb	120	24	-	-	1e-10
Filter	20	Mohr-Coulomb	0	35	20	1.5	0.001
Shell	21.9	Mohr-Coulomb	0	44	22	5	1.25e-05

¹ Fredlund

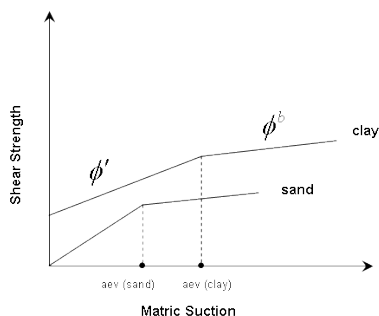


Shell

Filter

Asphalt Core

شکل ۲. ضریب نفوذپذیری بر حسب مکش خاک برای مصالح مختلف سد



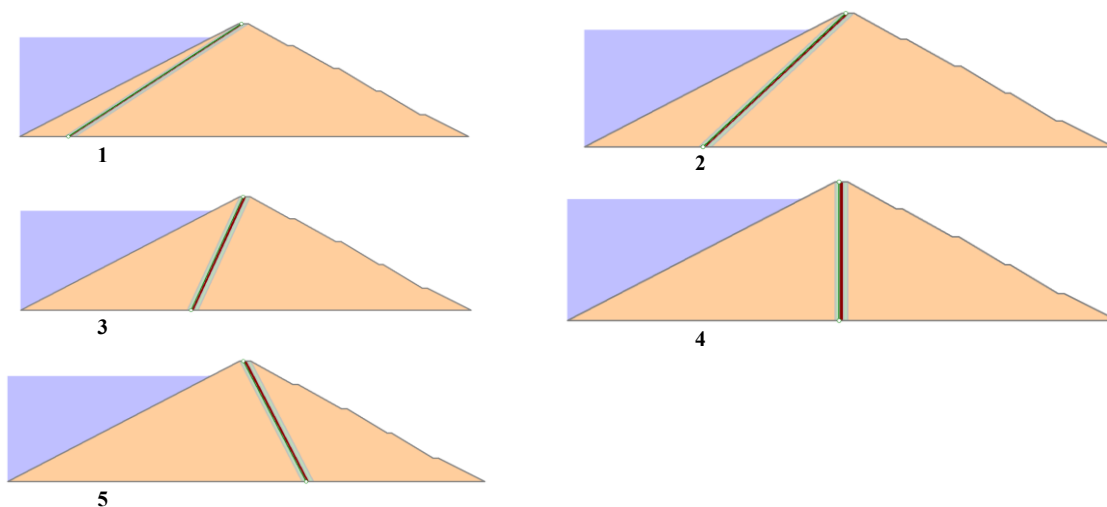
شکل ۳. اثر مقدار ورودی هوا (AEV) بر روی پوش مقاومت برشی اشباع نشده (فردلاند، ۲۰۰۰)

۴. محل قرارگیری هسته بتن آسفالتی

برای بررسی تأثیر محل هسته بتن آسفالتی بر نتایج تحلیل احتمالی پایداری شیب، پنج حالت برای قرارگیری هسته در نظر گرفته شده است که شکل و مشخصات آنها در شکل (۴) و جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. شیب هسته آسفالتی

Case	slope of core(H:V)
1	1.75:1
2	1:1
3	1:2.5
4	vertical
5	1:1.9



شکل ۴. تمام حالات قرارگیری محل هسته آسفالتی

۵. قابلیت اطمینان شیب

ارزیابی قابلیت اطمینان شیب شامل بررسی اثرات تجمعی عدم قطعیت ها و تمایز بین سناریوهایی است که با سطوح عدم قطعیت به طور قابل توجهی بالا یا پایین مشخص می شوند (وارد و پچت^۱، ۲۰۱۸). قابلیت اطمینان (R) به عنوان قابلیت عملکرد بدون تجربه شکست تعریف می شود که می تواند به عنوان احتمال موفقیت نیز تعبیر شود که با رابطه (۱) نشان داده می شود:

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (1)$$

برعکس، احتمال شکست (PF) به احتمال وقوع شکست قبل از یک زمان مشخص (t) اشاره دارد و می تواند به صورت ریاضی همان طور که در رابطه (۲) نشان داده شده است بیان شود:

$$P_f(t) = P(T \leq t) \quad (2)$$

شاخص قابلیت اطمینان (RI) که اغلب با β نشان داده می شود، نسبت میانگین حاشیه ایمنی (که میانگین ضریب ایمنی منهای یک است) به انحراف استاندارد حاشیه ایمنی است. این مفهوم برای اولین بار توسط کرنل^۲ در سال ۱۹۶۹ معرفی شد و به صورت ریاضی در معادله (۳) بیان می شود:

$$RI = \beta = \frac{\text{mean of FS} - 1}{\text{SD of FS}} \quad (3)$$

یک ضریب ایمنی قطعی، حاشیه ایمنی در یک سیستم را بر اساس مقادیر ورودی متوسط یا مورد انتظار نشان می دهد. با این حال، مقادیر ورودی واقعی به ندرت دقیقاً با میانگین مطابقت دارند و این معیار را برای پرداختن مؤثر به خطرات و عدم قطعیت ها ناکافی می کند؛ بنابراین، روش های احتمالی یا تصادفی برای محاسبه تغییرپذیری و عدم قطعیت ضروری هستند و بیش مهمی در مورد ریسک ارائه می دهند. شاخص قابلیت اطمینان نقش کلیدی در ارزیابی پایداری شیب به دنبال تحلیل احتمالی، اندازه گیری حاشیه ایمنی با ارزیابی فاصله بین میانگین ضریب ایمنی و آستانه بحرانی دارد. شاخص قابلیت اطمینان بالاتر نشان دهنده افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان است، در حالی که مقدار پایین تر نشان دهنده افزایش خطرات است. روابط بین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان در جدول (۴) خلاصه شده است.

شکل ۴. روابط بین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان (فون و کولهوی^۳، ۲۰۰۸)

Reliability Index	Probability of failure	Performance level
1	0.16	Hazardous
1.5	0.023	Unsatisfactory
2	0.0027	Poor
2.5	0.0006	Below average
3	0.0001	Above average
4	3×10^{-5}	Good
5	3×10^{-7}	High

شاخص قابلیت اطمینان هدف حداقل ۳ معمولاً برای اطمینان از طراحی شیب ایمن توصیه می شود که نشان دهنده یک حاشیه ایمنی قابل توجه بین ضریب ایمنی متوسط و ضریب ایمنی بحرانی است. این سطح جداسازی برای به حداقل رساندن خطر شکست شیب و تضمین سطح بالایی از قابلیت اطمینان در کاربردهای مهندسی و ژئوتکنیکی بسیار مهم است. تغییرپذیری خاک را می توان با استفاده از ضریب تغییرات (COV) که نسبت انحراف استاندارد به محتمل ترین مقدار پارامتر است، کمی سازی کرد. این اندازه گیری به عنوان یک شاخص تغییرپذیری پارامتر عمل می کند و همان طور که در رابطه (۴) نشان داده شده است، می تواند به صورت ریاضی بیان شود.

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

¹ Varde & Pecht

² Kernel

³ Phoon & Kulhawy

محققین بسیاری ضریب تغییرات را به عنوان شاخص تغییرپذیری در پارامترهای خاک برجسته کرده اند. ضریب تغییرات وزن واحد در انواع مختلف خاک طبق مطالعات متعددی از جمله مطالعات برینوسکی^۱ (۱۹۸۵) و دانکن^۲ (۲۰۰۰) از ۳٪ تا ۱۲٪ گزارش شده است. تحقیقات دیگر نشان می دهد که محدوده ضریب تغییرات گسترده تر از ۱٪ تا ۱۵٪، همان طور که توسط استاماتوپلوس و کوتزیاس^۳ (۱۹۷۵) ذکر شده است. علاوه بر این، لومب^۴ (۱۹۷۴) و لاکاس و ندیم^۵ (۱۹۹۶) ضریب تغییرات را بین ۵ تا ۱۳ درصد گزارش کردند. همان طور که سینگ^۶ (۱۹۷۱)، هوگ و مورارکا^۷ (۱۹۷۴) و لومب (۱۹۷۴) گزارش کردند، ضریب تغییرات (COV) زاویه اصطکاک برای انواع مختلف خاک از ۵٪ تا ۱۵٪ متغیر است. این بینش ها بر اهمیت در نظر گرفتن تنوع در پارامترهای خاک هنگام ارزیابی پایداری شیب و ویژگی های ژئوتکنیکی تأکید می کند. براین اساس، در این تحقیق مقدار ضریب تغییرات برای وزن واحد و زاویه اصطکاک مصالح سد برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است که در جدول ۵ به تفصیل شرح داده شده است. همچنین، توزیع نرمال با فاصله ۳ انحراف استاندارد در دو طرف میانگین برای همه متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. پارامترهای آماری مصالح سد

Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Asphalt concrete Core	Cohesion	normal	120	12	36	36
	Phi	normal	24	2.4	7.2	7.2
	Unit Weight	normal	23.5	2.35	7.05	7.05
Filter	Phi	normal	35	3.5	10.5	10.5
	Unit Weight	normal	20	2	6	6
Shell	Phi	normal	44	4.4	13.2	13.2
	Unit Weight	normal	21.9	2.2	6.6	6.6

یافته های پژوهشی

۱. نتایج آنالیز نشت

برای تحلیل نشت سد صیدون در شرایط جریان پایدار، از نرم افزار Slide2 استفاده شده است. نتایج حاصل از این تجزیه و تحلیل که در شکل (۵) و (۶) ارائه شده است، نشان می دهد که جابه جایی هسته سد از سمت پوسته بالادست به سمت پایین دست می تواند منجر به کاهش نرخ جریان سد گردد. این تغییر به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان، شیب های هیدرولیکی تغییر یافته، تجمع بالقوه آب و تغییرات ساختاری به وجود می آید. ثبات و هماهنگی این عوامل می توانند بی نظمی و اتلاف انرژی بیشتری به همراه داشته باشند و در نهایت جریان کلی در سد را کاهش دهند. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، بیشترین میزان جریان در حالت ۱ ثبت شده است که مقدار آن ۰/۰۶۵ مترمکعب در روز است و کمترین دبی در حالت (۵) مشاهده گردیده که مقدار آن برابر ۰/۰۱۶۱ مترمکعب در روز است. از طرفی نتایج نشان می دهد که نتایج دبی عبوری در حالت هسته قائم (حالت ۴) و شیب هسته به سمت پایین دست (حالت ۵) و حالت ۳، بسیار به هم نزدیک است. این یافته ها نشان می دهند که موقعیت هسته سد تأثیر قابل توجهی بر رفتار جریان درون سد دارد و اهمیت طراحی دقیق در این زمینه را مورد تأکید قرار می دهد؛ بنابراین، توجه به جنبه های مهندسی هیدرولیک در طراحی سدها و پروژه های زیرساختی از اهمیت بالایی برخوردار است.

¹ Brainosky

² Duncan

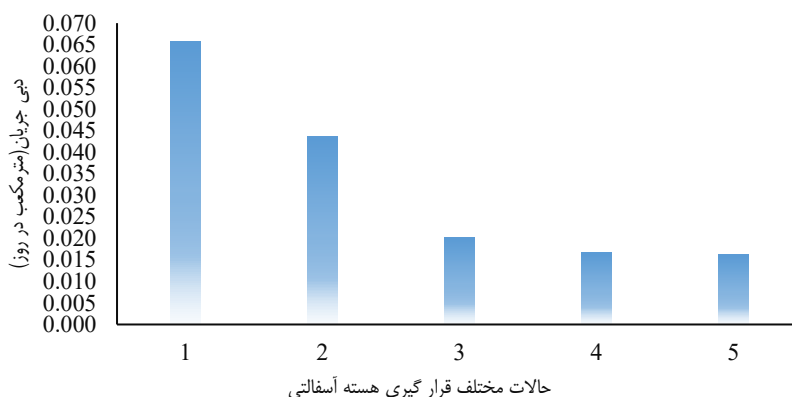
³ Stamatopoulous & Cottzias

⁴ Lumb

⁵ Lacasse & Nadim

⁶ Singh

⁷ Höeg & Murarka



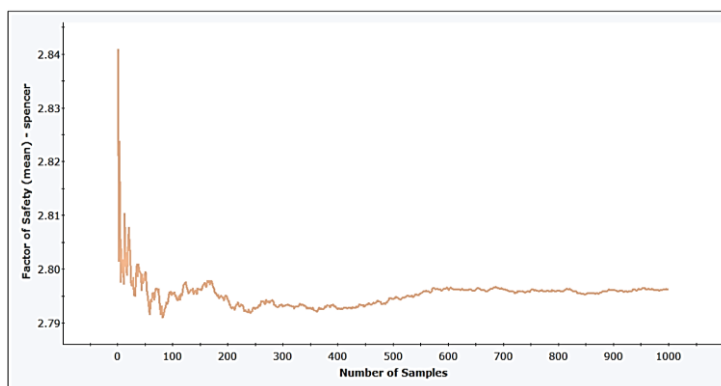
شکل ۵. نتایج آنالیز نشت از بدنه سد در حالت جریان پایدار

۲. نتایج تحلیل پایداری شیب

استفاده از نرم افزار Slide2 برای ارزیابی پایداری شیب پایین دست سد خاکی رویکردی جامع برای تحلیل پایداری شیب محسوب می شود. در نظر گرفتن هر دو حالت استاتیک و شبه استاتیک این امکان را فراهم می آورد که پایداری سد را در شرایط مختلف به طور کامل بررسی کنیم. ترکیب نتایج تجزیه و تحلیل نشت با مشخصات مصالح ارائه شده در جدول (۵)، مراحل ضروری برای انجام یک ارزیابی جامع از پایداری شیب پایین دست سد خاکی را تشکیل می دهد.

۳. آنالیز حداقل شیب احتمالاتی کلی

در تجزیه و تحلیل پایداری شیب احتمالاتی، هر سطح لغزش با استفاده از نمونه های تولید شده برای هر متغیر تصادفی تحت تکرارهای متعددی از محاسبات پایداری قرار می گیرد. هر تکرار نشان دهنده یک ترکیب متمایز از متغیرهای ورودی است که بر اساس تکنیک نمونه گیری به کار گرفته شده، ایجاد می شود. تجزیه و تحلیل پایداری برای حداقل سطح لغزش کلی هر مورد انجام می گیرد و سپس N بار، ضریب ایمنی محاسبه می شود که N بیانگر تعداد نمونه ها است. در ادامه، با شناسایی تعداد تحلیل هایی که ضریب ایمنی کمتری از ۱ دارند (که نشان دهنده ناپایداری است) و تقسیم این تعداد بر کل نمونه ها، احتمال شکست تعیین می شود. برای تولید نمونه هایی از متغیرهای ورودی بر اساس توزیع احتمال آن ها، از روش نمونه گیری هایپرکیوب لاتین^۱ استفاده شد و ۱۰۰۰ نمونه به کار گرفته شد. نتایج نشان می دهند که ۱۰۰۰ نمونه برای محاسبه ضریب همگرایی ایمنی کافی است (شکل (۶)).

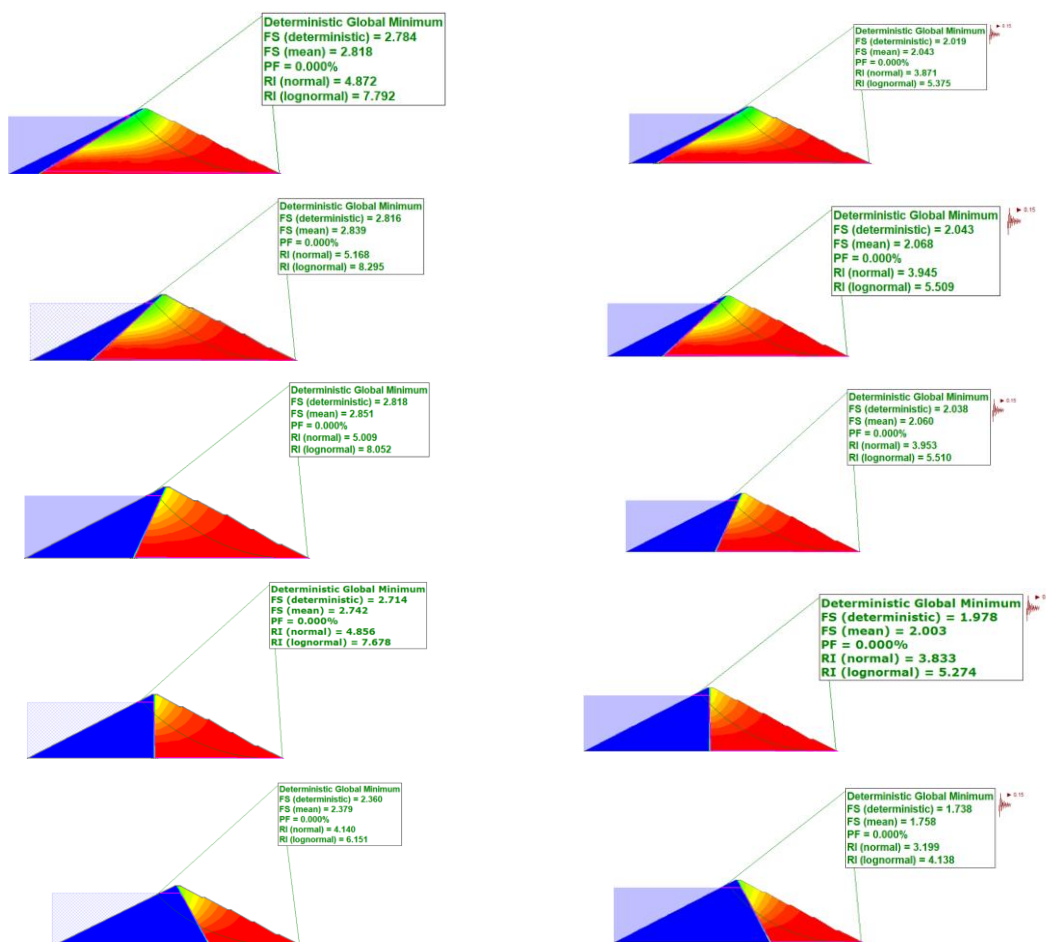


شکل ۶. همگرایی نتایج آنالیز احتمالاتی برای ۱۰۰۰ نمونه

^۱ Latin Hypercube

در بسیاری از کشورها، از نقشه‌های پهنه‌بندی و مقادیر تعیین شده برای تعیین ضریب زلزله در طراحی سدها استفاده می‌شود. با این حال، استانداردهای طراحی سدهای فعلی در ایران چنین معیارهایی را ارائه نمی‌دهند که این موضوع منجر به انتخاب ضریب زلزله در محاسبات پایداری شیب عمدتاً بر اساس قضاوت مهندسی و مقررات کشورهای دیگر می‌شود. استاندارد کشور ژاپن حداقل ضریب زلزله اعمال شده در پی سد را برای مناطق پر خطر ۰/۱۸ توصیه نموده است. سازمان مهندسان ارتش ایالات متحده^۱ (۱۹۸۷) استفاده از ضریب زلزله افقی ۰/۱۵ را برای مناطق پرخطر، بر اساس نقشه‌های منطقه‌بندی، پیشنهاد می‌دهد. در سال ۱۹۷۹ پروفیسور سید^۲ اعلام نمود، هرگاه سدی با ضریب زلزله ۰/۱۵ و ضریب اطمینان ۱/۱۵ طراحی شود مادامی که حداکثر شتاب تاج سد از ۰/۷۵ کمتر شود، سد برای زلزله‌ای به بزرگی ۸ ریشتر پایدار بوده به گونه‌ای که تغییر مکان‌های سد در حد قابل قبولی کوچک خواهد بود.

باتوجه به موارد فوق و نتایج مطالعات لرزه‌خیزی ساختگاه سد صیدون از ضریب زلزله افقی ۰/۱۵ برای حالت بارگذاری در آنالیزهای شبه‌استاتیکی استفاده شده و به دلیل اثر کم و همچنین نامشخص ضریب زلزله قائم از اعمال آن صرف‌نظر شده است. هر چند بهتر است که با تلفیق مطالعات لرزه‌خیزی و زمین‌شناختی محل ساختگاه مقدار شتابی را که با احتمال مشخص در طول عمر سازه ممکن است رخ دهد به طریق احتمالی محاسبه شده و در آنالیز لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد؛ اما از آنجا که هدف این مطالعه مقایسه حالات مختلف قرارگیری هسته آسفالتی است، همان ضریب ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل احتمالی برای تمامی موارد و در حالت‌های استاتیک و شبه‌استاتیک در شکل (۷) و جدول (۶) ارائه شده است.



شکل ۷. نتایج آنالیز احتمالاتی پایداری شیب در حالت استاتیک و شبه‌استاتیکی

¹ USBR

² Seed

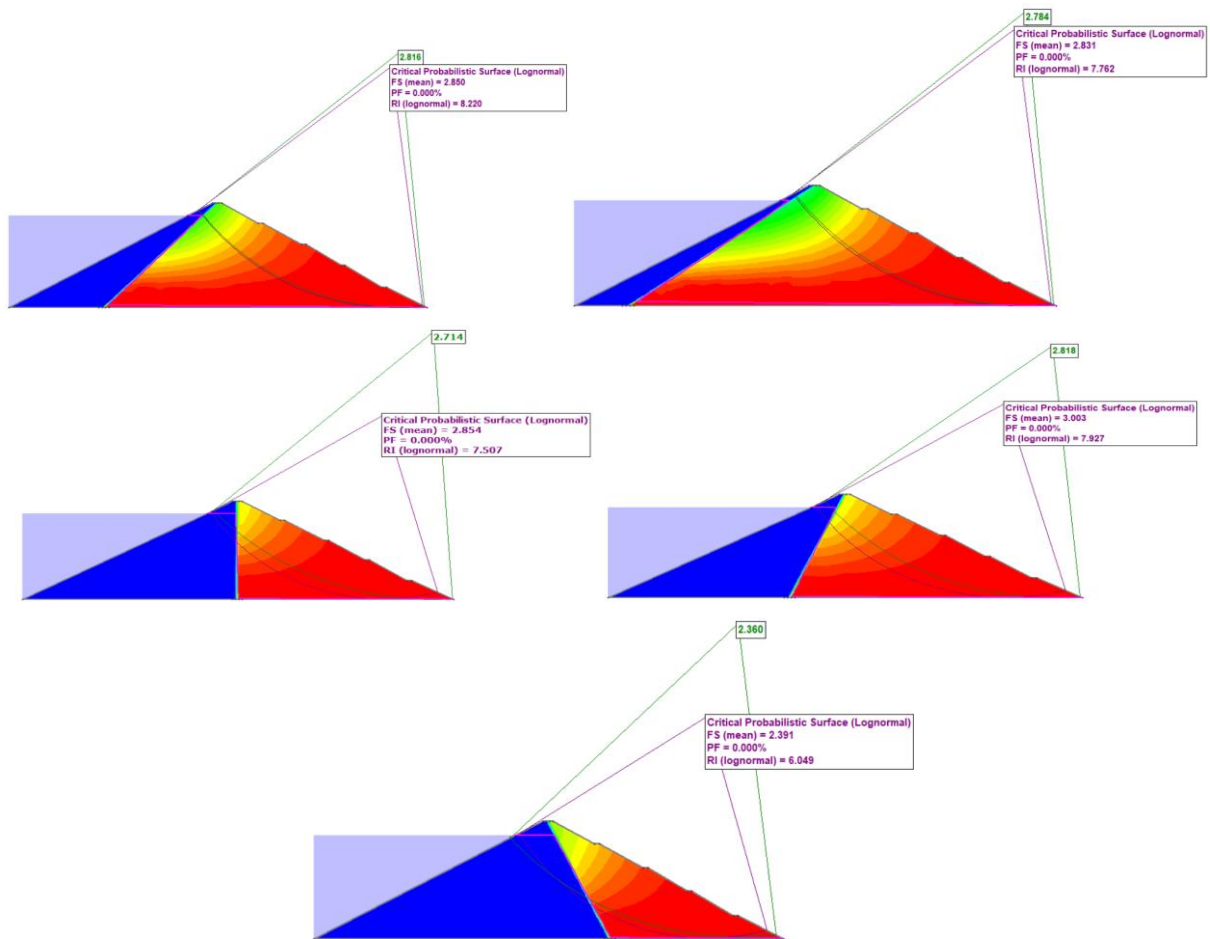
نتایج در شکل (۷) نشان می‌دهد که برای سه سناریو اول که در آن شیب هسته به سمت بالادست سد است، ضریب ایمنی ($F.S$) شیب پایین دست تقریباً در مقدار $2/82$ ثابت می‌ماند. در مقابل، برای سناریوهای چهارم و پنجم که در آن هسته در داخل قوس گسیختگی قرار می‌گیرد، کاهش ضریب ایمنی مشاهده می‌شود به طوری که در حالت ۵ به مقدار $2/36$ می‌رسد. این نشان می‌دهد که موقعیت هسته با حرکت به سمت پایین دست بر پایداری شیب تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین مقدار قابلیت اطمینان شیب در تمامی حالات مقادیری بیشتر از ۳ را نشان می‌دهد که نشان از اطمینان بالای شیب است. از آنجا که توزیع خاک بر ضریب ایمنی از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند، لذا مقدار قابلیت اطمینان بر اساس توزیع لوگ نرمال در نتایج آورده شده است.

نتایج در شکل (۷) نشان می‌دهد که در حالت شبه استاتیک، ضریب ایمنی در تمامی حالات، بیشتر از یک باقی می‌ماند که نشان‌دهنده پایداری سد است هر چند که روندی شبیه به حالت استاتیکی در آن مشاهده می‌شود. علاوه بر این، شاخص قابلیت اطمینان (RI) بیشتر از سه است که نشان‌دهنده سطح بالایی از اطمینان در توانایی سد برای مقاومت در برابر عدم قطعیت‌ها و خرابی‌های بالقوه است. این نتایج نشان می‌دهد که سد در شرایط شبه‌استاتیکی پایداری و قابلیت اطمینان بالایی از خود نشان می‌دهد.

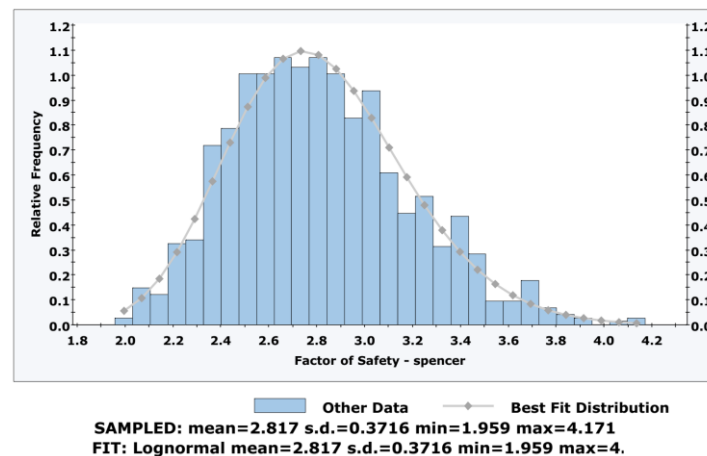
۴. آنالیز احتمالاتی حداقل اطمینان

روش احتمالاتی حداقل اطمینان شیب در Slide2 برای تجزیه و تحلیل پایداری شیب احتمالی شامل تکرار N بار جستجو برای حداقل سطح لغزش کلی است که N نشان‌دهنده تعداد نمونه‌های تولید شده برای متغیرهای تصادفی است. در هر تکرار، مجموعه جدیدی از نمونه‌های متغیر تصادفی اعمال می‌شود و جستجو برای سطح حداقل لغزش با حداقل قابلیت اطمینان انجام می‌شود. این فرایند تکراری، با در نظر گرفتن تغییرپذیری و عدم قطعیت مرتبط با پارامترهای ورودی، امکان کاوش کامل سطوح شکست احتمالی در شیب را فراهم می‌کند. روش احتمالاتی حداقل اطمینان چندین مزیت نسبت به روش احتمالاتی کلی در تحلیل پایداری شیب احتمالی دارد. یک مزیت مهم این است که در این روش شبیهی که بیشترین احتمال شکست را دارد بر اساس متغیرهای تصادفی تعریف شده تعیین می‌شود که لزوماً با شیب حالت قبل یکسان نیست. با انجام تکرارهای متعدد و بررسی سطوح مختلف شکست بالقوه، روش احتمالاتی حداقل اطمینان ارزیابی جامع‌تر و قوی‌تری از پایداری شیب را با در نظر گرفتن طیف کاملی از عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ورودی ارائه می‌کند. در این تحلیل، شبیهی که دارای کمترین قابلیت اطمینان است به عنوان شیب بحرانی انتخاب می‌شود که لزوماً شیب با حداقل ضریب ایمنی نیست. این نشان می‌دهد که صرف انجام آنالیز پایداری شیب بالادست و پیدا کردن ضریب ایمنی آن نه تنها کافی نیست؛ بلکه حتی آنالیز احتمالاتی کلی نیز نمی‌تواند شبیهی که بیشترین احتمال شکست (کمترین قابلیت اطمینان) را دارد، نشان دهد و حتماً باید آنالیز احتمالاتی حداقل اطمینان انجام شود. از آنجایی که بهترین توزیع حاکم بر $F.S$ لوگ نرمال است (شکل ۹)، از نتایج RI این توزیع در تحلیل استفاده شده است. نتایج روش احتمالاتی حداقل اطمینان در شکل (۸) ارائه شده است.

نتایج روش احتمالاتی حداقل اطمینان شیب نشان می‌دهد که سطح لغزشی با کمترین شاخص قابلیت اطمینان (RI) ضریب ایمنی بالاتری ($F.S$) را در مقایسه با آنالیز حداقل شیب کلی نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج در شکل (۸) نشان می‌دهد که سطح لغزشی شناسایی شده با استفاده از این روش، عمیق‌تر از سطح تعیین شده توسط روش حداقل شیب کلی است. نکته مهم این است که نتایج این آنالیز نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان این سطح لغزش همچنان از مقدار عدد ۳ بیشتر است و پایداری آن را تأیید می‌کند.



شکل ۸. نتایج آنالیز احتمالاتی حداقل اطمینان



شکل ۹. توزیع حاکم بر ضریب ایمنی در آنالیز احتمالاتی

۵. آنالیز تغییرات مکانی

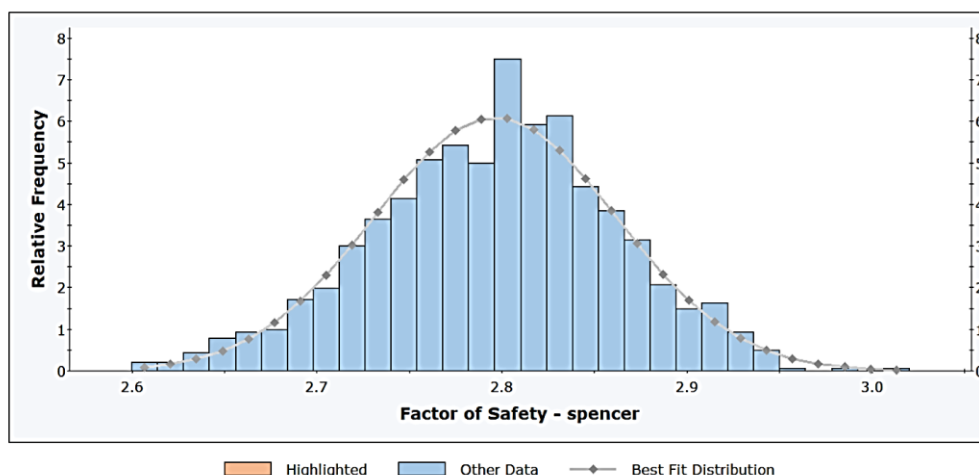
تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی نقش اساسی در لحاظ کردن تنوع ذاتی خواص خاک در یک توده خاک ایفا می‌کند که اغلب در تحلیل‌های پایداری شیب احتمالاتی سنتی نادیده گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن تغییرات مکانی خواص خاک مانند استحکام و وزن واحد در مکان‌های مختلف درون توده خاک، مهندسان می‌توانند نمایش واقعی‌تری از شرایط زمین واقعی به دست آورند. در تجزیه و تحلیل تنوع مکانی، توزیع‌های آماری و پارامترهای طول همبستگی برای تولید میدان‌های تصادفی مقادیر برای هر ویژگی

خاک نمونه برداری شده استفاده می شود. این فرایند توزیع فضایی مقادیر را در سرتاسر مصالح ایجاد می کند که منعکس کننده تنوع طبیعی موجود در خاک است. در خاک، طول همبستگی در جهت X معمولاً بسیار بیشتر است - اغلب حدود ۵ تا ۱۰ برابر - نسبت به جهت Y . در این تحقیق طول همبستگی برابر با ۵ متر در جهت Y و ۲۵ متر در جهت X در نظر گرفته شده است.

نتایج تجزیه و تحلیل در شکل (۱۱) و جدول (۶) آورده شده است. همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، توزیع حاکم بر ضریب ایمنی ($F.S$) برای همه موارد نرمال است، برخلاف شرایط قبلی که از توزیع لگ نرمال پیروی می کرد. علاوه بر این، نتایج در جدول (۶) نشان می دهد که هنگام در نظر گرفتن تغییرات فضایی، مقدار $F.S$ کاهش یافته است. باین حال، این کاهش با افزایش قابل توجهی در شاخص قابلیت اطمینان (RI) همراه است که نشان می دهد اگرچه ضریب ایمنی کمتر است، قابلیت اطمینان و استحکام کلی سازه هنگام محاسبه تنوع فضایی بهبود یافته است.

جدول ۶. نتایج انواع آنالیز شیب برای شرایط مختلف قرارگیری هسته آسفالتی در بدنه سد

نوع آنالیز	آنالیز حداقل احتمال (استاتیکی)		آنالیز حداقل احتمال (شبه استاتیکی)		آنالیز حداقل اطمینان		آنالیز تغییرات مکانی	
	$F.S$	RI	$F.S$	RI	$F.S$	RI	$F.S$	RI ($l_x=25; l_y=5$)
<i>Cases</i>								
1	2.84	7.79	2.02	5.37	2.84	7.76	2.60	25.24
2	2.82	8.29	2.04	5.51	2.85	8.22	2.60	23.72
3	2.82	8.05	2.04	5.51	3	7.93	2.62	24.03
4	2.71	7.67	1.98	5.27	2.85	7.51	2.54	24.65
5	2.36	6.15	1.74	4.14	2.39	6.05	2.20	19.40



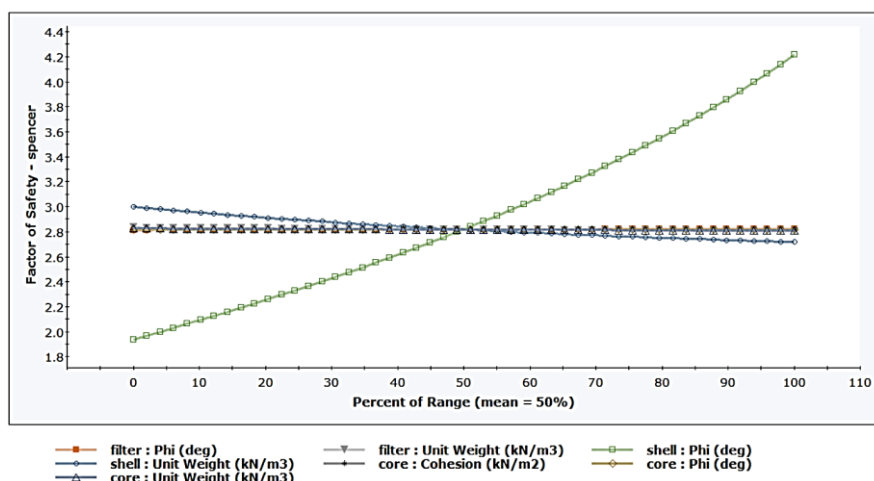
SAMPLED: mean=2.796 s.d.=0.06548 min=2.6 max=3.02 (PF=0.000% RI=27.43322, best fit=Normal distribution)
FIT: Normal mean=2.796 s.d.=0.06548 min=2.6 max=3.02

شکل ۱۱. توزیع حاکم بر ضریب ایمنی در آنالیز تغییرات مکانی

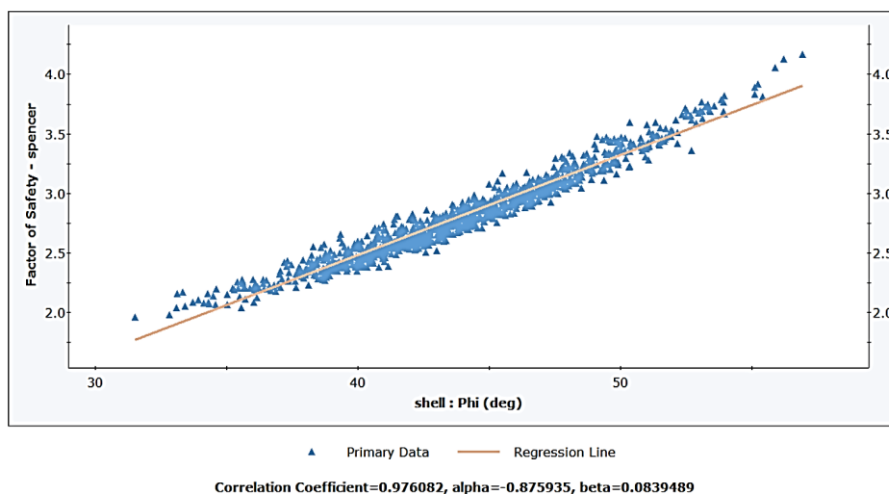
۶. تحلیل حساسیت

انجام یک تحلیل حساسیت بر اساس توزیع آماری پارامترهای مصالح سد، درک جامعی از چگونگی تأثیر تغییرات در عوامل مختلف بر نتایج فاکتور ایمنی را فراهم می کند. یافته های حاصل از تجزیه و تحلیل حساسیت در شکل های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. در شکل (۱۲)، مشهود است که زاویه اصطکاک مواد پوسته بیشترین تأثیر را بر ضریب ایمنی شیب سد دارد. این قابل درک

است، زیرا سطح لغزش در درجه اول مصالح پوسته را قطع می‌کند و بر نقش مهم پارامترهای پوسته در تجزیه و تحلیل پایداری شیب تأکید می‌کند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با جابه‌جایی هسته آسفالتی از بالادست به سمت پایین‌دست پوسته، تأثیر پارامترهای مصالح بر ضریب ایمنی ($F.S.$) تغییری نمی‌کند. شکل (۱۳) رابطه بین پارامترهای پوسته و ضریب ایمنی شیب را بیشتر بررسی می‌کند و یک همبستگی خطی بین زاویه اصطکاک مواد پوسته و ضریب ایمنی را نشان می‌دهد. در مقابل، هیچ ارتباط معنی‌داری بین ضریب ایمنی با سایر پارامترهای مقاومتی مشاهده نمی‌شود که نقش غالب زاویه اصطکاک مصالح پوسته را در تأثیرگذاری بر پایداری شیب کلی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. تأثیر تغییرات پارامترهای مصالح سد بر ضریب ایمنی سد



شکل ۱۳. رابطه همبستگی بین زاویه اصطکاک مصالح پوسته و ضریب ایمنی سد

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که موقعیت هسته آسفالتی در سدهای سنگریزه‌ای تأثیر قابل‌توجهی بر پایداری شیب پایین‌دست و میزان نشت آب دارد. جابه‌جایی هسته به سمت پایین‌دست باعث کاهش ضریب ایمنی و افزایش خطر ناپایداری می‌شود، درحالی‌که قرارگیری آن در بالادست، پایداری بیشتری را تضمین می‌کند. همچنین، زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد به‌عنوان مؤثرترین پارامتر در پایداری شیب شناسایی شد. این یافته‌ها با مطالعات پیشین مانند تحقیقات هوگ^۱ (۱۹۹۳) و فنگ و

^۱ Hoeg

همکاران^۱ (۲۰۲۰) که بر اهمیت طراحی هسته و خواص مصالح تأکید داشتند، همسو است. اما این پژوهش با بررسی تحلیل احتمالاتی و تغییرات مکانی، گامی فراتر نهاده و بینش دقیق تری برای طراحی ایمن تر سدها ارائه می دهد. باید توجه داشته باشیم که معمولاً در طراحی سدهای خاکی با هسته آسفالتی، برخی حالت ها به دلیل مسائل فنی، ساخت و ساز، پایداری سد و قابلیت اجرای عملی، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، در حالی که برخی حالت ها کمتر کاربردی یا حتی غیرعملی هستند. به طور خاص، حالت هایی که هسته آسفالتی در مرکز سد یا به طور قائم قرار دارد (مثل حالت ۴) معمول تر و پایدارتر هستند و به خوبی از نشتی آب جلوگیری می کنند. حالت هایی که هسته آسفالتی با شیب تندی قرار گرفته یا به صورت نامتقارن هستند (مثل حالت ۱ یا ۲ و ۵) ممکن است مشکلات اجرایی، ضعف در پایداری یا کنترل نشتی را به همراه داشته باشند و کمتر ترجیح داده می شود. در نتیجه، طراحی نهایی بستگی به شرایط هیدرولیکی، ژئوتکنیکی، اقتصادی و اجرایی دارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر موقعیت هسته آسفالتی در داخل یک سد سنگ ریزه ای بر نتایج تحلیل احتمالاتی مربوط به پایداری شیب پایین دست در شرایط حالت جریان پایدار مورد بررسی قرار گرفت. سد خاکی صیدون در ایران به عنوان مطالعه موردی مورد استفاده قرار گرفت و پنج موقعیت مختلف هسته سد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته های کلیدی تحقیق به شرح زیر خلاصه می شود:

۱. نتایج آنالیز نشت: تجزیه و تحلیل نشت نشان می دهد که حرکت هسته آسفالتی از سمت بالادست به سمت پایین دست سد سنگ ریزه ای منجر به کاهش دبی جریان از بدنه سد می شود. با این حال این کاهش در حالات ۱ و ۲ به ۳ بیشتر مشهود است.
۲. آنالیز حداقل شیب احتمالاتی کلی: این تحلیل نشان می دهد که فاکتور ایمنی ($F.S$) برای شیب پایین دست زمانی که هسته آسفالتی در بالادست سد قرار می گیرد نسبتاً ثابت می ماند. با این حال، پایین ترین مقدار $F.S$ زمانی رخ می دهد که هسته آسفالتی به سمت پایین دست منتقل شود. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل احتمالاتی نشان می دهد که سد یک شاخص قابلیت اطمینان (RI) بیشتر از ۳ را در تمام شرایط، از جمله تجزیه و تحلیل استاتیک و شبه استاتیک حفظ می کند.
۳. تحلیل احتمالاتی حداقل اطمینان: در تحلیل احتمالاتی حداقل اطمینان، سطح لغزشی که بیشترین احتمال خرابی یا کمترین قابلیت اطمینان را دارد، شناسایی می شود. این سطح لغزش لزوماً با سطح لغزش مشخص شده در روش حداقل شیب کلی که بر اساس پارامترهای مقاومتی مصالح سد محاسبه می شود، یکسان نخواهد بود. مقایسه نتایج این دو روش نشان داد که مقدار ضریب ایمنی روش تحلیل احتمالاتی حداقل اطمینان بیشتر از روش حداقل شیب کلی است در حالی که عمق سطح لغزش بحرانی افزایش یافته است. همچنین قابلیت اطمینان این روش مقدار کمتری را برای سطح لغزش نشان می دهد.
۴. در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی: هنگام محاسبه تغییرپذیری مکانی خواص خاک، ضریب ایمنی برای شیب پایین دست کاهش می یابد در حالی که شاخص قابلیت اطمینان افزایش می یابد که نشان دهنده درک جامع تری از پویایی پایداری است.
۵. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت: تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می دهد که زاویه اصطکاک مصالح پوسته بیشترین تأثیر را بر ضریب ایمنی شیب در تمام حالات دارد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل حساسیت، یک رابطه خطی بین زاویه اصطکاک مصالح پوسته و ضریب ایمنی شیب را شناسایی می کند و نقش حیاتی پارامترهای پوسته را در ارزیابی پایداری سد تقویت می کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

از سازمان آب و برق استان خوزستان به‌خاطر همکاری صمیمانه آنها و تهیه گزارش‌های سد صیدون بسیار سپاسگزاریم.

References

- Akhtarpour, A., & Khodaii, A. (2014). A study of the seismic response of asphaltic concrete used as a core in rockfill dams. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 16, 169–184. https://www.jsee.ir/article_240693.html
- Akhtarpour, A., & Khodaii, A. (2013). Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams. *Construction and Building Materials*, 41, 319–334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.104>
- Baziar, M. H., Salemi, S., & Heydari, T. (2006). Analysis of earthquake response of an asphalt concrete core embankment dam. *International Journal of Civil Engineering*, 4(3), 192–211. <http://ijce.iust.ac.ir/article-1-342-en.html>
- Biernatowski, K. (1985). Statistical characteristic of subsoil. *The 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, California, USA. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9287230>
- Carter, J. P., & Kulhawy, F. H. (1992). Analysis of laterally loaded shafts in rock. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(6), 839–855. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:6\(839\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:6(839))
- Cornell, C. A., & Vanmarcke, E. H. (1969). The major influences on seismic risk. *The 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile. <https://www.sciepub.com/reference/124848>
- Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:4\(307\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(307))
- Durmaz, S., & Ülgen, D. (2021). Prediction of earthquake-induced permanent deformations for concrete-faced rockfill dams. *Natural Hazards*, 105, 587–610. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04328-7>
- Feizi-Khankandi, S., Ghalandarzadeh, A., Mirghasemi, A. A., & Hoeg, K. (2009). Seismic analysis of the Garmrood embankment dam with asphaltic concrete core. *Soils and Foundations*, 49(2), 153–166. <https://doi.org/10.3208/sandf.49.153>
- Feizi-Khankandi, S., Mirghasemi, A. A., Ghalandarzadeh, A., & Hoeg, K. (2008). Cyclic triaxial tests on asphalt concrete as a water barrier for embankment dams. *Soils and Foundations*, 48(3), 319–332. <https://doi.org/10.3208/sandf.48.319>
- Feng, S., Wang, W., Hu, W., Deng, Y., Yang, J., Wu, S., Zhang, C., & Höeg, K. (2020). Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam. *Soils and Foundations*, 60(5), 1036–1049. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.006>
- Fredlund, M. D. (2000). The role of unsaturated soil property functions in the practice of unsaturated soil mechanics. Doctoral dissertation, *University of Saskatchewan*, Saskatoon, Saskatchewan, Canada. <https://core.ac.uk/download/pdf/226137518.pdf>
- Gatmiri, B., & Mokarram, N. (2003). Dynamic analysis of embankment dam with concrete asphalt core. *The 4th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran. https://www.researchgate.net/publication/278241578_Dynamic_analysis_of_embankment_dam_with_Concrete-Asphalt_Core
- Gurdil, A. (1999). Seismic behaviour of an asphaltic concrete core dam. *1st Symposium on Dam Foundation*, Antalya, Turkey. <https://core.ac.uk/download/229085448.pdf>
- Höeg, K. (1993). Asphaltic concrete cores for embankment dams. *Norwegian Geotechnical Institute Publications*, Oslo, Norway. <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:4193e0b8-f433-4f87-bf16-94d9ff17e793>

- Höeg, K., & Murarka, R. P. (1974). Probabilistic analysis and design of a retaining wall. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(3), 349–366. <http://worldcat.org/oclc/3519342>
- Kotzias, P. C., & Stamatopoulos, A. C. (1975). Statistical quality control at Kastraki earth dam. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(9), 837–853. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/AJGEB6.0000192>
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1996, May). Model uncertainty in pile axial capacity calculations. *Offshore Technology Conference*, Houston, TX, United States. <https://doi.org/10.4043/7996-MS>
- Liu, J., Liu, F., Kong, X., & Yu, L. (2016). Large-scale shaking table model tests on seismically induced failure of concrete-faced rockfill dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.11.014>
- Lumb, L. I., Aldridge, K. D., & Henderson, G. A. (1993). A generalized ‘core resonance’ phenomenon: Inferences from a Poincaré core model. *Dynamics of Earth's Deep Interior and Earth Rotation*, 72, 51–68. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1029/GM072#page=60>
- Mahabadi, S. G., & Roosta, R. M. (2002). Seismic analysis and design of asphaltic concrete core embankment dams. *International Journal on Hydropower and Dams*, 9 (4), 75–78. <https://researchoutput.csu.edu.au/en/publications/seismic-analysis-and-design-of-asphaltic-concrete-core-embankment>
- Meintjes, H., & Jones, G. (1999). Dynamic analyses of the new Ceres dam. *In Geotechnics for Developing Africa*, CRC Press, Durban, South Africa. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003211174-67/dynamic-analyses-new-ceres-dam-meintjes-jones>
- Middleton, B. J. (1982). 14th International Congress of ICOLD. *Civil Engineering Siviele Ingenieurswese*, 1982 (10), 548. https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10212019_14676
- Nejad, B. G., Soden, P., Taiebat, H., & Murphy, S. (2010). Seismic deformation analysis of a rockfill dam with a bituminous concrete core. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 10 (1), 012106. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/10/1/012106>
- Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (2008). Serviceability limit state reliability-based design. *In Reliability-based design in geotechnical engineering*, CRC Press, Durban, South Africa. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781482265811-14/serviceability-limit-state-reliability-based-design-kok-kwang-phoon-fred-kulhawy>
- Qiu, T., Wang, W., Höeg, K., Feng, S., & Zhao, R. (2021). 3D analysis of the 174-m high Quxue asphalt-core rockfill dam in a narrow canyon. *Soils and Foundations*, 61 (6), 1645–1659. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.08.008>
- Taylan, D., & Aydın, T. (2018). Analysis of dynamic behavior of Darideresi-II Dam by ANSYS. *Natural Hazards*, 90, 1223–1235. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3091-0>
- Valstad, T., Selnes, P., Nadim, F., & Aspen, B. (1991). Seismic response of a rockfill dam with an asphaltic concrete core. *International Water Power and Dam Construction*, 43 (8), 22–27. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=4818350>
- Varde, P.V., & Pecht, M.G. (2018). *Risk-based engineering: an integrated approach to complex systems—special reference to nuclear plants*. Springer Publications, Singapore. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0090-5_1
- Wu, Y., Jiang, X., Fu, H., Xu, K., & Wu, Z. (2018). Three-dimensional static and dynamic analyses of an asphalt-concrete core dam. *GeoShanghai International Conference*, Shanghai, China. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0125-4_65