

The Influence of the Position of the Clay Core in the Earth Dam on the Probabilistic Stability Analysis in the Rapid Drawdown Condition

Seyed Ali Asghari Pari^{1*}, Seyed Amin Asghari Pari²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

* asgharipari@bkatu.ac.ir

Received: 25 July 2024

Accepted: 22 January 2025

Discussion: 22 December 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The present study examines the influence of the position of clay core on the stability of the upstream slope in the conditions of rapid discharge of the reservoir. The position of the clay core in earth dams is always one of the most challenging issues in the design of earth dams. Using inclined cores instead of vertical cores has always been one of the key options in the minds of designers and implementation engineers. Investigating the possible effects of the clay core position in the earth dams can make decision making easier and more accurate. The findings of this study contribute to the existing body of knowledge in the field of geotechnical engineering and provide valuable insight for engineers and policy makers who involved in the design, construction and maintenance of the earthen dams. The aim of the present study is to increase the safety and reliability of these essential infrastructure assets by addressing these critical aspects of dam sustainability.

Methodology: The Seydon Reservoir Dam, a significant engineering project, is currently under construction approximately 40 km southeast of Baghmolek, situated on one of the main branches of the Ala River in Khuzestan province. Seydon's earth dam is an earth type with a clay core, with two filters located at the bottom and top of the core. The type of clay core material in terms of classification of soils is CL type, whose width reaches 45 meters at the bottom of the dam and 7 meters at the top of the dam. The filter and drain material are of SM type, which is placed on both sides of the core. The materials of the dam body are mostly of GP-GM type and have a slope of 1 to 2.5 in the upstream and 1 to 2 in the downstream.

A deterministic safety factor measures the margin of safety in a system when input variables are at their average or expected values, providing a baseline safety measure disregarding variability. However, real-world inputs seldom align exactly with mean values, making this measure insufficient in capturing risks and uncertainties. Hence, probabilistic or stochastic approaches are necessary to consider variability and uncertainty, offering valuable risk insight. The reliability index, crucial in slope stability assessment post probabilistic analysis, quantifies the safety margin by gauging the separation between the mean safety factor and the critical value.

The Latin Hypercube sampling technique was employed to generate samples of input variables from their probability distribution, utilizing 1000 samples. This technique offers the advantage of yielding results comparable to Monte Carlo simulation but with fewer samples, making it an efficient choice for reliable analysis and risk assessment.

Results and Discussion: In probabilistic slope stability analysis, each overall sliding surface is subjected to multiple iterations of stability calculations using samples generated for each random variable. Each iteration represents a distinct combination of input variables based on the sampling technique employed. A stability analysis is performed for the overall minimum slip surface of each case, resulting in the calculated factor of safety (N), where N represents the number of samples. The Latin hypercube sampling method was used to generate samples of the input variables from their probability distribution, with 1000 samples. The results show that 1000 samples are enough to calculate the safety convergence coefficient.

The probabilistic minimum confidence slope method in Slide2 for probabilistic slope stability analysis involves repeating the search for the minimum overall slip surface N times, where N represents the number of samples generated for the random variables.. In each iteration, a new set of random variable samples is applied and the search for the minimum slip surface with the lowest reliability is performed. This iterative process, taking into account the variability and uncertainty associated with the input parameters, allows for a complete exploration of possible failure surfaces in the slope mass.

Conclusion: The research results are as follows.

- 1- Moving the clay core from the upstream side to the downstream side of the dam increases the safety factor and reliability of the upstream side.
- 2- The results of the analysis of global probabilities show that in cases 1 and 2 of placing the clay core (on the upstream side of the dam), the reliability index of the slope is lower than the value of 2. While in other situations, this index is always more than 3.
- 3- The results of the analysis of global probabilities show that, contrary to the idea, in some cases of core placement (cases 4 and 5), the lowest safety factor occurs in a time less than the time of drawdown.
- 4- The results of the minimum Reliability slope analysis show that the critical slope in this case is not the same as the global probabilistic analysis. The safety factor value is higher and the RI value is lower. Only in the case of core number 3 and 4, the reliability index was greater than 2.5 at all times.
- 5- The results of the sensitivity analysis show that the friction angle of the shell material will have the greatest effect on the safety factor of the dam slope in all situations of transient analysis times.
- 6- The results show that in cases 1 and 2 of core placement, the unit weight of the shell material has the highest linear correlation with the upstream safety factor. Meanwhile, for the rest of the core position, the most linear correlation is between the shell friction angle and the upstream safety factor.

Keyword: Probabilistic analysis, rapid drawdown, sensitivity analysis, clay core.


تأثیر موقعیت هسته رسی در سد خاکی بر تحلیل احتمالاتی پایداری در شرایط افت سریع مخزن

سید علی اصغری پری^{۱*}، سید امین اصغری پری^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

* asgharipari@bkatu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱  وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در مهندسی عمران کاربردی، آنالیز پایداری شیب و تحلیل تراوش اغلب با استفاده از یک رویکرد قطعی انجام می‌شود، که در آن خواص مقاومتی خاک ثابت فرض می‌شود. با این حال، این فرض ساده‌گرایانه نمی‌تواند عدم قطعیت‌های ذاتی مرتبط با مصالح و مدل‌های مورد استفاده برای تحلیل آن را توضیح دهد. گنجاندن ماهیت تصادفی ویژگی‌های خاک، به جای تکیه صرف بر مقادیر قطعی، می‌تواند نمایش دقیق‌تری از رفتار سیستم ارائه دهد و منجر به تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر شود. همچنین، پایداری سدهای خاکی یک نگرانی حیاتی است، زیرا شکست چنین سازه‌هایی می‌تواند عواقب فاجعه‌باری داشته باشد. هدف این مطالعه ارائه یک درک جامع از عواملی است که بر پایداری و عملکرد کلی سدهای خاکی با تمرکز بر نقش مکان هسته رسی تأثیر می‌گذارد. برای این تحقیق سد صیدون در ایران توسط نرم افزار Slide2 در شرایط تخلیه سریع مخزن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که جابجایی هسته رسی از سمت بالادست به سمت پایین دست سد باعث افزایش ضریب ایمنی از ۱.۰۳ به ۱.۵۸ و قابلیت اطمینان از ۰.۲۳ به ۰.۴۳ در بالادست می‌شود. همچنین تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک پوسته سد دارای بیشترین همبستگی خطی با ضریب ایمنی شیب است.

کلیدواژگان: تحلیل احتمالاتی، تخلیه سریع مخزن، تحلیل حساسیت، هسته رسی.

۱- مقدمه

توانند به طور قابل توجهی بر عملکرد سد تأثیر بگذارد (Asadi Sakhumrasi et al. 2014). برای پرداختن به این موضوع، پژوهش انجام شده توسط Nayebzadeh & Mohammadi (2011) بر روی سد سنگی قاوشان در منطقه غرب ایران، نقش شکل هسته سد را در کاهش اثرات نشست بررسی کرد. یافته‌های آنان نشان می‌دهد که شکل هسته مایل در شرایطی که نشست بدنه سد یک نگرانی مهم است، ترجیح داده می‌شود. در پژوهش ما و چی به ساخت موفقیت‌آمیز چندین سد سنگریزه ای مرتفع در چین پرداختند و سد با هسته رسی شیبدار Xiaolangdi را برجسته کردند (Ma and Chi, 2016). آنان به طور دقیق ساخت موفقیت‌آمیز این سدهای سنگریزه‌ای

سدها سازه‌های ضروری هستند که نقش محوری در مدیریت آب دارند. این سازه‌های بزرگ، اغلب با اندازه‌های قابل توجه، با هزینه‌های قابل توجهی همراه هستند و در هنگام تعمیر هر گونه آسیب، چالش‌های بزرگی را به همراه دارند. یکی از بحرانی‌ترین حالت‌های شکست سدها مسئله نشست است که می‌تواند منجر به تخریب کل سازه شود (USBR 1990). سدهای خاکی به ویژه از منطقه‌های مختلفی تشکیل شده‌اند که هر یک بر عملکرد کلی، پایداری و سایر اجزای حیاتی بدنه سد تأثیر می‌گذارد. هسته یک سد خاکی موضوع مورد توجه محققان بوده است، زیرا یکی از مهم‌ترین منطقه‌هایی است که می‌

پژوهش آنان نشان داد که افزایش زاویه انحراف شیت پایل می‌تواند نشست را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. مطالعات دیگری توسط Memarian et al. (2023) و Kiyani et al. (2024) در مورد تاثیر ژئوتکستایل‌ها بر پایداری شیب و تاثیر آن بر ضریب ایمنی سد های خاکی انجام شد. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر مکان هسته رسی بر پایداری احتمالاتی شیب بالادست در شرایط تخلیه سریع مخزن، می‌پردازد. مکان هسته رسی در سدهای خاکی همواره یکی از چالش برانگیزترین مسائلی در طراحی سدهای خاکی می‌باشد. استفاده از هسته های مایل به جای هسته قائم همواره یکی از گزینه های کلیدی در ذهن مهندسان طراح و اجرا بوده است. بررسی احتمالاتی اثرات مکان قرار گیری هسته رسی در سد های خاکی می‌تواند تصمیم گیری در این زمینه را آسان تر و دقیق تر کند. یافته های این پژوهش به مجموعه دانش موجود در زمینه مهندسی ژئوتکنیک کمک می‌کند و بینش ارزشمندی را برای مهندسان و سیاست‌گذاران درگیر در طراحی، ساخت و نگهداری سدهای خاکی ارائه می‌دهد. هدف پژوهش حاضر پرداختن به عدم قطعیت موجود در مقدار پارامترهای مقاومتی مصالح و اثر آن بر پایداری سد، افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان سد خاکی است و از سوی دیگر بر تاثیر موقعیت قرار گیری هسته رسی تاکید می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ویژگی‌ها و موقعیت پروژه سد صیدون

سد مخزنی صیدون که یک پروژه مهندسی مهم است، هم‌اکنون در حدود ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی باغملک و بر روی یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه اعلا در استان خوزستان در حال ساخت است. حوضه آبریز این سد که در یک منطقه کوهستانی قرار دارد، به مساحت ۴۹۶.۵ کیلومتر مربع است. محل ساخت سد مخزنی صیدون در دره ای V شکل به نسبت متقارن، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، قرار دارد. خلاصه ویژگی‌های سد مخزنی صیدون در جدول ۱ ارائه شده است. سد خاکی صیدون از نوع خاکی با هسته رسی با دو فیلتر در پایین و بالای هسته است. نوع مصالح هسته رسی از نظر طبقه

مرتفع را تجزیه و تحلیل کرده‌اند و راه‌حل‌های جامعی برای جنبه‌های حیاتی توسعه آنان از لحاظ کنترل تغییر شکل، نشست و پایداری شیب سد ارائه کرده‌اند. Faridmehr et al. (2019) یکپارچگی دیوار برشی بتنی پلاستیکی در سد کرخه را بررسی کردند. در این پژوهش از نرم‌افزار SEEP-3D برای مدل‌سازی عملکرد دیواره برشی در نشست از بدنه سد استفاده شد و محاسبات با استفاده از اندازه‌گیری‌های نشست واقعی واسنجی (کالیبره) شدند. به همین ترتیب Teimouri et al. (2018) از نرم‌افزار Geo-Studio برای انجام تجزیه و تحلیل نشست از سد خاکی نرماب استفاده کردند. در این پژوهش با استفاده از چهار اندازه‌مش مختلف، تأثیر عناصر محاسباتی را بر نرخ جریان و هد کل بررسی کردند. افزون بر این، Salmasi & Mansuri (2014) تأثیر نسبت‌های هدایت هیدرولیکی سد خاکی همگن (kx/ky) و وجود یک زهکش افقی در نشست را بررسی کردند. Ahmed & Elsanabary (2015) تجزیه و تحلیل سه بعدی نشست زیر سازه‌های هیدرولیکی را انجام دادند و یک فیلتر میانی را در کف سازه معرفی کردند. در یک پژوهش تکمیلی، Eslamian & Hajiannia (2021) نشست گذرا دوبردی و سه بعدی از سدهای خاکی از طریق مدل المان محدود در سد کردالیا را بررسی کردند. (2014a) Khanna et al. یک تحقیق جامع در مورد تأثیر تغییرات در ضخامت هسته عمودی بر تجزیه و تحلیل پایداری سدهای خاکی و سنگریزه‌ای ارائه کردند. Shole (2019) Belayneh & تأثیر شیب جانبی و شکل هسته رسی را بر پایداری یک سد خاکی در جنوب اتیوپی بررسی کردند. پژوهش Khanna et al. (2019) به تأثیر ضخامت هسته بر پایداری شیب پایین دست تحت شرایط استاتیکی و دینامیکی می‌پردازد. تحلیل‌های احتمالی انجام شده توسط Calamak et al. (2018) اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های درون هسته و مصالح فیلتر را هنگام ارزیابی ویژگی‌های نشست سدهای خاکی نشان می‌دهند. (2022) Ahadiyan et al. و (2023) Haghdoost et al. (2024) به بررسی تأثیر زاویه انحراف، تعداد و فاصله شیت پایل بر نشست در سدهای خاکی پرداختند و از نرم‌افزار SEEP/W برای مدل‌سازی عددی استفاده کردند. نتایج

۲-۲- تخلیه سریع مخزن و تجزیه و تحلیل پایداری شیب

تخلیه جزئی یا کلی مخزن بخشی از مراحل عملیات سد در طول تعمیر و نگهداری و در موارد شدید مورد نیاز است. همچنین تخلیه جزئی یا کلی مخزن در رویدادهایی مانند زلزله، رانش زمین در داخل مخزن یا بارندگی شدید محتمل است. تعادل سد در طول فرآیند تخلیه، مستقیماً به سرعت تخلیه بستگی دارد و تخلیه سریع آن حیاتی است. این منجر به مشکلی که به عنوان تخلیه سریع مخزن (RDD¹) شناخته می شود، خواهد شد. پایداری سدهای خاکی برای شرایط طولانی مدت به هندسه، خواص مصالح و نیروهایی که به سد وارد می شود، بستگی دارد. (Sica et al. 2019; Lane and Griffiths, 2000). رویکرد معمول برای تجزیه و تحلیل RDD یک تجزیه و تحلیل جریان پایدار و تجزیه و تحلیل گذرا در طول زمان است. تجزیه و تحلیل تعادل حدی با استفاده از میانگین خواص خاک، برای یافتن قطعی ضریب ایمنی (F.S) انجام می شود (Berilgen, 2007). با این حال، ضریب ایمنی دقیق، بستگی به شرایط بارگذاری و پارامترهای خاک، که می تواند به عنوان متغیرهای تصادفی مدل سازی شود، دارد. در این تحقیق از نرم افزار Slide2 از مجموعه نرم افزار Rocscience استفاده شده است. Slide2 یک نرم افزار کاربردی برای ارزیابی پایداری شیب ها در خاک یا سنگ می باشد و می تواند ضریب ایمنی و احتمال شکست را برای سطوح شکست دایره ای یا غیر دایره ای محاسبه کند. این برنامه از روش های تعادل حدی دوعدی برای بررسی پایداری سطوح لغزش استفاده می کند که شامل برش های عمودی و غیرعمودی می شود. افزون بر این، Slide2 قابلیت را برای تجزیه و تحلیل نشت آب زیرزمینی با استفاده از روش های امان محدود تحت شرایط حالت پایدار و گذرا فراهم می کند. از طرفی این نرم افزار قابلیت تحلیل احتمالاتی و تجزیه و تحلیل حساسیت را نیز دارا می باشد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

بندی خاک ها از نوع CL است که عرض آن در کف سد به ۴۵ متر و در بالای سد به ۷ متر می رسد. مصالح فیلتر و زهکش از نوع SM می باشد و در دو طرف هسته قرار می گیرد. مصالح بدنه سد از نوع GP-GM بوده و دارای شیب ۱ به ۲.۵ در بالادست و ۱ به ۲ در پایین دست می باشد.

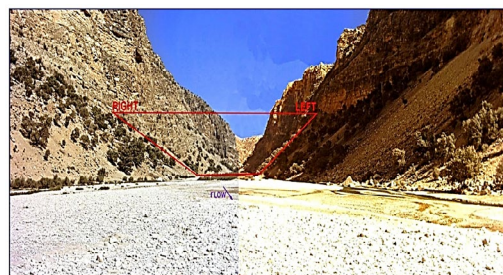


Fig. 1 Location of the valley of Seydon Dam
شکل ۱ محل دره ای که سد صیدون در آن قرار دارد

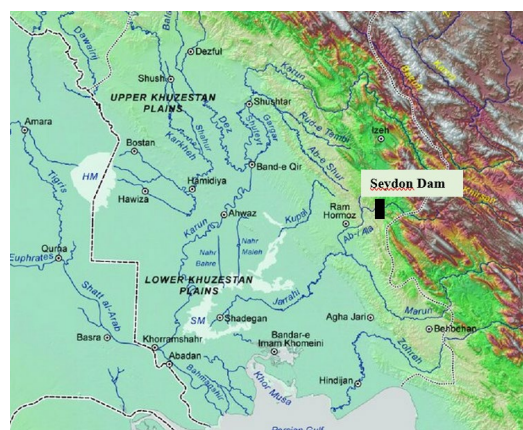


Fig. 2 Location of Seydon Dam
شکل ۲ محل قرار گیری سد صیدون

جدول ۱ ویژگی های سد مخزنی صیدون (سازمان آب و برق استان خوزستان، ۱۳۸۹)

Table 1 The characteristics of Seydon Reservoir Dam (Khuzestan Water And Power Authority, 2010)

Dam Characteristics	Value
The Total Volume Of The Reservoir	65.9 Million Cubic Meters
Useful Volume	50.5 Million Cubic Meters
Normal Level	1290 Meters Above Sea Level
Minimum Exploitation Level	1245 Meters From The Open Sea Level
The Total Land Area Of The Seydon Network	15,668 Hectares
The Regulatory Water Volume Of The Seydon Dam	6.77 Million Cubic Meters

1. Rapid Drawdown

۲-۳- داده های ورودی برای تجزیه و تحلیل

سد

در این مقاله از پارامترهایی استفاده شده است که با پارامترهای خاک مورد استفاده در سد خاکی صیدون مطابقت دارد. نتایج دقیق آزمایشگاهی در منطقه مورد پژوهش اطلاعات جامعی را در مورد مقادیرهای میانگین خواص مختلف خاک، از جمله وزن واحد، پارامترهای مقاومت برشی، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، نفوذپذیری و پارامترهای خاک غیراشباع ارائه کرد. مدل خاک اشباع-غیراشباع برای تجزیه و تحلیل دقیق تر تجزیه و تحلیل جریان آب و تجزیه و تحلیل پایداری شیب استفاده شده است. در این مدل خاک به صورتی مدل می شود که بر حسب اینکه خاک در شرایط اشباع یا غیر اشباع باشد، پارامترهای مقاومتی خاک تابع مکش موجود

در مصالح در هر کدام از بخش های سد خواهد بود. خواص مصالح بخش های مختلف سد در جدول ۲ آورده شده است. ضریب نفوذپذیری و درصد رطوبت حجمی بر حسب مکش خاک برای مصالح مختلف در شکل ۳ آورده شده است. مقدار ورودی هوا همانطور که توسط Fredlund & Rahardjo (1993) تعریف شده است، آستانه مکش ماتریکی را نشان می دهد که برای خروج هوا از منافذ خاک لازم است. با توجه به رفتار مقاومتی خاک، زمانیکه خاک در حالت اشباع قرار دارد، از مدل اشباع موهر-کولمب تبعیت می کند. وقتی مکش ماتریک از مقدار ورودی هوا فراتر می رود، انتظار می رود که مقاومت برشی به یک پوش خطی با زاویه ϕ_b به عنوان زاویه اصطکاک برسد. شکل ۴، بر اساس Fredlund (2000)، تأثیر مقدار ورودی هوا را نشان می دهد.

جدول ۲ خواص مواد بخش های مختلف سد

Table 2 The material properties of different parts of the dam

Material Name	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Phi b (deg)	Air Entry (kPa)	K _s (m/s)
Core	20.7	Mohr-Coulomb	40	23	10	19.6	4e-08
Filter	20	Mohr-Coulomb	0	35	20	1.5	0.001
Shell	21.9	Mohr-Coulomb	0	44	22	5	1.25e-05

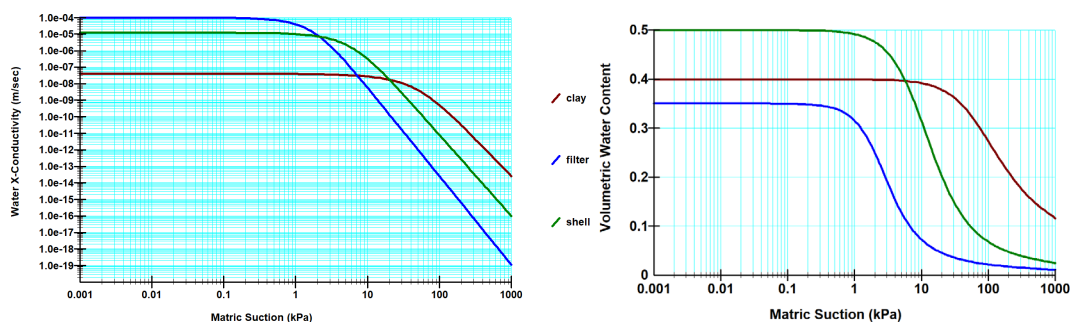


Fig. 3 The permeability coefficient and Volumetric water content in terms of soil suction for different materials of Dam

شکل ۳ ضریب نفوذپذیری و درصد رطوبت حجمی بر حسب مکش خاک برای مصالح مختلف سد

۲-۴- موقعیت قرارگیری هسته رسی

برای بررسی تأثیر موقعیت هسته رسی بر نتایج تحلیل احتمالی پایداری شیب، پنج حالت برای قرارگیری هسته رسی در نظر گرفته شده است که شکل و ویژگی های آنان در شکل ۵ و جدول ۳ آورده شده است.

۲-۵- قابلیت اطمینان شیب

برای ارزیابی قابلیت اطمینان شیب، اثرات ترکیبی عدم قطعیت ها در نظر گرفته می شود و بین موقعیت هایی با سطوح عدم قطعیت بالا یا پایین تمایز قائل می شوند (Varde and Pecht, 2018). قابلیت اطمینان (R) نشان دهنده

جدول ۳ شیب بالادست و پایین دست هسته

Case	Upstream slope of core(H:V)	Downstream slope of core(H:V)
1	1.75:1	1.4:1
2	1.35:1	1:1
3	1:1.86	1:2.2
4	1:3	1:18
5	1:13.3	1:2.2

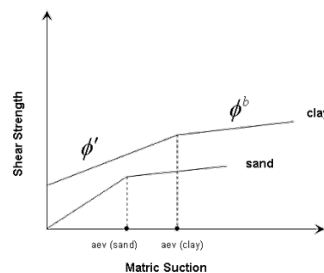


Fig. 4 Effect of air entry value (AEV) on unsaturated shear strength envelopes (Fredlund, 2000)

شکل ۴ اثر مقدار ورودی هوا (AEV) بر روی پوشش‌های مقاومت برشی اشباع نشده (Fredlund, 2000)

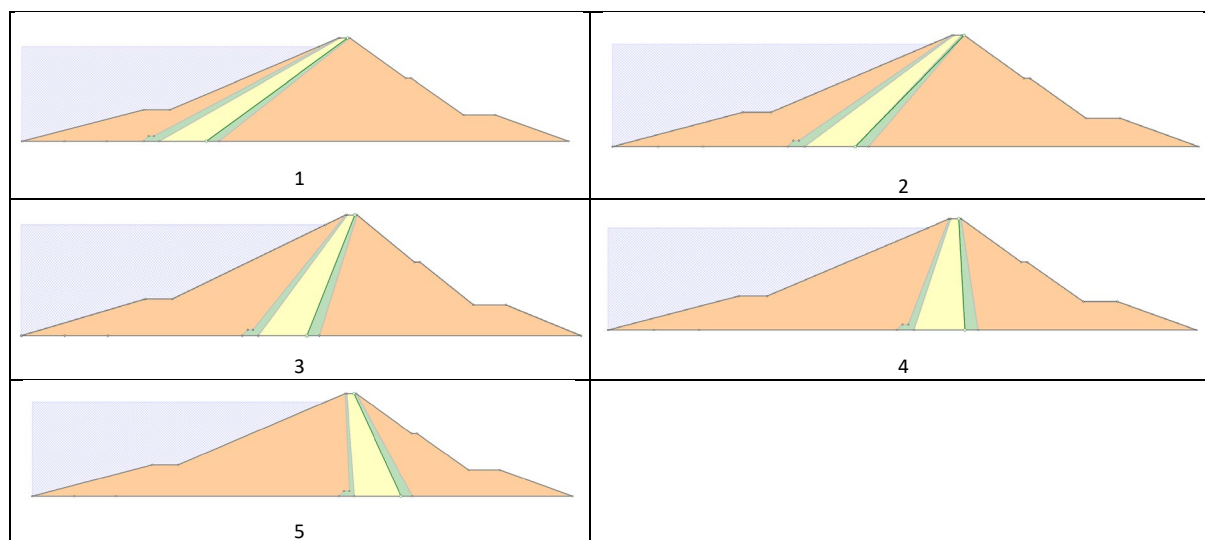


Fig. 5 All cases of the position of the clay core

شکل ۵ تمام موارد موقعیت هسته رسی

معرفی شد و می‌توان آن را به صورت ریاضی با معادله (۳) نشان داد.

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

ضریب ایمنی قطعی تنها حاشیه ایمنی را بر اساس مقدارهای متوسط ورودی‌ها اندازه‌گیری می‌کند و نادیده‌گیرنده تغییرات واقعی است. به دلیل پیچیدگی‌های دنیای واقعی، رویکردهای احتمالی برای درک ریسک‌ها و عدم قطعیت‌ها لازم است. شاخص قابلیت اطمینان در ارزیابی پایداری شیب، جدایی بین میانگین ضریب ایمنی و مقدار بحرانی را اندازه‌گیری کرده و اطلاعات بیشتری درباره ایمنی و قابلیت اطمینان ارائه می‌دهد. مقدارهای بالاتر این شاخص نشان‌دهنده ایمنی بیشتر و ریسک کمتر و مقدارهای پایین‌تر نشان‌دهنده ریسک بالاتر هستند. این

توانایی عملکرد بدون شکست است که می‌توان از آن به عنوان احتمال موفقیت نیز یاد کرد (معادله ۱).

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

از سوی دیگر، احتمال رخداد شکست قبل از زمان معین t به عنوان احتمال شکست (PF) شناخته می‌شود. همانطور که در رابطه (۲) نشان داده شده است، می‌توان این را از نظر ریاضی به عنوان احتمال اینکه زمان شکست قبل از زمان مشخص t اتفاق می‌افتد، تعریف کرد.

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

شاخص قابلیت اطمینان (RI) که معمولاً با نماد β نشان داده می‌شود، نسبتی از میانگین حاشیه ایمنی (میانگین FS-1) به انحراف استاندارد حاشیه ایمنی (SD از F) است. این مفهوم برای اولین بار توسط کرنل در سال ۱۹۶۹

(1983) Baecher & (2010) Akbas & Kulhawy و (2006) Kulhawy et al. مقادیرهای COV را از ۲٪ تا ۲۱٪ برای پارامترهای زاویه اصطکاک و چسبندگی موثر نشان داده‌اند. این تحقیق‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن تنوع در پارامترهای خاک هنگام ارزیابی پایداری شیب و ویژگی‌های ژئوتکنیکی تأکید می‌کند.

در تحقیق حاضر، پارامترها متغیرهایی با توزیع لوگ نرمال و ضریب تغییرات (COV) برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شدند، همانطور که در جدول ۵ توضیح داده شده است. روش نمونه‌گیری لاتین هایپرکیوب برای تولید نمونه‌هایی از متغیرهای ورودی با توزیع احتمال آنان، برابر ۱۰۰۰ استفاده شد. این روش، مزیت به دست آوردن نتایج قابل مقایسه با شبیه‌سازی مونت کارلو اما با نمونه‌های کمتر را ارائه می‌دهد و آن را به یک انتخاب کارآمد برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و ارزیابی ریسک تبدیل می‌کند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تجزیه و تحلیل گذرا

برای انجام تجزیه و تحلیل گذرا و تخلیه مخزن باید ابتدا دبی تخلیه مخزن تعیین گردد. دبی تخلیه مخزن بر اساس پارامترهای مختلفی تعیین می‌شود (Gao et al. 2018). دبی تخلیه به طرق مختلف در آیین‌نامه‌های مختلف ارجاع داده می‌شود (USACE, 2016; USBR, 1990; Environment Agency, 2017a,b): (۱) به عنوان درصدی از ارتفاع سد. (۲) به عنوان درصدی از حجم سد. و (۳) به عنوان نرخ تغییر ارتفاع در طول زمان. الزامات برای تخلیه سریع (RDD) بر اساس نسبت ارتفاع سد (۱) پیشنهاد می‌کند که نرخ تخلیه از ۱۰٪ تا ۹۰٪ ارتفاع سد در بازه زمانی ۷ روز تا ۴ ماه اتفاق بیافتد (Prentice, 2005). برای معیارهای RDD مربوط به نسبت حجم سد (۲)، توصیه‌ها شامل کاهش ۵۰ درصد ظرفیت سد، ظرف ۳ تا ۱۵ روز و تا ۲۵ درصد ظرفیت در ۲۸ روز است (Combelles et al., 1985; Alonso and pinyol, 2009; Gosden et al., 2014). معیارهای RDD بر اساس تغییر ارتفاع در روز (۳) شامل سرعت‌های ۰.۱ متر در روز تا ۴.۰ متر در روز است که در مطالعات مختلف پیشنهاداتی برای سرعت‌های

رویکرد امکان ارزیابی کمی از پایداری سیستم و تصمیم‌گیری آگاهانه در مهندسی را فراهم می‌آورد. روابط بین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ رابطه بین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان

Table 4 Relationship between probability of failure, and reliability index

Reliability Index	Probability of failure
1	0.16
1.5	0.023
2	0.0027
2.5	0.0006
3	0.0001
4	3×10^{-5}
5	3×10^{-7}

هدف قرار دادن شاخص قابلیت اطمینان کمترین ۳ معمولاً برای اطمینان از طراحی ایمن توصیه می‌شود که نشان دهنده یک حاشیه ایمنی قابل توجه بین ضریب ایمنی متوسط و ضریب ایمنی بحرانی است. در حالت تخلیه مخزن که یک حالت گذرا می‌باشد هیچ توصیه‌ای برای مقدار ضریب اطمینان نشده است. این سطح جداسازی برای به کمترین رساندن خطر شکست شیب و تضمین سطح بالایی از قابلیت اطمینان در کاربردهای مهندسی و ژئوتکنیکی بسیار مهم است. تغییرپذیری خاک را می‌توان با استفاده از ضریب تغییرات (COV)، که نسبت انحراف استاندارد (σ) به محتمل‌ترین مقدار پارامتر یا میانگین (μ) است، کمی‌سازی کرد. این اندازه‌گیری به عنوان یک شاخص تغییرپذیری پارامتر عمل می‌کند و همانطور که در رابطه (۴) نشان داده شده است، می‌تواند به صورت ریاضی بیان شود.

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

محققین بسیاری ضریب تغییرات (COV) را به عنوان شاخص تغییرپذیری در پارامترهای خاک برجسته کرده‌اند. به عنوان مثال، مطالعات (Akbas & Kulhawy (2010) و (Pham (2001) محدوده ضریب تغییرات 5-15% را برای وزن واحد خاک پیشنهاد می‌کند. افزون بر این، Einstein

۳-۳- تجزیه و تحلیل احتمالاتی کلی

در تجزیه و تحلیل پایداری احتمالی شیب، هر سطح لغزش کلی با استفاده از نمونه‌های تولید شده برای هر متغیر تصادفی، تحت تکرارهای متعددی از محاسبات پایداری قرار می‌گیرد. هر تکرار یک ترکیب متمایز از متغیرهای ورودی را بر اساس تکنیک نمونه‌گیری به کار گرفته شده نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل پایداری برای سطح کمترین لغزش کلی هر مورد انجام می‌شود، که در نتیجه N بار، ضریب ایمنی محاسبه شده، که در آن N تعداد نمونه‌ها را نشان می‌دهد. سپس با شناسایی تعداد تجزیه و تحلیل‌هایی که ضریب ایمنی کمتر از ۱ را نشان می‌دهند (که نشان دهنده ناپایداری است) و تقسیم این تعداد بر تعداد کل نمونه‌ها، احتمال شکست تعیین می‌شود. روش نمونه‌گیری Latin hypercube برای تولید نمونه‌هایی از متغیرهای ورودی از توزیع احتمال آنان، با استفاده از ۱۰۰۰ نمونه استفاده شد. نتیجه نشان می‌دهد که ۱۰۰۰ نمونه برای محاسبه ضریب همگرایی ایمنی کافی است (شکل ۷). این رویکرد جامع، تغییرپذیری در پارامترهای ورودی را در نظر می‌گیرد و با در نظر گرفتن ماهیت احتمالی

متوسط ارائه شده است (Song et al., 2015; Pinyol et al., 2008). بر اساس تمامی موارد ذکر شده در این تحقیق نرخ ۳ متر در روز بعنوان نرخ تخلیه در نظر گرفته شده است. مخزن سد از رقوم ۱۲۹۰ به ۱۲۴۵ معادل ۵۰ درصد حجم مخزن ظرف ۱۵ را تخلیه می‌شود. برای انجام تجزیه و تحلیل زمانی، ۸ بازه زمانی ۱، ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰ و ۳۶۵ روزه در نظر گرفته شده است. نتیجه تجزیه و تحلیل‌گذرا برای حالت ۵ به عنوان نمونه در شکل ۶ آورده شده است.

۳-۲- نتیجه تحلیل پایداری شیب

استفاده از نرم افزار Slide2 برای ارزیابی پایداری شیب بالادست سد خاکی منعکس کننده یک رویکرد جامع برای تحلیل پایداری شیب است. در نظر گرفتن پارامترهای ویژگی‌های مصالح سد به عنوان یک متغیر تصادفی، امکان بررسی کامل پایداری سد را در شرایط مختلف فراهم می‌کند. ترکیب نتایج تجزیه و تحلیل گذرای قبلی و ارجاع به ویژگی‌های مواد ذکر شده در جدول ۵، مرحله مهم در انجام یک ارزیابی پایداری کامل از شیب بالادست سد خاکی است.

جدول ۵ پارامترهای آماری مصالح سد

Table 5 Statistical parameters of dam materials

Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Core	Cohesion	Lognormal	40	4	12	12
	Phi	Lognormal	23	2.3	6.9	6.9
	Unit Weight	Lognormal	20.7	2.07	6.21	6.21
Filter	Phi	Lognormal	35	3.5	10.5	10.5
	Unit Weight	Lognormal	20	2	6	6
Shell	Phi	Lognormal	44	4.4	13.2	13.2
	Unit Weight	Lognormal	21.9	2.19	6.57	6.57

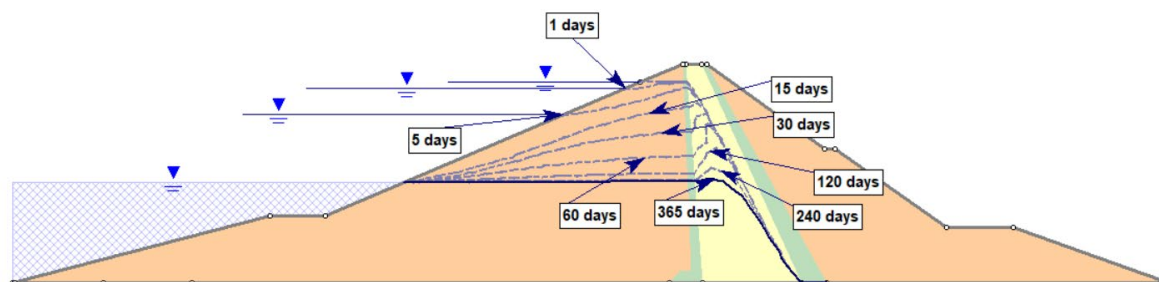


Fig. 6 Result of transient analysis (case5)

شکل ۶ نتیجه تجزیه و تحلیل گذرا (مورد ۵)

می‌رسد در حالیکه مقدار قابلیت اطمینان به عدد 0.23 رسیده است که نشان از احتمال خرابی بالای سد در این وضعیت دارد. در حالت ۲ باز هم مقدار ضریب ایمنی در کمترین وضعیت (۱۵ امین روز) به عدد 1.23 و قابلیت اطمینان 1.64 رسیده است که نشان می‌دهد این وضعیت دارای شرایط بهتری نسبت به حالت ۱ بوده اما باز هم مقدار قابلیت اطمینان کم است. در حالت ۳ موقعیت قرارگیری هسته، ضریب ایمنی کمترین در شرایط ۵ و ۱۵ روزه تقریباً یکسان و برابر 1.6 می‌باشد ولی کمترین شاخص قابلیت اطمینان در ۵ امین روز و برابر 2.61 می‌باشد. در حالت ۴ و ۵ شرایط بصورتی است که کمترین ضریب ایمنی و قابلیت اطمینان در ۵ امین روز واقع شده و مقدارهای آن به ترتیب 1.6 و 1.58 برای ضریب ایمنی و 2.54 و 2.43 برای شاخص قابلیت اطمینان است. دقت به این نکته ضروری است که با وجود اینکه مدت زمان تخلیه

احتمالی تحلیل، ارزیابی قوی‌تری از پایداری شیب ارائه می‌کند. نتایج تحلیل احتمالی برای همه حالت‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ و جدول ۶ نشان داده شده است.

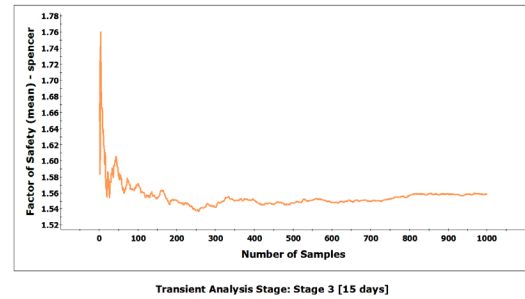


Fig. 7 Convergence plot of Factor of safety vs number of sample

شکل ۷ نمودار همگرایی ضریب ایمنی در مقابل تعداد نمونه همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در حالت ۱ که هسته سد در قسمت بالادست سد قرار دارد، ضریب ایمنی شیب در کمترین حالت یعنی ۱۵ امین روز، به عدد 1.03

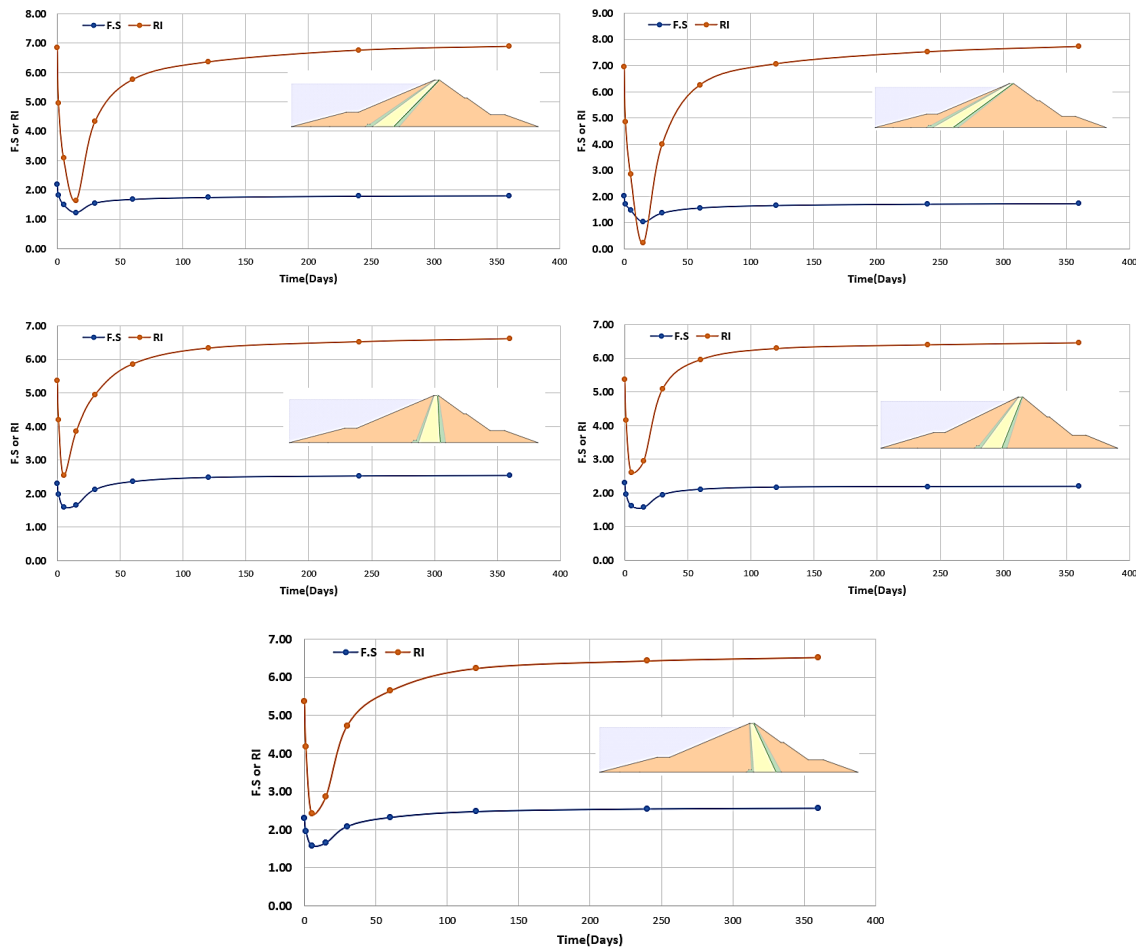


Fig. 8 The results of Global probabilistic analysis in transient analysis conditions

شکل ۸ نتایج تجزیه و تحلیل احتمالاتی کلی در شرایط تحلیل گذرا

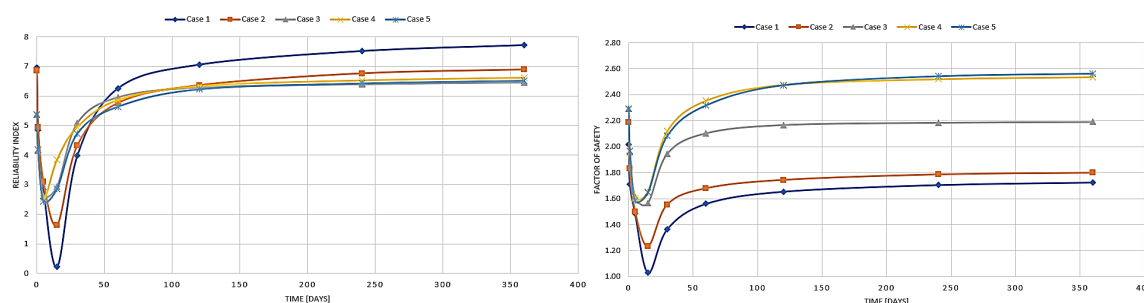


Fig. 9 Comparison of the safety factor and Reliability index in all cases of core position investigation

شکل ۹ مقایسه ضریب ایمنی و شاخص اطمینان در تمام حالت های بررسی موقعیت هسته

جدول ۶ نتایج تجزیه و تحلیل احتمالاتی کلی در شرایط گذرا

Table 6 Results of Global probabilistic analysis in transient conditions

F.S					
Time [d]	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
0	2.02	2.19	2.29	2.29	2.29
1	1.71	1.83	1.96	1.97	1.97
5	1.49	1.50	1.62	1.60	1.58
15	1.03	1.23	1.58	1.65	1.65
30	1.36	1.55	1.95	2.12	2.08
60	1.56	1.68	2.10	2.35	2.32
120	1.65	1.74	2.17	2.48	2.47
240	1.71	1.79	2.19	2.52	2.54
360	1.72	1.80	2.19	2.54	2.56

RI					
Time [d]	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
0	6.95	6.85	5.36	5.36	5.36
1	4.85	4.95	4.15	4.19	4.18
5	2.84	3.09	2.61	2.54	2.43
15	0.23	1.64	2.94	3.85	2.86
30	3.99	4.33	5.09	4.95	4.73
60	6.26	5.76	5.96	5.86	5.64
120	7.06	6.36	6.29	6.33	6.23
240	7.52	6.76	6.4	6.52	6.43
360	7.72	6.89	6.46	6.61	6.52

روش احتمالاتی کمترین اطمینان چندین مزیت نسبت به روش احتمالاتی کلی در تحلیل پایداری شیب احتمالی دارد. یک مزیت مهم این است که در این روش شیبی که بیشترین احتمال شکست را دارد بر اساس متغیرهای تصادفی تعریف شده تعیین می شود که لزوماً با شیب حالت قبل یکسان نیست. از آنجایی که بهترین توزیع حاکم بر F.S. لوگ نرمال است (شکل ۱۰)، از نتایج RI این توزیع در تحلیل استفاده شده است. نتایج روش احتمالاتی

مخزن ۱۵ روز در نظر گرفته شده است، اما کمترین ضریب ایمنی در زمانی کمتر از آن اتفاق افتاده است. همچنین نتایج شکل ۹ نشان می دهد که ضریب ایمنی در حالت های ۱ و ۲ در دراز مدت (۳۶۵ روز) باز هم به مقدار ناشی از تجزیه و تحلیل جریان پایدار یا زمان صفر نمی رسد، در حالی که در حالت ۳ این مقدار با مقدار حالت جریان پایدار برابر و در حالت های ۴ و ۵ مقدار ضریب ایمنی شیب بالادست به عددی بیش از مقدار حالت جریان پایدار (زمان صفر) می رسد.

نتایج جدول ۶ و شکل ۹ همچنین نشان دهنده این موضوع است که در تمامی حالت های، در دراز مدت همواره شاخص قابلیت اطمینان از مقدار آن در حالت جریان پایدار (زمان صفر) بیشتر بوده است.

۳-۴- تجزیه و تحلیل احتمالاتی کمترین اطمینان

روش احتمالاتی کمترین اطمینان شیب در Slide2 برای تجزیه و تحلیل پایداری شیب احتمالی شامل تکرار N بار جستجو برای کمترین سطح لغزش کلی است، که N نشان دهنده تعداد نمونه های تولید شده برای متغیرهای تصادفی است. در هر تکرار، مجموعه جدیدی از نمونه های متغیر تصادفی اعمال می شود و جستجو برای سطح کمترین لغزش با کمترین قابلیت اطمینان انجام می شود. این فرآیند تکراری، با در نظر گرفتن تغییرپذیری و عدم قطعیت مرتبط با پارامترهای ورودی، امکان کاوش کامل سطوح شکست احتمالی در شیب را فراهم می کند.

شکل ۱۲ برای حالت ۳ موقعیت قرار گیری سد و پس از گذشت ۱۵ روز آورده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در این تجزیه و تحلیل، ضریب ایمنی دارای مقداری بیشتر یا برابر با حالت تجزیه و تحلیل احتمالاتی کلی است. نتایج نشان می دهد که تنها در حالت قرار گیری هسته شماره ۳ و ۴، شاخص قابلیت اطمینان در تمامی زمانان بزرگتر از ۲.۵ بود و همچنین ضریب ایمنی از مقدار ۱.۲ آیین نامه برای حالت تخلیه سریع مخزن بیشتر است.

۳-۵- تجزیه و تحلیل حساسیت

انجام تجزیه و تحلیل حساسیت بر اساس توزیع آماری پارامترهای مصالح سد امکان بررسی کامل چگونگی تأثیر تغییرات در عوامل مختلف بر نتایج ضرایب ایمنی را فراهم می کند. در این بخش ابتدا به بررسی تغییرات پارامترهای مختلف مصالح سد در طول زمان برای هر یک از حالت های قرار گیری هسته پرداخته شده است. که نتایج در شکل های ۱۳ تا ۱۷ ارائه شده است. نتایج نشان میدهد که در حالت های ۱ و ۲ قرار گیری هسته با توجه به وجود هسته و فیلتر در قسمت بالادست و تأثیر مستقیم آن در پایداری شیب در تمامی زمان ها پارامترهای کل مصالح بر ضریب ایمنی شیب بالادست تأثیر گذار است. نتایج در حالت های ۳ و بخصوص ۴ و ۵ قرار گیری هسته نشان می دهد که تنها پارامترهای مصالح پوسته سد و به خصوص زاویه اصطکاک مصالح پوسته بر ضریب ایمنی شیب بالا دست در تمامی زمانانی تجزیه و تحلیل گذرا موثر است. از این سو در بخش دوم تجزیه و تحلیل حساسیت به بررسی رابطه خطی بین پارامترهای مختلف مصالح سد با ضریب اطمینان در زمانانی مختلف پرداختیم. برای نمونه زمان ۱۵ روز بعد از شروع تخلیه مخزن که یک زمان حساس در تحلیل ما می باشد را بررسی و نتایج در شکل ۱۸ برای تمام حالت های قرار گیری هسته آورده شده است. در شکل ۱۸ برای هر یک از حالت های، پارامتری که بیشترین همبستگی خطی را با ضریب ایمنی نشان می داد، آورده شده است. نتایج نشان میدهد که در حالت های ۱ و ۲ قرار گیری هسته، وزن مخصوص مصالح پوسته بیشترین همبستگی خطی را با ضریب ایمنی بالادست دارد.

کمترین اطمینان در شکل ۱۱ ارائه شده است.

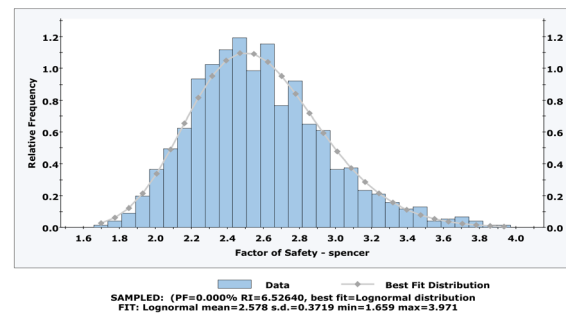


Fig. 10 Distribution of Factor of Safety for Global probabilistic method (case 3)

شکل ۱۰ توزیع ضریب ایمنی برای روش احتمالاتی کلی (حالت ۳)

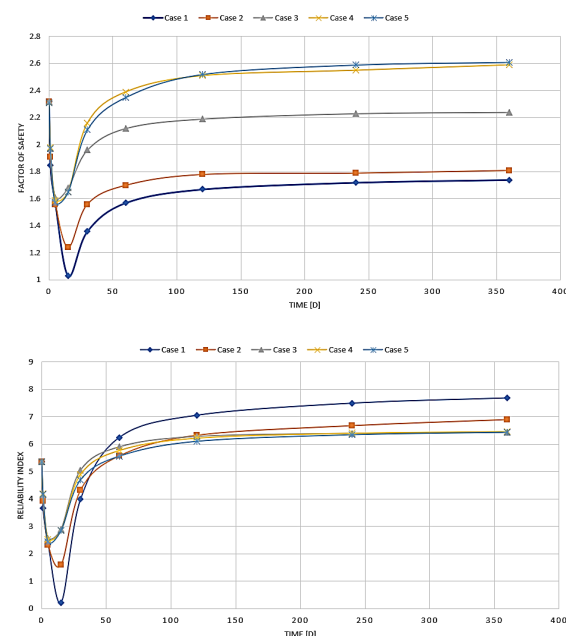


Fig. 11 Results of minimum Reliability probabilistic analysis

شکل ۱۱ نتایج تجزیه و تحلیل احتمالاتی کمترین اطمینان

در این تحلیل، شیبی که دارای کمترین قابلیت اطمینان است به عنوان شیب بحرانی انتخاب می شود که لزوماً شیب با کمترین ضریب ایمنی نیست. این نشان میدهد که صرف انجام تجزیه و تحلیل پایداری شیب بالادست و پیدا کردن ضریب ایمنی آن نه تنها کافی نیست بلکه حتی تجزیه و تحلیل احتمالاتی کلی نیز نمی تولد شیبی که بیشترین احتمال شکست (یا کمترین قابلیت اطمینان) را دارد، نشان دهد و حتماً باید تجزیه و تحلیل احتمالاتی کمترین اطمینان انجام شود. یک نمونه از تفاوت بین نتیجه روش احتمالاتی کلی و روش کمترین اطمینان در

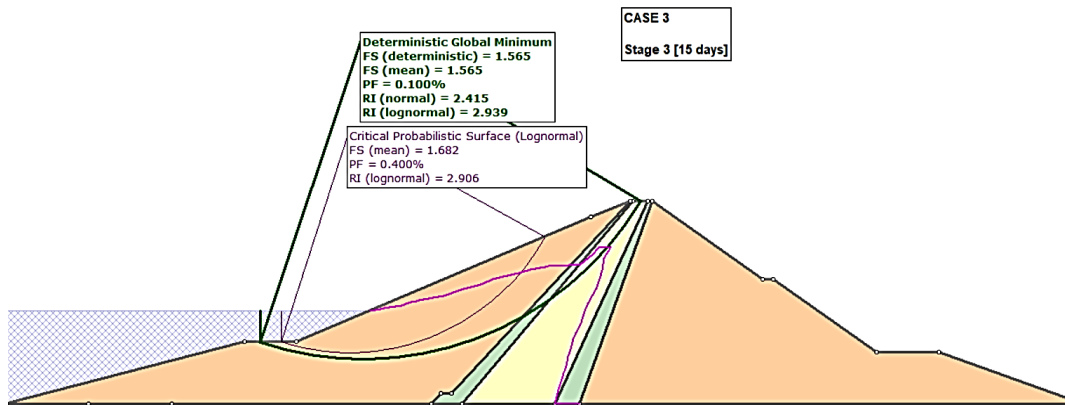


Fig. 12 An example of comparing the results of the Global probabilistic method and the minimum Reliability method

شکل ۱۲ نمونه‌ای از مقایسه نتیجه روش احتمالاتی کلی و روش کمترین اطمینان

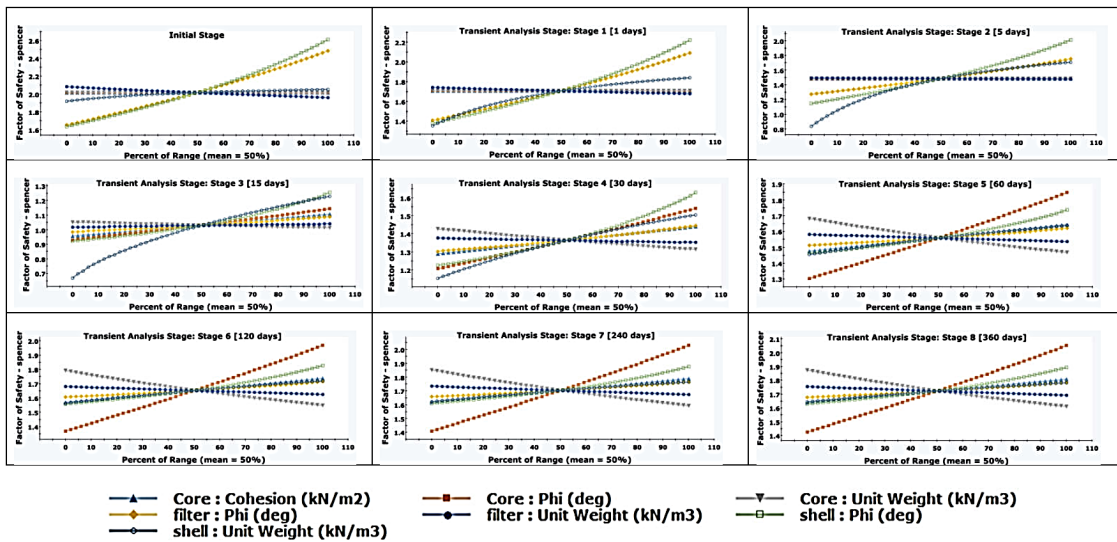


Fig. 13 Results of the sensitivity analysis for case 1 of core placement during the Transient analysis

شکل ۱۳ نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت برای حالت ۱ قرارگیری هسته در طول فرایند تجزیه و تحلیل گذرا

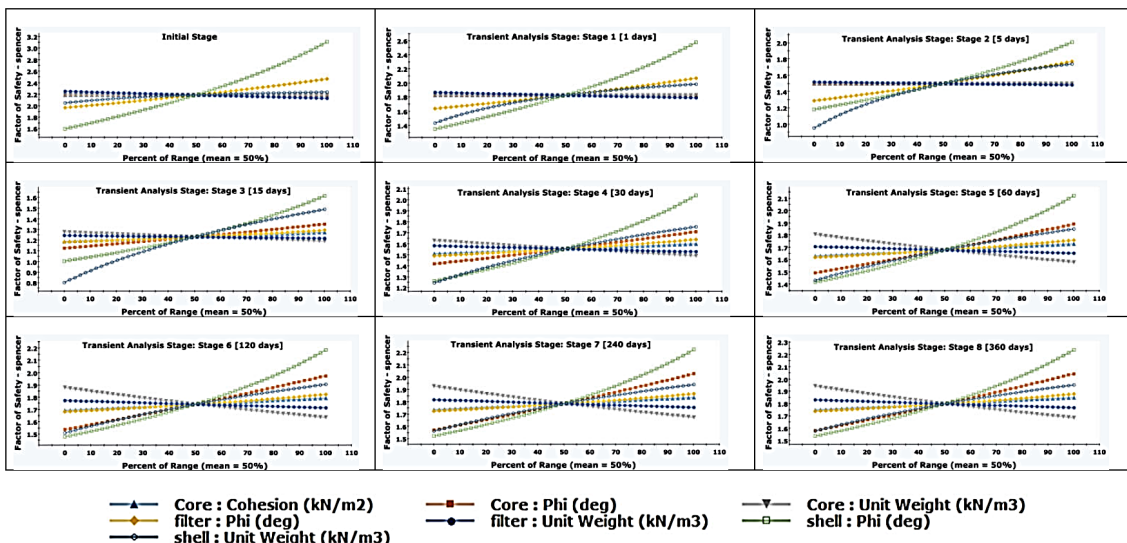


Fig. 14 Results of the sensitivity analysis for case 2 of core placement during the Transient analysis

شکل ۱۴ نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت برای حالت ۲ قرارگیری هسته در طول فرایند تجزیه و تحلیل گذرا

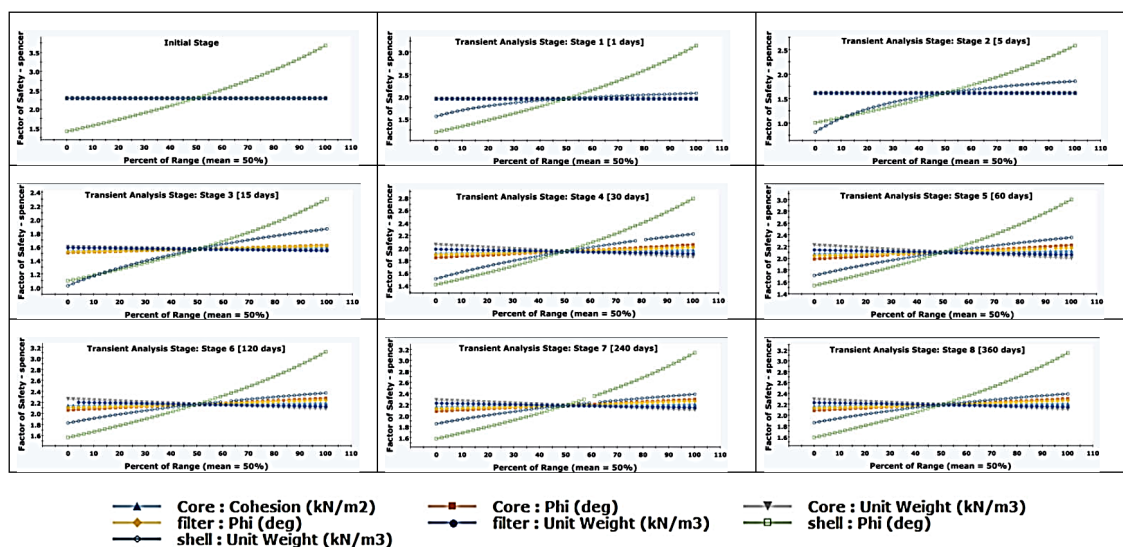


Fig. 15 Results of the sensitivity analysis for case 3 of core placement during the Transient analysis
 شکل ۱۵ نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت برای حالت ۳ قرارگیری هسته در طول فرایند تجزیه و تحلیل گذرا

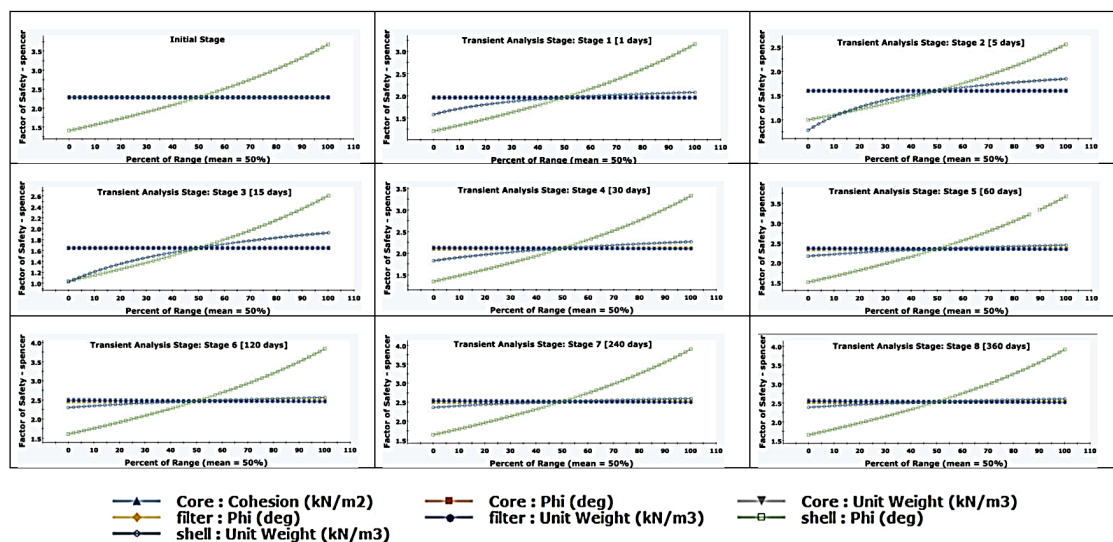


Fig. 16 Results of the sensitivity analysis for case 4 of core placement during the Transient analysis
 شکل ۱۶ نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت برای حالت ۴ قرارگیری هسته در طول فرایند تجزیه و تحلیل گذرا

رسی در سازه‌های خاکی، به‌ویژه سد خاکی صیدون واقع در ایران، پرداخته است. هدف اصلی این پژوهش تحلیل احتمالی پایداری شیب بالادست سد در شرایط تخلیه سریع مخزن بود. در این راستا، وضعیت‌های مختلف هسته رسی در سدهای خاکی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن اطلاعات حیاتی را برای مهندسان و طراحان سدی فراهم می‌کند.

۱. جابه جایی هسته رسی: نتایج تحقیق نشان می‌دهد که جابه جایی هسته رسی از سمت بالادست به سمت پایین دست سد منجر به افزایش ضریب ایمنی و قابلیت

این در حالی است که برای بقیه حالت های قرار گیری هسته، بیشترین همبستگی خطی بین زاویه اصطکاک پوسته و ضریب ایمنی بالادست می باشد. همچنین در شکل ۱۸ تعداد نمونه هایی که در ۱۰۰۰ نمونه اخذ شده دارای ضریب ایمنی کمتر از یک بودند نمایش داده شده است که برای حالت ۱، ۴۰۳ نمونه برای حالت ۲، ۵۹ نمونه و برای بقیه حالت های ۴ نمونه است.

۴- نتیجه گیری

این تحقیق به‌طور جامع به بررسی تأثیر موقعیت هسته

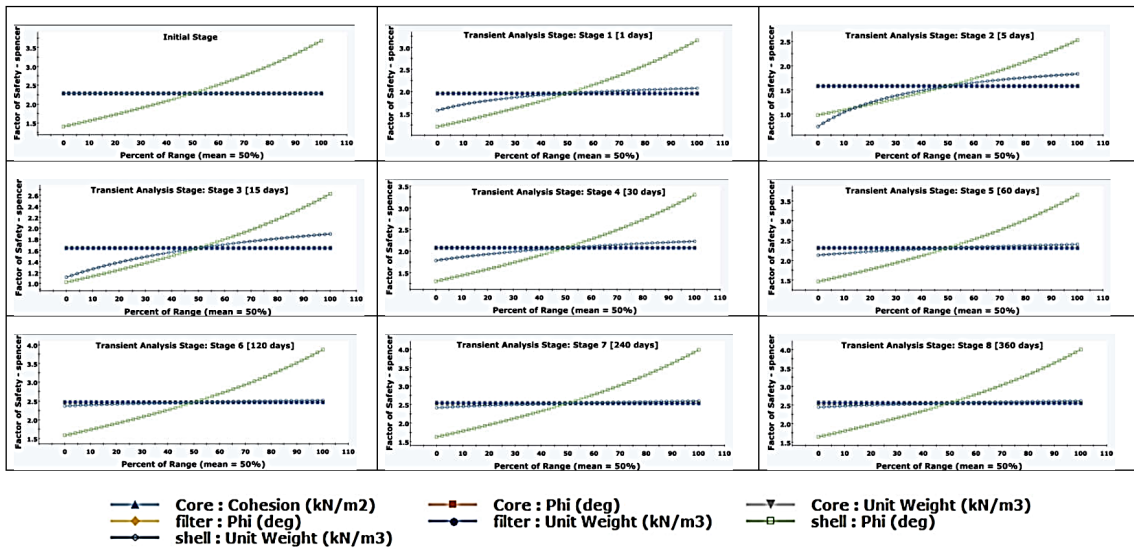


Fig. 17 Results of the sensitivity analysis for case 5 of core placement during the Transient analysis
 شکل ۱۷ نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت برای حالت ۵ قرار گیری هسته در طول فرایند تجزیه و تحلیل گذرا

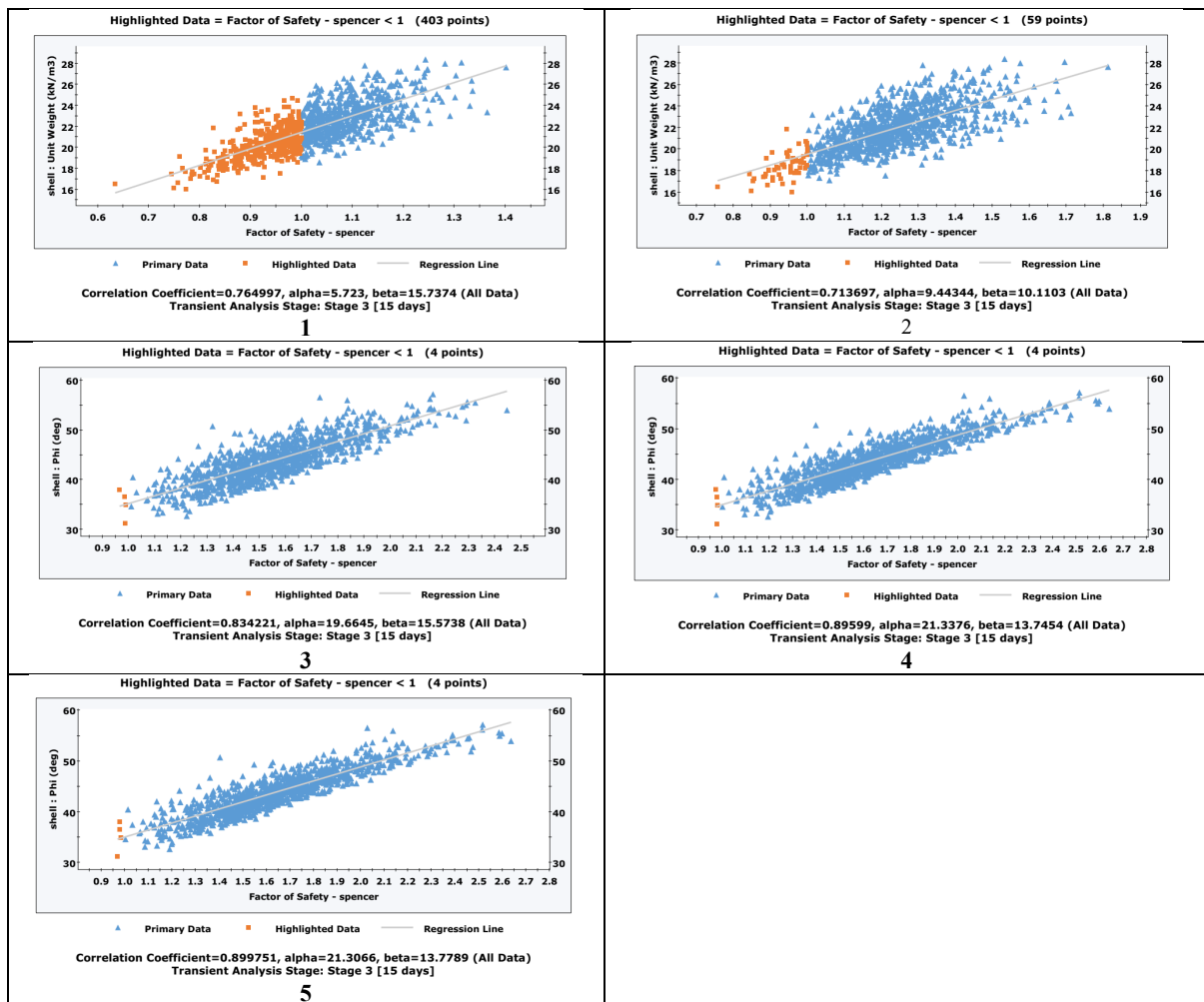


Fig. 18 Correlation between the factor of safety and material properties of dam in all cases

شکل ۱۸ همبستگی بین ضریب ایمنی و خواص مصالح سد در همه حالت‌ها

زیرا نشان می‌دهد تغییر در موقعیت هسته می‌تواند تأثیرات

اطمینان سازه می‌شود. این نکته بسیار با اهمیت است

به همبستگی‌های خطی بین پارامترهای مختلف نشان داد که در حالت‌های ۱ و ۲ که هسته رسی در بالادست قرار دارد، وزن مخصوص مصالح پوسته همبستگی بیشتری با ضریب ایمنی بالادست دارد. در حالی که در سایر حالت‌های قرارگیری هسته، بیشترین همبستگی خطی بین زاویه اصطکاک و ضریب ایمنی بالادست مشاهده شده است. این نتیجه به طراحان و مهندسان کمک می‌کند تا بر روی ویژگی‌های کلیدی مواد و مصالح تمرکز بیشتری داشته باشند، به خصوص در زمان طراحی و ارزیابی پایداری سدها.

به طور کلی، این تحقیق به وضوح تأثیر موقعیت هسته رسی بر پایداری شیب سدهای خاکی را نمایان می‌کند. داده‌های به‌دست‌آمده می‌توانند به طراحان سدهای خاکی کمک کنند تا تصمیم‌گیری‌های بهتری در مربوط به طراحی و ارزیابی پایداری در برابر شرایط مختلف اتخاذ کنند و از این طریق امنیت و پایداری سازه‌ها را افزایش دهند.

۵- منابع‌ها

- Ahadiyan, J., Bahmanpouri, F., Adeli, A., Gualtieri, C. & Khoshkonesh, A. (2022). Riprap Effect on Hydraulic Fracturing Process of Cohesive and Noncohesive Protective Levees. *Water Resources Management*, 36(2), 625-639. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03044-6>.
- Ahmed, A.T. & Elsanabary, M.H. (2015). Hydrological and environmental impacts of Grand Ethiopian Renaissance Dam on the Nile River. In Proceedings of the Eighteenth International Water Technology Conference, IWTC18, Sharm El Sheikh, Egypt, 12-14.
- Akbas, S.O. & Kulhawy, F.H. (2010). Characterization and estimation of geotechnical variability in Ankara clay: a case history. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28, 619-631.
- Alonso, E. & Pinyol N. (2009). Slope stability under rapid drawdown conditions. First Italian Workshop on Landslides, Napols, 11-27.
- Asadi, M. & Khazaei, J. (2014). Seepage analysis in body and foundation of Dam using the Seep/3D and Seep/W. Journal home page: <http://www.journalsci.com> ISSN, 2322, 326X.
- Berilgen, M.M. (2007). Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Comput*

قابل توجهی بر پایداری و عملکرد سد در شرایط مختلف داشته باشد. به بیان دیگر، با جابه‌جایی هسته، توزیع تنش و آب‌فشانی بهبود می‌یابد و ریسک رخداد نشت یا شکست در ساختار سد کاهش می‌یابد.

۲. تجزیه و تحلیل احتمالاتی: داده‌های آماری به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل احتمالاتی نشان می‌دهد که در حالت‌های ۱ و ۲، جایی که هسته رسی در بالادست قرار دارد، شاخص قابلیت اطمینان شیب کمتر از ۲ است. این موضوع تأکید می‌کند که این حالت‌های در مقایسه با سایر موقعیت‌ها، خطر بیشتری در برابر ناپایداری و شکست دارند. در مقابل، سایر حالت‌های مورد بررسی، تمامی زمانان، شاخص قابلیت اطمینان آنان بیشتر از ۳ بوده است که نشان‌دهنده شرایط ایمنی بهتر در این حالت‌ها است.

۳. ضریب ایمنی و زمان تخلیه: یک یافته جالب در این تحقیق این است که بر خلاف تصور رایج، در برخی از حالت‌های (حالت‌های ۴ و ۵) کمترین ضریب ایمنی در زمانانی کمتر از زمان تخلیه مخزن مشاهده می‌شود. این نکته حاکی از آن است که ممکن است در طراحی و ارزیابی پایداری سدهای خاکی نیاز به در نظر گرفتن شرایط خاص وجود داشته باشد تا ریسک‌های غیرمنتظره مورد شناسایی قرار گیرد.

۴. تجزیه و تحلیل کمترین اطمینان شیب: بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که در تحلیل کمترین اطمینان شیب، شیب بحرانی به‌دست‌آمده با تحلیل احتمالاتی کلی یکسان نیست. به ویژه در حالت‌های ۳ و ۴، شاخص قابلیت اطمینان در تمامی زمانان بیشتر از ۲.۵ بوده که نشان‌دهنده پایداری این حالت‌های در مقابل حوادث و بارهای استاتیکی و دینامیک است.

۵. تحلیل حساسیت: تحلیل حساسیت انجام‌شده در این تحقیق نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک مصالح پوسته در تمامی حالت‌های و زمانانی تجزیه و تحلیل نویدبخش تأثیر بالایی بر ضریب ایمنی شیب سد دارد. این بدان معناست که عواملی چون خصوصیات خاک و ویژگی‌های مصالح به کار رفته در سازه می‌تواند تأثیر بسزایی بر عملکرد کلی سد داشته باشد.

۶. همبستگی‌های خطی: در نهایت، بررسی‌های مربوط

- Haghdoust, M., Sajjadi, S.M., Ahadiyan, J., Norouzi, R. & Abraham, J. (2024). The effect of sheet piles' inclination angle, number, and distance on seepage through an earthfill dam. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(12), 103056, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103056>.
- Haghdoust, M., Lakzian, E., Norouzi, R. Abraham, J., Sajjadi, S.M. & Ahadiyan, J. (2023). Numerical simulation using the finite element method to investigate the effect of internal cutoff walls on seepage and hydraulic gradients in homogeneous earth dams, *Model Earth System Environment*, 9, 3851–3864.
- Khanna, R., Datta, M. & Ramana, G.V. (2014a). Influence of thickness of a vertical core on the slope stability of earth and rockfill dams. *Dams and Reservoirs*, 24(4), 152-167.
- Khanna, R., Datta, M. & Ramana, G.V. (2014b). Influence of inclination of thin core on the stability of upstream slope of earth and rockfill dams. *Electronic J Geotech Eng, Bounle (U)*, 6293-6306.
- Khanna, R., Datta, M. & Ramana, G.V. (2019). Influence of core thickness on stability of downstream slope of earth and rockfill dams under end-of-construction and steady-state-seepage: a comparison. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(1), 25-31.
- Kiyani, A.M., Zeinivand, M., Ahadiyan, J. & Falorca, I. (2024). Experimental Investigation of Embankment Wedge Failure's Stability under the Effect of the Number and Spacing of Geotextile Layers in the Reinforced Retaining Wall. *JWSS*, 28(2), 177-194.
- Kulhawy, F.H. & Phoon, K.K. (2006). Some critical issues in Geo-RBD calibrations for foundations. In: *GeoCongress 2006: Geotechnical engineering in the information technology age*, 1-6, [https://doi.org/10.1061/40803\(187\)197](https://doi.org/10.1061/40803(187)197).
- Lane, P.A. & Griffiths, D.V. (2000). Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *J Geotech Geoenviron Eng*, 126(5), 443, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(443\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(443)).
- Ma, H. & Chi, F. (2016). Major technologies for safe construction of high earth-rockfill dams. *Engineering*, 2(4), 498-509.
- Mansuri, B., Salmasi, F. & Oghati, B. (2014). Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dam. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, 1165-1173.
- Memarian, S., Ahadiyan, J. & Karimi, H.R. (2023). Assessment of vertical pile reinforcement effect on behavior of foundations placed on Slopes: An experimental and numerical study, *Ain Shams Geotech*, 34, 81–91.
- Calamak, M., Yilmaz, A.N. & Yanmaz, A.M. (2018). Performance evaluation of internal drains of earthen dams. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(6), 04018085, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001232](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001232).
- Combelle, J., Goube, A., Llopis, N. & Paccard, M. (1985). Measures to improve the safety of hydraulic structures in dams (in French). *Trans 15th Int Congr Large Dams, Lausanne*, Q59 R46.
- Cornell, C.A. & Vanmarcke, E.H. (1969). The major influences on seismic risk. In: *Proceedings of the Fourth World Conference on earthquake engineering*, Santiago, Chile.
- Einstein, H.H. & Baecher, G.B. (1983). Probabilistic and statistical methods in engineering geology: Specific methods and examples part I: Exploration. *Rock mechanics and rock engineering*, 16, 39-72.
- Environment Agency (2017a). Guide to drawdown capacity for reservoir safety and emergency planning. Vol. 1, Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH.
- Environment Agency (2017b). Guide to drawdown capacity for reservoir safety and emergency planning. Vol. 2, Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH.
- Eslamian, M.B.S. & Hajiannia, G.S.A. (2021). 2D and 3D Modeling of Transient Seepage from Earth Dams Thorough Finite Element Model (Case Study: Kordaliya Dam). *Water Resources*, 14(48), 86-97.
- Faridmehr, I., YazdaniPour, M.R., Jokar, M.J. & Ozbakkaloglu, T. (2019). Construction and monitoring of cement/bentonite cutoff walls: case study of Karkheh Dam, Iran. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 41(4), 184-199.
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). An overview of unsaturated soil behavior. Reprinted from UNSATURATED SOILS, Sponsored by the Geotechnical Engineering Division/ASCE, Held October 24-28, 1993, Dallas, Texas.
- Fredlund, M.D. (2000). The role of unsaturated soil property functions in the practice of unsaturated soil mechanics, Doctoral dissertation, University of Saskatchewan.
- Gao, X., Liu, H., Zhang, W., Wang, W. & Wang, Z. (2019). Influences of reservoir water level drawdown on slope stability and reliability analysis. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 13(2), 145-153.
- Gosden, J., Hart, D. & Dutton, T. (2014). Guide to drawdown capacity for reservoir safety and emergency planning. *Dams Reserv*, 24, 134–135.

Journal of Environmental Science and Technology, 16, 5871-5880.

Sica, S., Pagano, L. & Rotili, F. (2019). Rapid drawdown on earth dam stability after a strong earthquake. *Comput Geotech*, 116, 103187, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103187>.

Song, K., Yan, E., Zhang, G., Lu, S. & Yi, Q. (2015). Effect of hydraulic properties of soil and fluctuation velocity of reservoir water on landslide stability. *Environ Earth Sci*, 74, 5319-5329.

Teimouri, A.B.B. & Khalkhali, A.B. (2018). Stability control of Narmab Dam and sensitivity analysis of reliability coefficients. *Civil Engineering Journal*, 4(9), 2197-2209.

USACE. (2016). Design criteria for dam and lake projects, Part 220. In: U.S. Corps of Engineers – Department of the Army, editor. Title 33 - Navig. waters. 33 CFR 220, Washington, DC: United States Corps of Engineers.

USBR (1990). Criteria and guidelines for evacuating storage reservoirs and sizing of low-level outlet works. ACER TECHN MEMORANDUM No. 3, Denver, Colorado.

Varde, P.V. & Pecht, M.G. (2018). Risk-Based Engineering: An Integrated Approach to Complex Systems--Special Reference to Nuclear Plants. Springer Singapore.

Water and Electricity Organization of Khuzestan Province. (2010). Water resource planning studies (Final Report), The first stage of the Seydon Reservoir Dam project.

Engineering Journal, 14(12), 102233, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102233>.

Nayebzadeh, R. & Mohammadi, M. (2011). The effect of impervious clay core shape on the stability of embankment dams. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 627-635.

Nouri, S. & Nohani, E. (2014). Numerical study of flow patterns in lateral intakes upstream and downstream (case study: Gotvand diversion Dam). *Advances in Environmental Biology*, 8(21), 1202-1208.

Pham, H.Q. (2001). An engineering model of hysteresis for soil-water characteristic curves. Doctoral dissertation, University of Saskatchewan.

Phoon, K.K. & Kulhawy, F.H. (2008). Serviceability limits state reliability-based design. In: Reliability-based Design in Geotechnical Engineering, 356-396, CRC Press.

Pinyol, N.M., Alonso, E.E. & Olivella, S. (2008). Rapid drawdown in slopes and embankments. *Water Resour Res*, 44(5), <https://doi.org/10.1029/2007WR006525>.

Prentice, J. (2005). Minimum discharge capacity of impounding reservoirs – Northumbria Water's experience and results capital spend. *Dams Reserv*, 15(1), 17-8.

Salmasi, F. & Mansuri, B. (2014). Effect of homogeneous earth dam hydraulic conductivity ratio (K_x/K_y) with horizontal drain on seepage. *Indian Geotechnical Journal*, 44, 322-328.

Shole, D.G. & Belayneh, M.Z. (2019). The effect of side slope and clay core shape on the stability of embankment dam: Southern Ethiopia. *International*

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

