



Sensitivity analysis for uncertainty quantification in earth dams modeling (Case study: Maku dam)

Behzad Shakouri¹ | Mirali Mohammadi² | Mir Jafar Sadegh Safari³

1. Water & Hydraulic Structures Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Eng., Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: b.shakouri@urmia.ac.ir
2. Corresponding Author, Civil Engineering Hydraulics & Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Iran. E-mail: m.mohammadi@urmia.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Yaşar University, Izmir, Turkey. E-mail: jafar.safari@yasar.edu.tr

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 7 June 2023

Received in revised form

15 September 2023

Accepted 4 October 2023

Published online 14 March 2024

Keywords:

Sensitivity analysis

Earth dam

Uncertainty quantification

Tornado diagram

ABSTRACT

Due to the existence of various uncertainties in the materials and modeling of these structures, the quantification of these uncertainties requires sensitivity analysis and reducing the number of variable parameters to reduce cost and time in modeling. In this research, numerical analysis of Maku dam located in West Azerbaijan province which is considered as a case study is performed using FLAC2D software and the static response is obtained. The effect of construction layers and the amount and shape of contours of stress and displacement were compared and validated with previous researches. The 49 random variables (RVs) (of materials properties in the zones of the core, shell, filter, drainage, alluvium and bedrock) was considered. By performing sensitivity analysis and using the Tornado diagram, the number of variable parameters is reduced and 18 important RVs were identified for the modeling and analysis of the earth dam. The results showed that altering the dry density (γ_d) of the shell causes a change of about 8% and altering the Poisson's ratio (ν) and also the modulus of elasticity (E) of the core leads to a change of about 7% in earth dams' response. Finally, parameters of dry density (γ_d), Poisson's ratio (ν), modulus of elasticity (E) and internal friction angle (ϕ) were identified as more sensitive parameters that have the greatest impact on the response of earth dams.

Cite this article: Shakouri, B., Mohammadi, M., & Sadegh Safari, M. J. (2024). Sensitivity analysis for uncertainty quantification in earth dams modeling (Case study: Maku dam). *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (1), 75-90. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.360452.1084>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.360452.1084>

Publisher: The University of Tehran Press.



تحلیل حساسیت برای کمی‌سازی عدم قطعیت در مدل‌سازی سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد ماکو)

بهزاد شکوری^۱ | میرعلی محمدی^۲ | میرجعفر صادق صفری^۳

۱. گروه مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: b.shakouri@urmia.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.mohammadi@urmia.ac.ir
۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاشار، ازمیر، ترکیه. رایانامه: jafar.safari@yasar.edu.tr

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

کلیدواژه‌ها:

تحلیل حساسیت

سد خاکی

کمی‌سازی عدم قطعیت

نمودار Tornado

به‌علت وجود عدم قطعیت‌های گوناگون در مشخصات مصالح و مدل‌سازی سدهای خاکی، کمی‌سازی این عدم قطعیت‌ها نیازمند تحلیل حساسیت و کاهش تعداد پارامترهای متغیر برای کاهش هزینه و زمان در مدل‌سازی امری بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش، تحلیل عددی سد خاکی ماکو واقع در استان آذربایجان غربی به‌عنوان مطالعه موردی، با نرم‌افزار FLAC2D صورت گرفته و پاسخ استاتیکی به‌دست آمد. اثر لایه‌های ساخت و مقدار و شکل خطوط هم‌تراز تنش و جابه‌جایی با پژوهش‌های قبلی مقایسه و اعتبارسنجی گردید. تعداد ۴۹ متغیر تصادفی (از مشخصات مصالح در نواحی هسته، پوسته، فیلتر، زه‌کش، پی آبرفتی و سنگ بستر) در نظر گرفته شد. با انجام تحلیل حساسیت و با استفاده از نمودار Tornado، تعداد پارامترهای متغیر کاهش و ۱۸ متغیر تصادفی مهم در تحلیل سد خاکی شناسایی شدند. نتایج نشان داد که تغییرات چگالی خشک (γ_d) پوسته تغییر در حدود ۸ درصد و هم‌چنین تغییرات ضریب پواسون (ν) و مدول الاستیسیته (E) هسته تغییر در حدود ۷ درصد در پاسخ سد خاکی ایجاد می‌کنند. در نهایت، پارامترهای چگالی خشک (γ_d)، ضریب پواسون (ν)، مدول الاستیسیته (E) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) به‌ترتیب پارامترهای حساس‌تری شناسایی شدند که بر پاسخ سدهای خاکی بیش‌ترین تأثیر را می‌گذارند.

استناد: شکوری، بهزاد؛ محمدی، میرعلی و صادق صفری، میرجعفر (۱۴۰۳). تحلیل حساسیت برای کمی‌سازی عدم قطعیت در مدل‌سازی سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد ماکو). نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۱)، ۷۵-۹۰. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.360452.1084>



۱. مقدمه

برای ارزیابی جامع ایمنی سازه‌ای سدها، برنامه یکپارچه تخصصی در زمینه‌های مختلف مانند سازه، ژئوتکنیک، زلزله، هیدرولیک، هیدرولوژی و مهندسی مواد موردنیاز است (Hariri-Ardebili, 2018). امروزه با وجود توسعه امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، مدل‌سازی سدهای خاکی یکی از چالش‌برانگیزترین کارهایی است که نیازمند دانش مطلوب است. اگرچه نرم‌افزارها و مدل‌های رفتاری زیادی برای مدل‌سازی سدهای خاکی ارائه شده‌اند (Ahhbab *et al.*, 2021; Shakouri and Mohammadi, 2021)، اما مراحل مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل‌های ساخته‌شده نیازمند داده‌های ابزار دقیق و کنترل‌های کافی است (Hariri-Ardebili *et al.*, 2020). کنترل پاسخ‌ها و ایمنی سدهای خاکی، مستلزم کمی‌سازی عدم قطعیت‌های مصالح است که نیازمند تحلیل حساسیت و شناسایی پارامترهای مهم در ارزیابی این سازه‌ها است.

قابلیت اطمینان سازه‌ای کلاسیک براساس ارزیابی کمی احتمال تجاوز از حالت حدی (LS)، P_{LS} ، با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای ورودی است (Sørensen, 2004). به‌عنوان جایگزین، روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود؛ به‌عنوان مثال، شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) (Ditlevsen *et al.*, 1996). این روش، صریح بوده و براساس نظریه اعداد زیاد است. اشکال عمده آن، تعداد زیاد شبیه‌سازی برای به‌دست‌آوردن نتایج پایدار است که آن را برای تحلیل انتقالی سدها محدود می‌کند. پیدایش و ماهیت این روش‌ها در پژوهش‌های (Ditlevsen *et al.*, 1996) و (Melchers *et al.*, 2018) ارائه شده است که به‌جای آن، روش‌های کاهش واریانس مانند نمونه‌برداری فوق مکعب لاتین (LHS) (McKay *et al.*, 2000) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما این روش‌ها هم شبیه‌سازی‌های نسبتاً زیادی نیاز دارند (Hariri-Ardebili *et al.*, 2020).

Srivastava (2010) در پژوهشی به موضوع تحلیل قابلیت اطمینان در سدهای خاکی پرداختند. در این مطالعه نتایج تحلیل قابلیت اطمینان چهار مقطع سد خاکی احیا شده منتخب Chang, Tapar, Rudramata و Kaswati، در شرایط بارگذاری شبه‌استاتیکی، ارائه شد. مقایسه نتایج با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های دیگر تحلیل قابلیت اطمینان، شامل شبیه‌سازی‌های مونت کارلو (MCS) همراه با روش تعادل حدی، مبنایی برای بحث در مورد پایداری سدهای خاکی از نظر احتمالی فراهم نموده و نتایج تحلیل نشان داد که مقاطع سد خاکی در نظر گرفته شده قابل اطمینان هستند و انتظار می‌رود عملکرد مطلوبی داشته باشند. موضوع تحلیل عدم قطعیت و نظارت بر سد خاکی توسط Yang *et al.* (2014)، کنترل پایداری سد نرماب (استان گلستان) و تحلیل حساسیت ضرایب قابلیت اطمینان توسط Teimouri *et al.* (2018)، ارزیابی نشت سد خاکی با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط Boroomand *et al.* (2019)، تحلیل حساسیت مدل‌های فرسایش داخلی برای ایمنی سد توسط Neilsen *et al.* (2019)، تحلیل قابلیت اطمینان کارایی پایداری شیب سد خاکی با استفاده از روش تقویت گرادیان شدید توسط Wang *et al.* (2020)، و تحلیل قابلیت اطمینان و حساسیت مبتنی بر Kriging و کاربرد آن در پایداری یک سد خاکی توسط Guo *et al.* (2020) بررسی گردید. Liu (2019) تحلیل مبتنی بر قابلیت اطمینان سدهای خاکی همگن را انجام داد. نتایج حاصل از محاسبات قطعی^۳ و احتمالی^۴ نشان داد که سد مورد مطالعه بیش‌تر از حد مجاز خطر خرابی دارد. در محاسبه قابلیت اطمینان سیستم، مرزهای ساده به‌ویژه مرزهای بالایی دامنه وسیعی را می‌دهد. در ادامه مشخص گردید که طبقه‌بندی سطوح لغزش مختلف به گروه‌های متفاوت با توجه به هندسه و مصالح برای ساده‌سازی محاسبات مفید است. Boroomand *et al.* (2019) در پژوهشی به ارزیابی نشت سد خاکی البرز با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل SEEP/W براساس روش اجزای محدود پرداختند. در این مطالعه، از روش مونت کارلو (MC) برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی

خاک استفاده شد. نتایج نشان داد که عدم اطمینان در پارامترهای هیدرولیکی سد خاکی البرز قابل توجه است، بنابراین خطر در این سد مهم است. Kahot *et al.* (2019) تحلیل قابلیت اطمینان پایداری شیب در سدهای خاکی پس از تخلیه سریع را انجام داده و تأثیر آن بر پایداری سد با استفاده از روش پاسخ سطح و شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) را ارزیابی نمودند. در نهایت، یک فرمول طراحی به منظور محدود کردن احتمال خرابی مرتبط با پایداری شیب ارائه شد. Mouyeaux *et al.* (2019) با استفاده از یک رویکرد اجزای محدود تصادفی براساس داده‌های میدانی به تحلیل احتمالی فشار آب حفره‌ای یک سد خاکی پرداختند. آن‌ها تحلیل احتمالی فشارهای آب حفره‌ای براساس داده‌های میدانی برای نشان دادن نفوذپذیری با یک میدان تصادفی دو بعدی ایجاد شده از تحلیل آماری و زمین آماری را انجام دادند. در این مطالعه، تأثیر تغییر مکانی نفوذپذیری بر فشار آب حفره‌ای با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) بررسی گردید. Siacara *et al.* (2020) در پژوهشی به تحلیل قابلیت اطمینان سدهای خاکی با استفاده از کوپل مستقیم پرداخته و نشان دادند که چگونه تحلیل قابلیت اطمینان دقیق و کارآمد از تأسیسات ژئوتکنیک را می‌توان با کوپل مستقیم به نرم‌افزار ژئوتکنیک با تحلیل قابلیت اطمینان اعمال کرد. همچنین با استفاده از تحلیل حساسیت، مشخص شد که زاویه اصطکاک مؤثر (f_0) مهم‌ترین پارامتر ژئوتکنیکی نامشخص برای تعادل سد بوده و همبستگی بین خصوصیات مختلف ژئوتکنیکی نشان داد که از نظر شاخص‌های قابلیت اطمینان تعادل مرتبط هستند (King *et al.*, 2020). یک چارچوب شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) قطعی برای ارزیابی کنترل جریان ایمنی سد ارائه نمودند. یک مطالعه موردی با نتایج حاصل از یک سناریوی نمونه ارائه شد تا نشان دهد چگونه می‌توان از چارچوب شبیه‌سازی برای تخمین پارامترهای حساسیت برای هر ترکیبی از حوادث شبیه‌سازی شده استفاده کرد. این رویکرد می‌تواند این رویدادهای نادر را به روشی کامل و سیستماتیک تحلیل کند و پوشش بهتری از فضای احتمال و همچنین بینش ارزشمندی راجع به آسیب‌پذیری‌های سیستم فراهم کند. Pouraminian *et al.* (2020) به ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل حساسیت سدهای بتنی وزنی با در نظر گرفتن عدم اطمینان در سطح آب مخزن و مصالح بدنه سد پرداختند. نتایج نشان داد، مدول الاستیسیته بتن مؤثرترین پارامتر در پاسخ به تغییر شکل افقی تاج سد و چگالی بتن و ارتفاع فشار هیدرواستاتیک بالادست مؤثرترین پارامترها هستند و ضریب پواسون پارامتر ناچیزی در پاسخ سد به دست آمد. برای اطمینان از ایمنی بدنه سد تحت بار معمول، از جمله وزن سد و فشار هیدرواستاتیک بالادست، شاخص اطمینان (RI)^۵ با شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) به دست آمد.

نتایج کمی‌سازی عدم قطعیت را می‌توان در داده‌های استخراج شده مصنوعی مدل‌سازی (به‌ویژه روش اجزای محدود (FEM)^۶ و روش تفاضل محدود (FDM)^۷) گنجانده. هدف اصلی این مجموعه از برنامه‌ها تولید برخی مدل‌های جایگزین وابسته به ساختار با استفاده از تعداد کمی شبیه‌سازی اولیه است. این هدف می‌تواند بسیار ارزشمند باشد، زیرا بیش‌تر مسائل مهندسی سد در طبیعت، مسئله‌ای چندفیزیکی است که باعث هزینه‌بر و وقت‌گیر شدن آن‌ها می‌شود. پرداختن به شبیه‌سازی‌های تصادفی بسیار جذاب است، زیرا استفاده از رویکردهای احتمالی را محدود می‌کند و هم‌زمان به دلیل تعداد کم‌تر شبیه‌سازی، سوگیری آن‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، هدف تحلیل احتمالی تمرکز بر مشخصات و مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در ارزیابی امان محدود احتمالی یا تفاضل محدود سدهای خاکی است. همان‌طور که Der Kiureghian *et al.* (2009) بیان کردند، این را می‌توان در مقوله عدم قطعیت مبتنی بر دانش^۸ در نظر گرفت. مدل قابلیت اطمینان سازه مرسوم براساس ارزیابی کمی احتمال بیش از حد حالت حدی (LS)، PLS، به دلیل وجود عدم قطعیت در پارامترهای ورودی ایجاد شده است (Sørensen, 2004).

در طی دهه گذشته، موضوع مهمی که در مدل‌سازی سدها و به‌ویژه سدهای خاکی مطرح است، کمی‌سازی عدم

قطعیت^۹، تحلیل حساسیت^{۱۰} و قابلیت اطمینان سازه‌ای^{۱۱} به دلیل وجود عدم قطعیت‌ها در مشخصات مصالح، نتایج آزمایش‌ها، روش اجرا و ... می‌باشد. با بررسی منابع موجود در زمینه پژوهش حاضر، مشخص شد که مطالعات محدودی در زمینه کمی‌سازی عدم قطعیت و تحلیل حساسیت سدهای خاکی انجام شده است و مطالعات انجام‌گرفته، تعداد متغیرهای تصادفی^{۱۲} محدودی را لحاظ نموده‌اند. بنابراین، پژوهش حاضر به بررسی موردی کمی‌سازی عدم قطعیت و تحلیل حساسیت سد خاکی ماکو می‌پردازد که برای اولین بار، تعداد بالای مشخصات مصالح برای نواحی مختلف سد خاکی به‌عنوان متغیرهای تصادفی (۴۹ متغیر) در نظر گرفته شد. سپس، با استفاده از تحلیل حساسیت (نمودار Tornado)، پارامترهای مهم در پاسخ سدهای خاکی شناسایی گردید.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تحلیل رفتار سدهای خاکی با استفاده از مدل FDM در نرم‌افزار FLAC2D انجام شده است که معادلات را با استفاده از روش تفاضل محدود گسسته‌سازی می‌کند (Itasca, 2019). مراحل اصلی انجام این پژوهش، شامل تحلیل عددی قطعی، تحلیل حساسیت با استفاده از نمودارهای Tornado^{۱۳} و کاهش متغیرهای تصادفی می‌باشد.

۱.۲. شرح مطالعه موردی

مطالعه موردی این پژوهش، سد خاکی ماکو واقع در شمال غرب ایران است. این سد حدود ۷۸ متر ارتفاع و ۲۱۰ متر طول تاج دارد که بر روی پایه آبرفتی از سنگ آهک و مواد شیست بر روی سنگ بستر ساخته شده است. تاج سد در ارتفاع ۱۶۹۹ متری قرار دارد. هم‌چنین حداکثر طول بدنه سد در پی ۳۵۰ متر است. در شکل (۱) مقطع عمومی سد ماکو و مش بندی در نرم‌افزار FLAC2D نشان داده شده است.

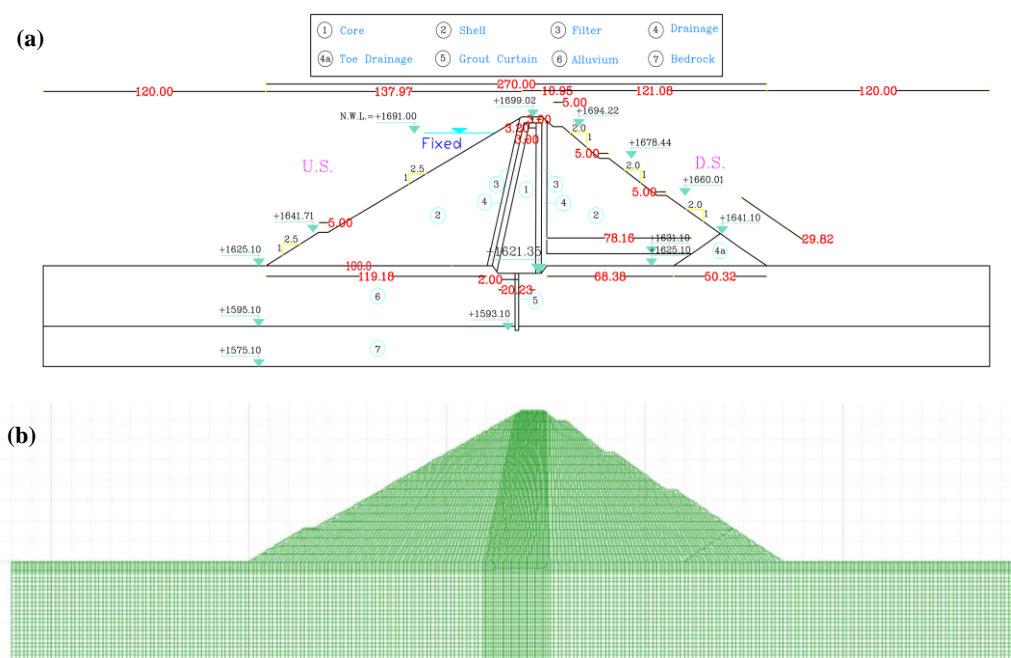


Figure 1. a) General cross section of Maku dam, b) FLAC2D mesh

۲.۲. معادلات حاکم بر جریان

معادله دیفرانسیل تراوش را می‌توان از ترکیب فرمول دارسی و معادله دیفرانسیل پیوستگی به‌عنوان معادله (۱) به‌دست آورد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_{(x,y,t)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_{(x,y,t)}}{\partial x} \right) + Q = \frac{d\theta_v}{dt} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، $h_{(x,y,t)}$ هد کل^{۱۴} در یک نقطه با مختصات (x, y) ، θ_v مقدار آب حجمی و k_x و k_y هدایت هیدرولیکی خاک به‌ترتیب در جهات افقی و عمودی است و Q میزان دبی تولیدی در واحد سطح عنصر است ($Q < 0$ در صورت وجود زه‌کش) (Harr, 1991). در حالت تراوش پایدار و برای خاک همسانگرد (یعنی $k_x = k_y$) و عدم وجود زه‌کش، رابطه (۱) به رابطه (۲) ساده شده است:

$$\left(\frac{\partial^2 h_{(x,y)}}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h_{(x,y)}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

این معادله دیفرانسیل را می‌توان برای شرایط مرزی مناسب با روش‌های FDM و FEM حل کرد (Cundall, 1976; Zienkiewicz *et al.*, 1977). در این پژوهش، برای حل معادله لاپلاس که بر تراوش پایدار در محیط‌های متخلخل حاکم است، نرم‌افزار FLAC2D بر پایه FDM به‌کار گرفته شد (Itasca, 2019; Shahkarami *et al.*, 2021; Shahkarami *et al.*, 2022; Shayan *et al.*, 2013; Adami *et al.*, 2022). هم‌چنین برای مطالعه بیش‌تر در مورد موضوع حل معادلات جریان در سازه‌های هیدرولیکی می‌توان به (Bagherzadeh *et al.*, 2022) و (Daneshfaraz *et al.*, 2023) مراجعه کرد.

۳.۲. هندسه و مش‌بندی

هندسه ساده‌سازی شده سد ماکو به‌عنوان مدل آزمایشی^{۱۵} در نظر گرفته شد و با استفاده از FLAC2D به‌عنوان نرم‌افزار FDM و با به‌کارگیری مدل رفتاری موهر-کولمب^{۱۶} مدل‌سازی شد. ابتدا، از عناصر چهار گرهی در مدل‌های عددی استفاده گردید. در مرحله دوم، مدل‌های عددی متفاوت با اندازه‌های مش غیریکسان برای دستیابی به اندازه مش بهینه (با سعی و خطا و رعایت استانداردهای نرم‌افزار FLAC2D) دارای تعداد کل برابر ۲۷۶۴۲ مش، مورد مطالعه قرار گرفتند. در سطح تماس هسته رسی، فونداسیون، پرده آب‌بند و سنگ بستر اجزای رابطه^{۱۷} نیز برای دستیابی به پیکربندی بهتر مدل به‌کار گرفته شد. استفاده از اجزای رابط باعث تغییر شکل برشی به‌علت لغزش دیوار نسبت به محیط اطراف می‌شود (Itasca, 2019). مصالح سد خاکی شامل یک ناحیه هسته رسی با نفوذپذیری کم، نواحی پوسته‌های بالادست و پایین‌دست شنی و هم‌چنین فیلتر ریز، فیلتر درشت (زه‌کش) و پنجه زه‌کش می‌باشد. نواحی مختلف بدنه سد و پی آن و هم‌چنین مش‌بندی سد در شکل (۱) نشان داده شده است. برای دستیابی به شرایط موجود قبل از احداث سد، به‌عنوان شرایط مرزی، جابه‌جایی افقی در کناره‌ها و جابه‌جایی افقی و قائم در کف بستر ثابت فرض می‌گردد و مدل به تعادل اولیه می‌رسد. سپس، با همین شرایط مرزی، لایه‌های ساخت سد ایجاد می‌گردد. در انتها در حالت تراوش پایدار، با حفظ شرایط مرزی قبلی، شرایط اولیه شامل بار آبی (سطح آب نرمال؛ N.W.L.) در بالادست و بار آبی معادل صفر در محل زه‌کش کف پایین‌دست اعمال و تحلیل انجام می‌پذیرد.

۴.۲. مشخصات مصالح و مدل رفتاری

در تحلیل FEM و FDM باید یک مدل سازنده مناسب برای هر قسمت از سد انتخاب شود تا رابطه بین تنش‌ها و کرنش‌ها شبیه‌سازی شود. مناطق مختلف یک سد خاکی معمولاً از مواد مختلف خاکی ساخته می‌شوند که پاسخ تنش/کرنش می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد. علاوه بر این، مقادیر مناسبی باید به پارامترهای موجود در مدل سازنده انتخاب‌شده برای هر بخش سد اختصاص داده شود تا بتوان ویژگی‌های مهم رفتار خاک را به تصویر کشید

(Vahdati *et al.*, 2013). همان‌طور که، هیچ مدل سازنده‌ای نمی‌تواند به‌طور کامل رفتار پیچیده خاک را در تمام موقعیت‌های بارگذاری توصیف کند. بنابراین، مدل‌های سازنده محدودیت‌هایی برای کاربرد خود دارند. همه مدل‌ها مزایا و محدودیت‌های خاصی دارند که به‌شدت به کاربردهای خاص آن‌ها بستگی دارد. انتخاب یک مدل سازنده مناسب به دقت موردنیاز برای تحلیل، نوع شرایط بارگذاری و رفتار زه‌کشی نشده یا زه‌کشی شده و غیره بستگی دارد (Vahdati, 2014). معیار شکست موهر-کولمب نشان‌دهنده پوشش خطی است که از نمودار مقاومت برشی یک مصالح در مقابل تنش نرمال اعمال شده به‌دست می‌آید. این رابطه به‌صورت زیر بیان می‌شود (رابطه ۳):

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، τ مقاومت برشی (یعنی برش در هنگام شکست)، c چسبندگی، σ_n تنش نرمال در صفحه برشی، و ϕ زاویه اصطکاک داخلی (phi) است (Itasca, 2019).

رفتار ساختاری پیوستار معادل با رابطه هذلولی وابسته به تنش محدود ارائه شده توسط Duncan *et al.* (1970) با معیار شکست موهر-کولمب در تحلیل عددی نشان داده شده است. در این مدل، رفتار کشسانی^{۱۸} خاک با مدول حجمی بالک^{۱۹} (B) و مدول برشی^{۲۰} (G) و مقاومت خاک با چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) تعریف می‌شود.

۵.۲. تجزیه و تحلیل حساسیت قطعی (نمودار Tornado)

پارامترهای مورد مطالعه به ترتیب نزولی در نمودار Tornado قرار می‌گیرند که بیش‌ترین تأثیر را در بالا و کم‌ترین تأثیر را در پایین دارد. برای ترسیم نمودار Tornado، پارامترهای مورد ارزیابی انتخاب می‌شوند و مطالعات متعدد با تغییر تنها یک پارامتر در هر سناریو انجام می‌شود. یک مقدار حداکثر و یک حداقل به‌عنوان کران‌های بالا و پایین در هنگام بررسی اثر یک پارامتر استفاده می‌شود. مقادیر میانه پارامترهای دیگر برای تأکید بر تأثیر پارامتر مورد مطالعه استفاده می‌شود. میزان نوسان^{۲۱} به‌عنوان تفاوت بین نتایج به‌دست‌آمده برای کران بالایی و پایینی یک پارامتر تعریف می‌شود. میزان نوسان تأثیر متغیر تصادفی را با نمایش نتایج متنوع نشان می‌دهد. نمودارهای Tornado با مرتب‌کردن نوسان‌های هر پارامتر به ترتیب نزولی، با بزرگ‌ترین نوسان در بالا ایجاد می‌شوند (Binici *et al.*, 2007; Yücel, 2013).

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تحلیل عددی

یک تحلیل قطعی برای بررسی اثرات لایه‌های ساخت در سناریوهای مختلف براساس توصیه Jafari *et al.* (2014) و Zomorodian *et al.* (2006) انجام شد. پس از پایان مرحله ساخت، بار آبی (سطح آب نرمال؛ N.W.L.)^{۲۲} بر روی مدل انتخابی به‌عنوان مرحله اولین آبیگری اعمال گردید و سپس با گزارش علی سد و نتایج موجود در پژوهش‌های انجام‌گرفته بر روی سد ماکو و سدهای مشابه دیگر اعتبارسنجی شد (Mohammadi *et al.*, 2010; Nayebzadeh *et al.*, 2011; Rashidi *et al.*, 2017; Shakouri *et al.*, 2020). مشخصات مدل قطعی در جدول (۱) نشان داده شده است.

همان‌طور که در پژوهش‌های گذشته ذکر شده است، نشست خاک‌ریزی (جابه‌جایی عمودی) با توجه به تغییر در تعداد لایه‌های ساخت، الگوهای متفاوتی را نشان می‌دهد. اگر تعداد لایه‌های ساخت بیش از ۱۰ باشد، تغییرات در جابه‌جایی عمودی با تعداد لایه‌ها ناچیز است (Jafari *et al.*, 2014; Zomorodian *et al.*, 2006). برای ارزیابی اثر لایه‌های ساخت، یک، سه، نه، ۱۰ و ۱۵ لایه در نظر گرفته شد. با توجه به تحلیل، منحنی‌های هم‌تراز^{۲۳} و مقادیر حداکثر برای جابه‌جایی‌ها ترسیم شده و نتایج در جدول (۲) ارائه شده است. با مقایسه نتایج و هم‌چنین در نظر گرفتن شکل (۲) و جدول (۲)،

مشاهده می‌شود که تغییرات در جابه‌جایی‌ها مشهود است و نه لایه ساخت باید به‌عنوان لایه ساخت بهینه برای مدل‌سازی در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن مطالعات *Rashidi et al.* (2017)، *Nayebzadeh et al.* (2011) و *Ziyayi* (2013) این نتیجه حاصل می‌شود که الگوهای منحنی‌های هم‌تراز و مقادیر پاسخ‌ها با داده‌های ابزار دقیق سد ماکو و تحلیل عددی و همچنین نتایج سایر سدها مطابقت خوبی دارد. در نتایج مدل‌سازی باید به این موضوع توجه داشت که تعداد لایه‌های ساخت تغییر مکان‌ها را تغییر می‌دهد و در این پژوهش این موضوع مورد توجه و ارزیابی قرار گرفت.

Table 1. Deterministic model's materials properties (*Shakouri et al.*, 2022)

ID	Zone	Dry Density kg/m^3	Elasticity Pa	Poisson's Ratio	Cohesion Pa	Friction $Degree$	Porosity	Hydraulic Conductivity m/s
1	Core	1,500	15E6	0.30	25E3	22	0.50	1.15E-8
2	Shell	1,600	125E6	0.25	200	40	0.30	7.00E-4
3	Filter	1,500	80E6	0.25	200	30	0.30	2.00E-4
4	Drainage	1,800	85E6	0.25	200	35	0.30	1.50E-3
4a	Toe Drainage	1,800	85E6	0.25	5E3	35	0.30	1.00E-2
5	Grout Curtain	1,800	850E6	0.20	400E3	45	0.50	1.00E-9
6	Alluvium	1,800	450E6	0.25	35E3	33	0.45	1.50E-7
7	Bedrock	1,900	4,500E6	0.33	100E3	45	0.50	2.00E-8

به دلیل اثر لایه ساخت (با در نظر گرفتن یک لایه)، حداکثر جابه‌جایی قائم (Ydisp.) در *Rashidi et al.* (2017) بیش‌تر و حدود ۲ درصد ارتفاع سد خاکی مربوطه است، اما در این پژوهش این مقدار زیر ۱ درصد است. همچنین لازم به ذکر است که طبق ادبیات پیشینه، این مقدار باید کم‌تر از ۲ درصد ارتفاع سد خاکی باشد و موقعیت وقوع ۰/۵ تا ۰/۷ ارتفاع خاک‌ریزی باشد (*Kutzner, 2018*). در انتها حداکثر جابه‌جایی افقی (Xdisp.) در محدوده مجاز قرار دارد و همچنین لایه‌های ساخت بر تنش‌های افقی و قائم (Syy و Sxx) تأثیر قابل‌توجهی ندارند.

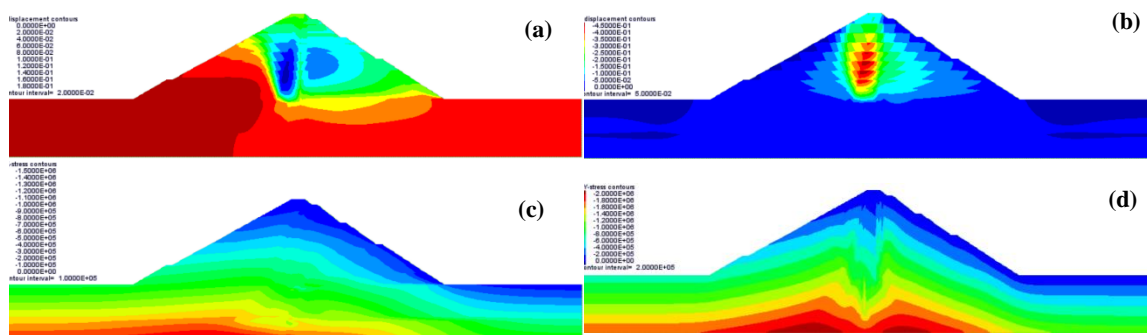


Figure 2. (a) Total Xdisp. (b) Total Ydisp. (c) Sxx (d) Syy contours for first impoundment stage

Table 2. Range of the dam body's displacements for different layers of construction

Number of construction layers	End of construction stage		End of first impoundment stage			
	Xdisp. (cm)	Ydisp. (cm)	Xdisp. (cm)	Total Xdisp. (cm)	Ydisp. (cm)	Total Ydisp. (cm)
1	-6~4	-70~0	0~17	-1~17	-6~8	-70~0
3	-5~4.5	-55~0	0~16	0~18	-5~7	-60~0
9	-3.5~4	-45~0	0~17	0~18	-5~7	-45~0
10	-3.5~4	-44.5~0	0~17	0~18	-5~7	-44.5~0
15	-3.5~4	-44.3~0	0~17	0~18	-5~7	-44.3~0

در نهایت، شکل (۳) نمودار خط فریاتیکی عبوری از سد و خطوط هم‌تراز فشار آب حفره‌ای در سد و پی برای مرحله اولین آبیاری را نشان می‌دهد که براساس مطالعات *Rashidi et al.* (2017)، *Shahkarami et al.* (2021) و *Shahkarami et al.* (2022) می‌توان دریافت که شکل کنتورها با فیزیک مسئله مطابقت دارد.

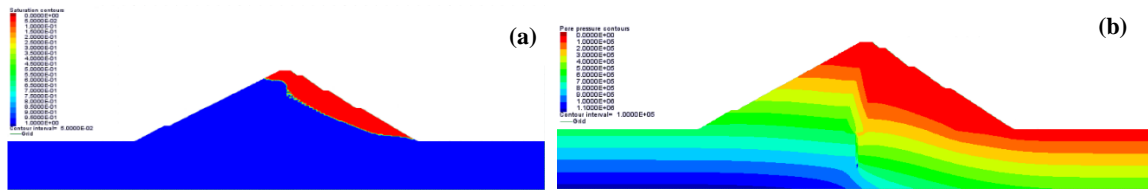


Figure 3. (a) Phreatic line diagram (b) Contours of pore water pressure for first impoundment stage

۲.۳. تحلیل حساسیت قطعی (نمودار Tornado)

از آنجایی که مدل‌سازی سدهای خاکی با عدم قطعیت‌ها نیازمند داشتن تعداد زیادی داده است، لذا تولید نمونه‌های تصادفی داده‌ها مورد نیاز است. برای ساده‌سازی این مدل‌ها، انجام تحلیل حساسیت امری ضروری به نظر می‌رسد. برای این منظور، برای مشخصات مصالح، تحلیل حساسیت انجام شد و پارامترهای حساس با توجه به نمودارهای Tornado انتخاب شدند. برای انجام تحلیل حساسیت، مدل قطعی و ۴۹ متغیر تصادفی با کران بالا و پایین در نظر گرفته شد (به عبارت دیگر، ۹۹ مدل؛ ۱+۲×۴۹). مشخصات این مدل‌ها در جدول‌های (۱)، (۳) و (۴) آورده شده است. برای به دست آوردن مشخصات مصالح شامل کران‌های بالا و پایین، مقادیر میانگین، ضریب تغییرات^{۲۴} و دیگر ویژگی آن‌ها مرور ادبیات انجام شده است (Babu *et al.*, 2007; Baecher *et al.*, 2005; Guo, 2020; Look, 2007; Mouyeaux *et al.*, 2018; Phoon *et al.*, 1999; Siacara *et al.*, 2020). نشان‌دادن تأثیر هر پارامتر به طور جداگانه همان‌طور که توسط Binici *et al.* (2007)، Yücel (2013) و Hariri- Ardebili and Sattar (2023) توضیح داده شده است، استفاده و با توجه به نمودارهای Tornado، حساس‌ترین پارامترهایی که بر پاسخ‌ها (S_{yy} , S_{xx} , Y_{disp} , X_{disp}) تأثیر می‌گذارند، استخراج گردید و به عنوان متغیرهای تصادفی نهایی انتخاب شدند (۱۸ متغیر تصادفی از ۴۹ متغیر تصادفی، همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است).

Table 3. Selected RVs for uncertainty quantification (Shakouri *et al.*, 2022)

RVs	Zone/Property	Symbol	Unit	Mean	CoV	Truncation
1	Core/Dry Density	$\gamma_{d,c}$	kg/m ³	1,500	0.07	[1,300 1,800]
2	Shell/Dry Density	$\gamma_{d,s}$	kg/m ³	1,600	0.07	[1,400 1,900]
3	Filter/Dry Density	$\gamma_{d,f}$	kg/m ³	1,500	0.07	[1,300 1,900]
4	Drainage/Dry Density	$\gamma_{d,d}$	kg/m ³	1,800	0.07	[1,400 2,000]
5	Core/Elasticity	E_c	Pa	15E6	0.40	[8E6 50E6]
6	Shell/Elasticity	E_s	Pa	125E6	0.40	[40E6 200E6]
7	Drainage/Elasticity	E_d	Pa	85E6	0.40	[40E6 200E6]
8	Alluvium/Elasticity	E_a	Pa	450E6	0.40	[200E6 2,000E6]
9	Core/Poisson's Ratio	ν_c	-	0.30	0.14	[0.25 0.35]
10	Shell/Poisson's Ratio	ν_s	-	0.25	0.14	[0.20 0.30]
11	Core/Cohesion	C_c	Pa	25E3	0.30	[10E3 100E3]
12	Shell/Friction Angle	ϕ_s	Degree	40	0.20	[36 45]
13	Filter/Friction Angle	ϕ_f	Degree	30	0.20	[27 36]
14	Drainage/Friction Angle	ϕ_d	Degree	35	0.20	[30 40]
15	Alluvium/Friction Angle	ϕ_a	Degree	33	0.20	[20 46]
16	Core/Porosity	n_c	-	0.50	0.30	[0.35 0.60]
17	Shell/Porosity	n_s	-	0.30	0.30	[0.25 0.45]
18	Drainage/Hydraulic Conductivity	K_d	m/s	1.50E-3	0.80	[5.00E-5 5.00E-3]

برای این هدف، پارامترهایی با تغییر بیش از ۱ درصد به عنوان یک پارامتر حساس انتخاب گردید (با در نظر گرفتن حداقل یک متغیر تصادفی برای مشخصات مصالح مختلف) (Hariri-Ardebili and Sattar, 2023). با توجه به نمودارهای Tornado نشان داده شده در شکل (۴)، می توان دریافت که چگالی خشک (γ_d) پوسته تغییری در حدود ۸ درصد در پاسخ سد خاکی ایجاد می کند و از این حیث، مهم ترین پارامتر حساس به شمار می رود. همچنین، مشاهده می شود که ضریب پواسون (ν) و مدول الاستیسیته (E) هسته از دیگر پارامترهای مهم حساس هستند که تغییری در حدود ۷ درصد در پاسخ سد خاکی ایجاد می کنند. در نهایت، این شکل بیانگر این است که در حالت کلی، چگالی خشک (γ_d)، ضریب پواسون (ν)، مدول الاستیسیته (E) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) به ترتیب پارامترهای حساس تری هستند. این نتایج را می توان با توجه به پژوهش های گذشته مقایسه نمود که برای نمونه، با توجه به Shahzadi *et al.* (2021)، مدول برشی (G) که تابعی از مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) است، حساس ترین پارامترها در رفتار سد خاکی هستند.

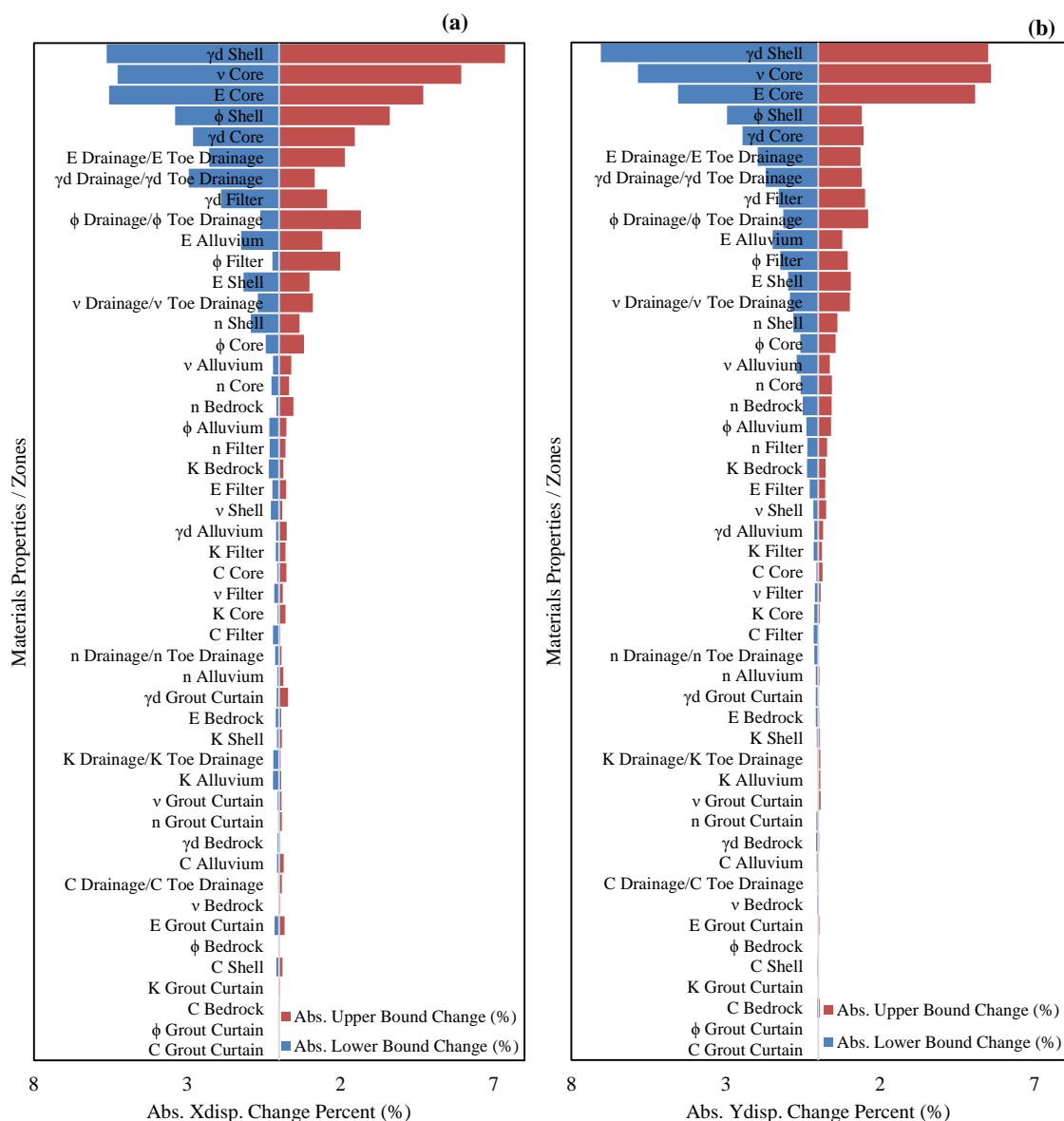
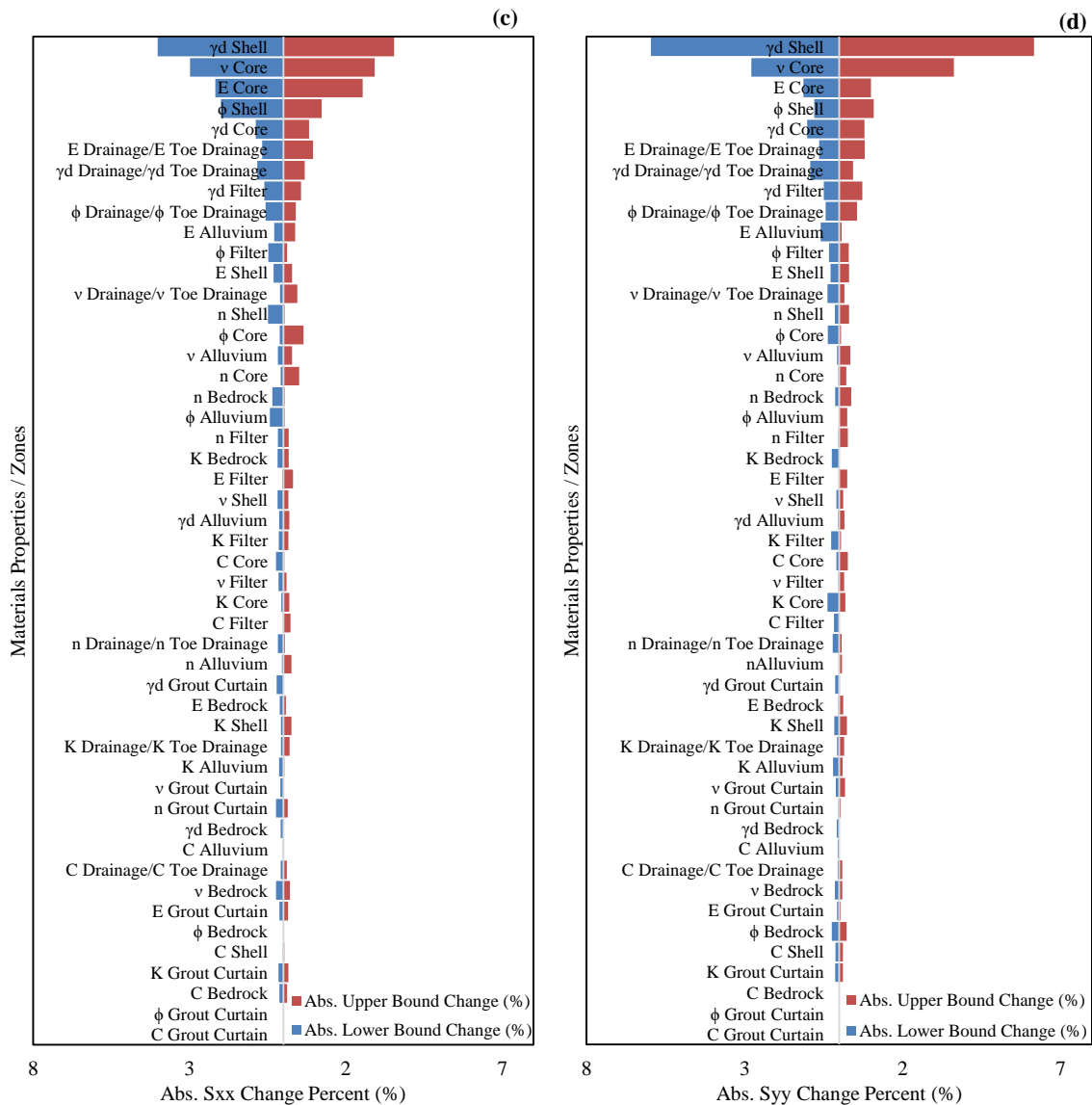


Figure 4. Tornado diagrams for selecting sensitive parameters (a) Xdisp. (b) Ydisp. (c) Sxx (d) Syy



Continued figure 4. Tornado diagrams for selecting sensitive parameters (a) Xdisp. (b) Ydisp. (c) Sxx (d) Syy

هم‌چنین دیگر متغیرهای تصادفی در نظر گرفته‌شده برای تحلیل حساسیت، در جدول (۴) آورده شده است. با توجه به شکل (۴)، این پارامترها تأثیر آن‌چنانی بر پاسخ سد نداشته‌اند و می‌توان با حذف این پارامترها از متغیرهای تصادفی و لحاظ نمودن مقدار میانگین (قطعی) برای آن‌ها، از میزان محاسبات کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها کاست.

۳.۳ کاربرد نتایج تحلیل حساسیت در کمی‌سازی عدم قطعیت

تحلیل حساسیت یک روش تحلیلی است که برای بررسی تأثیر تغییرات در پارامترهای مختلف بر یک سیستم، مدل یا پروژه استفاده می‌شود. در این روش، پارامترهای مختلف به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده و تأثیر آن‌ها بر خروجی سیستم موردبررسی قابل اندازه‌گیری است. با استفاده از تحلیل حساسیت، پژوهش‌گران و تصمیم‌گیران قادر خواهند بود، به‌صورت دقیق‌تر پارامترهای کلیدی را شناسایی کنند و بهبود عملکرد سامانه را با اصلاح آن‌ها دست یابند. هم‌چنین، با

استفاده از این روش، پژوهش‌گران قادر خواهند بود به صورت دقیق‌تر پارامترهای کلیدی را شناسایی کنند و بهبود عملکرد سامانه خود را با اصلاح آن‌ها دست یابند.

Table 4. Other RVs that are considered in sensitivity analysis (Shakouri *et al.*, 2023)

RVs	Zone/Property	Symbol	Unit	Mean	CoV	Truncation
1	Grout Curtain/Dry Density	$\gamma_{d,g}$	kg/m^3	1,800	0.07	[1,500 2,000]
2	Alluvium/Dry Density	$\gamma_{d,a}$	kg/m^3	1,800	0.07	[1,500 2,100]
3	Bedrock/Dry Density	$\gamma_{d,b}$	kg/m^3	1,900	0.07	[1,600 2,100]
4	Filter/Elasticity	E_f	Pa	80E6	0.40	[40E6 150E6]
5	Grout Curtain/Elasticity	E_g	Pa	850E6	0.40	[200E6 2,000E6]
6	Bedrock/Elasticity	E_b	Pa	4,500E6	0.40	[2,000E6 20,000E6]
7	Filter/Poisson's Ratio	ν_f	-	0.25	0.14	[0.20 0.30]
8	Drainage/Poisson's Ratio	ν_d	-	0.25	0.14	[0.20 0.34]
9	Grout Curtain/Poisson's Ratio	ν_g	-	0.20	0.14	[0.18 0.34]
10	Alluvium/Poisson's Ratio	ν_a	-	0.25	0.14	[0.20 0.34]
11	Bedrock/Poisson's Ratio	ν_b	-	0.33	0.14	[0.28 0.38]
12	Shell/Cohesion	C_s	Pa	200	0.30	[100 900]
13	Filter/Cohesion	C_f	Pa	200	0.30	[0 1E3]
14	Drainage/Cohesion	C_d	Pa	200	0.30	[0 1E3]
15	Grout Curtain/Cohesion	C_g	Pa	400E3	0.30	[100E3 600E3]
16	Alluvium/Cohesion	C_a	Pa	35E3	0.30	[20E3 100E3]
17	Bedrock/Cohesion	C_b	Pa	100E3	0.30	[50E3 600E3]
18	Core/Friction Angle	ϕ_c	Degree	22	0.20	[15 27]
19	Grout Curtain/Friction Angle	ϕ_g	Degree	45	0.20	[20 46]
20	Bedrock/Friction Angle	ϕ_b	Degree	45	0.20	[26 46]
21	Filter/Porosity	n_f	-	0.30	0.30	[0.25 0.35]
22	Drainage/Porosity	n_d	-	0.30	0.30	[0.25 0.35]
23	Grout Curtain/Porosity	n_g	-	0.50	0.30	[0.40 0.60]
24	Alluvium/Porosity	n_a	-	0.45	0.30	[0.35 0.55]
25	Bedrock/Porosity	n_b	-	0.50	0.30	[0.40 0.60]
26	Core/Hydraulic Conductivity	K_c	m/s	1.15E-8	0.80	[1.00E-11 5.00E-8]
27	Shell/Hydraulic Conductivity	K_s	m/s	7.00E-4	0.80	[8.00E-6 2.00E-3]
28	Filter/Hydraulic Conductivity	K_f	m/s	2.00E-4	0.80	[4.00E-6 4.00E-4]
29	Grout Curtain/Hydraulic Conductivity	K_g	m/s	1.00E-9	0.80	[1.00E-11 5.00E-9]
30	Alluvium/Hydraulic Conductivity	K_a	m/s	1.50E-7	0.80	[1.00E-8 5.00E-7]
31	Bedrock/Hydraulic Conductivity	K_b	m/s	2.00E-8	0.80	[1.00E-11 5.00E-8]

عدم قطعیت در سدهای خاکی به معنای عدم دقت و قطعیت در پیش‌بینی رفتار و واکنش خاک به بارگذاری‌های مختلف است. این عدم قطعیت ممکن است به دلیل تغییرات زمانی، فضایی و ژئومورفولوژیک خاک، تغییرات شرایط آب‌وهوا، تغییرات در نوع و شدت بارگذاری‌ها، نوسانات در شرایط محلول‌پذیری خاک، مشخصات مصالح و ... باشد. عدم قطعیت مهم‌ترین چالش در طراحی سدهای خاکی است که با توجه به اهمیت این سدها در حفاظت از منابع آب، کنترل سیلاب و تأمین آب برای کشاورزان و شهرنشینان، لزوم پذیرفتن روش‌های جدید برای کاهش عدم قطعیت را الزام می‌سازد. کمی‌سازی عدم قطعیت به معنای تخمین و پیش‌بینی احتمالات وقوع یک رویداد یا پدیده است. در این روش، با استفاده از داده‌های موجود و مدل‌سازی مناسب، احتمال وقوع یک رویداد به صورت عددی تخمین زده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان عدم قطعیت مصالح سد خاکی ماکو را با توجه به پارامترهای حساس، کمی‌سازی نمود. این نتایج در کاهش هزینه و زمان مدل‌سازی بسیار مؤثر خواهد بود.

۴. نتیجه‌گیری

از آنجایی که مدل‌سازی سدهای خاکی مملو از عدم قطعیت‌ها است، کمی‌سازی این عدم قطعیت‌ها ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به بحث زمان و هزینه کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها نیازمند تحلیل حساسیت برای کاهش تعداد متغیرهای تصادفی

مورد استفاده در کمی‌سازی این عدم قطعیت‌ها خواهد بود. در این پژوهش، ابتدا مدل عددی سد خاکی ماکو واقع در استان آذربایجان غربی در نرم‌افزار FLAC2D برای انجام تحلیل قطعی تهیه شد. اثر لایه‌های ساخت در نظر گرفته شده و مقدار و خطوط هم‌تراز تنش و جابه‌جایی‌های افقی و قائم با تحقیقات قبلی مقایسه و اعتبارسنجی گردید. سپس، این مدل برای حالت آبیگری اولیه تهیه و ارزیابی گردید و پاسخ استاتیکی به‌دست آمد و به‌عنوان پاسخ مدل قطعی در نظر گرفته شد. برای کمی‌سازی عدم قطعیت مصالح، مشخصات مصالح بدنه و پی سد به‌عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شدند. این مشخصات که شامل کران بالا و پایین، میانگین، ضریب تغییرات و دیگر ویژگی‌های مصالح می‌باشد، از ادبیات پیشینه استخراج گردید. آنگاه، تحلیل حساسیت برای ساده‌کردن مدل بر روی مشخصات مصالح نواحی هسته، پوسته، فیلتر، زه‌کش، پی آبرفتی و سنگ بستر سد خاکی انجام شد و پارامترهای حساس براساس نمودارهای Tornado انتخاب شدند. تحلیل حساسیت با ۴۹ متغیر تصادفی شامل مدل قطعی و کران بالا و پایین (به‌عبارت دیگر ۹۹ مدل) انجام شد. حساس‌ترین عواملی که بر پاسخ‌ها (S_{yy} , S_{xx} , Y_{disp} , X_{disp}) تأثیر می‌گذارند به‌عنوان متغیرهای تصادفی نهایی انتخاب شدند (۱۸ از ۴۹ مورد در کل). برای این منظور، پارامترهایی با نوسان بیش از ۱ درصد به‌عنوان پارامترهای حساس انتخاب شدند که با در نظر گرفتن حداقل یک متغیر تصادفی برای مشخصات مصالح در نواحی مختلف سد خاکی به‌دست آمد. نتایج نشان داد که تغییرات چگالی خشک (γ_d) پوسته تغییری در حدود ۸ درصد در پاسخ سد خاکی ایجاد می‌کند و از این حیث، مهم‌ترین پارامتر حساس به‌شمار می‌رود. هم‌چنین، مشاهده گردید تغییرات ضریب پواسون (ν) و مدول الاستیسیته (E) هسته از دیگر پارامترهای مهم حساس هستند که تغییری در حدود ۷ درصد در پاسخ سد خاکی ایجاد می‌کنند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی، چگالی خشک (γ_d)، ضریب پواسون (ν)، مدول الاستیسیته (E) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) به‌ترتیب پارامترهای حساس‌تری هستند و بر پاسخ سدهای خاکی بیش‌ترین تأثیر را می‌گذارند.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Limit State
2. Latin Hypercube Sampling
3. Deterministic
4. Probabilistic
5. Reliability Index
6. Finite Element Method (FEM)
7. Finite Difference Method (FDM)
8. Epistemic
9. Uncertainty Quantification
10. Sensitivity Analysis
11. Structural Reliability
12. Random Variables (RVs)
13. Tornado Diagrams
14. Total Head
15. Pilot Model
16. Mohr-Coulomb
17. Interface Elements
18. Elastic Behavior
19. Bulk Modulus
20. Shear Modulus
21. Swing
22. Normal Water Level
23. Contour
24. Coefficient of Variations (CoVs)

۶. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abbaszadeh, H., Norouzi, R., Sume, V., Kuriqi, A., Daneshfaraz, R., & Abraham, J. (2023). Sill Role Effect on the Flow Characteristics (Experimental and Regression Model Analytical). *Fluids*, 8(8), 235. <https://doi.org/10.3390/fluids8080235>
- Adami, R., Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Djahanghiri, M. (2022). Application of Radial Base Function Method to Investigate Seepage under the Dam in Steady and Unsteady Flow Conditions. *Journal of Structural and Construction Engineering*. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.346671.2844>
- Ahbab, A., Akhlaghi, T., Safari, M. J. S., & Avci, E. (2021). Evaluation of the static and pseudo-static stability and effectiveness of an improvement technique for slopes of the Vanyar Dam reservoir. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(2), 468-481. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0780-0>
- Babu, G. S., & Srivastava, A. (2007). Reliability analysis of allowable pressure on shallow foundation using response surface method. *Computers and Geotechnics*, 34(3), 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.11.002>
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2005). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons. https://www.researchgate.net/profile/Gregory-Baecher/publication/247385445_Reliability_and_Statistics_in_Geotechnical_Engineering/links/603be4292851c4ed5a4e861/Reliability-and-Statistics-in-Geotechnical-Engineering.pdf
- Binici, B., & Mosalam, K. M. (2007). Analysis of reinforced concrete columns retrofitted with fiber reinforced polymer lamina. *Composites Part B: Engineering*, 38(2), 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.01.006>
- Boroomand, M. R., & Mohammadi, A. (2019). Evaluation of earth dam leakage considering the uncertainty in soil hydraulic parameters. *Civil Engineering Journal*, 5(7), 1543-1556. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091351>
- Bagherzadeh, M., Mousavi, F., Manafpour, M., Mirzaee, R., & Hoseini, K. (2022). Numerical simulation and application of soft computing in estimating vertical drop energy dissipation with horizontal serrated edge. *Water Supply*, 22(4), 4676-4689. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.127>
- Cundall, P. (1976). Explicit finite difference method in geomechanics. Second Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, 1976.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Patrick Abraham, J., Ebadzadeh, P., Akhondi, B., & Abar, M. (2023). Determination of flow characteristics over sharp-crested triangular plan form weirs using numerical simulation. *Water Science*, 37(1), 211-224. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2236384>
- Der Kiureghian, A., & Ditlevsen, O. (2009). Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural Safety*, 31(2), 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>
- Ditlevsen, O., & Madsen, H. O. (1996). *Structural reliability methods* (Vol. 178). Wiley New York. [https://chodor-projekt.net/wp-content/uploads/BiNSK/Literatura/Dilevsen,Madsen,%20Structural%20Reliability%20Methods%20\(2007\).pdf](https://chodor-projekt.net/wp-content/uploads/BiNSK/Literatura/Dilevsen,Madsen,%20Structural%20Reliability%20Methods%20(2007).pdf)
- Duncan, J. M., & Chang, C.-Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 96(5), 1629-1653. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0017188>
- Guo, X. (2020). *Probabilistic stability analysis of an earth dam using field data* [Université Grenoble Alpes]. <https://www.theses.fr/2020GRALI017>
- Guo, X., & Dias, D. (2020). Kriging based reliability and sensitivity analysis-Application to the stability of an earth dam. *Computers and Geotechnics*, 120, 103411. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103411>
- Hariri-Ardebili, M. A. (2018). Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review. *International journal of disaster risk reduction*, 31, 806-831. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.07.024>

- Hariri-Ardebili, M. A., & Salazar, F. (2020). Engaging Soft Computing in Material and Modeling Uncertainty Quantification of Dam Engineering Problems. *Soft Computing*, 111, 111-111. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04623-x>
- Hariri-Ardebili, M. A., & Sattar, S. (2023). Sensitivity Analysis of Reinforced Concrete Structures.
- Harr, M. E. (1991). *Groundwater and seepage*. Courier Corporation.
- Itasca. (2019). Fast Lagrangian analysis of continua [FLAC], Version 8.1. *Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minn.* Retrieved from <http://www.itascacg.com/>
- Jafari, F., & Salmasi, F. (2014). Effect of embankment soil layers on stress-strain characteristics. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 5(4), 369-375. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2014.05.04.04>
- Kahot, Z., Dkiouak, R., & Khamlichi, A. (2019). Reliability analysis of slope stability in earthen dams following rapid drawdown. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 10(1), 101-112. <http://doi.org/10.1556/1848.2018.0011>
- King, L. M., & Simonovic, S. P. (2020). A deterministic Monte Carlo simulation framework for dam safety flow control assessment. *Water*, 12(2), 505. <https://doi.org/10.3390/w12020505>
- Kutzner, C. (2018). *Earth and rockfill dams: principles of design and construction*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203758991>
- Liu, X. (2019). *Reliability-based analysis of embankment dams* <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1349056/FULLTEXT01.pdf>
- Look, B. G. (2007). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9780203946602>
- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (2000). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 42(1), 55-61. <https://doi.org/10.1080/00401706.2000.10485979>
- Melchers, R. E., & Beck, A. T. (2018). *Structural reliability analysis and prediction*. <https://www.wiley.com/en-br/Structural+Reliability+Analysis+and+Prediction,+3rd+Edition-p-9781119265993>
- Mohammadi, M., Nabati, M., & Noury, M. (2010). Maku dam monitoring by comparison of results of instrumentantion and computer software. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(3&4), 1010-1015. https://www.researchgate.net/publication/282809006_Maku_dam_monitoring_by_comparison_of_results_of_instrumentation_computer_software
- Moran, E. F., Lopez, M. C., Moore, N., Müller, N., & Hyndman, D. W. (2018). Sustainable hydropower in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(47), 11891-11898. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809426115>
- Mouyeaux, A., Carvajal, C., Bressolette, P., Peyras, L., Breul, P., & Bacconnet, C. (2018). Probabilistic stability analysis of an earth dam by Stochastic Finite Element Method based on field data. *Computers and Geotechnics*, 101, 34-47. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.017>
- Mouyeaux, A., Carvajal, C., Bressolette, P., Peyras, L., Breul, P., & Bacconnet, C. (2019). Probabilistic analysis of pore water pressures of an earth dam using a random finite element approach based on field data. *Engineering Geology*, 259, 105190. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105190>
- Nayebzadeh, R., & Mohammadi, M. (2011). The effect of impervious clay core shape on the stability of embankment dams. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(4), 627-635. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9395-z>
- Neilsen, M. L., & Cao, C. (2019). Sensitivity analysis of internal erosion models for dam safety. 2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, NV, USA.
- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612-624. <https://doi.org/10.1139/t99-038>
- Pouraminian, M., Pourbakhshian, S., & Farsangi, E. N. (2020). Reliability assessment and sensitivity analysis of concrete gravity dams by considering uncertainty in reservoir water levels and dam body materials. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 30(1), 1-17. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0001>
- Rashidi, M., & Haeri, S. M. (2017). Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), 709-725. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.12.003>

- Shahkarami, N., & Aalimohammadi Piranshahi, S. (2021). The effect of increasing the reservoir capacity on the static stability of an earth dam (Case study: Kamal-Saleh earth dam). *Water and Irrigation Management*, 11(3), 633-642. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.329962.915>
- Shahkarami, N., & Bayat, M. (2022). Numerical analysis of static behavior of embankment dam under changes in the core inclination (Case Study: Azad Dam). *Water and Irrigation Management*, 12(3), 527-539. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.339386.971>
- Shahzadi, G., & Soulaïmani, A. (2021). Deep neural network and polynomial chaos expansion-based surrogate models for sensitivity and uncertainty propagation: An application to a rockfill dam. *Water*, 13(13), 1830. <https://doi.org/10.3390/w13131830>
- Shakouri, B., & Mohammadi, M. (2020). Evaluation of Penetration Depth for Cutoff Walls in the Core of Earth Dams. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 151-167. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01004-x>
- Shakouri, B., & Mohammadi, M. (2021). On the Effect of Clay Core Shape on Dynamic Response of Embankment Dams. 5th Asia-Pacific Group - International Symposium on Water and Dams, New Delhi, India.
- Shakouri, B., Mohammadi, M., Safari, M. J. S., & Hariri-Ardebili, M. A. (2022). *First Impoundment Response Analysis of an Earth Dam using Coupled Numerical-Soft Computing technique*. IWA World Water Congress & Exhibition 2022, Copenhagen, Denmark.
- Shakouri, B., Mohammadi, M., Safari, M. J. S., & Hariri-Ardebili, M. A. (2023). A collaborative numerical simulation-soft computing approach for earth dams first impoundment modeling. *Computers and Geotechnics*, 164, 105814. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105814>
- Shayan, H. K., & Farhoudi, J. (2013). Effective parameters for calculating discharge coefficient of sluice gates. *Flow Measurement and Instrumentation*, 33, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.06.001>
- Siacara, A., Napa-García, G., Beck, A., & Futai, M. (2020). Reliability analysis of earth dams using direct coupling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.012>
- Sørensen, J. D. (2004). Notes in structural reliability theory and risk analysis. *Aalborg University*, 4. <http://www.ukm.my/kamal3/rro/note%20Structural%20Reliability%20Theory%20and%20risk%20analysis.pdf>
- Srivastava, A. a. B. G. L. S. (2010). Total risk rating and stability analysis of embankment dams in the Kachchh Region, Gujarat, India. *Engineering Geology*, 115(1-2), 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.011>
- 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. <https://doi.org/10.28991/cej-03091150>
- Vahdati, P. (2014). *Identification of soil parameters in an embankment dam by mathematical optimization* [Luleå tekniska universitet]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990533/FULLTEXT01.pdf>
- Vahdati, P., Levasseur, S., Mattsson, H., & Knutsson, S. (2013). Inverse Mohr-Coulomb soil parameter identification of an earth and rockfill dam by genetic algorithm optimization. *The Electronic journal of geotechnical engineering*, 18(X), 5419-5440. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1014014/FULLTEXT01.pdf>
- Wang, L., Wu, C., Tang, L., Zhang, W., Lacasse, S., Liu, H., & Gao, L. (2020). Efficient reliability analysis of earth dam slope stability using extreme gradient boosting method. *Acta Geotechnica*, 15, 3135-3150. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00962-4>
- Yang, L. Q., Gao, R., & Wang, Y. (2014). Uncertainty analysis and monitoring of earth dam. *Applied Mechanics and Materials*, <https://www.scientific.net/AMM.580-583.954>
- Yücel, A. R. (2013). *Seismic analysis of concrete gravity dams including damfoundation-reservoir interaction* Middle East Technical University]. <https://hdl.handle.net/11511/22938>
- Zienkiewicz, O., & Taylor, R. (1977). *The Finite Element Method*, McGraw-Hill. New York.
- Ziyaei, M. (2013). *A consideration of settlement in soil dams at the operation time and comparison with the results of the numerical analysis (case study: Maku dam)* Urmia University (In Persian).
- Zomorodian, A., Sahebzadeh, K., & Ooria, A. (2006). Effect of number of layers on incremental construction analysis of earth and rock fill dams. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 11. https://www.researchgate.net/publication/294629378_Effect_of_number_of_layers_on_incremental_construction_analysis_of_earth_and_rock_fill_dams