مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰
صفحه‌های ۶۴۲-۶۳۳
DOI: 10.22059/jwim.2021.329962.915

مقاله پژوهشی:

تأثیر افزایش ظرفیت مخزن بر پایداری استاتیکی سد خاکی (مطالعه موردی: سد خاکی کمال‌صالح)

نازنین شاه‌کرمی[1*]، ساناز عالی‌محمدی پیرانشاهی[2]
۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
۲. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

چکیده
با گذشت زمان از ساخت سدها به‌دلیل افزایش جمعیت و کاهش حجم مفید مخزن در اثر تجمع رسوبات، نیاز به ذخیره بیش‌تر آب افزایش می‌یابد. یک گزینه برای دست‌یابی به ذخیره آب بیش‌تر، افزایش ظرفیت مخزن سد با بالابردن تراز سرریز است. یکی از بررسی‌هایی که لازم است برای امکان اجرای این راه‌کار در سدهای خاکی صورت گیرد، تحلیل پایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد با لحاظ این افزایش ارتفاع است. در پژوهش حاضر، تحلیل پایداری استاتیکی سد سنگ‌ریزه‌ای کمال‌صالح در تراز فعلی سرریز در سه حالت پایان ساخت، تراوش دائم و افت سریع با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و با به‌کارگیری روش‌های تعادل حدی بیشاپ، جانبو، مورگنسترن- پرایس و معمولی انجام شد. هم‌چنین برای شرایط تراوش دائم، پایداری سد در شرایط افزایش تراز سرریز به‌صورت گام به گام (تا چهار متر ارتفاع مجاز تعیین‌شده از تحلیل تراوش)، بررسی شد. طبق نتایج، سد در شرایط فعلی تراز سرریز برای هر سه حالت پایدار بود. البته هرچند که در حالت افت سریع، ضریب اطمینان ابتدا تا یک مقدار حداقل کاهش و سپس با ادامه افت تراز آب افزایش یافت، اما برای کم‌ترین مقدار آن هم ضریب اطمینان تأمین شد. در شرایط افزایش ظرفیت مخزن تا چهار متر افزایش تراز سرریز، ضریب اطمینان پایداری شیب پایین‌دست کاهش یافت، اما در تمام روش‌های تحلیل انجام‌شده میزان این کاهش قابل توجه نبوده و هم‌چنان حداقل ضریب اطمینان لازم تأمین شد.

کلیدواژه‌ها: افزایش ظرفیت مخزن، پایداری استاتیکی، سد خاکی کمال‌صالح، Slope/W.

The Effect of Increasing the Reservoir Capacity on the Static Stability of an Earth Dam (Case Study: Kamal-Saleh Earth Dam)

Nazanin Shahkarami[1*], Sanaz Ali Mohammadi Piranshahi[2]
1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
2. M. Sc. Graduate of Geotechnics, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
Received: August 23, 2021 Accepted: October, 28, 2021

Abstract
Over time, as the population increases and the useful volume of the reservoir decreases as a result of sediment build-up, the need for more water storage increases. One option to obtain more water storage is to increase the reservoir capacity of the dam by increasing the level of the spillway. One of the necessary research to assess the feasibility of implementing this solution in earth dams is the analysis of the stability of dam slopes in the height-increasing state. In this study, the static stability analysis of the Kamal-Saleh dam was performed at current level of the spillway at end of construction, steady-state seepage, and rapid drawdown conditions using GeoStudio software and applying limit equilibrium methods of Bishop, Janbo, Morgenstern-Price, and ordinary. Also under steady-state seepage, the stability of the dam was analyzed during the steps to raise the level of the spillway (up to 4 meters of acceptable height based on seepage analysis). The results indicated the dam was stable for all three conditions in the current spillway level. Although in the case of rapid drawdown, the factor of safety (FOS) initially decreased to a minimum and then increased as the water level continued to decrease, however, acceptable stability was provided for the least amount of it. In the case of increasing the storage capacity of the dam up to 4 m, the FOS for downstream slope stability was reduced; however, in all methods, the magnitude of this reduction was not significant and the required FOS was still provided.

Keywords: Kamal-Saleh earth dam, Reservoir capacity increase, Slope/W, Static stability.

* نویسنده مسئول Email: shahkarami@araku.ac.ir

مقدمه

با گذشت زمان از ساخت سدها به‌دلیل افزایش جمعیت و کاهش حجم مفید مخزن در اثر تجمع رسوبات، نیاز به ذخیره آب بیش‌تر افزایش می‌یابد. در این شرایط می‌توان ظرفیت مخزن را با روش‌هایی مانند نصب دریچه قطاعی، فیوزگیت (دریچه اضطراری) و سد لاستیکی روی سرریز اصلی و یا بتن‌ریزی روی آن افزایش داد (Kamanbedast & Delvari, 2012).

شیروانی‌های سد خاکی باید در برابر نیروهای وارده پایدار بوده و دچار گسیختگی نشود. تغییر در ظرفیت و ارتفاع مخزن سدها می‌تواند پایداری آن‌ها را تهدید کند. از این‌رو، ضمن آن‌که در شرایط فعلی، پایداری شیب‌های طرفین سد بایستی تأمین شده باشد، پیش از هرگونه تغییر در افزایش ظرفیت مخزن سدها نیز، لازم است پایداری آن‌ها دوباره با اعمال شرایط تغییریافته بررسی و این اطمینان حاصل شود که در شرایط جدید نیز، شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد حداقل ضریب اطمینان را طبق آیین نامه (USACE)[1] دارا می‌باشند.

Souliyavong *et al.* (2012) به تحلیل تراوش و بررسی پایداری شیب بالادست یک سد خاکی در شرایط افت سریع تحت تأثیر نرخ‌های فروکش متفاوت و خواص خاک با استفاده از نرم‌افزارهای Slope/W و Seep/W پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که در صورت استفاده از مصالح با نفوذپذیری بیش‌تر در پوسته میزان کاهش پایداری در طول افت سریع کم‌تر خواهد بود. برای تمام سناریوهای بررسی‌شده کم‌ترین ضریب اطمینان در طول افت سریع زمانی اتفاق افتاد که تراز آب مخزن به حدود $\frac{2}{3}$ ارتفاع کل آب مخزن رسیده بود. در پژوهش Hasani *et al.* (2013)، تأثیر نوع و اندازه سایز مش روی نرخ کل جریان و هد کل درون مقطع سد ایلام موردمطالعه قرار گرفت. پایداری شیب در شرایط مختلف با استفاده از نرم‌افزار Slope/W تحلیل شد. تحلیل با روش‌های بیشاپ، مورگنسترن، جانبو و روش معمولی انجام شده و کم‌ترین مقدار ضریب اطمینان محاسبه‌شده از این روش‌ها به‌عنوان ضریب اطمینان در نظر گرفته‌شد. Yazdanian *et al.* (2015) تأثیر ارتفاع بر روی پایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست سدهای خاکی ناهمگن کاملاً یکسان ولی با ارتفاع‌های متفاوت را بررسی کردند. برای این منظور نرم‌افزار GeoStudio برای بررسی پایداری دو سد و تعیین ضریب اطمینان در سه مرحله عملیاتی به‌کار گرفته شد. طبق نتایج، ضریب اطمینان با افزایش ارتفاع کاهش یافت و در هر مرحله نیز مقادیر متفاوتی برای ضریب اطمینان سد به‌دست آمد. در مرحله افت سریع بیش‌ترین کاهش در مقدار ضریب اطمینان مشاهده شد. در پژوهشی Yi *et al.* (2015) پایداری شیب سدهای خاکی را در ارتفاع و شیب‌های مختلف بررسی کردند. روش تعادل حدی برای محاسبه ضریب اطمینان سطح لغزش بحرانی به‌کار گرفته شد. روش مورداستفاده تحلیل توسط نرم‌افزار 3DSTAB بود. نتایج حاکی از آن بود که افزایش ارتفاع در یک شیب ثابت و افزایش شیب در یک ارتفاع ثابت ضریب اطمینان را کاهش می‌دهد. Athani *et al.* (2015) تحلیل پایداری سد خاکی را به‌روش المان محدود و با استفاده از Plaxis/3D و با هدف بررسی تأثیر شرایط مختلف بهره‌برداری روی پایداری سد انجام دادند. در شرایط مختلف برای سد خاکی ضریب اطمینان متفاوتی به‌دست آمد. این مقدار در حالت تراوش دائم و برای مخزن پر بیش از ۱/٦ بود، ولی در حالت افت سریع ضریب اطمینان به مقدار زیاد کاهش یافت. Andreea Maneciu (2016) تحلیل پایداری سد را برای سه مرحله پایان ساخت، تراوش پایدار و افت سریع موردمطالعه قرار داد. تحلیل با نرم‌افزار Geostudio انجام شد و هد فشاری در سه مرحله ارائه شد. طبق نتایج، هد

فشاری در تحلیل از مقادیر ابزار دقیق بزرگ‌تر و نشان‌دهنده پایداری سد بود. Esfahani *et al.* (2016) به‌منظور ارزیابی پایداری دو نوع از سدهای خاکی، سد سنگ‌ریزه‌ای با رویه بتنی و سد سنگ‌ریزه‌ای با هسته خاکی، از روش‌های SCU-SLIDE، FORM و روش اصلاح‌شده بیشاپ استفاده‌کردند. طبق نتایج با افزایش ارتفاع، ضریب اطمینان شیب پایین‌دست سد سنگ‌ریزه‌ای با رویه بتنی بیش‌تر کاهش می‌یابد. پایداری و ایمنی شیب بالادست بیش‌تر از پایین‌دست بوده و ضریب اطمینان سد سنگ‌ریزه‌ای با هسته خاکی بزرگ‌تر از سد سنگ‌ریزه‌ای با رویه بتنی است. در پژوهشی Bageri Gorji (2016) امکان افزایش ارتفاع سد گلستان به روش افزایش ارتفاع بدنه سد را با استفاده از نرم‌افزار Plaxis موردبررسی قرار داد. تحلیل‌های انجام‌شده بر مبنای وضع کنونی سد و زاویه‌های گوناگون در قسمت بدنه سد انجام شد و با کنترل‌های مربوط به پایداری و نشست، ارتفاع افزایش سد برآورد شد. Fattah *et al.* (2017) و AL-Labban (2018)، رفتار سدهای خاکی را با به‌کارگیری روش المان محدود و استفاده از نرم‌افزار Slope/W در شرایط تخلیه سریع بررسی کردند. طبق نتایج حاصل از هر دو پژوهش، در طول زمان افت سریع مقدار ضریب اطمینان پایداری سد کاهش یافت. Abbas & Mutiny (2018) در پژوهش خود فاکتور ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست را برای تعدادی از سدهای خاکی موجود در ایران، عراق و هند با استفاده از نرم‌افزار Slope/W در شرایط خشک و با افزایش تدریجی سطح آب بالادست ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که ضریب اطمینان پایداری شیب سد، بیش‌ترین مقدار را در شرایط خشک داشت. هم‌چنین در شرایط وجود آب در مخزن، با افزایش تراز سطح آب، ضریب اطمینان افزایش داشت. Salmasi *et al.* (2019) تأثیر به‌کارگیری زهکش‌های افقی بر افزایش پایداری شیب‌های خاکی به‌عنوان راه‌کاری مؤثر و کم هزینه را با استفاده از نرم‌افزارهایSeep/W و Slope/W بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها حاکی از تأثیر افزایش طول، ضخامت و تعداد زهکش‌های افقی بر افزایش ضریب اطمینان پایداری بود. Siacara *et al.* (2020) از روش تعادل حدی مورگنسترن- پرایس برای محاسبه ضریب اطمینان شیب سد خاکی و سطح لغزش بحرانی استفاده کردند. آن‌ها از نرم‌افزارهای Seep/W و Slope/W در تلفیق با نرم‌افزار قابلیت اطمینان سازه StRAnD استفاده کردند. شاخص‌های اطمینان‌پذیری سطوح احتمالی بحرانی، با روش‌های قابلیت اطمینان سازه و هم‌چنین شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌دست آمدند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که زاویه اصطکاک مؤثر، مهم‌ترین پارامتر ژئوتکنیکی نامعلوم بر تعادل سد است. هم‌چنین سطح لغزش بحرانی از لحاظ داشتن حداقل ضریب اطمینان برحسب شاخص قابلیت اطمینان، سطح لغزش بحرانی نمی‌باشد.

در پژوهشی توسط Aalimohammadi *et al.* (2021)، تراوش سد سنگ‌ریزه‌ای کمال‌صالح در وضعیت فعلی تراز سرریز در شرایط پایان ساخت، تراوش دائم و افت سریع بررسی شد. سپس امکان افزایش تراز سرریز از لحاظ مقدار تراوش و گرادیان هیدرولیکی خروجی در حالت تراوش دائم ارزیابی شد. هم‌چنین تحلیل سطح فریاتیک به‌روش تحلیلی و محاسباتی در شرایط فعلی و افزایش ارتفاع آب مخزن انجام شد. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش تراز سرریز تا چهار متر هرچند میزان دبی عبوری از بدنه و پی سد افزایش و ضریب اطمینان در برابر جوشش کاهش می‌یافت اما در تمام موارد، سد از دیدگاه تراوش پایدار بود. برای چهار متر افزایش ارتفاع سرریز، با وجود پایین‌تر قرارگرفتن سطح فریاتیک از تراز تاج هسته، با احتساب موییینگی محل

برخورد خط فریاتیک بسیار نزدیک به تاج هسته بوده و لذا از این نقطه‌نظر، افزایش چهار متری ارتفاع سرریز در اجرا توصیه نشد.

در این پژوهش تحلیل پایداری استاتیکی بدنه سد سنگ‌ریزه‌ای کمال‌صالح در شرایط کنونی، برای مراحل بحرانی پایان ساخت، افت سریع آب در مخزن و تراوش دائم با استفاده از نرم‌افزار Slope/W از بسته نرم‌افزاری GeoStudio انجام شده است. هم‌چنین ضمن افزایش ظرفیت مخزن سد در شرایط تراوش دائم، تأثیر افزایش تراز سرریز بر ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها، ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

یکی از بررسی‌های که باید حتماً به‌منظور بررسی امکان افزایش ظرفیت مخزن سد انجام شود، تحلیل پایداری سد در شرایط جدید است. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، تحلیل سد کمال‌صالح و پایداری آن از دیدگاه تراوش مجاز بدنه و پی سد با افزایش ارتفاع سرریز در مرجع Aalimohammadi *et al.* (2021) انجام شده است. در تکمیل آن پژوهش، آن‌چه در این پژوهش انجام گرفته است، بررسی پایداری استاتیکی بدنه سد کمال‌صالح در تراز کنونی سرریز و با افزایش ارتفاع آن است. لازم به ذکر است که در این پژوهش حداکثر ارتفاع مجاز قابل‌بررسی اولیه چهار متر لحاظ شد، چرا که براساس پژوهش فوق‌الذکر افزایش ارتفاع بیش از آن، سبب عبور سطح فریاتیک از تاج هسته براساس محاسبات تحلیلی و عددی و انهدام سد بر اثر تراوش غیر مجاز از بدنه سد خواهد شد.

مشخصات سد سنگ‌ریزه‌ای کمال‌صالح

سد کمال‌صالح از نوع خاکی سنگ‌ریزه‌ای با هسته رسی قائم در ۷٤ کیلومتری جنوب‌غرب شهر اراک در استان مرکزی واقع شده است. حجم مخزن در تراز نرمال ۱۱۰ میلیون مترمکعب، ارتفاع از بستر رودخانه ۷٦ متر و از پی ۸۰ متر، طول تاج ۷٦٥ متر و عرض سد ۱۲ متر در تاج است. تراز بستر رودخانه ۱۷۹۲ متر و تراز نرمال و تاج سد به‌ترتیب ۱۸٦۱/۱ و ۱۸٦۸/۳ متر می‌باشند. نوع سرریز سد، اوجی با شوت تخلیه است. این سد در سال ۱۳۸۸ به بهره‌برداری رسیده و از طریق آن آب موردنیاز شهرهای اراک، شازند و صنایع بزرگ منطقه تأمین می‌شود. شکل (۱) مقطع عرضی تیپیک و شکل (۲) سد سنگ‌ریزه‌ای کمال صالح را از نمای بالادست و در شرایط سرریزشدن نشان می‌دهد. در جدول (۱) نیز مشخصات ژئوتکنیکی مصالح تشکیل‌دهنده بدنه سد طبق گزارشات ژئوتکنیک سد کمال‌صالح ارائه شده‌است (Lar Consulting Engineers Company, 2010). لازم به ذکر است اطلاعات مربوط به ضرایب هدایت هیدرولیکی مصالح به‌کار رفته در سد، در مرجع Aalimohammadi *et al.* (2021) آمده است.

پایداری بدنه سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای

سدهای خاکی باید در برابر نیروهای وارد بر بدنه مقاوم بوده و دچار گسیختگی و حرکت اجزای سد یا از بین‌رفتن کارایی نشوند. مراحل بحرانی پایداری سدهای خاکی شامل مرحله پایان ساخت برای هر دو شیب، مرحله افت ناگهانی سطح آب برای شیب بالادست و و مرحله تراوش دائم برای شیب پایین‌دست است. برای اطمینان از پایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد خاکی، مقدار ضریب اطمینان (FOS)[۲] شیب باید بزرگ‌تر یا حداقل مساوی مقدار توصیه‌شده توسط آیین‌نامه باشد. مقدار مجاز توصیه‌شده توسط سازمان مهندسی ارتش آمریکا (USACE) در جدول (۲) نشان داده شده است. ضریب اطمینان به‌دست‌آمده در هر مرحله نباید از مقدار مجاز ارائه‌شده در این جدول کم‌تر باشد (Rahimi, 2013).

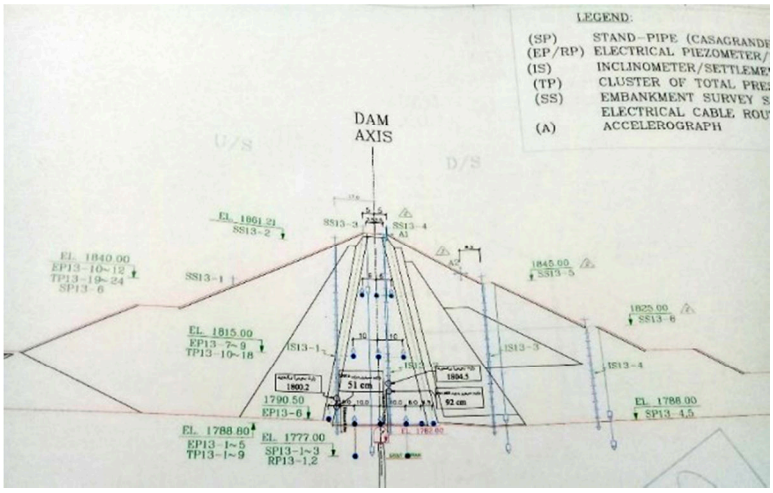

Figure 1. Typical cross-section of Kamal-Saleh earth dam (Lar Consulting Engineers Company, 2010)

Figure 2. Kamal-Saleh earth dam under overflow condition

Table 1. Geotechnical characteristics of Kamal-Saleh earth dam (Lar Consulting Engineers Company, 2010)

Material type	Loading procedure	Cohesion (KPa)	Friction angle (degree)	Saturated density ($\frac{KN}{m^3}$)	Wet density ($\frac{KN}{m^3}$)
Clay core	UU	58	9	20.9	20.6
	CU	50	30.2	20.9	20.6
	CD	0	22	20.9	20.6
Filter	CD	0	35	20	18
Drainage	CD	0	35	20	18
Riverbed gravel	CD	0	38	22.5	20.7
Upstream limestone rocks	CD	0	48	22	20
	CD	0	45	22	20
	CD	0	43	22	20
	CD	0	42	22	20
Downstream limestone rocks	CD	0	48	22	20
	CD	0	45	22	20
	CD	0	43	22	20
	CD	0	42	22	20
Rock foundation	CD	58	30	27	26

در پژوهش حاضر، پایداری استاتیکی شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد خاکی کمال‌صالح از روش‌های تعادل حدی[۳] برای هریک از مراحل بحرانی فوق‌الذکر موردبررسی و تحلیل قرار گرفته است. به این منظور از روش‌های تعادل حدی بیشاپ[٤]، جانبو[٥]، مورگنسترن-پرایس[٦] و معمولی[۷] استفاده شده است.

Table 2. Minimum allowable safety factor for static stability analysis of earth dam according to USACE regulations (Rahimi, 2013)

Condition of slope stability analysis	Minimum allowable safety factor	
	Downstream slope	Upstream slope
End of construction	1.25	1.25
Steady-state seepage	1.5	-
Rapid drawdown	-	1.25

مدل‌سازی عددی

در این پژوهش به‌منظور آنالیز پایداری بدنه سد خاکی کمال‌صالح از نرم‌افزار Slope/W از بسته نرم‌افزاری GeoStudio استفاده شده است. بسته نرم‌افزاری GeoStudio از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان محدود است اما در Slope/W که برای تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی از آن استفاده می‌شود، از طریق روش‌های تعادل حدی گوه گسیختگی بحرانی و ضریب اطمینان پایداری به‌دست می‌آید (Javaheri, 2009). شکل (۳) مقطع سد مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

تحلیل و نتایج

طبق مشخصات سازه‌ای و ابعاد سد کمال‌صالح، سد در نرم‌افزار مدل شده و پس از اختصاص مصالح با ویژگی‌های ژئوتکنیکی مختص به هر ناحیه، تحلیل پایداری در سه مرحله پایان ساخت، تراوش دائم و افت سریع مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا تحلیل پایداری در شرایط کنونی ارتفاع سرریز و سپس با اعمال افزایش ارتفاع سرریز به‌صورت گام به گام انجام شده است.

تحلیل پایداری سد کمال‌صالح در پایان ساخت

پس از اتمام ساخت سد به‌دلیل نبود زمان کافی جهت تحکیم و زهکشی، مشخصات مصالح هسته به‌صورت (UU)[۸] وارد محاسبات می‌شوند. گوه گسیختگی بحرانی پایان ساخت برای شیب بالادست و پایین‌دست از کلیه روش‌های به‌کاررفته ، حاصل و ضرائب اطمینان در جدول (۳) ارائه شده است. ضمن آن‌که گوه گسیختگی بحرانی به‌طور نمونه برای روش بیشاپ در شکل (٤) آمده است. طبق نتایج جدول (۳)، در تمام روش‌ها ضریب اطمینان از حداقل مقدار مجاز آیین‌نامه USACE بزرگ‌تر و سد در پایان ساخت پایدار بود.

Table 3. Calculated safety factors of downstream and upstream slope at the end of construction

Analysis method	FOS	
	Upstream slope	Downstream slope
Bishop	2.243	2.22
Ordinary	2.113	2.025
Janbu	2.017	1.889
Morgenstern-price	2.257	2.221
Average	2.157	2.08

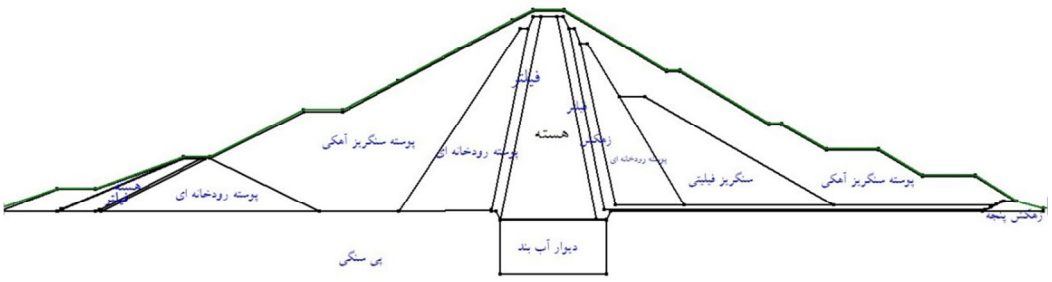

Figure 3. Modeled cross section of Kamal-Saleh Dam in software

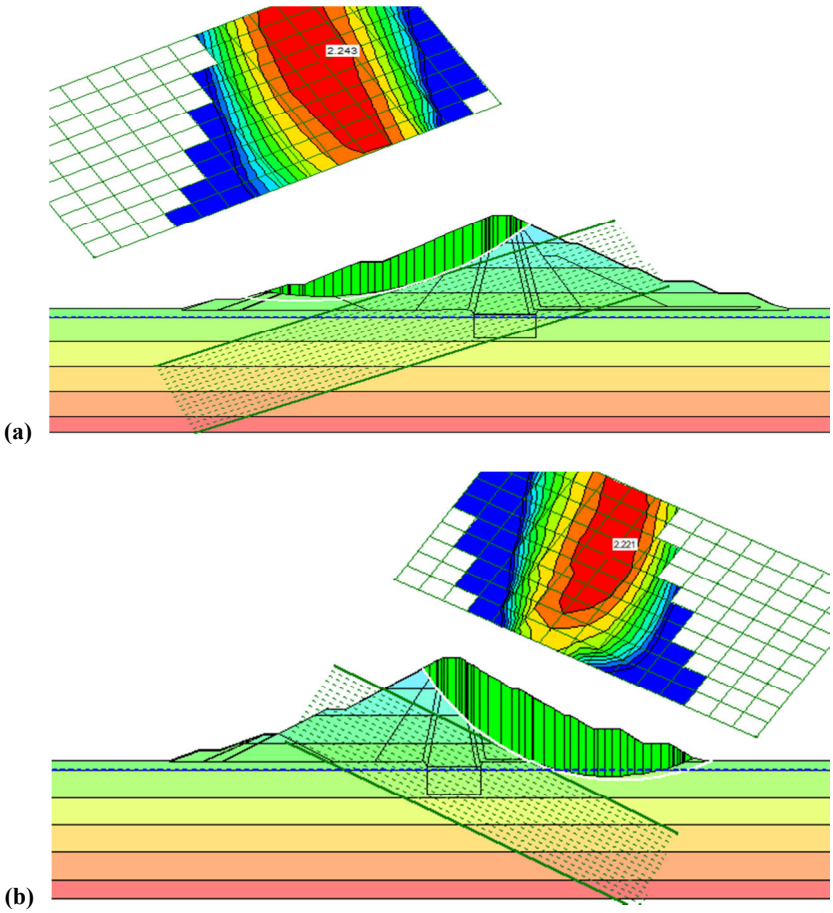

Figure 4. Critical slip surface and calculated safety factors at the end of construction based on the Bishop's method: (a) upstream slope, (b) downstream slope

تحلیل پایداری در شرایط تراوش دائم برای ظرفیت کنونی مخزن و در شرایط افزایش ارتفاع سرریز

در مرحله تراوش دائم، زمان کافی جهت تحکیم و زهکشی وجود داشته و مصالح هسته به‌صورت (CD)[9] وارد محاسبات می‌شوند. نتایج حاصل از تحلیل پایداری در شرایط تراوش دائم و برای شیب پایین‌دست برای تراز کنونی ارتفاع سرریز (تراز نرمال آب) و در مراحل افزایش تراز سرریز در جدول (٤) ارائه شده است. گوه گسیختگی بحرانی، به‌طور نمونه به‌دست‌آمده از دو روش نیز برای تراز فعلی سرریز و با لحاظ حداکثر افزایش تراز ممکن به‌ترتیب در شکل‌های (٥) و (٦) نشان داده شده است. براساس جدول (٤) می‌توان استنباط نمود که با افزایش سطح آب مخزن، ضریب اطمینان در تمام روش‌ها کاهش یافته، هرچند که میزان این کاهش در افزایش تراز سرریز به میزان چهار متر برای سد کمال‌صالح قابل‌ملاحظه نیست. به‌طوری‌که روش جانبو ضمن آن‌که کم‌ترین ضریب اطمینان را برای تمام ترازهای سرریز می‌دهد، برای افزایش چهار متر تراز سرریز، بیش‌ترین کاهش در ضریب اطمینان را به مقدار ۲/۱ درصد تولید کرده است. کم‌ترین کاهش در روش معمولی به مقدار ۰/۹۷ درصد بود. برای چهار متر افزایش تراز سرریز، میانگین ضریب اطمینان تقریباً ۱/۷ درصد کاهش یافته است. در تمام روش‌ها ضریب اطمینان برای حالت فعلی و پس از افزایش ظرفیت مخزن از حداقل مقدارمجاز توصیه‌شده توسط آیین‌نامه USACE بزرگ‌تر و سد پایدار بود.

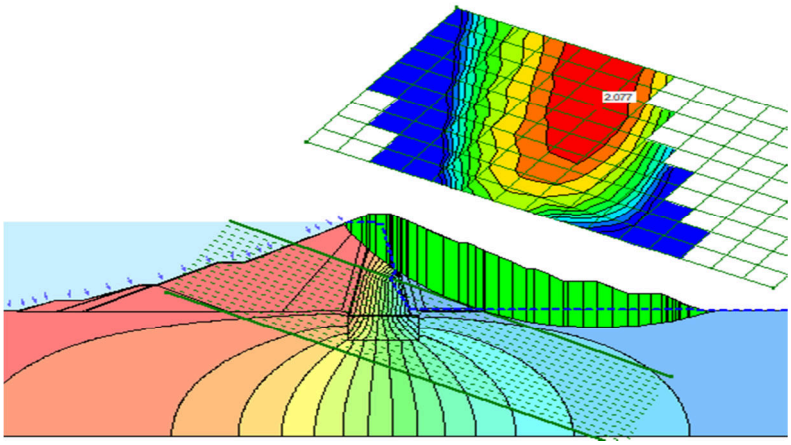

Figure 5. Critical slip surface for water height 69.1 m (normal water level) at the steady state condition- typically in Bishop's method.

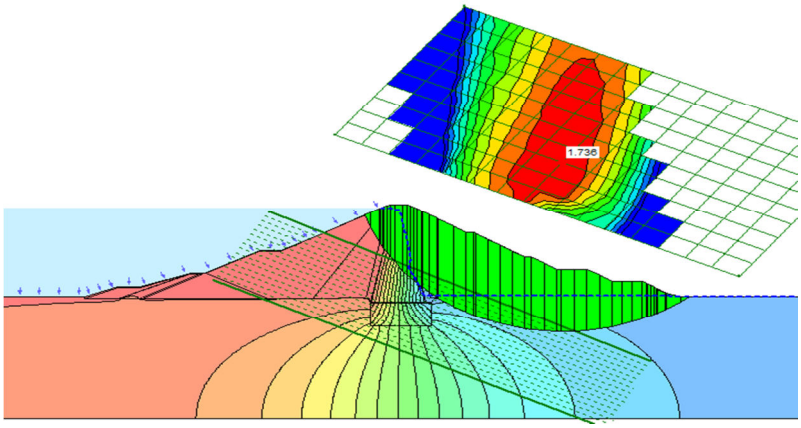

Figure 6. Critical slip surface for water height 73.1 m (four meters increase in overflow level compared to normal water level) at the steady state condition- typically in Janbu's method.

Table 4. Calculated safety factors of downstream slope for different overflow levels at the steady state condition

Analysis method	Reservoir overflow levels (m)					
	69.1	70.1	71.1	72.1	73.1	74.1
Bishop	2.077	2.071	2.059	2.046	2.033	2.019
Ordinary	1.862	1.860	1.858	1.852	1.844	1.83
Janbu	1.777	1.768	1.751	1.747	1.736	1.752
Morgenstern-price	2.064	2.063	2.054	2.045	2.032	2.02
Average	1.945	1.940	1.931	1.922	1.911	1.898

پایداری سد کمال‌صالح در مرحله افت سریع

در افت سریع آب مخزن به‌دلیل اشباع‌بودن خاک بدنه‌ی سد و هم‌چنین حذف نیروی افقی فشار هیدرواستاتیک که یکی از عوامل پایداری شیب بالادست است، احتمال لغزش دامنه و بروز ناپایداری در شیب بالادست سد افزایش می‌یابد. در افت سریع زمان کافی جهت تحکیم مصالح وجود داشته، اما فرصت برای زهکشی مصالح هسته نبوده و مصالح به‌صورت (CU)[10] وارد محاسبات می‌شوند. تخلیه سریع مخزن از تراز نرمال به‌مدت ۲۳ روز فرض گردیده است (Lar Consulting Engineers Company, 2010). در این مرحله تحلیل پایداری برای شیب بالادست طبق روش‌های بیشاپ، جانبو،

مورگنسترن- پرایس و معمولی انجام و میزان ضرائب اطمینان متوسط برای افت آب تا ترازهای مختلف در شکل (۷) نمایش داده شده است. طبق شکل (۷)، ضریب اطمینان ابتدا تا یک مقدار حداقل کاهش و سپس با ادامه افت تراز آب، افزایش یافته است. کم‌ترین میزان ضریب اطمینان بعد از میزان حدود یک سوم افت کل در تراز ۱۸٤۰ متر (ارتفاع آب ٤۸ متر) به‌دست آمد که با نتایج Souliyavong *et al.* (2012) مبنی بر وقوع کم‌ترین ضریب اطمینان در طول افت سریع در تراز آب مخزن حدود $\frac{2}{3}$ ارتفاع کل آب مخزن تطابق دارد.

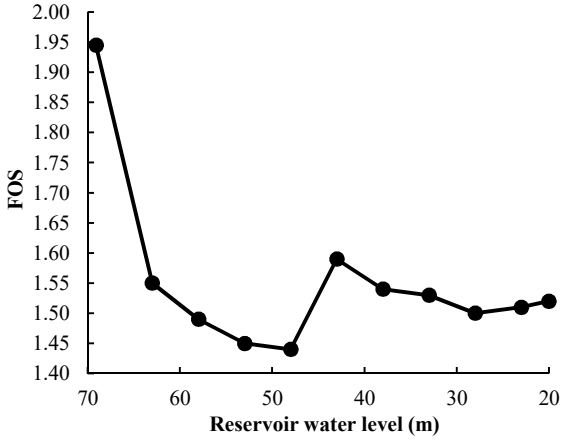

Figure 7. Changes in calculated safety factors of upstream slope at the condition of rapid drawdown

در بررسی تغییرات ضرایب اطمینان به‌دست‌آمده از تحلیل‌های Slope/W در حالت تخلیه سریع ۲۳ روزه مخزن، مشخص شد که با کاهش تراز مخزن از تراز نرمال، ضریب اطمینان دارای روند کاهشی و سپس افزایشی در طول زمان است که با نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های Souliyavong *et al.* (2012)، Fattah *et al.* (2017) و AL-Labban (2018) هم‌خوانی دارد. می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در ابتدا با حذف فشار هیدرواستاتیک آب از روی دامنه بالادست و عدم تخلیه از مصالح ریزدانه، ضریب اطمینان کاهش و پس از گذشت زمان و توزیع فشار آب حفره‌ای، مقدار آن افزایش یافته است. در کل در این شرایط نیز، حداقل ضریب اطمینان طبق آیین‌نامه USACE برای سد کمال صالح برقرار و سد پایدار بود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تحلیل پایداری سد خاکی کمال‌صالح در شرایط پایان ساخت، تراوش پایدار و شرایط افت سریع سطح آب مخزن با استفاده از نرم‌افزار Solpe/W انجام شد. هم‌چنین امکان افزایش ارتفاع سرریز مخزن از تراز کنونی بررسی و تحلیل پایداری بدنه سد با افزایش ظرفیت مخزن انجام شد و نتایج زیر حاصل شد.

- ضرائب اطمینان در شرایط پایان ساخت، تراوش دائم و افت سریع برای دامنه‌های بالادست و پایین‌دست سد در شرایط کنونی سد از حداقل مقدار مجاز آیین‌نامه USACE بزرگ‌تر و سد پایدار بود.

- ضرائب اطمینان پایداری به‌دست‌آمده از تمام روش‌های تحلیل در شرایط افزایش تراز سرریز تا چهار متر برای حالت تراوش دائم، از حداقل مقدار مجاز توصیه‌شده آیین‌نامه USACE بزرگ‌تر و سد پایدار بود.

- کم‌ترین ضرائب اطمینان برای تمام ترازهای سرریز از روش جانبو به‌دست آمد به‌طوری‌که برای افزایش چهار متر تراز سرریز، بیش‌ترین کاهش در ضریب اطمینان به مقدار ۲/۱ درصد نسبت به وضعیت کنونی حاصل‌شد.

- در طول افت سریع آب مخزن، ضریب اطمینان دارای روند کاهشی و سپس افزایشی در طول زمان است که با نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های Souliyavong *et al.* (2012)، Fattah *et al.* (2017) و AL-Labban (2018) هم‌خوانی دارد. در این حالت کم‌ترین ضریب اطمینان در تراز آب مخزن حدود $\frac{2}{3}$ ارتفاع کل آب مخزن به وقوع می‌پیوندد.

پی‌نوشت‌ها

1. U.S.A Corps of Engineering
2. Factor of safety
3. Limit Equilibrium Methods
4. Bishop
5. Janbu
6. Morgenstern-Price
7. Ordinary
8. Unconsolidated Undrained
9. Consolidated Drained
10. Consolidated Undrained

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

Aalimohammadi, S., Shahkarami N., & Asadi H. (2021). Analysis of seepage in the conditions of increased reservoir capacity by raising the spillway level (Case study: Kamal-Saleh earth dam). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9). (In Persian)

Abbas, J. M., & Mutiny, Z. A. (2018). Slope stability analysis for earth dams using (Geo-Slope/W). *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 11(1), 70-81.

Al-Labban, S. (2018). *Seepage and Stability Analysis of the Earth Dams under Drawdown Conditions by using the Finite Element Method*. Ph.D. dissertation, University of Central Florida, USA.

Andreea, C. (2016). Unsaturated Slope Stability and Seepage Analysis of a Dam. *Journal of Energy Procedia*, 85, 93-98.

Athani, S. S., Solanki, C. H., & Dodagoudar, G. R. (2015). Seepage and stability analyses of earth dam using finite element method. *Aquatic Procedia*, 4, 876-883.

Bageri Gorji, M. S. (2016). *Feasibility study of increasing the height of Golestan earthen dam by finite element method*. M.Sc. thesis, Loghmanhakim Golestan Institute, Iran. (In Persian)

Esfahani, S., Zamani, A., & Jafari, P. (2016). *Reliability analysis in rockfill dams*. 4th national conference on applied research in civil engineering, architecture and urban management, Tehran, Iran. (In Persian)

Fattah, M.Y., Omran, H.A., & Hassan M.A. (2017). *Flow and stability of Al-Wand earth dam during rapid drawdown of water in reservoir*. Acta Montanistica Slovaca, 22(1), 43-57.

Hasani, H., Mamizadeh, J., & Karimi, H. (2013). Stability of slope and seepage analysis in earth fills dams using numerical models (Case Study: Ilam Dam-Iran). *Journal of World Applied Sciences*, 21(9), 1398-1402.

Javaheri, A. R. (2009). *Static and Dynamic Analysis of embankment Dams Using GEOSTUDIO*, Iran, Elme Omran Press. (In Persian)

Kamanbedast, A., & Delvari, A. (2012). Analysis of earth dam: Seepage and stability using Ansys and GeoStudio software. *World Applied Sciences Journal*, 17(9), 1087-94.

Lar Consulting Engineers Company, *Geotechnical reports of Kamal Saleh Dam*, Regional Water Authority of Markazi-Arak Province, 2010. (In persian)

Rahimi, H. (2013). *Embankment Dams*, Iran, Tehran University Press, Iran. (In persian)

Salmasi, F., Hosseinzadeh Dalir, A., & Norouzi Sarkarabad, R. (2019). Investigation of the performance of horizontal drains in increasing slope stability in intense rainfall conditions by numerical simulation. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(3), 491-502. (In Persian)

Siacara, A. T., Napa-García, G. F., Beck, A. T., & Futai, M. M. (2020). Reliability analysis of earth dams using direct coupling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 366-380.

Souliyavong, T., Gallage, C., Egodawatta, P., & Maher, B. (2012). Factors affecting the stability analysis of earth dam slopes subjected to reservoir drawdown. *The Second International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*, The GEOMATE International Society, Japan, 507-512.

Yazdanian, M., Afshoon, H. R., Gasemi, S., Afshoon, V., & Fahhim, F. (2015). Effect of Height on the Static Stability of Heterogeneous Embankment Dams. *Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology*, 5(3), 274-282.

Yi, P., Liu, J., & Xu, C. (2015). Reliability Analysis of High Rockfill Dam Stability. *Journal of Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1-8.