Journal of Intelligent Strategic Management
Vol(5), 641-666.
Bumara.ir

Development Of An Intelligent Management Model For Monitoring And Predicting Settlement In The Mosul Dam Based On Structure–Water–Foundation Interaction

Zainab Abed Naeem Al-Zerkani — Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

Mohammad Reza Habibi * — Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

Mohammad Hadi Tavana — Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

Hamed Eivani — Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

Abstract

The Mosul Dam is one of the most important earth-and-rockfill dams in the region. It is constructed on a karstic foundation composed of gypsum, anhydrite, dolomite and limestone formations. The solubility of the foundation materials, reservoir-water infiltration, fluctuations in reservoir level, and variations in hydrostatic and pore-water pressures contribute to the complexity of the dam's geotechnical behaviour and settlement pattern. This study aimed to develop an intelligent management model for monitoring and predicting settlement in the Mosul Dam based on structure–water–foundation interaction. Accordingly, a two-dimensional cross-sectional model of the dam was simulated using the finite-element method and coupled stress–pore-pressure analysis in FLAC2D and ABAQUS. The modelling considered the effects of dam geometry, geotechnical properties of the constituent materials, reservoir-level fluctuations, drawdown rate, pore-water pressure, seepage, and mechanical and hydraulic boundary conditions.The results demonstrated that the dam exhibits an asymmetric settlement pattern, with the greatest settlement occurring on the downstream side. In the ABAQUS model, downstream settlement reached 36.1 mm, whereas upstream settlement was estimated at 23.8 mm. This difference was primarily attributed to the steeper downstream slope, variations in material stiffness, and the non-uniform distribution of pore-water pressure. Moreover, rapid reservoir drawdown at a rate of 2–5 m/day increased the maximum settlement from 28.3 to 41.7 mm and reduced the time required to reach 90% of the ultimate settlement from 60 to 15 days. Analysis of reservoir-level variations showed a substantial nonlinear decrease in the settlement rate within the elevation range of 320–310 m. Accordingly, an elevation of 310 m may be considered a critical management level for controlling the settlement process. At this elevation, the settlement rate decreased to approximately 0.5–0.6 mm/day. A comparison of the results obtained from the two software packages indicated satisfactory agreement, with a maximum settlement difference of approximately 1.5 mm, a consolidation-time difference of approximately three days, and a residual pore-pressure difference of approximately 5 kPa. The findings indicate that controlling the drawdown rate, simultaneously monitoring settlement and pore-water pressure, and incorporating critical reservoir elevations into operational decision-making are essential requirements for the safe management of the Mosul Dam.

Keywords: Mosul Dam, Settlement, Intelligent Management, Interaction, FLAC2D, ABAQUS, Safety Management

How to Cite: Abed Naeem Al-Zerkani, Z., Habibi, M. R., Tavana, M. H., & Eivani, H. (2026). Development Of An Intelligent Management Model For Monitoring And Predicting Settlement In The Mosul Dam Based On Structure–Water–Foundation Interaction. Journal of Intelligent Strategic Management .5(4), 641-666.
doi: 10.87453/bumara.2026.373601.6877

Intelligent Strategic Management (JISM) in Development and Evolution is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
© Authors

* **Corresponding Author:** m.r.Habibi@iau.ac.ir

Original Research
Received: 2026/07/05
Review: 2026/08/11
Accepted: 2026/09/15
eISSN: 2891-4128

نشریه مدیریت استراتژیک هوشمند
دوره ۵، شماره ٤، زمستان، ١٤٠٥، ٦٦٦-٦٤١
Bumara.ir

ارائه مدل مدیریت هوشمند برای پایش و پیش‌بینی نشست سد موصل براساس اندرکنش سازه، آب و ساختگاه

زینب عبد نعیم الزرکانی گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

محمدرضا حبیبی* گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

محمدهادی توانا گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

حامد ایوانی گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۴
eISSN: 2891-4128

چکیده

سد موصل به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سدهای خاکی–سنگریزه‌ای منطقه، بر روی ساختگاهی کارستی و متشکل از لایه‌های گچ، انیدریت، دولومیت و سنگ‌آهک احداث شده است. انحلال‌پذیری مصالح ساختگاه، نفوذ آب مخزن، تغییرات تراز آب و نوسان فشارهای هیدرواستاتیک و منفذی، رفتار ژئوتکنیکی و الگوی نشست این سد را پیچیده می‌کند. هدف پژوهش حاضر ارائهٔ مدل مدیریت هوشمند برای پایش و پیش‌بینی نشست سد موصل براساس اندرکنش سازه، آب و ساختگاه است. در این راستا، مقطع دوبُعدی سد با استفاده از روش اجزای محدود و مدل‌سازی کوپله‌شده تنش–فشار منفذی در نرم‌افزارهای FLAC2D و ABAQUS شبیه‌سازی شد. در مدل‌سازی، اثر هندسه و مشخصات ژئوتکنیکی مصالح، تغییرات تراز آب مخزن، نرخ تخلیه، فشار منفذی، تراوش و شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که نشست سد دارای الگوی نامتقارن است که بیشترین نشست در جناح پایین‌دست رخ می‌دهد و در مدل ABAQUS به ۳۶/۱ میلی‌متر می‌رسد، درحالی‌که نشست جناح بالادست ۲۳/۸ میلی‌متر برآورد شد. این اختلاف عمدتاً به شیب تندتر پایین‌دست، تفاوت سختی مصالح و توزیع غیریکنواخت فشار منفذی نسبت داده شد. همچنین، تخلیهٔ سریع مخزن با نرخ ۲ تا ۵ متر در روز، حداکثر نشست را از ۲۸/۳ به ۴۱/۷ میلی‌متر افزایش داد و زمان رسیدن به ۹۰ درصد نشست نهایی را از ۶۰ به ۱۵ روز کاهش داد. بررسی تغییرات تراز آب نشان داد که در محدودهٔ ترازهای ۳۲۰ تا ۳۱۰ متر، نرخ نشست کاهش غیرخطی و چشمگیری دارد و تراز ۳۱۰ متر می‌تواند به‌عنوان تراز بحرانی برای کنترل روند نشست در نظر گرفته شود. در این تراز، نرخ نشست به حدود ۰/۵ تا ۰/۶ میلی‌متر در روز کاهش یافت. مقایسهٔ نتایج دو نرم‌افزار نیز تطابق قابل‌قبولی را نشان داد اختلاف حداکثر نشست حدود ۱/۵ میلی‌متر، اختلاف زمان تحکیم حدود ۳ روز و اختلاف فشار منفذی باقیمانده حدود ۵ کیلوپاسکال بود. براساس یافته‌ها، کنترل نرخ تخلیه، پایش هم‌زمان نشست و فشار منفذی، و استفاده از ترازهای بحرانی آب در تصمیم‌گیری‌های بهره‌برداری، از مهم‌ترین الزامات مدیریت ایمنی سد موصل است.

کلیدواژه‌ها: سد موصل، نشست، مدیریت هوشمند، اندرکنش، FLAC2D، ABAQUS، مدیریت ایمنی

استناد به این مقاله: عبد نعیم الزرکانی، زینب وحبیبی، محمدرضا و توانا ، محمدهادی و ایوانی، حامد. (۱۴۰۵). ارائه مدل مدیریت هوشمند برای پایش و پیش‌بینی نشست سد موصل براساس اندرکنش سازه، آب و ساختگاه. مدیریت استراتژیک هوشمند, ۵(۴) , ۶۴۱-۶۶۶.

مدیریت استراتژیک هوشمند (JISM) در توسعه و تکامل تحت مجوز بین‌المللی کریتیو کامنز با شرایط انتساب-غیرتجاری ۴,۰ منتشر می‌شود.
©نویسندگان

* **نویسنده مسئول:** m.r.Habibi@iau.ac.ir

مقدمه

سدها از زیرساخت‌های بنیادین مدیریت منابع آب به‌شمار می‌روند و در تأمین آب، تولید انرژی برق‌آبی، مهار سیلاب و توسعهٔ کشاورزی نقشی راهبردی دارند. ایمنی و کارایی بلندمدت این سازه‌ها تنها به مشخصات فنی بدنه وابسته نیست، بلکه از شرایط زمین‌شناختی پی، رژیم هیدرولیکی مخزن و نحوهٔ بهره‌برداری نیز تأثیر می‌پذیرد. این مسئله در سدهای خاکی–سنگریزه‌ای احداث‌شده بر بسترهای انحلال‌پذیر اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا گردش آب در لایه‌های زیرسطحی می‌تواند به گسترش حفره‌ها، تغییر فشار منفذی، افت مقاومت موضعی و شکل‌گیری نشست‌های نامتجانس منجر شود. در چنین محیط‌هایی، تغییر تراز مخزن نیز تعادل میان بار هیدرواستاتیک، تنش مؤثر و جریان تراوش را برهم می‌زند و پاسخ مکانیکی مجموعه را دستخوش تغییر می‌کند. سد موصل در شمال عراق، به‌دلیل جایگاه آن در تأمین آب، آبیاری و تولید برق، یکی از سازه‌های حیاتی منطقه محسوب می‌شود. قرارگیری این سد بر سازندهای کارستی متشکل از گچ، انیدریت، دولومیت و سنگ‌آهک، پایداری آن را به رفتار هم‌زمان بدنه، مخزن و زمین‌پایه وابسته ساخته است. انحلال‌پذیری بخشی از این لایه‌ها و نفوذ آب به شبکهٔ حفرات و شکستگی‌ها می‌تواند پیوستگی ساختگاه را کاهش داده و زمینه را برای تراوش متمرکز و تغییرشکل‌های ناهمگون فراهم کند (Asadi et al., 2020). افزون‌بر این، نوسانات ناشی از ورودی‌های هیدرولوژیکی و عملیات تنظیم مخزن، فشار وارد بر بدنه و پی را تغییر می‌دهد و ممکن است میان افت سطح آزاد آب و تخلیهٔ فشار منفذی درون مصالح تأخیر ایجاد کند (Sissakian et al., 2021; Xiaoming et al., 2003). چنین وضعیتی ضرورت بررسی رفتار سد را در قالب یک سامانهٔ به‌هم‌پیوسته آشکار می‌سازد. در این چارچوب، مفهوم اندرکنش سازه–آب–ساختگاه بیانگر رابطهٔ متقابل میان بارگذاری مخزن، ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی مصالح، جریان آب در محیط متخلخل و پاسخ تغییرشکلی سد است. نادیده‌گرفتن هریک از این مؤلفه‌ها می‌تواند به برآورد ناقص میدان تنش، روند تحکیم و میزان جابه‌جایی منجر شود. اهمیت موضوع هنگام تخلیهٔ سریع افزایش می‌یابد؛ زیرا مصالح کم‌نفوذ فرصت کافی برای تعدیل فشار آب منفذی ندارند و اختلاف میان شرایط هیدرولیکی داخل و خارج بدنه می‌تواند تمرکز تنش و ناپایداری موضعی را تشدید کند. ازاین‌رو، شناخت رابطهٔ میان سطح آب، سرعت تخلیه و پاسخ نشست، برای تعیین حدود مناسب بهره‌برداری و طراحی نظام هشدار پیش‌نگر ضرورت دارد. اگرچه عملیات

تزریق و اصلاح پی با هدف مهار انحلال و کاهش تراوش در سد موصل انجام شده است، این اقدامات نیاز به ارزیابی مستمر رفتار سازه را برطرف نمی‌کنند. پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر یکی از ابعاد مسئله، مانند پاسخ سازه‌ای سد–مخزن–پی یا ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی زمین‌پایه، تمرکز داشته‌اند. درنتیجه، چگونگی پیوند میان تغییرات تراز مخزن، نرخ تخلیه، فشار منفذی و الگوی نشست در یک چارچوب کمّی و قابل استفاده برای تصمیم‌گیری مدیریتی، همچنان به‌طور کامل تبیین نشده است. این شکاف، به‌ویژه در تعیین نواحی آسیب‌پذیر، تشخیص آستانه‌های هشدار و انتخاب شیوهٔ مناسب تنظیم سطح آب، اهمیت دارد. بر همین مبنا، مسئلهٔ اصلی پژوهش حاضر آن است که چگونه می‌توان با تلفیق مؤلفه‌های سازه‌ای، هیدرولیکی و زمین‌شناختی، مدلی برای پایش و پیش‌بینی نشست سد موصل ارائه کرد که قابلیت پشتیبانی از تصمیم‌های بهره‌برداری را داشته باشد. برای پاسخ به این مسئله، رفتار مقطع دوبُعدی سد با تحلیل کوپله‌شدهٔ تنش–فشار منفذی در نرم‌افزارهای FLAC2D و ABAQUS شبیه‌سازی و پاسخ مدل در سناریوهای گوناگون سطح آب و سرعت تخلیهٔ مقایسه می‌شود. هدف، تبیین سازوکار شکل‌گیری نشست نامتقارن، شناسایی محدودهٔ حساس عملکرد و تبدیل نتایج تحلیل عددی به شاخص‌هایی برای مدیریت هوشمند ایمنی سد است. بدین‌ترتیب، نوآوری پژوهش در ایجاد پیوند میان شبیه‌سازی ژئوتکنیکی و تصمیم‌گیری مدیریتی نهفته است که می‌تواند مبنایی برای تنظیم مخزن، هدفمندکردن پایش و اولویت‌بندی اقدامات پیشگیرانه فراهم سازد.

پیشینهٔ پژوهش

ایمنی و پایداری سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، تنها از عملکرد مستقل بدنهٔ سد حاصل نمی‌شود، بلکه از پیوند میان ساختگاه، مصالح، آب مخزن و شرایط بهره‌برداری شکل می‌گیرد. ویژگی‌های زمین‌شناختی پی، به‌ویژه در سازندهای کارستی و انحلال‌پذیر، می‌تواند مسیر تراوش، فشار منفذی، تنش مؤثر و روند نشست را تغییر دهد؛ به‌گونه‌ای که وجود لایه‌های گچی و انیدریتی و احتمال شکل‌گیری حفره‌ها و ناپیوستگی‌های زیرسطحی، شناخت دقیق زمین‌پایه را به ضرورتی اساسی در طراحی و ارزیابی ایمنی سد تبدیل می‌کند (Sissakian et al., 2017). تغییرشکل‌های تدریجی و مکانی نیز بخشی از همین فرایند به‌شمار می‌روند و پایش ماهواره‌ای با استفاده از فناوری DInSAR-PSI، امکان شناسایی روندهای حرکتی و تغییرمکان‌های سطحی را در پهنهٔ سازه و پیرامون آن فراهم می‌سازد (Othman et al., 2019). بااین‌حال، مقدار تغییرمکان به‌تنهایی سازوکار ایجاد

نشست را توضیح نمی‌دهد و تفسیر آن نیازمند توجه به ویژگی‌های مصالح، وضعیت پی و شرایط بارگذاری است؛ زیرا نشست در بدنهٔ سد تحت‌تأثیر موقعیت مقطع، هندسه، توالی ساخت، تراکم لایه‌ها و شرایط تکیه‌گاه، در بخش‌های مختلف الگوی یکسانی ندارد (سلماسی و همکاران، ۱۳۹۷). تغییرات تراز آب مخزن نیز با تغییر بار هیدرواستاتیک، فشار منفذی، گرادیان هیدرولیکی و تنش مؤثر، رفتار سد را دگرگون می‌کند و هنگامی‌که سرعت افت سطح آب با ظرفیت زهکشی بدنهٔ سد و پی هماهنگ نباشد، اختلاف میان شرایط هیدرولیکی داخل و خارج سازه می‌تواند به تغییر مسیر تراوش، تمرکز تنش و افزایش تغییرشکل‌های قائم و افقی منجر شود (Zheng et al., 2024). پیوند میان سازه، آب و ساختگاه، مبنایی ضروری برای تحلیل پاسخ واقعی سد فراهم می‌سازد؛ زیرا ویژگی‌های مخزن و انعطاف‌پذیری پی، هم‌زمان بر توزیع تنش و مقدار جابه‌جایی اثر می‌گذارند (Zeidan, 2015). بازنمایی این روابط در مدل‌های عددی، با استفاده از روش اجزای محدود و ترکیب میدان نزدیک و دور، امکان تحلیل دقیق‌تر انتقال تنش و اثر محیط پیرامونی را فراهم می‌سازد (Yerli et al., 2003). شرایط تکیه‌گاه و انعطاف‌پذیری محیط زیرین نیز می‌توانند جابه‌جایی، برش پایه و ویژگی‌های ارتعاشی سازه را تغییر دهند (امین‌فر و همکاران، ۱۳۹۲). وابستگی عملکرد سازه به تغییرمکان تکیه‌گاه، در طراحی عملکردی سازه‌های دارای تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر نیز اهمیت دارد و نشان می‌دهد که پاسخ سازه بدون توجه به شرایط محیط زیرین به‌درستی قابل ارزیابی نیست (بهنام‌فر و عیدینی، ۱۳۸۳). اثر شرایط پیرامونی بر پاسخ سازه در برابر تحریک‌های نزدیک‌گسل، توزیع تقاضای شکل‌پذیری و خروج از مرکزیت دینامیکی نیز آشکار است و اندرکنش خاک و سازه در هریک از این فرایندها، نحوهٔ انتقال نیرو و تغییرشکل را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Ganjavi & Hao, 2012; Azarhoosh & Ghodrati Amiri, 2010; Shakib, 2004). تفاوت در نوع مصالح و نحوهٔ انتقال نیرو، رفتار سدهای خاکی و بتنی را نیز از یکدیگر متمایز می‌سازد و می‌تواند زمینه‌ساز ترک‌خوردگی، نشست نامتقارن، لغزش و تغییرشکل‌های موضعی شود (عباس‌زاده‌شهری و همکاران، ۱۳۸۵). در چنین شرایطی، حرکت از تصمیم‌گیری‌های خطی به‌سوی مدیریت سناریومحور و آینده‌نگر، امکان پیوند میان داده‌های پایش، مدل‌های عددی و فرایندهای بهره‌برداری را فراهم کرده و مدیریت زیرساخت‌های حیاتی را از واکنش پس از وقوع ناپایداری به سمت پیش‌بینی و پیشگیری هدایت می‌کند (دبدبه و همکاران، ۱۴۰۴).

باوجود توسعهٔ فناوری‌های پایش، مدل‌سازی عددی و شیوه‌های نُوین مدیریت، هنوز ابهاماتی بنیادین دربارهٔ چگونگی ارتباط میان شرایط ساختگاه، تغییرات تراز آب، نرخ تخلیه، فشار منفذی، تراوش و روند نشست سد موصل باقی است. ضرورت این جستار از آنجا آشکار می‌شود که بررسی جداگانهٔ این مؤلفه‌ها نمی‌تواند رفتار پیچیدهٔ سد را در شرایط مختلف بهره‌برداری تبیین کند. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر اندرکنش سازه، آب و ساختگاه، به‌دنبال ارائهٔ مدلی برای مدیریت هوشمند، پایش و پیش‌بینی نشست سد موصل است؛ به‌گونه‌ای که ضمن شناسایی شرایط بحرانی و الگوهای تغییرشکل، امکان پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مرتبط با بهره‌برداری، کنترل تغییرات تراز آب و ارتقای ایمنی سد فراهم شود.

روش‌تحقیق

در این بخش، روش‌شناسی پژوهش با هدف بررسی رفتار نشست سد موصل در شرایط مختلف بهره‌برداری از مخزن و تحلیل هم‌زمان تأثیر ارتفاع آب، نرخ تخلیه و اندرکنش سازه–آب–ساختگاه ارائه می‌شود. به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق و قابل اتکا، از مدل‌سازی عددی دوبُعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D و ABAQUS بهره گرفته شده است که امکان تحلیل رفتاری و ژئوتکنیکی بدنهٔ سد در برابر سناریوهای مختلف تنش و تغییرات سطح آب را فراهم می‌سازد.

- موقعیت سد موصل

سد موصل، که پیش‌تر با نام سد صدام نیز شناخته می‌شد، در شمال عراق، حدود ۵۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر موصل، مرکز استان نینوا، و بر روی رود دجله احداث شده است. این سد تقریباً در مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقهٔ عرض شمالی و ۴۲ درجه و ۴۹ دقیقهٔ طول شرقی قرار دارد. ساختگاه سد از نظر زمین‌شناسی شامل سازندهای کارستی متشکل از گچ، انیدریت، دولومیت و سنگ‌آهک است؛ سازندهایی که به‌دلیل قابلیت انحلال و نفوذپذیری، شرایط ژئوتکنیکی پیچیده و حساسی ایجاد کرده‌اند. رود دجله که سرچشمهٔ آن در ارتفاعات ترکیه قرار دارد، در محل احداث سد از میان این سازندهای زمین‌شناختی عبور می‌کند و همین ویژگی، همراه با قابلیت انحلال مصالح زیرسطحی، بر رفتار بلندمدت پی و پایداری سد اثرگذار است. موقعیت سد موصل در تصویر ماهواره‌ای (شکل ۱)، نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت سد موصل

- داده‌های موردنیاز

برای مدل‌سازی دقیق رفتار سد موصل با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D، مجموعه‌ای از داده‌های هندسی، ژئوتکنیکی، هیدرولیکی، پایشی و کنترلی مورد نیاز است. مشخصات هندسی سد و ساختگاه، شامل ارتفاع سد، عرض تاج و پی، شیب جناح‌های بالادست و پایین‌دست و ضخامت هستهٔ نفوذناپذیر، در (جدول)، ارائه شده است. خواص ژئوتکنیکی مصالح مختلف، ازجمله چگالی، چسبندگی، زاویهٔ اصطکاک، مدول یانگ، ضریب پواسون و نفوذپذیری، در (جدول ۲)، درج شده‌اند. همچنین، ترازهای مختلف آب مخزن، نرخ تخلیهٔ تدریجی و سریع و فشار اولیهٔ آب منفذی در (جدول ۳)، ارائه شده است. داده‌های مربوط به کالیبراسیون و پایش، شامل دامنهٔ نشست ثبت‌شده، فشار منفذی در اعماق مختلف و اطلاعات GPS و ترازیابی، در (جدول ۴)، آورده شده‌اند. افزون‌بر این،

روند تقریبی نشست سالانهٔ تاج سد و مقدار نشست تجمعی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ در (جدول ۵)، ارائه شده است. این داده‌ها به‌عنوان ورودی مدل عددی و مبنای مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی با وضعیت مشاهده‌شدهٔ سد مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱: مشخصات هندسی سد موصل

پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
ارتفاع کل سد	113	متر	از پی تا تاج
عرض تاج	10	متر	مسیر دسترسی
عرض پی	~610	متر	در مقطع پایه
شیب جناح بالا (بالادست)	1:2.5	نسبت	افقی به قائم
شیب جناح پایین (پایین‌دست)	1:2.0	نسبت	افقی به قائم
ضخامت هستهٔ نفوذناپذیر	10–20	متر	متغیر در مقطع

جدول ۲: خواص ژئوتکنیکی مصالح

لایه	چگالی ویژه (kN/m³)	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	k (m/s)
هستهٔ رسی	19	50	18	25	0.35	1×10^{-9}
تکیه‌گاه سنگ‌ریز	21	5	38	80	0.30	1×10^{-5}
فیلتر شن و ماسه	20	1	35	50	0.28	1×10^{-4}
لایهٔ کارستی–گچی	22	15	27	150	0.25	1×10^{-6} ~ 1×10^{-3}

جدول ۳: داده‌های هیدرولیکی و شرایط مخزن

پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
تراز نرمال آب مخزن	330	متر	سطح نرمال بهره‌برداری
حداقل تراز بهره‌برداری	300	متر	در مواقع کم‌آبی یا تخلیهٔ اضطراری
حداکثر تراز اضطراری	335	متر	حداکثر مجاز قبل از سرریز
نرخ تخلیهٔ تدریجی	0.5–1	متر/روز	استاندارد بهره‌برداری
نرخ تخلیهٔ سریع	2–5	متر/روز	شرایط هشدار یا اضطراری
فشار آب منفذی اولیه (PWP)	100–300	kPa	وابسته به عمق و تراوایی خاک

جدول ٤: داده‌های کالیبراسیون و پایش

پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
حداکثر نشست ثبت‌شده	25–35	mm	نشست تجمعی تاج سد
فشار منفذی در اعماق پایین	200–400	kPa	بر اساس داده‌های Piezometer
داده‌های GPS و ترازسنجی	موجود از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳	-	برای اعتبارسنجی مدل

جدول ٥: داده‌های تقریبی GPS و ترازسنجی تاج سد موصل (۲۰۲۳–۲۰۱۰)

سال	میانگین نشست سالانه (mm)	نشست تجمعی (mm)
2010	2.8	2.8
2011	3.1	5.9
2012	2.7	8.6
2013	3.3	11.9
2014	2.5	14.4
2015	2.9	17.3
2016	3.5	20.8
2017	3.2	24.0
2018	2.2	26.2
2019	2.0	28.2
2020	1.5	29.7
2021	1.3	31.0
2022	1.0	32.0
2023	0.8	32.8

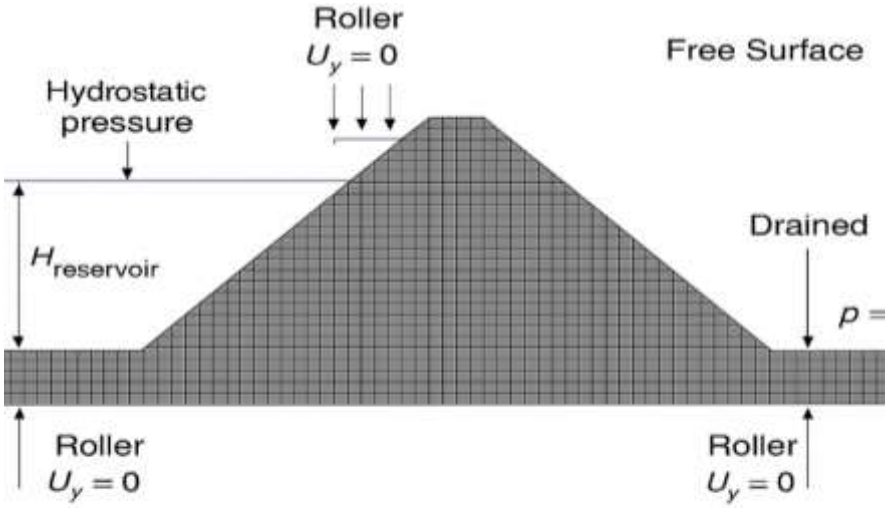
- شرایط مرزی

در مدل عددی سد موصل با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D، شرایط مرزی با هدف بازنمایی رفتار واقعی بدنه، پی و جریان آب در محیط پیرامونی به دو گروه مکانیکی و هیدرولیکی تقسیم شدند. این شرایط به‌گونه‌ای انتخاب شدند که از ایجاد جابه‌جایی‌های صلب و غیرواقعی در مرزهای مدل جلوگیری شود و در عین حال، امکان شبیه‌سازی نشست، انتقال تنش و جریان تراوش در پاسخ به تغییرات سطح آب مخزن فراهم آید. مقادیر عددی قیود اعمال‌شده در (جدول ۶) و نحوهٔ قرارگیری مرزهای مکانیکی و هیدرولیکی در (شکل ۲)، ارائه شده است. در بخش مکانیکی، مرز زیرین مدل به‌عنوان تکیه‌گاه سنگ‌بستر در نظر گرفته شد و جابه‌جایی‌های افقی و قائم آن محدود گردید. این شرط از حرکت کلی مدل و جابه‌جایی صلب کف جلوگیری می‌کند و بیانگر آن است که لایه‌های عمیق‌تر ساختگاه، در مقایسه با بدنهٔ سد و لایه‌های سطحی، از سختی و پایداری بیشتری برخوردارند. در مرزهای جانبی، حرکت افقی محدود و حرکت قائم آزاد تعریف شد تا اثر محدودشدگی

جانبی محیط زمین بازنمایی شود، بدون آنکه امکان نشست طبیعی مدل از بین برود. سطوح آزاد بدنه، شامل تاج و شیب‌های سد، بدون قید مکانیکی مستقیم باقی ماندند تا تغییرشکل آن‌ها در اثر وزن مصالح، بار آب و تغییرات تنش مؤثر، به‌صورت طبیعی در تحلیل محاسبه شود. در بخش هیدرولیکی، مرز بالادست به‌عنوان سطح تماس با مخزن تعریف شد و فشار آب در آن متناسب با عمق و تراز سطح آب اعمال گردید. به این ترتیب، فشار هیدرواستاتیک از سطح مخزن به‌سمت بخش‌های عمیق‌تر افزایش یافته و اثر بار آب بر بدنهٔ سد و پی در مدل وارد شد. در مرز پایین‌دست، وضعیت زهکشی آزاد در نظر گرفته شد تا آب منفذی بتواند از بدنهٔ سد و ساختگاه خارج شود و شرایط طبیعی‌تر تراوش در جناح پایین‌دست بازنمایی گردد. فشار آب منفذی اولیه نیز در نواحی اشباع مدل، براساس ارتفاع آب و عمق نقاط نسبت به سطح آزاد تعیین شد؛ درحالی‌که نواحی واقع در بالای سطح آب، فاقد فشار منفذی اولیه در نظر گرفته شدند. ترکیب این شرایط مرزی، امکان تحلیل هم‌زمان رفتار مکانیکی و هیدرولیکی مدل را فراهم می‌کند. براین‌اساس، تغییرات فشار آب، مسیر تراوش، توزیع تنش مؤثر و روند نشست می‌توانند در پاسخ به تغییرات تراز مخزن و سناریوهای مختلف تخلیه بررسی شوند. همچنین، انتخاب مرزهای جانبی با حرکت افقی محدود و قائم آزاد، از تمرکز مصنوعی تغییرشکل در کناره‌های مدل جلوگیری کرده و شرایط مناسب‌تری برای بررسی رفتار قائم بدنهٔ سد فراهم می‌سازد. در مجموع، شرایط مرزی تعریف‌شده، چارچوب لازم را برای شبیه‌سازی اندرکنش سازه، آب و ساختگاه و ارزیابی پاسخ سد در برابر تغییرات هیدرولیکی و مکانیکی ایجاد می‌کنند.

جدول ٦: مقادیر عددی شرایط مرزی

شرط مرزی	مرز	مقدار
جابه‌جایی افقی و عمودی	پایین (کف مدل)	Ux=0, Uy=0
جابجایی افقی مسدود عمودی آزاد	کناری (چپ/راست)	Ux=0, Uyآزاد
فشار هیدرواستاتیک	بالادست (مخزن)	$p = 9.81 \times (330 - z)$ kPa
فشار صفر (تراوش)	پایین دست (خروجی)	p = 0 kPa
فشار منفذی اولیه	درون مدل	مطابق توزیع هیدرواستاتیک



FLAc Boundary Conditions

شکل ۲: شرایط مرزی سد موصل

- مش‌بندی

در فرایند مش‌بندی مدل دوبُعدی سد موصل، هندسهٔ ترسیم‌شده به چهار ناحیه اصلی شامل بالادست، هستهٔ رسی، پایین‌دست و بستر و پی تقسیم شد. تراکم شبکه در هر ناحیه با توجه به اهمیت آن در انتقال تنش، تراوش و ایجاد نشست تعیین گردید. در ناحیه بالادست، با شیب ۱:۲٫۵ و عرض تاج ۱۰ متر، شبکه‌ای منظم شامل ۳۰۰ المان مربعی با اندازهٔ تقریبی ۲ متر در نظر گرفته شد. هستهٔ رسی، به‌دلیل حساسیت بیشتر نسبت به نشست و تغییرات فشار منفذی، با ۴۵۰ المان و اندازهٔ تقریبی ۱٫۵ متر مش‌بندی گردید. در ناحیهٔ پایین‌دست، با شیب ۱:۲٫۰ و عرض پایهٔ تقریبی ۶۱۰ متر، تعداد ۳۵۰ المان مربعی با اندازهٔ تقریبی ۲ متر به‌کار رفت. برای بستر و پی نیز شبکه‌ای نسبتاً درشت‌تر شامل ۲۰۰ المان مربعی با اندازهٔ تقریبی ۳ متر ایجاد شد؛ زیرا این ناحیه در مقایسه با هسته و پوسته‌های سد، تغییرات شدیدتری در نشست و تنش نشان نمی‌دهد، اما انتقال صحیح بار به آن اهمیت دارد. درمجموع، شبکهٔ عددی مدل از ۱۳۰۰ المان تشکیل شد. این آرایش، با افزایش تراکم مش در نواحی حساس و استفاده از مش درشت‌تر در بخش‌های کم‌تغییر، تعادل مناسبی میان دقت محاسبات و زمان اجرای تحلیل ایجاد می‌کند. مش‌بندی در نرم‌افزار FLAC2D با استفاده از گزینهٔ Grid > Generate انجام شد. همچنین، در صورت نیاز به افزایش دقت در

ناحیهٔ هسته یا پوستهٔ بالادست، امکان استفاده از ابزار Refine Mesh برای ریزترکردن شبکه فراهم بود.

- تحلیل کوپله‌شده تنش و فشار منفذی در ABAQUS

برای بررسی اندرکنش آب، خاک و ساختگاه، مقطع دوبُعدی سد موصل در نرم‌افزار ABAQUSو در حالت کرنش صفحه‌ای (Plane Strain) ایجاد شد. هندسهٔ مدل شامل هستهٔ رسی با عرض متوسط ۱۵ متر، زون سنگ‌ریزه‌ای بالادست با شیب قائم به افقی برابر با ۱ به ۲٫۵، زون سنگ‌ریزه‌ای پایین‌دست با شیب قائم به افقی برابر با ۱ به ۲، عرض تاج ۱۰ متر و ارتفاع کلی ۱۱۳ متر بود. محدودهٔ ارتفاعی مدل از تراز ۲۱۷ تا تراز ۳۳۰ متر در نظر گرفته شد. برای هستهٔ رسی، مدول یانگ برابر با ۲۵ مگاپاسکال، ضریب پواسون برابر با ۰٫۳۵، چسبندگی برابر با ۵۰ کیلوپاسکال، زاویهٔ اصطکاک داخلی برابر با ۱۸ درجه، تخلخل برابر با ۰٫۳۸ و نفوذپذیری برابر با ۱ ضرب در ۱۰ به توان منفی ۹ متر بر ثانیه تعریف شد. برای زون سنگ‌ریزه‌ای، مدول یانگ ۸۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰٫۳۰، چسبندگی ۵ کیلوپاسکال، زاویهٔ اصطکاک داخلی ۳۸ درجه، تخلخل ۰٫۲۵ و نفوذپذیری ۱ ضرب در ۱۰ به توان منفی ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. مشخصات فیلتر ماسه‌ای شامل مدول یانگ ۵۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰٫۲۸، چسبندگی ۱ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه، تخلخل ۰٫۳۰ و نفوذپذیری ۱ ضرب در ۱۰ به توان منفی ۴ متر بر ثانیه بود. لایهٔ کارستی ـ گچی نیز به‌عنوان پی ساختگاه با مدول یانگ ۱۵۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰٫۲۵، چسبندگی ۱۵ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک داخلی ۲۷ درجه، تخلخل ۰٫۲۰ و نفوذپذیری ۱ ضرب در ۱۰ به توان منفی ۶ متر بر ثانیه تعریف شد. در گام ژئواستاتیکی، تنش‌های اولیه و فشار منفذی بر اساس توزیع هیدروستاتیکی متناسب با عمق مدل اعمال شد. سپس، یک گام تحلیل کوپله‌شده تنش و فشار منفذی با مدت ۳۰ روز و شامل ۳۰۰ زیرگام تعریف گردید تا کاهش تراز آب مخزن از ۳۳۰ متر به ۳۰۰ متر با نرخ کاهش یک متر در روز شبیه‌سازی شود. در کف مدل، جابه‌جایی‌های افقی و قائم مقید شد. در دیواره‌های جانبی، جابه‌جایی افقی محدود و جابه‌جایی قائم آزاد در نظر گرفته شد. بر وجه بالادست، فشار هیدرواستاتیک متناسب با ارتفاع آب اعمال گردید و مرز پایین‌دست به‌صورت زهکش‌شده، با فشار منفذی برابر با صفر، تعریف شد. برای مش‌بندی، از المان‌های چهارگرهی کوپله‌شده از نوع CPE4P استفاده شد. اندازه مش در هستهٔ رسی

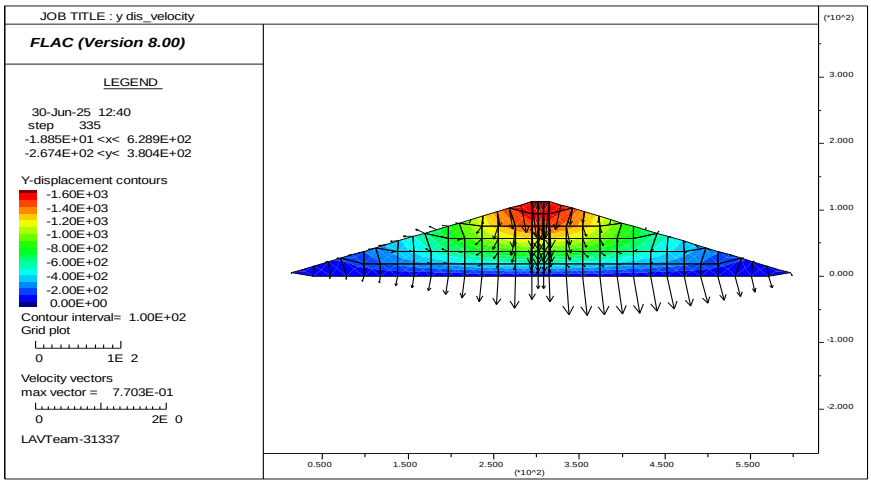
حدود ۱٫۵ متر و در سایر نواحی حدود ۳ متر انتخاب گردید. تحلیل نهایی با روش حل ضمنی و استاندارد (Standard/Implicit)، اجرا شد.

یافته‌ها

پس از تکمیل مدل‌سازی عددی و اجرای تحلیل‌های کوپله‌شده، نتایج حاصل در سه محور اصلی شامل الگوی جابه‌جایی و تنش، اثر نرخ تخلیهٔ مخزن بر نشست، و رابطهٔ تراز آب با روند تغییرشکل بررسی شد. در ادامه، عملکرد دو نرم‌افزار FLAC2D و ABAQUS نیز براساس شاخص‌هایی مانند مقدار نشست، زمان تحکیم و فشار منفذی باقیمانده مقایسه گردید. یافته‌ها در مجموع، وجود نشست نامتقارن، حساسیت قابل‌توجهٔ رفتار سد به سرعت کاهش تراز آب و شکل‌گیری یک تراز بحرانی برای کنترل روند نشست را نشان می‌دهند.

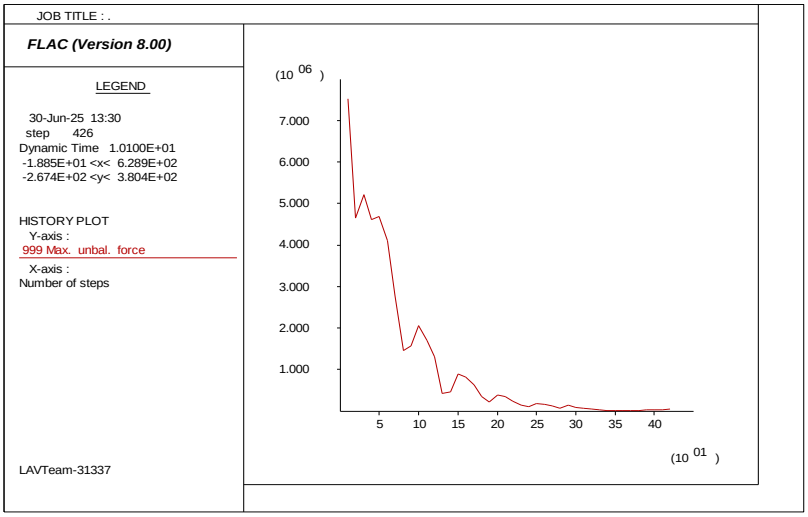
- الگوی تنش و جابه‌جایی در بدنهٔ سد

توزیع تنش‌های قائم و الگوی جابه‌جایی بدنهٔ سد تحت اثر بارگذاری هیدرواستاتیک در (شکل ۳)، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تنش‌های فشاری در بخش‌های پایین‌دست و نواحی نزدیک به پی تمرکز بیشتری دارند و با حرکت به‌سمت بالادست، از شدت آن‌ها کاسته می‌شود. این تمرکز تنش حاصل اثر هم‌زمان وزن بدنهٔ سد، فشار آب مخزن، تفاوت سختی مصالح و شرایط هندسی جناح‌هاست. بردارهای جابه‌جایی نیز حرکت غالب مصالح به‌سمت پایین‌دست را نشان می‌دهند. این الگو با تفاوت نشست میان دو جناح سد سازگار است و پایین‌دست را به‌عنوان ناحیهٔ حساس‌تر در برابر تغییرشکل معرفی می‌کند.



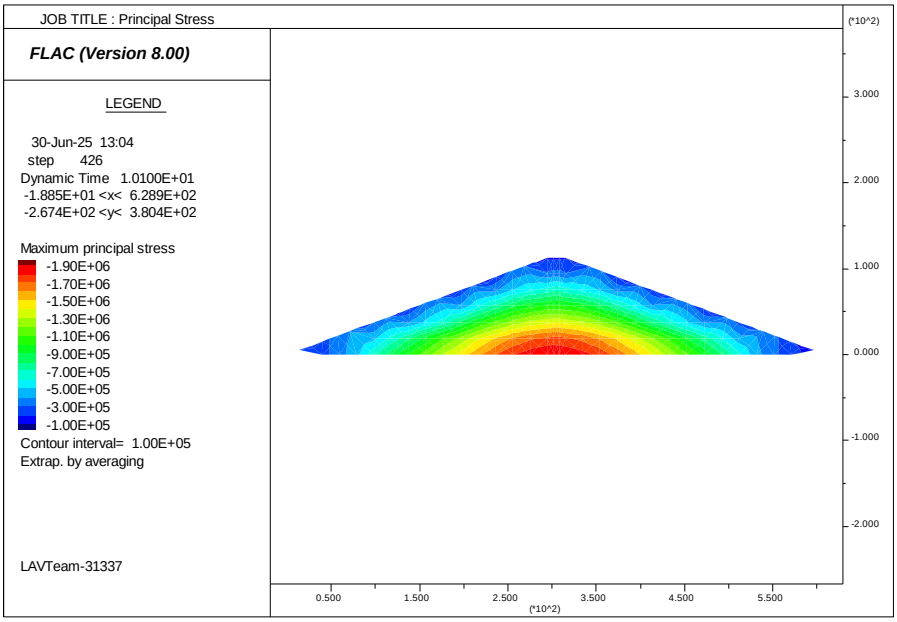
شکل۳:. توزیع تنش قائم و بردارهای جابه‌جایی در مدل FLAC2D

تاریخچهٔ نشست قائم در طول مراحل زمانی تحلیل در (شکل ۴)، نشان داده شده است. روند تغییرات از سه مرحلهٔ اصلی تشکیل می‌شود. در مرحلهٔ نخست، نشست با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد که بیانگر تحکیم اولیه و پاسخ سریع مصالح به بارگذاری و تغییر شرایط هیدرولیکی است. در مرحلهٔ دوم، شیب منحنی کاهش پیدا می‌کند و روند نشست وارد مرحله‌ای با سرعت متوسط می‌شود. این تغییر با کاهش تدریجی فشار منفذی و نزدیک‌شدن سامانه به شرایط تعادل همراه است. در مرحلهٔ پایانی، افزایش نشست بسیار محدود می‌شود و منحنی به وضعیت تقریباً پایدار میل می‌کند. این رفتار، وابستگی نشست سد به زمان و ضرورت پایش پیوستهٔ تغییرشکل‌ها را تأیید می‌کند.



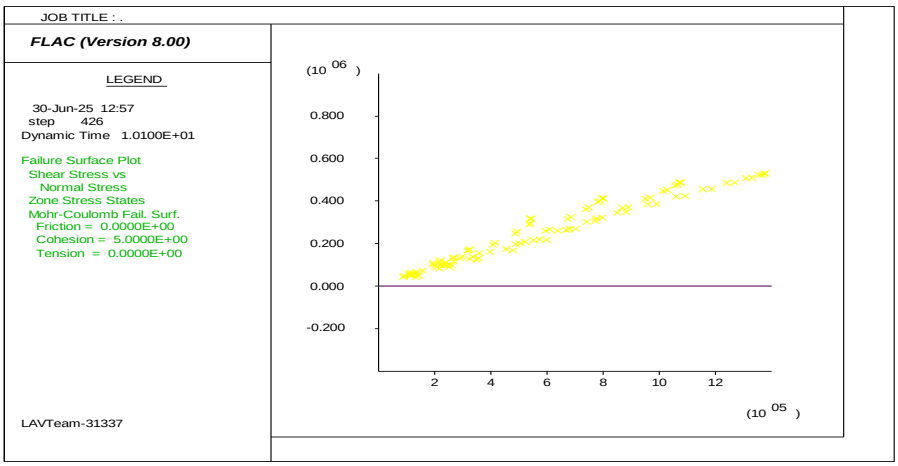
شکل ٤: تاریخچهٔ تغییرات نشست قائم سد موصل در مدل FLAC2D

توزیع تنش اصلی بیشینه در (شکل ۵)، ارائه شده است. بیشترین تمرکز تنش در بخش‌های پایین‌دست بدنهٔ سد و نواحی مجاور پی مشاهده می‌شود. این تمرکز به تفاوت رفتار مکانیکی هستهٔ رسی و مصالح سنگ‌ریزه‌ای، تغییر هندسهٔ مقطع و انتقال بار هیدرواستاتیک به ساختگاه مربوط است. نواحی دارای تنش بالاتر، در صورت تداوم بارگذاری یا وقوع تغییرات سریع در سطح آب، می‌توانند مستعد ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک و گسیختگی موضعی باشند. بنابراین، ارزیابی این نواحی باید در برنامه‌های پایش و تحلیل ایمنی سد در اولویت قرار گیرد.



شکل۵: توزیع تنش اصلی بیشینه در مدل FLAC2D

توزیع تنش‌های فشاری و کششی در (شکل ۶)، نشان داده شده است. میدان تنش در بدنهٔ سد یکنواخت نیست و اختلاف مشخصی میان نواحی مرکزی، پایین‌دست و پی مشاهده می‌شود. تنش‌های فشاری عمدتاً در بخش‌هایی متمرکز شده‌اند که انتقال بار و محدودیت تغییرشکل بیشتر است، درحالی‌که تنش‌های کششی در نواحی دارای تغییرشکل نامتوازن ظاهر می‌شوند. این وضعیت، احتمال ایجاد ترک‌های موضعی و توسعهٔ نواحی پلاستیک را در بخش‌های حساس افزایش می‌دهد و لزوم کنترل تغییرشکل‌های قائم و افقی را آشکار می‌سازد.



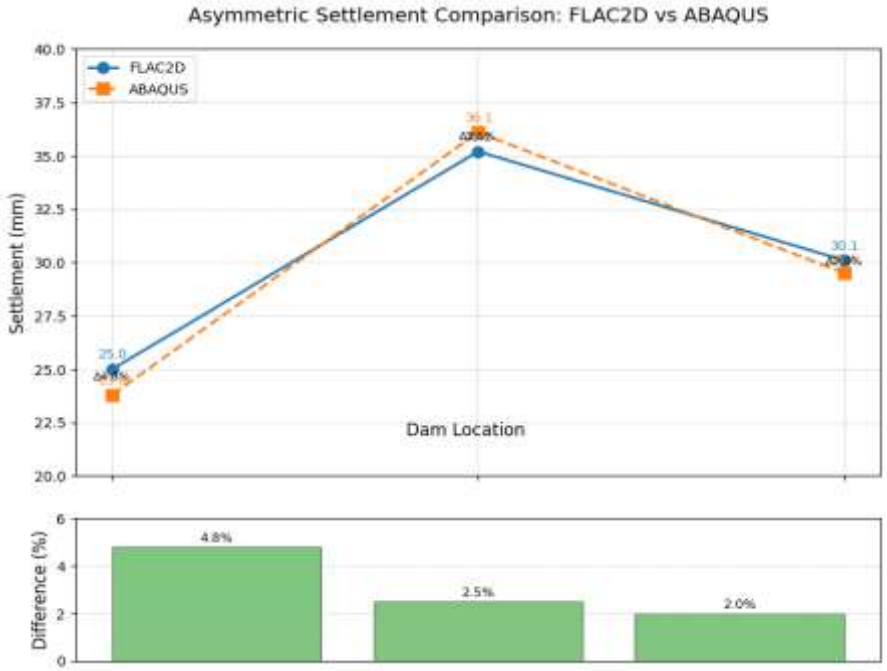
شکل٦: توزیع تنش‌های فشاری و کششی در مدل

- نشست نامتقارن در بدنهٔ سد

مقایسهٔ نشست در تاج بالادست، تاج پایین‌دست و میانهٔ هسته در (جدول ۷) و (شکل ۷)، ارائه شده است. بیشترین نشست در تاج پایین‌دست به‌دست آمد؛ به‌گونه‌ای‌که مقدار آن در مدل FLAC2D برابر با ۳۵٫۲ میلی‌متر و در مدل ABAQUS برابر با ۳۶٫۱ میلی‌متر بود. در تاج بالادست، نشست‌های پیش‌بینی‌شده به‌ترتیب ۲۵٫۰ و ۲۳٫۸ میلی‌متر به‌دست آمدند. نشست میانهٔ هسته نیز در دو مدل به‌ترتیب ۳۰٫۱ و ۲۹٫۵ میلی‌متر برآورد شد.

جدول ۷: مقایسهٔ نشست در بخش‌های مختلف بدنهٔ سد

موقعیت	نشست - (mm) FLAC2D	نشست - (mm) ABAQUS	اختلاف (%)
تاج بالادست	۲۵٫۰	۲۳٫۸	۴٫۸
تاج پایین‌دست	۳۵٫۲	۳۶٫۱	۲٫۵
میانهٔ هسته	۳۰٫۱	۲۹٫۵	۲٫۰



شکل۷: مقایسهٔ نشست نامتقارن در بدنهٔ سد

نتایج، وجود الگوی نامتقارن نشست را تأیید می‌کنند. نشست پایین‌دست نسبت به بالادست حدود ۳۴ تا ۴۰ درصد بیشتر است. این تفاوت به شیب تندتر پایین‌دست، تفاوت سختی و تراکم‌پذیری مصالح، تمرکز تنش‌های قائم و توزیع غیریکنواخت فشار منفذی مربوط می‌شود. هم‌خوانی مناسب خروجی دو نرم‌افزار، با بیشترین اختلاف ۴٫۸ درصد، نشان

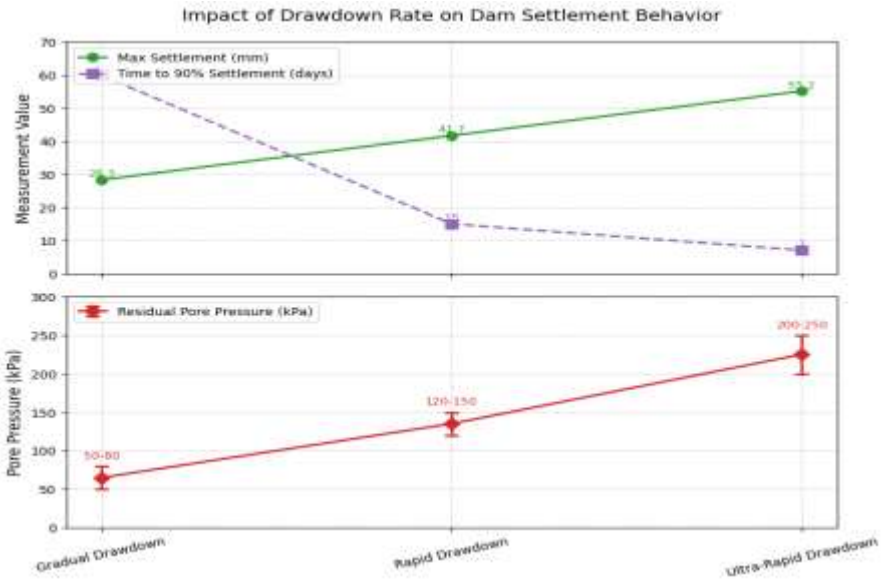
می‌دهد که الگوی کلی تغییرشکل در هر دو مدل به‌صورت مشابه بازتولید شده است. براین‌اساس، پایین‌دست سد و بخش‌های مجاور پی باید به‌عنوان نواحی اولویت‌دار برای پایش نشست و تغییرشکل در نظر گرفته شوند.

- اثر نرخ تخلیهٔ مخزن بر نشست

نتایج سناریوهای مختلف تخلیهٔ مخزن در (جدول ۸) و (شکل ۸)، ارائه شده است. در تخلیهٔ تدریجی، با نرخ ۰٫۵ تا ۱ متر در روز، حداکثر نشست ۲۸٫۳ میلی‌متر و زمان رسیدن به ۹۰ درصد نشست نهایی ۶۰ روز به‌دست آمد. در تخلیهٔ سریع، با نرخ ۲ تا ۵ متر در روز، حداکثر نشست به ۴۱٫۷ میلی‌متر افزایش یافت و زمان رسیدن به ۹۰ درصد نشست نهایی به ۱۵ روز کاهش پیدا کرد. در سناریوی تخلیهٔ فوق‌سریع، نشست به ۵۵٫۲ میلی‌متر رسید و این مقدار در مدت ۷ روز ایجاد شد.

جدول ۸: اثر نرخ تخلیهٔ مخزن بر نشست

سناریو	حداکثر نشست (mm)	زمان رسیدن به ۹۰٪ نشست (روز)	فشار منفذی باقیمانده (kPa)
تخلیهٔ تدریجی	۲۸٫۳	۶۰	۸۰–۵۰
تخلیهٔ سریع	۴۱٫۷	۱۵	۱۵۰–۱۲۰
تخلیهٔ فوق‌سریع	۵۵٫۲	۷	۲۵۰–۲۰۰



شکل۸: اثر نرخ تخلیهٔ مخزن بر نشست

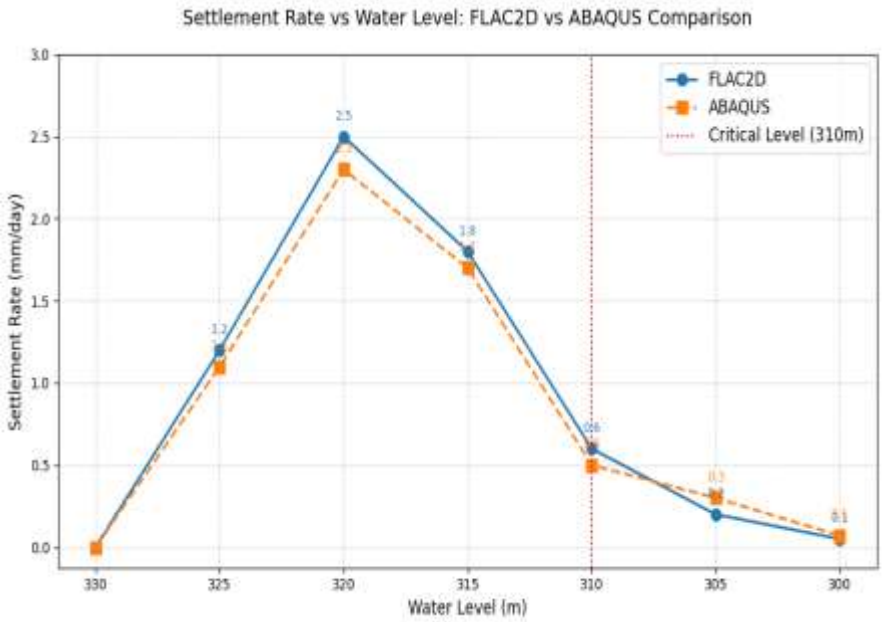
افزایش نرخ تخلیه، هم مقدار نشست و هم سرعت وقوع آن را افزایش می‌دهد. در مقایسه با تخلیهٔ تدریجی، تخلیهٔ سریع موجب افزایش تقریبی ۴۷ درصدی نشست و کاهش ۷۵ درصدی زمان رسیدن به ۹۰ درصد نشست نهایی شد. در حالت فوق‌سریع، افزایش نشست به حدود ۹۵ درصد رسید. علت اصلی این رفتار، ناهماهنگی میان سرعت افت سطح آب در مخزن و سرعت تخلیهٔ آب منفذی از بدنهٔ سد و پی است. درنتیجه، فشار منفذی باقیمانده افزایش می‌یابد، توزیع تنش مؤثر دستخوش تغییر می‌شود و ظرفیت تحمل مصالح در برابر تغییرشکل و لغزش کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، کاهش سریع تراز آب، به‌ویژه در سازندهای دارای تراوایی ناهمگن، می‌تواند حاشیهٔ ایمنی سد را به‌طور محسوسی کاهش دهد.

- رابطهٔ تراز آب و نرخ نشست

رابطهٔ میان تراز آب مخزن و نرخ نشست در (جدول ۹) و (شکل ۹)، ارائه شده است. با کاهش تراز آب از ۳۳۰ متر، نرخ نشست ابتدا افزایش یافت و در تراز ۳۲۰ متر به بیشترین مقدار رسید. پس از آن، با کاهش بیشتر تراز آب، نرخ نشست روندی نزولی پیدا کرد و در تراز ۳۱۰ متر به حدود ۰٫۵ تا ۰٫۶ میلی‌متر در روز رسید. در تراز ۳۰۰ متر، نرخ نشست به حدود ۰٫۰۵ تا ۰٫۰۷ میلی‌متر در روز کاهش یافت.

جدول ۹: رابطهٔ تراز آب مخزن و نرخ نشست

تراز آب (m)	نرخ نشست - (mm/day) FLAC2D	نرخ نشست - (mm/day) ABAQUS
۳۳۰	۰٫۰	۰٫۰
۳۲۵	۱٫۲	۱٫۱
۳۲۰	۲٫۵	۲٫۳
۳۱۵	۱٫۸	۱٫۷
۳۱۰	۰٫۶	۰٫۵
۳۰۵	۰٫۲	۰٫۳
۳۰۰	۰٫۰۵	۰٫۰۷



شکل۹: رابطهٔ تراز آب مخزن و نرخ نشست

رفتار مشاهده‌شده غیرخطی و سه‌مرحله‌ای است. در مرحلهٔ نخست، کاهش تراز آب از مقدار نرمال تا تراز ۳۲۰ متر با افزایش سریع نشست همراه شد. در مرحلهٔ دوم، بین ترازهای ۳۲۰ تا ۳۱۰ متر، نرخ نشست به‌صورت محسوس کاهش یافت. در مرحلهٔ سوم، با نزدیک‌شدن تراز آب به ۳۰۰ متر، روند نشست تقریباً متوقف شد. کاهش نرخ نشست در این محدوده را می‌توان به کاهش گرادیان هیدرولیکی، تکمیل بخش عمدهٔ تحکیم اولیه و نزدیک‌شدن تنش‌های داخلی به حالت تعادل نسبت داد. تراز ۳۱۰ متر به‌عنوان آستانهٔ مدیریتی مهم شناسایی شد؛ زیرا در این تراز، نرخ نشست در هر دو نرم‌افزار به‌طور چشمگیری کاهش یافت و اختلاف میان خروجی‌ها نیز محدود بود. بااین‌حال، این تراز نباید به‌تنهایی به‌عنوان حد ایمنی قطعی تلقی شود و لازم است همراه با فشار منفذی، نرخ تراوش، جابه‌جایی افقی و وضعیت ساختگاه ارزیابی شود.

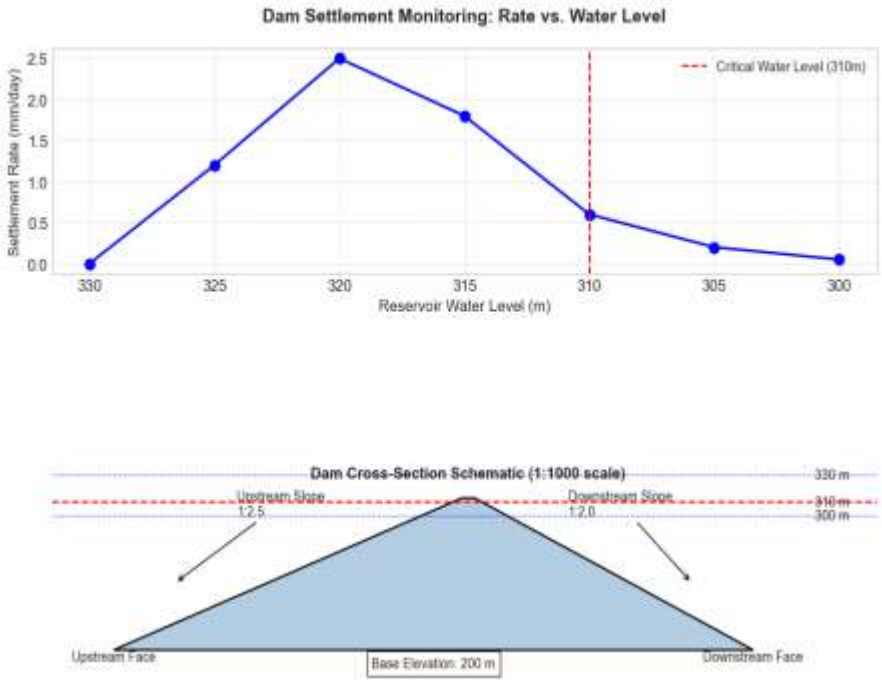
- نتایج تحلیل کوپله‌شدهٔ ABAQUS

نتایج اصلی تحلیل کوپله‌شدهٔ ABAQUS در (جدول ۱۰) و رابطهٔ تراز آب با نرخ نشست در (شکل ۱۰)، ارائه شده است. مدل ABAQUS بیشترین نشست را در پایین‌دست و کمترین مقدار را در بالادست نشان داد. همچنین، اختلاف نشست دو جناح به تمرکز تنش در پایین‌دست، تفاوت سختی مصالح و اثر جریان آب منفذی نسبت داده شد. در برخی

نواحی پایین‌دست، فشار منفذی منفی ایجاد شد که منشأ آن تفاوت میان سرعت افت سطح آب خارجی و سرعت تعدیل فشار آب درون بدنهٔ سد است.

جدول ۱۰: نتایج کلیدی تحلیل

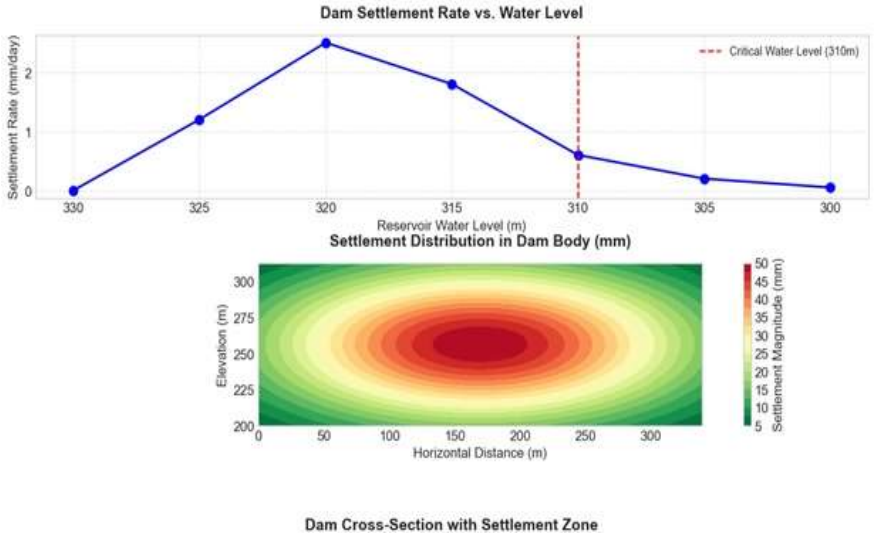
پارامتر	مقدار	تفسیر
حداکثر نشست (پایین‌دست)	mm ۳۶٫۱	۴۰٪ <بالادست
فشار منفذی منفی اوج	- kPa۲۵۰	در عمق ۱۵ متری پایین‌دست
کرنش پلاستیک (PEEQ)	۰٫۰۲۲	نشانگر گسیختگی موضعی
زمان رسیدن به ۹۰٪ نشست	۲۴ روز	در تخلیه ۱ m/day



شکل۱۰: رابطهٔ تراز آب مخزن و نرخ نشست در مدل ABAQUS

نتایج نشان داد که نواحی تمرکز تغییرشکل برشی در هستهٔ رسی شکل گرفته‌اند و کرنش پلاستیک در این محدوده‌ها افزایش یافته است. این نواحی با بخش‌هایی هم‌زمان هستند که گرادیان هیدرولیکی بیشتری دارند. مدل ABAQUS همچنین کاهش نرخ نشست از حدود ۲٫۳ میلی‌متر در روز در تراز ۳۲۰ متر به حدود ۰٫۵ میلی‌متر در روز در تراز ۳۱۰ متر را بازتولید کرد. این موضوع، با نتایج تحلیل FLAC2D دربارهٔ وجود تراز بحرانی سازگاری دارد.

نقشهٔ توزیع مکانی نشست و ارتباط آن با تراز آب در (شکل ۱۱)، نشان داده شده است. بیشترین تغییرشکل در بخش پایین‌دست و نواحی نزدیک به هسته و پی مشاهده می‌شود، درحالی‌که نواحی بالادست تغییرشکل محدودتری دارند. این توزیع مکانی، ضرورت تمرکز ابزارهای پایش بر پایین‌دست، هسته و محدودهٔ تماس بدنه با پی را تأیید می‌کند.



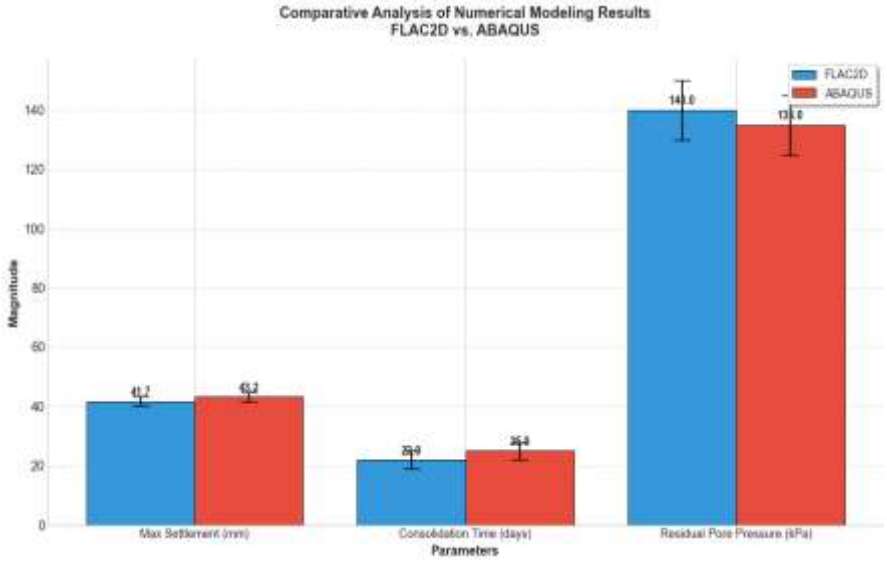
شکل ۱۱: توزیع مکانی نشست و رابطهٔ آن با تراز آب مخزن

- مقایسهٔ نتایج FLAC2D وABAQUS

مقایسهٔ نهایی خروجی دو نرم‌افزار در (جدول ۱۱۱ و (شکل ۱۲)، ارائه شده است. مقدار حداکثر نشست در FLAC2D برابر با ۴۱٫۷ میلی‌متر و در ABAQUS برابر با ۴۳٫۲ میلی‌متر به دست آمد. اختلاف دو مدل در این شاخص حدود ۱٫۵ میلی‌متر بود. زمان تحکیم در FLAC2Dحدود ۲۲ روز و در ABAQUS حدود ۲۵ روز برآورد شد و اختلاف زمانی دو مدل به حدود ۳ روز رسید. فشار منفذی باقیمانده نیز در دو مدل به‌ترتیب ۱۴۰ و ۱۳۵ کیلوپاسکال محاسبه شد.

جدول ۱۱: مقایسهٔ نتایج FLAC2D و ABAQUS

پارامتر	FLAC2D	ABAQUS	انحراف معیار
حداکثر نشست (mm)	۴۱٫۷	۴۳٫۲	۱٫۵±
زمان تحکیم (روز)	۲۲	۲۵	۳±
فشار منفذی باقیمانده (kPa)	۱۴۰	۱۳۵	۱۰±



شکل ۱۲: مقایسهٔ نتایج FLAC2D و ABAQUS

هم‌گرایی نسبی نتایج نشان می‌دهد که هر دو نرم‌افزار توانسته‌اند روند کلی نشست، تحکیم و فشار منفذی را با اختلاف محدود بازتولید کنند. اختلاف‌های مشاهده‌شده را می‌توان به تفاوت در الگوریتم حل، نحوهٔ تعریف رفتار مصالح، نوع المان‌ها و روش اعمال شرایط مرزی نسبت داد. با وجود این تفاوت‌ها، انطباق نتایج برای ارزیابی روند کلی رفتار سد مناسب است و استفاده هم‌زمان از دو مدل، اطمینان بیشتری برای شناسایی نواحی حساس و شرایط بحرانی فراهم می‌کند. برآیند یافته‌ها نشان می‌دهد که نشست سد موصل تابعی از اندرکنش هم‌زمان هندسه و مصالح بدنه، شرایط هیدرولیکی مخزن، فشار منفذی، تراوش و ویژگی‌های کارستی ساختگاه است. از میان متغیرهای بررسی‌شده، نرخ تخلیهٔ مخزن بیشترین اثر را بر شدت و سرعت نشست دارد و ترازهای ۳۲۰ تا ۳۱۰ متر حساس‌ترین محدودهٔ عملکردی سد محسوب می‌شوند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که مدیریت نشست سد موصل مستلزم نگاهی یکپارچه به روابط متقابل میان بدنهٔ سد، نوسانات آب مخزن و ویژگی‌های زمین‌شناختی ساختگاه است. شرایط کارستی پی سبب می‌شود که رفتار سد صرفاً با تحلیل سازه‌ای یا هیدرولیکی مستقل قابل تبیین نباشد؛ زیرا تغییر هریک از مؤلفه‌های تراز آب، فشار منفذی، تراوش و تنش مؤثر می‌تواند پاسخ سایر اجزای سیستم را نیز دگرگون کند. ازاین‌رو، رویکرد کوپله‌شده سازه–آب–ساختگاه مبنای مناسب‌تری برای شناخت رفتار واقعی سد و مدیریت مخاطرات

مرتبط با نشست فراهم می‌آورد. برآیند تحلیل‌ها بیانگر آن است که نرخ کاهش تراز مخزن، در مقایسه با مقدار مطلق تراز آب، نقش مدیریتی تعیین‌کننده‌تری در کنترل نشست دارد. کاهش سریع سطح آب، به‌دلیل تأخیر در تخلیهٔ فشار منفذی، می‌تواند تعادل میان فشار خارجی مخزن و شرایط داخلی بدنه و پی را مختل کرده و موجب تشدید تغییرشکل‌ها شود. بنابراین، تخلیهٔ مخزن نباید صرفاً براساس نیازهای عملیاتی یا حجم آب انجام گیرد، بلکه لازم است ظرفیت زهکشی مصالح، وضعیت فشار منفذی و پاسخ زمانی بدنه و ساختگاه نیز در تصمیم‌گیری لحاظ شود.

در این زمینه، تخلیهٔ مرحله‌ای همراه با توقف‌های کنترلی و ارزیابی مستمر داده‌های پایش، راهبرد مناسب‌تری برای کاهش مخاطرات ژئوتکنیکی خواهد بود. همچنین، تمرکز بیشتر تغییرشکل‌ها در جناح پایین‌دست نشان می‌دهد که پایش یکنواخت تمام بخش‌های سد نمی‌تواند به‌تنهایی پاسخ‌گوی الزامات مدیریت ایمنی باشد. طراحی نظام پایش باید مبتنی‌بر سطح خطر هر ناحیه باشد و برای جناح پایین‌دست، هستهٔ رسی و محدودهٔ تماس بدنه با پی، حساسیت و تواتر اندازه‌گیری بیشتری در نظر گرفته شود. شناسایی محدودهٔ ترازهای ۳۲۰ تا ۳۱۰ متر به‌عنوان بازهٔ حساس رفتاری نیز می‌تواند در تدوین ضوابط بهره‌برداری مورد استفاده قرار گیرد. بااین‌حال، تراز ۳۱۰ متر نباید به‌عنوان مرز قطعی ایمنی تلقی شود؛ بلکه ارزش آن در نقش یک آستانهٔ هشدار مدیریتی است که باید همراه با وضعیت فشار منفذی، تراوش، تغییرشکل‌های افقی و قائم و شرایط ساختگاه تفسیر شود. همگرایی نتایج FLAC2D و ABAQUS، با وجود تفاوت در روش‌های حل و نحوهٔ بازنمایی رفتار مصالح، قابلیت استفاده از مدل عددی پیشنهادی را به‌عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری تأیید می‌کند. بااین‌حال، هوشمندی این مدل زمانی تحقق می‌یابد که خروجی شبیه‌سازی به‌صورت مستمر با داده‌های واقعی پایش مقایسه و به‌روزرسانی شود.

بنابراین، چارچوب پیشنهادی باید از یک مدل عددی ایستا به سامانه‌ای پویا و داده‌محور ارتقاء یابد که بتواند با دریافت اطلاعات پیزومترها، تجهیزات ترازیابی، سامانه‌های موقعیت‌یابی و ابزارهای سنجش تراوش، وضعیت سد را ارزیابی کرده و دربارهٔ عبور از آستانه‌های بحرانی هشدار دهد. دستاورد اصلی این پژوهش، تبدیل نتایج تحلیل ژئوتکنیکی به الزامات قابل استفاده در مدیریت ایمنی سد است. براین‌اساس، چارچوب مدیریت پیشنهادی باید بر کنترل نرخ تخلیه، پایش خطرمحور نواحی حساس، تعریف آستانه‌های هشدار چندپارامتری و به‌روزرسانی دوره‌ای مدل براساس داده‌های میدانی

استوار باشد. چنین رویکردی می تواند امکان گذار از مدیریت واکنشی به مدیریت پیش‌نگر را فراهم سازد و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با بهره‌برداری، نگهداری و اقدامات اصلاحی را از اتکای صرف به قضاوت‌های موردی به‌سمت تصمیم‌گیری مبتنی‌بر داده و پیش‌بینی سوق دهد. درنهایت، مدل ارائه‌شده را می‌توان چارچوبی اولیه برای پایش و پیش‌بینی نشست سد موصل دانست، نه جایگزینی برای ارزیابی‌های میدانی و قضاوت تخصصی. دوبُعدی‌بودن مدل، ساده‌سازی ناهمگنی ساختگاه و محدودیت داده‌های پیوستهٔ پایش، از مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش به‌شمار می‌روند. ازاین‌رو، برای افزایش اعتبار و قابلیت کاربرد مدل، انجام تحلیل‌های سه‌بُعدی، کالیبراسیون مستمر پارامترهای مصالح، بررسی رفتار بلندمدت ساختگاه کارستی، تحلیل سناریوهای لرزه‌ای و تلفیق داده‌های زمینی و ماهواره‌ای پیشنهاد می‌شود. توسعهٔ این مسیر می‌تواند به شکل‌گیری سامانه‌ای جامع برای مدیریت هوشمند نشست و ارتقای ایمنی پایدار سد موصل منجر شود.

منابع:

امین‌فر، محمدحسین. فرهمند آذر، بهمن. صفری، هادی و بیک‌لریان، مرتضی. (۱۳۹۲). تحلیل دینامیکی اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بتنی به روش المان محدود. مهندسی عمران فردوس، ۲۴(۲)، ۸۴-۶۹. https://doi.org/10.22067/civil.v24i2.28789

بهنام‌فر، فرهاد و عیدینی مریم. (۱۳۸۳). طراحی عملکردی لرزه‌ای سازه‌های با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر براساس تغییر مکان. اولین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران. https://civilica.com/doc/204

دبدبه، محمد. صعوه، المیرا. پناهی، سیامک. آلاک، منیژه و نشاسته‌سازان‌اصفهان، عطیه. (۱۴۰۴). الگوی آینده‌پژوهی سناریومحور در مدیریت استراتژیک شهرهای هوشمند ایران. مدیریت استراتژیک هوشمند، ۴(۴)، ۶۶۴-۶۴۷.

https://doi.org/10.87453/bumara.2026.373601.4867

سلماسی، فرزین. حکیمی‌خانسر، حسین. و نورانی، بهرام. (۱۳۹۷). بررسی نشست بدنهٔ سد خاکی در دوران ساخت و مقایسهٔ آن با نتایج تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS (مطالعهٔ موردی سد کبودوال). علوم آب و خاک، ۲۲(۴)، ۱۵۵-۱۷۱.

https://doi.org/10.29252/jstnar.22.4.155

عباس‌زاده‌شهری، عباس. گودرزی، محسن و شیخ‌انصاری، مهدی. (۱۳۸۵). مقایسهٔ رفتار سدهای خاکی و بتونی در مقابل زلزله. دومین همایش زمین‌شناسی کاربردی و محیط‌زیست. https://civilica.com/doc/21409

Asadi, M., Soltani, F., Sivandi-Pour, A., & Noroozinejad Farsangi, E. (2020). Seismic Behavior Of Earth Dams With Different Reservoir Water Levels Under Near-Field And Far-Field Earthquakes. Civil And Environmental Engineering Reports, 30(4), 125-141. https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0055

Azarhoosh, Z., & Ghodrati Amiri, G.R. (2010). Elastic Response Of Soil-Structure Systems Subjected To Near-Fault Rupture Directivity Pulses. Geotechnical Special Publication, https://doi.org/10.1061/41102(375)18

Ganjavi, B., Hao, H. (2012). A Parametric Study On The Evaluation Of Ductility Demand Distribution In Multi-Degree-Of-Freedom Systems Considering Interaction Effects. Engineering Structures, 43, 88-104.

Othman, A.A., Al-Maamar, A.F., Al-Manmi, D.A.M., Liesenberg, V., Hasan, S.E., Al-Saady, Y.I., Shihab, A.T., & Khwedim, K. (2019). Application Of DInSAR-PSI Technology For Deformation Monitoring Of The Mosul Dam, Iraq. Remote Sensing, 11(22), 1-20. https://doi.org/10.3390/rs11222632

Shakib, H. (2004). Evaluation Of Dynamic Eccentricity By Concidering Soil-Structure Interaction: Aproposal For Seismic Design Codes. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 24(5), 369-378, https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.01.00

Sissakian, V.K., Adamo, N., Al-Ansari, N., Knutsson, S., & Laue, J. (2017). Defects In Foundation Design Due To Mis-Interpretation Of The

Geological Data: A Case Study Of Mosul Dam. Engineering, 9(7), 683–702. https://doi.org/10.4236/ENG.2017.97042

Sissakian, V.K., Adamo, N., Al-Ansari, N., Knutsson, S., & Laue, J. (2021). Mosul Dam Problem And Stability. Engineering, 13(3), 105–124. https://doi.org/10.4236/eng.2021.133009

Xiaoming Y., Rui, S., & Meng S.h., (2003). Effect Of Asymmetry And Irregularity Of Seismic Waves On Earthquake-Indused Differential Settlement Of Buildings On Natural Subsoil. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 23(2), 107-114.

Yerli H.R., Kacin S., & Kocak S. (2003). A Parallel Finite-Infinite Element Model For Twodimensional Soil-Structure Interaction Problems. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 23(4), 249-253.

Zeidan, B.A. (2015). Seismic Finite Element Analysis Of Dam-Reservoir-Foundation Interaction. International Conference On Advances In Structural And Geotechnical Engineering (ICASGE'15), Hurghada-Egypt.

Zheng, X., Yan, B., Wang, W., Du, K., & Fang, Y. (2024). Seepage–Deformation Coupling Analysis Of A Core Wall Rockfill Dam Subject To Rapid Fluctuations In The Reservoir Water Level. Water, 16(11), 1-18. https://doi.org/10.3390/w16111621