



Investigation and evaluation of settlement, displacement and pore pressure parameters obtained from instrumentation data (Case Study: Golestan earthen dam)

Shaban Rasooli¹ , Abdolreza Zahiri² , Mahdi Meftah Helghi³  and Farzin Salmasi⁴ 

1. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran. E-mail: rasolishaban@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran. E-mail: zahiri.areza@gmail.com
3. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran. E-mail: meftahhalaghi@gmail.com
4. Department of Water Engineering, Tabriz University, East Azarbaijan, Iran. E-mail: ferzin.salmasi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 06 April 2025
Received in revised form 07 July 2025
Accepted 12 September 2025
Available online 21 March 2026

Keywords:

earthen dam,
monitoring,
Golestan dam,
instruments,
settlement.

ABSTRACT

Objective: Instrumentation and monitoring of dams, especially in earthen dams, is one of the basic and vital steps in the construction and operation of these structures, and it is necessary to control the construction, ensure safety and reduce their operational costs. In this study, the behavior of the Golestan earthen dam during the periods of construction, first impounding and operation were investigated and analyzed.

Method: To carry out the required analysis, the data of piezometers, settlement gauges and inclinometers of the Golestan earthen dam were extracted during the above three time periods, and based on these data, the settlement of the dam as well as its horizontal and vertical displacement were evaluated according to standard criteria. The ratio of excess pore water pressure was also analyzed.

Results: The instrumentation results and also observations from downstream of the dam reservoir showed that the difference in the rate of settlement of the dam body at higher levels compared to lower levels is somewhat more than expected. The results showed that the middle part of the dam crest experienced the highest settlement of about 55 cm which is acceptable compared to the allowed value of 1.5 m. Moreover, the results of the piezometers confirm the seepage flow through the sealant wall with a permeability coefficient.

Conclusions: Golestan Dam has a suitable condition in terms of displacement and settlement, and the instruments showed reasonable values within the allowed range. Although some cases like seepage from the sealing element do not endanger the stability of the dam, it is necessary to be taken into account and managed with the help of a more detailed analysis of the instrumentation data and the analysis of the structural behavior of the dam.

Cite this article: Rasooli, Sh., Zahiri, A.R., Meftah Helghi, M., & Salmasi, F. (2026). Investigation and evaluation of settlement, displacement and pore pressure parameters obtained from instrumentation data (Case Study: Golestan earthen dam). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6 (1), 25-43. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12129.1166>



Introduction

Instrumentation and monitoring of dams, especially in earthen dams, is one of the basic and vital steps in the construction and operation of these structures, and it is necessary to control the construction, ensure safety and reduce their operational costs. To measure the dam responses regarding the special changes due to environmental phenomena such as floods, earthquake, cracking, liquefaction of foundation soils, piping, etc., several sensitive locations within the dam body and its foundation are monitored with a single instrument or a group of instruments. This process includes measuring various quantities such as pore water pressure, water level, and internal stress ratios using inspection devices such as ordinary and Casagrande piezometers, internal settlement gauges and total pressure cells during construction and operation of the dam. In this study, the behavior of the Golestan earthen dam during the periods of construction, first impounding and operation were investigated and analyzed.

Method

To carry out the required analysis, the data of piezometers, settlement gauges and inclinometers of the Golestan earthen dam during the above three time periods were extracted and based on these data, the settlement of the dam as well as horizontal and vertical displacement were evaluated according to the standard criteria. The ratio of excess pore water pressure (R_U) was also analyzed.

Results

The instrumentation results and also observations from downstream of the dam reservoir showed that the difference in the rate of settlement of the dam body at higher levels compared to lower levels is somewhat more than expected. The results showed that the middle part of the dam crest experienced the highest settlement of about 35 cm which is acceptable compared to the allowed value of 70 cm. Moreover, the results of the piezometers confirm the seepage flow through the sealant wall with a permeability coefficient of 0.00002 m/month. The R_U associated with S4 and S5 piezometers, which are located adjacent to the drainage gallery and have the highest pore water pressures, show values less than 0.3 on all dates. Therefore, all sections are safe from a hydraulic failure standpoint and showing satisfactory conditions with no immediate risk of uplift.

Conclusions

Golestan Dam has a suitable condition in terms of displacement and settlement, and the instruments show reasonable values within the allowed range. Although some cases like seepage from the sealing element do not endanger the stability of the dam, it is necessary to be taken into account and managed with the help of a more detailed analysis of the instrumentation data and the analysis of the structural behavior of the dam.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical Considerations

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

Funding

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بررسی و ارزیابی پارامترهای نشست، جابه‌جایی و فشار حاصل از داده‌های ابزار دقیق (مطالعه موردی: سد خاکی گلستان)

شعبان رسولی^۱، عبدالرضا ظهیری^۲، مهدی مفتاح هلقی^۳، و فرزین سلماسی^۴

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: rasolishaban@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: zahiri.areza@gmail.com

۳. گروه آموزشی مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: mefthalmalaghi@gmail.com

۴. گروه آموزشی مهندسی آب، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: ferzin.salmasi@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: ابزارگذاری و رفتارنگاری سدها به‌ویژه در سدهای خاکی، یکی از مراحل اساسی و لازم در فرایندهای ساخت و بهره‌برداری این سازه‌ها بوده و برای کنترل ساخت، تضمین ایمنی و کاهش هزینه‌های اجرائی آنها ضروری است. در این تحقیق رفتار سد خاکی گلستان واقع بر رودخانه گرگانرود در استان گلستان در طی دوره زمانی ساخت، اولین آنگیری و نیز دوره بهره‌برداری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

روش پژوهش: برای انجام تحلیل موردنظر، داده‌های ابزار دقیق پیزومترها، نشست سنج‌ها و انحراف سنج‌های سد خاکی گلستان در طی سه مرحله زمانی فوق (بیش از ۱۵ سال)، استخراج و بر اساس این داده‌ها، نشست سد و تغییر شکل‌های افقی و قائم آن طبق ضوابط استاندارد بررسی شدند. همچنین نسبت فشار آب منفذی اضافی نیز تحلیل شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

یافته‌ها: نتایج داده‌های ابزار دقیق و نیز مشاهدات پایین‌دست مخزن سد نشان داد که اختلاف مقادیر نرخ و میزان نشست بدنه سد در ترازهای بالاتر در مقایسه با ترازهای پایین‌تر تا حدودی بیشتر از حد انتظار است. حداکثر مقدار نشست در وسط تاج سد حدود ۵۵ سانتی‌متر بود که در مقایسه با محدوده مجاز ۱/۵ متری قابل قبول است. همچنین نتایج پیزومترهای پی، آنگذری از دیواره آب‌بند با ضریب نفوذپذیری قابل قبول را تأیید نمود.

کلیدواژه‌ها:

سد خاکی،

رفتارسنجی،

سد گلستان،

ابزار دقیق،

نشست.

نتیجه‌گیری: سد گلستان از نظر میزان انحراف و نشست دارای وضعیت مطلوبی بوده و ابزار دقیق، اعدادی منطقی و در محدوده مجاز را نشان می‌دهند. برخی موارد مثل نشست از المان آب‌بند اگرچه پایداری سد را به مخاطره نمی‌اندازد، اما لازم است موردتوجه قرار گرفته و به کمک تحلیل دقیق‌تر داده‌های ابزار دقیق و نیز تحلیل رفتار سازه‌ای سد مدیریت شود. به‌طور کلی و بر اساس رفتارسنجی و شواهد حاصل از بازرسی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که سد گلستان پس از گذشت بیش از ۲۲ سال از بهره‌برداری آن، در وضعیت مطلوبی از نظر پایداری و ایمنی قرار دارد. نتایج حاصل از پیزومترها و مشاهدات پایین‌دست بیانگر کارایی نسبتاً مطلوب تنوره و پتوی زهکش است.

استناد: رسولی، شعبان؛ ظهیری، عبدالرضا؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ و سلماسی، فرزین. (۱۴۰۵). بررسی و ارزیابی پارامترهای نشست، جابه‌جایی و فشار حاصل از داده‌های ابزار دقیق (مطالعه موردی: سد خاکی گلستان). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۶ (۱)، ۴۳-۲۵.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.12129.1166>



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

در طراحی هر سازه بزرگی مثل سد علاوه بر در نظر گرفتن یک سری مفروضات و معیارها برای بررسی و کنترل رفتار آن در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری، اندازه‌گیری‌های واقعی برخی از پارامترها که بتوان به کمک آنها عملکرد رفتار سازه‌ای سد را بیان نمود نیز لازم است. ایمنی و پایداری سدهای خاکی نه تنها به طراحی و اجرای صحیح آن وابسته است، بلکه به پایش مداوم رفتار این سازه در طول دوره بهره‌برداری نیز بستگی دارد (هسو و همکاران^۱، ۲۰۰۷). بدیهی است در صورت وقوع هرگونه خرابی در سدهای بزرگ، اقتصاد ملی متحمل زیان شده و زندگی و دارایی مردم در معرض خطر قرار خواهد گرفت. تخریب سدهای خاکی به‌ویژه اگر در زمان بارش‌های سنگین و ورود جریان‌های سیلابی باشد، توأم با ایجاد جریان‌های با غلظت بالای رسوب در پایین‌دست سد خواهد بود. آشفتگی قابل‌توجه جریان و چگالی بالای آن باعث فرسایش شدید (کف‌کنی) بستر و دیواره‌های رودخانه و در نتیجه افزایش غلظت رسوبات معلق می‌شود. این پدیده منجر به تخریب رودخانه و حوضه آن، از بین رفتن پوشش گیاهی، سیل‌گیری اراضی اطراف رودخانه در پایین‌دست سد و نهایتاً رسوب‌گذاری شدید در انتهای سیلاب خواهد شد (دقیق و همکاران، ۱۳۹۴). خسارت بالای ناشی از خرابی سدها نشان‌دهنده اهمیت قابل‌توجه مراقبت و ایمنی سدهای بزرگ است. بر اساس گزارش کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ^۲، ۱۹۶۹؛ و انجمن مهندسان عمران آمریکا^۳، ۲۰۰۰)، درصد قابل‌توجهی از شکست سدها در شرایطی بوده است که آنها دارای سیستم پایش پایداری نبوده‌اند (جانسون^۴، ۱۹۹۷؛ اداره بازسازی ایالات متحده^۵، ۲۰۱۴؛ و ال بیلالی و همکاران^۶، ۲۰۲۱).

تغییرات اقلیمی در تمامی نقاط دنیا باعث تغییرات شدید در مقدار و فراوانی پدیده‌های هیدرولوژیکی شده است، به‌طوری که وقوع توأم سیلاب‌های شدید و بلافاصله پس از آن، خشکسالی به امری معمول تبدیل شده است. یکی از راهکارهایی که می‌تواند تا حدودی برای مدیریت هر دو پدیده فوق (سیلاب و خشکسالی) مورد استفاده قرار گیرد، سدهای مخزنی هستند. اهمیت و دلایل نصب ابزار دقیق در سدهای مخزنی و به‌ویژه سدهای خاکی در زمان‌های خاص مثل وقوع سیلاب، خشکسالی و زلزله آن قدر مهم است که تأثیر مستقیم بر عملکرد بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها دارد. مثلاً با افزایش حجم و تراز سطح آب مخزن در اثر ورود سیلاب، مقادیر پیژومترها، فشارسنج‌ها و انحراف‌سنج‌ها با شرایط نرمال و عادی متفاوت خواهد بود و عکس رفتار آنها آن در شرایط خشکسالی است (سید کلبادی^۷ و همکاران، ۲۰۲۰). اولین داده ثبت شده از سدها مربوط به سد گراس بويس در کشور فرانسه در سال ۱۸۵۳ بوده است (فریمون و همکاران^۸، ۲۰۱۶). در طی قرن نوزدهم در آمریکا، هند، اروپا و آسیا برای بررسی پدیده نشت از سدهای احداث شده در مناطق آبرفتی، ابزار دقیق متفاوتی مثل پیژومترهای لوله باز استفاده شدند (سید کلبادی و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین از قدیمی‌ترین موارد استفاده از داده‌های ابزار دقیق می‌توان به نصب پیژومترهای هیدرواستاتیکی سد کوبول در آمریکا در سال ۱۹۳۸ اشاره نمود (ماجوروس و اسنید^۹، ۱۹۸۱). بر اساس نتایج بررسی ۱۴۷۰۰ سد منتشر شده در گزارش کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (۱۹۸۳)، شی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۵) مشخص نمود که ۷ درصد سدها در حال تخریب و ۰/۷ درصد آنها به‌صورت کامل تخریب شده‌اند. همچنین سدهای خاکی، ۷۴ درصد بیشتر از سدهای بتنی دچار تخریب شده‌اند. این واقعیت به‌وضوح لزوم پایش رفتار سدهای خاکی را آشکار می‌کند (رشیدی و حائری^{۱۱}، ۲۰۱۷).

1. Hsu et al
2. ICOLD
3. ASCE
4. Johansson
5. USBR
6. EL Bilali et al
7. Seyed-Kolbadi et al
8. Frémion et al
9. Majoros & Sneed
10. She et al
11. Rashidi & Haeri

در ادبیات مهندسی گاهی از سدها به عنوان موجود زنده یاد می‌شود، زیرا ضمن ایجاد تغییرات شگرف در محیط اطراف و اکوسیستم منطقه، بدنه سد و نیز مخزن آن به میزان قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی (مثل زلزله و باد)، هیدرولیکی (مثل فشار آب مخزن و رسوب‌گذاری)، و هواشناسی (مثل بارش و سیلاب) قرار می‌گیرند. این موضوع برای سدهای خاکی مهم‌تر و شدیدتر است. سدهای خاکی سازه‌هایی هستند که برای ذخیره آب و نیز اهداف دیگری از قبیل مدیریت سیل، تولید برق آبی، تفریحات آبی و... احداث می‌شوند. بر خلاف سدهای وزنی - بتنی که در رودخانه‌های کوهستانی دارای بستر و سواحل سنگی اجرا می‌شوند، سدهای خاکی از نظر جنس پی دارای محدودیت کمتری بوده و در بازه‌های کوهپایه‌ای و حتی دشت با بستر شنی و ماسه‌ای نیز قابل احداث هستند. این سدها دارای فرایند ساخت ساده‌تری بوده و از نظر مصالح نیز به صرفه‌تر هستند. همچنین سدهای خاکی در مقایسه با سدهای بتنی دارای انعطاف بهتری برای پذیرش بار دینامیکی ناشی از نیروی زلزله هستند (استفنز^۱، ۲۰۱۰). احتمالاً به دلیل همین مزایا است که از حدود ۵۸۰۰۰ سد بزرگ دنیا، حدود ۷۷ درصد آنها از نوع خاکی و یا خاکی - سنگ‌ریزه‌ای هستند (آدامو و همکاران^۲، ۲۰۲۰). مصالح سدهای خاکی متنوع بوده و بر اساس نوع کارکرد هر منطقه از بدنه سد تغییر می‌کنند (تورومانوویک^۳، ۲۰۱۸). این مصالح شامل خاک رس، ماسه، شن و قلوه‌سنگ هستند. باتوجه به تنوع مصالح به کاررفته در بدنه و هسته سد و نیز اثرات متقابل حجم عظیم آب مخزن با خاک بدنه و هسته سد، رفتار این سازه در شرایط مختلف هیدرولیکی و ژئوتکنیکی (پی) پیچیده بوده و ارزیابی ایمنی و پایداری سازه‌ای و ژئوتکنیکی این سازه‌ها، نیازمند تحلیل‌های خاصی است (عالی‌محمدی پیرانشاهی و همکاران^۴، ۱۴۰۰). از طرف دیگر، احداث این سدها نیز پرهزینه و زمان‌بر است. بنابراین بررسی مباحث مربوط به ایمنی این سازه‌ها در حین ساخت و نیز در دوره بهره‌برداری دارای اهمیت زیادی است. یکی از مهم‌ترین مباحث مرتبط با پایداری سدهای خاکی، گسیختگی شیروانی‌ها در شرایط مختلف است که نیازمند رفتارسنجی مستمر است (یحیایی‌نیا، ۱۳۹۹). در این راستا برای بررسی وضعیت پایداری این سازه، ادوات ابزار دقیق در مناطق مختلف سد نصب شده و در طی مراحل اجرای سدها مواردی از قبیل مقادیر تنش (میزان فشار وارده)، تغییر شکل و مقدار جابه‌جایی (شامل میزان نشست سازه‌ای و میزان انحراف) در گالری سیستم انتقال بررسی می‌شود. نتایج این بررسی‌ها می‌تواند در تعیین مجهولاتی که در اثر فشار، نشست و انحراف در سازه ایجاد می‌شود، اثربخشی مهمی داشته باشد.

امروزه ابزار دقیق و تجهیزات رفتارنگاری به واسطه‌ی ارتقای فناوری ساخت، اهمیت ویژه‌ای در کنترل پایداری و ایمنی سدها پیدا کرده‌اند. تقریباً همگی محققین اعتقاد دارند که اغلب باید به داده‌های ثبت شده توسط ابزار دقیق سدها اهمیت بیشتری نسبت به بازدهی‌های میدانی داده شود (دونیاس^۴، ۲۰۲۱). با انتخاب صحیح ابزار دقیق و وجود یک برنامه رفتارسنجی منظم در یک سد، می‌توان علاوه بر کنترل رفتار سد، بروز پدیده‌ها و عوامل مخرب آنها را شناسائی نموده و تمهیدات لازم برای جلوگیری از خرابی سد را انجام داد. به عنوان مثال، نشست از بدنه و پی سد خاکی ضمن کاهش حجم آب در مخزن، منجر به نیروی نشست، فشار آب منفذی و گرادیان هیدرولیکی خواهد شد و اگر این نیروها در محدوده مجاز کنترل نشوند، تبعاتی از قبیل زیرشویی^۵، نشست سد و یا لغزش سازه و نهایتاً تخریب سد خاکی قابل‌انتظار است (ییلماز^۶، ۲۰۱۷؛ زو و ژانگ^۷، ۲۰۰۹؛ و اوموفونمی و همکاران^۸، ۲۰۱۷) در طی ساخت سد به علت تغییرات تنش کل، فشار آب منفذی و همچنین اثرات خزش، ممکن است تغییر شکل‌های داخلی تحت تأثیر قرار گرفته و مواردی از قبیل حرکات ناهمسان پی و توزیع تنش نامتقارن در سد اتفاق افتند. این مسئله علاوه بر کاربرد در بررسی ایمنی سد، می‌تواند در ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومتی نیز مفید واقع شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

1. Stephens
2. Adamo et al
3. Toromanovic
4. Dounias
5. Piping
6. Yilmaz
7. Omofunmi et al
8. Xu & Zhang

باوجود پیشرفت‌های چشمگیری که در طول چند دهه اخیر در سامانه‌های ابزار دقیق از نظر قابلیت‌های هر ابزار، سهولت اندازه‌گیری، ارائه و انتقال داده‌ها... اتفاق افتاده است، کماکان مطالعات کافی در زمینه تحلیل داده‌های ابزار دقیق سدها محدود است (دونیاس، ۲۰۲۱). در اغلب گزارش‌های طراحی سدها در بخش ابزار دقیق، فقط عناوین این ابزار، موقعیت این ادوات در قسمت‌های مختلف سد و نیز حجم عظیمی از داده‌های ثبت شده ذکر می‌شود و تحلیل نتایج و رفتارنگاری سد در طول زمان مورد توجه کافی نبوده است. به همین دلیل، تاکنون مطالعات مرتبط با سدهای مخزنی بر مدل‌سازی عددی، مدل‌های بهینه‌سازی و استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین متمرکز بوده است که این تحقیقات برای سدهای خاکی کمتر از سدهای وزنی - بتنی است (ال بیلالی و همکاران، ۲۰۲۱)

در زمینه مدل‌سازی عددی، مطالعات سلماسی و حکیمی خانسر (۱۴۰۰) و سلماسی و همکاران (۱۳۹۷) برای سد خاکی کبودال (نگارستان) در استان گلستان و نیز دقیق و همکاران (۱۳۹۴) برای سد خاکی دریاچه چیتگر تهران قابل‌اشاره است. تحقیقات بهینه‌سازی نیز عمدتاً متمرکز بر بهینه‌سازی مقطع عرضی سد خاکی، ابعاد هسته رسی سد و یا ابعاد زهکش سد بوده‌اند (رضاییان و همکاران^۱، ۲۰۱۹؛ و کماسی و همکاران^۲، ۲۰۲۰). در زمینه کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین در بررسی پدیده نفوذ یا نشت در سدهای خاکی، تحقیقاتی انجام شده است که شامل مطالعات ژیانگ و همکاران^۳ (۲۰۱۷)، وانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۸)، نجف‌زاده^۵ (۲۰۲۰)، تانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۰)، پارسایی و همکاران^۷ (۲۰۲۱)، و رهام نیا و همکاران^۸ (۲۰۲۱) است. سیکا و همکاران^۹ (۲۰۱۹) یافتند که اگرچه تخمین نسبتاً دقیق دبی نشت از زیر یا درون سدهای خاکی را فراهم نموده و ارزیابی عملکرد راهکارهای مختلف کنترل این پدیده برای جلوگیری از شکست سد به‌ویژه در شرایط وقوع سیلاب (ایجاد حداکثر گرادیان هیدرولیکی) را امکان‌پذیر می‌کنند، اما نمی‌توانند تغییرات مکانی و نوسانات دبی نشت در نقاط بحرانی را با دقت مناسبی برآورد نمایند.

پانسولو و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۱) و فریمیون (۲۰۱۶) یافتند که نوسانات دبی می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی محیطی از قبیل وقایع هیدرولوژیکی، تغییرات سریع تراز آب زیرزمینی، و زلزله باشند. به‌عنوان راهکار جایگزین، می‌توان از تخمین سریع فاکتور پایداری سد به‌عنوان یک ابزار مؤثر و کارآمد برای جلوگیری از شکست سد و یا کاهش ریسک سیلاب با تخلیه سریع ساکنین محل در معرض خطر استفاده نمود. یکی از راه‌حل‌های نسبتاً ساده برای تخمین سریع فاکتور پایداری سد، اندازه‌گیری‌های روزانه فشار آب منفذی است.

مطالعات پاگانو و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۰) و دسیدری و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۳) تغییرات فشار آب منفذی در مناطق مختلف سد خاکی را مورد بررسی قرار داده است. آنها یافتند که تغییرات فشار آب منفذی در مناطق مختلف سد خاکی می‌تواند بیانگر پایداری شیب‌ها و شیروانی‌های سد خاکی در هر دو مرحله ساخت سد و دوره بهره‌برداری (سیستم پایش) باشد. این مسئله به‌وضوح اهمیت داده‌های ابزار دقیق سدهای خاکی را بیان می‌کند. نکته قابل‌توجه این است که با استفاده از داده‌های فشار آب منفذی، می‌توان دبی نشت و نیز نوسانات آن را در طول بدنه سد خاکی محاسبه نمود. نکته مهم دیگری که در مورد سدهای خاکی وجود دارد این است که انجام نمونه‌برداری‌های میدانی متداول از بخش‌های مختلف آنها و به‌ویژه منطقه نفوذناپذیر سد (هسته) نه تنها دشوار و پرهزینه است، بلکه ممکن است اثرات منفی بر کارکرد بدنه سد و نیز پایداری آن داشته باشد. این کار ممکن است

1. Rezaeian et. al
2. Komasi et. al
3. Xiang et al
4. Wang et al
5. Najafzadeh
6. Tang et al
7. Parsaie et al
8. Rehamnia et al
9. Sica et al
10. Panthulu et al
11. Pagano et al
12. Desideri et al

ساختار آب‌بندی سد را به خطر انداخته و باعث تشکیل حفره‌های نفوذ آب شود. همچنین همواره این سؤال مطرح است که آیا نمونه برداشت شده می‌تواند نماینده مناسبی از لایه خاک باشد (تورومانوویک و همکاران، ۲۰۱۸؛ تورومانوویک، ۲۰۱۸؛ و ال بیلالی و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین داده‌های ابزار دقیق در این حالت نیز می‌توانند کمک مؤثری نمایند. رفتارنگاری سد علاوه بر مزایای مهم فوق، دارای این مزیت است که رفتار سد خاکی در مرحله ساخت می‌تواند نشان‌دهنده چگونگی رفتار آن در آینده باشد.

در این تحقیق با انتخاب سد خاکی گلستان واقع بر رودخانه گرگانرود به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سدهای استان گلستان به‌ویژه برای تأمین آب اراضی کشاورزی و نیز مدیریت سیلاب‌های دوره‌ای این استان، رفتار پی و بدنه سد (به‌طور خاص در بخش‌های تکیه‌گاهی و میانی بدنه) برای بررسی تغییر شکل‌پذیری ارزیابی شده است. به این منظور، با جمع‌آوری داده‌های ادوات ابزار دقیق نصب شده در مناطق مختلف این سد (مجاور تکیه‌گاه‌ها، وسط دهنه سازه و نیز محدوده سازه بتنی خروجی گالری)، پارامترهای سازه‌ای و ژئوتکنیکی مهم این سد از قبیل جابه‌جایی (شامل میزان نشست سازه‌ای و میزان انحراف) تحلیل شده و وضعیت پایداری این سد در طول دوره بهره‌برداری ارزیابی شده است. نتایج این بررسی‌ها می‌تواند در تعیین مجهولاتی که در اثر فشار، نشست و انحراف در سازه ایجاد می‌شود، اثربخشی مهمی داشته باشد. داده‌های مختلفی برای انجام این تحقیق مورد نیاز است. داده‌های اصلی شامل مقادیر نشست‌ها، جابه‌جایی، فشار آب منفذی و... بر اساس آمار ابزار دقیق نصب شده در مناطق مختلف بدنه و پی سد خاکی گلستان استخراج شده است. این داده‌ها به‌صورت زمانی ثبت شده‌اند. دوره آماری این داده‌ها، چهار سال در طول دوره ساخت سد، سه سال در دوره اولین آبیگری مخزن سد و هفت سال در دوره بهره‌برداری سد است.

روش پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه (سد خاکی گلستان)

سد خاکی گلستان در ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهرستان گنبدکاووس با طول جغرافیایی ۳۰-۱۶-۵۵ و عرض جغرافیایی ۳۷-۱۹-۳۰ بر روی رودخانه گرگانرود در استان گلستان قرار دارد. این سد در پایین‌دست سد بوستان و در بالادست سد وشمگیر احداث شده است. مشخصات کلی این سد در جدول ۱ ذکر شده است. هدف از احداث این سد، توسعه اراضی ساحل راست رودخانه گرگانرود با استفاده از سیستم آبیاری ایستگاه پمپاژ در سطح خالص ۸۶۰۰ هکتار، کمک به بهبود اراضی فعلی شبکه آبیاری سد وشمگیر به وسعت ۹۲۰۰ هکتار و نیز کمک به مدیریت سیلاب‌های مخرب سالانه رودخانه گرگانرود است. ساخت این سد از سال ۱۳۷۶ شروع شده و بهره‌برداری از آن در اوایل سال ۱۳۸۰ آغاز شده است. در شکل ۱ این سد و موقعیت آن در کشور و استان گلستان نشان داده شده است. سد مذکور دارای اهمیت ویژه‌ای در استان گلستان است. این سد فواید بسیاری برای کشاورزان منطقه (تأمین آب آبیاری)، اهالی و ساکنین پایین‌دست (مدیریت سیلاب)، و نیز سامانه‌های آبی مثل تالاب‌های استان گلستان (تأمین حقابه محیط‌زیستی) دارد. در شکل ۲ تصویر ماهواره‌ای سد مخزنی گلستان (به تاریخ ۲۰۲۱/۰۱/۰۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات کلی سد گلستان

مشخصه	مقدار (نوع)
نوع سد	خاکی همگن
حداکثر ارتفاع سد	۲۵ متر
طول تاج	۱۳۶۷ متر
تراز تاج	۶۶ متر (بالتر از سطح دریا)
عرض تاج	۱۰ متر
عرض پی	۲۱۸ متر
حجم اولیه مخزن	۸۶ میلیون مترمکعب
حجم فعلی مخزن	۵۶ میلیون مترمکعب
نوع مصالح بدنه سد	(رس لای دار) CL-ML
جنس تکیه گاه ها و پی	آبرفت های رسی با لتهائی از ماسه بادی



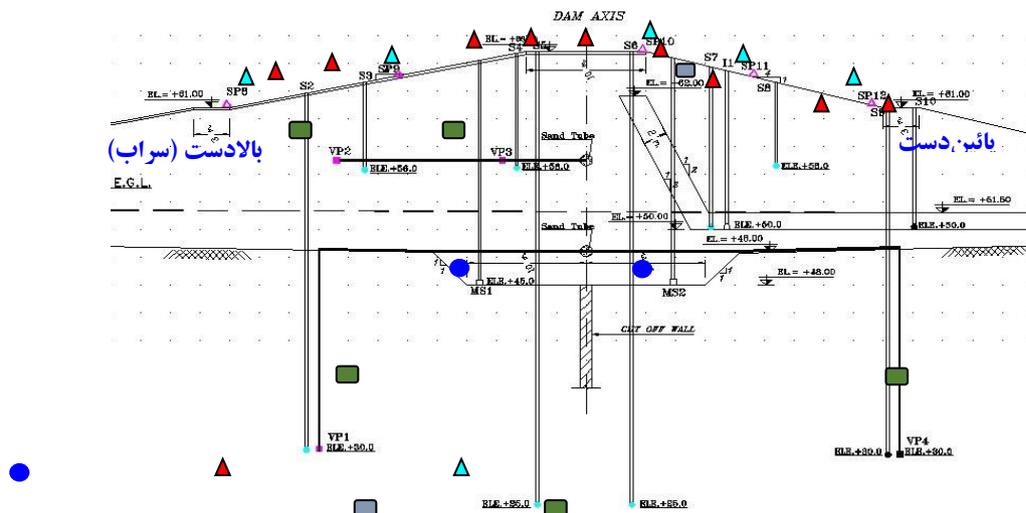
شکل ۱. سد گلستان و موقعیت آن در کشور و استان گلستان



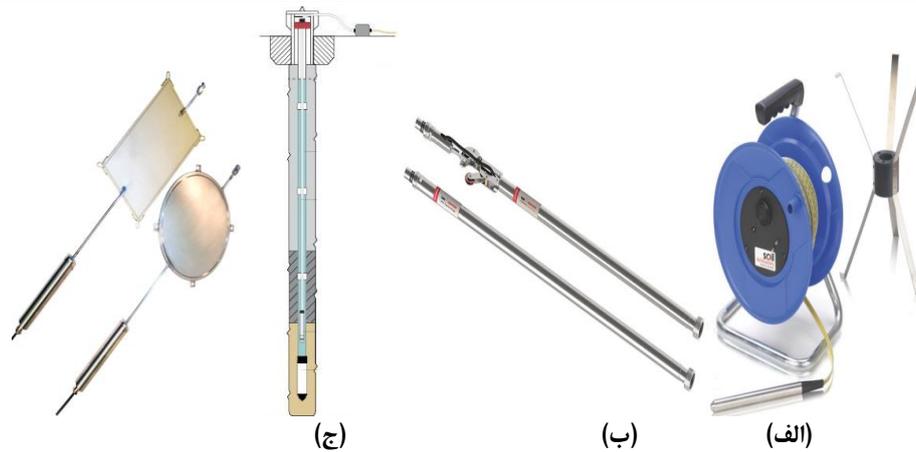
شکل ۲ تصویر ماهواره‌ای سد مخزنی گلستان (تاریخ ۲۰۲۱/۰۱/۰۱)

۲. تجهیزات رفتارسنجی و ابزار دقیق سد

ابزار دقیق رفتارنگاری سد گلستان در ۴ مقطع عرضی، بدنه و پی سد توزیع شده‌اند. این ابزار شامل ۶۲ پیژومتر (پیژومترهای الکتریکی پی و شیروانی‌ها، پیژومتر کاساگرانده و سلول فشار کل)، ۸ انحراف سنج، ۸ نشست‌سنج، و یک سرریز مثلثی اندازه-گیری دبی تراوش یا نشست هستند (شکل ۳). این ابزار ساخت شرکت کانادایی Roctest هستند. این دستگاه‌ها در بازه زمانی حداکثر سه‌ساله، کالیبره (واسنجی) می‌شوند. البته بعد از وقوع پدیده‌های حدی مثل سیلاب و زلزله نیز این دستگاه‌ها باید کالیبره شوند. دقت اندازه‌گیری دستگاه‌های ابزار دقیق مختلف معمولاً متفاوت است. دقت ادوات مورد استفاده در سد خاکی گلستان برای دستگاه‌های انحراف سنج، $1 \pm \text{mm}$ ، برای دستگاه‌های پیژومتر نشست و سطح آب، $3 \pm \text{mm}$ و برای دستگاه‌های فشارسنج، $5 \pm \text{Pa}$ است. در شکل ۴، ابزار این سد شامل سلول فشار کل، پیژومتر کاساگرانده و انحراف سنج نشان داده شده است.



شکل ۳. موقعیت ابزار دقیق در سد خاکی گلستان (SP نقاط مشاهده‌ای، S پیژومتر کاساگرانده، MS نشست‌سنج، VP پیژومتر تار مرتعش، I انحراف‌سنج)



شکل ۴. ابزار دقیق سد گلستان، الف) سلول فشار کل، ب) پیزومتر کاساگرانده، و ج) انحراف سنج

جدول ۲. مشخصات پیزومترهای الکتریکی و پیزومترهای کاساگرانده در سد گلستان

نام	فاصله از محور سد (متر)	تراز نصب (متر)	محل نصب	موقعیت
S2	۸۰	۵۱	بالادست	سراب سد
S3	۷۰	۵۴	بالادست	سراب سد
S4	۵۰	۵۷	بالادست	سراب سد
S5	۲۰	۵۹	بالادست	تاج - سراب سد
S6	۲۰	۵۹	پایین دست	تاج - پایاب سد
S7	۵۰	۵۷	پایین دست	پایاب سد
S8	۷۰	۵۴	پایین دست	پایاب سد

جدول ۳. مشخصات سلولهای فشار کل در سد گلستان

نام	فاصله از محور سد (متر)	تراز نصب (متر)	محل نصب	موقعیت
TCP1,2	۸۰	۵۴	بالادست	روی گالری
TCP3,4	مرکز	۵۴	میانی	روی گالری
TCP5,6	۸۰	۵۴	پایین دست	روی گالری

یافته‌های پژوهش

۱. بررسی نسبت فشار آب منفذی اضافی (R_U)

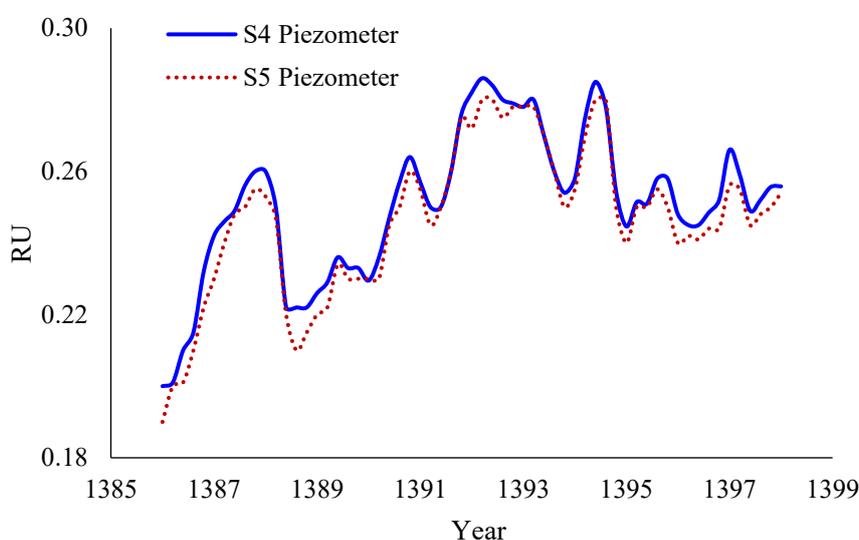
یکی از پارامترهای بسیار مهم در ارزیابی ایمنی سدهای خاکی به‌ویژه برای پایداری شیروانی‌ها و نیز بررسی پتانسیل روان‌گرایی، نسبت فشار آب منفذی اضافی (U) به تنش مؤثر قائم سربار (σ_v) است (R_U):

$$R_U = \frac{U}{\sigma_v} = \frac{\gamma_w \times h_w}{\gamma_s \times h_s} \quad (1)$$

که γ_w و γ_s وزن مخصوص آب و ذرات خاک، h_w فشار آب منفذی و h_s فاصله از سطح زمین است. مقدار نسبت فشار آب منفذی اضافی بین ۰ و ۱ متغیر است. هرچه مقدار این نسبت بزرگتر باشد، بیانگر پتانسیل بالاتر آب برای خروج از خاک است. به ازاء مقادیر کوچکتر از ۰/۴، شرایط سد ایمن و مطلوب است. در محدود ۰/۴-۰/۶ پتانسیل ریسک وجود دارد و بخش موردنظر سد باید به‌صورت مستمر ارزیابی و پایش شود. در حالت مقادیر بزرگتر از ۰/۶، شرایط سد بحرانی بوده و با افزایش این نسبت، احتمال

تخریب و نهایتاً شکست سد وجود دارد. در شرایط حدی و مقادیر بزرگتر از ۱، شکست هیدرولیکی سد اتفاق خواهد افتاد (سید کلبادی و همکاران، ۲۰۲۱)

نتایج تغییرات زمانی این پارامتر در طی سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۸۶ (دوره بهره‌برداری) برای پیزومترهای واقع در موقعیت‌های S4 (بالادست تاج) و S5 (تاج سد) در شکل ۵ نشان داده شده است. باتوجه به اینکه این دو پیزومتر تقریباً در یک تراز نصب شده‌اند، مشاهده می‌شود که منحنی این دو پیزومتر بر هم منطبق بوده و محدوده تغییرات این نسبت حدود ۰/۲۹-۰/۲۰ است که بیانگر ایمن و مطلوب بودن شرایط پایداری سد گلستان است. دلیل انتخاب این پیزومترها این است که در مجاورت گالری قرار گرفته و قطعاً نسبت فشار آب منفذی اضافی آنها مقادیر بیشتری را در مقایسه با پیزومترهای دیگر نشان می‌دهند. در بقیه نقاط به دلیل تراکم بالای خاک، مقادیر این عدد بسیار کمتر است. این نسبت با افزایش نوسانات سطح آب مخزن ارتباط مستقیم دارد به طوری که با افزایش نوسانات سطح آب مخزن در زمان سیلاب، روندی افزایشی داشته است.



شکل ۵. تغییرات نسبت فشار آب منفذی اضافی در سد گلستان در پیزومترهای S4 و S5

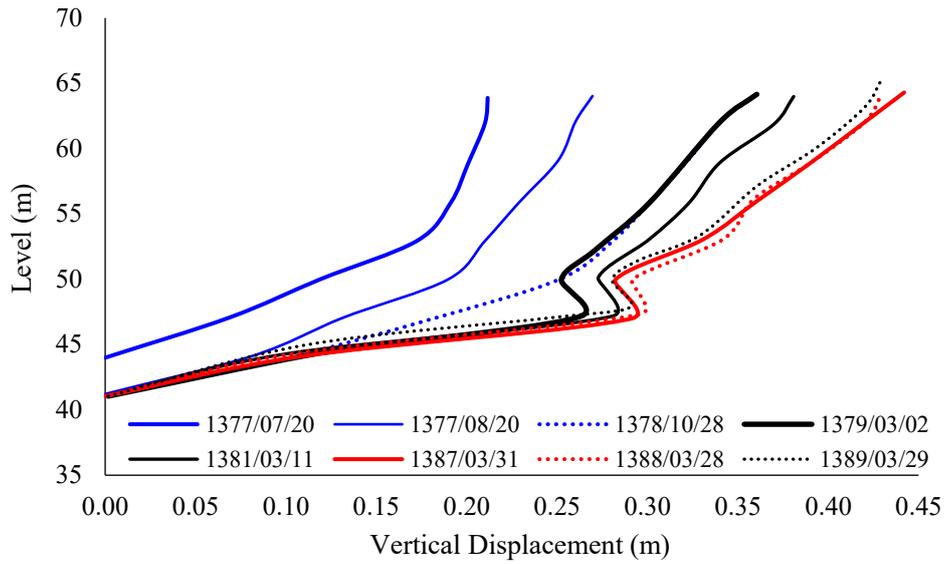
۲. بررسی نشست

حرکات و جابه‌جایی سازه‌ها در بخش‌های میانی و تکیه‌گاه‌های سد، نشانه واضحی از اثر نیروهای داخلی و خارجی وارد بر سازه و نیز عکس‌العمل یا رفتار سازه در برابر این نیروها است. پارامتر نشست سد در مقایسه با سایر پارامترهای کنترلی مثل نیرو بسیار ملموس‌تر بوده و می‌تواند تغییرات ایجاد شده در سد را به خوبی نشان دهد. به منظور اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها و حرکات بدنه سد، ۸ دستگاه نشست‌سنج با صفحات مغناطیسی در ۴ مقطع (در بالادست و پائین دست و به فاصله ۹ متری از محور سد) نصب شده است. شکل‌های ۶ و ۷ به طور نمونه تغییرات جابه‌جایی شعاعی و تغییر شکل صفحات مختلف را در یکی از نشست‌سنج‌های واقع در مجاورت تکیه‌گاه سد (MS3) در طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۷۷ نشان می‌دهند. بررسی مقادیر نشست سنج‌ها که در شکل ۶ نشان داده شده است، بیانگر این است که با نزدیک شدن به تکیه‌گاه سمت چپ سد، به دلیل تراکم مناسب اولیه، اختلاف بین نشست بالادست و پائین دست کاهش می‌یابد. از نظر مقدار، نشست کل بدنه در محل نشست‌سنج واقع در پائین دست مقطع ۱ بسیار بیشتر از سایر نشست‌سنج‌ها است. این وضعیت عمدتاً به دلایلی مثل نصب صفحات مغناطیسی پس از اجرای خاکریز توسط حفر چاهک و نحوه اجرای تراکم در اطراف لوله نشست، تراکم نسبی پایین خاک درون چاهک و تفاوت تراکم نسبی خاک درون چاهک در نشست‌سنج‌های مختلف اتفاق افتاده است. حداکثر مقدار نشست حدود ۴۴ سانتیمتر است که در مقایسه با مقدار نشست مجاز یا حداکثر نشست بعد از ۵ سال از اولین آبیگیری مخزن (حدود ۷۰ سانتیمتر) به میزان

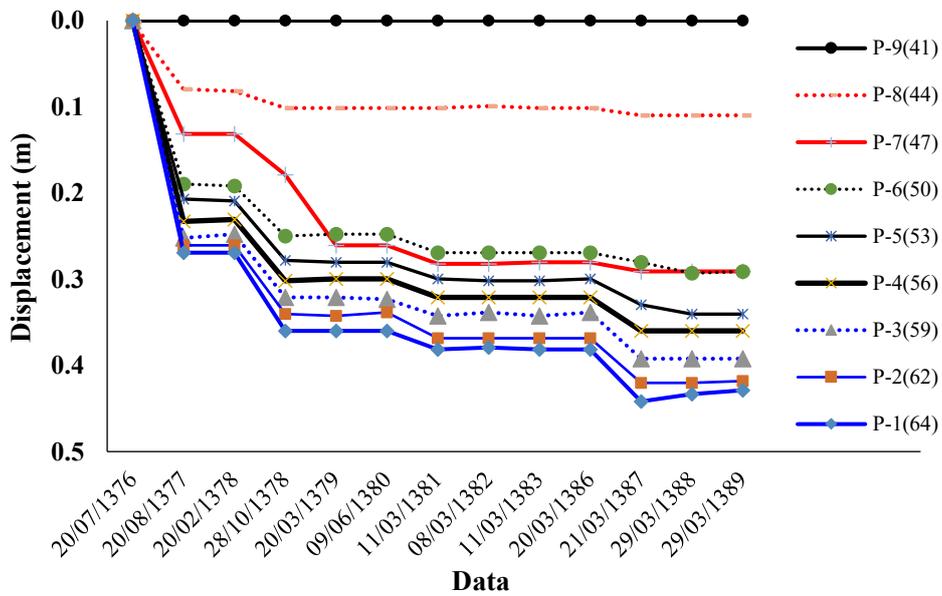
قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر است (شرکت آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۸۰). در تمامی موارد، نشست‌سنج نصب شده در بالادست، نشست کمتری نسبت به نشست‌سنج پائین‌دست نشان می‌دهد که در شکل ۷ نشان داده شده است. این اختلاف به دلیل عبور نشست‌سنج پائین‌دست از میان زهکش و محو شدن سریع رطوبت خاکریزی در این ناحیه است. مقادیر نشست تا سال ۱۳۷۸ (اتمام ساخت سد) با شیب زیادی در حال افزایش بوده و بعد از آگیری و بهره‌برداری، منحنی‌های نشست تقریباً صاف یا یکنواخت شده‌اند که بیانگر رفتار طبیعی و تحکیمی مصالح خاکی بوده و معمولاً این روند مشابه با منحنی چندجمله‌ای درجه ۴ است (گیکاس و ساکلاریو، ۲۰۰۸). نکته قابل اشاره در این شکل، برگشت منحنی‌ها از تراز ۴۷ متر تا ۵۰ متر است که این فرایند از سال ۱۳۷۹ و بعد از ۲ سال از شروع ساخت سد شروع شده است. بررسی‌های بیشتر بیانگر این است که این مسئله احتمالاً به دلیل تورم خاک است، به این دلیل که در زمان اجرای گالری تحتانی سد گلستان (سامانه انتقال آب از درون سد خاکی به پایین‌دست) که یکی از بخش‌های بحرانی سدهای خاکی است، در تراز ۴۴ تا ۴۷ متر از بتن برای پوشش اطراف لوله‌های فولادی گالری تحتانی استفاده شده است. سپس برای حفاظت مناسب این سامانه انتقال، به ارتفاع ۳ متر (از تراز ۴۷ تا ۵۰ متر) از بالشتک رسی استفاده شد. باتوجه به خاصیت ارتجاعی خاک رس، تورم این خاک می‌تواند یکی از دلایل اصلی برگشت تمامی منحنی‌ها (از سال ۱۳۷۹ به بعد) در تراز ۴۷ تا ۵۰ متر باشد.

در شکل ۸ همین وضعیت به صورت خلاصه برای نشست‌سنج MS5 واقع در وسط تاج سد به عنوان بحرانی‌ترین نقطه سد خاکی از نظر نشست یا جابه‌جایی قائم نشان داده شده است. در این شکل منحنی‌های نشست در دو زمان ابتدایی و انتهایی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در این نقطه حداکثر مقدار نشست بعد از حدود ۹ سال از ساخت سد حدود ۵۵ سانتیمتر ثبت شده است. مطابق استاندارد ICOLD، حداکثر نشست در طول دوره بهره‌برداری در این مقطع بحرانی حدود ۱/۵ متر است (شرکت آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۸۰). مقایسه این دو مقدار، وضعیت قابل قبول سد گلستان را نشان می‌دهد. این مقدار نشست، حدود ۰/۶۴ درصد ارتفاع سد گلستان (۸۶ متر) است که در محدوده مقدار متعارف نشست در سدهای خاکی (۰/۵ تا ۲ درصد ارتفاع سد) قرار می‌گیرد. همچنین حداکثر نشست این سد تقریباً معادل نشست سد خاکی ۱۰۳ متری پورناری I در یونان (حدود ۰/۶)، بیشتر از نشست سد خاکی ۱۲۶ متری مورنوس در یونان (۰/۴ درصد) و بسیار کمتر از نشست سد خاکی ۶۸ متری ایوشان (۱ درصد) و سنگ‌ریزه‌ای ۱۷۷ متری مسجد سلیمان در ایران (۲ درصد) است (آدامو و همکاران، ۲۰۰۰؛ پیسارولی و همکاران، ۲۰۱۹؛ عمادعلی و متاق، ۲۰۲۰؛ و بیرانوند و همکاران، ۲۰۲۴) (2000; 2019; 2020; 2024). محققین مختلف، مقادیر متفاوتی از قبیل ۰/۲۵-۱ درصد ارتفاع سد، ۰/۳۵ درصد، ۰/۴-۰/۱ درصد را برای حداکثر مقدار نشست سدهای خاکی - سنگ‌ریزه‌ای پیشنهاد نموده‌اند (پیسارولی و همکاران، ۲۰۱۹). مقدار ۲ درصد ارتفاع سد نیز توصیه شده است (کالوپ و لی، ۲۰۰۹).

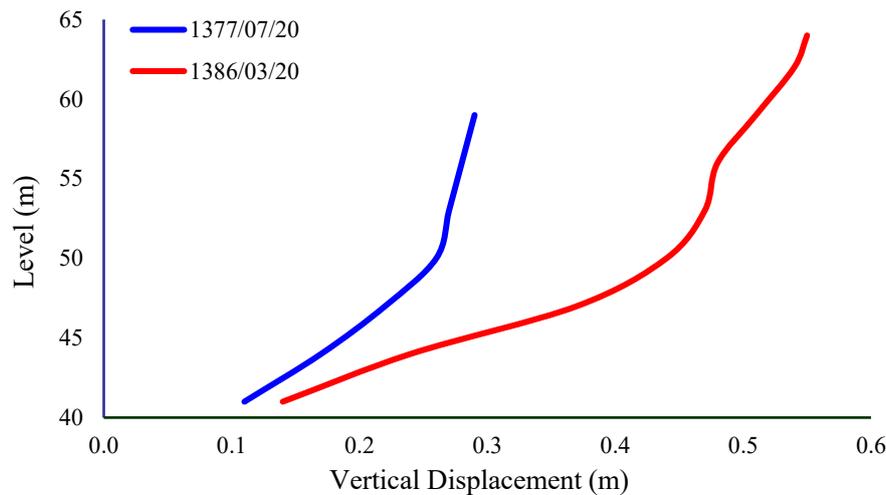
1. Gikas & Sakellariou
2. Adamo et al
3. Pytharouli et al
4. Emadali & Motagh
5. Beiranvand et al
6. Kaloop & Li



شکل ۶. تغییرات نشست با ارتفاع سد در ابزار نشست سنج سراب (MS3)



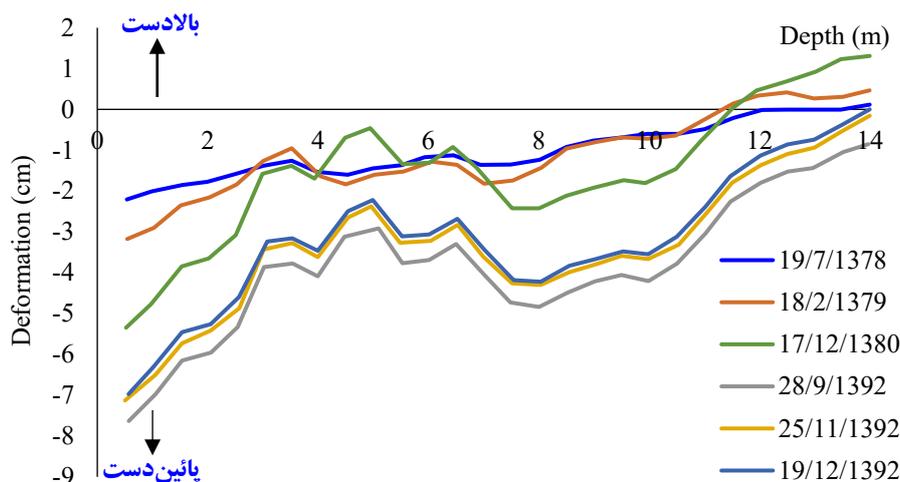
شکل ۷. تغییرات نشست صفحات در ابزار MS3



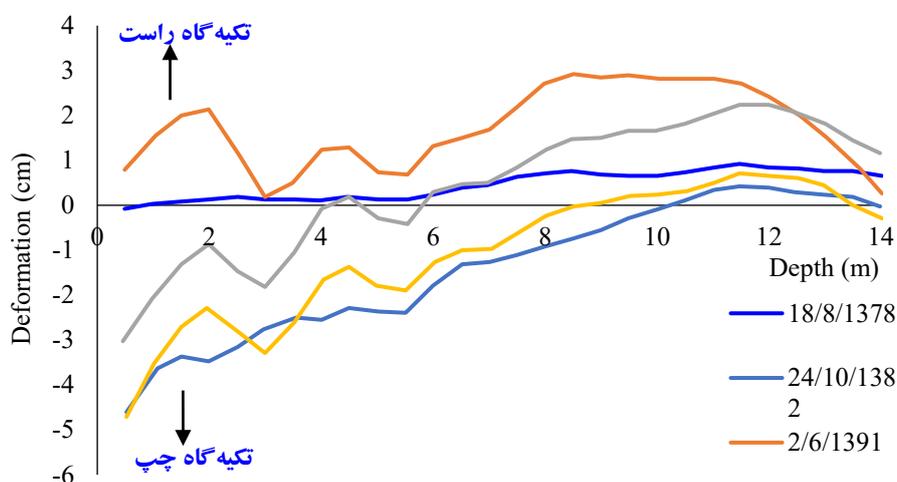
شکل ۸. تغییرات نشست با جابه‌جایی قائم در ترازهای مختلف در ابزار MS5 در وسط تاج سد (بحرانی‌ترین نقطه)

۳. تغییر شکل‌های افقی سد

هدف اصلی از نصب انحراف‌سنج، بررسی جابه‌جایی افقی درون بدنه سد با اندازه‌گیری انحراف افقی لوله راهنمای انحراف-سنج در فواصل یکسان است. انحراف در دو صفحه عمود بر هم اندازه‌گیری می‌شود که یکی عمود و دیگری موازی با آن است. انتهای لوله راهنمای انحراف‌سنج باید به‌عنوان مرجع و ثابت در نظر گرفته شود. بنابراین معمولاً انتهای این لوله در داخل پی سنگی و در محل ثابت قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری تغییر مکان افقی در بدنه سد گلستان در مجموع ۴ سیستم انحراف-سنج در پوسته پایین دست نصب شده است (شکل ۲). این ابزار در پوسته پایین دست سد واقع شده و فاصله محور ابزار تا محور سد ۱۲ متر است. در واقع محل ابزارگذاری، نزدیک‌ترین مقطع به تکیه‌گاه سمت چپ است (نقطه A در شکل ۱). این مقطع به دلیل ورود هم‌زمان جریان آب دو رودخانه گرگانرود و اوغان به درون مخزن سد، بحرانی‌ترین مکان از نظر فشار و نشست است. همان‌طور که از شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، میزان تغییر شکل یا جابه‌جایی نسبت به تراز بدنه سد دارای روندی افزایشی است، به این صورت که در ترازهای پایین‌تر، تغییر شکل بیشتر است. همچنین با نزدیک شدن به سطح پوسته سد، مقادیر تغییر شکل افقی بیشتر می‌شود. نمودار تغییر شکل‌ها در تاریخ‌های مختلف (شکل ۹) نشان می‌دهد که این تغییرات به سمت پائین-دست بوده و هیچ‌گونه تغییر شکل ناگهانی که نشان‌دهنده سطح لغزش باشد، ملاحظه نمی‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر تغییر شکل‌ها نسبی بوده و نسبت به اندازه‌گیری مینا (قرائت در زمان اولین اندازه‌گیری در تاریخ ۱۳۷۹) سنجیده شده است. حداکثر جابه‌جایی در تاج سد حدود ۷/۶ سانتیمتر و در سال ۹۲ است که نسبت به سال ۱۳۸۴ حدود ۱/۵ سانتیمتر افزایش داشته است. مقادیر مثبت تغییر شکل‌ها به‌خصوص در شکل ۱۰ ممکن است در اثر خطای قرائت ابزار انحراف‌سنج و یا در اثر گرفتگی لوله ابزار باشد. این نکته باید به‌صورت دقیق‌تری مورد بررسی قرار گیرد.



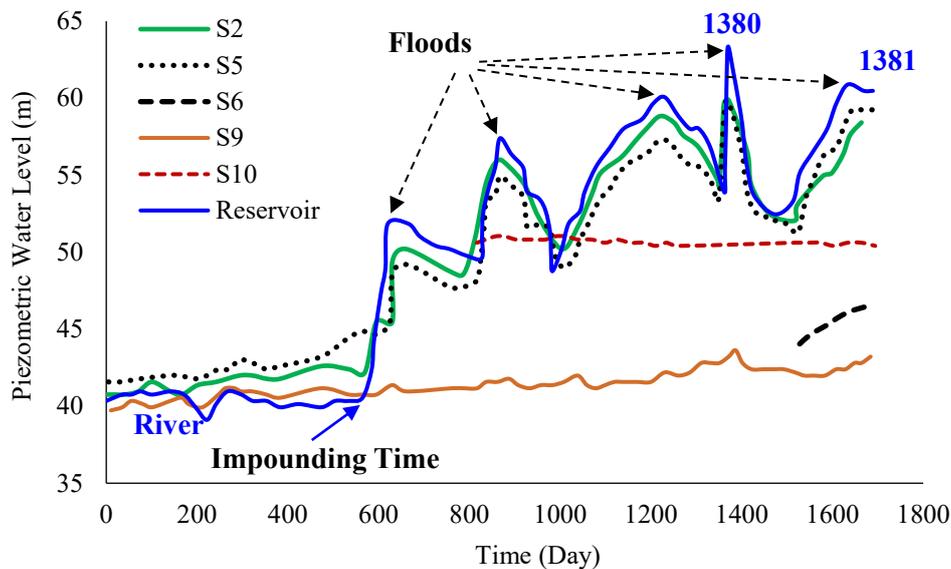
شکل ۹. تغییرات جابه‌جایی افقی سد در مقطع A در جهت بالادست - پائین دست



شکل ۱۰. تغییرات جابه‌جایی افقی سد در مقطع A در جهت چپ - راست

۴. بررسی فشار آب منفذی و تراوش آب

بررسی فشار آب منفذی و تغییرات آن در سدهای خاکی از اهمیت بسزایی برخوردار است، به طوری که افزایش فشار آب منفذی باعث کاهش مقاومت برشی و تنش مؤثر خاک گردیده و پایداری سد را به مخاطره می‌اندازد. بنابراین در سدهای خاکی همواره افزایش فشار آب منفذی مورد توجه قرار گرفته و با انجام تمهیدات لازم از افزایش بیش از حد آن جلوگیری به عمل می‌آید. برای بررسی فشار آب منفذی و تراوش در سد گلستان در ۴ مقطع ابزارگذاری از پیزومترهای کاساگرانده و الکتریکی - تار مرتعش استفاده شده است. تغییرات سطح آب پیزومتریک و تراز آب مخزن پس از آبیگری و در حین عملیات ساختمانی در پیزومترهای واقع در سراب و پایاب سد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل، تاریخ ۱۳۷۶/۷/۱ به عنوان مبنای زمانی قرائت‌ها و به عنوان روز صفر در نظر گرفته شده است. زمان آبیگری مخزن سد گلستان (خرداد ۱۳۷۸) و دوره‌های سیلابی نیز در این شکل مشخص شده است. تأثیرپذیری فشار آب منفذی از تغییرات تراز سطح آب مخزن و نیز اثر سیلاب مردادماه ۱۳۸۰ و سایر سیلاب‌های رودخانه گرگانرود در تغییرات زمانی فشار آب منفذی برای پیزومترهای کاساگرانده که در قسمت سراب مخزن سد نصب شده‌اند (S2 و S5) کاملاً مشهود است، به طوری که با ورود سیلاب به مخزن و افزایش تراز سطح آب، سطح آب در هر دو پیزومتر افزایش یافته و با تخلیه مخزن سد و فروکش سطح آب، تراز این پیزومترها نیز کاهش یافته است. این در حالی است که تغییرات فشار ثبت شده در پیزومترهای واقع در پایاب سد (S6، S9 و S10) تقریباً ناچیز است که روند درستی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. تغییرات سطح آب پیزومتریک و تراز آب مخزن پس از آبیگری در مقطع ۱

بحث

نتایج حاصل از پیزومترها و مشاهدات پایین دست بیانگر کارایی نسبتاً مطلوب تنوره و پتوی زهکش و نیز افت مناسب سطح آب درون بدنه سد است. نتایج پیزومترهای پی، آگذری از المان آب بند را تأیید می کند که اگرچه پایداری سد را به مخاطره نمی اندازد، اما لازم است مورد توجه قرار گرفته و کنترل شود. مقادیر نشست های اندازه گیری شده در سد تا حدودی حالت یکنواخت داشته و نشست تفاضلی بین مقاطع مختلف مشاهده نمی شود. نرخ و میزان نشست در ترازهای بالاتر بدنه سد در مقایسه با ترازهای پایین تر، مقادیر بیشتری را نشان می دهند که منطقی است ولی تا حدودی بیشتر از حد انتظار است. در تمامی موارد نشست سنج نصب شده در بالادست، نشست کمتری نسبت به نشست سنج پائین دست نشان می دهد. به طور کلی عامل اصلی نشست ها پس از عملیات ساختمانی را می توان ناشی از مرطوب شدن خاک و افزایش تراکم پذیری آن دانست. بر اساس گزارش های مکانیک خاک و ژئوتکنیک این سد، مقدار نشست در بخش میانی سد پس از هفت سال از دوره بهره برداری مطابق با ضوابط ICOLD، حدود ۱/۵ متر پیش بینی شده بود، این در حالی است که در این مکان و در مقطع گالری تحتانی سد، نشست جمعی به میزان ۰/۵۵ متر اتفاق افتاده که بسیار کمتر از مقدار پیش بینی بوده است.

نتیجه گیری

این تحقیق باهدف ارزیابی و پایش ایمنی و سلامت سد خاکی گلستان به عنوان بزرگ ترین سد مخزنی موجود در استان گلستان و با بررسی و تحلیل داده های طولانی مدت ثبت شده توسط ابزار دقیق این سد انجام شده است. باتوجه به هزینه فراوان و مدت زمان طولانی احداث سدهای مخزنی و نیز تبعات منفی قابل توجه ناشی از عدم پایداری آنها، انجام فرایند پایش و رفتارنگاری سد به کمک داده های ابزار دقیق (و به ویژه در سدهای خاکی) در طول دوره ساخت، آبیگری اولیه و بهره برداری از سد لازم و ضروری است. انجام این کار ضمن کمک به افزایش عمر مفید سد، تشخیص زودهنگام نقص ها و وقوع احتمالی ناهنجاری ها در بدنه و پی سد را فراهم نموده و گامی مهمی در ارزیابی یکپارچگی سدها، پایش سلامت و مدیریت کلی ریسک است. نتایج این تحقیق می تواند برای پایش سلامت سدهای مشابه (به ویژه سد در حال ساخت نرماب در استان گلستان) مورد استفاده قرار گیرد. سد خاکی گلستان به صورت همگن و بدون هسته رسی طراحی و اجرا شده است که این موضوع، حساسیت و اهمیت ارزیابی ها را بیشتر می کند. بر اساس رفتارسنجی سد خاکی گلستان و نتایج ارائه شده در این تحقیق و نیز شواهد حاصل از بازرسی ها می توان نتیجه گرفت که این سد پس از گذشت بیش از ۲۲ سال از زمان بهره برداری، در وضعیت مطلوبی از نظر پایداری و ایمنی قرار

دارد. باتوجه به وقوع سیلاب‌های بسیار شدید رودخانه گرگانرود در سال‌های ابتدایی بهره‌برداری از این سد (۱۳۸۰، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲)، وضعیت ایمن سد قابل قبول است. علاوه بر نتایج داده‌های ابزار دقیق این سد که در این تحقیق ارائه شده است، ارائه نتایج بازرسی‌ها نیز مفید است. مثلاً بر اساس بازدیدهای محلی، پوشش بتنی بالادست سد گلستان کاملاً سالم بوده و آسفالت روی تاج سد نیز فاقد هرگونه ترک خوردگی جدید است. باتوجه به پوشش سطحی مناسب شیب بالادست سد گلستان، پتانسیل گسیختگی ناشی از فرسایش سطحی برای این سد بسیار کم ارزیابی شد. رویه پائین دست این سد نیز در وضعیت مطلوبی قرار داشته و اثری از وجود مناطق مرطوب، ترک، لغزش، فرو چاله، تراوش، برآمدگی در خاکریز نزدیک پنجه سد و فرسایش مشاهده نگردید. تحلیل داده‌های ثبت شده توسط نشست سنج‌ها نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی افقی در جهت بالادست - پایین دست دارای روندی افزایشی است به طوری که با نزدیک شدن به سطح پوسته سد، مقادیر جابه‌جایی‌های افقی نیز افزایش می‌یابد. همچنین نمودار تغییرات زمانی جابه‌جایی‌ها نشان می‌دهد که هیچ‌گونه تغییر جابه‌جایی ناگهانی که نشان‌دهنده سطح لغزش باشد، مشاهده نمی‌شود. حداکثر جابه‌جایی در تاج سد حدود ۷/۶ سانتیمتر در سال ۹۲ بوده که نسبت به سال ۱۳۸۴ حدود ۱/۵ سانتیمتر افزایش داشته است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله، تعارض منافع وجود ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی آب و خاک در قالب پژوهانه رساله دانشجویی نویسنده اول انجام شده است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به خاطر حمایت مالی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- یحیایی‌نیا، احمد. (۱۳۹۹). آنالیز پایداری سد خاکی بر اساس تحلیل عددی و نتایج ابزار دقیق (مطالعه موردی سد دامغان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
<https://shahroodut.ac.ir/fa/thesis/thesis.php?thid=S541>
- دقیق، حدیث، حسن‌پور درویشی، حسین، و موسوی چهرمی، سید حبیب. (۱۳۹۴). آنالیز ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی نسبت به زمان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۵(۲)، ۲۷-۱۵.
<https://sid.r/paper/232260/fa>
- عالی‌محمدی پیرانشاهی، ساناز، شاه‌کرمی، نازنین، و اسدی، حسین. (۱۴۰۰). تحلیل تراوش در شرایط افزایش ظرفیت مخزن با بالا بردن تراز سرریز (مطالعه موردی: سد خاکی کمال صالح). نشریه مهندسی عمران/میرکبیر، ۵۳(۹)، ۳۹۳۲-۳۹۱۳.
<https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18161.6786>
- سلماسی، فرزین، و حکیمی خانسر، حسین. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی رفتار سد کبودوال در زمان ساخت با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی. نشریه مهندسی عمران/میرکبیر، ۵۳(۹)، ۳۹۸۴-۳۹۶۷.
<https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18172.6790>
- سلماسی، فرزین، حکیمی خانسر، حسین، و نورانی، بهرام. (۱۳۹۷). بررسی نشست بدنه سد خاکی در دوران ساخت و مقایسه آن با نتایج تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS (مطالعه موردی سد کبودوال). نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۲(۴)، ۱۷۱-۱۵۵.
<http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3542-fa.html>
- شرکت آب منطقه‌ای گلستان. (۱۳۸۰). گزارش رفتارنگاری سد گلستان در مراحل ساخت و بهره‌برداری. شرکت مهندسی مشاور تهران-برکلی، گلستان، ایران.

References

- Aalimohammadi Piranshahi, 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 J. Civil Engineering*, 53(9), 3913-3932. (In Persian) <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2020.18161.6786>
- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety problems related to seepage. *J. Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10(6), 191-239. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3878719>
- ASCE, Task Committee on Instrumentation and Monitoring Dam Performance. (2000). Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance. ASCE, USA. https://damsafety.cwc.gov.in/ecm-includes/PDFs/Guidelines_for_Instrumentation_of_Large_Dams.pdf
- Beiranvand, B., Rajaei, T., & Komasi, M. (2024). Presenting the AI models in predicting the settlement of earth dams using the results of spatiotemporal clustering and k-means algorithm. *Scientific Report*, 14, 10207. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60944-4>
- Daghigh, H., Hassanpour Darvishi, H., & Musavi Jahromi, S.H. (2015). Safety factor analysis of the stability of earth dams over the long period of time. *J. Water and Soil Resources Conservation*, 5(2), 15-27. (In Persian) <https://sid.ir/paper/232260/fa>
- Dannicliiff, J. (1991). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. *John Wiley & Sons Inc*, USA. https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_89.pdf
- Desideri, A., Fontanella, E., & Pagano, L., (2013). Pore water pressure distribution for use in stability analyses of earth dams. *Landslide Sci. Pract. Risk Ass. Manag. Mitig.*, 6, 149-153. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6_21
- El Bilali, A., Mohammed, M., Taleb, A., Nafii, A., Alabjah, B., Brouzyine, Y., Mazigh, N., Teznine, Kh., & Mhamed. M. (2021). Predicting daily pore water pressure in embankment dam using machine learning models and hydrostatic seasonal time approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 382-397. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-947164/v1>
- Fremion, F., Bordas, F., Mourier, B., Lenain, J.F., Kestens, T., & Courtin-Nomade, A. (2016). Influence of dams on sediment continuity: a study case of a natural metallic contamination. *Sci. Total. Environ*, 547, 282-294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.023>
- Gikas, V., & Sakellariou, M. (2008). Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring. *Engineering Structures*, 30, 3074-3081. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.019>
- Golestan Regional Water Company. (2011). Golestan dam monitoring in construction and operation phases. Final Report, *Tehran-Berkeley Consulting Engineers Company*, Golestan, Iran. (In Persian)
- Gordan, D., Koopialipour, B., Armaghani, M., Tarinejad, D.J., Pham, R., Huynh, B.T., & Van, V. (2020). Seepage analysis in short embankments using developing a metaheuristic method based on governing equations. *Appl. Sci*, 10, 1-23. <https://doi.org/10.3390/app10051761>
- Hsu, Y.C., Lin, J.S., & Kuo, J.T. (2007). Projection method for validating reliability analysis of soil slopes. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6), 753-756, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:6\(753\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(753))
- ICOLD, (1969). General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams. Bultten 21, Paris, France. <https://www.svk.se/4a5420/siteassets/3.sakerhet-och-beredskap/dammsakerhet/forskning-och-utveckling/icold-bulletiner---forteckning-med-sammanfattning-230815.pdf>
- ICOLD. (1983). Deterioration of dams and reservoirs; Laboratório nacional de engenharia civil. Lisbon, Portugal. <https://doi.org/10.1080/02630258408970371>

- Johansson, S. (1997). Seepage monitoring in embankment dams. PhD Thesis, *Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:8066>
- Kalooop, M.R., & Li, H. (2009). Monitoring of bridge deformation using GPS technique. *KSCE J. Civil Engineering*, 13, 423-431. <https://doi.org/10.1007/s12205-009-0423-y>
- Komasi, M., Mohammadzadeh, A., & Beiranvand, B. (2020). Optimization of horizontal drain dimensions in homogeneous earth dams using neural network. *Int. J. Mining and Geo-Eng.*, 54(2), 173-177. <https://doi.org/10.22059/IJMGE.2019.278411.594792>
- Majoros, M., & Sneed, H.M. (1981). The softest program test system. *J. Syst. Softw*, 2, 289-296. [https://doi.org/10.1016/0164-1212\(81\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0164-1212(81)90003-0)
- Najafzadeh, M. (2019). Projection of seepage and piezometric pressure in earth dams using soft computational Models. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7), 435-438, <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15667.5990>
- Omofunmi, O.E., Kolo, J.G., Oladipo, A.S., Diabana, P.D., & Ojo, A.S. (2017). A review on effects and control of seepage through earth-fill dam. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 1-11. <https://doi.org/10.9734/CJAST/2017/28538>
- Pagano, L., Fontanella, E., Sica, S., & Desideri, A., (2010). Pore water pressure measurements in the interpretation of the hydraulic behaviour of two earth dams. *Soils Found*, 50, 295-650. <https://doi.org/10.3208/sandf.50.295>
- Panthulu, T.V., Krishnaiah, C., & Shirke, J.M. (2001). Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. *Eng. Geol.*, 59, 281-295. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00082-X)
- Parsaie, A., Haghiabi, A.H., Dashti Latif, S., & Tripathi, R.P. (2021). Predictive modeling of piezometric head and seepage discharge in earth dam using soft computational models. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 60842-60856. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15029-4>
- Pytharouli, S., Michalis, P., & Raftopoulos, S. (2019). From theory to field evidence: observations on the evolution of the settlements of an earthfill dam, over long time scales. *Infrastructures*, 4, 65. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4040065>
- 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. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 9, 709-725. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.12.003>
- Rehamnia, I., Benlaoukli, B., Jamei, M., Karbasi, M., & Malik, A. (2021). Simulation of seepage flow through embankment dam by using a novel extended Kalman filter based neural network paradigm: Case study of Fontaine Gazelles Dam, Algeria. *J. Int. Meas. Confed.*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement>
- Rezaeeian, A., Davoodi, M., & Jafari. M.K. (2018). Determination of optimum cross-section of earth dams using ant colony optimization algorithm. *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, 26(3), 1104-1121. <https://doi.org/10.24200/SCI.2018.21078>
- Salmasi, F., & Hakimi Khansar, H. (2021). Simulation of behavior of the Kabudval Dam during construction with 3D numerical modeling. *AMIRKABIR J. Civil Engineering*, 53(9), 3967-3984. (In Persian) <https://doi.org/10.22060/CEJ.2020.18172.6790>
- Salmasi, F., Hakimi Khansar, H., & Norani, B. (2019). Investigation of the structure of the dam body during construction and its comparison with the analytical results using PLAXIS software (Case Study: Kaboodvall Dam). *J. Water and Soil Sciences*, 22(4), 155-171. (In Persian) <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3542-fa.html>
- Seyed-Kolbadi, S.M., Hariri-Ardebili, M.A., Mirtaheri, M., and Pourkamali-Anaraki, F. (2020). Instrumented health monitoring of an earth dam. *Infrastructures*, 5(3), 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5030026>

- Shi, Z.M., Wang, Y.Q., Peng, M., Chen, J.F., & Yuan, J. (2015). Characteristics of the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake and dynamic behavior analysis using large-scale shaking table tests. *Eng. Geol.* 194, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.009>
- Sica, S., Pagano, L., & Rotili, F. (2019). Rapid drawdown on earth dam stability after a strong earthquake. *Comput. Geotech.*, 116, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103187>
- Stephens, T. (2010). Manual on small earth dams, A guide to siting, design and construction. *FAO Irrigation and Drainage Paper 64*, Rome, Italy. <https://www.adds.dj/manual-on-small-earth-dams-a-guide-to-siting-design-and-construction-2/>
- Toromanovic, J. (2018). On parameter identification for better predictions of dam behaviour. PhD Thesis, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, *Luleå University of Technology*, Sweden. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1200172>
- Toromanovic, J., Laue, J., & Knutsson, S. (2018). Assessment of arching and cracking potential by numerical modelling: A case study of the Mornos dam. In *Proceedings of 14th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Stockholm, Sweden, 445-459. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1158923>
- USB. (2014). Embankment dams, technical report. Design Standards No. 13, *USB*, Denver, USA. https://damtoolbox.org/wiki/Design_Standards_No.13
- Wang, S., Xu, W., Li, Y., Gu, C., Shi, B., & Fei, T. (2018). Monitoring models for base flow effect and daily variation of dam seepage elements considering time lag effect. *Water Sci. Eng.*, 11, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2018.12.004>
- Xiang, Y., Fu, S.Y., Zhu, K., Yuan, H., & Fang, Z.Y. (2017). Seepage safety monitoring model for an earth rock dam under influence of high-impact typhoons based on particle swarm optimization algorithm. *Water Sci. Eng.*, 10, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.03.005>
- Xu, Y., & Zhang, L.M. (2009). Breaching parameters for earth and rockfill dams. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1957-1970. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000162](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000162)
- Yilmaz, A.N. (2017). Assessment of performance of drainage systems in earth-fill dams. MSc. Thesis in Civil Engineering, *Middle East Technical University*, Turkey. <https://hdl.handle.net/11511/26400>
- Yahiaee Nia, A. (2020). Stability analysis of earth fill dams based on numerical analysis and instrumentations results (Case Study: Moghan Dam). MSc Thesis in Civil Engineering, *Shahrood University of Technology*, Shahrood, Iran. (In Persian) <https://shahroodut.ac.ir/fa/thesis/thesis.php?thid=S541>