

Investigating the Arching in Rock-Fill Dam Ten Years after the End of Construction using Numerical Analysis and Monitoring (Case Study: Shahid Madani Dam in Tabriz, Iran)* Research Article

Rasoul Farajniya¹ Ramin Vafaei Poursorkhabi²
Ahmad Zarean³ Rouzbeh Dabiri⁴

1. Introduction

The behavior of rock fill dams at the end of construction and operation is an important issue in the field of hydraulic failure, which can pose serious risks to dams and related facilities. Due to the uncertainty in the properties of materials, the results of numerical analysis may differ somewhat from the results provided by the tools. Therefore, the analysis of dams at the end of construction is necessary. The study of hydraulic failure in rock fill dam cores has been evaluated through laboratory tests and numerical analysis, which shows that CL is prone to hydraulic failure, so the use of GM-GC for rock fill dam cores is recommended. Shahid Madani Dam is a rock fill dam that was built near the city of Tabriz, Iran. The city of Tabriz is located in an area with high seismic potential. Supplying agricultural water was the main purpose of building this dam. There are several freshwater and saltwater rivers in this catchment area. Some evaporative dams have been built in brackish water rivers to prevent them from flowing into the Shahid Madani Dam reservoir. In this research, in addition to the results of numerical analysis, the parameters obtained from the behavior of the body obtained from the results of precision instruments, including the parameters of settlement, vertical stress and pore pressure, are included in the stability control. Therefore, the possibility of core arching and hydraulic failure of the rock fill dam ten years after the end of construction was investigated.

1.1. Materials and experimental program

Shahid Madani Dam is a rockfill dam with a clay core that was built on the Aji-Chai River, 5 km northeast of Tabriz. This dam has a crown length of 277 m and the height of the largest part of the foundation is 91 meters. The crown level of the dam is 1504 m, the normal level of the reservoir is 1498 m above sea level, and the volume of the reservoir at the normal level is 361 million cubic meters. Drilling was done with a depth of 52 m in the riverbed to reach the bedrock. Two filter layers are located upstream and downstream of the clay core, between the clay core and the rock shell. The body's behavioral instruments, including settlementmeters, pressure cells, and piezometers are located at five cross-sections at the height

of the dam. The construction of the dam began in 2002 and was completed in 2011. Instrument readings began in 2003 and the data were continuously recorded during the construction of the dam body. Table 1 shows the materials resistance and hydraulic parameters for different areas of the dam.

Table 1. Resistance parameters of dam body, foundation and materials

Materials	γ_u (KN/m ³)	γ_{sat} (KN/m ³)	K^*10^{-6} (m/s)	ϕ (deg)	C (KPa)	(ν)	E (MPa)
Clay core	19	20	0.0005	28	40	0.3	20
Filter	20	21	0.0001	33	0	0.25	40
Shell	21	22	1000	44	0	0.25	70
Transient Shell	20	21	1e-4	38	0	0.25	50
Disposal	19.2	19.8	1e-6	28	20	0.3	15
Alluvial foundation	18.5	19.5	1e-7	20	20	0.3	40
Bed Rock	21	22	1e-9	28	80	0.25	200

2. Results

In this section, the results of numerical analysis of Shahid Madani dam including settlements, total vertical stresses, and pore water pressure are compared with the recorded data obtained from the tools. The maximum amount of vertical settlement after ten years from the end of construction of Shahid Madani dam body is the results of numerical analysis and tools installed in the dam body in cross section C, which is 1.79 and 1.90 (m), respectively. The maximum amount of total stress resulting from the reading of pressure cell instruments and numerical analysis at the junction of the core and the foundation is 1205 and 1440 (KPa), respectively, which indicates a very good fit between the data. The maximum pore pressure of the clay core, based on numerical analysis and readings of installed piezometers, is 450 and 420 (Kpa), respectively. The results showed that the amount of settlement, amount of pore pressure, and the total stress obtained from the numerical analysis were consistent with the data recorded by the instruments. The correlation coefficients obtained from linear regression between instrumentation data and numerical analysis results for settlement, pore pressure, and total stress parameters were 84, 67, and 99%, respectively.

* Manuscript received: October, 31,2021; Revised, February,16,2022; Accepted, April, 3,2022.

¹. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

². Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran. **Email:** raminvafaei@yahoo.com

³.Robotics & Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

⁴. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

⁵. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

3. Conclusion

In the present study, ten years after the completion of the construction of the Shahid Madani dam body, numerical analysis of the dam body and monitoring of the results of instrumentation were performed. According to the readings of the installed tools and three-dimensional numerical analysis of the body and the support of the dam, the results obtained from this research are as follows:

1. Ten years after the completion of the dam body, Ten years after the completion of the construction of the dam body, the amount of vertical settlement obtained from the reading of the instrument and the results of the numerical analysis is 190(cm) and 179(cm), respectively. The amount of vertical settlement obtained from the results of instrumentation in all sections is more than the value obtained from numerical analysis, which is due to the occurrence of several natural earthquakes in the region of Azerbaijan over the past ten years. The correlation coefficient between the settlement data obtained from the results of instrumentation and numerical analysis for the five instrumented sections is 83.8 percent, which indicates a good agreement between the model and the instrumentation data.
2. Ten years after the construction of the dam body, the maximum total vertical stress, in the body of the Shahid Madani Dam in Tabriz at the junction of the core, recorded by the pressure cells and obtained from the numerical analysis is 1205 and 1440 kPa, respectively. The correlation coefficient between the total stress obtained from the results of instrumentation and numerical analysis is 99.09 percent, which indicates a very good agreement. The arcing ratio in Shahid Madani Dam is between 0.6 - 0.77, which is less than 1, therefore, the dam is in a safe area in terms of hydraulic failure due to arcing at the end of construction.
3. In Shahid Madani Dam of Tabriz, due to the passage of ten years from the end of construction, and the existence of high groundwater level in this region as a result of the river water level as well as the wide width of the core, a large pore pressure is observed in the core of the dam. The maximum pore pressure due to the reading of piezometers installed in the core and numerical analysis is 420 and 450 KPa. The correlation coefficient between the pore pressure data obtained from the results of instrumentation and numerical analysis is 67.31 percent, which indicates a good agreement between the data. To prevent the increase of pore pressure during the dewatering operation and to prevent the occurrence of hydraulic failure in the body of the dam, the dewatering operation of the dam reservoir must be controlled. The pore pressure values obtained from the numerical analysis and the piezometers at the end of construction were well compatible. The differences between the observed and calculated R_u were due to the differences between the observed and calculated vertical stresses. The maximum R_u calculated and recorded by the tools in the dam core is 0.35 and 0.47 and the R_u predicted in the design stage was 0.5,

which ensures the safety of the dam in terms of strength against hydraulic failure.

بررسی قوس زدگی در سدهای سنگریزه‌ای یک دهه پس از پایان ساخت با نتایج تحلیل عددی و مونیتورینگ بدنه سد

(مطالعه موردی سد شهید مدنی تبریز، ایران)*

مقاله پژوهشی

رسول فرج نیا^(۱) رامین وفايي پورسرخايبی^(۲) احمد زارعان^(۳) روزبه دبیری^(۴)

چکیده در تحقیق حاضر، رفتار مکانیکی سد سنگریزه‌ای شهید مدنی ده سال پس از تکمیل بدنه سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل عددی سه بعدی براساس روش اجزای محدود برای بدنه و تکیه‌گاه سد در نرم‌افزار میاداس انجام شد. داده‌های ثبت شده توسط ابزارهای واقع در کل بدنه سد با نتایج تحلیل عددی در محل ابزار مقایسه گردید. نشست، فشار آب منفذی، تنش عمودی کلی و کنترل پایداری بدنه سد، پارامترهایی بودند که برای ارزیابی رفتار سد در ده سال پس از پایان ساخت سد، مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نشست‌ها، میزان فشار منفذی و تنش کلی به دست آمده از تحلیل عددی با داده‌های ثبت شده توسط ابزارها، منطبق بوده است. به طوری که در رفتار خطی بین داده‌های ابزار دقیق و تحلیل عددی در مورد نشست، فشار منفذی و تنش کل ضرایب همبستگی به ترتیب ۶۷/۸۴ و ۹۹ درصد به دست آمدند. پارامترهای فشار منفذی و تنش کل برای کنترل شکست هیدرولیکی هسته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج ماکزیمم مقدار نشست حاصل از تحلیل‌های عددی و ابزار دقیق به ترتیب ۱/۷۹ و ۱/۹۰ متر، برای فشار منفذی ۴۵۰ و ۴۲۰ کیلوپاسکال، برای تنش کل ۱۴۴۰ و ۱۲۰۵ کیلوپاسکال به دست آمده است. با محاسبات صورت گرفته ماکزیمم نسبت ضریب قوس در سد شهید مدنی حاصل از قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۹۱ بود که هر دو کمتر از عدد یک است، همچنین حداکثر R_{II} حاصل از تحلیل عددی و ابزار دقیق نصب شده در هسته به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۴۷ می باشد که کمتر از مقدار پیش بینی شده در مرحله طراحی ۰/۵ می باشند. بنابراین احتمال وقوع قوس زدگی هسته وجود ندارد، که نشان می دهد سد از نظر شکست هیدرولیکی در محدوده امن قرار دارد.

واژه‌های کلیدی سد سنگریزه‌ای، اجزای محدود، فشار منفذی، قوس زدگی، شکست هیدرولیکی.

مقدمه

به طور مداوم مورد ارزیابی و نظارت قرار گیرد. نظارت به معنای بررسی عملکرد یک سازه در پایان ساخت و مرحله بهره‌برداری و سازگاری آن با پیش بینی‌های زمان طراحی است. [2] با طراحی سیستم نظارتی و نصب ابزارهای مربوط در بدنه سد در حین ساخت و ساز، نشست‌ها، تنش‌ها و فشار آب منفذی را می توان اندازه گیری کرد. تحلیل داده‌های ثبت شده توسط ابزارها نه تنها به درک تنش‌ها و نشست‌های پیچیده در بدنه سد کمک می کند، بلکه می تواند مبنای مناسبی برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی از طریق تحلیل برگشتی باشد. این داده‌ها را می توان با نتایج عددی مقایسه کرد تا دقت تحلیل عددی ارزیابی شود [3]. با توجه به

رفتار سدهای خاکی در پایان ساخت و بهره‌برداری از مسائل مهم در زمینه رفع خرابی هیدرولیک است که می تواند خطرات جدی را برای سدها و تأسیسات مربوط به همراه داشته باشد. به دلیل عدم قطعیت در خواص مواد، نتایج تحلیل عددی ممکن است به نحوی با نتایج ارائه شده توسط ابزارها متفاوت باشد. بنابراین، تجزیه و تحلیل سدها در پایان ساخت و ساز ضروری است [1]. سدهای خاکی و سنگی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین سازه‌های خاکی محسوب می شوند. هزینه‌های ساخت و آسیب‌های جبران ناپذیر به دلیل خرابی آن‌ها باعث شده است که عملکرد آن‌ها

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۱۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱/۱۶ می باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

(۴) استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

چند شاخه رودخانه از جمله آب شیرین و آب شور وجود دارد. برخی از سدهای تبخیری در رودخانه‌های آب شور ساخته شده‌است تا از سرازیر شدن آن‌ها به مخزن سد شهید مدنی جلوگیری شود. در تحقیق حاضر ضمن کنترل وضعیت پایداری بدنه سد با استفاده هم‌زمان از تحلیل عددی و ابزار دقیق، شامل کنترل پارامترهای نشست، تنش قائم و فشار منفذی بدنه سد، به کنترل تغییرات ضرایب فشار منفذی هسته و مقدار ضریب قوس‌زدگی نیز پرداخته شده‌است و احتمال وقوع قوس‌زدگی هسته و بروز شکست هیدرولیکی سد سنگ‌ریزه‌ای تا یک دهه پس از پایان ساخت بررسی شده‌است.

روش تحقیق

مشخصات سد

سد شهید مدنی سدی سنگ‌ریزه‌ای با هسته رسی است که بر روی رودخانه آجی‌چای (تلخینه‌رود) در ۵ کیلومتری شمال شرقی تبریز ساخته شده‌است. این سد دارای طول تاج ۲۷۷ متر و ارتفاع بزرگ‌ترین قسمت پی (بخش میانی) معادل ۹۱ متر است. تراز تاج سد ۱۵۰۴ (از سطح دریا) و تراز نرمال مخزن ۱۴۹۸ متر از سطح دریا و حجم مخزن در سطح نرمال ۳۶۱ میلیون مترمکعب است. عمق حفاری ۵۲ متر در بستر رودخانه تا سنگ بستر انجام گرفته‌است. دو لایه فیلتر در بالادست و پایین‌دست از هسته رسی عمودی و پوسته سنگی که بین هسته رس و پوسته سنگ‌ریز قرار دارد. علاوه بر این، یک رویه بالادست توسط مصالح ریپ‌رپ پوشش داده شده‌است. ابزارهای رفتارسنجی شامل نشست‌سنج‌ها، سلول‌های فشار و پیزومتر در پنج سطح مقطع در ارتفاع سد قرار گرفته‌است. ساخت سد در سال ۲۰۰۲ آغاز شد و در سال ۲۰۱۱ به پایان رسید. قرائت ابزارها در سال ۲۰۰۳ شروع شد و داده‌ها در طول ساخت بدنه سد به‌طور مداوم ثبت می‌شدند. اکثر ابزارها در هسته رس متمرکز شده‌اند. در شکل (۱) نمای پلان و محورهای جانمایی ابزار دقیق در پلان سد شهید مدنی نشان داده شده‌است.

در جدول (۱) مشخصات بدنه سد و مخزن سد شهید مدنی نشان داده شده‌است [14].

پایش به‌منظور ارزیابی عملکرد سد از نظر ایمنی، مقایسه

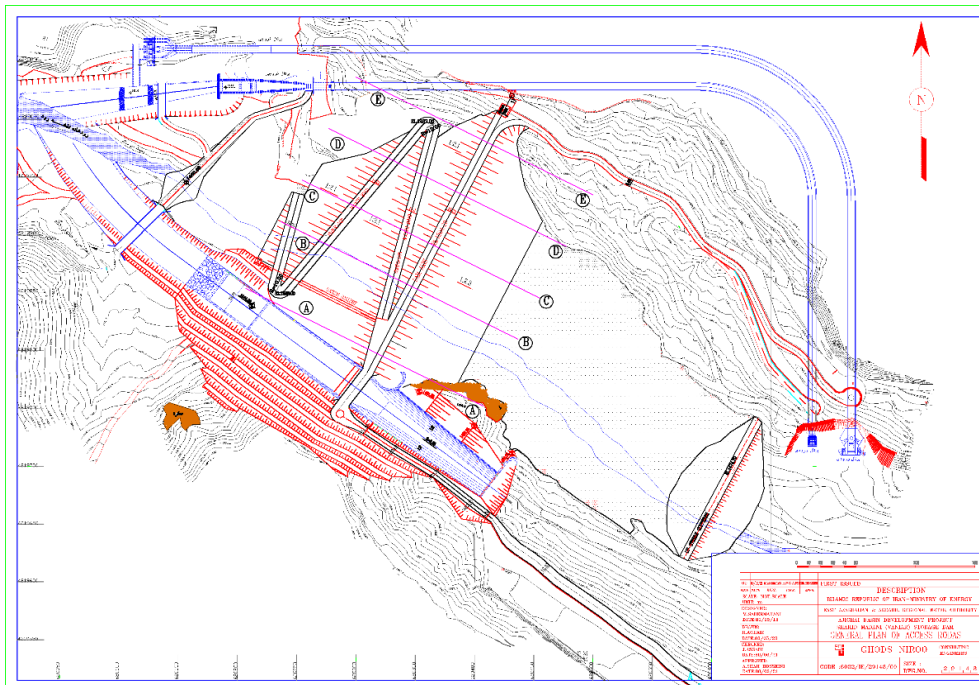
استانداردهای سد خاکی، به‌شرطی که بین نتایج تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده توسط ابزارها تفاوت قابل توجهی وجود داشته باشد، انجام یک تحلیل برگشتی برای اصلاح ویژگی‌ها و مفروضات مواد ضروری است [4]. افزایش فشار آب منفذ در بدنه سدها باعث کاهش تنش مؤثر و در نتیجه کاهش مقاومت برشی مواد بدنه سد می‌شود که می‌تواند نتایج خطرناکی را به دنبال داشته باشد و باعث ناپایداری سدهای خاکی شود [5]. کنترل پایداری سدها براساس بلایای طبیعی مانند زلزله، سیل، رانش زمین و طراحی ضعیف یا عدم نگهداری مناسب باید مورد توجه قرار گیرد [6]. هم‌چنین ارزشیابی پایداری شیب حاصل از مدل‌سازی عددی باید با مقدار ضریب اطمینان مجاز کنترل شود [7]. از نتایج ابزارهای نصب‌شده در بدنه سد، میزان نشست اشباع ناشی از اولین آبیگری مخزن سد در پوسته بالادست سد قابل تعیین است [8]. پایداری بدنه سدهای سنگ‌ریزه‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی قابل تخمین است [9]. براساس مطالعات انجام گرفته حداکثر نشست در بلندمدت و قوس‌دهی تقریباً در وسط هسته سد رخ می‌دهد [10]. ضمناً با مطالعات صورت‌گرفته مشخص شده‌است که ۸۸ درصد از کل نشست سد در حین ساخت سد صورت گرفته‌است [11]. با توجه به تفاوت خواص مصالح هسته و پوسته، نشست‌های ناهمگن بین بخش‌های مختلف سد رخ می‌دهد. این عمل منجر به پدیده قوس‌زدگی می‌شود که باعث ایجاد برخی ترک‌ها در سطح مقطع غیر قابل نفوذ بدنه سد، به‌ویژه در نزدیکی محل اتصال به دیوارهای جانبی در اولین دوره آبیگری می‌شود که با اعمال فشار آب مخزن به هسته، می‌تواند توسعه یابد و سرانجام و در شرایط بحرانی‌تر منجر به خرابی و شستشوی هیدرولیکی بدنه سد می‌شود [12]. مطالعه شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی ارزیابی شده‌است که نشان می‌دهد CL مستعد شکست هیدرولیکی است بنابراین استفاده از GM-GC برای هسته سدهای خاکی توصیه شده‌است [13]. سد شهید مدنی یک سد با مصالح سنگی است که در نزدیکی شهر تبریز در ایران ساخته شده‌است. تبریز در منطقه ای با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا قرار دارد. تأمین آب شیرین بدون شوری هدف اصلی ساخت این سد بوده‌است. در این حوضه

فونداسیون در نظر گرفته شده است. برای نظارت بر سد شهید مدنی در مرحله طراحی، پنج سطح مقطع ابزار به گونه ای پیش بینی شده است که به راحتی قابل خواندن و کنترل هستند. در شکل (۲) مقطع طولی بدنه با قرارگیری مقاطع ابزار و تصویر بزرگترین مقطع بدنه سد نشان داده شده است.

رفتار واقعی با پیش بینی های زمان طراحی و تجربه در طراحی های آینده ضروری به نظر می رسد. نظارت با نصب ابزارهای مناسب در مناطق حساس و اندازه گیری پارامترهای مختلف مانند فشار منفذی، تغییر شکل، تنش کلی امکان پذیر است [15]. به منظور کنترل و مراقبت از عملکرد و رفتار سد شهید مدنی، سیستم نظارتی با توجه به ویژگی های بدنه سد و وضعیت زمین شناسی



(الف)

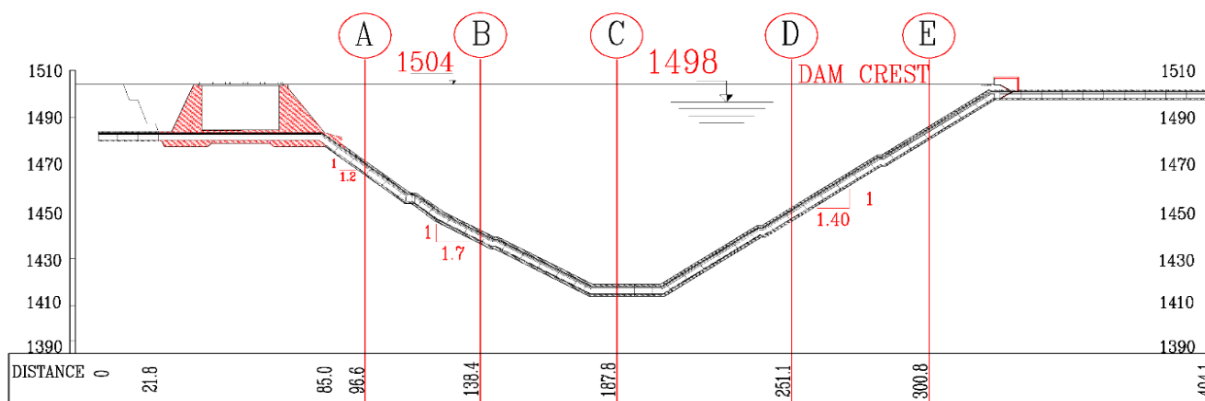


(ب)

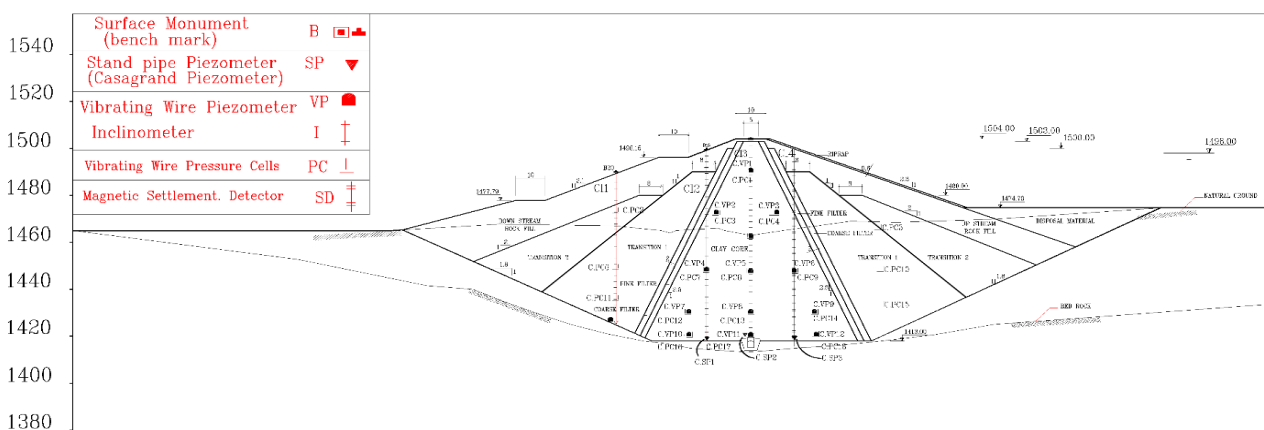
شکل ۱ سد شهید مدنی : (الف) نمای پلان، (ب) محورهای ابزارگذاری در پلان

جدول ۱ مشخصات فنی سد و مخزن شهید مدنی

مقدار	جزئیات بدنه سد
۹۱ متر	ارتفاع تاج سد از سنگ بستر
۳۹ متر	ارتفاع تاج سد از بستر رودخانه
۱۵۰۴ متر	تراز تاج سد
۱۴۹۸ متر	تراز رقوم نرمال
۲۷۸ متر	طول تاج سد
۱۰ متر	عرض تاج سد
۳۶۱ میلیون مترمکعب	حجم مخزن سد
۱/۷ میلیون مترمکعب	حجم مصالح بدنه سد
۱ به ۲/۳	شیب بالادست بدنه سد
۱ به ۲/۱	شیب پایین دست بدنه سد
۱۲/۳۳ کیلومترمربع	مساحت مخزن سد



(الف)



(ب)

شکل ۲ سد شهید مدنی: (الف) مقطع طولی بدنه با قرارگیری مقاطع ابزار، (ب) بزرگ‌ترین مقطع بدنه سد

استخراج شده است. پارامترهای مدل الاستو و پلاستیک برای شبیه سازی پی آبرفتی، سنگ بستر و مواد دیزپوزال از آزمایشگاه و آزمایش‌های میدانی استخراج شده است. مدل رفتاری موهر کولمب به عنوان سطح تسلیم برای شبیه سازی رفتار مکانیکی فونداسیون، مواد آبرفتی و دیزپوزال استفاده شد. در جدول (۲) پارامترهای هیدرولیکی مدل برای نواحی مختلف سد نشان داده شده است.

در این جدول پارامترهای γ_d (KN/m³), γ_{sat} (KN/m³), ϕ (deg), C (KPa), v و E (MPa) براساس مدل رفتاری موهر کولمب، به ترتیب وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص اشباع، ضریب نفوذپذیری، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی مصالح، نسبت پواسون و مدول الاستیسیته مصالح می باشند.

ده سال پس از اتمام ساخت پروژه، با استفاده از اطلاعات بیش از ۵۰۰ ابزار نصب شده در بدنه سد (ارتفاع ۹۱ متر در سطح ۱۵۰۴)، تمام اطلاعات شامل فشار منغذی هسته، میزان نشست قایم و تنش‌های ایجاد شده خوانده می شود. در مجموع ۱۲۰ سلول فشار کلی (PC)، ۶۲ پیزوالکتریک (VP)، ۲۷ پیزومتر (SP) casgrandeh، ۱۷ انحراف سنج (I)، ۲۷۵ نشست سنج (SD) در بدنه سد نصب شده است. ابزار دقیق بدنه سد در سال ۲۰۰۳ شروع به کار کرد و داده‌ها در طول ساخت به طور مداوم ثبت شد. اکثر ابزارها در هسته رس متمرکز شده‌اند [3]. شکل (۳) نمایی از محفظه و سیستم‌های کنترل مرکزی تجهیزات الکترونیکی نصب شده در بدنه و نحوه قرائت دستی تجهیزات مکانیکی در بدنه سد شهید مدنی را نشان می دهد.

خواص مصالح مورد استفاده در تحلیل عددی از آزمایش‌های مکانیک خاک بر روی مصالح ریز و درشت‌دانه



(الف)



(ب)

شکل ۳ سد شهید مدنی: (الف) نمای کنترل مرکزی تجهیزات الکترونیکی مونیتورینگ، (ب) نحوه خواندن دستی تجهیزات مکانیکی

جدول ۲ پارامترهای مقاومت بدنه، پی و مصالح سد

پارامترهای مصالح بدنه	γ_d (KN/ m ³)	γ_{sat} (KN/ m ³)	$K*10^{-6}$ (m/s)	ϕ (deg)	C (KPa)	(ν)	E (MPa)
هسته رسی	۱۹	۲۰	۰/۰۰۰۵	۲۸	۴۰	۰/۳	۲۰
فیلتر	۲۰	۲۱	۰/۰۰۰۱	۳۳	۰	۰/۲۵	۴۰
پوسته	۲۱	۲۲	۱۰۰۰	۴۴	۰	۰/۲۵	۷۰
ناحیه انتقالی	۲۰	۲۱	۰/۰۰۰۱	۳۸	۰	۰/۲۵	۵۰
مصالح دیزپوزال	۱۹/۲	۱۹/۸	۰/۰۰۰۰۰۱	۲۸	۲۰	۰/۳	۱۵
پی آبرفتی	۱۸/۵	۱۹/۵	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	۲۰	۲۰	۰/۳	۴۰
سنگ بستر	۲۱	۲۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	۲۸	۸۰	۰/۲۵	۲۰۰

مدل‌سازی و تحلیل عددی

تحلیل عددی سه‌بعدی سد شهید مدنی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Midas-GTS.2019V2.1 انجام شده است. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار تخصصی ژئوتکنیک و برای تحلیل سدهای خاکی - سنگ ریزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌سازی دقیق، تحلیل آسان و سرعت بالا از مزایای این نرم‌افزار است. مراحل اولیه کار در این برنامه ایجاد هندسه مدل سد با استفاده از شرایط مرزی است. در مدل‌سازی، برای بستر و بدنه سد، از مدول رفتاری موهرکولمب استفاده شد. شکل دره بر توزیع تنش در سد خاکی تأثیر می‌گذارد، در دره U شکل، شرایط کرنش صفحه یک ملاحظه منطقی است و تجزیه و تحلیل دوبعدی به نوعی رفتار مکانیکی سد را توضیح می‌دهد. برعکس، در دره ای V شکل، این فرض از واقعیت دور است و نیاز به مدل‌سازی سه‌بعدی از سد خاکی دارد. برخی از محققان اظهار داشته‌اند که مدل‌سازی دوبعدی یک سد خاکی به شرطی که نسبت طول به ارتفاع سد خاکی بیشتر از ۶ باشد منجر به نتایج مناسب می‌شود [16]. برای سد شهید مدنی، این نسبت حدود ۳/۱ (طول ۲۸۶ متر و ارتفاع ۹۱ متر) بود. در نتیجه برای رسیدن به نتایج دقیق سد شهید مدنی، یک مدل‌سازی سه‌بعدی مورد نیاز بود. بنابراین تحلیل‌های انجام شده در این نرم‌افزار، سه‌بعدی بوده و برای مدل‌سازی از شبکه‌های مثلثی استفاده شده است. زمان احداث سد کاملاً مطابق گزارش‌های دریافتی از دوران ساخت سد است. شبیه‌سازی عددی شامل سه مرحله می‌باشد. در مرحله اول برای محاسبه تنش‌های درجا، باید بستر رودخانه را قبل از ساخت سد مدل‌سازی کرد. در این مرحله، تنش‌های افقی با اعمال ضریب فشار جانبی در حالت سکون برآورد شد. در مرحله دوم قبل از

شروع ساخت سد، نیاز به مدل‌سازی حفاری ترانشه حفاری شده برای رسیدن به سنگ بستر بود. حفاری ترانشه‌ها در ۱۰ لایه در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. در مرحله سوم، ساخت سد از سنگ زیرین تا قله سد شامل دو مرحله است:

مرحله ۱. ساخت سد از سنگ بستر (۱۴۱۳ متر) تا سطح بستر رودخانه (۱۴۷۷ متر) که در ۱۰ لایه با ضخامت ۶/۴ متر در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد و از نظر فیزیکی حدود ۶ سال به طول انجامید. سطح آب زیرزمینی در محل سد تقریباً سطح بستر رودخانه بود. هنگامی که ارتفاع سد به ۳۷ متر از سنگ زیرین رسید، اجازه داده شد آب زیرزمینی به بدنه سد نفوذ کند. در این مرحله هسته سد بدون زهکشی یکپارچه (CU) فرض شد. به دلیل نفوذپذیری کم هسته رس، مواد رس به تدریج اشباع شد در حالی که سطح آب در پوسته و پی آبرفتی به دلیل نفوذپذیری بیشتر این مواد نسبت به هسته رس، ثابت ماند. پس از اشباع شدن هسته رسی و هنگامی که سطح خاکریزی به سطح بستر رودخانه رسید، حالت پایداری از تراوش پدیدار شد.

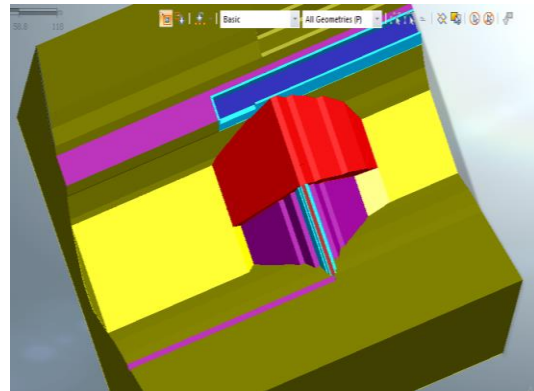
مرحله ۲. ساخت سد از سطح بستر رودخانه تا قله سد (۱۵۰۴ متر) که در پنج لایه شبیه‌سازی شده است. در این مرحله، عملیات ساخت و ساز حدود ۳ سال به طول انجامید و هسته رس بدون زهکشی (CU) فرض شد. هنگامی که سطح آب برای اولین بار به ۳۹ متر بالاتر از سنگ بستر رسید (۲۱ مه ۲۰۰۵)، تمام پی‌زومترها شروع به ثبت فشار منفذی در هسته سد کردند. زمان شروع ضبط داده‌ها و انجام تجزیه و تحلیل وابسته به زمان بود. عملیات تحکیم و تنش در بدنه سد ده سال پس از اتمام ساختمان بدنه سد در تحلیل عددی در نظر گرفته می‌شود. در آغاز مرحله دوم، سطح آب در هسته به حالت ثابتی رسید.

آنالیزها

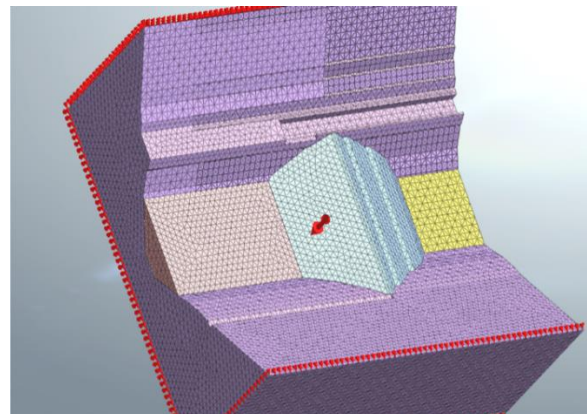
در این بخش، نتایج تحلیل عددی سد شهید مدنی شامل نشست‌ها، تنش‌های عمودی کل و فشار آب منفذی با داده‌های ثبت‌شده به دست آمده از ابزارها مقایسه می‌شود.

بررسی نتایج نشست‌های بدنه سد. نشست‌سنج‌های داخلی سد در سه گروه عمودی، افقی و حرکتی چرخشی طبقه‌بندی می‌شوند. حرکات عمودی، نشست‌ها را از نظر وزن مصالح، فشردگی و تثبیت بدنه سد نشان می‌دهد. حرکات افقی، عمدتاً به حرکات‌های بالادستی که در زمان اولین آبرگیری در مخزن سد رخ می‌دهد اشاره دارد که به دلیل کاهش سریع تر تنش مؤثر در مصالح بالادست نسبت به سایر قسمت‌های سد است. حرکت پایین دست به دلیل فشار افقی آب مخزن سد است. علاوه بر این، حرکات چرخشی که در دامنه‌های بالادست و پایین دست ظاهر می‌شوند به دلیل مقاومت برشی کمتر مواد در پی یا بدنه سد است. استفاده از نقاط نقشه برداری، شیب‌سنج‌ها (لوله‌های استقرار) و نشست‌سنج قائم یک روش معمول برای اندازه‌گیری این تغییر شکل‌ها در سدهای خاکی است. برای بررسی جابه‌جایی عمودی بدنه سد، از یک سری صفحات مغناطیسی که در فواصل مختلف داخل لوله نشست‌سنج نصب شده‌اند استفاده شده است. پایین ترین صفحه، که صفحه پایه است، بر روی پایه سنگی نصب شده است که کمترین جابه‌جایی در آن رخ می‌دهد و این نقطه تقریباً ثابت است. پایداری دامنه‌های خاکی با ارزیابی تغییر شکل قسمت‌های مختلف بدنه امکان پذیر است. به منظور ارزیابی تغییر شکل‌های عمودی در سد شهید مدنی، از ۱۷ انحراف‌سنج (I) و ۲۷۵ نشست‌سنج (SD) (صفحات استقرار مغناطیسی) در سطوح مختلف بدنه سد استفاده شده است. در تحقیق حاضر، مقدار حداکثر تغییر شکل عمودی حاصل از نتایج ابزار نشست‌سنج و تحلیل‌های عددی در مقاطع سد A, B, C, D و E سد شهید مدنی در جدول (۳) نشان داده شده است. مقدار نشست‌های عمودی به دست آمده از داده‌های ثبت شده توسط ابزار دقیق بیشتر از مقادیر به دست آمده از تحلیل‌های عددی است. به طور کلی تناسب خوبی بین این اعداد وجود دارد.

در تحلیل تنش اولیه، جابه‌جایی اولیه تکیه‌گاه صفر در نظر گرفته می‌شود. براساس تجزیه و تحلیل حساسیت، اندازه مش ۱ در نظر گرفته می‌شود. ابعاد و مرزهای افقی و عمودی برای ایجاد هندسه مدل براساس تحلیل حساسیت در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۴) مدل سازی و مش بندی سه بعدی نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴ مدل عددی سد شهید مدنی: (الف) مدل سه بعدی، (ب) مدل شبکه سه بعدی

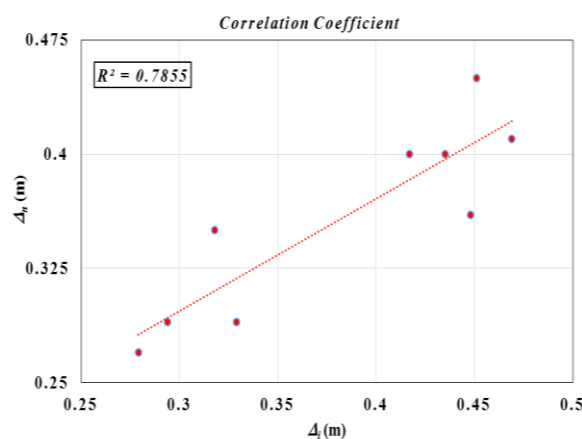
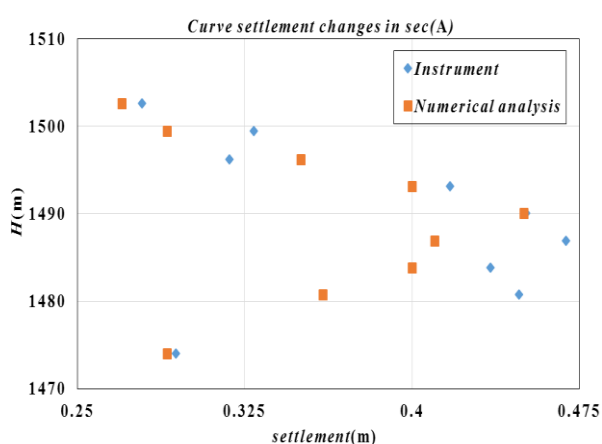
تحلیل عددی شامل تجزیه و تحلیل تنش، جابه‌جایی و فشار منفذی برای ارزیابی احتمال وقوع شکست هیدرولیکی بدنه سد است. در این بخش، نتایج تحلیل عددی سد شهید مدنی شامل نشست‌ها، تنش‌های عمودی کل، فشار آب منفذی و نسبت قوس با داده‌های ثبت شده به دست آمده از ابزارها مقایسه می‌شود.

وقوع چندین زمین‌لرزه طبیعی در منطقه آذربایجان طی ده سال گذشته است. در ادامه به ترتیب منحنی‌های تغییرات نشست در ارتفاع بدنه سد و ضریب همبستگی بین داده‌های حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی برای هر پنج مقطع اصلی بدنه سد در شکل‌های (۵) نشان داده شده‌است.

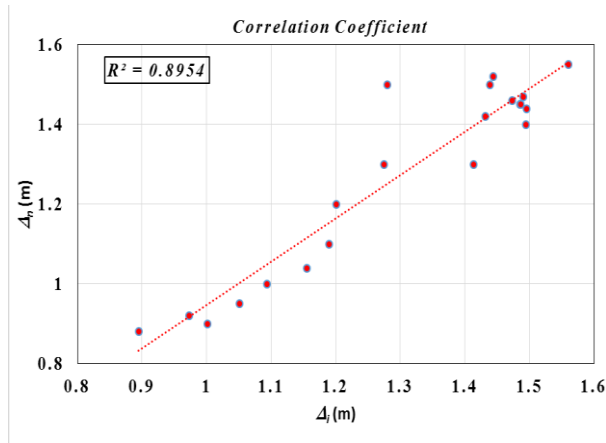
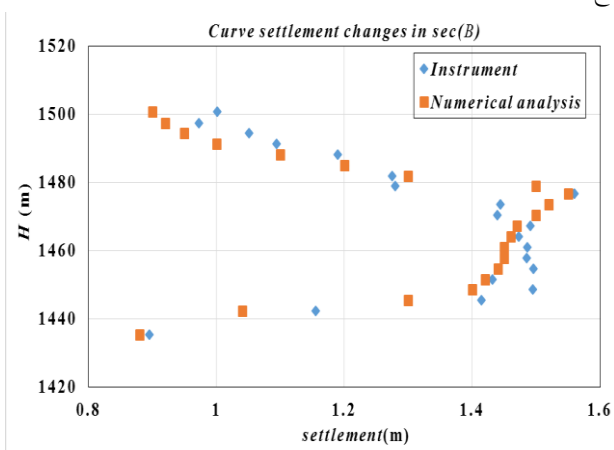
حداکثر میزان نشست عمودی پس از ده سال از پایان ساخت بدنه سد شهید مدنی به ترتیب نتایج تحلیل عددی و ابزار نصب‌شده در بدنه سد در مقطع عرضی (C)، 1/79 و 1/90 (متر) است. دلیل این‌که میزان نشست عمودی حاصل از نتایج ابزار دقیق در همه مقاطع بیشتر از میزان تحلیل عددی است، ناشی از

جدول ۳ حداکثر نشست عمودی حاصل از تجزیه و تحلیل عددی و ابزار در مقاطع بدنه سد

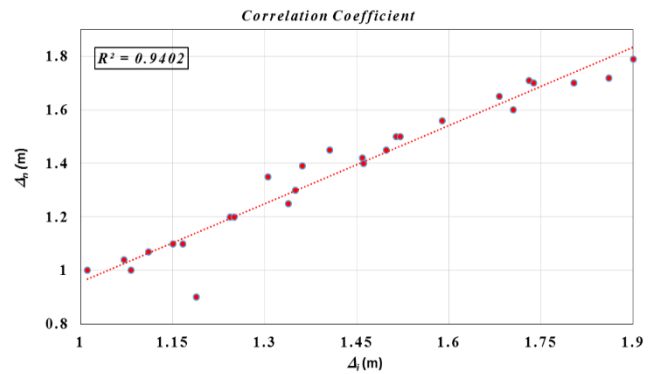
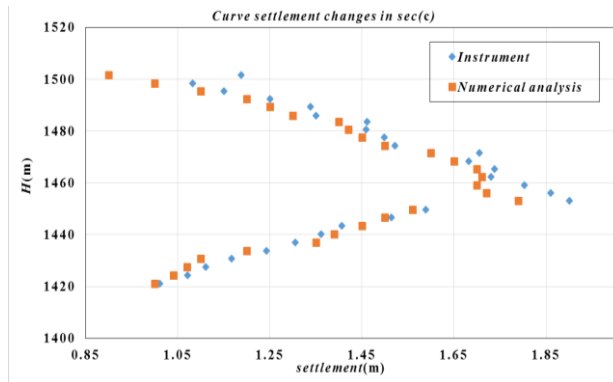
نام مقطع عرضی	ماکزیمم مقدار نشست حاصل از آنالیز (متر)	ماکزیمم مقدار نشست حاصل از ابزار دقیق (متر)
A	۰/۴۵	۰/۴۶۹
B	۱/۵۵	۱/۵۶
C	۱/۷۹	۱/۹۰
D	۱/۳	۱/۳۳
E	۱/۱	۱/۱۷



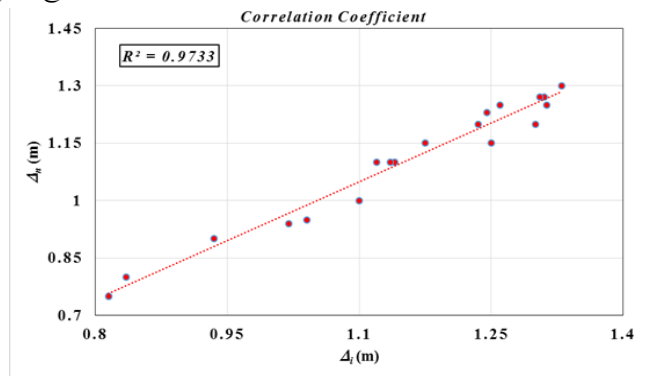
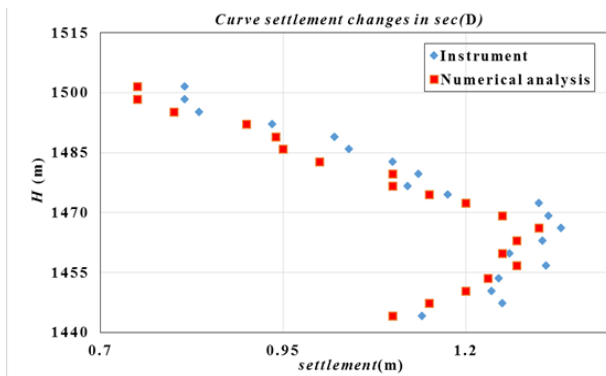
الف) مقطع A



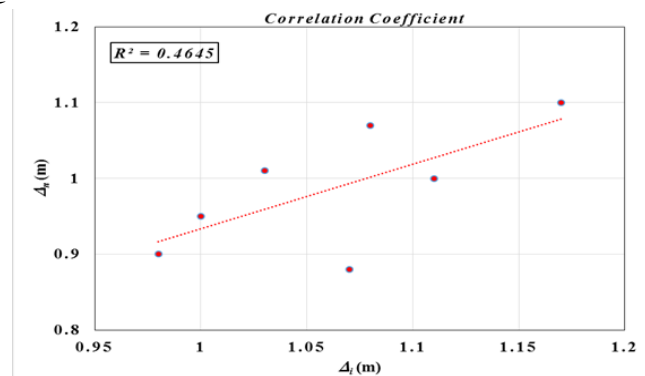
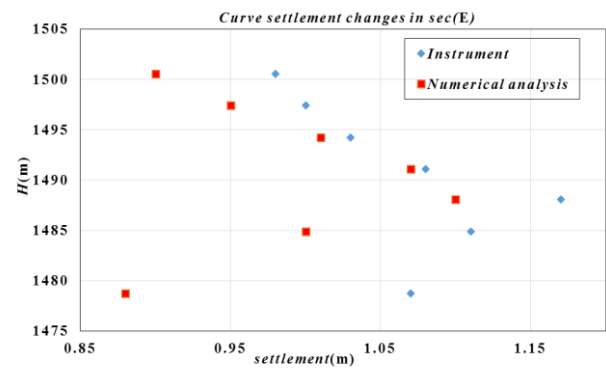
ب) مقطع B



(ج) مقطع C



(د) مقطع D



(ی) مقطع E

شکل ۵ مقایسه منحنی‌های نشست و ضریب همبستگی در مقاطع بدنه سد

مختلف بدنه سدهای خاکی- سنگریزه‌ای به بررسی تغییرات میزان تنش کل در نقاط مختلف بدنه سد می‌پردازد. در سد شهید مدنی ۱۲۰ سلول فشار در قسمت‌های مختلف بدنه تعبیه شده‌اند که برای تعیین میزان تنش کل نقاط مختلف بدنه سد استفاده می‌شوند. این سلول‌ها در خوشه‌های ۳ تایی قرار دارند و تنش‌ها را در ۳ جهت (دو جهت افقی، یک جهت عمودی) اندازه‌گیری می‌کنند. مقدار تنش‌های عمودی به دست آمده توسط سلول‌های فشار و تحلیل عددی در هسته سد به ترتیب در پنج مقطع سد در جدول (۴) آورده شده است.

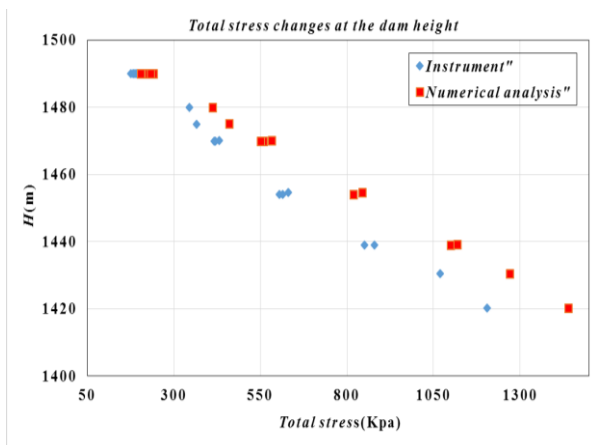
در منحنی‌های فوق H نشان‌دهنده ارتفاع قرارگیری صفحات نشست‌سنج‌ها در تراز بدنه سد و Settlement نشان دهنده مقدار نشست بدنه سد در جهت قائم است. ضریب همبستگی بین داده‌های نشست حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی برای پنج مقطع ابزارگذاری شده بیش از ۸/۸۳ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین داده‌های نشست می‌باشد.

تنش قائم و نسبت قوس‌زدگی. سلول‌های فشار در ترازهای

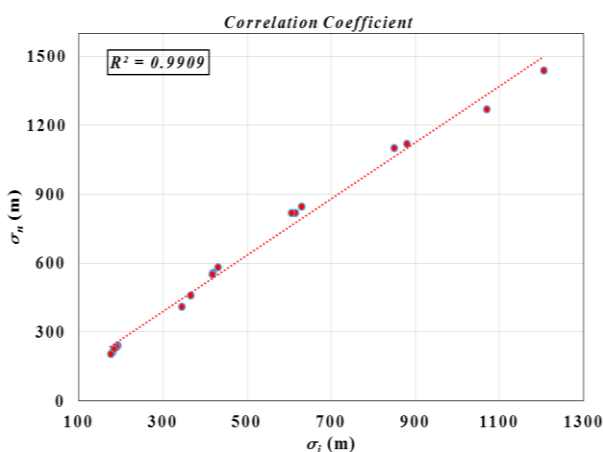
جدول ۴ مقایسه تنش‌های قائم بدنه سد ده سال پس از پایان ساخت در مقطع A، B، C، D و E

شماره سلول‌ها	محل نصب	فاصله از محور (متر)	تراز نصب	ابزار دقیق		آنالیز عددی	
				تنش کل قائم	A _F	تنش کل قائم	A _F
APC.1	مرکز هسته	۰/۷۴	۱۴۹۰/۰۷	۱۸۱	۰/۶۸	۲۱۳	۰/۸
APC.2	پایین دست هسته	-۶/۶۸۵	۱۴۷۵/۳۵	۳۶۵	۰/۶۷	۴۶۰	۰/۸۶
APC.3	بالادست هسته	۶/۷۵۴	۱۴۷۵/۹	۳۵۱	۰/۶۵	۴۴۵	۰/۸۳
BPC.1	مرکز هسته	۰/۰۷۵	۱۴۹۰/۱	۱۸۹	۰/۷۳	۲۳۴	۰/۸۸
BPC.3	دست هسته پایین	-۹/۵۴	۱۴۶۹/۷۹	۴۱۹	۰/۶۴	۵۵۹	۰/۸۶
BPC.4	بالادست هسته	۱۰/۳۰	۱۴۶۹/۷۹	۴۱۳	۰/۶۳	۵۵۲	۰/۸۵
BPC.7	دست هسته پایین	-۱۷/۰۶	۱۴۵۴/۳۳	۵۶۵	۰/۶	۷۹۰	۰/۸۳
BPC.8	مرکز هسته	۰/۳۶	۱۴۵۴/۴۵	۶۱۵	۰/۶۵	۸۲۰	۰/۸۷
BPC.9	بالادست هسته	۱۸/۰۲	۱۴۵۴/۴۸	۵۸۰	۰/۶۱	۸۰۰	۰/۸۵
BPC.11	دست هسته پایین	-۱۶/۲	۱۴۳۹/۲۰۵	۸۰۵	۰/۶۵	۱۰۹۵	۰/۸۹
BPC.12	مرکز هسته	۰/۰۸	۱۴۳۹/۱۶۴	۸۸۰	۰/۷۱	۱۱۲۰	۰/۹۱
BPC.13	بالادست هسته	۱۶/۸۱	۱۴۳۹/۱۶۱	۸۴۵	۰/۶۸	۱۱۰۰	۰/۸۹
CPC.1	مرکز هسته	۰/۵	۱۴۹۰/۱۱	۱۹۲/۴	۰/۷۳	۲۴۰	۰/۹
CPC.3	دست هسته پایین	-۱۰/۵۴	۱۴۷۰/۰۳۶	۴۳۰	۰/۶۶	۵۸۳	۰/۹
CPC.4	بالادست هسته	۱۰/۲۴	۱۴۶۹/۹۳۵	۴۱۹/۳	۰/۶۵	۵۷۹	۰/۸۹
CPC.7	دست هسته پایین	-۱۶/۹۲	۱۴۵۴/۶۴۹	۵۷۵	۰/۶۱	۸۰۵	۰/۸۵
CPC.8	مرکز هسته	۰/۴۹۲	۱۴۵۴/۶۶	۶۳۰/۱۸	۰/۶۷	۸۴۵	۰/۹
CPC.9	بالادست هسته	۱۷/۹۵	۱۴۵۴/۶۲۹	۵۹۱/۶	۰/۶۳	۸۱۲	۰/۸۶
CPC.12	دست هسته پایین	-۲۰/۰۲	۱۴۳۰/۹۰۹	۱۰۰۸/۳	۰/۷۲	۱۲۵۰	۰/۹
CPC.13	مرکز هسته	۰	۱۴۳۱	---	---	۱۲۷۰	۰/۹۱
CPC.14	بالادست هسته	۲۰/۳	۱۴۳۱/۳۲۱	۱۰۷۰/۵	۰/۷۷	۱۲۵۵	۰/۹۰
CPC.16	دست هسته پایین	-۲۰/۴۳	۱۴۲۰/۲۹۴	۱۲۰۵	۰/۷۵	۱۴۲۵	۰/۸۹
CPC.17	مرکز هسته	۱/۲۱	۱۴۲۰/۵۵	۱۱۵۰	۰/۷۲	۱۴۴۰	۰/۹۰
CPC.18	بالادست هسته	۱۹/۸۴	۱۴۲۰/۲۹۶	۱۱۶۰	۰/۷۲	۱۴۲۰	۰/۸۹
DPC.1	مرکز هسته	۰/۴	۱۴۹۰/۱۱	۱۸۴	۰/۶۹	۲۲۶	۰/۸۵
DPC.3	دست هسته پایین	-۱۰/۶۹	۱۴۷۰/۱۱	۴۱۷	۰/۶۵	۵۵۱	۰/۸۵
DPC.4	بالادست هسته	۱۰/۷۷	۱۴۷۰/۱۵۹	۴۰۸	۰/۶۳	۵۴۴	۰/۸۳
DPC.9	دست هسته پایین	-۱۷/۹۱	۱۴۵۴/۴۲۲	۵۶۰	۰/۶	۷۸۵	۰/۸۳
DPC.10	مرکز هسته	۰/۳۵۲	۱۴۵۴/۴۸۸	۶۰۵	۰/۶۴	۸۲۰	۰/۸۷
DPC.11	بالادست هسته	۱۷/۹۶	۱۴۵۴/۱۷	۵۷۵	۰/۶	۷۹۰	۰/۸۳
DPC.6	دست هسته پایین	-۱۷/۱۵	۱۴۳۹/۱۵۸	۷۹۰	۰/۶۴	۱۰۸۰	۰/۸۷
DPC.7	مرکز هسته	۰/۱۸	۱۴۳۹/۰۴۴	۸۵۰	۰/۶۸	۱۱۰۰	۰/۸۹
DPC.8	بالادست هسته	۱۷/۰۷	۱۴۳۹/۱۲۹	۸۲۲	۰/۶۶	۱۰۷۰	۰/۸۷
EPC.1	مرکز هسته	۰/۰۴۹	۱۴۸۹/۹۶	۱۷۵	۰/۶۵	۲۰۴	۰/۷۶
EPC.2	دست هسته پایین	-۶/۸۸	۱۴۷۹/۸۴۶	۳۴۵	۰/۷۵	۴۱۱	۰/۸۹
EPC.3	بالادست هسته	۶/۷۳	۱۴۷۹/۹۰۷	۳۲۱	۰/۷	۴۰۴	۰/۸۶

بیشتر باشد (نزدیک به یک)، وقوع پدیده قوس زدگی در هسته کمتر و احتمال شکست هیدرولیکی کمتر است [18]. در جداول (۴) تفاوت معناداری بین نسبت ضریب قوس زدگی به دست آمده از داده‌های ابزار و محاسبه شده توسط تحلیل عددی دیده می‌شود. این به تفاوت تنش‌های عمودی به دست آمده توسط سلول‌های فشار و تحلیل عددی اشاره دارد. علاوه بر این، ماکزیمم نسبت قوس در سد شهید مدنی حاصل از قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۹۱ بود که هر دو کمتر از یک است، بنابراین احتمال وقوع قوس در هسته وجود ندارد. این امر نشان می‌دهد که سد از نظر شکست هیدرولیکی در محدوده امن قرار دارد. در شکل (۶) به ترتیب منحنی‌های تغییرات تنش کل در ارتفاع بدنه سد و ضریب همبستگی بین داده‌های حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی بدنه سد ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۶ (الف) تغییرات تنش کل عمودی، (ب) ضریب همبستگی منحنی

PC: Vibrating Wire Pressure Cell نشان‌دهنده

سلول‌های فشار است که در پنج مقطع A, B, C, D و E نصب شده‌اند. همان‌طور که در نتایج نشان داده شده است مقدار تنش‌های عمودی کل در سلول‌های فشار، کمتر از مقدار به دست آمده از تحلیل عددی است. تفاوت اندکی بین تنش‌های عمودی مشاهده شده و محاسبه شده وجود دارد. دلایلی هم‌چون کالیبراسیون برای تنش اعمالی و دما یک کار دشوار و گران است، به طوری که عدم کالیبراسیون و تخریب ابزارها ممکن است فرض شود هم‌چنین برای جلوگیری از آسیب به سلول‌های تحت فشار، خاک اطراف سلول‌ها با تراکم کمتری در مقایسه با سایر قسمت‌های هسته فشرده شد. بنابراین، قوس موضعی در محل ابزارها منجر به تغییر مدول کشش و چگالی در اطراف سلول‌های فشار می‌شود [17]. ماکزیمم مقدار تنش کل حاصل از قرائت ابزار سلول‌های فشاری و تحلیل عددی در محل اتصال هسته به پی، به ترتیب ۱۲۰۵ و ۱۴۴۰ کیلوپاسکال است. به دلیل گذشت زمان و عمل تحکیم مصالح هسته تناسب بسیار خوبی بین داده‌ها وجود دارد. تنش عمودی کل، عامل اصلی جلوگیری از ایجاد ترک در هسته است. در زمان پایان ساخت و اولین آبیگری مخزن، کاهش تنش عمودی در اثر پدیده قوس می‌تواند ترک‌های افقی ایجاد کند زیرا فشار آب بیشتر از مقدار تنش عمودی است. این ترک‌ها که هیدرولیکی خوانده می‌شوند، از بالادست به پایین دست سوراخ ایجاد می‌کنند. هم‌چنین، آسیب جدی به بدنه سد وارد می‌کنند و احتمالاً منجر به خرابی سد می‌شوند. مصالح استفاده شده در پوسته سدهای سنگ‌ریزه‌ای سخت‌تر از مصالح استفاده شده در هسته سدها هستند. تفاوت مدول الاستیسیته بین این دو نوع مواد، گرایش‌های مختلفی را برای نشست ایجاد کرده است. علاوه بر این، اصطکاک بین مواد هسته و پوسته باعث انتقال تنش از هسته به پوسته می‌شود که می‌تواند یک منطقه کم‌تنش در هسته ایجاد کند. به این پدیده، قوس زدگی در سدهای خاکی می‌گویند. معادله (۱) نسبت قوس زدگی را ارائه می‌دهد [18].

$$A_r = \left(\frac{\sigma_v}{\gamma * h} \right) \quad (1)$$

σ_v : رابطه تنش قائم

γ : وزن مخصوص

h : ارتفاع خاک

برای جلوگیری از ایجاد قوس در هسته، نسبت قوس باید

در محل سلول‌های فشار در هسته کمتر از ۱ باشد. هرچه A_r

h : ضخامت لایه خاک بالاتر از نقطه مورد نظر

σ : تنش عمودی کل در نقطه مورد نظر

ثبات نسبی r_u در طول و انتهای ساخت، سرعت مناسب ساخت را نشان می‌دهد و بنابراین احتمال، شکست هیدرولیکی بدنه سد را نتیجه می‌دهد. علاوه بر این، مقدار پایین R_{II} نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالا در برابر شکست هیدرولیکی به دلیل پدیده قوس‌دهی است. ارزش R_{II} به‌طور کلی بیش از r_u در هسته است. در جدول (۵) تغییرات نسبت فشار منفذی به ترتیب در مقاطع 'B' و 'C' و 'D' براساس قرائت پیزومترهای الکتریکی (VP) و پیزومترهای کاساگرانده (SP) و نتایج حاصل از تحلیل عددی آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که r_u مشاهده شده و محاسبه شده در پایان ساخت، سازگاری خوبی با هم دارند. تفاوت بین R_{II} مشاهده شده و محاسبه شده به دلیل تفاوت بین تنش‌های عمودی مشاهده شده و محاسبه شده است. حداکثر R_{II} حاصل از تحلیل عددی و ابزار دقیق نصب شده در هسته به ترتیب $0/35$ و $0/47$ می‌باشد. طبق گزارش فنی سد شهید مدنی [19]، R_{II} پیش‌بینی شده در مرحله طراحی $0/5$ برآورد شده که از نظر مقاومت در برابر شکست هیدرولیکی ایمنی سد تأمین شده است. در شکل (۷) به ترتیب منحنی‌های تغییرات فشار منفذی در ارتفاع بدنه سد و ضریب همبستگی بین داده‌های حاصل از نتایج قرائت پیزومترهای الکتریکی و تحلیل‌های عددی ارائه شده است.

ماکزیمم فشار منفذی هسته رسی براساس تحلیل عددی و قرائت پیزومترهای نصب شده در بدنه سد به ترتیب 450 و 420 پاسکال است که در پایین‌ترین تراز سطح هسته رخ داده است. به دلیل گذشت زمان و عمل تحکیم مصالح هسته تناسب بسیار خوبی بین داده‌ها وجود دارد. ضریب همبستگی بین داده‌های فشار منفذی حاصل از نتایج پیزومترها و تحلیل‌های عددی، $67/31$ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین داده‌های فشار منفذی می‌باشد. تفاوت ضریب همبستگی و تفاوت‌هایی بین فشار منفذی ثبت شده توسط ابزارها و تحلیل عددی می‌تواند به علت نسبت اشباع و نفوذپذیری در طول مدل‌سازی عددی در هسته ثابت در نظر گرفته شود، درحالی که در حقیقت، این دو پارامتر به علت ارتفاع سد تغییر می‌کنند.

ضریب همبستگی بین داده‌های تنش کل حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، $99/09$ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی بسیار مناسب بین داده‌های تنش کل می‌باشد. باتوجه به تحلیل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که خواص مصالح از دقت مناسبی برخوردار است و منشأ خطا در تنش‌های محاسبه شده نیست.

تغییرات فشار منفذی. فشار منفذی یکی از مسائل مهم در مهندسی مکانیک خاک است. تغییرات فشار منفذی در سدهای خاکی به عواملی مانند میزان فشار سربار، سرعت خاک‌ریزی، شرایط زهکشی، نفوذپذیری، میزان اشباع و تراکم خاک بستگی دارد. افزایش فشار منفذی باعث کاهش مقاومت برشی خاک و به خطر افتادن پایداری سد می‌شود. بنابراین با کنترل سرعت خاک‌ریزی در زمان ساخت، می‌توان سرعت افزایش فشار منفذی را کنترل کرد. در سد شهید مدنی از پیزومترهای الکتریکی و کاساگرانده برای تعیین میزان فشار منفذی در تراز مختلف استفاده شده است. در سدهای خاکی و سنگی، به دلیل تغییرات تراکم مصالح هسته و فونداسیون، متشکل از مواد ریزدانه با نفوذپذیری کم و بار ناشی از آن، فشار اضافی آب ایجاد می‌شود. این فشار منفذی، به‌ویژه در هسته سد که نفوذپذیری بسیار کمی دارد و زه کشی آن کم است، در طول ساخت سد منجر به افزایش فشار منفذی می‌گردد که ممکن است با کاهش تنش مؤثر منجر به گسیختگی برشی ناحیه هسته شود. در این تحقیق، تغییرات فشار منفذی ناشی در پنج محور اصلی بدنه سد مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. با نتایج پیزومترهای نصب شده در بدنه سد، به دلیل عرض زیاد هسته رسی، نفوذپذیری کم مواد ریزدانه و تراکم مناسب مصالح هسته، فشار منفذی اضافی بدنه سد ایجاد شده است. ماکزیمم فشار منفذی ایجاد شده طی ده سال پس از پایان ساخت در سطوح پایین‌تر هسته در محل اتصال هسته به فونداسیون مشاهده شده است. ضرایب فشار منفذی از معادلات (۲) و (۳) قابل محاسبه است:

$$r_u = \left(\frac{u}{\gamma * h} \right) \quad (2)$$

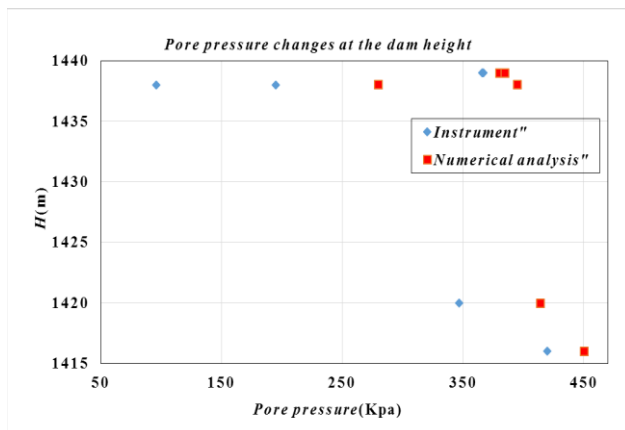
$$R_{II} = \left(\frac{u}{\sigma_v} \right) \quad (3)$$

u : فشار آب منفذی در نقطه مورد نظر

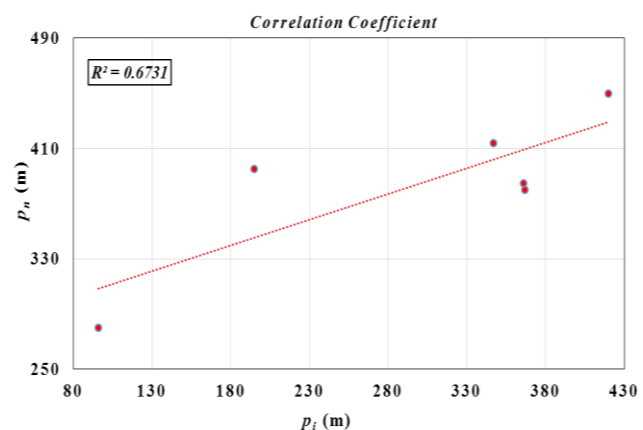
γ : وزن واحد مخصوص

جدول ۵ مقایسه نسبت فشار منفذی پیژومترهای ارتعاشی و کاساگرانده با نتایج تحلیل عددی ده سال پس از پایان ساخت در مقطع B، C و D

شماره پیژومتر	محل نصب	فاصله از محور (متر)	تراز نصب	فشار منفذی		r_u		R_u	
				ابزار دقیق	آنالیز عددی	ابزار دقیق	آنالیز عددی	ابزار دقیق	آنالیز عددی
BVP.7	پایین دست هسته	-۱۷/۳۶	۱۴۳۹/۱۸	۳۵۸/۶	۳۷۵	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۴۴	۰/۳۴
BVP.8	مرکز هسته	۰/۴۸	۱۴۳۹/۱۶	۳۶۰/۲	۳۸۰	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۴	۰/۳۳
BVP.9	بالا دست هسته	۱۶/۴۹	۱۴۳۹/۲۲	۳۶۶/۵	۳۸۵	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۴۳	۰/۳۵
BSP.1	پایین دست هسته	-۱۵	۱۴۳۸	۱۷۵	۳۸۰	۰/۱۳	۰/۲۸	-	۰/۳۴
BSP.2	مرکز هسته	-۳/۱۹	۱۴۳۸	۱۶۱	۳۸۳	۰/۱۲	۰/۲۸	-	۰/۳۳
BSP.3	بالا دست هسته	۱۳/۳۸	۱۴۳۷	۱۹۵	۳۹۵	۰/۱۴	۰/۲۹	-	۰/۳۵
CVP.10	پایین دست هسته	-۲۰/۶	۱۴۲۰/۵۲	۳۴۰	۴۰۲	۰/۲	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۸۲
CVP.11	مرکز هسته	۰/۴۲۲	۱۴۲۰/۵۸	۳۲۸	۳۹۶	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۲۷
CVP.12	بالا دست هسته	۲۰/۲۵	۱۴۲۰/۲۹	۳۴۷	۴۱۴	۰/۲	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۲۹
CSP.1	پایین دست هسته	-۱۶/۲۴	۱۴۱۶/۷	۴۰۳	۴۳۸	۰/۲۲	۰/۲۵	-	۰/۲۹
CSP.2	مرکز هسته	-۳/۸۰	۱۴۱۶/۷	۳۹۲	۴۲۵	۰/۲۲	۰/۲۴	-	۰/۲۸
CSP.3	بالا دست هسته	۱۵/۹	۱۴۱۶/۷	۴۲۰	۴۵۰	۰/۲۳	۰/۲۵	-	۰/۳
DVP.4	پایین دست هسته	-۱۶/۴۲	۱۴۳۹/۱۴	۳۷۷/۷	۳۵۵	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۴۷	۰/۳۲
DVP.5	مرکز هسته	۰/۱۲	۱۴۳۹/۰۲	۳۵۲	۳۶۳	۰/۲۶	۰/۲۷۵	۰/۴	۰/۳۳
DVP.6	بالا دست هسته	۱۷/۱	۱۴۳۹/۱	۳۶۱/۱	۳۸۰	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۴۳	۰/۳۵
DSP.1	پایین دست هسته	-۱۴/۹۱	۱۴۳۸	۹۶	۳۵۸	۰/۰۷	۰/۲۷	-	۰/۳۳
DSP.2	مرکز هسته	-۲/۹۲	۱۴۳۹	۸۶	۳۶۳	۰/۰۶	۰/۲۷۵	۰/۱	۰/۳۳
DSP.3	بالا دست هسته	۱۴/۸۵	۱۴۳۹	۸۶	۳۸۰	۰/۰۶	۰/۲۸	۰/۱	۰/۳۵



(الف)



(ب)

شکل ۷ (الف) تغییرات فشار منفذی، (ب) ضریب همبستگی منحنی

نتیجه گیری

پایش نتایج انجام شده است. با توجه به قرائت ابزارهای نصب شده و تحلیل‌های عددی سه‌بعدی بدنه و تکیه‌گاه سد، نتایج به دست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

در تحقیق حاضر، ده سال پس از اتمام ساخت بدنه سد شهید مدنی، تحلیل‌های عددی واقعی بدنه سد همزمان با ارزیابی و

ساخت در منطقه‌ای امن قرار دارد.

۳. در سد شهید مدنی به دلیل گذشت ده سال از پایان ساخت و هم‌چنین وجود سطح بالای آب زیرزمینی در منطقه در اثر سطح آب رودخانه و هم‌چنین عرض وسیع هسته، فشار منفذی ایجاد شده‌است. ماکزیمم فشار منفذی ناشی از قرائت پیزومترهای نصب شده در هسته و تحلیل عددی به ترتیب ۴۲۰ و ۴۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد. ضریب همبستگی بین داده‌های فشار منفذی حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، ۶۷/۳۱ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین داده‌های تنش کل می‌باشد. به منظور جلوگیری از افزایش فشار منفذی در حین عملیات آبیگری و جلوگیری از وقوع خرابی هیدرولیکی در بدنه سد، عملیات آبیگری مخزن سد باید به صورت کنترل شده انجام گردد. مقادیر فشار منفذی به دست آمده از تحلیل عددی و پیزومترها در پایان ساخت، سازگاری خوبی با هم داشتند. تفاوت بین R_{II} مشاهده شده و محاسبه شده به دلیل تفاوت بین تنش‌های عمودی مشاهده شده و محاسبه شده بودند. حداکثر R_{II} محاسبه شده و ثبت شده توسط ابزارها در هسته سد به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۴۷ می‌باشد، R_{II} پیش‌بینی شده در مرحله طراحی ۰/۵ بود، بدین صورت استحکام سد در برابر شکست هیدرولیکی تأمین می‌گردد.

۱. ده سال پس از اتمام ساخت بدنه سد، میزان نشست عمودی براساس قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی به ترتیب ۱۹۰ و ۱۷۹ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده‌است. میزان نشست عمودی حاصل از نتایج ابزار دقیق در همه مقاطع بیشتر از میزان تحلیل عددی است، که این مسئله ناشی از وقوع چندین زمین‌لرزه طبیعی در منطقه آذربایجان طی ده سال گذشته است. ضریب همبستگی بین داده‌های نشست حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی برای پنج مقطع ابزارگذاری شده ۸۳/۸ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین داده‌های نشست می‌باشد.

۲. ده سال پس از ساخت بدنه سد، حداکثر تنش عمودی کل ناشی از قرائت ابزارهای سلول فشاری و تحلیل عددی در بدنه سد شهید مدنی در محل اتصال هسته به ترتیب ۱۲۰۵ و ۱۴۴۰ کیلوپاسکال به دست آمده‌است که نشان‌دهنده تناسب بین دو مقدار فوق است. ضریب همبستگی بین داده‌های تنش کل حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، ۹۹/۰۹ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی بسیار مناسب بین داده‌های تنش کل می‌باشد. نسبت قوس در سد شهید مدنی بین ۰/۶ تا ۰/۷۷ می‌باشد که کمتر از مقدار ۱ می‌باشد بنابراین، سد از نظر خرابی هیدرولیکی به دلیل قوس زدگی در پایان

مراجع

- Javanmard, M., Amiri, F., Safavi, S. M., "Instrumentation Readings Versus Numerical Analysis of Taham Dam", *International Journal of Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 28-35, (2019).
- Hosseini, S., Etemadifar, M., Aghamolaie, I., "Monitoring of Masjed Soleyman Dam Based on Instrumentation Data", *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 4, No. 5, pp. 78-99, (2017).
- Derakhshandi, M., Pourbagherian, H., Baziari, M., Shariatmadari, N., Sadeghpour, A., "Numerical Analysis and Monitoring of a Rock Fill Dam at the End of Construction", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 175-199, (2014).
- Yu, Y., Zhang, B., Yuan, H., "An Intelligent Displacement Back-Analysis Method for Earth-Rockfill Dams", *Computers and Geotechnics*, Vol. 34, pp. 423-434, (2007).
- Komasi, M., Mazaheri, A. R., Beiranvand, B., "Numerical Analysis of the Arching Effect of Ayoshan Dam in the First Dewatering Period and Its Comparison with Accurate Instrument Results", *Journal of Water and Soil Conservation Research*, Vol. 26, No. 6, pp. 79-97, (2019).
- Bharti, M. K., Sharma, M., Nazrul, Islam, "Study on the Dam & Reservoir, and Analysis of Dam Failures", *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 07, No. 05, pp. 303-317, (2020).

7. Zhenyu, W., Chen, C., Xiang, L., Liang, P., Limin, Z., "Discussion on the Allowable Safety Factor of Slope Stability for High Rock Fill Dams in China", *Journal of Elsevier Engineering Geology*, Vol. 272, pp. 220–235, (2020).
8. Soroush, A., Aghaei, Araei A., "Analysis of Behaviour of a High Rockfill Dam", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Geotechnical Engineering ICE Virtual Library*, Vol. 159, No. 1, pp. 49-59, (2006).
9. Pramthawee, P., Jongpradist, P., Kongkitkul, W., "Evaluation of Hardening Soil Model on Numerical Simulation of Behaviors of High Rockfill Dams", *Songklanakar Journal. Sci. Technol*, Vol. 33 No.3, pp. 325-334, (2011).
Mazaheri, A. r., Alipour, R., Shokri Derivand, B., "Study the Monitoring and Numerical Analyses of Rock fill Dam (Case Study of Marvak Dam in Lorestan, Iran)", *Civil Infrastructure Researches*, Vol. 5, No.2, pp. 153-164, (2020).
10. Rashidi, M., Mohsen Haeri, S. M., "Evaluation of Behaviors of Earth and Rockfill Dams during Construction and Initial Impounding Using Instrumentation Data and Numerical Modeling", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol 9, No. 4, pp. 709–725, (2016).
11. Komasi, M., Beiranvand, B., "Evaluation of Pore Water Pressure Foundation and Core of Sivand Dam after the First Dewatering Period in Comparison with the Actual Instrument Results", *Journal of Iranian Dam and hydroelectric power plant*, Vol.6, No, 21, pp. 66-73, (2019).
12. Ghanbari, A. and Shams Rad, S., "Development of an Empirical Criterion for Predicting the Hydraulic Fracturing in the Core of Earth Dams", *Acta Geotechnica*. pp. 1-12, (2013).
13. Ghods-Niroo consultant engineers Co, "Technical Report on the Studies of the Second Phase of Shahid Madani Dam", Tehran, (2002).
14. Mauriya Kumar, V., "Geotechnical Instrumentation in Earth and Rock-Fill Dams", *Indian Geotechnical Conference*, Vol. 10, pp.1027-1030, (2010).
15. Lefebvre, G., Duncan, J., Wilson, E., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Dams", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 99, No. SM7, pp. 495-507, (1973).
16. Dunncliff, J., Green, G., *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance: A Wiley Inter-science Publication*, (1988).
17. Terzaghi, K., "Theoretical Soil Mechanics", New York, (1943).
18. Ghods-Niroo consultant engineers Co, "Technical Report on the Instrumentation of the Body of Shahid Madani Dam", Tehran, (2013).
19. Beiranvand, B., Komasi, M., "Monitoring and Numerical Analysis of Pore Water Pressure Changes Eyvashan Dam during the First Dewatering Period", *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, Vol.6, No.11, pp.1-7, (2019).
20. Geological Report of Shahid Madani Dam Engineering, Ghods-Niroo Consultant Engineers Co, Tehran, (2002).
21. Ghiasi, V., Heidari, F., Behzadinezhad, H., "Numerical Analysis and Back Calculation for Embankment Dam Based on Monitoring Results (Case Study: Iran-Lurestan Rudbar)", *Sharif University of Technology Scientia Iranica. Transactions A: Civil Engineering*, Vol.28, No. 5, pp.2519–2533, (2021).
22. Ghods-Niroo Consultant Engineers Co, "Technical Review of Numerical Analyzes to Control the Static and Dynamic Stability of Shahid Madani Dam", Tehran, (2009).

23. Henkel, D, "The Shear Strength of Saturated Remolded Clays, in Proceedings of the ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soil", *Boulder, Colorado*, pp. 533-554, (1960).
24. Hongqi, M., Fudong, Chi, "Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams", *Science Direct Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 498-509, (2016).
25. Lifeng Wen, MEng Junrui Chai, Xiao Wang, MEng Zengguang Xu, Yuan Qin, Yanlong Li, "Behaviour of Concrete-Face Rockfill Dam on Sand and Gravel Foundation", *Geotechnical Engineering*, Vol. 168, No. 5, pp. 439-456, (2015).
26. Mahinroosta, R., Alizadeh, A., Gatmirib, B., "Simulation of Collapse Settlement of First Filling in a High Rockfill Dam", *Geotechnical Engineering*, Vol. 187, pp. 32-44, (2015).
27. Nazari Giglou, A., Panahi, A., Solari, L., Bombar, G., "Assessment of Static and Dynamic Behaviour of Emarat Earth Dam by Finite Difference Method", *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, Vol. 7, No. 1, pp. 01-11, (2017).
28. Sehra, R. S, Gupta, S. L, "Instrumentation of Earth & Rock Fill Dams", *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 3, pp. 277-298, (2018).
29. Sigtryggsdóttir, F. G., Snæbjörnsson J. Th., Sigbjörnsson R., Grande L., "Rockfill Dam SETTLEMENT Data: Processing and Statistical Analysis", *The 3rd International Symposium on Rock fill Dams, Chincold Hydropower*, (2013).
30. Sivasuriyan, A., Vijayan, D., Munusami, R., Devarajan, P., "Health Assessment of Dams under Various Environmental Conditions Using Structural Health Monitoring Techniques: A State-of-Art Review", *International Research on Sustainable Developments for Environment Management*, Vol. 5, pp. 455-464, (2021).
31. Terzaghi, K., "Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door", in *Proceeding of First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Massachusetts*, Vol. 1, pp. 307-311, (1963).
32. Yongkang, W., Bingyin, Z., Yuzhen, Y., Zongliang, Z., "Consolidation Analysis of Nuozhadu High Earth-Rockfill Dam Based on the Coupling of Seepage and Stress-Deformation Physical State", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 16 Issue 3, pp. 05-19, (2016).
33. Yongkang, W., Huina, Y., Bingyin, Z., Zongliang, Z., Yuzhen, Y., "Displacement-Based Back-Analysis of the Mode Parameters of the Nuozhadu High Earth-Rockfill Dam", *Hindawi Publishing Corporation the Scientific World Journal*, pp. 77-88, (2014).