

Research Paper

Monitoring Seepage through Dam under Consolidation Using the Finite Element Method, Case Study: Karkheh Dam

Siamak Esmailzadeh¹Mehrdad Shahrbanouzadeh^{2*}

1M.Sc. Graduate of Hydraulic Structure Engineering, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
Email: m.shahrbanouzadeh@jsu.ac.ir. Corresponding Author.



10.22125/IWE.2022.162567

Received:

August 11, 2021

Accepted:

November 22, 2021

Available online:

December 11, 2022**Keywords:****Seepage, Monitoring, Consolidation, Finite Element Method, Karkheh Dam.****Abstract**

The monitoring of an earth dam refers to the dam's performance in different construction stages, starting with impoundment followed by the exploitation period, which can be achieved in different fields such as seepage and subsidence analysis. This research analyzed Karkheh storage dam's seepage behavior using the finite element method under various scenarios assuming saturated flow, saturated-unsaturated flow, and saturated-unsaturated flow under consolidation in steady and unsteady conditions. The 17-year data obtained from the Karkheh dam's piezometer instrumentation in five sections of the dam's body and foundation were used to improve the accuracy of the parameters and adapt the analyses results to the actual dam conditions. Subsequently, seepage analysis comprising calibration and validation of the numerical model in two-dimensional and three-dimensional states using Seep/w and Seep3D software was conducted under the considered scenarios. Finally, a complete numerical model was obtained based on the actual dam conditions. The results show that three-dimensional flow analysis in the unsteady state under consolidation is more accurate than the two-dimensional state with a 23.5% lower error rate than the 2D approach.

1. Introduction

To record the behavior of a dam, the results of instrumentation readings and various analyzes can be used to determine the accuracy of this information and the behavior of the components of the earth dam. Li and Desai (1983) utilized the finite element method to investigate and analyze leakage and stress in the body of earthen dams, considering their interactions with each other and used linear elastic and Drucker-Prager model for the soil environment, and transient and steady states or water. Ataie-Ashtiani (2014) proposed a boundary element-based method for solving transient free-surface problems in homogeneous and heterogeneous environments. Javadi Jokar and Shahrbanouzadeh (2015) numerically evaluated the pore water pressure in the most critical section of Karkheh earthen dam using Seep3D software. The results show that the analysis of the three-dimensional numerical model is consistent with

* **Corresponding Author:** Mehrdad Shahrbanouzadeh

Address: Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Email: Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Tel: 09166447906

the instrumentation data. Yuan and Zhong (2016) conducted a three-dimensional analysis of free and unlimited surface flow in the earthen dam body using a finite element method with quadratic elements.

Various researchers have analyzed and determined the effective flow parameters in the dam body using other methods. Ren et al. (2016) used a reverse analysis method called the super-equivalent continuum method to analyze three-dimensional leakage in a heterogeneous porous medium. Stanisław and Leszek (2017) utilized analytical methods to detect seepage and leakage in earthen dams accurately. Yan et al. (2017) employed a PSO optimization algorithm to optimize the parameters involved in the leakage problem. Guo et al. (2018) proposed a statistical model called EFR based on the hydrostatic-season-time (HST) model for the behavior of pore water pressure in the body of the earth dam.

In this research, in order to achieve a comprehensive model that can express the behavior of the dam in leakage during the operation period and be used in future forecasts, utilizing two-dimensional and three-dimensional modeling with the help of the finite element method and two specialized software Seep/w and Seep3D, data from selected sections of Karkheh reservoir dam were extracted. The model was achieved considering the items and changes in the permeability coefficient and volumetric content of materials to consolidate the optimal model.

2. Materials and Methods

The general leakage equation is mathematically expressed by the Richards equation, which combines the continuity equation and Darcy's law for the flow of water in the soil in a non-constant state and three dimensions x , y , z , (Eq. 1) and nonhomogeneous and anisotropic environment. The following equation is obtained:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

Where h is the hydraulic load, K_x , K_y , K_z are the permeability coefficient in the x , y , z axes, θ is the volume content of water, and t is time.

(2)

$$\partial \theta_w = m_w \partial u$$

The total hydraulic head is also defined as follows:

$$h = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

By placing Eq. (3) in Eq. (2), the following equation is obtained:

$$\partial \theta_w = m_w \gamma_w \partial (h - y) \quad (4)$$

Since the height is constant for each element, its derivative concerning time is zero and is eliminated. Therefore, the differential equation is obtained as follows:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t}$$

(5)

Solving the above equation using the finite element numerical method, the Galerkin method, and derived from the weighted residual theory is transformed into Eq. (6):

$$\iiint_v ([B]^T [D] [B]) dv + \iiint_v (\lambda [N]^T [N]) dv. \{H\}_t = \iint_A (q [N]^T [N]) dA \quad (6)$$

Where [B] is the gradient matrix, [C] is the hydraulic conductivity coefficients (permeability) matrix, {H} is the node head vector, and $\lambda = m_w \gamma_w$. Also $[N]^T [N]$ or [M] is the mass matrix, $\{H\}_t$ is $\frac{\partial h}{\partial t}$ (changes of head over time), q is the unit of flow rate through the surface of an element, and [N] is an interpolation function vector.

According to the above formulation, different scenarios have been designed to achieve the optimal model of leakage in Karkheh Reservoir Dam, which indicates its behavior subjected to leakage:

1. Investigation of piezometric pressure assuming a completely saturated environment in a two-dimensional state and steady flow.
2. Investigation of piezometric pressure assuming saturated-unsaturated environment in the two-dimensional state and steady flow.
3. Investigation of piezometric pressure assuming saturated-unsaturated environment in the three-dimensional state and steady flow.
4. Investigation of piezometric pressure by assuming saturated-unsaturated environment in the two-dimensional state, unsteady flow, and considering the consolidation effect.
5. Investigation of piezometric pressure assuming saturated-unsaturated environment in the three-dimensional state and unsteady flow considering the consolidation effect.

3. Discussion and Conclusion

According to the different scenarios defined in this research, the following statements are made:

1. Considering the calibration and validation of the numerical model in asymmetric analysis, the results showed that the more time step, the more accurate the results would be. According to the analysis results and the time steps considered, the time step of 3600 seconds offers better results and a lower error rate.
2. By considering the actual conditions of the porous environment and flow in the numerical model (consolidation effect), a complete model can be obtained, which can be used to analyze the conditions of the higher reservoir water level that has not yet occurred and make the necessary predictions to prevent losses and damage to the dam.
3. The results showed that non-permanent analysis is more accurate than permanent analysis.
4. According to the results of permanent and non-permanent analysis, it can be said that in some parts of the dam body, the body materials have not reached full saturation, and there are no completely stable conditions.
5. Comparing the 2D mode results with Seep/w software and 3D mode with Seep-3D software shows that 3D mode results have a lower error rate and are closer to the instrumentation results. This shows the accuracy of the finite element method and Seep-3D software. The resulting outcome is also a reason for the three-dimensionality of water flow in the body and foundation of the Karkheh dam and the effect of the third dimension on the accuracy of the results.

6. The excellent matching of instrumentation results and Seep-3D software outputs allows us to determine the water level at the desired piezometers and the amount of leakage before or after the construction of each earth dam.
7. Leakage flow control results show the high accuracy of Seep-3D software in calculating the amount of leakage flow.

4. Six important references

- 1) Javadi Jokar M, M. Shahrbanouzadeh and F. Salehifar. 2015. The numerical assessment of pore pressure in critical section of earth dam by Seep3D software, Case study: Karkheh dam, Water Engineering Conference & Exhibition, Tehran, Iran (In Persian).
- 2) Guo X., J. Baroth, D. Dias and A. Simon. 2018. An analytical model for the monitoring of pore water pressure inside embankment dams. *Engineering Structures*, 160, 356–365.
- 3) Ren J., Z.Z. Shen, J. Yang and C.Z. Yu. 2016. Back analysis of the 3D seepage problem and its engineering, applications. *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 1-8.
- 4) Stanisław L. and O. Leszek. 2017. Using the modified scalar product approach for testing the direction of seepage through the earth-fill dam in Pieczyska, *Journal of Water and Land Development*, No. 33 (IV–VI): 89–98, 1429–7426
- 5) Yan X., F. Shu-yan, Z. Kai, Y Hui and F. Zhi-yuan. 2017. Seepage safety monitoring model for an earth rock dam under influence of high-impact typhoons based on particle swarm optimization algorithm, *Water Science and Engineering*, 10(1):70-77.
- 6) Yuan S. and H. Zhong. 2016. Three dimensional analysis of unconfined seepage in earth dams by the weak form quadrature element method, *Journal of Hydrology*, No 533, 403–411.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to Mr. Javadi Jokar, the Master of Science the Karkheh hydropower dam Company for her cooperation in this research.

رفتارنگاری سد در زمینه نشت تحت اثر تحکیم با روش اجزاءمحدود مطالعه موردی: سد کرخه

سیامک اسمعیل زاده^۱ مهرداد شهربانوزاده^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱

مقاله پژوهشی (برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد)

چکیده

رفتارنگاری سد حاکی به بررسی عملکرد سد در مراحل مختلف ساخت، اولین آگیری و دوران بهره‌برداری اطلاق می‌شود که در زمینه‌های مختلفی نظیر تحلیل نشت و نشست می‌تواند صورت پذیرد. در این تحقیق، رفتارنگاری سد در زمینه نشت به روش اجزاءمحدود تحت سناریوهایی با فرض جریان اشباع کامل، جریان اشباع-غیراشباع و جریان اشباع-غیراشباع با اثر تحکیم در دو حالت ماندگار و غیرماندگار بر روی سد مخزنی کرخه انجام گرفت. با هدف تدقیق پارامترها و نتایج تحلیل‌ها با شرایط واقعی سد از آمار و اطلاعات ۱۷ساله پیژومترهای موجود در ۵ مقطع از بدنه و تکیه‌گاه سد استفاده شده است. سپس آنالیز تراوش شامل کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل عددی در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزارهای Seep/w و Seep3D تحت سناریوهای در نظر گرفته شده انجام پذیرفت و در نهایت مدل عددی کامل در زمینه نشت مطابق شرایط واقعی سد کرخه بدست آمد. نتایج حاکی از آن است که تحلیل سه‌بعدی جریان در حالت غیرماندگار با اثر تحکیم، نسبت به تحلیل دوبعدی بدون اثر تحکیم دقیق‌تر و بطور میانگین خطای آن ۲۳/۵ درصد کمتر از حالت دوبعدی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نشت، رفتارنگاری، تحکیم، روش اجزاء محدود، سد کرخه.

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، siamakes72@gmail.com

^{۲*} استادیار گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول m.shahrbanouzadeh@jstu.ac.ir (نویسنده مسئول)



مقدمه

سدها از نظر اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشند. به علت بالا بودن هزینه ساخت سدها، پیچیدگی‌های رفتاری خاص سازه سد در اثر احداث در شرایط ژئومکانیکی و هیدرولوژی متفاوت و نیز شدت وخامت عواقب ناشی از ناپایداری سدها، مسئله حفاظت و نگهداری و ارزیابی مستمر پایداری سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بنابراین مشاهده و ثبت رفتار سدها طی مرحله ساخت و در دوران بهره‌برداری امری کاملاً ضروری و غیر قابل اجتناب می‌باشد. به منظور دستیابی به این هدف، وسایل و ابزار مناسبی در پی، تکیه‌گاه‌های جانبی، بدنه سد و سازه‌های جانبی نصب و داده‌های حاصله به طور مستمر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. به منظور رفتارنگاری یک سد نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق و آنالیزهای مختلف می‌توان به صحت این اطلاعات و رفتار اجزای سد خاکی پی برد.

Li and Desai, (1983) با استفاده از روش اجزاء محدود به بررسی و تحلیل نشت و تنش در بدنه سد خاکی با در نظر گرفتن اثرات متقابل آنها بر یکدیگر پرداختند و از مدل‌های رفتاری مناسب برای محیط خاک (Linear elastic and Drucker-Prager model) و برای آب (Transient and Steady States) استفاده کردند. Thieu et al., (2001) به مدلسازی نشت با در نظر گرفتن محیط اشباع-غیراشباع پرداختند و تحلیل جریان را با استفاده از روش‌های عددی انجام دادند. Fu et al., (2009) به بررسی جریان غیرماندگار در بدنه سد خاکی با استفاده از روش اجزاء محدود پرداختند و صحت‌سنجی و کالیبراسیون آن را با استفاده از روش‌های تحلیلی و اطلاعات مدل آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج مدل، نشان از دقت، قابلیت اطمینان بالای مدل در شرایط پیچیده و کاربرد ساده در مقایسه با روش‌های پیشین دارد.

Pakbaz et al., (2009) به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک با استفاده از مدل Seep3D در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند و نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش داده است. شهربانوزاده و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از روش عددی المان محدود و نرم‌افزار Seep3D به مدل‌سازی جریان نشت از پی سد شهید عباسپور پرداختند. نتایج نشان داد با محاسبه نشت سه‌بعدی به راحتی می‌توان بار آبی هر نقطه از منطقه را بدست آورد. این

نکته در تعیین طول پرده‌های آب بند تکیه‌گاه‌ها بسیار مفید می‌باشد و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌بندی نشت به روش حجم محدود و نرم افزار Seep3D حاکی از دقت بالای نرم افزار Seep3D نسبت به روش حجم محدود می‌باشد. Rafieezadeh and Ataie-Ashtiani, (2014) روشی بر مبنای المان مرزی را برای حل مسائل گذرای با سطح آزاد در محیط‌های همسان و غیرهمسان پیشنهاد دادند. جواد جواد و شهربانوزاده (۲۰۱۵) به ارزیابی عددی فشار آب منفذی در بحرانی‌ترین مقطع سد خاکی کرخه با استفاده از نرم‌افزار Seep3D پرداختند. نتایج بدست آمده حاکی از تطابق تحلیل مدل عددی سه بعدی با داده‌های ابزار دقیق می‌باشد. Yuan and zhong (2016) آنالیز سه بعدی برای جریان با سطح آزاد و نامحدود در بدنه سد خاکی با استفاده از روش اجزاء محدود و با المانهای چهارگره‌ای پرداختند.

برخی از محققین از روش‌های دیگری به تحلیل و تعیین پارامترهای موثر جریان در بدنه سد پرداختند از آنجمله Ren et al. (2016) از یک روش آنالیز برگشتی تحت عنوان (super-equivalent continuum method) جهت تحلیل نشت سه‌بعدی در محیط متخلخل ناهمگن، Stanisław and Leszek (2017) از روش تحلیلی برای تشخیص دقیق جهت تراوش و نشت در سد خاکی، Yan et al. (2017) از الگوریتم بهینه‌سازی PSO جهت بهینه کردن پارامترهای دخیل در مسئله نشت استفاده کردند و Guo et al., (2018) یک مدل آماری تحت عنوان EFR و بر پایه مدل زمانی-فصلی-هیدرواستاتیک (HST) برای رفتارنگاری فشار آب حفره‌ای در بدنه سد خاکی پیشنهاد دادند. Jin et al., (2019) مطالعه گسترده و طولانی به مدت ۱۸ سال را بر روی سد خاکی در استان گوانگشی چین انجام دادند و به بررسی عوامل مؤثر در جابجائی عمودی، جانبی و تغییر شکل بدنه سد با استفاده از بررسی دقیق فشار پیزومتریک پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین عامل نشست در بدنه سد ناشی از تغییر سطح آب مخزن و فشار پیزومتریک می‌باشد. مطالعه مروری بر ادبیات فنی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که رفتارنگاری سد با در نظر گرفتن تغییرات بوجود آمده در ضریب نفوذپذیری بدنه سد در دوره بهره‌برداری انجام نشده است. در این تحقیق جهت رسیدن به مدلی جامع که بتواند بیانگر رفتار سد در زمینه نشت در طول دوره بهره‌برداری باشد و بتوان از آن در پیش‌بینی‌های آینده استفاده کرد، مدلسازی دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از دو نرم‌افزار

زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

حل معادله فوق با استفاده از روش عددی اجزاء محدود و با استفاده از روش گالریکین و برگرفته از تئوری باقیمانده وزندار بصورت رابطه (۶) تبدیل می‌گردد:

$$\iiint_V ([B]^T [D] [B]) dv + \iiint_V (\lambda [N]^T [N]) dv \cdot \{H\}_t = \iint_A (q [N]^T [N]) dA \quad (6)$$

در این رابطه، [B] ماتریس گرادیان، [C] ماتریس ضرایب هدایت هیدرولیکی (نفوذپذیری)، {H} بردار هدهای گره ای و $\lambda = m_w \gamma_w$ است. همچنین $[N]^T [N]$ یا همان [M] ماتریس جرم، که همان $\frac{\partial h}{\partial t}$ است (تغییرات هد بر حسب زمان)، q واحد دبی عبوری از سطح یک المان و [N] بردار تابع میانمایی می‌باشد. مطابق فرمول بندی فوق سناریوهای مختلفی جهت رسیدن به مدل بهینه نشد در سد مخزنی کرخه که بیانگر رفتار آن در زمینه نشد می‌باشد طرح ریزی شده است:

- ۱- بررسی فشار پیژومتری با فرض محیط اشباع کامل در حالت دوبعدی و جریان ماندگار.
 - ۲- بررسی فشار پیژومتری با فرض محیط اشباع- غیر اشباع در حالت دوبعدی و جریان ماندگار.
 - ۳- بررسی فشار پیژومتری با فرض محیط اشباع- غیر اشباع در حالت سه بعدی و جریان ماندگار.
 - ۴- بررسی فشار پیژومتری با فرض محیط اشباع- غیر اشباع در حالت دوبعدی، جریان غیرماندگار و در نظر گرفتن اثر تحکیم.
 - ۵- بررسی فشار پیژومتری با فرض محیط اشباع- غیر اشباع در حالت سه بعدی و جریان غیرماندگار با در نظر گرفتن اثر تحکیم. طرح سناریوهای فوق جهت رسیدن به مدل بهینه که بتواند رفتار مصالح بدنه در زمینه نشد را با توجه به شرایط موجود و پیش بینی آینده مهیا سازد انجام پذیرفته است. تفاوت سناریوها همانطوریکه مشخص شده در سه بخش اصلی می‌باشد:
- (۱) ضریب نفوذپذیری که در شرایط اشباع و غیر اشباع مقادیر متفاوت دارد و با طرح سناریوها قابل اصلاح می‌باشد. (۲) میزان محتوی حجمی خاک که در شرایط غیر اشباع و تحت اثر تحکیم در طول زمان بهره برداری تغییر می‌یابد و در آنالیز جریان غیرماندگار در مدل عددی لحاظ گردیده است. (۳) تحلیل دوبعدی

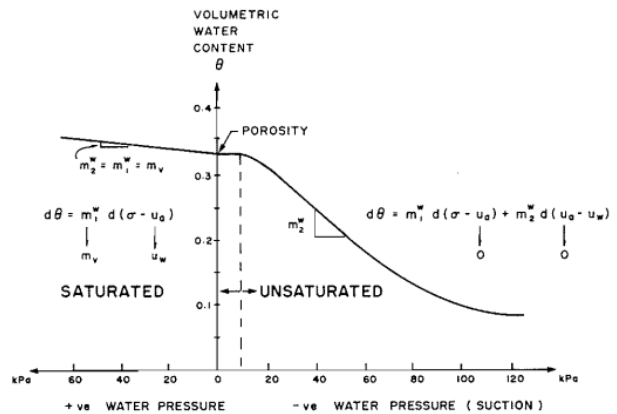
تخصصی Seep/w و Seep3D از مقاطع انتخابی سد مخزنی کرخه، با در نظر گرفتن تغییرات حاصل در ضریب نفوذپذیری و محتوای حجمی مصالح تحت اثر تحکیم انجام شده است.

روش تحقیق

معادله عمومی نشد از نظر ریاضی با معادله ریچاردز بیان می‌گردد که با ترکیب معادله پیوستگی و قانون داری برای جریان آب در خاک در حالت غیرماندگار و در سه بعد x, y, z، (رابطه ۱) و محیط غیر همگن و غیر همسان بفرم زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

در رابطه (۱) h بار هیدرولیکی، K_x, K_y, K_z ضریب نفوذپذیری در جهت محورهای x, y, z و همچنین θ میزان محتوای حجمی آب و t زمان می‌باشد.



شکل (۱): منحنی محتوای حجمی آب و m_v^u برای جریان اشباع و غیر اشباع (Lam et al., 1987)

مطابق شکل (۱) تغییرات محتوای حجمی آب وابسته به تغییرات در متغیر $(u_a - u_w)$ می‌باشد که فشار آب حفره‌ای و u_a فشار هوا است و با توجه به ثابت ماندن u_a میزان تغییر محتوای حجمی آب تابعی از تغییرات فشار آب حفره‌ای می‌باشد (Lam et al., 1987).

$$\partial \theta_w = m_w \partial u \quad (2)$$

همچنین هد هیدرولیکی کل بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$h = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

با جایگذاری معادله (۳) در (۲) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\partial \theta_w = m_w \gamma_w \partial (h - y) \quad (4)$$

از آنجائیکه ارتفاع برای هر المان ثابت است مشتق آن نسبت به زمان صفر بوده و حذف می‌شود. لذا معادله دیفرانسیل بصورت



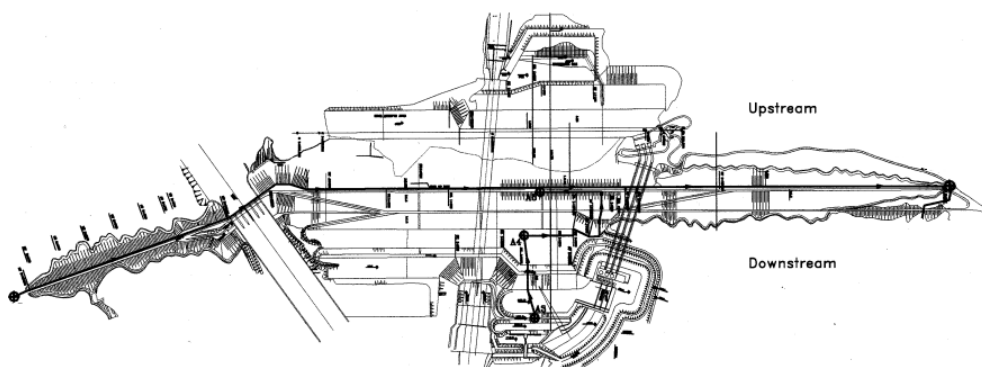
تراز نرمال، بزرگترین سد کشور از نظر ذخیره‌سازی آب می‌باشد. ساختگاه سد مخزنی کرخه در سازند بختیاری واقع است. سازند بختیاری متشکل از کنگلومرا و عدسی‌های ماسه سنگی و گلسنگی، سنگ پی را تشکیل می‌دهند. توده‌سنگ کنگلومرای نفوذپذیری نسبتاً بالایی داشته و توسط میان لایه‌های گلسنگی با نفوذپذیری بسیار کم از یکدیگر جدا می‌شود. جهت جلوگیری از نفوذ و نشت آب از کنگلومرای پی در تکیه‌گاه‌ها و بخش میانی سد از دیوار آب‌بند با مصالح بتن پلاستیک استفاده گردیده که در بالا به هسته مرکزی سد و در پایین عمدتاً به یکی از لایه‌های گلسنگی دوخته شده است. (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، (۱۳۷۱)). در بدنه و پی سد کرخه از حدود یک هزار قطعه ابزار دقیق برای بررسی رفتار سد از نظر فشارهای منفذی، تنش خاک (تنش کل)، نشست‌های بدنه و میزان نشت استفاده شده است. این ابزار در ۲۳ مقطع بدنه با توجه به شرایط پی و ارتفاع سد تعبیه شده است (شکل (۳)). قرائت بیش از ۷۷۰ قطعه که از نوع کابلی بوده و به اتاق کنترلی در سمت چپ بدنه متصل هستند بوسیله کامپیوتر انجام شده و مابقی قرائت‌ها بصورت دستی و توسط ابزارهای خاص در محل انجام می‌گیرد (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، (۱۳۸۱)).

و سه‌بعدی با توجه به تغییرات ابعاد و جنس مصالح در بعد سوم که می‌تواند نتایج مدل عددی را ارتقاء دهد.

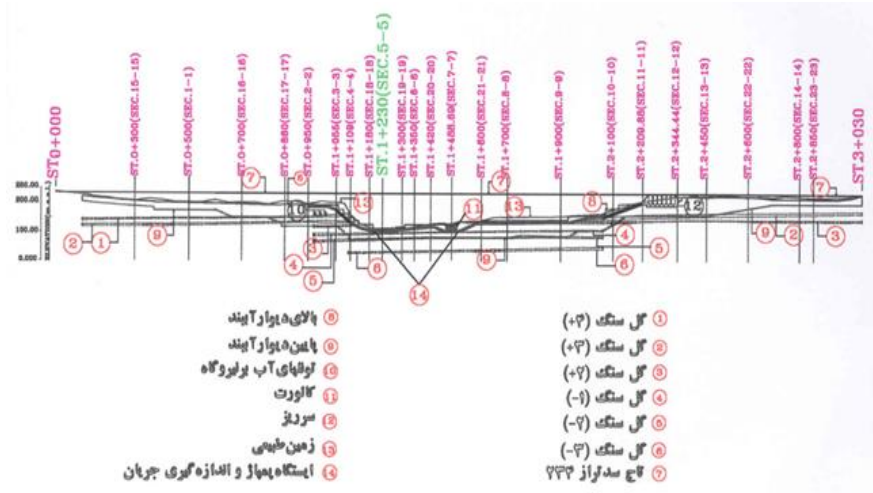
جهت انجام آنالیز تراوش در این تحقیق از نرم‌افزارهای Seep-3D 1.18 و Seep/w 2018 استفاده شده است. نرم افزار Seep/w یک نرم‌افزار مدل‌سازی مسائل تراوش است که نسخه تجاری آن در سال ۱۹۹۸ توسط شرکت Geoslope، تهیه کننده نرم‌افزارهای تخصصی مهندسی ژئوتکنیک، به بازار عرضه شد. نرم‌افزار Seep-3D نیز یک نرم‌افزار برای مدل‌سازی سه‌بعدی مسائل تراوش می‌باشد که اولین نسخه آن در سال ۲۰۰۰ توسط شرکت Geoslope به بازار عرضه شد. این نرم‌افزارها قابلیت حل معادله تراوش در حالات ماندگار و غیرماندگار و نیز در محیط‌های اشباع و غیراشباع را دارا بوده و جهت تحلیل و آنالیز از روش اجزاء محدود استفاده می‌کنند.

معرفی سد کرخه

سد کرخه از نوع خاکی با هسته مرکزی رسی به ارتفاع ۱۲۷ متر از پی خود و طول تاج ۳۰۳۰ متر می‌باشد. رقوم تاج سد ۲۳۴ متر و رقوم کف پی در بحرانی‌ترین مقطع سد ۱۰۷ متر بالاتر از سطح دریا است (شکل (۲)). این سد با حجم مخزن ۷/۴ میلیارد متر مکعب در هنگام سیلاب طراحی و ۵/۶ میلیارد متر مکعب در



شکل (۲): پلان سد مخزنی کرخه

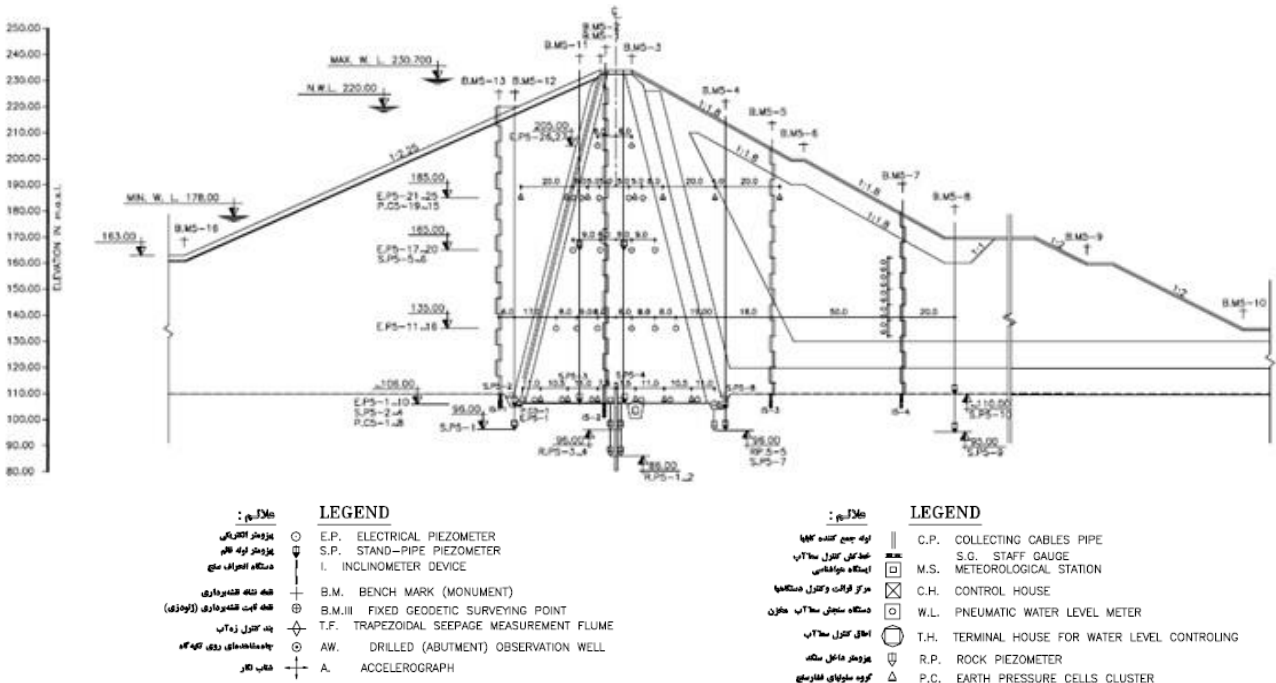


شکل (۳): موقعیت مقاطع ابرار دقیق در طول محور سد

مقاطع مورد بررسی

مشخصات مقطع ۵ (شکل ۴) نمایش داده شده است. انتخاب این مقاطع با توجه به دو شرط گستردگی مقطع بگونه‌ای که قابلیت تعمیم به کلیه بخش‌های بدنه و تکیه‌گاه را دارا باشد و داشتن پیژومترهای سالم صورت پذیرفته است (شرکت مهندسی مهتاب قدس، (۱۳۸۱)).

در این مقاله از ۵ مقطع که عبارتند از ۳ مقطع بحرانی مرکزی (مقاطع ۵، ۴ و ۶)، یک مقطع از جناح چپ (مقطع ۱) و یک مقطع از جناح راست (مقطع ۱۴) انتخاب گردید که به عنوان نمونه



شکل (۴): مشخصات مقطع ۵ کیلومتر ۱+۲۲۵

رطوبت حجمی خاک و ضریب قابلیت فشردگی حجمی مصالح بدنه و پی سد مورد استفاده در نرم افزارهای مورد نظر، ارائه شده است.

در جدول (۱) مقادیر هدایت هیدرولیکی اولیه، نسبت ضرایب نفوذپذیری اولیه در جهت X,Y,Z و همچنین مشخصات مربوط به

جدول (۱): مقادیر و مشخصات هیدرولیکی اولیه بکار رفته جهت آنالیز مدل در نرم افزار Seep/w و Seep3D

Material	K_x	K_y/K_x	K_z/K_x	Vol. Water Content	M_v
Alluviom	۲e-۶	۱	۱	۰/۵	۰/۰۰۰۱
Clay	۱e-۶	۰/۱	۱	۰/۵	۰/۰۰۰۱
Cong silty gravel	۰/۰۰۳	۰/۱	۱	۰/۴	۰/۰۰۰۱
Conglomerate	۰/۰۰۵	۰/۱	۱	۰/۴	۰/۰۰۰۱
Cutoff drain	None	None	None	None	None
filter	۰/۱	۱	۱	۰/۴۲	۰/۰۰۰۱
Filter drain	۰/۰۰۲۵	۱	۱	۰/۴۲	۰/۰۰۰۱
Mudstone	۰/۰۵۵	۱	۱	۰/۴	۰/۰۰۰۱
Riprap	۵e-۶	۰/۱	۱	۰/۴۸	۰/۰۰۰۱
shell	۰/۰۰۷۵	۰/۱	۱	۰/۴	۰/۰۰۰۱
	۰/۰۰۱	۰/۱	۱	۰/۴۲	۰/۰۰۰۱

جدول (۲): مشخصات پیزومترها

کاربرد	تعداد ابزار	نوع ابزار	نام ابزار
فشار منفذی سنگ پی در جوش سنگ و گل‌سنگ‌ها	۸۷	تار	فشار سنج RP
ارزیابی فشار آب منفذی داخل هسته و صافی	۱۹۱	تار	فشار سنج EP
ارزیابی صحت فشار آب منفذی SP و RP پی-بدنه	۱۳۴	مکانیکی	فشار سنج SP

یافته‌های پژوهش

بر اساس موارد تئوری روش تحقیق و سناریوهای تعریف شده نتایج بدست آمده در ۴ بخش بصورت زیر ارائه می‌گردد:

بررسی فشار آب منفذی درون هسته

نتایج حاصل از پیزومترهای الکتریکی نصب شده در سد کرخه نشان می‌دهد که همه این ابزارها، روند عمومی مشابهی را برای تغییرات فشار آب حفره‌ای درون هسته پس از آبیگری از خود نشان داده‌اند. در ۵ مقطع عرضی ابزارگذاری سد، بخش عمده بررسی‌های انجام شده در این مطالعه روی آن متمرکز شده است. همچنین با توجه به اهمیت تغییرات تراز آب مخزن در بررسی رفتار و تفسیر نتایج ابزار دقیق، نمودار تغییرات تراز آب مخزن با زمان، در شکل (۵) نشان داده شده است. لازم به توضیح است که تغییرات زمان در این نمودار بر حسب روز و از تاریخ شروع آبیگری

در هر مرحله از سناریوهای تعریف شده آنالیزهای مختلفی برای رسیدن به یک مدل عددی کاملتر انجام پذیرفته است که این آنالیزها ابتدا با فرض محیط اشباع کامل مصالح در حالت دویعدی شروع شده و با توجه به نتایج بدست آمده در سناریوهای بعدی فرضیات اصلاح و با شرایط واقعی سد منطبق گردید و این مهم با تعریف و اصلاح محیط بدنه تحت شرایط اشباع-غیراشباع و تغییرات ضرایب نفوذپذیری با استفاده از نمودار غیرخطی آن در حالت غیراشباع برای تک مصالح و اثر دادن تحکیم در آنالیز غیر ماندگار با اصلاح میزان محتوای حجمی مصالح بدنه در فرایند کالیبراسیون و اعتبارسنجی بدست آمده است. در مرحله کالیبراسیون ۵ تراز مختلف مخزن و آمار و اطلاعات ابزار دقیق (پیزومترهای موجود) قرائت شده در مقاطع مورد نظر و همچنین مرحله اعتبارسنجی با استفاده از ۵ تراز دیگر مخزن انجام پذیرفت. اطلاعات مربوط به سه نوع پیزومتر موجود در جدول (۲) ارائه شده است. برای بررسی میزان دقت مدل عددی، به شاخصی نیاز است که به کمک آن تصمیم لازم در خصوص قبول یا رد مدل اتخاذ شود. لذا از شاخص میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE) (رابطه ۸) جهت ارزیابی خطای مدل عددی استفاده شده است.

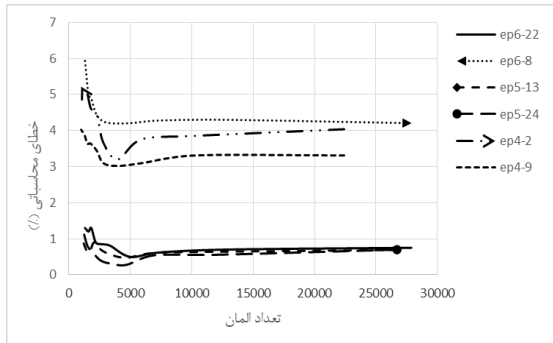
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{X_t - \hat{X}_t}{X_t} \right| \quad (8)$$

در رابطه (۸) X_t مقادیر مشاهداتی، \hat{X}_t مقادیر محاسباتی و n تعداد داده‌های محاسباتی است.

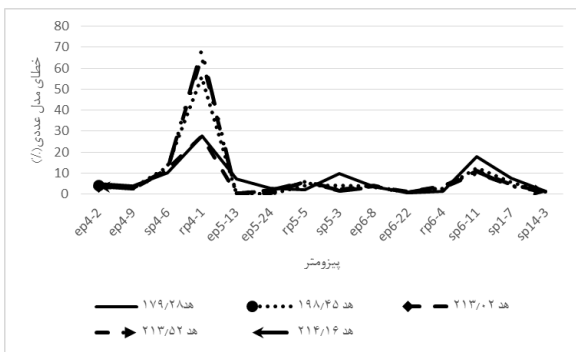
نقاط مختلف می‌باشد که ضرورت مدل‌سازی سه‌بعدی برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر را نشان می‌دهد (شکل (۶)).

بررسی فشار آب منفذی با فرض محیط اشباع-غیراشباع، حالت دوبعدی و جریان ماندگار

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل نرم افزار Seep/w بعنوان نمونه با هد ثابت بالادست ۲۱۳/۴۴ و با تعداد المان‌های مختلف انجام گردیده است. مشاهده می‌شود که بهترین تعداد المان، برای مقاطع ۱، ۴، ۵، ۶، و ۱۴ به ترتیب ۷۰۷، ۳۹۷۱، ۴۶۷۶، ۴۹۸۳ و ۴۳۹۹ المان است که مربوط به مش ۵ متر می‌باشد. نتایج تغییرات المان‌بندی مختلف و خطای بدست آمده در پی‌زومترهای موردنظر در شکل (۷) نمایش داده شده است.

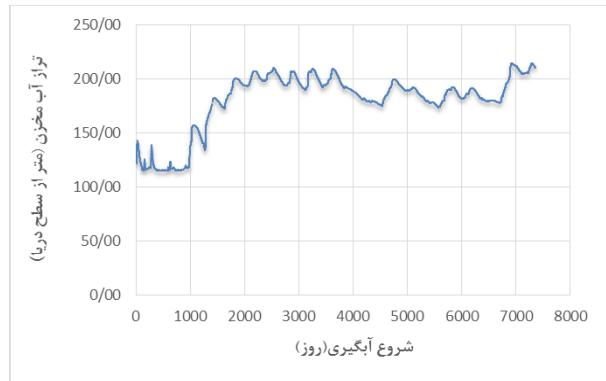


شکل (۷): تغییرات خطای محاسباتی با تعداد المان‌های مختلف



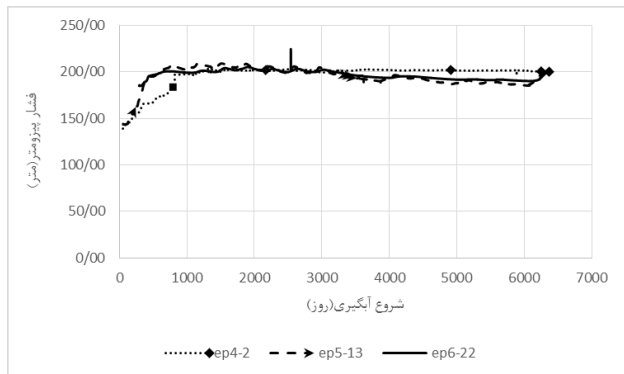
شکل (۸): نتایج کالیبراسیون مدل دو بعدی محیط اشباع-غیر اشباع

سد محاسبه شده است.



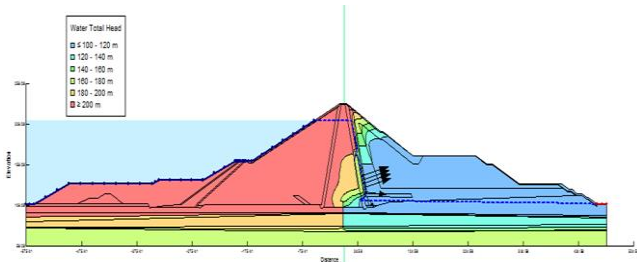
شکل (۵): تغییرات تراز آب مخزن در طول دوره آبیاری و بهره‌برداری

به عنوان نمونه نمودارهای تغییرات فشار آب حفره‌ای در مقابل زمان برای پی‌زومترهای الکتریکی EP4-2، EP5-13، EP6-22 در مقاطع منتخب نصب شده‌اند به همراه نمودار تغییرات فشار آب مخزن در شکل (۶) نشان داده شده است.

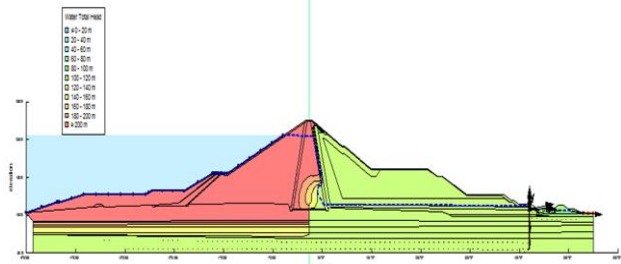


شکل (۶): تغییرات فشار آب حفره‌ای در مقابل زمان برای پی‌زومترهای الکتریکی EP4-2، EP5-13، EP6-22

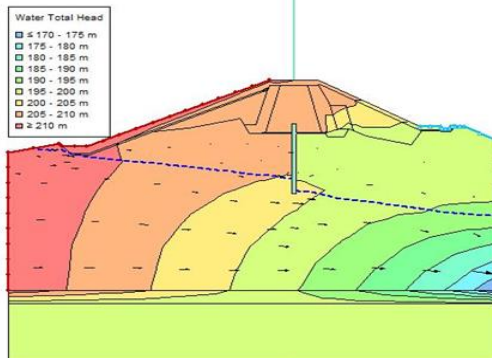
با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیشینه فشار آب منفذی در حدود ۹۹۰ روز از شروع آبیاری ثبت شده است. این امر نشان‌دهنده این واقعیت است که نفوذپذیری مصالح هسته به اندازه‌ای کوچک است که نرخ افزایش فشار آب منفذی بیشتر از سرعت زهکشی و تخلیه آب آغاز شده و سپس شکل کاهشی به خود می‌گیرد که نشان‌دهنده روند کند تحکیم مصالح هسته رسی می‌باشد و این موضوع در سناریوهای تعریف شده خصوصاً تحلیل غیرماندگار با اثر تحکیم لحاظ گردیده است. همچنین اختلاف در فشار آب منفذی اندازه‌گیری شده در پی‌زومترهای مذکور عمدتاً ناشی از تغییرات تصادفی درصد رطوبت مصالح اجرا شده هسته در



شکل (۱۲): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۵ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



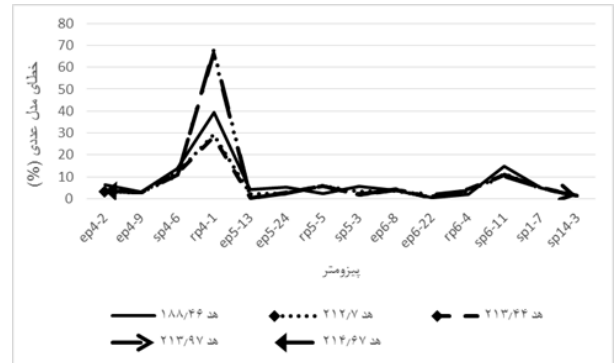
شکل (۱۳): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۶ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



شکل (۱۴): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۱۴ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۲۱۳/۴۴

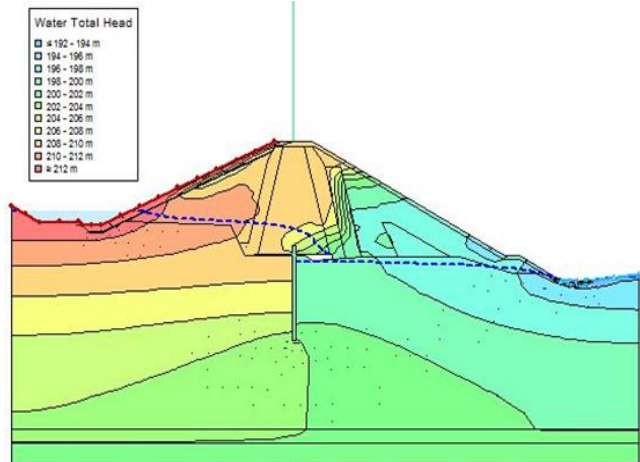
بررسی فشار آب منفذی با فرض محیط اشباع کامل، حالت دوبعدی و جریان ماندگار

نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی با ۱۰ تراز مختلف در اشکال (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است. همچنین نتایج گرافیکی تحلیل‌ها در اشکال (۱۷) تا (۲۱) ارائه شده است.

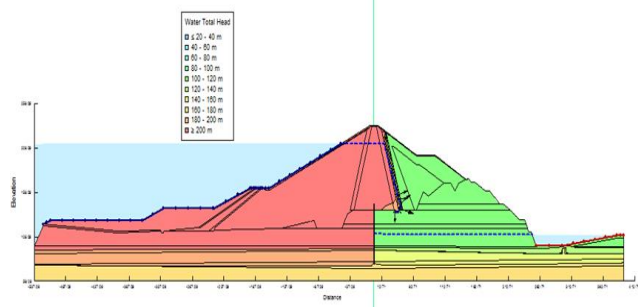


شکل (۹): نتایج اعتبارسنجی مدل دو بعدی محیط اشباع-غیر اشباع

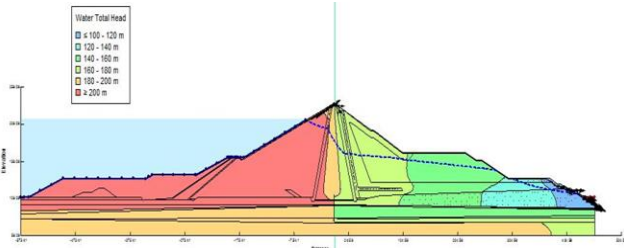
همچنین اختلاف در فشار آب منفذی اندازه‌گیری شده در پیزومترهای مذکور عمدتاً ناشی از تغییرات تصادفی درصد رطوبت مصالح اجرا شده هسته در نقاط مختلف می‌باشد که ضرورت مدل‌سازی سه‌بعدی برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر را نشان می‌دهد. نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی با ۱۰ تراز مختلف در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. همچنین نتایج گرافیکی تحلیل‌ها در اشکال (۱۰) تا (۱۴) ارائه شده است.



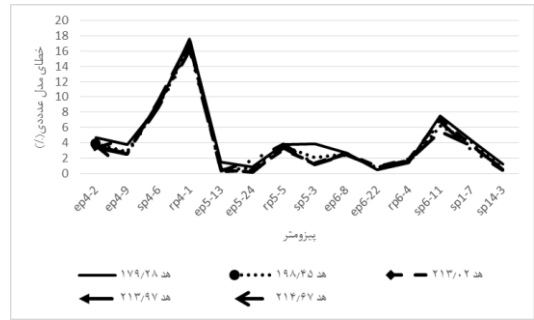
شکل (۱۰): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۱ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



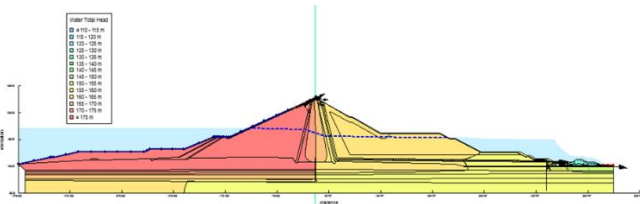
شکل (۱۱): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۴ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



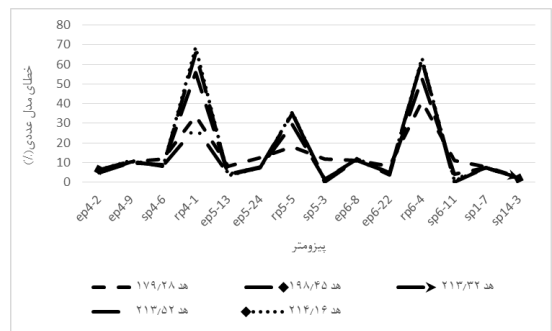
شکل (۱۹): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۵ در حالت اشباع کامل با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



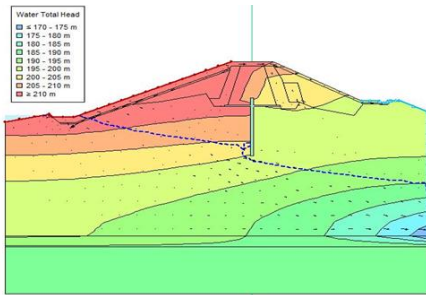
شکل (۱۵): نتایج کالیبراسیون مدل دو بعدی محیط اشباع کامل



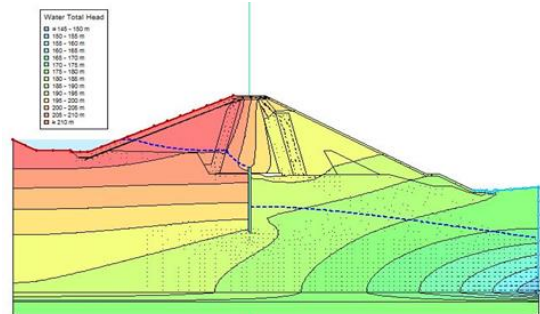
شکل (۲۰): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۶ در حالت اشباع کامل با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



شکل (۱۶): نتایج اعتبارسنجی مدل دو بعدی محیط اشباع کامل

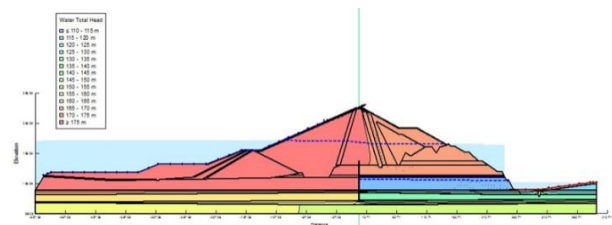


شکل (۲۱): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۱۴ در حالت اشباع کامل با هد بالادست ۲۱۳/۴۴

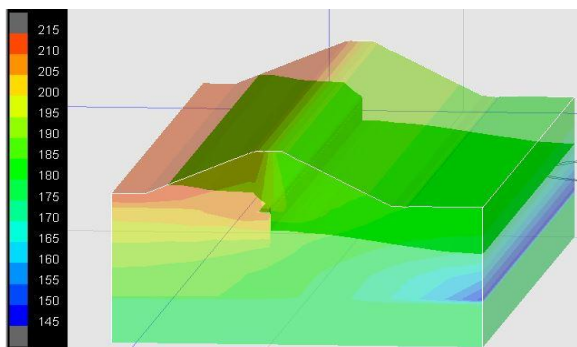


شکل (۱۷): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۱ در حالت اشباع کامل با هد بالادست ۲۱۳/۴۴

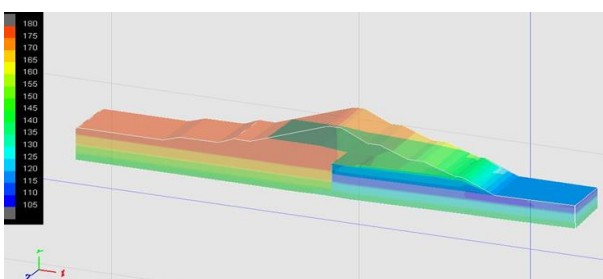
با مقایسه خطاهای دو وضعیت اشباع کامل و اشباع-غیر اشباع دو سناریو نسبت بهم مقایسه شده است (شکل (۲۲)). همانطوریکه مشاهده می‌شود نتایج سناریو اشباع-غیر اشباع خطای کمتری نسبت به حالت اشباع دارد و نشان می‌دهد قسمت‌های عمده ای از بدنه به شرایط اشباع کامل نرسیده است. بنابراین در سناریوهای بعدی با فرض محیط اشباع-غیر اشباع تحلیل‌ها صورت پذیرفته است.



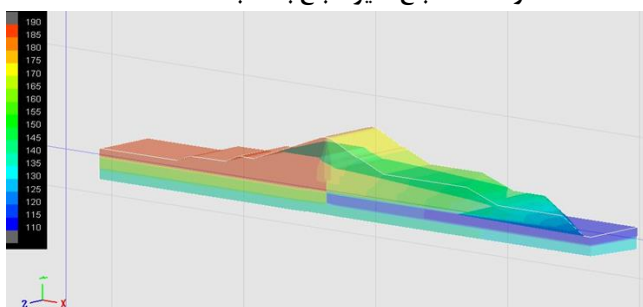
شکل (۱۸): نمایش گرافیکی تحلیل دو بعدی حالت ماندگار مقطع ۴ در حالت اشباع کامل با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



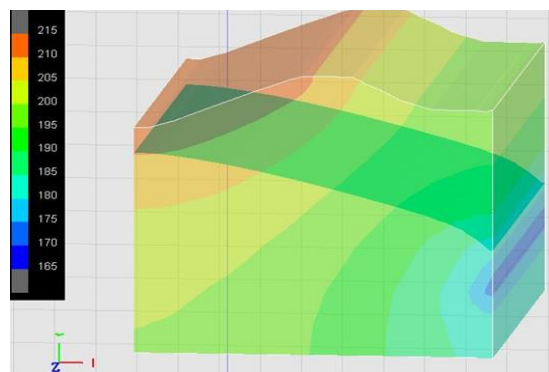
شکل (۲۵): نمایش گرافیکی تحلیل سه بعدی حالت ماندگار مقاطع ۱۷-۱۶-۱ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



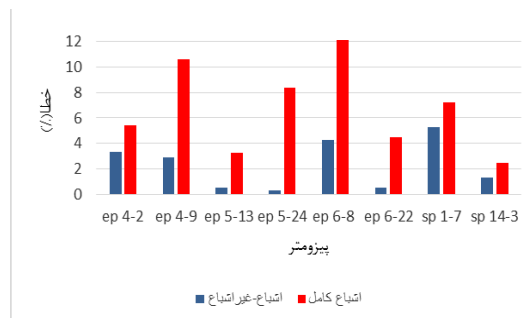
شکل (۲۶): نمایش گرافیکی تحلیل سه بعدی حالت ماندگار مقاطع ۵-۴ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۱۷۹/۲۸



شکل (۲۷): نمایش گرافیکی تحلیل سه بعدی حالت ماندگار مقاطع ۶-۵ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۱۸۸/۴۶



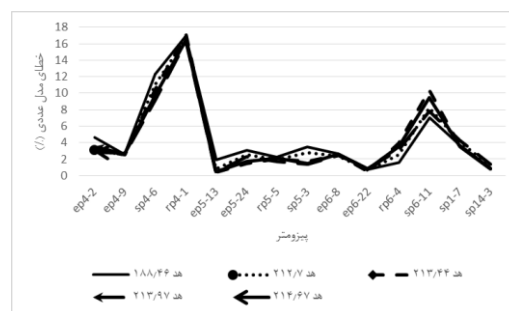
شکل (۲۸): نمایش گرافیکی تحلیل سه بعدی حالت ماندگار مقاطع ۱۴-۲۲-۱۳ در حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۲۱۳/۴۴



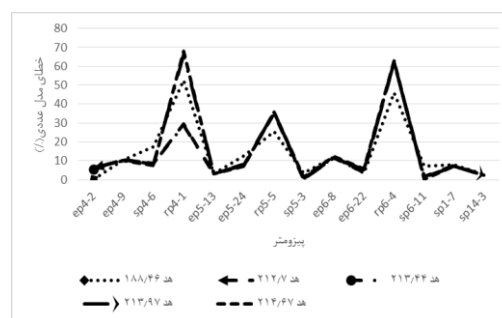
شکل (۲۲): نمایش گرافیکی مقایسه خطاهای پیزومتری در دو محیط اشباع کامل و اشباع-غیراشباع

بررسی فشار آب منفذی با فرض محیط اشباع-غیراشباع، حالت سه بعدی و جریان ماندگار

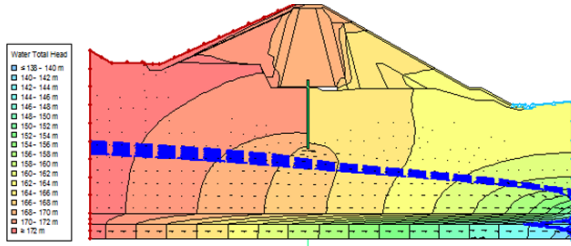
نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی با ۱۰ تراز مختلف در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) نشان داده شده است. همچنین نتایج گرافیکی تحلیل‌ها در شکل‌های (۲۵) تا (۲۸) ارائه شده است.



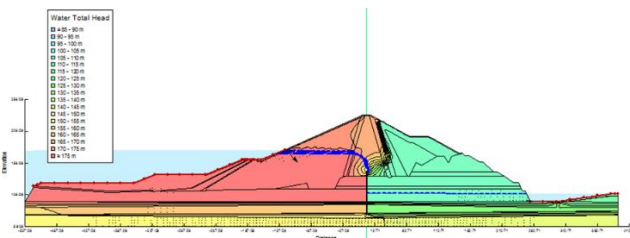
شکل (۲۳): نتایج کالیبراسیون مدل سه بعدی حالت اشباع-غیراشباع



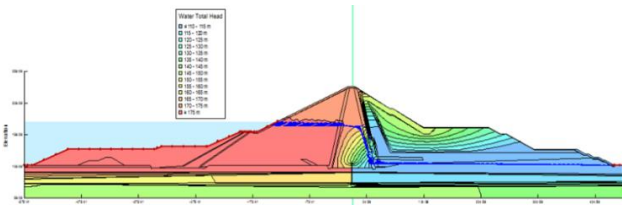
شکل (۲۴): نتایج اعتبارسنجی مدل سه بعدی حالت اشباع-غیراشباع



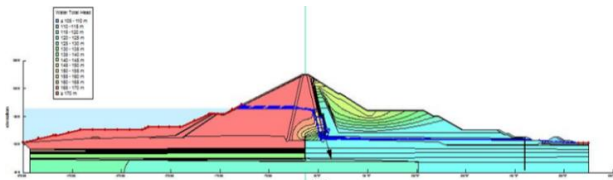
شکل (۳۱): نمایش گرافیکی خطوط هم پتانسیل در تحلیل دو بعدی حالت غیرماندگار مقطع ۱ با فرض حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۱۷۸/۴۲-۱۷۲/۷۸



شکل (۳۲): نمایش گرافیکی خطوط هم پتانسیل دو بعدی در حالت غیرماندگار مقطع ۴ با فرض حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۱۷۸/۱۷۲-۴۲/۷۸

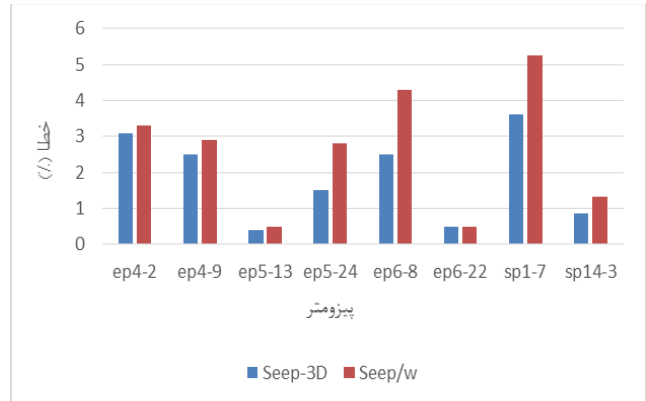


شکل (۳۳): نمایش گرافیکی خطوط هم پتانسیل دو بعدی حالت غیرماندگار مقطع ۵ با فرض حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۱۷۸/۱۷۲-۴۲/۷۸



شکل (۳۴): نمایش گرافیکی خطوط هم پتانسیل دو بعدی حالت غیرماندگار مقطع ۶ با فرض حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۱۷۸/۱۷۲-۴۲/۷۸

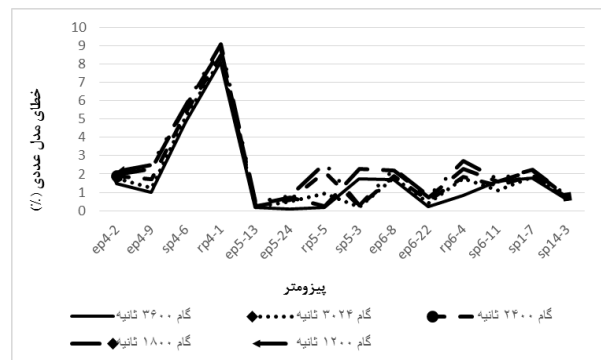
با مقایسه خطاهای دو حالت دوبعدی و سه بعدی دو سناریو نسبت بهم مقایسه شده است (شکل (۲۹)). همانطوریکه مشاهده می شود نتایج سناریو سه بعدی خطای کمتری نسبت به حالت اشباع دارد و نشان از سه بعدی بودن جریان در سد کرخه می باشد.



شکل (۲۹): نمایش گرافیکی مقایسه خطاهای پیزومتری در دو حالت دو بعدی و سه بعدی در حالت ماندگار

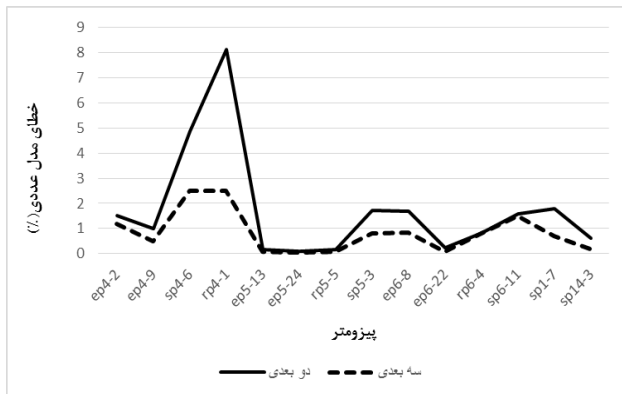
بررسی فشار آب منفذی با فرض محیط اشباع-غیراشباع، حالت دوبعدی و جریان غیرماندگار با اثر تحکیم

در فرایند کالیبراسیون مدل عددی در حالت غیر ماندگار، بهینه ترین گام زمانی بدست آمد. شکل (۳۰) نتایج مربوط به بررسی بهترین گام زمانی را نشان می دهد. این تحلیل با تراز بالادست در بازه ۱۹۹/۷۴-۲۰۰/۳۵ انجام گرفته است. نتایج گرافیکی مدلسازی دوبعدی غیرماندگار در اشکال (۳۱) تا (۳۵) ارائه شده است.

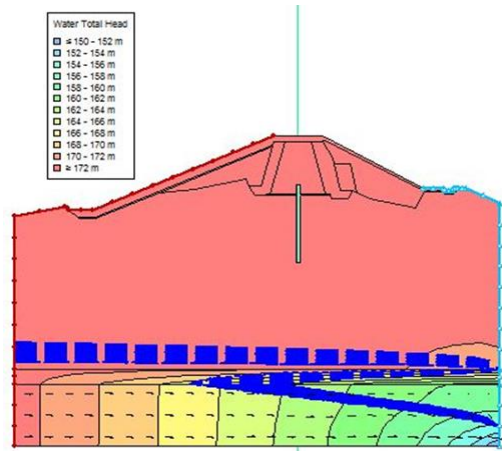


شکل (۳۰): نتایج تحلیل حالت جریان غیر ماندگار با ۵ گام زمانی توسط نرم افزار SEEP/W

انتخاب شده است. با توجه به بازه ۷ روزه و گام زمانی ۳۶۰۰ ثانیه، تعداد گام‌های زمانی ۱۶۸ وارد می‌شود. بدین ترتیب ترازهای مورد نظر ۱۹۹/۷۴ تا ۲۰۰/۳۵ می‌باشد. شکل (۲۹) مقایسه نتایج تحلیلهای دوبعدی و سه بعدی را در مرحله کالیبراسیون نشان می‌دهد. در مرحله اعتبارسنجی، بازه زمانی ۱۶۴۶ تا ۱۶۵۲ روز پس از اولین آبیاری که مانند مرحله کالیبراسیون یک بازه ۷ روزه (۶۰۴۸۰۰ ثانیه) انتخاب شد. در این جا نیز با توجه به بازه ۷ روزه و گام زمانی ۳۶۰۰ ثانیه، تعداد گام‌های زمانی ۱۶۸ وارد گردید. بدین ترتیب ترازهای مورد نظر ۱۷۲/۷۸ تا ۱۷۸/۴۲ می‌باشد. مقایسه نتایج تحلیل دوبعدی و سه بعدی در مرحله کالیبراسیون در شکل (۳۷) و مرحله اعتبارسنجی در شکل (۳۸) نمایش داده شده است. همچنین در مدل سه بعدی علاوه بر بررسی فشار پیژومتری، دبی جریان نیز قابل اندازه‌گیری می‌باشد و با توجه به داده‌های موجود از گالری در جناح راست بین گلسنگ (۳+) و (۲+) و بالای گلسنگ (۳+) که به عنوان منطقه زهکش هستند و در مقطع ۴ قرار دارند و همچنین چاه کاهش فشار در محدوده پایین گلسنگ (۲-) و بین گلسنگ (۲-) و (۱-) که در مقطع ۶ واقع هستند، برای بررسی و کنترل دبی مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۳) نتایج دبی‌سنجی را در تحلیل سه‌بعدی نشان می‌دهد.



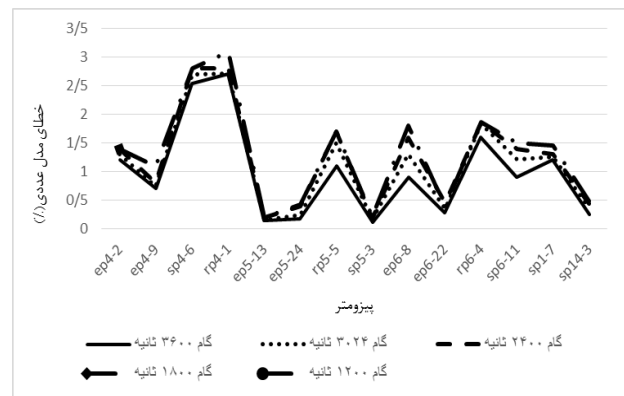
شکل (۳۷): نتایج حاصل از تحلیل دو بعدی و سه بعدی مرحله کالیبراسیون در حالت غیرماندگار



شکل (۳۵): نمایش گرافیکی خطوط هم پتانسیل دو بعدی حالت غیرماندگار مقطع ۱۴ با فرض حالت اشباع-غیراشباع با هد بالادست ۱۷۸/۱۷۲-۴۲/۷۸

بررسی فشار آب منفذی با فرض محیط اشباع-غیراشباع، حالت سه‌بعدی و جریان غیرماندگار با اثر تحکیم

در این بخش همانند حالت دوبعدی نتایج تحلیل با تراز بالادست در بازه ۱۹۹/۷۴-۲۰۰/۳۵ انجام گرفته است که در شکل (۳۶) نشان داده شده است و بهترین گام زمانی ۳۶۰۰ ثانیه بدست آمد.



شکل (۳۶): نتایج تحلیل حالت جریان غیر ماندگار با ۵ گام زمانی توسط نرم‌افزار Seep-3D

بررسی این سناریو نیز همانند سناریوهای قبلی نیاز به کالیبراسیون و اعتبارسنجی دارد، که برای این کار دو بازه یک هفته ای مربوط به دوره‌های اول بهره برداری انتخاب شده است که بازه اول برای کالیبراسیون و بازه دومی برای صحت سنجی نتایج می‌باشد که به صورت‌های دو بعدی و سه بعدی تحلیل شده است. در اینجا بازه زمانی ۱۸۰۷ تا ۱۸۱۳ روز پس از اولین آبیاری که یک بازه ۷ روزه (۶۰۴۸۰۰ ثانیه) می‌باشد، برای کالیبراسیون

تحلیل غیرماندگار، نتایج نشان داد که هرچه گام زمانی بیشتر باشد، نتایج دقیق‌تری خواهیم داشت. با توجه به نتایج تحلیل‌ها و گام‌های زمانی در نظر گرفته شده، گام زمانی ۳۶۰۰ ثانیه دارای نتایج بهتر و درصد خطای کمتری می‌باشد.

۲- با در نظر گرفتن شرایط واقعی محیط متخلخل و جریان در مدل عددی (اثر تحکیم) می‌توان به مدل کاملی رسید که از آن جهت تحلیل شرایط تراز آب مخزن بالاتر که هنوز به وقوع نپیوسته استفاده کرد و پیش‌بینی لازم را جهت جلوگیری از تلفات و خسارات وارده به سد نمود.

۳- نتایج نشان داد که تحلیل غیرماندگار نسبت به تحلیل ماندگار دقیق‌تر می‌باشد.

۴- با توجه به نتایج تحلیل‌های ماندگار و غیرماندگار می‌توان گفت که در برخی از نقاط بدنه سد، مصالح بدنه به حالت اشباع کامل نرسیده و شرایط پایدار کامل وجود ندارد.

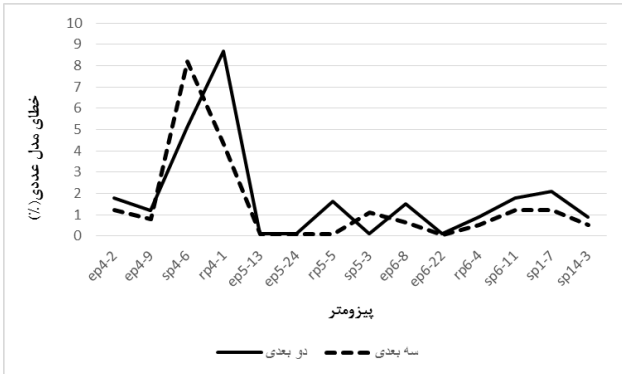
۵- مقایسه نتایج حالت دوبعدی با نرم افزار Seep/w و حالت سه بعدی با نرم افزار Seep-3D نشان می‌دهد که نتایج حالت سه بعدی درصد خطای کمتر و به نتایج ابزار دقیق نزدیک‌تر می‌باشد. که این نشان از دقت روش المان محدود و نرم‌افزار Seep-3D می‌باشد. همچنین دلیلی بر سه‌بعدی بودن جریان آب در بدنه و پی سد کرخه و تاثیر بعد سوم بر دقت نتایج می‌باشد.

۶- با توجه به تطابق خوب نتایج ابزار دقیق و خروجیهای نرم‌افزار Seep-3D، این امکان را به ما می‌دهد که قبل یا بعد از ساخت هر سد خاکی، ارتفاع تراز آب در پیژومترهای مد نظر و همچنین مقدار نشت را مشخص کنیم.

۷- نتایج کنترل دبی نشت نشان از دقت بالای نرم افزار Seep-3D در محاسبه مقدار دبی نشت می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری آقای مهندس جوادی جوکار کارشناس بخش ابزار دقیق شرکت تولید و بهره‌برداری سد نیروگاه برق آبی کرخه در جمع‌آوری اطلاعات لازم قدردانی و تشکر نمایند.



شکل (۳۸): نتایج حاصل از تحلیل دو بعدی و سه بعدی در مرحله اعتبارسنجی در حالت غیرماندگار

جدول (۳): مقدار دبی قرائت و تحلیل شده

خطا (%)	مقدار دبی حاصل از تحلیل (Lit/s)	مقدار دبی قرائت شده (Lit/s)	ناحیه بررسی دبی
۸/۶	۱۰۶	۱۱۶	گالری جناح راست - بین گلسنگ ۳+ و ۲+
۰/۷	۳۷۸	۳۸۱	گالری جناح راست - بالای گلسنگ ۳+
۱/۷	۱۱۲	۱۱۴	چاه کاهش فشار - پایین گلسنگ ۲-
۳/۴	۵۷	۵۹	چاه کاهش فشار - بین گلسنگ ۲- و ۱-

نتیجه گیری

با توجه به سناریوهای مختلف تعریف شده در این تحقیق می‌توان بیان کرد: ۱- با توجه به کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی در

منابع

جوادی جوکار م.، م. شهربان‌زاده و ف. صالحی‌فر، ۱۳۹۴، ارزیابی عددی فشار آب منفذی در بحرانی ترین مقطع سد خاکی با استفاده از نرم‌افزار Seep-3D مطالعه موردی: سد کرخه، کنفرانس و نمایشگاه مهندسی آب، تهران، ایران.



شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۱، گزارش پایانی ایزاردقیق و رفتارنگاری سد کرخه، طرح سد مخزنی کرخه.
شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۷۴، گزارش زمین‌شناسی سد کرخه، مطالعات مرحله دوم، طرح سد مخزنی کرخه.
شهربانوزاده م.، م. حسامی کرمانی و غ. بارانی، ۱۳۸۹، مدلسازی جریان نشت از پی سد با استفاده از نرم افزار Seep-3D مطالعه موردی سد شهید عباسپور، اولین کنفرانس بین المللی مدلسازی گیاه، آب، خاک و هوا، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان، ایران.

Fu J.F. and S. Jin. 2009. A study on unsteady seepage flow through dam. *Journal of Hydrodynamics* 21(4) 499-504.

Geoslope international, Ltd. 2004. Seep3D user manual.

Geoslope international, Ltd. 2018. Seep/w user manual.

Guo X., J. Baroth, D. Dias and A. Simon. 2018. An analytical model for the monitoring of pore water pressure inside embankment dams. *Engineering Structures*, 160, 356–365.

Jin L., Z. Qi, Li. Liang, Wei Xiang. 2019. Monitoring and characterizing the deformation of an earth dam in Guangxi Province, China, *Engineering Geology*, 248, 50–60.

Lam L., D.G. Fredlund and S.L. Barbour. 1987. Transient seepage model for saturated unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach, Department of Civil Engineering, University of saskatchewan, saskatoon, Canada S7, NO W0.

Li G.C. and C.S. Desai. 1983. Stress and seepage analysis of earthen dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 109, 946-960.

Rafieezadeh K. and B. Ataie-Ashtiani. 2014. Transient free-surface seepage in three-dimensional general anisotropic media by BEM. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 46, 51-66.

Ren J., Z.Z. Shen, J. Yang and C.Z. Yu. 2016. Back analysis of the 3D seepage problem and its engineering applications. *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 1-8.

Stanisław L. and O. Leszek. 2017. Using the modified scalar product approach for testing the direction of seepage through the earth-fill dam in Pieczyska, *Journal of Water and Land Development*, No. 33 (IV–VI): 89–98, 1429–7426.

Thieu N.T.M., M.D. Fredlund, D.G. Fredlund and V.R. Hung. 2001. Seepage modeling in a saturated/unsaturated soil system. *International Conference on Management of Land and Water Resources*, MLWR, Hanoi, Vietnam.

Yan X., F. Shu-yan, Z. Kai, Y Hui and F. Zhi-yuan. 2017. Seepage safety monitoring model for an earth rock dam under influence of high-impact typhoons based on particle swarm optimization algorithm, *Water Science and Engineering*, 10(1):70-77.

Yuan S. and H. Zhong. 2016. Three dimensional analysis of unconfined seepage in earth dams by the weak form quadrature element method, *Journal of Hydrology*, No 533, 403–411.



Monitoring Seepage through Dam under Consolidation Using the Finite Element Method, Case Study: Karkheh Dam

Siamak Esmailzadeh¹ Mehrdad Shahrbanouzadeh^{2*}

ABSTRACT

The monitoring of an earth dam refers to the dam's performance in different construction stages, starting with impoundment followed by the exploitation period, which can be achieved in different fields such as seepage and subsidence analysis. This research analyzed Karkheh storage dam's seepage behavior using the finite element method under various scenarios assuming saturated flow, saturated-unsaturated flow, and saturated-unsaturated flow under consolidation in steady and unsteady conditions. The 17-year data obtained from the Karkheh dam's piezometer instrumentation in five sections of the dam's body and foundation were used to improve the accuracy of the parameters and adapt the analyses results to the actual dam conditions. Subsequently, seepage analysis comprising calibration and validation of the numerical model in two-dimensional and three-dimensional states using Seep/w and Seep3D software was conducted under the considered scenarios. Finally, a complete numerical model was obtained based on the actual dam conditions. The results show that three-dimensional flow analysis in the unsteady state under consolidation is more accurate than the two-dimensional state with a 23.5% lower error rate than the 2D approach.

Keywords: Seepage, Monitoring, Consolidation, Finite Element Method, Karkheh Dam.

¹ M.Sc. Graduate of Hydraulic Structure Engineering, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

^{*2} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
Email: m.shahrbanouzadeh@jsu.ac.ir. Corresponding Author.