



## Analysis of seepage in the conditions of increased reservoir capacity by raising the spillway level (Case study: Kamal-Saleh earth dam)

S. Aalimohammadi<sup>1</sup>, N. Shahkarami<sup>1\*</sup>, H. Asadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

<sup>2</sup> Deputy of Planning and Development, Regional Water Company of Markazi, Arak, Iran

### Review History:

Received: Mar. 26, 2020

Revised: May, 23, 2020

Accepted: Jun. 03, 2020

Available Online: Jul. 13, 2020

### Keywords:

Seepage analysis

Kamal-Saleh earth dam

Phreatic surface

Storage capacity increase

Seep/W

**ABSTRACT:** Seepage is one of the main threats to the stability of the earth dam, which can weaken the dam structure and cause piping, washing the earth dam materials inside the body or foundation and eventually its failure. In this study, seepage analysis of Kamal-Saleh earth dam was performed using Seep/W software under three conditions of steady-state, rapid drawdown and end of construction for the current dam as well as for increased spillway level in stable seepage condition. The effect of increasing the height of spillway on the seepage rate inside the body and foundation of the dam, hydraulic gradient and phreatic surface was investigated. To evaluate the dam behavior in the conditions of increasing reservoir capacity, seepage analysis was performed for the current level and increased levels of spillway by one-meter intervals. According to the software results, the dam was safe against seepage in the current spillway level in every three conditions and provided the required factors of safety. In the conditions of increased spillway level, the amounts of seepage and the hydraulic gradients increased and the factors of safety against boiling decreased in a way that by increasing the dam spillway level equal to 4 meters, the seepage through the dam body and foundation increased 85% and the safety factor against boiling decreased 4.5% but in all these conditions, the dam was safe against boiling. In the current and increased levels of the spillway, there are the appropriate similarity of phreatic lines produced by the selected analytical method and Seep/W. The most similarity is seen in the upstream shell and core and the maximum difference is seen in the phreatic line intersection with the downstream slope of the dam.

### 1- Introduction

The dam is an impermeable barrier in front of the water flow that is mainly used to store or divert the flow direction [1]. Some reasons for increasing the capacity of the reservoir include technical problems and limitations during the construction of the dam, reducing the useful storage of the reservoir with the entry of large volumes of sediments over time, increasing the need to store more water over time due to the increase in population and the low cost of increasing the capacity of the current reservoir compared to the construction of a new one [2]. In order to increase the capacity of the dam, methods such as installing gates or fuse gates on the spillways, installing rubber dam along the entire dam crest, raising the level of spillway crest by concreting on it, raising the top of the non-overflow section of the dam are used [3-5].

The aim of this study was to analyze the seepage of the Kamal-Saleh rockfill dam using the Seep/W module of GeoStudio software for the current dam and increased spillway levels.

### 2- Methodology

#### 2- 1- Calculation of phreatic surface

In the present study, two analytical methods, Stello [6]

\*Corresponding author's email: n-shahkarami@araku.ac.ir

and Rezk and Senoon [7], that have been less seen in Persian references have been used to estimate the phreatic surface of the dam. Full details of these methods can be found in the references [6] and [7].

#### 3- Kamal-Saleh rockfill dam

Kamal-Saleh dam is a rockfill dam with a capacity of 110 million cubic meters, a height of 76 meters from the riverbed and 80 meters from the foundation, a crest length of 765 meters and a crest width of 12 meters located 74 km southwest of Arak. Figure 1 shows the typical cross-section of Kamal-Saleh Dam [8].

#### 4- Results and Discussion

##### 4.1. Seep/W verification in seepage calculation

The results of seepage simulation with SEEP/W software compared with the seepage monitored data from the instrumentation system installed in the dam body and foundation. The average error between the estimated seepage discharge values and the actual values was 6.4% and the coefficient of determination was  $R^2=0.98$ , which indicates the appropriate match between the results of the software Seep/W and the instrument and therefore, software results can be considered acceptable.



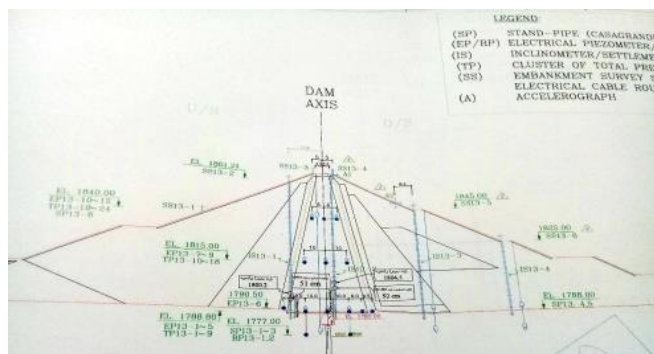


Fig. 1. Typical cross-section of Kamal-Saleh rockfill dam [8]

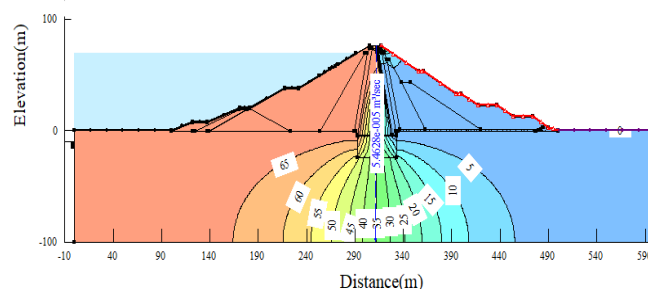


Fig. 2. Total head contour (m) and the amount of seepage discharge for the current level of Kamal-Saleh dam overflow spillway (water height of 69.1 m)

#### 4- 1- Seepage analysis of Kamal-Saleh Dam

Initially, in order to determine the size and type of optimal mesh, the amount of discharge from the analysis for different types of mesh and their size per unit width was investigated. The results showed that the effect of mesh and type size on the rate of seepage is negligible, which is consistent with the findings of many studies, including [9]. Finally, 3-meter mesh was selected as the optimal mesh.

##### 4- 1- 1- Seepage analysis of Kamal-Saleh Dam in current level of the spillway

Seepage analysis of Kamal-Saleh earth dam was analyzed using Seep/W software under three conditions of steady-state, rapid drawdown and end of construction for the current level of the spillway. As an instance, total head contour (m) and the amount of seepage discharge for the current level of Kamal-Saleh dam spillway under steady state are shown in Figure 2.

During rapid drawdown of water in the reservoir, in all parts of the dam body, the pore water pressure decreased almost linearly, indicating that steady-state flow takes place. Water level fluctuations affected the upstream of the dam more rapidly and reduction of pressure occurred at a higher rate. Due to the low velocity of water drainage inside the clay core materials, the least change in the amount of pore water pressure occurred within the core. At the upstream slope, the pore water pressure became negative, which indicates that the water level becomes below the evaluated selected points. The obtained results were consistent with the studies of Fattah et al. [10]. At all points in the upstream slope, the exit hydraulic gradient was smaller than one and therefore, the factor of safety against boiling was greater than one and the dam was stable.

##### 4- 1- 2- Seepage analysis of Kamal-Saleh Dam for increased spillway levels

Seepage analysis was performed under steady-state condition for the current spillway level (water height of 69.1 m). Then, with the increase in the spillway level at one-

meter intervals up to a height of 73.1 meters, the seepage was analyzed for each step. The results showed that the highest rate of discharge from the body and foundation would happen in the condition of raising spillway level by four meters which is equal to 85% increase. In order to check whether this seepage increase causes boiling at the dam downstream, the factor of safety against boiling was calculated for each increased level. This consideration showed that although the factor of safety decreases with raising the spillway level, still its value is more than 3 in all cases and therefore, the dam is safe against boiling.

For up to 4 meters increase in the level of the spillway, the phreatic surface was still at a lower level of the core crest, but by considering the capillary rise, the phreatic surface would be very close to the core crest and so from this point of view, it is not recommended to increase the spillway level by 4 meters. By increasing the spillway level by 5 meters, the phreatic surface passed over the core according to the analytical and numerical methods.

#### 4- 2- Determining the phreatic line within the dam

Comparing the phreatic lines obtained from these two analytical methods, Stello [6] and Rezk and Senoon [7], with the corresponding results in the Seep/W software would specify whether the analytical method can be used like the Seep/W software in drawing the phreatic line and analyzing the permeability of Kamal-Saleh study dam or not.

For the same hypothetical dam, which was used in original references ([6 and 7]), the phreatic line obtained in Seep/W software and the results of analytical and numerical methods were compared. The results showed that among the two analytical methods, the method of Rezk and Senoon is more accurate in drawing the phreatic surface and therefore, it used to determine the phreatic surface of the Kamal-Saleh dam. At the current level of the Kamal-Saleh spillway and in the conditions of raising its levels, there was a good match between the phreatic line that can be drawn from the variables obtained from Rezk and Senoon analytical methods [7] and the Seep/W numerical method.

## 5- Conclusions

Increasing the probability of occurrence of high precipitation amounts and floods in the Kamal-Saleh dam basin due to climate change which can endanger downstream areas and also increasing the need for storing the water of the dam in low water conditions, led to the investigation of the possibility of increasing the dam storage capacity in this study. The plan of raising the spillway level is investigated in this research. The results showed that raising the spillway level up to a height of 4 meters is possible. Of course, it should be noted that the efficiency of this action is controlled from the seepage point of view, and the static and dynamic stability of the slopes should also be examined.

## References

- [1] H. Rahimi, Embankment Dams, Tehran University, Iran, 2013 (in Persian).
- [2] H. Karimian Aliabad, Explaining the Elevation Method in Dam Cure, A Case Study of the Fusegate System in Zarrineh Rood Dam, M.Sc. Thesis in hydraulic structures, Shahid Chamran Ahvaz university, Iran, 2010 (in persian).
- [3] M. Yazdaniyan, H.R. Afshoon, S. Ghasemi, V. Afshoon, F. Fahim, Effect of Height on the Static Stability of Heterogeneous Embankment Dams, Journal of Engineering, Science and Technology, 5(3) (2017) 274-282.
- [4] X.G. Song, Z.D. Zhou, H.B. Zhang, H.Y. Yue, Study on the Capacity Increasing and Dam Heighten of Plain Reservoirs, Journal of Applied Mechanics and Materials, 353-356 (2013) 2531-2536.
- [5] A. Abdulsattar, M. Faris, A. Zedan, Seepage Analysis through an Earth Dam (KHASA-CHAI Dam) as a Case Study, Journal of Engineering and Technology, 35(2) (2017) 172-181.
- [6] M.W. Stello, Seepage charts for homogeneous and zoned embankments, Journal of geotechnical engineering, 113(9) (1987) 996-1012.
- [7] M.A.E.-R.M. Rezk, A.E.-A.A.A. Senoon, Analytical solution of seepage through earth dam with an internal core, Journal of Alexandria Engineering, 50(1) (2011) 111-115.
- [8] L.C.E. Company, Geotechnical reports of Kamal Saleh Dam, Regional Water Authority of Markazi-Arak Province, 2010 (in Persian).
- [9] H. Hasani, J. Mamizadeh, H. Karimi, Stability of slope and seepage analysis in earth fills dams using numerical models (Case Study: Ilam Dam-Iran), Journal of World Applied Sciences, 21(9) (2013) 1398-1402.
- [10] M.Y. Fattah, H.A. Omran, M.A. Hassan, Behavior of an Earth Dam during Rapid Drawdown of Water in Reservoir–Case Study, International Journal of Advanced Research (2015), 3(10) (2015) 110-122.
- [11] stand-alone wind turbine-generator systems, Electrical Engineering in Japan, 150(4) (2005) 13-22.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Aalimohammadi, N. Shahkarami, H. Asadi, Analysis of seepage in the conditions of increased reservoir capacity by raising the spillway level (Case study: Kamal-Saleh earth dam), Amirkabir J. Civil Eng., 53(9) (2021) 865-868.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18161.6786







## تحلیل تراوش در شرایط افزایش ظرفیت مخزن با بالا بردن تراز سرریز (مطالعه موردی: سد خاکی کمال صالح)

ساناز عالی محمدی<sup>۱</sup>، نازنین شاه کرمی<sup>۱\*</sup>، حسین اسدی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران  
۲- معاونت طرح و توسعه شرکت سهامی آب منطقه ای مرکز.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۷  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۳  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

### کلمات کلیدی:

تحلیل تراوش  
سد خاکی کمال صالح  
سطح فریاتیکی  
افزایش ظرفیت مخزن  
Seep/W

**خلاصه:** تراوش یکی از دلایل اصلی تهدید پایداری سدهای خاکی است که می تواند سازه سد را تضعیف و سبب جوشش، شسته شدن مصالح درون بدنه یا پی سد و نهایتاً تخریب آن گردد. در این تحقیق تحلیل تراوش سد خاکی کمال صالح با استفاده از نرم افزار Seep/W در سه شرایط تراوش پایدار، افت سریع و پایان ساخت برای وضعیت فعلی سد و همچنین برای افزایش تراز سرریز در شرایط تراوش دائمی انجام شد. تأثیر افزایش ارتفاع سرریز بر روی میزان تراوش از بدنه و پی سد، گرادیان هیدرولیکی و سطح فریاتیکی بررسی گردید. به منظور بررسی رفتار سد در شرایط افزایش ظرفیت مخزن، تحلیل تراوش برای تراز فعلی سرریز و افزایش تراز در گام های یک متری انجام شد. بر اساس نتایج نرم افزار، سد در برابر تراوش برای تراز فعلی سرریز در هر سه شرایط پایدار بود و ضرایب اطمینان لازم را تأمین می کرد. در شرایط افزایش تراز سرریز، مقدار تراوش و گرادیان هیدرولیکی خروجی افزایش و ضریب اطمینان در برابر جوشش کاهش یافت به طوری که با افزایش تراز سرریز سد به میزان ۴ متر، مقدار تراوش عبوری از بدنه و پی سد ۸۵ درصد و ضریب اطمینان در برابر جوشش ۴/۵ درصد کاهش یافت اما در تمام این شرایط سد در برابر جوشش پایدار بود. در ارتفاع فعلی سرریز و در شرایط افزایش ارتفاع، تطابق مناسبی بین خط فریاتیکی حاصل از روش تحلیلی منتخب و محاسباتی وجود داشت. بیشترین تطابق در پوسته بالادست و هسته و بیشترین اختلاف در محل برخورد خط فریاتیکی با دامنه پایین دست سد دیده شد.

### ۱- مقدمه

محققین بسیاری جهت تعیین سطح فریاتیکی روشهای تحلیلی را ارائه دادند. Stello (۱۹۸۷) برای محاسبه مقدار نشت و ارتفاع محل برخورد سطح فریاتیکی با هسته و پوسته پایبندست برای سدهای همگن و غیرهمگن قرار گرفته بر روی پی نفوذناپذیر و با استفاده از روش قطعات، نمودارهایی را ارائه داد [۸]. Rezki در سال ۱۹۹۵ برای تعیین مسیر جریان و سطح فریاتیکی درون سد خاکی، مقطع سد خاکی را در آزمایشگاه مدل کرد و سطح فریاتیکی را به صورت تجربی به دست آورد [۹]. Rezk و Senoon در سال ۲۰۱۱ بر اساس مطالعات تجربی پیشین Rezk (۱۹۹۵) که برای سد خاکی دارای هسته انجام شده بود، یک روش تحلیلی را برای ترسیم سطح فریاتیکی توسعه دادند و نتایج حاصل از دو روش را مقایسه کردند [۱۰].

Fei و Kasim (۲۰۰۲) شبیه سازی عددی رفتار جریان درون بدنه سد خاکی را با استفاده از نرم افزار Seep/W انجام دادند. در آن تحقیق تأثیر ضریب نفوذپذیری روی مقدار تراوش بررسی شد و مقدار تراوش با مقادیر متعدد ضریب نفوذپذیری برای هسته و پایین دست به دست آمد. نتایج نشان داد که نشت کل در پایین دست با مقدار ضریب نفوذپذیری

سد، حائلی ناتراوا در برابر جریان آب است که عمدتاً به منظور ذخیره کردن یا انحراف مسیر آب استفاده می شود [۱]. از دلایلی که مبادرت به افزایش ظرفیت مخزن میشود میتوان به مسائل و محدودیتهای فنی در زمان ساخت سد، کاهش حجم مفید مخزن با ورود حجم زیادی از رسوبات در طی زمان، افزایش نیاز به ذخیره حجم آب بیشتر با گذشت زمان از ساخت سدها به دلیل افزایش جمعیت و کم بودن هزینه افزایش ظرفیت مخزن در مقایسه با احداث یک سد جدید اشاره کرد [۲]. به منظور افزایش ظرفیت مخزن سد از روشهایی مانند فیوزگیت، دریچه قطاعی، سد لاستیکی، بتنریزی روی سرریز اصلی، دریچه دار کردن سرریز، افزایش ارتفاع سد [۳-۷] استفاده می شود.

سطح فریاتیکی اولین خط جریان تشکیل شده درون سد خاکی است و محل قرارگیری آن به سبب جلوگیری از احتمال روگذری در سدهای خاکی از اهمیت بالایی برخوردار است و به روشهای مختلفی تعیین می گردد.

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: n-shahkarami@araku.ac.ir



[۱۰] و Stello [۸] استفاده شده است. همچنین اثر اندازه و نوع مش بر نتایج تحلیل تراوش بررسی گردید.

## ۲- تراوش سدهای خاکی و سنگریزه‌ای

تراوش باعث تلف شدن آب ذخیره شده در پشت سازه خاکی، ایجاد فشار منفذی در محیط متخلخل، کاهش تنش مؤثر بین ذرات خاک و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آن، اعمال فشار بالابر بر سازه‌های غیرقابل نفوذ در محیط و اعمال نیروی نشست بر توده خاک در جهت جریان میشود. تراوش یکی از دلایل گسیختگی سدهای خاکی است که سبب تضعیف سازه سد و سپس گسیختگی ناگهانی در اثر جوشش یا پوسته‌ای شدن می‌شود [۱].

### ۱-۲ معادلات لاپلاس و شبکه جریان

برای حرکت آب در خاک برای جریان ماندگار در محیط متخلخل از معادله لاپلاس استفاده می‌شود که برای المانی از خاک به ابعاد  $d_x$ ،  $d_y$  و  $d_z$  به شکل رابطه ۱ است.  $k_x$ ،  $k_y$  و  $k_z$  به ترتیب ضریب نفوذپذیری توده خاک در جهات X، Y و Z در سه امتداد عمود بر هم و  $h$  نشان دهنده پتانسیل آب است [۱].

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

در شرایط معمولی میتوان حرکت آب را به صورت دو بعدی بررسی نمود و این فرض در اکثریت مقاطع محیط نفوذپذیر سد خاکی واقعا بدون تقریب است و در تحقیق حاضر نیز این فرض پذیرفته شده است. در یک محیط دو بعدی به منظور حل ترسیمی معادله ۱ می‌توان از شبکه جریان استفاده نمود. شبکه جریان برای محاسبه مقدار تراوش در محیط متخلخل، محاسبه فشار بالابرنده، محل مناسب تعبیه فیلتر و مشاهده و بررسی شکل کلی جریان کاربرد دارد. مقدار دبی کل جریان از روی شبکه جریان مطابق با رابطه ۲ است [۱].

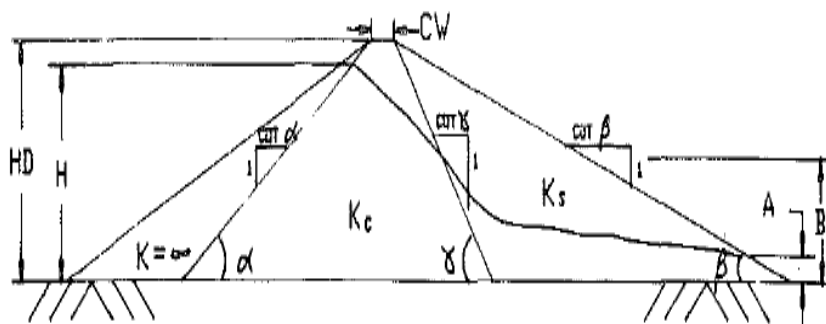
$$q = k \cdot h \cdot \frac{n_f}{n_d} \cdot \frac{a}{b} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $a$  و  $b$  اضلاع عمودی و افقی بلوکها،  $K$  ضریب نفوذپذیری خاک،  $h$  اختلاف هد بین بالادست و پاییندست،  $n_f$  تعداد کانال‌های جریان

تغییر می‌کند. نشست بیش از مقدار مجاز می‌تواند سبب فرسایش درونی و جوشش و در نهایت گسیختگی سد خاکی شود [۱۱]. Zomorodian و Abdollahzadeh (۲۰۱۰) مقدار تراوش درون سد خاکی را با استفاده از نرم افزار Seep/W تعیین کردند. تغییرات فشار آب حفرهای و تراوش خروجی در این تحقیق به دست آمد [۱۲]. Ismaeel و Noori (۲۰۱۱) خط فریاتیکی، مقدار نشست درون بدنه، توزیع فشار آب حفره‌ای و اندازگیری هد با استفاده از نرم‌افزار Seep/W در سد خاکی Duhok را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج با افزایش نسبت ضریب نفوذپذیری افقی به قائم، محل خط فریاتیکی دچار تغییر گردید و در ارتفاع بالاتری قرار گرفت [۱۳]. Andreea در سال ۲۰۱۶ تحلیل نشست در حالت غیراشباع را به منظور جلوگیری از نشست درون سد Maneciu با استفاده از نرم افزار Seep/W انجام داد. خط نشست برای سه مرحله پایان ساخت، تراوش دائمی و افت سریع مخزن ارائه و هد فشاری نیز در سه مرحله و به روش Parish، Carsel، Rawle محاسبه شد [۱۴]. اثر نوع و اندازه مش بر نتایج تراوش Seep/W در پژوهشهای گذشته [۱۶ و ۱۵] بررسی شده است. طبق نتایج، تفاوت نرخ نشست برای سایزهای مختلف مش ناچیز است.

اثرات جانبی تراوش بر سدهای خاکی مانند جوشش و بالازدگی نیز در تعدادی از مطالعات گذشته [۱۸ و ۱۷] با استفاده از روش المان محدود Seep/W مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات گرادیان هیدرولیکی در نقاط مختلف از بدنه سد، محاسبه و جهت بررسی ضریب اطمینان برابر جوشش به کار گرفته شد. در هنگام تراوش، اگر گرادیان هیدرولیکی برای جابجایی ذرات خاک به اندازه کافی بزرگ باشد فرسایش و جوشش میتواند پایداری سازه خاکی را تهدید نماید. در پژوهش [۱۸] افزایش ارتفاع آب از تراز ۱۱۵ به ۱۴۳ متر، باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی به میزان ۲۱۸٪ شد که به معنی کاهش ضریب اطمینان در برابر جوشش از ۱۰ به ۳/۱ بوده است.

به منظور تحلیل تراوش سدهای خاکی از نرم افزارهای متعددی می‌توان بهره گرفت. این تحقیق با هدف تحلیل تراوش سد سنگریزه‌ای کمال صالح با استفاده از نرم افزار المان محدود Seep/W از زیر مجموعه Geostudio2012 برای شرایط پایان ساخت، افت سریع و تراوش دائمی انجام گرفت و سپس ضمن افزایش ظرفیت مخزن سد، تاثیر تراز سرریز بر روی تراوش و سطح فریاتیکی در شرایط تراوش دائمی و به روش تحلیلی و محاسباتی بررسی گردید. به این منظور در روش محاسباتی از نرم افزار المان محدود Seep/W و در روش تحلیلی از روشهای Rezk و Senoon



شکل ۱. مقطع سد و پارامترهای مورد بررسی در روش Stello [۸]

Fig. 1. Cross section of the dam and the parameters studied in Stello method [8]

مشهور است. دانستن محل این خط برای ترسیم شبکه جریان ضروری است. در اکثر تحقیقات مرتبط انجام شده، به دست آوردن این خط یا به روش تحلیلی و یا به صورت عددی صورت گرفته است. عموماً نتایج تحقیقات، حاکی از دقت بالاتر خط فریاتیکی رسم شده با نرم‌افزارهای مرسوم در مقایسه با روشهای تحلیلی است، حال آن که روشهای تحلیلی نیز با توجه به امکان استفاده از روابط عموماً ساده تر مربوط به تراوش جریان از سد حاکی ارزشمند میباشند. در تحقیق حاضر سعی شده است از دو روش تحلیلی که در منابع فارسی کمتر به کار رفته‌اند، در برآورد سطح فریاتیکی سد فرضی استفاده شود و در ادامه برای همان سد، خط فریاتیکی در نرم افزار Seep/W به دست آمده و نتیجه دو روش تحلیلی و عددی مقایسه گردد.

در مقایسه خطوط فریاتیکی به دست آمده از این دو روش با نتایج نظیر در نرم افزار Seep/W مشخص مینماید که آیا میتوان روش تحلیلی را همانند نرم‌افزار Seep/W در ترسیم خط فریاتیکی و تحلیل تراوش سد مطالعاتی کمال صالح توصیه نمود و یا خیر.

### ۲-۳-۱ روش تحلیلی Stello در ترسیم سطح فریاتیکی [۸]

Stello برای محاسبه مقدار نشت و محاسبه نقاط بحرانی روی سطح فریاتیکی روابط تحلیلی را برای دو نوع سد همگن و غیرهمگن ارائه داده است. مقطع سد غیر همگن مورد مطالعه در این روش مطابق با شکل ۱ است. در این روش با استفاده از تعدادی نمودار و جداول ضرایب تصحیح،

و  $n_d$  تعداد افت خطوط هم پتانسیل است.

### ۲-۲ مویبگی

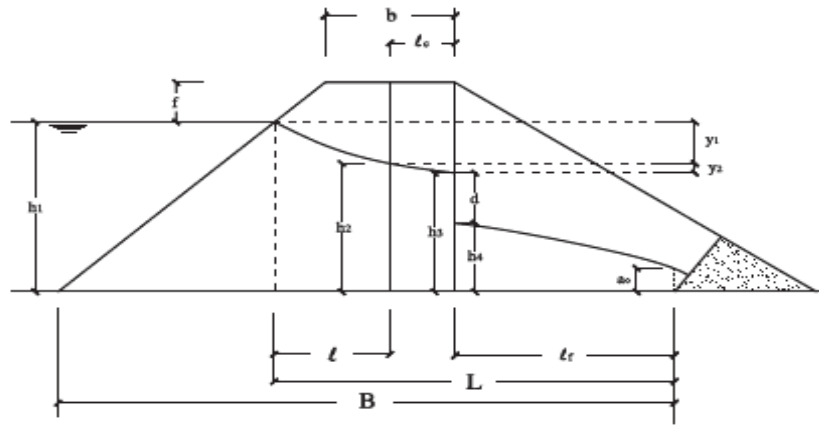
در خاکهایی از جنس سیلت و ماسه ریزدانه (خاکهای مستعد مویبگی)، حفرات به هم پیوسته خاک مانند لوله های مویب عمل می کنند و باعث صعود آب در خاک و مرطوب شدن آن در ناحیه صعود مویبگی می گردند. در سد حاکی ممکن است در محل هسته نفوذناپذیر این پدیده رخ دهد و این در صورتی است که تاج هسته بالاتر از خط فریاتیکی بوده است. در این شرایط احتمال روگذری جریان از هسته و در نتیجه خطر انهدام سد حاکی وجود دارد. لذا بایستی این ارتفاع در محاسبات منظور گردد. ارتفاع صعود مویبگی از رابطه ۳ محاسبه می شود [۲۰].

$$h_c = -990 \times (\ln D_{10}) - 1540 \quad (3)$$

$h_c$  ارتفاع صعود مویبگی و  $D_{10}$  قطر مربوط به ده درصد وزنی اندازه ذرات برحسب میلی متر است.

### ۲-۳ روشهای تحلیلی رسم سطح فریاتیکی

اولین خط جریان در داخل بدنه سد حاکی به خط زه آزاد یا خط فریاتیکی



شکل ۲. مقطع سد و پارامترهای مورد بررسی در روش Senoon و Rezk [۱۰]

Fig. 2. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

$$Q_1 = k_d \cdot a_0 \quad (5)$$

$$Q_1 = \frac{k_d}{2l_f} (h_4^2 - a_0^2) \quad (6)$$

$$Q_1 = \frac{k_d}{2l} (2h_1 y_1 - y_1^2) \quad (7)$$

$$Q_1 = \frac{k_c}{2l_c} [(h_1 - y_1)^2 - (h_1 - y_1 - y_1)^2] \quad (8)$$

$$d = h_1 - (y_1 + y_2 + h_4) \quad (9)$$

ارتفاع محل برخورد سطح فریاتیکی با هسته در پایبندست (B) و دامنه پایبندست سد (A) به صورت تحلیلی استخراج شده است که شرح کامل آن‌ها در مرجع [۸] موجود است.

۲-۳-۲ روش تحلیلی Senoon و Rezk در ترسیم خط فریاتیکی [۱۰] یک

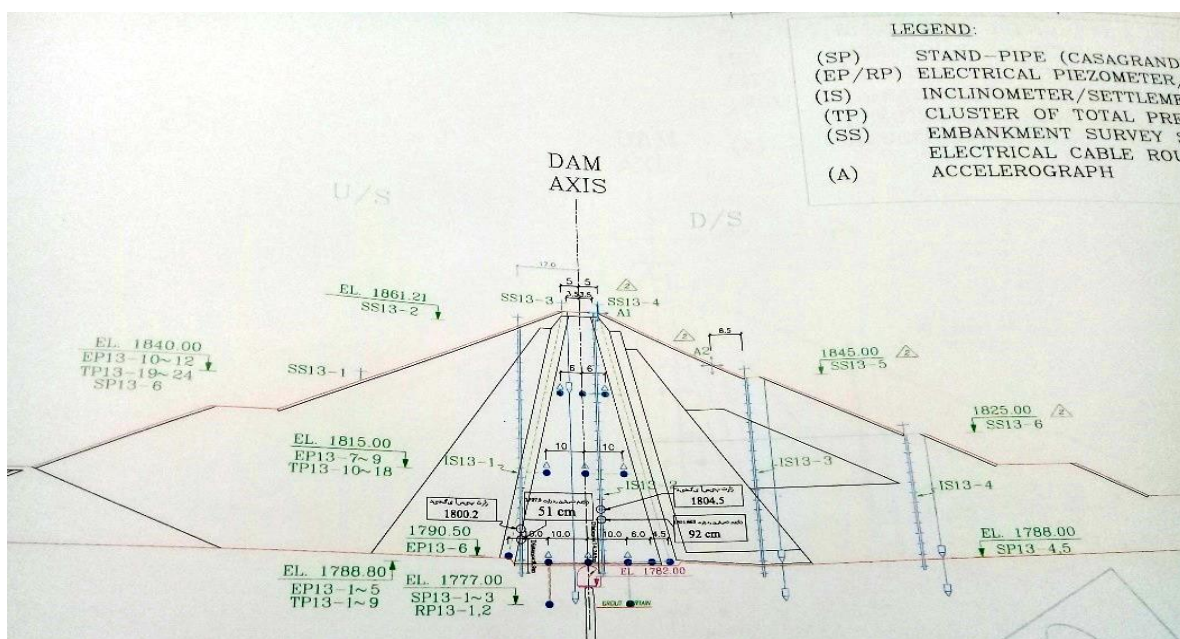
روش تحلیلی را برای ترسیم سطح فریاتیکی توسعه دادند. در شکل ۲، مقطع سد مورد مطالعه توسط آن‌ها و متغیرهای مهم نشان داده شده است. طبق فرضیات، ارتفاع محل برخورد سطح فریاتیکی با انتهای هسته ( $h_4$ ) از رابطه ۴، ارتفاع محل برخورد سطح فریاتیکی با ابتدای فیلتر ( $a_0$ ) و دبی عبوری از سد ( $Q_1$ ) از رابطه های ۵ و ۶ محاسبه می شود. مقدار  $Y_1$  (افت قائم سطح فریاتیکی در پوسته بالادست) و  $y_2$  (افت قائم سطح فریاتیکی در هسته) طبق شکل ۲ به ترتیب از رابطه های ۷ و ۸ و نهایتاً افت سطح فریاتیکی در محل خروج از هسته (d) از رابطه ۹ به دست می آید. این محققین نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته  $\left(\frac{k_c}{k_d}\right)$  مورد بررسی را در محدوده ۰/۱ تا ۰/۸ در نظر گرفتند.

### ۳- سد سنگریزهای کمال صالح

سد کمال صالح از نوع خاکی سنگریزهای با ظرفیت ۱۱۰ میلیون مترمکعب، ارتفاع ۷۶ متر از بستر رودخانه و ۸۰ متر از پی، طول تاج ۷۶۵ متر و عرض تاج ۱۲ متر در ۷۴ کیلومتری جنوب غرب اراک و ۴۶ کیلومتری جنوب شهر شازند واقع گردیده است. تراز بستر رودخانه ۱۷۹۲ متر، تراز تاج

$$\frac{h_4}{h_1} = 0.7969 \left(\frac{k_c}{k_d}\right)^{0.4347} \quad (4)$$





شکل ۳. مقطع عرضی تیبیک سد سنگریزه ای کمال صالح [۱۹]

Fig. 3. Typical cross section of Kamal-Saleh rockfill dam [19]

شکل مقاطع ابزارگذاری شده سد نشان داده شده است. علائم اختصاری به کار رفته در شکل، نشان دهنده انواع پیزومترها و ابزار دقیق های اندازه گیری نشست در سد طبق راهنمای موجود در شکل است [۱۹]. در جدول ۱ ضریب هدایت هیدرولیکی مصالح تشکیل دهنده بدنه سد طبق گزارشات ژئوتکنیک سد کمال صالح ارائه شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- واسنجی نرم افزار Seep/W در محاسبه دبی تراوش

جهت واسنجی نرم افزار Seep/W، دبی حاصل از نرم افزار با نتایج ابزار دقیق سد در سال ۱۳۹۷ مقایسه شد. محل قرارگیری ابزارهای دقیق در شکل ۳ مشخص است، در این شکل علامتهای اختصاری SP و EP به ترتیب معرف پیزومترهای کاساگراند و الکترونیک می باشند. در جدول ۲ مقادیر دبی تراوش در تراز محل قرارگیری ابزارهای دقیق حاصل از نرم افزار Seep/W، مقادیر متناظر حاصل از ابزار دقیق و درصد اختلاف آنها ارائه شده است. بر این اساس میانگین خطای مقادیر محاسباتی ۶/۴ درصد و ضریب تعیین دبی تراوش حاصل از نرم افزار و ابزار دقیق (ستون های ۲ و

سد ۱۸۶۸/۳ متر، تراز نرمال ۱۸۶۱/۱ (۶۹/۱ متر ارتفاع آب) و لذا ارتفاع آزاد ناخالص ۷/۲ متر است. هسته سد از نوع رسی قائم بوده و تاج هسته ۲/۵ متر پایینتر از تاج سد است.

حجم بالای بارندگیها در حوضه سد کمال صالح می تواند مناطق پایبندست (مروک و لرستان) را با خطر سیلاب مواجه کند. بارندگیهای زمستان ۱۳۹۷ در حوضه سد کمال صالح و سرریز شدن آب از سرریز کناری سد در این تاریخ و چند سال گذشته شاهدهی بر این ادعا بوده است. با توجه به وجود ارتفاع آزاد کافی در سد، طرح افزایش ارتفاع سرریز سد از گزینههای قابل بررسی برای کنترل و تعدیل سیلابهای احتمالی است که میتواند ضمن جلوگیری از حوادث احتمالی، قابلیت ذخیره حجم بالایی از آب را با توجه به شرایط کمآبی منطقه فراهم کند. در این تحقیق امکان افزایش ظرفیت مخزن سد به روش افزایش تراز سرریز با استفاده از نرم افزار Seep/W از جنبه تراوش درون بدنه سد شبیه سازی شده است. افزایش ارتفاع سد، قابلیت ذخیره آب را افزایش داده و از مشکلات پیشبینی شده (مانند افزایش کمآبی استان مرکزی و سیلاب در پایبندست سد) جلوگیری خواهد کرد. شکل ۳ مقطع عرضی تیبیک سد کمال صالح را نشان می دهد، ضمن آن که در این

جدول ۱. ضرایب هدایت هیدرولیکی مصالح به کار رفته در سد کمال صالح (Kx) در جهت x و (Ky) در جهت y [۱۹]

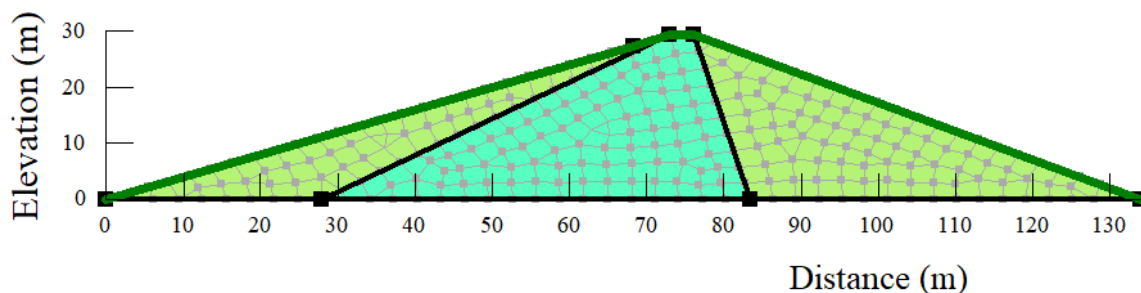
Table 1. Hydraulic coefficients of material used in Kamal-Saleh Dam in x direction (Kx) and y direction (Ky) [19]

$\frac{k_x}{k_y}$	$K_y \left(\frac{m}{s}\right)$	$K_x \left(\frac{m}{s}\right)$	ناحیه
۱۰	$10^{-9}$	$10^{-8}$	هسته
۱	$10^{-3}$	$10^{-2}$	پوسته سنگریز
۴	$10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	پوسته رودخانه‌ای
۱	$10^{-4}$	$10^{-4}$	پوسته سنگریز فیلیتی
۴	$10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	فیلتر
۱	$5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$	زهکش
۱	$10^{-7}$	$10^{-7}$	پی سنگی

جدول ۲. مقایسه دبی تراوش عبوری (Q) از سد کمال صالح حاصل از نرم افزار Seep/W و ابزار دقیق (سال ۱۳۹۷)

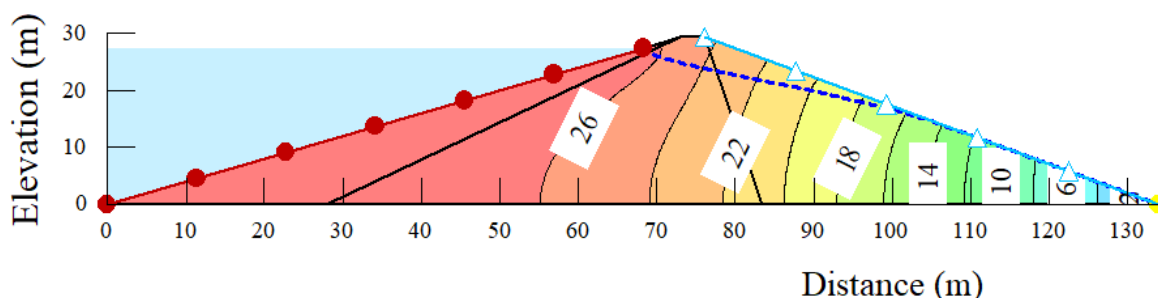
Table 2. Comparison of seepage discharge flow (Q) from Kamal Saleh Dam resulting from Seep/W software and instrumentation (year 1397)

درصد اختلاف	Q ( $\frac{lit}{sec}$ )		ارتفاع از پی (m)
	Seep/W	ابزار دقیق	
۵/۷	۱۹/۷۳	۱۸/۶۶	۵۹/۸۲
۴/۵	۱۹/۱۲	۱۸/۲۹	۵۹/۴۷
۲/۹	۱۷/۵۹	۱۷/۰۹	۵۸/۰۲
۱۰/۲	۱۶/۰۶	۱۴/۵۷	۵۶/۵
۸/۹	۱۴/۵۳	۱۳/۳۴	۵۵/۸



شکل ۴. شبکه مش بندی مقطع سد فرضی مورد مطالعه Stello [۸] مدل شده در Seep/W

Fig. 4. A cross-section of the mesh network in a hypothetical dam studied by Stello [8] modeled in Seep/W



شکل ۵. کانتور هد کل (m) و سطح فریاتیگ مقطع سد فرضی مورد مطالعه Stello [۸] مدل شده در Seep/W

Fig. 5. Total head contour (m) and phreatic surface of the cross section of the hypothetical dam studied by Stello [8] modeled in Seep/W

( به دست آمدند (ستون ۲ و ۳ جدول ۳). در گام بعد همان سد فرضی (با مشخصات هندسی و نسبت‌های نفوذپذیری یکسان) در نرم افزار Seep/w مدل‌سازی (شکل ۴) و تحلیل گردید. شکل ۵ کانتور هد کل و سطح فریاتیگ حاصل از تحلیل تراوش در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج به دست آمده برای متغیرهای شکل ۱ حاصل از هر دو روش مذکور، در جدول ۳ ارائه گردیده است. مقایسه نتایج دو روش تحلیلی و محاسباتی ارزیابی شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که هر چند انطباق مقادیر به دست آمده برای محل برخورد سطح فریاتیگ با پوسته پایبندست (A/H) در نسبت نفوذپذیری پوسته به هسته متفاوت را تا حدودی می‌توان قابل قبول در نظر گرفت، اما مقادیر

۳ در جدول ۲)  $R^2 = 0.98$  حاصل شده است که نمایانگر تطابق مناسب بین نتایج حاصل از نرم‌افزار Seep/W با ابزار دقیق بوده و لذا می‌توان نتایج نرم افزار را قابل قبول فرض نمود.

۴-۲- امکانسنجی تعیین خط فریاتیگ با استفاده از روش تحلیلی Stello در این بخش از تحقیق، به منظور بررسی امکان پیش بینی سطح فریاتیگ با روش تحلیلی Stello [۸] و مقایسه نتایج حاصل از این روش با نتایج نرم افزار Seep/W، متغیرهای نشان داده شده در مقطع فرضی شکل ۱، ابتدا با استفاده از روش تحلیلی مذکور برای ارتفاع آب بالادست  $(\frac{H}{k_s})$  مساوی ۳۰ متر و به ازای نسبت‌های متفاوت نفوذپذیری پوسته به هسته  $(\frac{k_s}{k_c})$

جدول ۳. مقایسه مقادیر متغیرهای شکل ۱ حاصل از Seep/W و Stello [۸] برای نسبت های مختلف نفوذپذیری پوسته به هسته سد فرضی با  $H = 30$  (m) ( $K_s/K_c$ )

Table 3. Comparison of the variable values in Figure 1 from Seep/W and Stello [8] for different ratios of shell in hypothetical dam with  $H = 30$  (m) permeability to the core permeability ( $K_s/K_c$ )

مقدار اختلاف (%)		Seep/W		Stello		$\frac{K_s}{K_c}$
$\frac{B}{H}$	$\frac{A}{H}$	$\frac{B}{H}$	$\frac{A}{H}$	$\frac{B}{H}$	$\frac{A}{H}$	
۱۹	۱۲	۰/۷۸	۰/۵۱	۰/۹۳	۰/۵۸	۱
۲۲	۱۴	۰/۶۵	۰/۲۲	۰/۷۹	۰/۱۹	۵
۶۹	۱۵	۰/۴۵	۰/۱۳	۰/۷۶	۰/۱۱	۱۰
۴۵۳	۰	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۷۲	۰/۰۱	۱۰۰

به پوسته بین ۰/۱ تا ۰/۸ انجام شده است که در این تحقیق برای نسبت های نفوذپذیری کمتر از ۰/۱ و بیش از ۰/۸ نیز تحلیل انجام شد. نتایج حاکی از انطباق قابل قبول سطح فریاتیکی به دست آمده از این روش تحلیلی با آنچه از نرم افزار حاصل شده است، می باشد. ضمن آن که با کاهش  $\frac{k_c}{k_d}$ ، میزان انطباق نتایج افزایش می یافت.

#### ۴-۴- تحلیل تراوش سد کمال صالح

در ابتدا به منظور تاثیر اندازه و نوع مش و تعیین مش بهینه، میزان دبی حاصل از تحلیل برای انواع مش و اندازه آن برای عرض واحد سد بررسی و نتایج در شکل ۸ ارائه شد. طبق شکل ۸، تاثیر اندازه و نوع مش بر میزان تراوش ناچیز است که این نتیجه با یافته بسیاری از محققین از جمله [۱۵] منطبق است. در نهایت مش ۳ متر به دلیل پراکندگی کمتر در نتایج برای انواع مش، زمان کوتاه جهت تحلیل مدل Seep/W و نزدیکی به نتایج رفتارنگاری سد به عنوان مش بهینه انتخاب شد. با افزایش اندازه مش، نسبت به مش ۳ متر، انطباق نتایج تحلیل و گزارشهای سد کمتر و با کاهش بیشتر اندازه مش، زمانی طولانی جهت تحلیل مدل صرف می شد.

محل برخورد سطح فریاتیکی با دامنه پایبندست ( $B/H$ ) به دست آمده از روش درصد اختلاف زیادی با یکدیگر داشته و با افزایش نسبت نفوذپذیری پوسته به هسته نیز، این اختلاف بیشتر می گردد و لذا در کل نمی توان روش Stello را به منظور ترسیم سطح فریاتیکی توصیه نمود.

#### ۴-۳- امکان سنجی تعیین خط فریاتیکی با استفاده از روش تحلیلی Rezk و Senoon [۱۰]

همانند بخش قبل به منظور بررسی امکان تعیین خط فریاتیکی سد خاکی به روش تحلیلی، این بار خط فریاتیکی همان سد فرضی به کار رفته توسط Rezk و Senoon (شکل ۲) برای ارتفاع آب بالادست ( $h_1$ ) مساوی ۱۲ متر به روش تحلیلی Rezk و Senoon [۱۰] به دست آمد (جدول ۴). سپس همان سد فرضی در نرم افزار Seep/w مدل شد (شکل ۶) و متغیرهای لازم برای ترسیم خط فریاتیکی به دست آمد (جدول ۵). شکل ۷ کانتور هد کل و سطح فریاتیکی حاصل از تحلیل تراوش مدل شده در Seep/W را نشان می دهد. در هر دو روش به منظور ارزیابی تاثیر نفوذپذیری مصالح بر خط فریاتیکی، تحلیل برای نسبت های مختلف نفوذپذیری هسته ( $K_c$ ) به پوسته ( $K_d$ ) صورت گرفته و نتایج ارائه شده است.

محاسبات Rezk و Senoon (۲۰۱۱) برای نسبت نفوذپذیری هسته

جدول ۴. مقادیر متغیرهای شکل ۲ حاصل از روش تحلیلی Rezk و Senoon [۱۰] برای نسبت های مختلف نفوذپذیری هسته (Kc) به پوسته (Kd) سد فرضی با  $h_1=12(m)$

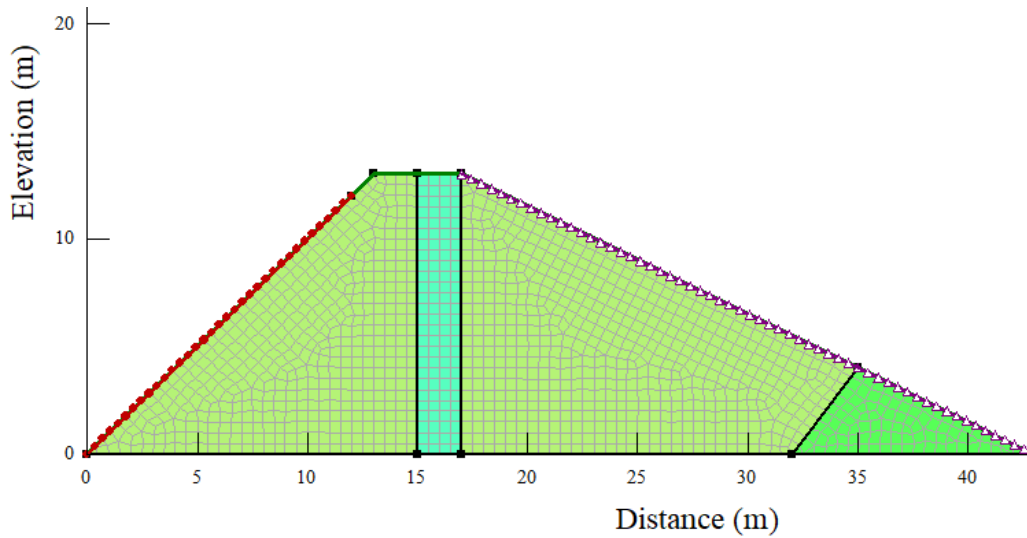
Table 4. The variable values in Figure 2 from Rezk and Senoon analytical method [10] for different ratios of core permeability to the shell permeability (KC/Kd) in hypothetical dam with  $h_1 = 12$  (m)

$\frac{K_c}{K_d}$							
۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۴	۰/۸	۱	
۰/۰۶۱	۰/۱۱۷	۰/۴۷	۳/۵۱	۶/۴۲	۸/۶۷	۹/۵۶	$h_4$
۰	۰	۰/۰۵	۰/۴۱	۱/۳۱	۲/۳۲	۲/۷۸	$a_0$
۱۱/۹۹	۱۱/۹۹	۱۱/۹۹	۱۱/۹۰	۱۱/۶۶	۱۱/۴	۱۱/۲۸	$h_2$
۱۰/۱۳	۱۰/۲۱	۱۰/۶۶	۷/۶۸	۴/۶۷	۲/۲۱	۱/۲۱	$d$

جدول ۵. مقادیر متغیرهای شکل ۲ حاصل از Seep/W برای نسبت های مختلف نفوذپذیری هسته (Kc) به پوسته (Kd) سد فرضی با  $h_1=12(m)$

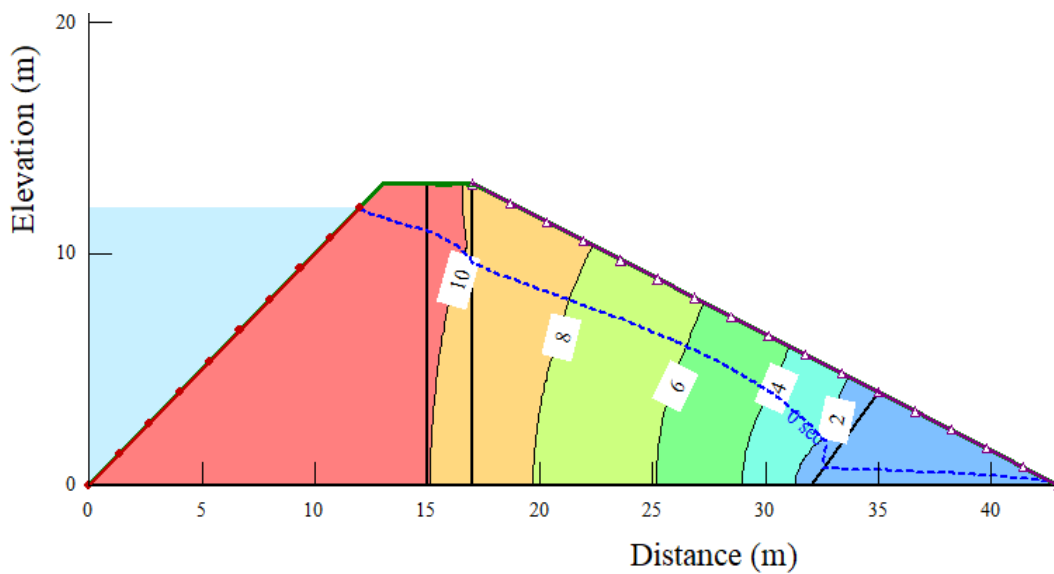
Table 5. The variable values in Figure 2 from Seep/W [10] for different ratios of core permeability to the shell in hypothetical dam with  $h_1 = 12$  (m)

$\frac{K_c}{K_d}$							
۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۴	۰/۸	۱	
۰/۰۵	۰/۲۲	۰/۹۵	۸/۲۵	۹/۶۲	۹	۱۰	$h_4$
۰	۰	۰/۰۵۵	۱/۶۸	۲/۵۵	۲/۷۷	۲/۹۲	$a_0$
۱۲/۰	۱۱/۹۹	۱۱/۹۹	۱۱/۴۹	۱۰/۹۸	۱۰/۶۷	۱۰/۷	$h_2$
۱۱/۹۶	۱۱/۶۶	۱۱/۰۴	۳/۲۵	۱/۳۹	۰/۷۵	۰/۷	$d$



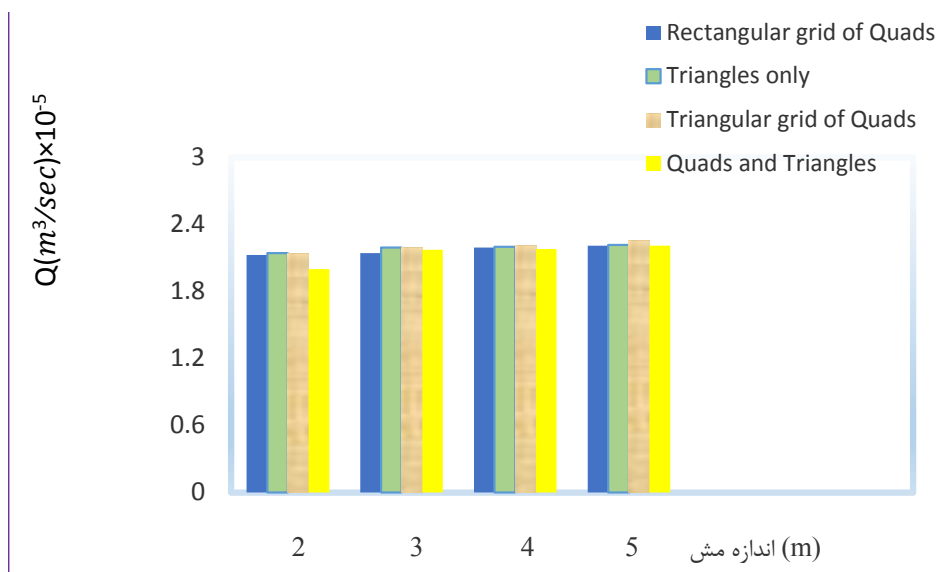
شکل ۶. شبکه مش بندی مقطع سد فرضی مورد مطالعه Rezk و Senoon [۱۰] مدل شده در Seep/W

Fig. 6. A cross-section of the mesh network in a hypothetical dam studied by Rezk and Senoon [10] modeled in Seep/W



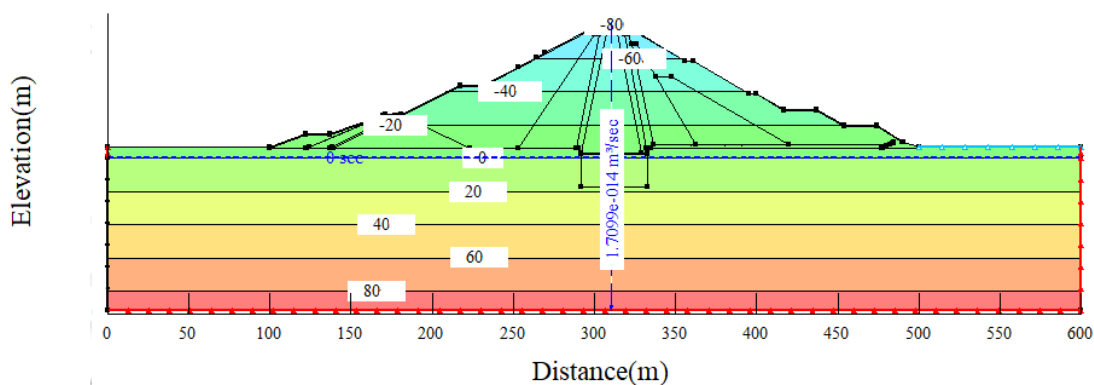
شکل ۷. کانور هد کل (m) و سطح فریاتیگ مقطع سد فرضی مورد مطالعه Rezk و Senoon [۱۰] مدل شده در Seep/W

Fig. 7. Total head contour (m) and phreatic surface of the cross section of the hypothetical dam studied by Rezk and Senoon [10] modeled in Seep/W



شکل ۸. میزان تراوش (Q) به ازای عرض واحد برای انواع مش و اندازه آن برای تراز آب ۱۸۵۱/۴۷ متر

Fig. 8. Seepage discharge flow (Q) per unit width for different types and sizes of mesh for water level 1851.47 (m)



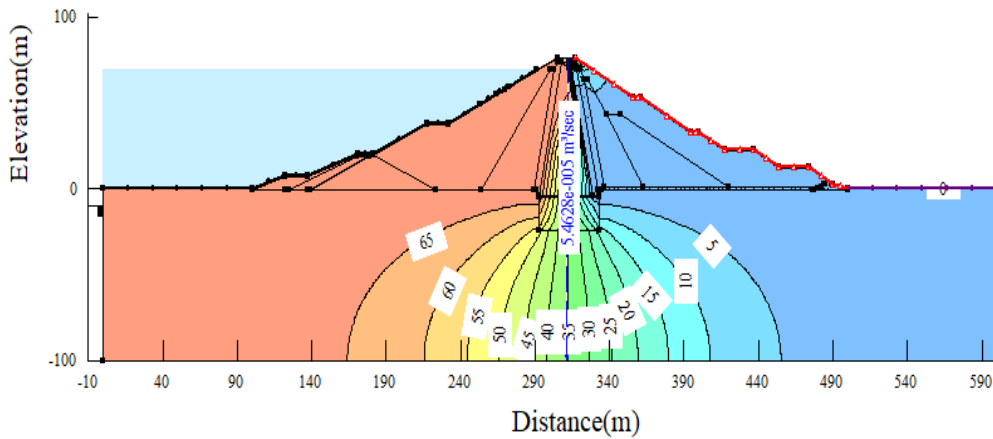
شکل ۹. کانتور هد فشار (m) و مقدار تراوش به ازای عرض واحد سد کمال صالح در پایان ساخت

Fig. 9. Pressure head contour (m) and the amount of seepage discharge per unit width of Kamal-Saleh dam at the end of construction

۴-۱- تحلیل تراوش سد کمال صالح در پایان ساخت

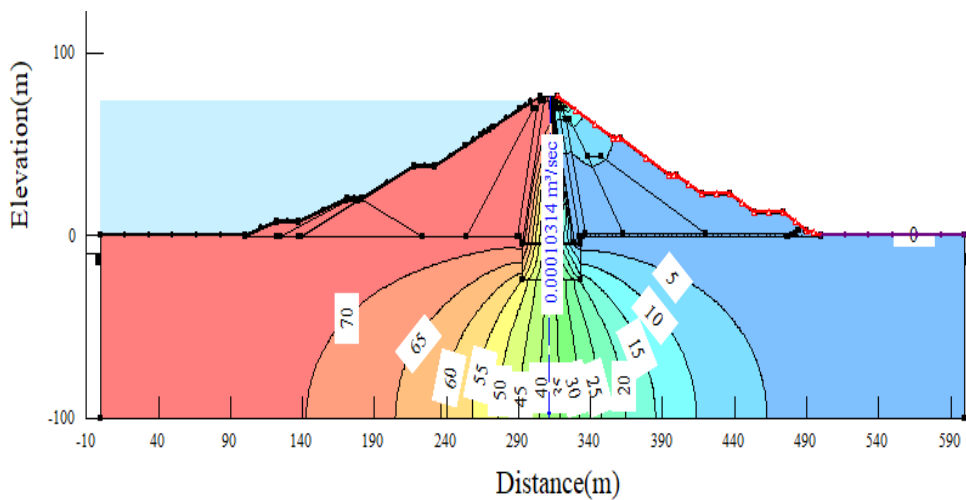
شکل ۹ نشان داده شده است. مقدار دبی کل عبوری از بدنه و پی سد پس از اتمام ساخت سد و برای طول ۷۶۵ متر تاج برابر با  $1.3 \times 10^{-8} \frac{lit}{sec}$  به دست آمد.

در پایان ساخت سد بستر رودخانه هم چنان خشک بوده و تراز آب طبق گزارشات ژئوتکنیک سد کمال صالح در تراز ۱۷۸۵ متر در نظر گرفته شد. طبق تحلیل Seep/W هد فشار و دبی عبوری از عرض واحد سد در



شکل ۱۰. کانتور هد کل (m) و مقدار تراوش در شرایط تراوش پایدار برای تراز فعلی سرریز سد کمال صالح (ارتفاع آب ۶۹/۱ متر)

**Fig. 10. Total head contour (m) and the amount of seepage discharge in the conditions of steady state for the current level of Kamal-Saleh dam overflow spillway (water height of 69.1 m)**



شکل ۱۱. کانتور هد کل (m) و مقدار تراوش با بالا بردن چهار متر تراز سرریز (ارتفاع آب ۷۳/۱ متر) در سد کمال صالح

**Fig. 11. Total head contour (m) and the amount of seepage discharge in the condition of raising overflow spillway level by four meters (water height 73.1 m) in Kamal-Saleh Dam**

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از نرم‌افزار برای تراوش عبوری از سد کمال صالح متناظر با ارتفاع‌های سرریز متفاوت، در جدول ۶ آمده است.

طبق نتایج حاصل از جدول ۶، بیشترین میزان دبی عبوری از بدنه و پی سد برای افزایش ارتفاع ۴ متری و معادل با ۸۵٪ افزایش است. این یافته با نتایج تحقیق [۱۶ و ۶] که افزایش تراز آب سبب افزایش میزان تراوش شده

۴-۲- تحلیل تراوش سد کمال صالح در شرایط تراوش دائمی برای وضعیت فعلی و افزایش ارتفاع آب

تحلیل تراوش برای رقوم کنونی تراز سرریز (ارتفاع آب ۶۹/۱ متر) انجام شد و سپس با افزایش تراز سرریز در گام‌های یک متری تا ارتفاع ۷۳/۱ متر، دبی هر مرحله برآورد گردید. کانتور هد کل، شبکه جریان و خط زه به طور نمونه برای تراز فعلی سرریز (ارتفاع نرمال) و چهار متر افزایش تراز سرریز



جدول ۶. تراوش عبوری از سد کمال صالح (Q) بر حسب ارتفاع سرریز (h)

Table 6. Amount of the seepage discharge from Kamal-Saleh Dam (Q) according to the height of the spillway (h)

h(m)	Q ( $\frac{m^3}{s} \times 10^{-5}$ )	مراحل تحلیل تراوش
۶۹/۱	۵/۴	تراز فعلی سرریز
۷۰/۱	۶/۲	گام اول
۷۱/۱	۷/۱	گام دوم
۷۲/۱	۸/۷	گام سوم
۷۳/۱	۱۰	گام چهارم

جدول ۷. ضریب اطمینان در برابر جوشش متناظر با ارتفاع سرریز

Table 7. The factor of safety against boiling corresponding to the height of the spillway

$FS_{boiling}$	$i_c$	$i_{ex}$	تراز آب (m)	مراحل تحلیل
۳/۹۹	۱/۷	۰/۴۲۶	۶۹/۱	ارتفاع کنونی سرریز
۳/۹۵	۱/۷	۰/۴۳	۷۰/۱	۱ متر افزایش
۳/۹۱	۱/۷	۰/۴۳۴	۷۱/۱	۲ متر افزایش
۳/۸۵	۱/۷	۰/۴۴۱	۷۲/۱	۳ متر افزایش
۳/۸۱	۱/۷	۰/۴۴۶	۷۳/۱	۴ متر افزایش

باشد، تمایل جریان برای حرکت بیشتر است.

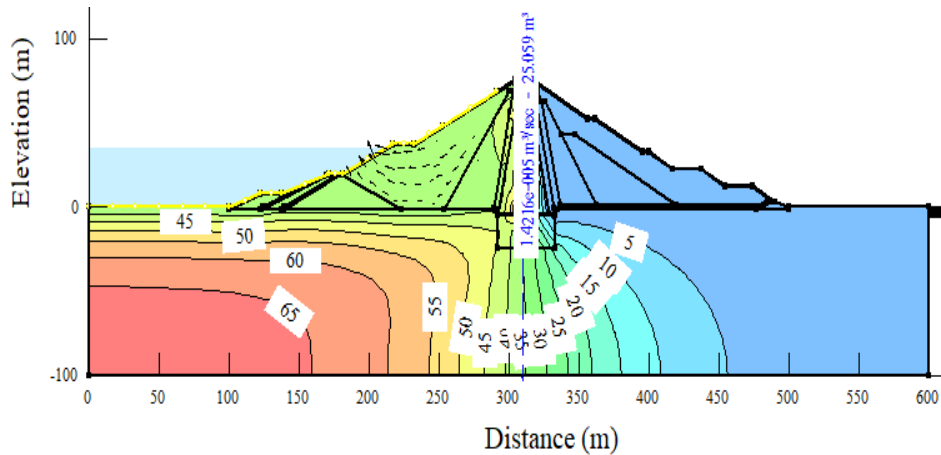
$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (11)$$

$G_s$  وزن مخصوص دانه ها،  $e$  نسبت تخلخل،  $\gamma_{sat}$  وزن مخصوص اشباع مصالح،  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب،  $\gamma'$  وزن مخصوص مستغرق است. در جدول ۷ ضریب اطمینان در برابر جوشش در ارتفاع نرمال و همچنین در شرایط افزایش ظرفیت مخزن محاسبه شده است. بر اساس نتایج تحلیل Seep/W و طبق جدول ۷، به ازای ۴ متر افزایش ارتفاع آب، گرادیان هیدرولیکی خروجی ۴/۷٪ افزایش یافته است که منطبق بر [۱۸] و معادل

است، همخوانی دارد. به منظور بررسی آن که آیا این افزایش تراوش، سبب ایجاد جوشش در پاییندست سد می شود یا نه، لازم است ضریب اطمینان در برابر جوشش ( $FS_{boiling}$ ) با استفاده از رابطه ۱۰ در شرایط افزایش ارتفاع آب محاسبه گردد.

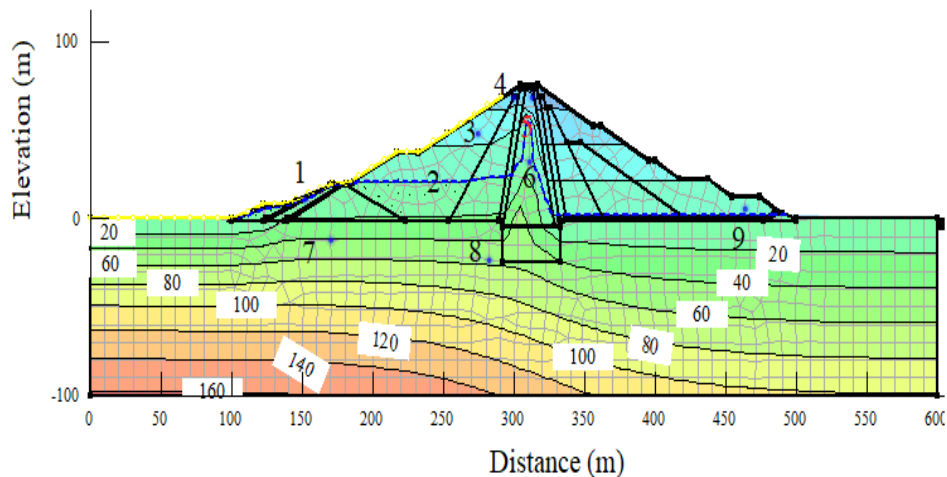
$$FS_{boiling} = \frac{i_c}{i_{ex}} \quad (10)$$

در رابطه فوق،  $i_{ex}$  گرادیان هیدرولیکی خروجی از سد و  $i_c$  گرادیان هیدرولیکی بحرانی است که طبق رابطه ۱۱ تعریف می شود. گرادیان هیدرولیکی نشان دهنده تمایل جریان برای حرکت بیشتر است و با نماد  $i$  نشان داده می شود. هر چه در یک فاصله مشخص از خاک اختلاف هد بیشتر



شکل ۱۲. کانتور هد کل (m)، جهت جریان و مقدار تراوش در شرایط افت سریع مخزن (به طور نمونه در لحظه ارتفاع آب برابر ۳۵/۲ متر)

Fig. 12. Total head contour (m), flow direction and the amount of seepage discharge in the conditions of rapid drawdown of the reservoir (typically at the moment of water height equal to 35.2 m)



شکل ۱۳. نقاط انتخابی جهت نمایش تغییرات فشار آب حفره ای در طول افت سریع مخزن

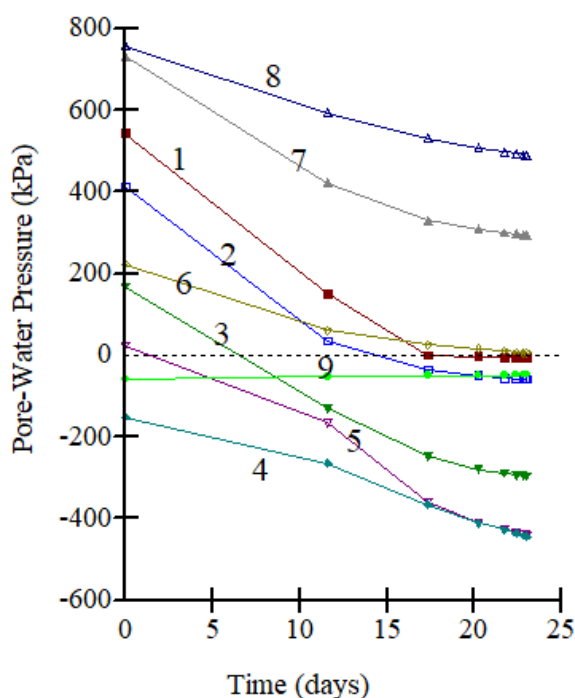
Fig. 13. Selective points to show the changes in the pore water pressure during the rapid drawdown of the reservoir

می گیرد و در پاییندست نیز جریان همواره ادامه دارد. جهت بررسی تغییرات فشار آب حفره‌ای در طول تخلیه سد کمال صالح، در نواحی مختلف بدنه و پی سد طبق شکل ۱۳، ۹ نقطه انتخاب شده و تغییرات فشار آب حفره‌ای در هر یک از این نقاط محاسبه گردید. در شکل ۱۴ هر منحنی، معرف تغییرات فشار آب حفره‌ای در یک نقطه از سد برای دوره تخلیه سریع ۲۳/۱ روز است.

طبق نتایج در تمام نقاط بدنه سد، فشار آب حفره ای تقریباً به صورت خطی کاهش یافت که نشان دهنده وقوع یک جریان پایدار بود. نوسان سطح

کاهش ۴/۵٪ ضریب اطمینان برابر جوشش است. طبق ضرایب اطمینان به دست آمده پس از افزایش ظرفیت مخزن نیز، سد برابر جوشش پایدار است.

۴-۳-۴ تحلیل تراوش سد کمال صالح در شرایط افت سریع مخزن سد در طول افت سریع مخزن، خط فریاتیکی با کاهش سطح آب دچار نوسان شده و نسبت به حالت تراوش دائمی در تراز پایینتری قرار می گیرد. شکل ۱۲ خط زه، جهت جریان و کانتورهای هد کل را در طول افت سریع نشان می دهد. طبق شکل در طول افت سریع جریانی به سمت بالادست شکل



شکل ۱۴. تغییرات فشار آب حفره ای (kPa) متناظر با نقاط انتخابی نسبت به زمان برای دوره تخلیه سریع ۲۳/۱ روز

Fig. 14. Pore water pressure changes (kPa) corresponding to the selective points during the time for the rapid drawdown period of 23.1 day

۴-۵- بررسی امکان روگذری هسته با افزایش تراز سرریز با احتساب مویبگی سد کمال صالح

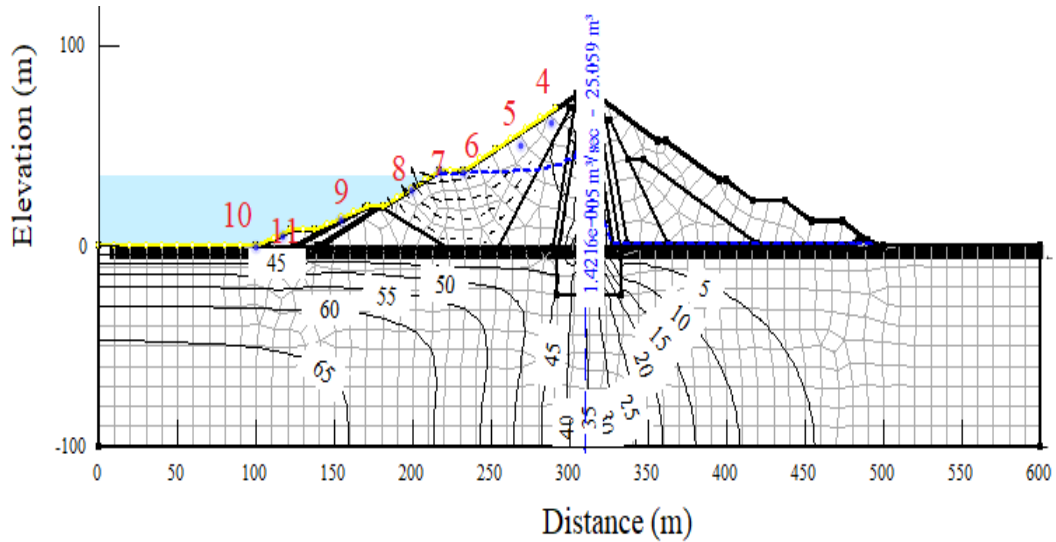
بر اساس گزارشات ژئوتکنیک سد کمال صالح،  $D_{10}$  مصالح پوسته برابر  $0.002$  میلی‌متر است و لذا بر اساس رابطه ۳ مقدار مویبگی به شرح زیر محاسبه شده است:

$$h_c = -990 \times (\ln 0.002) - 1540 = 46.1 \text{ cm} \quad (12)$$

تحلیل تراوش در وضعیت تراز نرمال و چهار گام افزایشی نشان داد که با افزایش تراز آب، سطح فریاتیکی دچار نوسان شده و در ترازهای متفاوتی با هسته برخورد می‌کند. بین نقطه برخورد سطح فریاتیکی با هسته و تراز آب در سد کمال صالح رابطه ای مستقیم برقرار بود. ارتفاع برخورد در ارتفاعهای مختلف سرریز در جدول ۸ نشان داده شده است. به ارتفاع برخورد سطح فریاتیکی با هسته، ارتفاع صعود مویبینه اضافه می‌گردد. طبق جدول ۸،

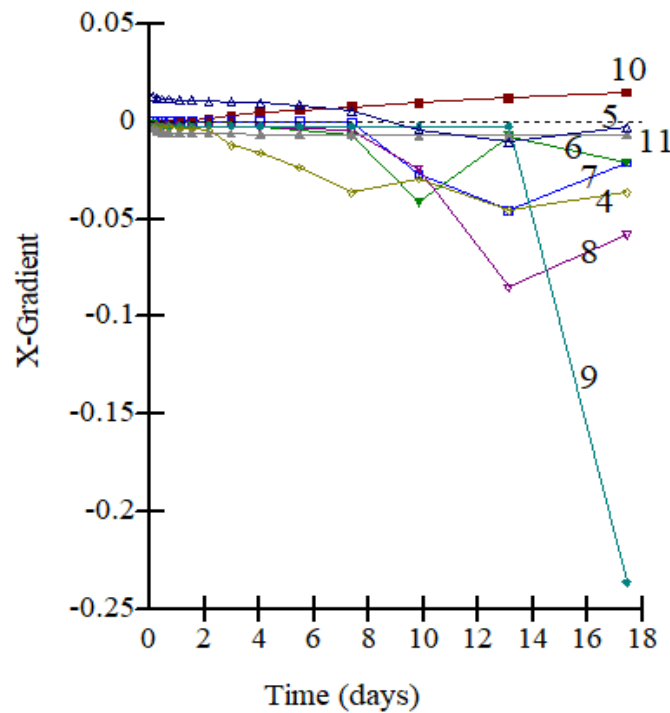
آب نقاط بالادست سد را بیشتر تحت تاثیر قرار داد و کاهش فشار با سرعت بالاتری رخ داد، به دلیل سرعت پایین زهکشی آب از درون مصالح ریزدانه هسته، کمترین تغییر در مقدار فشار آب حفره‌ای در نواحی انتخابی درون هسته رخ داد. طبق شکل ۱۴، مقدار فشار آب حفره‌ای در نقاط مورد بررسی به دو ناحیه مثبت و منفی تقسیم می‌شود. در نواحی بالادست در طول تخلیه، فشار از مثبت به منفی تغییر کرده و نشان دهنده افت سطح آب و قرارگیری خط زه پایینتر از این نقاط بود. نتایج به دست آمده در این بخش با مطالعات Fattah و همکاران [۱۸] همخوانی داشت. زه در طول تخلیه سریع روی شیب بالادست متمرکز شده و امکان افزایش گرادیان هیدرولیکی خروجی وجود دارد. نقاط انتخابی و نمودار متناظر جهت بررسی تغییرات گرادیان هیدرولیکی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمایش داده شده است.

طبق نمودار شکل ۱۶ در طول تخلیه سریع در تمام نقاط واقع در دامنه بالادست، گرادیان هیدرولیکی خروجی از یک کوچک‌تر و لذا ضریب اطمینان در برابر جوشش بزرگ‌تر از یک و سد پایدار بود.



شکل ۱۵. کانتورهای هد کل (m) و نقاط انتخابی جهت تعیین گرادیان هیدرولیکی در طول افت سریع مخزن (به طور نمونه در لحظه ارتفاع آب برابر ۳۵/۲ متر)

Fig. 15. Total head contours (m) and selective points for determining hydraulic gradients during rapid draw-down of the reservoir (typically at the moment of water height equal to 35.2 m)



شکل ۱۶. گرادیان هیدرولیکی متناظر با نقاط انتخابی در طول افت سریع مخزن

Fig. 16. Hydraulic gradient corresponding to the selective points during rapid drawdown of the reservoir

جدول ۸. ارتفاع برخورد خط زه با هسته در ترازهای مختلف آب در بالادست

Table 8. The height of the collision of the phreatic line with the core at different levels of the upstream water

ارتفاع برخورد خط زه با هسته در بالادست با لحاظ مویینگی (m)	ارتفاع برخورد خط زه با هسته در بالادست (m)	مراحل تحلیل تراوش
۶۹/۱	۶۸/۸۸	تراز نرمال آب
۷۰/۱	۶۹/۹۳	گام اول
۷۱/۱	۷۰/۷۸	گام دوم
۷۲/۱	۷۱/۶۲	گام سوم
۷۳/۱	۷۲/۸۷	گام چهارم
۷۴/۱	۷۳/۵	گام پنجم

فریاتیکی حاصل از روش Rezk و Senoon (۲۰۱۱) در جدول ۹ و نتایج Seep/W در جدول ۱۰ ارائه گردیده است.

با بررسی جداول ۹ و ۱۰ مشخص گردید که تطابق مناسبی بین خط فریاتیکی قابل ترسیم از متغیرهای به دست آمده از هر دو روش تحلیلی Rezk و Senoon و روش محاسباتی Seep/W در هر یک از ارتفاع‌های سرریز لحاظ شده وجود دارد. در هر دو روش با افزایش تراز سرریز، سطح فریاتیکی بالا می‌رود. خط فریاتیکی به دست آمده از دو روش در پوسته بالادست و هسته ( $h_2$  و  $h_3$ ) تطابق بیشتری بر هم دارند چنانچه به طور نمونه در تراز نرمال میزان اختلاف حاصل از دو روش به ترتیب به میزان ۰/۴ و ۴/۲ درصد می‌باشد. بیشترین اختلاف دو روش مربوط به محل برخورد خط فریاتیکی با دامنه پایبندست ( $a_0$ ) است اما به دلیل مقدار کم این متغیر قابل توجه است. برای ۴ متر افزایش ارتفاع سرریز، سطح فریاتیکی در تراز ارتفاعی پایینتر از تاج هسته قرار میگیرد اما با افزایش ۵ متری ارتفاع سرریز، سطح فریاتیکی طبق روش‌های تحلیلی و محاسباتی از تاج هسته عبور می‌کند.

برای ۴ متر افزایش ارتفاع سرریز ارتفاع برخورد سطح فریاتیکی با هسته در بالادست در ارتفاع ۷۲/۸۷ متر قرار دارد و با احتساب مویینگی تا ارتفاع ۷۳/۳۷ متر میرسد. با توجه به اینکه تاج هسته در ارتفاع ۷۳/۵ متر قرار دارد، افزایش ۴ متری ارتفاع سرریز توصیه نمی‌شود. با افزایش ۵ متری ارتفاع سرریز، سطح فریاتیکی طبق روش تحلیلی و محاسباتی از تاج هسته عبور کرده و هسته دچار روگذری می‌شد.

#### ۴-۶- مقایسه سطح فریاتیکی روش تحلیلی منتخب با روش محاسباتی در سد کمال صالح

در ترسیم سطح فریاتیکی، با مقایسه نتایج حاصل از روش محاسباتی نرم افزار Seep/W با روش تحلیلی Stello [۸] و روش تحلیلی Rezk و Senoon [۱۰] که به ترتیب در بخش‌های ۴-۲ و ۴-۳ برای سدهای فرضی انجام شد، مشخص گردید که از بین دو روش تحلیلی به کار رفته، روش دوم دقت بیشتری در ترسیم سطح فریاتیکی دارد و لذا در این بخش برای ترسیم سطح فریاتیکی سد مطالعاتی کمال صالح، در تراز کنونی سرریز و با افزایش تراز آن استفاده گردید. نتایج محاسبه نقاط بحرانی سطح

جدول ۹. مقادیر متغیرهای شکل ۲ حاصل از روش تحلیلی Rezk و Senoon [۱۰] در ترسیم سطح فریاتیك سد كمال صالح

Table 9. The values of the variables in figure 2 obtained by Rezk and Senoon analytical method [10] in drawing the phreatic surface of Kamal-Saleh Dam

هد آب ( $h_1(m)$ )						
۷۴/۱	۷۳/۱	۷۲/۱	۷۱/۱	۷۰/۱	۶۹/۱	
۷۴/۰۹۸	۷۳/۰۹۶	۷۲/۰۹۸	۷۱/۰۹۸	۷۰/۰۹۸	۶۹/۰۹۸	$h_2$
۷۰/۳۹	۶۹/۴	۶۸/۴۱	۶۷/۷۶	۶۶/۷۶	۶۵/۸۹	$h_3$
۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۵۷۳	۰/۵۶۵	۰/۵۵۷	۰/۵۵	$h_4$
۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۹	$a_0$

\* واحد متغیرها بر حسب متر است.

جدول ۱۰. مقادیر متغیرهای شکل ۲ حاصل از روش محاسباتی نرم افزار Seep/W در ترسیم سطح فریاتیك سد كمال صالح

Table 10. The values of the variables in figure 2 obtained by the computational method of Seep/W software in drawing the phreatic surface of Kamal-Saleh Dam

هد آب ( $h_1(m)$ )						
۷۴/۱	۷۳/۱	۷۲/۱	۷۱/۱	۷۰/۱	۶۹/۱	
۷۳/۵۷	۷۲/۴۹	۷۱/۶۲	۷۰/۷۸	۶۹/۹۳	۶۸/۸۵	$h_2$
۷۳/۵	۷۲/۵۲	۷۲/۳۲	۷۰/۷۸	۶۹/۹۳	۶۸/۷۹	$h_3$
۱/۵۴	۱/۲۶	۱/۱۲	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۷۸	$h_4$
۱/۳۴	۱/۱۱	۰/۹۷	۰/۸۲	۰/۷۴	۰/۶۵	$a_0$

\* واحد پارامترها بر حسب متر است.

## ۵- نتیجه گیری

نمود.

۵- در ارتفاع فعلی سرریز کمال صالح و در شرایط افزایش ارتفاع بررسی شده در آن تطابق مناسبی بین خط فریاتیکی قابل ترسیم از متغیرهای به دست آمده از روش تحلیلی Rezk و Senoon [۱۰] و روش محاسباتی Seep/W وجود داشت. بیشترین تطابق در پوسته بالادست و هسته و بیشترین اختلاف در محل برخورد خط فریاتیکی با دامنه پایبندست دیده شد.

## منابع

- [1] H. Rahimi, Embankment Dams, Tehran University, Iran, 2013 (in persian).
- [2] H. Karimian Aliabad, Explaining the Elevation Method in Dam Cure, A Case Study of the Fusegate System in Zarrineh Rood Dam, M.Sc. Thesis in hydraulic structures, Shahid Chamran Ahvaz university, Iran, 2010 (in persian).
- [3] M. Yazdani, H.R. Afshoon, S. Ghasemi, V. Afshoon, F. Fahim, Effect of Height on the Static Stability of Heterogeneous Embankment Dams, Journal of Engineering, Science and Technology, 5(3) (2017) 274-282.
- [4] X.G. Song, Z.D. Zhou, H.B. Zhang, H.Y. Yue, Study on the Capacity Increasing and Dam Heighten of Plain Reservoirs, Journal of Applied Mechanics and Materials, 353-356 (2013) 2531-2536.
- [5] M.S.B. Gorgi, Feasibility Study for Increasing the Height of the Golgestan Earth Dam by Finite Element Method, Second National Conference on New Research Findings in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, 2016 (in persian).
- [6] A. Abdulsattar, M. Faris, A. Zedan, Seepage Analysis through an Earth Dam (KHASHA-CHAI Dam) as a Case Study, Journal of Engineering and Technology, 35(2 Part (A) Engineering) (2017) 172-181.
- [7] H.H. Fazlollah Soltani, N. Irani and M. Zeinodini Moghaddam, Investigation of discharge of earth dam in unsaturated state with reservoir volume fluctuations using Rawls et al (1982) and Casrel and Parrish (1988) methods Case Study of Maneciu Dam, International

در این پژوهش با توجه به سرریز آب از سد کمال صالح در سال‌های گذشته و تهدید نواحی پایبندست سد، بالابردن تراز سرریز سد جهت افزایش ظرفیت مخزن و حفظ مناطق پایبندست بررسی شد. تحلیل پایداری سد در برابر تراوش با استفاده از نرم‌افزار Seep/W در شرایط فعلی سد در حالت‌های پایان ساخت، تراوش دائمی و افت سریع و در شرایط افزایش ظرفیت مخزن در حالت تراوش دائمی انجام گردید. همچنین تحلیل سطح فریاتیکی به روش تحلیلی و محاسباتی در شرایط فعلی و افزایش ارتفاع آب مخزن انجام شد. به دلیل اهمیت محل سطح فریاتیکی در سدهای خاکی و بررسی امکان استفاده از یک روش تحلیلی در ترسیم سطح فریاتیکی، علاوه بر محاسبه این سطح به وسیله روش محاسباتی نرم‌افزار Seep/W، دو روش تحلیلی کمتر بررسی شده در منابع فارسی نیز به این منظور ارزیابی گردید. نتایج تحقیق حاضر را میتوان به صورت ذیل خلاصه نمود:

۱- در رسم سطح فریاتیکی در سدهای فرضی با استفاده از روش تحلیلی Stello [۸] و روش تحلیلی Rezk و Senoon [۱۰] مشخص گردید که روش تحلیلی اول دارای اختلاف قابل ملاحظه‌ای با مقادیر متناظر حاصل از نرم‌افزار Seep/W است ولی در روش تحلیلی دوم، سطح فریاتیکی به دست آمده با مقادیر متناظر حاصل از نرم افزار تطابق مناسب را نشان داده است که با کاهش  $\frac{k_c}{k_d}$ ، میزان انطباق نتایج افزایش می یافت.

۲- در بررسی میزان تراوش عبوری از سد کمال صالح در شرایط تراوش دائمی، مشخص گردید که بیشترین میزان دبی عبوری از بدنه و پی سد برای افزایش ارتفاع ۴ متری و معادل با ۸۵٪ افزایش است. میزان تراوش با افزایش سطح آب مخزن و تراز سرریز افزایش یافت.

۳- در محاسبه ضریب اطمینان در برابر جوشش در حالت تراوش پایدار، هر چند با افزایش ارتفاع سرریز گرادیان هیدرولیکی خروجی افزایش و به تبع آن ضریب اطمینان در برابر جوشش کاهش یافته است (به ازای ۴ متر افزایش ارتفاع آب، گرادیان هیدرولیکی خروجی ۴/۷٪ افزایش یافته که معادل کاهش ۴/۷٪ ضریب اطمینان برابر جوشش است)، اما در تمام موارد، سد برابر جوشش پایدار بود.

۴- برای ۴ متر افزایش ارتفاع سرریز، سطح فریاتیکی در تراز ارتفاعی پایینتر از تاج هسته قرار گرفت اما با احتساب مویبستگی محل برخورد خط فریاتیکی به هسته، بسیار نزدیک به تاج هسته میباید و لذا از این نقطه نظر افزایش ۴ متری ارتفاع سرریز توصیه نمی شود. با افزایش ۵ متری ارتفاع سرریز، سطح فریاتیکی طبق روشهای تحلیلی و محاسباتی از تاج هسته عبور

- [15] H. Hasani, J. Mamizadeh, H. Karimi, Stability of slope and seepage analysis in earth fills dams using numerical models (Case Study: Ilam Dam-Iran), *Journal of World Applied Sciences*, 21(9) (2013) 1398-1402.
- [16] M.M. Sazzad, M. Roy, M.S. Rahman, FEM Based Seepage Analysis through Earth Dam, *International Journal of Advances in Structural and Geotechnical Engineering*, 4(3) (2015) 158-164.
- [17] S. Al-Labban, Seepage and Stability Analysis of the Earth Dams under Drawdown Conditions by using the Finite Element Method, Ph.D. Thesis in civil engineering, University of Central Florida, America (2018).
- [18] M.Y. Fattah, H.A. Omran, M.A. Hassan, Behavior of an Earth Dam during Rapid Drawdown of Water in Reservoir-Case Study, *International Journal of Advanced Research* (2015), 3(10) (2015) 110-122.
- [19] L.C.E. Company, Geotechnical reports of Kamal Saleh Dam, Regional Water Authority of Markazi-Arak Province, 2010 (in persian).
- [20] Y. Li, C. Zhang, C. Chen, H. Chen, Calculation of Capillary Rise Height of Soils by SWCC Model, *Journal of Advances in Civil Engineering*, 2018 (2018).
- Conference on Civil Engineering, Tehran, 2016 (in persian).
- [8] M.W. Stello, Seepage charts for homogeneous and zoned embankments, *Journal of geotechnical engineering*, 113(9) (1987) 996-1012.
- [9] M.A.E.M. Rezk, Earth dam with an internal core, *Journal of Alexandria Engineering*, 34 (1995).
- [10] M.A.E.-R.M. Rezk, A.E.-A.A.A. Senoon, Analytical solution of seepage through earth dam with an internal core, *Journal of Alexandria Engineering*, 50(1) (2011) 111-115.
- [11] F. Kasim, W.S. Fei, Numerical parametric simulations for seepage flow behaviour through an earthfill Dam, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 14(1) (2002).
- [12] A. Zomorodian, S.M. Abodollahzadeh, Effect of horizontal drains on upstream slope stability during rapid drawdown condition, *International Journal of Geology*, 4(4) (2010) 85-90.
- [13] K. S Ismaeel, B.M. Noori, Evaluation of seepage and stability of duhok dam, in: *AL-Rafdain Engineering Journal (AREJ)*, 2011, pp. 42-58.
- [14] C. Andreea, Unsaturated Slope Stability and Seepage Analysis of a Dam, *Energy Procedia*, 85 (2016) 93-98.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Aalimohammadi, N. Shahkarami, H. Asadi, Analysis of seepage in the conditions of increased reservoir capacity by raising the spillway level (Case study: Kamal-Saleh earth dam), *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 3913-3932.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18161.6786

