

**Research Article**

**Experimental Investigation on the Performance of Different Drainage Systems in a Homogeneous Earth Dam Over an Alluvial Foundation**

**Arab Atefeh<sup>1</sup>, Ahmadi Hojjat<sup>✉2</sup>, Haghdoost Nourali<sup>2</sup>, Nourani Bahram<sup>3</sup>**

1- Phd Candidate, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran

2- Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.

3- Department of Water Engineering, University of Tabriz, Iran

(✉ Corresponding Author: [hojjat.a@gmail.com](mailto:hojjat.a@gmail.com))

---

**ARTICLE INFO**

**Received:** 24 December 2025

**Revised:** 17 February 2026

**Accepted:** 19 February 2026

**Available Online:** 18 April 2026

---

**HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Arab, A., Ahmadi, H., Haghdoost, N., Nourani, B., (2026). Experimental Investigation on the Performance of Different Drainage Systems in a Homogeneous Earth Dam Over an Alluvial Foundation. V.26, No.100, P: 105-127

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.371869.1635>

---

**Extended Abstract**

**Introduction**

Earth dams are the most common type of dams due to their cost-effectiveness, and they make up the majority of the world's dams. Water seepage is one of the most important issues in the design and safety of earth dams, as it can lead to increased pore water pressure, reduced shear strength, the occurrence of piping phenomena, and ultimately dam failure. Statistics show that approximately 35% of dam failures are directly or indirectly related to seepage. This risk is particularly exacerbated in dams built on permeable alluvial foundations.

To control seepage, various measures are employed, including drainage systems in the dam body and foundation. Blanket drains, toe drain, and chimney drain, whose main roles are to collect leaked water, reduce pore water pressure, and lower the water table. Although the use of chimney drains has become more common in recent years, new studies show that horizontal drains, especially their length, can have a significant impact on reducing pore water pressure and improving dam stability, while parameters such as drain thickness, height, and angle play a lesser role.

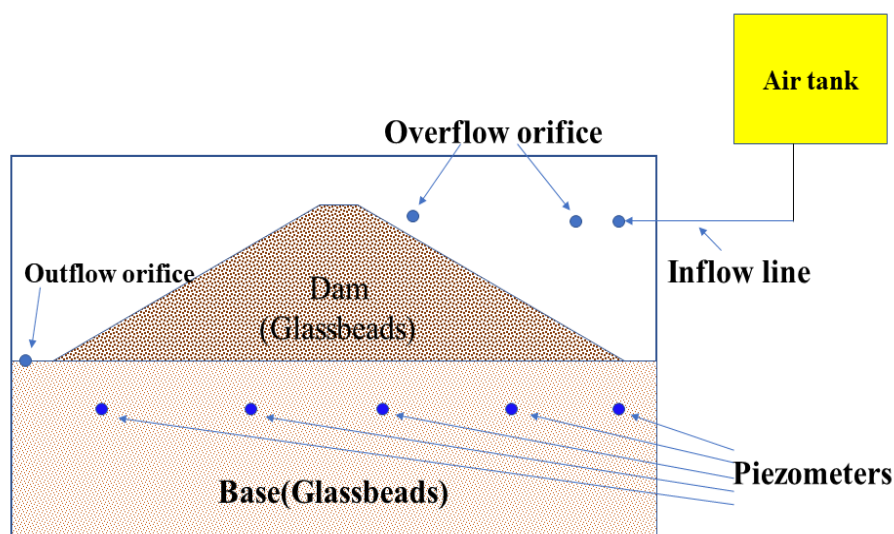
Seepage in earth dams is examined using numerical and experimental methods. Numerical methods are fast and cost-effective, but laboratory studies are of high importance as a basis for validating numerical results and for a detailed examination of the dam's actual behavior. Given that the impact of different drainage geometries with the same length has not been fully investigated to date, this study designs a laboratory model of a homogeneous earth dam to examine the effect of various drainage types with equal lengths and different geometries on seepage discharge and flow patterns in an earth dam located on an alluvial bed.

**Methodology**

In this study, a homogeneous earth dam was constructed using glass bead material, which contains glass particles with sizes ranging from 0.7 to 3.5 millimeters. The dam model was designed in a drainage box with dimensions of 150 cm length, 10 cm width, and 60 cm height, and included 5 piezometers to monitor changes in pore water pressure under the dam structure. The purpose of this experiment was to investigate the effect of the downstream drain's geometric shape on seepage from the dam. To observe the water seepage, artificial sunset yellow dye and potassium permanganate were used to visualize the flow lines. An air tank was also placed above the laboratory box to keep the water level in the dam constant.

The hydraulic conductivity of the material was estimated to be 0.128 cm/s using the constant head permeability test. The height of the constructed dam was 25 cm above the level of the permeable layer, which, considering the location of the overflow weirs, resulted in a reservoir water level of approximately 22 cm. The crest width was 10 centimeters, and the upstream and downstream body slopes were equal to the dam width at the foundation, which was 130 centimeters. Figure 1 illustrate the details of the constructed dam.

To study the effects of different drain system and their geometry, three different drain system involving blanket, toe and chimney drain were studied and compared with the basic state of an earth dam with no drain system. The length of all implemented drains was almost identical equal to 21 cm. The dimensions of the drains were presented in table1. The coarse gravel was used to create the employed drains. To avoid any mixing of the fine glass beads within the coarse materials of drains, a fine mesh fabric was placed around the drain system. The thickness of the gravels in the drains was 3 cm.



**Fig. 1 - Details of the constructed embankment dam along with an image of the constructed earthen dam model**

**Table1. Details of the employed drainage systems**

Type	Blanket	Toe	Chimney
parameters			
Length (cm)	21	21	21
Height (cm)	3	8	10
Volume (cm <sup>3</sup> )	630	945	1170

**Results and Discussion**

The summary of the achieved results were presented in figure 2 in terms of pore pressure in the base of the dam. In this figure each curve belongs to the specific drain. As seen, the toe and blanket drains have similar effect in removing of pore water pressure, while the chimney drain is very effective, comparing to other drain.

Additionally, the seepage line was investigated in the toe and blanket types to evaluate the seepage velocity and their lengths. The results are shown in figure 3. As seen in this figure, the seepage path through the earth dam from the identical inlet point has different outlet point. The length of the seepage path in toe drain and blanket drain significantly is shorter than that in no-drain. Among toe drain, blanket drain, and chimney drain , the toe drain has the shortest seepage path.

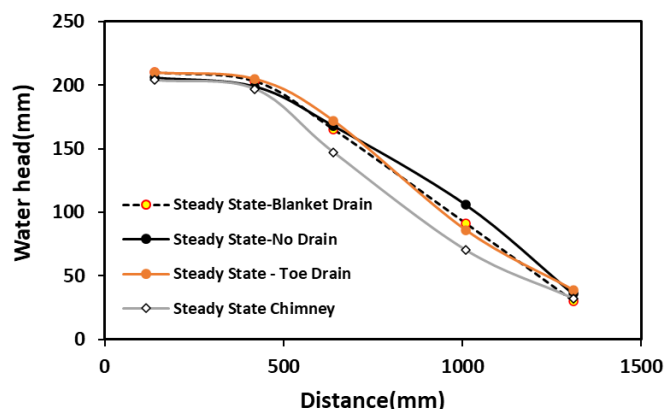


Fig. 2- the effect of drains in damping of developed pore water pressure along the dam

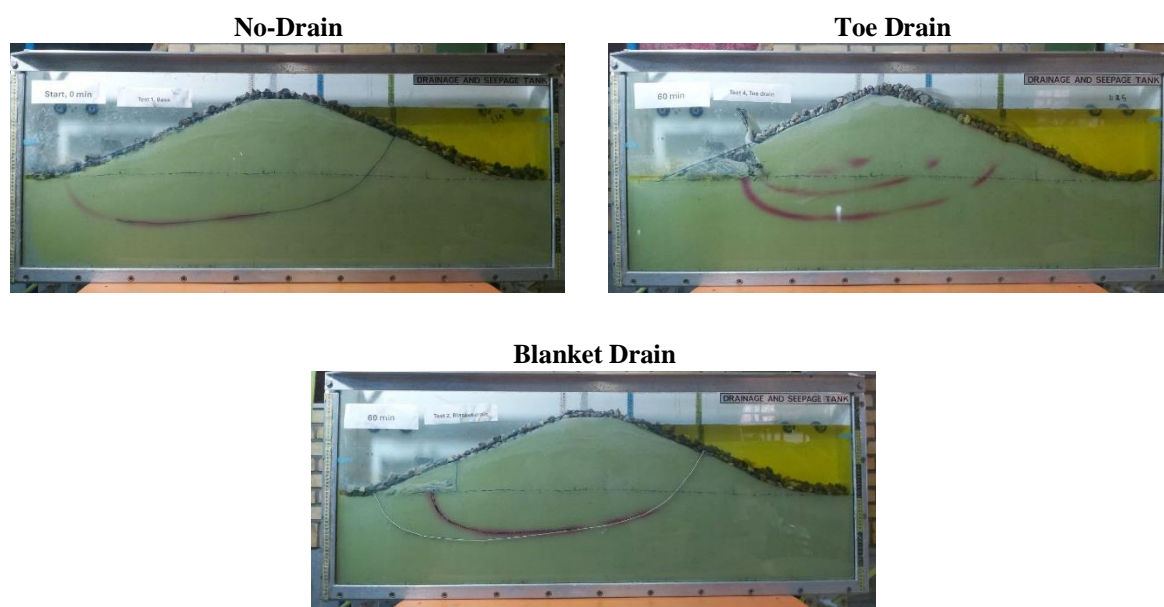


Fig. 3. The seepage line through the earth dam under different drain conditions comparing to the no-drain state

### Conclusions

The objective of this study is to evaluate the performance of various drainage systems in controlling seepage and mitigating pore water pressure within a homogeneous earthen dam constructed on an alluvial foundation under laboratory conditions. To quantitatively assess the influence of drainage systems on the seepage rate and the dam's hydraulic behavior, three drain configurations: horizontal or blanket drains, toe drains, and chimney drains, were investigated. Their performance was subsequently compared to a control scenario with no drainage system. The findings of this investigation demonstrate that chimney drains are superior comparing to other drain types in reducing pore water pressure; however, they concurrently lead to a higher rate of seepage. When drain length is held constant, horizontal drains are preferable to toe drains. Nevertheless, the implementation of toe drains can enhance the structural stability of the dam body due to the incorporation of a substantial volume of coarse-grained material. This particular aspect, however, warrants further investigation to enable a quantitative comparison of its outcomes with those of other drainage configurations. Based on a value analysis conducted by considering three parameters—pore water pressure reduction, seepage discharge, and the volume of material utilized as a cost factor—the chimney drain yields

the highest value, whereas the toe drain yields the lowest. It is noteworthy that the differential in value between the chimney drain and the toe drain is marginal.

**Keywords:** Blanket Drain, Chimney Drain, Permeable base, Seepage Rate, Toe Drain

### **Acknowledgement**

The author would like to thank all referees of the present study.

### **Conflict of Interest**

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

### **Funding**

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

### **Data Availability Statements**

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

### **Author contribution**

The author has read and agreed to the published version of the manuscript.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.371869.1635>

نوع مقاله: پژوهشی

## مطالعه آزمایشگاهی عملکرد انواع سیستم‌های زهکشی در بدنه سد خاکی همگن واقع بر بستر آبرفتی

عاطفه عرب<sup>۱</sup>، حجت احمدی<sup>۲</sup>، نورعلی حق دوست<sup>۳</sup>، بهرام نورانی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹

### چکیده

یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب و شکست سدهای خاکی، پدیده نشست و پیامدهای جانبی ناشی از آن است. کنترل نشست نقش اساسی در افزایش ایمنی و پایداری سدهای خاکی دارد. هدف از این پژوهش، مقایسه آزمایشگاهی عملکرد انواع سیستم‌های زهکشی در کنترل نشست و کاهش فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی همگن ساخته شده روی بستر آبرفتی است. در این مطالعه، یک مدل فیزیکی از سد خاکی به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر واقع بر بستر آبرفتی همگن به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر ساخته شد. به منظور بررسی کمی تأثیر زهکش‌ها بر میزان نشست و رفتار هیدرولیکی سد، سه نوع سیستم زهکشی شامل زهکش افقی، زهکش پنجه و زهکش دودکشی ساده بررسی و نتایج آنها با حالت بدون زهکش مقایسه شد. پارامترهای اصلی شامل دبی نشست، مسیر جریان و فشار آب منفذی در زیر بدنه اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در داده‌های حاصل از پیژومترهای به کار رفته در بدنه سد خاکی مورد مطالعه، زهکش دودکشی عملکرد بسیار بهتری نسبت به زهکش پنجه از خود نشان می‌دهد. این در شرایطی هست که به‌طور متوسط مقدار فشار آب منفذی در پی را به حدود ۲۵ درصد نسبت به دیگر حالات کاهش داد. در این میان، زهکش افقی و زهکش پنجه نتایج مشابهی را در خصوص کاهش فشار آب منفذی از خود نشان دادند. بررسی سرعت نشست و حرکت آب در داخل بدنه سد برای دو حالت زهکش افقی و پنجه با حالت بدون زهکش نیز مقایسه شد و نتایج این بررسی نشان داد که در زهکش پنجه سرعت حرکت آب به میزان جزئی حدود ۲ درصد بیشتر از زهکش افقی است و نسبت به حالت بدون زهکش سرعت جریان ۱۰ درصد بیشتر است. با این حال، طول مسیر نشست به میزان ۲۶ درصد کوتاه تر شده است. نتایج این پژوهش در انتخاب سیستم مناسب زهکش برای سدهای خاکی همگن موثر و مفید خواهد بود.

**واژه‌های کلیدی:** بستر نفوذپذیر، زهکش افقی، زهکش پنجه، زهکش دودکشی، دبی نشست

### مقدمه

به دلیل ماهیت دانه‌ای مصالح تشکیل‌دهنده و متخلخل بودنشان در برابر نفوذ آب مقاوم نیستند به طوری که بخش‌های هسته رسی آن نیز قابلیت عبور را در گرادیان‌های بالای هیدرولیکی دارد (Liu et al., 2019). بنابراین مخاطرات و اثرهای ناشی از ورود آب به بدنه سد خاکی

تقریباً ۷۰ درصد از سدهای جهان یا مصالح خاکی ساخته شده‌اند (Mohamad et al., و Javani et al., 2015). این سازه‌ها با اینکه در برابر نیروهای خارجی و حتی زلزله بسیار مقاوم‌اند (Zheng et al., 2021)

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه ارومیه، ایران

<sup>۲</sup> استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران (تویسنده مسئول: Email: hojjat.a@gmail.com)

<sup>۳</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران

<sup>۴</sup> دانش آموخته دکترای مهندسی آب-سازه های آبی، دانشگاه تبریز، ایران

شبیه‌سازی فیلتر و زهکش در برآورد نشت در سدهای خاکی نشان دادند افزایش میزان گرادیان هیدرولیکی در نزدیکی دیوار آب‌بند می‌تواند به ایجاد رگاب بینجامد و در این خصوص لازم است برای مهار آن تدبیری اندیشید. در این بین، بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی مصالح بدنه سدهای خاکی و استفاده از مشخصات درست آن در تحلیل‌های عددی و در به‌دست آوردن نتایج قابل اعتماد تاثیر بسزایی دارد. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2017.a) نشان دادند که مطالعه نشت در سدهای خاکی مستلزم بررسی و تخمین مناسب از توابع هدایت هیدرولیکی مصالح است به‌طوری که برای تعیین موقعیت دقیق خط نشت لازم است تابع هیدرولیکی مصالح پوسته یا فیلتر به‌جای مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع به‌کار گرفته شود. استفاده از تابع هدایت هیدرولیکی، به‌جای هدایت هیدرولیکی اشباع، می‌تواند تا ۲۰ برابر مقدار دبی عبوری از بدنه سد خاکی را دقیق‌تر نشان دهد (Ahmadi et al., 2017.b).

سیستم‌های زهکشی در بدنه و پی سدهای خاکی تمهیداتی هستند که برای جمع‌آوری و هدایت آب‌های نشت‌یافته به نواحی پایین‌دست طراحی می‌شوند و به اجرا در می‌آیند (Mahmoud et al., 2016). "زهکش‌ها را می‌توان با توجه به شکل و موقعیت آنها به سه زهکش پنجه‌ای، افقی و دودکشی طبقه بندی کرد (Mahmoud et al., 2024). در زهکش‌های افقی که در گذشته در سدهای خاکی همگن و کم ارتفاع به کار می‌رفت، یک لایه زهکشی افقی در زیر ناحیه پایین‌دست سد قرار می‌گرفت و هدف آن جمع‌آوری آب نشتی و هدایت آن به خارج از بدنه سد بود (Mahmoud et al., 2024). زهکش‌های افقی با جمع‌آوری و هدایت آب نشت یافته دو عملکرد اصلی دارند: (۱) کاهش میزان نشت کل و (۲) پایین آوردن سطح نشت در پایین‌دست و در نتیجه کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی که مهم‌ترین عامل در شروع پدیده رگاب است (Sazzad and Islam, 2019). استفاده از زهکش افقی در عمل رایج است اما

اجتناب‌ناپذیر است. این امر موجب شده است تا مطالعه پدیده نشت و عبور آب از بدنه سدهای خاکی اهمیت یابد. به عبارت دیگر، مطالعه نشت یا تراوش یکی از مهم‌ترین مطالعات در طراحی سدهای خاکی است که در آن مقدار آب تراوش شده از سد، مقدار و توزیع فشار آب منفذی در قسمت‌های مختلف بدنه و پی، شیب یا گرادیان هیدرولیکی و سرعت حرکت آب تعیین می‌گردد. قابل توجه است که بسیاری از خرابی‌های سدها، به‌ویژه در سدهای خاکی همگن و ناهمگن، اگر سرعت حرکت آب زیاد باشد منجر به جابه‌جایی ذرات خاک می‌شود. این پدیده رگاب شناخته می‌شود که عامل مهمی در تخریب سدهای خاکی است (Zhang et al., 2009). آمارها حدود ۳۵ درصد از شکست سدها را به مسائل مربوط به نشت نسبت می‌دهند (Garg et al., 2013). حالت‌های مختلف خرابی به طور مستقیم یا غیرمستقیم با نشت ارتباط دارند، به‌طوری که ۱۵ درصد از خرابی‌ها در بدنه سدهای خاکی ناشی از لغزش بدنه است که طور مستقیم با افزایش فشار آب منفذی ناشی از عبور آب از بدنه سد مرتبط است (Rahimi, 2015).

فرسایش داخلی سدها پدیده‌ای است پنهان که می‌تواند منجر به خرابی و ایجاد فاجعه‌ای غیرمنتظره برای سد شود و لازم است بازرسی ایمنی برای سدهای خاکی-سنگی صورت گیرد (Zhang et al., 2022). روش‌های مختلفی برای کنترل و جمع‌آوری جریان عبوری از بدنه سد ابداع و ارائه شده است. رحیمی (Rahimi, 2015) به‌کارگیری انواع مختلفی از روش‌ها مانند استفاده از ترانشه رسی، پتوی رسی و انواع زهکش‌ها را در کنترل و هدایت مطمئن جریان نشت از بدنه سدهای خاکی پیشنهاد کرده است. نصرالهی (Nasrolahi, 2011) با بررسی ترکیب‌های مختلف عمق ترانشه و بلانکت رسی برای کاهش نشت از سد خاکی ستارخان اهر به این نتیجه رسید که ترکیب پتوی رسی و ترانشه آب‌بند میزان نشت از پی را کمتر می‌کند. موهبت‌زاده و همکاران (Mohebatzadeh et al., 2011) با بررسی

کمی‌سازی اثرهای آن بر پارامترهای مختلف نشت در شرایط مختلف، نیازمند مطالعات دقیق است. تقاطع خط فریاتیکی با شیب پایین‌دست، پایداری سدخاکی را به دلیل گرا دیان خروجی زیاد تحت تاثیر قرار می‌دهد (Shirazi et al., 2023). زمانی که خاکریز سد ناهمگن است یا ناحیه پایین‌دست سدخاکی نفوذ پذیری مشکوک دارد، از زهکش افقی برای نگهداری خط فریاتیکی داخل بدنه سد استفاده می‌شود تا امکان زهکشی را به خاکریز و فونداسیون بدهد و بدین ترتیب رگاب از داخل آنها محدود شود. از این رو خط فریاتیکی نباید شیب پایین‌دست را قطع کند (Mahmoud et al., 2016). در مطالعه‌ای، اثر مشخصات زهکش افقی بر رفتار سدهای خاکی ساخته شده روی بستر نفوذناپذیر بررسی شد که در آن سدخاکی همگن را با زهکش افقی در نظر گرفتند. دقت در نتایج به دست آمده مشاهده شد، با تغییر ضخامت زهکش تغییر چندانی در خط نشت به وجود نمی‌آید. تنها با دو برابر شدن ضخامت زهکش، مقدار اندکی فشار آب حفره‌ای تغییر می‌کند. همچنین معلوم شد با افزایش ضخامت زهکش مقدار دبی عبوری از محور مرکزی سد تغییر چندانی نداشته است و بیشترین افزایش در دبی زمانی بوده است که ضخامت زهکش دو برابر شده و دبی به مقدار ۵ درصد افزایش پیدا کرده است (Calamak et al., 2018). در برخی از منابع معتبر علمی استفاده از زهکش‌های پنجه و افقی محدود به سدهای با ارتفاع کمتر از ۲۵ متر اعلام شده است در سدهای مدرن کاربرد زهکش‌های دودکشی مرسوم است (Rahimi, 2018). با این همه، طراحی این زهکش‌ها بر اساس سد خاکی واقع بر بستر نفوذناپذیر ارائه شده است. بررسی عملکرد زهکش‌های پنجه با وجه قائم و شیب‌دار در سد خاکی ساخته شده روی بستر نفوذناپذیر نشان می‌دهد عملکرد زهکش‌های با وجه مایل بهتر از عملکرد زهکش‌های با وجه قائم است (Sazzad and Islam, 2019). مطالعات اخیر نشان داده است طول زهکش افقی می‌تواند تاثیر بهتری نسبت به ارتفاع یا ضخامت انواع زهکش‌ها داشته باشد

(Refaiy et al., 2021; Malekpour et al., 2012). رفای و همکاران (Refaiy et al., 2021) در پژوهشی تحت عنوان مدل‌سازی تاثیر هندسه زهکش پایین‌دست بر نشت از سد خاکی واقع بر بستر نفوذناپذیر به این نتیجه رسیدند که پارامتر هندسی مؤثر زهکش پایین‌دست، طول آن است در حالی که ارتفاع و زاویه آن هیچ تأثیری ندارند. افزایش طول زهکش منجر به افزایش دبی نشت و فاصله بین خط فریاتیکی و صفحه پایین‌دست و کاهش فشار آب منفذی می‌شود. برای بررسی مسئله نشت در بدنه سدهای خاکی، از روش‌های عددی یا آزمایشگاهی استفاده می‌شود. با اینکه روش‌های عددی سریع و کم هزینه هستند و حالت‌های مختلفی از هندسه و سناریوهای متفاوت آبیگری را می‌توان به راحتی و در کمترین زمان استفاده کرد (Ahmadi et al., 2017; Hassan & Zovain et al., 2024; Ahmadi et al., 2014) اما مطالعات آزمایشگاهی از روش‌های پایه‌ای در بررسی نشت از بدنه سدهای خاکی هستند به طوری که نتایج چنین مطالعاتی در ارزیابی روش‌های عددی و نیز اعتبارسنجی روش‌های ابداعی و جدید استفاده می‌شوند (Ahmadi et al., 2018). طبق بررسی‌ها نشان می‌دهند برای زهکش‌های مختلف طول زهکش‌ها مهم‌ترین فاکتور بر عملکرد آنها در استهلاک فشار آب منفذی است است (Refaiy et al., 2021) و بقیه بخش‌های زهکش مانند ارتفاع، زاویه قرارگیری و دیگر مشخصات هندسی تاثیر قابل توجهی ندارند. محققان معتقدند زمانی که سد روی بستر آبرفتی نفوذپذیر احداث گردد، خطرهای ناشی از نشت افزایش می‌یابند (Omofunmi et al., 2017). بررسی‌ها در طراحی زهکش‌ها در مطالعات اخیر نشان می‌دهد که این مطالعات روی سدهای همگن یا ناهمگنی بوده است که روی پی‌های نفوذناپذیر بنا شده‌اند. محدود مطالعات عملکرد زهکش‌ها روی بستر نفوذپذیر محدود به ارائه روش‌های طراحی برای یک زهکش خاص مانند زهکش دودکشی است (Djehiche

برابر ۲/۵: ۱ و عرض سد در محل پی برابر با ۱۳۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. روند ساخت بدین ترتیب بود که ابتدا بخش پی سد به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر به صورت اشباع ساخته شد. در این حالت تانک به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر با آب حاوی مقدار بسیار اندکی دترژانت پر شد. دلیل اضافه شدن دترژانت حذف بار الکتریکی احتمالی از ذرات گلس‌بید و جلوگیری از حبس هوا در بین ذرات بود. ذرات گلاس‌بید به صورت یکنواخت داخل آب ریخته شد و با یک میله فلزی این ذرات به هم زده می‌شد تا لایه‌ای یکنواخت از ذرات روی هم رسوب کنند. پس از ساخت بخش پی، قسمت بدنه سد نیز به روش مشابه ساخته شد. با این تفاوت که بدنه سد در لایه‌های ۵ سانتی‌متری اجرا شد. برای این کار لایه آب به ارتفاع ۵ سانتی‌متر در هر مرحله در تانک بالا آورده می‌شد و ذرات گلاس‌بید در داخل تانک ریخته می‌شد و به کمک میله فولادی به تراکم یکنواخت می‌رسید. پیش از اجرای لایه بعدی، شیب بدنه مطابق با نقشه بدنه سد، که پیشتر در سطح شیشه‌های مدل ترسیم شده بود، اجرا می‌شد و به منظور پایداری و تثبیت آن لایه‌ای نازک از گراول روی بدنه چیده شد. هدایت هیدرولیکی مصالح بدنه و پی به کمک آزمایش تعیین هدایت هیدرولیکی به روش بار ثابت ۰/۱۲۸ سانتی‌متر در ثانیه تخمین زده شد. شکل (۱) جزئیات مدل آزمایشگاهی به همراه سیستم تامین آب مخزن و تصویر آن را نشان می‌دهد. در شکل (۲) نیز منحنی دانه‌بندی مصالح گلاس‌بید ارائه شده است. دیگر ویژگی‌های مربوط به بدنه و همچنین برخی از مشخصات مخزن در جدول (۱) ارائه شده است.

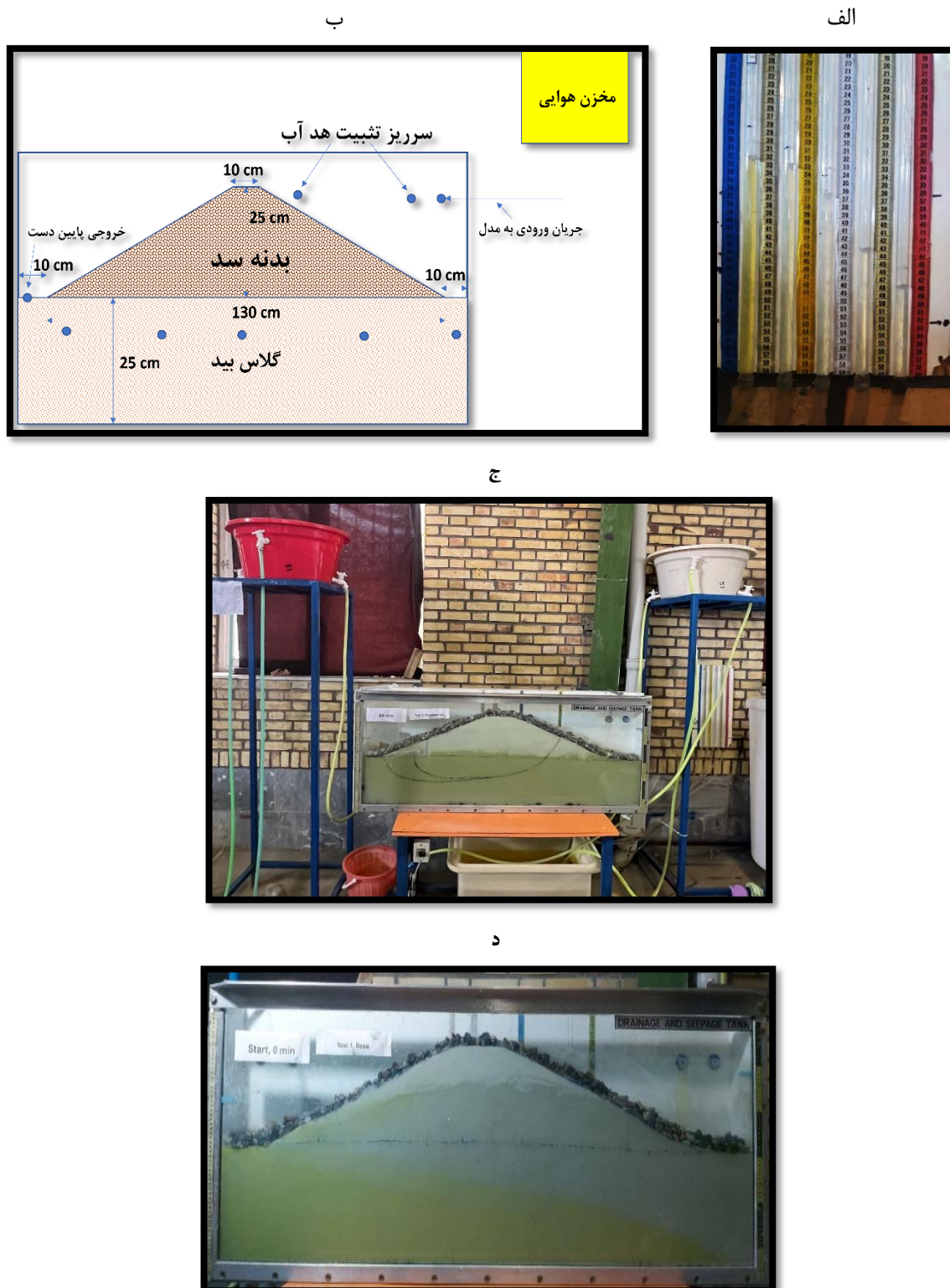
(*et al.*, 2012) ولی بین عملکرد زهکش‌های مختلف روی بسترهای نفوذپذیر مقایسه‌ای صورت نگرفته است (Kashef, 1969; Refaiy *et al.*, 2021, Kouhpeyma *et al.*, 2021). در واقع، حتی بسیاری از روش‌ها و مبانی طراحی بر اساس سد واقع بر بستر نفوذناپذیر است. از این رو در این طرح‌ها جریان نشت از بخش‌های فوقانی زهکش وارد آن می‌شود و اثر جریان‌های ورودی از پی و از کف زهکش در مطالعات دیده نشده است. بدین ترتیب یک مدل آزمایشگاهی از سد خاکی همگن طراحی و ساخته شد تا به صورت آزمایشگاهی تاثیر وجود انواع زهکش با طول یکسان و هندسه متفاوت بر میزان دبی نشت و تغییرات الگوی مسیر جریان در یک سد خاکی همگن واقع بر بستر آبرفتی بررسی گردد تا عملکرد این زهکش‌ها در شرایط وجود پی نفوذپذیر ارزیابی شود.

## مواد و روش‌ها

### مدل آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر یک سد خاکی همگن با مصالح گلاس‌بید<sup>۱</sup> به صورت ذرات گرد و شفاف شیشه‌ای با قطر ذرات ۰/۷ میلی‌متر تا ۰/۳۵ میلی‌متر ساخته شد. این مدل در یک تانک زهکشی به طول ۱۵۰ سانتی‌متر، عرض ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر ساخته شد. ارتفاع سد ساخته شده برابر با ۲۵ سانتی‌متر از سطح لایه نفوذپذیر در نظر گرفته شد که با احتساب موقعیت سرریزهای تخلیه ارتفاع آب مخزن حدود ۲۲ سانتی‌متر انتخاب گردید. عرض تاج برابر با ۱۰ سانتی‌متر و شیب بدنه بالادست و پایین‌دست

<sup>۱</sup> Glass bead



شکل ۱- جزئیات بدنه سد خاکی ساخته شده به همراه تصویر مدل سد خاکی ساخته شده. الف: سیستم اندازه‌گیری پیزومترها، ب: اجزای هندسی مدل آزمایشگاهی، ج: شمای کلی اجزای سیستم آزمایشگاهی، د: هندسه بدنه سد،

Fig. 1 - Details of the constructed earth dam body along with an image of the constructed earth dam model.

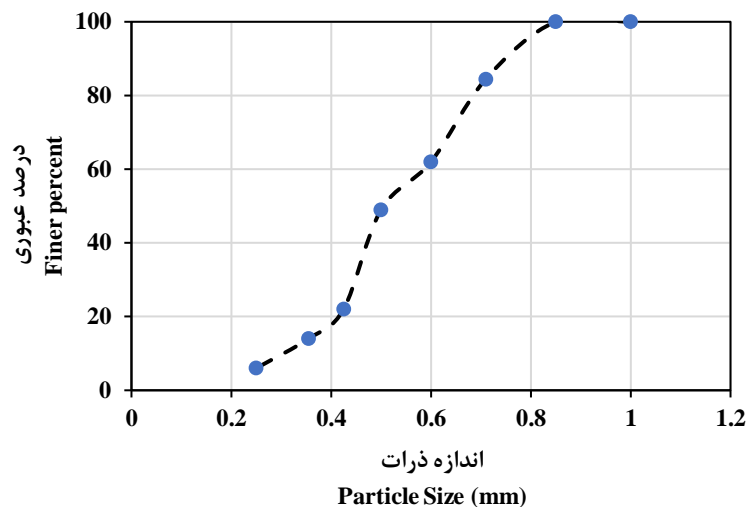
هندسه‌های بیان شد در سد ساخته شده استفاده شد. این زهکش‌ها با مصالح شن درشت‌دانه یکنواخت رودخانه‌ای به اندازه یک تا دو سانتی‌متر در طول ۲۱ سانتی‌متر، معادل ۱۶ درصد از عرض پی در نظر گرفته شد. ضخامت زهکش افقی و دودکشی حدود ۳ سانتی‌متر و زهکش پنجه به شکل مثلث متساوی الساقین و طول قاعده ۲۱ سانتی‌متر ساخته شد. دلیل استفاده از طول یکسان برای همه زهکش‌ها، مقایسه شکل هندسی آنها تحت طول یکسان بر پدیده نشت بود. برای جلوگیری از نفوذ مصالح بدنه به داخل زهکش، از یک لایه پارچه توری استفاده شد. در زهکش دودکشی ارتفاع بخش مایل برابر با ۱۰ سانتی‌متر و شیب آن در حدود ۱:۲ انتخاب شد. به منظور جلوگیری از اختلاط بخش ریزدانه بدنه سد با مصالح زهکش استفاده شده برای زهکش دودکشی از یک لایه پارچه توری روی مصالح زهکش استفاده شد. این پارچه طوری انتخاب شد تا مقاومتی در برابر جریان آب ورودی به زهکش ایجاد نکند زیرا ورود مواد ریز به داخل زهکش‌ها می‌تواند عملکرد آن‌ها را به شدت تحت تاثیر قرار دهد و منجر به نتیجه‌گیری اشتباه در مقایسه عملکرد آنها شود (Al Yaqoubi *et al.*, 2024). با این حال شکل‌های عمومی و کلی زهکش‌های مورد بررسی در این تحقیق تفاوت عمده با یکدیگر دارند و به صورت زهکش افقی، زهکش پنجه و زهکش دودکشی به کار گرفته شد و با حالت بدون زهکش مقایسه گردید. شکل (۳) تصاویر مدل‌های ساخته شده را برای حالت‌های مختلف به کارگیری زهکش‌ها نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در بدنه این باکس ۵ پیرومتر برای پایش تغییرات فشار آب منفذی در پی سد تعبیه گردید و به تابلو قرائت با دقت ۱ میلی‌متر متصل شد. موقعیت پیرومترها در جدول (۲) نشان داده شده است.

به منظور آبیگری سد، از یک تانک هوایی با تراز سطح آب ثابت استفاده شد. هنگام آزمایش، آب به درون این تانک پمپ می‌شد و مازاد جریان از طریق دو سرریز تعبیه شده در بدنه مدل تخلیه می‌گردید و سطح آب بدین ترتیب در این تانک ثابت بود. از این فرآیند برای ایجاد جریان ماندگار ورودی به مخزن استفاده می‌شد. شدت جریان ورودی به مخزن از طریق یک شیر تنظیم جریان قابل کنترل بود. ورودی جریان به مخزن از بخش فوقانی صورت می‌گرفت. در پایین دست مدل یک دریچه برای زهکشی جریان نشستی از پی و بدنه سد تعبیه شده بود که علاوه بر تخلیه جریان نشستی، در تعیین مقدار نشت به روش وزنی استفاده می‌شد. از رنگ مصنوعی خوراکی نارنجی<sup>۱</sup> برای مشاهده نشت آب یا حرکت آب در بدنه سد استفاده شد و مطابق با آن برای نمایان شدن خطوط جریان نشستی از بدنه سد از پرمنگنات پتاسیم استفاده شد. در شکل (۳)، تصاویر مربوط به زهکش‌های با هندسه‌های مختلف و طول بخش افقی یکسان نشان داده شده است.

هدف عبارت است از مطالعه تاثیر زهکش‌های افقی و پنجه و دودکشی بر فرآیند نشت و از این رو زهکش‌هایی با

<sup>۱</sup> Sunset yellow FCF



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مربوط به گلاس‌بید، مصالح بدنه سدهای خاکی ساخته شده

Fig. 2 – Particle size distribution curve for glass beads, the body material of the earth dam.

جدول ۱- مشخصات سد خاکی ساخته شده در تحقیق حاضر

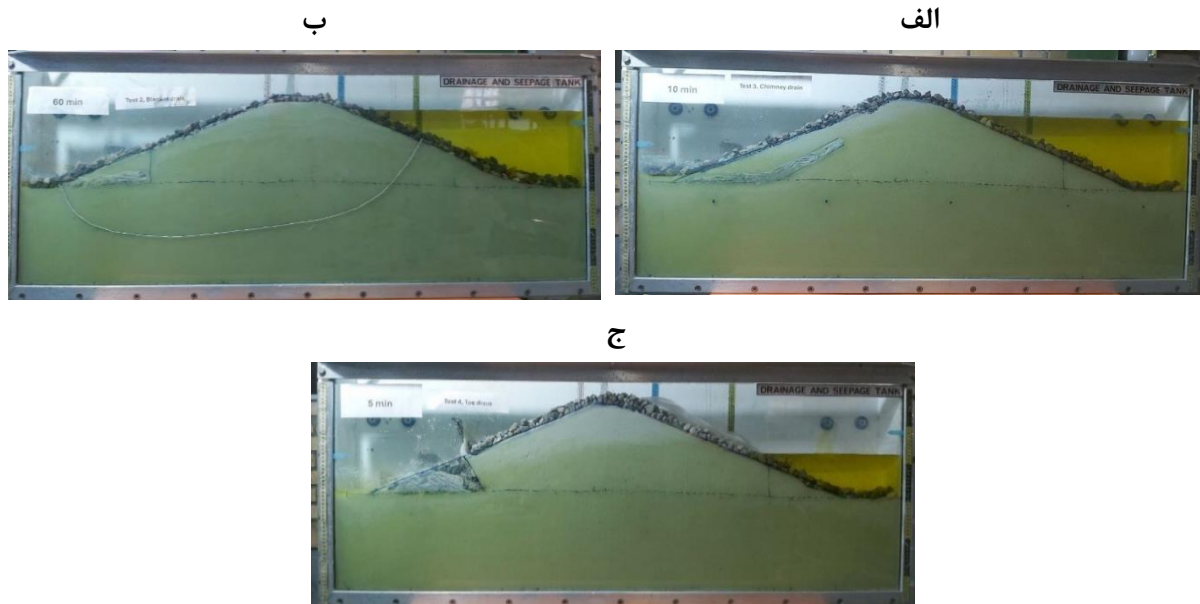
Table 1 - Characteristics of the earth dam constructed in the present study

مقدار Amount	پارامترها Parameter
10 سانتی‌متر	عرض تاج سد (B)
150 سانتی‌متر	طول مخزن سد (L)
25 سانتی‌متر	ارتفاع سد (H)
25 سانتی‌متر	عمق بستر آبرفتی (D)
10-20 سانتی‌متر	عمق آب ( $h_w$ )
1:2.5	شیب پایین دست و بالادست (z:1)
0.128 cm/s	هدایت هیدرولیکی بدنه سد (k)
0.4	نسبت عرض تاج به ارتفاع سد (B/H)
6	نسبت طول پی سد به ارتفاع سد (L/H)
0.8	نسبت عمق آب به ارتفاع سد ( $h_w/H$ )
60 سانتی‌متر	ارتفاع باکس ( $H_{box}$ )

جدول ۲- مختصات پیزومترهای نصب شده بر بدنه مدل نسبت به گوشه پایین پی در بالادست.

Table 2 - Coordinates of piezometers installed on the model body regarding the bottom of the foundation at the upstream.

فاصله از سطح پی Distance from foundation surface (mm)	Y(mm)	X(mm)	شماره پیزومتر Piezometer number
65	185	140	پیزومتر ۱۱ Piezometer 1۱
55	195	420	پیزومتر ۲۲ Piezometer 2۲
55	195	640	پیزومتر ۳۳ Piezometer 3۳
65	185	1010	پیزومتر ۴۴ Piezometer 4۴
65	185	1310	پیزومتر ۵۵ Piezometer 5۵



شکل ۳- تصاویر مربوط به زهکش‌های با هندسه‌های مختلف و طول بخش افقی یکسان. الف: زهکش دودکشی، ب: زهکش افقی، ج: زهکش پنجه

Fig. 3. View of different drains employed in the studied earth dams

$$C = \frac{V_T - V}{V_T} \quad (4)$$

در این رابطه‌ها:  $\bar{U}$  فشار آب حفره‌ای نرمال شده در زهکش،  $U_{no}$  نیروی فشار آب حفره‌ای در حالت بدون زهکش،  $\bar{Q}$  دبی نشت نرمال شده زهکش،  $Q$  دبی زهکش،  $Q_{no}$  دبی نشت در حالت بدون زهکش،  $V_T$  حجم کل بدنه سد، و  $V$  حجم زهکش است. برای نیروی فشار آب حفره‌ای ضریب اثر ۰/۷ و برای دبی ضریب ۰/۳ انتخاب شد. این ضریب‌ها بر اساس اهمیت فاکتور فشار آب حفره‌ای نسبت به دبی نشت انتخاب شدند.

### نتایج و بحث

نتایج این تحقیق به صورت جداگانه به بررسی و تفسیر هر یک از آزمایش‌ها و مقایسه آنها پرداخته است که این موارد در زیر ارائه می‌گردد.

#### الف- حالت بدون زهکش

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر وجود زهکش افقی بر پدیده نشت، یک حالت پایه بدون زهکش در نظر

### آنالیز ارزش

به منظور مقایسه بهتر زهکش‌های مختلف بکار رفته در این تحقیق و توصیه زهکش مناسب، آنالیز ارزش بر مبنای چند فاکتور مهم و تاثیرگذار صورت گرفت در این بررسی، مشابه با توصیه‌های النشر و همکاران (Elnashr *et al.*, 2023) از رابطه زیر برای ارزیابی و مقایسه زهکش‌های به کار رفته استفاده شد:

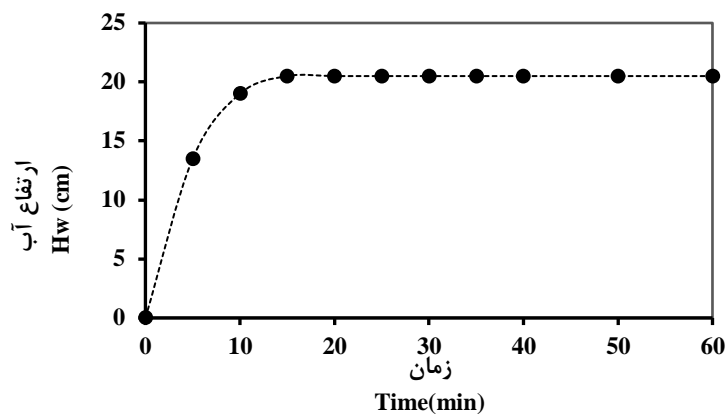
$$Value = \frac{F}{C} \quad (1)$$

که در آن: Value ارزش زهکش، F عملکرد زهکش و C هزینه ساخت است. در تعریف عملکرد زهکش از دو فاکتور متفاوت شامل کاهش فشار آب حفره‌ای و دبی نشت و برای هزینه حجم مصالح به کار رفته در نظر گرفته شد. برای نرمال سازی هر یک پارامترهای به کار رفته از رابطه‌های زیر استفاده شد:

$$\bar{U} = \frac{U_{no} - U}{U_{no}} \quad (2)$$

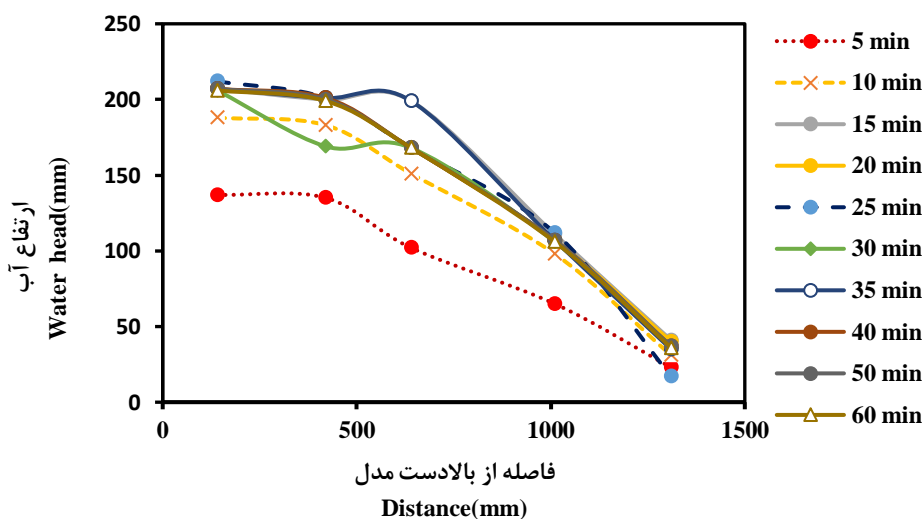
$$\bar{Q} = \frac{Q_{no} - Q}{Q_{no}} \quad (3)$$

گرفته شد و مدل آزمایشگاهی آن ساخته شد. شکل (۴) مدت ۱۵ دقیقه صورت گرفت و پس از آن سطح آب در الگوی آبیگری و افزایش تراز آب در مخزن سد را نشان می‌دهد. طبق این شکل، آبیگری با به صورت پیوسته در



شکل ۴- روند آبیگری و افزایش تراز آب در مخزن بالادست سد خاکی همگن مطالعه شده در حالت بدون زهکشی  
Fig. 4 – Water level raising in the reservoir of the studied earth dam in case of no drainage system.

بررسی و ثبت داده‌های مربوط به تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت اخیر بدون زهکشی در شکل (۵) ارائه شده است. در این بررسی در فاصله‌های زمانی معین و با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه، ارتفاع آب در هر پیزومتر قرائت و نسبت به سطح مبنای معین فشار آب در هر یک محاسبه شده است. طبق داده‌های ارائه شده در این شکل، در دقیقه ۳۰ ام در پیزومتر واقع در مختصات طولی ۴۲۰ میلی‌متر، فشار آب منفذی به صورت غیرعادی کمتر است تا در دقیقه ۱۰ ام. بررسی‌ها در زمان آزمایش نشان از وجود حباب هوا در لوله‌های پیزومتر داشت که در روند آزمایش با هواگیری مشکل رفع شد. همین امر موجب ایجاد نوسان در فشار آب منفذی در پیزومتر شماره ۳ در دقیقه ۳۵ ام شد و به صورت موقت مقدار فشار آب منفذی در این حالت بیشتر از مقدار معمول ثبت شده است. به‌طور خلاصه، با پیشرفت آزمایش و بعد از دقیقه ۴۰ ام آزمایش به حالت پایدار رسیده و تغییرات فشار آب منفذی در پیزومترها ثابت شده است.

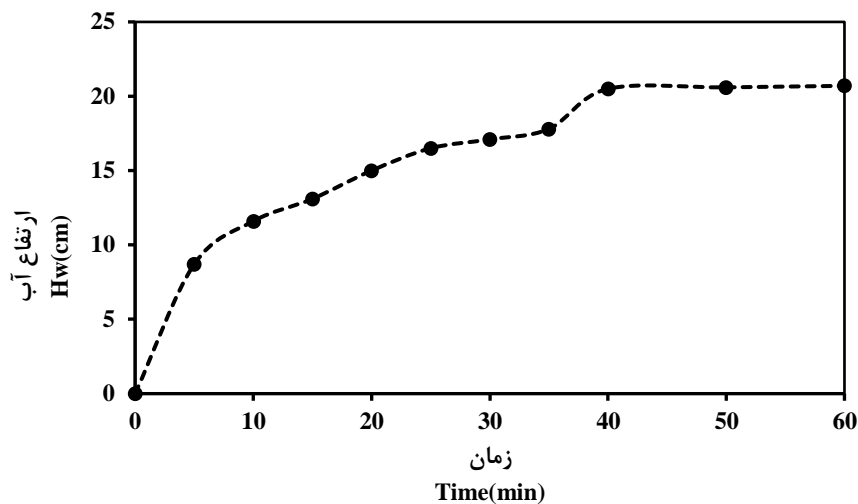


شکل ۵- تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت بدون زهکشی با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه از شروع آزمایش  
Fig. 5 – pressure head changes in piezometers for the No drain condition at 5 to 10 minute intervals

### ب- حالت زهکش افقی

افزایش پیدا می‌کند که طی ۵ دقیقه تراز سطح آب به سرریزهای تعبیه شده می‌رسد و عمق آب در مخزن ثابت شده است. استفاده از سرعت متغیر موجب افزایش عمق آب با سرعت متفاوت در مخزن بود و دلیل این کار بررسی پاسخ پیزومترها و برای حصول اطمینان از پاسخ دهی صحیح آنها بود. در واقع، در صورت عملکرد صحیح پیزومترها باید رفتار مشابه با تغییرات سرعت افزایش تراز آب در مخزن در فشار ثبت شده پیزومترها مشاهده می‌شد.

برای بررسی اثر زهکش افقی در پدیده نشت مدل آزمایشگاهی، حالت پایه با اجرای تغییرات و اضافه کردن یک لایه شن درشت بر اساس آنچه در بخش مواد و روش‌ها بیان شد به حالت زهکش افقی اصلاح شد. شکل (۶) روند آگیری در مخزن را برای این حالت نشان می‌دهد. بر اساس نمودار ارائه شده، آگیری با سرعت تقریباً یکنواخت تا دقیقه ۳۵ ادامه دارد اما پس از دقیقه ۳۵ ام دبی ورودی به مخزن

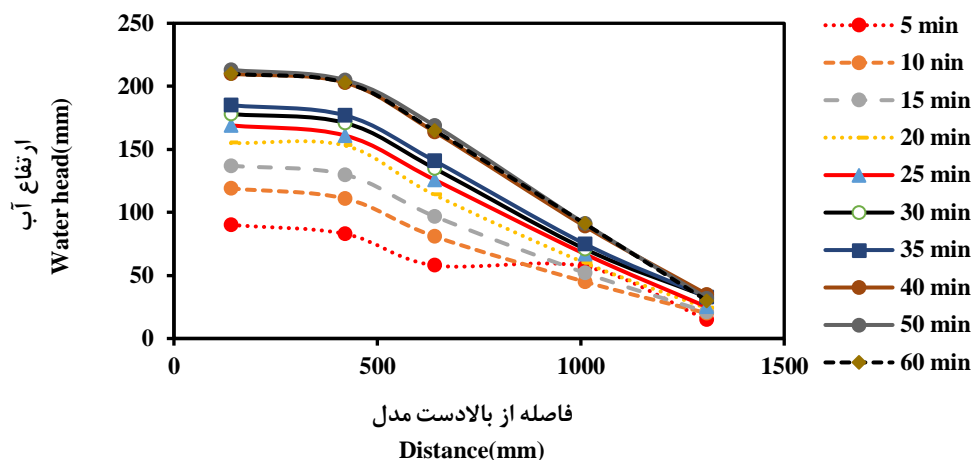


شکل ۶- روند آگیری در مخزن سد در حالت استفاده از زهکش افقی

Fig. 6 - Image of the homogeneous earth dam laboratory model in the horizontal drainage type, along with the reservoir water level from the start of the experiment.

از سد، فشار به حالت عادی برگشته است. علاوه بر این، همان‌طور که از این شکل مشخص است، در فاصله ۳۵ دقیقه ۴۰ ام که افزایش سریع در سرعت آگیری رخ داده است، پیزومترها هم متناسب با آن پاسخ داده‌اند و فاصله منحنی‌های مربوط افزایش چشمگیر نسبت به سایر حالات داشته است که بدان معناست در فاصله زمانی دقیقه‌های ۳۵ ام و ۴۵ ام که سرعت افزایش سطح آب حالت جهشی پیدا کرده است، فشار در پیزومترها هم در این ۵ دقیقه به صورت معنی‌دار با شدت و مقدار بیشتری افزایش را ثبت کرده است. طبق این نتایج، زمان تاخیر قابل توجهی بین افزایش سطح آب در مخزن و پاسخ پیزومترها وجود ندارد که می‌تواند به دلیل هدایت هیدرولیکی بالای محیط و مصالح سازنده بدنه سد باشد.

بررسی و ثبت داده‌های مربوط به تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت زهکش افقی در شکل (۷) ارائه شده است. در این بررسی در فاصله‌های زمانی معین و با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه ارتفاع آب در هر پیزومتر قرائت شده و نسبت به سطح مبنای معین فشار آب در هر یک محاسبه شده است. بر اساس داده‌های منعکس شده در شکل مذکور، در شروع آزمایش و در پیزومتر ۴، فشار آب منفذی به صورت غیر عادی بیشتر نشان داده می‌شود. این موضوع به دلیل وجود حباب هوا در پیزومتر یا هوای محبوس در بین ذرات پیش از اشباع شدن کامل محیط است. به عبارتی، جبهه حرکت جریان نشت به دلیل برخورد با هوای محبوس در اطراف این پیزومتر ممکن است موجب بالا رفتن موقت فشار شده باشد که پس از تخلیه هوای محبوس و حرکت آب به سمت بیرون



شکل ۷- تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت زهکشی افقی با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه

Fig. 7 - Water level changes in piezometers for horizontal drainage with 5 to 10 minute intervals.

### ج- زهکشی دودکشی

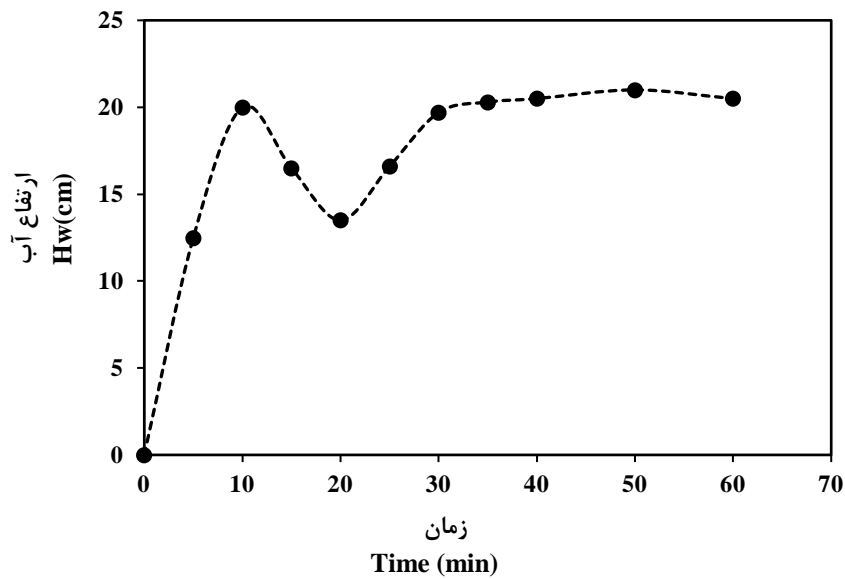
سانتی‌متر در اولین پیزومتر افزایش یافت. نوسان‌های سطح آب و پایین‌افتادن تراز آب در مخزن و سپس افزایش آن در عملکرد و پاسخ پیزومترها به خوبی مشاهده می‌شود، به طوری که در دقیقه ۱۵ ام و ۲۰ ام تراز آب در پیزومترها پایین افتاده و سپس افزایش پیدا کرده است.

### د- حالت زهکشی پنجه

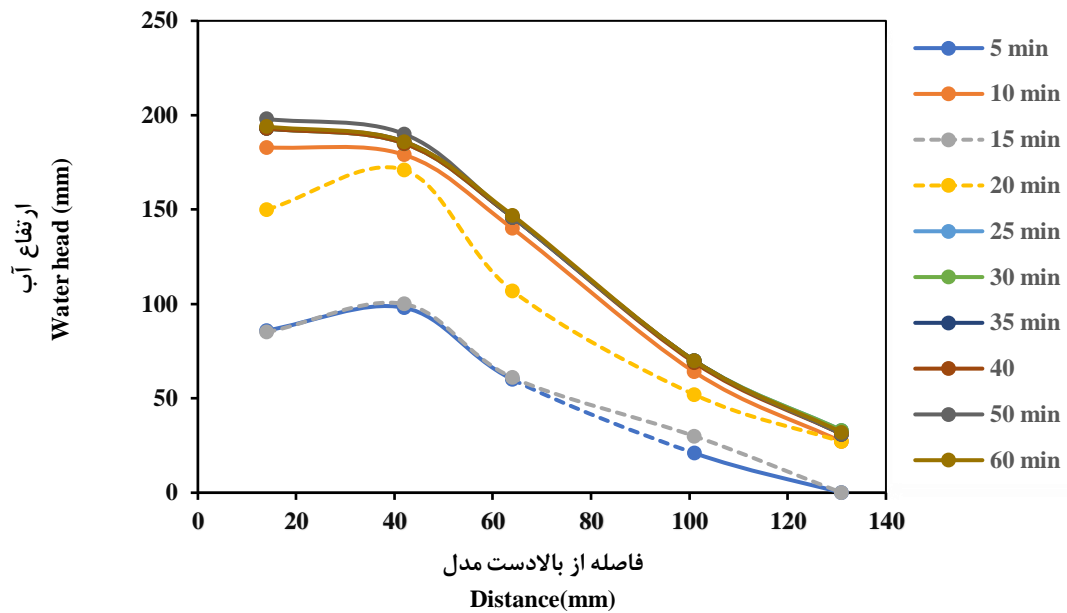
زهکشی پنجه یکی از انواع متداول زهکشی‌ها در کنترل نشت در سدهای خاکی همگن کوچک است که در این تحقیق به کار گرفته شد. زهکشی مورد نظر به صورت یک بخش مثلثی در پنجه سد ساخته شد. برای ساخت این زهکشی بخشی از پنجه سد حذف گردید و با مصالح درشت دانه ای جایگزین شد که برای ساخت دیگر زهکشی‌ها استفاده شده بود. هندسه این زهکشی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. طول بخش پایینی (قاعده) زهکشی برابر با ۲۱ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. سد در این حالت به صورت پیوسته آبدگیری شد. ارتفاع افزایش تراز آب مخزن در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. تغییرات فشار آب منفذی در محل نصب پیزومترها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. طبق این شکل، افزایش تدریجی فشار آب در پیزومترها با گذشت زمان و افزایش تراز آب در پیزومترها قابل مشاهده است.

مشابه با حالت زهکشی افقی، زهکشی دودکشی به صورت یک زهکشی افقی در ترکیب با یک زهکشی مایل به سمت بالادست سد، در بدنه سد کار گذاشته شد. برای مصالح زهکشی دودکشی از همان مصالح زهکشی افقی استفاده شد. پس از ایجاد بدنه سد بخش مخزن با ورودی جریان آب آبدگیری شد. از آنجایی که بخشی از این تحقیق برای تحلیل‌های غیرماندگار استفاده خواهد شد، بر کردن مخزن به صورت افزایشی، کاهشی و سپس افزایشی در نظر گرفته شد. منحنی آبدگیری سد در شکل (۸) ارائه شده است. بعد از حدود ۴۰ دقیقه، مخزن پر شد و تراز آب به حداکثر رسید. طبق داده‌های این گراف بعد از ده دقیقه از شروع آبدگیری عمق آب به حدود ۲۰ سانتی‌متر رسید و سپس پایین آورده شد و مجدداً افزایش یافت. دلیل این کار ایجاد نوسان در پیزومترها بود تا عملکرد صحیح آنها کنترل شود. پس از این نوسان‌ها، شرایط ماندگار و ثابت عمق آب در مخزن شکل گرفت.

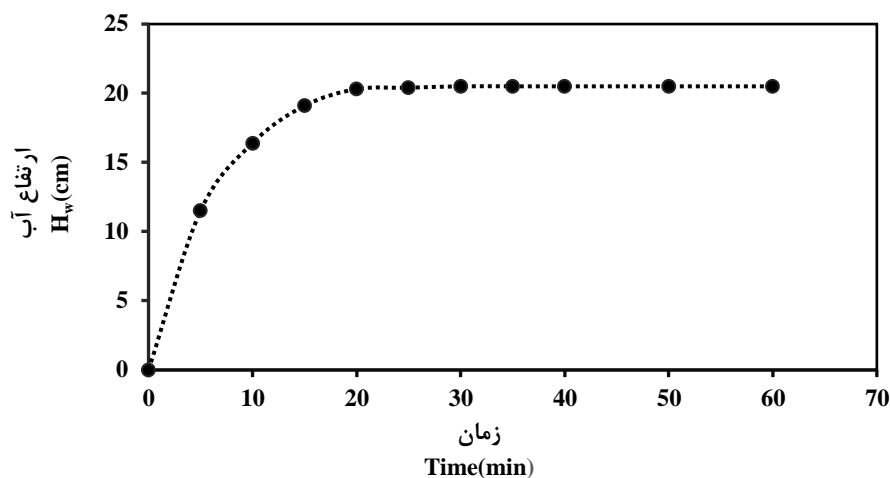
بر اساس داده‌های ثبت شده از پیزومترها، تغییرات فشار آب منفذی در پی سد در شکل (۹) ارائه شده است. طبق این شکل، فشار آب منفذی پس از شروع آبدگیری در پیزومترها افزایش پیدا کرد و در مدت ده دقیقه به حدود ۱۸



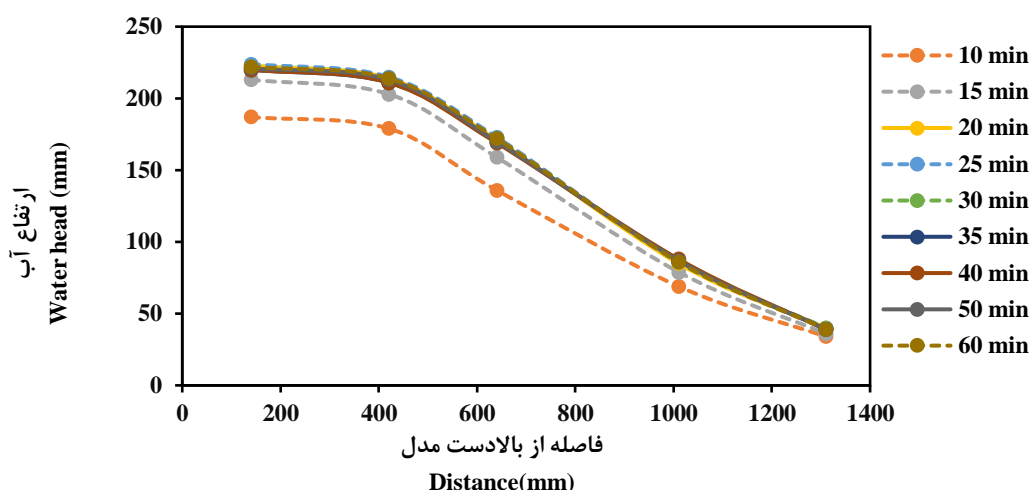
شکل ۸- تصویر مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن در حالت زهکشی دودکشی به همراه ارتفاع آب مخزن از لحظه شروع آزمایش  
 Figure 8 - Image of the homogeneous earth dam laboratory model with chimney drain, along with reservoir water level from the start of the test.



شکل ۹- تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت زهکشی دودکشی با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه  
 Fig. 9 - Changes in water level in piezometers for chimney drainage mode with an interval of 5 to 10 minutes



شکل ۱۰- تصویر مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن در حالت زهکش پنجه به همراه ارتفاع آب مخزن از لحظه شروع آزمایش  
 Fig. 10 - Image of the laboratory model of a homogeneous earth dam in the toe drainage type along with the reservoir water height from the moment the test started



شکل ۱۱- تغییرات تراز آب در پیزومترها برای حالت زهکش پنجه با فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه  
 Fig. 11 - Changes in water level in piezometers for the toe drainage mode with an interval of 5 to 10 minutes

### ج- تاثیر هندسه زهکش

(۱۲)، مقایسه روند کاهش منحنی‌ها نشان می‌دهد که زهکش پنجه و زهکش افقی تاثیر مشابهی بر تغییرات فشار آب منفذی داشته‌اند اما زهکش دودکشی نسبت به بقیه حالات افت بیشتری در مقدار فشار آب منفذی ایجاد کرده است. طول زهکش‌های به کار رفته برای حالت‌های مختلف یکسان است ولی از نظر شکل هندسی و مقدار مصالح به کار رفته در ساخت آنها تفاوت‌های زیادی باهم دارند. جدول (۳) حجم مصالح به کار رفته در ساخت هر یک از زهکش‌ها را به

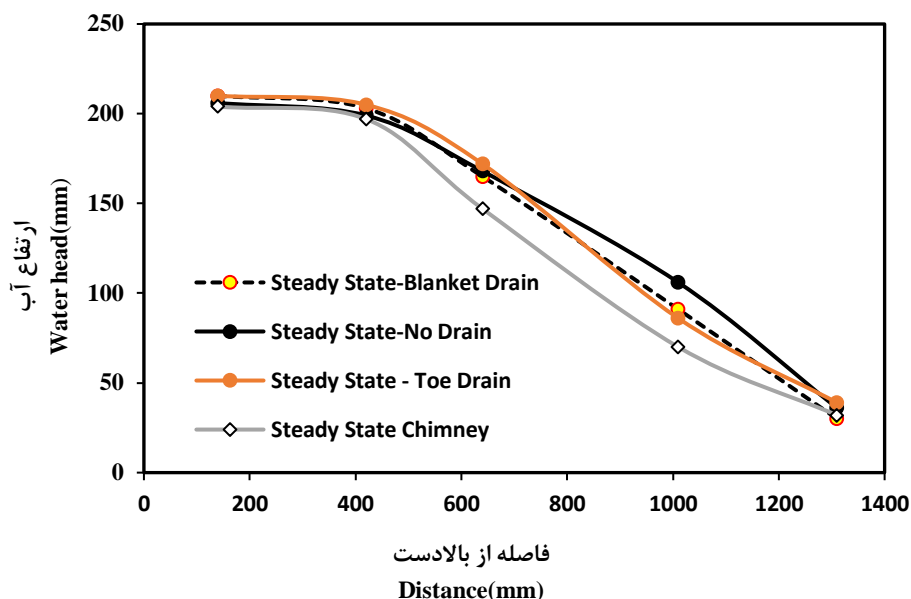
شکل (۱۲) تغییرات فشار آب منفذی در پیزومترها را برای حالت ماندگار در چهار حالت آزمایش شامل حالت بدون زهکش و سه نوع زهکش مختلف نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات ارائه شده در شکل، مقدار فشار آب منفذی در پی و عمق حدود ۵۶ میلی‌متر از پی سد در طول بدنه سد روند کاهشی دارد و از سمت مخزن به سمت بدنه پایین دست مقدار فشار کاهش یافته است. طبق نتایج ارائه شده در شکل

خط نشت نشان داده شده توسط رنگ تزریقی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، اطلاعات طول مسیر نشت اندازه‌گیری شده با استفاده چسباندن نخ روی مسیر نشت ثبت شده (شکل ۱۳ - زهکش افقی) و سرعت حرکت ماده رنگی در جدول (۴) گنجانده شده است. طبق اطلاعات ارائه شده در شکل (۱۳) و جدول (۴)، مسیر سرعت حرکت ماده رنگی از یک نقطه ثابت برای دو حالت مختلف از زهکش‌ها نسبت به حالت بدون زهکش تفاوت بسیار زیادی دارد و طول مسیر نشت در حالت زهکش افقی و پنجه به ترتیب حدود ۱۷ و ۲۰ درصد کوتاه شده است بر همین اساس سرعت جریان نیز در حدود ۱۱ درصد در زهکش پنجه و ۹ درصد در حالت زهکش افقی بیشتر از حالت بدون زهکش است. این نتایج نشان دهنده این موضوع است که گرادیان هیدرولیکی نشت در حالت وجود زهکش افزایش قابل توجهی نسبت به حالت بدون زهکش دارد و جریان نشت به سمت زهکش پنجه سریع‌تر رخ می‌دهد. این موضوع می‌تواند به دلیل حجم بالای مصالح درشت‌دانه بکار رفته و تاثیر آن در کاهش مسیر نشت جریان‌هایی باشد که از بخش‌های بالادست بدنه وارد بدنه سد می‌شوند. موضوعی که از این بخش تحقیق می‌توان استنباط کرد این است در سدهایی که از زهکش پنجه استفاده می‌شود، به دلیل بالاتر بودن سرعت نشت، به دلیل بالارفتن گرادیان هیدرولیکی احتمال خطر رگاب بیشتر از زمانی است که از زهکش افقی استفاده شود هر چند این دو فرم از زهکش به یک میزان مقدار فشار آب منفذی را در بدنه سد پایین می‌اندازند. در واقع می‌توان این‌گونه گفت که در حالت وجود پی نفوذپذیر در سد خاکی همگن، زهکش پنجه نسبت به زهکش افقی به شکل بهتری جریان عبوری از پی را جمع‌آوری می‌کند. اما از آنجایی که تغییرات مقدار فشار آب منفذی در دو حالت یکسان است، بر میزان نشت کلی اختلاف قابل توجهی ایجاد نمی‌کنند.

همراه فاصله افقی بالادست زهکش تا پنجه سد در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. با توجه جدول ارائه شده، میزان حجم مصالح به‌کار رفته در زهکش دودکشی تقریباً دو برابر (۱/۸۲ برابر) و حجم مصالح استفاده شده در زهکش پنجه حدود یک و نیم برابر (۱/۴۸ برابر) حجم مصالحی است که در زهکش افقی به‌کار رفته است. با این همه، تاثیر زهکش پنجه نسبت به زهکش افقی قابل توجه نیست زیرا طبق شکل (۱۲)، منحنی‌های توزیع فشار در دو حالت اخیر تقریباً بر هم منطبق شده‌اند. طبق نتایج به‌دست آمده، حجم مصالح در هندسه زهکش افقی و پنجه تاثیر قابل توجهی نداشته زیرا با وجود حجم بالای مصالح زهکش پنجه نسبت به زهکش افقی، در فشار آب منفذی اختلاف قابل توجهی مشاهده نمی‌شود و طول زهکش نقش مهم‌تری در کاهش فشار آب منفذی دارد.

علاوه بر بررسی تاثیر زهکش بر فشار آب منفذی پی، دبی نشت عبوری از بدنه سد در دو حالت مطالعه شده نیز بررسی گردید. جدول (۳)، دبی نشت اندازه‌گیری شده را برای حالت وجود زهکش افقی و حالت بدون زهکش نشان می‌دهد. بررسی و مقایسه مقدار دبی نشت عبوری از بدنه سدها نشان می‌دهد که وجود زهکش افقی موجب افزایش دبی نشت به میزان ۱۶ درصد نسبت به دبی حالت بدون زهکش شده است. بررسی اعداد مربوط به نشت نشان‌دهنده افزایش در میزان نشت در کلیه حالات نسبت به حالت بدون زهکش است. با این حال، مقایسه مقادیر نشت بین زهکش‌های مختلف اختلاف قابل توجه را بین مقادیر نشت ایجاد شده در بدنه سد نسبت به هم نشان نمی‌دهد.

به منظور بررسی سرعت جریان نشت و طول مسیر آن در زهکش‌های مختلف رنگ مصنوعی پرمنگنات پتاسیم از یک نقطه ثابت در بالادست مخزن وارد جریان نشت شد که طی آن طول مسیر و زمان حرکت رنگ ردیاب وارد شده از لحظه ورود تا رسیدن به زهکش ثبت شد. شکل (۱۳) مسیر



شکل ۱۲- مقایسه فشار آب منفذی در پیژومترها برای زهکشی‌های مختلف در شرایط ماندگار

Fig. 12 - Comparison of pore water pressure in piezometers for different drains under steady-state conditions

جدول ۳- حجم مصالح به کار رفته برای ساخت هر یک از زهکشی‌ها به همراه طول افقی آنها (از منتهای بالادست تا پایین دست)

Table 3- Volume and the horizontal length of the employed drainage system

طول افقی کلی زهکشی (cm) Length of Drain in Horizon (cm)	حجم مصالح به کار رفته (cm <sup>3</sup> ) Material Volume (cm <sup>3</sup> )	نوع زهکشی Drain Type
21	630	زهکشی افقی (Blanket Drain)
21	932	زهکشی پنجه (Toe Drain)
33.6	1147	زهکشی دودکشی (Chimney Drain)

جدول ۴- مقایسه طول مسیر خط نشت در سد‌های خاکی همگن

Table 4 - Comparison of seepage line lengths in homogeneous earth dams

زهکشی افقی Blanket Drain	زهکشی پنجه Toe Drain	بدون زهکشی No Drain	حالت Type پارامتر parameter
91	89	108.8	طول مسیر نشت (سانتی متر) length drain(cm)
1200	1152	1560	زمان طی مسیر (ثانیه) (sec) Time route
4.55	4.63	4.18	سرعت نشت سانتی متر بر دقیقه (cm/min) seepage rate

جدول ارزش زهکشی‌های به کار رفته بر اساس آنچه در نهایی در خصوص قضاوت بهترین زهکشی ممکن گردد. بخش مواد و روش‌ها بیان شد تکمیل گردید تا تصمیم‌گیری جدول (۵) نتایج مربوط به این بررسی را نشان می‌دهد. طبق

داده‌های ارائه شده در جدول، از لحاظ فاکتور کاهش فشار آب حفره‌ای زهکشی دودکشی بهترین عملکرد و زهکش افقی ضعیف‌ترین نتیجه را نشان می‌دهد. در مورد فاکتور دبی نشت، کمترین مقدار نشت مربوط به زهکش افقی است به همین دلیل فاکتور مربوط ( $\bar{Q}$ ) برای زهکش افقی بیشترین و برای زهکش دودکشی کمترین مقدار محاسبه شده است. این بدان معناست از لحاظ ارزش‌گذاری بر مبنای دبی نشت، در زهکش افقی به دلیل کمتر بودن مقدار نشت، ارزش این نوع زهکش بیشتر از دیگر انواع زهکش‌هاست. بر اساس جدول (۵) و داده‌های نهایی ارزش کلی زهکش، زهکش دودکشی ارزش دو برابر را نسبت به زهکش افقی و زهکش پنجه نشان می‌دهد.

ب



الف



ج



شکل ۱۳- مسیر نشت از یک نقطه مشترک در سد خاکی با زهکش‌های مختلف

Fig. 13 - Seepage path from a common point in an earth dam with different drains

جدول ۵- جدول آنالیز ارزش زهکش‌های مختلف به کار رفته در سد خاکی همگن مطالعه شده

Table 5- Value analysis of the employed drainage systems in the studied earth dam

Value	F	پارامتر Parameter			زهکش Drain
		C	$\bar{Q}$	$\bar{U}$	
0.051403	0.051403	0.964	0.159498	0.00508	زهکش افقی Blanket Drain
0.046044	0.046044	0.947	0.143116	0.00442	زهکش پنجه Toe Drain
0.097219	0.090851	0.934	0.148861	0.06599	زهکش دودکشی Chimney Drain

## نتیجه گیری

و نشان داده شد که در زهکش پنجه سرعت حرکت آب بیشتر است تا در زهکش افقی و نسبت به حالت بدون زهکش ۱۰ درصد بیشتر است. این نتیجه نشان می‌دهد که احتمال وقوع رگاب در سدهای خاکی همگن با زهکش پنجه بیشتر از زمانبست که از زهکش افقی استفاده می‌گردد. البته این یافته به این معنا نیست که در زهکش پنجه حتما رگاب رخ خواهد داد، وقوع آن بستگی دارد به نسبت گرادیان خروجی و گرادیان بحرانی مصالح تشکیل دهنده بدنه سد. با این حال، هر چه سرعت حرکت آب در خاک بیشتر باشد گرادیان بالاتر است و نیز در مقایسه با سرعت‌های جریان نشت کم، احتمال رگاب بیشتر است.

۶- بر اساس آنالیز ارزش صورت گرفته بر مبنای سه فاکتور کاهش فشار آب حفره‌ای، دبی نشت و حجم مصالح به کار رفته به عنوان فاکتور هزینه، زهکش دودکشی بیشترین و زهکش پنجه کمترین ارزش را نشان می‌دهد. البته اختلاف ارزش بین زهکش دودکشی و زهکش پنجه بسیار اندک است. این یافته‌ها با توصیه‌های منابع علمی (Rahimi, 2015) در خصوص طراحی زهکش‌ها مطابقت دارد.

نتایج این تحقیق نشان از برتری کاربرد زهکش دودکشی نسبت به زهکش‌های دیگر در استهلاک فشار آب منفذی دارد هرچند زهکش دودکشی موجب هدررفت و نشت بیشتری از آب می‌شود. در حالات یکسان از طول زهکش، زهکش افقی نسبت به زهکش پنجه برتری دارد. با این حال وجود زهکش پنجه به دلیل به کارگیری حجم بالایی از مصالح درشت‌دانه می‌تواند به پایداری بدنه سد کمک کند. این موضوع نیاز به بررسی بیشتری دارد تا به صورت کمی نتایج آن با حالات دیگر از کاربرد زهکش‌ها مقایسه شود.

نتایج حاصل از این مطالعه آزمایشگاهی به وضوح مؤید کارایی بالای زهکش در کاهش فشار آب منفذی ایجاد شده در بدنه سد و بهبود عملکرد هیدرولیکی سدهای خاکی همگن روی بسترهای آبرفتی است. مقایسه نتایج حاصل از بررسی کاربرد سه نوع زهکش مختلف به شرح زیر است:

۱- با به کارگیری انواع زهکش‌های مختلف مقدار فشار آب منفذی در پی سد خاکی کاهش پیدا می‌کند.

۲- بر اساس داده‌های به دست آمده از پی‌زومترهای به کار رفته در بدنه سد خاکی مورد مطالعه، زهکش دودکشی، نسبت به زهکش افقی و پنجه، عملکرد بسیار بهتری در کاهش فشار آب منفذی از خود نشان داد. در این میان، زهکش افقی و زهکش پنجه نتایج مشابهی در خصوص کاهش فشار آب منفذی از خود نشان دادند. بر اساس یافته‌های رفای و همکاران (Refaiy *et al.*, 2021) این موضوع می‌تواند به دلیل طول بیشتر تصویر افقی این زهکش باشد.

۳- بررسی دبی نشت از بدنه سد خاکی در حالات مختلف از زهکش به کار رفته نشان داد که بیشترین مقدار نشت مربوط به حالت زهکش دودکشی است در حالی که زهکش پنجه و زهکش افقی نتایج مشابهی در مقدار نشت عبوری از بدنه سد به دست دادند.

۴- طول مسیر نشت برای ذره آب ورودی از یک نقطه یکسان در وجه بالادست در زهکش پنجه ۱۸ درصد و در زهکش دودکشی حدود ۱۶ درصد نسبت به حالت بدون زهکش کوتاه‌تر شده است و همین موضوع موجب افزایش دبی نشت در این دو زهکش نسبت به حالت بدون زهکش شده است.

۵- سرعت نشت و حرکت آب در داخل بدنه سد برای دو حالت زهکش افقی و پنجه با حالت بدون زهکش مقایسه

## منابع

- Ahmadi, H., Abtahi, T. & Aghazadeh, N. (2017b). Effect of hydraulic functions in transient seepage analysis through the earth dam and its foundation (Case study: Derik Earth Dam). *Iranian Water Researches Journal*, 11(4), pp.1–11.
- Ahmadi, H. & Rezaei, H. & Zeinalzadeh, K. (2017a). An experimental study of the influence of hydraulic conductivity function on modeling seepage through earth dam cores. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(3), pp.299–307. (in Persian)
- Ahmadi, H., Salimi, H. & Hemmati, M. (2018). Analysis of seepage through earth dams by using finite difference numerical method and extended pressure technique. *Journal of Research in Irrigation and Drainage Engineering Structures*, 19(72), pp.1–14. (in Persian)
- Ahmadi, H. & Vahid, R. (2014). Investigation on the effects of hydraulic conductivity function in unconfined seepage analysis (Case study: Hassanlu Earth Dam). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(3), pp.430–442.
- Al-Yaqoubi, S., Al-Maktoumi, A., Obnosov, Y. & Kacimov, A. (2024). Clogging of toe drain drastically affects phreatic seepage in earth dams. *Advances in Water Resources*, 190, 104737.
- Amr, R., Refaiy, N. M., Aboul, A., Neveen, Y., Saad, D. A. & Molla, E. (2021). Modeling the effect of downstream drain geometry on seepage through earth dams. *Ain Shams Engineering Journal*, 12, pp.101–113.
- Çalamak, M., Bingöl, A. N. & Yanmaz, A. M. (2018). Effect of drainage properties on seepage behavior of earth-fill dams. *Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering*. Istanbul, Turkey.
- Djehiche, A., Amieur, R. & Gafsi, M. (2012). Seepage through earth dams with chimney drain on pervious foundation. *Advanced Materials Research*, 452, pp.538–542.
- Elnashar, W., Abd-Elhamid, H. F., Zelenáková, M. & Elyamany, A. (2023). Value engineering approach to evaluate the agricultural drainage water management strategies. *Water*, 15(4), 831.
- Garg, S. K. (2013). *Irrigation engineering and hydraulic structures* (23rd rev. ed.). New Delhi, India: Khanna Publishers.
- Hassan, W. H. & Zwain, H. M. (2024). The influence of drain pipe location and diameter on seepage through an earth dam. *Ain Shams Engineering Journal*, 15, 102475.
- Javani, A., Yusefzadeh-Fard, M. & Moradi, G. (2015). A study on the effect of implementing waterproof membrane on reduction of water seepage from earthen dams (Case study: Shahid Madani Earth Dam, Tabriz, Iran). *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 36(3), pp.2693–2717.
- Kashef, A. A. I. (1965). Seepage through earth dams. *Journal of Geophysical Research*, 70(24), pp.6121–6128.
- Kouhpeyma, A., Kilanehei, F., Hassanlourad, M. & Ziaie-Moayed, R. (2022). Numerical and experimental modelling of seepage in homogeneous earth dam with combined drain. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3), pp.292–302.
- Liu, K., Vardon, P. J. & Hicks, M. A. (2019). Probabilistic analysis of seepage for internal stability of earth embankments. *Environmental Geotechnics*, 6(5), pp.294–306.
- Mahmoud, A., Badakhshan, M. & Seifi, A. (2016). The effect of horizontal drain length on seepage discharge, uplift force and hydraulic gradient in homogeneous earth dams by numerical simulation. *Specialized Scientific Quarterly of Construction Engineering and Management*, 1(3), pp.45–55. (in Persian).
- Malekpour, A., Farsadzadeh, D., Hosseinzadeh Dalir, A. & Sadrekarimi, J. (2012). Effect of horizontal drain size on the stability of an embankment dam in steady and transient seepage conditions. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 36, pp.139–152.

- Mohebat Zadeh, A., Meshkal, M. & Hedayat, N. (2011). Seepage analysis in earth dams with clay core using SEEP/W software (Case study: Karkheh Earth Dam). *Proceedings of the 6th National Congress of Civil Engineering*. Semnan University, Iran. (in Persian)
- Mohammed, Y. F., Salama, N. Y. & Al-Labban, F. A. S. (2014). Seepage analysis of a zoned earth dam by finite elements. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(8), pp.128–139.
- Mahmoud, M. M. & Shen, Z. Z. (2024). Seepage behaviour through earth dams with zones of different filling materials. *Water SA*, 50(1), pp.106–120. <https://doi.org/10.17159/wsa/2024.v50.i1.4055>
- Nasrollahi, M. (2011). Investigation of different combinations of trench depth and clay blanket for reducing seepage in earth dams (Case study: Satarkhan Dam) (*M.Sc. Thesis*), Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Persian)
- Omofunmi, O. E., Kolo, J. G., Oladipo, A. S., Diabana, P. D. & Ojo, A. S. (2017). A review on effects and control of seepage through earth-fill dam. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 22(5), pp.1–11.
- Rahimi, H. (2015). *Earth dams*. Tehran, Iran: University of Tehran Press. (in Persian)
- Shirazi, M. G., Rashid, A. S. B. A. & Ganiyu, A. A. (2023). Analysis of seepage control system improvement in an earthen dam. *Dams and Reservoirs*, 33(1), pp.27–33.
- Zhang, L. M., Xu, Y. & Jia, J. S. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach. *Georisk*, 3(3), pp.184–189. <https://doi.org/10.1080/17499510902831759>
- Zhang, X. S., Wang, C. Y., Wong, H., Jiang, T. & Dong, J. Y. (2022). Modeling dam deformation in the early stage of internal seepage erosion: Application to the Teton Dam, Idaho, before the 1976 incident. *Journal of Hydrology*, 605, 127378. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127378>
- Zheng, H., Shi, Z., Shen, D., Peng, M., Hanley, K. J., Ma, C. & Zhang, L. (2021). Recent advances in stability and failure mechanisms of landslide dams. *Frontiers in Earth Science*, 9, 65993