

Evaluation of Hydraulic and Stability Behavior of Homogeneous Earth Dam with Combined Drain

Azam Kouhpeyma¹, Fouad Kilanehei^{2*}, Mahmood Hassanlou Rad³, Reza Ziaee Moayad⁴

1. MSc student of Civil Engineering, Imam Khomeini International University.
2. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University.
3. Associate Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University.
4. Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University.

*kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

Received: 14 May 2019, Accepted: 23 August 2019  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Different types of drainage systems are used for seepage control through earthfill dams; including horizontal toe drain, triangular toe drain, chimney drain and combined toe drain. Earthfill dams are constructed by soil compaction, so horizontal permeability is more than vertical permeability. As a result, hydraulic performance of chimney drain is better than triangular toe drain and operation of triangular toe drain is more suitable than horizontal toe drain. On the other hand, triangular toe drain can be repaired due to the more accessible position, if necessary, and is easier to implement than chimney drain. In this research, a combined drain, as a replacement for triangular toe drain is introduced, and its hydraulic performance is studied and compared with triangular toe drain. In order to achieve this goal, first, the hydraulic efficiency of the combined drain is investigated through physical modeling. After assuring the positive performance of combined drain and acceptable comparing of numerical and physical modeling results, sensitivity analyses of the seepage and stability were numerically performed. For this purpose, the height of triangular toe drain was decreased from 20 to 50%, and a part of the saved material was attached to triangular toe drain as horizontal toe drain. This kind of drain called combined drain.

Methodology: In this study, firstly, the hydraulic performance of 3 physical models with different drainage system (without drain, with triangular toe drain, and with combined drain) is studied. Models were constructed in a box with 11 piezometers and 2 spillways in upstream and downstream which are used to keep the water level fixed in reservoirs. Height, length and width of this box are 1m, 1.1m, and 0.15m, respectively. Height of physical models, considering the dimensional constraints of box considered 49 cm. The slopes angles were kept about 45 degrees and the crest width was dictated 21 cm. The height of triangular toe drain, considering Creager's recommendation was chosen 17 cm. In the models with combined toe drain, height of triangular part, considering 15% reduction, was assumed to be 14.5 cm and length and thickness of the horizontal part of combined drain were 11.5 and 5 cm respectively. Upstream and downstream water level were set as 47 and 4 cm for all models. Piezometric water level as a representative of phreatic surface, and volumetric flux were recorded from

physical models. Then, numerical models were run using Geo-studio software. Hydraulic performance comparison between these two physical and numerical analyses illustrated acceptable agreement. In the following, additional analyses were performed just numerically in order to assure the adequacy of combined drain. The size and characteristics of numerical models were assumed based on the real earthfill dams characteristics. Seepage analyses were performed for both steady state and rapid drawdown conditions, then stability analyses were done for downstream slope (end of construction, steady flow condition and quasi-static condition) and upstream slope (drawdown condition) for these models.

Results and discussion: Comparison between models having triangular toe drain and combined toe drain, in which half of the remaining material from toe triangular drain height reduction were horizontally attached to toe drain, showed an increase in cover length of downstream on phreatic line, and also noticeable rise in amount of discharged water; so in the next step, models having combined toe drain, with the same hydraulic performance as models with triangular toe drain were compared. Also, stability performance of these two models were evaluated. Stability analyses of the models showed ignorable difference in factors of safety due to the little share of drain area in slip surface in which causes slight change in shear strength, and also, phreatic surface dropping down in which causes an increase in dry area of earth dam downstream and induces an increase in unit weight of soil and subsequently, expansion of slope stability.

Conclusion: The process described in the previous parts, approved proper performance of the combined drain when it is used as a replacement for triangular toe drain. It was revealed that when a triangular toe drain substitute with combined drain, it will improve the hydraulic performance of the earthfill dam and will also result in a noticeable reduction in drain material usage in which it is more expensive than body material. In addition, this replacement will have a negligible effect on the static and quasi-static stability of the reservoir slopes. Therefore, the adequacy of the proposed drainage system is confirmed as a suitable alternative for triangular toe drain in homogeneous soil dams. Results indicated 11 to 157% increase in cover length on downstream phreatic line and 25 to 50% reduction in drain material compared with triangular toe drain, in models which half of the saved drain material was used as horizontal toe drain. On the other hand, using combined drain with the same hydraulic performance instead of triangular toe drain results in 17 to 60% decrease in volume of drain material.

Keywords: Homogeneous earth dam, Combined drain, Seepage analysis, Stability analysis, Physical and numerical modeling.

بررسی رفتار هیدرولیکی و پایداری سد خاکی همگن با زهکش ترکیبی

اعظم کوه پیمای^۱، فواد کیلانتهئی^{۲*}، محمود حسنیو راد^۳، رضا ضیایی موید^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

۴- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

*kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۱ ☞ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در این پژوهش، استفاده از زهکش ترکیبی به عنوان جایگزینی برای زهکش پنجه‌ای در سدهای خاکی همگن تا ارتفاع ۳۵ متر پیشنهاد و عملکرد آن از منظر هیدرولیکی و پایداری کلی سد بررسی و با زهکش پنجه‌ای مقایسه شده است. برای دستیابی به این هدف، در آغاز با استفاده از مدل فیزیکی عملکرد هیدرولیکی زهکش ترکیبی بررسی شد. پس از اطمینان از تاثیر مثبت این جایگزینی بر عملکرد هیدرولیکی و سازگاری مناسب مدلسازی عددی و فیزیکی، تحلیل‌های (آنالیزهای) مختلف تراوش و پایداری با مدلسازی عددی به کمک نرم‌افزار ژئواستودیو انجام شد. به این ترتیب که در مدل‌های عددی ارتفاع زهکش پنجه‌ای بین ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش داده شد و بخشی از مصالح باقی‌مانده به صورت زهکش افقی، با زهکش پنجه‌ای کاهش یافته، ترکیب شد. بنابر نتایج، در مدل‌هایی که نیمی از مصالح باقی‌مانده از کاهش ارتفاع زهکش پنجه‌ای، در ایجاد قسمت افقی استفاده شده بود، کمترین فاصله‌ی عمود مابین شیب پایین‌دست با سطح آزاد آب در داخل بدنه بین ۱۱ تا ۱۵۷ درصد افزایش و حجم مصالح زهکش بین ۲۵ تا ۵۰ درصد در مقایسه با مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، استفاده از زهکش ترکیبی با عملکرد هیدرولیکی یکسان با زهکش پنجه‌ای، ضمن کاهش ۱۸ تا ۶۰ درصدی حجم مصالح زهکش، به رغم حذف بخشی از مصالح درشت‌دانه که مقاومت برشی بیشتری نسبت به مصالح بدنه دارند، به دلیل سهم کمتر ناحیه‌ی زهکش در طول سطح لغزش و پایین افتادن سطح آزاد آب و افزایش تنش موثر در بخش پنجه، منجر به کاهش بیشینه تا ۱۰/۶۸ درصد در پایداری شیب‌های پایین‌دست شد.

واژگان کلیدی: سد خاکی همگن، زهکش ترکیبی، تحلیل تراوش، تحلیل پایداری، مدلسازی فیزیکی و عددی.

۱- مقدمه

همگن استفاده می‌شود. از جمله کارکردهای مهم زهکش در سدهای خاکی افزون بر توانایی گردآوری و خروج آب نشت یافته از بدنه‌ی سد، خشک نگه داشتن بخش بزرگی از بدنه، به منظور مهار (کنترل) اضافه فشار آب حفره‌ای در حین زلزله است که با افزایش پایداری، امکان استفاده از شیب‌های تندتر در پایین‌دست سد را فراهم می‌سازد. در سدهای خاکی همگن، انواع مختلفی از زهکش‌ها، استفاده می‌شوند؛ از آن جمله می‌توان به زهکش افقی،

از ابتدایی‌ترین انواع سدهای خاکی که امروزه نیز به رغم پیشرفت علم و فناوری کماکان استفاده می‌شوند، سدهای خاکی همگن هستند؛ به دلایلی مانند بی‌نیازی به تجهیزات و فناوری پیچیده برای احداث، امکان استفاده از مصالح خاکی در دسترس، سازگاری با محیط زیست و امکان احداث روی بسترهای با مقاومت کمتر، به ویژه به منظور ایجاد بندها و گوره‌های^۱ مهار سیلاب، همچنان از سدهای

¹ Levee

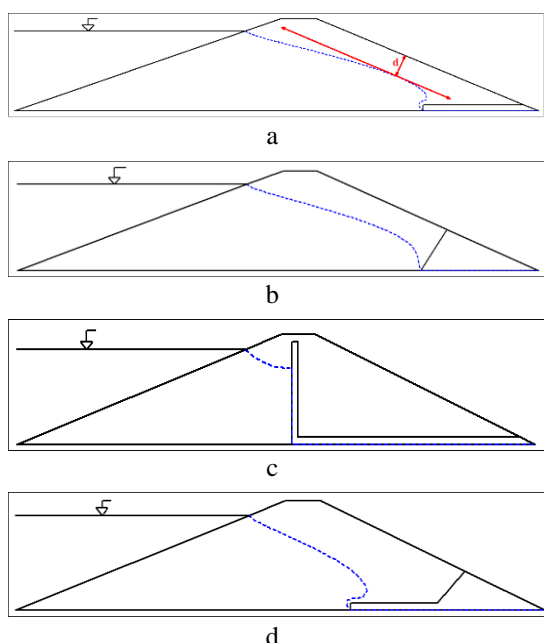


Fig. 1 Different types of drain in homogeneous earth dams, (a) Horizontal toe drain, (b) Triangular toe drain, (c) Chimney drain, (d) Combined drain

شکل ۱ انواع مختلف زهکش در سدهای خاکی همگن، (a) زهکش افقی، (b) زهکش پنجه‌ای، (c) زهکش دودکشی، (d) زهکش ترکیبی

رابطه‌ای بدون بعد برای حل مسئله‌ی تراوش دائمی دو بعدی ارائه دادند؛ فراسنجه‌های (پارامترهای) بی‌بعد استفاده شده در این رابطه عبارت‌اند از نسبت ناهمسانی محیط متخلخل، توزیع ابعاد ذرات و نسبت ارتفاع محیط متخلخل به ارتفاع صعود موئینگی. (Chahar (2004) فاصله‌ی عمود بر شیب پایین دست با سطح آزاد آب را طول پوشش شیب پایین دست روی سطح آزاد آب نامید. طول پوشش شیب پایین دست روی سطح آزاد آب با فراسنجه‌ی d در شکل ۱-۱ ارائه شده است. ایشان با کمک روش ترسیمی کاساگرانده، رابطه‌هایی را برای تعیین کمترین طول پوشش بر مبنای طول زهکش افقی و برعکس ارائه داد. Mishra and Singh (2005) با معیار قرار دادن ارتفاع صعود موئینگی، با استفاده از روش تحلیلی، رابطه‌ها و نمودارهایی برای برآورد دبی عبوری از یک گوره پیشنهاد دادند. در تحقیق دیگری Mishra and Parida (2006) رابطه‌ها و نمودارهایی برای تعیین ابعاد زهکش پنجه‌ای ارائه دادند که با استفاده از روش کوژنی^۱ و کاربرد روش قطعه‌ها حاصل شده بود. نتایج

پنجه‌ای، دودکشی و ترکیبی اشاره کرد (Sharma, 1991). زهکش‌های یاد شده در شکل ۱-۱ تا d-۱ نمایش داده شده‌اند. با توجه به اینکه در ساخت سد خاکی، خاک به صورت لایه‌ای کوبیده می‌شود، قابلیت نفوذپذیری در راستای افقی بیشتر از راستای قائم است؛ به همین دلیل، عملکرد زهکش دودکشی در گردآوری آب بهتر از زهکش پنجه‌ای و عملکرد زهکش پنجه‌ای مناسب‌تر از زهکش افقی است. از سوی دیگر اجرای زهکش پنجه‌ای از زهکش دودکشی ساده‌تر است و در صورت مسدود شدن آن در نتیجه‌ی سسته شدن ریزدانه‌های بدنه در دراز مدت، امکان ترمیم و بازسازی زهکش پنجه‌ای به دلیل موقعیت قرارگیری در دسترس‌تر، وجود دارد. همان‌گونه که در شکل ۱-d-۱ نشان داده شده است، زهکش ترکیبی، ترکیب زهکش پنجه‌ای و افقی با ابعاد کمتر از هر حالت به تنهایی است.

تا اوایل دهه‌ی ۱۹۲۰ میلادی طراحی سدها بر مبنای تجربه‌های موفق گذشته در سد سازی بود (Casagrande, 1937). Forchheimer (1930) روش ترسیمی خود را برای حل بعضی از مسئله‌های محدود و ساده‌ی تراوش ارائه داد. برابر نظر Sherard (1966) ابعاد زهکش باید به گونه‌ای طراحی شود که افزون بر جلوگیری از برخورد سطح آزاد آب با شیب پایین دست، ناحیه‌ی صعود موئینگی هم در فاصله‌ی مناسبی از شیب پایین دست قرار گیرد.

(Freeze (1971) با به‌کارگیری روش تفاضل محدود تاثیر وجود ناحیه‌ی غیر اشباع بالای سطح آزاد آب را در دو جریان دائمی و گذرا در نظر گرفت و نشان داد شرایط بالای سطح آزاد در خاک ریزدانه بر موقعیت سطح آزاد تاثیرگذار است. Tesarik and Kealy (1984) با مدلسازی فیزیکی چند سد خاکی در حالت وجود زهکش افقی و بدون زهکش، همچنین به‌کارگیری دو روش عددی تفاضل محدود و عنصر (المان) محدود و نیز مقایسه‌ی نتایج با دو سد واقعی، نمودارهایی را برای برآورد عملکرد زهکش افقی در تعیین موقعیت سطح آزاد، ارائه دادند. Boufadel et al. (1999) در نظر گرفتن تغییرپذیری‌های درجه‌ی اشباع در محیط متخلخل (در نظر گرفتن موئینگی)، با کمک روش تحلیلی،

¹ Kozeny

عبوری از پی و بدنه و گرادیان خروجی بیشینه در پنجه‌ی سد خاکی همگن را بررسی کردند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد با افزایش طول زهکش افقی، به‌رغم افزایش دبی نشت، خطر آب‌شستگی کاهش می‌یابد، همچنین میزان نیروی زیر فشار کل کاهش می‌یابد. افزون بر این در محل ورود جریان به زهکش، گرادیان با توجه به بیشتر بودن نفوذپذیری مصالح زهکش افزایش می‌یابد. Jahangiri, et al. (2018). با مدلسازی عددی سه بعدی به کمک نرم‌افزار FLAC 3D تحلیل تراوش در سدهای خاکی قوسی را انجام و تاثیر شکل مقطع دره و شعاع قوس بر میزان گرادیان هیدرولیکی و دبی خروجی سدهای خاکی تخت و قوسی را بررسی کردند.

همان‌گونه که عنوان شد تاکنون بررسی‌های مختلفی در زمینه‌ی عملکرد و بهینه‌سازی زهکش‌های افقی و پنجه‌ای به صورت عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است این در حالی است که به زهکش ترکیبی کمتر توجه شده است. در این پژوهش در آغاز عملکرد هیدرولیکی زهکش ترکیبی با استفاده از مدل آزمایشگاهی و عددی ارزیابی و ابعاد بهینه‌ی آن تعیین می‌شود. سپس پایداری کلی سد خاکی همگن با زهکش ترکیبی با استفاده از مدل عددی مقایسه و ارزیابی می‌شود.

۲- مدلسازی فیزیکی

مدلسازی فیزیکی در آزمایشگاه‌های تخصصی گروه مهندسی عمران دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شده است. ابعاد مدلسازی فیزیکی به‌صورت کوچک مقیاس صورت گرفت ولی دانه‌بندی بر مبنای مصالح واقعی انتخاب شد. به‌رغم اینکه در مدل کوچک مقیاس، جزئیات پدیده به‌طور کامل قابل شبیه‌سازی و مشاهده نیستند، اما به دلیل افزایش سرعت در مشاهده‌ی نتایج و کاهش هزینه‌ی تمام‌شده، اغلب مدلسازی کوچک مقیاس بر مدلسازی با مقیاس بزرگ برتری دارد (Wood, 2014). برای مدلسازی فیزیکی، مخزن تراوشی که نمای آن در شکل ۲ ارائه شده است، استفاده شد. طول، ارتفاع و عرض مخزن یاد شده به

پژوهش این محققان نشان داد که مهم‌ترین عامل در تعیین ابعاد زهکش، ارتفاع صعود موئینگی است و چنانچه ارتفاع زهکش پنجه‌ای یک سوم تراز آب مخزن تعیین شود، ناحیه‌ی صعود موئینگی به‌طور کامل در داخل بدنه‌ی سد قرار می‌گیرد و پیشنهاد کریگر^۱ مبنی بر اینکه ارتفاع زهکش پنجه‌ای، یک سوم ارتفاع سد باشد، یک پیشنهاد با حاشیه‌ی ایمنی بالاتر است. (Abdul Hussain, et al. (2007). توسعه‌ی مدلی عددی اقدام به طراحی بهینه به لحاظ اقتصادی، برای سد خاکی همگن روی بستر نفوذناپذیر و دارای زهکش کردند (Yazdani et al. (2008). به‌صورت عددی تاثیر مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها در یک ساختگاه سد را بر رفتار هیدرولیکی تکیه‌گاه‌های کناری و میزان نشت از داخل آن بررسی و تاثیر آن بر پایداری و ایمنی تکیه‌گاه را ارزیابی کردند. (Irzooki (2012). به کمک روش عددی تاثیر تغییر فراسنجه‌های مختلف بر دبی عبوری از بدنه‌ی یک سد خاکی همگن دارای زهکش افقی واقع بر بستر نفوذناپذیر را بررسی کرد و رابطه‌ی برای محاسبه‌ی دبی عبوری از بدنه‌ی سد ارائه داد. Malekpour et al. (2012). به کمک مدلسازی فیزیکی تاثیر همزمان طول و ضخامت زهکش افقی را در سد خاکی همگن، در دو حالت تراوش دائمی و گذرا (تخلیه‌ی مخزن) بررسی کردند. بنابر نتایج این پژوهش، افزایش ضخامت زهکش افقی، در جریان دائمی موجب جلوگیری از آب‌شستگی و در جریان گذرا موجب تضمین پایداری شیب بالادست می‌شود. (Najafpour et al. (2014). عددی به ارائه‌ی ابعادی بهینه برای زهکش پنجه‌ای پرداختند، بنابر نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از نسبت ارتفاع زهکش پنجه‌ای به تراز آب مخزن برابر با ۰/۳۵ و زوایه‌های ۴۵ و ۶۰ درجه، منجر به طراحی بهینه برای زهکش پنجه‌ای خواهد شد. (Salmasi and Mansuri (2014). تاثیر ناهمسانی خاک بدنه‌ی سد را بر تراوش بررسی کرده و نمودارهایی برای تعیین طول زهکش افقی برای دو حالت خاک همسان و ناهمسان ارائه دادند. (Mahmoud et al. (2016). با روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار عنصر محدود SEEP/W دبی

¹ Creager

اجرا شد. چگونگی اجرای لایه‌ها به صورت سه بعدی در شکل ۵ ارائه شده است.

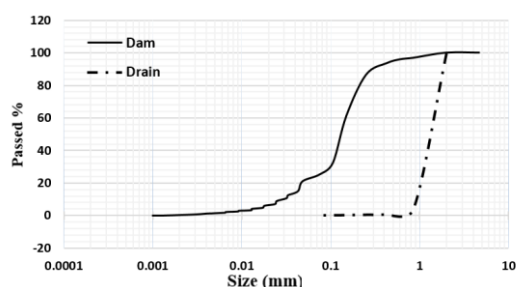


Fig. 3 Soil particle size distributon

شکل ۳ دانه‌بندی مصالح خاکی

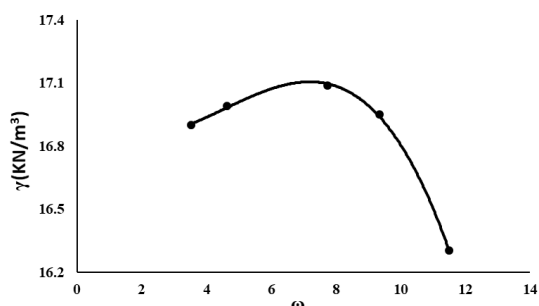


Fig. 4 Compaction curve of embankment material

شکل ۴ نمودار تراکم مصالح بدنه

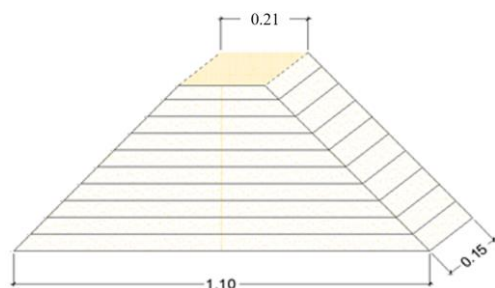


Fig. 5 3D view of constructed physical models

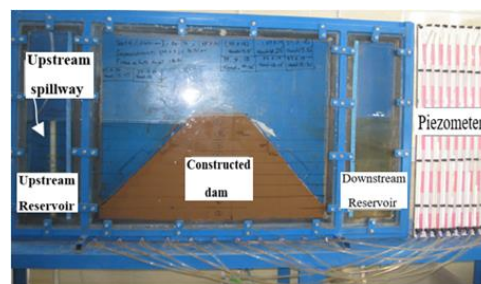
شکل ۵ نمای سه بعدی مدل‌های فیزیکی اجرا شده

فرایند متراکم‌سازی لایه‌ها با استفاده از کوبه‌ی فلزی، برای جای دادن مقدار مشخص خاک در حجم معین، انجام شد. مشخصات هندسی مدل فیزیکی در جدول ۱ و محاسبات مربوط به اجرای یک لایه، (لایه‌ی پنجم) در جدول ۲ ارائه شده است.

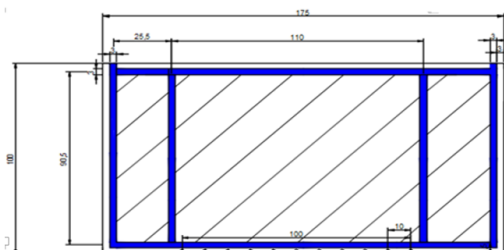
جدول ۱ مشخصات هندسی مدل‌های فیزیکی (سانتی‌متر)

Table 1 Geometric properties of physical models (cm)

Height of dam	Base width	Crest width	Upstream W.L.	Downstream W.L.
49	110	21	47.5	4



a



b

Fig. 2 Seepage tank (a) general layout, (b) Schematic layout

شکل ۲ مخزن تراوش: (a) نمای کلی، (b) شکل شماتیک

ترتیب برابر با ۱/۱، ۱ و ۰/۱۵ متر است. مخزن تراوش مجهز به ۱۱ پیزومتر به فاصله‌های افقی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر در کف و دو سر ریز لوله‌ای در مخزن‌های پایین دست و بالادست برای تنظیم تراز آب بوده است.

سه سد خاکی همگن، به صورت بدون زهکش، با زهکش پنجه‌ای به ارتفاع ۱۷ سانتی‌متر و با زهکش ترکیبی به ارتفاع ناحیه‌ی پنجه‌ای کاهش یافته‌ی ۱۴/۵ سانتی‌متر و به طول و ضخامت قسمت افقی ۱۱/۵ و ۵ سانتی‌متر، مدل شدند. برای ساخت بدنه‌ی سدها از ماسه‌ی لای‌دار و برای ساخت زهکش از ماسه‌ی یکنواخت با مشخصات ارائه شده در شکل ۳ استفاده شد. برای جلوگیری از شسته شدن ذرات ریزدانه‌ی بدنه به درون زهکش استفاده از پالایشگر (فیلتر) ضروری است. معمولاً در سدهای با مقیاس کامل استفاده از پالایشگرهای دانه‌ای به پالایشگرهای ژئوسینتیکی برتری دارد. در این تحقیق، فیلتر غیردانه‌ای ژئوتکستایل با توجه به محدودیت ابعاد مدل، سادگی اجرا و اطمینان از عملکرد آن استفاده شد. برای تعیین رطوبت بهینه‌ی تراکم و وزن مخصوص خشک بهینه‌ی مصالح بدنه نیز آزمایش تراکم استاندارد انجام شد که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. پس از تعیین رطوبت بهینه‌ی تراکم، ترکیب خاک با مقدار مشخص آب، مخلوط و در مخزن تراوش، به صورت لایه لایه

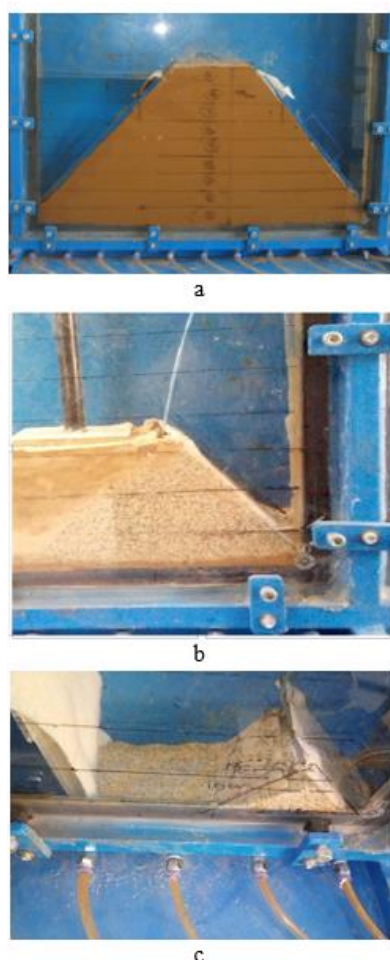


Fig. 6 Physical model (a) Without drain, (b) triangular toe drain, (c) combined drain

شکل ۶ مدل فیزیکی (a) بدون زهکش، (b) زهکش پنجه‌ای، (c) زهکش ترکیبی

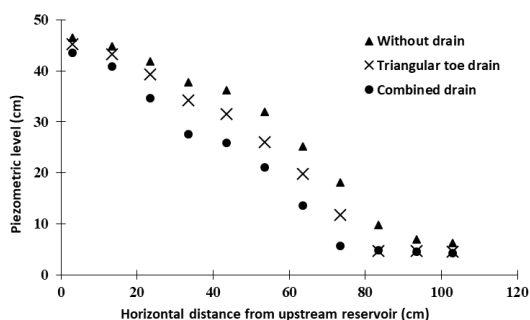


Fig. 7 Piezometric level of model without drain, with triangular toe drain and with combined toe drain

شکل ۷ تراز پیزومتری مدل بدون زهکش، دارای زهکش پنجه‌ای و زهکش ترکیبی

همانطور که در شکل ۷ مشهود است، استفاده از زهکش‌های پنجه‌ای و ترکیبی باعث افت سطح آزاد آب در بدنه‌ی سد شده است. همچنین استفاده از زهکش ترکیبی به جای زهکش پنجه‌ای ضمن کاهش حجم ۷/۵ درصدی مصالح

جدول ۲ محاسبات مربوط به وزن مصالح یک لایه

Table 2 A layer embankment material calculation

Material	Compaction Ratio %	Dry unit weight (KN/m ³)	Layer volume (m ³)	Layer weight (kg)
Silty sand	90	15.39	0.004875	7.65

به دلیل محدودیت ابعاد مخزن، برای دستیابی به ارتفاع قابل قبول در مدل‌های آزمایشگاهی، شیب کناره‌ها در حدود ۴۵ درجه در نظر گرفته شد و برای تامین پایداری شیب‌ها از صفحه‌های متخلخل فلزی به عنوان لایه‌ی ریپ ریپ استفاده شد. همچنین ارتفاع زهکش پنجه‌ای با رعایت توصیه‌ی کریگر ۱۹۴۴، مبنی بر در نظر گرفتن کمینه ارتفاع زهکش پنجه‌ای به میزان یک‌سوم ارتفاع سد برابر با ۱۶/۳۳ سانتی‌متر می‌باشد که به لحاظ راحتی اجرا برابر با ۱۷ سانتی‌متر انتخاب شد. همچنین مدل دارای زهکش ترکیبی با کاهش ۱۵ درصدی ارتفاع زهکش پنجه‌ای و افزودن نیمی از مصالح باقی‌مانده بصورت زهکش افقی به ضخامت ۵ سانتی‌متر، در نظر گرفته شد. پس از آن تراز آب در مخزن بالادست به تدریج افزایش یافت. برای هر نمونه در طول ۱۱ روز تراز آب پیزومتری خوانده و دبی حجمی اندازه‌گیری شد؛ در نهایت پس از اشباع شدن نمونه، دبی حجمی و تراز آب پیزومتری قرائت شده از مدل‌های فیزیکی، مبنای مقایسه با نتایج مدل عددی قرار گرفت. شکل ۶، مدل آزمایشگاهی بدون زهکش و زهکش‌های پنجه‌ای و ترکیبی از نمای نزدیک را نمایش می‌دهد.

۱-۲- نتایج مدل‌سازی فیزیکی

همان‌گونه که عنوان شد، در مدل فیزیکی دارای زهکش پنجه‌ای، ارتفاع زهکش ۱۷ سانتی‌متر بوده است و ابعاد زهکش در مدل دارای زهکش ترکیبی، با کاهش ۱۵ درصدی ارتفاع زهکش پنجه‌ای (۱۴/۵ سانتی‌متر) و افزودن نیمی از مصالح باقی‌مانده بصورت زهکش افقی به ضخامت ۵ سانتی‌متر (به طول ۱۱/۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. در مدل‌های فیزیکی، تراز آب پیزومتری به عنوان نماینده‌ای از تراز سطح آزاد آب، مبنای مقایسه قرار گرفت. شکل ۷ تراز آب در محل پیزومترها که به فاصله‌ی افقی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند را در مدل‌های فیزیکی بدون زهکش، دارای زهکش پنجه‌ای و زهکش ترکیبی نشان می‌دهد.

رویه‌ی پایین دست به صورت هد کل برابر با تراز نقطه تعریف شد. در تحلیل تخلیه‌ی سریع مخزن، شرایط مرزی وابسته به زمان با تعریف تراز آب مخزن در آغاز و پایان فرآیند تخلیه و نیز مدت زمان تخلیه مخزن به مدل اعمال شده است.

منقطع سازی محیط فیزیکی: در این تحقیق منقطع سازی محیط حل با استفاده از شبکه نامنظم مثلثی انجام شد. تحلیل شبکه برای همه‌ی مدل‌های عددی انجام شده است که به عنوان نمونه نتایج برای سد خاکی به ارتفاع ۲۵ متر شامل فشار آب حفره‌ای (در وسط سد و کف آن) و دبی عبوری از بدنه‌ی سد در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ تحلیل حساسیت شبکه

Table 3 Mesh sensitivity analysis

Mesh size (m)	2	1	0.5
Pore water pressure (kPa)	153.775	153.785	153.784
Flux (m ³ /s) *(E-7)	4.0591	4.0478	4.042

بنابر نتایج ارائه شده در جدول بالا با کوچک تر کردن ابعاد شبکه از ۲ متر به ۱ متر و افزایش تعداد عنصرها از ۱۰۸۴ به ۴۴۱۹ عدد، دبی تراوش و فشار آب حفره‌ای به ترتیب ۰/۲۷۸ و ۰/۰۶۵ درصد تغییرپذیری داشته است. بررسی همین موضوع در حالت افزایش تعداد عنصرها از ۴۴۱۹ به ۱۷۴۳۰ (تغییر ابعاد شبکه از ۱ متر به ۰/۵ متر)، دبی تراوش و فشار آب حفره‌ای به ترتیب ۰/۰۶۹ و ۰/۰۰۶۵ درصد تغییر را نشان می‌دهد. با توجه به درصدهای یاد شده و همچنین به لحاظ افزایش کارایی اجرای مدل‌های عددی، ابعاد شبکه برای سد خاکی به ارتفاع ۲۵ متر برابر با ۱ متر در نظر گرفته شد. برای مدل‌های عددی که بر مبنای مدلسازی فیزیکی توسعه یافته‌اند نیز با به کارگیری روندی یکسان، اندازه شبکه برابر با ۱ سانتی متر استفاده شد.

شرایط اولیه: فشار آب حفره‌ای اولیه برای انجام تحلیل‌های پایداری و تحلیل تخلیه‌ی مخزن ضروری است. این مقدارهای اولیه با انجام تحلیل جریان دائمی پیش از انجام تحلیل‌های یاد شده تعیین می‌شود.

مصرفی زهکش، منجر به پایین افتادن تراز پیزومتری نسبت به مدل دارای زهکش پنجه‌ای نیز شده است. لازم به یادآوری است استفاده از زهکش پنجه‌ای تراز سطح آزاد آب را نسبت به حالت بدون زهکش به‌طور میانگین ۳۶/۴۵ میلی‌متر کاهش داده است. بررسی همین موضوع در مورد زهکش ترکیبی نسبت به زهکش پنجه‌ای افت ۳۵/۳۶ میلی‌متری را نشان می‌دهد.

۳- مدلسازی عددی

در این پژوهش برای انجام مدلسازی عددی، بسته‌ی نرم‌افزاری ژئو استودیو^۱ استفاده شد. تحلیل‌های تراوش و پایداری در این بسته‌ی نرم‌افزاری به ترتیب با ماژول‌های سیپ^۲ و اسلوپ^۳ قابل انجام است.

ماژول سیپ معادله‌ی تراوش غیر دائمی را در حالت دوبعدی و بر مبنای روش عددی عنصر محدود حل می‌نماید. در تحلیل‌ها، معیار گسیختگی خاک، موهر- کولمب در نظر گرفته شده است. تحلیل‌های پایداری نیز بر مبنای روش قطعه‌ها و به کارگیری روش تعادل حدی و با فرضیه‌های روش اسپنسر (برای تأمین معادله‌های تعادل لنگر و نیرو) انجام شده است (GEO-SLOPE 2008, 2009). در ادامه نخست، مدل عددی با استفاده از مدل فیزیکی ارزیابی شده آنگاه کارایی زهکش ترکیبی از دیدگاه‌های هیدرولیکی و پایداری با مدلسازی عددی بررسی شده است.

۳-۱- جزئیات مدلسازی عددی

همان‌گونه که عنوان شد، مدل‌های عددی سدهای خاکی همگن در بستر نرم‌افزار ژئو استودیو اجرا شده است. در ادامه‌ی این بخش شرایط مرزی مورد استفاده، چگونگی منقطع سازی دامنه‌ی حل و شرایط اولیه برای تحلیل‌های پایداری و تخلیه‌ی سریع مخزن شرح داده شده است.

شرایط مرزی رویه‌ی بالادست و پایین دست: شرایط مرزی رویه‌ی بالادست برای تحلیل جریان دائمی، به صورت هد کل ثابت و برابر با مقدار تراز آب بالادست و شرایط مرزی

³ SLOPE/W¹ GEO-STUDIO² SEEP/W

۳-۲- ارزیابی مدل عددی

برای اطمینان از درستی نتایج بدست آمده از روش عددی، به طور معمول از مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی یا رابطه‌های تحلیلی استفاده می‌شود. در این پژوهش برای اطمینان از درستی نتایج مدل‌سازی عددی، ابتدا نتایج بدست آمده از مدل‌سازی فیزیکی سه سد خاکی همگن بدون زهکش، دارای زهکش پنجه‌ای و دارای زهکش ترکیبی، با نتایج حل عددی مقایسه و ارزیابی می‌شود. آنگاه در ادامه عملکرد مدل عددی با مقیاس واقعی نیز با حل تحلیلی بررسی می‌شود.

۳-۲-۱- ارزیابی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی

برای اطمینان از درستی و تطابق نتایج مدل‌سازی عددی، سه مدل فیزیکی با وضعیت زهکشی متفاوت و با مشخصات بیان شده در بند ۲ ایجاد شد. تراز پیزومتری به دست آمده از مدل‌های فیزیکی با مقدارهای همانند در مدل‌های عددی در شکل ۸ ارائه شده است.

بر مبنای شکل ۸ ملاحظه می‌شود که در مدل بدون زهکش در ناحیه‌ی بالادست، اختلاف بین تراز پیزومتری در دو مدل فیزیکی و عددی کم بوده و در ادامه هر چقدر به سمت پایین دست نزدیک می‌شود این اختلاف افزایش می‌یابد. مدل زهکش پنجه‌ای نیز تا حدودی همین روند را نشان می‌دهد، ولی مقدار اختلاف کمتر شده است. روند رخ داده در مدل دارای زهکش ترکیبی عکس دو حالت یادشده است بدین ترتیب که در بالادست مدل و حتی تا فاصله‌ی حدود ۳۰ سانتی‌متر پس از آن میزان اختلاف تراز پیزومتری بین دو مدل افزایش می‌یابد ولی در ادامه و نزدیک به پایین دست و زهکش، این اختلاف تا حدودی از بین می‌رود. از جمله فراسنجه‌های موثر در مدل‌سازی پدیده تراوش در مدل‌های عددی، ضریب نفوذپذیری محیط و نسبت آن در راستای قائم به افقی است. در این تحقیق نخست ضریب نفوذپذیری افقی بدنه‌ی سد با استفاده از مدل فیزیکی بدون زهکش واسنجی شد. بدین ترتیب که پس از اطمینان یافتن از پایداری جریان، در مقطعی نزدیک به بالادست (که جریان

به تقریب افقی است) و استفاده از فرضیه‌های فورشه‌ایمر، ضریب نفوذپذیری افقی تعیین شد. متراکم‌سازی لایه‌ها نیز برابر استاندارد اداره‌ی عمران و آبادانی آمریکا^۱ انجام شده است. بر اساس توصیه اداره‌ی یادشده، نسبت نفوذپذیری قائم به نفوذپذیری افقی بین ۰/۱ تا ۰/۲ پیشنهاد شده است که در مدل‌سازی عددی، این نسبت برابر با ۰/۱۵ لحاظ شده است. برای مصالح بدنه در مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای و ترکیبی، مقدارهای یاد شده اعمال گردید. نفوذپذیری مصالح زهکش نیز با توجه به

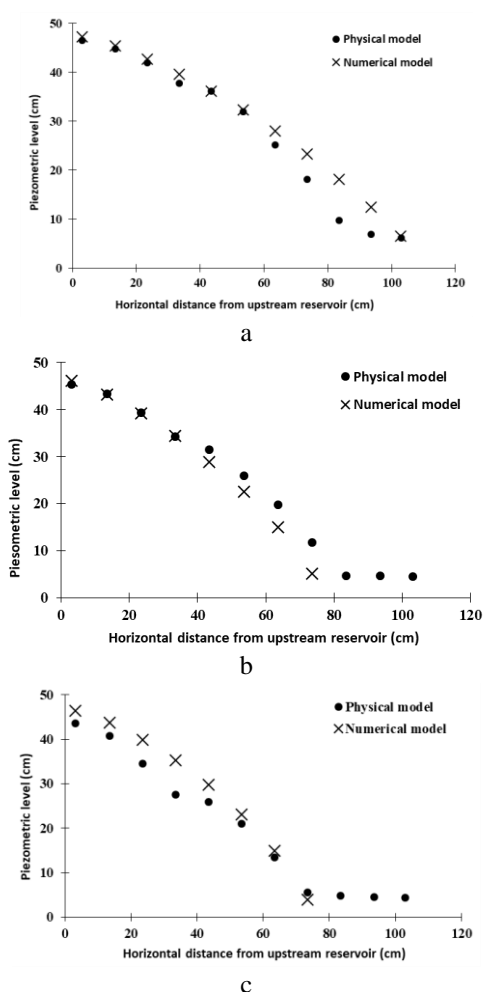


Fig. 8 Comparison between numerical and physical model (a) Without drain, (b) With triangular toe drain, (c) With combined drain

شکل ۸ مقایسه تراز پیزومتری مدل عددی و آزمایشگاهی در حالت (a) بدون زهکش، (b) بازهکش پنجه‌ای، (c) بازهکش ترکیبی

¹ USBR

در رابطه‌های بالا k نفوذپذیری بر حسب متر بر ثانیه، h ارتفاع آب در بالادست سد بر حسب متر، Q دبی خروجی بر حسب متر مکعب بر ثانیه، D طول قاعده‌ی سد بر حسب متر و β شیب پایین‌دست بر حسب درجه است. دبی به‌دست آمده از مدل عددی و رابطه‌های تحلیلی بر حسب مترمکعب بر ثانیه به همراه جذر میانگین مربع خطاها در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج جدول یاد شده مشهود است خطای مدل عددی کمتر از ۲ درصد بوده و قابل چشم‌پوشی است.

جدول ۵ خطای مدل عددی در مقایسه با حل تحلیلی
Table 5 Numerical model's error compared with analytical solution

Height of dam	Numerical model	Casagrande's method	Error (%)
15	1.06650E-06	1.07E-06	0.327
25	1.88000E-06	1.91E-06	1.571
35	2.78000E-06	2.83E-06	1.767

۳-۳- بررسی کارایی زهکش ترکیبی از دیدگاه هیدرولیکی و پایداری

این بخش به بررسی عملکرد زهکش ترکیبی از جنبه‌های هیدرولیکی و پایداری در شرایط مختلف اختصاص دارد. در آغاز فرضیه‌ها و مشخصات مصالح در مدل‌های عددی ارائه و در ادامه نتایج تحلیل‌های تراوش و پایداری در مورد زهکش ترکیبی بررسی و ارزیابی می‌شود.

۳-۳-۱- فرضیه‌ها و مشخصات مصالح در مدل عددی

پس از اطمینان از نتایج مناسب مدل عددی، مدلسازی عددی سازگار و هماهنگ با ابعاد واقعی و بزرگ مقیاس انجام شد. از آنجایی که به لحاظ فنی و اقتصادی، ارتفاع سدهای خاکی همگن محدود به ۳۰ تا ۳۵ متر است، بنابراین ارتفاع سدهای مدل شده ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متر و خاک مورد استفاده در مدلسازی، برابر توصیه اداره عمران و آبادانی آمریکا برای سد خاکی همگن از نوع SC انتخاب شد (Rahimi, 2015). ابعاد زهکش باید به گونه‌ای طراحی شود که ناحیه‌ی صعود موئینگی، شیب پایین‌دست را قطع نکند؛ همان‌گونه که عنوان شد، برابر نظر کریگر با در نظر گرفتن ارتفاع زهکش پنجاه‌ای دست‌کم به ارتفاع یک‌سوم ارتفاع سد، ناحیه‌ی صعود موئینگی، با اطمینان در داخل

درشت دانه بودن و تراکم در نتیجه‌ی وزن خود به‌طور مستقیم از آزمایش نفوذپذیری بار(هد) ثابت تعیین شده است. به‌رغم تلاش بسیار برای اجرای یکسان مدل‌های فیزیکی، در عمل این مدل‌ها تفاوت‌هایی از نظر نفوذپذیری و نسبت آن در راستای قائم به افقی به دلیل کوبیده شدن با کوبه، شرایط آزمایشگاه و... دارند که موجب تفاوت بین روند اختلاف بین مدل‌های آزمایشگاهی و عددی شده است. در ادامه و به منظور ارزیابی مقدارهای به‌دست آمده از مدل عددی، میزان خطای محاسبه‌ی تراز پیزومتری به روش عددی با مدل آزمایشگاهی با استفاده از رابطه‌ی جذر میانگین مربع خطاها (رابطه ۱) تعیین شده است.

$$R = \frac{\sqrt{\sum (h_i^{nu} - h_i^{exp})^2}}{\sum h_i^{exp}} * 100 \quad (1)$$

در رابطه بالا، بالانویس nu بیانگر حل عددی و بالانویس exp بیانگر مدل آزمایشگاهی است. خطای بدست آمده با استفاده از این رابطه در جدول ۴ ارائه شده است. بر مبنای جدول یادشده، جذر میانگین مربع خطاها برای مدل بدون زهکش، با زهکش پنجاه‌ای و با زهکش ترکیبی به ترتیب ۳/۹۳، ۳/۷۴ و ۵/۳ درصد است که این محدوده خطا بین مدلسازی عددی و مدلسازی فیزیکی قابل قبول است.

جدول ۴ خطای مدل عددی در مقایسه با مدل فیزیکی

Table 4 Numerical model's error compared with physical model

Model	Without drain	Triangular toe drain	Combined drain
%Error	3.93	3.74	5.30

۳-۲-۲- ارزیابی بر مبنای حل تحلیلی

در بند ۳-۲-۱ برای بررسی کارایی زهکش ترکیبی سه سد با مقیاس واقعی انتخاب شده است. به منظور اطمینان از عملکرد مناسب مدل عددی در حالت مقیاس کامل، دبی عبوری به‌دست آمده از یک دیواره خاکی همگن به ارتفاع و طول قاعده برابر با مشخصات سدهای عنوان شده در بند ۳-۳-۱، با استفاده از مدل عددی و حل تحلیلی ارزیابی و مقایسه شده است. رابطه‌ی تحلیلی کاساگراند (رابطه‌های ۲ و ۳) برای مقایسه در نظر گرفته شده است.

$$Q = kl \sin^2 \beta \quad (2)$$

$$l = \sqrt{(D + h^2)} - \sqrt{(D^2 - (h \cot \beta)^2)} \quad (3)$$

جدول ۶ مشخصات مصالح در تحلیل پایداری شیب‌ها

Material's behavior	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (degree)
Body, CD	19	20	26
Body, CU	19	70	6
Body, UU	19	60	5
Drain	19	5	37

جدول ۷ تحلیل تراوش مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای

Table 7 Seepage analyses of models with triangular toe drain

Height of dam (m)	Height of drain (m)	Volume of drain (m ³)	Flux (m ³ /s)	Cover length (m)
15	5	43.75	2.15E-7	3.15
25	8.4	123.48	4.048E-7	3.22
35	11.7	239.56	5.99E-7	3.56

عبوری از بدنه سد، در جدول ۷ ارائه شده است.

در گام بعدی ارتفاع زهکش پنجه‌ای به میزان ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد کاهش داده شد و نیمی از مصالح باقی‌مانده به صورت زهکش افقی به ضخامت ۱/۵ متر، با زهکش پنجه‌ای کاهش یافته، ترکیب شد. ابعاد هر یک از مدل‌ها، میزان دبی نشت و طول پوشش محاسبه شده در جدول ۸ ارائه شده است. همچنین در این جدول تغییرپذیری میزان جریان نشت یافته، طول پوشش و حجم مصالح زهکش در مدل‌های دارای زهکش ترکیبی، نسبت به مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای نیز آمده است. لازم به یادآوری است در ستون اول جدول یاد شده و دیگر جدول‌ها (مدل)، رقم اول ارتفاع سد و رقم دوم میزان کاهش ارتفاع زهکش پنجه‌ای است (۲۰٪/۱۵: سد به ارتفاع ۱۵ متر و ۲۰ درصد کاهش ارتفاع زهکش پنجه‌ای اولیه).

نتایج ارائه شده در جدول ۸ نشان می‌دهد چنانچه به جای استفاده از زهکش پنجه‌ای، ارتفاع زهکش پنجه‌ای را کاهش داده و ۵۰ درصد از حجم مصالح باقی‌مانده به صورت زهکش افقی به ضخامت ۱/۵ متر با زهکش پنجه‌ای کاهش یافته، ترکیب شود؛ طول پوشش شیب پایین دست روی خط آزاد، بین ۱۱ تا ۱۵۷ درصد افزایش می‌یابد. از سوی دیگر این افزایش طول پوشش، با افزایش دبی نشت یافته از بدنه سد نیز همراه است و میزان آن را تا حدود ۵۰ درصد (بسته به

بدنه‌ی سد قرار می‌گیرد. شیب شیروانی‌های دو طرف سد باید به گونه‌ای انتخاب شود که ضریب اطمینان پایداری دست‌کم ۱/۵ در تحلیل ایستایی (استاتیکی) و حداقل ۱/۰۵ در تحلیل شبه ایستایی (استاتیکی) به دست آید. همچنین برابر ضوابط ارائه شده توسط اداره‌ی عمران و آبادانی آمریکا بیشینه شیب مناسب برای خاک از نوع SC در محدوده ۱:۲/۵ تا ۱:۲ بیان شده است، با توجه به معیار بیان شده شیب بالادست ۳ افقی به ۱ قائم و شیب پایین دست ۲/۵ افقی به ۱ قائم در نظر گرفته شد. از سوی دیگر با توجه به دانه‌ای بودن مصالح زهکش، شیب مناسب برای زهکش پنجه‌ای نیز برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته شد که این زاویه تنها برای شیب بالادست زهکش که در داخل بدنه‌ی سد قرار گرفته است، اعمال می‌شود و شیب پایین دست زهکش پنجه‌ای که در ادامه‌ی شیب پایین دست بدنه‌ی سد قرار دارد از شیب پایین دست سد پیروی می‌کند. پی به صورت نفوذ ناپذیر فرض شده و نفوذپذیری افقی مصالح بدنه‌ی سد و زهکش، در حالت اشباع به ترتیب برابر با 10^{-7} و 10^{-3} متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت نفوذپذیری قائم به افقی برای مصالح بدنه‌ی سد برابر با ۰/۱۵ لحاظ شده است. تعیین عرض تاج سد با استفاده از رابطه‌های ارائه شده توسط اداره‌ی عمران و آبادانی آمریکا، برای سدهای به ارتفاع ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متر، به ترتیب برابر با ۶، ۷/۷۵ و ۱۰/۲۵ متر انتخاب شد. شکل ۹ نمای کلی مقطع مورد استفاده در مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. مشخصات مکانیکی مصالح نیز در جدول ۶ ارائه شده است.

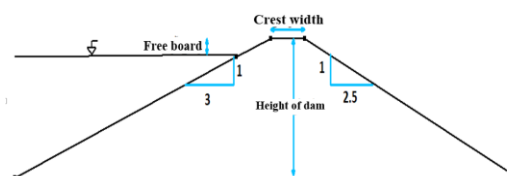


Fig. 9 Geometry of numerical models

شکل ۹ هندسه‌ی مدل‌های عددی

۳-۳-۲- تحلیل عددی تراوش و بررسی عملکرد هیدرولیکی

نتایج به دست آمده از حل عددی تراوش برای سدهای دارای زهکش پنجه‌ای، شامل طول پوشش روی سطح آزاد و دبی

هیدرولیکی یکسان زهکش ترکیبی با زهکش پنجه‌ای، طول قسمت افقی زهکش ترکیبی تعیین شده است. ابعاد زهکش هر یک از مدل‌ها، میزان دبی نشت، طول پوشش و تغییرپذیری فراسنجه‌های یادشده نسبت به مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای در جدول ۹ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۹ مشهود است، در صورت استفاده از زهکش ترکیبی با عملکرد هیدرولیکی یکسان با مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای، ضمن اینکه تغییر دبی عبوری از بدنه‌ی سد بسیار ناچیز و کمتر از ۰/۵ درصد خواهد بود، برای مدل‌های با مشخصات ارائه شده، بین ۱۷ تا ۶۰ درصد

ارتفاع سد) افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه هدف از ساخت سد، نگهداشت آب در مخزن است این افزایش، می‌تواند نامطلوب تلقی شود. بنابراین در ادامه ارتفاع زهکش پنجه‌ای به میزان ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد کاهش داده شد و بخشی از مصالح باقی‌مانده به صورت زهکش افقی به ضخامت ۱/۵ متر با زهکش پنجه‌ای کاهش یافته، ترکیب شده است و طول قسمت افقی زهکش ترکیبی به گونه‌ای انتخاب شد که طول پوشش شیب پایین دست برابر با میزان متناظر در مدل‌هایی باشد که در آن‌ها از زهکش پنجه‌ای تنها استفاده شده است. به عبارتی، با هدف دستیابی به عملکرد

جدول ۸ تحلیل تراوش مدل‌های دارای زهکش ترکیبی و مقایسه با مدل دارای زهکش پنجه‌ای

Table 8 Seepage analyses comparison of models with combined and triangular toe drains

Model	Height of triangular drain (m)	Horizontal drain length (m)	Flux(m ³ /s) *E-7	Cover length (m)	Saving drain material (%)	Flux increment %	Cover length increment (%)
15-20%	4	5.25	2.22	3.51	25.71	3.39	11.34
15-30%	3.5	7.37	2.25	3.66	35.71	4.42	16.03
15-40%	3	9.33	2.25	3.72	44.38	4.71	17.93
15-50%	2.5	10.93	2.24	3.64	51.71	4.36	15.34
25-20%	6.72	14.82	4.57	5.19	24.61	12.94	61.00
25-30%	5.88	20.99	4.79	5.89	34.61	18.37	82.90
25-40%	5.04	26.34	4.97	6.30	43.27	22.67	95.60
25-50%	4.2	30.87	5.09	6.58	50.61	25.67	104.38
35-20%	9.36	28.75	7.25	7.20	24.31	20.99	102.41
35-30%	8.19	40.72	7.90	8.26	34.31	31.91	132.21
35-40%	7.02	51.11	8.49	8.58	42.98	41.79	141.27
35-50%	5.85	59.89	8.98	9.12	50.31	49.94	156.46

جدول ۹ مقایسه مدل‌های با زهکش پنجه‌ای و زهکش ترکیبی با طول پوشش یکسان

Table 9 Comparison of models with triangular toe drain and combined drain having the same hydraulic performance

Model	Volume of combined drain (m ³)	Horizontal drain length (m)	Drain volume reduction (%)	Flux (m ³ /s) *E-7	Flux increment (%)	Cover length (m)	Change in cover length (%)
15-20%	35.95	5.3	17.83	2.15	0.07	3.15	-0.15
15-30%	32.22	7.19	26.35	2.16	0.15	3.16	0.17
15-40%	29.04	8.86	33.62	2.15	0.11	3.15	-0.11
15-50%	26.95	10.68	38.38	2.16	0.24	3.15	-0.17
25-20%	90.32	7.53	26.85	4.06	0.21	3.22	-0.09
25-30%	76.59	10.72	37.98	4.06	0.40	3.23	0.16
25-40%	64.87	13.61	47.47	4.06	0.38	3.23	0.27
25-50%	55.70	16.55	54.90	4.06	0.35	3.22	-0.18
35-20%	170.75	11.66	28.74	6.01	0.37	3.56	0.07
35-30%	140.99	15.735	41.15	6.01	0.35	3.56	0.57
35-40%	116.19	19.968	51.50	6.01	0.46	3.58	0.57
35-50%	95.94	24.035	59.95	6.01	0.44	3.57	0.48

مصالح خاکی، تحکیم یافته و زهکشی شده است و در شرایط اعمال بار پویا (دینامیکی) یا جریان گذرا به دلیل نبود فرصت زهکشی، فراسنجه‌های مقاومت برشی مصالح، تحکیم یافته و زهکشی نشده در نظر گرفته می‌شوند. بررسی پایداری شیب پایین‌دست در دو شرایط ایستا و شبه ایستا با ضریب لرزه‌ی ۰/۱ در راستای افقی انجام شده است. همچنین بررسی پایداری شیب بالادست در شرایط تخلیه‌ی سریع مخزن صورت گرفته است. نتایج بدست‌آمده از تحلیل پایداری شیب کناره‌های سدهای دارای زهکش پنجه‌ای که با استفاده از مدلسازی عددی به‌دست آمده‌اند، در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰ ضریب اطمینان پایداری شیب کناره‌های مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای

Table 10 Slope stability safety factor of models with triangular toe drain

Height of dam (m)	Static condition			Quasi-static condition
	Steady seepage (D.S)	Drawdown (U.S)	End of construction (D.S)	(D.S)
15	2.137	2.807	2.449	1.906
25	1.824	1.817	1.837	1.411
35	1.672	1.36	1.506	1.142

الف- نتایج تحلیل عددی پایداری ایستا و شبه ایستای شیب پایین‌دست

در جدول ۱۱، ضریب‌های اطمینان پایداری شیب‌ها، برای مدل‌های دارای زهکش ترکیبی که دارای عملکرد هیدرولیکی یکسان با مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای می‌باشند، ارائه شده است. همچنین در جدول یادشده درصد تغییرپذیری ضریب‌های اطمینان مدل‌های دارای زهکش ترکیبی نسبت به مقدارهای متناظر در مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای نیز ارائه شده است. برابر جدول ۱۱، بیشینه تغییر منفی ضریب‌های اطمینان پایداری شیب پایین‌دست در حالت ایستا- تراوش پایدار، ایستا- پایان ساخت و شبه ایستا به ترتیب برابر با ۳/۸۱، ۱۰/۰۳ و ۱۰/۶۸ درصد و مربوط به مدل ۵۰-۳۵ می‌باشد. همچنین بر مبنای این جدول ملاحظه می‌شود با وجود اثرگذاری‌های منفی استفاده از زهکش ترکیبی بر پایداری، همچنان همه‌ی

در حجم مصالح زهکش صرفه‌جویی شده‌است. در سدهای خاکی به حجم بالای مصالح در بدنه نیاز است. فاصله‌ی حمل در عملیات خاکی با حجم بالا، تاثیر زیادی در هزینه تمام شده‌ی پروژه دارد؛ بنابراین در سدهای خاکی، سعی بر استفاده از منبع‌های قرضه موجود در محل است. از سوی دیگر مصالح زهکش اغلب جزو مصالح تولیدی به‌شمار می‌روند و مصالح تولیدی هزینه‌ی بیشتری دارند بنابراین استفاده از زهکش ترکیبی منجر به صرفه‌جویی اقتصادی خواهد شد. به عنوان مثال برابر فهرست بهای سال ۱۳۹۸ هزینه‌ی یک متر مکعب مصالح تولیدی زهکش ۲۵۵۰۰۰ ریال و هزینه‌ی یک متر مکعب مصالح بدنه شامل خاک‌برداری، مخلوط کردن و اجرای مصالح ۸۶۴۰۰ ریال است. بنابراین در صورت کاهش مصرف مصالح زهکش و جایگزینی آن با مصالح بدنه، به ازای هر مترمکعب حدود ۶۶ درصد کاهش هزینه را در پی خواهد داشت.

۳-۳-۳- تحلیل عددی پایداری و بررسی عملکرد

نتایج به‌دست آمده از مرحله‌های پیش بیانگر کفایت زهکش ترکیبی از نظر هیدرولیکی است. در فرآیند این جایگزینی، به‌رغم بهبود عملکرد هیدرولیکی، لازم است تغییر عملکرد پایداری شیب کناره‌های سد هم ارزیابی شود چرا که در این فرآیند، مصالح درشت‌دانه که مقاومت برشی بیشتری دارند با مصالح ریزدانه‌تر بدنه‌ی سد جایگزین می‌شوند. لذا در ادامه، تغییرپذیری ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها، در شرایط مختلف بررسی شده است. به‌طور معمول بررسی پایداری شیروانی‌های سد خاکی در حالت ایستا در سه وضعیت، پایان ساخت و پیش از آبگیری، تراوش پایدار و برقراری جریان دائمی و تخلیه‌ی سریع مخزن (شرایط غیردائمی جریان) انجام می‌شود. افزون بر آن لازم است پایداری شیروانی‌های سد در حالت پویا (دینامیکی) نیز بررسی شود. در حالت‌های یاد شده، فراسنجه‌های مقاومت برشی مصالح بدنه می‌بایست متناسب با شرایط واقعی در نظر گرفته شود. در پایان ساخت سد، فراسنجه‌های مقاومت برشی مصالح خاکی به‌صورت تحکیم نیافته و زهکشی نشده است. در شرایط جریان دائمی بدلیل سپری شدن مدت زمان طولانی پس از ساخت، فراسنجه‌های مقاومت برشی

با ارتفاع کمتر از ۲۵ متر، درصد کاهش ارتفاع زهکش پنجه‌ای تا ۵۰ درصد و برای سد ۳۵ متر تا ۳۰ درصد ملاحظه شد.

مدل‌ها به استثنای مدل ۳۵-۴۰٪ و مدل ۳۵-۵۰٪ در سه حالت مورد بررسی دارای ضریب‌های اطمینان قابل قبول می‌باشند. بنابراین می‌توان استنباط کرد درصد قابل قبول کاهش ارتفاع زهکش بر مبنای تحلیل پایداری، وابسته به ارتفاع سد می‌باشد. در مدل‌های مورد بررسی، برای سدهای

جدول ۱۱ ضریب اطمینان پایداری شیب پایین دست در مدل‌های با زهکش ترکیبی و مقایسه‌ی نتایج با مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای

Table 11 Downstream slope safety factor of models with combined and triangular toe drains

Model	Static-steady state (D.S)		Static-end of construction (D.S)		Quasi-static (D.S)	
	Safety factor	Change of safety factor (%)	Safety factor	Change of safety factor (%)	Safety factor	Change of safety factor (%)
15-20%	2.138	0.05	2.44	-0.29	1.90	-0.157
15-30%	2.308	8.00	2.48	1.27	2.11	10.703
15-40%	2.14	0.14	2.44	-0.20	1.90	-0.157
15-50%	2.14	0.14	2.45	-0.08	1.91	0.000
25-20%	1.799	-1.48	1.78	-3.32	1.36	-3.473
25-30%	1.781	-2.46	1.75	-4.57	1.34	-5.245
25-40%	1.774	-2.85	1.74	-5.23	1.33	-5.457
25-50%	1.777	-2.68	1.75	-4.90	1.43	1.276
35-20%	1.643	-1.78	1.42	-5.44	1.08	-5.079
35-30%	1.629	-2.61	1.39	-7.90	1.05	-8.231
35-40%	1.616	-3.39	1.37	-9.16	1.03	-9.720
35-50%	1.609	-3.81	1.36	-10.03	1.02	-10.683

شده، شرایط مرزی وابسته به زمان در مخزن سد برابر جدول ۱۲ برای سه مدل سد مورد بررسی، انتخاب شد. در جدول یاد شده ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست برای مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای نیز ارائه شده است. بر مبنای شرایط مرزی عنوان شده، تحلیل پایداری شیب بالادست برای مدل‌های دارای زهکش ترکیبی انجام و نتایج آن در جدول ۱۳ آمده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱۳، درصد تغییرپذیری منفی ضریب‌های اطمینان پایداری شیب‌ها، در صورت استفاده از زهکش ترکیبی به جای زهکش پنجه‌ای کمتر از ۰/۰۴ درصد بوده و کماکان ضریب‌های اطمینان در محدوده‌ی مجاز قرار دارند.

درصد تغییرپذیری قابل قبول ضریب‌های اطمینان پایداری شیب پایین دست در دو حالت ایستا و شبه ایستا، نسبت به مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای، به دلیل عبور بخش کمی از طول سطح لغزش از ناحیه‌ی زهکش و تاثیر اندک این جایگزینی در تغییر مقاومت برشی می‌باشد.

ب- تحلیل عددی پایداری در حالت تخلیه‌ی سریع مخزن
همان‌گونه که عنوان شد یکی از تحلیل‌های مورد نیاز در طراحی سدهای خاکی، بررسی پایداری شیب بالادست در حالت تخلیه‌ی سریع مخزن است. به منظور ارزیابی تاثیر جایگزینی زهکش ترکیبی با زهکش پنجه‌ای در حالت یاد

جدول ۱۲ شرایط مرزی و ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست در مدل‌های با زهکش پنجه‌ای در حالت تخلیه مخزن

Table 12 Boundary conditions and upstream safety factor of models with triangular toe drain for drawdown state

Dam height (m)	Initial W.L. (m)	Final W.L. (m)	Draw down duration (days)	Safety factor
15	13	3	10	2.807
25	23	6	17	1.817
35	33	8	25	1.360

جدول ۱۳ مقایسه ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست در مدل‌های با زهکش ترکیبی و پنجه‌ای در حالت تخلیه‌ی مخزن

Table 13 Comparison of safety factor for models with combined and toe drains at drawdown state

Model	Safety factor	Changes of safety factor (%)
15-20%	2.806	-0.0356
15-30%	2.806	-0.0356
15-40%	2.806	-0.0356
15-50%	2.806	-0.0356
25-20%	1.818	0.055
25-30%	1.818	0.055
25-40%	1.818	0.055
25-50%	1.818	0.055
35-20%	1.36	0
35-30%	1.36	0
35-40%	1.36	0
35-50%	1.36	0

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، استفاده از زهکش ترکیبی به عنوان جایگزین زهکش پنجه‌ای، در سد خاکی همگن واقع بر بستر نفوذناپذیر پیشنهاد و تاثیر آن بر عملکرد هیدرولیکی و پایداری سد، بررسی شد. برای دستیابی به این مهم، نخست، عملکرد هیدرولیکی زهکش ترکیبی با مدل فیزیکی ارزیابی شد. پس از تایید نقش مثبت آن و ارزیابی مدل عددی، عملکرد زهکش ترکیبی سه سد به ارتفاع ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متر از نظر تراوش و پایداری در شرایط مختلف از طریق مدل‌سازی عددی بررسی شد. سپس با کاهش ارتفاع زهکش پنجه‌ای به میزان ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد ارتفاع اولیه آن و افزودن نیمی از حجم مصالح باقی‌مانده به صورت زهکش افقی به ضخامت ۱/۵ متر، زهکش ترکیبی تعریف و آنالیزهای مختلف انجام شد. بنابر نتایج به دست آمده ملاحظه شد که:

- استفاده از زهکش ترکیبی به جای زهکش پنجه‌ای، منجر به افزایش ۱۱ تا ۱۵۷ درصدی کمترین فاصله‌ی عمودی بین شیب پایین دست و سطح آزاد آب و کاهش ۲۵ تا ۵۰ درصدی حجم مصالح زهکش در مقایسه با مدل‌های دارای زهکش پنجه‌ای می‌شود.
- جایگزینی زهکشی ترکیبی با طول پوشش برابر با زهکش پنجه‌ای، ضمن ایجاد تغییرپذیری قابل چشم‌پوشی در دبی، منجر به کاهش حدود ۱۸ تا ۶۰

درصدی مصالح زهکش و صرفه جویی اقتصادی می‌شود.

- استفاده از زهکش ترکیبی با کاهش حجم مصالح زهکش که مصالح با مقاومت برشی بالا هستند، کاهش بیشینه ۱۰/۶۸ درصدی ضریب اطمینان پایداری شیب پایین دست سد را در پی دارد. علت کاهش کم ضریب اطمینان، کم بودن سهم سطح لغزش عبوری از محدوده زهکش و افت سطح آزاد آب و خشک ماندن بخش بیشتری از پایین دست سد، می‌باشد.

۵- فهرست نشانه‌ها

نمادهای به کار رفته در متن، در ادامه ارائه شده‌اند.

<i>b</i>	عرض تاج
<i>C</i>	چسبندگی خاک (Kpa)
<i>D</i>	طول قاعده‌ی سد (m)
<i>h</i>	ارتفاع آب در بالادست سد (m)
<i>h_i</i>	تراز پیزومتر <i>i</i> ام (m)
<i>K</i>	ضریب نفوذپذیری (ms^{-1})
<i>Q</i>	دبی (m^3/s)
<i>R</i>	درصد خطا
WL	تراز آب
β	شیب پایین دست سد (درجه)
γ	وزن مخصوص (KN/m^3)

- Kozeny, J. (1931). Grundwasserbewegung bei freiem spiegel, fluss und kanalversickerung. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, No. 3. ω درصد رطوبت
بالانویسها:
- Mahmoud, A., Badakhshan, M. and Seifi, A. (2016). The Effect on The Leakage Flow Along the Horizontal Drainage, Power, Drifted and Hydraulic Gradient in Homogeneous Earth Dam by Numerical Simulation, *Journal of engineering and construction management*, 1(3), 20-23. (in Persian) exp مدل آزمایشگاهی
 nu حل عددی
- Malekpour, A., Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh Dalir, A. and 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(2), 139-152
- Mishra, G. and A. Singh (2005). Seepage through a levee. *International Journal of Geomechanics* 5(1), 74-79
- Mishra, G. C. and B. P. Parida (2006). Earth dam with toe drain on an impervious base. *International Journal of Geomechanics*, 6(6), 379-388.
- Najafpour, N., Shayannejad, M. and Samadi, H. (2014). Investigation on Seepage Pattern and Design of Toe Drain in Homogenous Earth Dam on Impervious Foundation Using Physical Model and PLAXIS. *Journal of Water and Soil*, 28(3), 451-461. (in Persian)
- Rahimi, H. (2015). *Embankment Dams*. University of Tehran Press. (in Persian)
- Salmasi, F. and B. Mansuri (2014). Effect of Homogeneous Earth Dam Hydraulic Conductivity Ratio (K_x/K_y) with Horizontal Drain on Seepage. *Indian Geotechnical Journal*, 44(3), 322-328.
- Sharma, H. D. (1991). *Embankment dams*, Oxford & IBH Publishing Company.
- Sherard, J. L., Woodward, R. J., Gizienski, S. F. and Clevenger, W.A. (1966). *Earth and earth-rock dams*, Wiley, New York, 25, 130.
- Tesarik, D.R. and Kealy, C.D. (1984). Estimation horizontal drain design by the Finite-Difference method. *International journal of mine water*, 3(3), 1-19.
- USBR, U. (1987). *Design of small dams*. Water Resources Technical Publication Series.
- Wood, D. M. (2014). *Geotechnical modelling*, CRC press.
- Yazdani, S., Yazdani, M. and Ahmadi, M.T. (2008). Evaluation of Geometrical Characteristics of Rock Joints on Hydraulic Behavior and Seepage through the Abutments of Concrete Arch Dams, *Journal of Hydraulics*, 3(1), 33-44. (in Persian)
- Abdul Hussain, I.A., Kashyap, D. and Hari Prasad, K.S. (2007). Seepage modeling assisted optimal design of a homogeneous earth dam: Procedure evolution. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(2), 116-130
- Boufadel, M.C., Suidan, M.T., Venosa, A.D. and Bowers, M.T. (1999). Steady seepage in trenches and dams: effect of capillary flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(3), 286-294.
- Bowles, L. (1996). *Foundation analysis and design*, McGraw-Hill.
- Casagrande, A. (1937). *Seepage through dams*, Harvard University Publication 209.
- Cedergren, H.R. (1977). *Seepage, drainage and low nets*, Wiley- Interscience publication.
- Chahar R. (2004). Determination of length of a horizontal drain in homogeneous earth dams, *Journal of irrigation and drainage engineering*.
- Creager, W.P., Justin, J.D. and Hinds, J. (1944). *Engineering for dams*. V, III. Earth, rock-fill steel and timber dams, Wiley, New York.
- Freeze, R. A. (1971). Influence of the unsaturated flow domain on seepage through earth dams. *Water resources research*, 7(4), 929-941.
- Forchheimer, P. (1930). *Hydraulik*. Third edition, Teubner, Leipzig, Berlin, Germany.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2009). *Seepage Modeling with SEEP/W 2007 Version*. An Engineering Methodology, Fourth Edition.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2008). *Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version*. An Engineering Methodology, Fourth Edition.
- Irzooki, R. H. (2012). *Computation of Seepage through Homogenous Earth Dams with Horizontal Toe Drain*.
- Jahangiri, S., Kilanehei, F. and Hassanlourad, M. (2018). Investigation of valley shape and arc radius on the seepage analysis of arched earth dams using 3D numerical modeling, *Journal of Hydraulics*, 13(2), 83-93. (in Persian)