



## Numerical investigation of the influence of the combined seepage reduction scenarios on the hydraulic performance of the Alborz dam body

Kiyoumars Roushangar<sup>1✉</sup> | Farhad Amanzadeh Aboueshagh<sup>2</sup> |  
Hamidreza Abbaszadeh<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: [kroshangar@yahoo.com](mailto:kroshangar@yahoo.com)
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: [farhadamanzadeh00@yahoo.com](mailto:farhadamanzadeh00@yahoo.com)
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: [ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Sep. 14, 2023

**Revised:** Oct. 29, 2023

**Accepted:** Nov. 12, 2023

**Published online:** Dec. 23, 2023

**Keywords:**

Alborz Dam,  
Sealing Elements,  
Seepage,  
SEEP/W.

### ABSTRACT

Seepage is a crucial factor in the design of dams as it can lead to failure if not controlled. This study delves into the numerical modeling of seepage and investigates the effects of different sealing systems on the foundation and body of earthen dams under steady flow conditions. The study explores various sealing conditions ranging from optimal to critical, which include clay blankets, drains, and clay curtains in the foundation. In general, the combined effects have been studied by combining all types of defined elements without considering their geometric dimensions. The study reveals that the different seepage reduction systems have significant effects on reducing the flow within the dam body and foundation. The trend of seepage discharge increases with height and reaches a maximum between 38 to 46 meters before decreasing again. The combination of a drain, clay blanket, and clay curtain proved to be the most effective in ensuring the dam's stability. The study shows that this combination can reduce the flow rate by an average of 83%, the seepage rate by an average of 15.5%, and the water head by an average of 9.5% at downstream of the dam. The results of this study suggest that the diversity in the type of flow seepage reduction systems has a significant effect on reducing the flow inside the dam body and foundation. This finding underscores the importance of considering the combined effects of different sealing systems to ensure the stability of the dam.

Cite this article: Roushangar, K., Amanzadeh Aboueshagh, F., & Abbaszadeh, H. (2023). Numerical investigation of the influence of the combined seepage reduction scenarios on the hydraulic performance of the Alborz dam body, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (10), 1467-1483. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365336.669573>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365336.669573>



## بررسی عددی روند تأثیر سناریوهای ترکیبی کاهنده نشت بر عملکرد هیدرولیکی بدنه سد البرز

کیومرث روشنگر<sup>۱</sup> | فرهاد امنزاده ابواسحق<sup>۲</sup> | حمیدرضا عباسزاده<sup>۳</sup>۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: [kroshangar@yahoo.com](mailto:kroshangar@yahoo.com)۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: [farhadamanzadeh00@yahoo.com](mailto:farhadamanzadeh00@yahoo.com)۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: [ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	از مسائل مهم در طراحی سدها پدیده تراوش از سد است. اگر جریان آب در سدها کنترل نگردد باعث بروز مشکلات می شود که منجر به شکست سد می گردد. در تحقیق حاضر به بررسی مدل سازی عددی تراوش پرداخته شده و اثرات سیستم های آب بند در فونداسیون و بدنه سد خاکی در سناریوهای مختلف تحت جریان ماندگار مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش شرایط مختلف از بهینه ترین حالت تا بحرانی ترین شرایط موجود برای آب بندی لحاظ گردیده است. المان های آب بندی مورد بررسی شامل پتوی رسی، زهکش و پرده رسی در فونداسیون است. در حالت کلی با ترکیب انواع المان های تعریف شده و بدون در نظر گرفتن ابعاد هندسی آنها تأثیرات ترکیبی مطالعه شده است. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل در پژوهش حاضر، تنوع در نوع سیستم های کاهش نشت جریان در سناریوها، تأثیر به سزایی در کاهش جریان در داخل بدنه سد و فونداسیون دارد. روند دبی نشت با افزایش ارتفاع از کف فونداسیون روند صعودی داشته و در محدوده ۳۸ متر تا ۴۶ متر از ارتفاع، حداکثر بوده و مجدداً روند نزولی به خود می گیرد. نتایج نشان داد که ترکیب زهکش، پتوی رسی و پرده رسی می تواند به طور میانگین موجب کاهش ۸۳ درصدی سرعت جریان، ۱۵/۵ درصدی دبی نشت جریان و ۹/۵ درصدی از بار آبی در پائین دست سد گردد. این ترکیب در مقایسه با سایر سناریوها نقش اصلی کاهندگی را داشته و پایداری سد را تأمین می نماید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۸/۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۱	
واژه های کلیدی: المان های آب بندی، نشت، سد البرز، SEEP/W	

استناد: روشنگر، کیومرث؛ امنزاده ابواسحق، فرهاد؛ و عباسزاده، حمیدرضا (۱۴۰۲). بررسی عددی روند تأثیر سناریوهای ترکیبی کاهنده نشت بر عملکرد هیدرولیکی بدنه

سد البرز، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱۰)، ۱۴۶۷-۱۴۸۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365336.669573>

© نویسنده گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365336.669573>

## مقدمه

با آبیگری مخزن سد، تحت اثر فشار هیدرواستاتیکی وارد از طرف مخزن به بدنه سد و فونداسیون، پدیده‌ای به نام تراوش رخ می‌دهد که یکی از مسائل مهم در طراحی سدها تحلیل تراوش است. تحلیل میزان تراوش در سدها، مقدار فشار آب منفذی و گرادیان هیدرولیکی در سد را مشخص می‌نماید (Aboeela 2016). مقدار نشت جریان آب در بدنه سدهای خاکی در مقایسه با میزان آب مصرفی برای اهداف مختلف بهره‌برداری از سد، می‌تواند ساخت سد در یک منطقه را غیر قابل توجیه نماید. بنابراین محاسبه ضخامت، طول زهکش‌ها و فیلترها به‌عنوان پارامترهای مهم در ساخت سدها موثر است (Jiang and He 2018). مقدار فشار آب در هر نقطه از سد، در بررسی پایداری خاکریزهای سد، بررسی‌های تنش-تغییر شکل، بررسی لزوم ایجاد چاه‌های کاهش فشار و چاه‌های زهکش و بررسی لزوم و چگونگی احداث پرده آب‌بند مهم است (Venkatesh and Karumanchi 2016). مقدار گرادیان‌های هیدرولیکی در بررسی پایداری و دوام مصالح اجزای مختلف سد و فونداسیون در برابر آبستتگی نیز حائز اهمیت است. بنابراین اهمیت آنالیز تراوش به‌صورت دقیق در طراحی سدها ضروری است (Lee et al., 2018). مطالعه نشت در سدهای خاکی نیاز به بررسی در محل با توجه به شرایط هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی دارد. در همین راستا مطالعات متعددی برای رفع معضل نشت بدنه سدهای خاکی با استفاده از مدل‌های فیزیکی و مدل‌سازی عددی انجام شده است (Qiu et al., 2016). مدل‌های فیزیکی تصویر کلی از رفتار نشت در سدهای خاکی ارائه می‌دهند که می‌توان به بررسی پارامترهای خط فریاتیکی و سرعت جریان اشاره کرد. با این حال، از آنجایی که مدل‌سازی فیزیکی دارای محدودیت‌های زیادی بوده و هزینه‌های مطالعاتی بالایی را به خود اختصاص می‌دهد، از مدل‌سازی عددی مبتنی بر راه‌حل‌های ریاضی با حل پیچیده‌ترین مسائل مهندسی استفاده می‌شود (Chahar et al., 2012). از جمله روش‌هایی که برای تحلیل نشت در سدهای خاکی استفاده می‌شود، در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تحلیل نشت در سدهای خاکی می‌باشد (Choi et al., 2016). یکی از عوامل اصلی شکست سدهای خاکی، روگذری جریان و فرسایش داخلی است. این پدیده به شدت تحت تأثیر رفتار خاک رس بوده که به دلیل نفوذپذیری کم به‌عنوان ماده کنترل نشت استفاده می‌شوند (Galindo et al., 2020). برخی از انواع خاک‌های رس به دلیل خواص فیزیک و شیمیایی خود در تماس با آب رفتار ناپایداری دارند. به‌طوری‌که ذرات رس از یکدیگر جدا شده و در نتیجه در محیط آبی معلق می‌گردند. با توجه به اینکه در حالت تعلیق ترک‌ها می‌توانند گسترش یابند، در نتیجه خرابی مجرا و نشی متمرکز به‌همراه دارند که می‌تواند ایرادی بر این روش مطرح گردد (Chahar, 2004). Casagrande et al., (1940) با تأثیر از ارتفاع آب مخزن و شیب هسته رابطه‌ای را برای محاسبه جریان عبوری از بدنه سد ارائه کردند. (Giglou and Zeraatparvar 2012) با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی و فیزیکی مانند نفوذپذیری، شیب بالادست و پائین‌دست سد، تراوش در سدهای خاکی را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که نرخ جریان تراوش به ضریب نفوذپذیری سد خاکی، شیب‌های بالادست و پائین‌دست و عمق جریان آب بالادست بستگی دارد. (Salmasi and Mansuri 2014) به بررسی تأثیر زهکش افقی بر نشت جریان در یک سد خاکی همگن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگر فیلتر در نزدیکی پنجه سد قرار گیرد تراوش کاهش می‌یابد. محمدی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی با استفاده از روش الگوریتم شبیه‌سازی تیرید (بازپخت) (Simulated Annealing (SA) پرداختند. نتایج بیانگر کاهش حجم مصالح مورد نیاز جهت ساخت پوسته سد در حدود ۸ درصد و هسته سد در حدود ۲۱ درصد که تأمین‌کننده پایداری لازم نیز می‌باشد. نتایج بیانگر عملکرد بسیار مناسب مدل در جهت کاهش هزینه‌های اجرایی سد در حدود ۱۲/۳ درصد در طرح بهینه ابعاد هسته رسی تحت شرایط پایدار سدهای خاکی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین روش‌های بررسی روند نشت در سدهای غیرهمگن بحث تعیین مجموعه نقاط خط فریاتیکی است که براساس آن می‌توان شبکه جریان و تمرکز جریان در حالت‌های مختلف را بررسی نمود (رحیمی، ۱۳۹۷). (Salem et al., 2019) اثر نفوذپذیری را برای یک سد خاکی با هسته رسی در عرض و ضخامت هسته و برای بار دوم در یک سد خاکی بدون هسته داخلی و فقط در پایه بدنه سد مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد تحلیل عددی با استفاده از مدل تجربی مطابقت خوبی دارد. نتایج تحقیق (Salmasi and Nouri 2019) نشان داد که استفاده از پتوی غیرقابل نفوذ در بالادست سد خاکی در طول و ضخامت مناسب، در کاهش نشت و در نتیجه افزایش پایداری سد موثر است. همچنین عملکرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی نشت عالی بود. (Sazzad and Alam 2020) به روش مدل‌سازی عددی به بررسی نشت جریان در یک سد خاکی همگن پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود نشان دادند که فشار آب منفذی تقریباً به‌صورت خطی با فاصله از پاشنه سد خاکی کاهش می‌یابد. کماسی و بیرانوند (۱۳۹۹) با استفاده از نرم‌افزارهای Geostodio و Plaxis به بررسی نشت سد خاکی ایوشان پرداختند. آن‌ها با مدل‌سازی پرده آب‌بند در زیر هسته، اثر آن بر میزان دبی عبوری از پی در ترازهای مختلف مخزن را ارزیابی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین نتایج پیش‌بینی شده با عملکرد سد از نظر دبی نشت وجود دارد. (Kheiri et al., 2020)



استفاده از نرم‌افزار SEEP/W دبی جریان در زیر سد خاکی با هسته رسی و اثرات پرده آب‌بند در زیر هسته سد تحت دبی‌های مختلف ناشی از نشت را بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق پرده آب‌بند، فشار بالا بر کاهش یافته و گرادیان هیدرولیکی در زیر سد افزایش می‌یابد. Salmasi et al., (2020a) به بررسی میزان تراوش و گرادیان هیدرولیکی در سدهای خاکی غیرهمگن با هسته مایل و عمودی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تراوش با هسته عمودی کم‌تر از هسته مایل است. Salmasi et al., (2020b) به بررسی پرده آب‌بند، فیلتر پائین دست برای کنترل نشت و گرادیان هیدرولیکی و نیروی بالا برنده در سد پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش طول فیلتر، گرادیان هیدرولیک خروجی، نیروی بالا برنده و تراوش کاهش می‌یابد.

با توجه به جریان ایجاد شده تحت اثر فشار هیدرولیکی در بدنه سدهای خاکی، به مرور زمان جریان‌های داخلی افزایش پیدا کرده و منجر به ایجاد آبستگی در پائین دست آن و در نهایت ناپایداری سد می‌گردد. براین اساس، لزوم بررسی عوامل مختلفی برای کاهش این اثرات لازم و ضروری است. بدین منظور، راه‌کارهایی که بتواند بر کاهش اثر پدیده آبستگی و نشت جریان موثر باشد استفاده از سیستم‌های الحاقی از جمله دیوار برشی، پتوی رسی و زهکش است. بنابراین در پژوهش حاضر لزوم بررسی سناریوهای مختلف هم‌چون کاربرد ۱- پتوی رسی و زهکش و دیواره سپری، ۲- پتوی رسی و دو دیواره سپری، ۳- فقط پتوی رسی، ۴- پتوی رسی و یک دیواره سپری، ۵- یک دیواره سپری و ۶- بدون المان آب‌بندی در کاهش نشت و اثر آن بر عملکرد هیدرولیکی سد صورت پذیرفته است. در پژوهش حاضر سعی شده است از بهینه‌ترین شرایط ترکیب المان‌های آب‌بندی برای کاهش حداکثری نشت جریان استفاده گردد، که هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ مطالعات هیدرولیکی، قابلیت توجیه داشته باشد.

## مواد و روش‌ها

### خصوصیات فیزیکی و هندسه مدل

سد البرز یک سد غیرهمگن با هسته رسی بوده که در فاصله ۳۰ کیلومتری شهر شیرگاه در استان مازندران قرار دارد. این سد دارای پی به ارتفاع ۳۹ متر، طول ۲۳۵ متر، ارتفاع سد از سطح فونداسیون ۷۸ متر، عرض تاج سد ۱۲ متر، عرض سد در کف ۲۰۸ متر و طول تاج سد برابر ۸۳۸ متر است. نمای کلی سد خاکی مورد مطالعه در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. نمایی از مقطع سد در نرم‌افزار در شکل (۱-ب) ارائه شده است. با توجه به اینکه مقاومت در برابر بارهای وارده توسط پوسته سد تأمین می‌گردد و معمولاً هسته رسی نقش آب‌بندی در سازه سد را عهده‌دار و تمرکز جریان در پائین دست سد است، بنابراین مناطق بحرانی جهت بررسی نشت جریان در دو ناحیه به فاصله ۱۷۷ و ۲۰۷ متری از پاشنه بالادست سد در نظر گرفته شده است. مشخصات نفوذپذیری قسمت‌های مختلف سد، مطابق جدول (۱) نشان داده شده است.

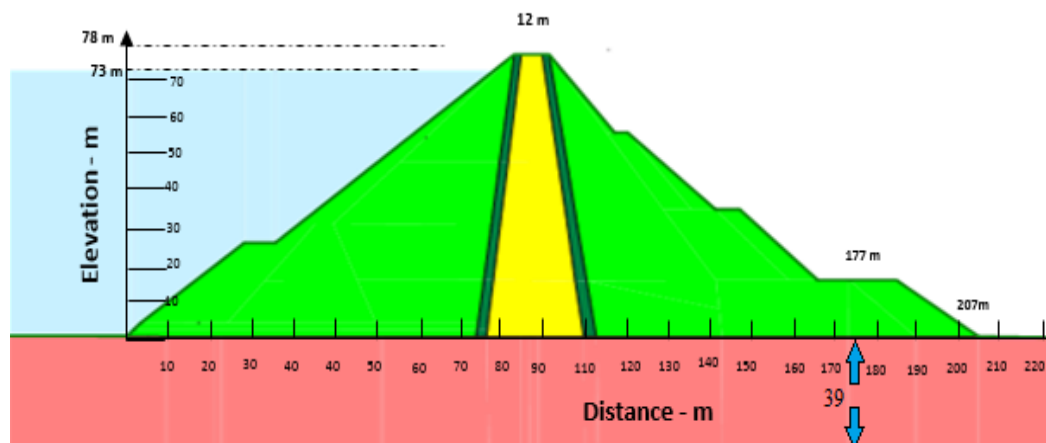
در شرایط وجود خاک غیراشباع، حباب‌های هوای موجود در توده فضاهای خالی خاک سبب ممانعت در مقابل آب می‌گردد. در نتیجه حرکت آب در خاک در شرایط غیراشباع مشکل‌تر از شرایط اشباع است. بنابراین در نظر گرفتن ضریب نفوذپذیری اشباع برای خاک غیراشباع به نتایج غیرواقعی منجر می‌گردد. بنابراین برای تحلیل شرایط فوق، برای تعریف ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع از ضریب نفوذپذیری با فشار حفره‌ای استفاده شده است. مشخصات نفوذپذیری پتوی رسی و دیواره آب‌بند (cut off) نیز برابر میزان نفوذپذیری هسته تعریف می‌گردد.

جدول ۱. مشخصات نفوذپذیری مصالح سد خاکی غیرهمگن

مقطع	ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع (متر بر ثانیه)
فونداسیون	۱۰ <sup>-۶</sup>
پوسته	۱۰ <sup>-۲</sup>
فیلتر	۱۰ <sup>-۳</sup>
هسته	۱۰ <sup>-۷</sup>



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) سد خاکی غیرهمگن البرز (ب) نمایی از مقطع سد

### نرم افزار SEEP/W

نرم افزار SEEP/W یکی از بخش‌های مهم بسته نرم افزاری Geo Studio بوده و مبتنی بر روش المان محدود است. این نرم افزار به بررسی شرایط تراوش و جریان آب در خاک و به طور کلی توزیع فشارهای منفذی در محیط‌های متخلخل نظیر خاک و سنگ می‌پردازد. نرم افزار SEEP/W دارای قابلیت ترسیم تراز آب عبوری از درون خاک، محاسبات دبی عبوری برای یک مقطع مشخص و ترسیم خطوط جریان و هم پتانسیل را دارد (Belew et al., 2022). همچنین علاوه بر آنالیز در شرایط ماندگار، قابلیت مدل‌سازی شرایط تخلیه سریع مخزن و ایجاد تابع تخلیه سریع مخزن بر حسب زمان را نیز دارا است. امکان مدل‌سازی شرایط پر شدن سریع مخزن، شرایط نیمه اشباع، توابع نفوذپذیری و توابع رطوبت حجمی خاک و پیوسته در نظر گرفتن آنها در کنار یکدیگر در محاسبات نیز از دیگر قابلیت‌های مهم این نرم افزار است. در تحلیل مدل‌های دارای سطح آزاد جریان و شرایط مرزی از نوع خروج، از آنجایی که هم موقعیت محل خروج آب و هم ضرایب نفوذپذیری در نقاط مختلف نامعلوم می‌باشند، بنابراین برنامه از دو سعی و خطا در داخل هم استفاده می‌کند. ابتدا شرایط مرزی با عنوان نفوذپذیری به صورت پیش فرض در نظر گرفته شده و برای بار اول به روش سعی و خطا میزان نفوذپذیری با همگرایی در دو مرحله متوالی تعیین می‌شود. برنامه این مقادیر پیش فرض را کنترل می‌کند و سپس این شرط مرزی مورد تأیید را برای محل خروج آب پیش فرض شده اعمال می‌کند. حال شرط مرزی پیش فرض خروج آب را به صورت سعی و خطا با در نظر گرفتن مقادیر صحیح ضرایب نفوذپذیری تحلیل می‌کند تا در نهایت در دو مرحله متوالی از سعی و خطا برای مرحله دوم نیز همگرایی اتفاق بیافتد.

### معادلات حاکم بر جریان

میزان دبی که از محیط متخلخل و اشباع عبور می‌کند با میزان افت بار  $\Delta h$  رابطه مستقیم و دبی جریان با طول مسیر آن نسبت عکس

دارد که مطابق رابطه (۱) نشان داده شده است (Liu et al., 2022).

$$V = -K \cdot i, Q = KA \frac{\Delta h}{L} \quad \text{رابطه (۱)}$$

برای یافتن معادله حاکم بر جریان آب در یک محیط متخلخل، یک المان کوچک و اشباع به ابعاد  $dx$  و  $dy$  در نظر گرفته شده و سرعت جریان در امتداد  $x$  و  $y$  به ترتیب  $V_x$  و  $V_y$  منظور می‌گردد (Daneshfaraz et al., 2022a). با صرف نظر کردن از تغییرات حجم المان در اثر عوامل مختلفی مانند تغییرات تنش مؤثر و نوشتن قانون بقای جرم، مقدار خالص جریان ورودی به المان برابر با معادله (۲) می‌شود.

$$q_{net} = q_x + q_y + Q \, dA = \left( -\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} + Q \right) dA \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)،  $q$  جریان خالص و  $Q$  مقدار دبی تولید شده در واحد سطح المان است. با استفاده از روابط نرخ تغییرات جرمی آب در المان خاک و نرخ تغییرات درصد رطوبت حجمی المان خاک و قانون بقای جرم داریم:

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} + Q = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{رابطه (۳)}$$

معادله (۳) بیانگر معادله دیفرانسیل پیوستگی است. با ترکیب روابط داری و دیفرانسیل پیوستگی، معادله دیفرانسیل تراوش حاصل می‌گردد (Tang et al., 2022).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{رابطه (۴)}$$

با منظور کردن ضریب ذخیره مخصوص در رابطه بالا داریم:

$$\bar{\nabla} \cdot (C \cdot \nabla h) + Q = m_w \cdot \gamma_w \cdot \frac{dh}{dt} \quad \text{رابطه (۵)}$$

معادله (۵)، معادله تراوش است که در آن  $\bar{\nabla} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right\}$  عملگر و  $C$  ماتریس نفوذپذیری است. از آنجایی که در جریان‌های پایدار، مقدار  $h$  با زمان تغییر نمی‌کند، معادله تراوش به شکل معادله (۶) ساده می‌شود:

$$\bar{\nabla} \cdot (C \cdot \nabla h) + Q = 0 \quad \text{رابطه (۶)}$$

با استفاده از توابع درون‌یابی و جایگذاری در مشتق معادله دیفرانسیلی تراوش و اعمال شرایط مرزی، فرم ماتریسی معادله تراوش طبق رابطه (۷) حاصل می‌گردد.

$$[K]\{H\} + [M]\{H\}_t = \{Q\} \quad \text{رابطه (۷)}$$

معادله (۷)، معادله کلی تراوش در روش اجزای محدود است. با محاسبه ماتریس‌های فوق و اعمال شرایط مرزی و حل دستگاه معادلات، مقادیر بار آبی در نقاط مورد نظر گره‌های شبکه به دست می‌آید.

در سدهای خاکی، محیط به دو قسمت اشباع و غیراشباع تقسیم می‌شود که جریان در هر دو محیط و نیز بین دو محیط وجود دارد. ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع با تغییرات درصد رطوبت یا تغییرات مکش حفره‌ای تغییر می‌کند. با داشتن رابطه محتوای رطوبت حجمی برحسب مکش حفره‌ای و ضریب نفوذپذیری می‌توان معادله تراوش را با استفاده از سعی و خطا حل نمود (شکل ۲). چون مقدار ضریب نفوذپذیری در محیط در ابتدا معلوم نیست، بنابراین با فرض محیط اشباع، معادله تراوش حل شده و فشارهای منفذی در هر المان از محیط محاسبه می‌شوند. با استفاده از مقدار فشار منفذی در مرکز هر المان، مقدار ضریب نفوذپذیری آن المان تعیین شده و معادله تراوش با ضرایب نفوذپذیری جدید مجدداً حل می‌شود. این روند تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد.

#### سناریوهای تعریف شده برای بررسی روند تأثیر عوامل کاهش نشت در سد خاکی

جهت بررسی کامل موضوع آب‌بندی با روش‌های مختلف، ۶ روند تحلیلی مطابق زیر در نشت جریان مورد مطالعه قرار گرفته است.

سناریوی ۱: پتوی رسی و زهکش و دیواره سپری

سناریوی ۲: پتوی رسی و دو دیواره سپری

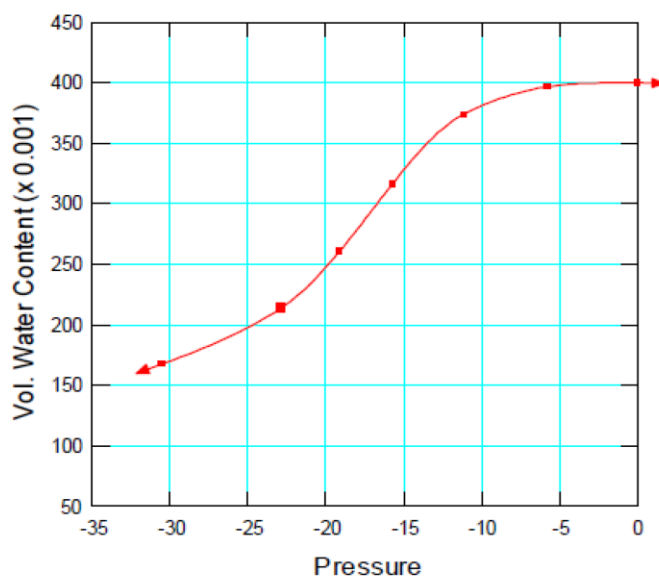
سناریوی ۳: فقط پتوی رسی

سناریوی ۴: پتوی رسی و یک دیواره سپری

سناریوی ۵: یک دیواره سپری

سناریوی ۶: بدون المان آببندی

روند سناریوها بدون در نظر گرفتن تغییرات ابعادی المان‌ها بوده و صرفاً ترکیب المان‌های آببندی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. کل سیستم تحلیل برمبنای جریان ماندگار بوده و اثرات کاهش تراز آب مخزن در نظر گرفته نشده است. مشخصات کل پارامترهای آببندی در جدول (۲) بیان شده است.



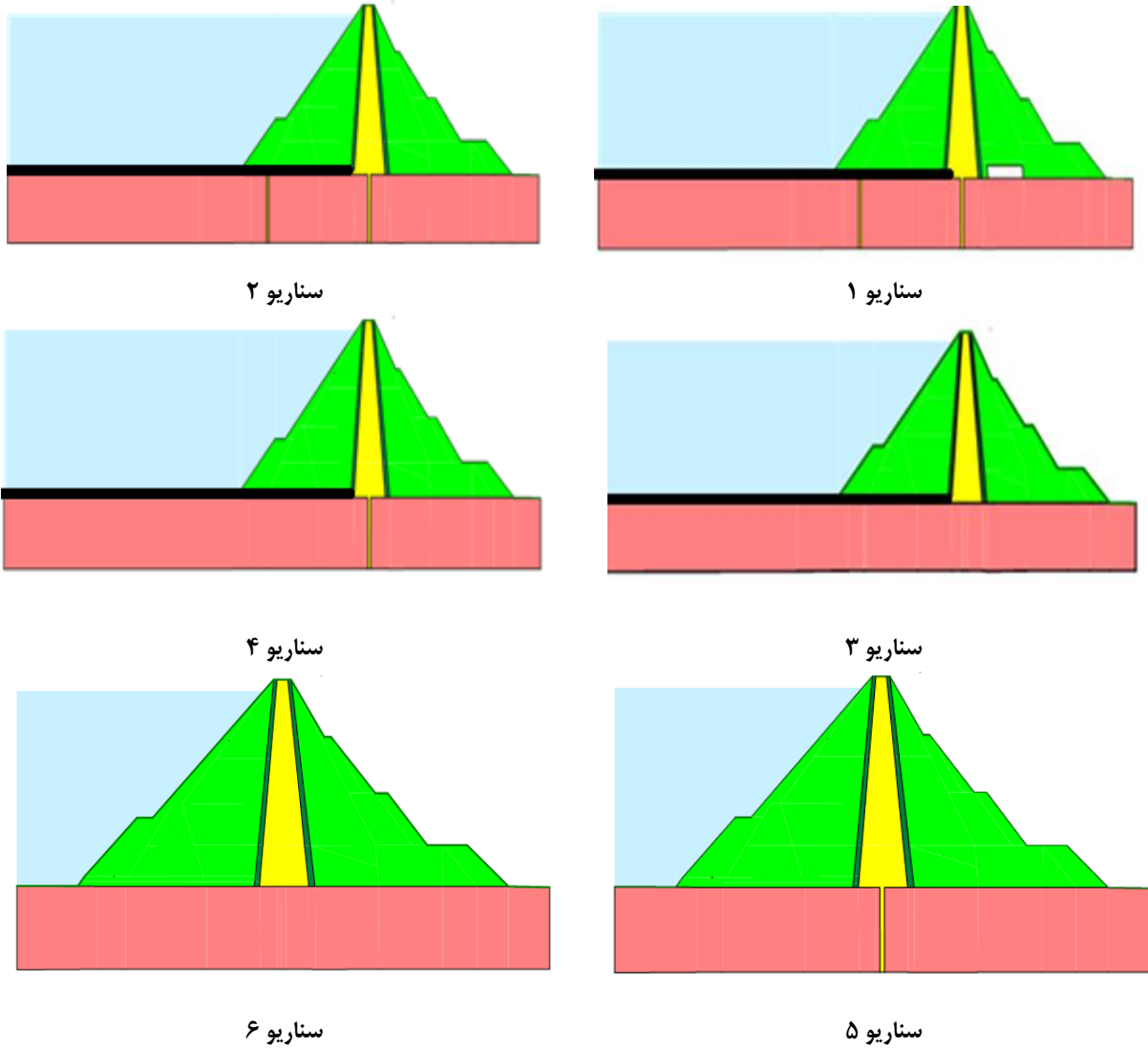
شکل ۲. تغییرات محتوای رطوبت حجمی با مکش حفره‌ای

جدول ۲. مشخصات المان‌های آببند برحسب ترکیب و نوع سناریوی تحلیلی

نوع سناریوی تحلیلی	نوع المان آببند	طول (متر)	عرض (متر)	ضریب نفوذپذیری
یک دیواره سپری	دیواره سپری	۳۹	۱	$10^{-7}$
پتوی رسی و یک دیواره سپری	دیواره سپری	۳۹	۱	$10^{-7}$
	پتوی رسی	۱۰۰	۱/۷۵	$10^{-7}$
پتوی رسی و دو دیواره سپری	دیواره سپری	۳۹	۱	$10^{-7}$
	پتوی رسی	۱۰۰	۱/۷۵	$10^{-7}$
فقط پتوی رسی	پتوی رسی	۳۸۵	۱/۷۰	$10^{-7}$
	دیواره سپری	۲۵	۱	$10^{-7}$
پتوی رسی و زهکش و دیواره سپری	پتوی رسی	۱۰۰	۱/۷۰	$10^{-7}$
	زهکش	۳۵	۲/۱۰	-

در شکل (۳) سناریوهای مختلف شش‌گانه در تحلیل نشت جریان نمایش داده شده است در تمامی موارد ارتفاع تراز آب به دلیل فرض جریان ماندگار، ثابت در نظر گرفته شده است و در سناریوی مربوط به تاثیر پتوی رسی، طول این المان آببند ۳۸۵ متر است که در سناریوهای ترکیبی، کم‌تر از این مقدار در نظر گرفته شده است. زیرا هدف اصلی بررسی ترکیبی اثرات سیستم‌های آببند در نحوه کاهش نشت جریان است. در شکل (۳) پوسته به رنگ سبز، هسته به رنگ زرد، فونداسیون به رنگ صورتی، پتوی رسی به رنگ سیاه و پرده آب بند به رنگ زرد تیره نشان داده شده است.



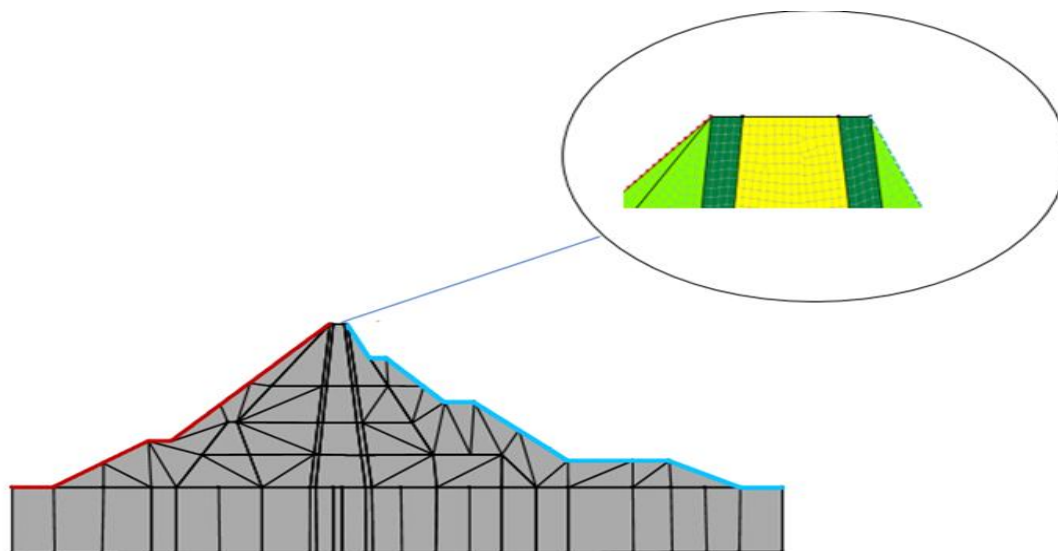


شکل ۳. سناریوهای مختلف تحلیل نشت جریان در سد خاکی

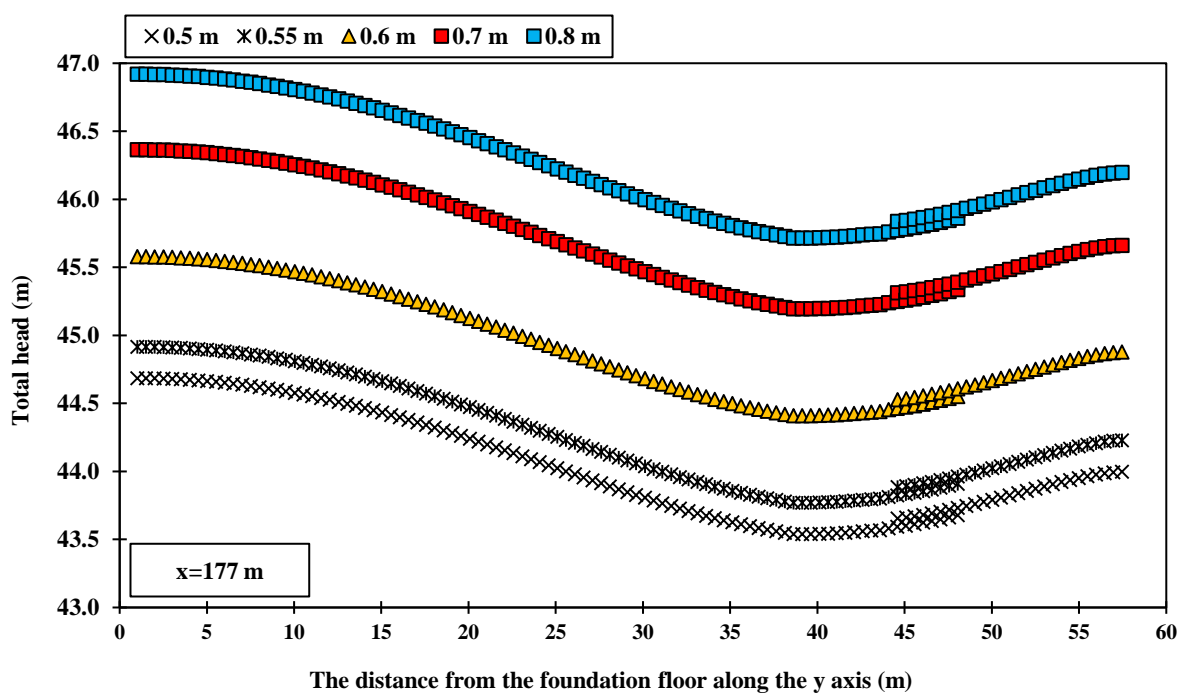
### شرایط مرزی، مش بندی و تحلیل حساسیت

مطابق تعریف کلی مسائل عددی در یک فضای محاسباتی نیاز است که مرز تحلیل مشخص گردد. در پژوهش حاضر دو شرط مرزی، یکی در بالادست و دیگری در پائین دست سد واقع شده است. در پائین دست سد تراز آب صفر است. با توجه به وجود جریان نشت آب از بدنه سد خاکی و عدم تعیین دقیق محل نشت، شرط مرزی Potential seepage بوده و برای تراز بالادست بدنه سد نیز به دلیل تغییر میزان فشار آب با تغییر در ارتفاع بالادست، از شرط مرزی Pressure head استفاده شده است. در تحلیل سد خاکی، متناسب با نوع مصالح، ناحیه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۴) برای فونداسیون ۲۳ ناحیه، برای پوسته ۴۷ ناحیه، برای هسته ۴ ناحیه و برای فیلتر ۸ ناحیه بندی انجام شده است. با توجه به قرارگیری المان‌های مش در داخل ناحیه‌های تعریف شده، در کل با در نظر گرفتن نوع المان‌های serendipity چهار ضلعی از نوع ۸ گرهی، ابعاد المان برای تحلیل ۰/۵۰، ۰/۵۵، ۰/۶۰، ۰/۷۰ و ۰/۸۰ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان تغییرات در المان‌هایی با طول ۰/۷۰ و ۰/۸۰ متر زیاد و در سایر اندازه‌ها کم است، بنابراین جهت حصول نتایج دقیق در تحلیل، از اندازه المان ۰/۵۰ متر در مش بندی استفاده شده است (Daneshfaraz et al., 2022b; Daneshfaraz et al., 2023). در شکل (۴) مش بندی بخشی از تاج سد نشان داده شده است. با توجه به اینکه در فاصله ۱۷۷ متر از مبدأ مختصات سد، به دلیل شروع ناحیه بحرانی که با نشت بالایی از جریان همراه است، نتایج حاصل از تحلیل برای تعیین میزان فشار کل در داخل سد در فاصله مذکور برای سناریوی بدون سیستم آب بندی مطابق شکل (۵) ترسیم شده است.





شکل ۴. مش بندی نمونه بخشی از تاج سد

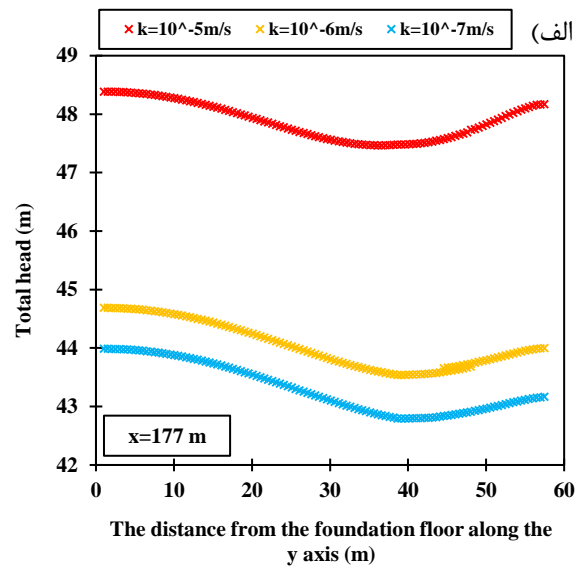
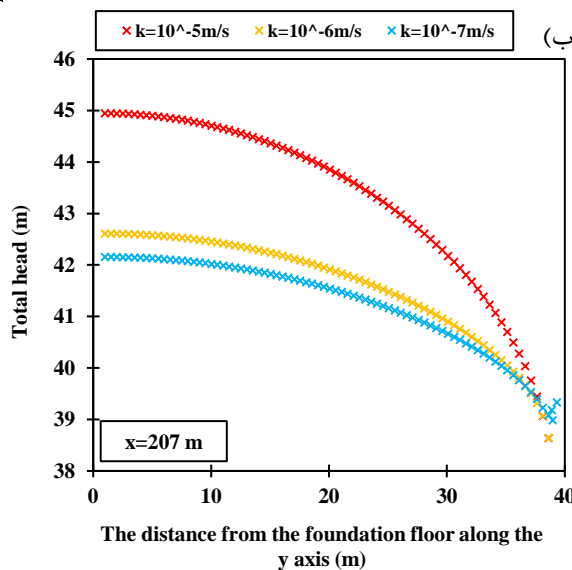


شکل ۵. تحلیل حساسیت برای المان چهار ضلعی با ۵ اندازه مختلف

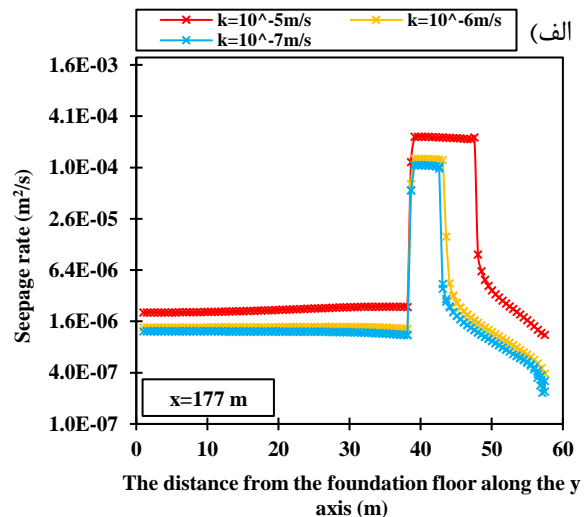
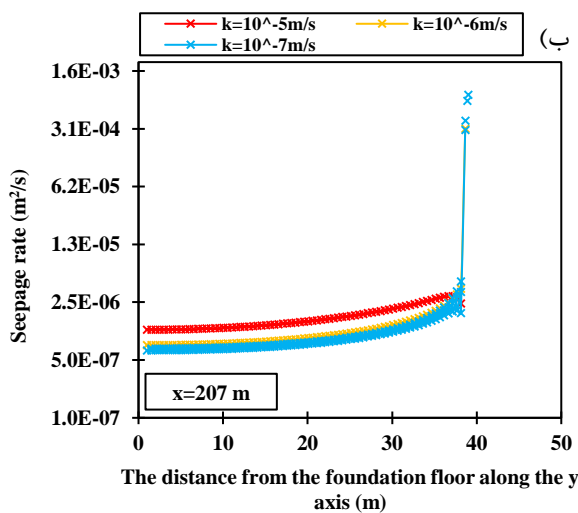
## نتایج و بحث

با توجه به اینکه هسته سد خاکی به دلیل مقاومت در برابر نشست جریان نقش کلیدی دارد با تغییر در میزان نفوذپذیری آن تغییرات دبی نشست و گرادیان سرعت می تواند نمود داشته باشد. در پروژه حاضر ضریب نفوذپذیری اشباع برابر  $10^{-7}$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. حال بدون تغییر در ابعاد هندسه سد و جهت بررسی روند تأثیر میزان نقش هسته رسی در نشست جریان، ضریب نفوذپذیری در مرحله دوم تحلیل برابر با  $10^{-6}$  متر بر ثانیه و در مرحله سوم تحلیل برابر با  $10^{-5}$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به تمرکز جریان در پائین دست و پاشنه سد خاکی می توان اثر بحرانی جریان را در آن مناطق پیش بینی کرد. بنابراین جهت بررسی دقیق تر مسئله، دو تراز قائم در فاصله ۱۷۷ و ۲۰۷ متری از محور  $y$  در نظر گرفته شد. مناطقی که در فاصله ۲۰۷ متری قرار دارند مختص فونداسیون بوده و محل ۱۷۷ متری از محور قائم اثرات ترکیبی پوسته پائین دست و فونداسیون به صورت توامان بررسی گردید. نتایج حاصل تحلیل ها را در سه پارامتر دبی نشست جریان، گرادیان هیدرولیکی و فشار کل در همان مناطق برای ضرایب نفوذپذیری های مختلف بررسی گردید (شکل های ۶، ۷ و ۸). مطابق شکل

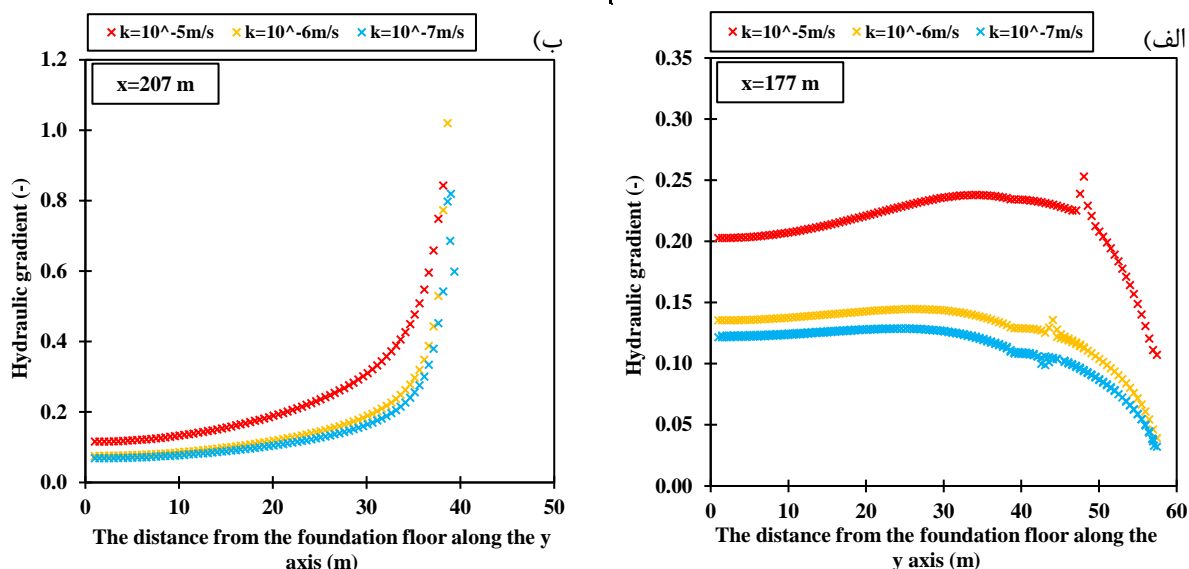
(۶)، از کف فونداسیون به طرف فصل مشترک فونداسیون و پوسته، توزیع فشار کل یک روند نزولی داشته و در فصل مشترک با توجه به تمرکز جریان میزان فشار کل برای هر سه ضریب نفوذپذیری مختلف حداقل مقدار را داشته و مجدداً با افزایش ارتفاع در پوسته به دلیل نزدیکی به سطح پوسته و تمرکز بالای جریان در آن ناحیه، این روند حالت صعودی به خود می‌گیرد. بنابراین در ناحیه حداکثر جریان، فشار کل کاهش چشم‌گیری داشته و با کاهش ضریب نفوذپذیری در فاصله ۴۰ متری از کف فونداسیون کم‌ترین مقدار و برابر  $37/8$  متر است. در شکل (۷) روند دبی نشت با افزایش ارتفاع از کف فونداسیون روند صعودی داشته و در محدوده ۳۸ متر تا ۴۶ متر از ارتفاع، حداکثر بوده و مجدداً روند نزولی به خود می‌گیرد. این روند بیانگر آن است که در فصل مشترک بین فونداسیون و پوسته تمرکز جریان وجود دارد و احتمال آبستتگی در این ناحیه زیاد است. در فاصله ۲۰۷ متری از مبدأ مختصات نیز به دلیل وجود فقط ناحیه فونداسیون، مقدار دبی نشت در ارتفاع ۳۹ متری به حداکثر مقدار خود می‌رسد. مقایسه این دو نمودار نشان دهنده افزایش ۳۸ درصدی دبی نشت در پائین دست سد بوده و بحرانی‌ترین ناحیه در قسمت پاشنه سد است. در شکل (۸) با مقایسه گرادیان جریان با ضریب نفوذپذیری در سه حالت، با حرکت به پائین دست سد، شیب گرادیان جریان بیشتر شده و متناسب با دبی نشت، میزان گرادیان نیز به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. در حالت کلی مطابق جدول (۳)، هرچند که تغییر داده‌ها در تأثیر میزان نفوذپذیری هسته رسی در کاهش دبی نشت و گرادیان جریان دارد، اما نمی‌تواند به طور مستقل کاهش جریان در داخل خاک را در حد کم‌تر از حالت بحرانی حفظ نماید. بنابراین بایستی از عوامل دیگر کنترل‌کننده نشت جریان در داخل خاک استفاده شود.



شکل ۶. توزیع بار آبی کل در عمق فونداسیون و بخشی از پوسته در فاصله ۱۷۷ متری و ۲۰۷ متری از محور  $y$



شکل ۷. توزیع دبی نشت در عمق فونداسیون و بخشی از پوسته در فاصله ۱۷۷ متری و ۲۰۷ متری از محور  $y$



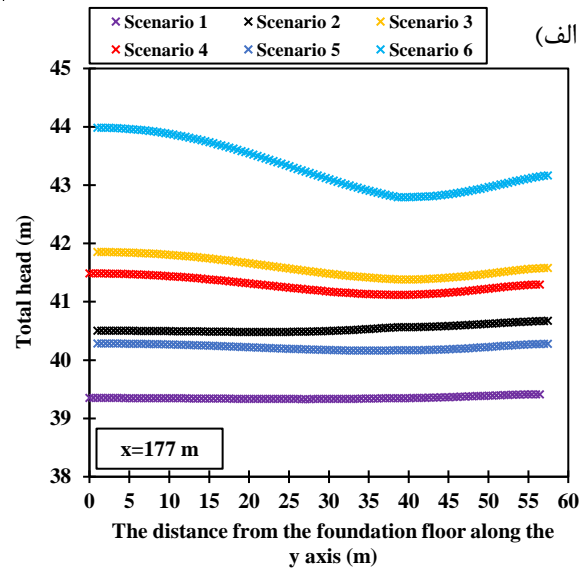
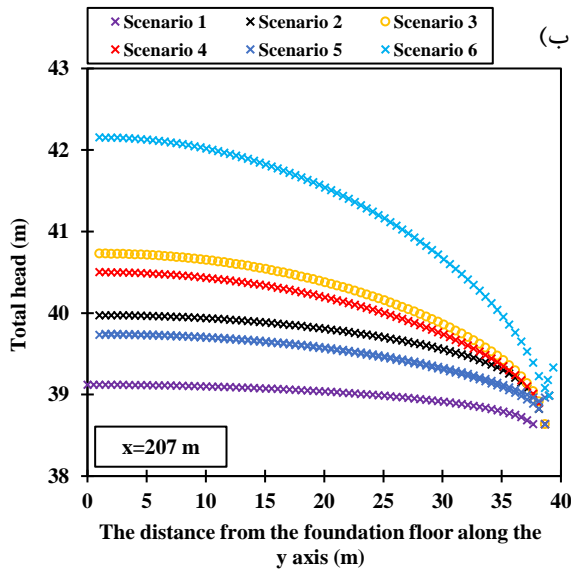
شکل ۸. توزیع گرادیان هیدرولیکی در عمق فونداسیون و بخشی از پوسته در فاصله ۱۷۷ متری و ۲۰۷ متری از محور y

جدول ۳. مقادیر حداکثر پارامترهای دبی نشت، فشار کل و گرادیان هیدرولیکی در پائین دست سد با ضریب نفوذپذیری مختلف

گرادیان جریان	فشار کل (m)	دبی نشت (m <sup>3</sup> /s.m)	ضریب نفوذپذیری هسته رسی
۰/۸۱	۳۹/۸	۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۰ <sup>-۷</sup>
۰/۸۶	۴۴/۸۵	۰/۸۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۰ <sup>-۶</sup>
۱/۰۵	۴۸/۷۰	۰/۷۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	۱۰ <sup>-۵</sup>

پتوی رسی باعث افزایش طول خطوط جریان و در نتیجه کاهش گرادیان هیدرولیکی و همچنین افزایش افت پتانسیل و کاهش انرژی آب می‌شود. طول و ضخامت رویه نفوذناپذیر، به ارتفاع آب در پشت سد بستگی دارد. این روش در سدهایی که پی آن نفوذپذیری قائم و افقی یکسانی دارند، بیشتر استفاده می‌گردد. زمانی که نفوذپذیری افقی خیلی بیشتر از قائم باشد تأثیر چندانی در نتایج حاصل از تحلیل نشان نمی‌دهد. براساس پیشنهاد سازمان عمران آمریکا، ضخامت رویه نفوذناپذیر بهتر است ۱۰ درصد ارتفاع آب باشد و از ۱ متر کم‌تر نباشد (ASCE 2015). بنابراین ضخامت پتوی رسی به‌طور تقریب برابر ۱/۷۵ متر در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی زهکش یک سیستم مستطیلی در صفحه با ارتفاع ۲/۵ و طول ۱۰ متر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تعریف شرط مرزی صفر برای زهکش و عدم تداخل شرایط مرزی مش‌های اطراف با زهکش، می‌بایست بخش مربوط به زهکش بدون مش‌بندی بوده و تابع شرط مرزی به جداره‌های زهکش اختصاص داده شود و ناحیه پیرامون جهت عدم تأثیرپذیری از مش‌بندی‌های دیگر، مش‌بندی مجزایی نسبت به دیگر نواحی‌ها مجاور استفاده می‌شود.

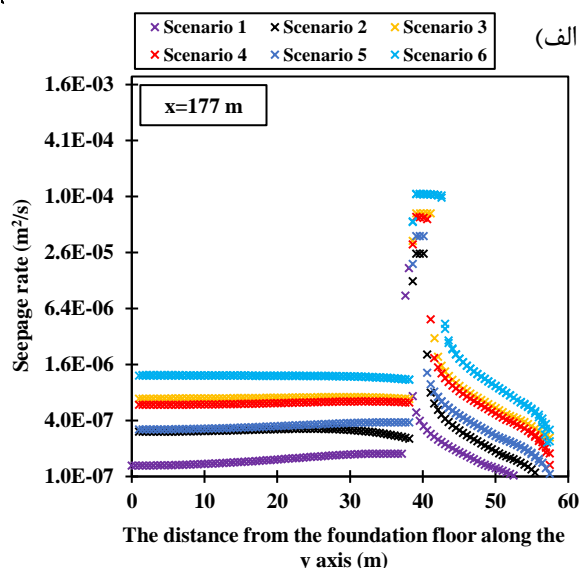
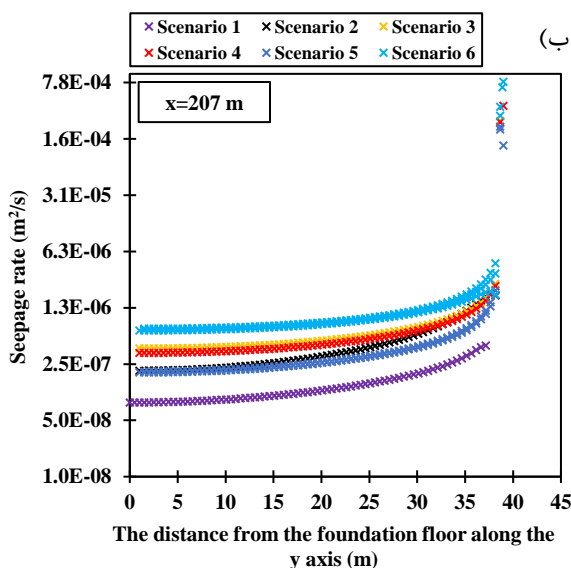
تغییرات پارامترهای دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و فشار کل در دو منطقه بحرانی برای کل ۶ سناریوی تعریف شده مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به شکل (۹-الف) تغییرات فشار کل برای ناحیه ۱۷۷ متری از مبدأ مختصات ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است در ناحیه فونداسیون شیب کاهش فشار برای تمامی عوامل آب‌بندی بیشتر از ناحیه پوسته است. در نتیجه آن تمرکز خطوط جریان و دبی حداکثر نشت در ناحیه فونداسیون است. در فصل مشترک فونداسیون و پوسته کاهش فشار زیاد بوده و بعد از آن، روند افزایش فشار به دلیل کاهش سطح جریان در پوسته اتفاق می‌افتد. نتایج نشان داد که تأثیر زهکش، پتوی رسی و دیواره سپری به‌صورت هم‌زمان می‌تواند فشار کل در هر تراز را تا حد مطلوبی کاهش دهد. مطابق شکل (۹-ب) در فاصله ۲۰۷ متر از مبدأ مختصات منحصراً محدوده فونداسیون بوده و تمرکز جریان در سطح آن بیشترین مقدار را دارد. بنابراین شرایط بحرانی و حداکثر دبی نشت در نقطه انتهایی پوسته پائین دست و در محور سد می‌باشد که براساس نمودار در این تراز شیب کاهش بار آبی کل، بسیار بیشتر از ناحیه ۱۷۷ متری می‌باشد. همچنین با حرکت از ناحیه پائین دست به طرف بالادست، کاهش بار آبی کل برای انواع سناریوهای آب‌بندی، اختلاف زیادی را نشان می‌دهد. مطابق جدول (۴)، توزیع درصد بار آبی کل در سناریوهای مختلف نمایش داده شده است. بر این اساس در فاصله ۱۷۷ و ۲۰۷ متری، سناریوی شماره ۱ کم‌ترین بار آبی و سناریوی شماره ۶ بالاترین میزان بار آبی را دارا است.



شکل ۹. توزیع بار آبی کل در فاصله ۱۷۷ متری و ۲۰۷ متری از مبدأ مختصات

جدول ۴. توزیع درصد بار آبی کل در سناریوهای مختلف در دو ناحیه بحرانی برای نشت جریان

سناریو	شماره	فاصله ۱۷۷ متری از مبدأ مختصات	فاصله ۲۰۷ متری از مبدأ مختصات
پتوی رسی و زهکش و دیوار سپری	۱	۸۹	۹۲
پتوی رسی و دو دیواره سپری	۲	۹۲/۱	۹۴/۳
فقط پتوی رسی	۳	۹۵	۹۶/۵
پتوی رسی و یک دیواره سپری	۴	۹۴/۴	۹۵/۷
یک دیواره سپری	۵	۹۱/۷	۹۳/۸
بدون المان آببندی	۶	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۱۰. تغییرات دبی نشت در فاصله ۱۷۷ متری و ۲۰۷ متری از مبدأ مختصات

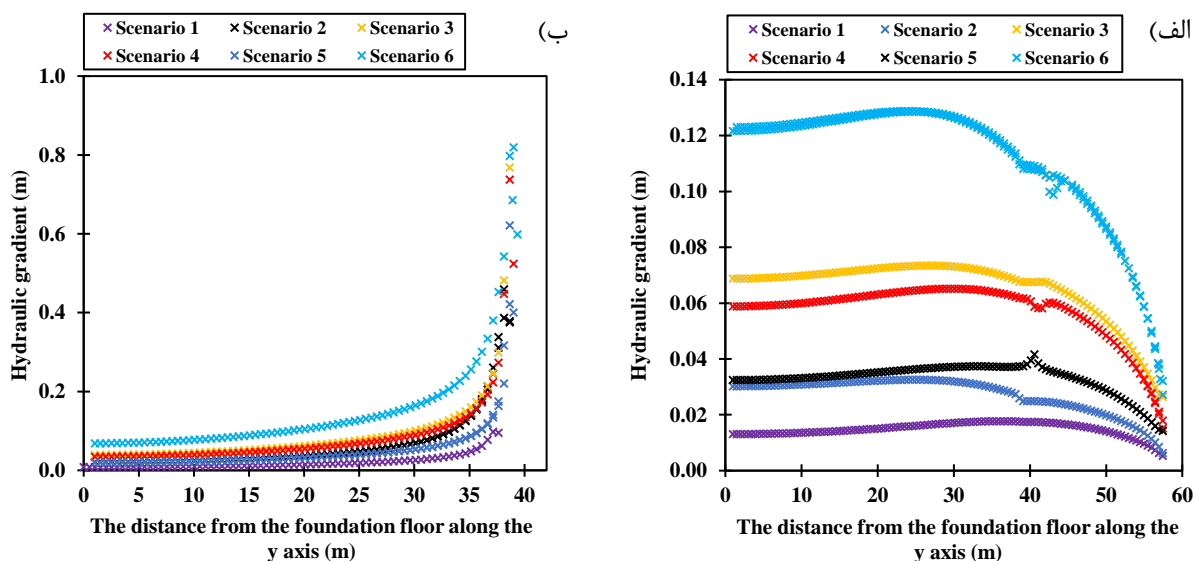
با توجه به شکل (۱۰) دبی نشت در عمق فونداسیون تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد و سناریوهای تحلیل تقریباً در دو ناحیه مورد مطالعه مقادیر نزدیک به یکدیگر دارند. اما در فصل مشترک پوسته و فونداسیون در ناحیه  $x=177$  m دبی نشت خیلی بالا بوده و ناحیه بحرانی مشهود است. در این ناحیه با توجه به نمودارها، مقادیر حالت بدون سیستم‌های آب بند دارای بیشترین دبی نشت بوده و حالت ترکیبی زهکش و دیواره سپری و پتوی رسی حداقل مقدار نشت را نشان می‌دهد. در جدول (۵) درصد توزیع دبی نشت در سناریوهای

مختلف نشان داده شده است براساس نتایج حاصل از جدول (۵) توزیع دبی نشت در دو ناحیه با هم متفاوت بوده و بسته به میزان جریان در دو ناحیه، تاثیر سناریوی ۱ کاهنده‌ترین نوع برای دبی نشت است. به علت تغییر طول پتوی رسی در ترکیب سایر المان‌های آب بندی که ۱۰۰ متر است نسبت به حالت صرف وجود پتوی رسی، سناریوهای ۳ و ۴ مقادیر توزیع دبی نشت متفاوتی را نسبت به ترکیب سناریوها نشان می‌دهند.

جدول ۵. توزیع درصد دبی نشت در سناریوهای مختلف در دو ناحیه مورد مطالعه

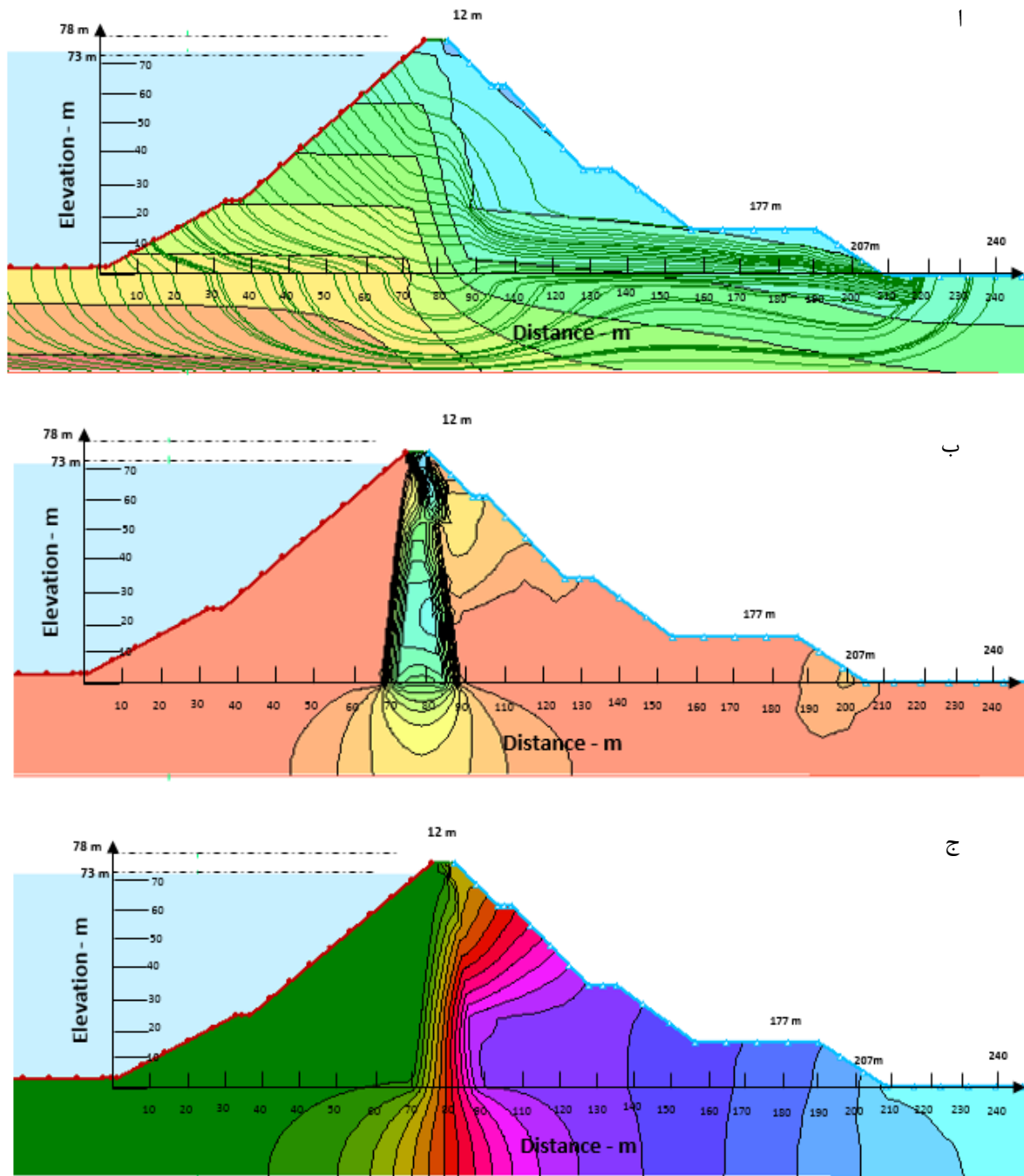
سناریو	شماره	فاصله ۱۷۷ متری از مبدأ مختصات	فاصله ۲۰۷ متری از مبدأ مختصات
پتوی رسی و زهکش و دیوار سپری	۱	۸۵/۸	۸۳/۲
پتوی رسی و دو دیواره سپری	۲	۸۶/۲	۸۸/۱
فقط پتوی رسی	۳	۸۶/۹	۹۵/۸
پتوی رسی و یک دیواره سپری	۴	۸۷/۶	۹۱/۹
یک دیواره سپری	۵	۸۶/۶	۹۰/۷
بدون المان آب‌بندی	۶	۱۰۰	۱۰۰

مطابق شکل (۱۱)، تغییرات گرادیان هیدرولیکی در دو ناحیه مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به شکل (۱۱)، تاثیر المان‌های آب‌بند در روند جریان در نواحی میانی بدنه سد زیاد بوده و در انتهای سد مقادیر حاصل برای تغییرات سرعت جریان بسیار نزدیک به یکدیگر هستند.



شکل ۱۱. تغییرات گرادیان هیدرولیکی در فاصله ۱۷۷ و ۲۰۷ متری از محور قائم مختصات

در شکل (۱۲) به ترتیب توزیع گرادیان هیدرولیکی، فشار هیدرولیکی و توزیع جریان برای سناریوی ۵ آورده شده است. مطابق شکل (۱۲-الف) در فاصله ۱۷۷ متر تا ۲۰۷ متر توزیع گرادیان هیدرولیکی، به دلیل کاهش مقطع، جریان عبوری افزایش می‌یابد و منجر به ایجاد یک حالت بحرانی در آن ناحیه می‌گردد. همچنین در شکل (۱۲-ب) توزیع فشار هیدرولیکی با فاصله گرفتن از هسته رسی کاهش نسبی را نشان می‌دهد. در شکل (۱۲-ج) نیز خطوط جریان در ناحیه بحرانی که حد فاصل بین ۱۷۷ متر و ۲۰۷ متر از مبدأ مختصات است، بسیار نزدیک به هم بوده که موید افزایش دبی نشت و ایجاد یک محیط بحرانی در آن ناحیه است. نکته قابل توجه در توصیف شکل‌های قبلی این است که تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در راستای عمودی و در دو نقطه ۱۷۷ متری و ۲۰۸۷ متری بررسی شده است. اما شکل (۱۲) توصیف کلی جریان در امتداد محور سد است.



شکل ۱۲. الف) گرادیان هیدرولیکی (ب) فشار هیدرولیکی (ج) توزیع جریان

با توجه به جدول (۶) تغییرات سناریوها برحسب موقعیت مختلف هندسه سد متفاوت است. به طوری که بیشترین میزان کاهندگی گرادیان هیدرولیکی در سناریوی ۱ است. با فاصله گرفتن از مرکز سد، ترتیب اولویت کاهندگی پارامترهای نشت متفاوت می باشد. در بحث گرادیان هیدرولیکی، دو سناریوی ۲ و ۵ در دو ناحیه موقعیت کاهندگی عکس هم را نشان می دهند. همین موضوع در دبی نشت و بار آبی کل هم وجود دارد. با توجه به اینکه طول المان سپری در ترکیب سناریوها ۱۰۰ متر و برای حالت اختصاصی ۳۸۵ متر در نظر گرفته شده است، بنابراین می تواند کاهندگی سناریوی ۵ را بیشتر از سناریوی ۲ در پائین دست سد نمایش دهد. به عبارت دیگر با افزایش طول مسیر جریان، میزان کاهش سرعت زیاد بوده و کاهندگی بیشتری را نشان می دهد. در حالی که برای در مناطق بالاتر و به طرف هسته، با کاهش طول مسیر جریان سناریوی ۲ کاهندگی بیشتری را نشان می دهد.

جدول ۶. توزیع درصد گرادیان هیدرولیکی در دو ناحیه بحرانی

فاصله ۲۰۷ متری از مبدأ مختصات	فاصله ۱۷۷ متری از مبدأ مختصات	شماره	سناریو
۱۳	۲۱	۱	پتوی رسی و زهکش و دیوار سپری
۵۰	۳۲/۲	۲	پتوی رسی و دو دیواره سپری
۷۷/۵	۶۲/۶	۳	فقط پتوی رسی
۸۶	۵۲/۵	۴	پتوی رسی و یک دیواره سپری
۴۸	۳۴/۷	۵	یک دیواره سپری
۱۰۰	۱۰۰	۶	بدون المان آببند

## نتیجه گیری

تحلیل سد خاکی از نوع غیرهمگن برای بررسی روند نشست جریان در تحلیل سه پارامتر گرادیان هیدرولیکی، دبی نشست و بار آبی در بدنه سد خاکی و فونداسیون مورد مطالعه قرار گرفت با توجه به تغییرات در میزان پارامترها در کل هندسه مدل، دو ناحیه بحرانی در فاصله ۱۷۷ و ۲۰۷ متری از مبدأ مختصات برای تحلیل در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل، تنوع در نوع سیستم‌های کاهش نشست جریان در سناریوها می‌تواند تاثیر به‌سزایی در کاهش جریان در داخل بدنه سد و فونداسیون داشته باشد. به طوری که افزایش طول و ابعاد پارامترهای کاهش نشست در مقایسه با استفاده ترکیبی تاثیر چندانی ایجاد نمی‌کند. همچنین در دو ناحیه تحلیلی برای گرادیان هیدرولیکی سناریوی پتوی رسی و زهکش و دیوار سپری با تاثیر ۸۵ درصدی، بالاترین میزان کاهش را به خود اختصاص داده است. تاثیر سناریوی پتوی رسی و دو دیواره سپری در نواحی نزدیک به هسته رسی نمود داشته و ۷۰ درصد کاهش سرعت جریان است. در بحث دبی نشست جریان نیز سناریوی پتوی رسی و زهکش و دیوار سپری با کاهش ۱۸ درصدی کاهش نشست و سناریوی پتوی رسی و دو دیواره سپری با کاهش متوسط ۱۲/۵ درصدی دبی نشست در مرتبه اول و دوم قرار دارند. با نزدیک شدن به ناحیه هسته رسی سد، انواع سناریوها در مقایسه با یکدیگر اختلاف زیادی را نشان می‌دهند. با نزدیک شدن به پاشنه پائین دست سد اختلاف داده‌ها در سناریوها کاهش می‌یابد، با توجه به تحلیل نتایج زیر می‌تواند مورد استنتاج قرار گیرد:

استفاده از یک نوع سیستم آببند در سدهای خاکی هرچند می‌تواند در کاهش جریان نقش داشته باشد، اما به‌طور قطع کاهش اصلی نشست در گرو استفاده ترکیبی از سایر سیستم‌های آببند می‌باشد. وجود زهکش به تنهایی عامل اصلی کاهش نشست جریان است اما جهت کاهش گرادیان هیدرولیکی نیاز است دیواره سپری به همراه پتوی رسی مورد استفاده قرار گیرد.

طول پتوی رسی در استفاده ترکیبی سیستم‌های آببند بسیار کوتاه در نظر گرفته شده است با این حال نتایج نشان می‌دهد موضوع ترکیبی سیستم‌های آببند خارج از بحث اندازه آن‌ها، نقش تعیین‌کننده تری دارد. درحالی که در سناریوی صرف پتوی رسی با طول ۳۸۵ متر پائین‌ترین نوع سیستم در کاهش نشست جریان را به خود اختصاص می‌داد.

با توجه به موضوع سیستم‌های آببند در هر پروژه‌ای نمی‌توان به راحتی موارد فوق را مورد استفاده قرار داد. بایستی مطالعات ژئوتکنیکی، ابعاد دره، مشخصات هندسی سد، ارتفاع مخزن و سایر موارد مورد بررسی قرار گرفته و با لحاظ حداقل هزینه اجرایی نسبت به استفاده بهینه از سیستم آببندی استفاده کرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- کماسی، مهدی؛ و بیرانوند، بهرنگ (۱۳۹۹). بررسی دبی نشست و عملکرد پرده آببند سد خاکی ایوشان با استفاده از تحلیل عددی. فصلنامه علمی مهندسی منابع آب، ۱۳(۴۷)، ۱-۱۴.
- محمدی، مرضیه؛ بارانی، غلامعباس؛ و قادری، کوروش (۱۳۹۴). بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی با استفاده از روش الگوریتم شبیه‌سازی تیرید (Simulated Annealing (SA)). نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر، ۴۷(۱)، ۱۱۹-۱۳۰.
- رحیمی، حسن (۱۳۹۷). سدهای خاکی. چاپ پنجم. تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## REFERENCES

- Aboeela, M. M. (2016). Control of seepage through earth dams based on pervious foundation using toe





- drainage systems. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(12), 1158-1174.
- Belew, A. Z., Belay, S. K., Wosenie, M. D., & Alemie, N. A. (2022). A comparative evaluation of seepage and stability of embankment dams using GeoStudio and Plaxis models: The case of Gomit dam in Amhara region, Ethiopia. *Water Conservation Science and Engineering*, 7(4), 429-441.
- Casagrande, A. (1940). Seepage Through Dams, in" Contribution to soil mechanics 1925-1940. Boston Society of Civil Engineers.
- Chahar, B. R. (2004). Determination of length of a horizontal drain in homogeneous earth dams. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(6), 530-536.
- Chahar, B. R., Graillot, D., & Gaur, S. (2012). Storm-water management through infiltration trenches. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(3), 274-281.
- Choi, B. I., Shin, D. H., Kim, K. Y., & Kang, C. K. (2016). Evaluation of seepage quantity of fill dam using 3D FEM analysis. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(49), 1703-1707.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2022a). Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: an experimental and numerical analysis. *Fluids*, 7(7), 244.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., & Ebadzadeh, P. (2022b). Experimental and numerical study of sluice gate flow pattern with non-suppressed sill and its effect on discharge coefficient in free-flow conditions. *Journal of Hydraulic Structures*, 8(1), 1-20.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., & Abbaszadeh, H. (2023). Effect of geometric shapes of chimney weir on discharge coefficient. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1-12.
- Galindo, R., Sánchez-Martín, J., & Olalla Marañón, C. (2020). Sustainable Construction of Earth Dams: Use of Heterogeneous Material from the Dam Site. *Sustainability*, 12(23), 9940.
- Giglou, A. N., & Zeraatparvar, A. (2012). Seepage estimation through earth dams. *Basic Appl Sci Res*, 2(8), 7861-7865.
- Jiang, Z., & He, J. (2018). Detection model for seepage behavior of earth dams based on data mining. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8191802>
- Kheiri, G., Javdanian, H., & Shams, G. (2020). A numerical modeling study on the seepage under embankment dams. *Model Earth Syst Environ*, 6, 1075-1087.
- Komasi, M., & Beiranvand, B. (2020). Study of Seepage Flow and Cutoff Wall Performance of Eyvashan Earth Dam Using Numerical Analysis. *Water Resources Engineering*, 13(47), 1-14. (In Persian)
- Lee, J. W., Kim, J., & Kang, G. C. (2018). Seepage behavior of earth dams considering rainfall effects. *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- Liu, X., Zhang, X., Kong, L., Wang, G., & Liu, H. (2022). Formation mechanism of collapsing gully in southern China and the relationship with granite residual soil: A geotechnical perspective. *Catena*, 210, 105890.
- Mohammadi, M., Barani, G. A., & Qaderi, K. (2015). Optimization of Clay Core Dimensions in Earth Dams Using Simulated Annealing. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 47(1), 119-130. (In Persian)
- Qiu, J., Zheng, D., & Zhu, K. (2016). Seepage monitoring models study of earth-rock dams influenced by rainstorms. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1656738>
- Rahimi, H. (2018). *Earth Dam*. (5th ed) Tehran, Publication University of Tehran. (In Persian)
- Salem, M. N., Eldeeb, H. M., & Nofal, S. A. (2019). Analysis of seepage through earth dams with internal core. *Int. J. Eng. Res*, 8, 768-77.
- Salmasi, F., & Mansuri, B. (2014). Effect of homogeneous earth dam hydraulic conductivity ratio ( $K_x/K_y$ ) with horizontal drain on seepage. *Indian Geotechnical Journal*, 44, 322-328.
- Salmasi, F., & Nouri, M. (2019). Effect of upstream semi-impervious blanket of embankment dams on seepage. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 25(2), 143-152.
- Salmasi, F., Norouzi, R., Abraham, J., Nourani, B., & Samadi, S. (2020a). Effect of inclined clay core on embankment dam seepage and stability through LEM and FEM. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 6571-6586.
- Salmasi, F., Nouri, M., & Abraham, J. (2020b). Upstream cutoff and downstream filters to control of seepage in dams. *Water Resources Management*, 34, 4271-4288.
- Sazzad, M. M., & Alam, S. (2020). *Numerical investigation of seepage through earth dam by FEM*. In 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE), Bangladesh.
- Tang, L., Wang, H., & Sun, Y. (2022). Study on the change of tensile strength of granite residual soil during dry and wet process. *Rock and Soil Mechanics*, 43(7), 1749-1760.
- Transactions of the American Society of Civil Engineers Archive. (2015) .Vol. 87, No. 1
- Venkatesh, K., & Karumanchi, S. R. (2016). *Distribution of pore water pressure in an earthen dam considering unsaturated-saturated seepage analysis*. In E3S Web of Conferences (Vol. 9, p. 19004). EDP Sciences.

## Numerical investigation of the influence of the combined seepage reduction scenarios on the hydraulic performance of the Alborz dam body

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

The value of hydrostatic pressure from the reservoir to the dam body and foundation leads to a seepage phenomenon, which is one of the significant issues in dam design. By analyzing the seepage of an earthen dam, the values of seepage flow, pore water pressure, and hydraulic gradient are determined at any point of the body and foundation of the dam. Due to the flow created under the effect of hydraulic pressure in the body of earthen dams, the internal flows increase over time and lead to erosion its downstream and ultimately the instability of the dam. Therefore, it is necessary to investigate various factors to reduce these effects. For this purpose, the solutions that can be effective in reducing the scouring phenomenon and flow seepage are the use of supplementary systems such as shear walls, clay blankets, and drainage. In the present research, the most optimal conditions for the combination of sealing elements have been used to reduce seepage.

#### Materials and Methods

SEEP/W model is based on the finite element method, which is prepared for modeling seepage and pore water pressure distribution in porous media such as soil and rock. SEEP/W software can be used for simple and complex seepage problems in saturated and unsaturated environments. In this software, the permeability of materials and the volume of water in the soil is a function of the pressure. In the analysis of models with a free flow surface and output-type boundary conditions, since both the location of the water outlet and the permeability coefficients at different points are unknown, so the program uses both trial and error inside. Thus, it first solves the problem with an assumed boundary condition until the permeability coefficients do not change at different points of the model. In this case, the first trial and error converged, and the program controls the boundary conditions with these assumptions. If the boundary condition is fulfilled at the water outlet from the model, the second trial and error is completed.

#### Results and Discussion

The clay blanket increases the length of the stream lines and as a result, reduces the hydraulic gradient as well as increases the potential drop and decreases the water energy. The length and thickness of the impervious surface depends on the depth of the water behind the dam. The results showed that the diversity in the type of flow seepage reduction systems has a significant effect on reducing the flow inside the dam body and foundation. So, increasing the length and dimensions of the seepage reduction parameters does not have much effect compared to the combined scenarios. Also, in two analytical areas for the hydraulic gradient of the clay blanket and drain and shield wall scenario, it has the highest reduction rate with an effect of 85%.

#### Conclusions

Although the use of one type of sealing system in earthen dams can play a role in reducing the flow, the main reduction of seepage depends on the combined use of other sealing systems. The presence of a drain alone is the main factor in reducing flow seepage, but to reduce the hydraulic gradient, it is necessary to use a shield wall along with a clay blanket. The length of the clay blanket is considered very short in the combined use of sealing systems; however, the results show that the combined issue of sealing systems has a more decisive role outside of the discussion of their size. While in the scenario of only clay blanket with a length of 385 m, it was the lowest type of system in reducing flow seepage.

**Keywords:** Alborz Dam, Sealing Elements, Seepage, SEEP/W.