

Research Paper

Investigating the Effect of Core Geometric Characteristics on Seepage Through Earth Dams

Amir Vakili¹, Roozbeh Aghamajidi², Mohammad Hossein Ahmadi^{1*}

1. Assistant Prof. Department of Civil Engineering, Bey.C, Islamic Azad University, Beyza, Iran.
2. Assistant Prof. Department of Civil Engineering, Sep.C, Islamic Azad University, Sepidan, Iran

Received: 2024/11/09

Revised: 2025/01/09

Accepted: 2025/03/27

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.71632/wej.2025.1189946](https://doi.org/10.71632/wej.2025.1189946)

Keywords:

Earth Dam, Dam Core, Seepage, SEEP2D, SEEP/W, Discharge

Abstract

Introduction: In the design of an earthen dam, it should be prevented the creation of flow paths in the dam and its foundation. Also, the seepage flow should be controlled and limited to prevent its adverse effects such as scouring.

Methodology: In the current research, earthen dams with internal cores were used to simulate leakage. In order to evaluate the performance of models, the samples were examined for no core, vertical core, wedge-shaped core, upstream inclined core and downstream inclined core. Furthermore the phreatic line in the core area was investigated and the effect of the core characteristics on the flow rate and phreatic line levels upstream and downstream of the core was investigated.

Findings: The research results showed that among the four studied samples, the wedge shape was the most effective in reducing the ratio of discharge to permeability and downstream depth to height. For both types of inclined core, the slope $S = 0.5:1$ gives the lowest values of the ratio of discharge to core permeability and downstream depth to height. The flow line level at the downstream surface of the core is also the parameter that was most affected by the core slope, especially for the inclined cores, with a maximum percentage of 30 and 45%.

Conclusion: The results of the research showed that the ratio of the top width of the core is effective for all types of cores except the wedge core. The area of the flow line at the upstream surface of the core increases for all studied core types due to their resistance to flow. It also reduces the height of the wetted part of the downstream surface and thus increases the safety against seepage effects.

Citation: Vakili A, Aghamajidi R, Ahmadi M.H. Investigating the Effect of Core Geometric Characteristics on Seepage Through Earth Dams.. Water Resources Engineering Journal. 2025; 18(65): 48- 63.

***Corresponding author:** Mohammad Hossein Ahmadi

Address: Department of Civil Engineering, Bey.C, Islamic Azad University, Beyza, Iran.

Tell: +989173396962

Email: mohamadh.ahmadi@iau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Seepage through earth dams poses a significant challenge for dam stability and overall water resource management. The geometry and design of the dam core can have a substantial impact on reducing seepage rates. This study aims to explore how different core configurations influence seepage amounts within earth dams. The analysis includes a comparison of performance across various core shapes, using two simulation tools—SEEP2D and SEEP/W—to assess seepage discharge and flow line characteristics within the dam structure.

Methodology and Methods

To evaluate the effects of core geometry on seepage behavior, simulations were conducted using SEEP2D and SEEP/W software. Each model simulates the flow through earth dams with distinct core configurations, including a dam without a core, one with a vertical core, and two variations of inclined cores. The reliability of each software tool was assessed by examining key parameters, such as the seepage discharge ratio ($q/K_{shell}H$) and normalized flow line levels upstream and downstream of the core, denoted as y_1/H and y_2/H , respectively. For the purposes of this study, SEEP/W was selected as the primary simulation tool, due to its consistent accuracy in modeling the flow line shape within the core, particularly under conditions where the permeability ratio (K_{core}/K_{shell}) was set at 0.01.

Findings

The results of the research showed that among the four studied core shapes, the wedge shape was more effective in reducing the ratio of discharge to core permeability and downstream depth to height. For both types of inclined cores, the slope $S = 0.5:1$ gives the lowest values of the ratio of discharge to core permeability and downstream depth to height. The flow line level at the downstream surface of the core is also the parameter that was most affected by the core slope, especially for the inclined

cores, with a maximum percentage of 30 and 45%.

Discussion

The simulations showed that core geometry significantly influences seepage reduction in earth dams. Among the various configurations tested, the wedge-shaped core emerged as the most effective design for minimizing seepage. Its broader width at the dam base enabled it to achieve the lowest seepage discharge ratio ($q/K_{shell}H$) and downstream flow line level (y_2/H) among the core shapes tested. This shape's effectiveness is likely due to its increased cross-sectional area, which provides greater resistance to water flow. For inclined cores, a slope of 0.5:1 yielded the most favorable results, effectively reducing both $q/K_{shell}H$ and y_2/H . The slope and orientation of the core appeared to play a critical role in shaping the flow line and controlling seepage, particularly on the downstream side. The study found that the downstream flow line level (y_2/H) was most affected by changes in core slope, especially for inclined cores. In cases with upstream and downstream inclined cores, this parameter showed a reduction of up to 30% and 45%, respectively. For the wedge-shaped core, the most significant decrease in seepage occurred when the slope was set to 1.5:1, likely due to the larger overall width enhancing its seepage control capacity near the dam base.

Conclusion

This study highlights the effectiveness of different core geometries in reducing seepage through earth dams. The wedge-shaped core design provided the best performance, largely due to its increased width at the dam's base, which effectively controlled the seepage discharge ratio and downstream flow line levels. Inclined cores with a slope of 0.5:1 also showed promising results in minimizing seepage, underscoring the importance of both core shape and slope in optimizing earth dam performance. SEEP/W was determined to be the more reliable tool for modeling flow characteristics in these scenarios, making it an essential tool for engineers and

researchers focused on dam design and stability.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Amir Vakili and Roozbeh Aghamajidi.

Methodology and data analysis: Mohammad Hossein Ahmadi, Amir Vakili, Roozbeh Aghamajidi.

Supervision and final writing: Roozbeh Aghamajidi

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر ویژگی‌های هندسی هسته بر الگوی جریان و میزان تراوش در سدهای خاکی

امیر وکیلی^۱، روزبه آقامجیدی^۲، محمدحسین احمدی^{*}

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سپیدان، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران.

چکیده

مقدمه: در طرح یک سد خاکی می‌بایست حتی‌الامکان مانع از به وجود آمدن مسیرهای جریان در سد و پی آن شده و جریان تراوش به‌گونه‌ای کنترل و محدود شود که از بروز اثرات نامطلوب آن نظیر آبستگي جلوگیری گردد. همچنین مقدار آبی که از طریق تراوش به هدر می‌رود باید به‌اندازه‌ای باشد که نه‌تنها از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر بوده، بلکه خللی در عملکرد پروژه وارد نیاورد.

روش: در تحقیق حاضر جهت شبیه‌سازی نشست، از سدهای خاکی با هسته‌های داخلی استفاده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد دو مدل، نمونه‌ها برای حالت‌های بدون هسته، هسته عمودی، هسته گوه‌ای شکل، هسته شیب‌دار بالادست و هسته شیب‌دار پایین‌دست مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این مطالعه خط فریاتیکی در ناحیه هسته مورد بررسی و تأثیر ویژگی‌های هسته بر میزان دبی و سطوح خط فریاتیکی در بالادست و پایین‌دست هسته در نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج تحقیق نشان داد از میان چهار شکل هسته مورد مطالعه، شکل گوه در کاهش نسبت دبی به نفوذپذیری هسته و عمق پایین دست به ارتفاع مؤثرتر بود. برای هر دو نوع هسته شیب‌دار، شیب $S = 0.5:1$ کمترین مقادیر نسبت دبی به نفوذپذیری هسته و عمق پایین دست به ارتفاع را به دست می‌دهد. سطح خط جریان در سطح پایین‌دست هسته نیز پارامتری است که بیشترین تأثیر را از شیب هسته، به‌ویژه برای هسته‌های شیب‌دار، با حداکثر درصد ۳۰ و ۴۵ درصد داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج تحقیق نشان داد که نسبت عرض بالای هسته برای همه انواع هسته‌ها به جز هسته گوه‌ای مؤثر است که هیچ پاسخی به تغییرات عرض بالایی برای همان ضریب هدایت هیدرولیکی نشان نمی‌دهد. سطح خط جریان در سطح بالادست هسته، برای همه انواع هسته مورد مطالعه به دلیل مقاومت آن‌ها در برابر جریان، افزایش می‌یابد. همچنین ارتفاع قسمت خیس شده سطح پایین‌دست را کاهش می‌دهد و در نتیجه ایمنی در برابر اثرات تراوش را افزایش می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۷

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.71632/wej.2025.1189946](https://doi.org/10.71632/wej.2025.1189946)

واژه‌های کلیدی:

خاکی، هسته رسی، تراوش عبوری، تحلیل عددی، مدل‌سازی SEEP/W

* نویسنده مسئول: محمدحسین احمدی

نشانی: گروه مهندسی عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران.

تلفن: ۰۹۱۷۳۳۹۶۹۶۲

پست الکترونیکی: Mohamadh.ahmadi@iau.ac.ir

مقدمه

در طراحی یک سد خاکی، هدف اصلی این است که تا حد ممکن از شکل‌گیری مسیرهای جریان آب در بدنه سد یا پی آن جلوگیری شود و تراوش به شکلی مهار گردد که اثرات ناخوشایند آن، مثل آبشستگی یا فرسایش، به حداقل برسد. به عنوان یک پژوهشگر، وقتی به این موضوع نگاه می‌کنم، می‌بینم که این فقط یک مسئله فنی نیست بلکه یک چالش حیاتی برای حفظ جان و مال مردم است. مقدار آبی که از طریق تراوش هدر می‌رود باید آن قدر محدود باشد که هم از نظر اقتصادی قابل قبول بماند و هم عملکرد اصلی سد چه ذخیره آب برای کشاورزی باشد، چه تولید برق یا مهار سیل را به خطر نیندازد. بدین منظور، مهندسان از روش‌های گوناگونی مثل هسته رسی غیر قابل نفوذ، لایه‌های فیلتر یا سیستم‌های زهکشی استفاده می‌کنند تا سد را در برابر خطرات تراوش از بدنه، پی یا حتی دیواره‌های کناری محافظت کنند (۱).

آب زیرزمینی و مدیریت نشت آن، یکی از پیچیده‌ترین مسائل در پایداری سدهای خاکی، دامنه‌های طبیعی و خاکریزهایی است که روی شیب‌ها بنا می‌شوند. به ندرت پیش می‌آید که سدی روی زمینی کاملاً نفوذناپذیر ساخته شود؛ پس، در بیشتر موارد، جریان آب زیرزمینی مثل یک مهمان ناخوانده حضور دارد و روی کارایی سد اثر می‌گذارد. اگر این جریان به خوبی کنترل نشود مثلاً وقتی آب ذخیره شده از زیر پی فرار می‌کند می‌تواند سد را از پا دریاورد. مطالعات نشان می‌دهد که ۸۰ درصد خرابی‌های سد به نشت آب از بدنه یا پی برمی‌گردد، که ریشه‌اش در اختلاف فشار هیدرولیکی بین بالادست و پایین‌دست است (۲، ۳). این عدد فقط یک آمار نیست یادآوری تلخی است از اینکه طبیعت چقدر می‌تواند بی‌رحم باشد اگر ما غفلت کنیم.

در تحقیقی دیگر پژوهشگران به سراغ تأثیر پی‌های آبرفتی روی نشست سدهای خاکی رفتند موضوعی که کمتر به آن پرداخته شده بود. نتایجشان مثل پیدا کردن یک کلید گمشده بود: با معیارهای جدید، می‌شود میزان نشست و تغییر شکل سدهایی با پی آبرفتی را دقیق‌تر اندازه‌گیری کرد و خطای ابزارهای اندازه‌گیری را کم کرد (۵). اما این فقط یک تکه از پازل است؛ پی آبرفتی مثل یک زمین لغزنده است نرم، ناپایدار، و پر از آب که اگر درست مدیریت نشود، می‌تواند کل سد را به لرزه دریاورد. این مطالعه به ما یادآوری می‌کند که هر سد، با شرایط خاص خودش، نیاز به نگاهی ویژه دارد یک راه‌حل برای همه جواب نمی‌دهد.

حالا بیا ببینیم کمی عمیق‌تر برویم چرا این همه روی تراوش حساسیم؟ چون سد خاکی مثل یک موجود زنده است که نفس می‌کشد و با محیطش جفت و جور می‌شود. وقتی آب از پی یا بدنه نشت می‌کند، فقط ذخیره را خالی نمی‌کند بلکه خاک را می‌شوید، پایه را سست می‌کند و فشارهای داخلی را به هم می‌ریزد. فکر کنید به یک خانه که زیرش آب راه افتاده دیوارها ترک می‌خورند، سقف می‌ریزد. برای همین، زهکشی و فیلترها مثل رگ‌های خونی سد عمل می‌کنند آب اضافی را بیرون می‌کشند تا قلبش، یعنی هسته رسی، سالم بماند. اما اینجا یک سؤال پیش می‌آید: آیا روش‌های فعلی ما برای سدهای بزرگ‌تر و

پیچیده‌تر کافی‌اند؟ وقتی ارتفاع سد یا حجم مخزن بیشتر می‌شود، فشارها هم چند برابر می‌شوند آیا زهکش‌هایمان هنوز جواب می‌دهند؟ تاریخچه سدها هم پر از درس است از سدهای باستانی مثل الکفره در مصر که ۴۸۰۰ سال پیش با ۱۲ متر ارتفاع آب را نگه می‌داشت، تا سدهای امروزی که به ۱۰۰ متر هم می‌رسند. این تکامل نشان می‌دهد ما چقدر راه آمده‌ایم از تکیه بر تجربه و شانس به علم دقیق خاک و هیدرولیک. اما همین تاریخ به ما هشدار می‌دهد: بیشتر خرابی‌ها ریشه در نشت دارند که دیده نشده یا دست کم گرفته شده است. مثلاً سدهایی که روی پی آبرفتی ساخته شدند، اگر درست خوانده نشوند، مثل بمب ساعتی‌اند. سد خاکی فقط یک تپه خاک نیست یک سیستم پویاست که با آب، خاک و انسان گره خورده است. نشت، مثل یک زنگ خطر است که به ما می‌گوید باید همیشه هوشیار بود. ۸۰ درصد خرابی‌ها (۳) و (۴) یعنی ما هنوز همه جواب‌ها را نداریم شاید نیاز داریم به فناوری‌های جدیدتر، مثل حسگرهای هوشمند، یا مدل‌های دقیق‌تر برای پیش‌بینی رفتار پی متوسل شویم. در تحقیق دیگری پژوهشگران به بررسی مدل‌سازی معکوس نشت از سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد بافت، ایران) پرداختند. در این مقاله یک روش ترکیبی جدید برای مدل‌سازی معکوس نشت از بدنه و پی سدهای خاکی با در نظر گرفتن مدل جریان گذرا معرفی شده است. آنها یک روش پیشنهادی برای مدل‌سازی معکوس نشت در سد بافت کرمان استفاده کردند. نتایج برازش، کاربرد روش پیشنهادی را در مدل‌سازی معکوس مسائل واقعی در مقیاس بزرگ نشان می‌دهد که نه تنها هزینه محاسبات را کاهش می‌دهد، بلکه قابلیت اطمینان و کارایی را در چنین مسائلی افزایش می‌دهد (۶). در پژوهش دیگری محققان به مقایسه عملکرد هسته قائم و هسته مایل با استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی تراوش و گرا دیان هیدرولیکی پرداختند. همچنین نسبت نفوذپذیری پوسته به هسته نیز به عنوان یک متغیر مهم تأثیرگذار بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان تراوش عبوری در هسته قائم کمتر از هسته مایل بود، اما ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست در سد با هسته مایل حدود ۵۵ درصد بیشتر از سد هسته قائم بود (۷). در تحقیق دیگری محققان به بررسی مدل‌سازی عددی برای تزریق خاکی سد و طراحی دیوار آب‌بند توسط نرم‌افزار Plaxis پرداختند. در این راستا از نرم‌افزار plaxis برای تخمین تغییرات و ارائه شبیه‌سازی استفاده شد که در مدل‌سازی هندسی، شرایط مرزی، تخصیص خواص مواد، مدل رفتاری، مدل‌سازی مکانیکی و تحلیل تراوش اجرا می‌شود. مدل‌سازی برای دو گروه مورد مربوط به قبل و بعد از طراحی دیوار پرده انجام شد. با توجه به نتایج نشت، مشخص شد که در صورت عدم اعمال پرده آب‌بند، تغییر شکل‌های ناشی از تنش، کرنش و فشار آب سوراخ شده باعث ایجاد تغییراتی در محدوده سد و گسترش آن در رسوبات می‌شود. از طرفی گسترش کرنش در محدوده هسته نشان‌دهنده رفتار پلاستیک هسته و پایین‌دست است که در نتیجه تنش درجا و فشار منفذ آب در آن است (۸). مطالعه (۹) به بررسی کاربرد دیوار آب‌بند بتن پلاستیکی در مقاوم‌سازی مخزن پرداختند. در این مقاله، نسبت اختلاط بتن پلاستیکی با محتوای بتونیت ۵۰ درصد، نسبت آب چسب ۱۰۰ و نسبت ماسه به سنگدانه ۵۵ درصد پیشنهاد شده است و دیوار برش بتن پلاستیکی با

که عمق بیشتر هسته، تراوش را کاهش می‌دهد، اما از طرفی می‌تواند به هزینه‌های ساخت و زمان اجرا بیافزاید. (طیف متنوع مسائل لازم در طراحی مناسب یک سد خاکی مانند برآورد تراوش در بدنه و پی، سد فشار آب منفذی، تنش‌ها تغییر شکل‌ها قوس زدگی، پایداری دامنه‌ها و دیگر مسائلی که ممکن است سبب ایجاد خسارت، خرابی و یا انهدام سد شود و راه‌های طراحی بهتر، ایمن‌تر و یا اقتصادی‌تر سد سبب شده است که پژوهش‌های گسترده و گوناگونی در این زمینه تاکنون انجام شود. در بسیاری از این پژوهش‌ها سعی شده است که جهت رسیدن به نتیجه بهتر از روش‌های عددی و نرم‌افزارهای مربوط استفاده شود. در تحقیق حاضر از نرم‌افزارهای SEEP2D و SEEP/W برای شبیه‌سازی نشست از سدهای خاکی با هسته‌های داخلی استفاده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد دو مدل، نمونه‌ها برای حالت‌های بدون هسته، هسته عمودی، هسته گوه‌ای شکل و هسته شیب‌دار بالادست و هسته شیب‌دار پایین‌دست مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W خط فریاتیکی در ناحیه هسته مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین تأثیر ویژگی‌های هسته بر میزان دبی و سطوح خط فریاتیکی در بالادست و پایین‌دست هسته در نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی عملکرد دو مدل، نمونه‌ها برای حالت‌های بدون هسته، هسته عمودی، هسته گوه‌ای شکل و هسته شیب‌دار بالادست و هسته شیب‌دار پایین‌دست مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که عملکرد این دو نرم‌افزار در مطالعات قبلی مقایسه نشده است و همچنین هسته‌های شیب‌دار پایین‌دست نیز در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است.

روش پژوهش

در این مطالعه از نرم‌افزارهای عددی SEEP 2D و SEEP/W برای شبیه‌سازی تراوش از سدهای خاکی با هسته‌های داخلی با آرایش‌های مختلف استفاده شد. به همین منظور حالت‌های مختلف هسته مورد بررسی قرار گرفت و نتایج برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها مقایسه شد. سپس از SEEP/W برای تکمیل مطالعه به دلیل دقت مشاهده شده در مکان‌یابی خط فریاتیکی در هسته استفاده شد. در ادامه تأثیر ویژگی‌های هسته بر میزان دبی تراوش و سطوح خط فریاتیکی در جبهه‌های بالادست و پایین‌دست هسته با استفاده از اشکال مختلف هسته و سناریوهای مشخصه هندسی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه چهار هندسه هسته عمودی، گوه‌ای (هسته عمودی با اضلاع شیب‌دار و عرض بالایی باریک‌تر که به تدریج به سمت پایه سد افزایش می‌یابد)، شیب بالادست (واقع در سمت بالادست و در نتیجه مایل به پایین‌دست) و شیب پایین‌دست (روی سمت پایین‌دست و مایل به بالادست) مورد مطالعه قرار گرفته است.

با فرض اینکه شتاب گرانشی ($g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$) و چگالی آب ($\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$) ثابت باقی بمانند که به عنوان پایه‌های استوار معادلات عمل می‌کنند پژوهشگران می‌توانند متغیرهای مورد مطالعه در طول عمر سد خاکی را به صورت عملکردی تحلیل کنند؛ این متغیرها، شامل فشار هیدرواستاتیکی، نرخ تراوش (Q)، نشست پی و

موفقیت اعمال شده است. تراوش سد اصلی ۶۷ درصد کاهش یافت و سطح پیژومتریک پشت دیوار ۶-۹ متر کاهش یافت. (۱۰) به ارزیابی عمق بهینه دیوارهای آب‌بندی در هسته رسی سد پیغم جای پرداختند. نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که به دلیل نفوذپذیری کم در ۲۶۰ متر اولیه در تکیه‌گاه سمت چپ سد، به جزء آب‌بندی نیازی نیست. همچنین عمق بهینه دیواره برش در بقیه محور سد ۱۵ متر ارزیابی شده است. در تحقیق دیگری (۱۱) به بررسی عملکرد دیوار آب‌بند و تحلیل عددی تراوش و فشار آب منفذی سد خاکی ایوشان پرداخته شد. بر اساس نتایج تحلیل عددی و ابزاری، حداکثر میزان نشست در شرایط مخزن کامل برابر با ۸۳۱۶۰۴ مترمکعب در سال است. برای برازش داده‌های ابزار دقیق و آنالیز عددی از رگرسیون چند متغیره استفاده شد. تطابق بسیار خوب بین نتایج داده‌های مشاهده شده و داده‌های پیش‌بینی شده نشان‌دهنده رفتار مناسب سد از نظر فشار آب منفذی است. (۱۲) به بررسی تأثیر تغییرات دیوار آب‌بند و زهکشی افقی سد گلفرج بر مقادیر پارامترهای فشار و حداکثر شیب خروجی پرداختند. هدف از پژوهش حاضر بررسی موقعیت‌های مختلف دیوار آب‌بند و انتخاب بهترین زاویه، طول، تعداد و فاصله و همچنین انتخاب طول مناسب برای زهکشی افقی بود. نتایج نشان داد که برای دیوار آب‌بند واقع در بالای هسته، زاویه ۲۰ درجه و برای دیوار آب‌بندی واقع در پایین‌دست هسته، زاویه ۱۰۰ درجه مناسب است. همچنین طول بهینه دیوار آب‌بندی ۲۴ متر و عدد بهینه آن ۲ می‌باشد. (۱۳) به مدل‌سازی عددی عملکرد طراحی پرده آب‌بند در سدهای خاکی اجرا شده بر روی خاک‌های لایه‌ای سد عباس‌آباد پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در زمانی که پرده آب‌بند اجرا نمی‌شد، این عناصر تغییرات محدودی در محدوده هسته سد داشتند که با اجرای پرده آب‌بندی گسترش بیشتری یافته است. این موضوع بیانگر حرکت و تأثیر جریان حاصل از اجرای پرده آب‌بندی در ناحیه هسته سد است. با این حال، افت تنش در ناحیه سد نشان‌دهنده فعالیت زهکش‌ها به‌منظور کاهش فشار آب منفذی است. از سوی دیگر، گسترش کرنش در محدوده هسته منعکس‌کننده پدیده رفتار پلاستیک ریزدانه ناشی از تنش درجا و فشار آب منفذی است. (۱۴) نشان دادند که تغییرات در مواد و روش‌های ساختاری سدها می‌تواند به شکل قابل توجهی بر میزان تراوش تأثیر بگذارد و مصالح مورد استفاده در هسته باید از نظر تراوش بهینه شوند تا تراوش به حداقل برسد. در یک مطالعه مشابه، محققان نقش تراکم و همگنی هسته سد را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که افزایش تراکم و کاهش تراوش می‌تواند به‌طور مستقیم باهم در ارتباط باشد. این نتایج با یافته‌های کلارک همسو بود که نشان داد تراوش از هسته سد می‌تواند با بهبود روش‌های تراکم و کنترل کیفیت کاهش یابد (۱۵). نتایج این مطالعه نشان داد که زاویه شیب هسته می‌تواند به شدت بر سرعت و حجم تراوش عبوری تأثیرگذار باشد و بهینه‌سازی این پارامتر می‌تواند عملکرد سد را بهبود بخشد (۱۶). (۱۷) در مطالعه‌ای جامع بر روی سدهای خاکی در منطقه خشک، به بررسی تأثیر تغییرات هندسی هسته پرداخت و نشان داد که تغییرات در ارتفاع و ضخامت هسته می‌تواند تراوش را تحت تأثیر قرار دهد. (۱۸) نیز به بررسی تأثیرات عمق و ضخامت هسته بر روی میزان تراوش پرداخته و نتیجه گرفت

مدل‌سازی دقیق شرایط مرزی پیچیده، شبیه‌سازی جریان در محیط‌های ناهمگن و ناهمسان (مثلاً خاک‌های لایه‌ای)، و ارائه نتایجی مانند خطوط جریان، خطوط تراز هیدرولیکی و مقدار نشت آب است. این نرم‌افزار به دلیل سادگی نسبی و کارایی بالا، در طراحی و ارزیابی پروژه‌های مهندسی عمران و منابع آب بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین، توانایی آن در تحلیل حالت‌های پایدار و گذرا، آن را به ابزاری ضروری برای مهندسان تبدیل کرده است.

SEEP2D برای تحلیل دقیق نشت آب در سازه‌های هیدرولیکی و خاک‌ها استفاده می‌شود و با مزایایی مانند مدل‌سازی شرایط پیچیده، شبیه‌سازی جریان در محیط‌های ناهمگن و ارائه نتایج دقیق، یکی از ابزارهای کلیدی در مهندسی عمران و منابع آب است.

SEEP2D یک مدل عددی دوبعدی، المان محدود است که برای مدل‌سازی تراوش در مدل‌های پروفیل، مانند سدهای خاکی و مقاطع آبریز، برای شرایط جریان پایدار استفاده می‌شود. هر دو شرایط جریان اشباع و غیراشباع را می‌توان شبیه‌سازی کرد. جریان اشباع بر اساس معادله لاپلاس (GMS 2008) شبیه‌سازی شده است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

از طرفی، SEEP2D می‌تواند جریان را در ناحیه غیراشباع شبیه‌سازی کند، اما هدایت هیدرولیکی منطقه باید کاهش یابد. حل معادله (۴) کل هد (h) را به‌عنوان تابعی از x و y توصیف می‌کند. معادله (۵) شکل کلی برای محاسبه هد کل است:

$$h = h_p + h_{el} - h_d \quad (5)$$

هدایت هیدرولیکی (k) در رابطه (۴) هدایت هیدرولیکی اشباع شده است. به منظور مدل‌سازی جریان در ناحیه غیراشباع، هدایت هیدرولیکی را می‌توان به صورت حاصل ضرب رسانایی هیدرولیکی اشباع شده k_s و هدایت هیدرولیکی نسبی k_r بیان کرد.

$$k = k_r k_s \quad (6)$$

در این تحقیق، شرایط مرزی کل هد در سطح بالادست سد با مقدار ۳۷ متر و جبهه پایین‌دست به عنوان خروجی با هد صفر در نظر گرفته شد. اندازه مش در محدوده ۲ تا ۱ متر استفاده شد و خاک پوسته و هسته سد به‌صورت همسانگرد، $k_x = k_y$ در نظر گرفته شده و از روش تابع خطی پیش‌رونده برای مدل‌سازی جریان اشباع/غیراشباع استفاده شده است.

۲. نرم‌افزار SEEP/W

SEEP/W یک مدل المان محدود که جریان آب را از طریق محیط متخلخل شبیه‌سازی می‌کند، می‌تواند برای تحلیل حرکت آب‌های زیرزمینی در هر دو حالت پایدار و گذرا استفاده شود. این مسئله بر اساس جریان آب از طریق خاک‌های اشباع و غیراشباع و قانون دارسی بررسی می‌شود.

$$V = ki \quad (7)$$

تنش‌های داخلی، در گذر زمان و تحت تأثیر عواملی نظیر بارندگی، رسوب‌گذاری، فرسایش، یا زلزله تغییر می‌یابند و نمایانگر وضعیت پویای سد از زمان ساخت تا دهه‌های بعد هستند؛ برای نمونه، نرخ تراوش به‌صورت تابعی مانند $Q = f(h, k, t)$ تعریف می‌شود که در آن h (ارتفاع آب)، k (نفوذپذیری خاک) و t (زمان) نقش دارند و با ثابت بودن ρg ، نشان می‌دهند که اگر خاک پی سست شود یا رسوب مخزن را پر کند، نشت افزایش می‌یابد یا نشست تسریع می‌شود و خطر آبشستگی یا فروپاشی را تشدید می‌کند مانند شاخصی که وضعیت سد را بازتاب می‌دهد؛ این تحلیل عملکردی، از طریق مدل‌سازی‌هایی مانند معادلات دیفرانسیل، به مهندسان امکان می‌دهد پیش‌بینی کنند که سد در ۲۰ یا ۵۰ سال آینده چه شرایطی خواهد داشت و با طراحی‌های بهبود یافته مانند زهکش‌های مؤثرتر یا هسته رسی مقاوم‌تر از هدر رفت آب و خرابی جلوگیری کنند، زیرا سد صرفاً سازه‌ای نیست، بلکه سپری برای حفاظت از زندگی کشاورزان، شهرها و نسل‌های آینده محسوب می‌شود که در صورت عدم کنترل دقیق نشت یا نشست، نه تنها پروژه، بلکه آینده‌ای را به مخاطره می‌اندازد.

با در نظر گرفتن شتاب گرانشی و چگالی آب به‌عنوان ثابت، در طول عمر سد، متغیرهای مورد بررسی در مطالعه می‌توانند به‌صورت عملکردی ارائه شوند:

$$\Phi(H, B, b, q, K_{shell}, K_{core}, y_1, y_2, S) = 0 \quad (1)$$

در این مطالعه، قضیه π باکینگهام برای تجزیه و تحلیل ابعادی اعمال می‌شود و تعداد پارامترهای غیر ابعادی را به‌صورت زیر نشان می‌دهد:

$$\Phi\left(\frac{b}{H}, \frac{B}{H}, \frac{q}{K_{shell}H}, \frac{K_{core}}{K_{shell}}, \frac{y_1}{H}, \frac{y_2}{H}, S\right) = 0 \quad (2)$$

همچنین هد آب بالادست که سد خاکی (H)، عرض تاج (B) و هدایت هیدرولیکی پوسته سد (K_{shell}) ثابت در نظر گرفته شده است. در طول مطالعه، رابطه عملکردی نهایی به موارد زیر کاهش می‌یابد:

$$\Phi\left(\frac{b}{B}, \frac{q}{K_{shell}H}, \frac{K_{core}}{K_{shell}}, \frac{y_1}{H}, \frac{y_2}{H}, S\right) = 0 \quad (3)$$

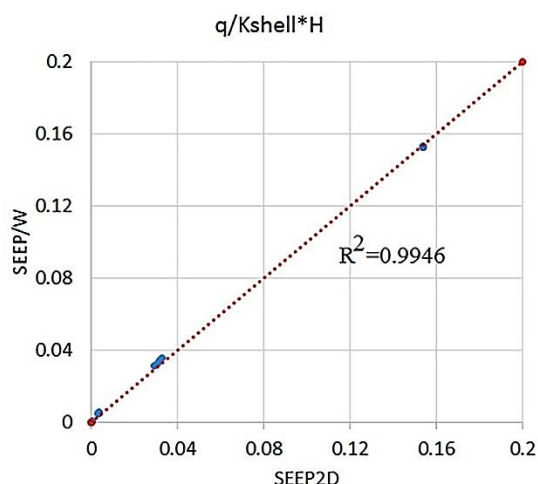
ابعاد سد

طرح سد مورد مطالعه بر روی یک‌پایه غیرقابل نفوذ شکل گرفته است تا تراوش در زیر آن به حداقل برسد. ارتفاع کل سد ۴۰ متر و عرض تاج آن ۸ (B) متر است. هد بالادست (H) ۳۷ متر است، با سطح آزاد ۳ متر و سمت پایین‌دست خشک است. شیب سمت بالادست ۱:۳ و شیب پایین‌دست ۱:۲.۵ است.

روش‌های مدل‌سازی عددی

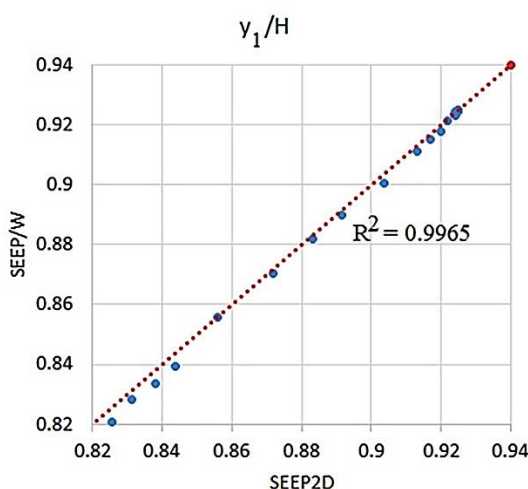
۱. نرم‌افزار SEEP2D

نرم‌افزار SEEP2D یک ابزار قدرتمند برای تحلیل و مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در محیط‌های اشباع و نیمه‌اشباع است که به روش اجزای محدود (Finite Element Method) کار می‌کند. از این نرم‌افزار عمدتاً برای بررسی نشت آب از سدها، دیواره‌های آب‌بند و سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. مزایای اصلی SEEP2D شامل توانایی



شکل ۲- مدل برازش مقدار $q/K_{shell}H$ به دست آمده برای سد خاکی با هسته عمودی به ازای مدل سازی با نرم افزارهای SEEP W و SEEP 2D

نمودار ارائه شده مشابه نمودار قبلی است و رابطه بین مقادیر نشت محاسبه شده توسط نرم افزار SEEP/W و مدل SEEP2D را نشان می دهد. محور عمودی نسبت نشت به ضریب نفوذپذیری پوسته (K_{shell}) و ارتفاع (H) را نمایش می دهد، درحالی که محور افقی مقدار نشت محاسبه شده توسط مدل SEEP2D را نشان می دهد. با وجود اینکه مقدار R^2 در اینجا کمی کمتر از نمودار قبلی (۰/۹۹۹۷) است، اما همچنان به وضوح نشان دهنده تطابق بسیار قوی بین نتایج دو مدل است. این اختلاف جزئی ممکن است ناشی از تفاوت های کوچک در داده ها یا روش های تحلیل باشد که در عمل تأثیر معناداری بر روی نتایج نهایی ندارد. همچنان مدل SEEP2D می تواند به عنوان یک ابزار محاسباتی قابل اعتماد در تحلیل های نشت در سدهای خاکی یا سازه های مشابه استفاده شود.



شکل ۳- مدل برازش مقدار y_1/H به دست آمده برای سد خاکی با هسته عمودی به ازای مدل سازی با نرم افزارهای SEEP W و SEEP 2D

هدایت هیدرولیکی در معادله (۷) برای هر منطقه خاک اشباع ثابت نگه داشته می شود، اما زمانی که خاک غیر اشباع مدل می شود، k مقادیر متفاوتی را می گیرد که به محتوای آب خاک بستگی دارد.

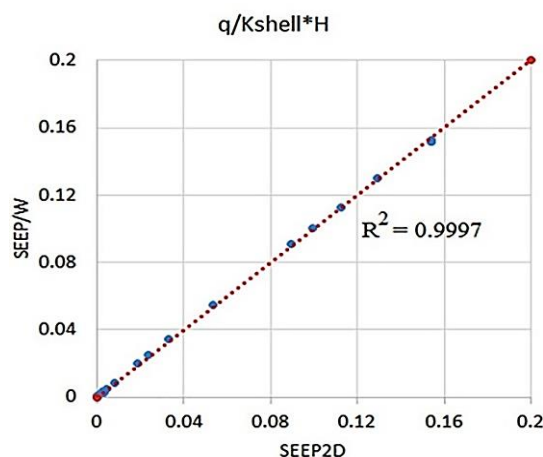
سناریوهای مدل سازی عددی

در ابتدا، یک سد بدون هسته مورد مطالعه قرار گرفت و سپس چهار سناریوی شکل و موقعیت هسته مختلف بررسی شد. برای هر سناریو، چهار عرض فوقانی هسته مختلف ($b/B = 0.25, 0.5, 0.75, 1$) با پنج نسبت هدایت هیدرولیکی هسته بررسی شد. در ادامه (K_{core}/K_{shell}) برای هسته های گوه ای شکل و شیب دار، ارزیابی و برای سه شیب ($S(H:V) = 0.5:1, 1:1, 1.5:1$)، برای هر دو مدل SEEP/W و SEEP2D مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آن ها برای ارزیابی عملکرد در مورد سناریوهای بدون هسته، هسته عمودی و هسته گوه شکل ($S = 1:1$) مقایسه شد. در کل ۴۱ اجرا با هر مدل برای مقایسه انجام شد و سپس از SEEP/W برای تکمیل کار مطالعه استفاده شد. (۱۶۰ اجرا).

یافته ها

مقایسه SEEP2D و SEEP/W

نتایج مدل سازی برای سه حالت بدون هسته، هسته عمودی و هسته گوه شکل ($S = 1:1$) در دو نرم افزار مقایسه شد تا بررسی شود که کدام یک در مطالعه با استفاده از R^2 استفاده شود. در شکل (۱) مدل برازش مقدار $q/K_{shell}H$ به دست آمده برای سد خاکی با هسته عمودی به ازای مدل سازی نشان داده شده است.



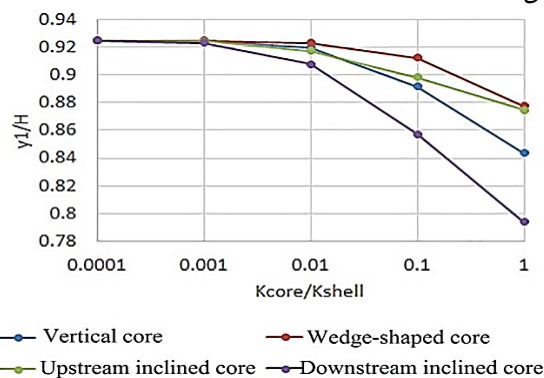
شکل ۱- مدل برازش مقدار $q/K_{shell}H$ به دست آمده برای سد خاکی با هسته عمودی به ازای مدل سازی با نرم افزارهای SEEP W و SEEP 2D

این نمودار نشان دهنده همبستگی بسیار بالای بین نتایج حاصل از نرم افزار SEEP/W و مدل محاسباتی SEEP2D در تحلیل نشت از یک سیستم هیدرولیکی، مانند سد خاکی، است.

مقایسه نتایج حاصل از دو نرم‌افزار SEEP2D و SEEP/W نشان می‌دهد که مقادیر نسبت دبی تراوش (q/KshellH) در SEEP/W کمی بیشتر از SEEP2D است، اما هر دو نرم‌افزار از تطابق خوبی برخوردارند. دقت بالاتر SEEP/W در محاسبه دبی به دلیل ورودی‌های جزئی‌تر و شامل ویژگی‌های دقیق‌تر خاک است. ضریب تعیین (R^2) بین ۰.۹۹۳۷ تا ۰.۹۹۹۷ به‌دست آمده است که نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین دو نرم‌افزار در محاسبه پارامترهای (q/KshellH)، (y_1/H) و (y_2/H) است. خط فریاتیکی محاسبه‌شده توسط هر دو مدل برای نسبت $K_{core}/K_{shell} > 0.01$ تقریباً یکسان است؛ اما برای مقادیر کوچک‌تر از این نسبت، خط جریان در SEEP2D در ناحیه هسته با دقت کمتری محاسبه می‌شود، زیرا محدوده عملکرد این نرم‌افزار به $K_{core}/K_{shell} = 0.01$ محدود می‌شود. در مقابل، SEEP/W نتایج دقیق‌تری برای مقادیر $K_{core}/K_{shell} \leq 0.01$ ارائه می‌دهد، زیرا انحراف خط جریان در سطح مشترک خاک با واقعیت تطابق بهتری دارد. با توجه به این بررسی‌ها، SEEP/W به‌عنوان ابزار مناسب‌تر برای ادامه مطالعات و ارزیابی ویژگی‌ها و اشکال مختلف انتخاب شد.

تأثیر شکل هسته بر سطح خط جریان و دبی تراوش

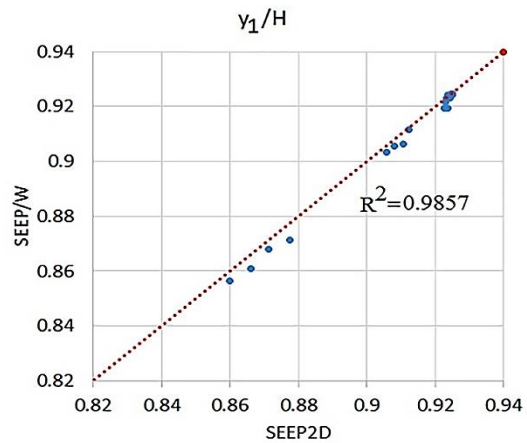
برای ارزیابی اثر شکل هسته بر سطح خط جریان و دبی تراوش، چهار هندسه هسته مختلف با ضریب هدایت هیدرولیکی مختلف برای هسته مورد مطالعه قرار گرفت. نسبت پهنای هسته بالایی به عرض هسته (b/B) و شیب هسته (S)، ثابت نگه‌داشته شد ($S=1:1$ و $b/B=1$) به‌طوری‌که فقط شکل هسته بر نتایج تأثیر می‌گذارد. در شکل (۷) اثر شکل هسته بر روی سطح خط فریاتیکی در وجهه بالادست هسته (y_1/H) برای نسبت‌های مختلف K_{core}/K_{shell} و $b/B=1$ و $S=1:1$ نشان داده شده است.



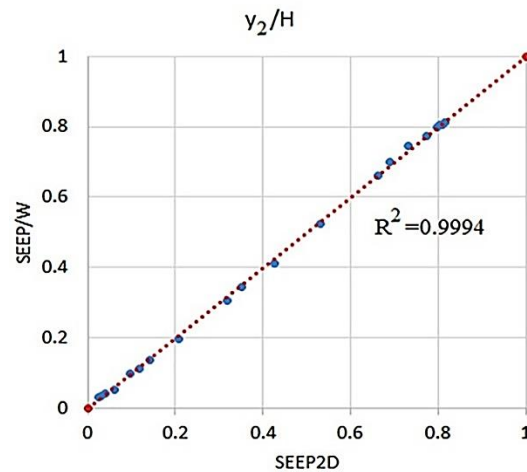
شکل ۷- اثر شکل هسته بر روی سطح خط فریاتیکی در وجهه بالادست هسته (y_1/H) برای نسبت‌های مختلف

$$K_{core}/K_{shell} \text{ و } b/B=1 \text{ و } S=1:1$$

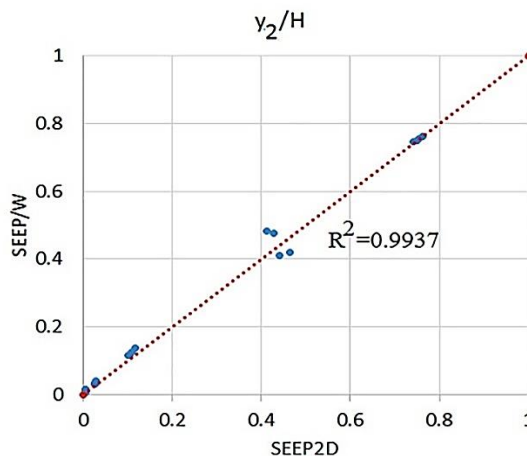
در شکل (۸) اثر شکل هسته بر روی سطح خط فریاتیکی در وجهه پایین‌دست هسته (y_2/H) برای نسبت‌های مختلف K_{core}/K_{shell} و $b/B=1$ و $S=1:1$ نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل برازش مقدار y_1/H به‌دست‌آمده برای سد خاکی با هسته عمودی به ازای مدل‌سازی با نرم‌افزارهای Seep 2D و SEEP W



شکل ۵- مدل برازش مقدار y_2/H به‌دست‌آمده برای سد خاکی با هسته عمودی به ازای مدل‌سازی با نرم‌افزارهای Seep 2D و SEEP W



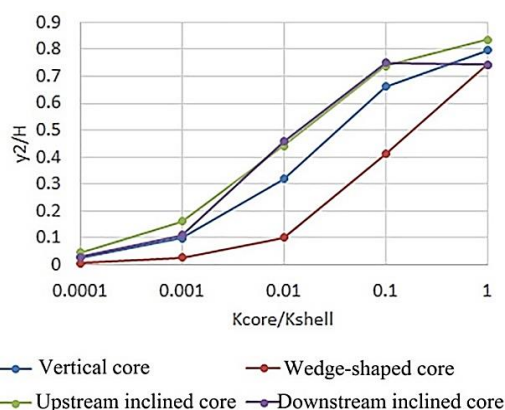
شکل ۶- مدل برازش مقدار y_2/H به‌دست‌آمده برای سد خاکی با هسته عمودی به ازای مدل‌سازی با نرم‌افزارهای Seep 2D و SEEP W

شکل ۹- اثر شکل هسته بر دبی تراوش $q/K_{shell}H$ برای نسبت‌های مختلف K_{core}/K_{shell} و $b/B = 1$ و $S = 1:1$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای K_{core}/K_{shell} از ۱ تا ۰/۰۰۱، هسته شیب‌دار پایین‌دست، پایین‌ترین سطح خط جریان را در سطح بالادست هسته می‌دهد. این مسئله ممکن است به دلیل مسیر طولانی‌تر آب برای رسیدن به سطح بالادست هسته باشد. مسیر طولانی‌تر باعث از دست دادن هد بیشتر قبل از رسیدن آب به هسته و در نتیجه مقدار کمتری برای y_1/H می‌شود. هسته گوه‌ای شکل پایین‌ترین سطح خط جریان را در سطح پایین‌دست هسته، y_2/H و کمترین نسبت دبی تراوش ($q/K_{shell}H$) ارائه می‌دهد. این مسئله را می‌توان به عرض بیشتر هسته نسبت به سایر موارد مورد مطالعه نسبت داد که منجر به مقاومت جریان بیشتر و افت هد می‌شود.

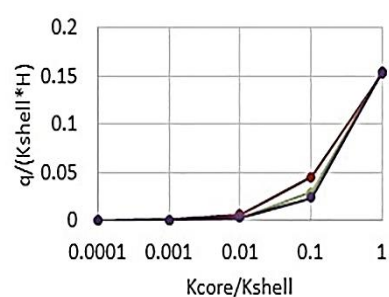
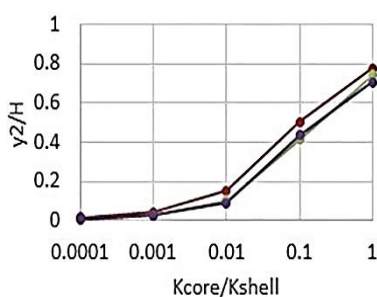
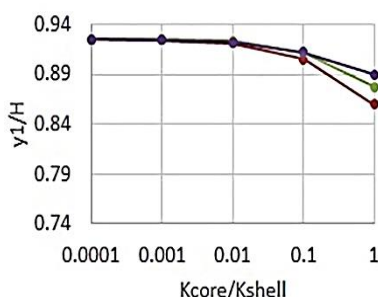
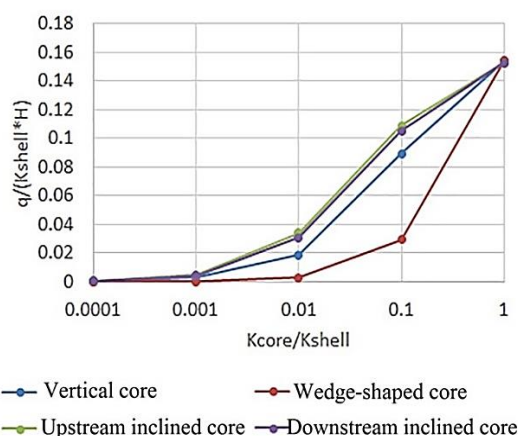
تأثیر شیب هسته بر سطح جریان و دبی تراوش

در این بخش به بررسی تأثیر شیب هسته بر سطح جریان و دبی تراوش پرداخته شده است. به همین منظور به ازای شیب‌های مختلف هسته سد ($S=0.5:1, S=1:1, S=1.5:1$)، تأثیر شیب هسته بر خط جریان و دبی تراوش به ازای شکل‌های مختلف هسته مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۱۰) تأثیر شیب هسته بر خط جریان و دبی تراوش به ازای هسته گوه‌ای شکل و $b/B=1$ نشان داده شده است. در شکل (۱۱) تأثیر شیب هسته بر خط جریان و دبی تراوش به ازای هسته شیب‌دار در بالادست و $b/B=1$ نشان داده شده است. در شکل (۱۲) تأثیر شیب هسته بر خط جریان و دبی تراوش به ازای هسته شیب‌دار در پایین‌دست و $b/B=1$ نشان داده شده است.



شکل ۸- اثر شکل هسته بر روی سطح خط فریاتیک در وجهه پایین‌دست هسته (y_2/H) برای نسبت‌های مختلف K_{core}/K_{shell} و $b/B = 1$ و $S = 1:1$

در شکل (۹) اثر شکل هسته بر دبی تراوش $q/K_{shell}H$ برای نسبت‌های مختلف K_{core}/K_{shell} و $b/B=1$ و $S=1:1$ نشان داده شده است.

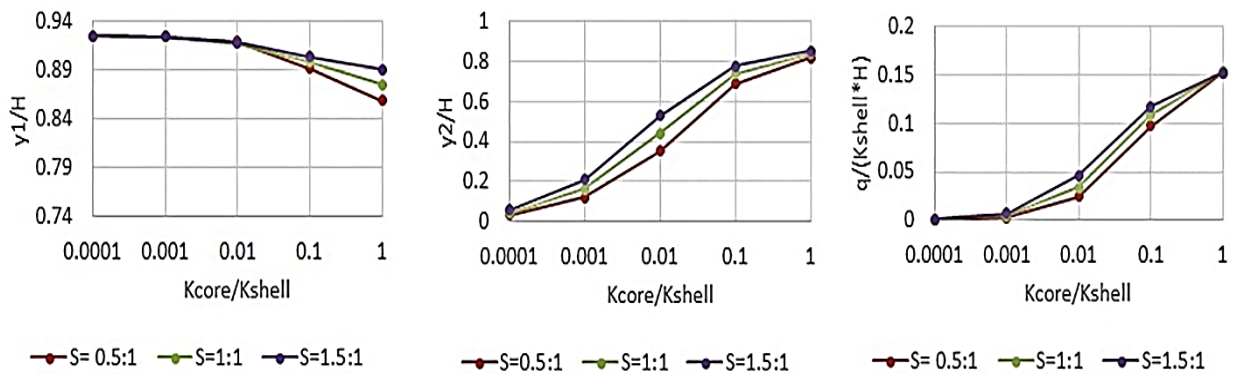


—●— $S=0.5:1$ —●— $S=1:1$ —●— $S=1.5:1$

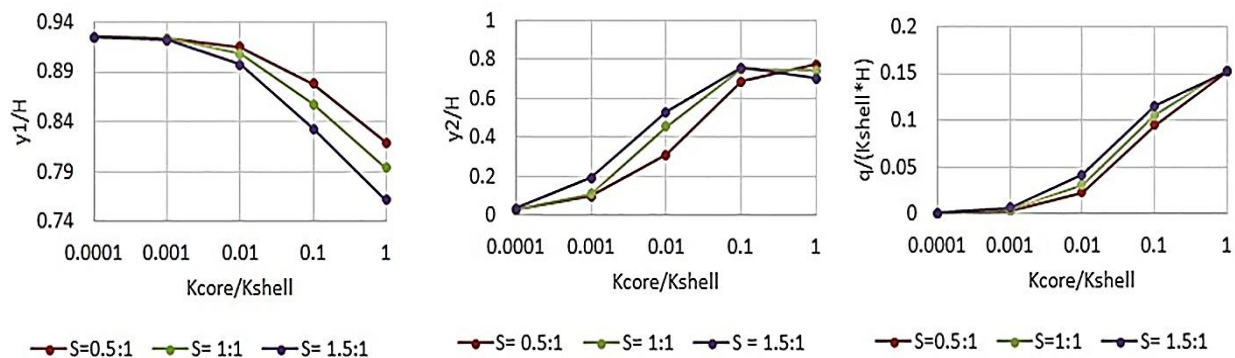
—●— $S=0.5:1$ —●— $S=1:1$ —●— $S=1.5:1$

—●— $S=0.5:1$ —●— $S=1:1$ —●— $S=1.5:1$

شکل ۱۰- تأثیر شیب هسته بر خط جریان و نرخ دبی تراوش برای هسته گوه‌ای شکل با نسبت $b/B=1$

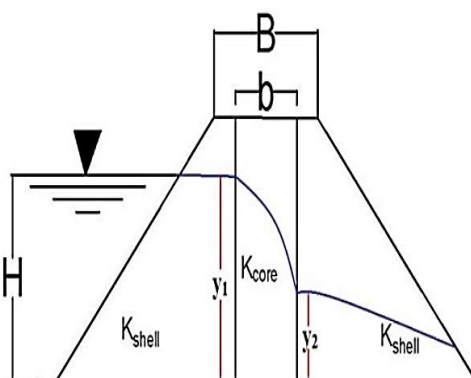


شکل ۱۱- تأثیر شیب هسته بر خط جریان و نرخ دبی تراوش برای هسته شیب‌دار در قسمت بالادست با نسبت $b/B=1$



شکل ۱۲- تأثیر شیب هسته بر خط جریان و نرخ دبی تراوش برای هسته شیب‌دار در قسمت پایین دست با نسبت $b/B=1$

مختلف هسته سد مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در ادامه مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت K_{core}/K_{shell} در همه موارد افزایش می‌یابد، زیرا کاهش ضریب هدایت هیدرولیکی هسته مانع از جریان می‌شود و باعث می‌شود سطح خط جریان در سطح بالادست افزایش یابد. در شکل (۱۳) طرح شماتیک پارامترهای مورد بررسی در هسته عمودی سد خاکی نشان داده شده است.

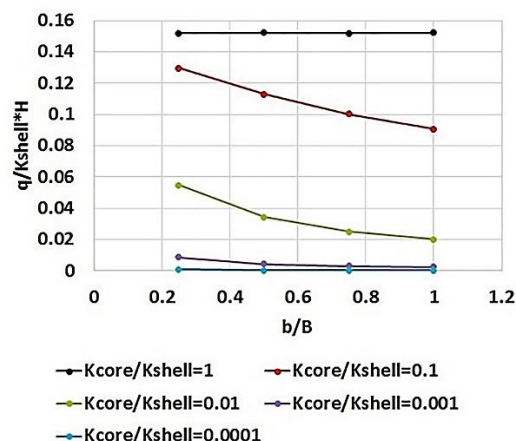


شکل ۱۳- طرح شماتیک پارامترهای مورد بررسی و نشست در سدهای خاکی

با توجه به نمودارهای (۱۰) تا (۱۲) می‌توان بیان نمود که شیب هسته گوه‌ای شکل (S) تأثیر بسیار کمی بر y_1/H و $q/K_{shell}H$ دارد، به‌خصوص زمانی که ضریب هدایت هیدرولیکی هسته کمتر از $K_{core}/K_{shell} = 0.01$ باشد. حداکثر افزایش y_1/H ناشی از تغییر شیب تقریباً ۴٪ است درحالی‌که حداکثر کاهش در $q/K_{shell}H$ حدود ۱۶٪ است. کمترین نسبت دبی تراوش ($q/K_{shell}H$) و سطح خط جریان در سطح پایین‌دست هسته (y_2/H) در $S=1.5:1$ برای هسته گوه‌ای شکل رخ می‌دهد که به عرض بیشتر آن نسبت داده می‌شود. برای دو شکل هسته شیب‌دار بالادست و پایین‌دست، شیب $S=0.5:1$ کمترین نسبت دبی تراوش ($q/K_{shell}H$) و سطح خط جریان را در سطح پایین‌دست هسته (y_2/H) نشان می‌دهد. سطح خط جریان در سطح پایین‌دست هسته (y_2/H) پارامتری است که بیشتر تحت تأثیر شیب هسته قرار می‌گیرد، به‌خصوص برای دو نوع هسته شیب‌دار، زیرا تغییر شیب از ۱.۵:۱ به ۰.۵:۱ مقدار y_2/H را تا ۳۰ درصد برای هسته شیب‌دار بالادست و ۴۵ درصد برای هسته شیب‌دار پایین‌دست کاهش می‌دهد.

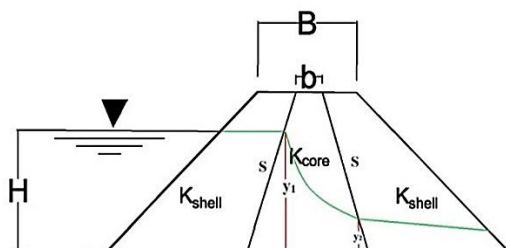
تأثیر عرض بالایی هسته و ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح جریان و دبی تراوش

در ادامه به بررسی تأثیر عرض بالایی هسته و ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح خط جریان و دبی تراوش پرداخته شد. به همین منظور به ازای نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد، مقادیر دبی تراوش ($q/K_{shell}H$) و سطح خط جریان در وجه‌های بالادست هسته (y_1/H) و پایین‌دست (y_2/H) به ازای شکل‌های



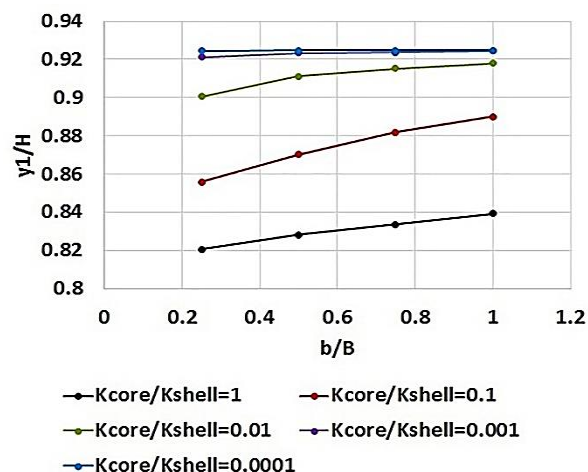
شکل ۱۶- تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر دبی تراوش در سد خاکی با هسته عمودی

با توجه به شکل‌های (۱۴) الی (۱۶) می‌توان بیان نمود که، برای هسته عمودی، نسبت دبی تراوش، $q/K_{shell}H$ ، از طریق سد با کاهش نسبت ضریب هدایت هیدرولیکی هسته، K_{core}/K_{shell} ، کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت عرض بالایی آن، b/B ، افزایش می‌یابد. افزایش b/B کاهش K_{core}/K_{shell} ، همچنین سطح خط جریان را در سطح بالادست هسته (y_1/H) افزایش می‌دهد درحالی که سطح خط جریان را در سطح پایین‌دست (y_2/H) پایین می‌آورد. این مسئله برای همه نسبت‌های K_{core}/K_{shell} و b/B مورد مطالعه به جز $K_{core}/K_{shell}=1$ در نظر گرفته می‌شود، در شرایطی که هسته و پوسته از یک مصالح هستند، عرض هیچ تأثیری ندارد و $K_{core}/K_{shell}=0.0001$ ، که در آن ضریب هدایت هیدرولیکی هسته بسیار کم است و تخلیه تراوش، $q/K_{shell}H$ ، تقریباً مسدود شده است. در شکل (۱۷) طرح شماتیک پارامترهای مورد بررسی در هسته گوه‌ای شکل سد خاکی نشان داده شده است.

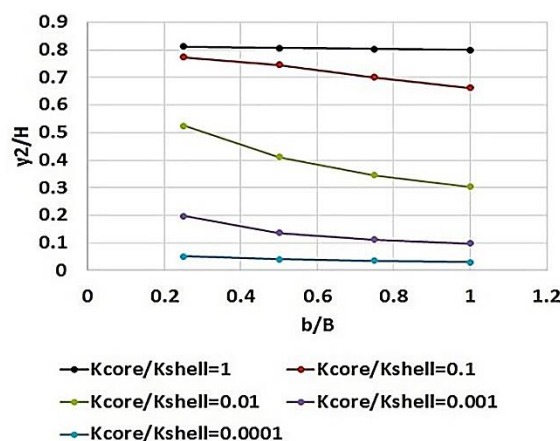


شکل ۱۷- طرح شماتیک پارامترهای مورد بررسی در هسته گوه‌ای شکل سد خاکی

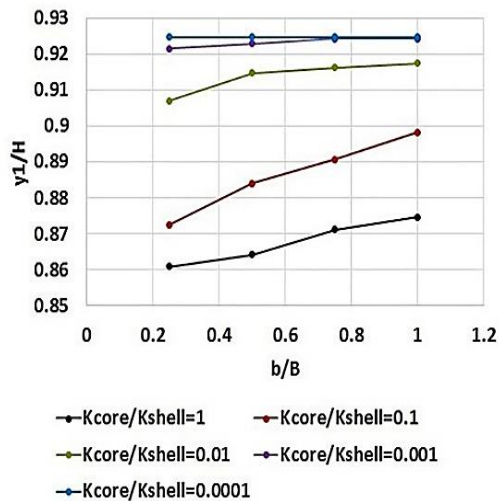
در شکل (۱۸) تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد (b/B) به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف (K_{core}/K_{shell}) بر سطح خط جریان در وجه بالادست هسته (y_1/H) در سد خاکی با هسته گوه‌ای شکل نشان داده شده است.



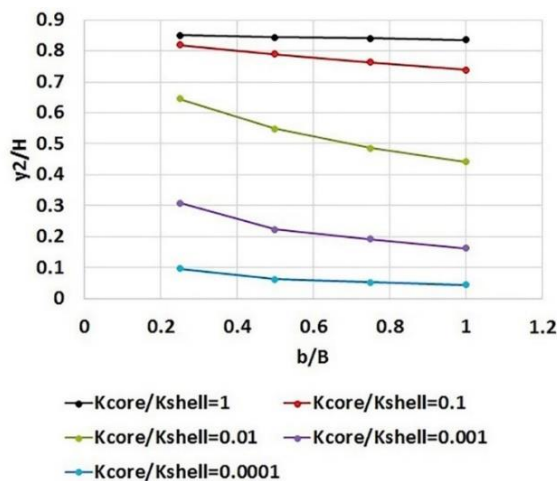
شکل ۱۴- تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر سطح خط جریان در وجه بالادست هسته در سد خاکی با هسته عمودی



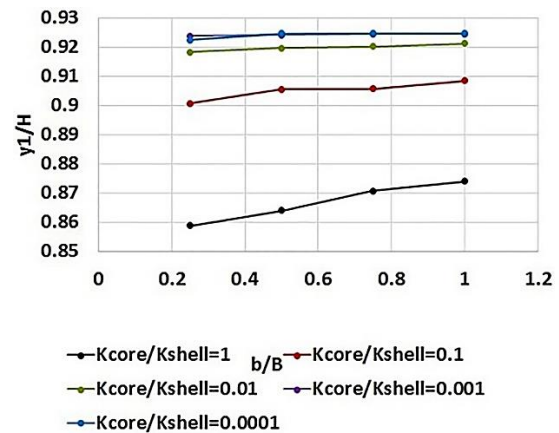
شکل ۱۵- تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر سطح خط جریان در وجه پایین‌دست هسته در سد خاکی با هسته عمودی



شکل ۲۰- تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر سطح خط جریان در وجه بالادست هسته در سد خاکی با هسته شیب‌دار در بالادست

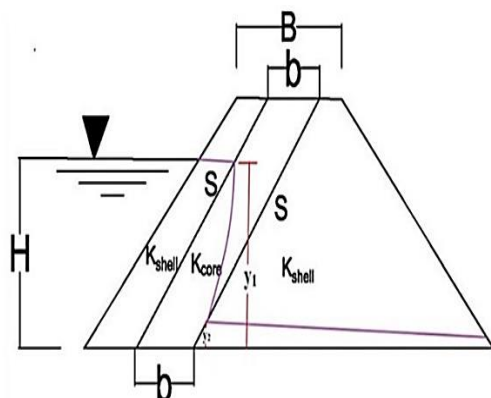


شکل ۲۱- تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر سطح خط جریان در وجه پایین‌دست هسته در سد خاکی با هسته شیب‌دار در بالادست

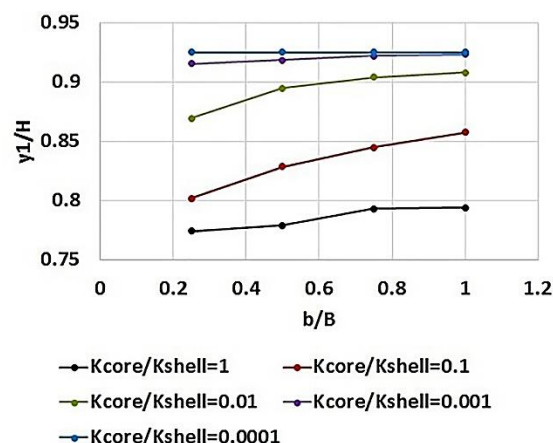


شکل ۱۸- تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر سطح خط جریان در وجه بالادست هسته در سد خاکی با هسته گوه‌ای شکل

تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد (b/B) بر به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف (K_{core}/K_{shell}) بر سطح خط جریان در وجه پایین‌دست هسته (y_2/H) در سد خاکی با هسته گوه‌ای شکل و تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد (b/B) به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف (K_{core}/K_{shell}) بر دبی تراوش ($q/K_{shell}H$) در سد خاکی با هسته گوه‌ای شکل نیز بررسی شد. با توجه به شکل (۱۸) و نتایج می‌توان بیان نمود که برای هسته‌های گوه‌ای شکل، کاهش ضریب هدایت هیدرولیکی (K_{core}/K_{shell})، نسبت دبی تراوش ($q/K_{shell}H$) و سطح خط جریان در سطح پایین‌دست هسته (y_2/H) را کاهش می‌دهد و همچنین واضح است که افزایش نسبت پهنای بالای هسته (b/B) بر $q/K_{shell}H$ یا y_2/H تأثیر نمی‌گذارد، اما باعث افزایش بسیار جزئی در y_1/H می‌شود. این مسئله ممکن است به این دلیل باشد که تغییر عرض بالای هسته گوه‌ای شکل (b/B) کمترین تأثیر را بر مقدار عرض پایین‌تر آن دارد، بنابراین تأثیر آن می‌تواند نادیده گرفته شود. در شکل (۱۹) طرح شماتیک پارامترهای مورد بررسی در هسته شیب‌دار در بالادست سد خاکی نشان داده شده است.



شکل ۱۹- طرح شماتیک پارامترهای مورد بررسی در هسته شیب‌دار در بالادست سد خاکی



شکل ۲۴- تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر سطح خط جریان در وجه بالادست هسته در سد خاکی با هسته شیب‌دار در پایین‌دست

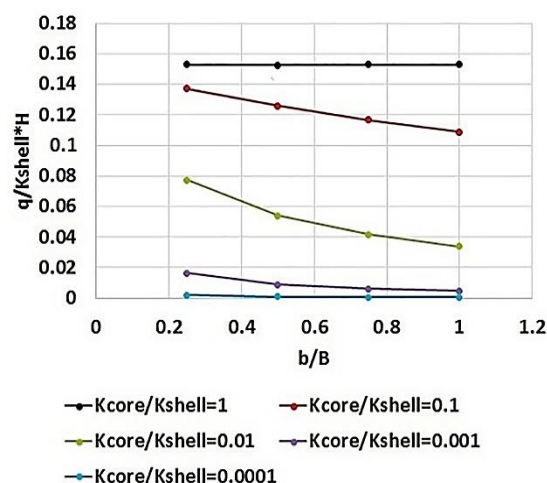
تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد (b/B) و ضریب هدایت هیدرولیکی هسته (K_{core}/K_{shell}) بر خط جریان و دبی تراوش در سدهای خاکی با هسته شیب‌دار در پایین‌دست مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس شکل (۲۵) و نتایج حاصل، مشخص شد که در این نوع سدها، کاهش ضریب هدایت هیدرولیکی هسته (K_{core}/K_{shell}) منجر به کاهش نرخ دبی تراوش ($q/K_{shell}H$) می‌شود. همچنین، افزایش نسبت عرض بالای هسته (b/B) برای یک مقدار ثابت K_{core}/K_{shell} ، به‌جز در موارد $K_{core}/K_{shell} = 1$ و 0.0001 ، باعث کاهش $q/K_{shell}H$ برای تمام ضرایب هدایت هیدرولیکی می‌شود.

علاوه بر این، کاهش K_{core}/K_{shell} معمولاً باعث کاهش موقعیت خط جریان در وجه پایین‌دست هسته (y_2/H) می‌شود، به‌جز در حالت $K_{core}/K_{shell} = 0.1$ که نتایج مشابه $K_{core}/K_{shell} = 1$ را نشان می‌دهد. در مقابل، کاهش K_{core}/K_{shell} و افزایش b/B موجب افزایش موقعیت خط جریان در وجه بالادست هسته (y_1/H) می‌شود. از سوی دیگر، نسبت عرض بالای هسته (b/B) تأثیر ناچیزی بر y_2/H دارد، به‌طوری که برای مقادیر $b/B > 0.5$ می‌توان از این تأثیر صرف‌نظر کرد.

خلاصه: بررسی‌ها نشان می‌دهند که کاهش K_{core}/K_{shell} و افزایش b/B به‌ترتیب باعث کاهش $q/K_{shell}H$ و تغییرات y_1/H و y_2/H می‌شوند، اما تأثیر b/B بر y_2/H برای مقادیر بزرگ‌تر از ۰.۵ ناچیز است.

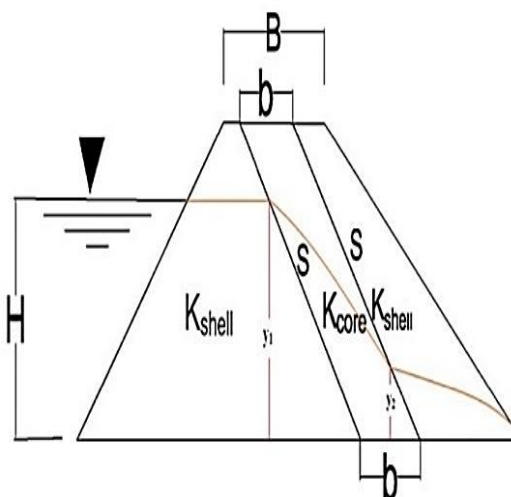
نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نرم‌افزارهای SEEP2D و SEEP/W برای شبیه‌سازی جریان تراوش در سدهای خاکی هسته‌دار به‌کار گرفته شدند. عملکرد دو نرم‌افزار در مدل‌سازی حالت‌های مختلف هسته شامل بدون هسته، هسته عمودی و هسته گوه‌ای ارزیابی شد. نتایج نشان داد که



شکل ۲۵- تأثیر نسبت‌های مختلف عرض هسته به عرض ناحیه بالایی سد به ازای ضریب هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر دبی تراوش در سد خاکی با هسته شیب‌دار در بالادست

با توجه به شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) می‌توان بیان نمود که برای سد خاکی با هسته شیب‌دار در بالادست، زمانی که ضریب هدایت هیدرولیکی هسته (K_{core}/K_{shell}) کاهش می‌یابد، $q/K_{shell}H$ و y_2/H کاهش می‌یابد و نسبت عرض بالایی آن (b/B) افزایش می‌یابد. به‌طوری که کاهش K_{core}/K_{shell} و افزایش b/B نیز y_1/H را افزایش می‌دهد. همان‌طور که در بالا و به دلایل مشابه، این امر برای همه نسبت‌های K_{core}/K_{shell} و b/B مورد مطالعه به‌جز $K_{core}/K_{shell} = 1$ اعمال می‌شود. در شکل (۲۳) طرح شماتیک پارامترهای مورد بررسی در هسته شیب‌دار در پایین‌دست سد خاکی نشان داده شده است.



شکل ۲۶- طرح شماتیک پارامترهای مورد بررسی در هسته شیب‌دار در پایین‌دست سد خاکی

می‌دهد که در مطالعات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی هسته سد خاکی نقش کلیدی در کنترل جریان تراوش و افزایش ایمنی سازه دارد و انتخاب هندسه مناسب هسته و تنظیم پارامترهایی مانند ضریب هدایت هیدرولیکی و شیب هسته می‌تواند به کاهش دبی تراوش و افزایش ایمنی کمک کند. برای مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود تأثیر شیب پوسته سد بر جریان تراوش بررسی شود. همچنین، استفاده از مواد مختلف برای هسته (مانند خاک رس، خاک ماسه‌ای و مواد پلیمری) می‌تواند موضوعی جذاب برای تحقیقات بعدی باشد. شبیه‌سازی شرایط غیرخطی و پیچیده‌تر مانند تغییرات غیریکنواخت خواص خاک یا وجود لایه‌های مختلف در ساختار سد نیز می‌تواند به درک بهتر رفتار سد کمک کند. انجام تحلیل حساسیت جامع‌تر برای پارامترهای مختلف مانند ضریب هدایت هیدرولیکی، شیب هسته و نسبت عرض بالای هسته می‌تواند بیش بهتری از رفتار سد فراهم کند. این پژوهش نه تنها به بهبود طراحی سدهای خاکی کمک می‌کند، بلکه پایه‌ای برای مطالعات آینده در زمینه بهینه‌سازی عملکرد سدها فراهم می‌کند.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

هر دو نرم‌افزار در محاسبه نسبت دبی نشت (q/K_{shellH}) و موقعیت خط جریان در وجه بالادست و پایین‌دست هسته ($y1/H$ و $y2/H$) مطابقت بسیار خوبی دارند. با این حال، در $SEEP/W$ محاسبه شکل سطح خط جریان درون هسته برای $K_{core}/K_{shell} = 0.01$ دقیق‌تر عمل کرد و بنابراین برای تکمیل مطالعات انتخاب شد. بررسی چهار نوع هندسه هسته نشان داد که هسته گوه‌ای در کاهش q/K_{shellH} و $y2/H$ مؤثرتر است، زیرا عرض کل بیشتری دارد. هسته عمودی در رتبه بعدی قرار دارد و هسته‌های شیب‌دار بالادست و پایین‌دست تأثیر مشابهی دارند. هسته شیب‌دار پایین‌دست کمترین مقادیر $y1/H$ را به دلیل طولانی‌ترین مسیر جریان تراوش تا سطح بالادست ارائه می‌دهد. وقتی K_{core}/K_{shell} کمتر از ۰.۰۰۱ باشد، هسته تقریباً تراوش را مسدود کرده و تمام اشکال هسته تأثیر یکسانی دارند.

شیب هسته (S) تأثیر ناچیزی بر q/K_{shellH} و $y1/H$ دارد، به‌خصوص برای K_{core}/K_{shell} کمتر از ۰.۰۰۱. برای هسته گوه‌ای، کمترین مقادیر q/K_{shellH} و $y2/H$ در شیب $S = 1.5:1$ رخ می‌دهد، در حالی که برای هسته‌های شیب‌دار، شیب $S = 0.5:1$ بهترین عملکرد را دارد. موقعیت خط جریان در وجه پایین‌دست هسته ($y2/H$) بیشترین تأثیر را از شیب هسته می‌پذیرد، به‌ویژه برای هسته‌های شیب‌دار بالادست و پایین‌دست که تغییرات آن به ترتیب ۳۰ و ۴۵ درصد است. نسبت عرض بالای هسته (b/B) برای انواع مختلف هسته‌ها به‌جز هسته گوه‌ای مؤثر است، زیرا تغییرات b/B تأثیر کمی بر عرض بزرگ‌تر در پایین‌دست دارد. نسبت هدایت هیدرولیکی هسته (K_{core}/K_{shell}) نیز نقش مهمی در تعیین خصوصیات تراوش ایفا می‌کند. کاهش K_{core}/K_{shell} منجر به افزایش $y1/H$ ، کاهش q/K_{shellH} و $y2/H$ می‌شود که این امر ارتفاع قسمت خیس شده در وجه پایین‌دست را کاهش داده و ایمنی در برابر اثرات تراوش را افزایش می‌دهد.

نتایج این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های مشابه سازگار است. به‌عنوان مثال، مطالعات قبلی نشان داده‌اند که هسته‌های گوه‌ای به دلیل عرض بیشتر، بهترین عملکرد را در کاهش دبی تراوش دارند. همچنین، تأثیر K_{core}/K_{shell} بر کاهش تراوش و افزایش ایمنی سد در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است. اما این مطالعه با بررسی تأثیر شیب هسته و نسبت عرض بالای هسته (b/B)، جزئیات بیشتری را ارائه

References

- Ahmadi H, Abtahi T, Aghazadeh N. The effect of hydraulic parameters on the analysis of unsteady seepage from the foundation and body of earth dams (Case study: Derik earth dam) Iranian Water Research Journal. 2018;11(4).
- Beiranvand B, Komasi M. An investigation on performance of the cut-off wall and numerical analysis of seepage and pore water pressure of Eyvashan earth dam. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng. 2021;45:1723-36.
- Emamzadeh S, Taheri A. Numerical modeling of sealing curtain design performance in earth-dams implemented on layered soils (Case study: Abbasabad dam). Geotechnical Geology. 2021;17(2):527-37.
- Farhadian H, Maleki Z, Eslaminezhad S. Assessment of the optimum depth of sealing cutoff walls in the clay core of Peygham-Chay dam. Journal of

- Hydraulic Structures. 2021;7(1):59-76.
5. Ghaemi M, Ahangari K, Noorzad A, Goshtasbi K. The effect of alluvial foundation on the earth dams settlement. *Open Journal of Geology*. 2017;7:360-73.
 6. Mashkabadi K, Zandi Y. The effect of changes in sealing wall and horizontal drainage of Golfaraj dam on the values of lifting pressure parameters and maximum outlet gradient. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*. 2021;12(1):419-32.
 7. Mirbehigi SN. Analysis of seepage performance of Soleiman Shah earth dam (Shahada dam) based on instrument results. *Second Conference on Architecture, Urban Planning, Civil Engineering, and Environment* 2022.
 8. Poursalim R, Alizade Majdi A. Numerical finite element modeling for earth-dam grouting and curtains wall design by Plaxis software. *Geotechnical Geology*. 2020;16(1):385-94.
 9. Salmasi F, Norouzi R, Abraham J, Nourani B. Effect of inclined clay core on embankment dam seepage and stability through LEM and FEM. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. 38:6571-86.
 10. Sharma HD. *Embankment Dams*.: OXFORD & IHB Publishing Co; 1991.
 11. Vaezinejad SM, Marandi SM, Salajegheh E. Inverse modeling of leakage through earth dams (Case study: Baft dam, Iran). *Geotechnical Research*. 2018;5(4):218-30.
 12. Wang L, Huang Y, Li Z, Zhang J. Application of plastic concrete cut-off wall in reinforcement of reservoir. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2020. p. 012037.
 13. Johnson A, Ahmad R. Effect of materials and structural methods on seepage rates in earth dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2000;126(6):450-9.
 14. Wilkinson P. Impact of core density and homogeneity on seepage in earth dams. *Geotechnical Engineering Journal* 2005;18(3):280-9.
 15. Clark T. Reducing seepage in earth dam cores through improved compaction methods and quality control. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*. 2010;25(2):135-42.
 16. Doyle M. Influence of slope and core angle on seepage velocity in earth dams. *Water Resources Engineering Review*. 2007;14(4):370-8.
 17. Mostafa, M.M., Zhenzhong, S. Effect of zones' dimensions and geometry on seepage through zoned earth dams. *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 46 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00223-7>
 18. Lopez J. Effects of core depth and thickness on seepage reduction in earth dams. *Civil Engineering Journal*. 2015;41(5):520-8.