نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره نهم / تابستان ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 9 / September 2016

ارزیابی روش‌های عددی و تجربی در تعیین سطح فریاتیک با توجه به تغییرات نفوذپذیری، تراز آب مخزن و هندسه سد خاکی

مهدی کماسی* [۱]
سیدمحمدرضا هاشمی [۲]
محمدرضا گودرزی [۳]
سیدمهدی هاشمی [۴]

چکیده

در بررسی جریان و ترسیم شبکه جریان در سدهای خاکی، نکته اساسی مشخص بودن موقعیت اولین خط جریان است که در اصطلاح به خط اشباع یا خط فریاتیک مشهور است. در این مقاله پس از مدل‌سازی یک سد با نرم‌افزار ژئو استودیو، محل منحنی فریاتیک، محل تقاطع آن با پوسته پایین‌دست و گذر از پوسته پایین‌دست، میزان افت قبل از هسته و همچنین پس از عبور از آن به‌عنوان نمونه موردبررسی قرارگرفته و نتایج با حل تجربی رزک مورد مقایسه قرارگرفته است. همچنین اثر تغییرات سطح آب مخزن، نسبت نفوذپذیری‌های مختلف و تغییر شیب سطح بالادست و پایین‌دست بر منحنی فریاتیک مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته است. نتایج پژوهش بیانگر آن است که خط فریاتیک در نسبت نفوذپذیری یکسان برای هسته و بدنه مستقل از مقدار نفوذپذیری آن‌ها بوده است. همچنین نسبت نفوذپذیری هسته به بدنه برابر ۰/۱ فرض شده درروش تجربی رزک دارای ۲۵٪ خطا است که با تعمیم روش تجربی رزک در نسبت‌های پایین‌تر میزان خطا به کمتر از ۳٪ می‌رسد. در این صورت روش تجربی رزک تطابق بسیار خوبی را با نتایج روش اجزاء محدود نشان می‌دهد. همچنین مشخص گردید که با تغییر هندسه سد نیز میزان خطا تغییر یافت به‌گونه‌ای که با کاهش شیب سطح بالادست خطای افت از ۴۳٪ به ۲۵٪ رسید.

واژه‌های کلیدی

تراوش، خط فریاتیک، رزک، سدهای خاکی، نفوذپذیری.

۱*. استادیار، دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره)، komasi@abru.ac.ir.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی (ره).
۳. استادیار، دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره).
۴. کارشناس ارشد مهندسی عمران- خاک و پی، سازمان نظام مهندسی استان مرکزی.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۴

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

مقدمه

مشکل تراوش یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی و ساخت سدها و سازه‌های هیدرولیکی است. آمار سدهای دنیا و سدهای داخلی نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد سدها از نوع خاکی و سنگ‌ریزه‌ای هستند (صدرنژاد، ۱۳۹۰). تأمین ایمنی سدها یکی از مهم‌ترین چالش‌های مهندسین است. برای جلوگیری از خرابی سدها پیش‌بینی مخاطرات نقش بسزایی دارد. از طرفی بیشترین تعداد خرابی مربوط به سدهای خاکی است (نجم، ۱۳۷۹). وفائیان (۱۳۹۱) اعلام کردند که تا قبل از سال‌های ۱۹۶۵، حدود ۲۵ درصد خرابی سدهای خاکی در اثر تراوش غیرمجاز و شسته شدن خاک اتفاق افتاده است که دراین‌بین حدود ۳۴ درصد سدها در پنج سال اول پس از ساخت و شروع کار سد و آبگیری آن‌ها تخریب شده‌اند. بررسی‌های جامع اخیر توسط فاستر[1] و همکاران (۲۰۰۰) و فل[2] و همکاران (۱۹۹۲) نشان می‌دهد که فرسایش داخلی و پدیده رگاب[3] از عوامل اصلی شکست و حوادث مؤثر بر سدهای خاکی هستند و این نسبت از ۴۳ درصد قبل از سال ۱۹۵۰ به ۵۴ درصد پس از سال ۱۹۵۰ افزایش‌یافته است؛ بنابراین یکی از دلایل اصلی شکست سدهای خاکی، تراوش آن است. یکی از نکات مهم در مراحل مطالعه و در طول ساخت‌وساز در سدهای خاکی حرکت مداوم آب از وجه بالادست سد به سمت وجه پایین‌دست آن است. موقعیت سطح ایجادشده که به سطح فریاتیک مشهور است، در پایداری سد خاکی تأثیرگذار است (ضیائی موئید[4] و همکاران، ۲۰۱۲). سطح فریاتیک درون یک سد می‌تواند توسط طراحی درست زهکش کنترل شود. حل ترسیمی معادله لاپلاس حرکت آب در خاک در حالت دوبعدی منتهی به‌رسم دو سری خطوط عمود بر هم می‌گردد که خطوط جریان و هم‌پتانسیل نام دارند. این خطوط شبکه جریان را تشکیل می‌دهند. روش دیگر حل معادله لاپلاس حل عددی آن است. امروزه بسته‌های نرم‌افزاری قدرتمندی برای تحلیل شرایط محیط متخلخل ارائه‌شده است که مبنای کار آن‌ها استفاده از روش‌های عددی مختلف مانند تفاضل محدود و اجزاء محدود است (شرارد[5] و همکاران، ۱۹۶۳). در طراحی سدها از تحلیل عددی با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری به‌طور گسترده برای مدل‌سازی جریان تراوش در سدهای خاکی در شرایط مختلف، استفاده می‌شود. ازآنجاکه تعیین خط فریاتیک در سدهای خاکی در دوران بهره‌برداری اهمیت زیادی دارد، به‌منظور دستیابی به این هدف، پژوهشگران روش‌های تحلیلی و تجربی مختلفی ازجمله روش تجربی رزک[6] را پیشنهاد کرده و داده‌های حاصله را به‌صورت مستمر مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌دهند تا درنهایت سطح فریاتیک در سد خاکی را درون یا زیر پنجه پایین‌دست سد نگهداری کنند. در این راستا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تحقیقات خود را کامل‌تر می‌کنند به‌گونه‌ای که شاهنگیان و شمسایی (۱۳۸۰) با استفاده از مدل شبیه‌سازی الکتریکی، دبی تراوش از سدهای خاکی را محاسبه و سپس با استفاده از این روش مقدار دقیق سطح تراوش را برای چند سد خاکی همگن، همسان و فاقد فیلتر به دست آورده و روش کاساگرانده[7] را اصلاح نمودند. درروش آن‌ها فرض شد جریان آب در خاک مشابه جریان الکتریسیته در یک محیط هادی بوده که عامل اصلی این شباهت، تشابه دو قانون دارسی و اهم است. نتایج این تحقیق نشان داد که روش آزمایشگاهی شبیه‌سازی الکتریکی برای محیط‌های همگن و همسان از دقت خوبی برخوردار است. در این مدل تنها از سد خاکی همگن و همسان و بدون زهکش استفاده‌شده درحالی‌که رزک و سنون[8] (۲۰۱۱) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی که برای سد خاکی با هسته رسی انجام داده‌اند، یک‌راه حل تحلیلی برای مسئله تراوش پیشنهاد دادند و آن را با کار ارائه‌شده توسط روزانف[9] مقایسه و صحت سنجی نمود و نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت نفوذپذیری هسته به بدنه نسبت دبی عبوری تراوش افزایش و هرچه عرض هسته بیشتر باشد دبی عبوری تراوش کاهش‌یافته است. همچنین با افزایش نسبت

[1] Foster
[2] Fell
[3] Piping
[4] Ziaie Moayed
[5] Sherard
[6] Rezk
[7] Casagrande
[8] Senoon
[9] Rozanov

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

نفوذپذیری هسته به بدنه، میزان افت خط فریاتیک در هسته کاهش و با افزایش عرض هسته، این میزان افزایش می‌یابد. از طرفی آبهیلاشا[1] و بالان[2] (۲۰۱۴) در تحلیل عددی تراوش در سدهای خاکی، نرم‌افزارهای کاربردی و تجاری که به‌طور مؤثر توسط محققان و طراحان برای مدل‌سازی جنبه‌های مختلف جریان تراوش در سدهای خاکی، مورداستفاده قرارگرفته‌اند را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل‌سازی با SEEP/W از صحت و دقت قابل‌قبول و بالایی برخوردار است و می‌تواند برای مسائل بسیار بزرگ و پیچیده نیز کارآمد و اقتصادی باشد. در این راستا نوری[3] و اسماعیل[4] (۲۰۱۱) در ارزیابی تراوش و پایداری سد دهوک برای تعیین خط فریاتیک سطح آزاد، مقدار تراوش از طریق سد، توزیع فشار منفذی آب، مقادیر هد کل و تأثیر ناهمسانی مواد هسته سد خاکی ناحیه بندی شده، با روش یادشده مورد ارزیابی قراردادند. همچنین صحت برنامه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سد مورد آزمون قرار گرفت و نتایج، صحت قابل قبولی را برای برنامه نشان داد. میشرا[5] و سینگ[6] (۲۰۰۵) روند تراوش در یک سد خاکی همگن دارای فیلتر پاشنه‌ای افقی را با استفاده از روش اجزا محدود موردبررسی قراردادند. برای آسان‌سازی مسئله سد را ایزومتریک و واقع‌شده بر روی یک پی نفوذناپذیر و شرایط نشت را پایدار فرض نمودند. برای حل مسئله با روش عددی از برنامه‌های ANSYS، PLAXIS و SEEP/W استفاده شد. آنالیز عددی فشار پیزومتریک در درون فیلتر یک‌روند کاهشی را در آن نشان داد درحالی‌که مدل تحلیلی یک خط هم‌پتانسیل صفر را درون فیلتر نمایش می‌داد و نتیجه حاصل از آنالیز اجزاء محدود جواب صحیح‌تری را به دست داد. همچنین حسنی[7] و همکاران (۲۰۱۳) در تحلیل پایداری دامنه و تراوش در سدهای خاکی با استفاده از مدل‌های عددی (مطالعه موردی: سد ایلام، ایران) تحلیل تراوش در سد خاکی ایلام را گزارش نمودند که با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار متوسط جریان از محل تراوش تحت اندازه متفاوت شبکه، برای سد ایلام برابر ۰/۸۳۶ لیتر در ثانیه برای کل طول سد بود. در این راستا، علی نژاد و زمردیان (۱۳۸۹) با مدل کردن ۳۶۰ سد خاکی توسط نرم‌افزارهای SEEP/W و SLOPE/W و نهایتاً با ایجاد شبکه مصنوعی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB طول و زوایای بهینه‌ای برای زهکش‌های افقی و مایل به دست آوردند. با مقایسه‌ی مدل‌های مختلف از نتایج آنالیز انجام‌شده، طول بهینه زهکش افقی در سدهای خاکی همگن در تمامی ارتفاع‌ها، در محدوده طولی برابر با ۲۵ درصد ارتفاع سد و بیشتر از آن و طول بهینه زهکش مایل در طولی برابر با ۵۰ درصد ارتفاع نرمال آب در مخزن سد خاکی، تعیین شد. با توجه به پژوهش‌های یادشده در این مقاله سعی بر آن گردید که برای یک سد هر دو روش تجربی رزک و عددی با نرم‌افزار SEEP/W مدل شود و نتایج آن مورد تحلیل قرار گیرد. در این راستا برای نفوذپذیری‌های متفاوت و همچنین در شرایط متفاوت تراز آب مخزن محاسبات و مدل‌سازی انجام گردید تا از رفتار خط فریاتیک در سد و تطابق نرم‌افزار و روش تجربی و مطالعاتی رزک اطلاعات کافی در جهت تعمیم و بهینه‌سازی این روش به دست آید.

مواد و روش‌ها

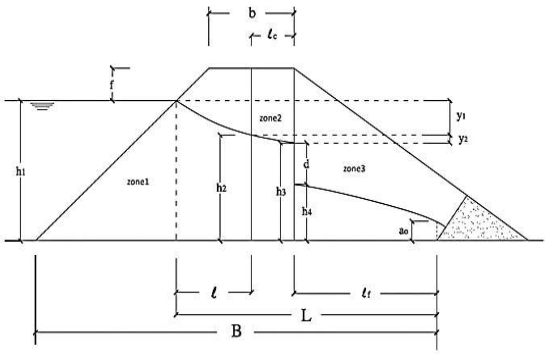
معرفی مدل موردمطالعه و فرضیات آن

در شکل (۱)، یک طرح شماتیک برای یک سد خاکی با هسته داخلی مدل رزک نشان داده شده است. این سد بر روی سطح افقی غیرقابل نفوذ ساخته‌شده و به سه منطقه تقسیم‌شده است. اولین منطقه سد، قبل از هسته است. عرض هسته نشان‌دهنده منطقه دوم است. از هسته تا پایان وجه فیلتر به‌عنوان منطقه سوم در نظر گرفته‌شده است. هدف از روش پیشنهادشده برای کاهش سطح فریاتیک در هر منطقه و به‌ویژه کاهش آن در منطقه دوم است (رزک و سنون، ۲۰۱۱).

[1] Abhilasha
[2] Balan
[3] Noori
[4] Ismaeel
[5] Mishra
[6] Singh
[7] Hasani

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

درروش تجربی رزک میزان ارتفاع تلاقی سطح فریاتیک با آغاز فیلتر با توجه به رابطه‌ی کوزنی[1] محاسبه‌شده است. همچنین درصد h_4/h_1 از نتایج آزمایشگاهی انجام‌شده توسط رزک یافت می‌شود. از راه‌حل پاولوفسکی[2]، برای یافتن میزان دبی تراوش عبوری از سه منطقه سد استفاده می‌شود و ارزش نسبی نفوذپذیری هسته در محدوده (۰/۸- ۰/۱) در نظر گرفته‌شده است.



شکل (۱): مدل هندسی مطالعاتی رزک برای سد خاکی با هسته داخلی

معرفی روش تجربی مطالعاتی رزک برای حل مسئله سد خاکی با هسته داخلی

روش تجربی مطالعاتی رزک برای حل مسئله سد خاکی با هسته داخلی با اشاره به شکل (۱) به شرح زیر پیشنهادشده است:

برای منطقه سه، برای محاسبه مقدار h_4/h_1 از رابطه‌ی (۱) که از نتایج تجربی توسط رزک استنباط شده است و در شکل (۲) نشان داده‌شده است توصیه می‌شود. برای K_c/K_d (نسبت نفوذپذیری هسته به نفوذپذیری بدنه) و h_1 معلوم، میزان h_4 را می‌توان از رابطه (۱) به دست آورد (رزک و سنون، ۲۰۱۱).

$$\frac{h_4}{h_1} = 0.7969\left(\frac{K_c}{K_d}\right)^{0.4374} \qquad (۱)$$

K_c= نفوذپذیری هسته، K_d= نفوذپذیری بدنه سد بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه، h_1= ارتفاع تراز آب تا بستر و h_4 تراز فریاتیک بعد از هسته بر حسب متر.

برای منطقه سه، مقادیر دبی (Q_1) و a_o را می‌توان طبق روابط کوزنی (رابطه ۲) و پاولوفسکی (رابطه ۳) یافت.

همچنین میزان y_1 در منطقه ۱ از رابطه (۴) استنباط و میزان y_2 در منطقه دوم از رابطه (۵) حاصل می‌شود (رزک و سنون، ۲۰۱۱). کاهش d را با توجه به شکل (۱) از رابطه (۶) می‌توان یافت:

$$Q_1 = K_d \times a_0 \qquad (۲)$$

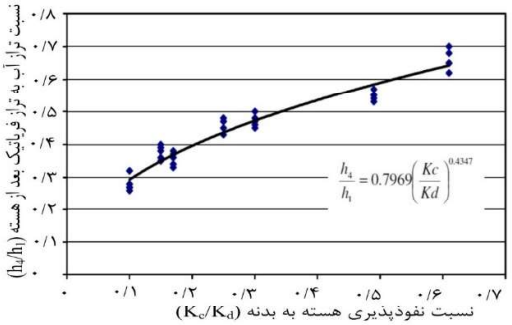
$$Q_1 = \frac{K_d}{2L_f}\left(h_4{}^2 - a_0{}^2\right) \qquad (۳)$$

$$Q_1 = \frac{k_d}{2l}(2h_1y_1 - y_1^2) \qquad (۴)$$

$$Q_1 = \frac{k_c}{2l_c}[(h_1 - y_1)^2 - (h_1 - y_1 - y_2)^2] \qquad (۵)$$

$$d = h_1 - (y_1 + y_2 + h_4) \qquad (۶)$$

Q_1= دبی عبوری از هسته سد، a_0= تراز خط فریاتیک در سطح تماس با فیلتر، y_1= میزان افت تا هسته، y_2= میزان افت درون هسته، L_c= عرض هسته و L_f و L= طول‌های مشخص شده در شکل (۱) بر حسب متر.



شکل (۲): نمودار رابطه h_4/h_1 با k_c/k_d (رزک و سنون، ۲۰۱۱)

مدل‌سازی اجزا محدود برای تعیین خط فریاتیک

نرم‌افزار ژئو استودیو[3] ازجمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان محدود بوده و از طریق آن می‌توان آنالیزهایی از قبیل تنش- کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیب‌ها، آنالیز دینامیکی و همچنین شرایط افت سریع را بررسی کرد. یکی از مجموعه نرم‌افزارهای قدرتمند درزمینه‌ی محاسبه تراوش آب در خاک‌های اشباع و غیراشباع نرم‌افزار ژئو استودیو است که مدل‌سازی مسائل تراوش آب در خاک توسط این نرم‌افزار عددی خصوصاً زیر برنامه‌های SEEP/W و VADOSE/W قابل‌مشاهده است (امین‌جواهری و پاک‌نیت، ۱۳۹۱؛ قاسم‌زاده، ۱۳۸۹).

[1] Kozeny
[2] Pavlovsky
[3] GeoStudio

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

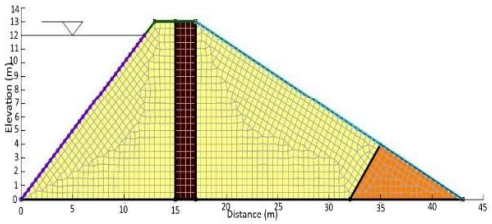
نرم‌افزار SEEP/W، برای مدل‌سازی حرکت و توزیع فشار آب منفذی درون مواد متخلخل مانند خاک و سنگ، ارائه می‌شود. این نرم‌افزار بر این اساس که جریان آب از طریق خاک اشباع از قانون دارسی تبعیت می‌کند، عمل می‌کند. مدل SEEP/W برای حل موقعیت‌های دوبعدی جریان با چندین لایه خاک، ساخته می‌شود. جهت‌های جریان آب زیرزمینی را نیز می‌توان تحلیل نمود. در شرایط پایدار، اختلاف بین جریان ورودی و جریان خروجی در همه زمان‌ها، صفر است. برای محاسبات اجزای محدود، مدل SEEP/W توسط گره‌ها، تقسیم می‌شود. ارتفاع سطح آب در هر گره محاسبه می‌شود. در مدل‌های SEEP/W، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند: آبخوان ناهمگن و همسان است و آبخوان تا حدی محدود و تا حدی آزاد، است. کیفیت خوب گرافیک‌های خروجی امکان نمایش تصویری خطوط هم‌پتانسیل و مسیرهای جریان را فراهم می‌کند و خطوط تراز می‌توانند برای ویژگی‌های مختلف مانند فشارهای منفذی، سرعت‌های منفذی و گرادیان‌ها، ترسیم شوند. محاسبات شامل کمیت‌های جریان و فشار بالابرنده در محل‌های انتخاب‌شده توسط کاربر، در مدل است (آبهیلاشا و بالان، ۲۰۱۴). جهت بحث و بررسی مطالب ذکرشده از داده‌های جدول (۱) جهت ترسیم سد استفاده‌شده است.

تعیین مش بهینه در مدل

در مش بندی نسبت طول به عرض نواحی، حدود نیم واحد انتخاب شد و نسبت مساحت زون‌های مجاور از یک تجاوز نکرد چراکه این نسبت اگر از ۱/۵ تجاوز نماید، از دقت جواب‌ها کاسته می‌شود. تعیین ابعاد مدل سد با توجه به جدول (۱) صورت گرفته است. با انجام مدل‌سازی‌های متعدد مش بهینه مشخص شد. تعداد حدود ۱۲۵۵ المان و ۱۳۱۲ گره استفاده‌شده است که در شکل (۳) مدل‌سازی هندسی نمایش داده‌شده است. این تعداد المان از یک‌سو زمان محاسبات را افزایش داده و از سوی دیگر تأثیر بسزایی در دقت جواب‌ها داشته است که خود سبب شد، روند محاسبات به سمت درست هدایت شود (هاشمی، ۱۳۹۴).

تخصیص مصالح به بدنه و پی

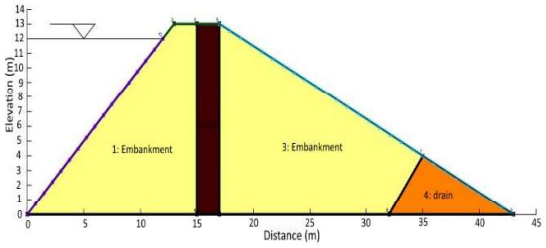
برای مصالح به‌کار رفته در سد، پس از ساخت هندسه مدل، رفتار مدل اشباع/ غیراشباع که شناخته‌ترین مدل در مصالح خاکی است استفاده‌شده است. در شکل (۴) اختصاص مصالح به قسمت‌های مختلف سد نشان داده‌شده است.



شکل (۳): مدل هندسی سد با تعداد المان‌های مشخص در نرم‌افزار

جدول (۱): خصوصیات هندسی و نفوذپذیری مصالح در سد موردمطالعه

مصالح	نفوذپذیری و ارتفاع	واحدها
هسته رسی (K_c)	۱×۱۰^{-۷}	سانتی‌متر بر ثانیه
فیلترها	۱×۱۰^{-۴}	سانتی‌متر بر ثانیه
بدنه سد (K_d)	۱×۱۰^{-۶}	سانتی‌متر بر ثانیه
ارتفاع تراز آب تا بستر (h_1)	۱۲	متر
پهنای تاج سد (b)	۴	متر
عرض هسته (L_c)	۲	متر
فاصله از انتهای هسته تا ابتدای فیلتر (L_f)	۱۵	متر
ارتفاع آزاد آب (f)	۱	متر
K_c/K_d	۰/۱	-



شکل (۴): تخصیص مصالح به مدل عددی سد

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

نتایج

مکان‌یابی خط فریاتیک

پس از مرحله ساخت بدنه، مدل‌سازی مرحله آبگیری و تحلیل تراوش سد در حالت تراوش پایدار، با توجه به خصوصیات نفوذپذیری مصالح و نیز نسبت تخلخل آن‌ها مطابق جدول (۱) انجام شد و درنهایت خط فریاتیک تعیین گردید. شکل‌های (۵) و (۶) گویای این مطلب است.

طبق نظریه کاساگراند حتی نفوذپذیری یا عدم نفوذپذیری پی سد نیز تأثیری بر وضعیت مسیر تراوش آب (سطح فریاتیک) ندارد. طبق روش حل تجربی مطالعاتی رزک و با توجه به مشخصات هندسی و خصوصیات مواد و مصالح بکار رفته در ساخت سد می‌توان میزان h_4، a_o، Q_1، y_1، h_2، y_2، h_3 و نهایتاً d را محاسبه نمود و صحت سنجی خط فریاتیک را با نرم‌افزار ژئو استودیو تائید کرد.

بدین منظور میزان شیب بالادست ($m_1=\cot\alpha=1$) و شیب پایین‌دست ($m_2=\cot\beta=2$) به‌صورت تقریبی در نظر گرفته شد. محاسبات به شرح زیر است:

$$\frac{h_4}{h_1} = 0.7969\left(\frac{K_c}{K_d}\right)^{0.4374} \Longrightarrow h_4 = 3.51m \qquad (۷)$$

$$Q_1 = K_d \times a_0 = \frac{K_d}{2L_f}\left(h_4{}^2 - a_0{}^2\right) \qquad (۸)$$

$$a_0 = \frac{1}{30}\left((3.5)^2 - (a_0)^2\right) \Longrightarrow a_0 = 0.41\ m$$

$$Q_1 = a_0 \times K_d = \frac{k_d}{2l}(2h_1y_1 - y_1^2) \qquad (۹)$$

$$y_1^2 - 24y_1 + 3.28 = 0$$

$$y_1 = 0.14, h_2 = 11.86\ m$$

$$Q_1 = \frac{k_c}{2l_c}[(h_1 - y_1)^2 - (h_1 - y_1 - y_2)^2] = 0.41k_d \qquad (۱۰)$$

$$y_2^2 - 23.72y_2 + 16.4 = 0, y2 = 0.70$$

$$h_3 = h_2 - y_2 = 11.16\ m \qquad (۱۱)$$

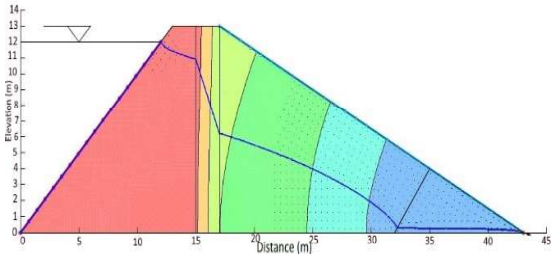
$$drop\ \ (d) = h_3 - h_4 = 7.65\ m \qquad (۱۲)$$

نتایج تحلیل حاصل از نرم‌افزار نیز (شکل‌های (۵) و (۶)) به شرح زیر است:

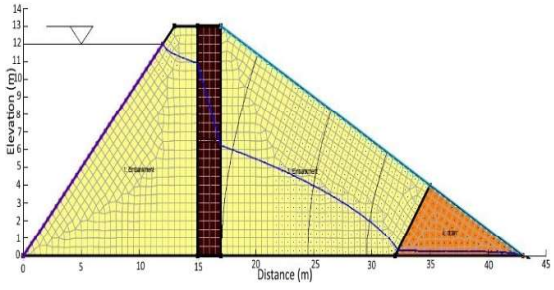
میزان افت از ابتدای فیلتر تا انتهای فیلتر برابر ۴/۶۸ به دست آمد که در آنالیز تحلیلی این میزان برابر ۸/۳۵ است. همچنین a_0=۰/۳۱، h_4= ۶/۲۴ و y_1=۱/۰۸ است. با مقایسه خط فریاتیک به دست آمده (شکل‌های ۵ تا ۱۲) از نرم‌افزار با مدل رزک می‌توان دریافت که الگوی خط فریاتیک در ناحیه اول و سوم سد بر همدیگر منطبق بوده و تنها الگوی خط فریاتیک درون هسته در دو مدل متفاوت است، به‌این‌ترتیب که در مدل رزک خط فریاتیک دارای انحنا است درحالی‌که بر اساس نتایج نرم‌افزار این خط دارای شیب زیادی است. میزان خطای افت نیز برابر ٪۴۳ به دست آمد. ازآنجاکه میزان نسبت k_c/k_d برابر ۰/۱ مطابق شرایط مدل رزک فرض شد، برای به دست آوردن تأثیر افزایش و یا کاهش هم‌زمان میزان نفوذپذیری بر نتایج خروجی نمودار و یافتن تطابق بیشتر با مدل رزک این معیار تغییر داده شد به‌طوری‌که میزان k_c/k_d همان مقدار ثابت ۰/۱ باشد. برای این کار ابتدا نفوذپذیری‌ها در نرم‌افزار کاهش داده شد به‌طوری‌که $K_c= ۱\times۱۰^{-۱۱}$ و $k_d= ۱\times۱۰^{-۱۰}$ و ۱×۱۰^{-۸} =kdrain شود.

نتایج حاصل از این تغییر در شکل (۷) نمایش داده شده است. سپس نفوذپذیری‌ها افزایش داده شد به‌طوری‌که $k_c=۱\times۱۰^{-۴}$ و $kd=۱\times۱۰^{-۳}$ و $kdrain=۱\times۱۰^{-۱}$ شود.

نتایج حاصل از این تغییر در نمودار شکل (۸) آورده شده است. همان‌گونه که در شکل (۸) ارائه شده است میزان تغییرات حاصل بسیار کم و قابل‌چشم‌پوشی است.



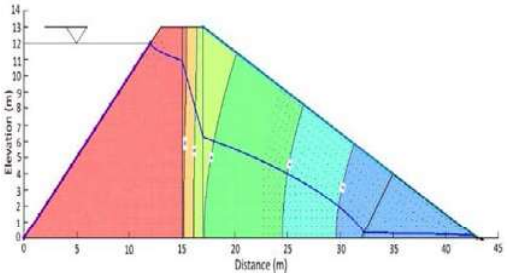
شکل (۵): نحوه توزیع فشار آب منفذی و خط فریاتیک در سد



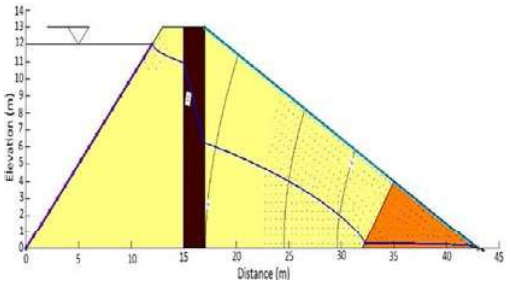
شکل (۶): نمایش خط فریاتیک همراه بامش و نواحی مختلف در سد

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

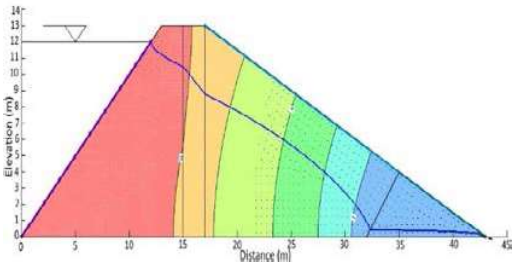


شکل (۷): تعیین خط فریاتیک با کاهش نفوذپذیری‌ها

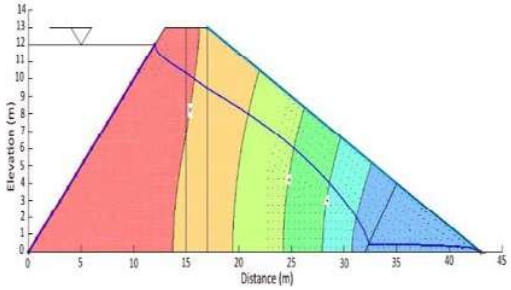


شکل (۸): تعیین خط فریاتیک با افزایش نفوذپذیری‌ها

برای بررسی بیشتر، نسبت‌های k_c/k_d برابر با ۰/۴ و ۰/۸ که از فرضیات میانی و انتهایی مدل رزک است برای مقایسه میزان خطا و شرایط بهینه بررسی شد. بدین منظور ابتدا در نرم‌افزار میزان $k_c= ۴ \times ۱۰^{-۷}$ و $k_d=۱ \times ۱۰^{-۶}$ و $k_{drain}=۱ \times ۱۰^{-۴}$ تنظیم گردید. نتایج حاصل در نمودار شکل (۹) قابل‌مشاهده است. نتایج حاصل از نرم‌افزار میزان افت را برابر ۱/۶۶ و مقادیر a_0=۰/۴۲ و h_4=۸/۸۱ و y_1=۱/۵۳ نشان می‌دهد. با جایگذاری مقادیر در فرمول‌های تجربی رزک مقادیر a_0=۱/۳۱ و h_4= ۶/۴۲ و y_1=۰/۴۵ و h_2=۱۱/۵۶ به دست آمد. میزان افت در مدل رزک برابر ۵/۱۴ و خطای نسبی برابر ٪۶۷ شد. در ادامه مقادیر $k_c=۸ \times ۱۰^{-۷}$ و $k_d=۱ \times ۱۰^{-۶}$ و $k_{drain}=۱ \times ۱۰^{-۴}$ در نرم‌افزار تغییر داده شد. نتایج حاصل در نمودار شکل (۱۰) قابل‌مشاهده است.

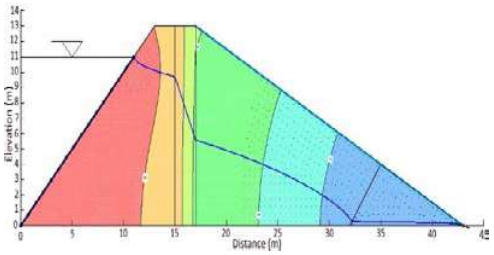


شکل (۹): خط فریاتیک در نسبت k_c/k_d = ۰/۴

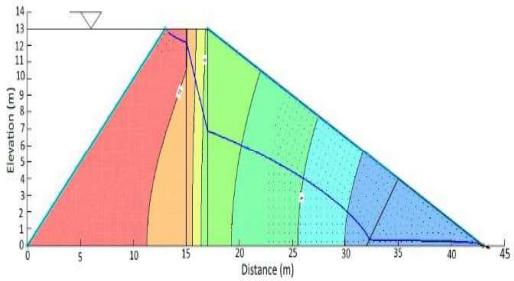


شکل (۱۰): خط فریاتیک در نسبت k_c/k_d =۰/۸

مقادیر a_0=۰/۴۵ و h_4=۹/۴۵ و y_1=۱/۶۷ نشان‌دهنده نتایج حاصل از این تغییرات است. میزان افت نیز در نرم‌افزار برابر ۰/۸۸ و در حل تحلیلی رزک برابر ۲/۵۳ شد. همچنین از جایگذاری مقادیر در فرمول‌های تجربی رزک مقادیر a_0=۲/۳۳ و h_4=۸/۶۷، y_1=۰/۸ و h_2=۱۱/۲ به دست آمد. میزان خطای افت در این حالت برابر ۶۵ درصد است. مشاهده شد با افزایش میزان نسبت k_c/k_d درصد خطا افزایش پیدا کرد به‌گونه‌ای که در نسبت ۰/۱ به کمترین میزان خود رسید. برای بررسی بیشتر، ارتفاع مخزن ابتدا کاهش و سپس افزایش داده شد. با کاهش سطح آب مخزن مشاهده شد که خط فریاتیک پایین‌تر و با افزایش سطح آب مخزن خط فریاتیک در ارتفاع بالاتری تشکیل می‌گردد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) گویای این مطالب است.



شکل (۱۱): نمایش خط فریاتیک با کاهش ارتفاع سطح آب

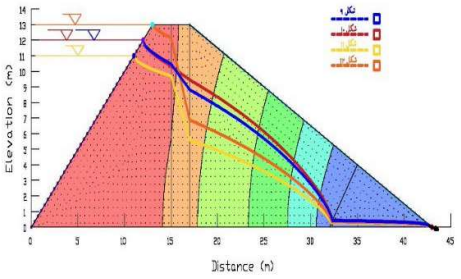


شکل (۱۲): نمایش خط فریاتیک با افزایش ارتفاع سطح آب

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

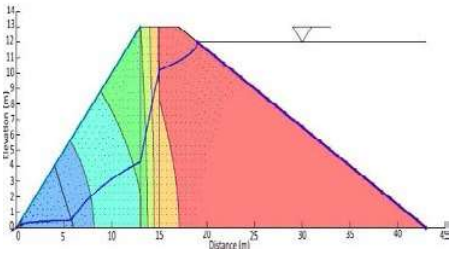
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

شکل (۱۳) اختلاف خطوط فریاتیک شکل‌های (۹) تا (۱۲) را نشان می‌دهد.



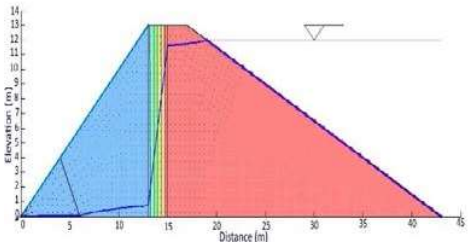
شکل (۱۳): نمایش خطوط فریاتیک شکل‌های (۹) تا (۱۲)

برای یافتن تأثیر شیب بالادست و پایین‌دست بر روی میزان خطای روش تجربی رزک، موقعیت مکانی بالادست و پایین‌دست سد با توجه به جدول (۱)، جابه‌جا شد ($k_{drain}= ۴ \times ۱۰^{-۵}$). میزان افت در نرم‌افزار المان محدود ۶ متر، a_0=۰/۵، y_1=۱/۸ و h_4= ۴/۲ حاصل شد. به‌طوری‌که در شکل (۱۴) خط فریاتیک حاصل از این تغییر قابل‌مشاهده است. همچنین از فرمول‌های رزک مقادیر a_0=۰/۸۲، h_4=۳/۵، y_1=۰/۴۲ و h_2=۱۱/۵۸ به دست آمد... مشاهده شد که میزان افت درروش تجربی رزک ۸ متر شد؛ بنابراین میزان خطای افت ۲۵٪ و میزان خطای h_4 برابر با ۱۶٪ به دست آمد.

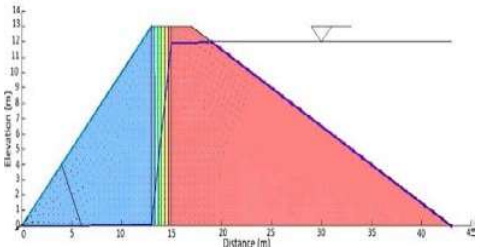


شکل (۱۴): نمایش خط فریاتیک در حالت جابجایی بالادست و پایین‌دست

ازآنجاکه در نمونه سدهای واقعی این نسبت نفوذپذیری بسیار پایین است، برای تعمیم روش تجربی رزک از نسبت ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ نیز استفاده شد (شکل‌های (۱۵) و (۱۶)). خلاصه مقایسه، حاصل از محاسبات در جدول (۲) ارائه شده است.



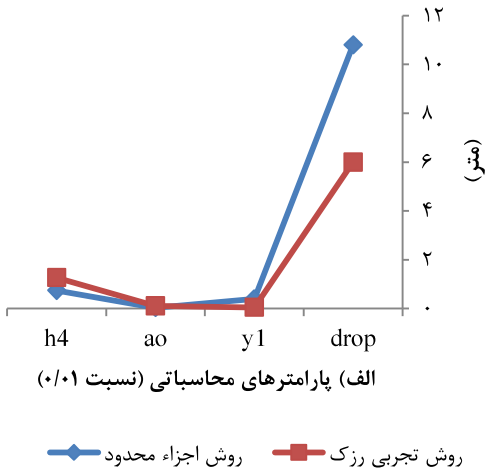
شکل (۱۵): نمایش خط فریاتیک با نسبت k_c/k_d =۰/۰۱



شکل (۱۶): نمایش خط فریاتیک با نسبت k_c/k_d =۰/۰۰۱

جدول (۲): مقایسه‌های روش‌های تجربی و اجزا محدود در نسبت‌های ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱

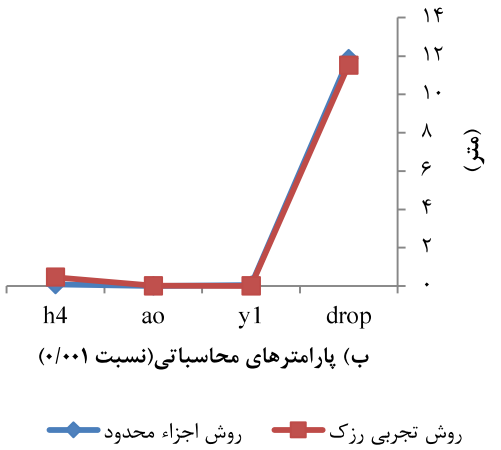
پارامترهای محاسباتی (متر)	روش اجزا محدود		روش تجربی رزک	
K_c/k_d	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱
h_4	۰/۷۴	۰/۰۸	۱/۲۷	۰/۴۶
a_0	۰/۰۴	۰/۰۰۴	۰/۱۱۴	۰/۰۱۵
y_1	۰/۴	۰/۰۴۲	۰/۰۴۷۵	۰/۰۰۶۲۵
drop	۱۰/۸	۱۱/۸۷	۶	۱۱/۵۳



الف) پارامترهای محاسباتی (نسبت ۰/۰۱)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]



ب) پارامترهای محاسباتی(نسبت ۰/۰۰۱)

شکل (۱۷): مقایسه نموداری روش تجربی رزک و اجزاء محدود در (الف) نسبت ۰/۰۱ و (ب) نسبت ۰/۰۰۱

با مقایسه‌ی دو نمودار شکل (۱۷) مشخص شد با تعمیم روش تجربی رزک در نسبت‌های پایین‌تر این میزان خطا کمتر از ۳٪ خواهد بود. علت وجود خطا را می‌توان به دلایل زیر برشمرد:

الف) ازآنجاکه در روش تجربی رزک از نتایج آزمایشگاهی استفاده‌شده، این عامل می‌تواند به‌شدت در پدید آمدن خطا مؤثر باشد چراکه علاوه بر محدودیت در آزمایشگاه، خطاهای دستگاهی و چشمی ازجمله اندازه‌گیری وجود دارد.

ب) در نرم‌افزار از روش اجزا محدود استفاده شده است که یک روش عددی نسبتاً دقیق است و در روش تجربی رزک با به‌کارگیری از ساده‌سازی و استفاده از فرمول‌های متفرقه خود باعث ایجاد خطا شده است.

ج) مدل رزک دارای ابهاماتی ازجمله مشخص نبودن دقیق شکل سد، زوایای آلفا و بتا و میزان نفوذپذیری‌ها به‌ویژه نفوذپذیری فیلتر است.

پیشنهاد می‌شود که درشیب‌های مختلف این روش تکرار شود تا زاویه بهینه حاصل شود. همچنین با روش‌های تجربی دیگر و یا عددی مانند تفاضل محدود نیز این روش مورد صحت‌سنجی قرار گیرد.

نتیجه گیری

با تغییر نفوذپذیری‌ها به‌شرط ثابت ماندن نسبت نفوذپذیری هسته به بدنه سد، خط فریاتیک تغییر بسیار ناچیزی درروش اجزا محدود خواهد داشت به‌طوری‌که می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. درروش تجربی رزک نیز تنها این نسبت ذکر شده و از بیان میزان نفوذپذیری‌ها اجتناب شده است؛ بنابراین خط فریاتیک در نسبت نفوذپذیری یکسان، مستقل از مقدار نفوذپذیری هسته و بدنه عمل می‌کند. در نسبت‌های کم نفوذپذیری هسته به بدنه، خطای خط فریاتیک و میزان افت به حداقل خود می‌رسد به‌گونه‌ای که این میزان در نسبت ۰/۱ از ۰/۴ و ۰/۸ کمتر شد. همچنین مشخص شد که با کاهش شیب سطح بالادست، خطای افت از ۴۳٪ به ۲۵٪ خواهد رسید. همچنین با تعمیم روش تجربی رزک در نسبت‌های پایین‌تر این میزان خطابه کمتر از ۳٪ می‌رسد. با تغییر سطح آب مخزن در بالادست خط فریاتیک و مناطق اشباع دچار تغییر شدند. با افزایش سطح آب مخزن خط فریاتیک به سمت بالاتر و با کاهش سطح آب مخزن خط فریاتیک به سمت پایین‌تر کشیده شد. همان‌طور که خروجی‌ها نشان دادند با افزایش سطح آب در بالادست منطقه بیشتری از بدنه اشباع خواهد شد. عوامل زیادی در ایجاد خطا مؤثر بود که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از نتایج آزمایشگاهی در روش تجربی رزک اشاره کرد.

مراجع

۱- امین‌جواهری، ا. و پاک‌نیت، ا. (۱۳۹۱). "تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از GeoStudio"، انتشارات نشر علم عمران، ۳۱۴ ص.

۲- شاهنگیان، ع. و شمسایی، ا. (۱۳۸۰). "تحلیل تراوش در سدهای خاکی با مدل‌های الکتریکی"، کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی، ۱۲ تا ۱۳ اردیبهشت‌ماه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صفحات ۱ تا ۸.

۳- صدرنژاد، ا. ا. (۱۳۹۰). "سدهای خاکی و تحلیل عددی آن"، انتشارات دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، ۶۹۸ ص.

۴- علی نژاد، ح. و زمردیان، م. ع. (۱۳۸۹). "بهینه‌یابی زهکش مایل و افقی در سدهای خاکی همگن"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت‌ماه، دانشگاه فردوسی مشهد، صفحات ۱ تا ۸.

۵- قاسم‌زاده، ح. (۱۳۸۹). "تراوش در خاک اشباع و غیراشباع"، انتشارات دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، ۳۲۸ ص.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

۶- نجم، ک. (۱۳۷۹). "رفتار سنجی و ابزار دقیق در سدها"، چهارمین کنفرانس سدسازی ایران، تهران، صفحات ۴۷۲ تا ۴۸۴.

۷- وفائیان، م. (۱۳۹۱). "سدهای خاکی، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان"، ۵۱۲ ص.

۸- هاشمی، س. م. (۱۳۹۴). "تعیین سطح فریاتیک به روش تحلیل عددی به‌منظور بررسی تراوش و پایداری سدهای خاکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی (ره).

9- Abhilasha P.S. and Antony Balan T.G. (2014). “Numerical Analysis of Seepage in Embankment Dams.” *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 4, 13- 23.

10- Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D. (1992). Geotechnical Engineering of Embankment Dams. Publisher: Aa Balkema, Rotterdam, Brookfield, ISBN-10: 9054101288.

11- Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M. (2000). “A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping.” *Canadian Geotechnical Journal*. 37(5), 1025–1061.

12- Hasani, H., Mamizadeh, J. and Karimi, H. (2013). “Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fills Dams Using Numerical Models (Case Study: Ilam Dam- Iran).” *World Applied Sciences Journal*. 21(9), 1398-1402.

13- Mishra, G. and Singh, A. (2005). “Seepage through a Levee.” *International journal of geo-mechanics ASCE*. 5(1),74-79.

14- Noori, B. M. A. and Ismaeel, KH. S. (2011). “Evaluation of Seepage and Stability of Duhok dam.” *Al-Rafidain Engineering journal*. 19(1), 42-58.

15- Rezk, M. and Senoon, A. A. (2011). “Analytical solution of seepage through earth dam with an internal core.” *Alexandria Engineering Journal*. 50(1), 111–115.

16- Sherard J. L., Woodward R. J., Gizienski S. F. and Clevenger W. A. (1963). Earth and Earth-Rock Dams. John Wiley and Sons. New York.

17- Ziaie Moayed, R., Rashidian, V. and Izadi, E. (2012). “Evaluation of phreatic line in homogeneous earth dams with different drainage systems.” Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, pp: 619-626.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]

Evaluation of the Numerical and Experimental Methods To Determine the Phreatic Surface Due To Changes In Level of Permeability, Reservoir Water Level and Earth Dam Geometry

Mehdi Komasi [*1]
Seyed Mohammadreza Hashemi [2]
Mohammadreza Goodarzi [3]
Seyed Mehdi Hashemi [4]

Abstract

To investigate the flow and drawing flow net of earth dams, the first important point is determining first flow line location which is known as saturation line or phreatic line. In this paper, a dam is simulated with GeoStudio software; then, the place of phreatic curve, intersection of that with downstream slope and the drop before and through passing the core were analyzed and the results were compared with Rezk's experimental solution. Moreover, the effects of changes in the water level of the reservoir, the relative value of the different permeability and slope changes in upstream and downstream on the phreatic curve have been address. Results have shown that phreatic line with the relative value of the same permeability is not dependent on the value of the permeability. In addition, the assumed relative value of k_c/k_d = 0.1, in Rezk's experimental solution, caused 25% error which is reduced to 3% by using Rezk method in the lower Permeability ratios. As a result, the result of Rezk's experimental solution is near to finite element method. It has also been determined that the rate of error is changed while the geometry of the dam is changed; i.e. the error decreased from 43% to 25% by reducing upstream slope.

Keywords

Earth dams, Permeability, Phreatic line, Rezk, Seepage.

1 Assistant Professor, Hydraulic structure Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Ayatollah Borujerdi, Borujerd, Iran. komasi@abru.ac.ir
2* Master Student of water and hydraulic structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering University of Ayatollah Borujerdi, Borujerd, Iran.
3 Assistant Professor, Hydraulic structure Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Ayatollah Borujerdi, Borujerd, Iran.
4 M.Sc. of Geotechnical Engineering, Engineering Organization of Arak.
Received: 2016/05/07 Accepted: 2016/08/14

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.2.2]