

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

مهدی کماسی<sup>۱\*</sup>

سیدمحمد رضا هاشمی<sup>۲</sup>

محمد رضا گودرزی<sup>۳</sup>

سیدمهدی هاشمی<sup>۴</sup>

### 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 پایین دست و گذر از پوسته پایین دست، میزان افت قبل از هسته و همچنین پس از عبور از آن به عنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با حل تجربی رزک مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین اثر تغییرات سطح آب مخزن، نسبت نفوذپذیری‌های مختلف و تغییر شیب سطح بالادست و پایین دست بر منحنی فریاتیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته 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  $0/1$  فرض شده در روش تجربی رزک دارای  $25\%$  خطا است که با تعمیم روش تجربی رزک در نسبت‌های پایین تر میزان خطا به کمتر از  $3\%$  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 به گونه‌ای که با کاهش شیب سطح بالادست خطای افت از  $43\%$  به  $25\%$  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](mailto: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.

**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 مهندسی 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 در این بین حدود ۳۴ درصد سدها در پنج سال اول پس از ساخت و شروع کار سد و آگیری آن‌ها تخریب شده‌اند. بررسی‌های جامع اخیر توسط فاستر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۰) و فل<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۲) نشان می‌دهد که فرسایش داخلی و پدیده رگاب<sup>۳</sup> 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 افزایش یافته 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 فریاتیکی مشهور است، در پایداری سد خاکی تأثیرگذار است (ضیائی موئید<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). سطح فریاتیکی درون یک سد می‌تواند توسط طراحی درست زهکش کنترل شود. حل ترسیمی معادله لاپلاس حرکت آب در خاک در حالت دوبعدی منتهی به رسم 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 ارائه شده است که مبنای کار آن‌ها

استفاده از روش‌های عددی مختلف مانند تفاضل محدود و اجزاء محدود است (شرارد<sup>۵</sup> 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. از آنجاکه تعیین خط فریاتیکی در سدهای خاکی در دوران بهره‌برداری اهمیت زیادی دارد، به‌منظور دستیابی به این هدف، پژوهشگران روش‌های تحلیلی و تجربی مختلفی از جمله روش تجربی رزک<sup>۶</sup> را پیشنهاد کرده و داده‌های حاصله را به‌صورت مستمر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند تا در نهایت سطح فریاتیکی 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 شمسانی (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 کاساگراند<sup>۷</sup> را اصلاح نمودند. در روش 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 استفاده شده درحالی‌که رزک و سنون<sup>۸</sup> (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 ارائه شده توسط روزانوف<sup>۹</sup> 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 کاهش یافته است. همچنین با افزایش نسبت

<sup>7</sup> Casagrande

<sup>8</sup> Senoon

<sup>9</sup> Rozanov

<sup>1</sup> Foster

<sup>2</sup> Fell

<sup>3</sup> Piping

<sup>4</sup> Ziaie Moayed

<sup>5</sup> Sherard

<sup>6</sup> Rezk

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 مورد مطالعه 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 ساخته شده و به سه منطقه تقسیم شده 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 گرفته شده است. هدف از روش پیشنهادشده برای کاهش سطح فریاتیک در هر منطقه و به‌ویژه کاهش آن در منطقه دوم است (رزک و سنون، ۲۰۱۱).

نفوذپذیری هسته به بدنه، میزان افت خط فریاتیک در هسته کاهش و با افزایش عرض هسته، این میزان افزایش می‌یابد. از طرفی آبهیلاشا<sup>۱</sup> و بالان<sup>۲</sup> (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، مورد استفاده قرار گرفته‌اند را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل‌سازی با SEEP/W از صحت و دقت قابل قبول و بالایی برخوردار است و می‌تواند برای مسائل بسیار بزرگ و پیچیده نیز کارآمد و اقتصادی باشد. در این راستا نوری<sup>۳</sup> و اسماعیل<sup>۴</sup> (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 قرار دادند. همچنین صحت برنامه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سد مورد آزمون قرار گرفت و نتایج، صحت قابل قبولی را برای برنامه نشان داد. میشرا<sup>۵</sup> و سینگ<sup>۶</sup> (۲۰۰۵) روند تراوش در یک سد خاکی همگن دارای فیلتر پاشنه‌ای افقی را با استفاده از روش اجزا محدود مورد بررسی قرار دادند. برای آسان‌سازی مسئله سد را ایزومتریک و واقع شده 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 پیرومتریک 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<sup>۷</sup> 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

<sup>6</sup> Singh

<sup>7</sup> Hasani

<sup>1</sup> Abhilasha

<sup>2</sup> Balan

<sup>3</sup> Noori

<sup>4</sup> Ismaeel

<sup>5</sup> Mishra

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:

$$Q_1 = K_d \times a_0 \quad (2)$$

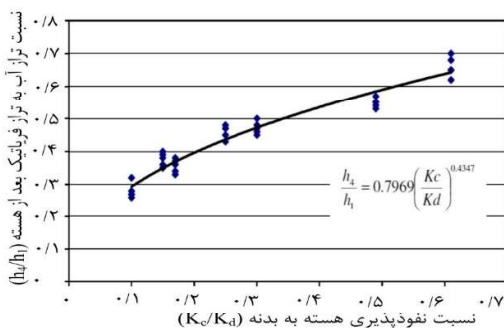
$$Q_1 = \frac{K_d}{2L_f} (h_4^2 - a_0^2) \quad (3)$$

$$Q_1 = \frac{k_d}{2l} (2h_1y_1 - y_1^2) \quad (4)$$

$$Q_1 = \frac{k_c}{2l_c} [(h_1 - y_1)^2 - (h_1 - y_1 - y_2)^2] \quad (5)$$

$$d = h_1 - (y_1 + y_2 + h_4) \quad (6)$$

$Q_1$  = 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.

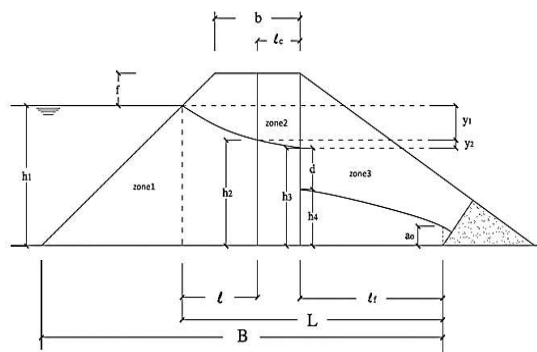


شکل (۲): نمودار رابطه  $h_4/h_1$  با  $K_c/K_d$  (رزک و سنون، ۲۰۱۱)

### مدل‌سازی اجزا محدود برای تعیین خط فریاتیک

نرم‌افزار ژئو استودیو<sup>۳</sup> از جمله 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 در زمینه‌ی 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 (امین‌جوهری و پاک‌نیت، ۱۳۹۱؛ قاسم‌زاده، ۱۳۸۹).

در روش تجربی رزک میزان ارتفاع تلاقی سطح فریاتیک با آغاز فیلتر با توجه به رابطه‌ی کوزنی<sup>۱</sup> محاسبه‌شده است. همچنین درصد  $h_4/h_1$  از نتایج آزمایشگاهی انجام‌شده توسط رزک یافت می‌شود. از راه‌حل پاولوفسکی<sup>۲</sup>، 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).

$$\frac{h_4}{h_1} = 0.7969 \left( \frac{K_c}{K_d} \right)^{0.4374} \quad (1)$$

$K_c$  = 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  $a_0$  را می‌توان طبق روابط کوزنی (رابطه ۲) و پاولوفسکی (رابطه ۳) یافت.

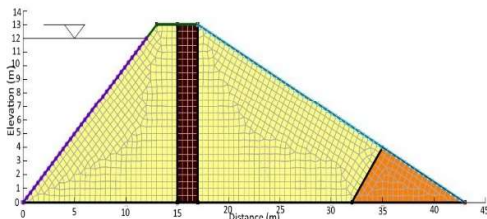
<sup>3</sup> GeoStudio

<sup>1</sup> Kozeny

<sup>2</sup> Pavlovsky

**تخصیص مصالح به بدنه و پی**

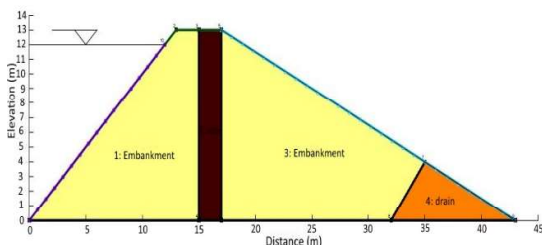
برای مصالح به کار رفته در سد، پس از ساخت هندسه مدل، رفتار مدل اشباع/ غیراشباع که شناخته‌ترین مدل در مصالح خاکی است استفاده شده است. در شکل (۴) اختصاص مصالح به قسمت‌های مختلف سد نشان داده شده است.



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

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

واحد‌ها	نفوذپذیری و ارتفاع	مصالح
سانتی‌متر بر ثانیه	$1 \times 10^{-7}$	هسته رسی ( $K_c$ )
سانتی‌متر بر ثانیه	$1 \times 10^{-4}$	فیلترها
سانتی‌متر بر ثانیه	$1 \times 10^{-6}$	بدنه سد ( $K_d$ )
متر	۱۲	ارتفاع تراز آب تا بستر ( $h_1$ )
متر	۴	پهنای تاج سد (b)
متر	۲	عرض هسته ( $L_c$ )
متر	۱۵	فاصله از انتهای هسته تا ابتدای فیلتر ( $L_f$ )
متر	۱	ارتفاع آزاد آب (f)
-	۰/۱	$K_c/K_d$



شکل (۴): تخصیص مصالح به مدل عددی سد

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 ذکر شده از داده‌های جدول (۱) جهت ترسیم سد استفاده شده است.

**تعیین مش بهینه در مدل**

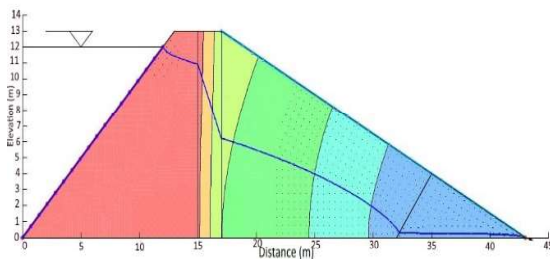
در مش بندی نسبت طول به عرض نواحی، حدود نیم واحد انتخاب شد و نسبت مساحت زون‌های مجاور از یک تجاوز نکرد چراکه این نسبت اگر از ۱/۵ تجاوز نماید، از دقت جواب‌ها کاسته می‌شود. تعیین ابعاد مدل سد با توجه به جدول (۱) صورت گرفته است. با انجام مدل‌سازی‌های متعدد مش بهینه مشخص شد. تعداد حدود ۱۲۵۵ المان و ۱۳۱۲ گره استفاده شده است که در شکل (۳) مدل‌سازی هندسی نمایش داده شده 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).

## نتایج

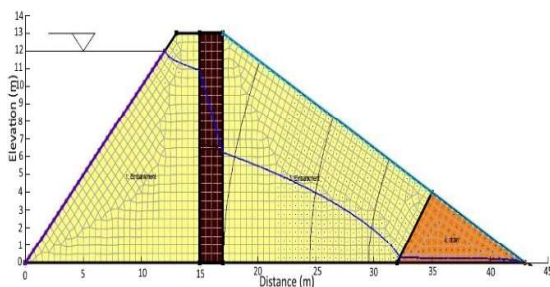
### مکان یابی خط فریاتیك

با مدل رزک می توان دریافت که الگوی خط فریاتیك در ناحیه اول و سوم سد بر همدیگر منطبق بوده و تنها الگوی خط فریاتیك درون هسته در دو مدل متفاوت است، به این ترتیب که در مدل رزک خط فریاتیك دارای انحنا است در حالی که بر اساس نتایج نرم افزار این خط دارای شیب زیادی است. میزان خطای افت نیز برابر ۴۳٪ به دست آمد. از آنجاکه میزان نسبت  $k_c/k_d$  برابر ۰/۱ مطابق شرایط مدل رزک فرض شد، برای به دست آوردن تأثیر افزایش و یا کاهش هم زمان میزان نفوذپذیری بر نتایج خروجی نمودار و یافتن تطابق بیشتر با مدل رزک این معیار تغییر داده شد به طوری که میزان  $k_c/k_d$  همان مقدار ثابت ۰/۱ باشد. برای این کار ابتدا نفوذپذیری ها در نرم افزار کاهش داده شد به طوری که  $K_c = 1 \times 10^{-11}$  و  $k_d = 1 \times 10^{-10}$  و  $k_{drain} = 1 \times 10^{-8}$  شود.

نتایج حاصل از این تغییر در شکل (۷) نمایش داده شده است. سپس نفوذپذیری ها افزایش داده شد به طوری که  $k_c = 1 \times 10^{-4}$  و  $k_d = 1 \times 10^{-3}$  و  $k_{drain} = 1 \times 10^{-1}$  شود. نتایج حاصل از این تغییر در نمودار شکل (۸) آورده شده است. همان گونه که در شکل (۸) ارائه شده است میزان تغییرات حاصل بسیار کم و قابل چشم پوشی است.



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



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

سد

پس از مرحله ساخت بدنه، مدل سازی مرحله آبیگری و تحلیل تراوش سد در حالت تراوش پایدار، با توجه به خصوصیات نفوذپذیری مصالح و نیز نسبت تخلخل آن ها مطابق جدول (۱) انجام شد و در نهایت خط فریاتیك تعیین گردید. شکل های (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 فریاتیك) ندارد. طبق روش حل تجربی مطالعاتی رزک و با توجه به مشخصات هندسی و خصوصیات مواد و مصالح بکار رفته در ساخت سد می توان میزان  $h_4, a_0, Q_1, y_1, h_2, y_2, h_3$  و نهایتاً  $d$  را محاسبه نمود و صحت سنجی خط فریاتیك را با نرم افزار ژئو استودیو تأیید کرد.

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

$$\frac{h_4}{h_1} = 0.7969 \left( \frac{K_c}{K_d} \right)^{0.4374} \Rightarrow h_4 = 3.51 \text{ m} \quad (7)$$

$$Q_1 = K_d \times a_0 = \frac{K_d}{2L_f} (h_4^2 - a_0^2) \quad (8)$$

$$a_0 = \frac{1}{30} ((3.5)^2 - (a_0)^2) \Rightarrow a_0 = 0.41 \text{ m}$$

$$Q_1 = a_0 \times K_d = \frac{k_d}{2l} (2h_1 y_1 - y_1^2) \quad (9)$$

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

$$y_1 = 0.14, h_2 = 11.86 \text{ m}$$

$$Q_1 = \frac{k_c}{2l_c} [(h_1 - y_1)^2 - (h_1 - y_1 - y_2)^2] \quad (10)$$

$$= 0.41 k_d$$

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

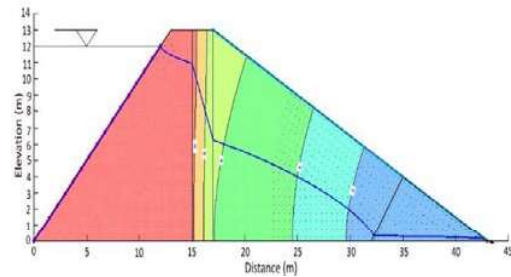
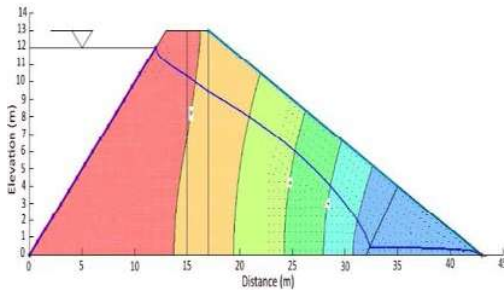
$$h_3 = h_2 - y_2 = 11.16 \text{ m} \quad (11)$$

$$\text{drop } (d) = h_3 - h_4 = 7.65 \text{ m} \quad (12)$$

نتایج تحلیل حاصل از نرم افزار نیز (شکل های (۵) و (۶)) به شرح زیر است:

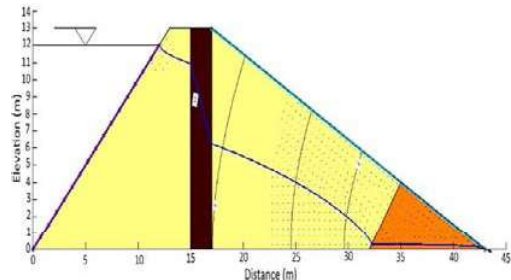
میزان افت از ابتدای فیلتر تا انتهای فیلتر برابر ۴/۶۸ به دست آمد که در آنالیز تحلیلی این میزان برابر ۸/۳۵ است. همچنین  $a_0 = ۰/۳۱$ ،  $h_4 = ۶/۲۴$  و  $y_1 = ۱/۰۸$  است. با مقایسه خط فریاتیك به دست آمده (شکل های ۵ تا ۱۲) از نرم افزار

شکل (۹): خط فریاتیگ در نسبت  $k_c/k_d = 0/4$



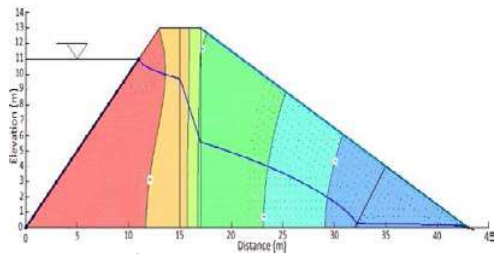
شکل (۷): تعیین خط فریاتیگ با کاهش نفوذپذیری‌ها

شکل (۱۰): خط فریاتیگ در نسبت  $k_c/k_d = 0/8$



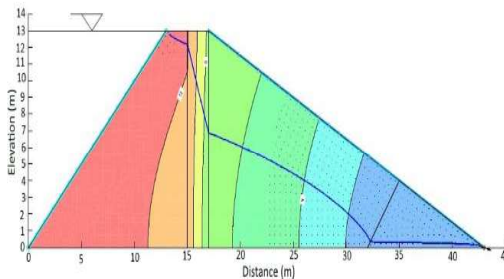
شکل (۸): تعیین خط فریاتیگ با افزایش نفوذپذیری‌ها

مقادیر  $a_0=0/45$  و  $h_4=9/45$  و  $y_1=1/67$  نشان‌دهنده نتایج حاصل از این تغییرات است. میزان افت نیز در نرم‌افزار برابر  $0/88$  و در حل تحلیلی رزک برابر  $2/53$  شد. همچنین از جایگذاری مقادیر در فرمول‌های تجربی رزک مقادیر  $a_0=2/33$  و  $h_4=8/67$ ،  $y_1=0/8$  و  $h_2=11/2$  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 به گونه‌ای که در نسبت  $0/1$  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 فریاتیگ پایین‌تر و با افزایش سطح آب مخزن خط فریاتیگ در ارتفاع بالاتری تشکیل می‌گردد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) گویای این مطالب است.

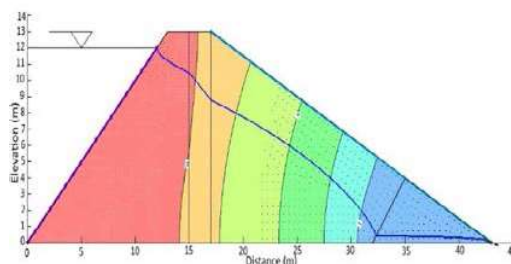


شکل (۱۱): نمایش خط فریاتیگ با کاهش ارتفاع سطح آب

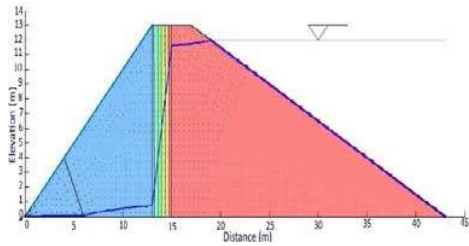
برای بررسی بیشتر، نسبت‌های  $k_c/k_d$  برابر با  $0/4$  و  $0/8$  که از فرضیات میانی و انتهایی مدل رزک است برای مقایسه میزان خطا و شرایط بهینه بررسی شد. بدین منظور ابتدا در نرم‌افزار میزان  $k_c=4 \times 10^{-7}$  و  $k_d=1 \times 10^{-6}$  و  $k_c=1 \times 10^{-4}$  و  $k_d=1 \times 10^{-6}$  تنظیم گردید. نتایج حاصل در نمودار شکل (۹) قابل مشاهده است. نتایج حاصل از نرم‌افزار میزان افت را برابر  $1/66$  و مقادیر  $a_0=0/42$  و  $h_4=8/81$  و  $y_1=1/53$  نشان می‌دهد. با جایگذاری مقادیر در فرمول‌های تجربی رزک مقادیر  $a_0=1/31$  و  $h_4=6/42$  و  $y_1=0/45$  و  $h_2=11/56$  به دست آمد. میزان افت در مدل رزک برابر  $5/14$  و خطای نسبی برابر ۶۷٪ شد. در ادامه مقادیر  $k_c=8 \times 10^{-7}$  و  $k_d=1 \times 10^{-6}$  و  $k_c=1 \times 10^{-4}$  و  $k_d=1 \times 10^{-6}$  در نرم‌افزار تغییر داده شد. نتایج حاصل در نمودار شکل (۱۰) قابل مشاهده است.



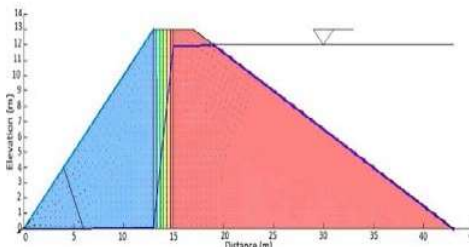
شکل (۱۲): نمایش خط فریاتیگ با افزایش ارتفاع سطح آب







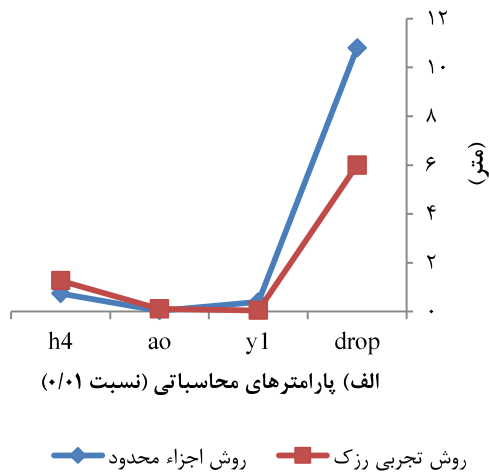
شکل (۱۵): نمایش خط فریاتیگ با نسبت  $k_c/k_a = 0.01$



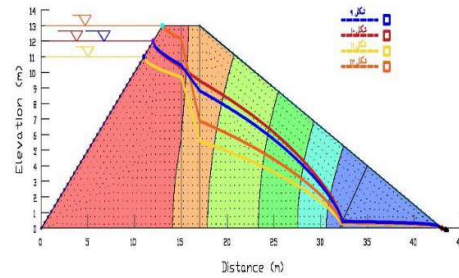
شکل (۱۶): نمایش خط فریاتیگ با نسبت  $k_c/k_a = 0.01$

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

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

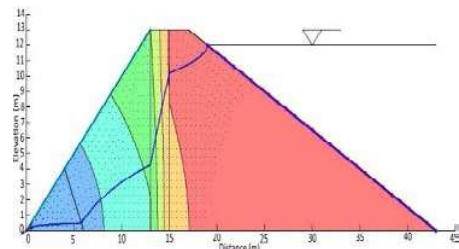


شکل (۱۳) اختلاف خطوط فریاتیگ شکل‌های (۹) تا (۱۲) را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): نمایش خطوط فریاتیگ 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 ( $k_{drain} = 4 \times 10^{-5}$ ). میزان افت در نرم‌افزار المان محدود ۶ متر،  $a_0 = 0.5$  و  $y_1 = 1/8$  و  $h_4 = 4/2$  حاصل شد. به‌طوری‌که در شکل (۱۴) خط فریاتیگ حاصل از این تغییر قابل مشاهده است. همچنین از فرمول‌های رزک مقادیر  $a_0 = 0.82$ ،  $h_4 = 3/5$  و  $y_1 = 0.42$  و  $h_2 = 11/58$  به دست آمد... مشاهده شد که میزان افت در روش 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 فریاتیگ در حالت جابجایی بالادست و پایین‌دست

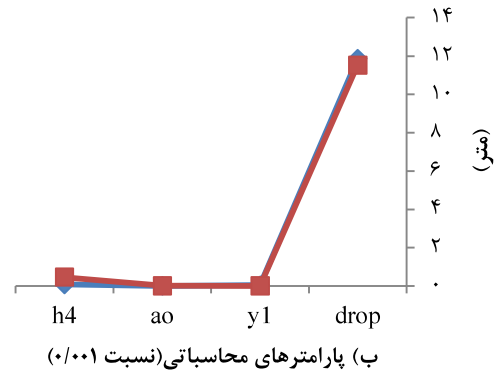
از آنجاکه در نمونه سدهای واقعی این نسبت نفوذپذیری بسیار پایین است، برای تعمیم روش تجربی رزک از نسبت ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ نیز استفاده شد (شکل‌های (۱۵) و (۱۶)). خلاصه مقایسه، حاصل از محاسبات در جدول (۲) ارائه شده است.



چشم‌پوشی کرد. در روش 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 به گونه‌ای 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 از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از نتایج آزمایشگاهی در روش تجربی رزک اشاره کرد.

### مراجع

- ۱- امین‌جوهری، 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 شمسانی، 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.



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) از آنجاکه در روش تجربی رزک از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده، این عامل می‌تواند به شدت در پدید آمدن خطا مؤثر باشد چراکه علاوه بر محدودیت در آزمایشگاه، خطاهای دستگاهی و چشمی از جمله اندازه‌گیری وجود دارد.

(ب) در نرم‌افزار از روش اجزاء 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 از جمله مشخص نبودن دقیق شکل سد، زوایای آلفا و بتا و میزان نفوذپذیری‌ها به‌ویژه نفوذپذیری فیلتر است.

پیشنهاد می‌شود که در شیب‌های 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.

### نتیجه‌گیری

با تغییر نفوذپذیری‌ها به شرط ثابت ماندن نسبت نفوذپذیری هسته به بدنه سد، خط فریاتیک تغییر بسیار ناچیزی در روش اجزاء محدود خواهد داشت به طوری که می‌توان از آن

- 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.
- 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 فریاتیگ به روش تحلیل عددی به منظور بررسی تراوش و پایداری سدهای خاکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله 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.

## 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 <sup>\*1</sup>

Seyed Mohammadreza Hashemi <sup>2</sup>

Mohammadreza Goodarzi <sup>3</sup>

Seyed Mehdi Hashemi <sup>4</sup>

### 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