



Numerical Investigation of clay blanket effect in reducing leakage from foundation of embankment dams

Meysam Nouri^{*1}, Farzin Salmasi²

Abstract

In this study, to investigate the influence of clay blanket on reducing seepage a computer model has been developed in which general equation of fluid flow through soil has been solved numerically by finite elements method. At the end, a complete and comprehensive relation for the effect of clay blanket on leakage from foundation of dams has been presented. To do this, all effective parameters have been modeled by the SEEP/W 2012 software in 350 models. One of these important parameters is the horizontal to vertical permeability ratio in foundation that has not been applied in any other research so far. This ratio should have been calculated for giving a precise relation applicable in construction works. Other parameters include thickness, length and permeability ratio of the clay cover, foundation thickness and width of the core. In the following, the results of modeling by the SPSS 23 software have been analyzed and finally, the results of the proposed relation have been compared to the results of the software and relation of the American Army Civil Engineers. The result of this comparison testifies the completeness of the proposed relation and trivial difference with the results of the modelings. Based on the analysis, the effective length for the clay blanket four times the height of water behind the dam is proposed. Also, when thickness of clay blanket is low, the impact of different levels of permeability coefficient is almost identical in reducing leakage and permeability reduction of clay blanket is effective when its thickness increases.

Keywords: Clay blanket, embankment dams, seepage control, Seep/w 2012, SPSS 23, underseepage.

Received: 2016/10/18
Accepted: 2016/10/28

بررسی عددی تأثیر پتوی رسی در کاهش نشت از پی سدهای خاکی

میثم نوری^{*۱}، فرزین سلماسی^۲

چکیده

در این مطالعه به منظور بررسی دقیق تأثیر پتوی رسی در کاهش مقادیر نشت، مدل کامپیوتری تهیه شده است و معادله عمومی جریان آب در خاک به روش المان محدود حل شده است. در پایان، رابطه‌ای جامع برای نشان دادن تأثیر پتوی رسی در نشت از پی سدها ارائه شده است. بدین منظور همه پارامترهای مهم و تأثیرگذار در ۳۵۰ مدل توسط نرم‌افزار SEEP/W 2012 مدل‌سازی شده است. یکی از این پارامترهای مهم و تأثیرگذار، نسبت ضریب نفوذپذیری افقی به عمودی پی است که در مطالعات قبلی اعمال نشده و برای بدست آوردن رابطه‌ای دقیق و قابل استفاده باید منظور می‌گردید. سایر پارامترها شامل ضخامت، طول و ضریب نفوذپذیری پتوی رسی، ضخامت پی و عرض هسته می‌باشند. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار SPSS 23 و رگرسیون آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در پایان نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی با نتایج نرم‌افزار و رابطه اداره عمران ارتش آمریکا مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از این مقایسه کامل بودن رابطه پیشنهادی و اختلاف بسیار کم آن با نتایج بدست آمده از مدل‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل‌ها، طول مؤثر پتوی رسی چهار برابر ارتفاع آب پشت سد پیشنهاد شده است. همچنین در ضخامت‌های کم پتوی رسی، تأثیر مقادیر مختلف ضریب نفوذپذیری بر مقدار نشت تقریباً یکسان است و کاهش نفوذپذیری پتوی رسی زمانی مؤثر است که ضخامت آن افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: پتوی رسی، سدهای خاکی، کنترل نشت، نشت از پی، SEEP/W 2012، SPSS 23.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۷

1- Graduate student of hydraulic structures, Tabriz university, Agriculture faculty, Department of water engineering.
E-mail: meysamnouri71@gmail.com

2- Department of water engineering, Agriculture faculty, Tabriz University, IRAN.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب.

۲- عضو هیات علمی دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب.

*- نویسنده مسئول

مقدمه

یکی از روش‌های کنترل نشت از زیر سدهای خاکی که بر روی پی‌های آبرفتی با نفوذپذیری زیاد احداث شده‌اند، استفاده از یک‌لایه پوشش با نفوذپذیری خیلی کم در سطح بستر رودخانه و کف مخزن و اتصال آن به هسته میانی سد است که در واقع نقش این پوشش و این‌گونه روش‌ها طولانی کردن مسیر جریان و در نتیجه افزایش افت پتانسیل و کاهش انرژی آب است که در نهایت موجب کاهش مقدار آب نفوذی و تلفات حاصل از آن است. این نوع پوشش پتوی رسی^۳ نامیده می‌شود.

در طراحی پتوهای رسی باید به چند نکته کلی توجه کرد، ۱. پتوی رسی زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که اولاً بدنه سد روی لایه آبرفتی با نفوذپذیری بالا قرار گیرد، ۲. سایر روش‌های آب‌بندی و کنترل نشت به دلایل فنی و اقتصادی قابل اجرا نباشد و بعضاً ترکیبی از این روش همراه با ترانشه آب‌بند استفاده می‌شود (رحیمی، ۱۳۸۳)، ۳. نکته دیگر اینکه هنگامی از پتوی رسی باید استفاده شود که بار آبی مخزن بیش از ۶۰ متر نباشد، به این دلیل که در بار بیش از این مقدار، گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده سبب نشت از پتوی رسی و به تبع آن نشت جدی و آب شستگی داخلی جدی رخ می‌دهد (مهندسین عمران ارتش آمریکا، ۱۹۸۶)، ۴. توپوگرافی محل احداث سد و در دسترس بودن مصالح نفوذناپذیر برای کم کردن هزینه‌ها، ۵. مواد نفوذناپذیر استفاده شده در پتوی رسی دقیقاً باید شبیه مواد استفاده شده در هسته رسی باشند، تراکم آن‌ها ۹۰ درصد پراکتور و درصد رطوبت ساخت آن ۲ الی ۴ درصد بیشتر از رطوبت بهینه پیشنهاد می‌شود، ۵. تأثیر پتوی رسی بستگی به مشخصات آن مانند طول، ضخامت و ضریب نفوذپذیری و هم‌چنین بستگی به نفوذپذیری و عمق پی دارد، ۶. طول پتو با کاهش نشت رابطه مستقیم دارد و با افزایش طول مقدار نشت کم‌تر می‌شود که این افزایش به حدی می‌رسد که بعد از آن مقدار، افزایش طول باعث ایجاد تغییرات جزئی و اندک در کاهش نشت خواهد شد که آن طول موردنظر ما طول بهینه پتو است و استفاده از طول بیش‌تر از آن از لحاظ اقتصادی به‌صرفه نبوده و در کارهای اجرایی توصیه نمی‌گردد، ۷. امکان ترک خوردن پتو در فصول خشک‌سالی یا در صورت

سدها و سازه‌هایی که بر روی پی‌های آبرفتی احداث شده‌اند در معرض نشت^۱ قرار دارند. بر اساس مطالعاتی که انجام شده است حدود ۳۰ درصد عامل خرابی‌هایی که در سدهای خاکی رخ می‌دهد به علت وقوع نشت از بدنه و پی آن‌ها می‌باشد (رحیمی، ۱۳۸۳)، به همین دلیل کنترل و جلوگیری از نشت امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. ماهیت کنترل نشت در واقع کنترل انرژی پتانسیل ذرات آب است که موجب نشت و تلفات بعدی آن می‌گردد. هرچند نمی‌توان مقدار نشت را به صفر رساند ولی با اتخاذ روش‌هایی می‌توان مقدار نشت را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. ایجاد هسته با نفوذپذیری کم، نشت از بدنه را به خوبی کنترل کرده و مقدار آن را کاهش می‌دهد، بنابراین مقدار نشت صورت گرفته از پی سدها بسیار قابل توجه و بیش‌تر از نشتی است که از بدنه اتفاق می‌افتد. کنترل نشت از پی به منظور جلوگیری از افزایش زیر فشار و جلوگیری از آشفستگی داخلی پی صورت می‌گیرد که در نهایت منجر به خرابی سدها می‌شوند. ممکن است با توجه به هدف پروژه مثلاً ذخیره‌سازی درازمدت، کنترل سیلاب، برق آبی بودن طرح و ... مقدار مجاز نشت در هر پروژه محدود شود (مهندسین عمران ارتش آمریکا، ۱۹۸۶). روش‌های کنترل نشت از پی عبارت‌اند از: اجرای زهکش‌های افقی، اجرای دیواره‌های آب‌بند، اجرای پتوی رسی بالادست، اجرای سکوی پایین‌دست، اجرای زهکش‌های پنجه‌ای، چاه‌های تزریق، دیوارهای بتنی و طراحی سپرهای فولادی. به دو نکته اساسی باید در انتخاب روش‌های کنترل نشت توجه کرد، اول آنکه انتخاب ناپجای روش‌های کنترل نشت مانند چاه‌های تزریق و زهکش‌های پنجه‌ای در شرایط خاص حتی موجب افزایش نشت می‌شوند و دوم آنکه در انتخاب روش‌های نشت یکی از فاکتورهای خیلی

$$F_s = \frac{i_c}{i_e}$$

مهم، ضریب اطمینان در برابر زیر فشار^۲ (i_e) است که در آن منظور از i_c گرادیان هیدرولیکی بحرانی و i_e مؤلفه عمودی گرادیان هیدرولیکی خروجی می‌باشد (مهندسین عمران ارتش آمریکا، ۱۹۸۶).

1- Seepage
2- Uplift

3- Clay Blanket

بنت در سال ۱۹۴۶ با یک روش تحلیلی دقیق تأثیر پتوی رسی و طول آن را بر کاهش نشت بررسی کرد و موفق به ارائه نتایج خوبی گردید (میهان و بنجاسویاتانان، ۲۰۱۲). او رابطه ۱ را برای طول نامحدود پتوی رسی (X_r) پیشنهاد کرد:

$$X_r = \frac{\tanh(a \times L)}{a} \quad [1]$$

$$a = \sqrt{\frac{K_b}{Z_f K_f Z_b}}$$

در این روابط L طول پتوی رسی بالادست، K_b و K_f به ترتیب ضرایب نفوذپذیری پی آبرفتی و پتوی رسی، Z_b و Z_f ضخامت پتوی رسی و ضخامت پی آبرفتی است. بحث‌های ارائه شده در مقاله بنت توسط افراد زیادی مطالعه و ارائه شد تا آنکه سازمان مهندسی ارتش آمریکا (۱۹۸۶) چهارچوب کلی مطالعات و روابط بنت را در رودخانه می‌سی‌سی‌پی آمریکا مورد مطالعه قرار داد و موفق به ارائه روابط و روش‌های جدیدی برای تجزیه و تحلیل زیر نشت شد. اداره عمران آمریکا (USBR) طبق آخرین مطالعات خود در سال ۲۰۱۴ که شکل ۱ گویای نمونه مورد مطالعه آن‌ها است، روابط زیر را برای محاسبه تأثیر پتوی رسی بالادست در مقدار نشت پیشنهاد نموده است:

$$Q = \delta K_f H \quad [3]$$

در این رابطه Q مقدار دبی نشت در واحد عرض پی، K_f ضریب نفوذپذیری پی و H ارتفاع آب پشت سد خاکی و δ ضریبی است که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

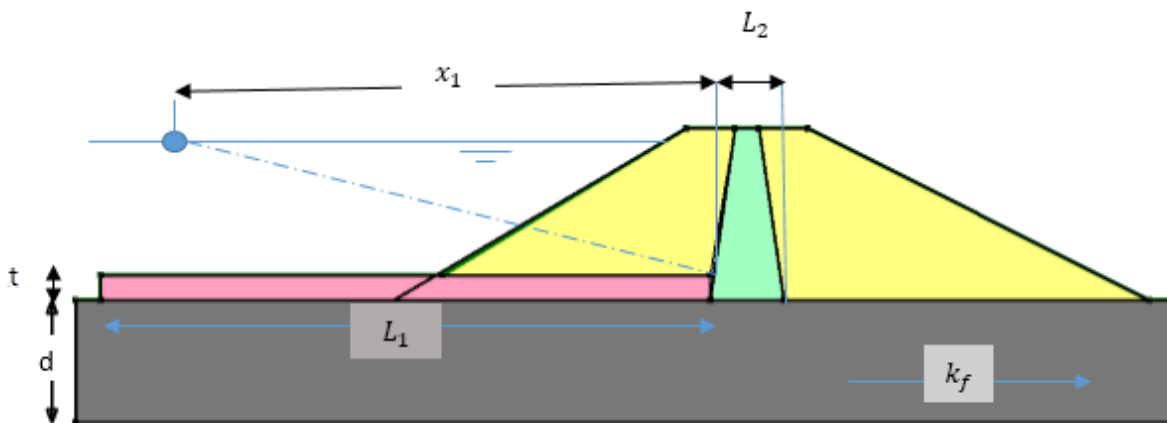
$$\delta = \frac{d}{x_1 + L_2 + 0.43d} \quad [4]$$

که در این رابطه d عمق پی آبرفتی، x_1 طول مؤثر پتوی رسی بالادست و L_2 عرض هسته سد می‌باشد. طول مؤثر پتوی رسی طبق رابطه زیر که توسط USBR ارائه شده است محاسبه می‌شود:

عدم اتصال مناسب به پی وجود دارد، ۸. امکان ایجاد رگاب^۱ در پی اگر پتو در بالای لایه شن درشت یا سنگ شکسته قرار گیرد وجود دارد، ۹. اگر سطح آب در بالادست و پایین‌دست دارای نوسانات شدید باشد باید در برابر فرسایش رواناب، خشک شدن و رشد گیاهان ریشه‌دار محافظت شود (غروی و جوادی، ۱۳۸۸).

برخی مطالعات صورت گرفته در ایران و سایر نقاط جهان بیانگر اهمیت استفاده از پتوی رسی و تأثیر آن در کاهش نشت می‌باشند. شمسایی و گوهر نژاد (۱۳۹۲) طبق مطالعاتی که در سد فریم صحرا انجام دادند به این نتیجه رسیدند که با اجرای پتوی رسی، ۷۰ درصد از مقدار نشت نسبت به حالتی که پتوی رسی به کار برده نشود کاسته می‌شود و آن‌ها طول و ضخامت پتو را به ترتیب ۱۵۰ و ۰/۷۵ متر پیشنهاد نمودند. فاروق و همکاران (۲۰۱۳) با کاربرد پتوی رسی در سد خانپور پاکستان مشاهده نمودند که مقدار دبی نشت از ۱۷/۵ مترمکعب به ۳/۷۵ مترمکعب کاهش می‌یابد. در مطالعاتی که قنبری و زریابی (۱۳۸۸) بر روی یک سد فرضی و اعمال سیستم پتوی رسی با ترانشه رسی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین پارامتر مؤثر، ضریب نفوذپذیری سیستم می‌باشد که با کاهش نفوذپذیری آن مقدار دبی نشت به صورت جدی کاهش می‌یابد، آن‌ها هم‌چنین طول مؤثر پتو رسی را چهار برابر ارتفاع آب پشت سد پیشنهاد نمودند. بتول و وندنبرگ (۲۰۱۵) در مطالعه خود نشت از پی سدی فرضی را در صورت وجود پتوی رسی با دو روش المان محدود و تئوری پتوی رسی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از بررسی عددی تأثیر پتوی رسی با نتایج حاصل از روش تئوری پتوی رسی در اکثر موارد نتایج یکسانی را به دنبال دارد. امیری و خلیلی (۱۳۹۲) تأثیر پرده آب‌بند^۲ در کاهش نشت، گرادیان خروجی و زیر فشار را هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت عددی توسط نرم‌افزار GEOSTUDIO 2007 مورد بررسی قرار دادند و با تأکید بر اینکه نتایج حاصل از نرم‌افزار و نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی باهم دارند، بهترین موقعیت پرده آب‌بند برای جلوگیری از نشت را در پایین‌دست سد عنوان نمودند.

1- Piping
2- Cut off Wall



شکل ۱- سد خاکی با وجود پتوی رسی بالادست (USBR,2014).

مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار SPSS 23 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و سعی شده است که روابطی قابل استفاده ارائه شود و در نهایت نتایج رابطه بدست آمده با روابط USBR مقایسه می‌گردد تا اعتبار سنجی رابطه موردنظر صورت گیرد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار SEEP/W صورت می‌گیرد. این نرم‌افزار، مبتنی بر روش المان محدود می‌باشد که برای مدل‌سازی تراوش و توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل نظیر خاک و سنگ تهیه شده است و قادر است جریان را در دو حالت اشباع و غیراشباع مدل کند. در نرم‌افزار SEEP/W امکان استفاده از تمام شرایط مرزی ممکن از قبیل هدکل، هد فشار، دبی و همچنین شرایط خروج آب از مدل در یک مسئله تراوش وجود دارد. نمونه مورد مطالعه در این تحقیق سدی با مشخصات کلی به صورت شکل ۲ است که در این سد K_b ضریب نفوذپذیری پتوی رسی، L_1 طول پتوی رسی، t ضخامت پتوی رسی، h_f ضخامت پی آبرفتی، L_2 عرض هسته رسی در محل اتصال به پی می‌باشد و آخرین پارامتر K_f ضریب نفوذپذیری پی آبرفتی می‌باشد که در این مطالعه سعی شده است برای انطباق بهتر و بیش‌تر نمونه مورد مطالعه با نمونه‌های واقعی موجود در طبیعت، ضریب نفوذپذیری عمودی پی K_{fy} و ضریب نفوذپذیری افقی پی K_{fx} که در سایر مطالعات نسبت این دو ضریب ۱ فرض شده

$$x_1 = \frac{\tanh(cL_1)}{C}$$

در این رابطه نیز L_1 طول پتوی رسی بالادست و C فاکتوری است که مقدار آن برابر است با:

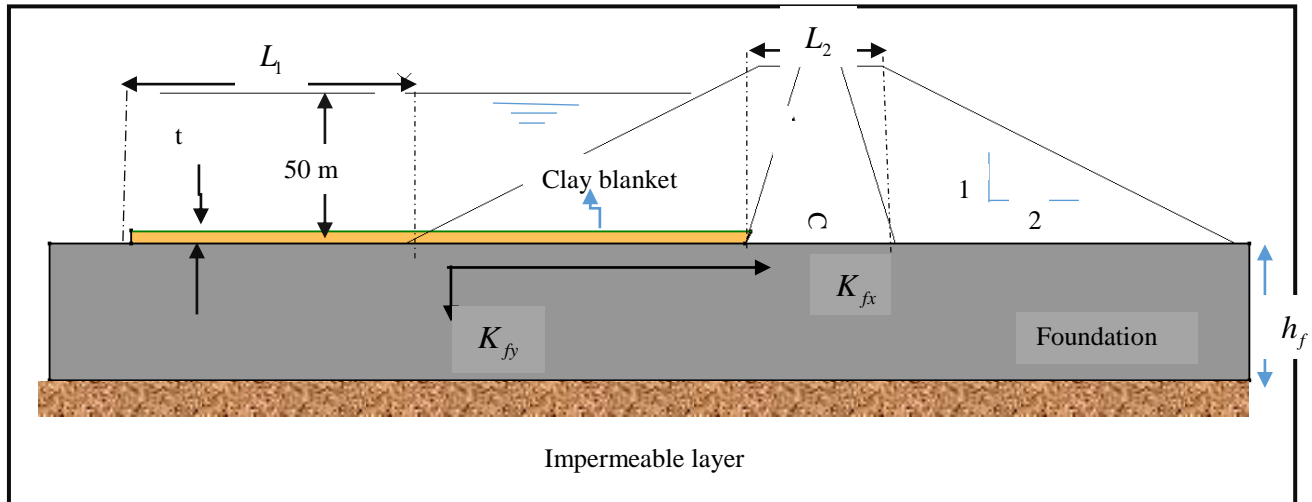
$$C = \sqrt{\frac{K_f}{K_b t d}}$$

که منظور از K_b و K_f به ترتیب ضریب نفوذپذیری پی و پتوی رسی و t ضخامت پتوی رسی نفوذناپذیر می‌باشد. سازمان مهندسی ارتش آمریکا (۱۹۸۶) در ارائه روابط بالا برای تأثیر پتوی رسی فرضیاتی را اعمال کرده و روابط طبق آن فرضیات به‌دست آمده‌اند که آن‌ها عبارت‌اند از: الف. جریان در پتوی رسی به‌صورت عمودی حرکت می‌کند، ب. جریان‌های موجود آرام و پایدارند، ج. سد یا هسته آن غیرقابل نفوذ است، د. پتوی رسی و پی آبرفتی ضخامت ثابتی دارند و افقی هستند، د. جریان در پی به‌صورت افقی فرض می‌شود.

در این تحقیق سعی می‌شود کلیه پارامترهای مهم و تأثیرگذار در پتوی رسی که عبارت‌اند از ضریب نفوذپذیری، ضخامت و طول پتوی رسی، ضخامت و ضریب نفوذپذیری پی آبرفتی و همچنین به‌منظور ارائه رابطه‌ای قابل استفاده در کارهای اجرایی، نسبت ضریب نفوذپذیری افقی و عمودی پی آبرفتی که تأثیر بسیار زیادی در نشت از پی دارد به صورت اطلاعات موجود در طبیعت اعمال شده و مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار SEEP/W صورت می‌گیرد و نتایج بدست آمده از این

جامع برای نحوه تأثیر پتوی رسی و ضرایب تأثیر هر یک از پارامترهای اثرگذار ارائه می‌شود و سعی می‌شود رابطه ارائه شده توسط اداره عمران آمریکا (USBR) اصلاح و گسترش یابد. در جدول ۱ نحوه تغییرات پارامترهای مؤثر نشان داده شده است.

است، نسبت‌های مختلفی برای آن مدل‌سازی انجام گردد، به بیان دیگر در این تحقیق خاک غیر ایزوتروپ فرض شده است. در نهایت نتایج حاصل از این مدل‌سازی‌های انجام گرفته توسط نرم‌افزار SPSS 23 و قسمت رگرسیون آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و ضریب همبستگی آن بدست می‌آید و رابطه‌ای



شکل ۲- مشخصات هندسی پارامترهای مورد استفاده در مدل‌ها.

جدول ۱- محدوده تغییر پارامترهای مورد بررسی.

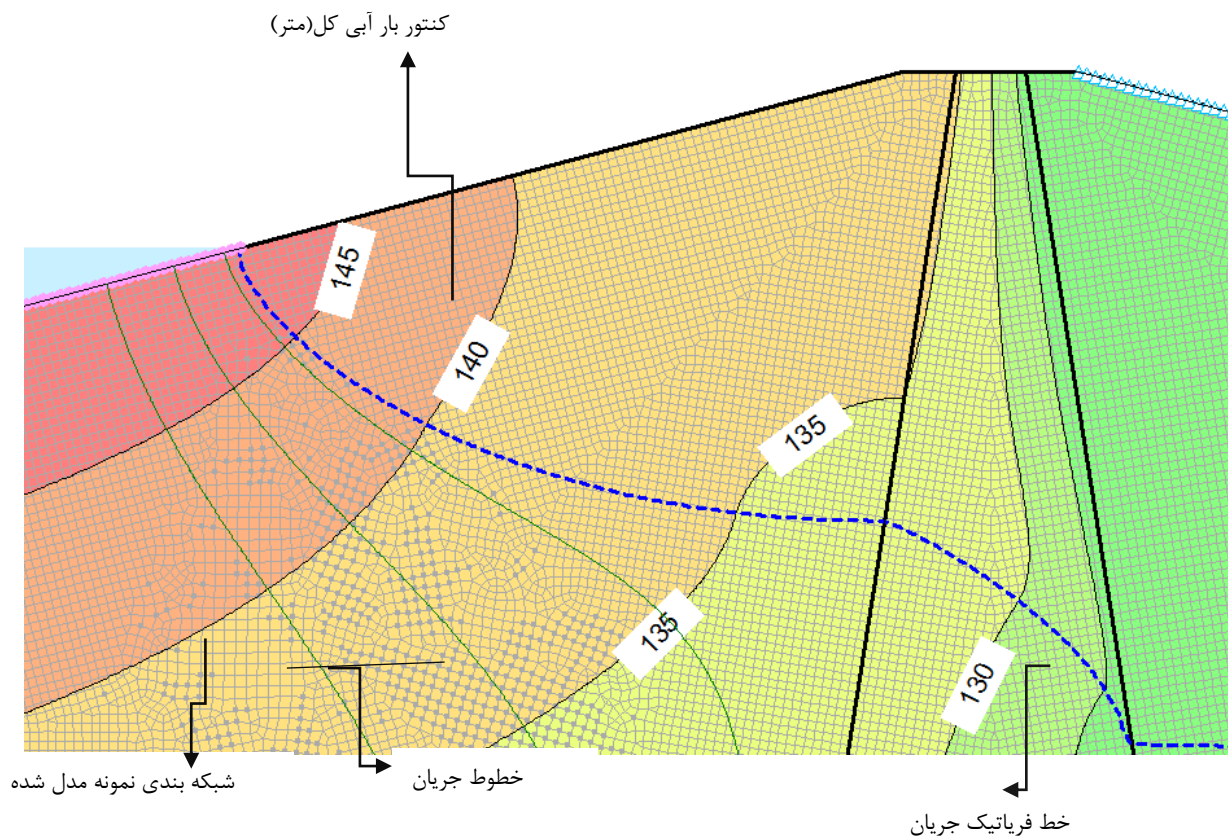
پتوی رسی	هسته رسی	پی آبرفتی	پارامترها
۱۰-۹ تا ۱۰-۶	-	۱۰-۵ تا ۱۰-۳	ضریب نفوذپذیری (متربر تانیه)
۱/۵ تا ۰/۵	-	۷۰ تا ۲۵	ضخامت (متر)
۴۰۰ تا ۲۵	۸۳ تا ۲۳	-	طول (متر)
-	-	۱۵ تا ۱	نسبت ضریب نفوذپذیری افقی به عمودی

سد و در کف مخزن، فشار صفر در پایین‌دست سد و پتانسیل نشت بر بدنه پایین‌دست سد است، هم‌چنین از المان‌های مثلثی و مستطیلی به تعداد ۱۵۰۰۰۰ عدد در اندازه تقریبی ۰/۵ متر در مدل‌سازی‌ها استفاده شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از سد خاکی مدل‌سازی شده همراه با شبکه‌بندی، خط فریاتیک^۱، منحنی‌های هم‌پتانسیل و خطوط جریان را نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز یک نمونه اجرا شده توسط نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

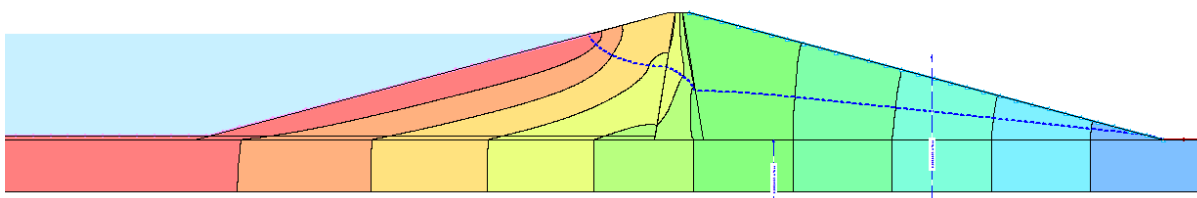
مشاهده می‌شود برای رسیدن به هدف موردنظر علاوه بر پارامترهای ذکر شده، عرض هسته رسی و ضخامت پی آبرفتی که دو عامل مهم و تأثیرگذار در مقدار نشت از پی آبرفتی هستند نیز تغییراتی داده می‌شوند و تأثیر این پارامترها هم با توجه به مسلم بودن تأثیر آن‌ها، در روابط اعمال خواهد شد و هم‌چنین در مدل‌سازی‌های صورت گرفته، بار آبی مخزن ۵۰ متر در نظر گرفته شده است.

این متغیرها و تغییرات اعمال شده بر آن‌ها در غالب ۳۵۰ مدل توسط نرم‌افزار SEEP/W 2012 مدل‌سازی شدند. شرایط مرزی مورد استفاده در این نرم‌افزار بار آب در بالادست

1- phreatic line



شکل ۲- شبکه بندی و جزئیات نمونه مدل شده.



شکل ۴- نمونه مدل شده توسط SEEP/W.

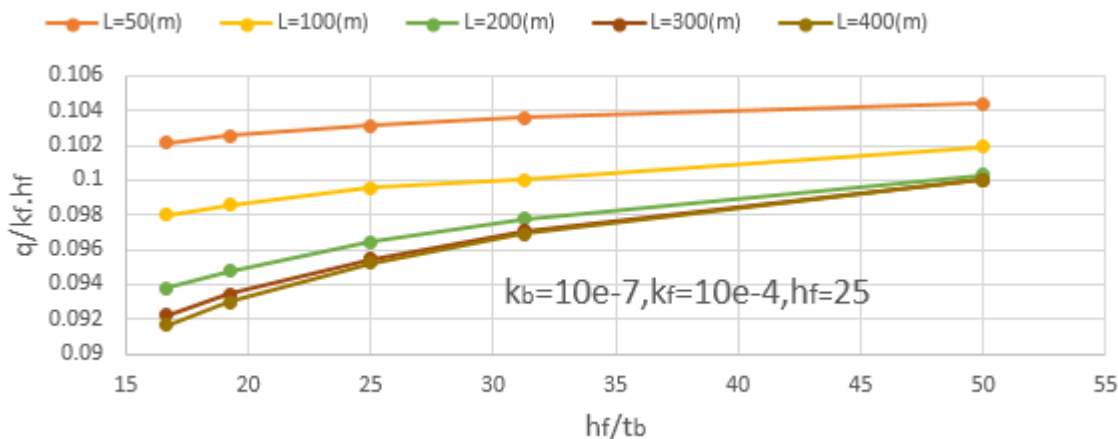
نتایج و بحث

ارتفاع آب ۵۰ متر، مقدار نشت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد اما در طول‌های بیش‌تر از آن مقدار، با افزایش طول مقدار کاهش نشت ناچیز است، می‌توان نتیجه گرفت که در سدهایی با شرایط نمونه مورد مطالعه، طول مؤثر پتوی رسی ۲۰۰ متر یا چهار برابر ارتفاع آب پشت سد خواهد بود و افزایش

شکل ۵ تأثیر طول پتوی رسی و ضخامت آن را در کاهش نشت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش طول پتوی رسی، مقدار دبی نشت کاهش خواهد یافت که در اینجا افزایش طول تا ۲۰۰ متر به ازای

ضخامت عنوان کرد زیرا با افزایش آن همواره مقدار نشت کاهش قابل توجهی دارد. ناگفته نماند دلایل تأثیر افزایش طول و ضخامت در کاهش نشت به علت افزایش مسیر جریان و کاهش گرادیان هیدرولیکی است.

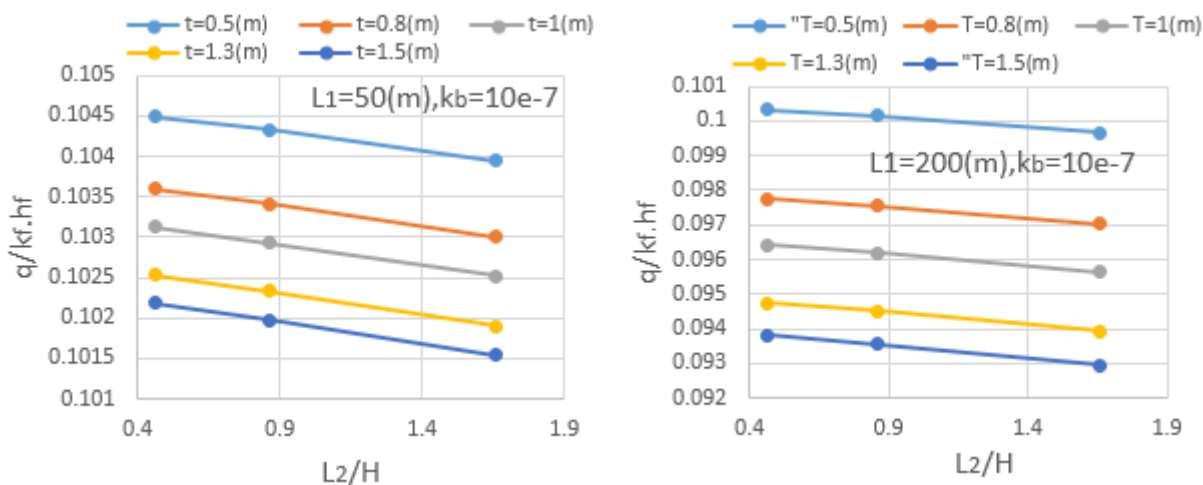
طول سبب تغییرات ناچیزی در نشت می‌شود که اجرای آن در کارهای عملی اقتصادی نیست. از شکل ۵ هم‌چنین به این نتیجه می‌توان رسید که با افزایش ضخامت پتوی رسی به ازای طول مشابه مقدار دبی کاهش خواهد یافت، همان‌طور که در شکل نمایان است نمی‌توان الگوی خاصی برای مقدار بهینه



شکل ۵- تأثیر طول پتوی رسی و ضخامت آن در کاهش نشت.

ثابت است ولی تأثیر آن در طول‌های کم‌تر پتوی رسی بیشتر از وقتی است که طول پتوی رسی بیشتر باشد.

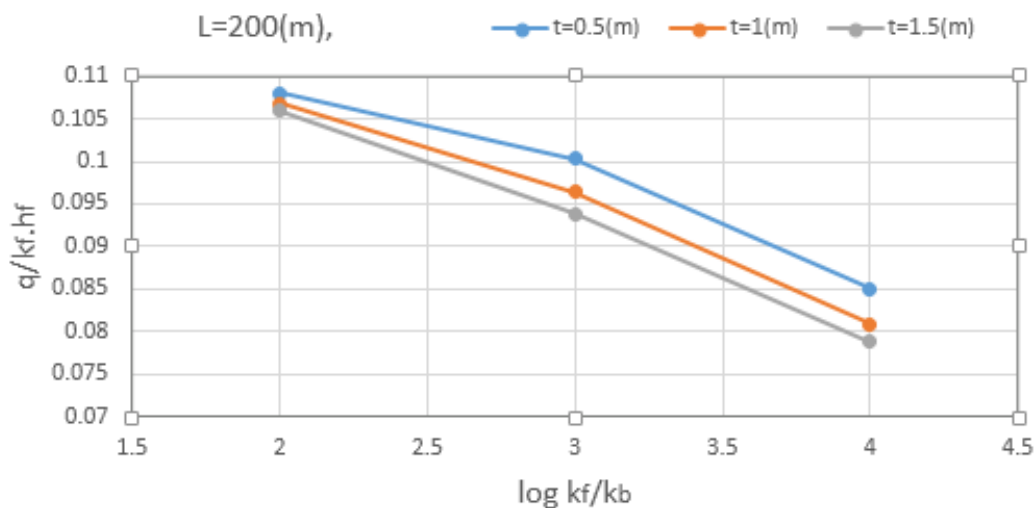
شکل ۶ تأثیر عرض هسته رسی در کنترل نشت توسط پتوی رسی را نشان می‌دهد. در این شکل همان‌طور که مشخص است تأثیر عرض هسته در ضخامت‌های مختلف تقریب



شکل ۶- نحوه تأثیر عرض هسته در عملکرد پتوی رسی در کاهش مقدار نشت.

ازای سه ضخامت ۰/۵، ۱، ۱/۵، مقدار نشت نزدیک به هم هستند ولی با کاهش مقدار ضریب نفوذپذیری، مقدار نشت در هر سه ضخامت ذکر شده با یکدیگر اختلاف بیشتری پیدا می‌کند که می‌توان به این نتیجه رسید کاهش ضریب نفوذپذیری در ضخامت‌های بیشتر، مؤثر و کاربردی‌تر خواهد بود.

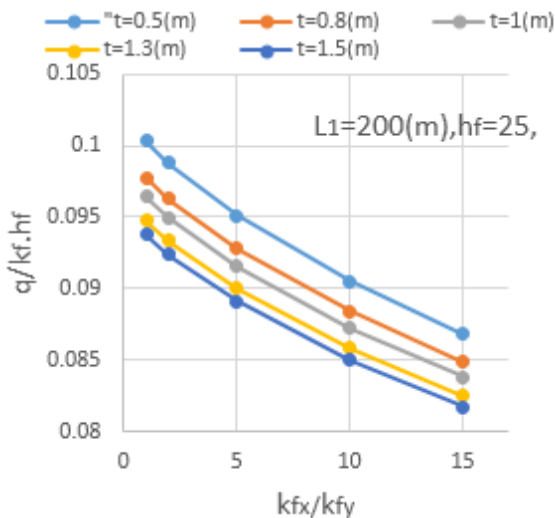
شکل ۷ تأثیر ضریب نفوذپذیری پتوی رسی در کاهش و کنترل نشت را نشان می‌دهد. طبق مدل‌سازی‌ها و نتایج بدست آمده یکی از مؤثرترین پارامترهای موجود، ضریب نفوذپذیری پتوی رسی است. همان‌طور که در شکل نمایان است با کاهش ضریب نفوذپذیری مقدار نشت از پی به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد و نکته‌ای که می‌تواند حائز اهمیت باشد این است که وقتی ضریب نفوذپذیری پتو زیاد است به



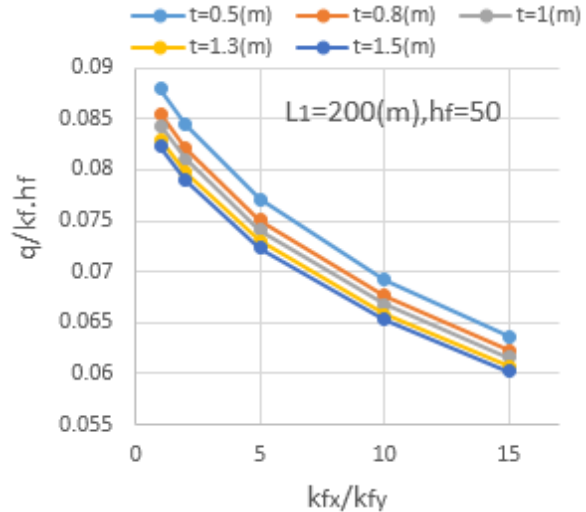
شکل ۷- تأثیر ضریب نفوذپذیری پتوی رسی در کاهش نشت.

از زمانی جریان می‌یابد که از لایه وارد لایه دیگر شود. مشاهده می‌شود که ازای یک طول و ضخامت ثابت مقدار نشت نسبت به زمانی که ضریب نفوذپذیری افقی بیشتر از ضریب نفوذپذیری عمودی باشد تفاوت بسیار زیادی دارد نسبت به زمانی که نسبت افقی به عمودی ضریب نفوذپذیری یک فرض شود، هم‌چنین مشاهده می‌شود تأثیر نسبت‌های مختلف این ضریب در ضخامت ۰/۵ تا ۰/۸ پتوی رسی، قابل توجه‌تر از سایر ضخامت‌ها است و تأثیر این ضریب همان‌طور که در شکل ۸- (ب) مشخص است در پی‌های عمیق بیشتر از تأثیر آن در پی‌های کم‌عمق است.

شکل ۸ تأثیر نسبت‌های مختلف ضریب نفوذپذیری افقی به عمودی پی آبرفتی را در نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در مطالعات قبلی دیده نمی‌شود. این نسبت در مطالعات انجام گرفته ۱ فرض شده و مطالعات و روابط به دست آمده طبق این فرض برنامه‌ریزی شده‌اند، این در حالی است که طبق تحقیقات انجام گرفته و تجارب به دست آمده ضریب نفوذپذیری افقی همواره بیشتر از ضریب نفوذپذیری قائم بوده و این نسبت می‌تواند خیلی بالا باشد. علت این تفاوت در نفوذپذیری می‌تواند لایه‌ای بودن رسوبات به صورت افقی باشد و همان‌طور که مشخص است آب در یک‌لایه سریع‌تر و بیشتر



ب - ۸



الف - ۸

شکل ۸- تأثیر تغییرات نسبت ضریب نفوذپذیری افقی به عمودی پی آبرفتی ($\frac{K_{fx}}{K_{fy}}$) در کاهش نشت.

لحاظ اجرایی امکان‌پذیر نیست ولی در این مطالعه سعی شده است با مدل‌سازی و نتایج بدست آمده تأثیر این ضریب تأثیرگذار نیز در رابطه ارائه شده اعمال گردد تا رابطه پیشنهادی کلیه جوانب را در نظر گرفته باشد. داده‌ها و اطلاعات حاصل از مدل‌سازی‌ها وارد نرم‌افزار SPSS 23 شده و روابط ۵ و ۶ بدست آمدند:

$$\frac{q}{K_f h_f} = -0.524 \log\left(\frac{K_f}{K_b}\right)^{0.08} + 0.252 \left(\frac{t}{h_f}\right)^{1.244} + 0.005 \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{0.958} + 0.662 \left(\frac{K_{fy}}{K_{fx}}\right)^{0.014} \quad [5]$$

در ارائه این روابط سعی شده است که به‌منظور سهولت در استفاده، از نسبت‌های بی‌بعد استفاده شود که در آن $\frac{q}{K_f h_f}$ صورت بی‌بعد دبی در واحد عرض پی سد با وجود پتوی رسی بالادست، K_f ضریب نفوذپذیری پی، K_b ضریب نفوذپذیری پتوی رسی، t ضخامت پتوی رسی، h_f ضخامت پی آبرفتی، L_2 عرض هسته رسی در محل اتصال به پی، L_1 طول

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است با افزایش مقدار $\frac{K_{fx}}{K_{fy}}$ مقدار نشت کاهش می‌یابد. این عامل به این دلیل است که در تنظیمات نرم‌افزار SEEP/W ابتدا مقدار ثابتی برای ضریب نفوذپذیری افقی لحاظ می‌شود و غیر ایزوتروپ کردن خاک با تغییر دادن ضریب نفوذپذیری قائم انجام می‌شود. از طرفی طبق اطلاعات موجود، ضریب نفوذپذیری افقی همواره بیش‌تر از ضریب نفوذپذیری قائم است، پس برای غیر ایزوتروپ نمودن خاک باید K_{fy} کاهش یابد که در این صورت کاهش مقدار نشت به دلیل کاهش نفوذپذیری قائم، که موجب کاسته شدن مقدار نفوذپذیری کل خاک می‌شود طبیعی به نظر می‌رسد. همچنین نتایج مدل‌سازی‌ها که به دلیل محدودیت در اینجا ارائه نشده‌اند، منتها در ارائه رابطه توسط نرم‌افزار SPSS اعمال می‌شوند نشانگر آن است که با افزایش عمق پی مقدار دبی نشت افزایش زیادی می‌یابد و افزایش ضخامت پتوی رسی به ازای افزایش ضخامت پی همان تأثیر ثابت خود را خواهد گذاشت.

نکته دیگر آن‌که، ضریب نفوذپذیری پی آبرفتی که یکی از پارامترهای مورد مطالعه است که تأثیر آن از همه پارامترها بیش‌تر و قابل توجه‌تر است، هرچند تغییرات آن از

مقایسه بین دو رابطه غیرخطی ممکن، نشان می‌دهد در رابطه (۵) دبی عبوری با متغیرهای ذکر شده همبستگی بیش‌تری دارند و میانگین مربع خطاها نیز در مدل ۱ وضعیت بهتری دارد، پس به نظر می‌رسد استفاده از رابطه (۵) نسبت به رابطه (۶) نتایج بهتر و قابل قبولی را در بر خواهد داشت، این تحقیق استفاده از رابطه (۵) را پیشنهاد می‌کند. به‌منظور اعتبار سنجی رابطه موردنظر ابتدا رابطه پیشنهادی با نرم‌افزار SEEP/W مقایسه می‌شود و سپس هر دو رابطه، یعنی رابطه پیشنهادی و هم‌چنین رابطه USBR (۲۰۱۴) باهم و با مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار مقایسه خواهند شد. در جدول ۳ بازه متغیرهای مدل شده برای مقایسه و در جدول ۴ نتایج حاصل از مقایسه ارائه شده‌اند. منظور از درصد خطای نسبی در جدول ۴ برابر است با: اختلاف دو داده بدست آمده از روابط موردنظر ضربدر صد.

پتوی رسی بالادست، K_{fy} مؤلفه عمودی ضریب نفوذپذیری پی، K_{fx} مؤلفه افقی ضریب نفوذپذیری پی آبرفتی است. همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد ما به دنبال بهترین رابطه به‌منظور کاربرد در مواقع استفاده از پتوی رسی هستیم پس روابط موردنظر را مقایسه کرده و رابطه‌ای که نتایج معقولی داشته باشد انتخاب می‌شود. جدول ۲ نتیجه این مقایسه را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه روابط حاصل از رگرسیون برای محاسبه مقدار دبی در واحد عرض پی.

مدل	(ضریب همبستگی) R^2	(میانگین مربع خطاها) RMSE
رابطه (۵)	۰/۷۳	۰/۰۰۷۹
رابطه (۶)	۰/۶۱	۰/۰۰۹۳

جدول ۳- بازه تغییر پارامترها برای مقایسه رابطه پیشنهادی و نرم‌افزار.

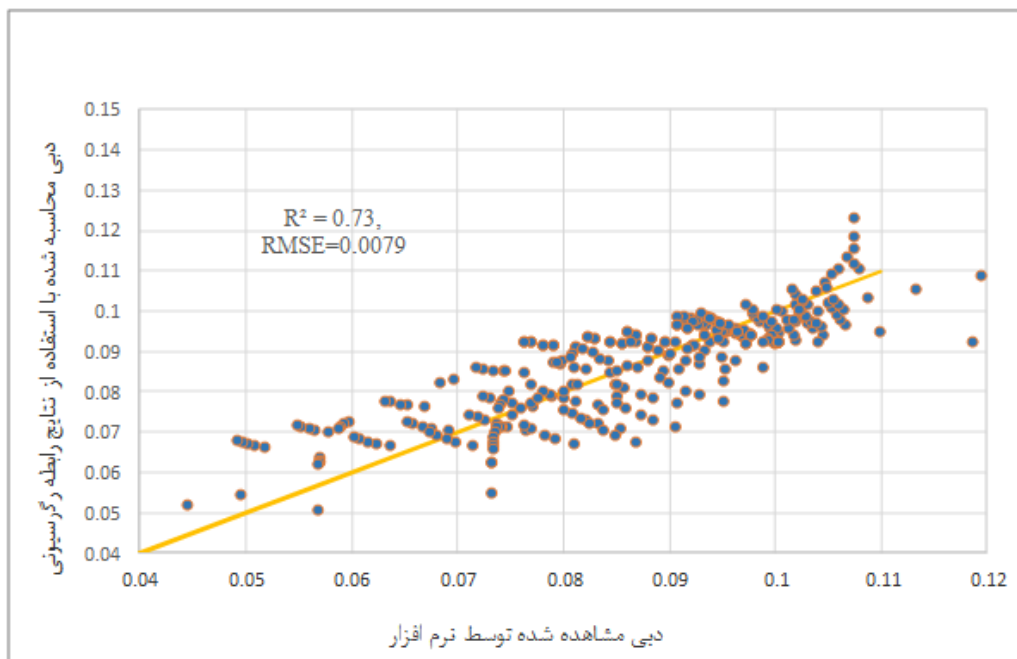
L_1 (m)	L_2 (m)	(m)t	h_f (m)	K_f (m/s)	K_b (m/s)	$\frac{K_{fy}}{K_{fx}}$
۵۰	۲۳	۰/۵	۲۵	1×10^{-3}	1×10^{-6}	۱
۱۰۰	۲۳	۰/۸	۲۵	1×10^{-3}	1×10^{-6}	۱
۲۰۰	۲۳	۱	۲۵	1×10^{-3}	1×10^{-8}	۱
۳۰۰	۴۳	۱/۳	۲۵	1×10^{-4}	1×10^{-6}	۱
۴۰۰	۴۳	۱/۵	۲۵	1×10^{-4}	1×10^{-7}	۱
۲۵	۶۳	۰/۵	۲۵	1×10^{-3}	3×10^{-6}	۱
۲۵	۶۳	۰/۸	۲۵	1×10^{-3}	4×10^{-6}	۰/۵
۲۵	۸۳	۰/۸	۲۵	7×10^{-3}	1×10^{-7}	۰/۲
۲۵	۸۳	۱/۵	۲۵	9×10^{-4}	1×10^{-7}	۰/۰۶۶
۲۰۰	۲۳	۰/۵	۳۰	2×10^{-3}	2×10^{-6}	۰/۵
۲۰۰	۲۳	۰/۸	۳۰	3×10^{-3}	5×10^{-6}	۰/۲
۲۰۰	۲۳	۰/۸	۴۰	4×10^{-3}	6×10^{-6}	۰/۱
۲۰۰	۲۳	۱	۴۰	5×10^{-3}	2×10^{-7}	۰/۰۶۶
۲۰۰	۲۳	۱	۵۰	2×10^{-4}	3×10^{-7}	۰/۵
۲۰۰	۲۳	۱/۳	۵۰	3×10^{-4}	4×10^{-7}	۰/۲
۲۰۰	۲۳	۱/۳	۷۰	4×10^{-4}	2×10^{-8}	۰/۱
۲۰۰	۲۳	۱/۵	۷۰	5×10^{-4}	3×10^{-8}	۰/۰۶۶

جدول ۴- مقایسه رابطه پیشنهادی با نرم افزار و USBR

ردیف	q حاصل از نرم افزار	q رابطه ارائه شده (رابطه ۵)	q سازمان USBR	درصد خطای نسبی میان دبی نرم افزار و رابطه ارائه شده (رابطه ۵)	درصد خطای نسبی میان دبی نرم افزار و دبی USBR (رابطه ۳)
۱	۰/۱۰۴۴	۰/۰۹۴۱	۰/۰۳۴۷	۱/۰۳	-۲۴/۳۳
۲	۰/۱۰۰۳	۰/۰۹۴۵۶	۰/۲۹۰۵	۰/۵۷	-۱۹/۰۲
۳	۰/۰۷۴۱	۰/۰۷۱۲	۰/۱۱۲۹	۰/۲۹	-۳/۸۷
۴	۰/۱۲۷۹	۰/۰۱۱۵۲	۰/۴۵۱۴	۱/۲	-۳۲/۳۵
۵	۰/۱۰۱۶	۰/۰۹۸۰	۰/۲۰۲۶	۰/۳۶	-۱۰/۱
۶	۰/۱۰۷۵	۰/۱۱۱۷	۰/۳۶۱۸	-۰/۴۲	-۲۵/۴۳
۷	۰/۱۰۵۳	۰/۱۰۹۲	۰/۳۴۶۷	-۰/۳۸	-۲۴/۱۳
۸	۰/۰۹۵۱	۰/۰۸۲۹	۰/۱۷۴۳	۱/۲	-۷/۹۲
۹	۰/۰۸۳۷	۰/۰۷۵۷	۰/۱۶۷۷	۰/۷۹	-۸/۴
۱۰	۰/۰۹۰۸	۰/۰۸۵۶	۰/۳۱۶۲	۰/۵۱	-۲۲/۵۴
۱۱	۰/۰۸۵۰	۰/۰۸۲۰	۰/۳۲۱۱	۰/۳	-۲۳/۶۱
۱۲	۰/۰۷۱۰	۰/۰۷۴۱	۰/۲۶۹۸	-۰/۳۱	-۱۹/۸۷
۱۳	۰/۰۵۶۸	۰/۰۵۰۵	۰/۱۱۴۷	۰/۶۲	-۵/۷۸
۱۴	۰/۰۹۲۷	۰/۰۸۸۸	۰/۲۲۳۸	۰/۳۹	-۱۳/۱
۱۵	۰/۰۸۰۰	۰/۰۸۰۳	۰/۱۹۵۶	-۰/۰۲	-۱۱/۵۵
۱۶	۰/۰۴۹۵	۰/۰۵۴۵	۰/۱۰۹۰	-۰/۴۹	-۵/۹۴
۱۷	۰/۰۴۴۰	۰/۰۵۲۰	۰/۱۰۹۱	-۰/۷۴	-۴۵/۶

همچنین مدل سازی نسبت های مختلف مؤلفه افقی به عمودی ضریب نفوذپذیری پی و غیر ایزوتروپ فرض کردن خاک در مدل ها می باشد. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است برای هر پارامتری مدل های متعددی مدل سازی شده اند، مثلاً برای ضریب نفوذپذیری پتوی رسی ۱۵ الی ۲۰ مورد اعمال شده اند در حالی که رابطه USBR فقط بر اساس $(m/s)^{-۷}$ پیشنهاد شده است. شکل ۹ مقادیر حاصل از رابطه $K_{b=۱}$ پیشنهادی را مورد ارزیابی قرار می دهد.

آن چه که در مقایسه انجام شده مشخص است دقت بسیار بالای رابطه ارائه شده است که تقریب در همه موارد مورد مقایسه اختلاف کمی با مقادیر بدست آمده از نرم افزار دارد و می تواند با اطمینان در کارها و ملاحظات اجرایی در نمونه هایی مشابه با نمونه مورد مطالعه، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین اختلاف زیاد مقادیر به دست آمده از رابطه USBR و مقادیر حاصل از نرم افزار نیز در جدول ارائه شده نمایان است. به نظر می رسد یکی از دلایل دقت رابطه پیشنهادی و اختلاف نتایج به دست آمده از رابطه USBR، مدل سازی همه پارامترهای مؤثر و



شکل ۹- بررسی رابطه ارائه شده برای محاسبه نشت از پی.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بررسی تأثیر پتوی رسی و اهمیت استفاده آن برای کنترل نشت آب از پی، ۳۵۰ مدل توسط نرم‌افزار SEEP/W و همچنین نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شدند: در نمونه‌هایی شبیه نمونه مدل شده، بهترین طول پتوی رسی بالادست، چهار برابر ارتفاع آب پشت سد می‌باشد و افزایش طول بیش از آن از لحاظ اقتصادی توصیه نمی‌شود. با افزایش ضخامت پتوی رسی همواره مقدار نشت کاهش می‌یابد. همچنین با مشاهده تأثیر ضخامت هسته رسی می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش عرض هسته، مقدار نشت از پی همواره کاهش می‌یابد که مقدار افزایش عرض هسته، در پتوهای رسی با طول کم بسیار مطلوب و مؤثر خواهد بود.

با مدل‌سازی تأثیر ضریب نفوذپذیری پتوی رسی می‌توان به این نتیجه رسید در ضخامت کم پتوی رسی کاهش مقدار نشت به ازای مقادیر مختلف ضریب نفوذپذیری تقریب یکسان است، به عبارتی افزایش ضخامت پتوی رسی بدون کاهش ضریب نفوذپذیری آن در کاهش مقدار نشت

تأثیر زیادی نخواهد داشت. یکی دیگر از عوامل مؤثر در کاهش نشت، نسبت ضریب نفوذپذیری افقی و عمودی پی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در صورتی که این نسبت یک فرض شود تفاوت بسیار زیادی با حالتی که این ضریب نسبت‌هایی نزدیک‌تر به نمونه‌های واقعی لحاظ می‌شود، دارد. اعمال این ضریب در ضخامت‌های کم، معمولاً بین ۰/۵ تا ۰/۸ تأثیر بسزایی در نتایج خواهد داشت. در نهایت با اعمال متغیرهای ذکر شده، رابطه (۵) برای محاسبه مقدار دبی عبوری در صورت وجود پتوی رسی ارائه شده است. مقایسه رابطه موردنظر با نرم‌افزار و همچنین مقایسه آن با رابطه USBR، گویای دقت بسیار بالای رابطه است و می‌تواند قبل از احداث سدهای خاکی برای کنترل نشت آب از سدها و نمونه‌هایی مشابه با نمونه مورد مطالعه در صورت طراحی پتوی رسی، توسط مهندسیین مورد استفاده واقع شود.

مراجع

رحیمی، ح.، ۱۳۸۳. *سدهای خاکی، انتشارات دانشگاه تهران.*

- Goharnejad, H., Nourzad, M., Shamsaie, A., and Goharnejad, A., 2010. The effect of clay blanket thickness to prevent seepage in dam reservoir. *Research journal of environmental sciences*, 4(6), 558-565.
- Khalili Shayan, H., Amiri Tokaldany, E., 2015. Effects of blankets of blanket, drains, and cut off wall on reducing uplift pressure, seepage and exit gradient under hydraulic structures. *International Journal of Civil Engineering*, 13(4), 486-500.
- Meehan, C. L., Benjasupattananan, C. L., 2012. An analytical approach for levee under seepage analysis. *Journal of Hydrology*, 470(2012), 201-2011.
- SEEP/W, 2012. *Seepage Modeling with SEEP/W*. Geo-Slope International Ltd, Calgary, 197 p.
- USACE, 1986. *Seepage analysis and control for dams*. Department of the US army corps of engineers, Washington, D.c.20314-1000.
- USBR, 2014. *Embankment dams, chapter 8, seepage, phase 4*. U. S. Department of interior bureau of reclamation.
- غروی. م، جوادی. ع، ۱۳۸۸. بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد پتوی رسی در مخازن سدها، دومین همایش ملی سدسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان ایران، ۱۸ اسفند ماه.
- Batool, A., Vendenberg, D.R., and Thomas, I. B., 2015. Practical application of blanket theory and the finite-element method to levee underseepage analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(10), 1-10.
- Farooq, K., Mujtaba, H., Nazir, A., Khan, A. H., 2013. Effectiveness of upstream and grouting in control of seepage at Khanpur dam project. *Pakistan journal of science*, 65(2), 225-234.
- Ghanbari, A., and Zaryabi, S., 2014. A simple method for calculating the seepage at the foundation of embankment dams with blanket and clay trench. *Journal of GeoEngineering*, 9(1), 21-32.