

بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول و ضخامت زهکش‌های افقی بر نشت ماندگار از بدنه سد خاکی همگن

امیر ملک‌پور^{1*}، داود فرسادی‌زاده²، علی حسین زاده دلیر² و جمشید صدر کریمی³

تاریخ دریافت: 88/10/2 تاریخ پذیرش: 89/3/26

1- دانشجوی دکترا، سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

2- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

3- دانشیار، گروه مهندسی خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه: Email: Amir_mlk@yahoo.com

چکیده

سد خاکی همگن با هدف استفاده بهینه از مصالح محلی برای کنترل و ذخیره رواناب‌های سطحی احداث می‌گردد. یکی از مهمترین عوامل تخریب این سازه نشت از داخل بدنه و زیر پی می‌باشد. برای جلوگیری از این مساله می‌توان راهکارهای مختلفی اتخاذ نمود که معمول‌ترین آنها استفاده از زهکش‌های افقی می‌باشد. در این تحقیق تأثیر ضخامت لایه زهکش افقی در مدل آزمایشگاهی و در محدوده طول‌های زهکش برآورد شده توسط روابط تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت و طول زهکش، پارامتر پوشش شیب پائین دست به مقدار زیادی افزایش می‌یابد در حالی که تأثیر پارامتر ضخامت در روابط تحلیلی موجود لحاظ نگردیده است. همچنین شدت دبی نشت با افزایش ضخامت زهکش بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این نرخ افزایش دبی با افزایش مقدار ضخامت به بیش از ضخامت حداکثر مورد نظر در این تحقیق کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: زهکش افقی، سد خاکی، سنسور ترانسدیوسر، فشار پیزومتریک، نشت

Laboratory Investigation on the Effect of Horizontal Drain Length and Thickness on Steady Seepage Flow Through Homogeneous Earth Dam

A Malekpour^{1*}, D Farsadizadeh², A Hosseinzadeh Dalir² and J Sadrkarimi³

Received: 23 December 2009 Accepted: 19 June 2010

¹PhD Student, Dept. of Water Engin. Faculty of Agric. Univ. of Tabriz, Iran.

²Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

³Assoc. Prof., Dept. of Soil and Foun. Engin., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz, Iran

Corresponding Author: Email: Amir_mlk@yahoo.com

Abstract

Homogeneous earth dam is constructed with the optimized use of local materials, to control and store runoffs. One of the most important destructive factors, in this structure, is the seepage through dam body and below its foundation. There are some methods to prevent the internal erosion, among which the horizontal toe drain is the most common alternative. In this research, the effect of applying various thicknesses of horizontal drain in laboratory model and within the proposed range of lengths derived from the analytical relationships was investigated. Results showed that the increase in thickness and length led to significant increase in downstream slope cover while the effect of thickness has not been considered in similar analytical relationships. In addition, the seepage rate would increase dramatically with the increase in drain thickness but the rate of this increase would decline if the thickness exceeded the proposed maximum limit of this research.

Keywords: Earth dam, Horizontal drain, Piezometric pressure, Seepage, Transducer sensors

خاکی بوده است. پدیده فرسایش داخلی اغلب بسیار سریع صورت می‌گیرد بدون اینکه زمان و فرصت کافی برای اقدامات ترمیمی توسط مهندسين وجود داشته باشد. یکی از مهمترین موارد تخریب سدهای خاکی توسط فرسایش داخلی در سد تتون³ در ایالات متحده آمریکا مشاهده گردید. تحقیقات همچنین نشان داد که قبل از سال 1950 سهم پدیده فرسایش داخلی در تخریب سدهای خاکی 43 درصد بوده است که این نسبت بعد از 1950 به 54 درصد افزایش یافته است (چاھر 2004). در

مقدمه

از معمول‌ترین عوامل تخریب سدهای خاکی پدیده فرسایش داخلی¹ و سرریز جریان از بدنه² می‌باشند. تحقیقات نشان داده است که تقریباً 30 درصد از سدها بدلیل نشت تخریب گردیده‌اند (میدلبروکز 1953). در مطالعه جامعی که توسط فاستر و همکاران (2000) و فل و همکاران (2003) انجام شد مشخص گردید که فرسایش داخلی مهم‌ترین عامل موثر در تخریب سدهای

³ Teton dam

¹ Piping

² Overtopping

تحلیلی مختلفی برای تعیین طول مناسب زهکش افقی در بخش پائین دست بدنه پائین دست سد خاکی ارائه نموده اند در حالی که تأثیر ضخامت زهکش افقی در این روابط منظور نشده است.

هدف از این تحقیق بررسی تغییر ضخامت لایه زهکش افقی در مدل آزمایشگاهی و در محدوده طولهای زهکش برآورد شده توسط روابط تحلیلی موجود و اثرات آن بر شکل سطح آزاد نشت و همچنین بر مقدار جریان نشتی به ازای حداکثر گرادیان هیدرولیکی ناشی از عمق آب در مخزن سد می باشد. بررسی فاصله حداقل خط آزاد نشت از شیب پائین دست در مدل آزمایشگاهی به ازای زهکش های مختلف بکار گرفته شده در تحقیق و مقایسه با روابط تحلیلی هدف دیگر این تحقیق است که از جهت محافظت شیب پائین دست در برابر برخورد جریان نشتی و اثرات مؤئینگی حائز اهمیت می باشد. با توجه به اینکه ممکن است دسترسی به مصالح زهکش در محل احداث سازه واقعی دشوار و هزینه های انتقال آن از منابع قرضه دوردست قابل توجه باشد، همچنین در صورت عدم کارایی مناسب سیستم زهکش امکان تعمیر و اصلاح آن غیرممکن باشد، بررسی ابعاد مناسب جهت استقرار این مصالح در بدنه سد خاکی می تواند منجر به صرفه جویی اقتصادی و افزایش کارایی سازه احداث شده گردد.

تحلیل نشت

دوپویی - فورشهیمیر در دهه 1930 رابطه تقریبی برای محاسبه نشت از بدنه سد ارائه نمودند که به فرمول دوپویی شهرت یافته است. تئوری دوپویی بر مبنای دو فرض اولیه شکل گرفته است. اولاً در مواردی که شیب خط نشت کم است می توان خطوط جریان را بصورت افقی در نظر گرفت، ثانیاً گرادیان هیدرولیکی در امتداد قائم ثابت می باشد. سپس محققین بر اساس فرضیه دوپویی رابطه ای برای تعیین a ، فاصله محل برخورد خط نشت با شیب پائین دست (در امتداد شیب پائین دست) نسبت به پنجه سد در حالتی که پایاب وجود نداشته باشد (رابطه 1) ارائه نمودند (هارتونو 2002).

سدهای خاکی سه فرآیند مختلف باعث ایجاد پدیده فرسایش داخلی می گردد که عبارتند از فرسایش پیشرونده به سمت بدنه بالادست، نشت متمرکز و اشباع بودن مصالح سد (ماتسون و همکاران 2008). برای کاهش انرژی جریان نشتی اشباع در بدنه سد خاکی تدابیر مختلفی اتخاذ می گردد که عبارتند از استفاده از هسته رسی نفوذناپذیر در سدهای منطقه بندی شده و استفاده از زهکش های افقی و پنجه در سدهای همگن.

سد خاکی همگن معمولاً در مناطقی که از لحاظ اقتصادی یک نوع مصالح در دسترس باشد توصیه می گردد. از جمله سدهای خاکی همگن کوچک می توان به سدهای لایون لیک¹، پیشکن²، استابل فیلد³، دیکینسون⁴ و غیره که توسط اداره عمران اراضی آمریکا⁵ (بی نام 2003) طراحی شده اند اشاره نمود. زهکش افقی به عنوان سیستم تخلیه زه آب سدهای تا ارتفاع متوسط رایج می باشد. اداره عمران اراضی آمریکا همچنین سد بلند وگا⁶ به ارتفاع 50 متر را با سیستم زهکش افقی طراحی نمود. بالقاسم و عبدالرحمن (2008) نقش لایه زهکش افقی در سد خاکی همگن را در عملکرد سازه و پایداری مکانیکی و هیدرولیکی آن بسیار با اهمیت برشمردند به این ترتیب که با پائین آوردن خط نشت شیب پائین دست را محافظت می نماید. کاهش رقوم خط نشت موجب کاهش حجم بخش اشباع مصالح سد می گردد بدین ترتیب بخش زیادی از مصالح سد در حالت غیر اشباع قرار گرفته و احتمال وقوع فرسایش داخلی ناشی از انرژی زیاد جریان نشتی کاهش می یابد. این مسأله نقش مثبتی در تأمین پایداری سازه دارد. بدین ترتیب با افزایش کارایی سیستم زهکشی امکان ساخت سدهایی با ابعاد بزرگ تر فراهم گردیده است. همچنین سیستم زهکش از طریق جمع آوری آب نشت یافته در بدنه و پی و تخلیه مجدد به مخزن، امکان کاهش هدر روی آب از مخزن سد را فراهم می نماید. محققین روابط

¹ Lion lake

² Pishkun

³ Stubblefield

⁴ Dickinson

⁵ USBR

⁶ Vega

$y = q$ در معادلات بالا، روابط منحنی سطح آزاد نشت و دبی جریان نشتی (q) را ارائه نمود.

$$x = \frac{1}{2} \left(\frac{q}{k} - \frac{k}{q} y^2 \right) \quad [3]$$

$$q = 2kx_0 \quad [4]$$

که در آن x_0 فاصله محل برخورد سطح نشت با زهکش نسبت به ابتدای زهکش می‌باشد. ایراد رابطه کوزنی این است که برای تعیین موقعیت دقیق خط نشت باید وجه بالادست سد که اولین خط هم پتانسیل است دارای شکل سهموی باشد و این در حالی است که اگر وجه بالادست بصورت خط مستقیم باشد جواب بدست آمده از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. با توجه به نیاز مهندسان طراح به داشتن روابط کاربردی برای تعیین طول لایه زهکش افقی، در دهه اخیر محققین مختلف در این زمینه راه‌حلهایی ارائه نمودند (بی‌نام، 2003). چاهر (2004) روابطی ارائه نمود (روابط 5، 6 و 7) که در آن مفهوم پوشش شیب پائین دست (حداقل فاصله عمودی بین سطح آزاد نشت و شیب پائین دست که در شکل 1 نشان داده شده است) در تعیین طول زهکش افقی در نظر گرفته شد. مقدار حداقل پارامتر پوشش شیب پائین دست در هنگام برخورد سطح آزاد نشت با شیب پائین دست برابر صفر می‌باشد. این پارامتر از نقطه نظر محافظت شیب پائین دست در برابر موئینگی اهمیت دارد که این مسأله در رابطه ارائه شده توسط USBR لحاظ نگردیده است.

$$d_{\max} = \frac{[F_{B^*}(m+n) + T_*]}{\sqrt{(1+n^2)}} \quad [5]$$

$$l_{\min} = \frac{1+n^2}{2n^2} \left\{ 0.3m + n + F_{B^*}(m+n) + T_* - \sqrt{[0.3m + n + F_{B^*}(m+n) + T_*]^2 - n^2} \right\} \quad [6]$$

$$l_{\max} = F_{B^*}(m+n) + T_* \quad [7]$$

$$a = \frac{d}{\cos a} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 a} - \frac{h^2}{\sin^2 a}} \quad [1]$$

در رابطه بالا a زاویه شیب پائین دست سد، h ارتفاع آب در مخزن سد و d فاصله افقی پنجه سد از محل شروع سهمی نشت با اعمال تصحیح کاساگرانده می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد دقت رابطه 1 برای $a > 30^\circ$ تا حد زیادی کاهش می‌یابد. کاساگرانده برای رفع عیب رابطه دوپویی راه حلی ترسیمی برای رسم شبکه جریان بمنظور تعیین موقعیت برخورد سهمی نشت با شیب پائین دست ارائه نمود (هارتونو 2002). کوزنی و نامروف در همان دوره بمنظور تعیین خط آزاد نشت در بدنه سدهای خاکی دارای زهکش روش‌هایی ارائه نمودند که روش نامروف بدلیل عدم قابلیت در کسب نتایج کمی و عددی دقیق از مقبولیت زیادی برخوردار نشد (میشرا و پاریدا 2006). در این شرایط گرایش محققین عمدتاً به استفاده از روابط کوزنی معطوف گردید. کوزنی توابع تحلیلی برای برخی از جریان‌های دو بعدی ارائه نمود که از جمله آنها می‌توان به توابعی برای نشت از کانال و بدنه سد خاکی اشاره نمود. او با استفاده از مدل‌های فیزیکی و ریاضی و بر اساس تئوری نگاشت‌های مختلط روابط خود را برای سد خاکی با یک لایه زهکش افقی بر روی بستر نفوذناپذیر ارائه نمود. بر طبق تئوری کوزنی خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل در بدنه سد خاکی به صورت سهمی‌های هم‌کانون می‌باشند که محل تقریبی کانون، در نقطه شروع لایه زهکش افقی می‌باشد. او بر این عقیده بود که شکل کلی سهمی نشت از رابطه 2 تبعیت می‌نماید (هارتونو 2002).

$$z = cw^2 \quad [2]$$

$$z = x + iy$$

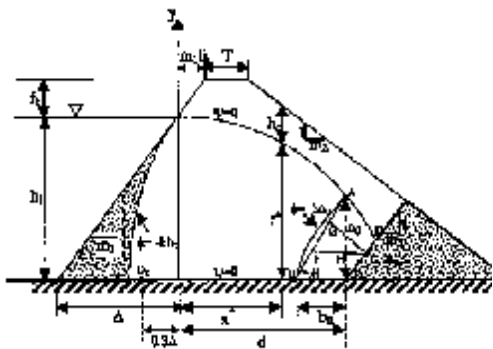
$$w = j + iy$$

که j و y بترتیب پتانسیل سرعت و تابع جریان می‌باشند. کوزنی با اعمال شرایط مرزی $j = -k.y$

که صعود موئینگی به خوبی در داخل بدنه سد و در بالای خط فریاتیک مهار شود و برای تعیین ارتفاع زهکش رابطه خود را ارائه نمودند.

$$h_i = \frac{0.5(m_2^2 + 1)(\sqrt{d^2 + h_1^2} - d) + m_2 h_c}{m_2 + m_3} \quad [8]$$

در رابطه مذکور h_i ارتفاع زهکش پنجه، h_1 عمق آب در مخزن سد، m_2 و m_3 بترتیب شیب خاکریز پائین دست و شیب بالادست زهکش پنجه، h_c صعود موئینگی و d فاصله پاشنه زهکش پنجه تا مبداء می باشند که این پارامترها در شکل 2 نشان داده شده اند.



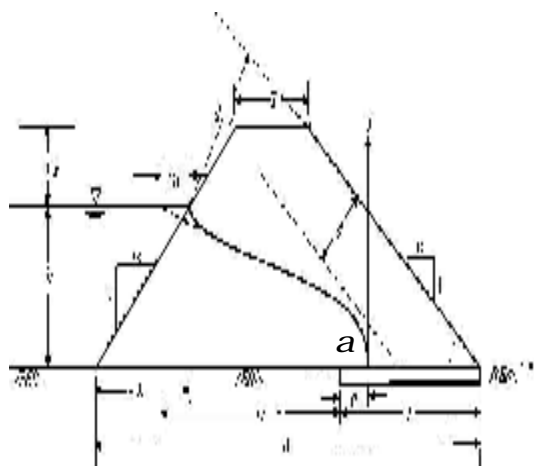
شکل 2- سد خاکی همگن بر روی بستر نفوذناپذیر با زهکش پنجه (میشرا و پاریدا 2006)

در این تحقیق آزمایشها بر روی مدل فیزیکی سد خاکی با زهکش افقی بر روی بستر نفوذناپذیر انجام شد و تأثیر ضخامت های مختلف زهکش در محدوده طول های حداقل و حداکثر توصیه شده توسط روابط تحلیلی چاھر (2004) به ازای گرادیان هیدرولیکی حداکثر و در شرایط جریان نشت ماندگار مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه به تشریح آزمایشها و نتایج آنها پرداخته می شود.

مواد و روشها
مدل فیزیکی

$$+ \frac{1+n^2}{2n^2} \left[0.3m+n - \sqrt{(0.3m+n)^2 - n^2} \right]$$

در روابط بالا l_{max}^* ، l_{min}^* ، d_{max}^* به ترتیب روابط بدون بعد جهت تعیین حداکثر پوشش شیب پائین دست، حداقل طول زهکش افقی و حداکثر طول زهکش افقی برای حالت همسان¹ می باشند. علامت * در روابط بالا نشانه بدون بعد بودن متغیر مربوطه با تقسیم بر عمق آب در مخزن سد می باشد. همچنین m و n بترتیب شیب بالادست و پائین دست سد خاکی می باشند و T_B^* و F_B^* بترتیب عرض بدون بعد تاج سد و عمق آزاد بدون بعد هستند.



شکل 1- پوشش شیب پائین دست نسبت به خط آزاد نشت (چاھر 2004)

میشرا و پاریدا (2006) نیز روش بررسی قطعه ای² دامنه جریان را برای تعیین ارتفاع مناسب زهکش های پنجه در سد خاکی همگن بر روی بستر نفوذناپذیر بکار بردند. آنها به این نتیجه رسیدند که حداکثر ضخامت موثر یا به عبارت دیگر ارتفاع موثر زهکش پنجه یک سوم ارتفاع سد خاکی می باشد. پارامترهایی که آنها در روابط خود لحاظ نمودند شامل سطح آب در مخزن، صعود موئینگی در بدنه سد، عمق آزاد، عرض تاج سد، شیب شیروانی ها و موقعیت پایاب بودند. آنها بیان نمودند که این مقادیر باید به شکلی در نظر گرفته شود

¹ Isotrope
² Fragment method

حفظ گردیده و این مسأله به صورت افزایش فشار آب منفذی و سطح فریاتیک بالا به خوبی نشان داده شود. ارتفاع سد در مدل فیزیکی 40 سانتی‌متر، حداکثر عمق آب در مخزن سد 35 سانتی‌متر (با لحاظ نمودن 5 سانتی‌متر عمق آزاد) در نظر گرفته شد. شیب شیروانی‌های بالادست و پائین دست سدهای 1: 1/5 (افقی: قائم) با زاویه 33/7 درجه نسبت به افق می‌باشد. تعداد 40 پیزومتر در بدنه سد در 5 ردیف و 2 پیزومتر در مخازن بالادست و پائین دست سد برای اندازه‌گیری فشارپیزومتريک تعبیه شد (شکل 3-ب).

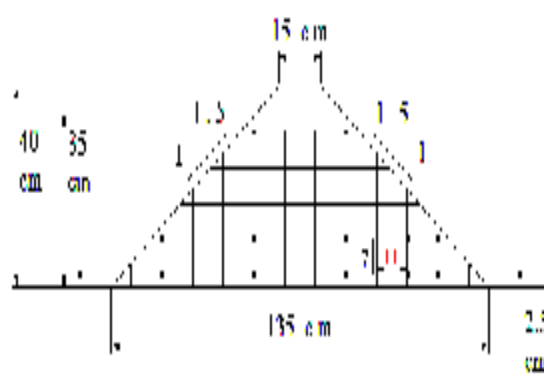
آزمایش‌های نشت

پس از قرار دادن مصالح زهکش و فیلتر، مصالح بدنه بر روی آن قرار گرفت (شکل 4-الف) و بر اساس نتایج آزمایش پروکتور استاندارد در سه لایه و در امتداد هر لایه با 25 ضربه متراکم گردید. برای انجام آزمایش‌ها پس از تثبیت بار آبی حداکثر، اشباع نمودن بدنه سد خاکی و هواگیری کامل پیزومترها اقدام به اندازه‌گیری فشار آب منفذی گردید. پیزومترهای بکار رفته توسط شلنگ‌های مخصوص به تابلوی کنترل مدرج متصل گردیده (شکل 4-ب) و فشار پیزومتريک در آنها به صورت ارتفاع آب قرائت گردید. همچنین برای افزایش دقت و مقایسه با اندازه‌گیری‌های پیزومترها از سنسورهای ترانسدیوسر که از نوع ارتعاشی با دقت ± 3 میلی‌متر می‌باشند استفاده گردید (شکل 5-الف). اندازه‌گیری‌های آن توسط کد TE70 که در محیط C-Sharp توسعه داده شده است و توسط مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال به صورت بار فشاری آب در یک فایل اکسل ثبت گردید. برنامه نویسی کد TE70 به شکلی انجام شده که قابلیت 1 تا 10000 قرائت بار پیزومتريک در هر ثانیه وجود دارد. فشارهای پیزومتريک ثبت شده اندازه‌گیری‌ها را در مجموعه‌ای از نقاط گسسته بدست می‌دهد (شکل 3-ب). بنابراین اطلاعات ثبت شده در رایانه توسط کد توسعه داده شده

برای بررسی جریان نشت پایدار در بدنه سد خاکی دارای زهکش افقی، مدل فیزیکی سد خاکی در یک دستگاه نشت و زهکشی¹ در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز احداث گردید (شکل 3-الف).



شکل 3-الف

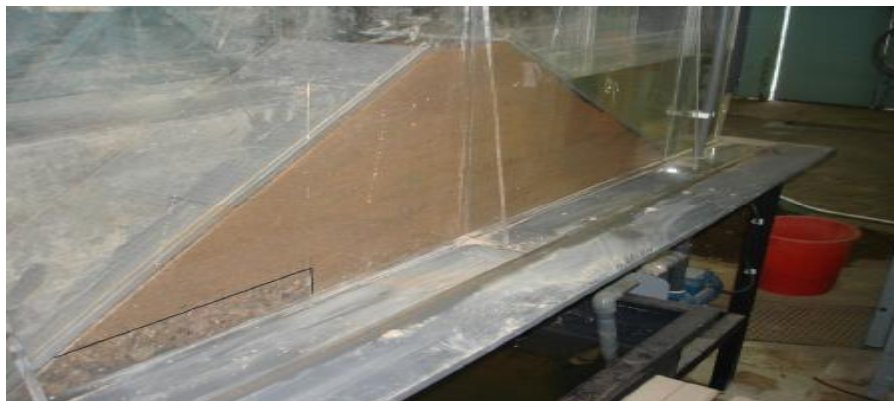


شکل 3-ب

شکل 3-الف) تصویر کلی مدل فیزیکی و ب) آرایش هندسی پیزومترها در بدنه سد خاکی

بدنه مدل فیزیکی سد خاکی شامل مصالح همگن بدنه سد و مصالح فیلتر-زهکش می‌باشد. همچنین پس از احداث سد خاکی در فضای مدل فیزیکی از دو صفحه متخلخل بر روی دو شیب بالادست و پایین دست استفاده گردید که تنها قابلیت عبور آب را داشته و از شسته شدن مصالح بدنه به مخزن سد جلوگیری می‌نمایند. بدین ترتیب، این صفحات متخلخل در صورت عدم کارایی سیستم زهکش با جلوگیری از شسته شدن و فرسایش داخلی مصالح باعث می‌شوند که شکل سد

¹Seepage and drainage tank



4- الف)



4- ب)

شکل 4- الف) جانمایی مصالح فیلتر و زهکش و ب) جانمایی تابلوی پیزومترها و سنسورهای ترانسدیوسر در مدل فیزیکی

در *MATLAB* با استفاده از توابع درونیابی مکعبی¹ تبدیل به مقادیر فشار پیزومتریک در شبکه‌ای پیوسته گردید. سپس خط آزاد نشت به صورت مکان هندسی نقاطی که بار پیزومتریک در آنها برابر ارتفاع آن نقاط می‌باشد برای شبکه پیوسته بدست آمده ترسیم گردید.

مصالح مدل فیزیکی

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق بررسی زهکش‌های افقی در یک سد خاکی همگن می‌باشد لازم است که از یک نوع مصالح با دانه بندی معین بعنوان مصالح بدنه سد استفاده گردد. در این تحقیق از یک نوع خاک که دارای نسبت معین ریزدانه به



5- الف)



5- ب)

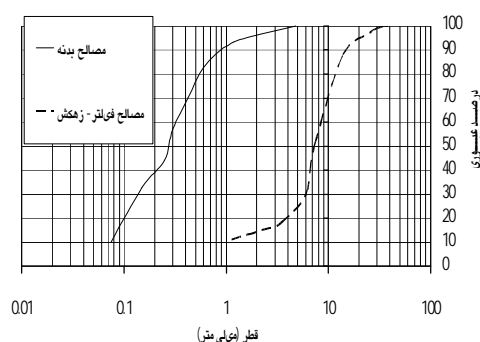
شکل 5- الف) ترانسدیوسر برای اندازه گیری فشار آب منفذی و ب) مخزن تزریق ماده رنگی ردیاب و نازل برای مشاهده مسیر خطوط جریان

¹ Cubic interpolation functions

نتایج و بحث

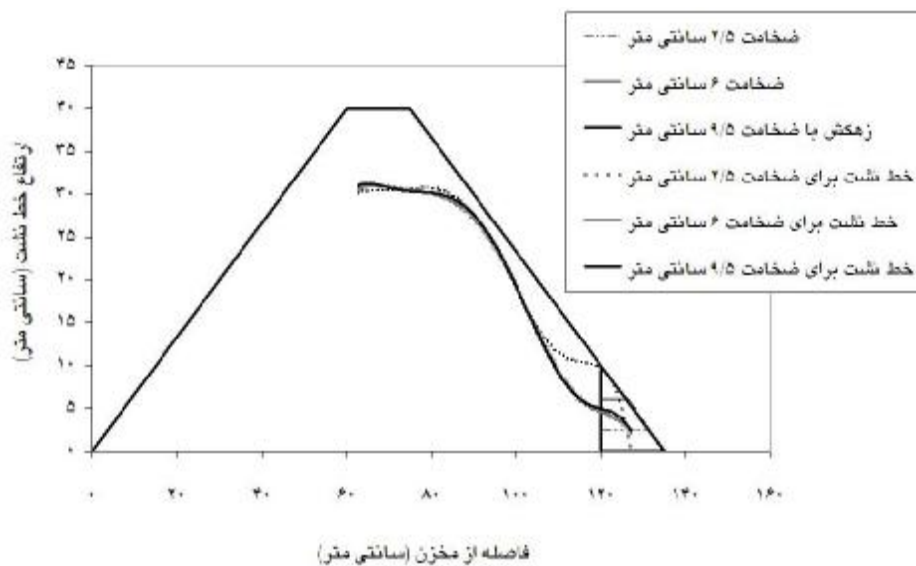
برای درک بهتر عملکرد زهکش‌ها در کنترل جریان ماندگار نشت، نتایج آزمایش‌های مربوط به ابعاد مختلف زهکش به‌ازای حداکثر گرادیان هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. با انجام آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی و به‌ازای استفاده از هریک از زهکش‌های مذکور قابلیت آنها در کاهش فشار پیزومتریک در 5 ردیف پیزومترهای تعبیه شده در مدل فیزیکی بررسی گردید. همانطور که در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، منحنی آزاد نشت توسط برنامه توسعه داده شده در نرم افزار *MATLAB* و با استفاده از داده‌های ورودی که فشارهای پیزومتریک ثبت شده توسط ترانس‌دیوسر می‌باشند، تعیین گردید. سپس برای هرکدام از طول‌های زهکش و به‌ازای ضخامت‌های مختلف منحنی‌های آزاد نشت با یکدیگر مقایسه شد تا تأثیر افزایش ضخامت در کارایی هر یک از این زهکش‌ها جهت کاهش رقوم سطح آزاد نشت و افزایش پارامتر فاصله منحنی نشت از شیب پائین دست (d) بررسی گردد. در این تحقیق سه طول مختلف در محدوده طول‌های حداقل و حداکثر پیشنهادی توسط روابط چاها (2004) در نظر گرفته شد. بدین منظور کمترین طول زهکش (15 سانتی متر) کمی بیش از مقدار بدست آمده از رابطه 6 در نظر گرفته شد و بیشترین طول زهکش (38 سانتی متر) کمی کمتر از مقدار حاصل از رابطه 7 در نظر گرفته شد تا با بررسی تغییر طول در محدوده تعیین شده اثر ضخامت بر افزایش کارایی زهکش مورد ملاحظه قرار گیرد. خط آزاد نشت به‌ازای هر سه ضخامت برای زهکش با طول حداقل به خوبی در داخل بدنه سد مهار نمی‌شود (شکل 7) و به‌ازای ضخامت 2/5 سانتی متر در نواحی فوقانی و تحتانی شیب پائین دست با آن تلاقی می‌نماید. به‌ازای ضخامت‌های

درشت دانه بوده است و منحنی دانه بندی آن در شکل 6 نشان داده شده است بعنوان مصالح بدنه سد استفاده گردید و آزمایشات نفوذپذیری به روش بار افتان بر روی آن انجام گرفت تا از کم بودن میزان نفوذپذیری آن بعنوان مانعی در برابر جریان نشت اطمینان حاصل گردد. دانه بندی مصالح فیلتر نیز با توجه به دانه بندی مصالح بدنه و با در نظر گرفتن معیارهای ترزاقی، *USACE* و *USBR* انجام شد.

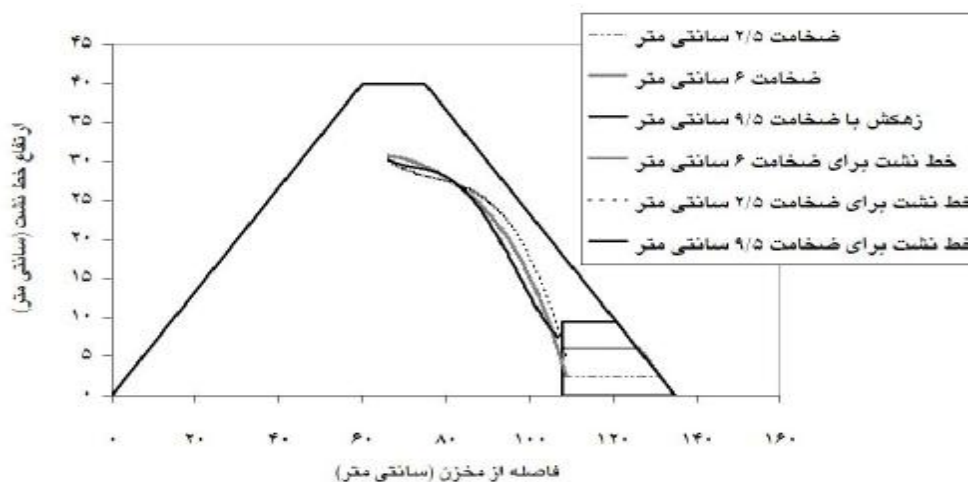


شکل 6- محدوده دانه بندی مصالح بدنه و فیلتر-زهکش در مدل آزمایشگاهی

محدوده تغییرات طول زهکش افقی نیز با توجه به پارامترهای هندسی مدل سد خاکی و با استفاده از روابط تحلیلی بدون بعد چاها (2004) تعیین گردید که در این آزمایشات سه طول مختلف 15، 25 و 38 سانتی متر با توجه به محدوده طول‌های حداقل و حداکثر توصیه شده برای زهکش در نظر گرفته شد تا اثرات آن بر جریان نشت ماندگار و منحنی آزاد نشت تعیین گردد. همچنین سه ضخامت مختلف برای زهکش‌ها در نظر گرفته شد که عبارتند از 2/5، 6 و 9/5 سانتی متر. در این تحقیق گرادیان هیدرولیکی حداکثر به‌ازای حداکثر عمق آب در مخزن (35 سانتی متر) برقرار گردید و اندازه‌گیری‌ها پس از اشباع شدن خاک، هواگیری پیزومترها و برقراری جریان نشت دائمی انجام گرفت تا میزان تأثیر افزایش ضخامت و طول زهکش در کاهش فشار آب منفذی و کاهش رقوم سطح آزاد نشت در بدنه سد خاکی و میزان جریان نشت با یکدیگر مقایسه گردد که نتایج آن در ادامه ارائه می‌گردد.



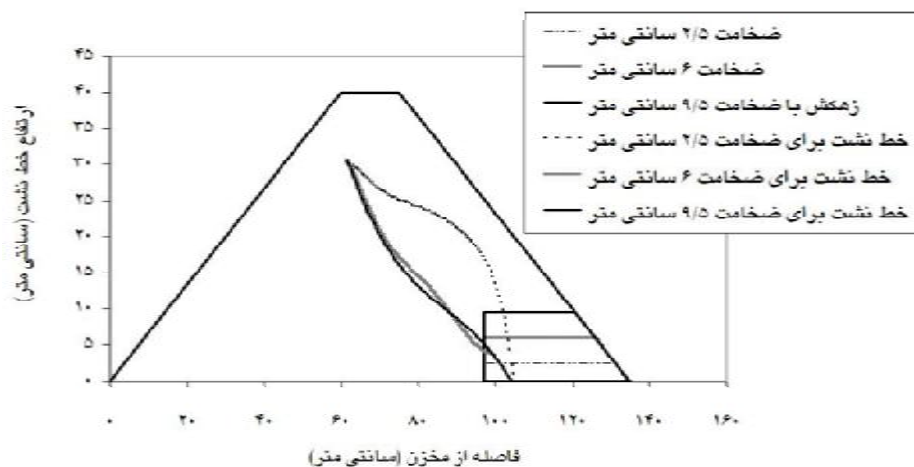
شکل 7- خطوط آزاد نشست حاصل از فشار پیزومتریک توسط برنامه توسعه داده شده در *MATLAB* به ازای ضخامت های مختلف و حداقل طول زهکش



شکل 8- خطوط آزاد نشست حاصل از فشار پیزومتریک توسط برنامه توسعه داده شده در *MATLAB* به ازای ضخامت های مختلف و طول متوسط زهکش

مهار گردیده اند و به ازای ضخامت های مختلف زهکش تغییرات چندانی در موقعیت سطح آزاد نشست ایجاد نگردیده است که این مسأله نشان دهنده تأثیر غالب طول زهکش در کاهش رقوم سطح آزاد نشست می باشد. همچنین در نواحی تحتانی شیب پائین دست سد خاکی به دلیل کارایی مناسب طول زهکش شیب خط جریان افزایش یافته و پتانسیل جریان به خوبی

6 و 9/5 سانتی متر در نواحی تحتانی وضعیت زهکشی اندکی بهبود می یابد و سطح نشست با شیب تلاقی نمی کند اما با توجه به فاصله کم خطوط نشست از شیب پائین دست در قسمت های بالایی، شیب پائین دست در معرض خطرات ناشی از تخریب به دلیل جریانات موئینه می باشد. شکل 8 سطوح آزاد نشست به ازای طول زهکش متوسط (25 سانتی متر) را نشان می دهد. همانطور که در شکل 8 نشان داده شده است خطوط آزاد نشست به خوبی در داخل بدنه سد

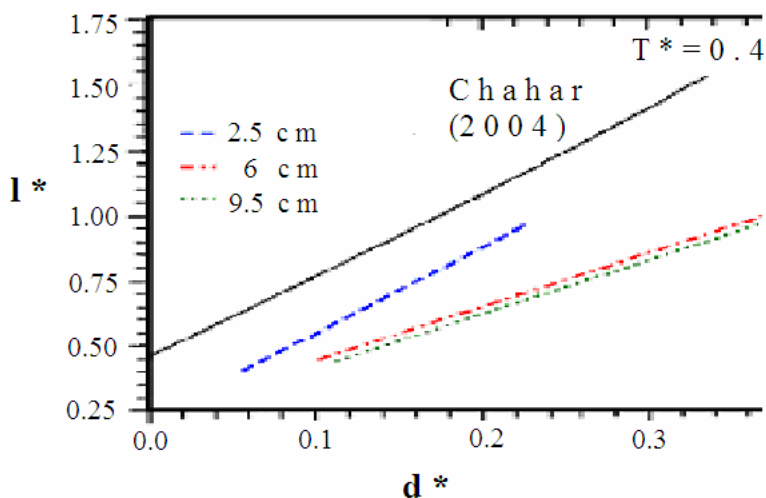


شکل 9- خطوط آزاد نشست حاصل از فشار پیزومتریک توسط برنامه توسعه داده شده در *MATLAB* به‌ازای ضخامت‌های مختلف و طول حداکثر زهکش

نشستی و مؤئینه و وقوع فرسایش پیش رونده به سمت بالادست قرار می‌دهد. مقایسه‌ای بین پارامتر d متوسط بدست آمده در آزمایشگاه و مقدار پیشنهادی توسط چاهر (2004) به‌ازای ابعاد مختلف زهکش در شکل 10 آمده است. چاهر (2004) رابطه صریح خود را برای طول بدون بعد زهکش (l^*) و پوشش بدون بعد شیب پائین دست (d^*) ارائه نمود که مفهوم این پارامترها قبلاً در شکل 1 بیان گردید. پارامتر ضخامت زهکش در روابط چاهر (2004) لحاظ نشده است که در این تحقیق پارامتر ضخامت یا ارتفاع زهکش افقی ارزیابی گردید و به‌ازای ضخامت‌های مختلف مطالعه شده در این تحقیق نمودار آن با نمودار ارائه شده توسط چاهر (2004) مقایسه شد (شکل 10). همانطور که در شکل 10 نشان داده شده است به‌ازای ضخامت $2/5$ سانتی‌متر (کمترین ضخامت) شیب خط l^* نسبت به d^* تقریباً برابر با شیب خط پیشنهادی توسط چاهر (2004) می‌باشد و عرض از مبدأ آن کمتر می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به پارامترهای موجود در روابط 5، 6 و 7 نمودار چاهر (2004) برای مقادیر T^* ، F_B^* و m و n بترتیب $0.1/4$ ، 3 و $2/5$ ارائه گردیده است. در این تحقیق مقدار دو پارامتر اول برابر با مقادیر چاهر (2004) و دو

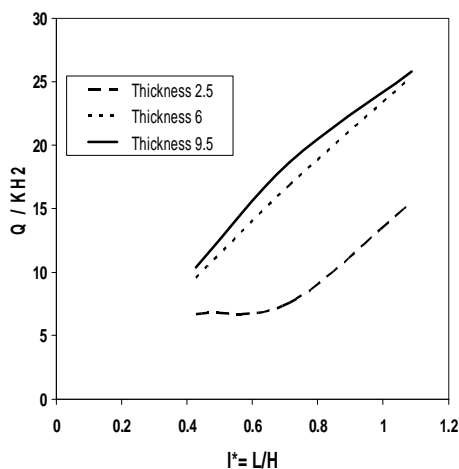
کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با توجه به تأثیر نسبی کمتر ضخامت در مقابل طول، در بخش‌های فوقانی مقدار پارامتر d (شکل 1) کاهش می‌یابد.

در مورد زهکش با طول 25 سانتی‌متر مقدار پارامتر a که در شکل 1 نشان داده شده است نیز کاهش می‌یابد که بیانگر افزایش فاصله محل برخورد سطح آزاد نشست به زهکش افقی نسبت به شیب پائین دست می‌باشد. در شکل 9 مشاهده می‌گردد به‌ازای بیشترین طول و کمترین ضخامت زهکش افقی سطح آزاد نشست به خوبی در داخل بدنه سد کنترل می‌شود اما مقدار پارامتر d تقریباً مشابه حالت زهکش با طول متوسط بدست می‌آید. با افزایش ضخامت به‌ازای طول حداکثر مشاهده می‌شود که پارامتر d به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این امر بیانگر تأثیر توأمان طول و ضخامت در کاهش پارامتر a و افزایش پارامتر d می‌باشد. این وضعیت بیانگر افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب پائین دست در مقابل پدیده فرسایش درونی ناشی از جریان نشستی و اثرات مؤئینگی می‌باشد. این در حالی است که به‌ازای طول متوسط زهکش و بر اساس روابط تحلیلی چاهر (2004) هر دو پارامتر a و d کاهش می‌یابند که کاهش پارامتر d شیب پائین دست را در معرض خطر تخریب ناشی از برخورد جریان‌های



شکل 10- مقایسه طول بدون بعد زهکش و پوشش شیب پائین دست حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی به ازای ضخامت های مختلف زهکش و نتایج رابطه چاهر (2004)

متوسط و حداکثر قابلیت زهکشی بهتری از خود نشان داده اند و اختلاف پارامتر بدون بعد دبی نشست به ازای



شکل 11- رابطه طول بدون بعد زهکش و پارامتر بدون بعد دبی نشست به ازای ضخامت های مختلف زهکش

حداقل ضخامت زهکش با مقادیر حاصل از آنها قابل توجه می باشد. شکل 7 مؤید این مطلب می باشد که به ازای کمترین ضخامت و کمترین طول، زهکش توانایی تخلیه تمامی زه آب موجود را نداشته است. در تحقیق حاضر با افزایش ضخامت زهکش به مقدار حداکثر، قابلیت زهکشی افزایش می یابد اما نرخ افزایش دبی

پارامتر m و n برابر با $1/5$ در نظر گرفته شد تا گرادیان هیدرولیکی بحرانی تری ایجاد گردد. شکل 10 نشان می دهد که به ازای ضخامت های مختلف نمودارهای حاصل از نتایج مدل آزمایشگاهی در زیر نمودار ارائه شده توسط چاهر (2004) قرار می گیرد و این بدان معنی است که به ازای مقدار کمتر l^* یا طول کمتر زهکش مقدار بیشتری برای پوشش شیب پائین دست (d) بدست می آید. با افزایش ضخامت زهکش مشاهده می گردد که شیب نمودار کاهش می یابد یعنی با افزایش ضخامت به ازای طول زهکش کمتر می توان به پوشش شیب پائین دست (d) بیشتری دست یافت.

نتایج اندازه گیری های دبی نشست به روش حجمی در زهکش تحتانی مدل فیزیکی به ازای ابعاد مختلف زهکش ها به صورت پارامترهای بدون بعد جریان نشستی در شکل 11 آورده شده است. با توجه به قضیه p باکینگهام، در این تحقیق سه متغیر بدون بعد $\frac{W}{H}$ ، $\frac{L}{H}$ ، $\frac{Q}{kH^2}$ بدست آمد که W, L و H بترتیب طول زهکش، ضخامت زهکش و حداکثر عمق آب در پشت سد می باشند و مقدار k هدایت هیدرولیکی خاک مورد استفاده که بر اساس آزمایش بار افتان $2/8 \times 10^{-5}$ سانتی متر بر ثانیه اندازه گیری گردید. مطابق شکل 11 ضخامت های

جریان نشتی خروجی از زهکش نیز با افزایش ضخامت از مقدار حداقل به متوسط به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت که این نرخ افزایش دبی به‌ازای ضخامت حداکثر نسبت به ضخامت متوسط کاهش یافت. بر این اساس در آزمایش‌ها ضخامت متوسط (6 سانتی‌متر) دارای عملکرد بهینه بوده است. این مسأله مؤید این است که با افزایش ضخامت زهکش از حد معین (یک سوم ارتفاع سد خاکی) قابلیت زهکشی افزایش قابل ملاحظه‌ای نمی‌یابد. همچنین با تغییر در طول زهکش ابتدا شیب تغییرات دبی زیاد می‌باشد که با افزایش این پارامتر از متوسط به حداکثر شیب نمودار جریان نشتی کاهش می‌یابد (شکل 11). به طور کلی تأثیر طول زهکش نسبت به ضخامت در افزایش قابلیت تخلیه زه‌آب قابل توجه است. در انتها با توجه به تأثیر پارامتر ضخامت بر سطح آزاد نشت و بویژه بر دبی نشت، جهت ادامه کار در این زمینه توصیه می‌شود که تحقیقات بیشتری صورت گیرد و با لحاظ نمودن پارامتر ضخامت در سیستم زهکش‌های افقی، کارایی این زهکش‌ها در خاک‌های لایه‌بندی شده با نفوذپذیری متفاوت نیز مورد بررسی قرار گیرد. در این خاک‌ها نفوذپذیری افقی زیاد با ایجاد جریان نشتی افقی و دور زدن زهکش مانع از ورود جریان به زهکش و در نهایت فرسایش داخلی می‌گردد که بررسی این موضوع در ادامه این کار پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

از همکاری مدیریت گروه خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز و بویژه از مسئولین آزمایشگاه ژئوتکنیک و مکانیک خاک دانشگاه تبریز که در آماده سازی مصالح و انجام آزمایشات مورد نیاز کمال همکاری را با محققین این پروژه داشتند سپاسگزاری می‌گردد.

نشت با تغییر ضخامت زهکش از مقدار متوسط به حداکثر (9/5 سانتی متر) کاهش می‌یابد. همچنین برای هر یک از ضخامت‌ها با افزایش طول در ابتدا میزان پارامتر بدون بعد جریان نشتی با شیب تند افزایش می‌یابد اما با افزایش این طول به میزان طول حداکثر، شیب نمودار کاهش می‌یابد. این مسأله نشانگر این است که با افزایش طول زهکش به مقادیر بیش از حداکثر بدست آمده توسط رابطه چاهر (2004) شدت تخلیه نسبی زه‌آب کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق زهکش افقی با ضخامت‌های مختلف در محدوده طول‌های پیشنهادی توسط روابط تحلیلی چاهر (2004) در یک مدل فیزیکی جهت بررسی عملکرد آنها در کنترل جریان نشت ماندگار مورد استفاده قرار گرفت تا رفتار کلی خط نشت با ترکیب دو پارامتر طول و ضخامت مشاهده شود زیرا در روابط و نمودارهای ارائه شده توسط چاهر (2004) تأثیر پارامتر ضخامت زهکش لحاظ نگردیده است. به‌ازای گرادیان هیدرولیکی حداکثر ایجاد شده و پس از بررسی سطوح آزاد نشت در بدنه سد خاکی نتایج حاصل با نتایج چاهر (2004) مقایسه گردید. نتایج حاکی است که به‌ازای حداقل طول زهکش پیشنهادی چاهر (2004) و حداقل ضخامت، عملکرد زهکش قابل قبول نمی‌باشد. با افزایش ضخامت کارایی زهکش بهبود یافته اما کماکان مقدار d^* که از لحاظ محافظت شیب پائین دست در مقابل فرسایش درونی و جریان‌های موئینه اهمیت دارد کمتر از مقدار قابل قبول می‌باشد. به‌ازای بقیه طول‌ها و ضخامت‌ها عملکرد زهکش‌ها در کاهش رقوم سطح آزاد نشت مناسب می‌باشند. همچنین به‌ازای تمامی ابعاد زهکش بکار رفته در آزمایش‌ها پوشش شیب پائین دست (d^*) بیش از مقادیر بدست آمده توسط چاهر (2004) بدست آمد که مقدار این افزایش به‌ازای ضخامت‌های متوسط و حداکثر قابل ملاحظه می‌باشد (شکل 10). همچنین دبی

منابع مورد استفاده

- Anonymus, 2003. United States Bureau of Reclamation (USBR). Design of Small Dams. Oxford and IBH, New Delhi.
- Belkacem M and Abderrahmane B, 2008. A design chart for positioning a drainage blanket in an earth dam. EJGE, Technical Note, Vol. 13.
- Chahar BR, 2004. Determination of length of horizontal drain in homogeneous earth dams. ASCE, J Irrig & Drain Eng 130(6): 530-536.
- Fell R, Wan CF, Cyganiewicz J and Foster M, 2003. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. J Geotech Geoenviron Eng 129(4): 307-314.
- Foster M, Fell R and Spannagle M, 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. Can Geotech J 37(5): 1000-1024.
- Hartono S, 2002. Prediction of transient head on seepage path using boundary fitted coordinate(BFC) system. MSc thesis, Dept of Civil and Envir Eng, Louisiana State University, Louisiana.
- Mattsson H , Hellström JG I and Lundström TS, 2008. On internal erosion in embankment dams: a literature survey of the phenomenon and the prospect to model it numerically. Research Report, Luleå University of Technology, Sweden.
- Middlebrooks TA, 1953. Earth dam practice in the United States. Trans Am Soc Civ Eng 118: 697-722.
- Mishra GC and Parida BP, 2006. Earth dam with toe drain on an impervious base. ASCE Pp: 379-388. Int Y Geomechanics, November/September.