

## تأثیر زهکش افقی بر پایداری سد خاکی همگن در شرایط تخلیه سریع

امیر ملک‌پور<sup>1\*</sup>، داود فرسادی‌زاده<sup>2</sup>، علی حسین‌زاده دلیر<sup>2</sup> و جمشید صدر کریمی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 89/9/21 تاریخ پذیرش: 89/12/7

1- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

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](mailto:Amir_MLK@yahoo.com)

### چکیده

در سدهای خاکی فرایند تخلیه سریع موجب ایجاد شیب فشار بین بدنه سد و مخزن می‌گردد. این شیب فشار پس از تخلیه مخزن به دلیل تأخیر زمانی لازم جهت اتلاف اضافه فشار آب منفذی موجود در شیب بالادست ایجاد گردیده و آن را در معرض لغزش قرار می‌دهد. در این تحقیق در یک مدل سد خاکی همگن تأثیر طول و ضخامت زهکش افقی بر پایداری شیب بالادست در شرایط تخلیه سریع مورد بررسی قرار گرفت. به ازای ابعاد مختلف زهکش، بلافاصله پس از افت سطح آب محدوده تغییرات ضریب اطمینان در مقابل لغزش سطحی و عمیق به ترتیب 1/5-2/6 و 1/3-2/2 بدست آمد که با گذشت زمان تحت تأثیر زهکش با حداکثر طول و ضخامت موثر به ترتیب به 2-3 و 2/2-3 افزایش یافت. علاوه بر این به ازای نسبت افت سطح آب کمتر از 0/3، زهکش با نسبت طول 0/43 (طول زهکش به عمق آب مخزن) به ازای تمامی ضخامت‌ها پایداری را ایجاد کرد. برای نسبت‌های بزرگتر افت سطح آب نیز، نسبت طول زهکش 0/71 با ضخامت متوسط، پایداری در مقابل لغزش را تأمین نمود.

واژه‌های کلیدی: تخلیه سریع، زهکش افقی، سد خاکی همگن، ضریب اطمینان، فشار آب منفذی

## Effect of Horizontal Drain on the Stability of Homogeneous Earth Dam Under Rapid Drawdown Conditions

A Malekpour<sup>1\*</sup>, A Hosseinzadeh Dalir<sup>2</sup>, D Farsadizade<sup>2</sup>, J Sadr Karimi<sup>3</sup>

Received: Dec 12, 2010 Accepted: Feb 26, 2011

<sup>1</sup> Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Gilan, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Dept. of Geotechnical Engin., School of Engin, Univ. of Tabriz, Iran

\*Corresponding author: Email: [Amir\\_MLK@yahoo.com](mailto:Amir_MLK@yahoo.com)

### Abstract

In earth dams, the rapid drawdown process creates a pressure gradient between the embankment and reservoir. This pressure gradient which is due to the temporal delay that is required for dissipating excessive pore water pressure existing in the upstream slope, may let the upstream slope to be prone to failure. In this research, the effect of length and thickness (of horizontal drain) on upstream slope stability under rapid drawdown conditions were considered in a model of homogeneous earth dam. The factor of safety for different drain dimensions immediately after drawdown ranged within 1.5-2.6 and 1.3-2.2 for superficial and deep slips, respectively, and increased with time to 2-3 and 2.2-3 for the drain with maximum effective length and thickness. Moreover, for drawdown ratio of less than 0.3, drain with the length ratio (drain length to water depth in reservoir) of 0.43 assured the stability. For the greater ratios of drawdown, drain length ratio of 0.71 with medium thickness provided the stability against sliding.

**Keywords:** Homogeneous earth dam, Horizontal drain, Pore water pressure, Rapid drawdown, Safety Factor

### مقدمه

برای استهلاک دارد. این مسأله سبب ایجاد گرادیان فشار بین بدنه و مخزن می گردد و اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده در بدنه موجب کاهش فشار موثر و در نتیجه کاهش مقاومت برشی موثر می گردد و خطر ناپایداری و لغزش شیب بالادست را به دنبال خواهد داشت. برخی از موارد مشاهده شده مربوط به تخریب سدهای خاکی در اثر افت آب مخزن عبارتند از سد پیلارسیتوس<sup>1</sup> در جنوب سانفرانسیسکو و سد والتربودین<sup>2</sup> در آلاباما (بریلگن 2007).

سد خاکی، به عنوان یکی از مهم ترین سازه های خاکی، همواره در معرض ناپایداری ناشی از افزایش یا کاهش سطح آب مخزن می باشد. این سازه با استفاده از مصالح محلی و به منظور کنترل و ذخیره رواناب احداث می شود. سد خاکی همگن یکی از انواع این سازه است که معمولاً از یک نوع مصالح ریزدانه با قابلیت بالای نگهداری آب ساخته می شود. در این سازه با کاهش سطح آب مخزن، فشار هیدرواستاتیک ناشی از وزن آب روی شیب بالادست که عامل حفظ پایداری شیب بالادست است کاهش می یابد و این در حالی است که فشار آب منفذی موجود در بدنه نیاز به زمان بیشتری

<sup>1</sup> Pilarcitos dam

<sup>2</sup> Walter Boudin dam

بسیار کند سطح آب در مخزن) یا عدم زهکشی (افت سریع سطح آب) که دو حالت حدی می‌باشند بیانگر رفتار واقعی سازه نمی‌باشند و در شرایط واقعی ترکیب دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و نرخ افت سطح آب سبب رفتاری متفاوت نسبت به این دو حالت حدی می‌شود که این مسأله موجب تفاوت نتایج تحلیل‌های عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی (یا نتایج اندازه‌گیری-های صحرائی) می‌گردد. در این خصوص مشاهده می‌شود که برخی مواقع در حالت افت سریع سطح آب حتی به ازای مصالح با نفوذپذیری زیاد نیز فرض رفتار زهکشی شده قابل قبول به نظر نمی‌رسد (حتی به ازای  $T \geq 6$ ).

از سوی دیگر محققین بررسی‌های زیادی در خصوص بهبود وضعیت زهکشی در بدنه سدهای خاکی انجام داده‌اند که در این راستا ملک پور و همکاران (1390) نقش زهکش افقی در کنترل نشست ماندگار از بدنه سد خاکی همگن را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به تأثیر مثبت زهکش‌های افقی در جلوگیری از فرسایش درونی شیب پائین دست سد خاکی در شرایط نشست ماندگار، در این تحقیق نتایج کاربرد این زهکش‌ها به ازای طول‌ها و ضخامت‌های مختلف در مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اثر آنها بر رفتار (زهکشی شده یا غیر زهکشی شده) و ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست سد خاکی در شرایط تخلیه سریع مخزن مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است که در صورت کارایی مناسب زهکش‌های افقی می‌توان علاوه بر شرایط نشست ماندگار آنها را در شرایط نشست غیر ماندگار ناشی از تخلیه سریع نیز توصیه نمود.

نشست غیرماندگار ناشی از تخلیه سریع سد

نشست غیر ماندگار یک سازه ژئوتکنیکی همچون سد خاکی عبارتست از تغییر زمانی خصوصیات جریان نشستی (فشار آب منفذی و خط فریاتیکی). رابطه 2 معادله نشست در حالت غیر ماندگار را نشان می‌دهد.

$$\frac{s}{b} \frac{\partial j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial j}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial j}{\partial y} \right) \pm \frac{q}{b} \quad [2]$$

به طور کلی دو رویکرد متفاوت توسط محققین برای تعیین فشار آب منفذی پس از افت سطح آب در مخزن اتخاذ گردیده است که طی آن عده‌ای از محققین رفتار زهکشی شده و عده‌ای دیگر رفتار غیر زهکشی شده را برای سد خاکی در نظر گرفتند. از جمله محققینی که پایداری شیب‌ها را در شرایط غیر زهکشی شده مورد بررسی قرار داده‌اند می‌توان به لوو و کارافیات (1980)، بیکر و همکاران (1993) و انجمن مهندسی ارتش آمریکا<sup>1</sup> (2003) اشاره نمود. از سوی دیگر، اسوانو و نوردال (1987)، رایت و دانکن (1987)، لین و گریفیس (2000) و بریلگن (2007) جهت بررسی پایداری شیب خاکی پس از تغییرات سطح آب مخزن، پارامترهای مقاومت برشی موثر خاک را در شرایط زهکشی شده مورد بررسی قرار دادند. این تحقیقات عمدتاً بر اهمیت نقش زهکشی به عنوان یکی از عوامل پایداری شیب‌های خاکی تأکید می‌نمایند.

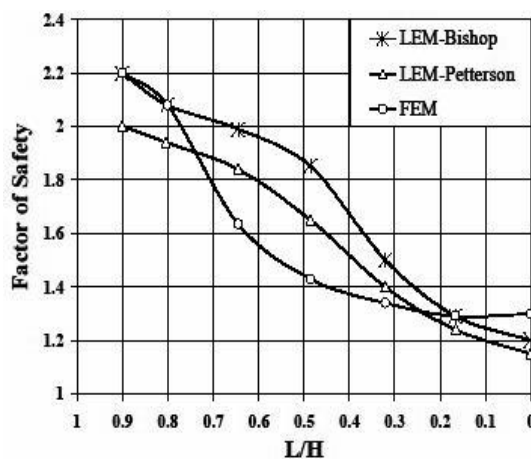
در این میان برخی از محققین از جمله دانکن و همکاران (1996) و دانکن و رایت (2005) بر نقش پارامتر  $T$  که زمان بدون بعد تحکیم نامیده می‌شود (رابطه 1) در تعیین وضعیت زهکشی (رفتار زهکشی شده یا غیرزهکشی شده) و پایداری شیب خاکی تأکید نموده‌اند. بر اساس تحقیقات آنها بیش از 99 درصد اضافه فشار آب منفذی ناشی از افت سطح آب مخزن به ازای  $T \geq 3$  مستهلک گردیده و به ازای زمان‌های بیشتر از آن باید رفتار زهکشی شده در تحلیل پایداری شیب خاکی در نظر گرفته شود.

$$T = \frac{c_v t_d}{H^2} \quad [1]$$

که در رابطه مذکور،  $H$  طول مسیر زهکشی (در اینجا مقدار آن برابر میزان افت سطح آب در مخزن فرض می‌گردد)،  $c_v$  ضریب تحکیم و  $t_d$  زمان تحکیم می‌باشد. نتایج تحقیق بریلگن (2007) حاکی از نقش حیاتی سرعت و میزان زهکشی در پایداری شیب خاکی می‌باشد. او تأکید می‌نماید که فرض زهکشی آزاد (افت

<sup>1</sup> US Army corps of engineers method

در مخزن سد دائوتینگ<sup>3</sup> به این نتیجه رسید که با افت سطح آب تا یک سوم ارتفاع سد ضریب اطمینان به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات او نشان داد که ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست به ازای افت سطح آب معادل یک سوم ارتفاع سد، 34 درصد کاهش می‌یابد که این میزان به ازای تخلیه کامل مخزن 43 درصد می‌باشد (شکل 2). در شکل 2،  $L$  و  $H$  بترتیب عمق آب و پائین افتادگی سطح آب پشت سد در شرایط تخلیه سریع می‌باشد. بر این اساس محدوده بحرانی افت سطح آب تا یک سوم ارتفاع سد تعیین گردید. لین و گریفیس (1997) و ویراتجاندر و میچالووسکی (2006) نیز نتایج مشابه شکل 2 را ارائه نمودند.



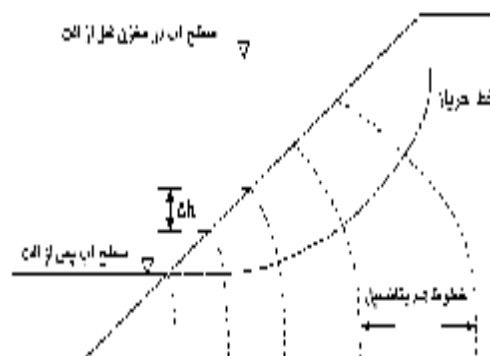
شکل 2- ضریب اطمینان شیب بالادست به روش‌های مختلف در شرایط پدیده RDD و به ازای  $L/H$  های مختلف (تران (2004)

در این تحقیق برای بررسی پایداری شیب خاکی از روش موازنه حدی یا تعادل حدی (LEM)<sup>4</sup> استفاده شده است. در این روش ضریب اطمینان ( $F$ ) برابر با نسبت مقاومت برشی خاک به تنش برشی لازم برای قرار دادن شیب در وضعیت تعادل حدی (آستانه لغزش) می‌باشد (رابطه 3).

که در مسائل نشست و آبهای زیرزمینی، پتانسیل سرعت،  $s$  ضریب ذخیره<sup>1</sup>،  $b$  ضخامت لایه آبدار،  $k_x$  و  $k_y$  هدایت هیدرولیکی در امتداد افقی و قائم و  $q$  دبی ورودی به محیط متخلخل و یا دبی خروجی از آن می‌باشد.

همانطور که در بخش مقدمه توضیح داده شد تخلیه سریع مخزن می‌تواند موجب ناپایداری و بروز لغزش در شیب بالادست گردد که دلیل آن باقی ماندن مصالح سد در حالت اشباع و آغاز جریان نشستی به سمت شیب بالادست می‌باشد. شمایی از افت سطح آب در مخزن و شبکه جریان (خط نشست و خطوط هم پتانسیل) حاصل از آن به سمت شیب بالادست در شکل 1 نشان داده شده است.

اگر تخلیه مخزن با سرعتی انجام شود که در هنگام افت سطح آب فشار آب منفذی داخل بدنه تغییر نکند و خط فراتیک در موقعیت پیشین خود باقی بماند اصطلاحاً به آن تخلیه سریع<sup>2</sup> (RDD) گفته می‌شود. پایداری شیب بالادست در شرایط تخلیه سریع سد خاکی تابع عوامل متعددی می‌باشد که عبارتند از:



شکل 1- شبکه جریان در شیب بالادست پس از افت سطح آب در مخزن

نفوذپذیری مصالح سد، وضعیت زهکشی، سرعت افت سطح آب و نسبت افت سطح آب در مخزن. تران (2004) با بررسی پدیده RDD با استفاده از روش‌های مختلف

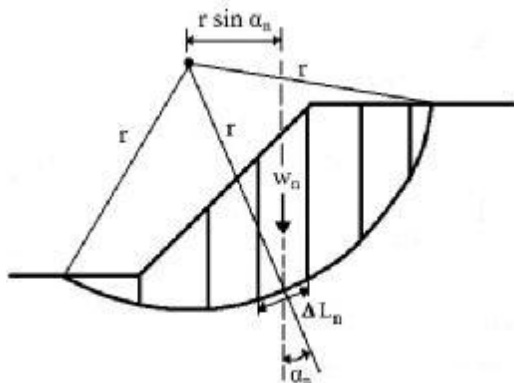
<sup>3</sup>Dau Tieng

<sup>4</sup>Limit equilibrium method

<sup>1</sup>Storage coefficient

<sup>2</sup>Rapid drawdown

واقعی از قطعاتی عبور می نماید که دارای کمترین ضریب اطمینان باشند.



شکل 3- پارامترهای تحلیل پایداری به روش قطعه بر مبنای روش تعادل حدی

از سوی دیگر ویراتجاندر و میچالوسکی (2006) برای تعیین ضریب اطمینان شیب های خاکی با چسبندگی کمتر (خاک های دانه ای) که دارای سطح لغزش تقریباً خطی می باشند با استفاده از روش آنالیز حدی رابطه زیر را ارائه دادند.

$$F = \frac{\frac{g_w}{g} \left(1 - \frac{L_1}{H}\right)^2 \sin^2 b - \frac{g_w}{g} \left(1 - \frac{L_2}{H}\right)^2 + \cos^2 b}{\left[1 - \frac{g_w}{g} \left(1 - \frac{L_1}{H}\right)^2\right] \sin b \cos b} \tan \phi \quad [5]$$

پارامترهای رابطه 5 در شکل 4 نشان داده شده است. که در آن  $L_1$  و  $L_2$  به ترتیب موقعیت سطح ایستابی در مخزن و شیب خاکی نسبت به تاج سد می باشد که در صورت وقوع پدیده RDD مقدار  $L_2$  به دلیل عدم تغییر موقعیت سطح ایستابی در لحظات اولیه پس از تخلیه سریع برابر صفر در نظر گرفته می شود.  $\gamma$  و  $\gamma_w$  نیز به ترتیب وزن مخصوص مصالح خاکی و وزن مخصوص آب می باشند.

$$F = \frac{c'}{c'_m} = \frac{\tan j'}{\tan j'_m} \quad [3]$$

در این رابطه  $c'$  و  $j'$  پارامترهای مقاومت برشی خاک می باشند که با استفاده از معیار گسیختگی موهر-کولمب<sup>1</sup> تعیین می شوند و  $c'_m$  و  $j'_m$  مقدار لازم پارامترهای مقاومت برشی برای قرار دادن شیب خاکی در آستانه لغزش می باشد.

تحلیل پایداری به روش LEM با سطح لغزش دایره ای، به دو صورت رایج می باشد که عبارتند از روش توده<sup>2</sup> و دیگری روش قطعه<sup>3</sup>. در روش اول کل توده خاک در بالای سطح لغزش فرضی به عنوان جسم واحد در نظر گرفته می شود اما در روش قطعه، سطح لغزش به صورت قطعات مجزا در نظر گرفته می شود و پایداری این قطعات مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این روش امکان در نظر گرفتن ناهمگنی ها و تأثیر فشار آب حفره ای میسر می شود که به همین دلیل در تحقیق حاضر از روش قطعه استفاده می گردد. رابطه روش معمولی قطعه<sup>4</sup> با در نظر گرفتن جریان نشت که در خاکهای همگن کاربرد دارد و در آن قطعات بصورت مجزا و اثر نیروهای بین قطعه ای صرفنظر می گردد در ذیل آورده شده است (رابطه 4).

$$F = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c \Delta L_n + (W_n \cos a_n - u_n \Delta L_n) \tan j]}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin a_n} \quad [4]$$

که  $\phi$  و  $c$  به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی مصالح و چسبندگی (پارامترهای مقاومت برشی)،  $u_n$  و  $W_n$  به ترتیب فشار آب منفذی و وزن قطعه  $n$  ام می باشند. بقیه پارامترهای رابطه 4 در شکل 3 نشان داده شده است. برای هر سطح لغزش فرضی با تعیین ضریب اطمینان قطعات، امکان وقوع لغزش در آنها مورد ارزیابی قرار می گیرد. بدیهی است که سطح لغزش

<sup>1</sup>Mohr-Coulomb failure criterion

<sup>2</sup>Mass procedure

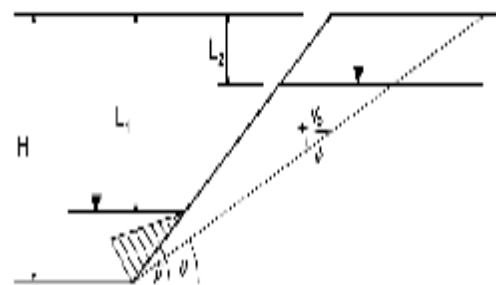
<sup>3</sup>Method of slices

<sup>4</sup>Ordinary method of slices

خاکی با توجه به فضای موجود در دستگاه کنترل نشت و زهکشی ( $m, n = 1/5$ ) کمی بیش از مقدار واقعی (3- $m, n = 2$ ) در نظر گرفته شد. در این حالت با ایجاد مسیر نشستی کوتاهتر (گرادیان هیدرولیکی بیشتر) عملکرد زهکش ها در شرایط بحرانی تر از شرایط واقعی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

دانه بندی مصالح فیلتر-زهکش براساس دانه بندی مصالح بدنه و با در نظر گرفتن معیار طراحی فیلتر موجود در مراجع مکانیک خاک (رحیمی 1382، طاحونی 1380) انجام شد که منحنی دانه بندی مصالح بدنه و فیلتر-زهکش در ملک پور و همکاران (1390) ارائه گردیده است. همچنین 9 زهکش افقی با ترکیب 3 طول و 3 ضخامت در نظر گرفته شد. در این خصوص روابط بدون بعد چاهر (2004) برای تعیین حداقل و حداکثر طول موثر زهکش استفاده گردید که طول موثر زهکش را بر حسب خصوصیات هندسی و به عنوان نسبتی از حداکثر عمق آب پشت سد تعیین می نمایند. همچنین از نتایج میشرای و پاریدا (2006) که حداکثر ضخامت موثر زهکش را کمتر از یک سوم ارتفاع سد خاکی پیشنهاد می نماید به عنوان معیار تعیین محدوده ضخامت زهکش در مدل فیزیکی استفاده گردید. روابط و معیارهای مذکور و خصوصیات مربوط به نفوذپذیری مصالح مدل سد خاکی در تحقیق گذشته نویسندگان مقاله (ملک پور و همکاران 1390) با جزئیات بیشتر ارائه گردیده است.

بر اساس توضیحات بالا، سه طول 15، 25 و 38 سانتی متر (در متن مقاله به ترتیب تحت عنوان طول حداقل، متوسط و حداکثر) با استفاده از روابط چاهر (2004) و سه ضخامت 2/5، 6 و 9/5 سانتی متر (در متن مقاله به ترتیب تحت عنوان ضخامت حداقل، متوسط و حداکثر) بر مبنای معیار ضخامت موثر میشرای و پاریدا (2006) برای آزمایش ها در نظر گرفته شد. هدف از این آزمایش ها بررسی کارایی ابعاد مختلف زهکش در تعدیل فشار منفذی و افزایش ضریب اطمینان پایداری سد خاکی همگن در شرایط تخلیه سریع مخزن



شکل 4- مکانیزم لغزش شیب های خاکی در شرایط RDD به ازای خاکهای با چسبندگی کم (ویراتجاندر و میچالووسکی 2006)

ویژگی رابطه 5 این است که ضریب اطمینان را به صورت تابعی از خصوصیات مصالح و نسبت افت سطح آب در مخزن و بدنه سد خاکی ارائه می دهد و نتایج آن قابل تعمیم به سدهای خاکی با هندسه های مختلف می باشد. در شرایطی که شکل سطح لغزش (دایره ای یا خطی) دقیقاً مشخص نباشد با مقایسه نتایج روابط 4 و 5 می توان دید مناسبی از وضعیت پایداری شیب در صورت وقوع سطوح لغزش مختلف بدست آورد.

#### مواد و روش ها

در این تحقیق مدل فیزیکی سد خاکی در یک دستگاه کنترل نشت و زهکشی<sup>1</sup> در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز احداث گردید. بر اساس دسته بندی سدهای خاکی، با در نظر گرفتن ارتفاع اسمی 20 متر برای سدهای خاکی کوچک تا متوسط (که استفاده از زهکش افقی در آنها رایج است)، مقیاس 1/50 برای تشابه هندسی ارتفاع سد انتخاب گردید و ارتفاع سد خاکی 40 سانتی متر، حداکثر عمق آب در مخزن 35 سانتی متر (با در نظر گرفتن 5 سانتی متر ارتفاع آزاد) و عرض تاج بر اساس ارتفاع سد و بر اساس روابط تعیین عرض تاج سدهای خاکی (رحیمی 1382) 15 سانتی متر در نظر گرفته شد. شیب های جانبی سد

<sup>1</sup>Seepage and drainage tank

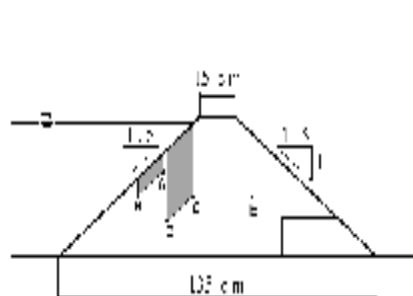
منفذی ( $u_n$ ) ثبت شده توسط دو حسگر موجود در هر قطعه (در هر لحظه معین پس از آغاز تخلیه سریع) و قراردادن در رابطه 4 و فرض تغییرات ناچیز پارامترهای مقاومت برشی ( $\phi$  و  $c$ ) در حین تخلیه سریع ضریب اطمینان مربوط به آن قطعه در لحظه مورد نظر محاسبه گردید.

آزمایش‌ها به ازای سه نسبت مختلف پائین افتادگی سطح آب ( $L/H$ ) با سرعت یکنواخت انجام شد که این سه نسبت عبارتند از  $5/35$ ،  $10/35$  و  $15/35$  که در آن  $L$  میزان پائین افتادگی سطح آب و  $H$  حداکثر عمق آب در مخزن بر حسب سانتی متر می باشند. نسبت‌های پائین افتادگی سطح آب در محدوده بحرانی پیشنهاد شده توسط تران (2004) که در بخش قبل به آن اشاره گردید در نظر گرفته شدند. پس از اجرای هر یک از نسبت‌های پائین افتادگی سطح آب، حسگرها به صورت پیوسته به ثبت تغییرات زمانی فشار آب منفذی در بدنه سد ادامه دادند تا علاوه بر ضریب اطمینان اولیه پس از افت سطح آب، روند تغییرات زمانی ضریب اطمینان نیز مورد بررسی قرار گیرد که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود.

### نتایج و بحث

بر اساس توضیحات بخش قبل برای بررسی تأثیر ابعاد زهکش‌های افقی بر پایداری سد خاکی به ازای نسبت‌های مختلف افت سطح آب در مخزن آزمایش‌های متعددی انجام شد و پایداری شیب بالادست در دو قطعه AB و CD که بر روی دو سطح لغزش احتمالی مختلف قرار گرفته اند ارزیابی گردید. قطعه AB بخشی از یک صفحه لغزش سطحی و قطعه CD بخشی از یک صفحه لغزش عمیق می باشد. نسبت‌های افت سطح آب در محدوده بحرانی پیشنهاد شده توسط تران (2004) انتخاب گردید تا بحرانی‌ترین شرایط در پایداری شیب بالادست اعمال گردد و عملکرد زهکش‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده جهت تعیین ضریب اطمینان (با استفاده از رابطه 4) به ازای نسبت‌های مختلف افت سطح آب در مخزن و

(RDD) می باشد. همچنین 5 حسگر<sup>1</sup> برای ثبت تغییرات زمانی فشار پیزومتریک بکار گرفته شد. همانطور که آرایش قرار گیری حسگرها در شکل 5 نشان می‌دهد، بیشترین تعداد حسگر (4 حسگر) در شیب بالادست قرار گرفته است (نقاط A, B, C, D) که این مسأله به دلیل احتمال تخریب شیب بالادست در اثر تخلیه سریع مخزن و لزوم بررسی تغییرات زمانی فشار آب منفذی در این ناحیه بلافاصله پس از کاهش سطح آب مخزن می‌باشد.

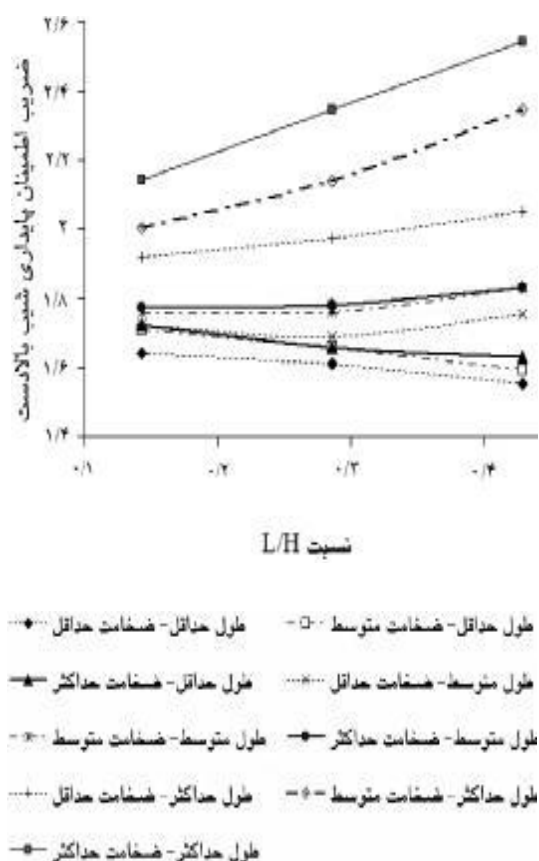


شکل 5- آرایش حسگرهای فشار آب منفذی در مدل فیزیکی

همچنین یک حسگر (E) در نزدیکی زهکش نصب گردید که به منظور مقایسه سرعت استهلاک فشار آب منفذی در شیب بالادست نسبت به نقطه ای در نزدیکی زهکش (E) می باشد.

جهت تعیین ضریب اطمینان از روش قطعه (رابطه 4) استفاده گردید و مشابه روشی که در سد گلن شیرا (آلونسو و پینیول 2009) بکار گرفته شد مقادیر ضریب اطمینان بر روی دو قطعه لغزشی سطحی و عمیق (AB و CD) در دو امتداد موازی با وجه بالادست سد خاکی محاسبه گردید. در این رابطه پارامترهای مقاومت برشی مصالح بدنه عبارتند از زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) 24 درجه، چسبندگی (c)  $15/2$  کیلو نیوتن بر متر مربع و وزن مخصوص مصالح بدنه  $18/79$  کیلونیوتن بر متر مکعب می‌باشد. با ضرب وزن مخصوص در مساحت قطعات AB و CD وزن آن قطعات ( $W_n$ ) تعیین گردید.  $\alpha_n$  و  $\Delta L_n$  برای قطعات AB و CD به ترتیب  $32/5$  درجه و 13 سانتی متر می‌باشد. با محاسبه میانگین فشار آب

<sup>1</sup>Sensor



شکل 6- تغییرات ضریب اطمینان در مقابل افت سطح آب مخزن برای سطح لغزش احتمالی AB

همانگونه که در شکل 7 نشان داده شده است برای قطعه لغزشی CD به ازای طول حداقل و ضخامت های مختلف نمودارها نزدیک به هم و دارای شیب خیلی کم و صعودی می‌باشند. در این حالت تأثیر هرچند جزئی زهکش در ایجاد حالت زهکشی شده مشاهده می‌شود. از سوی دیگر فاصله کم نمودارها بیانگر تأثیر کم ضخامت به ازای حداقل طول زهکش می‌باشد. به ازای طول‌های متوسط و حداکثر با افزایش ضخامت فاصله نمودارها افزایش یافته و شیب افزایش ضریب اطمینان نیز تندتر می‌شود. مشابه توضیحات ارائه شده در شکل 6 این مسأله نشان دهنده تأثیر ضخامت در افزایش ضریب اطمینان به ازای طول‌های متوسط و حداکثر می‌باشد. اما شدت تغییرات شیب منحنی‌های شکل 7 در مقایسه با منحنی‌های مشابه در شکل 6 کمتر می‌باشد. این مسأله به این دلیل است که در حالت عدم کاربرد زهکش و یا استفاده از زهکش‌های با طول

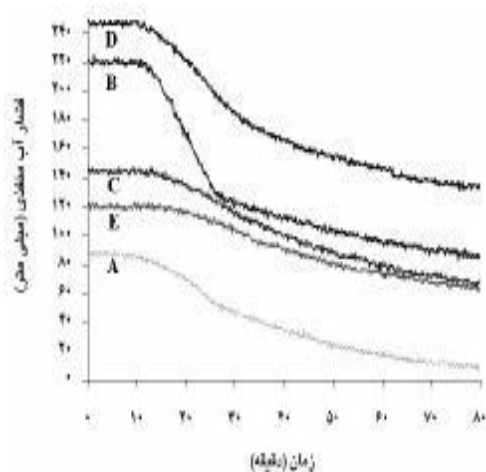
زهکش‌های مختلف برای قطعات لغزشی AB و CD بترتیب در شکل‌های 6 و 7 آورده شده است.

در شکل 6 ضریب اطمینان پس از تخلیه مخزن در مقابل نسبت افت سطح آب برای سطح لغزش AB ترسیم گردیده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد به ازای طول حداقل و ضخامت‌های مختلف زهکش ضریب اطمینان با افت سطح آب کاهش می‌یابد که نمایانگر رفتار غیر زهکشی شده در محدوده شیب بالادست به ازای حداقل طول موثر زهکش می‌باشد. به ازای طول متوسط و کمترین ضخامت، ابتدا با افت سطح آب در مخزن کاهش ضریب اطمینان مشاهده می‌گردد که روند نزولی شیب منحنی ضریب اطمینان با افزایش نسبت افت سطح آب و افزایش ضخامت به ازای طول متوسط به شیب ملایم صعودی تبدیل می‌گردد. این مسأله وقوع تدریجی رفتار زهکشی شده در شیب بالادست سد خاکی را نشان می‌دهد. این بدین معنی است که با کاهش سطح آب در مخزن توانایی زهکش در خنثی نمودن اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده در شیب بالادست پس از وقوع پدیده RDD افزایش می‌یابد که در نتیجه افزایش ضریب اطمینان و شیب صعودی منحنی را در پی خواهد داشت.

در حالت کاربرد حداکثر طول موثر زهکش به ازای همه ضخامت‌ها، شیب بالادست در امتداد سطح لغزش AB رفتار زهکشی شده را نشان می‌دهد زیرا به تدریج با افزایش نسبت افت سطح آب در مخزن تمامی زهکش‌ها فشار آب منفذی را بخوبی تعدیل نموده و ضریب اطمینان را افزایش می‌دهند. منحنی‌های بدست آمده در این حالت دارای شیب صعودی می‌باشند اما همانطور که مشخص است با افزایش ضخامت به ازای حداکثر طول، منحنی‌هایی با شیب تندتر مشاهده می‌گردد که نشان دهنده بیشترین تأثیر ضخامت بر افزایش ضریب اطمینان در حداکثر طول موثر نسبت به طول‌های حداقل و متوسط می‌باشد.



توانایی زهکش ها در افزایش ضریب اطمینان در مقابل لغزش سطحی در شیب بالادست می باشد. برای بررسی تغییرات زمانی فشار آب منفذی پس از افت سطح آب در 5 نقطه نشان داده شده در شکل 5، به عنوان نمونه، نتایج ثبت شده حسگرها به ازای کاربرد زهکش با طول متوسط و ضخامت متوسط (طول و ضخامت میانه) در شکل 8 نشان داده شده است. همانگونه که در شکل 8 نشان داده شده است نقاط A و B در شیب بالادست با تأثیر زهکش دارای افت سریع می باشند که نشان دهنده قابلیت زهکش در ایجاد گرادیان هیدرولیکی مناسب در بدنه مدل فیزیکی و استهلاک فشار آب منفذی در مناطق سطحی شیب بالادست می باشد.

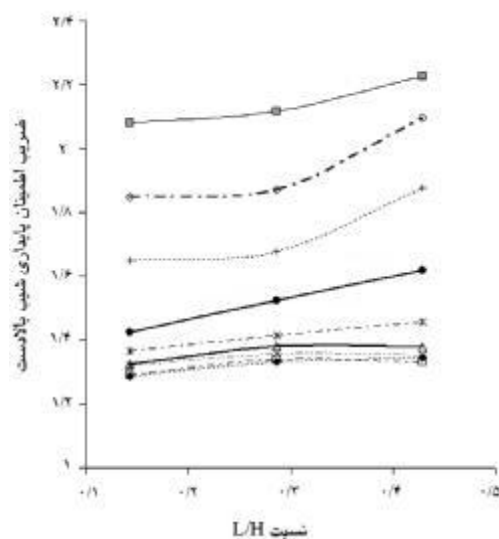


شکل 8- تغییرات زمانی فشار آب منفذی در مدل فیزیکی در حالت وقوع پدیده RDD

همچنین شکل 8 نشان می دهد که شیب تغییرات فشار آب منفذی برای حسگرهای تعبیه شده در شیب بالادست نسبت به حسگر نصب شده در نزدیکی زهکش (E) بیشتر می باشد. از طرف دیگر منحنی های نقاط B و D که در تراز پائین تر از A و C قرار دارند شیب تغییرات تندتری دارند. این مطلب بیانگر این است که جریان نشستی تحت تأثیر زهکش در ترازهای پائین تر بیشتر بوده و استهلاک فشار منفذی و پایداری در این نقاط با سرعت بیشتری محقق می شود. در مجموع منحنی ها نشان می دهند که در هر 5 نقطه، زهکش به خوبی توانسته از ایجاد اضافه فشار آب منفذی اولیه

و ضخامت کم، جهت جریان نشست غالباً به سمت شیب بالادست می باشد که سبب کاهش ضریب اطمینان در نواحی نزدیک به شیب بالادست می شود (آنچه در منحنی های قطعه AB مشاهده می گردد).

اما به تدریج با وقوع حالت زهکشی شده جهت غالب جریان نشست به سمت شیب پائین دست تغییر می کند که موجب پایداری بیشتر نواحی سطحی شیب بالادست و افزایش سریعتر ضریب اطمینان می شود. بر این اساس با توجه به شکل های 6 و 7 تغییرات ضریب اطمینان به ازای زهکش های مختلف پس از افت سطح آب برای سطح لغزش AB در محدوده 1/5 تا 2/6 و برای سطح لغزش CD در محدوده 1/3 تا 2/2 می باشد. همانطور که مشاهده می گردد محدوده تغییرات ضریب اطمینان قطعه AB بزرگتر و ضریب اطمینان نهایی آن به

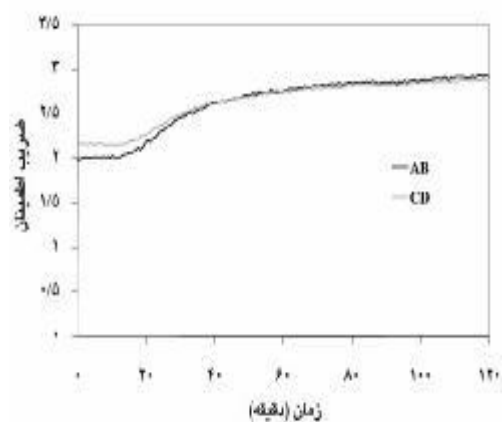


- طول حداقل - ضخامت حداقل
- طول حداقل - ضخامت متوسط
- طول متوسط - ضخامت حداقل
- × طول متوسط - ضخامت متوسط
- طول متوسط - ضخامت حداکثر
- طول حداکثر - ضخامت متوسط
- طول حداکثر - ضخامت حداکثر
- طول حداکثر - ضخامت حداکثر

شکل 7- تغییرات ضریب اطمینان در مقابل افت سطح آب مخزن برای سطح لغزش احتمالی CD

ازای استفاده از یک زهکش معین، بزرگتر از ضریب اطمینان قطعه CD می باشد. این مسأله نشان دهنده

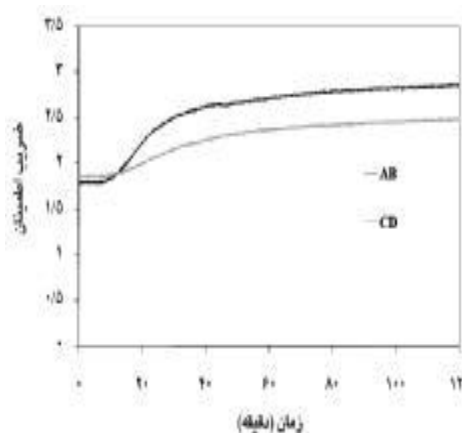
همانگونه که در شکل 9 مشاهده می‌گردد به محض اینکه تأثیر زهکش در کاهش فشار منفذی در شیب بالادست نمایان می‌شود شیب منحنی AB نسبت به CD تندتر می‌شود که دلیل آن سرعت بیشتر اتلاف فشار آب منفذی در قطعه سطحی AB می‌باشد. در شکل 10 به ازای حداکثر ضخامت منحنی‌های مربوط به دو قطعه ارائه می‌گردد تا تأثیر ضخامت بر افزایش زمانی ضریب اطمینان در مقایسه با نتایج شکل 9 مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل 10- تغییرات زمانی ضریب اطمینان، ثبت شده پس از حداکثر افت آب مخزن با استفاده از زهکش با طول حداکثر و ضخامت حداکثر

همانطور که در شکل 10 مشاهده می‌شود در حالت طول حداکثر (که مطابق شکل‌های 6 و 7 رفتار زهکشی شده در سد خاکی مشاهده می‌شود) با افزایش ضخامت زهکش، ضریب اطمینان اولیه در منحنی‌های AB و CD نسبت به شکل 9 افزایش می‌یابد. این میزان افزایش در سطح لغزش CD به دلیل فاصله نزدیکتر به زهکش بیش از AB می‌باشد. با گذشت زمان و افزایش تأثیر زهکش در کاهش فشار منفذی در نواحی سطحی شیب بالادست به تدریج ضریب اطمینان قطعه AB برابر و کمی بیش از قطعه CD می‌شود اما اختلاف مقادیر ضریب اطمینان ناچیز می‌باشد. این مسأله بیانگر توانایی زهکش در ایجاد حالت زهکشی شده به شکل یکنواخت در تمامی شیب بالادست می‌باشد. در شکل 11 با استفاده از نمودارهای جامع ارائه شده توسط ویراتجاندر و میچالووسکی (2006) منحنی‌های ضریب اطمینان

پس از افت سطح آب جلوگیری نماید که خود نقش موثری در تأمین پایداری شیب بالادست ایفا می‌نماید. جهت بررسی تأثیر طول و ضخامت زهکش بر تغییرات زمانی ضریب اطمینان، نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط حسگرها در امتداد دو قطعه لغزشی AB و CD در شکل‌های 9 و 10 ارائه گردیده است. منحنی‌های شکل 9 تغییرات زمانی ضریب اطمینان به ازای حداکثر طول و حداقل ضخامت زهکش را نشان می‌دهد و در شکل 10 تغییرات زمانی ضریب اطمینان به ازای حداکثر طول و حداکثر ضخامت زهکش نشان داده شده است تا تأثیر ضخامت بر نرخ تغییرات ضریب اطمینان ارزیابی گردد. همانگونه که در شکل 9 نشان داده شده است برای زهکش با طول حداکثر و ضخامت حداقل بلافاصله پس از وقوع افت سطح آب در مخزن ضریب اطمینان قطعه CD دارای مقداری بزرگتر از قطعه AB می‌باشد. این مسأله نشان دهنده تأثیر غالب طول زهکش در لحظه وقوع پدیده RDD بر کاهش فشار آب منفذی در سطح لغزش نزدیک‌تر به زهکش (قطعه CD) می‌باشد. اما با گذشت زمان و تأثیر زهکش بر کاهش فشار آب منفذی در شیب بالادست، جهت جریان نشت که پس از وقوع پدیده RDD به سمت شیب بالادست می‌باشد (شکل 1) به سمت شیب پائین دست تغییر می‌یابد. این مسأله موجب افزایش ضریب اطمینان شیب بالادست و کاهش خطر تخریب سطحی می‌گردد.



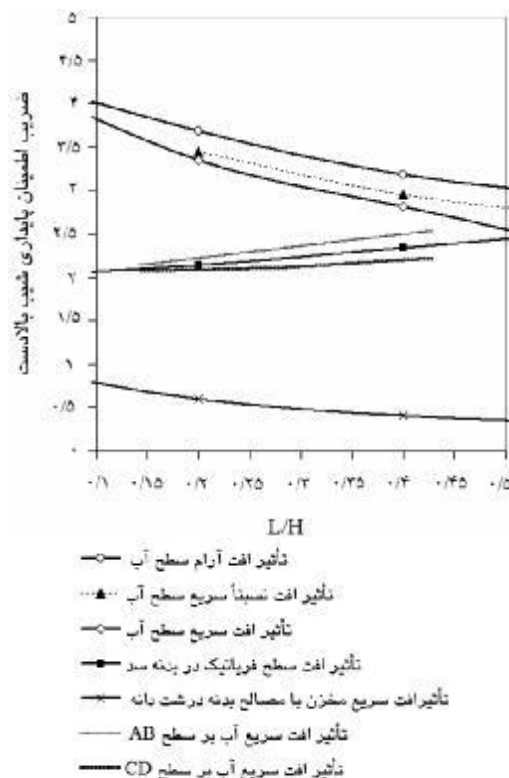
شکل 9- تغییرات زمانی ضریب اطمینان، ثبت شده پس از حداکثر افت آب مخزن با استفاده از زهکش با طول حداکثر و ضخامت حداقل

های مربوط به آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق برای قطعات AB و CD برای زهکش‌های با طول و ضخامت موثر (ایجاد کننده حالت زهکشی شده) می‌باشد. این مسأله نشان می‌دهد که این زهکش‌ها به خوبی توانسته‌اند سطح ایستابی در بدنه سد خاکی را پس از تخلیه مخزن پائین بیاورند و خطر تخریب شیب بالادست ناشی از اضافه فشار آب منفذی پس از افت آب در مخزن را کاهش دهند.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق بر اساس ابعاد مدل سد خاکی همگن، طول و ضخامت زهکش‌های افقی در محدوده حداقل و حداکثر موثر در نظر گرفته شدند و عملکرد آنها در کاهش فشار آب منفذی و افزایش پایداری شیب بالادست (در شرایط تخلیه سریع مخزن) مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نمودارهای قطعات لغزشی سطحی و عمیق (AB و CD) نشان داد که برای قطعه AB تغییرات ضریب اطمینان در محدوده 2/6-1/5 رخ می‌دهد که این محدوده برای قطعه CD، 2/2-1/3 می‌باشد. همانطور که مشخص است محدوده تغییرات ضریب اطمینان و ضریب اطمینان حداکثر قطعه AB بزرگتر از CD می‌باشد. به ازای حداقل طول موثر زهکش، ضریب اطمینان AB به ازای مقادیر کم افت سطح آب ( $F=1/65$ )، بیش از CD ( $F=1/3$ ) می‌باشد اما با افزایش نسبت افت سطح آب و کاهش تأثیر حداقل طول موثر زهکش بر اضافه فشار منفذی ایجاد شده در نواحی سطحی شیب بالادست، ضریب اطمینان AB کاهش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های 6 و 7 نتیجه می‌شود که وقتی  $L/H < 0/3$  باشد، زهکش دارای حداقل نسبت طول موثر ( $l_e/H=0/43$ ) می‌تواند پایداری در مقابل لغزش سطحی و عمیق را تأمین نماید که  $l_e=15$  cm (حداقل طول موثر زهکش) و  $H=35$  cm (حداکثر عمق آب در مخزن) می‌باشد. به ازای  $L/H > 0/3$  زهکش‌های با نسبت طول موثر متوسط ( $l_e/H=0/71$  که  $l_e=25$  cm) به ازای ضخامت متوسط به خوبی پایداری در مقابل لغزش سطحی و عمیق را تأمین می‌نمایند. به ازای

مربوط به مدل سد خاکی برای رژیم‌های مختلف افت سطح آب در شرایط عدم کاربرد زهکش بدست آمد و نتایج آن با منحنی‌های ضریب اطمینان حاصل از آزمایش‌ها در حالت کاربرد زهکش (در قطعات AB و CD) مقایسه گردید.



شکل 11- نتایج تحقیق حاضر در مقایسه با نتایج ویراتجاندر و میچالووسکی (2006)

منحنی‌ها نشان می‌دهند که برای مدل سد خاکی استفاده شده در تحقیق حاضر در حالت عدم کاربرد زهکش و به ازای نرخ‌های مختلف افت سطح آب رفتار غیر زهکشی شده مشاهده می‌گردد (منحنی‌های با علامت مثلث مشکی، دایره تهی و لوزی تهی). علامت ضرب بیانگر ضریب اطمینان برای سد خاکی با هندسه مشابه مدل بکار رفته در این تحقیق با کاربرد مصالح درشت دانه می‌باشد. منحنی با علامت مربع مشکی نشان دهنده تأثیر کاهش سطح فریاتیک در بدنه سد بر ضریب اطمینان می‌باشد و همانطور که نشان داده شده است با افزایش ضریب اطمینان همراه می‌باشد. نکته جالب این است که این منحنی تقریباً نزدیک به منحنی-

CD (با کاربرد زهکش در این تحقیق) در مقایسه با منحنی‌های استخراج شده از ویراتجاندر و میچالوسکی (2006) برای مدل سد خاکی بکار رفته در این تحقیق (در رژیم‌های مختلف افت سطح آب و در حالت عدم کاربرد زهکش) نشان می‌دهند که در صورت عدم کاربرد زهکش مدل سد خاکی بکار رفته در این تحقیق (حتی در حالت افت بسیار کند سطح آب) رفتار غیرزهکشی شده از خود نشان می‌دهد. اما منحنی‌های AB و CD (حالت کاربرد زهکش) تقریباً مشابه منحنی افزایش ضریب اطمینان با کاهش سطح فریاتیک در بدنه سد می‌باشند که نشان می‌دهد زهکش افقی در این تحقیق به خوبی توانسته است سطح فریاتیک در بدنه سد را پائین بیاورد. در انتها پیشنهاد می‌شود که تأثیر زهکش‌های مذکور در مصالح با نفوذپذیری مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

#### سپاسگزاری

از مدیریت محترم امور پژوهشی دانشگاه تبریز که پشتیبانی مالی این تحقیق را تقبل نمودند و همچنین از مدیریت محترم گروه خاک و پی و مسئولین آزمایشگاه های مکانیک خاک و هیدرولیک که با محققین کمال همکاری را داشتند تقدیر و تشکر می‌گردد.

همین نسبت طول زهکش و ضخامت موثر حداکثر، ضریب اطمینان در مقابل لغزش عمیق افزایش قابل توجهی می‌یابد. زهکش‌های با نسبت طول موثر حداکثر ( $l_e/H = 1/1$ ) که  $l_e = 38 \text{ cm}$  به ازای تمام ضخامت ها و نسبت‌های افت سطح آب پایداری در مقابل لغزش سطحی و عمیق را تأمین می‌نمایند. با مقایسه تغییرات فشار آب منفذی ثبت شده توسط حسگرها در 5 نقطه از بدنه سد مشخص گردید که فشار آب منفذی در شیب بالادست در نواحی سطحی و نواحی دارای تراز پائین‌تر (A, B و D) سریع‌تر از دیگر نواحی مستهلک می‌شود. مقایسه شکل‌های 9 و 10 نشان می‌دهد که برای  $l_e/H = 1/1$  (که تضمین کننده رفتار زهکشی شده می‌باشد) به ازای حداقل ضخامت زهکش تغییرات زمانی ضرایب اطمینان در مقابل لغزش سطحی و عمیق بترتیب  $1/8-2/8$  و  $1/88-2/5$  می‌باشد. به ازای حداکثر ضخامت موثر زهکش تغییرات زمانی ضرایب اطمینان در مقابل لغزش سطحی و عمیق بترتیب  $2-3$  و  $2/2-3$  می‌باشد. از مقایسه این محدوده تغییرات نتیجه می‌شود که به ازای حداکثر ضخامت موثر، ضریب اطمینان نهایی در مقابل لغزش سطحی و عمیق تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشند که نشان از تأثیر مثبت ضخامت زهکش در افزایش یکنواخت پایداری در تمامی نقاط شیب بالادست می‌باشد. در نهایت منحنی‌های ضریب اطمینان AB و

#### منابع مورد استفاده

رحیمی ح، 1382. سدهای خاکی. انتشارات دانشگاه تهران.

طاحونی ش، 1380. اصول مهندسی ژئوتکنیک - جلد اول مکانیک خاک. انتشارات پارس آئین.

ملک‌پور ا، فرسادی‌زاده د، حسین زاده دلیر ع و صدر کریمی ج، 1390. بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول و ضخامت زهکش‌های افقی بر نشت ماندگار از بدنه سد خاکی همگن. مجله دانش آب و خاک، جلد 21، شماره 2. صفحه‌های 51-63.

Alonso E and Pinyol N, 2009. Slope stability under rapid drawdown conditions. Report published by Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Baker R, Rydman S and Talesnick M, 1993. Slope stability analysis for undrained loading conditions. Int J Num and Anal Methods Geomech 17: 14-43.

- Berilgen MM, 2007. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *J Computers and Geotech* 34: 81-91.
- Chahar BR, 2004. Determination of length of horizontal drain in homogeneous earth dams. *J Irrig & Drain Eng*, ASCE 130 (6): 530-536.
- Duncan JM, 1996. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes. *J Geotech Eng*, ASCE 122(7):577-596.
- Duncan JM and Wright SG, 2005. *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons. Hobken NJ.
- Lane PA and Griffiths DV, 1997. Finite element slope stability analysis. Pp. 589-593. Proc of the 6<sup>th</sup> Int Symp on Num Models in Geomech (NUMOG VI) 2-4 July, Montreal Que.
- Lane PA and Griffiths DV, 2000. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *J Geotech and Geoenv Eng*, ASCE 126(5): 443-450.
- Lowe J and Karafiath L, 1980. Effect of anisotropic consolidation on the undrained shear strength of compacted clays. Pp. 237-258. Proc Research Conf on Shear Srength of Cohesive Soils, 1-2 Feb, Boulder, Colorado.
- Mishra GC and Parida BP, 2006. Earth dam with toe drain on an impervious base. *Int J Geomech*, ASCE (6): 379-388.
- Svano G and Nordal S, 1987. Undrained effective stability analysis. Proc of the 9<sup>th</sup> European Conf on Soil Mech and Found Eng, 31 Aug-3 Sep. Dublin.
- Tran TX, 2004. Stability problems of an earthfill dam in rapid drawdown condition. Doctoral dissertation Slovak University of Technology, Bratislava, Slovak Republic.
- US Army Corps of Engineers ,2003. Engineering and design manual slope stability, Engineer Manual EM 1110-2-1902, Department of the Army Corps of Engineers, Washington DC.
- Viratjandr C and Michalowski RL, 2006. Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown. *Can Geotech J* 43:802-814.
- Wright SG and Duncan JM, 1987. An examination of slope stability computation procedures for sudden drawdown. Report GL-87-25. US Army Corps Engineering, Waterway Experiment Station.