

## تأثیر زهکش‌های افقی بر پایداری شیروانی بالا دست سدهای خاکی در حین تخلیه سریع مخزن

سیدمحمدعلی زمردیان\*<sup>۱</sup> و سیدمهدی عبدالله‌زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شیراز

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد عمران- خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

### چکیده

حالت تخلیه مخزن یکی از حالات بارگذاری سدهای خاکی است که در طراحی شیروانی بالا دست سدهای خاکی نقش عمده‌ای ایفا می‌کند. در این حالت شیروانی بالا دست در شرایط بحرانی قرار گرفته و ممکن است ناپایداری‌هایی در آن رخ دهد. علت این امر آن است که در حین تخلیه مخزن، افت تراز آب داخل پوسته همزمان با پایین رفتن تراز آب مخزن صورت نمی‌گیرد. فشار آب حفره‌ای محبوس در پوسته بالا دست باعث کاهش تنش‌های مؤثر می‌گردد و از این رو احتمال وقوع لغزش و ناپایداری در شیروانی بالا دست وجود دارد. یکی از راه‌های کم کردن فشار آب حفره‌ای پوسته بالا دست در حین تخلیه مخزن، تعبیه زهکش در این شیروانی‌ها است. هدف اصلی این تحقیق آن است که مشخص گردد با لحاظ نمودن و تعبیه زهکش در شیروانی بالا دست سدهای خاکی، فشار آب حفره‌ای تا چه میزان زائل گردیده و ضریب اطمینان و پایداری تا چه حد بهبود می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** سد خاکی، تخلیه سریع مخزن، نشت، زهکش افقی، پایداری شیروانی خاکی.

### ۱- مقدمه

دیگر منجر به افزایش دبی نشت پایدار می‌گردند. از همین رو در طراحی و بکارگیری آن‌ها بایستی دقت لازم و کافی را به کار برد.

بعد از آن که مخزن سد از آب پرشد و مورد بهره‌برداری قرار گرفت و آب به داخل بدنه سد نفوذ کرد، هرگونه افت در تراز آب مخزن چه به صورت سریع و چه به صورت آرام می‌تواند موجب بروز لغزش در شیروانی بالا دست گردد. در این حالت افت در ارتفاع آب مخزن سریع‌تر از آن است که فشار آب حفره‌ای موجود در بدنه یا شالوده سد بتواند مستهلک گردد.

### ۲- تئوری جریان در خاک‌های اشباع و غیراشباع

قانون داری بیان کننده جریان در خاک‌های اشباع و غیر اشباع می‌باشد. یکی از تفاوت‌های اصلی نشت در محیط‌های اشباع و غیر اشباع، ضریب نفوذپذیری خاک است. در محیط‌های اشباع، تابع نفوذپذیری خاک به صورت تابعی ثابت می‌باشد در حالی که در محیط‌های غیر اشباع، ضریب نفوذپذیری ثابت نبوده و به صورت تابعی از درجه اشباع خاک یا میزان مکش موجود در حفرات خاک می‌باشد.

افت سریع‌تر از آب مخزن باعث کاهش نیروی مقاوم نسبت به نیروی محرک می‌شود. زیرا اولاً فشار آب بالا دست که به عنوان نگهدارنده شیب بالا دست عمل می‌کند تا مرز سطح آب از بین می‌رود. ثانیاً خط اشباع در بدنه سد بالاتر از سطح آب مخزن قرار می‌گیرد و زهکشی نمی‌تواند با سرعتی که سطح آب مخزن کاهش می‌یابد باعث استهلاک فشار آب حفره‌ای گردد.

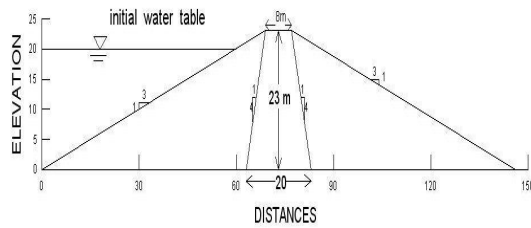
معادله حاکم بر جریان آب در خاک را می‌توان با اعمال قانون داری در معادله پیوستگی جرم به دست آورد. در این معادله فرض می‌گردد که تغییرات حجم حفرات خاک ناچیز است. این معادله به فرم کلی زیر می‌باشد:

روش‌های مختلفی به منظور کنترل فشار آب حفره‌ای ناشی از تخلیه مخزن پیشنهاد شده است که بسته به شرایط دسترسی مصالح و هزینه‌های حمل یا ساخت ممکن است از هر کدام از این روش‌ها استفاده گردد. یکی از این روش‌های مؤثر، تعبیه زهکش در شیروانی بالا دست سدهای خاکی می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial k} \left[ k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \gamma \omega \frac{\Delta \theta}{\Psi} \frac{\partial h}{\partial t}$$

اگرچه این زهکش‌ها با کاهش فشار حفره‌ای اضافی باعث بهبود هرچه بیشتر پایداری شیروانی خاکی می‌شوند، اما از سوی

در معادله فوق  $h$  هد کل است که مجهول می‌باشد.  $k_x$  و  $k_y$



شکل ۲- مقطع عرضی سد مدلسازی شده

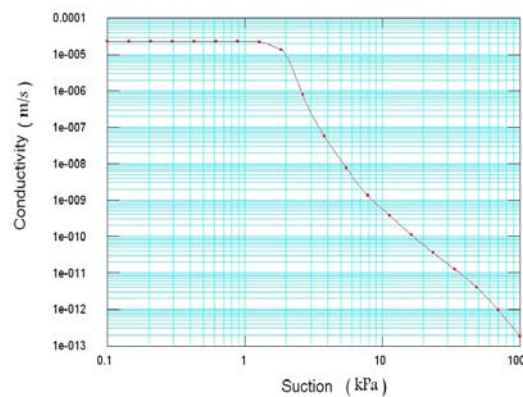
شیروانی بالا دست با شیب ۱ قائم به ۳ افقی، که یک شیب معمول در سدهای خاکی است، مدلسازی شده است. تراز اولیه آب در حالت مخزن پر ۲۰ متر و ارتفاع آزاد ۳ متر بوده است. این پژوهش شالوده به صورت صلب فرض گردیده است. برای انجام تحلیل‌های مورد نظر چهار حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اولیه مقطع سد، بدون وجود زهکش فرض گردیده و تحلیل‌های تخلیه سریع مخزن انجام شده است. در حالت دوم یک زهکش افقی در شیروانی بالا دست تعبیه شده است. در حالت سوم و چهارم نیز فرض گردیده که دو و سه زهکش افقی در شیروانی بالا دست قرار دارند. در شکل (۳) نحوه قرارگیری زهکش‌ها در شیروانی بالا دست و تراز قرارگیری هر یک از این زهکش‌ها نشان داده شده است. نکته قابل ذکر در شکل (۳) این است که طول زهکش‌ها برابر نصف فاصله افقی بین رویه شیب تا هسته در تراز زهکش‌ها بوده است. در جدول (۱) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی مورد استفاده در تحلیل تخلیه سریع مخزن نشان داده شده است. تمامی مصالح از لحاظ پارامترهای مقاومتی به صورت ایزوتروپیک مدلسازی شده‌اند. همچنین فرض گردیده است نفوذپذیری مصالح زهکش بسیار زیادتر از نفوذپذیری مصالح پوسته می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی مورد استفاده در تحلیل تخلیه سریع

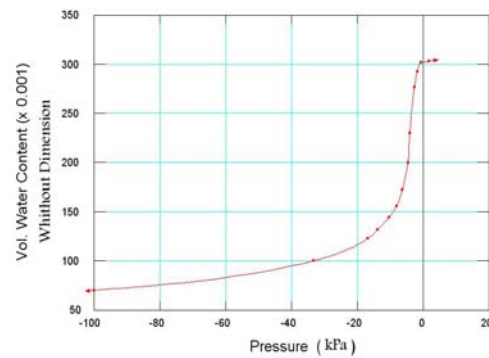
نفوذپذیری m/s	معیار رفتاری	$k_x/k_y$	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	C (kPa)	$\phi$ درجه	
$1 \times 10^{-4}$	موهر کولب	۵	۲۱	۱	۲۲	پوسته
بسیار زیاد	موهر کولب	۵	۲۱	۱	۳۲	زهکش
$2/5 \times 10^{-4}$	موهر کولب	۵	۲۰	۲۵	۲۵	هسته

ضرایب نفوذپذیری در راستای  $x$  و  $y$  می‌باشند.  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب،  $\theta$  تابع آب حجمی موجود،  $\Psi$  مکش موجود در خاک و  $t$  زمان می‌باشد.

با توجه به این که در حالت تخلیه مخزن، فرآیند نشت به صورت گذرا می‌باشد بایستی قبل از انجام تحلیل‌های تخلیه مخزن شرایط خاک از لحاظ تابع نفوذپذیری و نیز تابع آب حجمی موجود کاملاً مشخص باشند. هر دو تابع فوق‌الذکر برای حل معادله جریان ضروری و لازم می‌باشد. در این پژوهش برای تخمین هر دو تابع فوق از نرم‌افزار SEEP/W بهره‌گیری شده است. نمونه‌ای از این توابع در شکل (۱) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمونه‌ای از تابع نفوذپذیری و تابع آب حجمی مورد استفاده در تحلیل تخلیه مخزن

### ۳- معرفی مقطع نمونه

به منظور بررسی تأثیر وجود زهکش‌های افقی واقع در شیروانی بالا دست سدهای خاکی بر فرآیند تخلیه مخزن، مقطع یک سد خاکی همگن مانند شکل (۲) در نظر گرفته شده است. ارتفاع این سد ۲۳ متر و عرض قاعده ۱۴۶ متر می‌باشد. عرض تاج سد ۸ متر بوده است. شیب هسته در این مقطع نمونه ۱ قائم به ۲/۵ افقی لحاظ شده است.

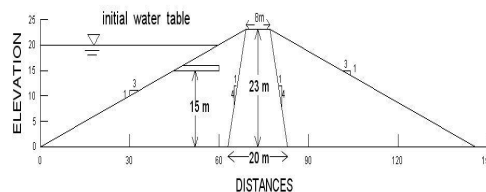
برای تحلیل فرآیند نشست پایدار و گذرا در این پژوهش از روش اجزای محدود بهره‌گیری شده است. با توجه به این که معادلات نشست، معادلاتی تک مجهوله هستند برای مش‌بندی محیط مسئله از المان‌های مثلثی درجه اول استفاده شده است. در مرحله پایانی نیز با استفاده از فشار آب حفره‌ای به دست آمده از مرحله قبل، تحلیل پایداری برای شیروانی بالا دست انجام گرفته تا مشخص گردد وجود زهکش‌ها تا چه اندازه بر بهبود پایداری شیروانی بالادست تأثیرگذار است. به منظور تحلیل پایداری شیروانی خاکی با بهره‌گیری از نرم‌افزار SLOPE/W روش اسپنسر<sup>۱</sup> استفاده شده است.

## ۵- نتایج تحلیل

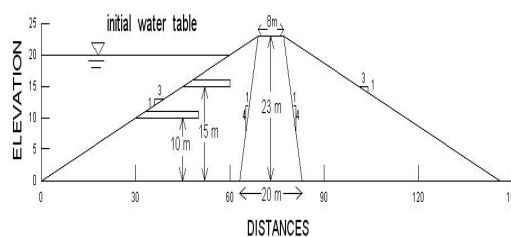
### ۵-۱- دبی خروجی از بدنه سد در حین تخلیه سریع مخزن

در اثر وجود زهکش‌های افقی در شیروانی بالا دست دبی خروجی در حین تخلیه مخزن افزایش خواهد یافت. در شکل (۴) دبی خروجی توسط زهکش‌ها و نیز دبی کل خروجی از بدنه سد در حین تخلیه سریع نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است در صورت وجود یک زهکش افقی، افزایش دبی خروجی در حین تخلیه سریع حداکثر تا ۲۹٪ حالت بدون زهکش خواهد بود. در صورتی که دو و سه زهکش افقی در شیروانی بالا دست موجود باشد، افزایش دبی خروجی در حین تخلیه مخزن به ترتیب حداکثر تا ۸۱٪ و ۶۰٪ حالت بدون زهکشی خواهد بود. هرچه دبی خروجی از بدنه سد در این حالت بیشتر باشد میزان کاهش و استهلاک فشار آب حفره‌ای بیشتر خواهد بود. با کاهش هرچه بیشتر فشار آب حفره‌ای اضافی، بهبود هرچه بهتر پایداری شیروانی بالا دست حاصل می‌گردد.

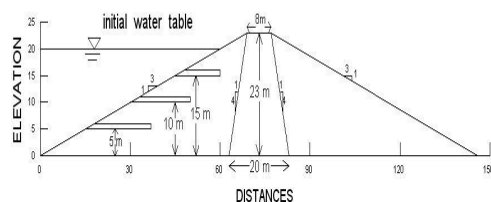
با دقت در شکل (۴) می‌توان دریافت که حداکثر مشارکت یک زهکش افقی در هدایت دبی خروجی در نسبت تخلیه ۰/۲۵ رخ می‌دهد. در صورت قرارگیری دو زهکش افقی در شیروانی بالا دست، حداکثر مشارکت این دو زهکش در نسبت تخلیه ۰/۲۵ و ۰/۵ می‌باشد. از سوی دیگر در صورت وجود سه زهکش افقی، حداکثر مشارکت این سه زهکش در نسبت تخلیه ۰/۷۵ و ۱ خواهد بود. در صورت عدم وجود زهکش در شیروانی بالا دست، پس از تخلیه مخزن خطوط هم‌پتانسیل به شکل قائم می‌باشند اما در صورت وجود زهکش در شیروانی بالادست و کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی، خطوط هم‌پتانسیل به شکل افقی خواهند بود. این امر که در شکل (۵) نشان داده شده است، نشانه زائل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی است.



(الف)



(ب)

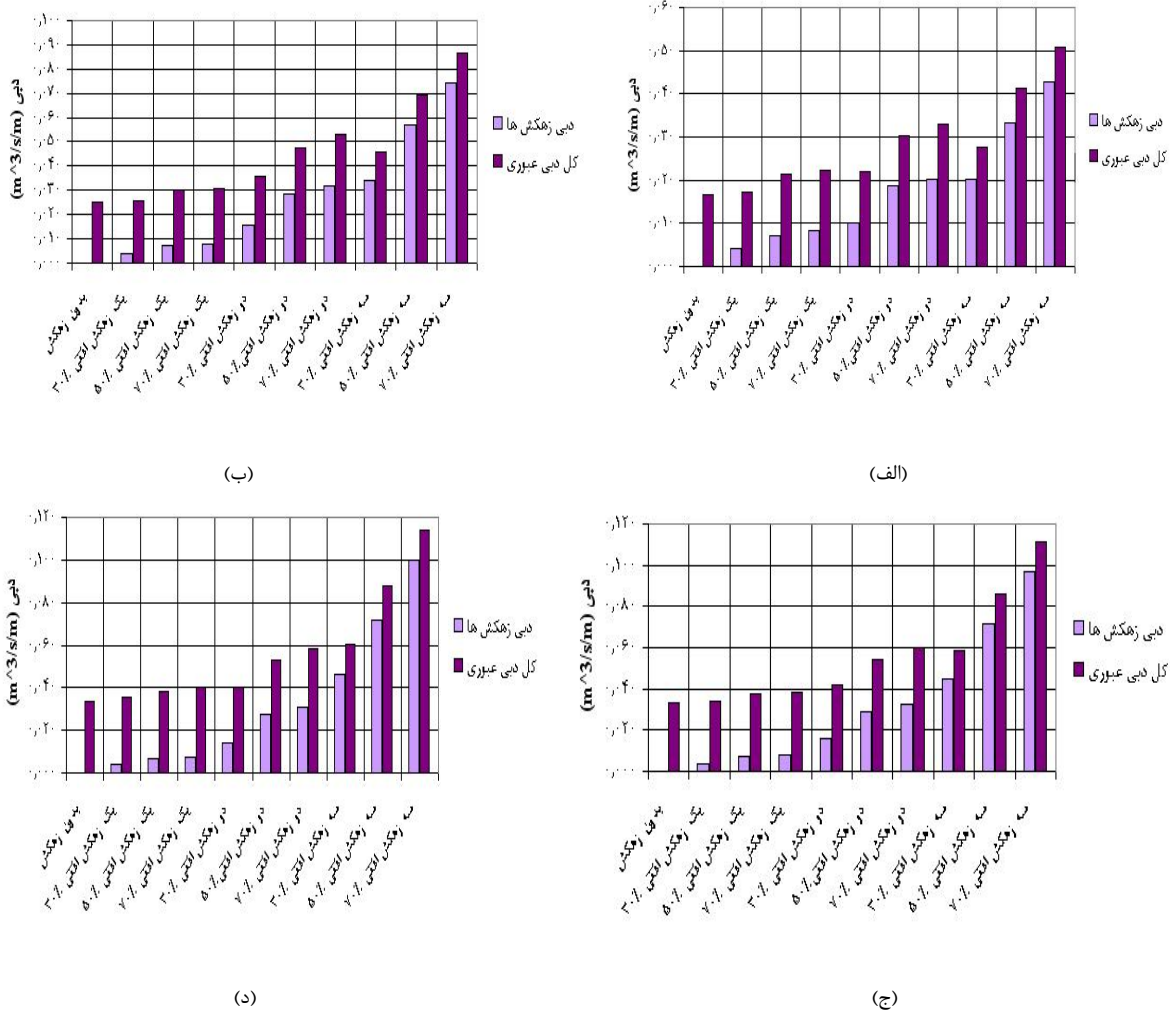


(ج)

شکل ۳- حالات مختلف قرارگیری زهکش در شیروانی بالادست (الف) زهکش تکی (ب) دو زهکش (ج) سه زهکش

### ۴- روش تحلیل

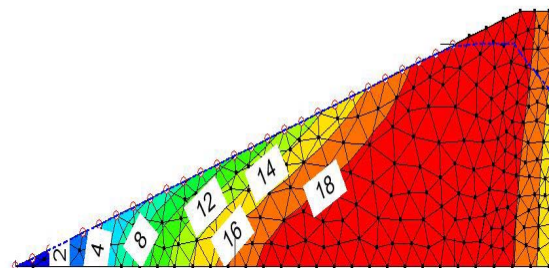
به منظور انجام تحلیل‌های مورد نظر، در ابتدا فرض گردیده که تراز آب مخزن در تراز نرمال قرار داشته است. سپس برای این حالت آنالیز نشست پایدار انجام شده، تا فشار آب حفره‌ای در مناطق مختلف بدنه سد به دست آید. فشار آب حفره‌ای به دست آمده از تحلیل نشست پایدار به عنوان شرایط اولیه در تحلیل مخزن به کار برده شده است. شایان ذکر است که برای انجام تحلیل‌های نشست مورد نظر از نرم‌افزار SEEP/W بهره‌گیری شده است. در مرحله بعد فرآیند تخلیه سریع با نرخ تخلیه ۱ متر بر روز و برای نسبت‌های تخلیه ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ مدل‌سازی شده است.



شکل ۴- دبی خروجی از زهکش‌ها و دبی خروجی از بدنه سد برای نسبت‌های مختلف تخلیه مخزن (الف) نسبت تخلیه ۰/۲۵ (ب) نسبت تخلیه ۰/۵ (ج) نسبت تخلیه ۰/۷۵ (د) نسبت تخلیه ۱

#### ۵-۲- ضرایب اطمینان نسبت‌های مختلف تخلیه مخزن

نتایج تحلیل پایداری شیروانی بالا دست پس از تخلیه سریع مخزن در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است ضرایب اطمینان برای نسبت‌های مختلف تخلیه مخزن محاسبه شده است. با توجه به این شکل، برای نسبت‌های تخلیه ۰/۲۵ و ۰/۵ بدون وجود هیچ‌گونه زهکش افقی ضریب اطمینان از حداقل مجاز (۱/۲) بیشتر بوده است، از این رو برای این دو نسبت تخلیه نیاز به تعبیه زهکش افقی وجود ندارد. برای نسبت تخلیه ۰/۷۵، برای ارضای حداقل ضریب اطمینان مجاز، وجود دو زهکش افقی ضروری است. در نهایت وجود سه زهکش افقی، برای برآورده شدن حداقل ضریب اطمینان مجاز در نسبت تخلیه ۱، الزامی است.



شکل ۵- خطوط هم پتانسیل در صورت عدم وجود زهکش در شیروانی بالادست

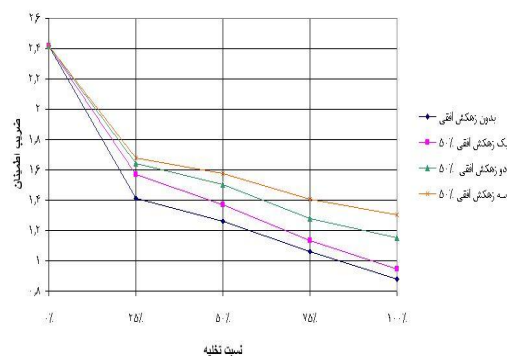
### ۶- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی تأثیر زهکش‌ها بر فرآیند تخلیه سریع مخزن، تحلیل نشت پایدار، تحلیل نشت گذرا و تحلیل پایداری، برای حالات مختلف قرارگیری زهکش در شیروانی بالا دست سدها انجام شده است. نتایج این تحلیل‌ها مؤید این امر است که اگرچه برای بعضی از نسبت‌های تخلیه، لحاظ نمودن زهکش در شیروانی بالا دست ضروری نیست اما برای بعضی نسبت‌های تخلیه دیگر تعبیه زهکش‌ها ضروری و غیر قابل اجتناب است. در اکثر مواقع قرارگیری زهکش‌ها در شیروانی بالا دست باعث استهلاک فشار آب حفره‌ای اضافی ناشی از تخلیه مخزن و بهبود پایداری می‌گردد. نامطلوب‌ترین اثر وجود این زهکش‌ها افزایش دبی نشت پایدار است که بایستی حتماً در تحلیل و طراحی سدها مورد توجه قرار گیرد.

### ۷- مراجع

- [1] Berilgen, M., Investigation of Stability of Slopes under Drawdown Condition. Computers & Geotechnics, 2007, 34, 81-91.
- [2] Lane P.A., Griffiths D.V., "Assessment of Stability of Slopes under Drawdown Conditions", Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering 2000, 126 (5), 443-450.
- [3] US Army Corps of Engineers, "Engineering and Design Manual-Slope Stability", Engineer Manual EM 1110-2-1902, Department of the Army, Corps of Engineers, Washington (DC), 2003.
- [4] US Army Corps of Engineers, "Engineering and Design Manual-General Design and Considerations for Earth and Rock-Fill Dams, EM 110-2-2300, Department of the Army, Corps of Engineers, Washington (DC), 2003.
- [5] Duncan, J.M., Wright, S.G., "Soil strength and Slope Stability", Hoboken (NJ), John Wiley & Sons, 2005.
- [6] Griffiths, D. V., Lane, P. A., "Slope Stability Analysis by Finite Elements", Geotechnique, 1999, 49 (3), 387-403.
- [7] Chardphoom, V., Michalowski, R., "Limit Analysis of Submerged Slopes Subjected to Water Drawdown", Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43, 802-814.
- [8] Fell, R., McGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., "Geotechnical Engineering of Dams", Taylor & Francis Group, London (UK), 2005.
- [9] Chen, Q., Zhang L., "Stability of a Gravel Soil Slope under Reservoir Water Level

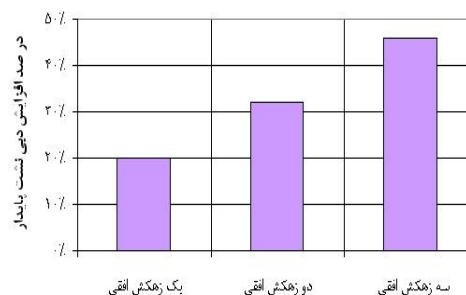
همان طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود در صورت تخلیه سریع مخزن در نسبت تخلیه ۱ بیشترین میزان کاهش ضریب اطمینان نسبت به ضریب اطمینان حالت مخزن پر وجود دارد. از سویی دیگر در نسبت تخلیه ۰/۲۵ کمترین میزان کاهش ضریب اطمینان، نسبت به حالت مخزن پر ملاحظه می‌گردد. لحاظ نمودن زهکش در شیروانی بالا دست باعث افزایش ضریب اطمینان نسبت‌های مختلف تخلیه مخزن می‌گردد. در صورت وجود یک زهکش افقی افزایش ضریب اطمینان حداکثر تا ۱۲٪ حالت بدون زهکش می‌باشد. با لحاظ نمودن دو و سه زهکش افزایش ضریب اطمینان به ترتیب حداکثر تا ۳۱٪ تا ۴۸٪ حالت بدون زهکش خواهد بود.



شکل ۶- تأثیر زهکش‌های افقی بر ضریب اطمینان نسبت‌های مختلف تخلیه در حین فرآیند تخلیه سریع مخزن

### ۵-۳- افزایش دبی نشت پایدار

قرارگیری زهکش‌ها در شیروانی بالا دست باعث افزایش قابل ملاحظه دبی عبوری از بدنه سد در حالت نشت پایدار می‌گردد. این امر نامطلوب‌ترین تأثیر وجود زهکش‌ها در شیروانی بالا دست سدهای خاکی است که بایستی در هنگام طراحی و تحلیل سدهای خاکی مورد توجه قرار گیرد. در شکل (۷) تأثیر تعبیه زهکش‌ها بر افزایش دبی نشت پایدار نشان داده شده است.



شکل ۷- افزایش دبی در حالت نشت پایدار به واسطه وجود زهکش‌های افقی

- [13] Goel, M., "Drawdown Pore Pressures in Earth Dams", Proceeding of 48<sup>th</sup> Research Session CBIP, Vol. 1, Hyderabad, 1980.
- [14] Kerkes, D. J., Fassett, J. B., "Rapid Drawdown in Drainage Channels with Earthen Side Slopes", Proceedings of the ASCE Texas Section Spring Meeting, Beaumont, TX. 2006, 1-8.
- [15] Lowe, J., Karafiath L., "Stability of Earth Dams upon Drawdown", In Proceedings of the first Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1959, Vol. 2, pp 537-552.
- [16] Morgernstern, N. R., "Stability Charts for Earth Slopes during Rapid Drawdown", Geotechnique, 1963, 13 (1), 121-131.
- [10] Brahma, S., Harr, M., "Transient Development of Free Surface in a Homogenous Earth Dam", Geotechnique, 1963, 12 (4), 183-202.
- [11] Dapporto, S., Rinaldi, M., Casagli, N., "Failure Mechanisms and Pore Pressure Conditions: Analysis of a River Bank Long the Arno River (Central Italy)", Engineering Geology, 2001, 61, 221-242.
- [12] Desai, C., "Drawdown Analysis of Slopes by Numerical Method", ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1977, 103 (7), 667-676.

## Effect of Horizontal Drains on Upstream Slope Stability During Rapid Drawdown Condition

S.M. Ali Zomorodian\*, S.M. Abodollahzadeh  
Department of Water Engineering, Shiraz University

### Abstract

Embankments may become saturated by seepage flow during a long term high reservoir stage. If subsequently the reservoir pool is drawn down faster than the pore water can escape, excess pore water pressures and reduced stability will result. This is called drawdown which is quite common in upstream slopes of embankment dams. The stability of slopes under drawdown conditions are usually analyzed considering two limiting conditions, namely slow and rapid drawdown. In the slow drawdown situation the water level within the slope is assumed to equalize the reservoir level at any time. In case of rapid drawdown, which represents the most critical condition, it is assumed that the pore water pressure within the embankment continues to reflect the original water level. The lag of the phreatic line depends on factors such as: permeability of soils, drawdown rate, drawdown ratio and slope gradient. Rapid drawdown can cause a temporary increase in pore water pressure. The increased seepage forces may lead to slope instability, causing the collapse of structure. This paper discusses the effect of horizontal drains on upstream slope of earth fill dams during rapid drawdown using finite elements and limit equilibrium methods. The change of pore water pressure, outpouring seepage flow and the factor of safety are inspected.

**Keywords:** Earth fill dams, Rapid drawdown, Drain, Stability, Finite element method, Limit equilibrium method.

-----  
**Received:** April 2011

**Accepted:** November 2011