

## یادداشت فنی

## بررسی اثر سوراخ آب در کاهش زیر فشار سد انحرافی یوسف کند مهاباد

سلیم عزیزی<sup>۱</sup>، فرزین سلماسی<sup>۲\*</sup>، اکرم عباسپور<sup>۳</sup> و هادی ارونقی<sup>۴</sup>

## چکیده

برای ایمنی سد در برابر آبشستگی زیر پی و نیروی بالا برنده می‌توان از روش‌هایی مانند تعبیه دیواره سپری در بالادست و پایین‌دست سازه، افزایش طول کف‌بند بتنی سازه و یا احداث سوراخ‌آب در حوضچه آرامش استفاده کرد. در این پژوهش که بر روی سد انحرافی یوسف کند مهاباد انجام شده، با شبیه‌سازی سد در نرم‌افزار Seep/W تأثیر تعداد سوراخ‌ها، موقعیت سوراخ آن‌ها در طول حوضچه آرامش و همچنین طول پرده‌های آب‌بند بر روی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی در نقاط کلیدی پی زیر سد انحرافی بررسی و پایداری کلی سد بررسی شده است. در بررسی انجام شده دیده شد که احداث دیوار آب‌بند ابتدایی به عمق ۸ متر موجب کاهش ۶۳ درصد از نیروی بالا برنده و کاهش ۷۹ درصد از گرادیان خروجی نسبت به حالت بدون آب‌بند می‌شود. همچنین احداث سوراخ‌آب در حوضچه آرامش سبب کاهش ۸ درصد از نیروی بالا برنده و کاهش ۷۴ درصد از گرادیان خروجی نسبت به حالت بدون سوراخ‌آب می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** دیوار آب‌بند، سد انحرافی، سوراخ‌آب، زیر فشار، گرادیان هیدرولیکی خروجی.

**ارجاع:** عزیزی س. سلماسی ف. عباسپور ا. و ارونقی ه. ۱۳۹۴. بررسی اثر سوراخ‌آب در کاهش زیر فشار سد انحرافی یوسف کند مهاباد. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۱۸۷-۱۹۲.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

\* نویسنده مسئول: [Salmasi@Tabrizu.ac.ir](mailto:Salmasi@Tabrizu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۷

## مقدمه

ایجاد سازه‌های آبی در مناطقی که احتمال نفوذ آب از زیر تأسیسات وجود دارد، به دلیل ناپایداری‌های ناشی از نشت آب نیاز به دقت دارد. ناپایداری‌های یاد شده بیشتر به دو دلیل توسعه زیرفشار و تغییر در تعادل نیروهای مؤثر بر سازه فرسایش تدریجی درونی مصالح پی و وقوع پدیده رگاب رخ می‌دهد (نگراج و مورفی، ۱۹۸۵). پس در همه مواردی که پی یک سازه بر روی بستر قابل نفوذ قرار داشته باشد، ضروری است که فشار وارد بر سطح تمامی سازه و پی و نیز گرادیان هیدرولیکی خروجی در پایین دست سطح تماس ذکر شده در بالا برآورد و محاسبه شود. مطالعاتی از این قبیل در مورد احداث سد انحرافی بر روی بستر آبرفتی رودخانه ضروری است. زیرا در اثر ذخیره آب در بالادست سد، نفوذ آب از زیر پی افزایش یافته و این امر باعث اعمال فشار به سطح تماس سد با پی می‌شود (لشته نشایی و خدابخشی، ۱۳۸۵).

تجربیات نشان می‌دهد که خطوط خزش شیب‌دار و قائم در زیر سازه بسیار مؤثرتر از خطوط خزش افقی در مقابل جریان نشتی مقاومت می‌کند. برای مثال با قرار دادن یک دیوار آب‌بند در پایین دست و زیر سازه مقدار زیادی از گرادیان هیدرولیکی خروجی را کاسته و درجه ایمنی در مقابل آبشستگی زیر پی بالا می‌رود (صبغ یزدی و همکاران، ۲۰۰۷). کف‌بند افقی حوضچه آرامش در پایین دست سد و کف‌بند افقی در بالادست سد که بر روی بستر رودخانه ایجاد می‌شود با افزایش طول مسیر خزش سبب کاهش زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی می‌شود. گرادیان هیدرولیکی خروجی مهم‌ترین معیار در جهت اطمینان از عدم پدیده پاپینگ (آبشستگی پی و یا رگاب) است. فرآیند لوله‌ای شدن همواره از انتهای پایین دست سازه شروع می‌شود. لذا در صورتی که گرادیان هیدرولیکی خروجی از گرادیان هیدرولیکی بحرانی (که مقدار آن برای مواد آبرفتی تقریباً برابر یک است) بیشتر باشد، ذرات خاک می‌تواند توسط جریان آب به حرکت در آید. دیواره‌های آب‌بند نیز بسته به موقعیت آن‌ها تأثیر متفاوتی در زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی دارند. خوسلا (۱۹۳۶) با توجه به رابطه‌ای که برای محاسبه گرادیان خروجی ارائه کرده است، اعلام کرد اگر در پایین دست سازه هیچ دیواره آب‌بندی وجود نداشته باشد گرادیان هیدرولیکی به بی‌نهایت میل خواهد کرد. اگرچه این

مسئله در عمل اتفاق نمی‌افتد، اما به تجربه ثابت شده است که در صورت عدم وجود دیواره آب‌بند پایین دست، گرادیان هیدرولیکی خروجی به مراتب زیادتر خواهد بود (هاذوت، ۱۹۸۶).

سوراخ آب<sup>۱</sup> عبارت است از یک مجرا یا لوله عمودی که از کف‌بند عبور کرده و پی را به جو وصل می‌کند و اطراف آن با یک فیلتر پوشانده می‌شود تا از فرار ذرات ریزدانه به داخل آن جلوگیری شود. همچنین در انتهای بالای آن یک شیر یک‌طرفه نصب می‌شود تا از جریان آب به داخل پی جلوگیری شود. سوراخ آب سبب کاهش زیرفشار در زیر کف‌بند شده و توزیع فشار و گرادیان هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لشته‌نشایی و باب الحوائجی (۱۳۸۲) با استفاده از مدل Mseep تأثیر طول دیواره‌های آب‌بند و موقعیت و ابعاد زهکش را در کاهش زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی بررسی کردند. صبغ یزدی و همکاران (۲۰۰۷) جریان نشت و نیروی بالابرنده در زیر یک سد بتنی وزنی با یک دیواره آب‌بند در بالادست آن را با استفاده از تکنیک اجزای محدود و روش گالرکین سه‌بعدی بررسی کرده و نتایج را با روش تحلیلی حل معادلات حاکم با استفاده از نگاشت‌های هم‌دیس مقایسه کردند. قبادیان و خدایی (۱۳۸۸) تأثیر دیواره آب‌بند و زهکش بر روی نیروی زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی را با استفاده از روش احجام محدود بررسی کرده و نتایج را با مدل کامپیوتری Mseep مقایسه کردند. فرشلاف آقاجانی (۱۳۸۸) استفاده از یک لایه زهکش در زیر کف‌بند حوضچه آرامش و مجموعه‌ای از سوراخ آن‌ها را به‌عنوان طرحی برای کاهش نیروی بالابرنده در زیر سرریز سد گرمی چای میانه ارائه کرد. هادوت (۱۹۸۶) با استفاده از نگاشت شوارتز- کریستوفل اقدام به حل تحلیلی معادله لاپلاس برای جریان نشت از زیر یک سد انحرافی کرد و تأثیر طول فیلتر پایین دست را بر توزیع زیرفشار در زیر سد بررسی کرد.

در پژوهش حاضر، سد مورد مطالعه در حال بهره‌برداری بوده و اطلاعات مربوط به آن شامل مقطع عرضی و رقوم آب بالادست و پایین دست از سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان غربی گرفته شده است. هدف از این پژوهش شبیه‌سازی عملکرد سوراخ آب و اثر آن در کاهش نیروی بالابرنده (زیرفشار) در زیر حوضچه آرامش سد است.

1- Weep hole

اختلاف ارتفاع بین بالادست و پایین‌دست بیشترین مقدار باشد)، طول سازه در سمت چپ ۸ متر و در سمت راست ۱۰ متر است.

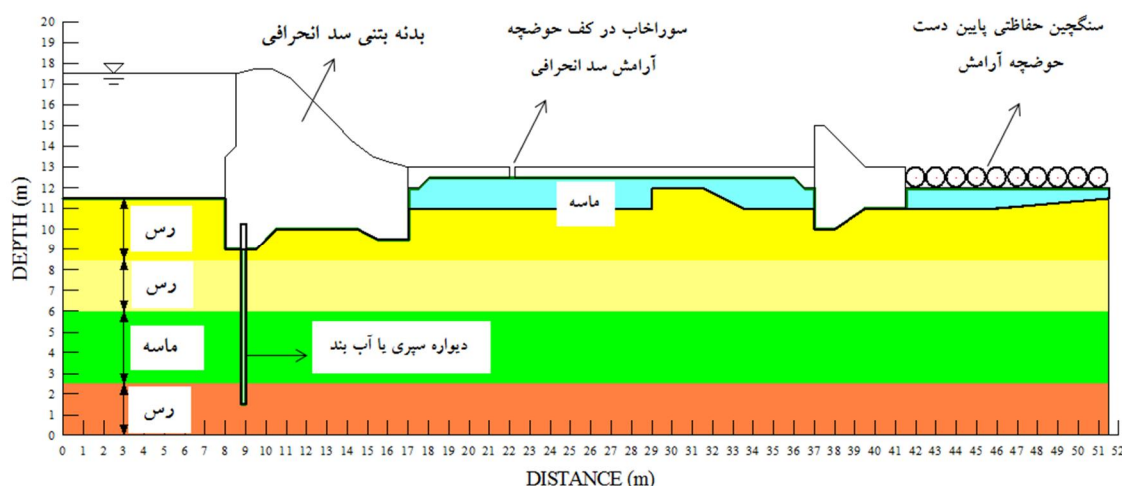
دبی گذرنده از کف غیر قابل نفوذ صفر وارد شده است تا از خروج آب از کف پی جلوگیری شود. برای اعمال شرایط مرزی در سوراخ‌آب، ارتفاع آب در محل سوراخ‌آب برابر ارتفاع آب در کف حوضچه یعنی ۱۲/۵ متر وارد شده که بیانگر فشار صفر جو در آن نقطه است. با توجه به شکل ۱، طول افقی بدنه سد ۹ متر، طول حوضچه آرامش ۲۰ متر و طول آستانه پایاب ۴/۵ متر است. در شبیه‌سازی هنگام تهیه کردارها زیر فشار در کل طول سد به طول ۳۳/۵ متر محاسبه می‌شود.

نفوذپذیری اشباع خاک برای لایه‌های مختلف پی براساس با مطالعات زمین‌شناسی و نقشه طراحی جهت شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده است که به ترتیب اولین لایه زیر پی سد خاک دستی متراکم شده بوده و جنس آخرین لایه زیر پی رس است. المان‌بندی پی زیر سد انحرافی به شکل چهارگوش در نظر گرفته شد زیرا بهترین شکل برای المان‌ها مربع و مثلث متساوی‌الاضلاع است (بی‌نام، ۲۰۰۴). در این مدل به جهت سهولت کار و به دست آمدن نتایج دقیق از المان‌های مربعی استفاده شده است. مدل المان‌بندی شده از سد انحرافی یوسف کند در شکل ۱ نشان داده شده است.

نوع سد انحرافی خاکی با سرریز بتنی به طول تاج ۴۴۳ متر است که ارتفاع در قسمت بتنی ۶ متر و دارای دو دریچه آبگیر اصلی با ظرفیت تخلیه ۸/۶ مترمکعب در ثانیه است. شبیه‌سازی با نرم‌افزار SEEP/W انجام شده است. نرم‌افزار SEEP/W توانایی حل معادلات حاکم بر جریان برای شرایط دائمی و غیردائمی را داشته و روش حل براساس المان‌های محدود استوار است. این نرم‌افزار می‌تواند جریان آب در خاک اشباع شده و یا خاک غیراشباع را مدل‌سازی کند.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش در شبیه‌سازی اولیه سد انحرافی یوسف کند از یک سپر فولادی در بالادست سد به عمق ۸ متر برای بررسی تأثیر آن بر روی کاهش زیر فشار استفاده شده است. در مرحله بعدی با شبیه‌سازی سوراخ‌آب در کف حوضچه آرامش و تغییر موقعیت آن در کف حوضچه، تأثیر آن روی کاهش زیر فشار بررسی شده است. در ادامه با ثابت نگه داشتن موقعیت سوراخ‌آب و کاهش طول آب‌بند ابتدایی و در نهایت حذف آن، تأثیر وجود آن بر روی کاهش زیر فشار و نشت از زیر پی بررسی شده است. تعداد المان‌های به کار رفته ۲۴۸۵ عدد، ارتفاع آب در بالادست ۶ متر، ارتفاع آب در پایین‌دست صفر (بحرانی‌ترین حالت در شبیه‌سازی هنگامی رخ می‌دهد که



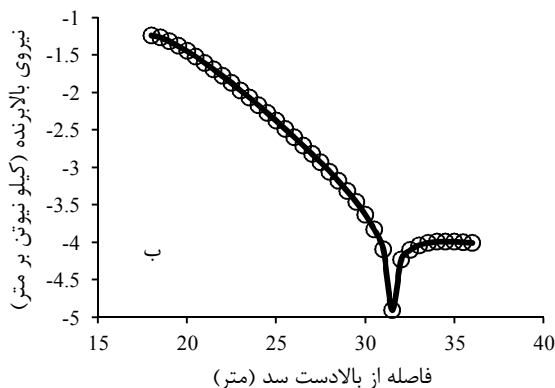
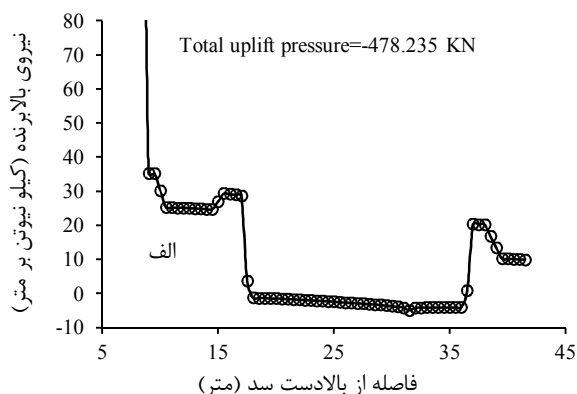
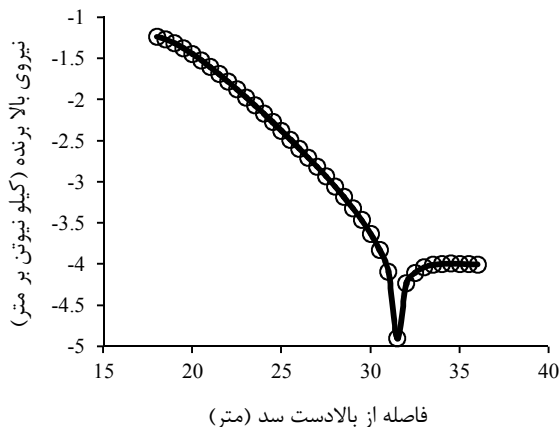
شکل ۱- مقطع عرضی سد یوسف کند و المان‌بندی پی زیر آن

جدول ۱- نفوذپذیر لایه‌های مختلف پی

خواص مصالح	خاک دستی کوبیده شده	رس	ماسه ریز	رس
$K_{sat}$ (cm/s)	$10^{-4}$	$1/2 \times 10^{-5}$	$1/4 \times 10^{-5}$	$10^{-6}$
ضخامت لایه (متر)	۱/۵	۵/۵	۳/۵	۱/۵

۰/۰۲۱ (متر بر متر) است که با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود نسبت به حالت سوم ۰/۶۶٪ کاهش یافته است و نسبت به حالت پنجم ۰/۱۴٪ افزایش داشته است. در محل سوراخ آب گرادیان هیدرولیکی به ۰/۱۵ رسیده است که نسبت به حالت چهارم ۰/۵۸٪ کاهش یافته است.

در جدول ۲ حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده سد در نرم‌افزار ذکر شده است. در حالت‌های ۱ الی ۳ فقط تأثیر آب‌بند بررسی شده است. در حالت‌های ۴ الی ۷ اثر سوراخ آب و در حالت‌های ۸ الی ۱۰ اثر توام سوراخ آب و آب‌بند با هم بر زیرفشار بررسی شده است.



شکل ۲- تغییرات نیروی زیرفشار برای حالت ششم سد انحرافی (الف) و حوضچه آرامش (ب)

جدول ۲- موقعیت سوراخ آب و دیوار آب‌بند سد برای شبیه‌سازی در نرم افزار Seep/W

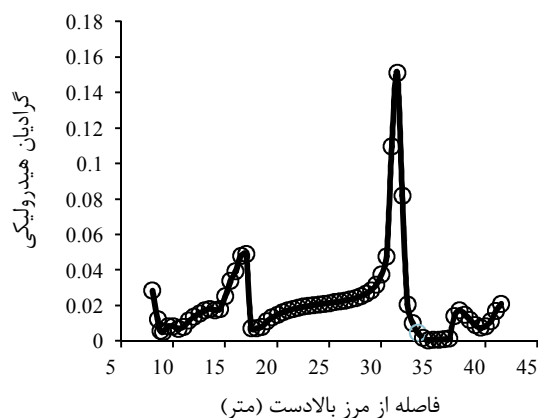
عمق آب‌بند ابتدایی	موقعیت سوراخ آب (x/L)	سوراخ بر	آب‌بند ابتدایی	حالت
_____	_____	ندارد	ندارد	۱
۴ متر	_____	ندارد	دارد	۲
۸ متر	_____	ندارد	دارد	۳
۸ متر	۰/۲۵	دارد	دارد	۴
۸ متر	۰/۵	دارد	دارد	۵
۸ متر	۰/۷۵	دارد	دارد	۶
۸ متر	۱	دارد	دارد	۷
۴ متر	۰/۷۵	دارد	دارد	۸
۲ متر	۰/۷۵	دارد	دارد	۹
_____	۰/۷۵	دارد	ندارد	۱۰

### نتایج و بحث

در شکل ۲ تغییرات نیروی بالا برنده (زیر فشار) برای حالت ۶ نشان داده شده است. مقدار کل نیروی بالا برنده ۴۷۸/۲۳۵- کیلو نیوتن بر واحد طول سد به دست آمده است که با مراجعه به جدول ۳، نسبت به حالت یک ۰/۶۲٪ کاهش یافته است و نسبت به حالت پنجم افزایش فشار ۰/۳٪ را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که زیر فشار در محل سوراخ آب به شدت کم شده است. به طوری که در شکل ۲ در محل سوراخ آب فرورفتگی در کردار زیر فشار مشاهده می‌شود. فشار منفی در فاصله محل سوراخ آب تا انتهای سازه سد بیانگر این موضوع است که در زیر حوضچه ارتفاع پیزومتریک آب پایین‌تر از تراز کف حوضچه است و در محل سوراخ آب فشار بالا برنده صفر است.

در شکل ۳ کردار گرادیان هیدرولیکی برای حالت ششم نشان داده شده است. بیشترین گرادیان در پایین دست

باشد این کاهش قابل توجه‌تر است. در محل سوراخ آب گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد که برای جلوگیری از پدیده جوش ماسه در محل سوراخ آب باید از فیلتر استفاده شود. در سدهای انحرافی سوراخ آب تمام وظایف مثبت آب‌بند انتهایی را انجام می‌دهد. این اثر با نزدیک شدن محل فیلتر به بالادست سد بیشتر خواهد شد. محل قرارگیری سوراخ آب در یک سوم میانی عرض پی سد پیشنهاد می‌شود تا بیشترین بازدهی را برای کنترل زیرفشار و گرادیان خروجی داشته باشد. طول پرده آب‌بند با توجه به اندازه عمق لایه نفوذپذیر طراحی می‌شود، در غیر این صورت با افزایش طول کف‌بند بالادست به طور مؤثری می‌توان گرادیان هیدرولیکی خروجی و زیرفشار را کم کرد.



شکل ۳- مقادیر گرادیان هیدرولیکی در زیر سد انحرافی برای حالت ششم

### نتیجه‌گیری

سوراخ آب سبب کاهش زیرفشار و گرادیان خروجی از سد می‌شود که هرچه موقعیت آن به بالادست سد نزدیک‌تر

جدول ۳- خلاصه نتایج مدل سازی سد برای حالت‌های ۱ الی ۱۰ در نرم افزار Seep/W

حالت	$q$ ( $m^3/m.s$ )	کل فشار بالا برنده $U(KN/m^2)$	گرادیان هیدرولیکی در پایاب	گرادیان هیدرولیکی در سوراخ آب	گرادیان هیدرولیکی در انتهای سپر	درصد کاهش یا افزایش فشار بالا برنده
۱	$7/0488 \times 10^{-5}$	-۱۲۳۸/۳۷	۰/۳	—	—	—
۲	$2/923 \times 10^{-5}$	-۶۹۰/۷۳	۰/۱۲۵	—	۱/۷	۴۴٪ (۱)
۳	$1/4788 \times 10^{-5}$	-۴۵۳/۶۸	۰/۰۶۲	—	۱/۵	۶۳٪ (۱)
۴	$4/089 \times 10^{-6}$	-۴۱۹/۴۲	۰/۰۱۶	۰/۳۶	۱/۶۲	۶۶٪ (۱)
۵	$4/352 \times 10^{-6}$	-۴۶۳/۸۸	۰/۰۱۸	۰/۱۷	۱/۶	۹/۱۵٪ (۴)
۶	$5/0856 \times 10^{-6}$	-۴۷۸/۲۳۵	۰/۰۲۱	۰/۱۵	۱/۵۷	۱۲/۵٪ (۴)
۷	$1/523 \times 10^{-5}$	-۴۸۶/۲۹۷	۰/۰۲۹	۰/۱۴	۱/۵۳	۱۳/۵٪ (۴)
۸	$1/107 \times 10^{-5}$	-۵۵۸/۲۸	۰/۰۴۶	۰/۴۹	۲/۰۴	۱۴/۰٪ (۶)
۹	$2/674 \times 10^{-5}$	-۸۶۵/۱۹۲	۰/۱۱	۱/۱۸	۲/۱۵	۴۴٪ (۶)
۱۰	$3/0654 \times 10^{-5}$	-۹۸۰/۲۹	۰/۱۳	۱/۳۵	—	۵۱٪ (۶)

سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳(۴): ۱۴۸-۱۶۰.  
۳. لشته‌نشائی م. الف. و باب‌الحوائجی س. ۱۳۸۲. طراحی بهینه پی سدهای انحرافی واقع بر مصالح نفوذپذیر، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۳۵-۱۴۱.

### منابع

۱. فرشباف آقاجانی ح. ۱۳۸۸. ارائه طرحی برای کاهش فشار برکنش (Uplift) در بستر خاکی سازه سرریز سد گرمی چای میانه، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، ۲۴-۲۶ آذر. ۲۷-۳۹.
۲. قبادیان ر. و خدائی ک. ۱۳۸۸. تأثیر دیواره آب‌بند و زهکش بر نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی زیر

۴. لشته نشایی م. ا. و خدا بخشی م. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر ابعاد دیواره‌های آب‌بند و زهکش‌ها بر میزان زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی در سدهای انحرافی، هفتمین سمینار بین‌المللی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۲-۳۶.
5. Anonymous, GeoStudio User's Guide. 2004. Seep/w for finite element seepage analysis, Geo-slope Calgary, Alta. 307-310.
6. Hathoot H. M. 1986. Seepage beneath a concrete dam with a downstream filter, Applied Mathematics Modeling, Butterworth & Co. Ltd. 10(2): 129-132.
7. Khosla A. N. 1936. Design of Weirs on Pervious Foundations, Publication No 12 of the central Board of Irrigation, Simla, India.
8. Nagraj T. S. and Murthy B. R. S. 1985. Prediction of the Reconsolidation Pressure and Recompression Index of Soils, Geotechnical Testing Journal. 8(4): 199-202.
9. Sabbagh-Yazdi S. R. Mastorakis N. E. and Bayat B. 2007. Assessment and application of 3D Galerkin finite volume explicit solver for computation of seepage and uplift in dam foundation, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Science. 1(4): 285-293.