

## بهینه‌یابی موقعیت چاله زهکشی به منظور کاهش نیروی زیرفشار در پی سدها

سعید صالحی هفشجانی، شهرام اسمعیل‌زاده، قاسم پناهی و کاظم اسماعیلی<sup>\*۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۸)

### چکیده

نیروی زیرفشار یکی از عوامل ناپایداری در سازه‌های آبی است. به همین علت تعیین و کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از چاله‌های زهکشی یکی راه‌های کاهش این نیرو است که به صورت قائم با لوله‌هایی با قطرهای مختلف در پی سازه‌های آبی ساخته می‌شوند. برای بررسی عملکرد این چاهک‌ها یک مدل آزمایشگاهی از پی سدهای بتنی در فلوم اختصاصی ساخته شد. طول پی مدل سد به پنج قسمت تقسیم‌بندی و تعداد چهار چاله زهکشی با ارتفاع معادل ضخامت پی سد در مدل نفوذناپذیر ایجاد شد. تغییرات فشار در پی سد با تغییر ارتفاع آب بالادست سد انجام و توسط لوله‌های پیزومتر نصب شده در پی و تغییر موقعیت چاله اندازه‌گیری شد. با استفاده از پتانسیل هیدرولیکی محاسبه شده از زهکش‌های تعبیه شده، نیروی زیرفشار محاسبه شد. سپس بهترین حالت که کمینه نیرو بالادهنده به‌ازای موقعیت زهکش در پی سد بود، مشخص شد. نتایج نشان داد در حالتی که  $a/L=0/4$  باشد، بهترین وضعیت برای قرار دادن زهکش‌های قائم برای کاهش نیروی زیرفشار است (a فاصله زهکش از پاشنه سد و L طول سد در پی است) که علت آن ایجاد فشار اتمسفریک در زیر پی سد است که خود سبب کاهش نیروی زیرفشار به مقدار چشمگیری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: حفره زهکشی، نیروی زیرفشار، پتانسیل هیدرولیکی، سازه‌های آبی

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: esmaili@um.ac.ir

## مقدمه

در بالادست (پاشنه) نتیجه قابل قبول به دست خواهد داد. علاوه بر آن، این امر موجب کاهش نیروی زیر فشار می شود که به عنوان راهکاری معرفی شد.

احمدی و قهرمان نژاد (۲) به بررسی نیروی زیر فشار حاصل از نشت آب از پی سدهای انحرافی و تأثیر بر ناپایداری پرداختند. در این پژوهش به معرفی راهکاری مناسب پرداخته شد که یکی از روش های کنترل نیروی زیر فشار استفاده از سیستم زهکش در پایین دست سدهای انحرافی بود. در این تحقیق با استفاده از مدل تحلیل مسئله نشت Seep/W مقدار نیروی زیر فشار وارد بر یک سد انحرافی همراه با سپرهای عمودی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی های صورت گرفته نشان داد که وجود یک سیستم زهکشی زیر سطحی در هر نقطه از زیر بدنه سد می تواند نیروی زیر فشار را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. همچنین بررسی های تحقیق نشان داد که بهترین موقعیت سیستم زهکش و سپر پایین دست به منظور کاهش نیروی زیر فشار به ترتیب برابر با فاصله  $0.33L$  از پاشنه سد و  $0.28L$  (L طول مقطع عرضی سد از پنجه سد) است.

قبادیانی و خدایی (۷) به بررسی راهکارهایی از جمله احداث دیواره های آب بند و نصب زهکش برای جلوگیری از پدیده زیرشویی و کاهش گرادیان خروجی پرداختند. از این رو در این تحقیق به منظور بررسی دقیق تأثیر هر یک از عوامل مذکور بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی، مدلی کامپیوتری تهیه شد که در آن معادله عمومی جریان آب در خاک همگن اشباع در شرایط همسان و غیرهمسان با استفاده روش احجام محدود و الگوریتم گوس - سایدل حل شد. به منظور صحت سنجی مدل تهیه شده و نتایج اندازه گیری آزمایشگاهی و همچنین نتایج مدل، از WinMseep که یک مدل پذیرفته شده است، استفاده شد. یکی از مزیت های نسبی مدل مذکور، در نظر گرفتن نفوذپذیری برای پرده آب بند است. نتایج این تحقیق نشان داد که با احداث یک دیواره آب بند در هر وضعیت مکانی، مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا (بدون دیوار آب بند) کاهش می یابد. همچنین بیشترین نیروی زیر فشار و کمترین گرادیان

یکی از مسائل مهم که باید در طراحی سازه های آبی مورد توجه قرار گیرد، برآورد فشار ناشی از نیروی جریان آب در محیط متخلخل زیر آن است که با عنوان نیروی زیر فشار شناخته می شود. این نیرو در جهت ناپایداری سازه های آبی عمل کرده و لازم است که به خوبی محاسبه و تمهیدات لازم برای کنترل آن به کار گرفته شود. یکی از روش های کنترل و کاهش این نیرو، کم کردن فشار در زیر بدنه سازه است که می تواند از طریق چاله های زهکشی که فشار در آن اتمسفریک است صورت گیرد. برای کاهش هرچه بیشتر نیروی زیر فشار که از اهداف مهم ملاحظات اقتصادی طرح است، یافتن موقعیت بهینه چاله زهکشی امری لازم و ضروری است. اهمیت لزوم بررسی شرایط پایداری سازه های آبی، پژوهشگران را به سمت و سوی ارائه راهکارهایی برای این منظور واداشته است. چنانکه:

افتخارافضلی و بارانی (۳) به بررسی نفوذ آب از زیرسازه هایی که روی خاک های تراوا بنا می شوند، پرداختند. در این تحقیق به معرفی این ناپایداری ها پرداخته شد و بیان کردند که این ناپایداری ها عمدتاً به علت توسعه نیروی زیر فشار، فرسایش تدریجی درونی مصالح پی و همچنین وقوع پدیده جوشش است، لذا محاسبه فشار وارده به سطح تماس سازه با پی و نیز شیب آبی خروجی در پایین دست این گونه سازه ها ضروری است. از جمله اقداماتی که برای جلوگیری از پدیده زیرشویی، کاهش شیب خروجی و همچنین بده نشت از زیرسازه های آبی صورت می گیرد، احداث دیواره های آب بند است. در پژوهش حاضر از نرم افزار Seep 3D به منظور انجام محاسبات نشت استفاده شده است. بیش از ۱۰۰۰ شبیه سازی انجام شد و در نهایت تأثیر تعداد، موقعیت و طول پرده های آب بند بر دبی نشت، فشار برکنش و شیب آبی خروجی در نقاط کلیدی پی با رسم نمودارهای مختلف بررسی شد. نتایج تحقیق این محققان نشان داد که استفاده از دو پرده آب بند، یکی برای مهار کردن زیرشویی در پایین دست (پنجه) و دیگری برای مهار کردن دبی نشت و تعدیل افزایش فشار برکنش ناشی از نصب پرده در پنجه،

در این تحقیق از دیواره آب‌بند در بالادست سد و همچنین در پایین دست سد استفاده شد. نکته اساسی این تحقیق تأثیر پرده آب‌بند و سوراخ‌های زهکشی بر نیروی زیر فشار است. نتایج نشان داد که عمق پرده آب‌بند با عمق هشت متر، نیروی بالا برنده را تا ۶۳ درصد کاهش داد و گرادیان خروجی نسبت به حالت بدون پرده آب‌بند، ۲۱ درصد کاهش نشان داد. همچنین سوراخ‌های ایجاد شده در دیواره پایین دست در حدود ۸ درصد گرادیان خروجی را کاهش داد. در این تحقیق از مدل نرم‌افزاری برای برآورد نیروی زیر فشار استفاده شد. در این مدل نرم‌افزاری، سد مدل شده در پاشنه سد دارای پرده آب‌بندی به ارتفاع سد است.

خلیلی و امیری (۱۴)، راهکارهایی برای کاهش نشت از جمله خاکریزی بالادست، زهکش و دیواره آب‌بند ارائه کردند. این موارد باعث کاهش نیروی بالا برنده می‌شود. در این تحقیق تأثیر زهکش‌ها که به صورت افقی در زیر بدنه واقع شده بودند، بررسی شد و چنین نتیجه‌گیری کردند که تأثیر این نوع زهکش به مراتب بیشتر از پرده آب‌بند در کاهش نیروی زیر فشار است. در نهایت آرایشی از پرده آب‌بند و زهکش‌ها ارائه شد که نیروی بالا برنده را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

مطالعات انجام شده راهکارهایی برای کنترل یا کاهش نیروی زیر فشار را نشان می‌دهد. کنترل این نیرو به منظور افزایش پایداری سازه‌های آبی لازم و ضروری می‌باشد. یکی از این راهکارها که هزینه ساخت کمتری نسبت به دیگر سازه‌ها دارد، زهکش‌های قائم هستند، که عموماً به آنها چاله زهکشی نیز گفته می‌شود. در این تحقیق سعی در پیش‌بینی بهترین مکان قرارگیری این زهکش‌ها در این سازه‌ها است.

## مواد و روش‌ها

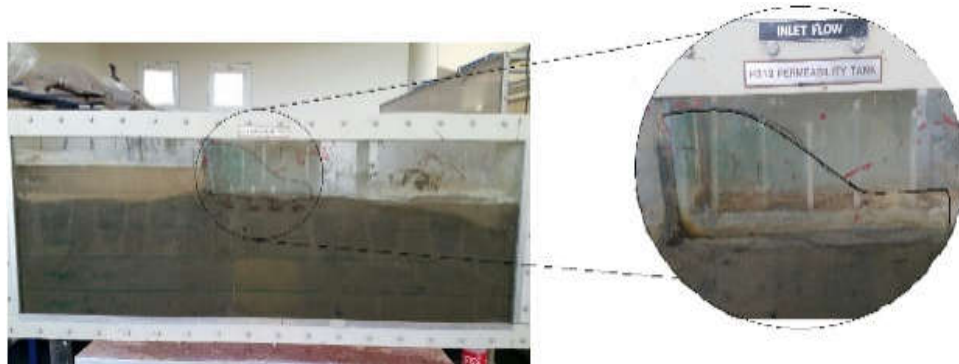
### معادلات حاکم

معادله لاپلاس، معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل اشباع است. با حل این معادله می‌توان تغییرات تراز آب در محیط متخلخل را مورد بررسی قرار داد (رابطه ۱).

هیدرولیکی خروجی در موقعیتی که دیوار آب‌بند در پایین دست احداث شود، دیده می‌شود. در شرایط وجود دو پرده آب‌بند یکی در پاشنه و دیگری در پنجه سد و یک زهکش در حد فاصل آنها هر چقدر زهکش در فاصله بیشتری از پاشنه احداث شود، تأثیر آن در کاهش نیروی زیر فشار کل و گرادیان خروجی بیشتر است. علاوه بر این با افزایش عمق پرده آب‌بند بالادست در مقایسه با پرده آب‌بند پایین دست، مقدار گرادیان خروجی کاهش می‌یابد. شدت این کاهش برای پرده آب‌بند پایین دست با عمق کوتاه‌تر مشهودتر است. توزیع فشار بالا برنده و گرادیان خروجی محاسبه شده برای شرایط خاک همسان و غیرهمسان در زیر سازه تطابق بسیار نزدیکی با نتایج مدل WinMSeep داشت.

شیراوندعمروی و همکاران (۵)، به معرفی اقداماتی برای جلوگیری از پدیده زیرشویی، کاهش نیروی زیر فشار کاهش گرادیان خروجی و کاهش بده نشت از زیرسازه‌های آبی به معرفی روش‌های مقابله کننده از جمله احداث دیواره‌های آب‌بند و نصب زهکش پرداختند. از این رو در این تحقیق به منظور بررسی دقیق تأثیر دیواره آب‌بند بر نیروی زیر فشار از نرم‌افزار Seep/w استفاده شد. در این مدل معادله عمومی جریان آب در خاک همگن اشباع در شرایط همسان و غیرهمسان با استفاده روش اجزای محدود حل شد. هدف از این تحقیق، استفاده از روش عددی المان محدود برای حل معادله عمومی جریان در شرایط اشباع است که این امر موجب پی بردن به موقعیت بهینه دیواره‌های آب‌بند و بررسی تأثیر عمق این دیواره‌ها و همچنین تأثیر ارتفاع آب بالادست بر مقدار نیروی زیر فشار است. نتایج این تحقیق نشان داد که با احداث یک دیواره آب‌بند در بالادست نسبت به دیواره آب‌بند در سایر موقعیت‌های مکانی، نیروی زیر فشار را کاهش می‌دهد. علاوه بر این با افزایش عمق پرده آب‌بند بالادست در مقایسه با پرده آب‌بند میانی و پایین دست، مقدار نیروی زیر فشار کاهش می‌یابد.

سلیم عزیزی و همکاران (۱۲)، برای ارائه راهکار مناسب برای طراحی اقتصادی و همچنین کاهش نیروی زیر فشار در سازه‌های آبی مانند سدهای انحرافی و سدهای وزنی، روش‌های مختلفی ارائه کرد.



شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی و مدل

### فلوم آزمایشگاهی

برای نشان دادن تأثیر چاله زهکشی بر نیروی بالابرنده در بدنه سدها، از مدل آزمایشگاهی با، طول دو متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع یک متر، که در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده شد. برای ساخت مدل سد تا ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر از کف فلوم خاکریزی صورت گرفت و برای مدل کردن سد از صفحه چوبی مقاوم به آب به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و طول ۴۰ سانتی‌متر روی پی قرار داده شد و برای آب‌بندی از چسب مخصوص استفاده شد. چهار چاهک زهکش در بدنه به صورت سوراخ‌هایی قائم که تا ارتفاع کف بدنه ادامه داشتند (به ضخامت پی سد) با قطر یک سانتی‌متر ایجاد شد (شکل ۱).

### خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده در رده SC، قرار داشت و هدایت هیدرولیکی آن با استفاده روش بار ثابت اندازه‌گیری و برابر دو متر در روز به دست آمد. برای این که خاک مورد استفاده را بتوان تقریباً همگن در نظر گرفت، تراکم نسبی براساس رابطه (۲)، برای خاک مورد استفاده به حدود ۹۰ درصد رسانده شد. بدین منظور وزن مخصوص آزمایشگاهی از آزمایش پروکتور به دست آمد. از نتایج آزمایش پروکتور وزن مخصوص ماکزیمم خاک مورد نظر با درصد رطوبت بهینه به دست آمد و از آن با توجه حجمی که باید اشغال کند تا به وزن مخصوص مورد نظر برسد. وزن مخصوص ماکزیمم در دستگاه تعیین هدایت

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

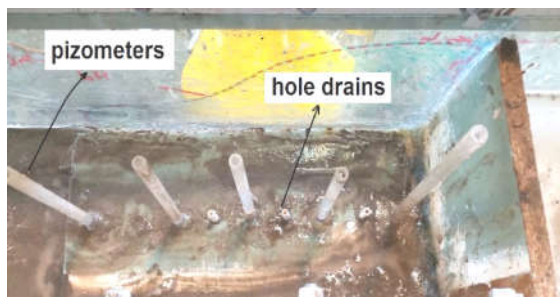
با بررسی نتایج حاصل از پژوهش بر اجا (۱۹۸۴) می‌توان بیان کرد که برای حل معادله لاپلاس و به دست آوردن مشخصات جریان در محیط‌های متخلخل و به‌ویژه پی و تکیه‌گاه‌های سد، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که مهم‌ترین روش‌های آزمایشگاهی آنها عبارتند از روش تحلیل الکتریکی که بر مبنای مدل‌های فیزیکی بنا شده‌اند. روش‌های ترسیمی مانند روش‌های ارائه شده توسط دوپویی، کاساگرانده و پاولوسکی که با کاربرد رسم خطوط جریان و پتانسیل مقادیر  $\phi$  به دست می‌آید. روش‌های نظری-تجربی مانند روش لین و بلائی و همچنین روش‌های تحلیلی مانند روش توان مرکب و روش خلا که بر مبنای توابع مختلط به حل تحلیلی معادله منجر می‌شود. شمسایی (۱۳۷۸) روش‌های شبیه-سازی عددی مانند تفاضلات محدود و حجم محدود اجزا و روش اجزا مرزی را برای محاسبه فشار بالابرنده را مورد استفاده قرار دادند. در هر یک از روش‌ها بسته به میزان ساده‌سازی از دقت جواب‌ها کاسته می‌شود. با توجه به این که هر یک از روش‌های نام برده شده برای تحلیل تراوش، محدودیت‌هایی دارند و این محدودیت‌ها در روش‌های شبیه‌سازی عددی بسیار کمتر است، امروزه به‌طور وسیعی از روش‌های مزبور استفاده می‌شود. در این تحقیق با توجه به مشخص بودن پتانسل در کف پی سد و منطقه نفوذناپذیر (کف فلوم)، از روش ترسیمی خطوط هم‌پتانسیل با درون‌یابی ترسیم شد.



شکل ۲. آزمایش بار ثابت و تعیین هدایت هیدرولیکی خاک مورد استفاده

(ب)

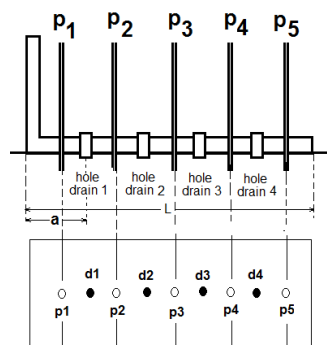
(الف)



شکل ۳. الف) پیزومترهای واقع در کف و ب) پیزومترهای واقع در بدنه سد

آزمایشگاهی، از تعداد ۱۹ عدد پیزومتر استفاده شد که تعداد ۱۵ تا از آنها در ارتفاع دو سانتی متری از کف فلوم واقع شده‌اند و تعداد پنج عدد در بدنه سد جانمایی شده‌اند. شکل ۳، جانمایی کلی این پیزومترها را نشان می‌دهد.

برای اشیاع کامل بدنه مدل سد، مخزن بالادست آن تا بیشترین ارتفاع، حداکثر از آب پر شد و برای مدت زمان لازم این شرایط برقرار ماند. در ادامه تمامی چاهک‌های زهکشی که در شکل ۴ نشان داده شده است، در حالت بسته نگه داشته شدند. پس از طی مدت زمانی با استفاده از پیزومترهای کف و تعبیه شده در بدنه سد فشار پیزومتریک برداشت شد. با استفاده از این خطوط هم‌پتانسیل و همچنین افت مورد نظر در خاک نیرو بالا برنده در کف سد محاسبه می‌شود. نیروی زیر فشار از پتانسیل فشاری واقع در زیر پی سد در شرایط مختلف آزمایشگاهی محاسبه شد. با قرائت پتانسیل فشاری از پیزومترهای تعبیه شده در بدنه فلوم، خطوط هم‌پتانسیل از الگوی حل معادله لاپلاس به روش ترسیمی، رسم شدند. در مواردی با دارا بودن خطوط



شکل ۴. نمایی کلی از چاله‌های زهکشی و پیزومترها  
(در شکل  $a=8$  سانتی متر و  $L=40$  سانتی متر)

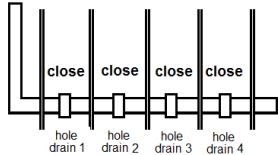
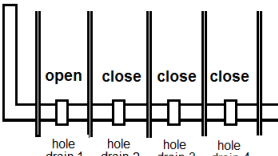
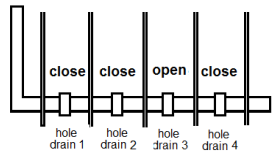
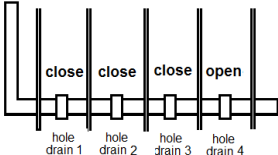
هیدرولیکی تعیین شد. هدایت هیدرولیکی در چنین شرایطی نیز به دست آمد.

$$\text{درصد تراکم نسبی} = \frac{\gamma_{Feild}}{\gamma_d} \times 100 \quad (2)$$

پیزومترها

برای برداشت داده‌های فشار پیزومتریک در بدنه مدل

جدول ۱. معرفی آزمایش‌ها در این تحقیق

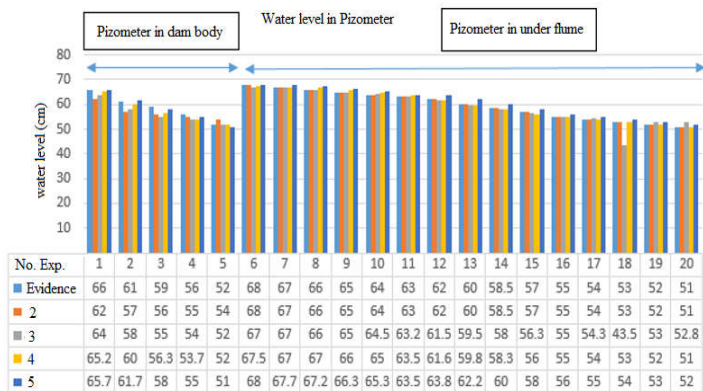
شماره آزمایش	وضعیت باز بودن چاهک‌های زهکشی	$\frac{a}{L}$	داده‌های برداشتی	توضیحات
۱			ارتفاع آب در پیزومترها	آزمایش شاهد
۲		$\frac{1}{5}$	ارتفاع آب در پیزومترها	
۳		$\frac{2}{5}$	ارتفاع آب در پیزومترها	
۴		$\frac{3}{5}$	ارتفاع آب در پیزومترها	
۵		$\frac{4}{5}$	ارتفاع آب در پیزومترها	

به‌خودی‌خود باعث کاهش نیروی زیرفشار می‌شود. به نظر می‌رسد نکته حائز اهمیت در این بررسی، کاهش نیروی بالابرنده و افزایش ضریب اطمینان جانمایی چاهک‌ها و همچنین فاصله آن‌ها از پاشنه می‌باشد. به همین علت فاصله زهکش‌ها به‌صورت نسبتی از طول سد در پی معرفی شدند که در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به موارد گفته شده طبقه‌بندی آزمایش‌ها به‌صورت جدول (۱)، انجام پذیرفت.

مطابق الگوی انتخابی در جدول ۱، اطلاعات سطح آب از پیزومترها برای ۲۰ حالت قرار گیری پیزومترها یادداشت شد. شکل ۵ پتانسیل فشاری موجود در زیر بدنه سد را در آزمایش‌ها مختلف نشان می‌دهد. در حالت کلی بهترین موقعیت چاهک‌های زهکشی به مقدار نیروی بالا برنده بستگی دارد. با ترسیم دیاگرام

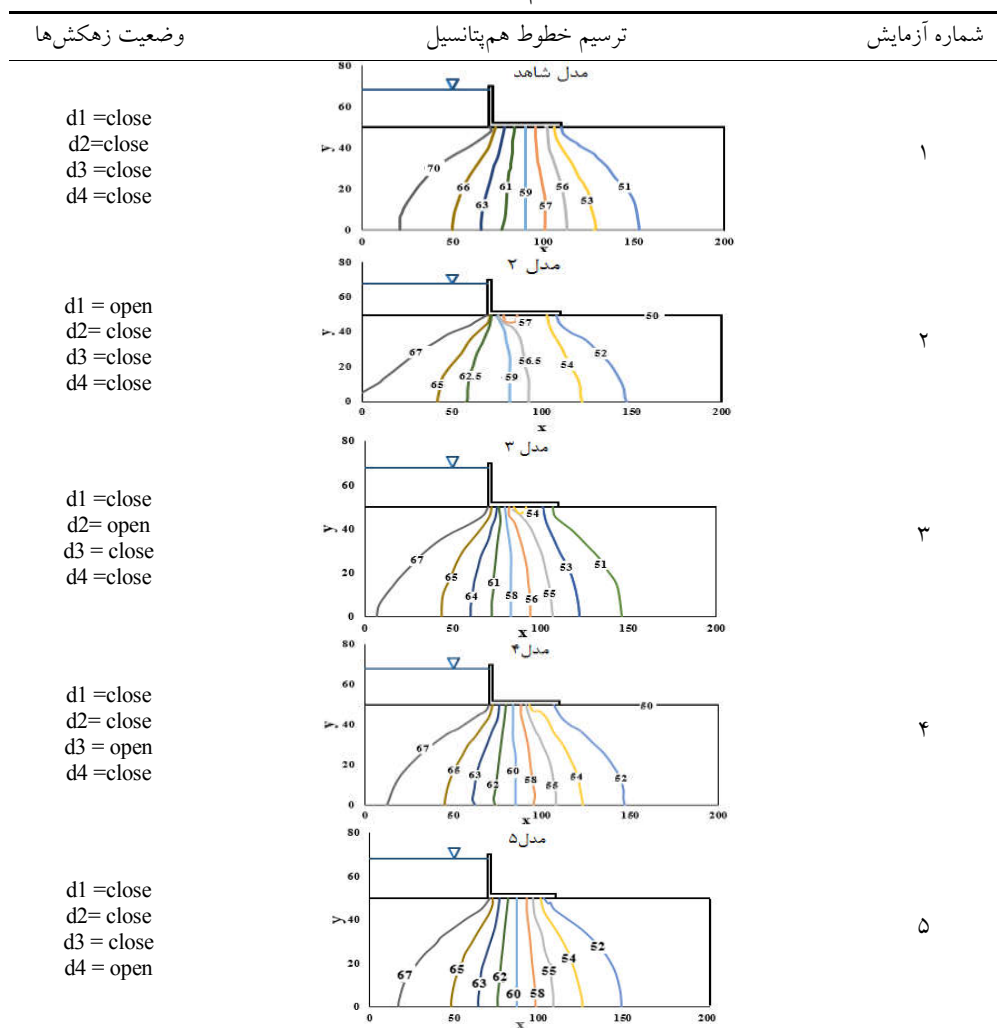
هم‌پتانسیل، پتانسیل فشاری در زیر بدنه سد مشخص شد. درنهایت با دارا بودن این پتانسیل نیروی زیرفشار در حالت‌های مختلف آزمایشگاهی محاسبه شد. با مقایسه این مقادیر می‌توان بهترین موقعیت زهکش قائم در پی سدهای بتنی را پیش‌بینی و پیشنهاد کرد که در ادامه بحث می‌شود.

آزمایش شاهد در شرایطی انجام شد که کلیه پیزومترها بسته باشند (شکل ۳-ب). سپس هر یک از چاهک‌های زهکشی به‌صورت مجزا باز می‌شود. ترتیب باز شدن چاهک‌ها در جدول (۱) آورده شده است. هنگامی که چاهک‌ها باز شدند سطح آب در پیزومترهای مجاور این چاهک‌ها نسبت به حالت شاهد (همه چاهک‌ها بسته)، پایین‌تر قرار می‌گیرند. علت این امر به‌خاطر اعمال فشار اتمسفریک به کف سد بوده که

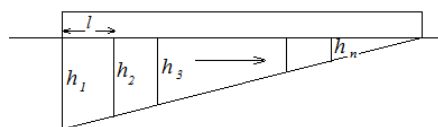


شکل ۵. ارتفاع آب در پیزومترها

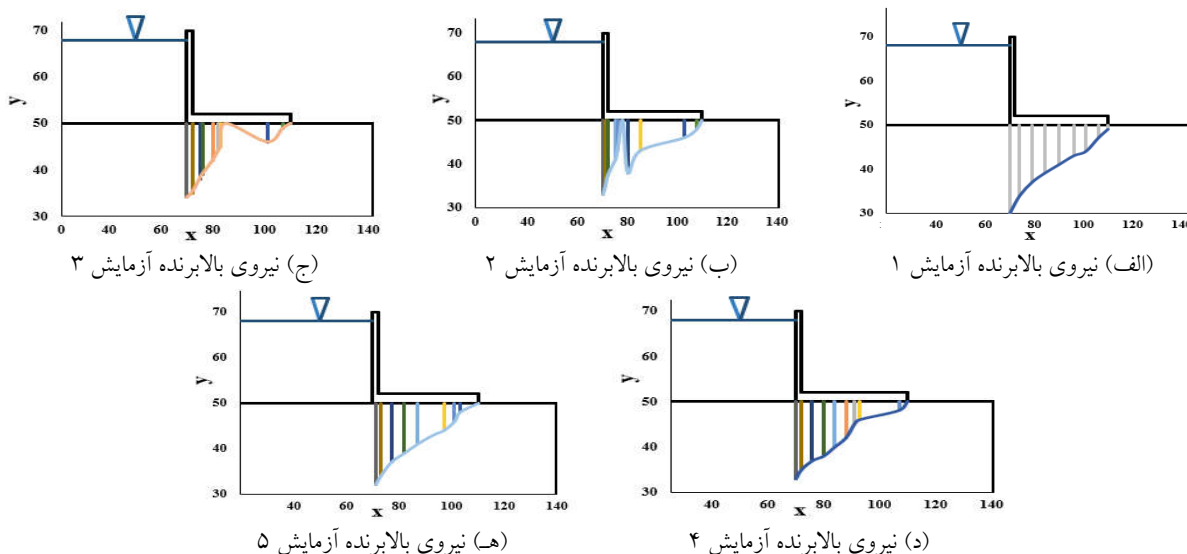
جدول ۲. به دست آوردن خطوط هم پتانسیل با استفاده از داده‌های پیزومتری



کلید واحدهای در جدول بر حسب سانتی متر است



شکل ۶. برآورد نیروی زیر فشار



شکل ۷. برآورد نیروی بالابرنده در مدل‌ها

محاسبه کرد.

$$U = \sum_{n=1}^n (U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n)$$

$$U_1 = \frac{h_1 + h_r}{2} \gamma_w l, U_2 = \frac{h_2 + h_r}{2} \gamma_w l, U_3 = \frac{h_3 + h_r}{2} \gamma_w l \quad (2)$$

$$U_n = \frac{h_{n-1} + h_n}{2} \gamma_w l$$

از طرفی شکل ۶ نشان می‌دهد که مقدار  $h_1$  برابر است با فشار آب در آن نقطه که از کم کردن پتانسیل فشاری از ارتفاع مرجع  $(z=50\text{cm})$  حاصل می‌شود.

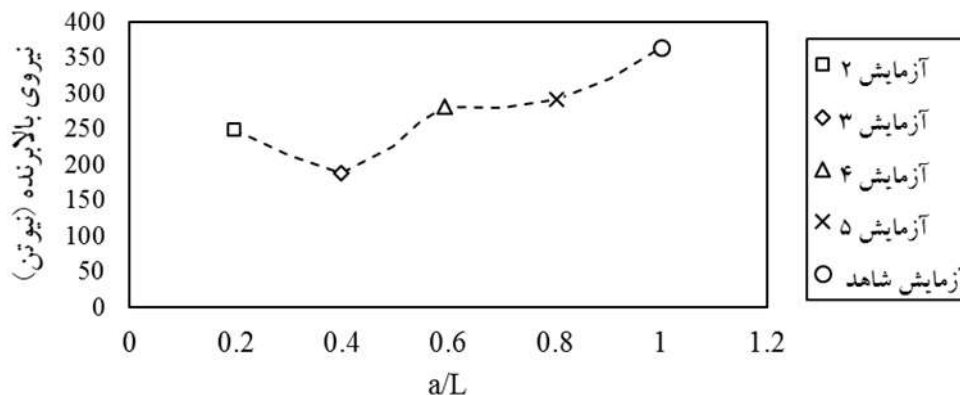
با ضرب مقدار زیر فشار در سطح زیر پی می‌توان نیروی زیر فشار را برای مدل‌ها محاسبه کرد. محاسبه این نیرو بدین صورت است که کف سد به مقاطع مختلفی تقسیم‌بندی شد و فشار بالابرنده در هر نقطه از روی خطوط هم‌پتانسیل مشخص شد و در نهایت نیروی بالا برنده برای آزمایش‌ها مختلف در شکل ۷ برای شماره آزمایش‌های یک تا پنج ترسیم شد که به صورت

نیروی بالا برنده مطابق جدول ۲، نتیجه می‌شود. بهترین طول برای جانمایی چاهک‌های زهکشی،  $a/L=0/4$  است که بهترین حالت آزمایشگاهی برای جانمایی این نوع زهکش‌ها در سدها است. لازم به ذکر است با استفاده از داده‌های پیزومتریک در شکل (۵) با درونیابی در زیر بدنه سد و کف فلوم آزمایشگاهی برای آزمایش‌های مختلف، خطوط هم‌پتانسیل ترسیم شد. این خطوط در جدول (۲) قابل مشاهده هستند.

### نتایج و بحث

با توجه به جدول (۲)، تمامی خطوط هم‌پتانسیل برای آزمایش‌ها ترسیم شد. همان‌طور که مشخص است با توجه به پتانسیل موجود در پی سد می‌توان با کم کردن ارتفاع از مبنا فشار آب منفذی را محاسبه کرد. حال با داشتن فشار آب منفذی در زیر بدنه سد می‌توان نیروی زیر فشار را به صورت زیر





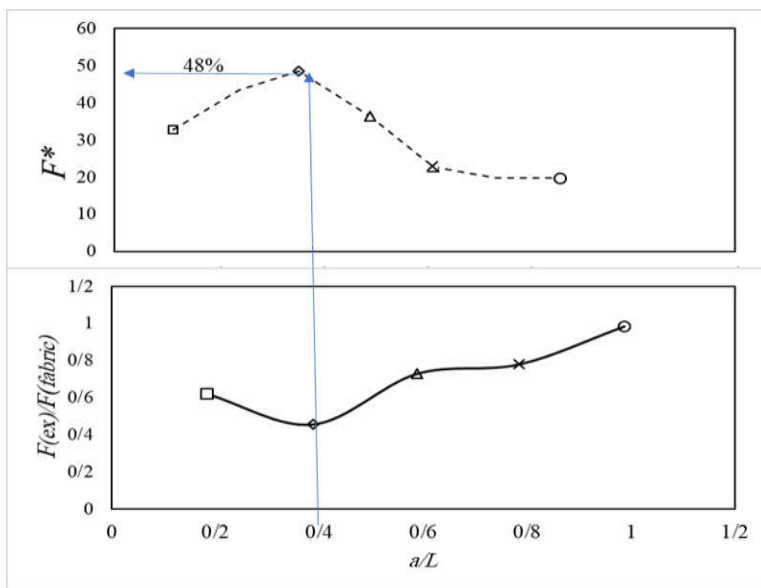
شکل ۸. تأثیر باز بودن چاله‌های زهکشی بر نیروی بالا برنده

تا امتداد پنجه سد با شیب کم تداوم دارد. بررسی نیروی زیر فشار موجود در حالت‌های مختلف آزمایشی نشان می‌دهد در آزمایش شماره ۳، بهترین شرایط کاهش نیروی زیر فشار به دست آمده است. زیرا گرادیان فشار در این حالت از گرادیان بحرانی کمتر است. شکل ۹، مؤید نتایج مورد بحث در حالت اخیر است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با ساخت چاله زهکش در طول پی سدها، گرادیان هیدرولیکی زیادی در سد ایجاد می‌شود ولی در برابر این پیشامد مقدار نیروی زیر فشار را تا حد قابل قبولی در منطقه زیر پی کاهش می‌یابد. با بررسی دیگران نیروی زیر فشار این نکته دارای اهمیت است که هر قدر چاله زهکشی به مخزن بالادست سدها نزدیک‌تر شود، در عمل چون فشار آب در آن منطقه بیشتر است، کاهش نیروی زیر فشار بیشتری خواهیم داشت. البته باید به این نکته توجه کرد که هر قدر این زهکش به سمت بالاتر منتقل شود، گرادیان هیدرولیکی در آن منطقه به خاطر افت ناگهانی فشار تا مرز اتمسفر بسیار بالا خواهد بود و امکان ایجاد پدیده ریزشویی را به وجود خواهد آورد که در هنگام طراحی باید مد نظر قرار گیرد. در این مدل‌سازی برای خاک با هدایت هیدرولیکی یک متر در روز و نسبت طول به ارتفاع ۲/۵، در زمانی که چاله زهکشی یک باز باشد، گرادیان هیدرولیکی موجود از گرادیان هیدرولیکی مجاز تجاوز نخواهد کرد، چرا که در هنگام آزمایش‌ها هیچ‌گونه مشاهده از وجود جوشش از چاهک مشاهده نشد، بنابراین پیشنهاد می‌شود. که برای سازه‌های آبی با نسبت طول

زیر است. برای محاسبه میزان نیروی بالا برنده می‌توان با محاسبه سطح زیر نمودار، میزان نیروی وارد شده به سد را محاسبه کرد. موقعیت انتخابی برای زهکش‌ها مطابق شکل بالا نشان داد که فشار در قسمت زیرین سد به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. این امر موجب کاهش فشار آب منفذی در زیر بدنه سد می‌شود. پس به مراتب هرچه در صد کاهش نیرو نسبت به حالت شاهد (زهکش‌ها بسته)، بیشتر باشد، در عمل تأثیر چاله زهکشی برای بالا بردن پایداری سد بیشتر خواهد بود. در آزمایش اول همه زهکش‌ها در حالت بسته قرار داده شدند. سپس با برداشت خطوط هم‌پتانسیل از روی پی‌زومترهای تعبیه شده در کف فوم و کف سد، میزان نیروی بالا برنده محاسبه شد. در تعیین کارایی هر یک از چاله‌های زهکشی عملکرد آن نسبت به این شرایط شاهد، بدین صورت سنجیده شد که هر کدام در صد کاهش نیروی زیر فشار بیشتری داشته باشد، آن موقعیت آن زهکش به عنوان بهترین حالت معرفی می‌شود. لذا با این نتیجه می‌توان در سازه‌های آبی همچون سدها محل مناسب احداث زهکش را برای کاهش هرچه بیشتر نیروی زیر فشار به دست آورد.

با توجه به برداشت نیروی زیر فشار در حالت‌های مختلف  $a/L$  می‌توان مقدار این نیرو را در شکل (۸) ارائه کرد. چنان‌که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار  $a/L$  ابتدا کاهش نیروی زیر فشار در پی به وجود خواهد آمد اما با افزایش  $a/L=0/4$  تأثیر چاله زهکشی روی نیروی زیر فشار کاهش می‌یابد و این کاهش



شکل ۹. بهترین حالت  $a/L$  و کمترین میزان نیروی بالا برنده

آمده از آزمایش‌ها و  $F_{Fabric}$  بیان کننده نیروی زیر فشار در آزمایش شاهد است.

### نتیجه گیری

هر چند پیشرفت علم ژئوتکنیک به پرونده ایمنی سدها و سازه‌های آبی کمک زیادی کرده است، با این وجود هنوز مسائل مهم مهندسی در ارتباط با این سازه‌ها وجود دارد. همچنین بحث تراوش و نیروی ناشی از آن که بر پایداری سدها تأثیرگذار است، پژوهشگران را به مطالعات مدل‌سازی فیزیکی و عددی سوق داده است. نتایج این پژوهش آزمایشگاهی نشان داد استفاده از چاله‌های زهکشی نقش مؤثری بر پایداری و کاهش نیروی زیر فشار دارد. تعیین موقعیت به دست آمده در این مدل‌سازی هر چند به صورت آزمایشگاهی، حاکی از آن است که امکان کاهش نیروی زیر فشار با تمهیدات مشابه این روش ممکن است وجود داشته باشد. در این مدل‌سازی کاهش نیروی زیر فشار به حدود ۴۸ درصد فشار اولیه وارد بر پی رسید. هر چند بر این اعداد و ارقام نمی‌توان تأکید قطعی کرد اما می‌توان مطمئن بود این پژوهش یک افق تازه در این گونه فعالیت است.

یه عرض کمتر از ۲/۵ و با خاک پی که هدایت هیدرولیکی آن کمتر از ۱ متر در روز باشد، می‌توان زهکش‌های قائم (چاله زهکشی) را در فاصله  $a/L = 0.4$  تعبیه کرد.

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۹، مشاهده می‌شود که در فاصله بین زهکش ۴ و ۵، جابه‌جا شدن زهکش نسبت به پاشنه تأثیر چندانی بر نیروی زیر فشار ندارد. این بدان معناست که ساخت زهکش در  $a/L = 0.8$  به ساخت زهکش قائم در  $a/L = 0.6$  برتری دارد. چرا که با ساخت زهکش در فاصله‌ای دورتر از پاشنه سد به‌ازای شرایط یکسان، خطر ایجاد پایینگ کاهش داده خواهد شد. در نهایت نسبت نیروی بالا برنده در وضعیت‌های دو تا پنج، نسبت به وضعیت ۱ (شاهد) به دست آمد. بدین منظور رابطه (۳) برای تعیین درصد کاهش نیروی زیر فشار ناشی از احداث زهکش‌ها مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصل از این رابطه در شکل ۹، ترسیم شد. بیشترین کاهش درصد نیروی بالا برنده برای  $a/L = 0.4$  مشاهده شد که مقدار آن حدود ۴۸ درصد است.

$$F^* = 100 - \left( \frac{F_{\text{Experimental}}}{F_{\text{Fabric}}} \right) \times 100 \quad (3)$$

در رابطه بالا  $F_{\text{Experimental}}$  نشان‌دهنده نیروی زیر فشار به دست

## منابع مورد استفاده

۱. ابن جلال، ر. و م. شفاعی بجزستان. ۱۳۸۴. *اصول نظری و عملی مکانیک خاک*. انتشارات دانشگاه شهید چمران. اهواز.
۲. احمدی، ح. و م. قهرمان‌نژاد. ۱۳۸۹. بررسی اثر سیستم زهکش و سپرهای کنترل تراوش و نیروی زیر فشار در سدهای انحرافی، سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز. ایران. ۷۹-۶۹.
۳. افتخار افضلی، س. و غ. ع. بارانی. ۱۳۹۱. بررسی اثر دیواره آب‌بند بر روی نیروی زیر فشار و شیب خروجی زیر سازه‌های آبی با استفاده از نرم‌افزار Seep. *مجله مهندسی منابع آب* ۵: ۷۹-۹۰.
۴. شمسانی، ا. ۱۳۷۸. *هیدرولیک جریان آب در محیط‌های متخلخل*. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.
۵. شیرواند عمروی، ر. و ح. قهرمان موسوی جهرمی. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر میزان عمق و محل دیور آب‌بند بر نیروی زیر فشار در سد های انحرافی با استفاده از نرم‌افزار seep/w، سومین سمینار ملی مسایل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. کرج. ایران. ۷۹-۶۶.
۶. عابدی کوپایی، ج. ۱۳۶۹. بررسی عوامل موثر بر زیر فشار در پایداری سد های انحرافی به روش تفاضل محدود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری دانشگاه تربیت مدرس. تهران.
۷. قبادیان، ر. و ک. خدایی. ۱۳۸۸. تأثیرات آب‌بند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود، *نشریه آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)* ۲۳: ۱۶۰-۱۳۸.
۸. وفاپیان، م. ۱۳۷۷. *سدهای خاکی*، چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی، اصفهان.
۹. هار، م. ۱۳۶۹. *آب زیر زمینی و نشت فریدون کاوه*، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
۱۰. هافمن، ک. ا. و س. ت. چیانگ. ۱۳۷۷. *دینامیک سیالات محاسباتی برای مهندسان*، ترجمه: احمدرضا عظیمیان، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
11. Anonymous, Technical Report on Sand Boils/Piping. 2002. Draft English Version, Technical Advisory Committee on Flood Defenses. Road and Hydraulic Engineering Institute. The Netherlands.
12. Azizi, S. and F. Salmasi. 2011. Weep hole and cut-off effect in decreasing of uplift pressure (case study: yusefkand mahabad diversion dam). *Journal of Civil Engineering and Urbanism* 2(3): 97-101.
13. Das, B. M. 1984. Model Uplift Tests on Pile Groups in Sand. Transportation Research Record, Washington.
14. Khalili Shayan, H. and E. Amiri-Tokaldany. 2015. Effects of blanket, drains, and cutoff wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structures. *International Journal of Civil Engineering* 13(4): 486-500.
15. Yu, H., S. Li, Y. Liu and C. Chen. 2009. Evaluation and rehabilitation of the seepage problems at the Fengman dam, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 14: 1-14.
16. Zoorasna, Z. and A. Hamidi. 2008. Mechanical and hydraulic behavior of cut off-core connecting systems in earth dams. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 13: 1-12.

## Optimization of the Drain Position to Reduce the Uplift Force in the Foundation of Dams

S. Salehi Hafshejani, SH. Esmailzade, GH. Panahi and K. Esmaili<sup>1\*</sup>

(Received: December 9-2016 ; Accepted: November 29-2017)

### Abstract

The effect of the uplift force in the hydraulics structures is against stability. So, determining and controlling this force can be very important. One of the ways to achieve this purpose is to decrease this force by using the hole drains; in this way, we can build perpendicular pipes with different diameters, leading to the durability of the structure. Therefore, an experimental model of concrete dam was constructed in the hydraulic laboratory. The dam's model was divided into five sections by using 4-hole drains with a thickness equal to the dam's foundation. By running experiments with the maximum water level at the upstream, dam hole drains were opened in their position. Hydraulic potential was estimated by using the Piezometer built in the flume body. Finally, by opening some hole drains, the uplift force was calculated from the equipotential lines. Therefore, the best case (which had the minimum force) was determined, which was  $a/L=0.4$ , to create the most proper hole drain in the dam foundation. ( $a$ : distance of drain to heel and  $L$ : length of the dam's foundation). To place the hole drain in this position, by applying the zero potential in this position, the up lift force was increased

**Keywords:** Hole Drain, Uplift force, Hydraulic potential, Dam and hydraulic structure

---

1. Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: esmaili@um.ac.ir