

## بررسی موقعیت بهینه دیواره‌های آب‌بند در حضور زهکش در پی ناهمگن سد بتنی

حجت احمدی<sup>۱\*</sup>، نگین اکبری<sup>۲</sup> و محمد همتی<sup>۲</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشیار، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، و دانشیار گروه آب دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۳

### چکیده

به منظور مطالعه تأثیر توأم به کارگیری زهکش و دیواره آب‌بند در سدهای بتنی یا انحرافی و تعیین موقعیت بهینه آنها، رفتار هیدرولیکی دیواره‌های آب‌بند و زهکش در عمق‌های مختلف روی پی ناهمگن ماسه‌ای به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شد. در مدل آزمایشگاهی ساخته شده، مقادیر نشست و فشار پیژومتری در ۱۸ نقطه از مدل تحت چهار هد آبی مختلف برداشت گردید. بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی با داده‌های آزمایشگاهی، موقعیت بهینه دیواره‌های آب‌بند با استفاده از مدل عددی اجزای محدود تعیین گردید. نتایج این تحقیق به هر دو صورت آزمایشگاهی و عددی نشان داد که استفاده از زهکش در حضور دو دیواره آب‌بند سبب افزایش مقدار دبی نشست، کاهش چشمگیر مقدار زیرفشار و کاهش گرادیان خروجی نسبت به حالت مبنا (بدون دیواره آب‌بند و زهکش) می‌شود. همچنین، افزایش عمق زهکش سبب افزایش مقدار دبی نشست و کاهش گرادیان خروجی می‌گردد، اما تأثیر چندانی بر تغییر نیروی زیرفشار ندارد. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که در صورت وجود دو دیواره آب‌بند، موقعیت بهینه دیواره آب‌بند بالادست در حضور زهکش در پاشنه سد و دیواره پایین دست به فاصله ۰/۲۷ طول بدنه از پنجه است که در این حالت هر سه پارامتر یعنی دبی نشست، زیرفشار و گرادیان خروجی کمترین مقدار خود را خواهند داشت.

### واژه‌های کلیدی

دبی نشست، دیواره آب‌بند، گرادیان خروجی، نیروی زیرفشار

### مقدمه

تحقیقات صورت گرفته در این خصوص بسیار گسترده است و تاریخچه طولانی دارد. در سال ۱۹۱۰، بلائی (Bligh, 1910) نظریه نفوذ را ارائه کرد و اظهار داشت که شیب هیدرولیکی در طول مسیر خزش ثابت است و در طول این مسیر افت انرژی به‌طور خطی با طول خزش تغییر می‌کند، در نتیجه توزیع فشار در زیر سد خطی است. لین (Lane, 1935)، کمبودهایی را در نظریه نفوذ بلائی (Bligh, 1910) دریافت و نظریه‌ای جدید بر مبنای نتایج آماری ارائه کرد. این نظریه، نفوذ قائم را در مقام

نفوذ آب به زیر پی و حرکت در محیط متخلخل یا سنگی زیر فونداسیون باعث افزایش فشار آب در زیر سازه می‌شود که به صورت نیروی بالابرنده عمل می‌کند و موجب ناپایداری آن می‌شود. علاوه بر این، حرکت آب در زیر بدنه سازه به زیرشویی و فرسایش می‌انجامد که می‌تواند موجب تشدید شرایط ناپایدارکننده بر سازه آبی گردد (Liang et al., 2017a; Qiao et al., 2018). با توجه به اهمیت موضوع تأمین شرایط پایداری سازه‌های آبی،

بر اساس مطالعات اولیه، افزایش مسیر نشت به-کمک ساخت دیواره‌های آب‌بند یا افزایش مقاومت مسیر جریان از راهکارهایی بود که برای کنترل نیرو-های مخرب نشت به‌کار گرفته می‌شد و به‌همین دلیل در مطالعات محققانی چون بلای، لین و خوسلا، وضعیت جریان فقط در حضور دیواره‌های آب‌بند بررسی شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، تأثیر دیواره‌های آب‌بند در کاهش و کنترل فشار بالا-برنده یکسان نیست و حتی تأثیر وجه بالا‌دست و پایین‌دست دیواره‌های آب‌بند در کنترل نشت و نیروهای مربوط به یک اندازه نیست (Liang *et al.*, 2017b).

چاهک‌های زهکش یا فشارشکن به‌صورت افقی یا عمودی، به‌عنوان تکنیکی مؤثر در کاهش نیروهای زیرفشار در سازه‌های آبی می‌توانند به‌کارگرفته شوند. یکی از مطالعات اولیه و دقیق بررسی وضعیت جریان در اطراف چاه‌های فشارشکن را ونگ و همکاران (Wang *et al.*, 1992) به‌عهده داشته‌اند. در مورد اثر چاه‌های زهکش در کاهش فشار بالا‌برنده، دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد که بر اساس یکی از قدیمی‌ترین آنها بیشترین کاهش فشار بالا‌برنده مربوط به حالتی است که زهکش‌ها به پاشنه سد نزدیک‌تر شوند (Yaghini, 1998). صیادزاده و زمردیان (Sayadzadeh & Zomorodian, 2007)، خصوصیات جریان (مقدار نشت و گرادیان خروجی) را در سدهای نفوذناپذیر با عرض متغیر و پرده‌سپری در عمق‌های مختلف پنجه‌ پایین‌دست، روی سیستم‌های خاک دو لایه و سه لایه بررسی و مقدار جریان و گرادیان خروجی را برای تمام شرایط تعیین کردند و نتایج به‌دست آمده را به‌صورت نمودارهای بی‌بعد به نام منحنی‌های اپسیلن ارائه دادند. ملوندی و همکاران (Melondy *et al.*, 2007)، در بررسی

مقایسه با نفوذ افقی، سه برابر بزرگ‌تر در نظر می‌گیرد. در این روش نیز مشابه تئوری خزشی بلای (Bligh, 1910)، توزیع زیرفشار در زیر سد خطی فرض می‌شود. خوسلا و همکاران (Khosla *et al.*, 1936)، برای یافتن راه حل نهایی برای حل مشکل تراوش در زیر سدها به تحقیقات بیشتری پرداختند و توزیع واقعی فشار بالا‌برنده را با حل تابع پتانسیل مختلط با بهره‌گیری از تبدیل‌های ریاضی ارائه کردند و معادلات جریان در زیر سد بتنی در محیط نفوذ-پذیر را به‌صورت تحلیلی حل کردند. بررسی فشار بالا‌برنده وارد بر کف سدهای بتنی نشان داده است که فشار بالا‌بر بر کل مساحت کف سد وارد می‌شود (Amiri-Tokaldani, 1990). در یک تحقیق با استفاده از مدل کامپیوتری زیرفشار وارد بر سازه‌های هیدرولیکی را با چند روش متفاوت با ارایه یک مدل کامپیوتری بررسی شد. مدل فوق در محاسبه زیر-فشار و زیرشویی از روش‌های لین، بلای، خوسلا و در محاسبه میزان نشت از روش خوسلا و شبکه جریان استفاده بهره می‌برد. بر اساس نتایج حاصله میزان خطای به‌دست آمده در مقایسه با داده‌های پیرومتری سد واقعی حدود چهار درصد بود (Abolpour, 1994).

مطالعه اثر موقعیت بهینه پرده آب‌بند قائم در کاهش نشت جریان و نیز کاهش سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از روش تفاضلات محدود نشان داد، بهترین مکان استفاده از پرده آب‌بند برای کنترل نشت و زیرشویی، به‌ترتیب پاشنه و پنجه سد است (Sedghi-Asl *et al.*, 2005). همچنین در مطالعه دیگری، تأثیر پارامترهای مختلف بر پدیده جوشش در پی‌های آبرفتی به‌صورت عددی بررسی شده است (Azar *et al.*, 2014).

فشار پیژومتری در ۲۸ نقطه از مدل فیزیکی برداشت و با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی گردید. مقدار خطای مدل عددی به‌طور متوسط ۰/۲۸ درصد بود که این موضوع حاکی از تطابق خوب نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی است. حیدرزاده و همکاران (Heidarzadeh *et al.*, 2015) با مدل‌سازی عددی نشت آب از پی سد کرخه نتیجه گرفتند که با نصب دیوارهای فشار شکن، ضریب ایمنی پنجه پایین‌دست به سطح ایمنی ۱/۳ برای سطح آب طبیعی مخزن افزایش یافته است. یافته‌های مشابه در تحقیقات عدی و حسن (Uday & Hassan, 2016) نشان می‌دهد که بهترین موقعیت گالری زهکش در فاصله ۱۷ درصد عرض سد بتنی از پاشنه آن است، به‌طوری‌که در این شرایط مقدار فشار برکش بیش از ۴۹٪ کاهش پیدا می‌کند.

محققان همچنین در مطالعات آزمایشگاهی با بررسی تأثیر پرده آب‌بند بر کنترل نشت و پدیده جوشش در پی سازه‌های هیدرولیکی، نتیجه گرفتند که در نسبت طول پرده آب‌بند به ضخامت لایه آبرفت برابر با ۰/۴۶، جوشش رخ نمی‌دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی در محدوده‌ای مناسب قرار می‌گیرند (Yousefi *et al.*, 2016). داغستانی (Daghestani, 2018) به‌صورت عددی به بررسی تأثیر چاه‌های زهکش واقع در پی و بدنه سدهای بتنی پرداخت. طبق یافته‌های وی، موقعیت بهینه افقی این چاه‌ها در فاصله ۱۰ درصد عرض پی از پاشنه سد و در عمق، در تراز آب پایین‌دست یا کمتر از آن حاصل شد. با استفاده از چاه‌های زهکش در پنجه سد کرخه، فشار ناپایدار بالابرنده که باعث کاهش ضریب اطمینان پایداری پایین‌دست سد تا کمتر از یک می‌شد، مرتفع گردید. به‌طوری‌که پس از

رفتار زهکش‌های عمقی در کاهش نیروهای بالابرنده در پی سدهای بتنی وزنی به‌کمک حل سه بعدی معادله تراوش نتیجه گرفتند که افزایش قطر زهکش اثر کمی در کاهش نیروی بالابرنده دارد، اما افزایش عمق، موقعیت، زاویه حفاری و کاهش فاصله زهکش‌ها از بالادست می‌تواند نقشی بسزا در کاهش نیروی بالابرنده داشته باشد. عبید و همکاران (Obead *et al.*, 2014) استفاده از زهکش‌های افقی در زیر سدهای بتنی را یکی از مؤثرترین روش‌ها در کاهش فشار بالابرنده دانسته‌اند.

سیستم‌های زهکشی، به عنوان راه کار کنترل نیروی زیر فشار، مورد توجه محققان مختلف است. ییفنگ و همکاران (Yifeng *et al.*, 2008)، برای حل مشکلات نشت با سیستم‌های زهکش سد، حل عددی ارائه دادند که از روش المان محدود استفاده می‌کرد. احمدی و همکاران (Ahmadi *et al.*, 2011)، اثر سیستم زهکش و سپرهای کنترل تراوش را بر نیروی زیرفشار در سدهای انحرافی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که وجود یک سیستم زهکشی زیرسطحی در هر نقطه از زیر بدنه سد می‌تواند نیروی زیرفشار را به‌مقدار قابل توجهی کاهش دهد. بررسی‌های آنها همچنین نشان داد که بهترین موقعیت سیستم زهکش و سپر پایین‌دست به‌منظور کاهش نیروی زیرفشار به‌ترتیب برابر با فاصله ۰/۳۳L از پاشنه سد و ۰/۲۸L (طول مقطع عرضی سد) از پنجه سد است. پوراسکندر و همکاران (Poureskandar *et al.*, 2012)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر پرده آب‌بند بر نشت از پی مطابق سدها پرداختند. این محققان رفتار هیدرولیکی پرده آب‌بند را با عمق‌های نفوذ مختلف برای خاک‌هایی با سه نوع ضریب آب‌گذری و دو لایه‌بندی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. در این بررسی، مقادیر نشت و

بالایی آن به تراز آب و ارتفاع آزاد جعبه اختصاص داده شد. قطر متوسط ذرات ماسه برای لایه‌های اول و دوم به ترتیب برابر با ۰/۵۵ و ۱/۳ میلی‌متر بود. برای اندازه‌گیری زیرفشار در هر آزمایش از یک شبکه پیزومتری متشکل از ۱۸ پیزومتر تعبیه شده بر کف سد استفاده شد. فاصله پیزومترها از هم در هر دو جهت طولی و عرضی ۵ سانتی‌متر انتخاب گردید. هر پیزومتر برای قرائت سطح آب به یک اشل مدرج قائم با دقت یک میلی‌متر متصل بود. دو دیواره سپری نفوذناپذیر از جنس پلکسی‌گلاس نیز به عمق‌های ۱۵ و ۷ سانتی‌متر به ترتیب در پاشنه و فاصله ۱۳/۶ سانتی‌متری پنجه نصب گردیدند. برای تعیین بهترین موقعیت زهکش زیر پی سد بتنی، سه زهکش افقی به طول ۱۰ سانتی‌متر و به قطر ۴ میلی‌متر در وسط دو دیواره آب‌بند و در عمق‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری از کف‌بند پی تعبیه گردیدند. موقعیت زهکش‌ها بر اساس بهترین موقعیت توصیه شده توسط محققان قبلی (Ahmadi *et al.*, 2011) انتخاب شد. خروجی زهکش‌ها با یک لوله انعطاف‌پذیر در تراز با تراز آب پایین‌دست تنظیم می‌شد. بار آبی بالادست به کمک یک لوله سرریز، ثابت و برابر با ۱۳/۵ سانتی‌متر و مقادیر بار آبی پایین‌دست متغیر و برابر با ۲، ۳، ۵/۵ و ۷ سانتی‌متر لحاظ گردیدند. شکل ۱ نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده و موقعیت زهکش‌ها و دیواره‌های آب-بند را نشان می‌دهد. پس از واسنجی، ضریب هدایت هیدرولیکی لایه ماسه‌ای اول ۳/۴۵ متر بر روز و لایه ماسه‌ای دوم ۸/۸۵ متر بر روز محاسبه گردید. برای اجرای آزمایش‌ها، هشت حالت مختلف برای قرارگیری زهکش‌ها در نظر گرفته شد که در جدول ۱ ارائه شده است.

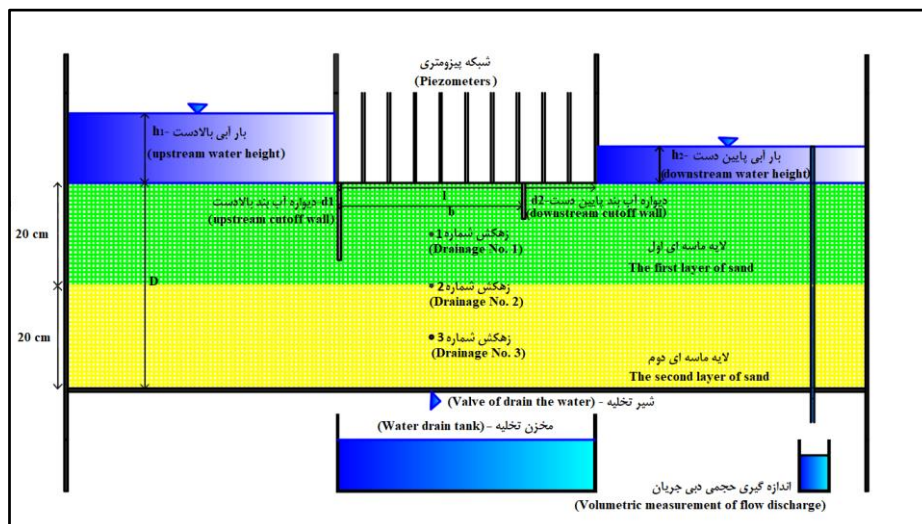
اجرای چاه‌های زهکش در این سد، ضریب اطمینان پایین‌دست سد به بالای ۱/۳ افزایش پیدا کرد.

با وجود معیارهای طراحی زهکش در سدهای خاکی (Chahar *et al.*, 2004)، به‌طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهند که مطالعات صورت گرفته درباره کاربرد توأم سازه‌های کنترل زیرفشار بسیار محدودند و اطلاعات موجود برای شرایط پی همگن هستند. در واقع بیشتر تحقیقات بر مبنای روش‌های آزمایشگاهی یا حتی عددی در محیط‌های همگن بوده است (Azar *et al.*, 2004, Ahmadi *et al.*, 2018). در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر توأم کاربرد دیواره‌های آب‌بند و زهکش در محیط ناهمگن، مطالعه آزمایشگاهی و عددی مسئله نشت از پی ناهمگن سد بتنی بررسی شده است تا تأثیر موقعیت مناسب زهکش و دیواره‌های آب‌بند در شرایط ناهمگن تحلیل شود.

## مواد و روش‌ها

### مدل آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی تأثیر توأم کاربرد دیواره‌های آب‌بند و زهکش در برآورد مقادیر دبی نشت، زیرفشار و گرادیان خروجی و تعیین موقعیت بهینه هیدرولیکی قرارگیری آنها، مدل کوچکی از سد با بدنه نفوذناپذیر در جعبه ماسه تولیدی شرکت آرمفیلد ساخته شد و آزمایش‌های نشت از زیر پی آن اجرا گردید. عرض داخلی جعبه مذکور برابر ۱۱ سانتی‌متر، ارتفاع آن ۶۵ سانتی‌متر و طول آن ۱۵۵ سانتی‌متر با اسکلت فولادی بود. چهل سانتی‌متر تحتانی از عمق جعبه به پی ماسه‌ای در دو لایه به ضخامت هر لایه ۲۰ سانتی‌متر و ۲۵ سانتی‌متر



شکل ۱- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده و موقعیت زهکش‌ها و دیواره‌های آب‌بند  
 Fig. 1- Laboratory model and location of drainages and cutoff walls

خطوط جریان و هم‌پتانسیل را دارد؛ علاوه بر آنالیز در شرایط ماندگار، قابلیت مدل‌سازی شرایط تخلیه سریع مخزن و ایجاد تابع تخلیه سریع مخزن بر حسب زمان را نیز داراست. امکان مدل کردن شرایط پر شدن سریع مخزن، شرایط نیمه‌اشباع، توابع نفوذ-پذیری و توابع رطوبت حجمی خاک و پیوسته در نظر گرفتن آنها در کنار یکدیگر در محاسبات، نیز از دیگر قابلیت‌های مهم این نرم‌افزار است (Anon, 2007).

#### مطالعه عددی

با توجه به اینکه امکان آزمایش برای حالت‌های مختلف از هندسه و شرایط حاکم، به دلیل هزینه بر و زمان بر بودن آن میسر نبود، از نرم‌افزار Seep/W برای بررسی حالت‌های مختلف از شرایط حاکم استفاده شد. برای این منظور در مدل عددی، هد آب در بالادست ثابت و در پایین دست در مقادیر مختلفی قرار داده شد تا تأثیر تغییرات مختلف اختلاف انرژی در نتایج، بررسی شود. علاوه بر این، برای مطالعه اثر فاصله دیواره‌های آب‌بند، دیواره آب‌بند بالادست

#### معرفی مدل Seep/W

برای رسیدن به هدف‌های تحقیق از نرم‌افزار Seep/W از بسته نرم‌افزاری GeoStudio2007 استفاده شد (Anon, 2007). بسته نرم‌افزاری GeoStudio در سال ۲۰۰۱ به بازار آمد و یکی از کاراترین محصولات در فضای دو بعدی در زمینه ژئوتکنیک است. این نرم‌افزار مبتنی بر روش المان محدود است که برای مدل‌سازی تراوش و توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل مانند خاک و سنگ تهیه شده و قادر است جریان درون سدهای خاکی و فونداسیون سد بتنی را شبیه‌سازی کند. معادلات به کار رفته در این مدل معادلات اصلی تراوش در شرایط ماندگار و غیرماندگارند که برای جریان در محیط‌های اشباع و نیمه‌اشباع قابل حل هستند. نرم‌افزار Seep/W مربوط به بررسی شرایط تراوش و جریان آب در خاک و به‌طور کلی توزیع فشارهای منفذی در محیط‌های متخلخل مانند خاک و سنگ است. این بخش، قابلیت ترسیم تراز آب عبوری از درون خاک، محاسبه دبی عبوری برای مقطعی مشخص و ترسیم

مجموع برای ۱۶۸ حالت مختلف از ترکیب قرارگیری چاهک زهکش و دیواره‌های آب‌بند بررسی گردید. در بررسی نتایج به دست آمده، مقادیر بی‌بعد فاصله نسبی  $l/b$  (نسبت فاصله بین دو دیواره آب‌بند بالادست و پایین دست به طول بدنه سد)، عمق نسبی  $d_1/D$  (نسبت طول دیواره آب‌بند بالادست به ضخامت پی)،  $q/q_0$  (نسبت دبی نشت به دبی نشت در حالت مبنا)،  $F_p/F_{p0}$  (نسبت نیروی زیر فشار به نیروی زیر فشار در حالت مبنا) و  $i/i_0$  (نسبت گرادیان خروجی به گرادیان خروجی در حالت مبنا) تعریف گردیدند.

ثابت و موقعیت دیواره آب‌بند پایین دست متغیر لحاظ شد. به این ترتیب مرز بالادست و پایین دست در سطح افق به صورت بار فشاری و برابر با عمق آب مورد نظر لحاظ شد. همچنین، شرایط مرزی برای زهکش‌ها در مرز هر زهکش به صورت بار فشاری و برابر با تراز آب در پایین دست سد اعمال شد. سایر مرزها نفوذ ناپذیر انتخاب شدند. با توجه به شکل ۱، با جابه‌جایی دیواره آب‌بند بالادست با سه طول نسبی  $d_1/D$  و در فاصله نسبی  $l/b$  به‌ازای قرارگیری زهکش‌ها در هشت حالت مختلف تغییرات نیروی زیر فشار، گرادیان خروجی و دبی نشت در

جدول ۱ - حالت‌های مختلف قرارگیری زهکش‌ها

Table 1- Different modes of the location of drainages

مشخصات Specifications	نمایه index	حالت Case
حالت بدون زهکش و بدون دیواره آب‌بند The case of without drainage and cutoff wall		مبنا The basis
بسته بودن زهکش‌های شماره ۱ و ۲ و ۳ Closed drainages No. 1, 2 and 3	A	اول First
باز بودن زهکش شماره ۱ Opened drainage No. 1	B	دوم Second
باز بودن زهکش شماره ۲ Opened drainage No. 2	C	سوم Third
باز بودن زهکش شماره ۳ Opened drainage No. 3	D	چهارم Fourth
باز بودن زهکش‌های شماره ۱ و ۲ Opened drainages No. 1 and 2	E	پنجم Fifth
باز بودن زهکش‌های شماره ۱ و ۳ Opened drainages No. 1 and 3	F	ششم Sixth
باز بودن زهکش‌های شماره ۲ و ۳ Opened drainages No. 2 and 3	G	هفتم Seventh
باز بودن زهکش‌های شماره ۱ و ۲ و ۳ Opened drainages No. 1, 2 and 3	H	هشتم Eighth

این بخش با هدف بیشترین انطباق بین داده‌های مشاهده‌ای حدی (بیشترین دبی نشت بر اساس حداکثر تراز سطح آب بالادست و حداقل پایین دست) و عددی از زیر بدنه سد به اجرا درآمد. یعنی تلاش شد با تغییر هدایت هیدرولیکی لایه‌ها

## نتایج و بحث

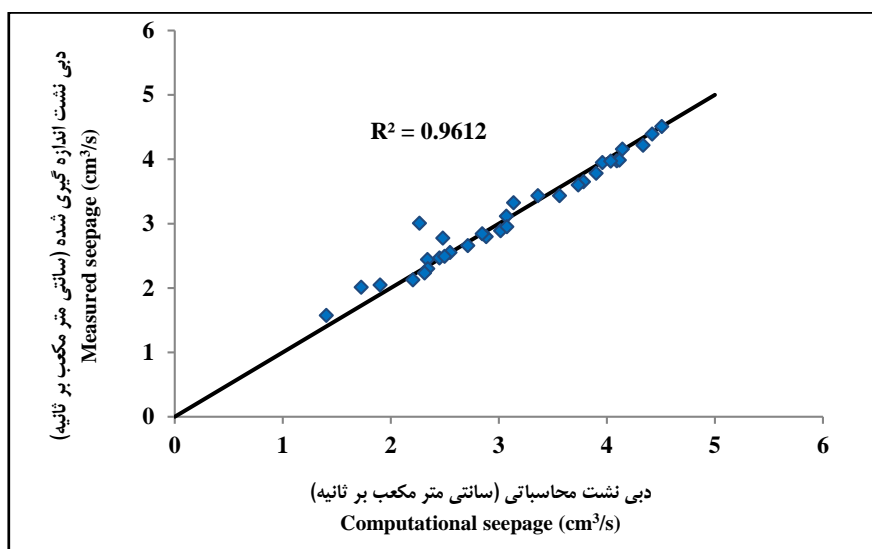
واسنجی و اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از

### نتایج آزمایشگاهی

برای واسنجی مدل عددی، نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی و مدل عددی مقایسه شدند.

۱) با استفاده از مدل عددی در قیاس با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به ضریب همبستگی بالا و تطابق داده‌ها با خط ۴۵ درجه، نتایج نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل عددی در برآورد دبی نشت در مقایسه با نتایج تجربی در شرایط متناظر است. در نتیجه می‌توان از بسته نرم‌افزاری فوق با اطمینان قابل قبولی برای برآورد زیرفشار، شیب خروجی و دبی نشت استفاده کرد.

حالتی با بیشترین انطباق نتیجه مدل عددی با مشاهده‌ای حاصل شود. برای این منظور حالتی از مدل استفاده شد که اختلاف هیدرولیکی بالادست و پایین‌دست حداکثر مقدار اختلاف را داشتند (عمق آب بالادست ۱۳/۵ و پایین‌دست ۲ سانتی‌متر). پس از واسنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی لایه‌ها، بر اساس حداکثر مقدار جریان عبوری از زیر پی، نتایج مقادیر دبی نشت بر اساس سانتی‌متر مکعب در ثانیه برای سایر آزمایش‌های صورت گرفته (طبق جدول



شکل ۲- ارزیابی مدل عددی در برآورد دبی نشت

Fig. 2- Evaluation of numerical model in seepage estimation

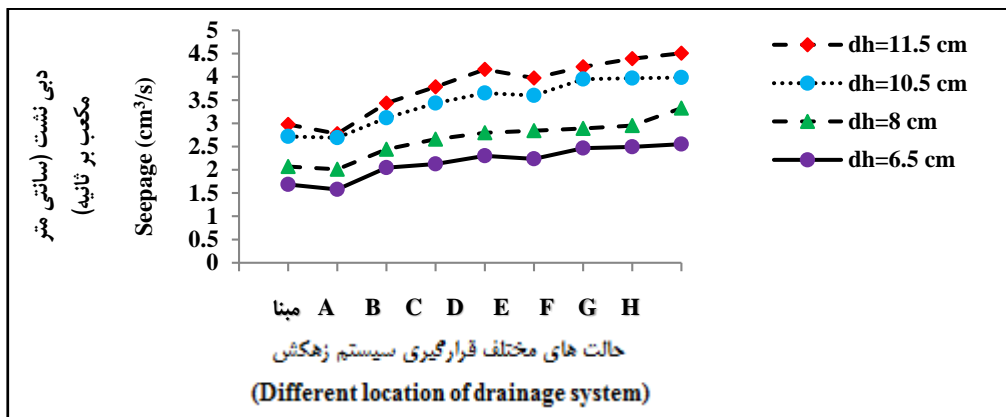
### میزان نشت و سیستم زهکشی

نتایج حاصل از آزمایش‌ها و اندازه‌گیری دبی نشت در شرایط آزمایشگاهی برای چهار بار آبی و هشت حالت قرارگیری زهکش در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی دبی نشت اندازه‌گیری شده بر حسب (سانتی‌متر مکعب بر ثانیه) و محور افقی حالت‌های مختلف قرارگیری زهکش‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش اختلاف بار هیدرولیکی و به تبع آن افزایش شیب هیدرولیکی، مقدار دبی نشت بیشتر

### تأثیر زهکش‌ها و دیواره‌های آب‌بند

به‌منظور بررسی عملکرد سیستم زهکش‌ها و سیستم دیواره‌های آب‌بند در کاهش مقدار زیرفشار و همچنین تأثیر آن بر مقدار نشت از زیر سازه تأثیر عمق نصب زهکش‌ها و فاصله دیواره‌ها به‌همراه طول آنها در مقایسه با عمق لایه نفوذناپذیر، بر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه تأثیر هر سیستم بر میزان دبی نشت، نیروی زیرفشار و گرادیان جریان ارائه شده است.

شده که این حقیقت تأیید صحت آزمایش‌هاست. علاوه بر این مقایسه میزان نشت ثبت شده بر اساس عملکرد زهکش‌های نصب شده به صورت منفرد، نشان‌دهنده افزایش دبی نشت با زیاد شدن عمق نصب است. همچنین در حالت عملکرد توأم دو زهکش، هرچه عمق متوسط دو زهکش بیشتر باشد، میزان دبی نشت بیشتر خواهد بود. به طوری که بیشترین میزان نشت به ترتیب در حالت‌های زهکش دو و سه، زهکش یک و سه و زهکش یک و دو اتفاق افتاده است.



شکل ۳ - مقایسه دبی نشت اندازه‌گیری شده برای چهار بار آبی و هشت حالت مختلف قرارگیری سیستم زهکش

Fig. 3- Comparison of seepage measured for four water height and eight different positions of the drainage system

است. مقایسه حالت‌های B و C، D که مربوط به کاربرد فقط یک لوله زهکش است، با وجودی که در هر سه حالت مقدار زیر فشار تقریباً یکسان است و اختلاف زیادی مشاهده نمی‌شود، ولی کمترین فشار در حالت D حاصل شده است که مربوط به باز بودن زهکش عمیق‌تر است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که نصب یک زهکش در عمق می‌تواند تأثیر بهتری نسبت به زهکش‌های سطحی داشته باشد. طبق نمودارهای نشان داده شده، اثر این حالت در کاهش نیروی زیر فشار بر میانه پایین بدنه سد مشهودتر است. برای حالت عملکرد دو زهکش از سه زهکش (حالت‌های E، F و G) بهترین عملکرد در کاهش نیروی زیر فشار مربوط به حالت F است یعنی عملکرد همزمان بالاترین و پایین‌ترین زهکش است و کمترین تأثیر در حالت G (باز بودن هم‌زمان دو زهکش ۲ و ۳) حاصل می‌گردد. نتیجه منطقی

### زیر فشار و سیستم زهکشی

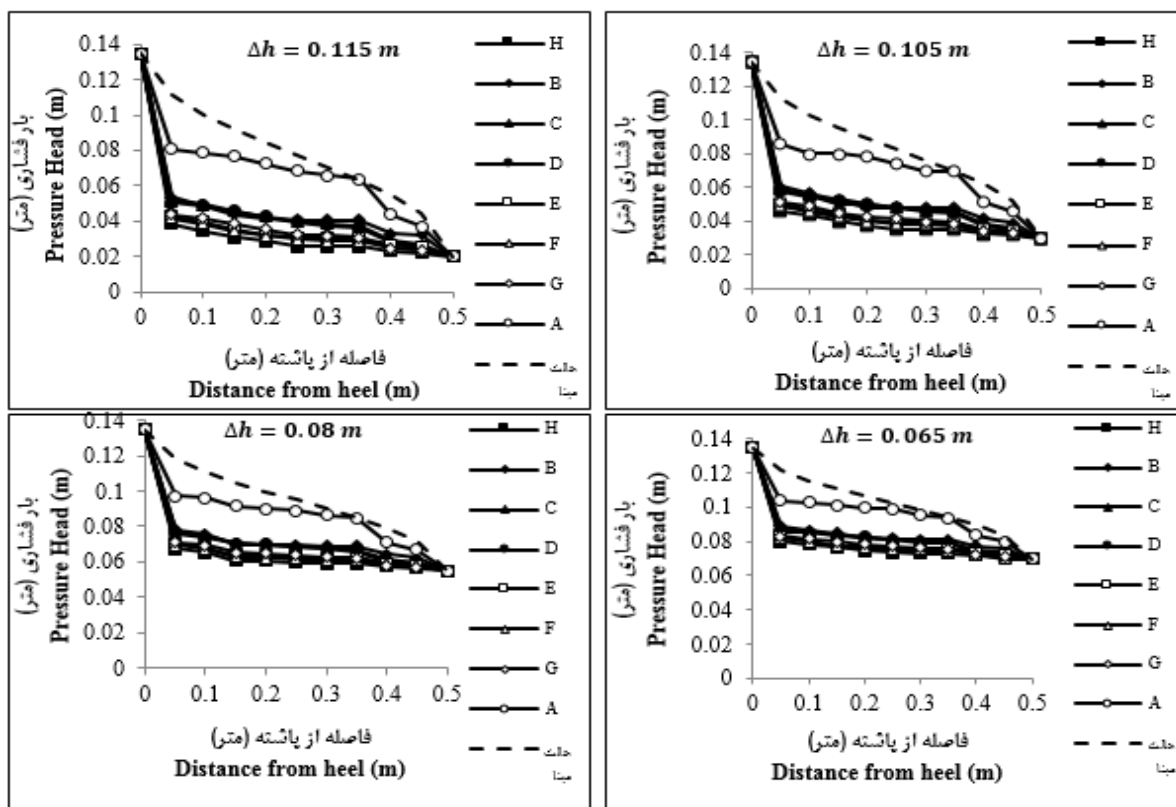
بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته برای بررسی مقدار زیر فشار حاصل از عبور جریان از زیر پی به ازای شرایط مختلف از عملکرد زهکش‌های تعبیه شده در زیر سازه، مقدار نیروی وارده در طول پی نسبت به مقادیر مختلف اختلاف بار هیدرولیکی بالادست و پایین دست مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل، محور عمودی نشان‌دهنده ارتفاع فشاری بر حسب متر آب و محور افقی نشان‌دهنده فاصله از پاشنه سد است.

با مقایسه نتایج ارائه شده در این شکل، تأثیر حالت‌های مختلف از قرارگیری زهکش در همه مقادیر  $\Delta h$  مشابه هم است، به طوری که کمترین تأثیر در کاهش مقدار زیر فشار در حالت A مشاهده شده است که وجود دیواره آب‌بند بدون زهکش



نیست. مقایسه همه حالت‌ها نشان می‌دهد که کمترین مقدار نیروی زیرفشار در حالت H اتفاق افتاده است که هر سه زهکش باز هستند و این نتیجه دور از انتظار نیست.

حاصل از این بررسی این است که تأثیر توأم دو زهکش سطحی و عمیق با فاصله بیشتر، بهتر از به‌کارگیری دو زهکش سطحی یا دو زهکش عمیق نزدیک به هم است، هرچند این اختلاف قابل توجه



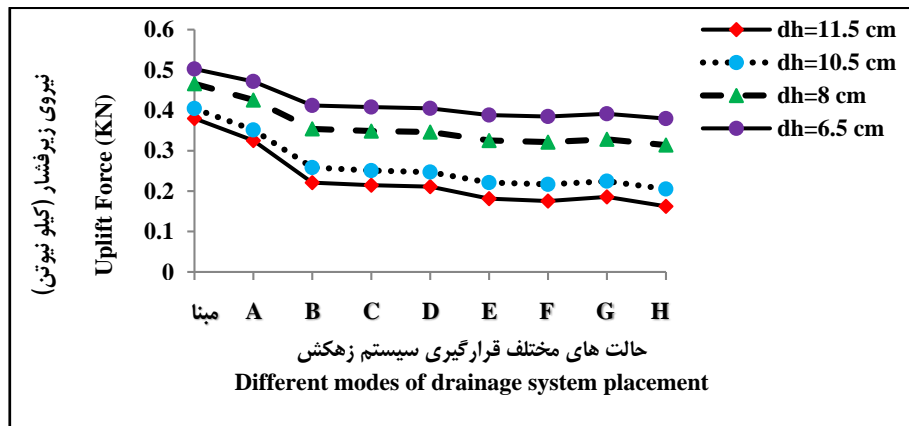
شکل ۴- مقایسه زیرفشار در طول محدوده نشت برای چهار بار آبی و هشت حالت مختلف قرارگیری سیستم زهکش

Fig. 4- Comparison of uplift in the seepage domain for four water height and eight different positions of the drainage system

هر سه زهکش) و F (باز بودن زهکش‌های تعبیه شده در اعماق ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متری زیر پی) است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که برای بیشترین اختلاف ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست  $dh=11/5$  cm مقدار نیروی زیرفشار در حالت‌های H (باز بودن هر سه زهکش)  $0.57\%$ ، B (باز بودن زهکش ۱)  $0.41/8\%$ ، C (باز بودن زهکش ۲)  $0.43/5\%$ ، D (باز بودن زهکش ۳)  $0.44/4\%$ ، E (باز بودن زهکش‌های ۱ و ۲)  $0.52\%$ ، F (باز بودن زهکش‌های ۱ و ۳)  $0.53/8\%$ ، G (باز بودن زهکش‌های ۲ و ۳)  $0.51\%$  و در حالت A (بسته بودن

برای مقایسه کمی مقدار نیروی زیرفشار در حالت‌های مختلف قرارگیری زهکش از سطح، با استفاده از قاعده انتگرال‌گیری سیمپسون مساحت مربوط به زیر هر منحنی محاسبه و در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار نیروی زیرفشار پس از حالت مبنا مربوط به حالت A (بسته بودن هر سه زهکش) و پس از آن مربوط به حالت B (باز بودن زهکش تعبیه شده در عمق ۱۰ سانتی‌متری زیر پی) و کمترین مقدار نیروی زیرفشار مربوط به حالت H (باز بودن

هر سه زهکشی) ۱۴/۳٪ نسبت به حالت مبنا کاهش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با وجود دیوارهای آب‌بند بالادست و پایین‌دست بدون وجود سیستم زهکشی مقدار نیروی زیرفشار نسبت به حالت مبنا کاهش می‌یابد. اما استفاده توأم از سیستم زهکشی و دیوارهای آب‌بند باعث کاهش بیشتر مقدار نیروی زیرفشار نسبت به حالت مبنا می‌شود.



شکل ۵ - مقایسه نیروی زیرفشار برای چهار بار آبی و هشت حالت مختلف قرارگیری سیستم زهکشی

Fig. 5- Comparison of uplift force for four water height and eight different positions of the drainage system

به کارگیری زهکشی و دیوارهای آب‌بند بر مقدار گرادیان خروجی بر اساس نتایج مدل‌های عددی کنکاش شده و نتایج به دست آمده در شکل ۶ ارائه گردیده است. در این شکل مشاهده می‌شود که کمترین مقدار گرادیان خروجی مربوط به حالت H (باز بودن هر سه زهکشی) و بعد از آن حالت G (باز بودن همزمان دو زهکشی عمیق) و بیشترین مقدار گرادیان خروجی بعد از حالت مبنا مربوط به حالت A (بسته بودن هر سه زهکشی) و بعد از آن حالت B (باز بودن بالاترین زهکشی) است. نتایج حالت‌های F (باز بودن زهکشی‌های ۱ و ۲)، G و H بسیار به هم نزدیک‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای بیشترین اختلاف ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست در حالت A (بسته بودن هر سه زهکشی) مقدار گرادیان خروجی ۴۸٪ نسبت به حالت مبنا به دلیل وجود دیوارهای آب‌بند کاهش پیدا کرده است. وجود زهکشی سبب کاهش بیشتر مقدار گرادیان خروجی نسبت به حالت مبنا می‌شود،

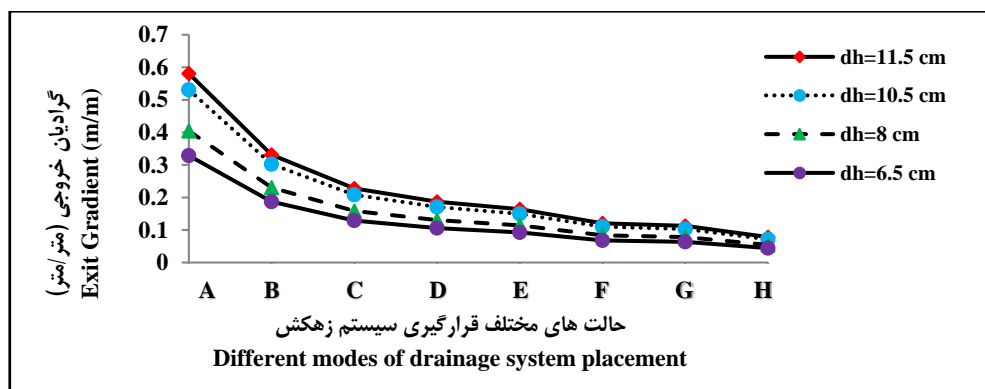
بر اساس شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که تغییر عمق زهکشی بر تغییر نیروی زیرفشار تأثیر چندانی ندارد و با افزایش عمق زهکشی نیروی زیرفشار به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌گردد که مقادیر نیروی زیرفشار در حالت‌های E (باز بودن زهکشی‌های ۱ و ۲)، F (باز بودن زهکشی‌های ۱ و ۳) و G (باز بودن زهکشی‌های ۲ و ۳) نیز بسیار به هم نزدیک‌اند. این روند برای هر چهار بار آبی مشاهده می‌شود. شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست (کاهش ارتفاع آب در پایین‌دست) مقدار نیروی زیرفشار بیشتر کاهش پیدا می‌کند.

#### گرادیان خروجی و سیستم زهکشی

گرادیان خروجی جریان عبوری از زیر سدهای بتنی و خصوصاً انحرافی ساخته شده روی بسترهای ماسه‌ای یکی از عوامل اصلی تخریب این نوع از سازه‌هاست. در این بخش از تحقیق نتایج حاصل از

مقدار گرادیان خروجی نیز بیشتر خواهد شد. نتایج تحقیق همچنین نشان می‌دهد که با افزایش عمق زهکش، مقدار گرادیان خروجی نیز کاهش پیدا می‌کند. روشن است که وجود زهکش در هر حالت و هر موقعیت مکانی و عمقی سبب کاهش مقدار گرادیان خروجی نسبت به حالت مبنا می‌شود. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که همانند دبی نشت، با افزایش اختلاف ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست مقدار گرادیان خروجی نیز افزایش پیدا می‌کند.

به‌طوری‌که در حالت‌های H (باز بودن سه زهکش) مقدار گرادیان خروجی  $0.93\%$  B (باز بودن زهکش ۱)  $0.70/5\%$  C (باز بودن زهکش ۲)  $0.79/7\%$  D (باز بودن زهکش ۳)  $0.83/3\%$  E (باز بودن زهکش‌های ۱ و ۲)  $0.85/4\%$  F (باز بودن زهکش‌های ۱ و ۳)  $0.89/3\%$  و در حالت G (باز بودن زهکش‌های ۲ و ۳)  $0.89/9\%$  نسبت به حالت مبنا کاهش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت وجود زهکش باعث کاهش بیشتر مقدار گرادیان خروجی می‌شود و علاوه بر این با افزایش تعداد زهکش‌ها، کاهش



شکل ۶ - مقایسه گرادیان خروجی محاسبه شده برای چهار بار آبی و هشت حالت مختلف قرارگیری سیستم زهکش

Fig. 6- Comparison of exit gradient calculated for four water height and eight different positions of the drainage system

یادآوری می‌شود افزایش مقدار پارامتر نسبی  $l/b$  به مفهوم دور شدن دیواره آب‌بند بالادست از دیواره آب‌بند پایین‌دست است. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، با دور شدن دیواره آب‌بند بالادست از دیواره آب‌بند پایین‌دست (افزایش پارامتر نسبی  $l/b$ ) مقدار دبی نشت کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که کمترین مقدار دبی نشت مربوط به فاصله نسبی  $l/b = 0.728$  قرارگیری دو دیواره آب‌بند در پاشنه و پنجه است. فاصله‌های نسبی  $0.428$  و  $0.328$   $l/b =$  مربوط به قرارگیری دیواره آب‌بند بالادست در قبل و بعد از زهکش است. با قرارگیری دیواره آب‌بند بالا-دست در فاصله بعد از زهکش (فاصله نسبی

## دیواره آب‌بند

به‌منظور بررسی و تعیین مکان بهینه دیواره آب‌بند بالادست با وجود سیستم زهکش از نظر کاهش دبی نشت، با استفاده از مدل عددی دیواره آب‌بند بالادست در زیر پی ناهمگن سد بتنی با طول‌های متفاوت از پاشنه به سمت دیواره آب‌بند پایین‌دست جابه‌جا گردید. نتایج این بررسی در شکل ۷ ارائه شده است. در این شکل، محور عمودی دبی نشت نسبی (دبی نشت نسبت به دبی نشت در حالت مبنا) و محور افقی فاصله نسبی (نسبت فاصله بین آب‌بندها به طول بدنه سد) است که به‌ازای طول‌های متفاوت دیواره آب‌بند بالادست بررسی گردیده است.

## نیروی زیر فشار و دیواره آب بند

برای بررسی رفتار نیروی بالابرنده وارده از طرف آب بر زیر سازه‌های آبی و سدهای بتنی در شرایط مختلف فاصله دیواره‌های آب‌بند، از نتایج تحلیل عددی استفاده شد. مقدار نیروی وارده بر پی سد به‌ازای فواصل مختلف از دیواره‌های آب‌بند نسبت به هم بررسی شد که نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است. در این شکل برای ۸ حالت مطالعه شده، مقدار نیروی وارده به‌صورت نسبی از حالتی ارائه شده که هیچ‌گونه سیستم کنترل در زیر سازه به‌کار گرفته نشده است. با توجه به شکل ۸ و نتایج حاصل از بررسی‌ها مشاهده می‌شود که کمترین مقدار نیروی زیر فشار در تمام حالت‌های مختلف قرارگیری زهکش‌ها مربوط به وضعیتی است که دیواره‌های آب‌بند بیشترین فاصله را از هم دارند ( $l/b=0/728$ ). با این حال، مقایسه حالت‌های وجود زهکش و نبود زهکش رفتار متفاوتی در مقدار نیروی وارده بر اساس فاصله دو دیواره را نشان می‌دهد. در حالت‌های C، D، G و A (بسته بودن هر سه زهکش) با دور شدن دیواره آب‌بند بالادست از دیواره آب‌بند پایین دست (افزایش پارامتر  $l/b$ )، مقدار نیروی زیر فشار مستقل از طول دیواره آب‌بند بالادست روندی کاهشی دارد.

طبق نمودارها و بر اساس انتظار، بیشترین مقدار نیروی وارده در شرایطی است که دیواره آب‌بند بالادست در نزدیک‌ترین فاصله به دیواره آب‌بند پایین دست قرار دارد. در حالت‌های B، E، F و H نیز که حالت‌های مربوط به باز بودن زهکش‌ها با الگوی متفاوت را نشان می‌دهند، هر چند روند کلی و حداقل نیروی وارده در شرایط مشابه با حالت‌های نبود زهکش یکسان است، اما نصب دیواره بالادست در پایین دست و یا بالادست زهکش در مقدار حداکثر نیروی وارده تأثیر بسزایی دارد، به‌طوری‌که

دبی نشت به‌شدت افزایش می‌یابد و بعد از آن با نزدیک شدن هرچه بیشتر دیواره آب‌بند بالادست به دیواره آب‌بند پایین دست (کاهش پارامتر  $l/b$ ) دبی نشت به مقدار بسیار اندکی افزایش پیدا می‌کند و تقریباً در مقدار ثابتی باقی می‌ماند.

در شکل ۷ همچنین مشاهده می‌شود که شدت افزایش دبی نشت با کاهش  $l/b$ ، برای طول نسبی  $dl/D=0/75$  مشهودتر است. در حالتی که دیواره آب‌بند بالادست، در بالادست زهکش قرار می‌گیرد (فاصله‌های نسبی  $0/728$  تا  $0/428$ ) افزایش طول دیواره در کاهش نشت بسیار مؤثر است، اما افزایش طول دیواره در حالتی که پس از زهکش نصب شده باشد (فاصله‌های نسبی  $0/328$  تا  $0/128$ ) تأثیری چشمگیر بر کاهش کمیت نشت ندارد. در واقع پس از زهکش‌ها تأثیر دیواره آب‌بند در کاهش میزان نشت ناچیز و مستقل از طول دیواره آب‌بند بالادست است. این روند برای تمام حالت‌های مختلف قرارگیری زهکش (به غیر از حالت A) مشاهده می‌شود. در حالت A که زهکش‌ها بسته‌اند، با دور شدن دیواره آب‌بند بالادست از دیواره آب‌بند پایین دست (افزایش پارامتر  $l/b$ ) مقدار دبی نشت کاهش پیدا می‌کند و کمترین مقدار دبی نشت در حالتی است که فاصله دو دیواره آب‌بند از هم بیشترین مقدار را دارد که مطابق با نتایج تحقیقات احمدی و همکاران (Ahmadi et al. 2010) است. در این حالت با افزایش طول دیواره آب‌بند بالادست مقدار دبی نشت کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به آنچه گفته شد، فاصله بهینه بین دو دیواره آب‌بند بالادست و پایین دست در شرایط وجود زهکش به‌منظور کاهش دبی نشت  $0/728$  برابر طول بدنه سد و نیز مکان بهینه قرارگیری دیواره بالادست همان پاشنه است.

است. در این شکل مشاهده می‌شود که کمترین مقدار گرادیان خروجی در حالتی است که دو دیواره آب‌بند دارای بیشترین و کمترین فاصله از هم باشند (فاصله‌های نسبی  $l/b=0/128$  و  $0/728$ ).

با مقایسه مقادیر گرادیان خروجی در این دو حالت مشاهده می‌شود که قرارگیری دیواره آب‌بند بالادست در پاشنه تأثیر بیشتری بر کاهش گرادیان دارد. همچنین مشاهده می‌شود که قرارگیری دیواره آب‌بند در اطراف زهکش (فاصله کمی قبل و بعد از آن) باعث می‌شود که نمودار گرادیان خروجی رفتارهای متفاوتی داشته باشد. به طوری که در بعضی از حالت‌ها همچون  $B, C, E, G$  و  $H$  برای طول نسبی  $dl/D=0/75$  مقدار گرادیان خروجی برای فاصله نسبی  $l/b=0/328$  (قرارگیری دیواره آب‌بند بعد از زهکش) به طور موضعی افزایش پیدا کرده است. در حالت  $A$  (بسته بودن سه زهکش) برای هر سه طول نسبی متفاوت دیواره آب‌بند بالادست با افزایش پارامتر بی‌بعد  $l/b$  و دور شدن دیواره آب‌بند بالادست از دیواره آب‌بند پایین دست مقدار گرادیان خروجی کاهش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه این است که در هر صورت در تمام حالت‌ها مقدار گرادیان خروجی نسبت به حالت مبنا شدیداً کاهش پیدا کرده است. همچنین مشاهده می‌شود که به غیر از مکان‌هایی که دیواره آب‌بند در فاصله کمی قبل و بعد از زهکش است و رفتارهای متفاوتی دارد، در سایر مکان‌ها افزایش طول دیواره آب‌بند بالادست سبب کاهش بیشتر گرادیان خروجی می‌شود. از این رو، مکان بهینه دیواره آب‌بند بالادست از نظر کاهش گرادیان خروجی پاشنه سد و فاصله بهینه بین دیواره‌های آب‌بند  $0/728$  برابر طول بدنه سد است. بدین ترتیب مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تحقیقات دیگر محققان مانند (Ahmadi et al.,

وقتی دیواره آب‌بند در فاصله بین دیواره آب‌بند پایینی و زهکش نصب می‌شود، مقدار نیروی زیر فشار افزایش می‌یابد و با دور شدن از دیواره پایین دست و نزدیک شدن به زهکش مقدار نیروی وارده نیز بیشتر می‌شود که این رفتار عکس حالت‌هایی است که زهکش‌ها بسته‌اند. به عبارتی دیگر، با نزدیک شدن دیواره آب‌بند بالادست به زهکش (افزایش پارامتر  $l/b$ ) ابتدا زیر فشار به بیشترین مقدار خود می‌رسد و بعد از قرارگیری دیواره آب‌بند بالادست بعد از زهکش زیر فشار روندی کاهشی دارد و در محل پاشنه به حداقل مقدار خود می‌رسد. در این حالت‌ها بیشترین مقدار نیروی زیر فشار مربوط به فاصله نسبی  $l/b=0/428$  است که در آن دیواره آب‌بند بالادست در پایین دست زهکش و در کمترین فاصله به آن قرار دارد. به غیر از حالت  $A$  در فاصله موقعیت‌های نسبی  $0/128$  و  $0/228$ ، در بقیه حالت‌ها مقدار زیر فشار نسبی به کمتر از یک رسیده و بدان معنا است که زیر فشار کمتر از زیر فشار مبنا است.

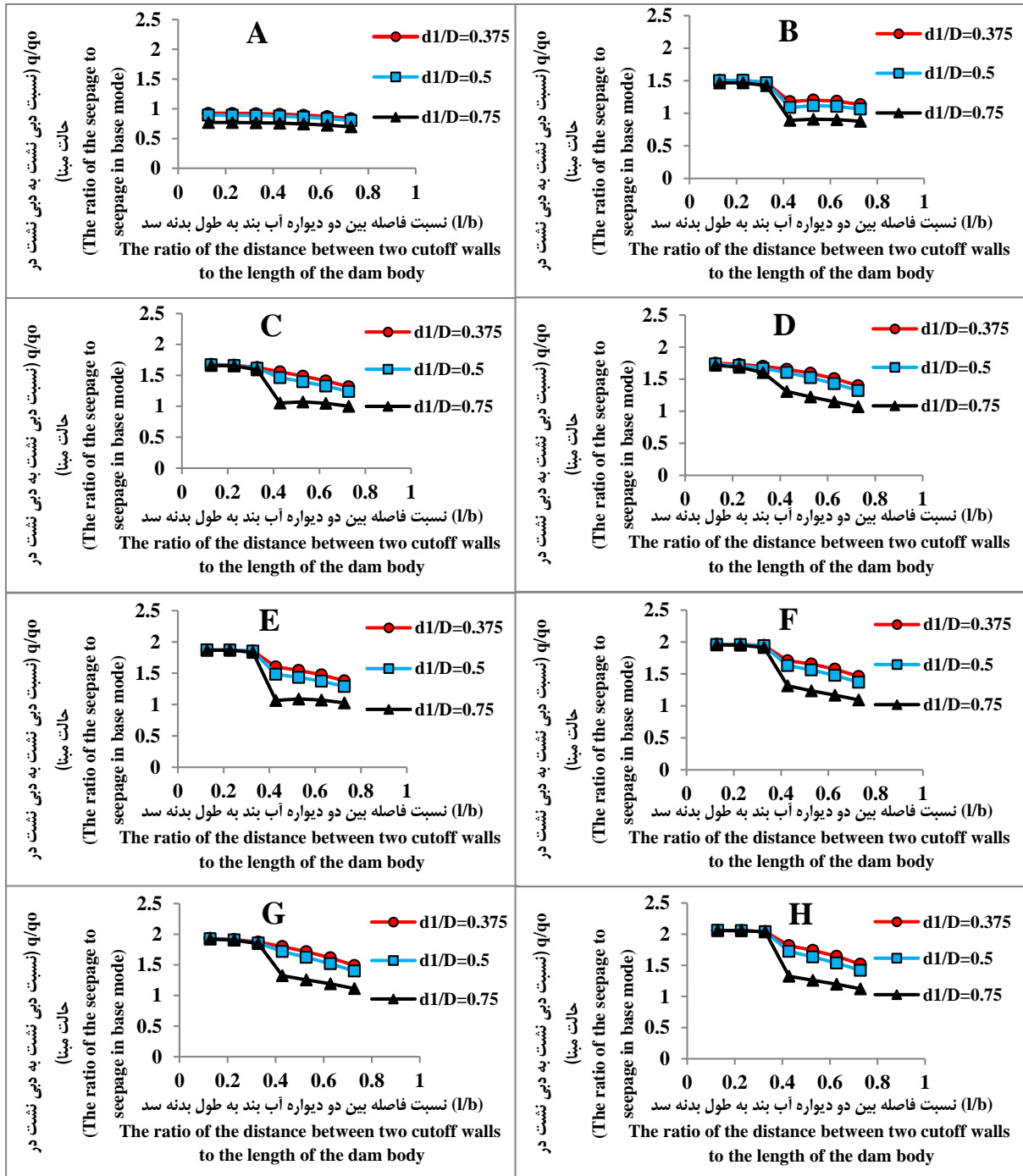
رفتار فوق در حالت‌های  $E$  و  $F$  که مربوط است به ترکیب باز بودن زهکش اول با زهکش‌های دوم و سوم، مشهودتر است. این موضوع به دلیل تأثیر زیاد زهکش اول به واسطه نزدیکی به بدنه سد است. می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تأثیر در کنترل نیروی زیر فشار مربوط به حالتی است که دیواره بالادست بیشترین طول را داشته و زهکش اول حتماً باز باشد.

### گرادیان هیدرولیکی و دیواره آب بند

در این بخش بر اساس داده‌های حاصل از تحلیل مدل عددی نتایج تغییرات گرادیان خروجی با تغییر فاصله بین دیواره‌های آب‌بند، به ازای طول‌های متفاوت دیواره آب‌بند بالادست در شکل ۹ ارائه شده

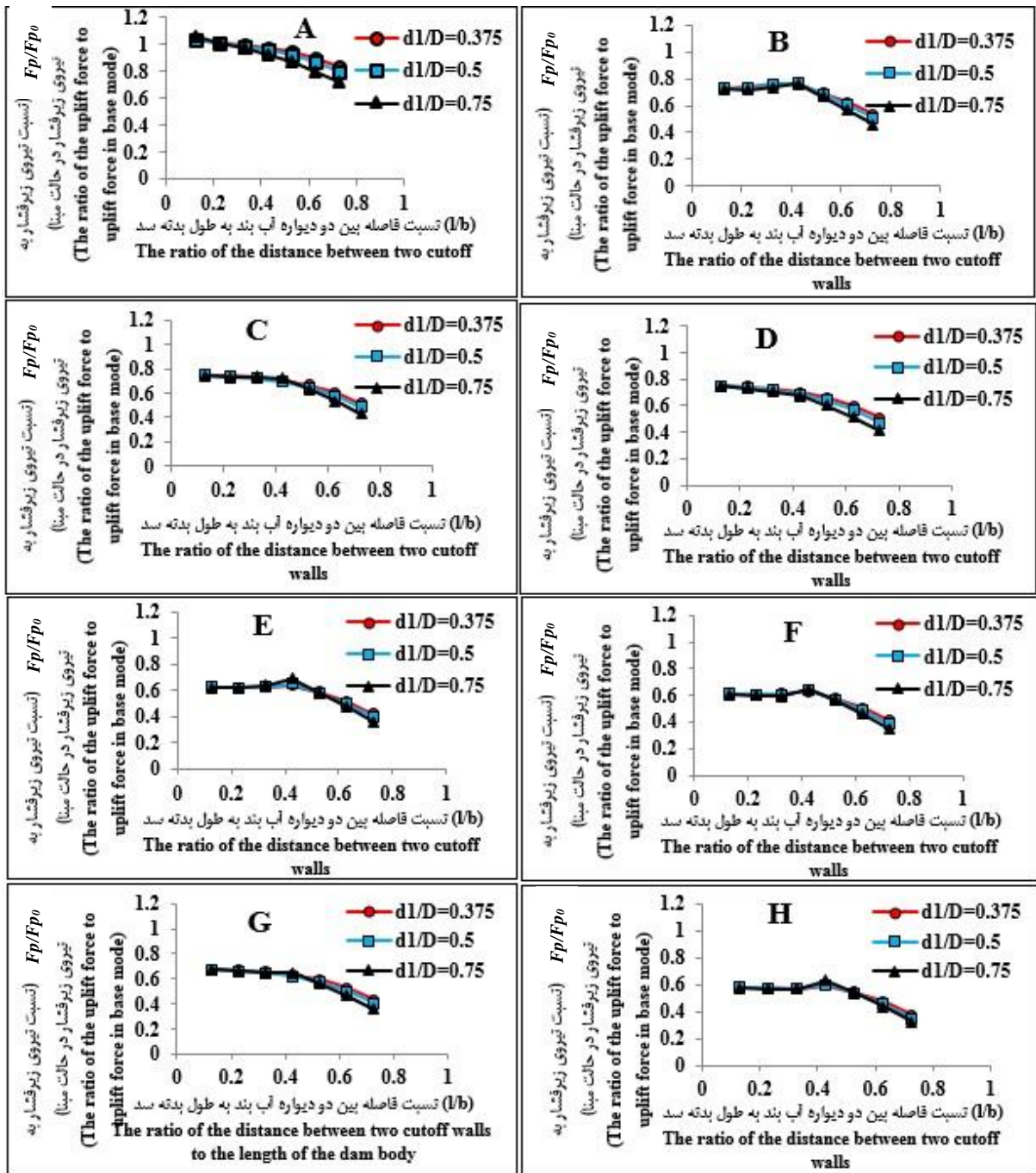
این رو، به صورت نتیجه‌گیری منطقی موقعیت بهینه زهکش و دیواره آب‌بند مستقل از شرایط لایه‌بندی و خصوصیات هیدرولیکی مصالح پی است.

(Uday and Hassan, 2011, 2011 نشان‌دهنده مطابقت این نتایج با کار این محققانی است که روی بسترهای همگن به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. از



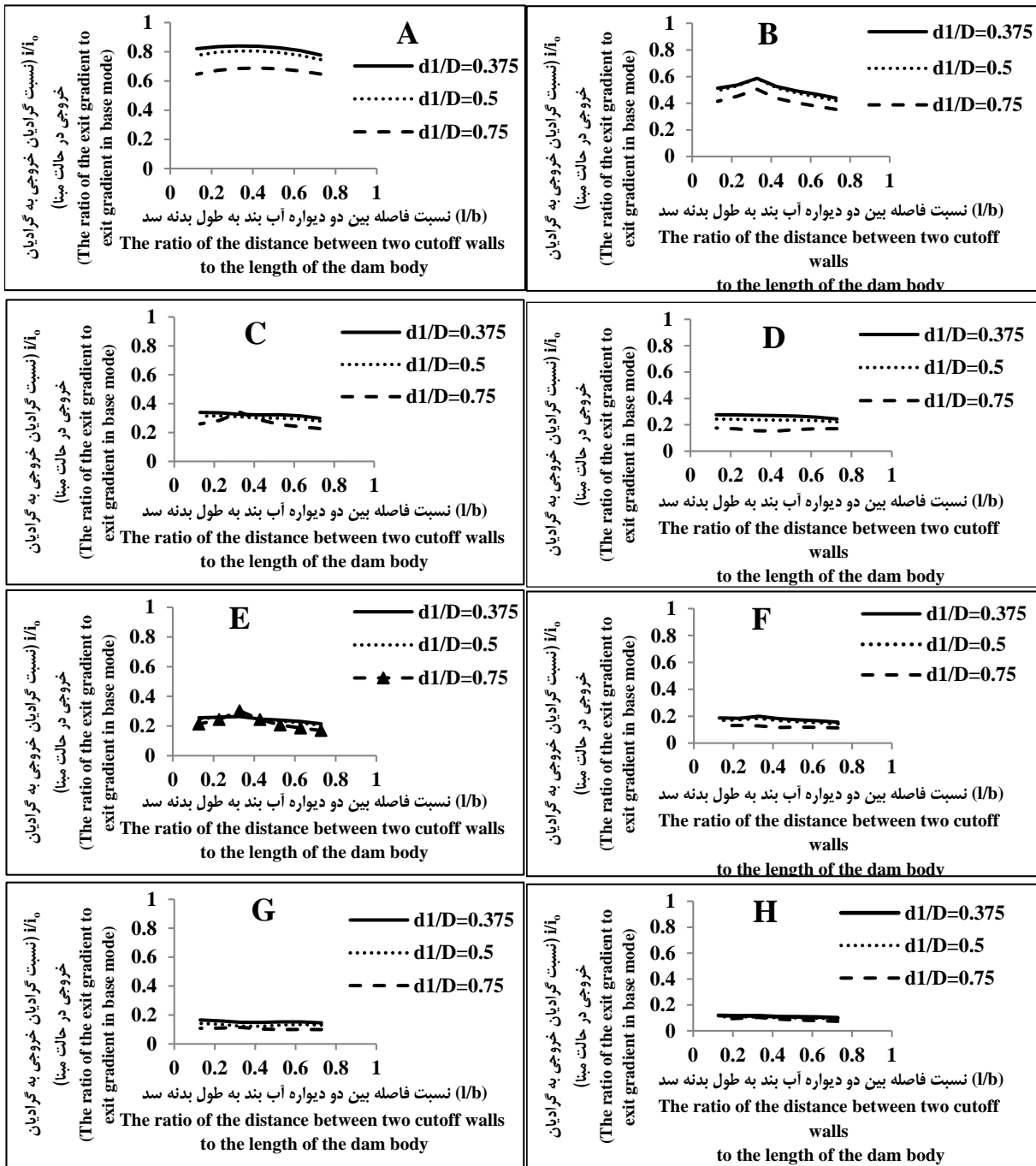
شکل ۷ - بررسی مکان بهینه دیواره آب‌بند بالادست در صورت وجود سیستم زهکش از نظر کاهش دبی نشت

Fig. 7- Checking the optimal location of the upstream cutoff wall in case of existence drainage system from the point of view of reducing seepage



شکل ۸ - بررسی مکان بهینه دیواره آب‌بند بالادست در صورت وجود سیستم زهکش از نظر کاهش نیروی زیرفشار

Fig. 8- Checking the optimal location of the upstream cutoff wall in case of existence drainage system from the point of view of reducing uplift force



شکل ۹ - بررسی مکان بهینه دیواره آب‌بند بالادست در صورت وجود سیستم زهکش از نقطه نظر کاهش گرادیان خروجی

Fig. 9- Checking the optimal location of the upstream cutoff wall in case of existence drainage system from the point of view of reducing exit gradient

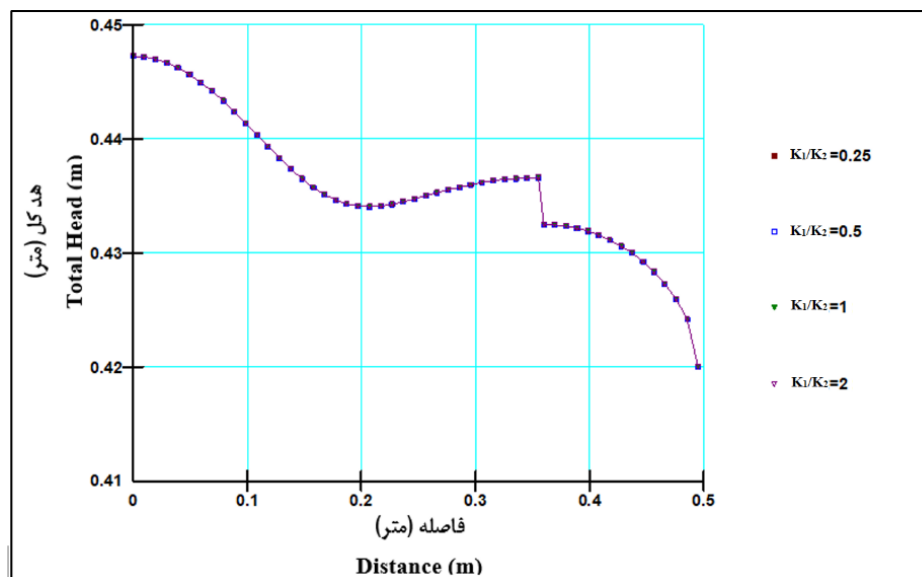
موقعیت دیواره‌های آب‌بند و موقعیت افقی و قائم زهکش نسبت هدایت هیدرولیکی لایه فوقانی به تحتانی به صورت ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ انتخاب و توزیع

تأثیر ناهمگنی پی  
به منظور بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی نسبی دو لایه مختلف مواد زیر پی، با اعمال شرایط بهینه



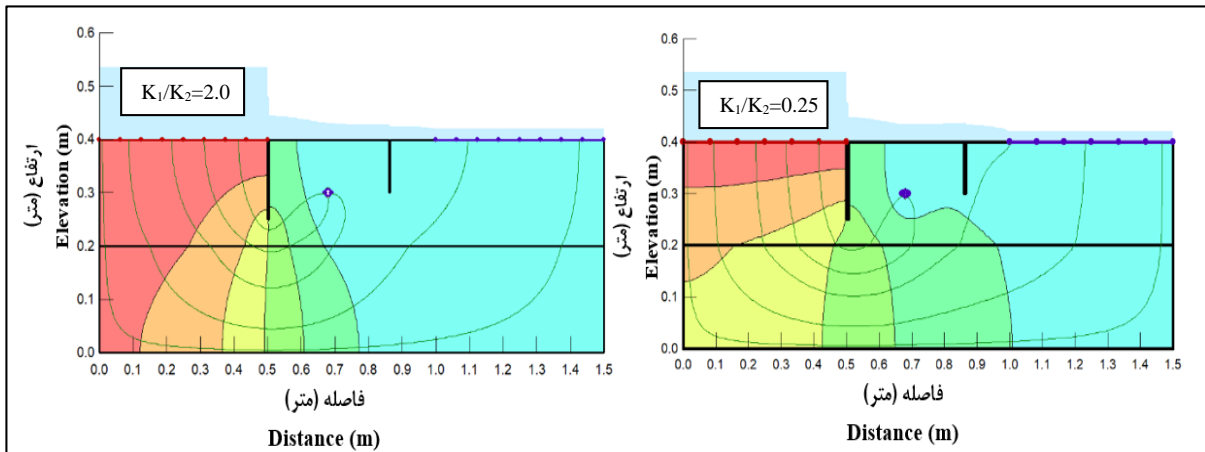
شبکه جریان و نسبت شبکه در دو ناحیه با هدایت هیدرولیکی مختلف متفاوت شود و همین امر موجب تغییر میزان دبی نشت در شرایط مختلف از نسبت-های هدایت هیدرولیکی دو لایه شود. شکل ۱۱ شبکه جریان با تعداد خط جریان و خط هم‌پتانسیل مساوی را برای دو نسبت هدایت هیدرولیکی لایه فوقانی به تحتانی ۰/۲۵ و ۲ نشان می‌دهد. برای مقایسه درست، نقطه ورودی خطوط جریان برای هر دو حالت یکسان انتخاب شده است. نکته گفتنی این است که مقدار افت انرژی در همه خطوط جریان در هر دو شکل یکسان است. شکل ۱۲ مقدار جریان عبوری از زیر پی (ورودی به زهکش و پایین‌دست) را در نسبت‌های هدایت هیدرولیکی مطالعه شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با کاهش نسبی هدایت هیدرولیکی لایه پایین مقدار نشت به عددی ثابت همگرا می‌شود. در این شکل  $Q_{II}$  مقدار دبی نشت در شرایط پی همگن با هدایت هیدرولیکی  $K_I$  است.

فشار بالا برنده بر بدنه سد برای حالتی که عمق آب در بالادست ۱۳/۵ و در پایین دست ۲ سانتی‌متر است به صورت عددی تحلیل شد. شکل ۱۰ نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. مقایسه نمودارهای توزیع فشار برای چهار نسبت مختلف از هدایت هیدرولیکی لایه فوقانی به لایه تحتانی نشان می‌دهد که تغییر هدایت هیدرولیکی لایه‌ها نسبت به هم تأثیری بر فشار بالا برنده ندارد بطوریکه برای چهار نسبت مختلف مقدار هدایت هیدرولیکی لایه بالایی به لایه پایینی نمودارها بر هم منطبق شده‌اند. البته این موضوع با اندکی تأمل قابل استنباط است، زیرا در حالت ترسیم شبکه جریان، هدایت هیدرولیکی تأثیری بر تعداد خطوط هم‌پتانسیل ندارد و فقط در محل فصل مشترک لایه‌ها در امتداد خطوط هم‌پتانسیل تغییراتی مشاهده می‌شود. با این همه، نسبت‌های مختلف هدایت هیدرولیکی علاوه بر اینکه باعث انحراف امتداد خطوط هم‌پتانسیل در فصل مشترک دو لایه می‌شود، موجب تغییر امتداد خطوط جریان نیز خواهد شد و باعث می‌شود که شکل

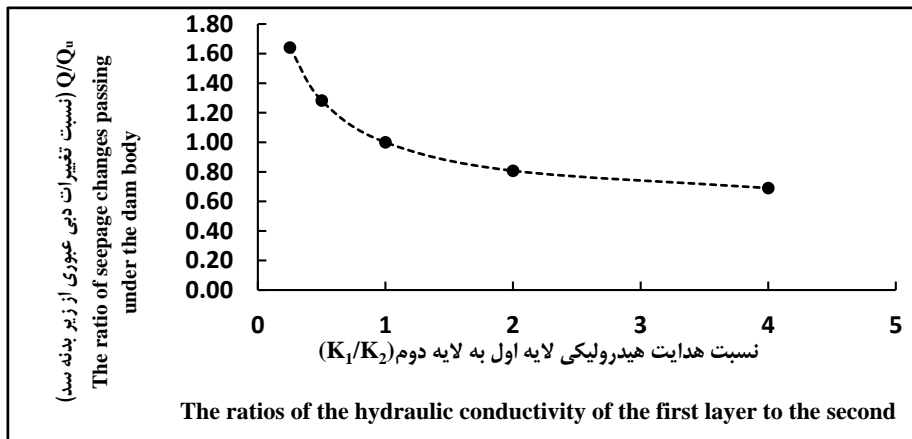


شکل ۱۰- انطباق تغییرات فشار بالا برنده در نسبت‌های مختلف هدایت هیدرولیکی لایه اول به لایه دوم

Fig. 10- Uplift pressure variation in different ratios of hydraulic conductivity of the first layer to the second



شکل ۱۱- تغییرات شبکه جریان در دو حالت مختلف از نسبت‌های هدایت هیدرولیکی لایه‌ها  
 Fig. 11- Flow net in two different conditions of hydraulic conductivity ratios of layers



شکل ۱۲- نسبت تغییرات دبی عبوری از زیر بدنه در نسبت‌های مختلف هدایت هیدرولیکی لایه اول به لایه دوم  
 Fig. 12- The ratio of the seepage variation under the body of dam in different ratios of the hydraulic conductivity of the first layer to the second

### نتیجه‌گیری

- در صورت وجود دو دیواره آب‌بند و بسته بودن زهکش‌ها، هر سه پارامتر هدف یعنی مقادیر دبی نشست، زیر فشار و گرادیان خروجی نسبت به حالت مبنا کاهش می‌یابند، اما با وجود زهکش در هر حالت مقادیر زیر فشار و گرادیان خروجی به شدت کاهش و مقدار دبی نشست نسبت به حالت مبنا افزایش پیدا می‌کند. به عبارتی، زهکش سبب افزایش مقدار دبی نشست شده است.

- افزایش عمق زهکش سبب افزایش مقدار دبی نشست و کاهش گرادیان خروجی می‌شود، اما تأثیر

در این پژوهش درجه تأثیر توأم کاربرد دیواره‌های آب‌بند و زهکش در برآورد مقادیر دبی نشست، زیر فشار و گرادیان خروجی بررسی و موقعیت بهینه هیدرولیکی آنها روی پی ناهمگن ماسه‌ای تعیین شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که:

- به صورت نتیجه‌گیری منطقی موقعیت بهینه زهکش و دیواره آب‌بند مستقل از شرایط لایه‌بندی و خصوصیات هیدرولیکی مصالح پی است. نتایج به دست آمده مشابه با نتایجی است که محققان در محیط‌های همگن به دست آورده‌اند.

و دبی نشت تأثیر چندانی نخواهد داشت. - در صورت وجود دو دیواره آب‌بند موقعیت بهینه دیواره آب‌بند بالادست در حضور زهکش در تمام حالات A تا H پاشنه سد خواهد بود که در این حالت هر سه پارامتر هدف یعنی دبی نشت، زیر فشار و گرادیان خروجی کمترین مقدار خود را دارند. از این رو فاصله بهینه بین دو دیواره آب‌بند برای کاهش هر سه پارامتر هدف  $0/728$  برابر طول بدنه سد از پاشنه خواهد بود  $(l=0/728b)$ .

چندانی بر تغییر نیروی زیر فشار ندارد. قرارگیری زهکش سطحی و عمیق می‌تواند مقدار زیر فشار را بیشتر از حالت دیگری کاهش دهد.

- قرارگیری دیواره آب‌بند بالادست بعد از زهکش سبب افزایش مقدار دبی نشت و زیر فشار نسبت به حالت مبنا می‌شود. افزایش عمق دیواره آب‌بند بالادست در فاصله قرارگیری قبل از زهکش نیز باعث کاهش مقدار دبی نشت و نیروی زیر فشار می‌گردد و قرارگیری آن بعد از زهکش بر تغییر نیروی زیر فشار

## قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه ارومیه که هزینه‌ها و زمینه اجرای این تحقیق را فراهم آوردند سپاسگزاری می‌کنند.

## مراجع

- Abolpour, B. (1994). Methods of estimating seepage, uplift pressure and exit gradient in hydraulic structures using a computer model (M. Sc. Thesis) Shiraz University, Iran. (in Persian)
- Ahmadi, H., Salimi, H., & Hemmati, M. (2018). Analysis of seepage through earth dams by using finite difference numerical method and extended pressure technique. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(72), 1-14. (in Persian)
- Ahmadi, H., Ghahremannejad, M., & Rezaverdinejad, V. (2011). *Assessment of drainage systems and seepage control walls on uplift force in diversion dams*. 3<sup>rd</sup> Irrigation and Drainage Network Management National Conference. Feb. 20. Faculty of Water Engineering. University of Chamran. Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Amiri-Tokaldani, A. (1990). Investigation of pressure on action under large dams (M. Sc. Thesis) Tehran University, Iran. (in Persian)
- Anon. (2007). Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology. GeoSlope International Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
- Azar, E., Sedghi-Asl, M., & Parvizi, M. (2014). Numerical modeling of seepage flow behavior from permeable alluvial foundations. *Journal of Applied Research in Irrigation and Drainage Structures Engineering*. 16(65), 85-100. (in Persian)
- Bligh, W. G. (1910). Dams, barrages and weirs on porous foundations. *Engineering News*, 64(26), 708-710.
- Chahar B. R. (2004). Determination of length of a horizontal drain in homogeneous earth dams. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 130(6), 530-536.
- Daghestani, T. (2018). A study on optimum layout of drainage gallery for concrete dams (M. Sc. Thesis) Ankara University, Turkey.
- Heidarzadeh, M., Mirghasemi, A. A., & Niroomand, H. (2015). Construction of relief wells under artesian flow conditions at dam toes: engineering experiences from Karkheh earth dam, Iran. *International Journal of Civil Engineering*, 13(1), 73-80.

- Obead, I. H., Al-Baghdadi, H. M., & Hamad, R. (2014). Reducing the impact of uplift pressures on the base of a concrete dam by configuration of drainage holes (hypothetical case study). *Civil and Environmental Research*, 6(1), 120-131.
- Khosla, A. N., Bose, N. K., & McKenzie, E. T. (1936). *Design of Weirs on Permeable Foundations*. Central Board of Irrigation India Pub.
- Liang, Y., Zeng, C., Wang, J. J., Liu, M. W., Yeh, T. C. J., & Zha, Y. Y. (2017a). Constant gradient erosion apparatus for appraisal of piping behavior in upward seepage flow. *Geotechnical Testing Journal*, 40(4), 630-642.
- Liang, Y., Yeh, T. C. J., Wang, J., Liu, M., Zha, Y., & Hao, Y. (2017b). An auto-adaptive moving mesh method for the numerical simulation of piping erosion. *Computers and Geotechnics*, 82, 237-248.
- Lane, E. W. (1935). Security from under seepage masonry dams on earth foundations. *Transaction of the ASCE*, 100, 1235-1272.
- Melody, B., Abrishami, J., & Akhtari, A. (2007). *Assessment of deep drainage behavior in control of uplift under concrete dams by solving of 3D seepage equations*. The 6<sup>th</sup> Conference of Iranian Hydraulics. Nov. 4. Shahrkord University, Iran. (in Persian)
- Qiao, X., Shu, L., Honglong, Z., Duopeng, W., Youzhi, J., & Xiu, X. (2018). *The design of research experiment about cohesive soil piping failure under the action of unsteady head*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 382(5), 052046.
- Poureskandar, S., Farsadizadeh, D., & Hosseinzadeh-Dalir, A. (2012). Experimental and numerical effect of grout curtain on seepage through layered base of dams. *The 11<sup>th</sup> conference of Iranian Hydraulics*. Nov. 6. Urmia University, Iran. (in Persian)
- Sayadzadeh, F., & Zomorodian, M. A. (2007). *Seepage analysis in layered soil using by finite element method*. The 6<sup>th</sup> Conference of Iranian Hydraulics. Nov. 4. Shahrkord University, Iran. (in Persian)
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., & Khaleghi, H. (2005). *Effect of vertical cutoff wall optimal position on seepage reduction and flow rate under water structures using numerical model*. The 5<sup>th</sup> Conference of Iranian Hydraulics. Nov. 12. Kerman University, Iran. (in Persian)
- Uday, A. M., & Hassan, H. M. (2016). Optimal location of drainage gallery under gravity dam by using finite element method. *International Journal of Multidisciplinary Research and Modern Education (IJMRME)*. 2(1), 611-622.
- Yaghini, A. (1998). *The optimum location of drainages under concrete dams* (M. Sc. Thesis) Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (in Persian)
- Yifeng, C., Chuangbing, Z., & Hong, Z. (2008). A numerical solution to seepage problems with complex drainage systems. *Computers and Geotechnics*, 35(3), 383-393.
- Yousefi, M., Parvizi, M., & Sedghi-Asl, M. (2016). Laboratory investigation the effects of sheet pile on seepage control and sand boiling through alluvial foundation of hydraulic structures. *AmirKabir Journal of Science and Research Civil and Environmental Engineering*. 48(3), 121-123.
- Wang, L., Liu, Z., & Zhang, Y. T. (1992). Analysis of seepage field near a drainage-holes curtain. *Journal of Hydraulic Engineering*, 12(4), 15-20.

## **Assessment of Optimal Location of Cutoff Wall with Drainage System Beneath Concrete Dams in Non-Homogenous Foundation**

**H. Ahmadi\*, N. Akbari and M. Hemmati**

\* Corresponding Author: Associate Professor, Urmia University, Urmia, Iran. Email: Hojjat.a@gmail.com, h.ahmadi@urmia.ac.ir

Received: 6 March 2019, Accepted: 22 April 2020

### **Extended abstract**

#### **Introduction**

Seepage flow through the base of hydraulic structures such as concrete dams causes different issues in these types of structures. It may cause under-scouring of foundations that are constructed in previous material like loose sands or non-cohesive soils. Additional to this, seepage flow creates uplift pressure that may destroy the whole of the structure by overturning or sliding. Therefore, engineers have been tried to reduce upward pressure created by seepage flow using different methods and techniques. Normally, applying drainage systems such as well-graded granular material, geo-materials, and artificial filters could control the moving of tiny soil particles from spaces between large particles. However, selecting of optimal location of the mentioned elements to control seepage forces as well to fix bed material under the foundation of a hydraulic structure is the main challenge for engineers and designers. Nevertheless, by using appropriate filters and drainage system moving of bed material is to be under control, this method couldn't control the harmful impacts of seepage flow singly. Since the last decades, researchers have proposed different methods to control uplift forces by using cut-off walls due to increasing seepage passway. This technic drops the hydraulic gradient of seepage flow. Employing of the relief well is another practical method to break high pore water pressure and reduce acting uplift pressure to the hydraulic structures.

Conducted studies showed that the closer the drainage systems to the toe of the dam, the lower pressure (Yaghan, 1998). Ahmadi et al, (2010) confirmed that the best location for relief well and the downstream cut-off wall is  $0.28L$  and  $0.72L$  from the toe, respectively in homogenous materials to reduce uplift pressure and seepage flow ( $L$  is the length of the dam foundation). The literature review revealed that almost all the research and studies in the field of seepage problem and uplift issues beneath concrete structure have been done under homogenous material, meanwhile, in nature, the base materials are in non-homogeneous conditions especially in the layered form with different permeability and properties. Therefore, in this research, we tried to study the effect of non-homogeneities of foundation materials in the seepage and uplift problem beneath concrete dams.

#### **Methodology**

To study the effect of drainage and cutoff wall application in concrete or diversion dams as well to determine their optimum location simultaneously, the hydraulic behavior of cutoff wall with the installed drainage system in different depth at the non-homogenous sandy foundation has

been studied experimentally and numerically. At the prepared experimental setup seepage rate and piezometric pressure under 4 different hydraulic head have been recorded using by 18 mounted piezometers. To study the various condition of non-homogeneities of foundation material as the ratio of permeability of the upper layer to the lower, seep/w a module of Geostudio as a finite element base mathematical model has been used. Calibration and validation of the mathematical model have been conducted based on observed experimental data by modifying the permeability of each layer to reach the same seepage flow rate in both model and experimental setup. The optimal location of cutoff walls also has been determined numerically. To study the under scouring phenomenon beneath the dam critical seepage gradient has been checked under different heads of water at upstream and downstream of the dam.

### **Results**

The results showed that employing a drainage system within two cutoff wall lead cause to increase in seepage flow and at the same time a significant reduction in uplift force and exit gradient in compare to the ordinary state (without drainage well). As well, increasing the depth of drainage installation makes the growth of seepage flow and dropping in the exit gradient but it does not have any effect on the uplift pressure. Also based on the achieved results, in the case of implementing two cutoff walls with drainage, the optimum location for the upper cutoff wall is exactly at the heel and the down cutoff should be installed at the distance of 0.73 lengths of foundation from the heel. In the current condition, all the three parameters as seepage flow, uplift pressure, and exit gradient take in the minimum magnitude.

### **Conclusion**

Also, assessment of the achieved results about the effect of non-homogenous material of the foundation of the dam in uplift pressure acting to the dam proved that layered strata don't have a significant effect on the pressure distribution and its magnitude. However, analyzing of flow-networks showed that the equipotential lines lean horizontally in the case of the ratio of permeability of the upper layer to the lower is smaller than one. In fact, in such cases, seepage streams lines tend to pass through the lower layer.

### **Acknowledgment**

The authors would like to express special thanks of gratitude to the vice-chancellor of research and technology of Urmia University for giving of opportunity and providing facilities to conduct this research.

**Keywords:** Cutoff Wall, Drainage, Exit Gradient, Seepage, Uplift Force