

## یادداشت فنی

بررسی تأثیر سوراخ آب بر توزیع زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی در زیر سدهای بتنی با پی  
نفوذپذیرنوید ناصحی اسکوئی<sup>۱</sup> و فرزین سلماسی<sup>\*۲</sup>

## چکیده

مدل سازی جریان نشت از زیر سازه های آبی که بر روی پی با مواد نفوذپذیر ساخته شده اند، از جمله موارد اساسی است که قبل از احداث سازه باید بررسی شود، تا از مشکلاتی مانند فرسایش مواد پی، نشست سازه و نشت آب از زیر سازه جلوگیری شود. در صورتی که در فرآیند طراحی نتوان بر مواردی مانند پدیده لوله ای شدن، کاهش نیروهای زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی و همچنین کنترل جریان نشت از زیر سازه فائق آمد، می توان از راه حل هایی کمکی مانند احداث کف بندهای افقی، دیواره های آب بند و همچنین نصب سوراخ آب استفاده کرد. در این پژوهش به بررسی تأثیر سوراخ آب روی توزیع زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی پرداخته شده است. برای این منظور معادله حاکم بر جریان نشت از محیط متخلخل به کمک روش عددی حجم کنترل برای حالت های مختلف حل شد. تمامی محاسبات توسط محیط ساده ولی قدرتمند صفحه گسترده Excel انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان می دهد استفاده از سوراخ آب در کف بند حوضچه آرامش سد می تواند از عمق دیواره های آب بند مورد نیاز بکاهد که این امر موجب صرفه جویی اقتصادی زیادی برای طرح می شود. هرچه سوراخ آب از پنجه سد فاصله پیدا کند و به پایین دست سازه منتقل شود از تأثیر مثبت آن کاسته می شود.

**واژه های کلیدی:** زیر فشار، حجم کنترل، سد انحرافی، سوراخ آب، گرادیان هیدرولیکی.

**ارجاع:** ناصحی اسکوئی ن. و سلماسی ف. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر سوراخ آب بر توزیع زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی در زیر سدهای بتنی با پی نفوذپذیر. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۱۸۱-۱۸۶.

۱- کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

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

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۰۳

## مقدمه

طراحی سدهای بتنی روی پی نفوذپذیر همواره با مشکلاتی نظیر فرسایش مواد پی، نشست و نشت آب از زیر سازه همراه است. این مشکلات از یک طرح به طرح دیگر کاملاً متفاوت بوده و در حالت کلی به نوع ذرات، لایه بندی، نفوذپذیری، همگنی و سایر مشخصات مواد تشکیل دهنده پی و همچنین ابعاد و مشخصات هندسی خود سازه بستگی دارد (سازمان عمران آمریکا<sup>۱</sup>، ۱۹۸۷). پایداری این سازه‌ها عمدتاً با جریان‌های زیرسطحی یا نشت و به دو طریق زیر، تهدید می‌شود (مودی، ۱۹۹۰):

الف) آبشستگی داخلی یا پدیده لوله‌ای شدن (Piping) که برای جلوگیری از این فرآیند احداث دیواره‌های آب‌بند و کف‌بند افقی در بالادست سد توصیه شده است.

ب) اعمال نیروی زیر فشار که با افزایش ضخامت کف‌بند افقی، استفاده از زهکش‌های لوله‌ای در زیر کف‌بند یا ایجاد سوراخ آب (Weep Hole) در کف‌بند و همچنین احداث دیواره آب‌بند می‌توان از این عمل جلوگیری کرد.

کف‌بندهای افقی که بر روی بستر رودخانه ایجاد می‌شود با افزایش طول مسیر خزش باعث کاهش زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی می‌شوند. اگر گرادیان هیدرولیکی خروجی از گرادیان هیدرولیکی بحرانی (که مقدار آن برای مواد آبرفتی تقریباً برابر ۱ است) بیشتر باشد، ذرات خاک توسط جریان آب به حرکت درمی‌آیند (مودی، ۱۹۹۰).

سوراخ آب عبارت است از یک مجرا یا لوله عمودی که از کف‌بند عبور کرده و پی را به جو متصل می‌کند و اطراف آن با یک فیلتر پوشانده می‌شود. سوراخ آب باعث کاهش زیر فشار در زیر کف‌بند شده و توزیع فشار و گرادیان هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اولین مطالعات تجربی و تحلیلی در مورد لوله‌ای شدن و تعیین نیروی زیر فشار به ترتیب توسط بلائی (۱۹۱۰)، لین (۱۹۳۵)، خوسلا (۱۹۳۶) و سپس راثو (۱۹۵۱) انجام شد (به نقل از مودی، ۱۹۹۰) در سال‌های بعد، شبکه جریان به عنوان یک روش تقریبی در محاسبه دبی نشت و توزیع فشار در محیط‌های متخلخل معرفی شد. با رواج کامپیوتر، استفاده از روش‌های عددی در حل معادلات حاکم بر مسائل مختلف از جمله جریان در محیط‌های متخلخل

مرسوم شد. از جمله این تکنیک‌ها می‌توان روش تفاضلات محدود، حجم کنترل و المان‌های محدود را نام برد.

لشسته‌نشائی و باب الحوائجی (۱۳۸۲) با مدل Mseep تأثیر عمق دیواره‌های آب‌بند و موقعیت و ابعاد زهکش را در کاهش زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی بررسی کردند. قبادیان و خدایی (۱۳۸۸) تأثیر دیواره آب‌بند و زهکش بر روی نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی را با 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 آب‌ها را به عنوان طرحی برای کاهش نیروی بالابرنده در زیر سرریز سد گرمی جای میانه ارائه کرد. صدقی اصل و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی به بررسی تأثیر عمق دیواره آب‌بند میانی و طول پتوی نفوذناپذیر، در میزان دبی نشت از زیر یک سد با پی نفوذپذیر، پرداختند. همچنین تأثیر آن‌ها را بر گرادیان خروجی و پدیده جوشش و لوله‌ای شدن بررسی کردند.

در این پژوهش با استفاده از روش حجم کنترل به بررسی توزیع زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی در زیر یک سد بتنی فرضی با پی نفوذپذیر و همچنین تأثیر ابعاد و موقعیت دیواره‌های آب‌بند و سوراخ آب، پرداخته شد. تمامی محاسبات با استفاده از محیط صفحه گسترده Excel و امکانات ساده ولی قدرتمند آن، صورت پذیرفت و سعی شده است توانایی‌های یک نرم‌افزار عمومی نظیر Excel در رفع نیاز جامعه مهندسی در حل مسائل مربوطه معرفی شود.

## مواد و روش‌ها

معادله اساسی حاکم بر حرکت جریان در محیط متخلخل را می‌توان با استفاده از معادله انتقال-پخشیدگی بدست آورد. فرم کلی این معادله به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(\phi \bar{u}) = \text{div}(D \cdot \text{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

در این رابطه عبارت  $\text{div}(\phi \bar{u})$  بیانگر انتقال و عبارت  $\text{div}(D \cdot \text{grad} \phi)$  بیانگر پخشیدگی بوده (که در آن D ضریب پخشیدگی است) و  $S_{\phi}$  نیز مقدار تخلیه یا تغذیه جانبی سیستم است (پاتانکار، ۱۹۸۰).

$$\iint_{c.v.} \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \iint_{c.v.} \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy =$$

$$\int_{x_s}^{x_e} \int_{y_s}^{y_n} \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_{x_s}^{x_e} \int_{y_s}^{y_n} \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dy dx =$$

$$\int_{y_s}^{y_n} \left[ \left( k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] dy +$$

$$\int_{x_s}^{x_e} \left[ \left( k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left( k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] dx = 0 \quad (3)$$

رابطه اخیر نیز با استفاده از روش تفاضلات محدود مرکزی به صورت زیر تقریب زده می شود:

$$k_w \frac{\phi_w - \phi_p}{\delta x_w} \delta y + k_e \frac{\phi_e - \phi_p}{\delta x_e} \delta y +$$

$$k_s \frac{\phi_s - \phi_p}{\delta y_s} \delta x + k_n \frac{\phi_n - \phi_p}{\delta y_n} \delta x = 0 \quad (4)$$

پارامترهای به کار رفته در رابطه (۴) در شکل (۱) تعریف شده اند.

سازه مورد مطالعه در این پژوهش یک سد بتنی فرضی است که ابعاد و مشخصات هندسی سد و دیواره های آب بند و سوراخ آب در شکل ۲ نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز ترکیب حالت های مورد بررسی در این پژوهش آورده شده است. پی سد با عمق متوسط و ضریب نفوذپذیری ۰/۰۰۰۱ متر بر ثانیه می باشد. همچنین ذرات تشکیل دهنده آن همگن و ایزوتروپ فرض شده است. در مرزهای AB و CD بار آبی معلوم و به ترتیب ۷ و صفر متر می باشد. مرزهای AE، DF، EF نیز مرز ناتراوا هستند. محدوده تعریف شده با گره هایی به فاصله ۰/۵ متر در امتداد قائم و افقی، مش بندی شد، که به ازای این فاصله و مقادیر کوچک تر از آن تغییرات پتانسیل هر نکته تقریباً مستقل از تعداد گره ها است. با انتخاب این فاصله، در مجموع حدود ۲۵۰۰ گره در محدوده مسئله ایجاد شد. برای حل معادله حاکم با استفاده از ابزار Calculation صفحه گسترده Excel برای هر گره یک سلول در صفحه Excel در نظر گرفته شده و مقدار بار آبی آن گره در سلول متناظر آن نوشته می شود. رابطه مورد استفاده در هر گره، با توجه به موقعیت آن و شرایط مرزی موجود، در سلول مربوط به آن نوشته می شود. محاسبات با استفاده از روش های تکراری با ۱۰۰۰۰ تکرار و محدوده خطای ۰/۰۰۰۱ انجام شده است.

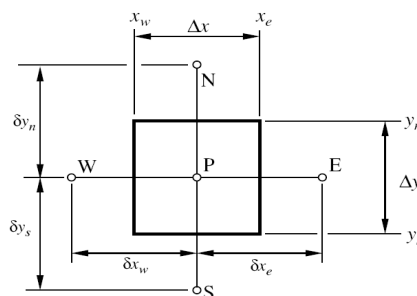
در صورتی که شرایط جریان ماندگار حاکم باشد، جمله  $\frac{\partial \phi}{\partial t}$  برابر صفر خواهد بود. از طرف دیگر با توجه به اینکه محیط مورد مطالعه در این پژوهش، محیط متخلخل خاک است و سرعت جریان آب در مواد آبرفتی رودخانه ها کم است، می توان از جمله  $div(\phi \bar{u})$  نیز صرف نظر کرد. بنابراین رابطه (۱) به معادله پخشیدگی در حالت ماندگار تبدیل می شود:

$$div(D.grad\phi) + S_\phi = 0 \quad (2)$$

گفتنی است، با فرض ایزوتروپیک و همگن بودن محیط، رابطه (۲) به معادله مشهور پواسون تبدیل می شود.

$\phi$  یک کمیت نرده ای بوده و در مسائل آب زیرزمینی بیانگر پتانسیل آب است و D نیز ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در جهت های مختلف است.

در روش حجم کنترل که جزو زیرشاخه های روش تفاضلات محدود است، برای گسسته سازی جملات معادله دیفرانسیلی با مشتقات جزئی، ابتدا باید محدوده مسئله را گره بندی کنیم. بر خلاف روش تفاضلات محدود فاصله گره ها می تواند بسته به دقت لازم، متفاوت انتخاب شود. سپس یک حجم کنترل برای هر گره (نقطه P در شکل ۱) تعریف و از معادله حاکم در این حجم کنترل انتگرال گیری می کنیم.



شکل ۱ - نقطه P به همراه حجم کنترل و نقاط مجاور آن

در این پژوهش با فرض دوبعدی بودن جریان در صفحه x-y و عدم وجود تغذیه یا تخلیه و همچنین با جایگذاری k به جای D از رابطه (۲) به نحو زیر انتگرال می گیریم:

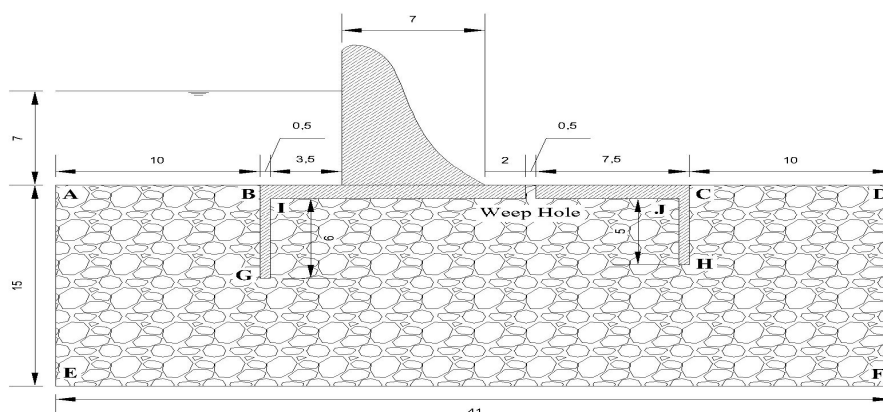
نتایج و بحث

در شکل ۳ تأثیر عمق دیواره آببند پایین دست روی توزیع زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی در سطح تماس قسمت های بتنی با مواد خاکی پی نشان داده شده است (مدل های شماره ۱ تا ۳ با توجه به جدول ۱). به طوری که مشاهده می شود با افزایش عمق دیواره آببند

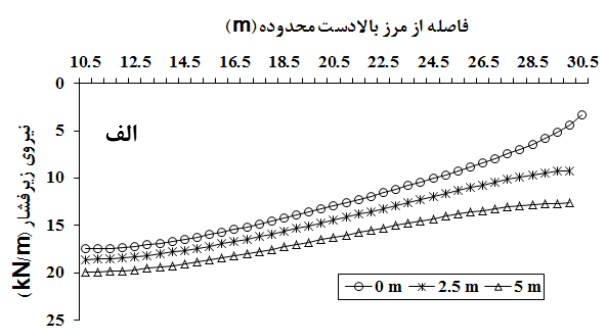
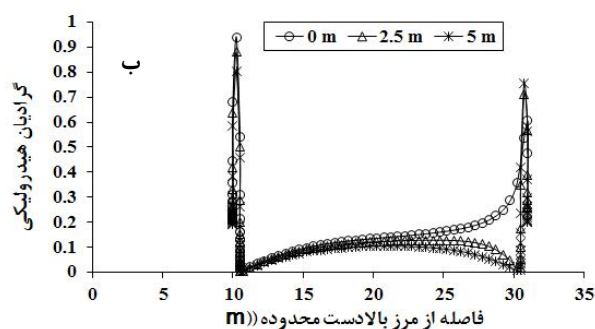
پایین دست، توزیع زیر فشار در زیر سازه به خصوص در قسمت پایین دست آن افزایش می یابد. گرادیان هیدرولیکی نیز در بالادست سازه تغییر چندانی نشان نمی دهد، اما در قسمت پایین دست با افزایش عمق دیواره آببند، گرادیان هیدرولیکی به مقدار زیادی کاهش یافته و تقریباً به صفر میل می کند.

جدول ۱- مشخصات و ابعاد مدل های بررسی شده (کلیه طول ها و فاصله ها بر حسب متر است).

شماره مدل	فاصله سوراخ آب از پاشنه سد	پایین دست عمق دیواره	بالادست عمق دیواره	طول کفبند بالادست	شماره مدل	فاصله سوراخ آب از پاشنه سد	پایین دست عمق دیواره	بالادست عمق دیواره	طول کفبند بالادست
۱ تا ۳	۰ و ۲ و ۵ و ۹	۰ و ۲/۵ و ۵	۶	۴	۱۶ تا ۱۹	-	۰	۲/۵ و ۵	۶
۴ تا ۷	۰ و ۲ و ۵ و ۹	۵	۶	۴	۲۰ تا ۲۳	۰ و ۲ و ۵ و ۹	۲/۵	۶	۴
۸ تا ۱۱	۰ و ۲ و ۵ و ۹	۲/۵	۶	۴	۲۴ تا ۲۷	۰ و ۲ و ۵ و ۹	۰/۵	۶	۴
۱۲ تا ۱۵	۰ و ۲ و ۵ و ۹	۰	۶	۴	۲۸ تا ۳۱	۰ و ۲ و ۵ و ۹	۰	۶	۴



شکل ۲- ابعاد و شرایط مرزی سد انحرافی



شکل ۳- تأثیر عمق دیواره آببند پایین دست (مدل های شماره ۱ تا ۳): (الف) توزیع زیر فشار، (ب) توزیع گرادیان هیدرولیکی

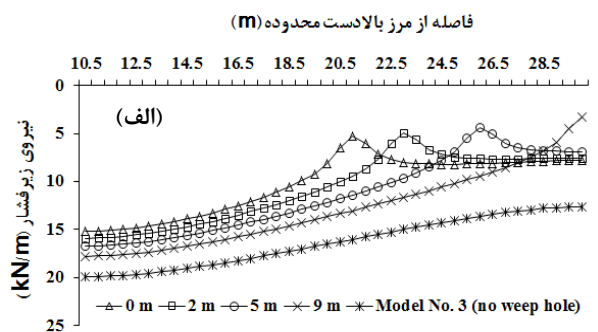
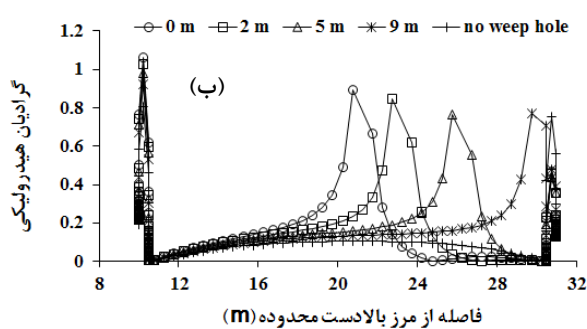
شده است که در آن  $\Delta h$  اختلاف بار آبی بین دو نقطه و  $\Delta l$  فاصله این دو نقطه از هم است.

لازم به یادآوری است که برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی در این پژوهش از رابطه  $i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$  استفاده

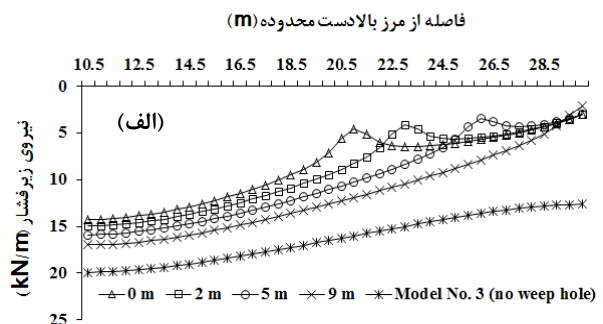
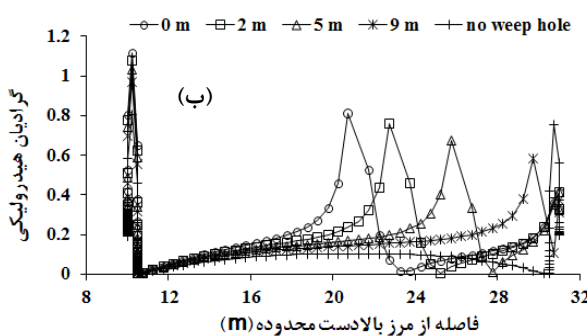
هیدرولیکی نیز در بالادست سوراخ آب تفاوت چندانی با حالت قبل ندارد اما در پایین دست سوراخ آب مقدار آن پس از یک افت ناگهانی، به تدریج به مقدار ۰/۲ میل می‌کند. برای مقایسه و آشکار شدن بهتر تأثیر سوراخ آب، نتایج مدل شماره ۳ نیز در شکل‌های ۴ و ۵ رسم شده است.

در نهایت نتایج به دست آمده از این پژوهش در مورد تأثیر توام عمق دیواره آب‌بند پایین دست و موقعیت سوراخ آب بر زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی (برای مدل‌های شماره ۱۶ تا ۳۱) با نتایج لشته‌نشائی و باب الحوائجی (۱۳۸۲) مقایسه شد. چنانکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، روند تغییرات زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی در هر دو پژوهش تقریباً مشابه است و اختلاف موجود ناشی از فرورفتگی ۱ متری سازه در پی و عدم اطلاع از طول دقیق کف‌بند بالادست مورد استفاده در پژوهش لشته‌نشائی و باب الحوائجی (۱۳۸۲) است.

در شکل ۴ تأثیر موقعیت سوراخ آب نسبت به پنجه سد، روی توزیع زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی، برای مدل‌های شماره ۴ تا ۷ نشان داده شده است. وجود سوراخ آب تأثیر بسزایی در کاهش زیر فشار در زیر سازه دارا است. زمانی که سوراخ آب دقیقاً در پنجه قرار دارد، بیشترین تأثیر را روی توزیع زیر فشار دارا است و با فاصله گرفتن از پنجه سد تأثیر آن کمتر می‌شود. همچنین وجود سوراخ آب سبب افزایش گرادیان هیدرولیکی در بالادست آن می‌شود که بیشترین مقدار این افزایش در محل سوراخ آب اتفاق می‌افتد اما در پایین دست آن گرادیان هیدرولیکی تقریباً به صفر میل می‌کند (شکل ۴-ب). این شرایط با نزدیک شدن سوراخ آب به پنجه سد دارای شدت بیشتری است. در شکل ۵ نیز تأثیر موقعیت سوراخ آب برای حالتی که دیواره آب‌بند پایین دست حذف شود (مدل‌های شماره ۱۲ تا ۱۵)، بررسی شده است. مقایسه شکل ۴-الف و ۵-الف نشان می‌دهد حذف دیواره پایین دست موجب کاهش توزیع زیر فشار در زیر سازه می‌شود. توزیع گرادیان

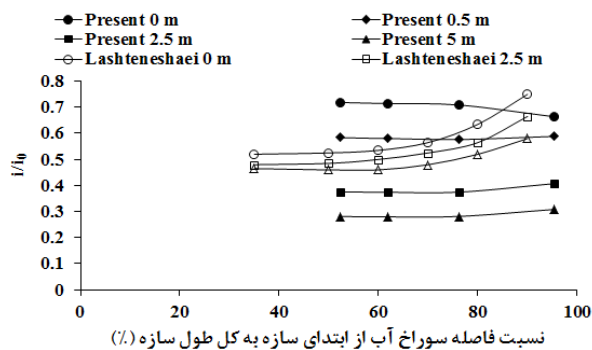


شکل ۴- تأثیر موقعیت سوراخ آب (مدل‌های شماره ۴ تا ۷): الف) توزیع زیر فشار، ب) توزیع گرادیان هیدرولیکی

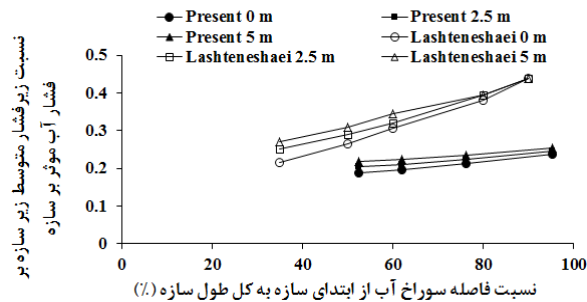


شکل ۵- تأثیر موقعیت سوراخ آب با حذف دیواره آب‌بند پایین دست (مدل‌های شماره ۱۲ تا ۱۵):

الف) توزیع زیر فشار، ب) توزیع گرادیان هیدرولیکی



شکل ۶- تأثیر توام موقعیت سوراخ آب و عمق دیواره آببند پایین دست بر زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی



### منابع

۱. فرشایف آقاجانی ح. ارائه طرحی برای کاهش فشار برکنش (Uplift) در بستر خاکی سازه سرریز سد گرمی چای میانه. ۱۳۸۸. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. تهران. ایران. ۲۴-۲۶ آذر ماه.
۲. قبادیان ر. و خدائی ک. ۱۳۸۸. تأثیر دیواره 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 صنایع کشاورزی). ۲۳(۴): ۱۶۰-۱۴۸.
۳. لشته‌نشائی م. الف. و باب‌الحوایجی س. ۱۳۸۲. طراحی بهینه پی سدهای انحرافی واقع بر مصالح نفوذپذیر. مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان. ایران. ص ۱۳۵-۱۴۱.
4. Modi P. N. 1990. Irrigation water resources and water power engineering. Standard Book House. Delhi. pp. 180-189.
5. Patankar S. V. 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere. Washington D.C. pp. 96-100.
6. Sedghi-Asl M. Rahaimi H. and Khaleghi H. 2010. Experimental analysis of seepage flow under coastal dikes. Experimental Techniques. 34(4): 49-54.
7. USBR. 1987. Design of small dams. Water Resources Technical Publication. Washington D.C. 334-335.

گفتنی است برای سهولت استفاده از این کردارها در مطالعات دیگر، مقدار زیر فشار متوسط در زیر سازه با تقسیم آن بر  $H\gamma$  (اختلاف بارآبی بالادست و پایین دست سازه) بی‌بعد شده است. همچنین گرادیان هیدرولیکی خروجی نیز با تقسیم بر  $i_0$  که همان گرادیان هیدرولیکی خروجی برای حالت مبنا یعنی مدل شماره ۳ است، بی‌بعد شده است.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- افزایش عمق دیواره آببند پایین دست، سبب افزایش توزیع زیر فشار و فشار بالابر کل در زیر سازه شده، ولی گرادیان هیدرولیکی خروجی را کاهش داده و تأثیر مثبت در کاهش پدیده لوله‌ای شدن دارد.
- نصب سوراخ آب سبب کاهش زیر فشار شده و هرچه محل آن به بالادست سازه یعنی ابتدای حوضچه آرامش نزدیکتر باشد، اثر آن بهتر است.
- تغییر موقعیت سوراخ آب تأثیر چندانی در گرادیان هیدرولیکی خروجی نداشته و بصورت جزئی باعث افزایش آن می‌شود.
- روند تغییرات زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی با موقعیت سوراخ آب، در این پژوهش با نتایج مطالعات لشته‌نشائی و باب‌الحوایجی (۱۳۸۲) همخوانی مناسبی دارد.