



موقعیت بهینه پرده آب بند و کف بند در کاهش فاکتورهای نشت در پی سدهای انحرافی

سید مصطفی اشرفی^۱، خلیل اژدری^{۲*}، سید حسین حسینی^۳، صمد امامقلی زاده^۴

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲

مقاله: پژوهشی

چکیده

نشت آب از پی سدهای انحرافی و اهمیت کنترل آن، همواره مورد توجه محققین بوده است. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی نشت آب و راه‌های کنترل آن پرداخته شده است. نتایج نشان داد که استفاده از کف‌بند و پرده آب بند تأثیر زیادی در کاهش دبی نشت داشته، به طوری که برای مدل کف‌بند با دو پرده آب‌بند، به ازای هد بالادست ۴۷ سانتی‌متر، مقدار دبی نشت ۶۰٪ کاهش نشان داد و وقوع پدیده جوشش را به تاخیر انداخت. بررسی‌ها نشان داد که دبی خروجی با عمق آب بالادست رابطه خطی داشت. استفاده از یک پرده آب‌بند در پی سد نیز بهترین عملکرد را در کاهش نیروی زیرفشار از خود نشان داد که حدود ۲۲٪ آن را کاهش داد. همچنین کاربرد دو پرده آب‌بند و کف‌بند علاوه بر کنترل پدیده جوشش، مقدار گردیان خروجی را به ازای هد بالادست ۷۵ سانتی‌متر تا ۰/۷۶۳ کاهش داد. اعمال مدل کف بند و پرده آب‌بند به لحاظ اقتصادی جایگزین مناسبی برای مدل کف‌بند و دو پرده آب‌بند می باشد. مدل عددی نیز مطابقت قابل قبولی با مدل آزمایشگاهی در شبیه سازی گردیان خروجی، نیروی زیرفشار و دبی نشت داشت به طوری که در تمام مدل‌ها مقدار خطا کمتر از ۵٪ بود. با نزدیک تر شدن پرده آب‌بند به مرکز کف بند، شکل خط جریان در زیر کف بند همگن تر شد که نتیجه آن تغییرات یکنواخت پتانسیل در زیر کف‌بند می باشد. همچنین نتایج موجود با مدل‌های تحلیلی مختلف مقایسه شد و تئوری خوسلا بیشترین مشابهت را با نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پرده آب‌بند، دبی نشت، کف‌بند، گردیان خروجی، مدل آزمایشگاهی و عددی، نیروی زیرفشار.

^۱ دانش آموخته سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود Email: Mostafa_ashrafi15@yahoo.com

^{۲*} دانشیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود Email: azhdary2015@yahoo.com (نویسنده مسئول)

^۳ استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود Email: Sayyedhossein.hosseini@gmail.com

^۴ دانشیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود Email: S_gholizadeh517@yahoo.com



مقدمه

نشت از زیر سازه‌هایی نظیر سدها که بر روی خاک-های نفوذپذیر بنا می‌شوند، یکی از عوامل ایجاد ناپایداری در پی آن‌ها می‌باشد. این ناپایداری‌ها عمدتاً به علت توسعه نیروی زیرفشار (نیروی بالابرنده)، فرسایش تدریجی درونی مصالح پی و یا وقوع پدیده جوشش رخ می‌دهد. لذا محاسبه فشار وارده به سد، گرادیان هیدرولیکی خروجی و دبی نشت در این‌گونه سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از جمله اقداماتی که برای جلوگیری از پدیده زیرشویی، کاهش گرادیان خروجی و همچنین کاهش دبی نشت از پی سدهای انحرافی صورت می‌گیرد، احداث دیواره‌های آب‌بند و نیز کف‌بند می‌باشد. محققین مختلفی به بررسی پدیده نشت پرداخته و راهکارهای زیادی را ارائه داده‌اند. اولین بار (Bligh, 1910) تئوری طول معادل خزش را معادل مسیر خط تماس بین کف سازه و خاک فونداسیون ارائه نمود و اظهار داشت که شیب هیدرولیکی در طول مسیر ثابت و افت انرژی به صورت خطی با طول خزش تغییر می‌کند. (Lane, 1935) تئوری طول معادل را با اعمال ضریب $0/3$ به طول‌های افقی اصلاح نمود. در قوانین لین و بلای دیواره‌های با زاویه کمتر از 45 درجه به عنوان طول‌های افقی و بالاتر از 45 درجه به عنوان طول‌های قائم در نظر گرفته می‌شود. خلیلی شایان و تکلدانی (۱۳۹۱) به بررسی نیروی زیرفشار، گرادیان خروجی، دبی نشت در شرایط حضور یک دیوار سپری و بلانکت در بندهای انحرافی پرداختند و معادلات بدون بعد برای تغییرات عمق پرده آب‌بند و فاصله از مبدا ارائه نمودند همچنین قوانین لین، بلای و خوسلا را با روش عددی اجزای محدود مقایسه نموده و به این نتیجه رسیدند که روش خوسلا مقادیر حقیقی‌تری را برای برآورد نیروی زیرفشار در سازه‌های آبی ارائه می‌دهد (Pakbaz, 2009). استفاده از مدل SEEP3D به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که با ساخت

دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب 60 و 20 درصد کاهش می‌یابد. قبادیان و خدایی (۱۳۸۸) به بررسی تأثیرات دیوار آب‌بند و زهکش بر نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک با روش حجم محدود پرداختند و دیگرام‌های زیرفشار- طول سد را در زیر بند انحرافی در حضور دیوار آب‌بند منفرد، دو دیوار آب‌بند، دو دیوار آب‌بند و یک زهکش در خاک‌های همسان و غیر همسان ارائه نمودند. براساس نتایج مطالعات ایشان با احداث دیواره سپری در هر موقعیت مکانی مقدار گرادیان خروجی نسبت به شرایط عدم وجود دیواره کاهش خواهد یافت. همچنین بیشترین میزان نیروی زیرفشار و کمترین مقدار گرادیان خروجی در شرایط حضور دیواره در انتهای پایین دست سازه حاصل می‌شود. همچنین در شرایط حضور یک دیواره سپری در ابتدا و یک دیواره سپری در انتهای سازه وجود یک زهکش در حد فاصل آن‌ها، هرچه زهکش در فاصله بیشتری از پاشنه احداث شود، کاهش در نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی بیشتر است. صدقی اصل و همکاران (۱۳۸۴) اثر موقعیت بهینه پرده آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی را با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار دادند و موقعیت بهینه دو پرده آب‌بند و زهکش را در زیر سد نشان داده و روابطی برای نسبت دبی نشت در حالت وجود دیوار آب‌بند به عدم حضور آن ارائه نمودند. (Sedghi-asl et al., 2010) اثرات روش‌های مختلف کنترل نشت در زیر دایک‌های ساحلی را با بهره‌گیری از یک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. ایشان طول بهینه بلانکت و عمق بهینه دیواره‌های سپری را به گونه‌ای ارائه کردند که مقدار نیروی زیرفشار وارد بر دایک حداقل گردد. ایشان نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی را با نتایج حاصل از تئوری‌های بلای و لین در شرایط متناظر قیاس نموده و نتیجه گرفتند روش لین مقدار نیروی زیرفشار و احتمال بروز پدیده جوشش را کمتر از روش بلای برآورد می‌کند. عابدی کوپایی (۱۳۷۰) در یک مطالعه موردی توزیع فشار بالابرنده را

حدود ۳۵٪ کاهش می‌دهد. علی‌رغم تحقیق‌های انجام شده با توجه به اهمیت مسئله نیاز به تحقیق‌های جامع-تر ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی عملکرد کف‌بند و پرده آب‌بند در کاهش نشست، نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی بررسی شد و هدف ارائه موقعیت بهینه و تعیین اقتصادی‌ترین ترکیب کف‌بند و پرده آب‌بند با استفاده از قابلیت‌های مدل عددی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. مدل آزمایشگاهی مخزن نشست و زهکش به طول ۲۰۰ سانتی‌متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر و با ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر از جنس پلکسی به ضخامت ۱ سانتی‌متر می‌باشد. بر روی دستگاه سوراخ‌هایی به فواصل ۱۱ سانتی‌متر در ۵ ردیف ۱۵ تایی موجود است که در مجموع در تعداد ۷۵ پیژومتر روی این دستگاه می‌باشد (شکل ۱). نمونه خاک از جنس ماسه بادی به عمق ۳۸ سانتی‌متر است که دانه‌بندی آن در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد و همچنین به منظور به دست آوردن ضریب هدایت هیدرولیکی، آزمایش بار ثابت در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی انجام گردید و نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): ویژه‌گی‌های خاک مورد آزمایش

مقدار	خصوصیت
0.3 mm	اندازه متوسط ذرات (d ₅₀)
0.0000758 m/s	هدایت هیدرولیکی (K)
3.023	ضریب یکنواختی (C _u)
1.292	ضریب انحنای (C _c)

به کمک چهار روش تئوری لین، بلای و خوسلا و روش عددی تفاضل محدود محاسبه کرد. او بیان کرد که مقدار فشار بالابرنده تخمین زده شده توسط تئوری لین و بلای از تئوری خوسلا و روش تفاضل محدود کمتر است. ابول‌پور (۱۳۷۳) مدلی را پیشنهاد کرد که زیرفشار وارد بر سازه‌های هیدرولیکی را با چند روش متفاوت محاسبه می‌کرد، مدل فوق در محاسبه زیرفشار و زیرشویی از روش‌های لین، بلای، خوسلا و شبکه جریان استفاده کرده و میزان خطای بدست آمده در مقایسه با داده‌های پیژومتری سد درودزن حدود ۴ درصد بود. Benmebarek et al (2013). به بررسی مسئله نشست آب در مجاورت سد موقت در زمان حفاری به دلیل وجود ارتفاع آب در محیط پرداختند. از نظر آنها زمانی که اختلاف ارتفاع آب بالادست و پایین‌دست زیاد باشد، گسیختگی در مجاورت سد موقت رخ می‌دهد. آنها به وسیله نرم افزار FLAC ارتفاع آب بالادست بحرانی را در حالات مختلف ژئوتکنیکی ماسه برای دیواره آب‌بند طره‌ای تعیین نمودند. Mansuri et al (2014) تاثیر موقعیت و زاویه پرده آب‌بند را در کاهش نیروی زیرفشار بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه‌دار کردن پرده آب‌بند در بالادست سد انحرافی نسبت به راستای قائم تاثیر زیادی در کاهش نیروی زیرفشار دارد. Zainal (2011) تاثیر پرده آب‌بند را بر روی نشست از ریز سدها بررسی کرد و نتیجه گرفت که بهترین زاویه برای کاهش دبی نشست، نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی به ترتیب ۶۰، ۱۲۰ و ۱۲۵ درجه است. Ahmad (2011) تاثیر شکل‌های مختلف شمع صفحه‌ای را در کاهش نیروی زیرفشار، جریان نشست و گرادیان خروجی بررسی کرد و ساخت یک هسته رسی (خاکی با نفوذپذیری پایین) را در لبه داخلی خاکریز برای این منظور پیشنهاد داد. Jafarieh and Ghannad (2014) تاثیر زیرفشار فونداسیون را بر روی عکس‌العمل الاستیک سیستم خاک و سازه بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حالت کلی نیروی زیرفشار فونداسیون وقوع رانش را سازه‌های ضعیف که بر روی خاک نرم قرار دارند در

شکل (۱): مدل آزمایشگاهی و موقعیت پیژومترها، الف)
طرح شماتیک مدل، ب) تصویر مدل

مدل عددی

حرکت آب در خاک در یک محیط مبتنی بر قانون داری و به صورت معادله ۱ می باشد

$$V_i = -k_i \frac{\partial h}{\partial i} \quad (1)$$

که در آن i جهت های اصلی (x, y, z) ، V_i سرعت جریان در جهت i ، k_i هدایت هیدرولیکی در جهت i و $\frac{\partial h}{\partial i}$ گرادیان هیدرولیکی در جهت i می باشد.

با نوشتن اصل بقای جرم برای یک توده مشخص و با توجه به قانون داری نهایتاً معادله حرکت آب در خاک به نام معادله ریچاردز به دست می آید که شبیه سازی عددی توسط مدل SEEP/W براساس این معادله می باشد. در این تحقیق شبیه سازی در حالت دو بعدی، شرایط جریان ماندگار و بدون جریان جانبی (تغذیه یا تخلیه) می باشد و نهایتاً معادله ریچاردز به صورت معادله ۲ ساده خواهد شد.

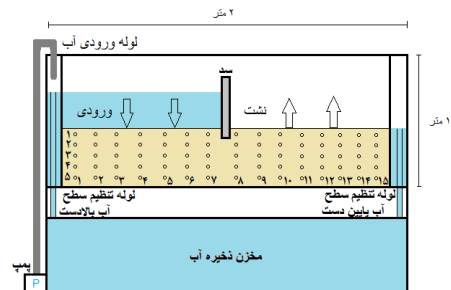
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

برای محیط های همگن و ایزوتروپ $(k = k_x = k_y)$ معادله ۲ به ۳ تبدیل خواهد شد که به آن معادله لاپلاس گفته می شود (ابن جلال و شفاعی بجزستان، ۱۳۸۹).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

هرچند که قانون داری هنوز هم اعتبار خویش را در تجزیه و تحلیل جریان آب زیرزمینی حفظ نموده، اما به نوبه خود دارای محدودیت هایی است که از جمله آن می توان به عدم کارایی این قانون در جریان

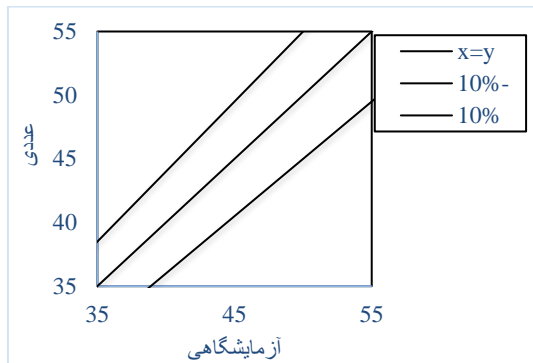
برای ساخت بدنه سد از پلکسی گلاس با قطر ۳ سانتی متر، ارتفاع ۴۰ سانتی متر و عرض ۵۰ سانتی متر و کف بند و پرده آب بند نیز از پلکسی گلاس به ضخامت ۰/۳ سانتی متر استفاده گردید. در آزمایش ها عمق پایین دست ۳۸ سانتی متر و عمق بالادست برای هدهای ۴۲، ۴۷، ۵۲، ۵۷، ۶۲، ۶۷، ۷۲ و ۷۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. میزان عمق آب را با فاصله زمانی هر ۳ دقیقه به اندازه ۱ سانتی متر بالا برده تا زمانی که به حد مد نظر برای قرائت برسد، در این بازه زمانی پیژومترهای بحرانی که در زیر سد قرار داشتند مشاهده و قرائت شدند و احتمال وقوع پدیده جوشش بررسی گردید. هد آب را تا زمانی بالا بردیم تا لحظه وقوع جوشش مشاهده شود و پس از مشاهده آن سطح آبی که در آن جوشش اتفاق افتاد تعیین گردید و همچنین پیژومترهای بحرانی نیز قرائت شدند. دبی نشت خروجی نیز به روش حجمی اندازه گیری شد. تمامی قرائت های عمق آب بالادست، پایین دست و همچنین قرائت پیژومترها از سطح مبنای کف دستگاه تانک نشت صورت گرفت.



(الف)



(ب)



شکل (۳): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی فشار پیزومتری

گرادیان خروجی

مقادیر گرادیان خروجی در مدل‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که در مدل شاهد با توجه به طول کوتاه خط جریان نهایتاً به ازای عمق بالادست ۵۴/۵ سانتی‌متر مقدار گرادیان خروجی از گرادیان بحرانی بیشتر شده و تخریب در زیر پی سد اتفاق افتاد. با کاربرد کف بند در پایین دست سد، طول خط جریان افزایش می‌یابد بدین ترتیب افت انرژی افزایش یافته در نتیجه پدیده‌ی جوشش در هد بالاتر و حدود ۷۰ سانتی‌متر برای بالادست اتفاق افتاد. خروجی مدل عددی برای تغییرات گرادیان خروجی در پی سد مطابق شکل ۴ می‌باشد. در ابتدای کف بند گرادیان خروجی به دلیل حرکت آب به سمت پایین منفی است سپس در طول مسیر کف بند گرادیان خروجی صفر می‌شود و هنگامی که به پی سد می‌رسد میزان گرادیان خروجی دوباره منفی می‌شود و بعد از پی سد گرادیان خروجی یکباره زیاد می‌شود در هد ۶۱ سانتی‌متر به حدود ۱/۱ می‌رسد و همین امر سبب جوشش و تخریب در این هد می‌شود. تغییرات در داخل پی و در محل کف بند نشان می‌دهد که کاهش گرادیان در زیر کف بند و انتهای کف بند در قسمت خروجی نسبت به مدل شاهد بیشتر است، به طوری که مقدار گرادیان خروجی در انتهای کف بند، حدود ۰/۹۵ بود. کاربرد کف بند در بالادست و مقایسه نتایج آن با کف بند پایین دست نشان داد که کاربرد کف بند در پایین دست، تأثیر بیشتری در کنترل خط

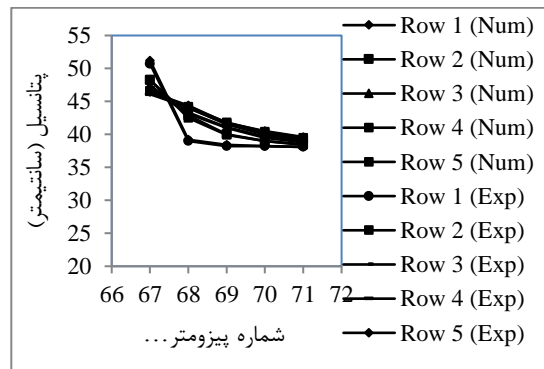
با سرعت‌های زیاد و جریان‌های پایا اشاره نمود، از این رو اهمیت مدل‌سازی فیزیکی و آزمایشگاهی بیش از پیش مشخص خواهد بود.

نتایج و بحث

در این قسمت نتایج مدل‌های آزمایشگاهی، عددی و روش‌های تحلیلی برای مدل‌های مختلف در سه بخش گرادیان خروجی، نیروی زیرفشار و دبی نشت ارائه شده است.

تغییرات پتانسیل

در مدل شاهد همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است مقدار پتانسیل از سمت بالادست به پایین دست روندی کاهشی دارد که این روند برای پیزومترهای پایین‌تر (ردیف ۵) خطی با شیب ثابت است و برای ردیف‌های بالاتر شیب آن تغییر می‌کند، به طوری که برای دو ردیف نزدیک به سطح کاهش پتانسیل به طور ناگهانی اتفاق می‌افتد که دلیل آن انحنای بیشتر خطوط جریان است که افت بیشتر پتانسیل را به دنبال دارد.



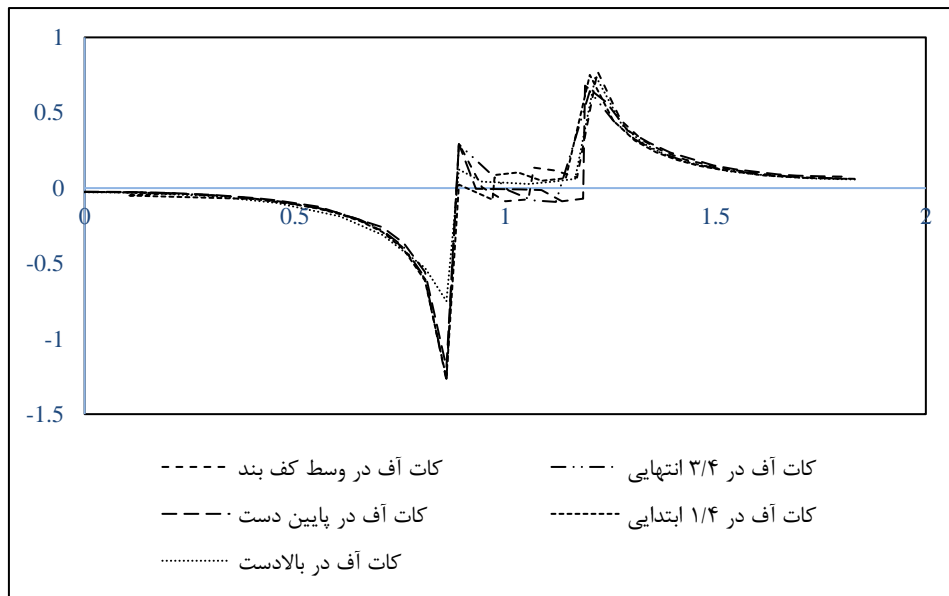
شکل (۲): تغییرات فشار در پیزومترها

همچنین مدل شاهد به کمک مدل Seep/w شبیه‌سازی شد و مقادیر فشار پیزومتری برای پیزومترهای مختلف به ازای هدهای مختلف بالادست برداشت شد و به منظور ارزیابی دقت مدل، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. بررسی نتایج نشان داد که مدل عددی با دقت قابل قبولی، مقادیر فشار پیزومتری را شبیه‌سازی می‌کند (شکل ۳).

خروجی ندارد، اما بسته به موقعیت پرده آب بند در طول کف بند مقدار و تغییرات گرادیان در زیر کف بند متفاوت خواهد بود، در شرایطی که پرده آب بند در ابتدای کف بند استفاده شده، مقدار گرادیان ورودی و گرادیان در ابتدای کف بند حداقل است و با فاصله گرفتن پرده آب بند از ابتدا مقدار گرادیان ورودی افزایش می یابد و با نزدیکتر شدن به انتهای کف بند مقدار آن افزایش می یابد. بهترین شرایط به لحاظ مقدار و تغییرات گرادیان در طول کف بند مربوط به استفاده از دو پرده آب بند یکی در ابتدا و دیگری در انتهای کف بند می باشد.

نشت دارد. به طوری که برای مدل کف بند در بالادست میزان گرادیان بحرانی در هد ۶۱ سانتی متر (لحظه وقوع جوشش) برابر با ۰/۹۵۳ بود و برای مدل کف بند در پایین دست میزان گرادیان بحرانی در هد ۷۰ سانتی متر (لحظه وقوع جوشش) برابر با ۰/۸۵۰ بود. پرده آب بند در پی سد طول خط نشت را افزایش داده و در نتیجه گرادیان هیدرولیکی را در قسمت پایین دست سد کاهش می دهد و بدین ترتیب از پدیده‌ی جوشش در عمق بالادست ۵۴/۵ سانتی متر (شاهد) جلوگیری می کند طوری که به ازای هد ماکزیمم بالادست ۷۵ سانتی متر جوشش مشاهده نشد.

همان طور که در شکل ۴ مشخص است موقعیت پرده آب بند در طول کف بند تاثیر زیادی در مقدار گرایان



شکل(۴): تغییرات گرادیان خروجی در مدل های مختلف

دست کاهش گرادیان خروجی را به دنبال داشت به طوری که به ازای هد ۷۵ سانتی متر جوشش مشاهده نشد و گرادیان خروجی در انتهای سد نیز در حدود ۰/۹ بود. به ازای هد ۷۵ سانتی متر، گرادیان هیدرولیکی بحرانی این مدل ۰/۹۴۱ بوده که در مقایسه با مدل قبلی (۰/۸۶۶) بیشتر بود. به همین دلیل، می توان کاربرد پرده آب بند در بالادست را در کنترل گرادیان خروجی مؤثرتر دانست. بررسی نتایج مدل کف بند در

برای مدل کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد با توجه به افزایش خط نشت، گرادیان خروجی کاهش یافت به طوری که به ازای هد ماکزیمم بالادست ۷۵ سانتی متر جوشش مشاهده نشد. نتایج مدل عددی نیز صحت نتایج فوق را تأیید می کند. با افزایش خط نشت در انتهای کف بند به ازای عمق ۷۵ سانتی متر مقدار گرادیان خروجی در حدود ۰/۹ شد. کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین

به گرادیان خروجی برای مدل های مختلف به ازای هد ۵۲ سانتی متر در جدول ۲ آمده است که به طور وضوح می توان عملکرد مدل ها را مورد بررسی قرار داد.

پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست و پی سد و مقایسه ی آن با سایر مدل ها نشان می دهد که مدل حاضر، بهترین عملکرد را در کنترل خط نشت و گرادیان خروجی دارد (شکل ۴). خلاصه نتایج مربوط

جدول (۲): مقادیر گرادیان خروجی برای مدل های مختلف در هد ۵۲ سانتی متر برای بالادست

گرادیان خروجی	مشخصات			
	پرده آب بند پایین دست (cm)	پرده آب بند بالادست (cm)	کف بند پایین دست (cm)	کف بند بالادست (cm)
1.14	-	-	-	-
0.588	-	-	-	30
0.371	-	-	30	-
0.472	-	7.5	-	-
0.327	-	7.5	30	-
0.353	7.5	-	30	-
0.307	7.5	7.5	30	-

$$i_{exit} = \frac{H}{\pi d \sqrt{Y}} \quad Y = \frac{1 + \sqrt{1 + \alpha^2}}{2}$$

$$\alpha = \frac{b}{d}$$

(۵)

که در این معادله H هد بالادست، d عمق پرده آب بند، b طول کف بند می باشد (Leliavsky, 1965). مقایسه مقادیر گرادیان خروجی روش عددی و تحلیلی نشان داد که روش تحلیلی خوسلا بیشترین دقت را در محاسبه گرادیان خروجی دارد به طوری که مقادیر خطای محاسباتی برای سه مدل آخر (کف بند در پایین دست و پرده آب بند در بالادست، کف بند و پرده آب بند در پایین دست، کف بند در پایین دست به همراه دو پرده آب بند) به ترتیب $۰.۱۳/۵\%$ ، ۰.۵% و $۰.۲۰/۹\%$ به دست آمد.

مقدار گرادیان خروجی مدل های مختلف با استفاده از سه روش تحلیلی بلای، لین و خوسلا محاسبه شد. در روش بلای و لین با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می شود.

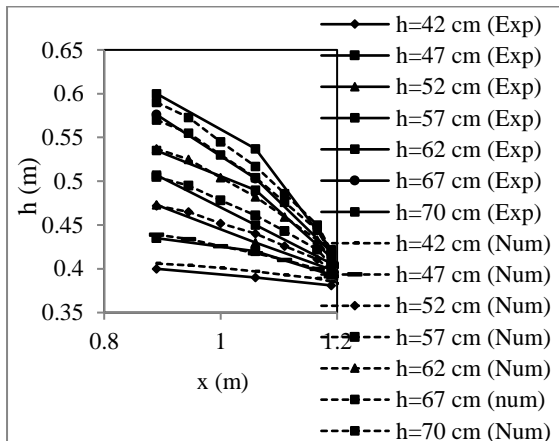
$$i_{exit} = \frac{\Delta h}{L} \quad (۴)$$

در این رابطه Δh اختلاف هد بالادست و پایین دست و L طول مسیر خزش می باشد که در روش بلای $L = L_H + L_V$ و در روش لین $L = \frac{1}{3}L_H + L_V$ که در آن L_H مجموع طول افقی و L_V مجموع طول عمودی است.

در روش خوسلا از معادله ۵ برای محاسبه گرادیان خروجی استفاده می گردد.

نیروی زیر فشار

به منظور محاسبه نیروی زیر فشار، مقدار فشار پیژومتری در پیژومترهای ردیف اول (زیر کف بند) قرائت شد. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش هد در بالادست مقدار فشار پیژومتری زیاد شده در نتیجه مقدار نیروی زیر فشار هم زیاد می‌شود. با محاسبه مساحت زیر منحنی مربوط به هد ۷۰ سانتی‌متر مقدار نیروی زیر فشار ۰/۱۵۶ متر مربع به دست آمد. همچنین با افزایش فاصله طولی مقدار فشار پیژومتری کاهش یافت و تغییرات فشار در طول برای هدهای مختلف منحنی شکل بود. شکل ۵ مقادیر آزمایشگاهی و عددی فشار پیژومتری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است نتایج آزمایشگاهی و عددی مطابقت خوبی با هم دارند.



شکل (۵): تغییرات فشار به ازای هدهای مختلف در مدل آزمایشگاهی و عددی

همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است با افزایش هد آبی بالادست، با توجه به ثابت بودن هد پایین‌دست،

تغییرات فشار در لایه نزدیک به سطح، منحنی شکل و زیاد است، در حالی که برای هدهای پایین‌تر تقریباً خطی است که دلیل این پیامد را می‌توان گرادیان هیدرولیکی بالا در هدهای بالاتر و نهایتاً افزایش سرعت و افت بیشتر پتانسیل دانست که برای هدهای پایین‌تر متناسب با کاهش گرادیان و سرعت، افت کاهش یافته و شیب خط بستر ملایم شد.

در محاسبه نیروی زیر فشار برای مدل کف بند در بالادست سد با افزایش هد بالادست، مقدار فشار پیژومترهای زیر کف بند افزایش یافت که به ازای هد بالادست ۶۱ سانتی‌متر، مقدار نیروی زیر فشار (مساحت زیر نمودار) ۰/۸۵۷ متر مربع به دست آمد که با مقدار نیروی زیر فشار برای مدل کف بند پایین‌دست به ازای ۷۰ سانتی‌متر برابر بود که این امر، عملکرد بهتر مدل کف بند پایین‌دست را نشان می‌دهد (شکل ۶). همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است برای مدل کف بند در پایین‌دست سد و پرده آب بند در پی سد نیز افزایش فشار پیژومترها با افزایش هد بالادست اتفاق افتاد. به ازای هد بالادست ۷۵ سانتی‌متر نیروی زیر فشار ۰/۱۵۴ مترمربع محاسبه شد که نسبت به نیروی زیر فشار به ازای هد بالادست ۴۲ سانتی‌متر به میزان ۰/۷۶۶٪ افزایش نشان داد. مقایسه نتایج مدل کف بند در پایین‌دست و پرده آب بند در پایین‌دست با مدل کف بند و پرده آب بند در پی نشان داد، کاربرد پرده آب بند در پایین‌دست تأثیری بر روی نیروی زیر فشار ندارد. همچنین نیروی زیر فشار برای هد ۷۵ سانتی‌متر برابر ۰/۱۷۲ مترمربع بود که نسبت به هد ۴۲ سانتی‌متر به میزان ۰/۶۸۶٪ افزایش داشت.

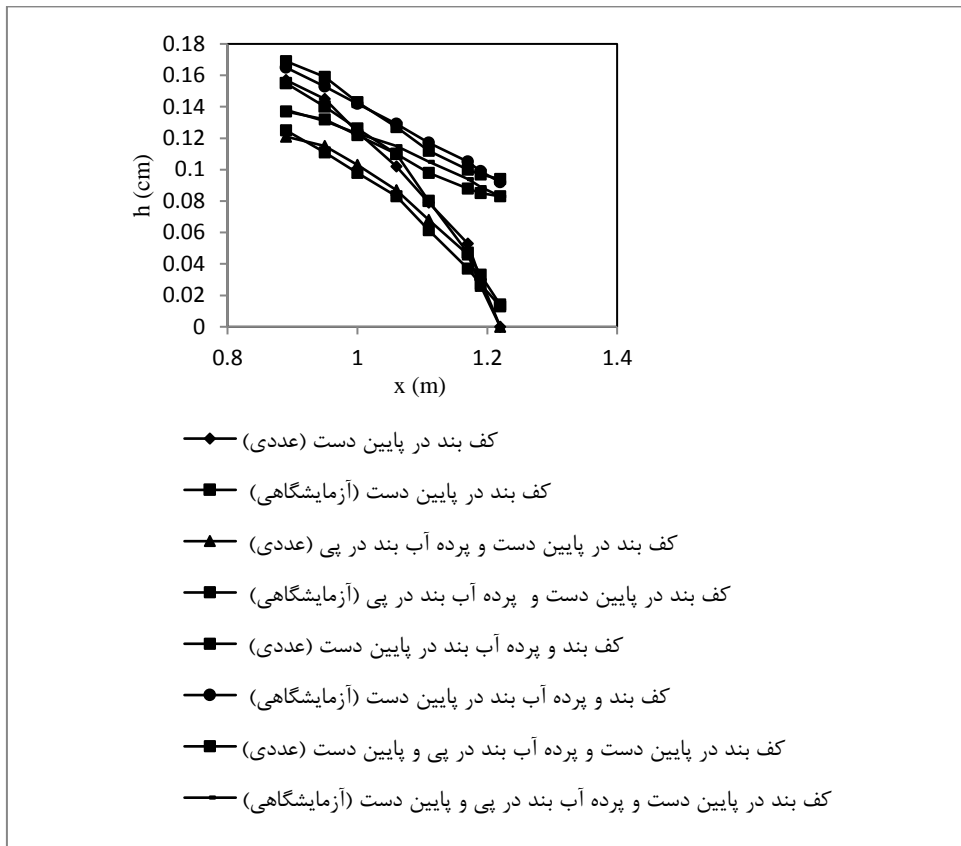
جدول (۳): مقادیر نیروی زیرفشار برای مدل های مختلف

نیروی زیرفشار (m ²)	هد بالاست (cm)	مشخصات			
		پرده آب بند پایین دست (cm)	پرده آب بند بالادست (cm)	کف بند پایین دست (cm)	کف بند بالادست (cm)
0.156	70	-	-	-	-
0.857	61	-	-	-	30
0.156	70	-	-	30	-
-	-	-	7.5	-	-
0.154	75	-	7.5	30	-
0.172	75	7.5	-	30	-
0.154	75	7.5	7.5	30	-

به شرایطی است که پرده آب بند فقط در ابتدای کف بند و در پی سد قرار دارد، زیرا مقدار فشار را بلافاصله در ابتدای کف بند کاهش داده و در انتهای آن به صفر می رسد. با جابجایی پرده آب بند در طول کف بند، تغییرات فشار قبل از آن به صورت خطی با شیب ملایم تغییر می کند و پس از پرده آب بند مقدار آن کاهش یافته، سبب روند ناهمگن و بسیار متغیر آن در طول کف بند می شود که این نوع استفاده توصیه نمی گردد. با کاربرد پرده آب بند فقط در قسمت انتها، در طول کف بند، تغییرات، خطی با شیب ملایم است به طوری - که در قسمت انتهای آن صفر نخواهد شد. استفاده از دو پرده آب بند در ابتدا و انتهای کف بند، در ابتدای آن با کاهش فشار همراه بود و در انتها مقدار فشار صفر نبود. بنابراین بهترین موقعیت پرده آب بند، ابتدای کف بند می باشد (جدول ۳).

شکل ۶ نتایج مربوط به تغییرات فشار را برای پیژومترهای ۸، ۹ و ۱۰ به ازای یک هد ثابت برای مدل - های آزمایشگاهی و عددی مختلف نشان می دهد. همان طور که در شکل ۶ مشخص است در حالتی که پرده آب بند در پی و پایین دست قرار دارد، اگر چه وجود پرده آب بند در پی سد طول خط نشت را اندکی افزایش می دهد اما وجود پرده آب بند در قسمت انتهای کف بند مانع از انحنای زیاد خط جریان در زیر کف بند می شود که منجر به افت فشار کمتر نسبت به حالتی که پرده آب بند در پی سد قرار دارد می شود، به همین دلیل نیروی زیرفشار بیشتر است. می توان نتیجه گرفت که استفاده از کف بند در انتها تاثیری در کاهش نیروی زیرفشار در زیر کف بند ندارد بلکه نسبت به مدل های بدون پرده آب بند در انتها، عملکرد بدتری را نشان می دهد.

همان طور که شکل ۶ نشان می دهد بهترین آرایش به لحاظ تغییرات مقدار فشار در طول کف بند مربوط



شکل (۶): تغییرات پتانسیل برای مدل های مختلف به ازای هد آبی بالادست یکسان

$$L = \frac{1}{3}L_H + L_V \quad \text{که در آن } L_H \text{ مجموع طول های}$$

افقی و L_V مجموع طول های عمودی است.

در روش خوسلا مقدار فشار به کمک رابطه زیر محاسبه می شود.

$$h = \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \frac{2x}{b} \quad (7)$$

که H هد بالادست، b طول کف بند و x فاصله پرده آب بند از ابتدا می باشد.

در شکل ۸ تغییرات فشار در مدل های تحلیلی، مدل آزمایشگاهی و عددی برای مدل کف بند در پایین دست همراه با پرده آب بند در ابتدا و انتها نشان داده شده است. نتایج نشان داد که نتایج روش تحلیلی خوسلا بیشترین مطابقت را با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین مقایسه روش های تحلیلی و روش عددی نشان داد که

به منظور بررسی قابلیت روش های مختلف در محاسبه تغییرات فشار و نیروی زیر فشار مقادیر آزمایشگاهی و عددی فشار با سه روش تحلیلی بالای، لین و خوسلا مقایسه شد. در محاسبه تغییرات فشار در دو روش بالای و لین از معادلات ۶ و ۷ استفاده شد.

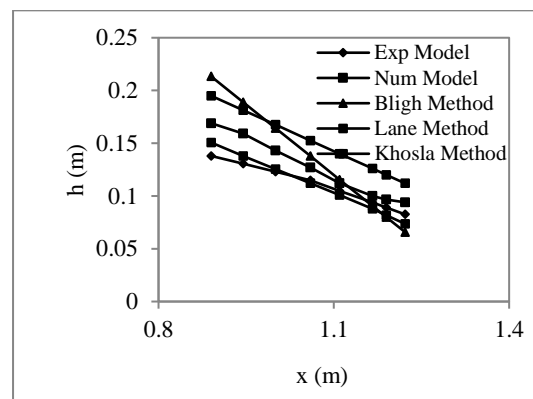
$$h_x = H - \frac{L_x}{L} \Delta h \quad (6)$$

که در آن H هد بالادست، Δh اختلاف هد بالادست و پایین دست، L_x فاصله تا نقطه مورد نظر و L تمام طول مسیر می باشد. مقدار L در روش بالای برابر است با $L = L_H + L_V$ و در روش لین برابر است با

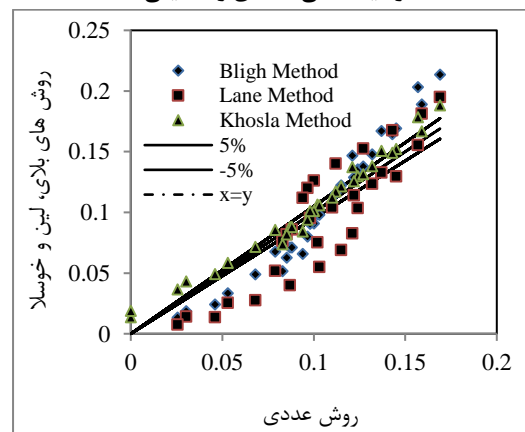
دبی نشت

در این قسمت نتایج مربوط به دبی نشت برای مدل - های مختلف در شرایط آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی ارائه می‌شود. در شکل ۱۰ تغییرات دبی جریان به ازای هدهای بالادست مختلف برای تمام مدل‌های آزمایشگاهی، ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است روند تغییرات دبی در برابر هد بالادست، تقریباً خطی می‌باشد که نشان‌دهنده حاکم بودن رابطه داری است. همچنین در مدل آزمایشگاهی یک کف‌بند در پایین‌دست و دو پرده آب‌بند در ابتدا و انتهای آن کمترین میزان نشت به دست آمد به طوری که در بهترین شرایط دبی نشت را در حدود ۶۰٪ کاهش داد. در واقع با افزایش طول خط نشت که نتیجه آن کاهش گرادیان هیدرولیکی در قسمت خروجی می‌باشد میزان دبی نشت خروجی نیز کاهش یافت. نتیجه فوق را می‌توان از مقادیر ارائه شده در جدول ۴ نیز استنباط کرد. البته همان‌طور که در شکل ۱۰ و جدول ۴ مشخص است تغییرات دبی در سه مدل کف‌بند و پرده آب‌بند در پی، کف‌بند و پرده آب‌بند در پایین‌دست و کف‌بند به همراه دو پرده آب‌بند بجز نوسانات معدود در برخی هدهای بالادست تقریباً مشابه یکدیگر است، در نتیجه می‌توان به لحاظ اقتصادی یکی از مدل‌های کف‌بند و یک پرده آب‌بند را بجای مدل کف‌بند به همراه دو پرده آب‌بند جایگزین کرد. در بین دو مدل کف‌بند و یک پرده آب‌بند نیز مدل کف‌بند و پرده آب‌بند در پی نیز نتایج بهتری را در کنترل دبی نشت داشت و مقدار دبی نشت به دست آمده از آن بسیار نزدیک به مدل کف‌بند و دو پرده آب‌بند بود.

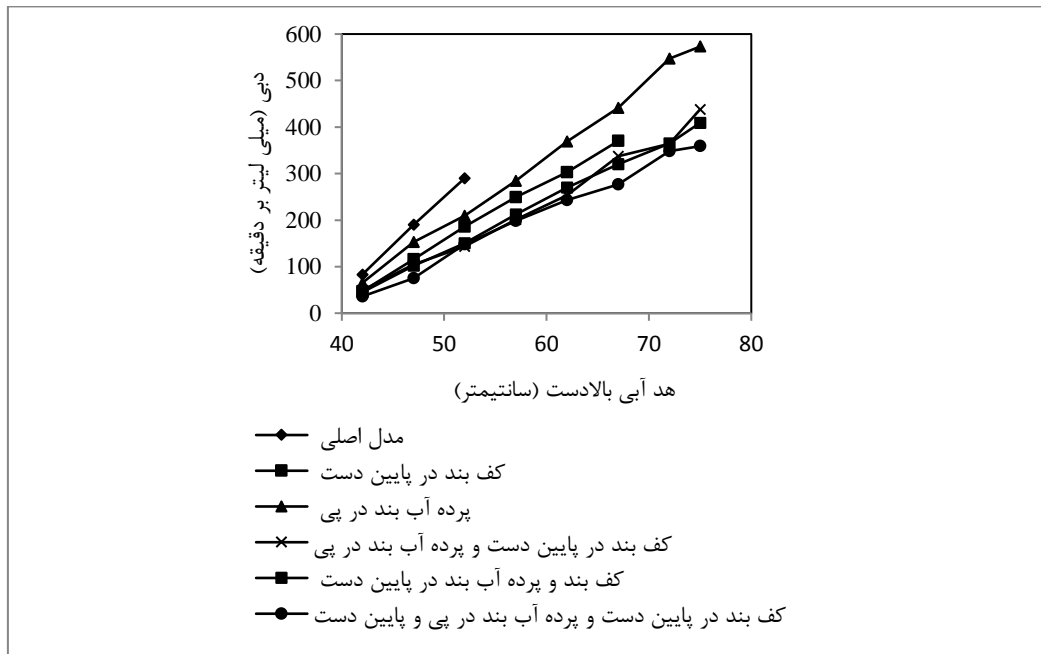
روش عددی بیشترین مطابقت را با روش خوسلا دارد به طوری که میزان خطای آن بسیار ناچیز و کوچکتر مساوی ۵٪ بود (شکل ۹). هر سه مدل آزمایشگاهی، عددی و روش تحلیلی خوسلا روند تغییرات فشار را به صورت منحنی نشان می‌دهند در حالی که سایر روش - های تحلیلی روند تغییرات فشار را خطی نشان می‌دهند (شکل ۸).



شکل (۸): مقایسه تغییرات فشار در مدل‌های آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی



شکل (۹): مقایسه نتایج مدل‌های تحلیلی با عددی



شکل (۱۰): تغییرات دبی در برابر هد بالادست برای مدل‌های مختلف

جدول (۴): مقدار دبی آزمایشگاهی و عددی در مدل های مختلف

مدل	کف بند در پایین دست و پایین دست	کف بند در پایین دست و پایین دست	کف بند در پایین دست و پایین دست	پرده آب بند در پی سد	کف بند در پایین دست	مدل اصلی	هدبالادست (cm)	دبی (میلی لیتر بر دقیقه)
42	36	45	49	65	47	83	(آزمایشگاهی)	
	39.570	43.659	44.484	63.438	49.898	86.325	(عددی)	
	9.917	2.98	9.216	2.403	6.166	4.006	خطا (%)	
47	75	102	105	153	116	190	(آزمایشگاهی)	
	89.034	98.232	100.086	142.737	112.476	194.229	(عددی)	
	18.712	3.694	4.68	6.708	3.038	2.226	خطا (%)	
52	148	150	153	209	186	290	(آزمایشگاهی)	
	138.498	152.805	155.691	222.033	174.966	302.13	(عددی)	
	6.420	1.87	1.759	6.236	5.932	4.184	خطا (%)	
57	198	212	221	284	249	*	(آزمایشگاهی)	
	187.962	207.378	211.302	301.320	237.453		(عددی)	
	5.070	2.180	4.388	6.097	4.637		خطا (%)	
62	243	270	273	369	303		(آزمایشگاهی)	
	237.426	261.951	266.898	380.640	299.940		(عددی)	
	2.294	2.981	2.235	3.155	1.010		خطا (%)	
67	277	320	337	441	370		(آزمایشگاهی)	
	286.890	316.530	322.500	459.530	362.430		(عددی)	
	3.570	1.084	4.303	4.202	2.046		خطا (%)	
72	348	365	374	547	*		(آزمایشگاهی)	
	336.360	371.100	378.090	538.410			(عددی)	
	3.3	1.671	1.094	1.570			خطا (%)	
75	359	409	438	573			(آزمایشگاهی)	
	366.030	403.830	411.480	586.600			(عددی)	
	1.958	1.264	6.055	2.374			خطا (%)	

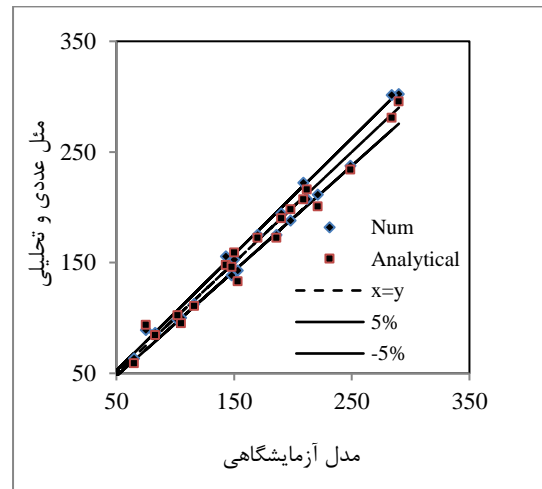
* به ازای هد مشخص شده در مدل مربوط پدیده جوشش اتفاق افتاد.

*For specified head, piping took place.

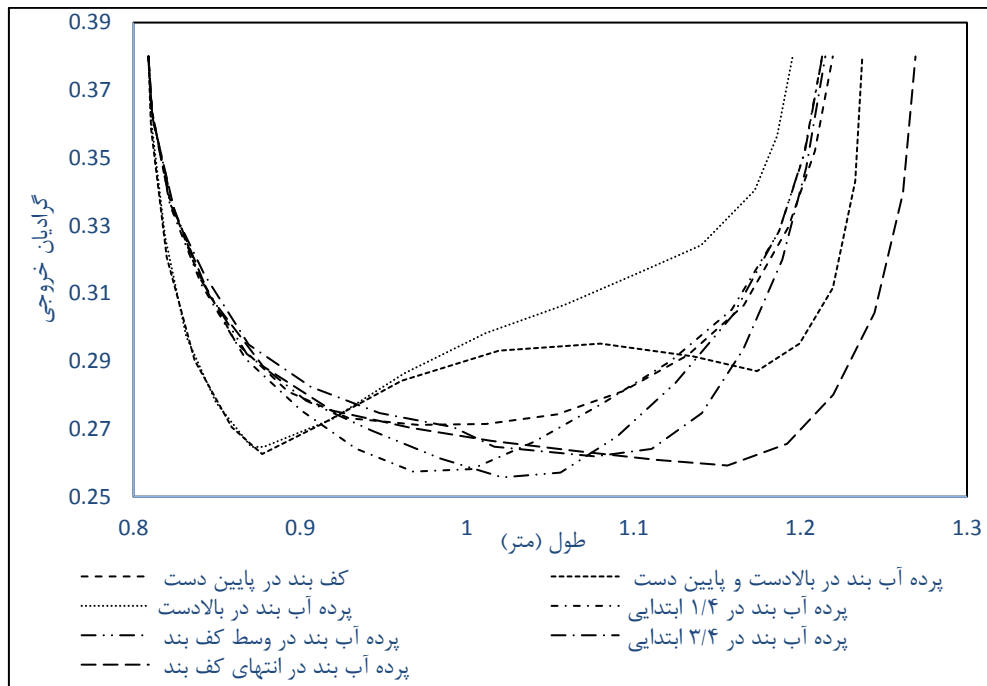
۱۱ این قابلیت مدل های عددی و تحلیلی را تایید می کند.

نتایج مربوط به دبی نشست حاصل از مدل آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی نشان داد که خطای مدل عددی کوچکتر مساوی ۵٪ است (جدول ۴). همچنین شکل

با توجه به نتایج فوق و قابلیت‌های مدل عددی و این که در مدل آزمایشگاهی امکان بررسی خطوط جریان وجود ندارد، به منظور بررسی خطوط جریان و همچنین بررسی تاثیر موقعیت پرده آب‌بند بر روی توزیع فشار از نتایج شبیه‌سازی عددی استفاده شد (شکل ۱۲). همان طور که در شکل مشخص است هرچه پرده آب‌بند به مرکز کف بند نزدیک می‌شود شکل خط جریان در زیر کف بند متقارن‌تر و همگن‌تر خواهد شد که نتیجه آن همگن‌تر شدن خطوط پتانسیل و نهایتاً یکنواخت شدن تغییرات پتانسیل در زیر کف بند می‌باشد.



شکل (۱۱): مقایسه دبی مدل آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی



شکل (۱۲): خط جریان ترسیم شده توسط مدل عددی برای موقعیت‌های مختلف پرده آب‌بند

را کاهش داد. نتایج نشان داد که کاربرد کف‌بند در پی سد مقدار نیروی زیرفشار را در زیر کف‌بند کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از کف‌بند و پرده آب‌بند تاثیر بسزایی در کاهش گرادیان خروجی دارد به طوری که با کاربرد دو پرده آب‌بند و کف‌بند علاوه بر کنترل پدیده جوشش، مقدار گرادیان خروجی به ازای هد بالادست

نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی و عددی گرادیان خروجی، نیروی زیرفشار و دبی نشست از زیر یک سد انحرافی پرداخته شد. استفاده از یک پرده آب‌بند در پی سد نیز بهترین عملکرد را در کاهش نیروی زیرفشار از خود نشان داد که در حدود ۲۲٪ آن

۷۵ سانتی‌متر به مقدار ۰/۷۶۳ کاهش یافت. برای مدل کف‌بند به همراه دو پرده آب‌بند، به ازای هد بالادست ۴۷ سانتی‌متر، مقدار دبی نشت در حدود ۰/۶۰٪ کاهش نشان داد. نتایج مدل کف‌بند و پرده آب‌بند در پی به منظور کنترل دبی نشت بسیار نزدیک به مدل کف‌بند و دو پرده آب‌بند بود، در نتیجه می‌توان آن را به لحاظ اقتصادی جایگزین مناسبی برای مدل کف‌بند و دو پرده آب‌بند دانست. بررسی نتایج نشان داد که مدل عددی از قابلیت خوبی در شبیه‌سازی برخوردار است به طوری که خطای آن برای اکثر مدل‌ها کوچکتر مساوی ۵٪ بود. همچنین روش تحلیلی خوسلا بیشترین مطابقت را با نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد.

فهرست علائم

b	طول کف‌بند (cm)
C_c	ضریب انحنای
C_u	ضریب یکنواختی
d_{50}	قطر متوسط ذرات (mm)
d	عمق پرده آب‌بند (cm)
h	پتانسیل هیدرولیکی (cm)
H	هد بالادست (cm)
i	گرادیان هیدرولیکی
k	هدایت هیدرولیکی (ms^{-1})
L	طول (cm)
L_x	طول افقی (cm)
L_v	طول عمودی (cm)
x,y,z	جهت‌های اصلی
V	سرعت متوسط (ms^{-1})

منابع

- ابن جلال، ر.، و شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۹. اصول نظری و عملی مکانیک خاک. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- ابول‌پور، ب. ۱۳۷۳. روش‌های برآورد تراوش، زیرفشار و زیرشویی در سازه‌های هیدرولیکی با ارائه مدل کامپیوتری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
- خلیلی شایان، ح.، تکلدانی، ا. ۱۳۹۱. برآورد آزمایشگاهی و عددی نیروی زیر فشار، دبی نشت و گرادیان خروجی در شرایط حضور دیوار سپری و بلانکت در طراحی بندهای انحرافی. سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه.
- صدقی اصل، م.، رحیمی، ح.، خالقی، ح. ۱۳۸۴. اثر موقیت بهینه پرده آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- عابدی کوپایی، ج. ۱۳۷۰. پایان‌نامه ارشد: بررسی عوامل موثر بر زیرفشار در پایداری سدهای انحرافی به روش تفاضل محدود. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- قبادیان، ر.، خدایی، ک. ۱۳۸۸. تاثیرات دیوار آب‌بند و زهکش بر نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود. نشریه آب و خاک جلد ۲۳، شماره ۴، دانشگاه فردوسی مشهد.



Ahmed, A. A. 2011. Design of hydraulic structures considering different sheet pile configurations and flow through canal banks. *Computers and Geo-techniques*, 38 (4): 559-565.

Amiri Takoldany, E., and Khalili Shayan, H. 2012. Uplift force, seepage and exit gradient under diversion dams. *Journal of Water Management*, 166 (8): 452-462.

Benmebarek, N., Bensmaine, A., and Benmebarek, S. 2013. Critical Hydraulic Head Loss Inducing Sandy Cofferdam Failure by Numerical Approach. *Academic Patforth*, 32: 437-445.

Bligh, W. G. 1910. Dams Barrages and Weirs on Porous Foundations. *Engineering news*, 64 (dec), 708.

Jafarieh, A., and Ghannad, M. 2014. The Effect of foundation uplift on elastic response of soil-structure systems. *International Journal of Civil Engineering*, 12(2): 146-157.

Khalili Shayan, H., and Amiri-Tokaldany, E. 2014. 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.

Lane, E.W. 1935. security from under seepage masonry dams on earth foundations. *trans. ASCE*, 1235 -1272.

Leliavsky, S. 1965. Design of dams for percolation and erosion. Chapman and Hall, London, UK.

Mansuri, B., Salmasi, F., and Oghati, B. 2014. Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dams. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32: 1165-1173.

Pakbaz, m.s. 2009. evaluation of performance of plastic concert cutoff wall in Karkhe dam using 3D seepage analysis and measurement. *journal of applied sciences*, 9(4): 724-730.

Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., and Khaleghi, H. 2010. Laboratory investigation of the seepage control measures under coastal dikes. *Experimental techniques*, 36(1): 61-71.

Zainal, E. 2011. The effects of cutoff wall angle on seepage under dams. *Journal of Engineering*, 17(5):1109-1131.



Optimal Position of Apron and Cut off in Reduction of Seepage Factors in Foundation of Diversion Dams

Seyyed Mostafa Ashrafi¹, Khalil Ajdari, Seyyaed Hossien², Hossieni³, Samad Emamgholizadeh⁴

Abstract

Seepage of diversion dams foundation and importance of its control, has always been of interest to researchers. In this study, seepage parameters and their control, were investigated experimentally, numerically and analytically. Results showed that using apron and cut off were effective on reduction of seepage discharge so that model with apron and two cut off for upstream head of 47 cm, seepage discharge about 60% decreased and occurrence of piping postponed. Investigations showed that outlet discharge had direct relation with upstream water head. Using a cut off on dam foundation showed the best performance on reduction of uplift force and reduced about 22%. Also application of apron and two cut off beside the control of piping, decreased exit gradient for upstream head of 75 cm up to 0.763. Results for model of apron and cut off on foundation in control of seepage discharge was so similar to model of apron and two cut off, so it is suitable alternative in terms of economic instead of apron and two cut off. Numerical model had good agreement with experimental model on simulation of exit gradient, uplift force and seepage discharge for whole models and error was less than 5%. Results showed, when cut off located at the center of apron, flow line was more symmetrical, potential line and potential changes under the apron were less. Also results compared with different analytical models and Khosla method showed more similarity with experimental and numerical results.

Keywords: cut off, seepage, apron, exit gradient, experimental and numerical model, uplift force.

¹ Graduate of aquatic structures, Faculty of Agriculture, Shahroud University of Technology Email: Mostafa_ashrafi15@yahoo.com

² Associate Professor, Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Shahroud University of Technology Email: azhdary2015@yahoo.com (Responsible author)

³ Assistant Professor, Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Shahroud University of Technology Email: Sayyedhossein.hosseini@gmail.com

⁴ Associate Professor, Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Shahroud University of Technology Email: S_gholizadeh517@yahoo.com