



مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پرده آب‌بند بر کنترل نشت و پدیده جوشش در پی سازه‌های هیدرولیکی

مهدی یوسفی^۱، منصور پرویزی^۲، محمد صدقی اصل^{۳*}

- ۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج
- ۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج
- ۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج

(دریافت ۱۳۹۲/۶/۴، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۳۱)

چکیده

دیوارهای سپری از جمله تمهیداتی هستند که به منظور کاهش نشت، نیروی زیر فشار و شیب خروجی در پی نفوذپذیر سازه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تاکنون تحقیقات زیادی در ارتباط با نشت از پی سازه‌های آبی، به ویژه در قالب مدل‌های عددی انجام شده است که برای ارزیابی درستی آن‌ها به داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی نیاز است. اما تا به امروز یک مدل آزمایشگاهی یا فیزیکی که مسائل نشت و جوشش از پی سازه‌های هیدرولیکی را به طور دقیق مورد مطالعه قرار دهد، ارائه نشده است. در این تحقیق برای بررسی اثر عوامل مؤثر بر پدیده جوشش از پی سازه‌های هیدرولیکی مستقر بر پی‌های آبرفتی یک مدل آزمایشگاهی به طول ۲/۲، ارتفاع ۰/۸ و عرض ۰/۴ متر با استفاده از اسکلت فولادی و جداره‌های پلکسی‌گلاس ساخته و آماده گردید. در این مدل آزمایشگاهی پرده آب‌بند به‌عنوان متغیر عمقی، از ورقه پلکسی‌گلاس ساخته شده و ترازهای پیژومتریک در دو وجه پایین دست و بالادست فلوم با استفاده از پیژومترهای شفاف با قطر کم اندازه‌گیری شده‌اند. تأثیر موقعیت، عمق دیواره سپری بر مقدار دبی نشت و گرادیان خروجی در قالب نمودارهای بی‌بعد نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در نسبت عمق پرده آب‌بند $d/D=0/46$ با نسبت بیشترین تراز آب بالادست $h/h_m=1$ پدیده جوشش رخ نمی‌دهد. مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی در محدوده مساعدی قرار دارند.

کلمات کلیدی:

پدیده جوشش ماسه‌ای، نشت، پرده آب‌بند، مدل آزمایشگاهی، گرادیان خروجی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please site this article using:
Yousefi, M., Parvizi, M., and Sedghi-Asl, M., 2016. "Laboratory Investigation of the Effects of Sheet Pile on Seepage Control and Sand Boiling through Alluvial Foundation of Hydraulic Structures". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), pp. 315-328.
DOI: 10.22060/ceej.2016.411
URL: http://ceej.aut.ac.ir/article_411.html

E-mail: msedghi@yu.ac.ir نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات:



۱- مقدمه

هیدرولیکی بحرانی (گرادیان غوطه‌وری) یا i_c را برای کنترل جوشش و زیرشویی تعریف کرد [۳۴]. بنت^۲ در سال ۱۹۴۴ تأثیر بلانکت را بر میزان نشست با استفاده از مدل‌های ریاضی و برای حالتی که طول بلانکت محدود و نامحدود باشد، مورد ارزیابی قرار داد [۱۸]. مک نامی^۳ در سال ۱۹۴۹ برای کنترل جوشش و فرسایش درونی، ضریب اطمینانی را که به صورت نسبت گرادیان هیدرولیکی بحرانی به گرادیان خروجی تعریف می‌شود، به شکل رابطه (۱) ارائه نمود:

$$F = \frac{i_c}{i_e} \quad (1)$$

که در آن i_c گرادیان هیدرولیکی بحرانی، i_e گرادیان خروجی و F ضریب اطمینان در مقابل زیرشویی است. او دو نوع عمده تخریب ناشی از نشست را به این صورت تعریف کرده است: اول تخریب موضعی مثل زیرشویی یا جوشش که به احتمال زیاد از یک نقطه در مجاورت پرده آب‌بند که در امتداد کوتاه‌ترین مسیر نشست قرار گرفته، شروع می‌شود و دوم اغتشاش و تخریب عمومی که توده بزرگ‌تری از خاک را شامل می‌گردد [۲۷].

لین^۴ در سال ۱۹۱۲ فرض کرد که طول خزش جریان از پی بندهای انحرافی باید با مجموع طول قائم و یک‌سوم طول افقی مسیر جریان نشستی برابر باشد. بر همین اساس، او برای پی‌های مختلف و به منظور کنترل مناسب پدیده جوشش و متعاقب آن فرسایش درونی، ضریبی را پیشنهاد نمود. لین ضریب وزنی خویش را به صورت $C=L/\Delta h$ تعریف کرد که در این رابطه L طول خزش و Δh اختلاف تراز آب بالادست و پائین‌دست سد و C نیز ضریب وزنی لین است. چنانچه ضریب وزنی محاسبه‌شده برای یک بند یا خاک‌ریز از مقدار پیشنهادی لین بیشتر باشد، در آن صورت بند به لحاظ ایمنی در مقابل جوشش و فرسایش درونی مشکلی نخواهد داشت (لیلیاوسکی^۵، سال ۱۹۶۵) [۲۵]. نیومن و ویترسپون^۶ (۱۹۷۰) نشست از پی و بدنه سدهای خاکی را به روش اجزای محدود^۷ مورد ارزیابی قرار دادند و مشاهده کردند که این روش قادر است تا مسائل آب زیرزمینی را به خوبی شبیه‌سازی نماید. اما در مقایسه با روش تفاضلات محدود^۸ از پیچیدگی‌های ریاضی بیشتری برخوردار است [۲۸]. جوان و فرجود^۹ در سال ۱۹۹۳ نشست از پی سد درودزن در استان فارس را به کمک مدل M-SEEP که مبتنی بر روش اجزای محدود است، مورد ارزیابی قرار دادند و توانایی مدل مذکور را در شبیه‌سازی نشست از پی و تکیه‌گاه‌های سد مذکور به خوبی توصیف کردند [۲۶].

لی و لیپ^{۱۰} در سال ۱۹۹۷ و کو و لیپ^{۱۱} در سال ۱۹۹۸ نشست ماندگار با

به علت اختلاف بار آبی که در دو طرف سازه‌های آبی احداث شده بر روی پی‌های نفوذپذیر وجود دارد، همواره نشست آب از پی این‌گونه سازه‌ها وجود دارد. اثرات تراوش از خاک پی این سازه‌ها را می‌توان در سه بخش ایجاد نیروی زیر فشار، دبی نشست و گرادیان خروجی طبقه‌بندی نمود. نیروی زیر فشار، سبب کاهش مقاومت برشی بین سد و پی آن شده و باعث ایجاد تنش کششی، کاهش ضریب اطمینان پایداری در برابر پدیده‌های لغزش و واژگونی می‌شود. چنانچه سرعت نشست جریان آب در قسمت انتهایی سدها افزایش یابد، ممکن است که این سرعت بالا سبب حرکت ذرات خاک گردد. این موضوع تسریع‌کننده پدیده مهم دیگری با عنوان زیرشویی می‌گردد که اگر کنترل نشود، ممکن است موجب تخریب این‌گونه سازه‌ها شود. هدف از احداث پرده تزریق، پرده آب‌بند و سایر روش‌های آب‌بندی، جلوگیری یا کاهش این حرکت به سمت پایاب بوده و گرادیان خروجی نیز مهمترین معیار طراحی برای ضریب اطمینان نسبت به زیرشویی است [۱۴].

محققین زیادی از چندین دهه گذشته مسائل نشست را به صورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار داده‌اند و درستی نتایج مدل‌های عددی با داده‌های صحرایی در اغلب این مطالعات مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به این که دقت برداشت داده‌های آزمایشگاهی به مراتب از داده‌های صحرایی بیشتر است، بنابراین مطالعه و تحلیل مسئله نشست از پی‌های آبرفتی به کمک یک مدل آزمایشگاهی می‌تواند روابط مورد نیاز برای طراحی آن‌ها را به گونه‌ای علمی‌تر استخراج و درستی روابط تجربی را نیز مورد ارزیابی قرار دهد. اهمیت شبیه‌سازی آزمایشگاهی مسئله نشست را می‌توان به دو دلیل توجیه نمود: اول این که شرایط پی و خصوصیات زمین‌شناسی سایت مورد بررسی در صحرا و مدل، غالباً تفاوت زیادی را با هم دارند و دوم این که با تقریب معادلات ریاضی حاکم بر حرکت آب زیرزمینی، اغلب مقداری عدم اطمینان وارد مسئله شده و انتظار آن می‌رود که بین نتایج مدل‌های ریاضی و آزمایشگاهی تفاوت محسوسی وجود داشته باشد.

اولین مطالعات انجام‌شده در مورد بهینه‌سازی جریان نشستی از پی سدهای خاکی توسط ترزاقی^۱ انجام گرفته است. وی با تحلیل نشست حاصله از بدنه و پی سدهای خاکی و با توجه به ضریب نفوذپذیری مصالح تشکیل‌یافته، نتایج خود را ارائه داد. نتیجه کار او به این صورت بود که هرچه نسبت نفوذپذیری هسته نسبت به پی و پوسته کمتر باشد، نشست حاصله کاهش خواهد یافت. او با در نظر گرفتن عمق‌های مختلفی از پرده آب‌بند واقع‌شده در پی سد به ارزیابی جریان نشست از پوسته و پی پرداخت. ارزیابی او بر اساس روش شبکه جریان ترسیم‌شده برای هر حالت انجام گرفته بود [۵].

اثر بلانکت (پتوی رسی) و پرده آب‌بند بر جریان نشست در سدهای خاکی نیز در ابتدا توسط ترزاقی مورد بررسی قرار گرفت. او مفهوم گرادیان

^۱ Terzaghi

^۲ Bennet

^۳ McNami

^۴ Lane

^۵ Leliavsky

^۶ Neuman and Wither Spoon

^۷ Finite Elements

^۸ Finite Differences

^۹ Javan and Farjood

^{۱۰} Lee and Leap

^{۱۱} Koo and Leap

نتایج به دست آمده را نیز به صورت نمودارهای بی‌بعدی به نام منحنی‌های پس‌بین ارائه دادند [۱۲].

صدقی اصل و همکارانش در سال ۲۰۱۰، تأثیر روش‌های مختلف کنترل اثرهای نشست در زیر دایک‌های ساحلی را با بهره‌گیری از یک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها طول بهینه کف بند و عمق بهینه دیواره‌های سپری را به گونه‌ای ارائه نمودند که مقدار نیروی زیر فشار وارد بر خاک‌ریز حفاظتی حداقل شود. آن‌ها نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی را با نتایج حاصل از نظریه‌های بلای و لین در شرایط متناظر مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که روش لین مقدار نیروی زیر فشار و احتمال بروز پدیده جوشش را کمتر از روش بلای برآورد می‌کند [۳۱، ۱۰].

گرازیان هیدرولیکی که نشان‌دهنده احتمال وقوع پدیده زیرشویی است، در بدنه پی و تکیه‌گاه‌های سد و به خصوص اطراف مجاری عبورکننده از داخل سد خاکی باید کنترل شود. گرازیان هیدرولیکی بر اساس روابط نظری موجود به دانه‌بندی خاک، تخلخل و چگالی و فشار آب حفره‌ای بستگی دارد. مقدار مجاز گرازیان هیدرولیکی معمولاً با اعمال ضریب اطمینان به گرازیان بحرانی (i_c) به دست می‌آید. بررسی سوابق اطلاعات ثبت‌شده تراوش و پدیده زیرشویی یا جوشش ماسه نشان می‌دهد که مشخصات محل، تأثیر قابل توجهی را در مقدار واقعی گرازیان بحرانی دارد. نتایج اطلاعات آماری گذشته برای اطلاع در جدول (۱) آورده شده است [۱۵].

جدول (۱): سوابق اطلاعات ثبت‌شده تراوش و پدیده زیرشویی یا جوشش ماسه

مقدار اندازه‌گیری شده گرازیان خروجی	شرایط مشاهده شده تراوش
صفر تا ۰/۲	عدم تراوش یا تراوش بسیار ناچیز
۰/۲ تا ۰/۴	تراوش معمولی یا متوسط
۰/۴ تا ۰/۶	تراوش زیاد
۰/۶ تا ۰/۸	زیرشویی یا جوشش ماسه

ریچارد و ردی^۵ در سال ۲۰۰۷، به بررسی جامع پیشینه تحقیق در ارتباط با پدیده نشست آب در خاک و چگونگی وقوع پدیده پایبندگ در خاک‌های مختلف پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که اولین ابزارها برای طراحی سدهای خاکی برای مقاومت در برابر پدیده نشست در سال‌های ۱۹۱۰ تا ۱۹۳۵ توسعه پیدا کرد [۳۰].

یافنگ و همکاران^۶ در سال ۲۰۰۸، برای حل مشکلات نشست با سیستم‌های زهکش سد، نوعی حل عددی را ارائه دادند که از روش المان محدود استفاده می‌کند [۳۵].

پاکباز و همکارانش در سال ۲۰۰۹، با مدل *SEEP-3D* به ارزیابی

سطح آزاد از بدنه سدهای خاکی را به کمک روش تبدیل مختصات برازش مرزی^۱ مورد بررسی قرار دادند و بیان نمودند که این روش مشکلات روش تفاضلات محدود را در مقاطع هندسی پیچیده کاهش می‌دهد [۲۴-۲۲].

ابول‌پور در سال ۱۳۷۳ یک مدل رایانه‌ای را ارائه داد که قادر بود تا فشار بالابر را در زیر سازه‌های هیدرولیکی با چندین روش مختلف برآورد نماید. یکی از روش‌های تحلیل، روش شبکه جریان بود که با استفاده از توابع پتانسیل و جریان و به کمک مفاهیم اعداد مختلط نوشته شده بود. او نتایج مدل خود را با داده‌های پیژومتریک سد دروزن مقایسه کرد و دریافت که بین نتایج مدل و داده‌های صحرائی، به میزان چهار درصد خطای مطلق وجود دارد [۱].

جباری در سال ۱۳۷۶ به بررسی مدل ریاضی سه‌بعدی حرکت آب در محیط متخلخل ناهمگن و ناهمسان در حالت ماندگار و با روش احجام محدود^۲ پرداخت. او از روشی موسوم به *ADI^۳* در تحلیل کارش استفاده نمود. روش *ADI* به روش تغییر متناوب ضمنی موسوم است که برای تبدیل ماتریس پنج قطری به سه قطری و حل همزمان آن‌ها به کار می‌رود. این مدل توانایی تحلیل محیط‌های سه‌بعدی و ناهمگن همسان و با لایه‌بندی‌های مختلف را دارد [۴].

شریفی و عطایی آشتیانی در سال ۱۳۸۲ در مطالعه‌ای به بررسی تحلیل تراوش و زیر تراوش از سد خاکی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش المان‌های مرزی یک مدل عددی تهیه کردند که قابلیت تحلیل تراوش دائم و غیردائم را در سد خاکی ناحیه‌بندی شده همراه با پی لایه‌ای و دیوار آب‌بند دارد. یکی از مزایای مهم این مدل، کاربرد المان مرز بی‌نهایت برای تحلیل تراوش در زیر پی است؛ به این شکل که رفتار مرز بی‌نهایت بررسی شده و برای مرز نزدیک بکار برده می‌شود که در این حالت، می‌توان با مدل کردن طول کمی از پی به جواب‌های نسبتاً دقیقی دست یافت. از مزایای دیگر این مدل، قابلیت تحلیل تراوش در حالت غیردائم مانند آبیگری یا افت سطح آب است [۸].

جای و همکارانش^۴ در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش تفاضلات محدود مبتنی بر روش انتقال مختصات برازش مرزی به بررسی نشست از زیر سدها و فراز بندها به کمک معادله پواسون پرداختند [۲۱].

صدقی اصل و همکارانش در سال ۱۳۸۴ به بررسی کاهش نشست، کنترل فشار بالابر، جوشش و همچنین کاهش گرازیان خروجی در زیر سازه‌های هیدرولیکی با استفاده از پرده آب‌بند و بلانکت (پتوی رسی) پرداختند [۱۱].

صیادزاده و زمردیان در سال ۲۰۰۷، خصوصیات جریان را در سدهای نفوذناپذیر با عرض متغیر و پرده سپر در عمق‌های مختلف پنجه پایین‌دست بر روی سیستم‌های خاک دولایه و سه لایه را بررسی کردند و مقدار جریان و گرازیان خروجی را برای تمامی شرایط تعیین نمودند و

¹ Boundary-Fitted Coordinate Transformation

² Finite Volume

³ Alternative Direct Implici

⁴ Jie. Y., et al

⁵ Richards and Ready

⁶ Yifeng et al.

محدود *SEEP 3D* مدل شده و میزان تأثیر دیوار و پرده آب‌بند با افزایش عمق نفوذ بر کاهش نشست مورد بررسی قرار گرفته است. پس از این محاسبه، مقدار نشست از محور و جناح راست سد در طول یک سال 22548240 متر مکعب برآورد شده که با افزایش عمق نفوذ دیوار و پرده آب‌بند از 20 به 30 متری در زیر تراز پی نشست به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که با استفاده از تمهیدات بکار رفته دیوار و پرده آب‌بند، میزان نشست در طول یک سال به 4415040 متر مکعب و حدود 80 درصد کاهش می‌یابد [۱۶].

شهرکی و همکارانش در سال 1392 به بررسی موقعیت قرارگیری دیواره آب‌بند نسبت به محور سد بر دبی و سرعت نشست، تنش و فشار آب منفذی سد سارادان پرداختند. دیواره‌های آب‌بند از جمله روش‌های کاهش دبی و سرعت نشست و نیروی زیر فشار در پی سدهای خاکی هستند. برای بررسی اثرهای دیواره آب‌بند از نوع بتن پلاستیک در کاهش مقادیر مؤلفه‌های فوق، در این تحقیق به مدلسازی سد سارادان ایرانشهر، به وسیله نرم‌افزار مبتنی بر روش اجزای محدود *PLAXIS* پرداخته شده است. در این تحقیق، پرده آب‌بند سد در سه حالت مدل گردید و مقادیر سرعت و دبی نشست، فشار آب منفذی و تنش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین مکان قرارگیری پرده آب‌بند برای کاهش سرعت و دبی نشست در پنجه هسته سد و جهت کاهش زیر فشار نیز در پنجه هسته سد است. آن‌ها در بررسی مقادیر تنش، افزایش تنش را از پاشنه هسته تا محور و مجدداً کاهش آن را از محور تا پنجه هسته ارائه دادند [۹].

رهنما راد و همکارانش در سال 1392 به بررسی تحلیل عددی و کارایی تزریقات پرده آب‌بند سد شهر بیجار پرداختند. با توجه به تحلیل عددی صورت گرفته، ملاحظه می‌گردد که مقدار نشست محاسبه‌شده از محاسبات تراوش سه‌بعدی در حدود 14 درصد از مقدار نشست مخزن که در مطالعات برنامه‌ریزی‌شده منابع آب (که به میزان 94 میلیون متر مکعب در سال در نظر گرفته شده است)، کمتر است. آن‌ها نشان دادند که طول پرده تزریق در محدوده زیر سرریز به میزانی در حدود 50 متر در تکیه‌گاه راست به صورت متصل و دوخته‌شده به شیل به اندازه کافی طولانی انتخاب شده است [۶].

پوراسکندر و همکارانش در سال 1391 به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر پرده آب‌بند بر روی نشست از پی سدها پرداختند. مقدار فشار در قسمت‌های مختلف پی سدها و مسئله نشست و نیروی بالابرنده از مهمترین مسائلی هستند که در طراحی سدها مورد توجه قرار می‌گیرد. در این تحقیق رفتار هیدرولیکی پرده آب‌بند با عمق‌های نفوذ مختلف برای خاک‌هایی با سه نوع ضریب آب‌گذری و دو لایه‌بندی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر نشست و فشار پی‌زومتری در 28 نقطه از مدل فیزیکی برداشت و با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی شد. مقدار خطای مدل عددی به‌طور متوسط $0/28$ درصد بوده که این موضوع حاکی از تطابق خوب نتایج مدل عددی با نتایج

ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب 60 و 20 درصد کاهش می‌یابد [۲۹].

بوچل قوم^۱ در سال 2011 به بررسی پدیده نشست در زمان حفاری پرداخت و ارزیابی‌های او در ارتباط با پدیده نشست در محیط‌های همسان بود. همچنین خاک چندلایه تحت جریان سیال در حالت متقارن را طی کدنویسی در محیط *FLAC* مورد بررسی قرار داد. عوامل مختلفی بر روی پایداری سد موقت تأثیرگذار هستند. او تأثیر شکل حفاری، همسان و غیرهمسان‌بودن خاک را بر روی کاهش ارتفاع آب بالادست با رانش مؤثر مقاوم خاک صفر مورد بررسی قرار داد [۲۰].

صدقی اصل و همکارانش در سال 2012 به بررسی عوامل مؤثر بر نشست از پی دایک‌های ساحلی پرداختند. آن‌ها یک مدل آزمایشگاهی به طول 9 متر و ارتفاع و عرض یک متر را با اسکلت فولادی و جداره‌های شیشه‌ای و پلاکسی‌گلاس ساختند و مصالح پی را ماسه تمیز ساحلی در نظر گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که نسبت طول بهینه بلانکت و عمق پرده آب‌بند به عمق آب مخزن و ضخامت پی به منظور حداقل نمودن دبی نشستی و کنترل فرسایش درونی به ترتیب 8 و $0/8$ است [۳۲].

بن مبارک و بنسماين^۲ در سال 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 پایین دست زیاد باشد، گسیختگی در مجاورت سد موقت خاک رخ می‌دهد. آن‌ها به وسیله نرم‌افزار *FLAC* ارتفاع آب بالادست بحرانی را در حالات مختلف ژئوتکنیکی ماسه برای دیواره آب‌بند طره‌ای تعیین نمودند [۱۹].

زارع و همکارانش در سال 2001 بهبود وضعیت فرار آب و احداث پرده آب‌بند تکمیلی جناح چپ سد تنگاب را مورد بررسی قرار دادند. سد تنگاب یک سد سنگریزه‌ای با هسته رسی بوده و بدنه سد بر روی سازنده آهکی آسماری احداث شده است. با بررسی نمونه‌های حاصل از حفاری اکتشافی، مشخص گردید که لایه‌های آب‌بند در این ناحیه در عمق 13 تا 72 متری زیر گالری پایینی از جنس آهک سیاه مارنی دولومیتی وجود دارد. پس از بررسی لاگ گمانه‌ها و انجام آزمون لوژان، آب‌بند بودن این لایه مورد تأیید قرار گرفت و این لایه دولومیتی-مارنی به همراه پرده آب‌بند طراحی‌شده به‌عنوان عامل نشست پذیرفته شد. آن‌ها در این مطالعه به نحوه اجرای پرده آب‌بند تکمیلی نیز پرداختند [۷].

نعیمی و همکارانش در سال 1390 به بررسی میزان تأثیر دیوار و پرده آب‌بند بر کاهش نشست با افزایش عمق نفوذ در محور و تکیه‌گاه راست سد مخزنی میرزای شیرازی به روش عددی پرداختند. در این پژوهش با توجه به اهمیت مسئله نشست و نیز به منظور نمایش جریان به صورت سه‌بعدی، محدوده محور و جناح راست سد توسط نرم‌افزار المان

¹ Bouchelghoum

² Benmebarek and Bensmaïne

آزمایشگاهی است [۳].

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (۴)$$

در حالتی که نفوذپذیری در محیط همگن و هم‌روند باشد ($k_x = k_y$)، رابطه فوق به معادله مشهور لاپلاس و به صورت رابطه (۵) تبدیل می‌گردد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (۵)$$

هرچند که قانون داریسی هنوز هم اعتبار خویش را در تجزیه و تحلیل جریان آب زیرزمینی حفظ نموده، اما به نوبه خود دارای محدودیت‌هایی است که از جمله آن می‌توان به عدم کارایی این قانون در جریان با سرعت‌های زیاد و جریان‌های پایا^۲ اشاره نمود.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

دیوارهای سپری از جمله تمهیداتی هستند که به منظور کاهش نشت، زیر فشار و شیب خروجی در پی نفوذپذیر سازه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آزمایش‌های مختلفی بر روی یک مدل آزمایشگاهی از پی یک‌بند انحرافی در شرایط مختلف بار آبی بالادست، طول و موقعیت دیواره‌های سپری برای بررسی اثرات این سازه‌ها در کاهش مقادیر مؤلفه‌های فوق انجام گرفت. این مدل آزمایشگاهی به طول ۲/۲۰ متر، ارتفاع ۰/۸ متر و عرض ۰/۴۰ متر ساخته و ضخامت پی و ارتفاع آن ۰/۴۰ متر لحاظ شدند. از ماسه ریز و تمیز ساحلی به‌عنوان مصالح پی استفاده گردید و مصالح با تراکم یکنواخت درون فلوم ریخته شد. سپس یک ورقه پلاکسی به عنوان سپر نصب می‌شود. متغیر مسئله عمق سپر (عمق نفوذ یافته درون پی) بوده که در هر حالت تغییر می‌کند.

اجزای مدل آزمایشگاهی شامل: ۱- سیستم تأمین آب، ۲- تبدیل‌ها و اتصالات، ۳- پرده آب‌بند، ۴- مخازن تنظیم‌کننده تراز آب بالادست و پایین‌دست، ۵- پی ماسه‌ای به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر، ۶- توری به شماره ۱۵۰ بکار رفته در حد فاصل انتهایی پی در پایین‌دست و مخزن نشت

احمدی و همکارانش در سال ۱۳۹۲ به بررسی تأثیر پرده آب‌بند بر روی کاهش نشت از سد چومان و بهینه‌سازی حجم آن پرداختند. آن‌ها در این مطالعه سعی کردند تا با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود *SEEP/W* به محاسبه میزان نشت بدون اجرای پرده آب‌بند پرداخته و با تحلیل نتایج به دست آمده و مدلسازی همراه با پرده آب‌بند و تأثیر آن بر نشت، بهینه‌ترین حجم را برای اجرای پرده آب‌بند پیشنهاد کنند. آن‌ها برای به حداقل رساندن خطا در نتایج حاصل از ارزیابی نشت سعی کردند تا خطای محاسبات با انتخاب ۵ مقطع در ترازهای مختلف تا حد امکان کاهش یابد [۲].

علوی و همکارانش در سال ۱۳۸۹ به بررسی و تحلیل نشت ساخت‌گاه سد ژاوه با استفاده از نرم‌افزار *SEEP/W* پرداختند. در این تحقیق، در ابتدا توسط نرم‌افزار سنگ-کار^۱ مناطق هم‌لوژن استخراج گردید و سپس تحلیل نشت با استفاده از مناطق به دست آمده انجام گرفت. عمق پرده آب‌بند با استفاده از این تحلیل بین ۷۰ تا ۸۰ متر به دست آمد [۱۳].

از آن‌جایی که مدل‌های عددی زیادی برای تخمین خصوصیات جریان نشت از پی‌های آبرفتی ارائه شده و تاکنون این مدل‌های با داده‌های آزمایشگاهی مطمئن مقایسه نشده‌اند، بنابراین این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. همچنین با استفاده از نتایج به دست آمده از این تحقیق، می‌توان به ارزیابی درستی از روش‌های تجربی برای طرح مطمئن هیدرولیکی سازه‌های هیدرولیکی پرداخت. در تحقیق حاضر برای تحلیل نشت عبوری از پی آبرفتی و پدیده جوش ماسه‌ای در پایین‌دست، یک مدل آزمایشگاهی با یک نوع متعارف عامل آب‌بندی‌کننده، یعنی پرده آب‌بند نفوذناپذیر ساخته و اثر عامل آب‌بندی‌کننده طی آزمایش‌های مختلف بر میزان جریان نشت عبوری از پی آبرفتی با مصالح ماسه ساحلی با هدف حداقل‌سازی این میزان و کنترل فرسایش درونی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مبانی نظری

جریان دوبعدی حرکت آب در محیط متخلخل خاک توسط قانون داریسی و به صورت رابطه (۲) بیان می‌گردد:

$$V = -k \cdot \text{grad}(h) \quad (۲)$$

که در آن V بردار سرعت، k ماتریس نفوذپذیری و h تراز پتانسیل است. اصل بقای جرم در یک حجم کنترل مشخص به صورت رابطه (۳) بیان می‌گردد:

$$\int_S V \cdot n \, ds = 0 \quad (۳)$$

که در آن V بردار سرعت، S سطح مقطع و n بردار واحد عمود بر S است. از تلفیق رابطه‌های (۲) و (۳)، رابطه (۴) به دست می‌آید:



شکل (۱): نصب توری شماره ۱۵۰ برای جلوگیری از شسته شدن مصالح

² Unsteady Flow

¹ Rock Work

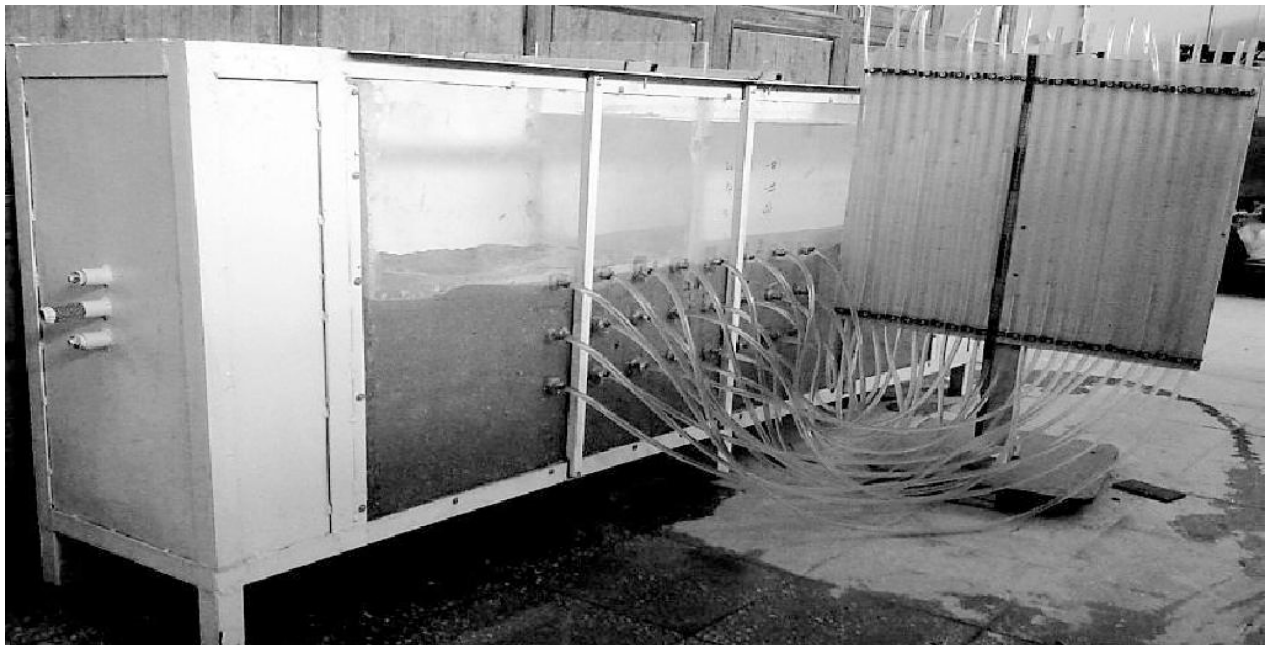
پلاستیکی شفاف با قطر کم نصب گردید. انتهای دیگر پیزومترها برای سهولت قرائت‌ها بر روی یک تابلوی مخصوص (که بر روی آن یک کاغذ شطرنجی و مدرج برای قرائت دقیق پیزومترها چسبانده شد) نصب شدند. ۴۰ سانتی‌متر پایینی از عمق فلوم به پی ماسه‌ای و ۴۰ سانتی‌متر بالایی آن به ارتفاع متغیر تراز آب و ارتفاع آزاد فلوم اختصاص داده شد. جریان آب در فلوم توسط سامانه تأمین آب آزمایشگاه برقرار و دبی جریان خروجی به صورت حجمی اندازه‌گیری شد.

شکل (۲) تصویر عمومی از مدل آزمایشگاهی و شکل (۳) طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

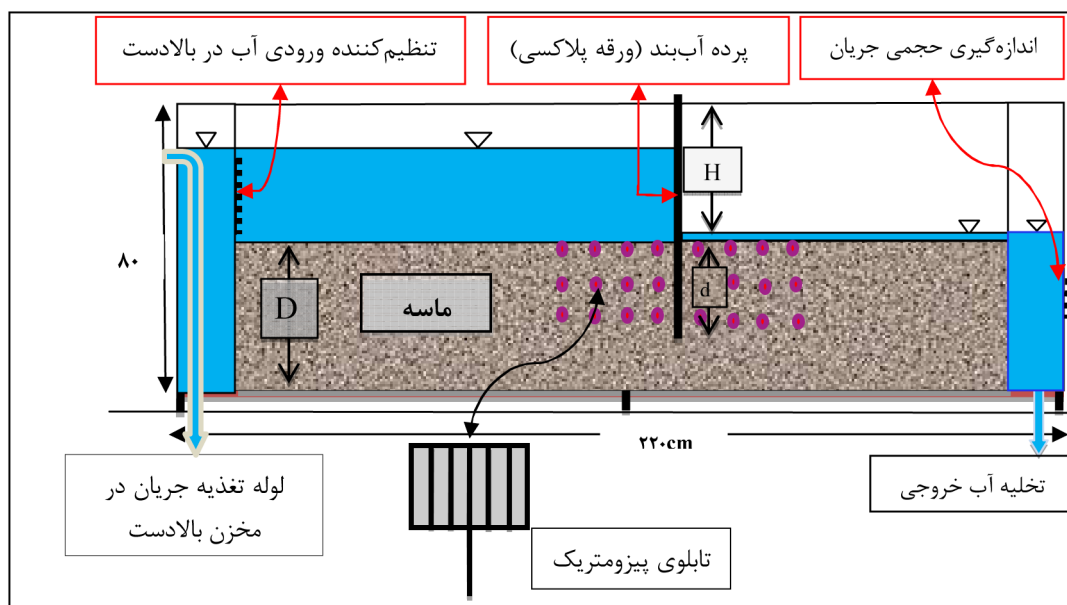
آب خروجی (شکل (۱))، ۷-وسایل ثبت تراز پیزومتریک و ۸- سیستم اندازه‌گیری دبی نشت خروجی.

اسکلت فلوم ساخته‌شده از نبشی‌هایی از جنس فولاد است. همچنین کف و بدنه پشتی آن با ورق‌هایی از جنس فولاد و نمای روبرویی فلوم از جنس ورق‌های پلکسی‌گلاس^۱ با ضخامت ۱۰ میلی‌متری پوشیده شده است. برای ثبت داده‌های پیزومتریک در بالادست و پایین دست سپری در ۳ تراز عمودی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری از کف و ۸ مقطع افقی با گام مکانی ۱۰ سانتی‌متری و در مجموع تعداد ۲۴ پیزومتر متشکل از لوله‌های

^۱ Plexiglas



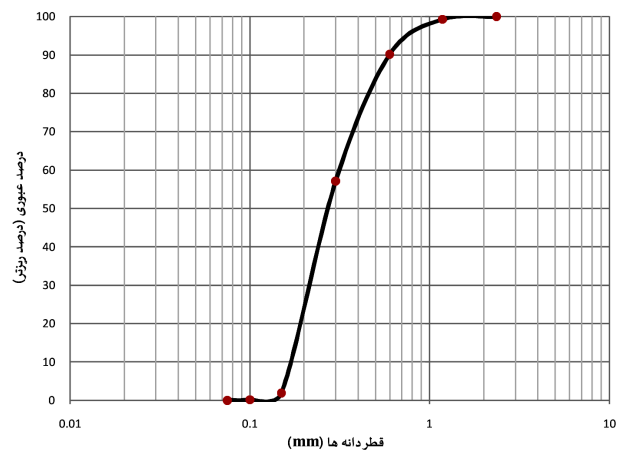
شکل (۲): تصویر عمومی مدل آزمایشگاهی ساخته شده



شکل (۳): طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی

۲-۳- روش آزمایش

در این تحقیق برای مطالعه کنترل نشت و بررسی پدیده جوشش ماسه‌ای در پایین‌دست، شش حالت کلی قرارگیری پرده آب‌بند در نظر گرفته شد. پرده آب‌بند در عمق‌های ۱۰، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۱۸/۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری از پی قرار داده شدند. ارتفاع آب بالادست در ۷ تراز ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متری از سطح روی پی و تراز آب پایین‌دست در تراز صفر تنظیم گردید. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، برای ایجاد بحرانی‌ترین حالت از نظر پتانسیل ایجاد فرسایش، از ماسه ریز تمیز (ماسه ساحلی) که فاقد هرگونه چسبندگی بوده و به پدیده فرسایش درونی^۱ و جوشش^۲ فوق‌العاده حساس است، به عنوان مصالح پی استفاده گردید. با استفاده از آزمایش بار افتان، نفوذپذیری ماسه ساحلی مورد استفاده برابر با $3/25 \times 10^{-4}$ سانتی‌متر بر ثانیه تعیین شد. برای جلوگیری از شسته‌شدن مصالح به مخزن پایین‌دست، یک شبکه توری شماره ۱۵۰ در حد فاصل مخزن تنظیم‌کننده مذکور و پی نصب گردید. شکل (۴) منحنی دانه‌بندی ماسه ریز ساحلی بکار رفته در پی مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل (۴): منحنی دانه‌بندی ماسه ریز ساحلی مورد استفاده در پی مدل آزمایشگاهی

نحوه انجام آزمایش‌ها به این ترتیب بود که پس از نصب سپری، شیر مخزن بالادست باز گذاشته می‌شد تا پی به تدریج از آب اشباع شود که این عمل، در شرایط آزمایشگاهی موجود حدود ۶ ساعت به طول می‌انجامید. بعد از اشباع شدن مصالح پی و بالا آمدن تراز آب در پایین‌دست و تنظیم آن در تراز ۳۵ سانتی‌متری، پیزومترها به کمک خم کردن تابلوی پیزومتریک و جریان یافتن آب در آن‌ها هواگیری شدند و بعد از هواگیری تابلو به صورت عمودی در جای خود قرار داده شد. پس از برقراری حالت آرام و ماندگاری جریان، رقوم آب در پیزومترها خوانده شده و دبی نشت با روش اندازه‌گیری حجمی تعیین گردید. مدت انجام هر آزمایش در ترازهای مورد نظر برای هریک از گزینه‌ها در حدود ۱۲ ساعت بوده است.

۲-۴- تحلیل ابعادی

معمولاً برای شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی در قالب مدل‌های فیزیکی و یا آزمایشگاهی از تشابه ابعادی استفاده می‌شود (استریترو و وایلی در سال ۱۹۷۹). بر اساس نظریه باکینگام، مؤلفه‌های مسئله نشت استخراج شدند. بنابراین اعداد بدون بعد مؤثر، تعیین و مطابق زیر در تجزیه و تحلیل نتایج تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند:

$$F(Q, Q_0, Q_m, h, H, d, D, h_m, X, p) = 0$$

$$F(Q/Q_0, Q/Q_m, h/H, h/h_m, d/D, X/D) = 0 \quad (۶)$$

که در آن h تراز آب بالادست، h_m بیشینه تراز آب بالادست، d عمق پرده آب‌بند، D ضخامت پی آب‌رفتی، X فاصله افقی از پرده آب‌بند، Q دبی نشت برای هر حالت دلخواه و Q_0 دبی مینای کل به ازای حداقل عمق پرده آب‌بند مورد نظر برای جلوگیری از شروع فرسایش درونی (یعنی ۱۰ سانتی‌متر) هستند. Q_m نیز بیشینه دبی نشت به ازای اعماق مختلف پرده آب‌بند بوده و در واقع برای هر عمق پرده آب‌بند یک Q_m و در مجموع ۵ مقدار برای آن وجود خواهد داشت.

۳- نتایج

افزایش میزان نشت آب، شیب هیدرولیکی خروجی و فرسایش درونی بعد از بهره‌برداری در بسیاری از سدهای خاکی و بندهای انحرافی سبب خسارات جبران‌ناپذیری شده است. بنابراین نیاز به راهی ساده و قابل‌دسترسی و در عین حال دقیق ضروری به نظر می‌رسد. مدل آزمایشگاهی می‌تواند گزینه‌ای برای مدل‌سازی این پدیده باشد.

نتایج آزمایش‌ها که در بندهای زیر آورده شده است، همگی این موضوع را بیان می‌کنند که با دستیابی به عمقی بهینه از پرده آب‌بند بتوان میزان دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و فرسایش درونی پی ماسه‌ای موجود در مدل آزمایشگاهی را به گونه‌ای کاهش داد تا با افزایش نسبت عمق پرده آب‌بند نسبت به این عمق (عمق بهینه) در روند تغییرات این مقادیر کاهش چشمگیری ایجاد نگردد. این موضوع در اجرا نیز در اولویت است. زیرا هزینه اجرای هر واحد طول عمق پرده آب‌بند در نسبت‌های بالا به هیچ عنوان مقرون به صرفه نیست. نصب پرده آب‌بند در اعماق زیاد با محدودیت‌های زیادی همراه بوده و هزینه اجرا افزایش می‌یابد. بنابراین مبنای گزینش معیار مناسب برای اجزای آب‌بندی‌کننده بکارگیری نگرش مهندسی و اقتصادی در کنار نتایج آزمایشگاهی است. در این تحقیق با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی به منظور پی‌بردن به موقعیت و عمق بهینه دیوارهای آب‌بند و بررسی تأثیر این دیوارها بر مقدار دبی نشت، گرادیان خروجی جریان و پدیده جوشش و فرسایش درونی در پی سازه‌های هیدرولیکی است، پرداخته می‌شود.

۳-۱- اثر عمق پرده آب‌بند بر روی دبی نشت

مسئله تخمین میزان جریان‌های نشتی به خصوص در پایداری

^۱ Piping

^۲ Boiling

دارد. همچنین برای نسبت Q/Q_0 به ازای ($d/D=1$) مقدار صفر تعریف شده است که این موضوع، در اجرا عملی نبوده و صرفاً جنبه تئوری دارد.

$$\frac{Q}{Q_0} = -4.1006 \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 7.4961 \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 5.3495 \left(\frac{d}{D}\right) + 1.9587; R^2 = 0.9779 \quad (7)$$

برای مقایسه کمی داده‌ها از ضریب همبستگی (RSQ) به صورت رابطه (۸) استفاده شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

که در آن x_i مقدار مشاهداتی، \hat{x}_i مقدار محاسبه شده و \bar{x} میانگین مقادیر مشاهداتی است.

۳-۲- اثر تراز آب بالادست بر میزان نشت

فشار ناشی از ارتفاع آب در مخزن سد باعث ایجاد جریان‌های زیرزمینی آب (جریانی که از بالادست به سمت پایین دست رخ می‌دهد و سبب تراوش آب در ترک‌ها، حفره‌های بتن و سنگ می‌گردد)، فشارهای منفذی و زیر فشار در بدنه، پی و تکیه‌گاه‌های سدهای خاکی و بندهای انحرافی می‌شود.

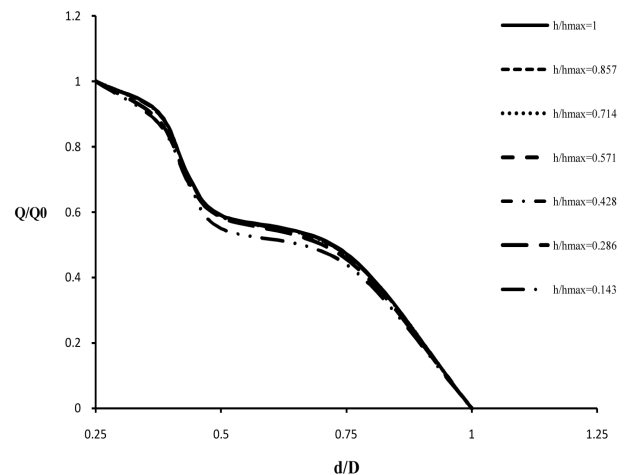
تراوش آب در حد معمول در تمام سدها و بندهای انحرافی رخ می‌دهد. ولی هنگامی که مقادیر آن از حدود طبیعی خارج شود، نیاز به بررسی و رسیدگی وجود دارد.

شکل (۶) اثر تراز آب بالادست را بر میزان دبی نشت عبوری از پی ماسه‌ای در حالت‌هایی که عمق پرده آب‌بند متفاوت است را نشان می‌دهد. بدیهی است که دبی نشت عبوری از پی با افزایش تراز آب مخزن افزایش می‌یابد. اما چگونگی این تغییرات با استفاده از رابطه خطی (۹) قابل بیان است. افزایش ارتفاع آب مخزن منجر به افزایش فشارهای منفذی، نیروی زیر فشار و دبی نشت در قسمت پایین دست سپری می‌گردد. همچنین این افزایش تراز آب افزایش شیب هیدرولیکی را به همراه دارد که در نسبت‌های کمتر عمق پرده آب‌بند موجب جوشش در محدوده پایین دست پرده آب‌بند می‌گردد. رابطه خطی (۹) برای مدیریت تراز آب مخزن بالادست و میزان دبی نشت در پایین دست پرده آب‌بند در شرایط مختلف ارائه شده است.

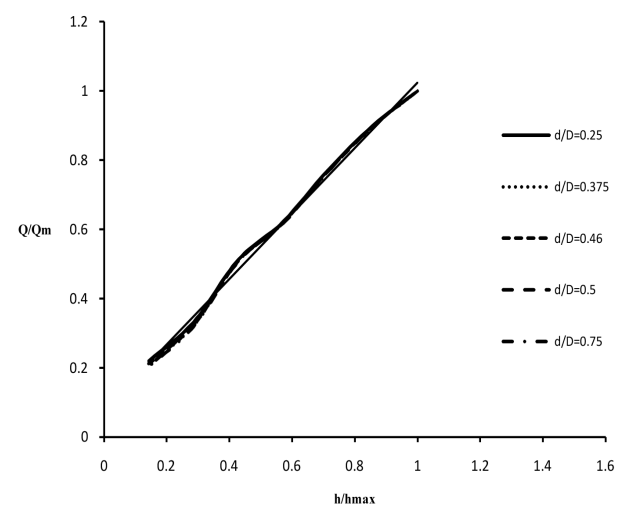
با توجه به این شکل، می‌توان این‌طور بیان نمود که در هر موقعیت معین دیواره سپری، دبی نشت با افزایش عمق دیواره کاهش می‌یابد. این امر با توجه به افزایش طول خطوط جریان خزشی و کاهش شیب متوسط هیدرولیکی از رابطه داری نیز قابل استنباط است.

سدهای خاکی و بندهای انحرافی اهمیت دارد که این موضوع با بکارگیری پرده آب‌بند با عمق‌های مختلف در پی ماسه‌ای در مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده شد. تأثیر عمق پرده آب‌بند بر روی دبی نشت به این صورت تشریح گردید که با افزایش عمق پرده آب‌بند، دبی نشت نیز کاهش می‌یابد. روند کاهش دبی نشت با توجه به منحنی شکل (۵) این‌گونه تشریح می‌شود که شیب خط‌های مماس بر منحنی در ابتدا افزایش یافته و سپس d/D در محدوده‌ای بین ۰/۴۵ تا ۰/۷۵ کاهش می‌یابد. نسبت Q/Q_0 به تغییرات عمق پرده آب‌بند در این محدوده تقریباً ثابت بوده و این موضوع بیانگر آن است که تغییر محسوس و چشمگیری در کاهش نشت با افزایش عمق پرده آب‌بند مشاهده نمی‌شود.

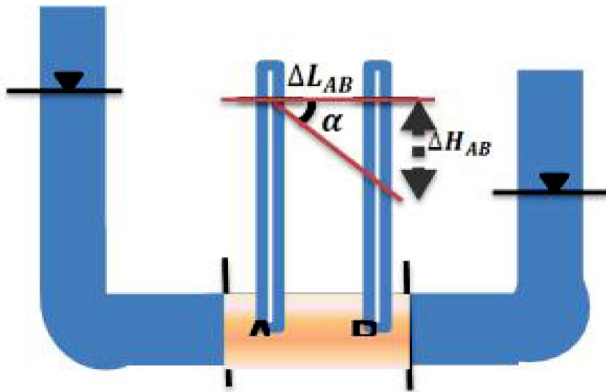
برای شروع آزمایش عمق ۱۰ سانتی‌متری به عنوان حداقل عمق پرده آب‌بند ($d/D=0.25$) انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، مقدار Q/Q_0 در این نسبت بیشترین مقدار دبی نشت را



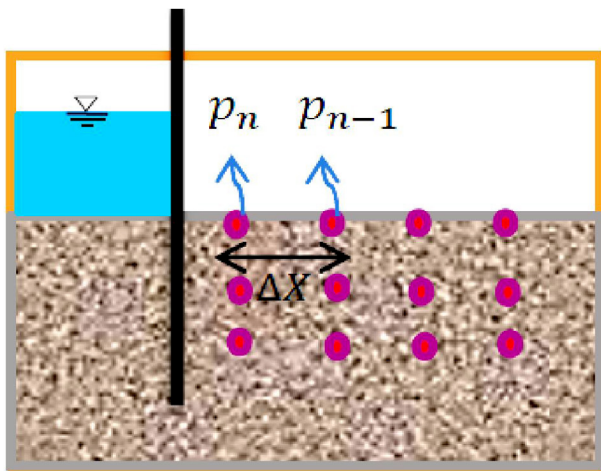
شکل (۵): اثر عمق پرده آب‌بند بر میزان نشت



شکل (۶): اثر تراز آب بالادست بر میزان نشت برای نسبت‌های مختلف عمق پرده آب‌بند



شکل (۸): شیب هیدرولیکی



شکل (۹): مقطعی از پیزومترهای پایین دست

$$\frac{Q}{Q_m} = 0.9451 \left(\frac{h}{h_m} \right) + 0.0787 ; \quad (11)$$

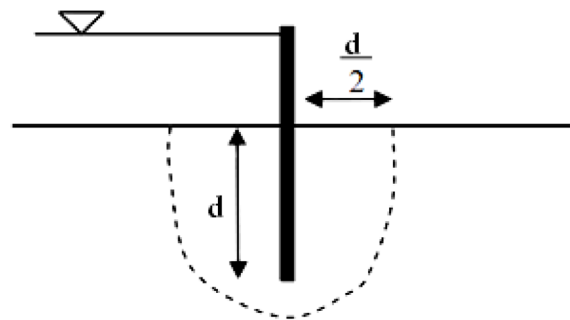
$$R^2 = 0.9955$$

گرادیان‌های افقی به دست آمده در شکل (۱۰) با تفریق فشارهای بالابر ثبت شده توسط پیزومتر در دو نقطه افقی متوالی در منشور انتهایی پایین دست پرده آب‌بند (اختلاف فشار پیزومتریک) و تقسیم آن بر فاصله افقی دو نقطه (۱۰ سانتی‌متر) مطابق رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) به دست آمده‌اند (شکل‌های (۸) و (۹)). در تمامی مراحل این آزمایش‌ها، جوشش پی ماسه‌ای به دقت مورد بررسی قرار گرفته و محدوده مناسب برای کنترل این پدیده، در جدول (۲) ارائه گردیده است. همان‌طور که در جدول (۲) نیز مشاهده می‌شود، در نسبت‌های d/D کمتر از ۰/۴۶ از عمق پرده آب‌بند و نسبت‌های ترازهای مختلف آب مخزن بالادست جوشش در هر دو نوع عمومی و موضعی رخ داده است که بیانگر نامساعد بودن عمق‌های پرده آب‌بند بکار گرفته شده در این حالت‌ها است. این موضوع در شکل (۱۰-الف) که تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به عمق پرده آب‌بند (d/D) را نمایش می‌دهد، این‌طور بیان می‌شود که در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۷۵ برای نسبت d/D ، شیب هیدرولیکی کمتر از ۰/۲ بوده و تا به صفر می‌رسد که با توجه به جدول (۱) عدم تراوش در پایین دست

$$\frac{Q}{Q_m} = 0.9451 \left(\frac{h}{h_m} \right) + 0.0787 ; \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9955$$

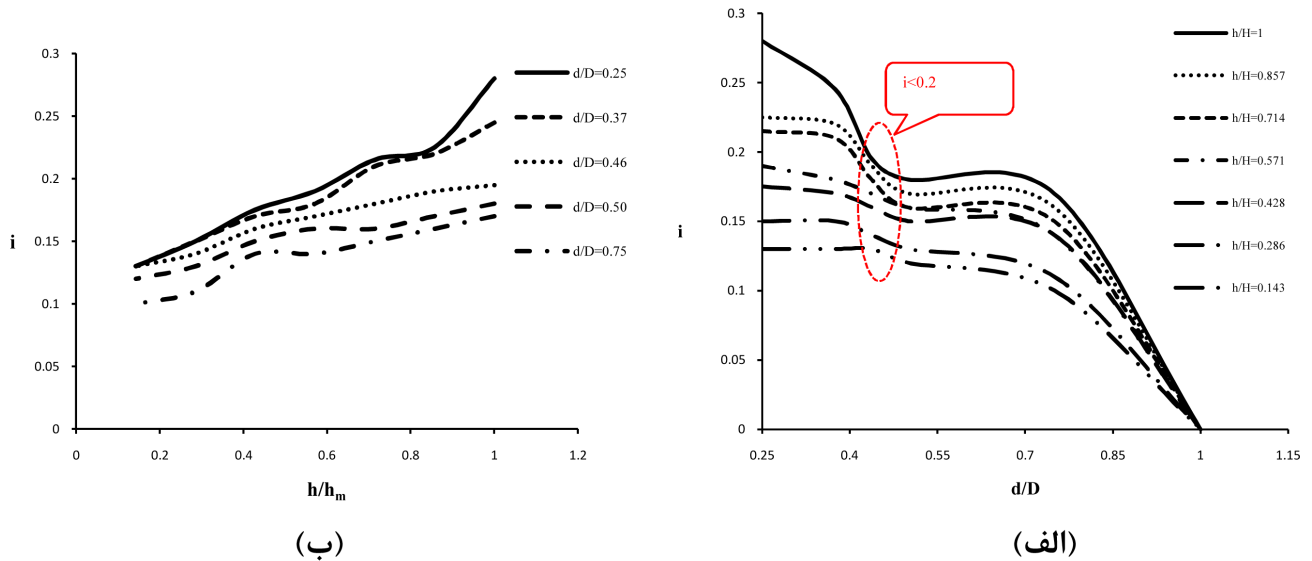
۳-۳- بررسی پدیده جوشش و فرسایش درونی
آزمایش‌هایی که توسط ترازقی صورت گرفته است، نشان می‌دهند که روان‌شدگی ماسه‌ها و فرسایش درونی آن‌ها در فاصله $d/2$ از سپری اتفاق می‌افتد (شکل (۷)) که در آن d عمق مدفون سپری است. در منشوری به عمق d و عرض $d/2$ روان‌شدگی ماسه پیش می‌آید که این محدوده در طراحی عمق سپری در پی سدهای خاکی و بندهای انحرافی بسیار مهم است و چنانچه کنترل نشود، موجب روان‌شدگی و افزایش شیب هیدرولیکی و در نهایت نیز منجر به خرابی در پایین دست پرده آب‌بند می‌گردد.



شکل (۷): محدوده روان‌شدگی و احتمال جوشش ماسه در پای سپری

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، از ماسه تمیز ساحلی در پی مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه به عنوان مصالح پی استفاده شد. پرواضح است که این خاک یکی از بدترین نوع مصالح برای پی سازه‌های آبی محسوب می‌شود. زیرا بر اثر بالا رفتن نیروی نشست و برابر شدن نیروی نشست با وزن مستغرق ذرات، پی ماسه‌ای رفتار جدید و نامتعارفی را از خود بروز می‌دهد. مشاهدات عینی و آزمایشگاهی حاکی از آن است که منشور انتهایی در پایین دست پرده آب‌بند با بالا رفتن گرادیان هیدرولیکی در آستانه جوشش قرار می‌گیرد. با افزایش عمق پرده آب‌بند این پتانسیل جوشش به تدریج کاهش یافته و از حالت بحرانی خارج می‌گردد. برای بررسی دقیق‌تر اثر عمق پرده آب‌بند بر پدیده جوشش و فرسایش درونی در هر حالت آزمایش، شیب هیدرولیکی افقی محاسبه گردید و نتایج در شکل‌های (۷) تا (۱۰) ارائه شده است.

$$i = \tan(\alpha) \Leftrightarrow i = \frac{\Delta H_{AB}}{\Delta L_{AB}} \quad (10)$$



شکل (۱۰): تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به: الف) نسبت‌های عمق آب‌بند (d/D)، ب) ترازهای مختلف آب بالادست (h/h_m)

جدول (۲): مشاهدات آزمایشگاهی برای تعیین محدوده حساس به جوشش و فرسایش درونی

d/D	h/h_m	d/D	h/h_m	d/D	h/h_m	d/D	h/h_m
۰/۷۵	—	۰/۵۰	—	۰/۴۶	—	۰/۴۰	جوشش موضعی**
—	—	—	—	—	—	—	جوشش موضعی
—	—	—	—	—	—	—	جوشش موضعی
—	—	—	—	—	—	—	جوشش موضعی
—	—	—	—	—	—	—	جوشش موضعی
—	—	—	—	—	—	—	جوشش موضعی
—	—	—	—	—	—	—	جوشش موضعی
—	—	—	—	—	—	—	جوشش موضعی

* منظور از جوشش عمومی، به وجود آمدن جوشش در تمام طول پایین دست پرده آب‌بند است.
 ** منظور از جوشش موضعی، اتفاق افتادن جوشش به صورت نقطه‌ای در پایین دست پرده آب‌بند است.
 در سایر مواردی که در جدول چیزی ذکر نشده، جوشش اتفاق نیفتاده است.

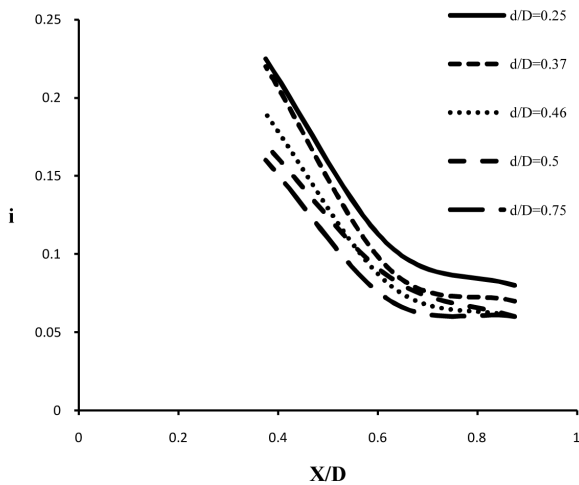
مشخص شده است). زیرا هزینه اجرای هر واحد طول عمق پرده آب‌بند در نسبت‌های بالا به هیچ عنوان مقرون به صرفه نیست. نصب پرده آب‌بند در اعماق زیاد با محدودیت‌های زیادی همراه بوده و هزینه اجرا به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد. بنابراین مبنای گزینش معیار مناسب برای اجزای آب‌بندی‌کننده بکارگیری نگرش مهندسی اقتصادی در کنار نتایج آزمایشگاهی است.

با توجه به شکل (۱۱) می‌توان گفت که گرادیان هیدرولیکی با دور شدن از پرده آب‌بند کاهش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد و این کاهش با پایین آمدن تراز آب بالادست ملموس‌تر خواهد بود. همچنین این کاهش با افزایش عمق پرده آب‌بند پررنگ‌تر است؛ به گونه‌ای که در نسبت عمق‌های d/D برابر با ۰/۴۶ و بالاتر، چشمگیرتر می‌شود؛ به طوری که مقدار گرادیان هیدرولیکی به کمتر از ۰/۲ کاهش می‌یابد و این امر بیانگر این است که با کاهش گرادیان هیدرولیکی مقدار نیروی زیر فشار

سپری مشاهده می‌شود. در شکل (۱۰-ب) تغییرات گرادیان هیدرولیکی را نسبت به ترازهای مختلف آب مخزن بالادست نشان می‌دهد. آنچه که به وضوح در آن قابل مشاهده بوده، این است که مقدار شیب هیدرولیکی به ازای نسبت عمق‌های مختلف پرده آب‌بند با افزایش نسبت تراز آب مخزن بالادست افزایش می‌یابد. همچنین میزان گرادیان هیدرولیکی در منشور انتهایی پای سپری در یک تراز آب مخزن بالادست با کاهش نسبت عمق پرده آب‌بند افزایش می‌یابد.

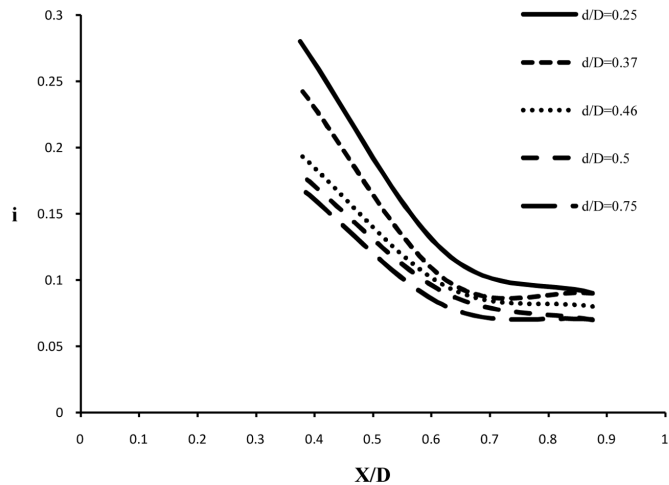
همان‌طور که در شکل (۱۰) نیز مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت آب بالادست حالت (الف) مقدار گرادیان هیدرولیکی برای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند کاهش می‌یابد و روند شیب منحنی در ابتدا بسیار زیاد است و بعد کندتر می‌شود و در نهایت نیز d/D در محدوده‌ای بین ۰/۴۵ تا ۰/۷۵ تقریباً ثابت می‌شود که از نظر اقتصادی، مقدار ۰/۴۶ برای نسبت عمق پرده آب‌بند مناسب‌ترین عمق است (در شکل با خط‌چین

Chart For $h/h_{max}=0.857$



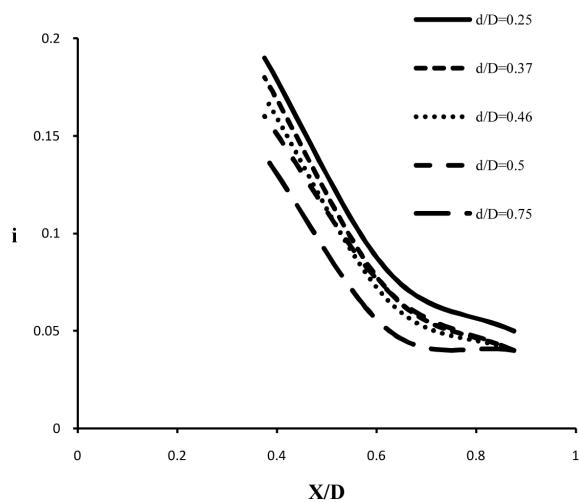
(ب)

Chart For $h/h_{max}=1$



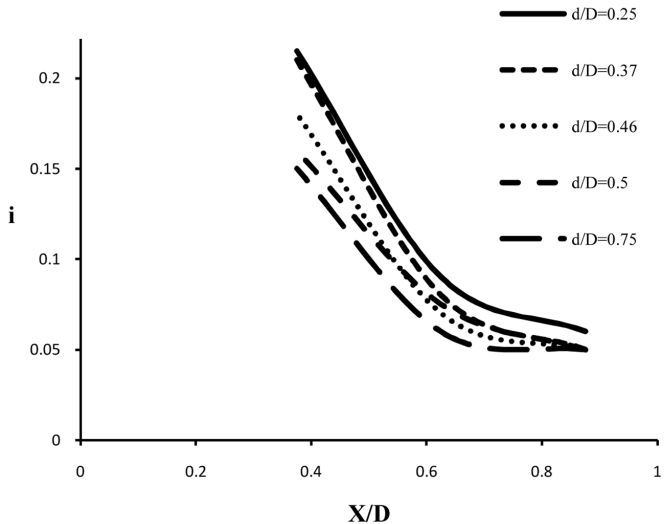
(الف)

Chart For $h/h_{max}=0.571$



(د)

Chart For $h/h_{max}=0.714$



(ج)

شکل (۱۱): تغییرات گرادیان هیدرولیکی به نسبت‌های فاصله‌های (الف، ب، ج، د) از پرده آب‌بند برای ترازهای متفاوت آب بالادست

است.

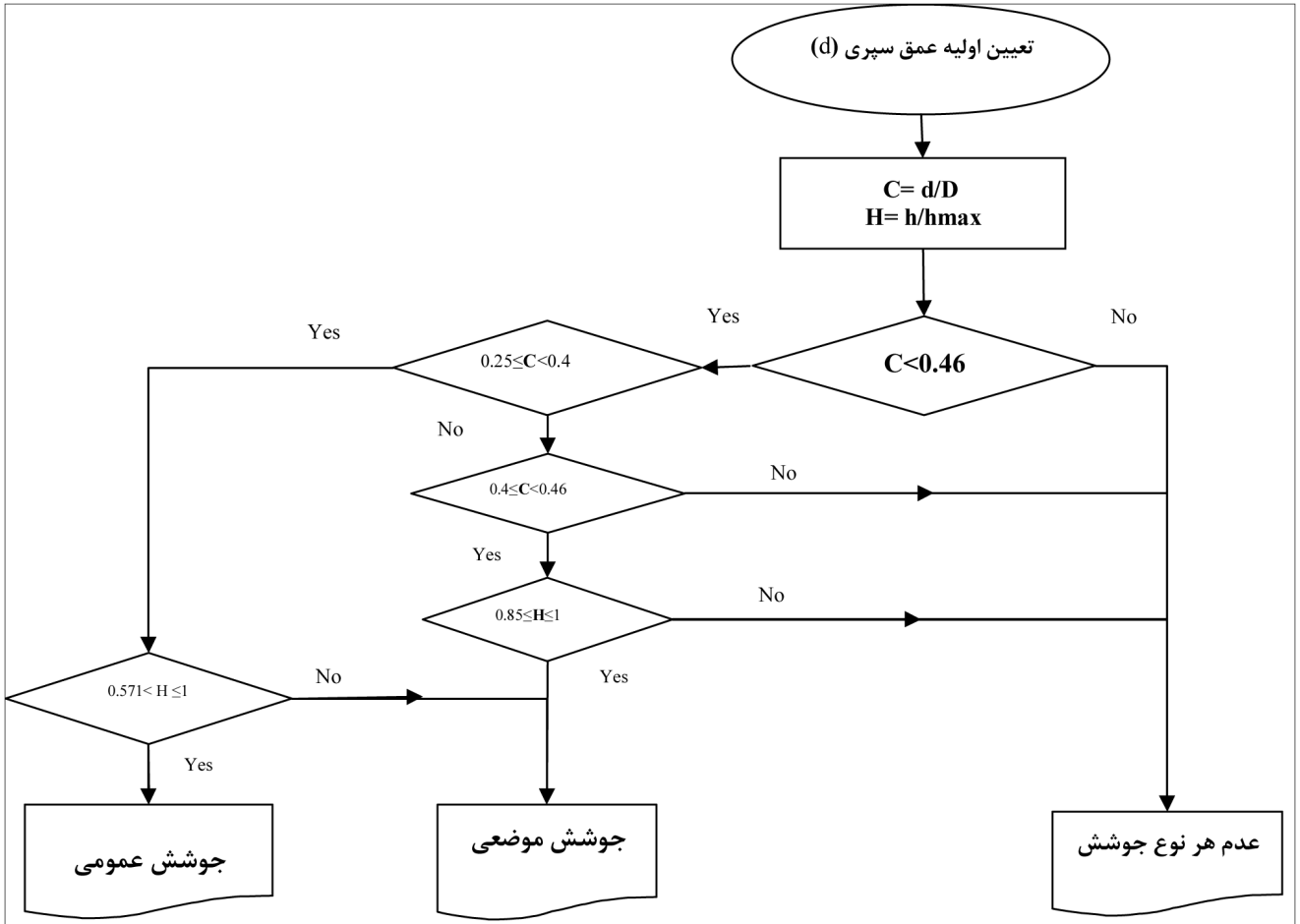
۳-۴-۱- شیب خروجی

همان‌گونه که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود مقادیر به دست آمده از روش اجزای محدود با داده‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقدار گرادیان خروجی نسبت به عمق‌های مختلف پرده آب‌بند برای دو تراز ماکزیمم آب بالادست (۰/۸۷۵ و $h/h_m=1$) به روش اجزای محدود محاسبه شده که نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارای دقت قابل‌قبولی بوده و رفتار تغییرات نمودار آن‌ها مشابه نتایج و نمودارهای آزمایشگاهی است. تنها نکته مهم این است که روش اجزای محدود مقدار گرادیان هیدرولیکی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کمتر برآورد

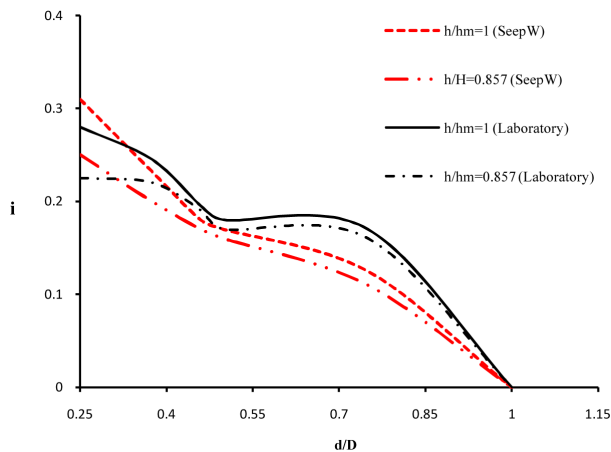
در محدوده بحرانی کاهش می‌یابد که این امر از به وقوع پیوستن پدیده مخرب جوشش در این محدوده جلوگیری می‌کند. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، حالت (الف) گرادیان هیدرولیکی برای بحرانی‌ترین حالت تراز آب بالادست (که دارای بیشترین پتانسیل نسبت به حالات دیگر است) در نسبت d/D برابر با ۰/۴۶ در بازه صفر تا ۰/۲ قرار گرفته است که جوشش یا تراوش با توجه به جدول‌های (۱) و (۲) رخ نمی‌دهد.

۳-۴-۲- واسنجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

در این مطالعه برای حل معادله لاپلاس حاکم بر جریان ماندگار در محیط متخلخل از نرم‌افزار $SEEP/W$ (جزئی از بسته نرم‌افزاری $GEOSTUDIO2007$) مبتنی بر روش اجزای محدود استفاده شده



شکل (۱۲): فلوجارت کلی تعیین عمق پرده آببند برای پی ماسه‌ای مدل

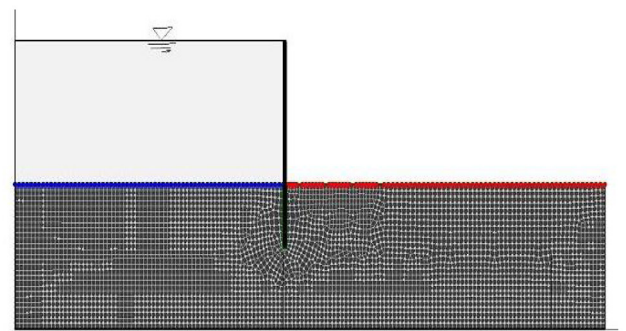


شکل (۱۵): ارزیابی روش‌های مختلف در برآورد گرادیان خروجی

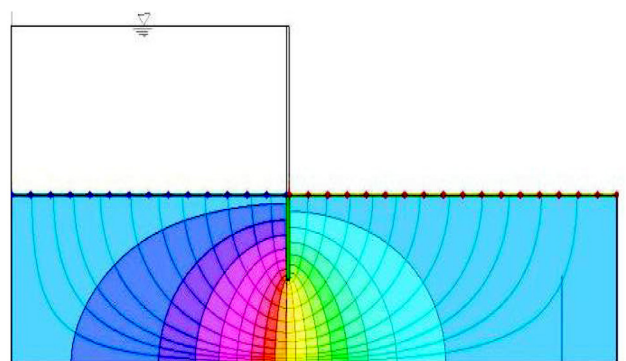
می‌کند و این مهم باید در طراحی اجزای آببند سازه‌های هیدرولیکی مستقر بر پی‌های ماسه‌ای در نظر گرفته شود.

۳-۲-۴- دبی نشت

شکل (۱۶) نتایج برآورد شده دبی نشت، با استفاده از روش اجزای محدود در قیاس با نتایج آزمایشگاهی است. همان‌طور که مشاهده



شکل (۱۳): شبکه‌بندی مدل عددی



شکل (۱۴): اجرای مدل عددی

- نتایج به دست آمده در مورد رابطه بین تراز آب بالادست و دبی نشت در حالات مختلف، می‌تواند در مدیریت تراز آب مخزن در شرایط بحرانی و تداخل جبهه‌های آب شور و شیرین مورد استفاده قرار گیرند.

- برای نشان دادن این که خطر فرسایش درونی و جوشش کاهش یافته است، چگونگی وقوع پدیده جوشش و فرسایش درونی با استفاده از مشاهدات آزمایشگاهی و مفهوم گرادیان هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش عمق پرده آب‌بند این کاهش قابل ملاحظه‌تر است؛ به گونه‌ای که در نسبت عمق $d/D=0.46$ محسوس‌تر می‌شود و مقدار گرادیان هیدرولیکی به کمتر از 0.2 کاهش می‌یابد که بیانگر آن است که مقدار نیروی زیر فشار در محدوده بحرانی با کاهش گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد و این امر از به وقوع پیوستن پدیده مخرب جوشش در این محدوده جلوگیری می‌کند.

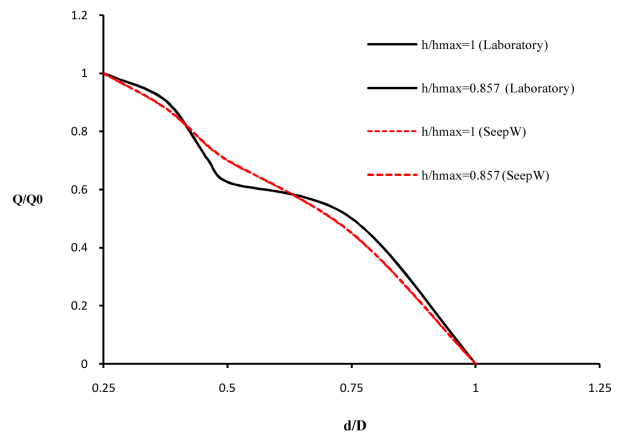
- شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار *SEEP/W* (جزئی از بسته نرم‌افزاری *GEOSTUDIO2007*) مبتنی بر روش اجزای محدود نشان داد که نتایج نرم‌افزار با داده‌های آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از تمامی کسانی که در تهیه و ساخت وسیله آزمایشگاهی همکاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۶- مراجع

- [1] Ghobadian, R. and Khodaei, K.; "Effects of Cutoff Wall and Drain on Uplift Pressure and Exit Gradient under Hydraulic Structure by Numerical Solution of General Equation of Fluid Flow in Soil Using Finite Volume Method," *Journal of Water and Soil*, Vol. 23, No. 4, pp. 148-160, 2009 (in Persian).
- [2] Rahimi, H.; "Earth Dams," *Tehran University Publications*, 2002 (in Persian).
- [3] Terzaghi, K.; "Theoretical Soil Mechanics," *John Wiley and Sons*, New York, 1943.
- [4] Bennet, P. T, "The Effect of Blankets on Seepage through Previous Foundation," *Trans., ASCE*, Vol. 111, 1946.
- [5] McNamee, J.; "Seepage into a Sheeted Excavation," *Geotechnique, the Institution of Civil Engineers*, London, Vol. 4, No. 1, pp. 229-241, 1949.
- [6] Leliavsky, S.; "Design Text Book in Civil Engineering: Design of Dams For Percolation and Erosion," *Chapman and Hall Press*, 1965.
- [7] Neuman, S. P. and Witherspoon, P. A.; "Finite Element Method for Analyzing Steady Seepage with a Free Surface," *Water Resources Research*, Vol. 6, pp. 889-



شکل (۱۶): ارزیابی روش‌های مختلف در برآورد دبی نشت

می‌شود روش اجزای محدود با دقت قابل قبولی نتایج را نسبت به داده‌های آزمایشگاه برآورد کرده است. نمودارهای منتج از روش اجزای محدود با نمودارهای آزمایشگاهی که برای نسبت‌های حداکثر تراز آب بالادست $(h/h_m=1 و 0.857)$ و عمق‌های مختلف پرده آب‌بند در شکل (۱۶) نشان داده شده است، رفتاری مشابه دارند.

نتایج نمودارهای مربوط به شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات گرادیان هیدرولیکی و دبی نشت نسبت به عمق پرده آب‌بند است. دقت قابل قبول روش اجزای محدود در برآورد دبی نشت و شیب خروجی در مقایسه با نتایج تجربی در شرایط متناظر است. در نتیجه می‌توان از بسته نرم‌افزاری فوق با اطمینان قابل قبولی برای برآورد زیر فشار، شیب خروجی و دبی نشت استفاده نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ملاک انتخاب یک نسبت به عنوان معیار بهینه این است که با افزایش آن نسبت (عمق پرده آب‌بند) تغییر محسوس و چشمگیری در کاهش نشت مشاهده نشود. این فرضیه از جنبه کاربردی نیز قابل پشتیبانی است. زیرا هزینه اجرای هر واحد طول عمق پرده آب‌بند در اعماق بالا اصلاً مقرون به صرفه نیست. در اعماق زیاد نصب پرده آب‌بند با محدودیت‌های زیادی همراه بوده و هزینه اجرا به طور تصاعدی افزایش می‌یابد. بنابراین مبنای گزینش معیار مناسب برای اجزای آب‌بندی‌کننده بکارگیری نگرش مهندسی اقتصادی در کنار نتایج آزمایشگاهی است. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری نمود:

- نتایج به دست آمده فقط برای طراحی سپری‌ها و دیوارهای سیل‌بند ساحلی مستقر بر پی‌های آبرفتی و با هدف کنترل جوشش و کاهش نشت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
- در نسبت عمق $d/D=0.46$ با نسبت $h/h_m=1$ پدیده جوشش رخ نمی‌دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی به‌طور چشمگیری کاهش یافته است.

- [19] Yifeng, C.; Chuangbing, Z. and Hong, Z.; "A Numerical Solution to Seepage Problems with Complex Drainage Systems," *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, No. 3, pp. 383–393, 2008.
- [20] Pakbaz M. S.; Dardaei, A. and Salahshoor, J.; "Evaluation of Performance of Plastic Concrete Cutoff Wall in Karkheh Dam using 3D Seepage Analysis and Measurement," *Journal of Applied Sciences*, Vol. 9, No. 4, pp. 724–730, 2009.
- [21] Bouchelghoum, F. and Benmebarak, N.; "Critical Hydraulic Head Loss Assessment for a Circular Sheet Pile Wall under Axisymmetric Seepage Conditions," *Studia Geotechnicaet Mechanica*, Vol. 33, No. 4, 2011.
- [22] Sedghi-Asl, M.; Rahimi, H. and Khaleghi, H.; "Laboratory Investigation of the Seepage Control Measures under Coastal Dikes," *Experimental Techniques*, Vol. 36, No. 1, pp. 61–71, 2012.
- [23] Benmebarek, N.; Bensmaine, A. and Benmebarek, S.; "Critical Hydraulic Head Loss Inducing Sandy Cofferdam Failure by Numerical Approach," *Akademik Patforth*, Vol. 32, pp. 437–445, 2013.
- [24] Zare, M.; Javer, H.; Soltanshah, M. and Shojaei, A.; "Water Escape Situation Improvement and Grout Curtain Construction for Left Side of Tangab Dam," *5th National Geological Conference of Payam-e Noor University*, 2011 (in Persian).
- [25] Naeimi, M. Gh. and Bayati, H.; "Investigation the Effect of Grout Wall and Curtain on Seepage Decrease with by Increase in Diffusion Depth in Right Side Axis of Mirzaye Shirazi Dam by Numerical Method," *6th National Congress on Civil Engineering*, Semnan, Iran, 2011 (in Persian).
- [26] Shahraki, S. and Azhdari-Moghaddam, M.; "Investigation of Grout Wall Location Relation to the Dam Axis on Seepage Flux and Speed, Water Stress and Pressure for Saradan Dam," *7th National Congress on Civil Engineering, Sistan and Baluchistan*, 2013 (in Persian).
- [27] Rahnamarad, J.; Khamoushian, F. and Mehr-Motlagh, M.; "Executive Operation and Performance of Grout Curtain Injection of Bijar City Dam," *8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment*, Mashhad, Iran, 2013 (in Persian).
- [28] Poureskandar, S. and Farsadizadeh, D.; "Laboratory and Numerical Investigation of the Effect of Grout Curtain on the Seepage through Layering Foundation," *11th Iranian Hydraulic Conference*, Urmia, 2012 (in Persian).
- [8] Javan, S. M. and Farjood, M. R.; "Evaluation of Foundation Seepage at Doroodzan Earth Dam," *Proceeding of the International Conference on Environmental Management, Geo-Water and Engineering Aspects*, Feb. 8–11, Wollongong, Aug., A. A. Balkema, 1993.
- [9] Abolpour, B.; "Seepage Estimation Methods, Uplift and Undercutting in Hydraulic Structures with Introducing Computer Based Model," *MSc Thesis*, Shiraz University, 1994 (in Persian).
- [10] Jabbari, A.; "Solution of Water Flow 3D Mathematical Model in Heterogeneous Porous and Anomalous Media by Means of Finite Volume Method and Desired Meshing," *MSc Thesis*, Tehran University, 1997 (in Persian).
- [11] Sharifi, A. and Ataee-Ashtiani, B.; "Analysis of Seepage through Earth Dam by Using Numerical Boundary Element Method," *MSc Thesis*, Sharif University, 2003 (in Persian).
- [12] Jie, Y.; Jie, G.; Mao, Z. and Li, G.; "Seepage Analysis Based on Boundary-Fitted Coordinate Transformation Method," *Computer and Geotechnics*, Vol. 31, pp. 279–283, 2004.
- [13] Sedghi-Asl, M.; Rahimi, H. and Khaleghi, H.; "Optimal Positioning of Vertical Sheet Pile to Reduce Seepage and Flow under Hydraulic Structures Using Numerical Model," *5th Iranian Hydraulic Conference*, Kerman, Iran, 2005 (in Persian).
- [14] Sayyadzadeh, F.; "Seepage Analysis through Foundation of Layered Soils Using Finite Element Method," *6th Iranian Hydraulic Conference*, Shahrekord, 2007 (in Persian).
- [15] Sedghi-Asl, M.; Rahimi, H. and Khaleghi, H.; "Laboratory Investigation on Seepage Control through Alluvial Foundation," *Amirkabir Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 11-22, 2010 (in Persian).
- [16] Sedghi-Asl, M.; Rahimi, H. and Khaleghi, H.; "Laboratory Investigation of the Seepage Control Measures under Coastal Dikes," *Experimental Techniques*, Vol. 36, No. 1, pp. 61–71, 2010.
- [17] No. 370 a Journal; "Guidelines for Safety Assessment and Emergency Action Plan for Dams and Appurtenant Structures," *Ministry of Energy, Bureau of Engineering and Technical Criteria for Water and Wastewater*.
- [18] Richards, K. and Reddy, K.; "Critical Appraisal of Piping Phenomena in Earth Dams," *Bull Eng. Geol Environ.*, Vol. 66, pp. 381–402, 2007.

- [31] Koo, M. H. and Leap, D. I.; "Modeling Three-Dimensional Ground Water Flows by the Body-Fitted Coordinate (BFC) Method (I): Stationary Boundary Problems," *Transport in Porous Media*, Vol. 30, pp. 217–339, 1998.
- [32] Lee, K. K. and Leap, D. I.; "Simulation of a Free-Surface and Seepage Face Using Boundary-Fitted Coordinate System Method," *J. Hydrology*, Vol. 196, pp. 297–309, 1997.
- [33] Streeter V. L. and Wylie, E. B.; "Fluid Mechanics," *McGraw-Hill*, 1979.
- [29] Ahmadi, H.; Gonbadi, M. B. and Rahimi, A.; "Investigation the Effect of Grout Curtain on the Seepage Decrease through Chooman Dam and Optimization of its Volume," *8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment*, Ferdowsi University, 2013 (in Persian).
- [30] Alavi, S. R. and Maarefvand, P.; "Seepage Analysis of Javeh Dam Foundation Using SEEP/W Software," *4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, Iran, 2000 (in Persian).