

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سپری‌های قائم و مایل در کنترل نشت و پدیده جوشش در پی سازه‌های آبی

مهدی یوسفی\*<sup>۱</sup>، محمد صدقی اصل<sup>۲</sup>، منصور پرویزی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد ژئوتکنیک دانشگاه یاسوج

۲. استادیار گروه خاک‌شناسی دانشگاه یاسوج

۳. استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه یاسوج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۷/۲۳)

### چکیده

در زمینه نشت از پی سازه‌های آبی تا کنون تحقیقات فراوانی، به‌ویژه در قالب مدل‌های عددی، انجام شده است که برای ارزیابی صحت آن‌ها به داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی نیاز 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 و ارتفاع ۰/۸ و عرض ۰/۴ متر، با استفاده از اسکلت فولادی و جداره‌های پلکسی‌گلاس ساخته و آماده شد. پرده آب‌بند نیز، به منزله متغیر عمقی، از ورقه پلکسی‌گلاس ساخته شد. در این تحقیق تأثیر موقعیت، عمق دیواره سپری بر مقدار دبی نشت، و گرادیان خروجی در قالب نمودارهای بی‌بعد آمده است. این تحقیق نشان داد در صورت استفاده از پرده آب‌بند قائم در نسبت عمق پرده آب‌بند ( $d$ ) به ضخامت پی ( $D$ ) برابر  $d/D = 0.44$  و پرده آب‌بند مایل در نسبت  $d/D = 0.34$  با بیشترین نسبت تراز آب بالادست  $h/h_m = 1.0$  پدیده جوشش رخ نمی‌دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی در محدوده مجاز و مناسبی قرار دارند.

**کلیدواژگان:** پرده آب‌بند، پی آبرفتی، جوشش، سازه‌های هیدرولیکی، نشت.

### مقدمه

به علت اختلاف بار آبی که دو طرف سازه‌های آبی احداث شده بر پی‌های نفوذپذیر وجود دارد، همواره از پی این‌گونه سازه‌ها آب نشت می‌کند. اثر تراوش از خاک زیر این سازه‌ها را می‌توان در سه بخش ایجاد نیروی زیرفشار، دبی نشت، و گرادیان خروجی طبقه‌بندی کرد. نیروی زیرفشار، که مقاومت برشی بین سد و پی آن را کاهش می‌دهد، باعث ایجاد تنش کششی و کاهش ضریب اطمینان پایداری در برابر پدیده‌های لغزش و واژگونی می‌شود. چنانچه در قسمت انتهایی سدها سرعت نشت جریان آب افزایش یابد، ممکن است سبب حرکت ذرات خاک شود. این پدیده تسریع‌کننده پدیده مهم دیگری به نام زیرشویی می‌شود. چنانچه زیرشویی کنترل نشود، ممکن است موجب تخریب این‌گونه سازه‌ها شود. هدف از احداث پرده تزریق و پرده آب‌بند و سایر روش‌های آب‌بندی جلوگیری یا کاهش این حرکت به سمت پایاب است. گرادیان خروجی نیز مهم‌ترین معیار طراحی برای ضریب اطمینان نسبت به زیرشویی است (Ghobadiyan *et al.*, 2009). در چندین دهه گذشته بسیاری از محققان مسائل نشت

را به صورت تحلیلی و عددی بررسی کرده‌اند. در اغلب این مطالعات صحت نتایج مدل‌های عددی با داده‌های صحرایی ارزیابی شده‌اند. با توجه به اینکه دقت برداشت داده‌های آزمایشگاهی به مراتب از داده‌های صحرایی بیشتر است، مطالعه و تحلیل مسئله نشت از پی‌های آبرفتی به کمک یک مدل آزمایشگاهی می‌تواند به گونه‌ای علمی‌تر روابط مورد نیاز جهت طراحی آن‌ها را استخراج و نیز صحت روابط تجربی را ارزیابی کند. اهمیت شبیه‌سازی آزمایشگاهی مسئله نشت را می‌توان در دو موضوع خلاصه کرد؛ اول اینکه شرایط پی و خصوصیات زمین‌شناسی سایت مورد بررسی در صحرا و مدل غالباً تفاوت زیادی با هم دارند و دوم اینکه با تقریب معادلات ریاضی حاکم بر حرکت آب زیرزمینی عموماً مقداری عدم اطمینان وارد مسئله می‌شود و انتظار می‌رود بین نتایج مدل‌های ریاضی و آزمایشگاهی تفاوت محسوسی وجود داشته باشد.

اولین مطالعات انجام‌شده درباره بهینه‌سازی جریان نشتی از پی سدهای خاکی را ترزاقی انجام داد. وی با آنالیز نشت حاصله از بدنه و پی سدهای خاکی، با توجه به ضریب نفوذپذیری مصالح متشکله، نتایج خویش را ارائه کرد (Rahimi, 2009). نتیجه کار وی نشان داد هر چه نسبت نفوذپذیری هسته

Sedghi Asl *et al* (2010a) روش‌های مختلف کنترل آثار نشت را در زیر دایک‌های ساحلی با بهره‌گیری از یک مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها طول بهینه کفبند و عمق بهینه دیواره‌های سپری را به گونه‌ای ارائه کردند که مقدار نیروی زیرفشار وارد بر خاکریز حفاظتی حداقل شود. ایشان نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی را با نظریه‌های Bligh (1912) و Lane (1934)، در شرایط متناظر، قیاس کردند و نتیجه گرفتند روش Lane (1934) مقدار نیروی زیرفشار و احتمال بروز پدیده جوشش را کمتر از روش Bligh (1912) برآورد می‌کند.

Richards and Reddy (2007) به بررسی جامع پیشینه تحقیق در زمینه پدیده نشت آب در خاک و چگونگی وقوع پدیده فرسایش درونی در خاک‌های مختلف پرداختند. نتایج بررسی ایشان نشان داد اولین ابزارهای طراحی سدهای خاکی جهت مقاومت در برابر پدیده نشت در سال‌های ۱۹۱۰ تا ۱۹۳۵ توسعه پیدا کرده است. گرادیان هیدرولیکی، که نشان‌دهنده احتمال وقوع پدیده زیرشویی است، در بدنه و پی و تکیه‌گاه‌های سد، به‌ویژه اطراف مجاری عبورکننده از داخل سد خاکی، باید کنترل شود. گرادیان هیدرولیکی بر اساس روابط نظری موجود به دانه‌بندی خاک و تخلخل و چگالی و فشار آب حفره‌ای بستگی دارد. مقدار مجاز گرادیان هیدرولیکی معمولاً با اعمال ضریب اطمینان به گرادیان بحرانی ( $i_c$ ) به دست می‌آید. بررسی سوابق اطلاعات ثبت‌شده تراوش و پدیده زیرشویی یا جوشش ماسه نشان می‌دهد مشخصات محل تأثیر شایان توجهی در مقدار واقعی گرادیان بحرانی دارد. نتایج اطلاعات آماری گذشته در جدول ۱ می‌آید (Safi *et al*, 2011).

جدول ۱. سوابق اطلاعات ثبت‌شده تراوش و پدیده جوشش ماسه

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

Bouchelghoum and Benmebarak (2011) به بررسی پدیده نشت در زمان حفاری پرداختند. آن‌ها پدیده نشت را در محیط‌های همسان و همچنین خاک چندلایه تحت جریان سیال را در حالت متقارن، طی کدنویسی در محیط FLAC، بررسی کردند. پارامترهای مختلفی بر پایداری سد موقت تأثیر می‌گذارد. ایشان تأثیر شکل حفاری و همسان و غیر همسان بودن خاک را بر کاهش ارتفاع آب بالادست، با رانش مؤثر مقاوم خاک، بررسی کردند.

نسبت به پی و پوسته کمتر باشد نشت کاهش می‌یابد. او با در نظر گرفتن عمق‌های مختلف پرده آب‌بند واقع شده در پی سد به آنالیز جریان نشت از پوسته و پی پرداخت و آنالیز را بر اساس روش شبکه جریان ترسیم‌شده برای هر حالت انجام داد (Rahimi, 2009). اثر بلانکت (پتوی رسی) و پرده آب‌بند بر جریان نشت در سدهای خاکی را ابتدا Terzaghi (1943) بررسی کرد. وی مفهوم گرادیان هیدرولیکی بحرانی (گرادیان غوطه‌وری) ( $i_c$ ) را برای کنترل فرسایش درونی<sup>۱</sup> و جوشش<sup>۲</sup> تعریف کرد و برای کنترل جوشش و فرسایش درونی ضریب اطمینانی را، که به صورت نسبت گرادیان هیدرولیکی بحرانی به گرادیان خروجی تعریف می‌شود، به صورت رابطه ۱ ارائه کرد:

$$F = \frac{i_c}{i_e} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$i_c$  گرادیان هیدرولیکی بحرانی،  $i_e$  گرادیان خروجی، و  $F$  ضریب اطمینان در مقابل زیرشویی است.

ترزاقی دو نوع عمده تخریب ناشی از نشت را 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 نشت قرار گرفته، شروع می‌شود و دوم اغتشاش و تخریب عمومی که توده‌های بزرگ‌تر از خاک را شامل می‌شود (McNamee, 1949).

Bligh (1912) فرض کرد که طول خزش جریان از پی بندهای انحرافی با مجموع طول قائم و یک‌سوم طول افقی مسیر جریان نشتی برابر باشد. بر همین اساس وی برای پی‌های مختلف جهت کنترل مناسب پدیده جوشش و متعاقب آن فرسایش درونی ضرابی را پیشنهاد کرد. Lane (1934) ضریب وزنی خویش را به صورت ( $c = \frac{L}{\Delta h}$ ) تعریف کرد که در آن  $L$  طول خزش و  $\Delta h$  اختلاف هد آب بالادست و پایین‌دست سد و  $c$  ضریب وزنی لین است. چنانچه ضریب وزنی محاسبه شده برای یک بند یا خاکریز از مقدار پیشنهادی لین بیشتر باشد، بند به لحاظ ایمنی در مقابل جوشش و فرسایش درونی مشکلی نخواهد داشت (Leliavsky, 1965).

Javan and Farjood (1993) نشت از پی سد درودزن را، در استان فارس، به کمک مدل M-SEEP، که مبتنی بر روش اجزای محدود است، ارزیابی کردند و توانایی مدل مذکور را در شبیه‌سازی نشت از پی و تکیه‌گاه‌های سد مذکور خوب توصیف کردند.

1. Piping  
2. Boiling

در این تحقیق برای تخمین خصوصیات جریان نشت از پی‌های آبرفتی یک مدل در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد. به کمک نتایج این تحقیق می‌توان صحت روش‌های تجربی را برای طرح مطمئن هیدرولیکی سازه‌های هیدرولیکی ارزیابی کرد.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

برای بررسی و کنترل نشت و گرادیان هیدرولیکی و فشار بالابر در شرایط مختلف بار آبی بالادست یک مدل آزمایشگاهی با طول و موقعیت دیواره‌های سپری مختلف ساخته شد. مدل آزمایشگاهی دارای طول ۲/۲۰، ارتفاع ۰/۸، و عرض ۰/۴۰ متر است. ضخامت پی و ارتفاع سازه ۰/۴۰ متر لحاظ شد. از ماسه ریز و تمیز ساحلی به مثابه مصالح پی استفاده شد. مصالح با تراکم یکنواخت درون فلوم ریخته شد. سپس، ورقه پلکسی به منزله سپری نصب شد. متغیر مسئله عمق سپر (عمق نفوذیافته درون پی) است که در هر حالت تغییر می‌کند. شکل ۱ تصویر مدل و شکل ۲ طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی ساخته شده را نشان می‌دهد.

اجزای مدل آزمایشگاهی عبارت‌اند از سیستم تأمین آب، تبدیل‌ها و اتصالات، پرده آب‌بند، مخازن تنظیم‌کننده تراز آب بالادست و پایین‌دست، پی ماسه‌ای به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر، توری به شماره ۱۵۰ (شماره معرف اندازه سوراخ‌ها) به کاررفته در حد فاصل انتهایی پی در پایین‌دست و مخزن نشت آب خروجی، ابزار ثبت تراز پیزومتریک، و سیستم اندازه‌گیری دبی نشت خروجی.

جنس اسکلت فلوم نبشی‌هایی از جنس فولاد بود. کف و بدنه پستی آن با ورق‌هایی از جنس فولاد و نمای روبه‌روی فلوم با ورق‌های پلکسی‌گلاس، به ضخامت ۱۰ میلی‌متر، پوشیده شد. برای ثبت داده‌های پیزومتریک در بالادست و پایین‌دست سپری در سه تراز قائم ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری از کف و هشت مقطع افقی با گام مکانی ۱۰ سانتی‌متری و در مجموع بیست و چهار پیزومتر متشکل از لوله‌های پلاستیکی شفاف با قطر کم نصب شد. انتهای دیگر پیزومترها برای سهولت قرائت روی تابلویی مخصوص نصب شد و بر تابلو کاغذی شطرنجی و مدرج چسبانده شد. ۴۰ سانتی‌متر تحتانی از عمق فلوم به پی ماسه‌ای ۴۰ سانتی‌متر بالایی آن به ارتفاع متغیر تراز آب و ارتفاع آزاد فلوم اختصاص داده شد. جریان آب در فلوم به کمک سیستم تأمین آب آزمایشگاه برقرار و دبی جریان خروجی به صورت حجمی اندازه‌گیری شد.

Sedghi Asl *et al* (2012) عوامل مؤثر بر نشت از پی دایک‌های ساحلی را بررسی کردند. ایشان یک مدل آزمایشگاهی به طول ۹ و ارتفاع و عرض ۱ متر با اسکلت فولادی و جداره‌های شیشه‌ای و پلکسی‌گلاس ساختند و مصالح پی را ماسه تمیز ساحلی در نظر گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد نسبت طول بهینه بلانکت به عمق آب مخزن و عمق پرده آب‌بند به ضخامت پی، به منظور حداقل کردن دبی نشتی و کنترل فرسایش درونی، به ترتیب ۸ و ۰/۸ است.

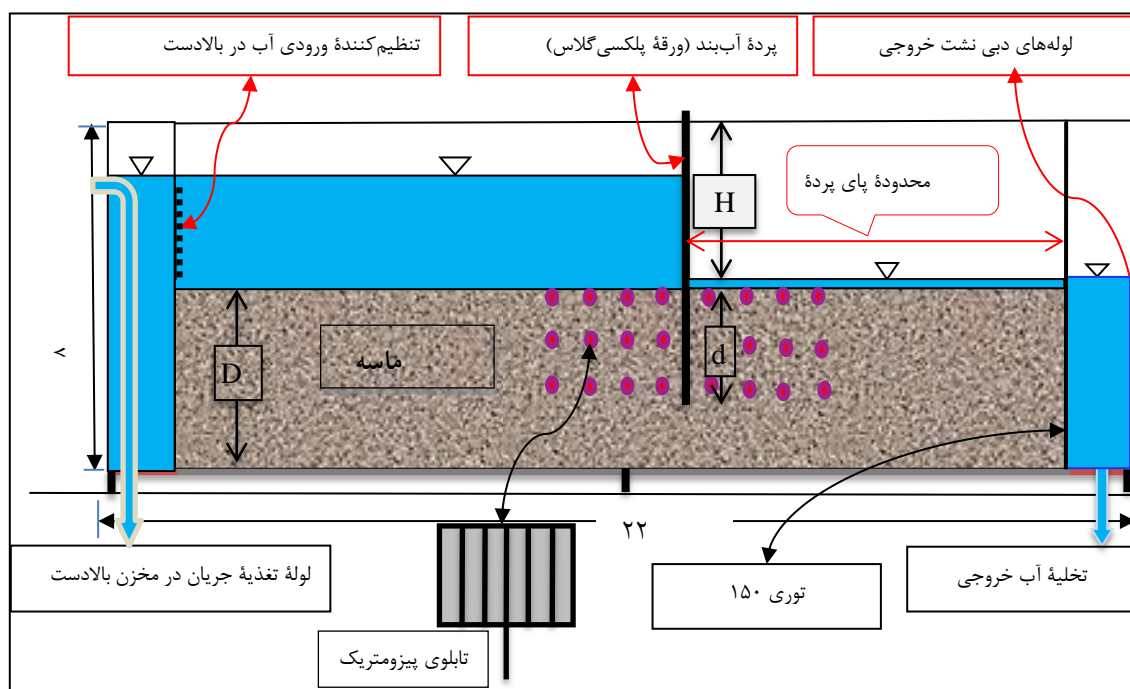
Benmebarek *et al* (2013) نشت آب را در مجاورت سد موقت در زمان حفاری، به دلیل ارتفاع آب در محیط، بررسی کردند. از نظر آن‌ها زمانی که اختلاف ارتفاع آب بالادست و پایین‌دست زیاد باشد در مجاورت سد موقت گسیختگی خاک رخ می‌دهد. ایشان به کمک نرم‌افزار FLAC ارتفاع بحرانی آب بالادست را با به‌کارگیری دیواره آب‌بند در پی ماسه‌ای تعیین کردند.

Shaikh Rezazadeh Nikoo *et al* (2012) به مطالعه آزمایشگاهی و عددی ابعاد و موقعیت بهینه دیواره‌های سپری، بلانکت، و زهکش جهت کاهش نیروی زیرفشار و دبی نشت و گرادیان خروجی در پی سدهای انحرافی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بهترین مکان قرارگیری دیواره سپری جهت کاهش نشت و شیب خروجی در انتهای کف‌بند و جهت کاهش زیرفشار بالادست کف‌بند است. آن‌ها مشاهده کردند که وجود بلانکت با هر طول دلخواه سبب کاهش توأم هر سه پارامتر هدف می‌شود. همچنین بهترین موقعیت قرارگیری زهکش جهت کاهش نیروی زیرفشار در فاصله یک‌سوم طول کف‌بند از ابتدای کف‌بند است. بسته به موقعیت عمقی و قطر زهکش، بهترین موقعیت قرارگیری زهکش جهت کاهش گرادیان خروجی می‌تواند دوسوم طول کف‌بند از ابتدای کف‌بند یا انتهای آن باشد. با نزدیک‌شدن زهکش به کف پی و افزایش قطر زهکش نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی کاهش می‌یابد.

Pour Eskandar *et al* (2012) به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر پرده آب‌بند بر نشت از پی‌های مطابق در سدها پرداختند. در تحقیق ایشان رفتار هیدرولیکی پرده آب‌بند با عمق‌های نفوذ مختلف برای خاک‌هایی با سه نوع ضریب آب‌گذاری و دو لایه‌بندی به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. مقادیر نشت و فشار پیزومتری در بیست و هشت نقطه از مدل فیزیکی برداشت و با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی شد. مقدار خطای مدل عددی به طور متوسط ۰/۲۸ درصد بود که حاکی از تطابق خوب نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی است.



شکل ۱. نمایی از مدل آزمایشگاهی ساخته شده



شکل ۲. طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی

### روش آزمایش

در این تحقیق برای مطالعه کنترل نشت و بررسی پدیده جوشش ماسه‌ای در پایین دست شش حالت کلی قرارگیری پرده آببند در نظر گرفته شد. پرده آببند در اعماق ۱۰، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۳۰ سانتی متری از پی قرار داده شد. نصب پرده آببند به جداره‌های فلوم به این طریق صورت پذیرفت که بعد از مشخص شدن محل قرارگیری آن نوارهای شیشه‌ای به عرض و ضخامت ۱ سانتی متر با فاصله‌ای به ضخامت پرده آببند روی جداره‌ها چسبانده و بعد از خشک شدن چسب‌ها پرده آببند بین نوارهای به کاررفته قرار داده شد. درزهای بین نوارهای شیشه‌ای

و پرده آببند و جداره‌های فلوم با چسب آکواریوم<sup>۱</sup> پر شدند. برای حصول اطمینان از آببندی پرده آببند و فلوم، چندین بار در فلوم آب انداخته شد تا به اصطلاح آببندی شود. بعد از مراحل فوق، مصالح ماسه‌ای پی با تراکم یکنواخت داخل فلوم ریخته شد و ارتفاع آب بالادست در هفت تراز ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتی متری از سطح روی پی و تراز آب پایین دست در تراز ۰ تنظیم شد. همان طور که اشاره شد، برای ایجاد بحرانی ترین حالت از نظر پتانسیل ایجاد فرسایش از ماسه

1. Sista

### آنالیز ابعادی

معمولاً برای شبیه سازی پدیده های فیزیکی در قالب مدل های فیزیکی یا آزمایشگاهی از تشابه ابعادی استفاده می شود. بر اساس تئوری باکینگام، پارامترهای مسئله نشت استخراج شدند. بنابراین، اعداد بدون بعد مؤثر تعیین و مطابق رابطه ۲ در تجزیه و تحلیل نتایج تحقیق به کار رفتند:

$$F(Q, Q_0, Q_m, h, d, D, h_m, p) = 0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$F(Q/Q_0, Q/Q_m, h/h_m, d/D) = 0$$

$h$  تراز آب بالادست،  $h_m$  ماکزیمم تراز آب بالادست،  $d$  عمق پرده آب بند،  $D$  ضخامت پی آب رفتی،  $Q$  دبی نشت برای هر حالت دلخواه،  $Q_0$  دبی مبنای کل به ازای حداقل عمق پرده آب بند مورد نظر جهت جلوگیری از شروع فرسایش درونی (۱۰ سانتی متر)، و  $Q_m$  حداکثر دبی نشت به ازای اعماق مختلف پرده آب بند است. در واقع، برای هر عمق پرده آب بند یک  $Q_m$  و در مجموع پنج مقدار برای آن وجود دارد.

### یافته ها و بحث

#### اثر عمق پرده آب بند قائم بر میزان نشت

تأثیر عمق پرده آب بند بر دبی نشت به این صورت تشریح می شود که با افزایش عمق پرده آب بند دبی نشت نیز کاهش می یابد. روند کاهش دبی نشت با توجه به منحنی شکل ۴ این گونه تشریح می شود که شیب خط های مماس بر منحنی ابتدا بالا می رود و سپس در محدوده  $0.43 < d/D < 0.75$  کاهش می یابد که نسبت  $Q/Q_0$  به تغییرات عمق پرده آب بند در این محدوده تقریباً ثابت است و این موضوع بیانگر آن است که با افزایش عمق پرده آب بند در محدوده یاد شده تغییر محسوس و چشمگیری در کاهش نشت مشاهده نمی شود.

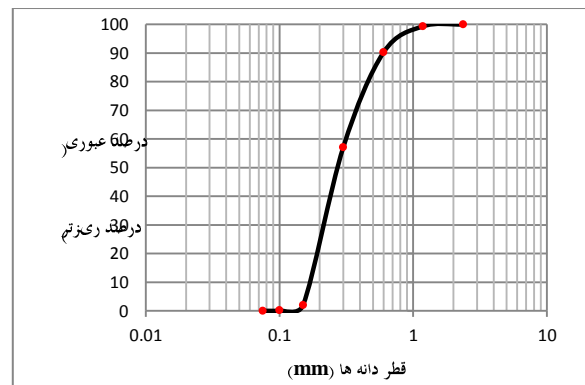
برای شروع آزمایش، عمق ۱۰ سانتی متری حداقل عمق پرده آب بند ( $d/D=0.25$ ) در نظر گرفته شد. در این نسبت، مقدار  $Q/Q_0$  همان طور که در شکل دیده می شود بیشترین دبی نشت را دارد. همچنین، برای نسبت  $Q/Q_0$  به ازای  $(d/D=1)$  مقدار نشت از نظر ریاضی ۰ تعریف شد. با رگرسیون گیری از داده های آزمایش ها در نمودار شکل ۴ رابطه درجه سوم زیر برازش یافت که چگونگی رفتار تغییرات دبی نشت را در به کارگیری عمق های مختلف پرده آب بند نشان می دهد. رابطه ۳ وابستگی دبی نشت را به عمق پرده آب بند نشان می دهد.

$$\frac{Q}{Q_0} = -4.1006 \left(\frac{d}{D}\right)^3 + 7.4961 \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 5.3495 \left(\frac{d}{D}\right) + 1.9587 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$R^2 = 0.9779$$

ریز تمیز (ماسه ساحلی) که فاقد هر گونه چسبندگی و به پدیده فرسایش درونی<sup>۱</sup> و جوشش<sup>۲</sup> فوق العاده حساس بود به منزله مصالح پی استفاده شد. با آزمایش بار افتان، نفوذپذیری ماسه ساحلی استفاده شده برابر  $3.25 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$  تعیین شد. برای جلوگیری از شسته شدن مصالح به مخزن پایین دست، شبکه ای توری با شماره ۱۵۰ در حد فاصل مخزن تنظیم کننده مذکور و پی نصب شد. برای اندازه گیری دبی جریان از روش حجمی، که دقیق ترین روش اندازه گیری دبی جریان است، استفاده شد و با به کارگیری یک استوانه مدرج و کرنومتر دبی نشت، که از لوله دبی نشت خروجی از فلوم خارج می شد، در سه نوبت زمانی ۳۰ ثانیه ای اندازه گیری شد و متوسط آن ها به منزله دبی نشت به کار رفت.

شکل ۳ منحنی دانه بندی ماسه ریز ساحلی به کاررفته در پی مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۳. منحنی دانه بندی ماسه ریز ساحلی استفاده شده در تحقیق

نحوه آزمایش ها بدین ترتیب بود که پس از نصب سپری شیر مخزن بالادست باز گذاشته شد تا پی به تدریج از آب اشباع شود. این عمل در شرایط آزمایشگاهی موجود حدود شش ساعت طول کشید. بعد از اشباع شدن مصالح پی و بالا آمدن تراز آب در پایین دست و تنظیم تراز آب در ارتفاع ۳۵ سانتی متری از سطح پی در بالادست، پیزومترها به کمک خم کردن تابلوی پیزومتریک و جریان یافتن آب در آن ها هواگیری شدند و بعد از هواگیری تابلو به صورت قائم در جای خود قرار داده شد. پس از برقراری حالت آرام و ماندگاری جریان، رقوم آب در پیزومترها قرائت و دبی نشت با روش اندازه گیری حجمی، که پیش تر به آن اشاره شد، تعیین شد. مدت انجام گرفتن هر آزمایش در ترازهای مورد نظر برای هر یک از گزینه ها حدود دوازده ساعت بود.

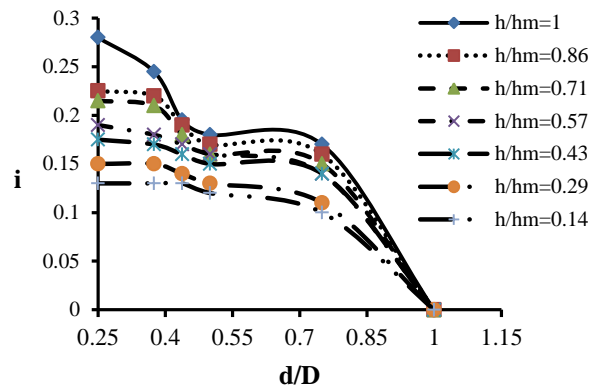
1. Piping
2. Boiling



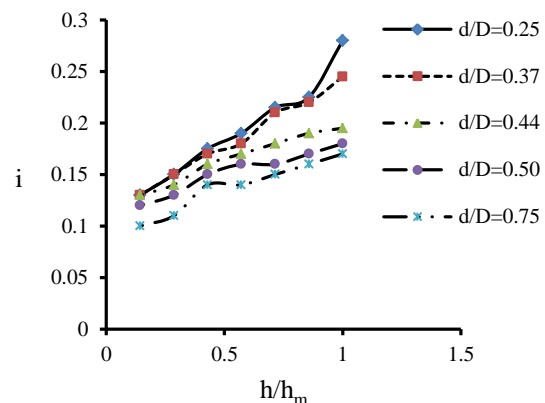
شکل ۹ نشان می دهد با افزایش نسبت تراز آب مخزن بالادست مقدار شیب هیدرولیکی به ازای نسبت عمق های مختلف پرده آب بند افزایش می یابد. البته این روند افزایشی برای عمق های مختلف پرده آب بند متفاوت است. همان طور که مشاهده می شود، برای یک تراز آبی بالادست ثابت، مثلاً  $h/h_m = 1.0$ ، با افزایش نسبت  $d/D$  گرادیان هیدرولیکی کاهش می یابد.

**مشاهدات آزمایشگاهی پدیده جوش**

جدول ۲ محدوده حساس به پدیده جوش را در پای پرده آب بند در پایین دست نشان می دهد که با مشاهدات آزمایشگاهی ثبت شده است. همان طور که دیده می شود، افزایش نسبت  $d/D$  در جلوگیری از وقوع پدیده مخرب جوش امری مؤثر است. ولی، همان طور که می دانیم، به کارگیری عمق های بسیار بالا از پرده آب بند به لحاظ اجرایی در پی سازه های هیدرولیکی امکان پذیر نیست. همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. پس، از نظر مهندسی و اقتصادی نسبت عمق  $d/D = 0.44$  از پرده آب بند عمق بهینه در به کارگیری پرده آب بند قائم در پی سازه های هیدرولیکی است و این نسبت برای کارهای مهندسی و طرح هیدرولیکی دیوارهای سپری به مهندسان مشاور توصیه می شود.



شکل ۸. تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به عمق پرده آب بند



شکل ۹. تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به تراز آب بالادست

جدول ۲. محدوده حساس به پدیده جوش در به کارگیری پرده آب بند قائم

$d/D$ $h/h_m$	$d/D = 0.25$	$d/D = 0.375$	$d/D = 0.4$	$d/D = 0.4375$	$d/D = 0.5$	$d/D = 0.75$
۱	* جوشش عمومی	* جوشش عمومی	** جوشش موضعی	-	-	-
۰٫۸۵۷	* جوشش عمومی	* جوشش عمومی	** جوشش موضعی	-	-	-
۰٫۷۱۴	* جوشش عمومی	* جوشش عمومی	-	-	-	-
۰٫۵۷۱	** جوشش موضعی	** جوشش موضعی	-	-	-	-
۰٫۴۲۸	** جوشش موضعی	** جوشش موضعی	-	-	-	-
۰٫۲۸۶	** جوشش موضعی	-	-	-	-	-
۰٫۱۴۳	** جوشش موضعی	-	-	-	-	-

\* منظور از جوشش عمومی به وجود آمدن جوشش در سراسر طول پایین دست پرده آب بند است.

\*\* منظور از جوشش موضعی اتفاق افتادن جوشش به صورت نقطه ای در پایین دست پرده آب بند است.

- در سایر حالات، که در جدول با خط تیره مشخص شده، جوشش اتفاق نیفتاده است.

آزمایش های انجام شده به صورت نمودارهای بی بُعد در شکل های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ می آید.

**اثر عمق پرده آب بند مایل بر میزان نشت**

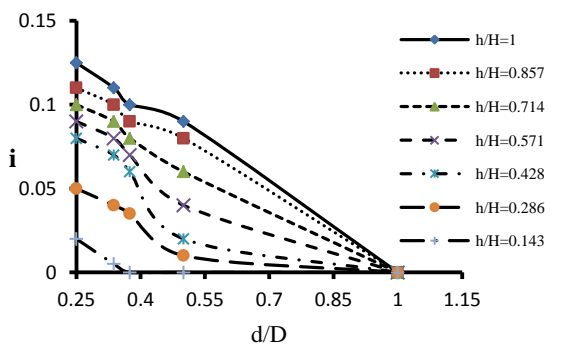
در به کارگیری پرده آب بند مایل، مشابه حالت قائم، با افزایش نسبت  $d/D$  در میزان دبی نشت از زیر پی کاسته می شود. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، رفتار شیب

**کارگذاری پرده آب بند مایل**

در ادامه نیز، مشابه به کارگیری پرده آب بند قائم، از پرده آب بند به صورت مایل با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق در عمق های متفاوت برای کنترل پدیده جوشش، فرسایش درونی، کاهش گرادیان هیدرولیکی، کاهش نشت از زیر پی، و کاهش فشار بالا بر در محدوده پای سپری در پایین دست استفاده شد. نتایج



تأثیر تراز آب بالادست و عمق پرده آببند بر گرادیان خروجی شکل ۱۲ تغییرات گرادیان هیدرولیکی را نسبت به عمق پرده آببند مایل با ترازهای مختلف آب بالادست به تصویر می کشد که در آن با افزایش تراز آب مخزن بالادست به ازای عمق یکسان از پرده آببند افزایش گرادیان هیدرولیکی در زیر پی مشاهده می شود. افزایش عمق پرده آببند به ازای تراز ثابت از آب مخزن بالادست به کاهش گرادیان هیدرولیکی می انجامد.



شکل ۱۲. تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به عمق سپر مایل

#### مشاهدات آزمایشگاهی پدیده جوشش

جدول ۳ محدوده حساس به پدیده جوشش را در پای پرده آببند مایل در پایین دست نشان می دهد که با مشاهدات آزمایشگاهی ثبت شده است. همان طور که مشاهده می شود، افزایش نسبت  $d/D$  در جلوگیری از رخ دادن پدیده مخرب جوشش مؤثر است. ولی، همان طور که می دانیم، به کارگیری عمق های بسیار بالا از پرده آببند، به لحاظ اجرایی، در پی سازه های هیدرولیکی امکان پذیر و همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. پس، از نظر مهندسی و اقتصادی نسبت عمق  $d/D \cong 0.34$  از پرده آببند عمق بهینه در به کارگیری پرده آببند مایل با زاویه ۶۰ درجه در پی سازه های هیدرولیکی است.

#### مقایسه به کارگیری پرده آببند در دو حالت مایل و قائم

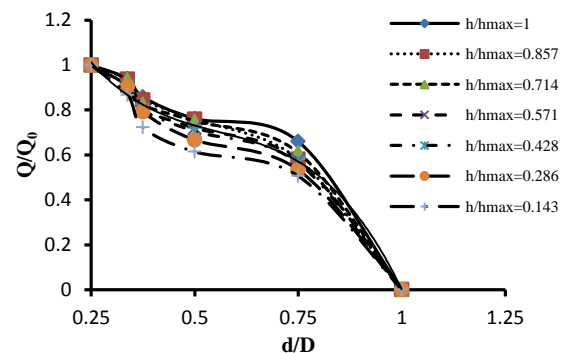
##### تأثیر عمق پرده آببند بر میزان نشت

شکل ۱۳ تغییرات دبی نشت را نسبت به عمق های متفاوت پرده آببند در بحرانی ترین حالت وجود آب در مخزن بالادست پرده آببند ( $h/h_m = 1.0$ ) برای دو حالت مختلف نشان می دهد. میزان نشت در آزمایش پرده آببند مایل با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق در مقایسه با آزمایش پرده آببند قائم کاهشی چشمگیر داشت. مقادیر نشت در آزمایش پرده آببند مایل به صورت میانگین تقریباً به نصف مقدار خود در آزمایش پرده آببند قائم رسید که بهبود کاهش میزان نشت را در زیر پی

مماس بر منحنی ابتدا دارای شیبی تندتر از شیب مماس در محدوده ۰/۳۳ تا ۰/۷۵ از نسبت عمق پرده آببند است. بعد، شیب نمودار در این محدوده ملایم و تغییرات دبی نشت تقریباً ثابت می شود و افزایش نسبت طول قائم عمق پرده آببند مایل به ضخامت پی از  $d/D \cong 0.34$  دیگر کاهش محسوسی در میزان دبی نشت ایجاد نمی کند (طول مایل ۱۵/۲ سانتی متر است). رابطه ۷ برای کنترل میزان نشت از زیر پی های آبرفتی نسبت به تغییرات عمق پرده آببند مایل با زاویه ۶۰ درجه برای حالات متفاوت تراز آب مخزن بالادست به کار رفت.

$$\frac{Q}{Q_0} = -5.6479\left(\frac{d}{D}\right)^3 + 9.4389\left(\frac{d}{D}\right)^2 - 5.7342\left(\frac{d}{D}\right) + 1.9443 \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$R^2 = 0.9964$$

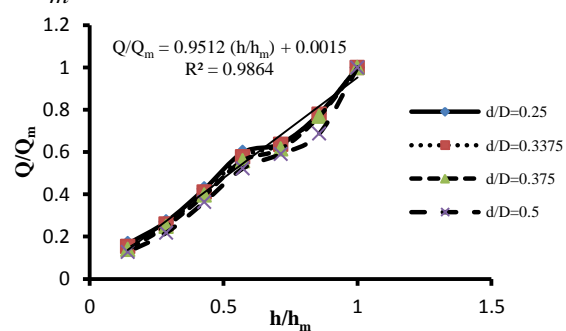


شکل ۱۰. تغییرات دبی نشت نسبت به عمق پرده آببند مایل با ترازهای متفاوت آب بالادست

#### اثر تراز آب بالادست بر میزان نشت

علاوه بر عمق پرده آببند، تراز آب بالادست نیز بر کاهش میزان دبی نشت تأثیر می گذارد. نمودار شکل ۱۱ تغییرات دبی نشت را نسبت به تراز آب مخزن بالادست برای عمق های مختلف پرده آببند نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود، برای نسبت عمق های بزرگ تر پرده آببند در یک تراز یکسان از آب مخزن بالادست افزایش میزان دبی نشت کمتر است. البته، با افزایش تراز آب بالادست میزان دبی نشت از زیر پی افزایش می یابد که رابطه خطی ۸ نیز بیانگر این مطلب است.

$$\frac{Q}{Q_m} = 0.9512\left(\frac{h}{h_m}\right) + 0.0015, \quad R^2 = 0.9864 \quad (\text{رابطه ۸})$$



شکل ۱۱. تغییرات میزان نشت نسبت به  $h/h_m$



به کارگیری پرده آببند مایل در نظر گرفته نشود، از نظر کاهش میزان دبی نشت بسیار مناسبتر از پرده آببند قائم است.

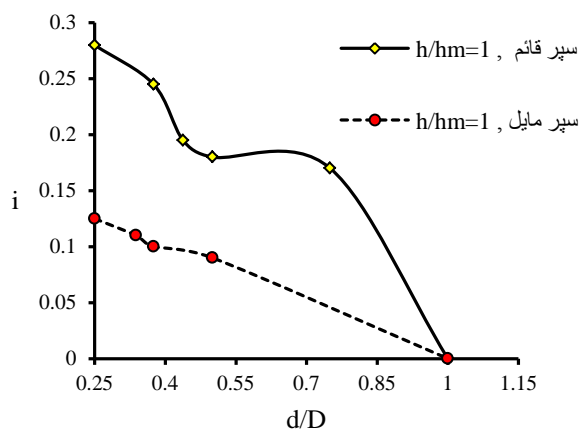
نشان می دهد. این در حالی است که اجرای پرده آببند مایل سخت تر از پرده آببند قائم است. اگر هزینه و سختی اجرا در

جدول ۳. محدوده حساس به پدیده جوشش در پای پرده آببند مایل

$d/D$ $h/h_m$	$d/D=0.25$	$d/D=0.3$	$d/D=0.337$	$d/D=0.375$	$d/D=0.5$	$d/D=0.75$
1	* جوشش عمومی	** جوشش موضعی	-	-	-	-
0.857	* جوشش عمومی	** جوشش موضعی	-	-	-	-
0.714	** جوشش موضعی	** جوشش موضعی	-	-	-	-
0.571	** جوشش موضعی	-	-	-	-	-
0.428	** جوشش موضعی	-	-	-	-	-
0.286	** جوشش موضعی	-	-	-	-	-
0.143	** جوشش موضعی	-	-	-	-	-

### تأثیر عمق پرده آببند و تراز آب بالادست بر میزان گرادیان هیدرولیکی

شکل ۱۵ تغییرات گرادیان هیدرولیکی را نسبت به عمق های مختلف پرده آببند به ازای تراز آب بالادست ماکزیمم در دو حالت پرده آببند مایل و قائم نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، به کارگیری پرده آببند مایل نسبت به پرده آببند قائم کاهش قابل ملاحظه در میزان گرادیان هیدرولیکی دارد. پرده آببند مایل با ایجاد طول جریان بیشتر نسبت به پرده قائم باعث کاهش بیشتر گرادیان هیدرولیکی در پایین دست می شود. بنابراین، تأثیر پرده آببند مایل در کاهش گرادیان هیدرولیکی نسبت به پرده آببند قائم بیشتر است.

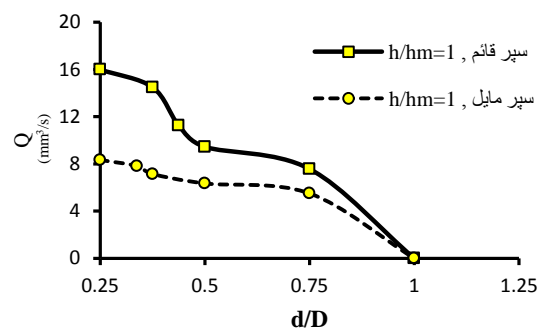


شکل ۱۵. تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به عمق پرده آببند

### واسنجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی با پرده آببند قائم

در این مطالعه، جهت حل معادله لاپلاس حاکم بر جریان ماندگار در محیط متخلخل از نرم افزار SEEP/W (جزئی از بسته نرم افزاری GEOSTUDIO2007) مبتنی بر روش اجزای محدود استفاده شد.

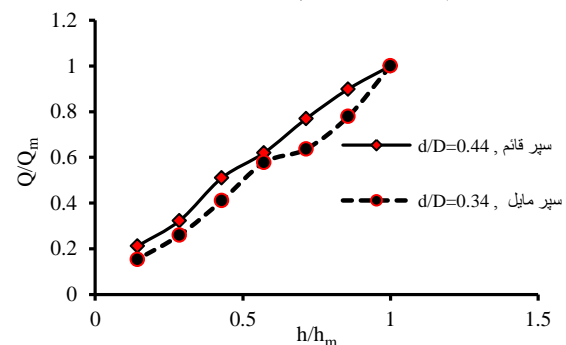
در آزمایش پرده آببند به صورت قائم نسبت عمق بهینه پرده آببند  $d/D \cong 0.44$  و در آزمایش پرده آببند به صورت مایل نسبت عمق بهینه پرده آببند  $d/D \cong 0.34$  است.



شکل ۱۳. تغییرات دبی نشت نسبت به عمق های متفاوت پرده آببند

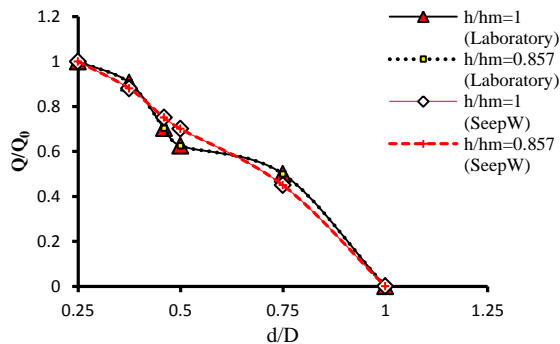
### تأثیر تراز آب بالادست بر میزان دبی نشت

همان گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، میزان دبی نشت به ازای ترازهای مختلف آب مخزن بالادست در آزمایش پرده آببند مایل بهینه کمتر از مقدارهای متناظر خود در آزمایش پرده آببند قائم بهینه است. این حالت نشان می دهد به کارگیری پرده آببند به صورت مایل باعث بهبود میزان کاهش نشت در زیر پی های آبرفتی می شود و میزان دبی نشت در عمق بهینه پرده آببند مایل بسیار کمتر از میزان دبی نشت در عمق بهینه پرده آببند قائم است.



شکل ۱۴. تغییرات دبی نشت نسبت به تراز آب بالادست به ازای عمق های بهینه از پرده های آببند

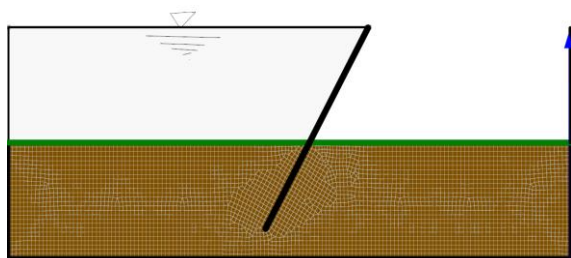
نمودارهای منتج از روش اجزای محدود با نمودارهای آزمایشگاهی، که برای نسبت‌های حداکثر تراز آب بالادست (۰٫۸۵۷) و ( $h/h_m=1$ ) و عمق‌های مختلف پرده آب‌بند قائم در شکل ۱۹ می‌آید، رفتاری مشابه دارند.



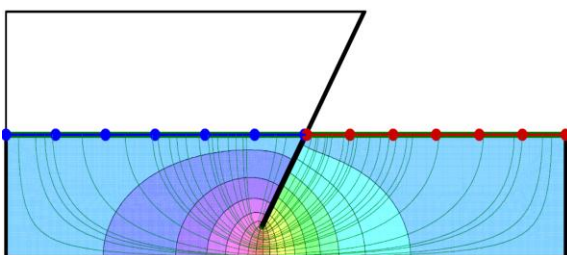
شکل ۱۹. ارزیابی روش‌های مختلف در برآورد دبی نشت

نتایج نمودارهای شکل ۱۸ و ۱۹ به ترتیب تغییرات گرادیان هیدرولیکی و دبی نشت را نسبت به عمق پرده آب‌بند قائم نشان می‌دهد. دقت مناسب 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 مناسب برای برآورد زیرفشار و شیب خروجی و دبی نشت استفاده کرد.

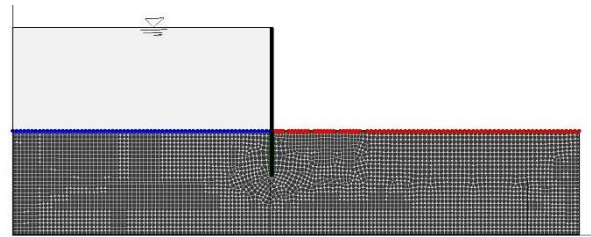
واسنجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی با پرده آب‌بند مایل شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب شبکه‌بندی، اجراء، و آنالیز مدل عددی پرده آب‌بند مایل نشان می‌دهند.



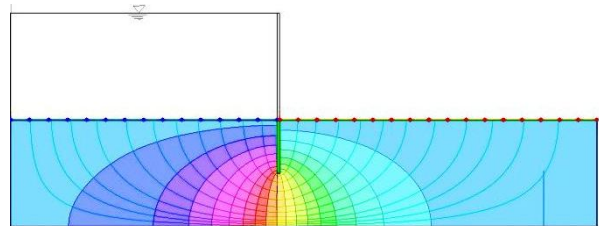
شکل ۲۰. شبکه‌بندی مدل عددی برای پرده آب‌بند مایل



شکل ۲۱. اجراء مدل عددی پرده آب‌بند مایل



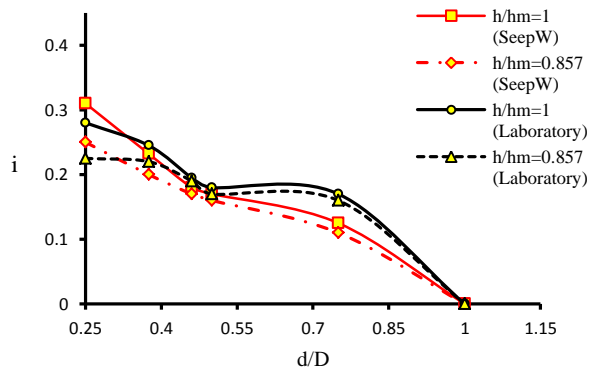
شکل ۱۶. شبکه‌بندی مدل عددی برای پرده آب‌بند قائم



شکل ۱۷. اجراء مدل عددی

### شیب خروجی با پرده آب‌بند قائم

همان‌گونه که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، مقادیر به‌دست‌آمده از روش اجزای محدود با داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی شد. مقدار گرادیان خروجی نسبت به عمق‌های مختلف پرده آب‌بند قائم برای دو تراز ماکزیمم آب بالادست (۰٫۸۵۷) و ( $h/h_m=1$ ) به روش اجزای محدود محاسبه شد که نسبت به نتایج آزمایشگاهی دقت مناسبی دارد و رفتار تغییرات نمودار آن‌ها مشابه نتایج نمودارهای آزمایشگاهی است. نکته مهم این است که روش اجزای محدود مقدار گرادیان هیدرولیکی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کمتر برآورد می‌کند و این مهم باید در طراحی اجزای آب‌بند سازه‌های هیدرولیکی مستقر بر پی‌های ماسه‌ای در نظر گرفته شود.



شکل ۱۸. ارزیابی روش‌های مختلف در برآورد گرادیان خروجی

### دبی نشت با پرده آب‌بند قائم

شکل ۱۹ نتایج دبی نشت را با استفاده از روش اجزای محدود در قیاس با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش اجزای محدود، نسبت به داده‌های آزمایشگاه، با دقتی مناسب نتایج را برآورد می‌کند.

محسوس و چشمگیری در کاهش نشت مشاهده نشود. این فرضیه از جنبه کاربردی نیز قابل حمایت است؛ زیرا هزینه اجرای هر واحد طول عمق پرده آببند در نسبت های بالا مقرون به صرفه نیست. در اعماق زیاد، نصب پرده آببند با محدودیت های زیادی همراه است و هزینه اجرا به طور تصاعدی افزایش می یابد. بنابراین، مبنای گزینش معیار مناسب برای اجزای آببندکننده به کارگیری نگرش مهندسی در کنار نتایج آزمایشگاهی است. بر اساس آزمایش های انجام شده، می توان نتیجه گرفت:

۱. برای به کارگیری پرده آببند قائم در شرایط جریان ماندگار در نسبت عمق پرده آببند قائم  $d/D \cong 0.44$  با نسبت حداکثر تراز آب مخزن بالادست  $h/h_m = 1.0$  پدیده جوشش و فرسایش درونی در محدوده پای پرده آببند قائم رخ نمی دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی به طور چشمگیری کاهش می یابد.

۲. برای به کارگیری پرده آببند مورب با زاویه  $60^\circ$  درجه نسبت به افق در شرایط جریان ماندگار در نسبت عمق پرده آببند  $d/D \cong 0.34$  با نسبت حداکثر تراز آب مخزن بالادست  $h/h_m = 1.0$  پدیده جوشش و فرسایش درونی در محدوده پای پرده آببند مورب رخ نمی دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی به طور چشمگیری کاهش می یابد.

۳. نتایج نشان می دهد به کارگیری پرده آببند مورب با زاویه  $60^\circ$  درجه نسبت به افق در کاهش میزان دبی نشت، فشار بالابر، گرادیان هیدرولیکی، و جلوگیری از رخ دادن پدیده مخرب جوشش و فرسایش درونی در نسبت عمق بهینه  $d/D \cong 0.34$  در مقایسه با به کارگیری پرده آببند قائم در نسبت عمق بهینه  $d/D \cong 0.44$  بسیار مؤثرتر است.

۴. نتایج به دست آمده در زمینه رابطه بین تراز آب بالادست و دبی نشت در حالات مختلف می تواند در مدیریت تراز آب مخزن در شرایط بحرانی و تداخل جبهه های آب شور و شیرین استفاده شود.

۵. نتایج ارائه شده در این تحقیق برای سازه های ساحلی، بندهای انحرافی، سپرها، و خاکریزهای مستقر بر پی های آبرفتی قابل کاربرد است.

۶. شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار SEEP/W (جزئی از بسته نرم افزاری GEOSTUDIO2007) مبتنی بر روش اجزای محدود نشان داد نتایج نرم افزار با داده های آزمایشگاهی دقت مناسبی دارد.

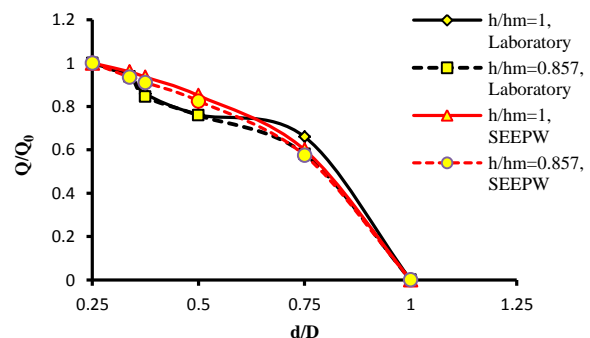
**REFERENCES**

Benmebarek, N., Bensmaine, A., and Benmebarek, S. (2013). Critical Hydraulic Head Loss Inducing

**دبی نشت با پرده آببند مایل**

شکل ۲۲ نتایج برآورد شده دبی نشت را با استفاده از روش اجزای محدود (SEEPW) در قیاس با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، روش اجزای محدود با دقتی مناسب نتایج را نسبت به داده های آزمایشگاه برآورد می کند.

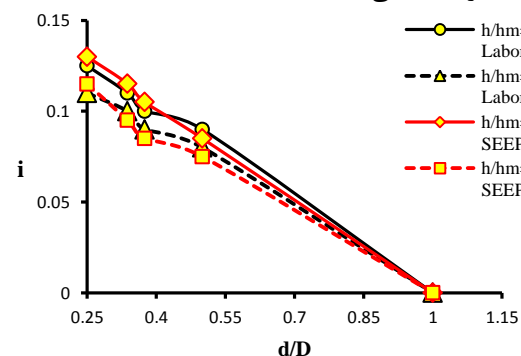
نمودارهای به دست آمده، که برای نسبت های حداکثر تراز آب بالادست ( $0.857$  و  $h/h_m = 1$ ) و عمق های مختلف پرده آببند مایل در شکل ۲۲ می آید، رفتاری مشابه دارند.



شکل ۲۲. ارزیابی روش های مختلف در برآورد دبی نشت

**شیب خروجی با پرده آببند مایل**

شکل ۲۳ ارزیابی مقادیر به دست آمده از روش اجزای محدود با داده های آزمایشگاهی را نشان می دهد. مقدار گرادیان خروجی نسبت به عمق های مختلف پرده آببند مایل برای دو تراز ماکزیمم آب بالادست ( $0.857$  و  $h/h_m = 1$ ) به روش اجزای محدود محاسبه شده است که نسبت به نتایج آزمایشگاهی دقتی مناسب دارد و رفتار تغییرات نمودار آن ها مشابه نتایج نمودارهای آزمایشگاهی است.



شکل ۲۳. ارزیابی روش های مختلف در برآورد گرادیان خروجی

**نتیجه گیری**

در این تحقیق ملاک انتخاب یک نسبت به منزله معیار بهینه این است که با افزایش آن نسبت (عمق پرده آببند) تغییر

Sandy Cofferdam Failure by Numerical Approach. *Akademik Patforth*, 32, 437-445.

- Bligh, W. G. (1912). *The Practical Design of Irrigation Works*, Constable, London, United Kingdom.
- Bouchelghoum, F. and Benmebarak, N. (2011). Critical Hydraulic Head Loss Assessment for a circular sheet pile wall under axisymmetric seepage conditions. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXXIII, No. 4.
- Ghobadiyan, Rasoul, Khodaei, Karim. (2009). Cutoff wall and drainage impacts on the pressure gradient force Numerical Solution of water flow in soil water structures with finite volume method. *Journal of Soil and Water (Agricultural Sciences and Technology)*, 23(4), 148-160. (In Farsi)
- Javan, S. and Farjood, M. M. R. (1993). 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, august, A. A Balkema.
- Lane, E. W. (1934). Security From Under-Seepage Masonry Dams on Earth Foundations, *Trans ASCE* 60(4):929-966.
- Leliavsky, S. (1965). Design Text Book in Civil Engineering: Design of Dams For percolation and Erosion. *Chapman and Hall press*.
- McNamee, J. (1949). Seepage into a Sheeted Excavation. *Geotechnique, the Institution of Civil Engineers*, London; 4(1), 229-41.
- Pour Eskandar, S., Farsadi Zadeh, D., and Hussein Zadeh Dalir, A. (2012). Experimental and numerical study of the effects of epithelium basement membrane seal the leak in the dam. *11th Iranian Hydraulic Conference*. (In Farsi)
- Rahimi, H. (2009). *Embankments Dams*, Tehran University Press, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Richards, k. and Reddy, K. (2007). Critical appraisal of piping phenomena in earth dams. *Bull Eng Geol Environ*. 66, 381-402.
- Safi, M., Hamidyan, M., Ghavasieh, A., and Beheshti, S. (2011). Guidelines for Safety Assessment and Emergency Action Plan for Dams and Appurtenant Structures. *Ministry of Energy and Water Affairs ABFA*. Journal of No. 370-A
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., and Khaleghi, H. (2010a). Controlled laboratory study of liquid foundation alluvium. *Amirkabir Journal*, 42(1), 22-11. (In Farsi)
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., and Khaleghi, H. (2010b). Experimental Analysis of Seepage Flow under Coastal Dikes, *Experimental Techniques*, 34(4), 49-54.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., and Khaleghi, H. (2012). Laboratory Investigation of the Seepage Control Measures under Coastal Dikes. *Experimental Techniques* 36(1), 61-71.
- Shaikh Rezazadeh Nikoo, N., Khalaili Shayan, H., and Amiri, E. (2012). Experimental and numerical study of the optimal size and location of the shield wall, drainage blanket and drifted to reduce the rate of seepage and exit gradient followed by diversion dams. *11th Iranian Hydraulic Conference*. (In Farsi)
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York.