

شبیه‌سازی فیزیکی و عددی تأثیر پرده آب‌بند بر روی نشت از پی‌های مطبق

پیمان ورجاوند^{۱*}، ساناز پوراسکندر^۲، داود فرساد زاده^۳ و اعظم مسعودی^۴

چکیده

برآورد مقدار فشار در قسمت‌های مختلف پی سدها و کنترل نشت و نیروی بالابرنده از مهم‌ترین مسائلی است که در طراحی سدها مورد توجه متخصصین است. در این پژوهش رفتار هیدرولیکی پرده آب‌بند با عمق‌های نفوذ مختلف برای خاک با سه نوع ضریب آب‌گذری و دو لایه‌بندی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. مقادیر نشت و فشار پیزومتری در ۲۸ نقطه از مدل فیزیکی به دست آمد. سپس جریان آب در همان شرایط خاک با مدل عددی seep/w شبیه‌سازی و مقادیر نشت و فشار برآورد شد. مقدار خطای مدل عددی در شبیه‌سازی فشار و نشت به ترتیب به طور متوسط ۰/۲۸ و ۱/۴ درصد بوده که نشان از هماهنگی خوب نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی است.

واژه‌های کلیدی: پرده آب‌بند، پی مطبق، فشار پیزومتری، نشت، Seep/W.

ارجاع: ورجاوند پ.، پوراسکندر س.، فرساد زاده د. و مسعودی م. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی فیزیکی و عددی تأثیر پرده آب‌بند بر روی نشت از پی‌های مطبق. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۶۵-۷۷.

۱- دکتری رشته سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

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

۴- کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: p.varjavand@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۴

مقدمه

آب ذخیره شده در پشت سد خاکی به دلیل پتانسیل زیاد در توده متخلخل پی و بدنه سد نفوذ کرده و به طرف پایین‌دست، نشت پیدا می‌کند. پیش‌بینی میزان فشار حفره‌ای در قسمت‌های مختلف پی سدها، یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در طراحی سدها مورد توجه متخصصین است (موهبت‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). محاسبه دقیق فشار پی‌زومتری در پی و دبی نشت از بدنه و پی از نظر فنی و اقتصادی مهم است، زیرا جریان آب در پی سد باعث به وجود آمدن فشار حفره‌ای و نیروهای تراوشی می‌شود که اگر مقدار این نیروها در حد مجاز نباشد پایداری پی، دچار مشکلات عمده‌ای از قبیل جوشش و آب‌شستگی خواهد شد و در نتیجه سد خراب می‌شود (ابن‌جلال و شفاعی بجستان، ۱۳۸۳).

در زمینه نشت از پی، پژوهش‌های زیادی تاکنون انجام شده است. لاکشمین (۲۰۰۳) با مطالعه نیروی نشت، معادلاتی را برای لایه‌های تحت فشار ارائه داد. صباغ یزدی و بیات (۱۳۸۸) نیز نرم‌افزار دو بعدی NASIR را ارائه کردند که در آن از روش عددی گالرکین- حجم محدود برای مدل‌سازی تراوش در پی سدهای بتنی وزنی دارای پرده آب‌بند استفاده شده است. آن‌ها از این مدل برای ارزیابی دقت رابطه‌های ارائه شده توسط لین و بلای برای برآورد تقریبی زیر فشار سدهای بتنی وزنی روی پی همگن و همسان استفاده کردند. تیفور و همکاران (۲۰۰۵) با مدل شبکه عصبی، تراوش در یک سد خاکی را پیش‌بینی کرده و نتایج را با روش المان‌های محدود مقایسه کردند. قبادیان و خدایی (۱۳۸۸) تأثیر دیواره آب‌بند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی زیرسازه‌های آبی را با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش حجم‌های محدود بررسی کردند. آن‌ها برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی و مدل WinMseep استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با احداث یک دیواره آب‌بند در هر وضعیت مکانی، مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا (بدون دیواره آب‌بند) کاهش می‌یابد. همچنین توزیع فشار بالا برنده و گرادیان خروجی محاسبه شده برای شرایط خاک همسان و غیرهمسان در زیرسازه هماهنگی نزدیکی با نتایج مدل WinMSeep داشت. یافنگ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از روش المان محدود، یک مدل عددی را برای رفع مشکل

نشت با سیستم‌های زهکش سدها ارائه دادند. داودنژاد (۱۳۸۵) برای آنالیز نشت پی و بدنه سد باغکل از نرم‌افزار seep/w استفاده کرد. وی مشاهده کرد بدون در نظر گرفتن راه‌حل‌های مناسب آب‌بندی، میزان خروج آب از پی در طول سال بالغ بر ۵۰٪ حجم مخزن است. اما با قرار دادن دیواره آب‌بند در این محدوده از میزان تراوش به مقدار زیادی کاسته می‌شود. از طرفی بر اساس نتایج به دست آمده، با کوچک‌تر شدن المان‌ها دبی جریان کاهش یافته و به مقدار واقعی نزدیک‌تر می‌شود. صبا و ولی‌زاده (۱۳۹۰) به مطالعه عددی میزان نشت سد خاکی حسنلو و مقایسه آن با مقادیر نشت واقعی پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که خروجی‌های نرم‌افزار seep/w نسبت به Plaxis به واقعیت نزدیک‌تر بوده و برای محاسبه نشت در سدهای خاکی مطمئن است. در زمینه تأثیر عمق نفوذ پرده آب‌بند در پی‌های مطابق زیر سدها مطالعات همزمان فیزیکی و عددی کمی انجام شده است.

هدف از این پژوهش بررسی آزمایشگاهی اثر پرده آب‌بند عمودی با عمق‌های نفوذ مختلف بر روی نشت از پی‌های مطابق و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی مدل عددی seep/w است.

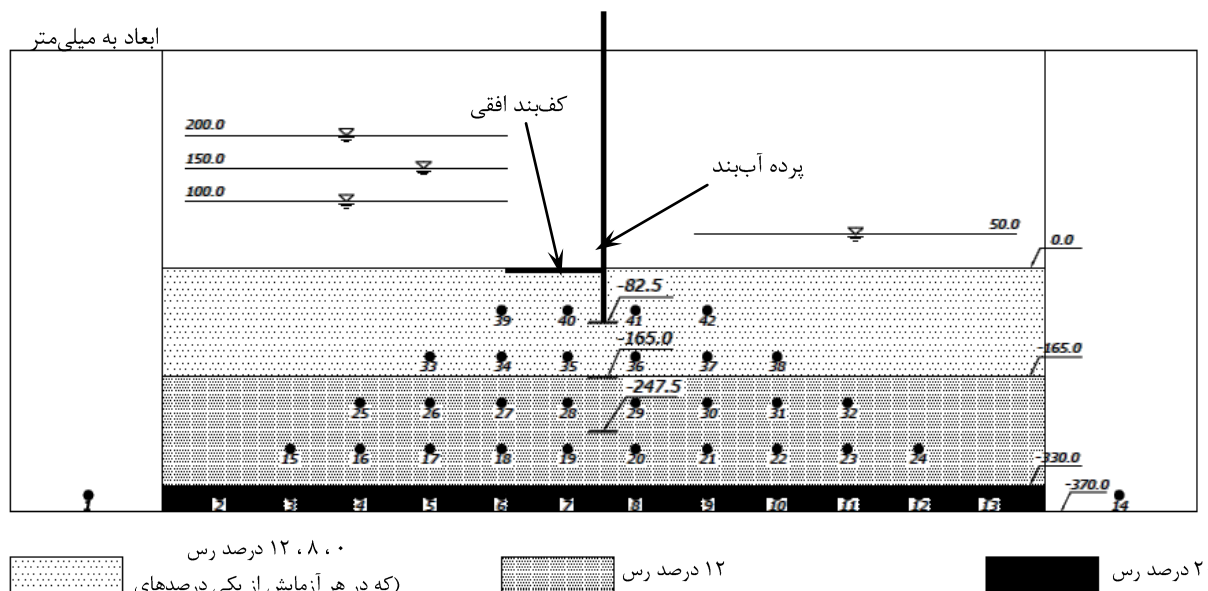
مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز انجام شد. مدل آزمایشگاهی شامل مخزن مکعب مستطیلی نشت و نفوذ به طول ۱/۸، عرض ۰/۲ و ارتفاع ۰/۷ متر از جنس پلکسی‌گلاس است. سوراخ‌هایی با فاصله‌های مشخص در دیواره‌های مخزن و برای نصب پی‌زومتر جهت مشاهده و اندازه‌گیری فشار پی‌زومتری در نقاط مختلف لایه‌های خاک ایجاد شده است. در شکل ۱ محل و شماره این سوراخ‌ها قابل مشاهده است. پی‌زومترهای شماره ۱ و ۱۴ برای کنترل عمق آب در مخزن بالادست و پایین‌دست است. یک لایه خاک رس با ضریب آب‌گذری بسیار کم به ضخامت ۴ سانتی‌متر برای جلوگیری از فرار آب از سطح بین خاک و کف مخزن و ایجاد بستر غیرقابل نفوذ در کف مخزن ریخته شد. پی‌زومترهای شماره ۲ تا ۱۳ در لایه غیرقابل نفوذ قرار گرفته و در این آزمایش مورد استفاده نبوده‌اند. پی‌زومترهای شماره ۱۵ تا ۲۴ در ارتفاع ۹۵ میلی‌متری از کف، پی‌زومترهای ۲۵ تا ۳۲ در ارتفاع ۱۶۵

۲ مشاهده می‌شود. پمپ مورد استفاده در آزمایش‌ها دارای قدرت ۰/۵ اسب بخار بوده و حجم مفید مخزن تأمین آب در مدل ۱۵۰ لیتر است.

میلی‌متری از کف، پیزومترهای شماره ۳۳ تا ۳۸ در ارتفاع ۲۳۵ میلی‌متری و پیزومترهای ۳۹ تا ۴۲ در ارتفاع ۳۰۵ میلی‌متری از کف قرار دارند. فاصله طولی دو پیزومتر ۱۱۰ میلی‌متر است. نمای کلی از مخزن مورد آزمایش در شکل



شکل ۱- جانمایی پیزومترها در مدل آزمایشگاهی



شکل ۲- مخزن نشت و نفوذ استفاده شده برای آزمایش‌ها

پیزومتر مطمئن نبود استفاده شد. همچنین از آنجایی که پس از هر آزمایش پیزومترها نیاز به هواگیری داشتند از حسگر مبدل برای اطمینان از درست هواگیری شدن پیزومترها و استخراج اطلاعات درست استفاده شد. دستگاه حسگر مبدل به یک رایانه متصل شده و در نهایت اطلاعات را به صورت یک فایل متنی در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

برای اندازه‌گیری فشار پیزومتری در نقاط مختلف از پیزومترهای فشارسنجی با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. در مورد آزمایش‌ها با ارتفاع آب کم (۵ سانتی‌متر) که اختلاف بین پیزومترها کم بودند از حسگر مبدل^۱ با دقت ۰/۱ میلی‌متر برای برداشت فشار در نقاطی که اطلاعات

1- Transducer

پیزومترها هم که شفاف و قابل انعطاف بودند، از یکسو به مخزن در محل سوراخ‌ها متصل شده و از سوی دیگر بر روی یک تابلو مدرج نصب شده است.

در ابتدای قسمت ورودی مدل آزمایشگاهی (شکل ۱ چپ) برای تأمین ارتفاع آب در بالادست به‌صورت پایدار از یک مخزن استفاده شد که برای آرام کردن جریان ورودی، بین این قسمت و مدل با یک صفحه متخلخل و یک فیلتر جدا شد. بخش میانی مخزن به طول ۱۴۰ سانتی‌متر محل قرارگیری لایه‌های خاک است. برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی، ابتدا نمونه‌ها را با توجه به مقدار تراکم مورد نظر (مقدار تراکم مورد نظر با توجه به اینکه جنس مدل از پلکسی‌گلاس است و احتمال شکستن آن وجود دارد، انتخاب شد) به روش تراکم استاتیک متراکم کرده و سپس به روش بار افتان ضریب هدایت هیدرولیکی آن اندازه‌گیری شد. خاک با همان تراکم که در آزمایش هدایت هیدرولیکی متراکم شده بود در مدل فیزیکی قرار داده شد. برای اطمینان از درستی ضریب هدایت هیدرولیکی در مدل فیزیکی، در حین انجام آزمایش‌ها نیز با نمونه‌گیری از خاک ضریب هدایت هیدرولیکی آن استخراج شد. در ابتدا از نمونه خاک ماسه‌ای استفاده و هدایت هیدرولیکی آن اندازه‌گیری شد. سپس با افزودن

درصدهای مختلف رس نمونه‌های دیگر خاک تهیه و هدایت هیدرولیکی آن‌ها نیز تعیین شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. در نهایت ۴ نوع خاک شامل ماسه، ماسه+رس ۸٪، ماسه+رس ۱۲٪ و ماسه+رس ۲۰٪ انتخاب شد (لازم به ذکر است که رس در تمامی آزمایش‌ها به‌صورت کسر وزنی به خاک مورد مطالعه اضافه شد). در این آزمایش‌ها از یک صفحه به طول ۱۵ سانتی‌متر به‌عنوان کف بند افقی در بالادست پرده آب‌بند استفاده شد و برای جلوگیری از فرار آب از زیر کف بند افقی - به‌خصوص در حالتی که پرده آب‌بند وجود ندارد - مقداری از خاک با چسب به زیر صفحه چسبانده شد. همچنین از یک صفحه به ضخامت ۶ میلی‌متر به‌عنوان پرده آب‌بند استفاده شد. برای دست یافتن به هدایت هیدرولیکی یکسان با آزمایش‌های هدایت هیدرولیکی، از همان انرژی تراکم و رطوبت، در تراکم لایه‌های خاک داخل مدل فیزیکی نیز استفاده شد. روش تراکم در آزمایش ضریب آب‌گذری و زمان پرکرده مدل فیزیکی یکسان بوده است و از آنجایی که غالب جریان در مدل فیزیکی در جهت قائم شکل می‌گیرد، پس نتایج آزمایش ضریب آب‌گذری مناسب هستند.

جدول ۱- هدایت هیدرولیکی لایه‌های خاک با درصد رس مختلف

نمونه خاک	ماسه	ماسه+رس ۸٪	ماسه+رس ۱۲٪	ماسه+رس ۲۰٪
هدایت هیدرولیکی (m/s)	$8/41 \times 10^{-6}$	$3/45 \times 10^{-6}$	$1/67 \times 10^{-6}$	$9/35 \times 10^{-7}$

پس از آماده‌سازی مخزن، ابتدا یک لایه غیرقابل نفوذ (ماسه+۲۰٪ رس) به ارتفاع ۴ سانتی‌متر در کف مخزن با تراکم مناسب ریخته شد. سپس ۲ لایه خاک با دانه‌بندی مختلف هر کدام به ارتفاع ۱۶/۵ سانتی‌متر در مدل‌های مختلف لایه‌بندی خاک روی لایه غیرقابل نفوذ قرار داده شد. مخزن شیشه‌ای بالادست از آب پر شده به طوری که ارتفاع آب در مخزن در تراز مورد نظر ثابت باقی بماند. ارتفاع آب در این مخزن همان بار آبی بالادست است. با استفاده از پیزومترهای نصب شده بر روی تابلو میزان افت سطح آب را می‌توان برداشت کرد. پس از ثابت شدن ارتفاع آب در پیزومترها و عدم تغییر آن‌ها شرایط پایدار در نمونه خاک ایجاد می‌شود. در این حالت دبی جریان به مقدار ثابت رسیده است و می‌توان آن را اندازه‌گیری کرد.

برای اندازه‌گیری دبی از استوانه مدرج به حجم ۲۵۰ سانتی‌مترمکعب با دقت ۲ سانتی‌مترمکعب استفاده شد. برای هر نمونه از مدل لایه‌بندی خاک ارتفاع آب در بالادست را تغییر داده و اندازه‌گیری‌ها دوباره انجام می‌شد. در مرحله بعد عمق نفوذ پرده آب‌بند را تغییر داده و آزمایش‌ها دوباره انجام و مقادیر موردنظر ثبت شدند. پرده آب‌بند نیز در چهار ارتفاع مختلف برای هر مدل لایه‌بندی خاک در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها برای ۳ نوع مختلف از لایه‌بندی خاک با ۳ ارتفاع آب در بالادست و ۴ ارتفاع پرده آب‌بند انجام شد. پارامترها و مقادیر آن‌ها در آزمایش‌های این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است. جهت تغییر عمق نفوذ پرده آب‌بند در هر مرحله خاک تا محدوده نفوذ تخلیه شده و دوباره متراکم می‌شد و پرده

آب‌بند به‌وسیله چسب آب‌بندی می‌شد.

جدول ۲- پارامترها و محدوده تغییرات مقادیر آن‌ها در نوع‌های مدل‌های لایه‌بندی خاک

شماره مدل	نحوه لایه‌بندی خاک			ارتفاع آب بالادست (cm)	ارتفاع آب پایین‌دست (cm)	عمق cut off (cm)
	لایه ۱ (غیرقابل نفوذ)	لایه ۲	لایه ۳			
۱	ماسه+رس ۲۰٪	ماسه+رس ۱۲٪	ماسه	۱۰، ۱۵، ۲۰	۵	۰، ۲۵، ۵۰، ۱۶/۵، ۲۴/۷۵
۲	ماسه+رس ۲۰٪	ماسه+رس ۱۲٪	ماسه+رس ۸٪	۱۰، ۱۵، ۲۰	۵	۰، ۲۵، ۵۰، ۱۶/۵، ۲۴/۷۵
۳	ماسه+رس ۲۰٪	ماسه	ماسه	۱۰، ۱۵، ۲۰	۵	۰، ۲۵، ۵۰، ۱۶/۵، ۲۴/۷۵

شرایط مرزی عبارتند از:

(۳) شرط مرزی دیریکله

$$\varphi = \varphi_p$$

(۴) شرط مرزی نیومن

$$k \frac{\partial \varphi}{\partial n} = -q$$

در رابطه بالا φ مقدار پتانسیل روی مرز φ_p ، n بردار خارجی عمود بر مرز و q دبی نشت است. با تقسیم ناحیه پیوسته به اجزا کوچک‌تر، حل مسئله محدود منتج به مقدار φ در گره‌هایی می‌شود که از متصل شدن اجزا کوچک حاصل شده‌اند. برای محاسبه فشار پیزومتری از المان‌های مثلثی سه گرهی استفاده شد (بی‌نام، ۲۰۰۴). برای بررسی تأثیر تعداد المان‌ها بر دقت برآورد فشار پیزومتری، ابتدا برای یک مدل تعداد المان‌ها را در مراحل مختلف افزایش داده تا جایی که از یک مرحله به بعد با افزایش تعداد المان‌ها دقت برآورد فشار پیزومتری تغییر نمی‌کند، این تعداد المان که در حدود ۱۷۰۰ بود، به‌عنوان تعداد المان بهینه در نظر گرفته شد. با توجه به تعداد زیاد المان‌ها مقدار نشت با دقت زیادی به دست آمد. سپس با معرفی بار آبی بالادست و پایین‌دست به برنامه، شرایط مرزی تعیین شد. شرایط مرزی از این قرار بود که بر روی نقاطی که در بالادست کف‌بند و در ابتدای مدل و همچنین روی سطح خاک قرار دارند بار آب ثابت و برابر با ارتفاع آب در مخزن داده شد و برای نقاطی از مدل که در پایین‌دست پرده آب‌بند و در سطح خاک قرار دارند به‌صورت ثابت ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مراحل ترسیم، شبکه‌بندی، موقعیت پیزومترها، اعمال شرایط مرزی، تحلیل جریان و رسم خط‌های فشار در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. با بررسی گزینه‌های مختلف و مقایسه خروجی‌ها با نتایج آزمایشگاهی به تحلیل و ارزیابی مدل‌های مختلف پرداخته شد.

برای مقایسه نتایج فشار پیزومتری در مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی و بررسی کارایی مدل عددی از میانگین درصد خطا استفاده شد که معادله آن به‌صورت زیر است:

$$E\% = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{[(u_{exp})_i - (u_{num})_i] \times 100}{(u_{exp})_i}}{n} \quad (1)$$

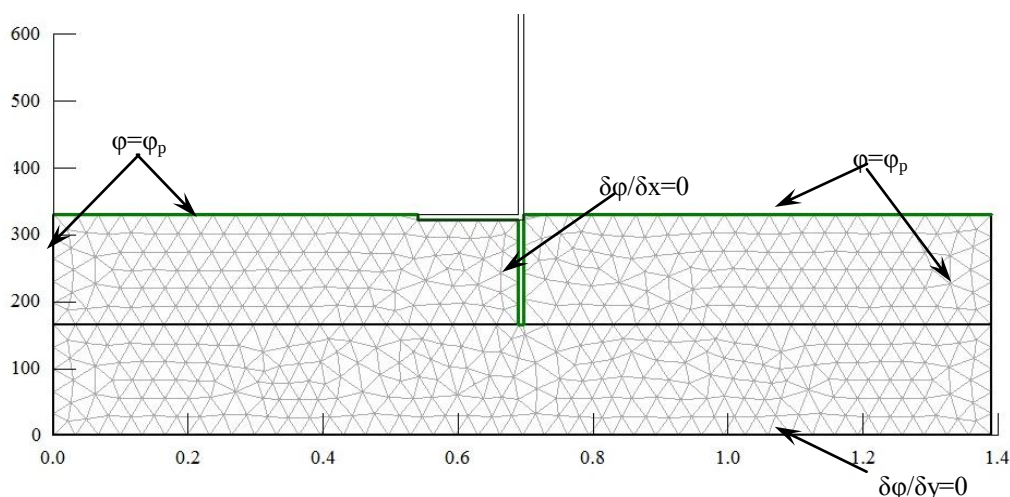
در معادله بالا، u_{exp} مقدار فشار پیزومتری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای پیزومتر u_{num} ، مقدار فشار پیزومتری به دست آمده از مدل عددی برای پیزومتر u_{num} و n تعداد پیزومترهاست.

مدل عددی

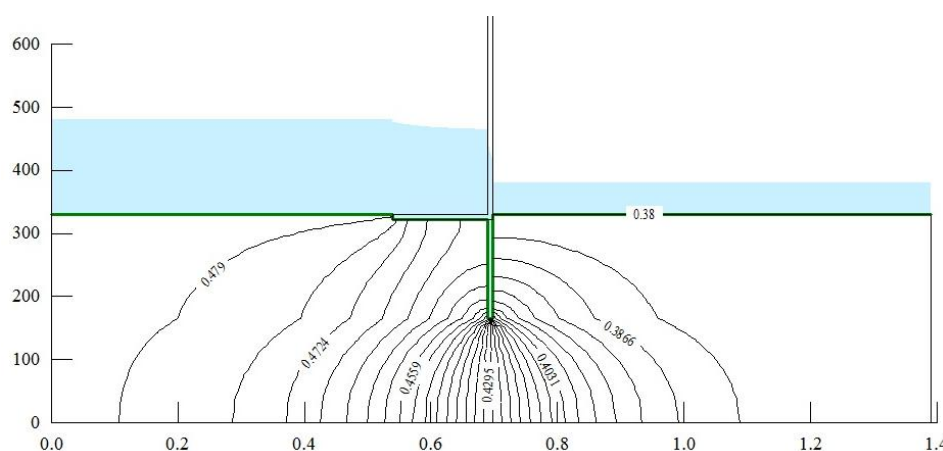
در این پژوهش از نرم‌افزار seep/w از ماژول Geo studio که یک برنامه کامپیوتری فراگیر در زمینه آنالیز تراوش و همچنین توزیع فشار پیزومتری آب در محیط‌های متخلخل با استفاده از روش المان محدود است، استفاده شده است. با این نرم‌افزار به راحتی می‌توان پدیده نشت و شبکه جریان در سدهای خاکی، خاک‌ریزها، سپرهای نفوذناپذیر و ... تحلیل کرد. این مدل جایگزین مدل‌هایی نظیر MSEEP و FSEEP شده است که در گذشته در کشور هلند ارائه شده و تحت سیستم عامل ویندوز نیستند. جامع بودن، این نرم‌افزار را قادر می‌سازد تا مسائل ساده و پیچیده مربوط به نشت را حل کند. معادله نشت با شرایط مرزی تعریف شده در این نرم‌افزار با روش المان‌های محدود حل می‌شود. معادله نشت در حالت دو بعدی عبارت است از:

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

در معادله بالا φ پتانسیل آب در خاک (مجموع فشار پیزومتری و پتانسیل ثقل)، k_x و k_y هدایت هیدرولیکی خاک در جهت x و y است.



شکل ۳- نحوه تعریف محدوده فیزیکی و شبکه‌بندی آن (مقیاس محور افقی متر و عمودی سانتی‌متر است).



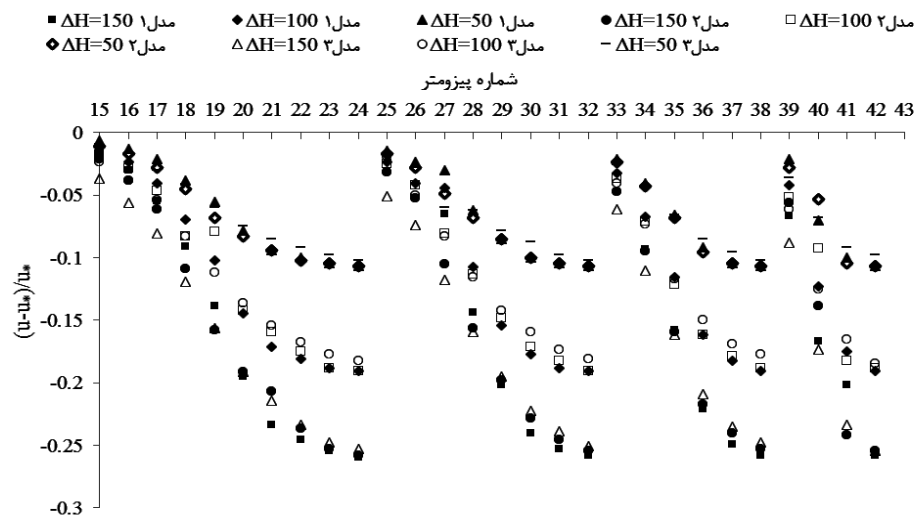
شکل ۴- ترسیم خط‌های هم‌پتانسیل در محدوده مورد نظر (مقیاس محور افقی متر و عمودی سانتی‌متر است).

نتایج و بحث

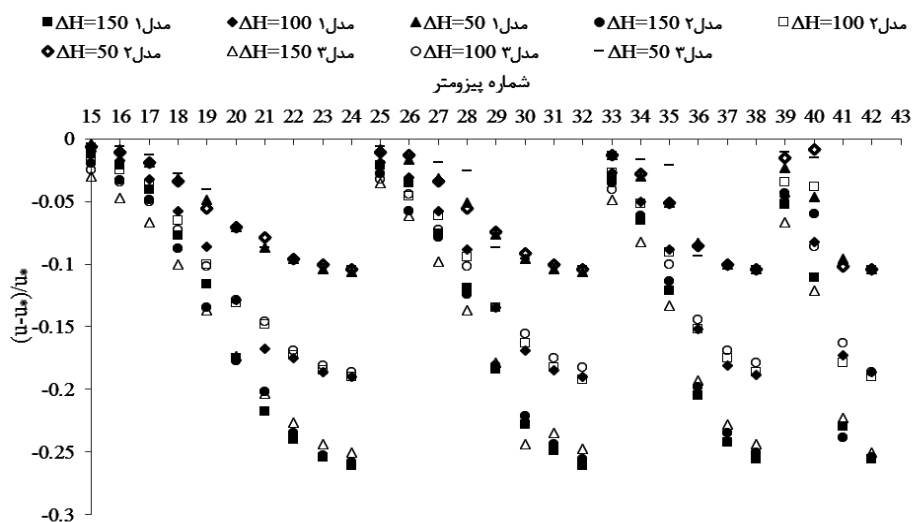
پس از اندازه‌گیری مقادیر آزمایشگاهی و اجرای مدل عددی، نتایج با هم مقایسه شد. ابتدا برای تحلیل نتایج آزمایشگاهی، مقادیر فشار پیزومتری قرائت شده با استفاده

از رابطه $\frac{u - u_*}{u_*}$ بی‌بعد شد که در این رابطه u فشار پیزومتری در نقطه دلخواه و u_* فشار در بالادست مخزن

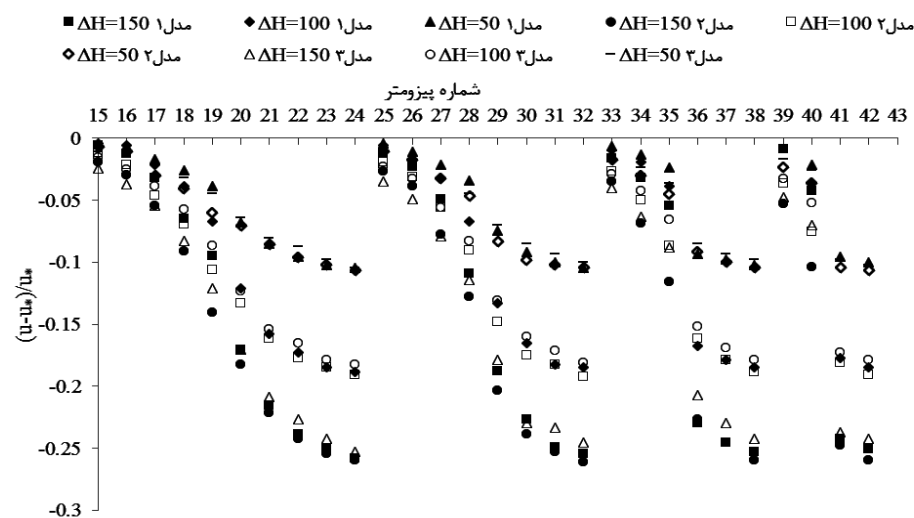
است. شکل تغییرات فشار بی‌بعد برای هر پیزومتر با شرایط مرزی مختلف و انواع لایه‌بندی خاک ترسیم شد. شکل‌های ۵ تا ۸ تغییرات مقادیر بی‌بعد پتانسیل برای هر پیزومتر در یک عمق مشخص از فرورفتگی دیواره آب‌بند را نشان می‌دهند.



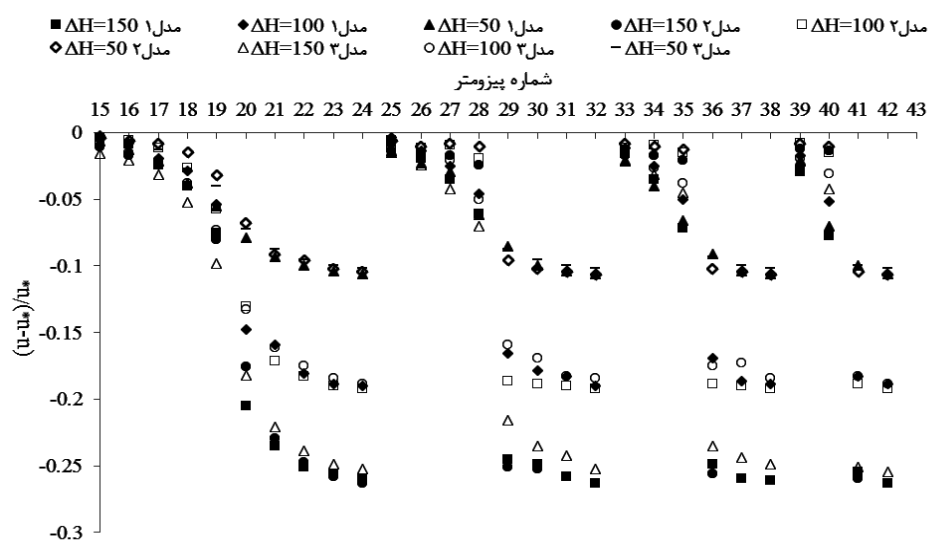
شکل ۵- تغییرات پتانسیل بی بعد در مدل های لایه بندی خاک با عمق فرو رفتگی صفر دیواره آب بند



شکل ۶- تغییرات پتانسیل بی بعد در مدل های لایه بندی خاک با عمق فرو رفتگی ۸/۲ cm آب بند



شکل ۷- تغییرات پتانسیل بی بعد در مدل های لایه بندی خاک با عمق فرو رفتگی ۱۶/۵ cm آب بند



شکل ۸- تغییرات پتانسیل بی‌بعد در مدل‌های لایه‌بندی خاک با عمق فرو رفتگی ۲۴/۷۵cm-آب‌بند

ردیف افق از پیزومترها- مثلاً ۲۵ تا ۳۲- برای حالتی که پرده آب‌بند وجود ندارد.

جدول ۳- مقادیر نشت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (m³/day)

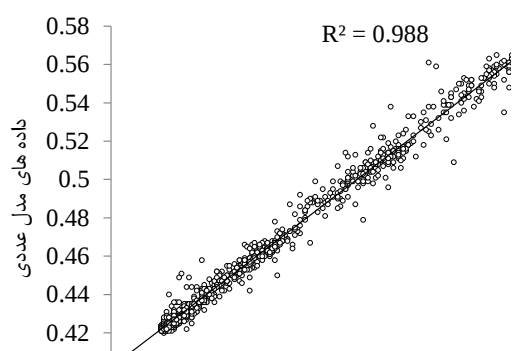
عمق فرو رفتگی دیواره آب‌بند (cm)					نوع خاک	ΔH
۲۴/۷۵	۱۶/۵	۸/۲۵	۰	۰/۴۳۷۷		
۰/۱۳۹۷	۰/۱۵۸۹	۰/۲۷۵۷	۰/۴۳۷۷	۱۵۰	مدل ۱	۱۰۰
۰/۰۸۹۳	۰/۱۰۱۴	۰/۱۸۱۲	۰/۲۸۱۰	۱۰۰		۵۰
۰/۰۴۹۳	۰/۰۴۹۱	۰/۰۹۱۱	۰/۱۳۴۹	۵۰		۱۵۰
۰/۰۲۴۸	۰/۱۱۴۷	۰/۱۲۲۵	۰/۱۷۴۲	۱۵۰	مدل ۲	۱۰۰
۰/۰۱۶۳	۰/۰۷۳۵	۰/۰۷۸۹	۰/۱۲۳۷	۱۰۰		۵۰
۰/۰۰۶۶	۰/۰۲۰۲	۰/۰۳۷۱	۰/۰۵۵۳	۵۰		۱۵۰
۰/۴۶۲۱	۰/۷۲	۱/۰۲۲۳	۱/۳۸۷۲	۱۵۰	مدل ۳	۱۰۰
۰/۳۰۷۲	۰/۴۶۹۷	۰/۶۹۶	۰/۹۴	۱۰۰		۵۰
۰/۱۸۹۲	۰/۲۲۶۹	۰/۳۳۶۵	۰/۴۹۰۷	۵۰		

در جدول ۴ مقادیر درصد خطای فشار پیزومتری برای مدل‌های مختلف نشان داده شده که میانگین خطا برای همه مدل‌ها ۰/۲۸٪ است. همچنین در شکل ۹ مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها با مقادیر متناظر حاصل از مدل عددی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که مقدار ضریب تبیین ۰/۹۸۸ به دست آمده است که نشان دهنده هماهنگی خوب مقادیر فشار به دست آمده از مدل عددی

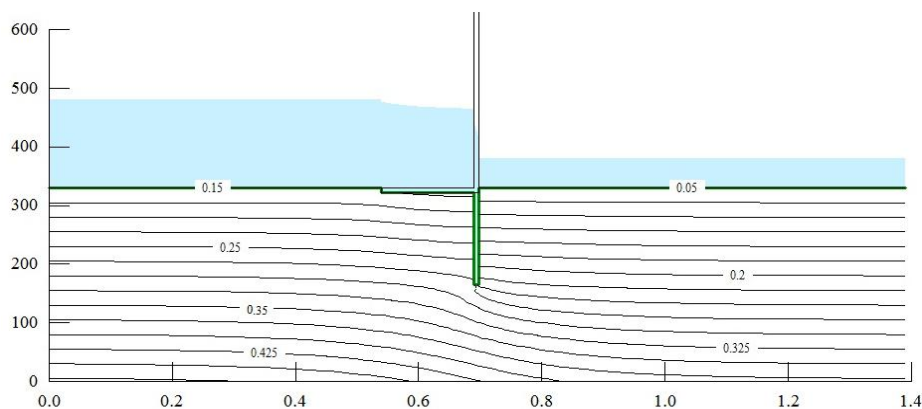
همان‌طور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود برای یک عمق مشخص از دیواره آب‌بند و اختلاف بار ثابت، مقدار پتانسیل بی‌بعد، در پیزومترهایی که در بالادست دیواره سپری قرار دارند برای مدل ۱ بیشتر از مدل ۲ و همچنین بیشتر از مدل ۳ است. اما در پیزومترهایی که در پایین‌دست دیواره آب‌بند هستند این روند معکوس نسبت به حالت دارای پرده آب‌بند به حالت خطی نزدیک‌تر بوده و این اختلاف با افزایش عمق پرده آب‌بند بیشتر می‌شود. که این مسئله بیانگر تغییر در خط‌های جریان و تندتر شدن شیب آن‌ها با نفوذ بیشتر پرده آب‌بند است. از طرفی بین مقادیر بی‌بعد پتانسیل بالادست دیواره آب‌بند و پایین‌دست آن یک بریدگی در شکل‌ها دیده می‌شود که نشان‌دهنده کاهش انرژی به دلیل تأثیر دیواره آب‌بند است. همچنین با مشاهده شکل‌ها مشخص می‌شود که با افزایش عمق دیواره آب‌بند این جهش بین مقادیر فشار پیزومترهای بالادست و پایین‌دست افزایش می‌یابد. میزان نشت اندازه‌گیری شده در هر یک از مدل‌های آزمایشی بر حسب مترمکعب در روز طی جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه عمق فرو رفتگی دیواره آب‌بند افزایش یافته، مقادیر نشت کاهش پیدا کرده است. از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد رس در لایه‌های خاک، میزان نشت کمتر شده است. یعنی مقدار فشار پیزومتری بی‌بعد در مدل شماره ۳ بیشتر از مدل ۱ و ۲ است. این روند به خصوص در اختلاف ارتفاع برابر ۱۵۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. با توجه به شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که روند تغییر پتانسیل بدون بعد در یک

جدول ۴- میانگین درصد خطای فشار پیزومتری برای مدل‌های

مختلف					نوع خاک
عمق فرو رفتگی دیواره آببند (cm)					
-۲۴/۷۵	-۱۶/۵	-۸/۲۵	۰	ΔH	مدل ۱
۱/۵۸۴	۰/۵۸۲	۰/۴۴۴۳	۱/۰۶۲۵	۱۵۰	
۰/۸۱۱۴	۰/۳۹۴۵	۰/۵۱۲	۰/۸۲۱۸	۱۰۰	
۰/۵۳۵۱	۰/۲۹۴	۰/۲۸۶۷	۰/۵۱۴۸	۵۰	
۱/۲۱۷	۱/۸۰۶۷	۰/۸۰۷۳	۱/۰۲۵	۱۵۰	مدل ۲
۰/۹۴۸۵	۱/۲۷۴۲	۰/۸۲۶	۱/۰۳۳۱	۱۰۰	
۰/۳۷۰۸	۰/۶۸۹۹	۰/۴۱۷۸	۰/۸۱۹	۵۰	
۰/۵۷۲۹	۰/۶۱۸۳	۱/۰۳۳۲	۱/۵۷۸۷	۱۵۰	
۰/۴۱۴۴	۰/۳۱۸۶	۰/۸۶۰۸	۰/۷۷۵۷	۱۰۰	مدل ۳
۰/۱۷۷۴	۰/۲۲۴۷	۰/۵۶۲	۰/۴۷۲۳	۵۰	



شکل ۹- مقایسه داده‌های پتانسیل به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی

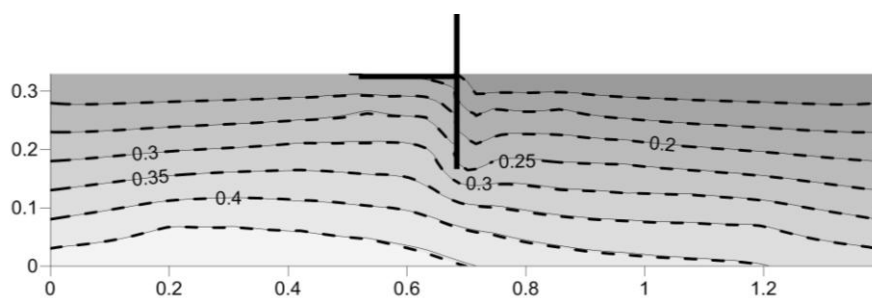


شکل ۱۰- خط‌های هم‌فشار پیزومتری برای عمق فرو رفتگی ۱۶/۵cm - پرده آب‌بند و اختلاف بار ۱۰cm (مقیاس محور افقی متر و عمودی سانتی‌متر است)

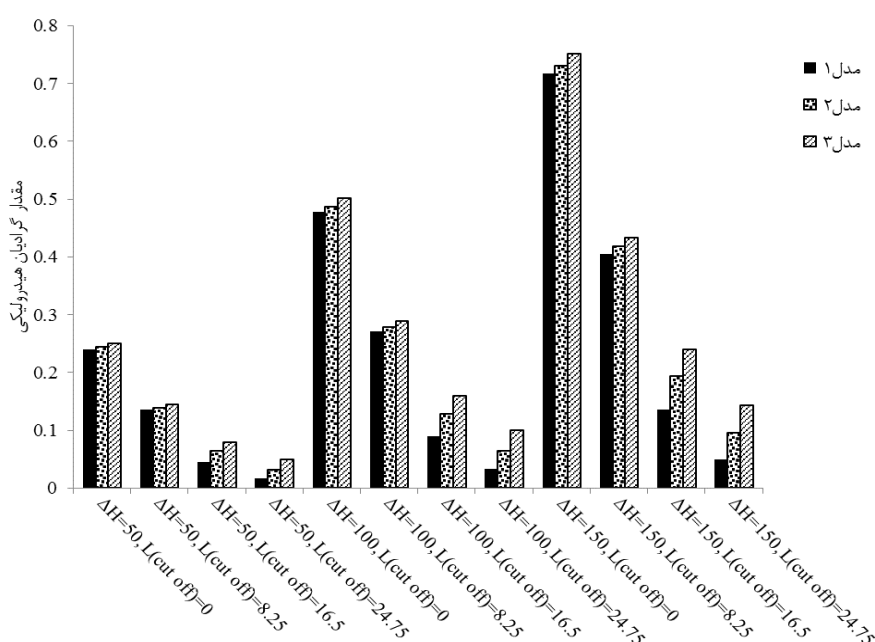
با مقادیر آزمایشگاهی است.

شکل ۱۰ خط‌های هم‌فشار پیزومتری مدلی با عمق پرده آب‌بند ۱۶/۵ cm و اختلاف بار ۱۰cm را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ خط‌های هم‌فشار با استفاده از داده‌های فشار پیزومتری مدل ۱ لایه‌بندی خاک با دیواره آب‌بند ۱۶/۵ سانتیمتری با نرم افزار surfer ترسیم و با مقادیر به دست آمده از مدل عددی مقایسه شده است. روش میان‌یابی استفاده شده در این نرم‌افزار Kriging است.

از آنجایی که نتایج مدل عددی دارای خطای کمی است، یک المان مربعی با ابعاد ۱/۵×۱/۵ سانتی‌متر در پایین‌دست پرده آب‌بند و چسبیده به سطح خاک در نرم‌افزار seep/w تعریف شد و با استفاده از آن برای همه مدل‌های خاک متوسط گرادیان خروجی محاسبه شد. در شکل ۱۲ تأثیر عمق نفوذ پرده آب‌بند و تغییر لایه‌بندی خاک بر روی گرادیان خروجی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مقدار گرادیان هیدرولیکی در لایه‌بندی خاک مدل ۳ بیشتر از دو مدل دیگر است. همچنین مقدار آن در خاک با لایه‌بندی مدل ۲ بیشتر از مدل ۱ است. از طرف دیگر هرچه طول دیواره آب‌بند افزایش می‌یابد از مقدار گرادیان هیدرولیکی خروجی کاسته می‌شود.



شکل ۱۱- خطوط هم‌فشار در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی، خط چین: نتایج آزمایشگاهی و خط پر: نتایج مدل عددی (مقیاس محور افقی متر و عمودی سانتی‌متر است)



شکل ۱۲- تأثیر نفوذ پرده آب‌بند و تغییر لایه‌بندی خاک بر روی گرادیان هیدرولیکی خروجی

نتیجه‌گیری

از آنجایی که در مطالعات مربوط به جریان آب در خاک بیشتر از مدل‌های عددی استفاده شده و این مطالعات به صورت صحرایی انجام شده‌اند، پس در این پژوهش برای کنترل بهتر شرایط و حاصل شدن نتایج دقیق‌تر از مدل فیزیکی برای انجام این مطالعه استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات پتانسیل بی‌بعد در یک خط افقی بدون حضور پرده آب‌بند به طور تقریبی خطی است، به‌خصوص در ابتدای جریان، ولی با حضور پرده آب‌بند این تغییرات غیرخطی می‌شوند که بیانگر تغییر در جهت خطوط جریان است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با حضور پرده آب‌بند نشت کاهش یافته و میزان گرادیان خروجی آن کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان داد

که مدل عددی Seep/w کارایی مناسبی در شبیه‌سازی فشار و دبی پی‌های مطابق دارد.

منابع

۱. ابن‌جلال ر. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۳. اصول نظری و عملی مکانیک خاک (چاپ چهارم). انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۷۲۹ ص.
۲. داودنژاد س. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر استفاده از پرده آب‌بند بر روی کاهش نشت از سدهای خاکی. سیزدهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، ۲۱ تا ۲۴ اسفند، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۳. صبا ح. ر. و ولی‌زاده م. ۱۳۹۰. مطالعه عددی میزان

نشت سد خاکی حسنلو و مقایسه آن با مقادیر نشت واقعی. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ تا ۷ اردیبهشت، دانشگاه سمنان.

۴. صباغ یزدی س. و بیات ب. ۱۳۸۸. بررسی دقت روابط متداول برای محاسبه زیر فشار در پی همگن و همسان سدهای وزنی دارای پرده آببند بالادست با توسعه تحلیلگر دو بعدی NASIR. فصلنامه عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز. ۳۹(۵۹): ۷۱-۸۲.

۵. قبادیان ر. و خدائی ک. ۱۳۸۸. تأثیرات دیواره آببند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی زیرسازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود. نشریه آب و خاک. ۲۳(۲۴): ۱۴۸-۱۶۰.

۶. موهبتزاده ا. مشعل م. و خیاط ن. ۱۳۸۹. آنالیز تراوش سد خاکی کرخه با نرم افزار seep/w و بررسی صحت‌سنجی آن. اولین همایش ملی مدیریت منابع آب ساحلی. ۱۷ تا ۱۸ آذر. دانشگاه ساری.

7. Anonymous. 2007. Seepage Modeling with Seep/W 2007. Geo-Slope International Ltd. Calgary. Alberta, Canada.
8. Lakshmin R. 2003. Seepage in soils principles and applications. John Wiley and Sons Inc. New York.
9. Tayfur G. Swiatek D. Wita A. and Singh V. P. 2005. Case study: finite element method and artificial neural network models for flow through Jeziorsko Earthfill Dam in Poland. Journal of Hydraulic Engineering. 131(6):431-440.
10. Yifeng C. Chuangbing Z. and Hong Z. 2008. A numerical solution to seepage problems with complex drainage systems. Computers and Geotechnics. 35(3):383-393.

