

تحلیل رفتار بدنه سد خاکی در شرایط افت ناگهانی تراز آب مخزن به روش آزمایشگاهی و عددی

منصور پاکمنش^۱، سید حبیب موسوی جهرمی^۲، امیر خسرو جردی^{۱*}، حسین حسن پور درویش^۲ و حسین بابازاده^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰)

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی و نرم‌افزاری سدهای خاکی همگن در حالت تخلیه ناگهانی مخزن می‌پردازد. در این پژوهش با به‌کارگیری مدل آزمایشگاهی، مدل عددی در حالت‌های مختلف اشباع بودن خاک مورد ارزیابی قرار داده شد. به‌منظور بررسی آزمایشگاهی تأثیر هدایت هیدرولیکی بر افت سریع سطح آب و به‌کارگیری پارامترهای هیدرولیکی مواد، جریان نشت در مدل توسط نرم‌افزار seep/w مدل‌سازی شد. اطلاعات ورودی به نرم‌افزار شامل، هدایت هیدرولیکی و مقدار حجم آب به ترتیب با انجام آزمایش بار ثابت و با به‌کارگیری یک نفوذسنج دیسکی ارائه شد. پس از صحت‌سنجی هدایت هیدرولیکی با مدل عددی، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. مقایسه بین تخلیه عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی تفاوت معناداری با مدل آزمایشگاهی ندارد. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های اشباع و غیراشباع نشان می‌دهد که مدل غیراشباع مطابقت زیادی با مدل آزمایشگاهی دارد. فرض بر این است که با توجه به شرایط افت، مدل‌های غیراشباع می‌توانند دقت زیادی را برای شبیه‌سازی جریان از طریق سد خاکی همگن به‌دست آورند.

واژه‌های کلیدی: پایداری شیب، افت سریع، سد خاکی، پیش‌بینی زهکشی، seep/w

۱. گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس، تهران، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khosrojerdi@srbiau.ac.ir

مقدمه

پایداری سدهای خاکی و فرازبندها برای شرایط طولانی مدت به نیروهای داخلی آب (فشارهای منفذی آب و نیروهای تراوش)، اثرات هیدرواستاتیک و هیدرودینامیکی خارجی خصوصیات خاک و هندسه بدنه سد بستگی دارد (۳ و ۱۵). کاهش تراز آب مخزن در سدهای خاکی سبب کاهش فشار منفذی داخلی (PWP) و کاهش فشار هیدرواستاتیک تثبیت کننده خارجی می‌شود. بنابراین، بهره‌برداری ایمن از سدهای خاکی نیاز به مطالعاتی در مورد نشت و پایداری شیب بالادست سد دارد. پایداری بدنه سد در طی مراحل تخلیه به‌طورمستقیم به سرعت تخلیه بستگی دارد و تخلیه‌های سریع بسیار مهم شناخته می‌شوند (۲۵). توزیع رطوبت در محیط متخلخل در صورت افت سریع سطح آب و نشت پایدار و ناپایدار در بسیاری از موضوعات از جمله نشت از سد خاکی و برهم‌کنش آب‌های سطحی با آب‌های زیرزمینی در جابه‌جایی بدنه سد مهم است (۹). برآورد توزیع فشار آب حفره‌ای به عنوان یک عامل مهم در تحلیل ثبات شیب پوسته سد خاکی است. به‌طور کلی، دو راه حل برای پیش‌بینی رژیم فشار آب منفذی پس از افت تراز آب مخزن استفاده شده است: آنالیز زهکشی نشده و روش جریان. اولین مورد در مورد شیب‌های خاک به‌نسبت نفوذناپذیر اعمال شده است، که در آن فشار آب منفذی در هنگام افت تراز از بین نمی‌رود. بنابراین، تنها اثر تغییر تنش کل در برابر شیب‌ها در محاسبه گنجانده شده است (۲۸). کاهوت و همکاران (۱۳) به‌روش عددی ضریب اطمینان پایداری شیب را در یک سد خاکی تحت شرایط افت سریع بررسی کرد. پایداری شیب با استفاده از فاکتور ایمنی که توسط رابطه ساده شده بیشاپ تخمین زده شده است، انجام شد. نتایج نشان داد که عامل ایمنی بیشتر با توجه به دو پارامتر، ضریب اصطکاک و تراکم متفاوت است. سرانجام، آنها معادله‌ای برای جلوگیری از احتمال خرابی مربوط به پایداری شیب توصیه کردند. علاوه بر این، در مورد تحولات و کاربرد روش‌های سطحی (RSMs) در مسائل مختلف، ضریب اطمینان شیب خاکریز مورد مطالعه قرار داده

شد. به منظور بررسی اثر فشار آب منفذی با در نظر گرفتن رژیم‌های پیشنهادی، از یک مدل عددی Seep/w استفاده شد (۱۶). به‌روش عددی اثر افت سریع تراز مخزن یک سد خاکی را که قبلاً زمین لرزه شدیدی داشته است، بررسی کردند. تجزیه و تحلیل افت توسط یک تراوش موقت انجام شد. طبق مطالعه آنها، اگر پس از زلزله شدید تخلیه اتفاق بیفتد، به‌دلیل تغییرات تنش ناشی از لرزه‌ای که توسط خاکریز سد تجربه می‌شود، پایداری سد ممکن است بیشتر کاهش یابد. علاوه بر این، مشخص شد که نرخ افت تراز آب، یک متغیر مهم برای پایداری سد است (۲۵). اثر زلزله شدید در طی شتاب‌دهی‌های مختلف زلزله بررسی شد. پارامتر اصلی ثبات شیب، فشار آب کل معرفی شد و به‌طور قابل توجهی اثرات این عامل را بر پایداری شیب کاهش می‌دهند (۴). بسیاری از پژوهشگران بر روی نشت نامحدود با سطح آزاد متغیر مخزن تمرکز کرده‌اند و به‌تازگی روش‌های زیادی برای تجزیه و تحلیل چنین موضوعاتی ارائه شده است. به عنوان مثال؛ دبی نشت ناپایدار متأثر از بارندگی و نوسانات آب سطحی با استفاده از یک مدل نشت غیراشباع و نیمه اشباع بر اساس تئوری جریان دو فازی هوا-آب در یک محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت (۲۶). مدل SUTRA (مدل اجزای محدود جریان اشباع-غیراشباع وابسته به تراکم سیال) برای دبی آب زیرزمینی تحت تأثیر نوسانات چرخه‌ای شرایط مرزی، مانند دوره‌های مرطوب و خشک اصلاح شد (۱). همچنین، کومار و همکاران (۱۴) با استفاده از نرم افزار HYDRUS دو بعدی اثر سطح آب را از طریق محیط متخلخل اشباع نشده آزمایش کرد. داده‌های تجربی با استفاده از معادله ریچاردز برای جریان اشباع متغیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقدار آب و موقعیت سطح آب پیش‌بینی شد. نرم افزار HYDRUS از خطاهای تعادل جرم در مناطق اشباع نشده جلوگیری می‌کند و از نظر عددی پایدار است. بسیاری از مدل‌های توسعه یافته به فشار یا بار هیدرولیکی وابسته هستند. در نتیجه، در این مدل‌ها و روش‌های عددی، به‌دلیل رفتار مویین، امکان تعیین دقیق رابطه‌ای برای هوا

پدیده پایداری در بدنه سدهای خاکی خواهد شد. پیش‌بینی رفتار بدنه سد در زمان افت تراز آب مخزن، امری ضروری است که سبب ایجاد برنامه زمان‌بندی با دید مهندسی در بهره‌برداری از سد می‌شود. از این‌رو؛ تأثیر خصوصیات هیدرولیکی اشباع و غیراشباع سازند بر نشت نامحدود از بدنه سد خاکی بررسی شد. بر این اساس، موقعیت خط تراوش، توزیع فشار آب و میزان دبی جریان از بدنه سد خاکی همگن در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی بررسی شد.

معادلات جریان داری در محیط متخلخل

قانون داری توسط ریچارد (۲۲) برای خاک غیراشباع اصلاح شد. این معادله معمولاً با استفاده از مدل دوبعدی FEM حل و به صورت دو خم از منحنی تعریف می‌شود. به‌طوریکه خطوط پتانسیل و جریان از طریق مدل‌های عددی رسم شده است. معادله دیفرانسیل حاکم در نرم‌افزار SEEP/W برای تجزیه و تحلیل تراوش دو بعدی گذرا مطابق رابطه ۱ بیان شد (۱۱):

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

در اینجا؛ H هد کل، k_x و k_y هدایت هیدرولیکی در جهت x و y است.

خاک اشباع و غیراشباع

فاکتور SWCC که به‌عنوان منحنی مشخصه آب در خاک تعریف می‌شود، رابطه بین حجم آب و درجه اشباعیت با مکش (ماتریک یا کل) را نشان می‌دهد (۷). این فاکتور شامل اطلاعات اساسی مورد نیاز برای توصیف بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی مربوط به خاک‌های غیر اشباع است (۲۱). در میان معادلات تجربی مختلف برای برآزش منحنی SWCC (۵، ۸ و ۲۰)، یکی از پرکاربردترین معادلات توسط ون جنوتن در سال ۱۹۸۰ (۲۷) ارائه شد که در آن مقدار حجمی آب (θ) و هدایت هیدرولیکی (k) را می‌توان به‌شرح زیر بیان کرد. همچنین، زمانی که اندازه ذرات در تمام دامنه‌ها به‌عنوان یک پارامتر اصلی از

و آب وجود ندارد. همچنین، به‌دلیل تغییرات چشمگیر در میزان اشباع خاک در نزدیکی این سطح، تعیین موقعیت دقیق سطح فریاتیک دشوار است (۹). بنابراین، برای تعیین موقعیت دقیق سطح نشت و خط فراتریک، لازم است هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در حالت غیراشباع تعیین شود. درحقیقت، محدودیت استفاده از مدل‌های تحلیلی نشت به تعیین خصوصیات هیدرولیکی محیط متخلخل مربوط می‌شود. به‌خصوص تغییرات رطوبت و نفوذپذیری محیط متخلخل در شرایط غیراشباع (۱۲). برخی از مطالعات با در نظر گرفتن هندسه سد خاکی و تأثیر آن بر شرایط هیدرولیکی در حال انجام هستند. اولین بار، مورگنسترن (۱۸) نمودارهای پایداری را برای خاکریزهای همگن ارائه داد که نشانگر تغییر ضریب ایمنی با افت تراز مخزن است. با پایین آمدن تراز مخزن، اگر فرض شود که در هنگام تخلیه اتلاف فشار منفذی رخ ندهد، عامل ایمنی کاهش می‌یابد. اما در حالت زهکشی شده باید برخی محاسبات انجام شود. بریلگن (۳) ثابت شیب‌های مستغرق را در شرایط کاهش تراز آب مخزن بررسی کرد. بر اساس گزارش آنها، نشت و جابه‌جایی بدنه همراه با تحلیل پایداری، با استفاده از روش المان محدود (FEM) برای نرخ و نسبت‌های مختلف افت با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی - پلاستیک شیب خاکریز انجام شد. وی اظهار داشت، پایداری شیب در هنگام افت تراز آب مخزن بستگی زیادی به نفوذپذیری خاک دارد. نشستگ و همکاران (۱۹) با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده (MGA) برای جستجوی سطح لغزش با توجه به معیارهای تنش برشی و تئوری مقاومت یکپارچه غیرخطی، بدون پیش فرض شکل سطح لغزش، یک مدل تحلیلی بهینه از تجزیه و تحلیل پایداری شیب سدهای خاکی فراهم کرد. بر اساس نتایج آنها، MGA یک الگوریتم تحمل خطای بسیار کارآمد، ساده و با عملکرد خوب است. اثر شیب در این تحقیق بر اساس تغییر فشار آب منفذی بررسی شد.

مطابق پیشینه پژوهش انجام شده، کاهش سریع تراز آب مخزن، به‌واسطه افت ناگهانی فشار آب منفذی سبب رخداد

می‌کند (۲۴). دیواره‌های جانبی از پلکسی گلاس و سایر قطعات از فولاد هستند. در قسمت بالادست و پایین دست بدنه سد خاکی، مخازن آب برای بررسی شرایط نفوذ ناپایدار در مدل در نظر گرفته شد (۲۳).

ویژگی‌های مواد نقش مهمی در الگوی جریان در هر پدیده نشت دارند. برای مدل آزمایشی سد خاکی، ترکیبی از مواد ماسه‌ای حاوی درصد کمی سیلت استفاده شد. شکل ۲-الف توزیع اندازه دانه مواد سد خاکی را نشان می‌دهد. دلیل استفاده از چنین موادی پاسخ سریع این خاک‌ها به تغییر در شرایط مرزی و در نتیجه صرفه‌جویی در وقت است. در طی مراحل ساخت بدنه سد خاکی، لایه‌های خاک در ضخامت ۵۰ میلی‌متر ریخته شده و با غلطک دستی متراکم می‌شوند (شکل ۲-ب).

آزمون‌های نشت از بدنه سد خاکی در محدوده هددهای آبی مختلف مخزن بالادست از ۰/۱ تا ۰/۶ متر به صورت پایدار و ناپایدار با کاهش سطح آب مخزن در هر مرحله به مقدار ۰/۱ متر انجام شد. فاصله زمانی کاهش سطح آب تا حد مطلوب حدود ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد و زمان تعادل و شروع جریان پایدار بر اساس تغییرات سطح آب پیژومترها کنترل شد. پس از تثبیت شرایط نشت پایدار، سطح آب در پیژومترها ثابت شد. به منظور بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی در تجزیه و تحلیل نشت (یا انتقال) ناپایدار، آزمایش‌های تراوش با شرایط مرزی متغیر بررسی شد. از آنجا که در تجزیه و تحلیل پایداری سد خاکی، به طور کلی شرایط ناپایدار برای افت سریع سطح آب در نظر گرفته می‌شود، آزمایش‌های نشت ناپایدار نیز انجام شد. افت سریع سطح آب مخزن در تجزیه و تحلیل نشت ناپایدار در فواصل ۰/۱ متر در هر ۱۰ دقیقه انجام شد. در مجموع ۴ مرحله مختلف تجزیه و تحلیل نشت ناپایدار انجام شد. زمان شروع هر مرحله از آزمون‌های ناپایدار پس از رسیدن به تعادل در مرحله قبلی بود. علاوه بر این، دبی تراوش عبور داده شده از بدنه سد خاکی در قسمت خروجی مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه هدف اصلی این مطالعه، تجزیه و تحلیل تراوش از بدنه، متأثر از پارامترهای هیدرولیکی سازند بدنه سد

خصوصیات خاک در نظر گرفته شود، می‌توان معادله فردلونند را در نظر گرفت (۷):

$$\theta = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (2)$$

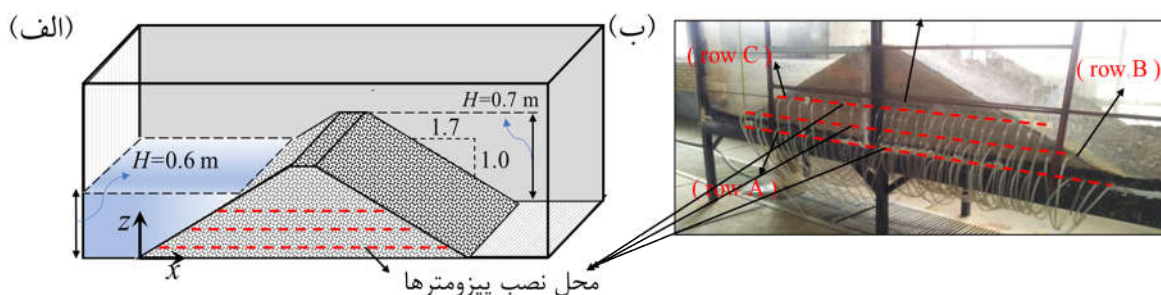
$$k = k_s \theta^{1/2} [1 - (1 - \theta^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

در اینجا؛ $\psi = u_a - u_w$ معرف مکش ماتریک، u_a و u_w به ترتیب فشار هوا و فشار آب منفذی، n و α پارامترهای تجربی مناسب بافت خاک، m مرتبط با n در رابطه $m = (1 - 1/n) > 1$ و k_s و k نفوذپذیری اشباع و نسبی هستند.

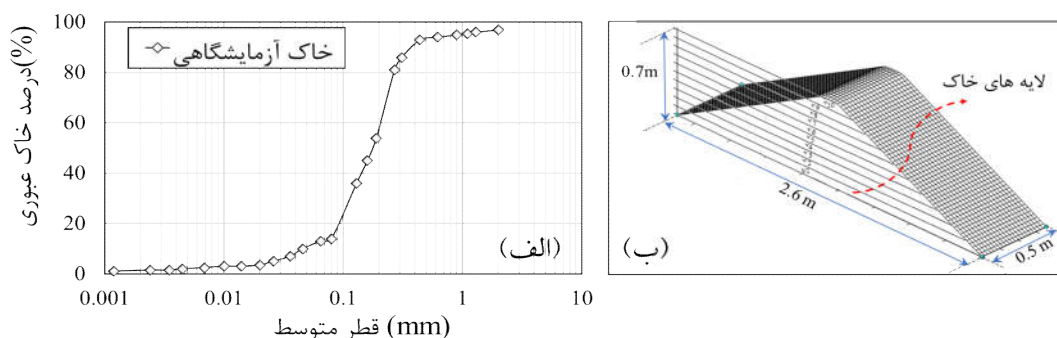
مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور بررسی خصوصیات نشت آب در بدنه سدهای خاکی، یک مدل آزمایشگاهی از سد همگن با ارتفاع ۰/۷ (متر) در شکل متقارن نسبت به محور سد ساخته شد (شکل ۱-الف). هشتاد عدد پیژومتر برای قرائت خط نشت جریان در سه تراز ارتفاعی از پی، شامل؛ ۰/۰۵، ۰/۱۵، ۰/۳ (متر)، با فاصله ده سانتی‌متری از هم، نصب شد. برای افزایش دقت اندازه‌گیری مقادیر فشار آب منفذی، تراکم نصب پیژومترها در شیب پوخته پایین دست بیشتر از بالادست بدنه خاکریز در نظر گرفته شد. شکل ۱-ب نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی را به همراه موقعیت نصب پیژومترها در بدنه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به جز دو پیژومتر، بقیه پیژومترهای ردیف دوم (پیژومترهای میانی) در پوخته پایین دست بدنه سد خاکی تعبیه شد. علاوه بر این، در کف مدل، از صفحه‌ای با سطح زبر به منظور کاهش دبی تراوش در سطح تماس مماسی خاک با کف استفاده شده است. برای کاهش تراوش از دیواره‌های جانبی مدل نیز یک لایه ماسه دانه‌ریز به سطح دیواره‌های جانبی چسبانده شد. این لایه دبی تراوش را کاهش می‌دهد و اصطکاک بین خاک و سطح دیواره را افزایش می‌دهد، و همچنین از جدا شدن خاکدانه‌ها و دیواره جانبی جلوگیری



شکل ۱. مدل آزمایشگاهی: الف) پارامترهای هیدرولیکی مدل آزمایشی و ب) موقعیت نصب سه ردیف پیزومتر

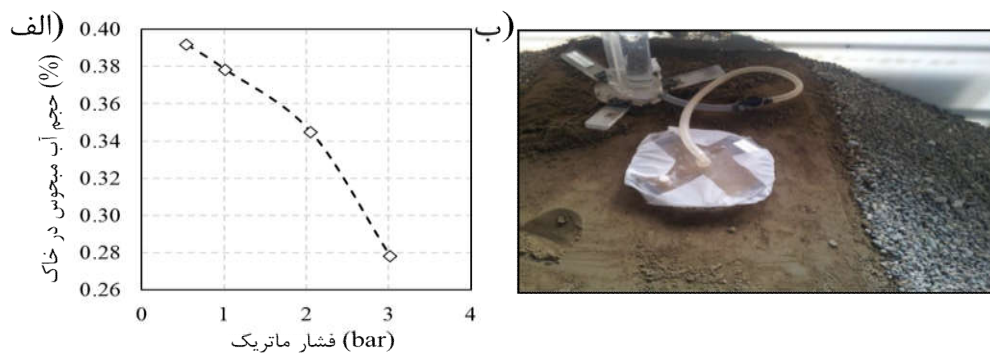


شکل ۲. توزیع اندازه ذرات در لایه‌های خاکریز بدنه سد: الف) توزیع اندازه ذرات و ب) مشخصه هندسی لایه‌های خاکریز

(متر) زیر تاج سد انجام شد. برای این منظور، سطح پس از حذف، لایه‌ای با ضخامت ۰/۲ متر از تاج سد و قبل از انجام آزمایش، با دقت صاف شد. سپس، یک لایه نازک از ماسه، با ضخامت ۲ میلی‌متر (یا کمتر)، با اندازه ذرات حدود ۱۰۰ میکرومتر، روی سطح خاک ریخته شد تا از تماس هیدرولیکی مناسب بین دیسک نفوذ و سطح خاک اطمینان حاصل شود. شکل (۳-ب) تصویری از دستگاه نفوذسنج استفاده شده روی تاج سد را نشان می‌دهد. آزمون نفوذپذیری دیسک در پتانسیل‌های ماتریک ۰/۲-، ۰/۱۷-، ۰/۱-، ۰/۰۳- و ۰ (متر) با شروع از کمترین فشار (۰/۰۲- متر) انجام شد. برای هر آزمایش، نفوذ تجمعی برای به دست آوردن شرایط پایدار در فواصل ۶۰ (ثانیه) ثبت شد. در کل، نفوذ پایدار برای حداقل فشار (۰/۲- متر) حدود ۵۰ دقیقه پس از شروع آزمایش به دست آمد. برای فشارهای بیشتر به شرایط اشباع (ارتفاع فشاری متر)، زمان رسیدن به سرعت نفوذ ثابت کاهش یافت. شکل ۳-ب سیستم دیسکی مکش را نشان می‌دهد.

خاکی است. در نتیجه، خصوصیات هیدرولیکی مدل، از جمله منحنی مشخصه رطوبت و عملکرد هدایت هیدرولیکی با استفاده از روش آزمایشگاهی تعیین شد.

به منظور تعیین منحنی مشخصه رطوبت (به عنوان مثال؛ مقدار حجم آب، VWC) آزمایش صفحه فشار با فشار مکش حداکثر ۳ (اتمسفر) انجام شد. منحنی مشخصه آزمایشگاهی رطوبت در بدنه سد خاکی در شکل ۳-الف نشان داده شده است. هدایت هیدرولیکی مواد بدنه در جهت عمودی با استفاده از دو روش بار ثابت برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و دستگاه نفوذسنج کششی برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع تعیین شد. هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمده از سه تکرار آزمایش بار ثابت ۶/۴۱ (سانتی‌متر بر ساعت) است. برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیراشباع در جهت عمودی در طول زمان افت سریع، از یک دستگاه نفوذپذیر با قطر دیسک ۰/۲ (متر) استفاده شد. آزمایش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری پس از اتمام آزمایش‌های تراوش و در عمق حدود ۰/۲



شکل ۳. محاسب VWC: الف) منحنی مشخصه آزمایشگاهی رطوبت در بدنه سد خاکی همگن و ب) سیستم مکش دیسکی نصب شده روی بدنه سد برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع نشده

در پتانسیل ماتریک h است. در این مطالعه، عملکرد هدایت هیدرولیکی برآورد شده با معادله ۶ بیان می‌شود:

$$k = 5.676 \exp(0.199h) \quad (۶)$$

که در آن k هدایت هیدرولیکی برحسب $[cm/hr]$ و h در $[cm]$ است. حداکثر ظرفیت مکش این دستگاه کمتر از ۱ اتمسفر است. با توجه به جنس بدنه، دامنه مکش اعمال شده کافی است و روند تغییرات در منحنی حاصل، این نکته را تأیید می‌کند. شکل ۴ منحنی عملکرد هیدرولیکی مواد بدنه مدل فیزیکی را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی عددی

مدل عددی

در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار قدرتمند ژئوتکنیکی اجزای محدود Geostudio, 2007 با زیربرنامه SEEP/W، برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم استفاده شد (۱۱). شکل ۵، مدل اولیه سد خاکی را در شرایط پایدار نشان می‌دهد. به منظور ایجاد مدل عددی در شرایط گذرا، حل وضعیت حالت پایدار جدایی‌ناپذیر است. شرایط مرزی برای تجزیه و تحلیل تراوش در شکل ۵-ج نشان داده شده است. در مرز بالادست، هد ارتفاعی به‌عنوان مرز بالادست و در پایین دست شرایط مرزی دبی صفر در نظر گرفته می‌شود. دبی صفر، به شرایط اولیه‌ای که در زمان اولیه هیچ نشستی از بدنه پایین دست سد

هدایت هیدرولیکی اشباع- غیراشباع

با استفاده از روش لوگستون و جاینس (۱۷)، مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع نشده بدنه مدل فیزیکی، از مقادیر نفوذپذیری در حالت پایدار و سه‌بعدی با پتانسیل‌های مختلف ماتریک محاسبه شد. این روش بر اساس حل تقریبی معادله وودینگ (۲۹) برای ایجاد شرایط افت سریع در سطح آب و نفوذپذیری بی‌نهایت پایدار $Q(h)$ از یک منبع آب کم‌عمق دایره‌ای و عملکرد نمایی هدایت هیدرولیکی است (۱۰)، به عنوان مثال به شرح زیر است:

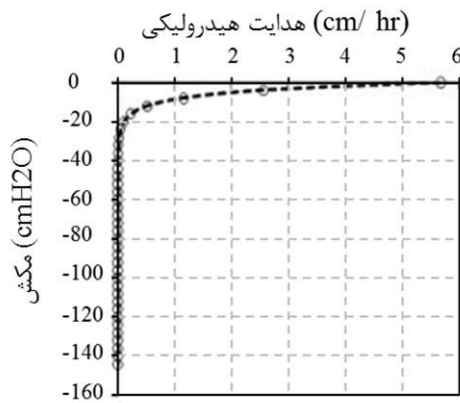
$$\frac{Q(h)}{\pi R^2} = K_s \exp(\alpha h) + \frac{[4k_s \exp(\alpha h)]}{\pi R \alpha} \quad (۴)$$

که در اینجا؛ $Q(h)$ نفوذپذیری پایدار $[L^3T^{-1}]$ تحت پتانسیل ماتریک h است، R شعاع دیسک پخش‌کننده $[L]$ ، α در صورت شاخص گاردنر برای توزیع مقدار تخلخل خاک $[L^{-1}]$ و k_s هدایت هیدرولیکی اشباع شده است $[LT^{-1}]$.

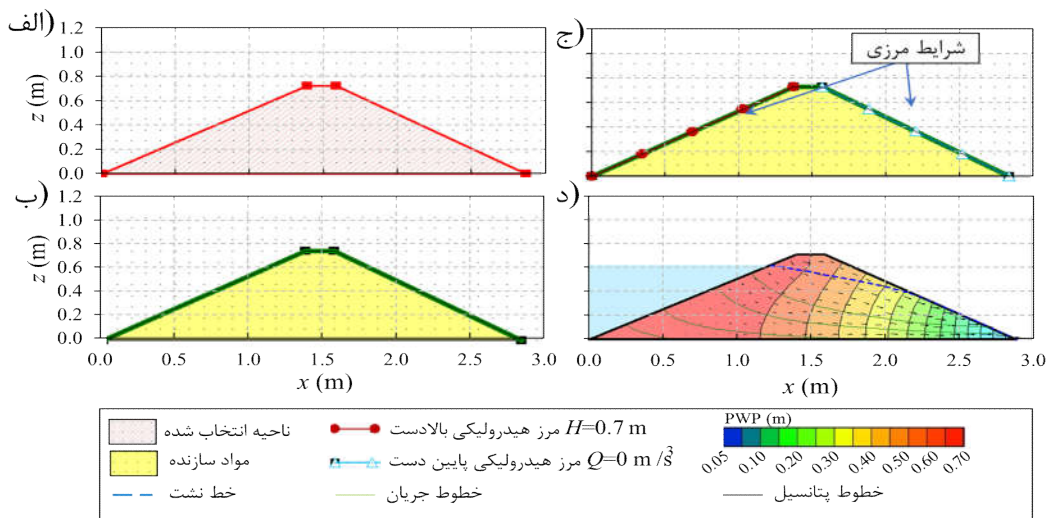
با توجه به روش لوگستون و جاینس (۱۷)، پارامترهای α و k_s با استفاده از رگرسیون غیرخطی نرخ نفوذپذیری در مقابل مقادیر پتانسیل‌های ماتریک به‌دست آمدند. سپس مقادیر k برای سایر پتانسیل‌های ماتریک با استفاده از تابع نمایی تعیین شد (۱۰). این تابع را می‌توان به‌صورت رابطه ۵ نشان داد:

$$k = k_s \exp(\alpha h) \quad (۵)$$

که در آن k_s هدایت هیدرولیکی اشباع و k هدایت هیدرولیکی



شکل ۴. تغییر میزان نفوذپذیری مواد در مکش‌های مختلف



شکل ۵. جزئیات مدل عددی: الف) هندسه مدل، ب) ورودی مواد سازند سد، ج) شرایط مرزی و د) PWP از طریق مدل حالت پایدار

قرار گرفتند تا اطمینان حاصل شود که نتایج عددی از تولید مش مستقل هستند (شکل ۶). ارزیابی‌ها نشان داد که مش ریز تفاوت معنی‌داری در نتایج نشان نمی‌دهد. نتیجه اخیر با کاری که توسط بهشتی و همکاران در سال ۲۰۱۳ (۲) انجام شده مطابقت دارد.

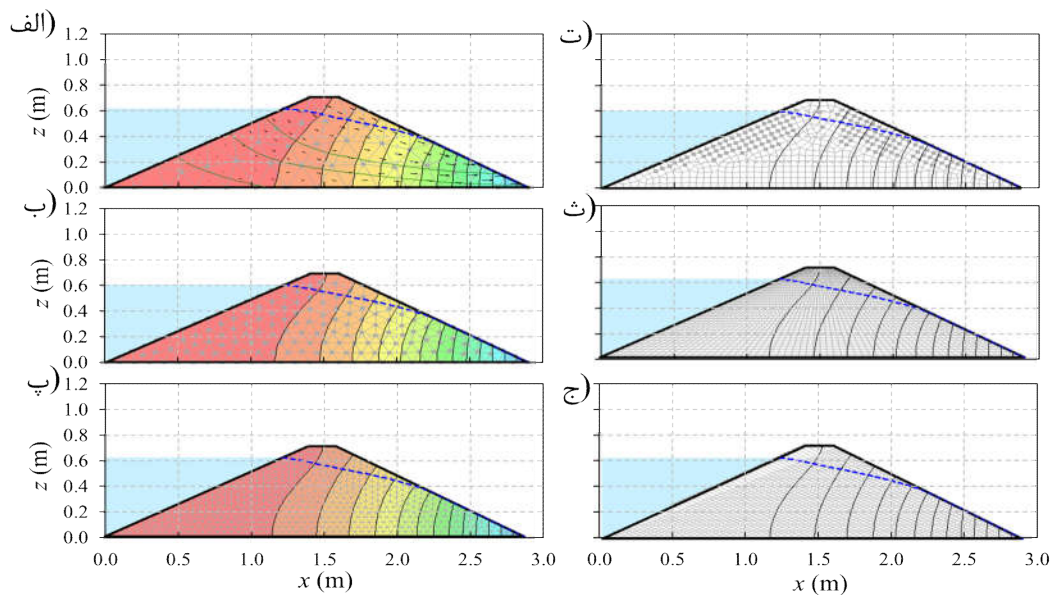
نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر عملکرد خاک از جمله هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه رطوبت در مدل عددی افت

وجود ندارد، اطلاق می‌شود. همچنین، شکل ۵- د یک مدل نشن پایدار را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل حساسیت مش

در این مطالعه از عناصر مثلثی و چهارضلعی با ۳ و ۴ نقطه ادغام گاوس استفاده شد. مقایسه اندازه مش‌های مختلف نشان می‌دهد که اندازه مش ۰/۰۵ (متر) در این مطالعه مناسب است. تعداد اجزا و گره‌های مورد استفاده در مدل اصلی به ترتیب ۵۴۵۰ و ۱۶۶۶۹ در نظر گرفته شد. همچنین باید توجه داشت که اندازه‌های مختلف مش مورد آزمون



شکل ۶. تحلیل حساسیت مش: الف) مش مثلثی، اندازه مش ۰/۲ متر، ب) مش مثلثی، اندازه مش ۰/۱ متر، پ) مش مثلثی، اندازه مش ۰/۰۵ متر، ت) مش چهارگوش و مثلثی، اندازه مش ۰/۰۵ متر، ث) شبکه چهارگوش مستطیلی، اندازه مش ۰/۰۵ متر و ج) شبکه چهار گوشه مثلثی، اندازه مش ۰/۰۵ متر

نتیجه نهایی این مطالعه نشان داد که بهترین انطباق نتایج حاصل از مدل عددی و داده‌های تجربی در جایی به دست آمده است که هدایت هیدرولیکی افقی ۵/۷ سانتی‌متر بر ساعت بوده و نسبت هدایت هیدرولیکی عمودی به افقی بدنه سد برابر ۰/۷ بوده است. شکل ۷ مقایسه فشارهای پیرومتریک به دست آمده از مدل عددی با داده‌های تجربی در سه تراز مختلف برای حداکثر تراز آب مخزن به دلیل متفاوت بودن هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

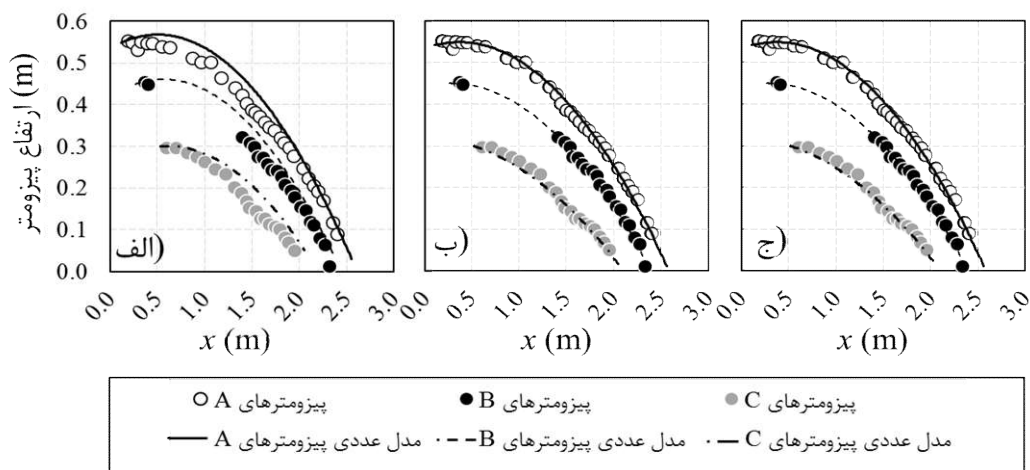
حالت نشت پایدار

به منظور بررسی تأثیر عملکرد هدایت هیدرولیکی بر افت سریع سطح آب، تراوش از بدنه سد خاکی همگن جمع‌آوری و از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی استخراج شد. با توجه به موقعیت پیرومترها، تغییرات فشار در سه تراز مختلف از سه ردیف به عنوان آزمون شاهد انتخاب شد. شکل ۸-الف و ۸-ب نتایج مقایسه تراز فریاتیک حاصل از داده‌های تجربی و نتایج عددی دو حالت مختلف استفاده از هدایت هیدرولیکی ثابت و

سریع آب و نشت در سدهای خاکی در حالت‌های ثابت و ناپایدار، نتایج با توجه به سناریوهای مختلف و بر اساس ترکیب شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت و به شرح زیر عمل می‌کند:

اعتبارسنجی مدل اشباع

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی توسط داده‌های تجربی، از اطلاعات پیرومتری هشتاد پیرومتر نصب شده برای مقایسه بین دو مدل استفاده شد. مدل عددی بر اساس یکنواختی هدایت هیدرولیکی بدنه سد خاکی بر اساس نسبت افقی توسط هدایت هیدرولیکی عمودی کالیبره شد. دلیل استفاده از این تراز، بیشترین سهم مواد سد در جریان از بدنه سد بود. به دلیل شرایط پایدار معادله ۱ برابر با صفر است، در نتیجه منحنی مشخصه رطوبت بر نتایج تأثیر نمی‌گذارد. در نتیجه، مقدار هدایت هیدرولیکی پارامتری مؤثر است. بنابراین، کالیبراسیون مدل عددی با مقایسه مقادیر مختلف فشار پیرومتریک ثبت شده در مدل آزمایشگاهی و عددی با میزان نشت از بدن سد انجام شد.



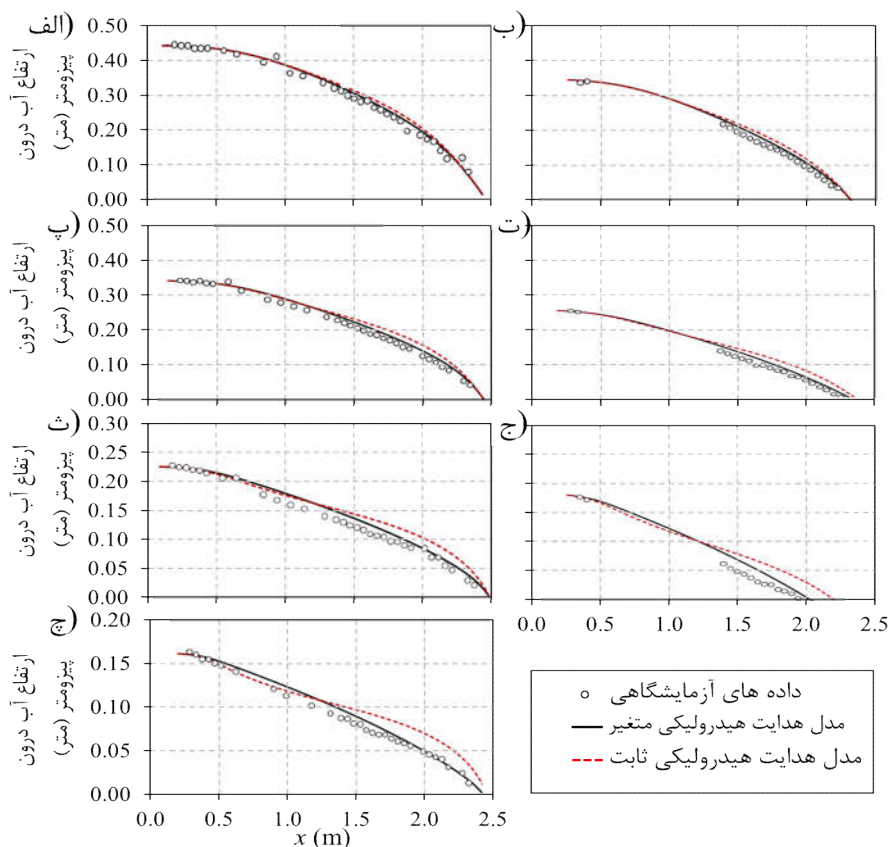
شکل ۷. مقایسه داده‌های پیزومتریک اندازه‌گیری شده و نتایج مدل عددی: الف) $k_x/k_y = 1$ ، $k_x = k_y = 6.41$ (cm/hr) (شرایط خاک ایزوتروپیک)، ب) $k_x/k_y = 1$ ، $k_x = k_y = 5.70$ (cm/hr) (شرایط خاک ایزوتروپیک) و ج) $k_x/k_y = 0.7$ ، $k_x = k_y = 5.70$ (شرایط خاک غیر ایزوتروپیک)، (مقادیر هدایت هیدرولیکی در شکل ۷ مقادیر عددی است).

* قبل از کالیبراسیون، استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع آزمایش‌های نفوذ بر روی نمونه خاک نیز در نظر گرفته شده است (الف) و پس از کالیبراسیون بر اساس سه ردیف پیزومتر اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع (ب) و اشباع (ج) در حالت غیراجباری.

افزایش می‌یابد. برای بررسی نتایج و نشان دادن تأثیر سطح آب در مخزن بالادست، آزمون عددی و آزمایشگاهی همزمان در $H = 0.2m$ انجام شد (شکل ۸-ج). به طوری که نشان داده شد، دقت مدل عددی به طور مستقیم به تراز آب در مخزن بالادست بستگی دارد. علاوه بر این، به دلیل کاهش فاصله بین تراز فریاتیک و سطح پیزومتر، انطباق بین مدل عددی و آزمایشگاهی به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

نکته قابل توجه دیگر این مطالعه این است که نتایج تجزیه و تحلیل عددی بر اساس هدایت هیدرولیکی غیراشباع است. نتایج این مطالعه نشان داد که برای هدایت هیدرولیکی ثابت (اشباع) تغییرات فشار پیزومتریک پس از عبور از یک نقطه چرخش، تفاوت قابل توجهی با داده‌های تجربی دارد. با این حال، در منطقه بالادست نزدیک به مخزن و به دلیل مجاورت با شرایط مرزی تعریف شده، سازگاری نتایج مدل با داده‌های تجربی مناسب است. علاوه بر این؛ در هر دو حالت استفاده از هدایت هیدرولیکی غیراشباع متغیر و هدایت هیدرولیکی اشباع ثابت، مدل فشار آب منافذ را بیش از حد تخمین زده و این

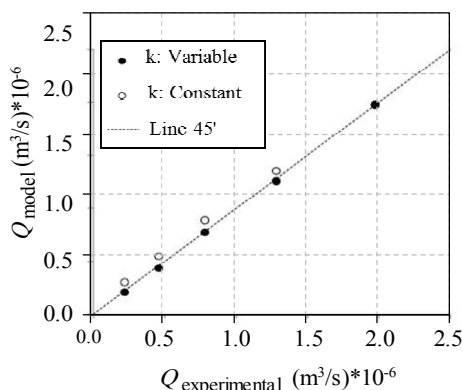
متغیر را در تراز آب ۰/۵ (متر) در مخزن نشان می‌دهد. شکل ۸-الف مربوط به پیزومترهای ردیف اول (پیزومترهای A) واقع در عمق ۰/۰۵ (متر) از کف نفوذناپذیر در مدل آزمایشگاهی است. مقایسه نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری بین مناطق پایین دست و نشن داده‌های تجربی و عددی وجود دارد. فرض می‌شود، تنوع هدایت هیدرولیکی اشباع بالاتر از یک است. مقایسه داده‌های پیزومترهای B- (در تراز آب ۰/۱۵ سانتی متر از کف) در شکل ۸-ب نشان می‌دهد که تفاوت بین نتایج مدل در هدایت هیدرولیکی اشباع متغیر و غیراشباع در طول یک بخش طولی از $x = 0$ تا $x = 2.4$ متر. مقایسه بین شکل ۸-ب با ۸-ت (به عنوان مثال؛ $H = 0.4m$ ، پیزومترهای B- و C) و همچنین شکل ۸-ث در ۸-ج (به عنوان مثال؛ $H = 0.3$ متر، پیزومترهای A- و C) نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی پیزومترها به طور مستقیم با تراز آب مخزن و فاصله بین تراز فریاتیک و موقعیت نصب پیزومترها مرتبط است. بنابراین، با کاهش سطح آب در مخزن، اختلاف بین نتایج تجزیه و تحلیل عددی و داده‌های اندازه‌گیری شده به طور نسبی



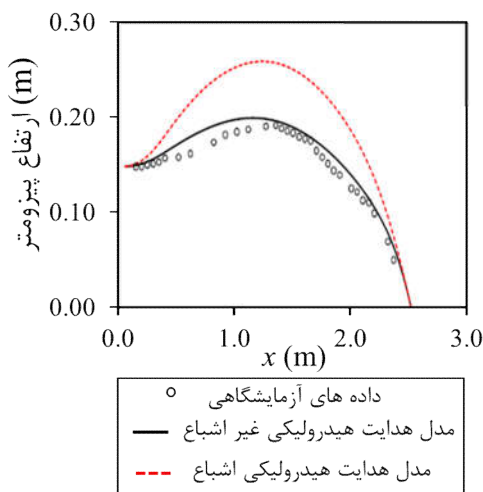
شکل ۸. مقایسه بار فشار در سنسورهای پیزوالکتریک ردیف اول و دوم با داده‌های تجربی با هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع در حالت تراز آب مخزن ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲ (متر): الف) پیزومترهای A-، B-، C-، H = 0.5 (متر)، ب) پیزومترهای A-، B-، C-، H = 0.5 (متر)، ج) پیزومترهای A-، C-، H = 0.3 (متر) و د) پیزومترهای A-، B-، C-، H = 0.4 (متر)، ه) پیزومترهای A-، B-، C-، H = 0.4 (متر)، ز) پیزومترهای A-، C-، H = 0.3 (متر) و ح) پیزومترهای A-، C-، H = 0.3 (متر) و ط) پیزومترهای A-، C-، H = 0.2 (متر)

دقیق‌تر و واقعی‌تری نسبت به کاربرد هدایت هیدرولیکی اشباع شده ارائه می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر هدایت‌های هیدرولیکی اشباع و غیراشباع در تجزیه و تحلیل عددی نشت از طریق بدنه سد، مقادیر نشت به دست آمده از تجزیه و تحلیل عددی هر یک از حالات مورد مطالعه و داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد. شکل ۹ نتایج این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، که دبی نشت در مدل آزمایشگاهی با استفاده از ظرفی که با حجم مشخصی از روغن پر شده بود در طول زمانی ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. علت استفاده از روغن برای جلوگیری از تبخیر در طول مدت آزمایش بود. همچنین دبی نشت از حل معادله ریچارد و معادله پیوستگی با به‌کارگیری

اختلاف به سمت پایین دست افزایش می‌یابد. این به دلیل عدم اطمینان هندسه مرزی در داخل و پایین دست بدنه سد است. دلیل دیگر مربوط به روش کالیبراسیون مدل است، زیرا کالیبراسیون بر اساس حداکثر سطح آب در مخزن است. در نتیجه، این وضعیت با کاهش سطح آب در مخزن از وضعیت کالیبره شده منحرف می‌شود. گفتنی است که در نمودارهای کالیبراسیون (شکل ۷)، تفاوت بین داده‌های پیزومترهای بالا و نتایج مدل عددی زیاد است، و این به دلیل عوامل مختلفی است، مانند شیب هیدرولیکی در نزدیکی تراز فری‌تیک. در هر صورت، مقایسه نتایج به دست آمده تأیید می‌کند که هدایت هیدرولیکی اشباع نشده نتایج



شکل ۹. مقایسه مقادیر دبی نشت روش عددی در دو حالت هدایت هیدرولیکی اشباع ثابت و متغیر هدایت هیدرولیکی، با مقادیر نشت مشاهده شده



شکل ۱۰. فشار پیزومتری در تجزیه و تحلیل نشت غیر دائمی ۳۰ دقیقه پس از افت سطح آب مخزن از تراز ۶۰ به ۱۵ سانتی متر در پیزومتر: پیزومترهای A-

نشان داده شده است، داده‌های مربوط به تراز ۶۰ سانتی متر مربوط به هر دو حالت هدایت هیدرولیکی سازگار است، که این همان نقطه کالیبراسیون مدل است.

اعتبارسنجی مدل اشباع

برای تأیید مدل‌های اشباع و غیراشباع با شرایط گذرا، شکل ۱۰ بر اساس فشار پیزومتری کل در طول مقطع از $x = 0$ تا $x = 2.5$ متر ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقایسه بین مدل‌های اشباع و غیراشباع با داده‌های تجربی نشان

اجزای محدود از مدل عددی حاصل می‌شود. که در قسمت گزارش نرم‌افزار می‌توان این مقادیر را در پنجه سد محاسبه و اندازه‌گیری کرد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در مورد استفاده از هدایت هیدرولیکی غیراشباع، یک توافق به‌نسبت خوب بین داده‌های مشاهده شده و نتایج مدل شده به دست می‌آید. هنگام استفاده از هدایت هیدرولیکی ثابت و برابر با هدایت هیدرولیکی اشباع، نتایج مدل مقادیر بزرگ‌تری از داده‌های مشاهده‌ای ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹

۱. مقایسه بین مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که استفاده از خصوصیات هیدرولیکی اشباع نشده عامل جدایی‌ناپذیری برای پیش‌بینی افت سریع سطح آب است. بنابراین، اگر از مقدار ثابت برای هدایت هیدرولیکی مواد استفاده شود، نتایج افت سریع سطح آب دور از واقعیت خواهد بود.

۲. به منظور ایجاد بهترین انطباق بین مدل‌های آزمایشگاهی و عددی، مقادیر تجربی حجم آب در تابع هیدرولیک عددی استفاده شد. با این حال، هدایت هیدرولیکی به دلیل شرایط اشباع و غیراشباع گرفته شد. مقایسه بین تراز پیزومتریک در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی نشان داد که مدل اشباع نشده بسیار دقیق‌تر از مدل اشباع در حالت پایدار و شرایط گذرا است (کاهش هد آب در مخزن سد هر ۱۰ دقیقه). همچنین، مقادیر تحلیل عددی بیش از داده‌های مشاهده‌ای بود.

به دلیل شیب خط Phreatic، اختلاف بین داده‌های عددی و مشاهده‌ای افزایش می‌یابد این اختلاف تا مقدار تقریب ۴۳ درصد نیز افزایش پیدا می‌کند. این نقطه در تجزیه و تحلیل تراوش پایدار و ناپایدار مشاهده شد. حداکثر اختلاف بین خطوط فریاتیکی عددی و تجربی برای نشت حالت پایدار در ناحیه پایین دست بدنه سد خاکی مشاهده شد. در جریان نشت ناپایدار و کشیدن سریع سطح آب به دلیل جریان نشت از بدنه در پایین دست، شیب خط فریاتک همزمان به سمت پوسته پایین دست بدنه مخزن هدایت می‌شود و باعث ایجاد اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج مدل عددی در دو طرف سد می‌شود. این اختلاف به طور قابل توجهی بالاتر از اختلاف مشاهده شده در افت سریع سطح آب و تجزیه و تحلیل نشت پایدار است.

می‌دهد که مدل غیراشباع مطابقت زیادی با داده‌های تجربی نسبت به مدل عددی اشباع دارد. فرض بر این است که هر دو مدل اشباع و غیراشباع مقادیر فشار پیزومتریک را بیش از حد ارزیابی می‌کنند. حداکثر تغییر بین مدل عددی و تجربی در موقعیت تاج سد (به عنوان مثال، $x = 1.3$ متر ارائه شد).

تراوش ناپایدار

نتایج تجزیه و تحلیل عددی جریان نشت در حالت ناپایدار با افت سریع در سطح آب مخزن از ۰/۶ به ۰/۱۵ سانتی‌متر نشان داد که نسبت زهکشی از طریق بدنه سد برای استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع متفاوت است. پژوهش‌ها نشان داد که برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع، میزان زهکشی بالاتر از شرایط اشباع است و کاهش فشار آب منفذی به سرعت در آن تغییر می‌کند (شکل ۱۰). مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده پس از ۳۰ دقیقه از زمان اولیه به ترتیب به دلیل جریان پایدار و ناپایدار تراوش مطابق شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب به دست آمده است. مقایسه این دو حالت نشان می‌دهد که افت فشار تراز آب با گذشت زمان برای شرایط غیراشباع زیاد است. فرض بر این است که منطقه متخلخل هوا (منطقه غیراشباع) در طی فرایند تخلیه در میان خطوط جریان از طریق بدنه سد وقفه ایجاد می‌کند. شرایط غیراشباع می‌تواند در طول فرایند تخلیه آب به دلیل راکد بودن آب از طریق محیط‌های اشباع نشده، تأخیر ایجاد کند. در نتیجه، به دلیل همان خصوصیات خاک، فشار آب منفذی از طریق خاک غیراشباع بیشتر از خاک اشباع شده است (شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب).

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی روی خصوصیات نشت سد خاکی انجام شد. نتایج به شرح زیر ارائه شده است:

منابع مورد استفاده

1. Ataie-Ashtiani, B., R. E. Volker and D. A. Lockington. 1999. Numerical and experimental study of seepage in unconfined aquifers with a periodic boundary condition. *Journal of Hydrology* 222(1-4): 165-184.
2. Beheshti, A., A. Kamanbedast and H. Akbari. 2013. Seepage analysis of rock-fill dam subjected to water level fluctuation: a case study on Gotvand-Olya dam. *Iranian Journal of Energy and Environment* 4(2): 155-160.
3. Berilgen, M. M. 2007. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics* 34(2): 81-91.
4. Bommer, J. J. and A. B. Acevedo, A. B. 2004. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. *Journal of Earthquake Engineering* 8(spec01): 43-91.
5. Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Colorado.
6. Byrne, P. M. 1991. A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Missouri, USA, 11-15 March, 47-55.
7. Fredlund, D. G. 2006. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(3): 286-321.
8. Fredlund, D. G., A. Xing and S. Huang. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31(4): 533-546.
9. Fu, J. F. and J. I. N. Sheng. 2009. A study on unsteady seepage flow through dam. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 21(4): 499-504.
10. Gardner, W. R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85(4): 228-232.
11. GeoSlope Ltd. 2007. Sigma/W User's Guide for Stress-Deformation Analysis. GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alta.
12. Ghanbarian-Alavijeh, B., A. Liaghat, G. H. Huang and M. T. Van Genuchten. 2010. Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data. *Pedosphere* 20(4): 456-465.
13. Kahot, Z., R. Dkiouak and A. Khamlichi. 2019. Reliability analysis of slope stability in earthen dams following rapid drawdown. *International Review of Applied Sciences and Engineering* 10(1): 101-112.
14. Kumar, S., P. K. Sharma and K. S. Hari Prasad. 2014. Modeling of Unsaturated Flow Using Hydrus Software. Conference Paper, Race-2014.
15. Lane, P. A. and D. V. Griffiths. 2000. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering* 126(5): 443-450.
16. Li, D. Q., D. Zheng, Z. J. Cao, X. S. Tang and K. K. Phoon. 2016. Response surface methods for slope reliability analysis: review and comparison. *Engineering Geology* 203: 3-14.
17. Logsdon, S. D. and D. B. Jaynes. 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal* 57(6): 1426-1431.
18. Morengstern, N. 1963. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. *Geotechnique* 13(2): 121-131.
19. Nansheng, L., T. Bo and X. Lihui. 2015. Slope stability analysis of earth-rockfill dams using MGA and UST. *Journal of Computational Engineering* 2015: 1-10.
20. Pham, H. Q. 2005. A volume-mass constitutive model for unsaturated soils. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
21. Rajesh, S., S. Roy and S. Madhav. 2017. Study of measured and fitted SWCC accounting the irregularity in the measured dataset. *International Journal of Geotechnical Engineering* 11(4): 321-331.
22. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1(5): 318-333.
23. Salehi-Hafshejani, S., M. Shayannejad, H. Samadi-Broujeni, A. R. Zarraty, B. Soltani, E. Mohri-Esfahani... and K. Ostad-Ali-Askari. 2019. Determination of the height of the vertical filter for heterogeneous Earth dams with vertical clay core. *International Journal of Hydrology Science and Technology* 9(3): 221-235.
24. Sedghi-Asl, M., H. Rahimi and H. Khaleghi. 2010. Experimental analysis of seepage flow under coastal dikes. *Experimental Techniques* 34(4): 49-54.
25. Sica, S., L. Pagano and F. Rotili. 2019. Rapid drawdown on earth dam stability after a strong earthquake. *Computers and Geotechnics* 116: 103187.
26. Sun, D. M., Y. G. Zang and S. Semprich. 2015. Effects of airflow induced by rainfall infiltration on unsaturated soil slope stability. *Transport in Porous Media* 107(3): 821-841.
27. Van Genuchten, M. T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 892-898.
28. Vandenberg, D. R. 2014. Total stress rapid drawdown analysis of the Pilarcitos Dam failure using the finite element method. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 8(2): 115-123.
29. Wooding, R. A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research* 4(6): 1259-1273.

Analysis of Earth Dam Body Behavior under Rapid Drawdown Conditions in Reservoir Water Level by Laboratory and Numerical Methods

M. Pakmanesh¹, S. H. Mousavi Jahromi², A. Khosrojerdi^{1*}, H. Hassanpour Darvishi² and H. Babazadeh¹

(Received: October 4-2020; Accepted: February 28-2021)

Abstract

The present study is investigated the earth dam stability during drawdown based on both numerical and experimental aspects. To validate the numerical model, a model was performed experimentally. Some soil mechanic tests were carried out through the hydraulic experiments to attain the usage factors of the numerical investigation. To investigate the effect of hydraulic conductivity on the rapid drop of water level and the use of hydraulic parameters of materials, seepage flow in the model was modeled by seep/w software. The input information to the software including hydraulic conductivity and water volume were measured by performing a constant load test and using a disc penetration meter, respectively. After validation of hydraulic conductivity with the experimental model, the results were compared with observed data. Comparison between numerical and laboratory discharge illustrated that the numerical model with laboratory model is well confirmed. In addition, saturated and unsaturated simulations demonstrated that the unsaturated model is highly consistent with the experimental model. It is assumed that due to the drawdown conditions, unsaturated models can achieve high accuracy for simulating the flow through a homogeneous earth dam.

Keywords: Slope stability, Rapid drawdown, Earth dam, Drainage prediction, Seep/w

1. Water Engineering Department, Islamic Azad university, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

2. Civil Engineering Department, Islamic Azad university, Shahr-e- Qods Branch, Tehran, Iran.

Corresponding author, Email: khosrojerdi@srbiau.ac.ir