

تعیین ضخامت لایه‌های فیلتر برای حفاظت شیب بالادست سد خاکی همگن با شیب متغیر در شرایط افت ناگهانی تراز آب مخزن به روش آزمایشگاهی و عددی

حسن آزاد بیگی*، محسن نجارچی و سید حمید لاجوردی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۸)

چکیده

پژوهش 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 حالت اشباع بودن خاک مورد ارزیابی و واسنجی قرار داده شد. برآورد میزان خطای بین داده‌های فشار پیزومتریک و خط نشت در مدل عددی و آزمایشگاهی، نشان از دقت قابل قبول داده‌های مدل عددی Seep/W بود. همچنین برای تعیین میزان ضخامت فیلتر تعبیه شده در شیب بالادست سدهای خاکی همگن در زمان افت ناگهانی سطح آب در مخزن بالادست، داده‌های ورودی به مدل عددی از جمله هدایت هیدرولیکی، میزان افت سطح آب (تخلیه سد در سه سناریو ۲، ۳ و ۴ روز) و شیب بدنه سدهای خاکی (۳ و ۲ و ۱ m)، ضخامت لایه‌های فیلتر تعیین شد. شایان بیان است که تعداد لایه‌ها و جنس مصالح سازند فیلتر، بر اساس توصیه حفاظت آب و خاک آمریکا، متشکل از سه نوع ساختار خاک (شن، ماسه و شن، ماسه) تعیین شد. برای تخمین میزان ضخامت لایه‌های فیلتر از بیشترین میزان گرادیان هیدرولیکی مصالح سازنده سد استفاده شد. در نهایت با تغییر شرایط ورودی به مدل عددی به‌ازای کنترل شرایط ایمن برای مقادیر گرادیان هیدرولیکی موجود در نقطه خروج آب در شیب بالادست، ضخامت لایه‌های فیلتر بر اساس اعداد بی بعد ارائه شد. بررسی نتایج مدل عددی نشان داد، به‌ازای ساخت سد با ضخامت فیلتر ارائه شده، میزان گرادیان هیدرولیکی در نقطه خروجی آب از بدنه سد خاکی در هنگام افت ناگهانی سطح آب در مخزن بالادست و برگشت جریان به سمت مخزن بالادست، همواره در شرایط ایمن قرار داشته و مقادیر گرایان هیدرولیکی موجود در بدنه سد خاکی از میزان گرادیان هیدرولیکی بحرانی برای مصالح استفاده شده، کمتر است.

واژه‌های کلیدی: ضخامت لایه‌های فیلتر، افت سریع، سد خاکی، گرادیان هیدرولیکی، seep/w

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hasanazadbeygi7202@gmail.com

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 ۱۳). کاهش تراز آب مخزن در سدهای خاکی، سبب کاهش فشار منفذی داخلی (PWP) و کاهش فشار هیدرواستاتیک تثبیت کننده خارجی می شود؛ بنابراین بهره برداری ایمن از سدهای خاکی نیاز به مطالعاتی در مورد نشست و پایداری شیب بالادست سد دارد. پایداری بدنه سد در طی مراحل تخلیه، به طور مستقیم به سرعت تخلیه بستگی دارد و تخلیه های سریع بسیار مهم شناخته می شوند (۲۲). توزیع رطوبت در محیط متخلخل در صورت افت سریع سطح آب و نشست پایدار و ناپایدار در بسیاری از موضوعات از جمله نشست از سد خاکی و برهم کنش آب های سطحی با آب های زیرزمینی در جابه جایی بدنه سد مهم است (۸). برآورد توزیع فشار آب حفره ای به عنوان یک عامل مهم در تحلیل ثبات شیب پوسته سد خاکی است. به طور کلی، دو راه حل برای پیش بینی رژیم فشار آب منفذی پس از افت تراز آب مخزن استفاده شده است: آنالیز زهکشی نشده و روش جریان. اولین مورد در رابطه با شیب های خاک به نسبت نفوذناپذیر اعمال شده است که در آن فشار آب منفذی در هنگام افت تراز از بین نمی رود؛ بنابراین تنها اثر تغییر تنش کل در برابر شیب ها در محاسبه گنجانده شده است (۲۴). کاهوت و همکاران (۱۱) به روش 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، عامل ایمنی به طور عمده باتوجه به دو پارامتر، ضریب اصطکاک و تراکم متفاوت است. سرانجام، آن ها معادله ای برای جلوگیری از احتمال خرابی مربوط به پایداری شیب توصیه کردند. علاوه بر این، در رابطه با تحولات و کاربرد روش های سطحی (RSMs) در مسائل مختلف، ضریب اطمینان شیب خاکریز را مطالعه

کردند. به منظور بررسی اثر فشار آب منفذی با در نظر گرفتن رژیم های پیشنهادی، از یک مدل عددی Seep/w استفاده شد (۱۴). اثر افت سریع تراز مخزن یک سد خاکی را که در گذشته زمین لرزه شدیدی داشته است، به روش عددی بررسی کردند. تجزیه و تحلیل افت توسط یک تراوش موقت انجام شد. طبق مطالعه آن ها، اگر پس از زلزله شدید تخلیه اتفاق بیفتد، به دلیل تغییرات تنش ناشی از لرزه ای که توسط خاکریز سد تجربه می شود، پایداری سد ممکن است بیشتر کاهش یابد. علاوه بر این، مشخص شد که نرخ افت تراز آب، یک متغیر مهم برای پایداری سد است (۲۲). اثر زلزله شدید طی شتاب دهی های مختلف زلزله بررسی شد. پارامتر اصلی ثبات شیب، فشار آب کل معرفی شد و به طور چشمگیری اثرات این عامل را بر پایداری شیب کاهش می دهند (۴). بسیاری از پژوهشگران روی نشست نامحدود با سطح آزاد متغیر مخزن تمرکز کرده اند و به تازگی روش های زیادی برای تحلیل چنین موضوعاتی ارائه شده است. برای نمونه؛ دبی نشست ناپایدار متأثر از بارندگی و نوسانات آب سطحی با استفاده از یک مدل نشست غیراشباع و نیمه اشباع بر اساس تئوری جریان دوفازی هوا - آب در یک محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت (۲۳). مدل SUTRA (مدل اجزای محدود جریان اشباع - غیراشباع وابسته به تراکم سیال) برای دبی آب زیرزمینی تحت تأثیر نوسانات چرخه ای شرایط مرزی، مانند دوره های مرطوب و خشک اصلاح شد (۱). همچنین، کومار و همکاران (۱۲) با استفاده از نرم افزار HYDRUS دوبعدی اثر سطح آب را از طریق محیط متخلخل اشباع نشده آزمایش کردند. داده های تجربی با استفاده از معادله ریچاردز برای جریان اشباع بررسی شد و مقدار آب و موقعیت سطح آب پیش بینی شد. نرم افزار HYDRUS از خطاهای تعادل جرم در مناطق اشباع نشده جلوگیری می کند و از نظر عددی پایدار است. بسیاری از مدل های توسعه یافته به فشار یا بار هیدرولیکی وابسته هستند. در نتیجه، در این مدل ها و روش های عددی، به دلیل رفتار موئین، امکان تعیین دقیق رابطه ای برای هوا و آب وجود ندارد. همچنین به دلیل تغییرات چشمگیر در

پایپینگ 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 (۱۹) برای خاک غیراشباع اصلاح شد. این معادله به طور معمول با استفاده از مدل دو بعدی FEM حل و به صورت دو خم از منحنی تعریف می‌شود. به طوری که خطوط پتانسیل و جریان از طریق مدل‌های عددی رسم شده است. معادله دیفرانسیل حاکم در نرم‌افزار SEEP/W برای تحلیل تراوش دو بعدی گذرا مطابق رابطه ۱ بیان شد (۹):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

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 اشباع با مکش (ماتریک یا کل) را نشان می‌دهد (۶). این فاکتور شامل اطلاعات اساسی موردنیاز برای توصیف بسیاری از مسائل ژئوتکنیک مربوط به خاک‌های غیراشباع است (۱۸). در میان معادلات تجربی مختلف برای برازش منحنی SWCC (۵، ۷ و ۱۷)، یکی از پرکاربردترین معادلات توسط ون جنوتن در سال ۱۹۸۰ (۲۵) ارائه شد که در آن مقدار حجمی آب (θ) و هدایت هیدرولیکی (k) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد. همچنین زمانی که اندازه ذرات در تمام دامنه‌ها به‌عنوان یک پارامتر اصلی از خصوصیات خاک در نظر گرفته شود،

میزان اشباع خاک در نزدیکی این سطح، تعیین موقعیت دقیق سطح فریاتیک دشوار است (۸)؛ بنابراین برای تعیین موقعیت دقیق سطح نشت و خط فراتریک، لازم است هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در حالت غیراشباع تعیین شود. در حقیقت، محدودیت استفاده از مدل‌های تحلیلی نشت به تعیین خصوصیات هیدرولیکی محیط متخلخل به خصوص تغییرات رطوبت و نفوذپذیری محیط متخلخل در شرایط غیراشباع (۱۰) مربوط می‌شود. برخی از مطالعات با در نظر گرفتن هندسه سد خاکی و تأثیر آن بر شرایط هیدرولیکی در حال انجام هستند. اولین بار، مورگنسترن (۱۵) 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) ثبات 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. بر اساس نتایج او، پایداری شیب در هنگام افت تراز آب مخزن بستگی زیادی به نفوذپذیری خاک دارد. نشت و همکاران (۱۶) با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده (MGA) برای جستجوی سطح لغزش با توجه به معیارهای تنش برشی و تئوری مقاومت یکپارچه غیرخطی، بدون پیش‌فرض شکل سطح لغزش، یک مدل تحلیلی بهینه از تحلیل پایداری شیب سدهای خاکی فراهم کرد. بر اساس نتایج آن‌ها، MGA یک الگوریتم تحمل خطا بسیار کارآمد، ساده و با عملکرد خوب است. اثر شیب در این پژوهش 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 پدیده

می توان معادله فردلوند را در نظر گرفت (۶).

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

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

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 روش ها

خرابی سدهای خاکی بر اثر تخلیه ناگهانی

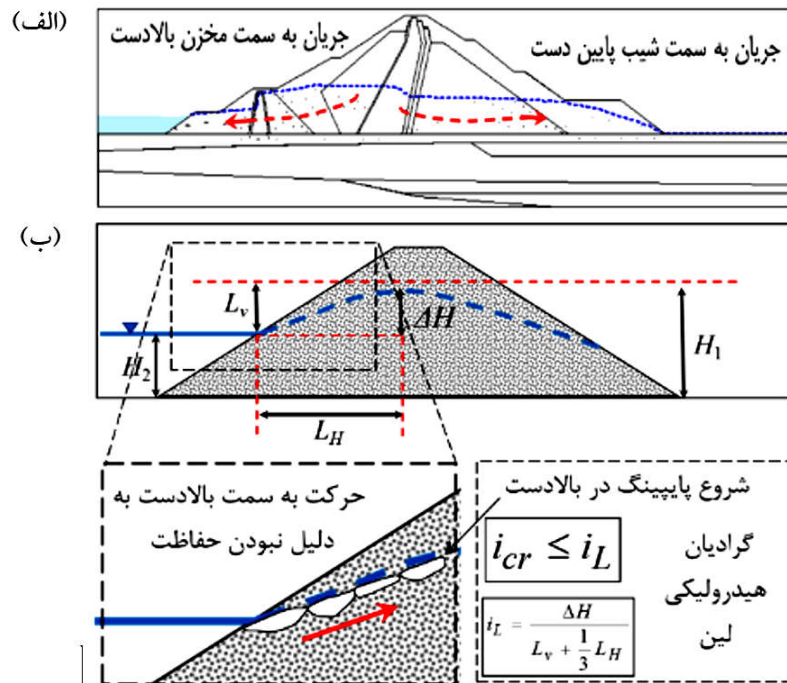
در طول بهره برداری سدهای خاکی کوتاه، تخلیه ناگهانی مخزن بالادست سد، امری اجتناب ناپذیر است. از این رو شناخت تأثیرات این پدیده بر پایداری سد بسیار حائز اهمیت است. تخلیه ناگهانی مخزن بالادست سدهای خاکی تأثیر مستقیمی بر افزایش گرادیان هیدرولیکی موجود در بدنه سد خاکی دارد. با تخلیه ناگهانی مخزن سد، خط نشن درون مخزن سدهای خاکی به سمت بالادست تغییر شیب خواهد داد. این امر سبب رخ دادن جریان برگشتی با گرادیان کنترل نشده ای در بالادست می شود. با توجه به عدم طراحی تمهید حفاظتی در بالادست (مانند زهکش افقی، قایم و یا پنجه) و در دیگر موارد حفاظتی، احتمال خرابی و ایجاد پدیده رگاب، محتمل خواهد بود. در شکل ۱ جریان برگشتی به سمت بالادست در یک مدل واقعی سد نمایش داده شده است.

شناخت عوامل مؤثر بر این پدیده بسیار حائز اهمیت است. از جمله این عوامل می توان به شیب بالادست و خصوصیات منابع قرصه اشاره کرد. استفاده از مدل های عددی می تواند در مطالعات پایداری سدها مؤثر باشد که این امر نیازمند اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از یک مدل فیزیکی است. در پژوهش حاضر با کمک مدل آزمایشگاهی و مدلسازی عددی با

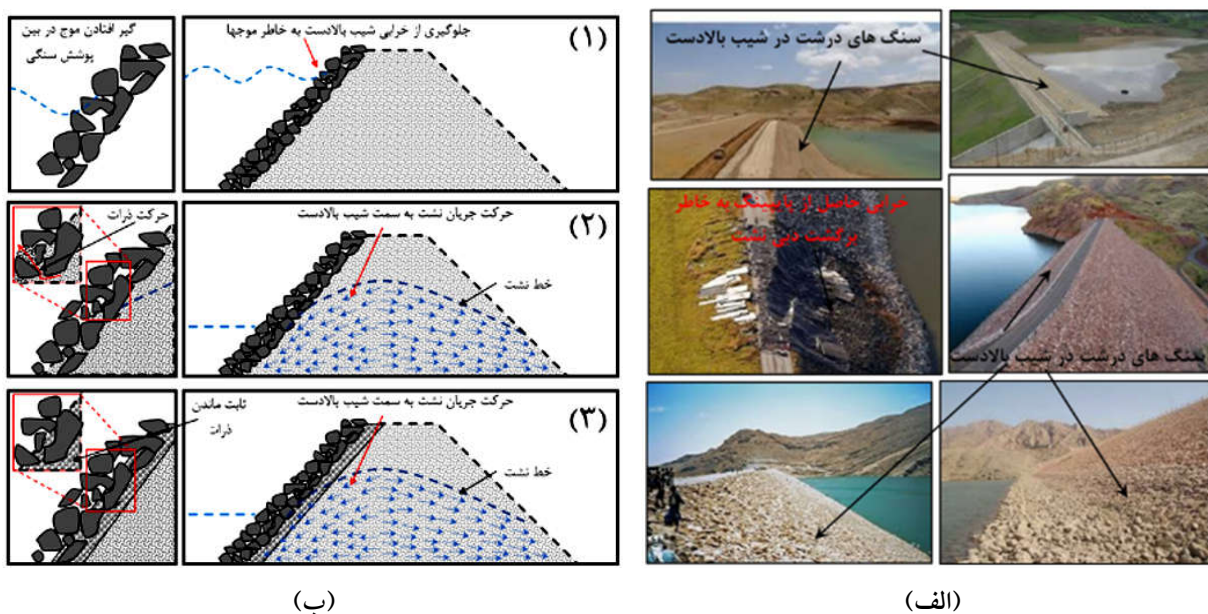
استفاده از نرم افزار seep/w، تأثیر شیب بالادست سدهای خاکی همگن بر پایداری سد، در شرایط مختلف هیدرولیکی و فیزیکی بررسی شده است.

در زمان ساخت سدهای خاکی، در شیب بالادست سد، به طور معمول از سنگ های درشت برای جلوگیری از تخریب شیب بالادست بر اثر امواج تشکیل شده در مخزن به وسیله باد استفاده می شود. در شکل ۲-الف نمونه هایی از این سدها نمایش داده شده است. باید در نظر داشت که در زمان تخلیه ناگهانی آب مخزن، از لحاظ هیدرولیکی این پوشش سنگی هیچ تأثیری بر کاهش خطر پاپینگ نخواهد داشت. از این رو، طراحی فیلتر و پوشش سنگی برای جلوگیری از حرکت ذرات پوسته سد به داخل مخزن امری حیاتی است و پیشنهاد می شود ضخامت و نوع مصالح فیلتر به صورت پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی سد ارائه شود. طبق شکل ۲-ب، با حرکت آب از سمت پوسته سد به داخل مخزن بالادست (که در اکثر موارد در سدهایی مانند سد ماران، استان خوزستان دیده شده است)، گرادیان هیدرولیکی مجاز در بدنه سد از گرادیان مجاز مصالح بیشتر شده است. این امر به این معنی است که ذرات پوسته، پتانسیل لازم برای حرکت به سمت مخزن و به وجود آوردن پدیده پاپینگ را دارند. از این رو ارائه فیلتر مناسب به ازای شیب بالادست سد خاکی همگن می تواند تا حد زیادی از به وجود آمدن این پدیده جلوگیری کند.

در شکل ۲-ب-۱، پوشش سنگی تا حد زیادی از خرابی امواج در شیب بالادست جلوگیری می کند. اما به خاطر درشت بودن این پوشش، ذرات پوسته به راحتی قادر به حرکت در فضاهای خالی این پوشش هستند. در شکل ۲-ب-۲، حرکت این ذرات نشان داده شده است. از این رو، بر اساس شکل ۲-ب-۳، ارائه فیلتر مناسب می تواند تا حد زیادی در مقابل گرادیان هیدرولیکی زیاد در پدیده برگشت ناگهانی آب به مخزن بالادست جلوگیری کند.



شکل ۱. برگشت دبی نشست به سمت مخزن بالادست در زمان تخلیه ناگهانی، (الف) مدل واقعی سد غیرهمگن، (ب) مراحل تشکیل پایپینگ در شیب بالادست به‌خاطر ماندآبی در پوسته سد



شکل ۲. پدیده برگشت جریان زه در مخزن بالادست سدهای خاکی، (الف) استفاده از سنگ درشت برای جلوگیری از خرابی موج‌های تشکیل شده در مخزن، (ب) استفاده از سنگ درشت در شیب بالادست، (ب-۱) عملکرد پوشش سنگ برای جلوگیری از خرابی موج، (ب-۲) حرکت ذرات در هنگام تخلیه ناگهانی آب در مخزن بالادست به‌خاطر عدم وجود فیلتر مناسب، (ب-۳) ثابت ماندن ذرات به‌خاطر اعمال فیلتر مناسب

تجهیزات و مدل آزمایشگاهی

به منظور بررسی خصوصیات نشست آب در بدنه سدهای خاکی، یک مدل آزمایشگاهی از سد همگن با ارتفاع ۰/۹ (متر) در شکل متقارن نسبت به محور سد ساخته شد (شکل ۳). تعداد ۲۷ پیژومتر برای قرائت خط نشست جریان در سه تراز ارتفاعی از پی، شامل؛ ۰/۰۵، ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ (متر)، با فاصله ده سانتی متری از هم، نصب شد. همچنین با استفاده چاهک‌های مشاهده‌ای نصب شده در شیب پایین دست مدل آزمایشگاهی سد خاکی، خط نشست در بدنه سد خاکی برداشت شد. برای تعیین شیب بدنه سدهای بر روند نشست، از سه شیب معمول سدهای خاکی ۳ و ۲، $m=1$ استفاده شد (شکل ۳-الف تا ۳-ج). شکل ۳-ز نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی را به همراه موقعیت نصب باکس زهکش انتهایی برای اندازه گیری دبی نشست در بدنه سد خاکی نشان می‌دهد. علاوه بر این، در کف مدل، از صفحه‌ای با سطح زیر 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 خاک دانه‌ها و دیواره‌ی جانبی جلوگیری می‌کند (۲۱). 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 (۲۰ و ۲۶).

فیلتر تعبیه شده در شیب بالادست سدهای خاکی

برای کنترل میزان گرادیان هیدرولیکی به وجود آمده در شیب بالادست سدهای خاکی در زمان تخلیه ناگهانی مخزن سد، از فیلترهای و لایه‌های محافظتی در شیب بالادست استفاده می‌شود (شکل ۴). در مطالعات گذشته بر اساس USBR، جنس این لایه‌ها بر اساس لایه ماسه، ماسه و شن و در نهایت لایه

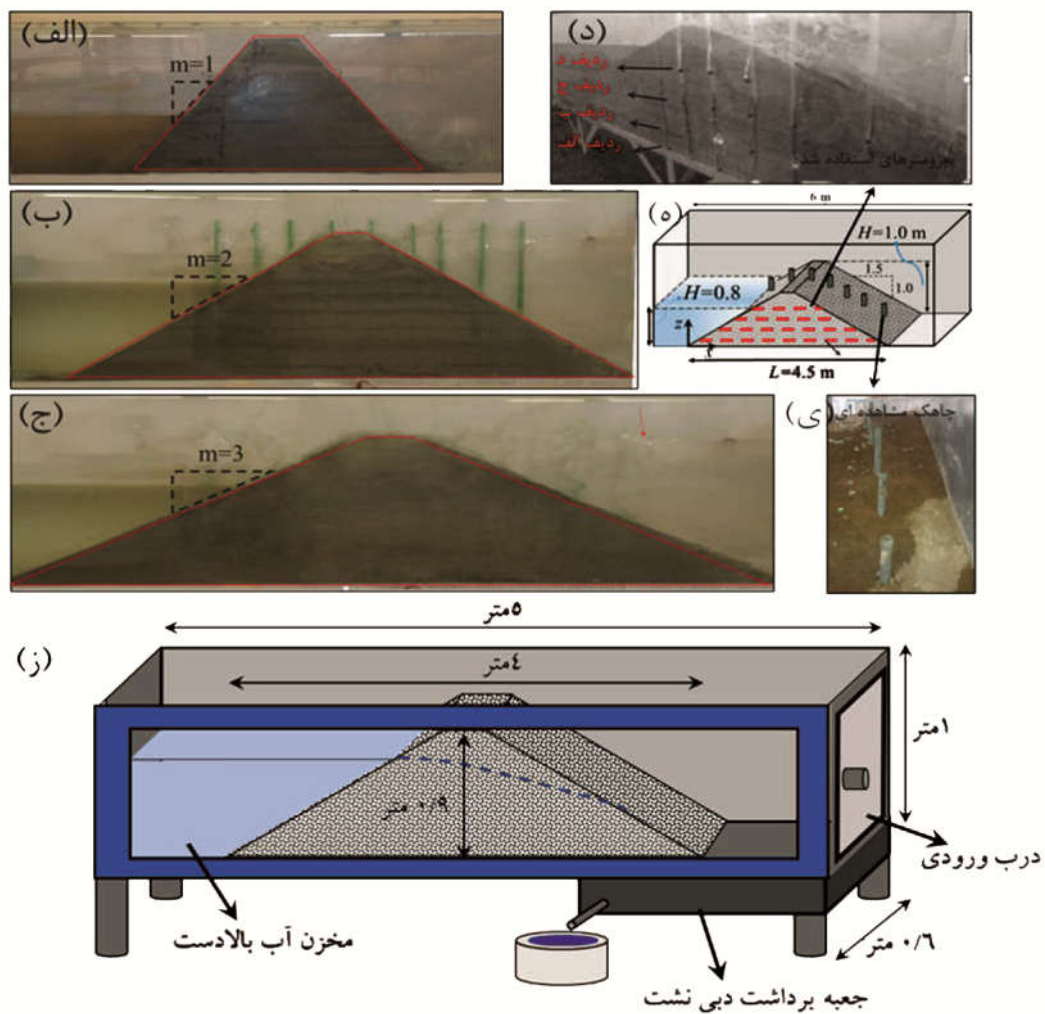
شن، توصیه شده است. شایان ذکر است که در رابطه با ضخامت این لایه، مطالعات جامعی انجام نشده است. همچنین ضخامت این لایه‌ها بر اساس گرادیان هیدرولیکی به وجود آمده در فصل مشترک لایه‌ها، همواره باید کمتر از مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی مصالح سازنده سد (جدول ۱) باشد. با تامین این معیار همواره سد در جهت پایداری دیواره بالادست عمل می‌کند.

مصالح ساخت بدنه سد

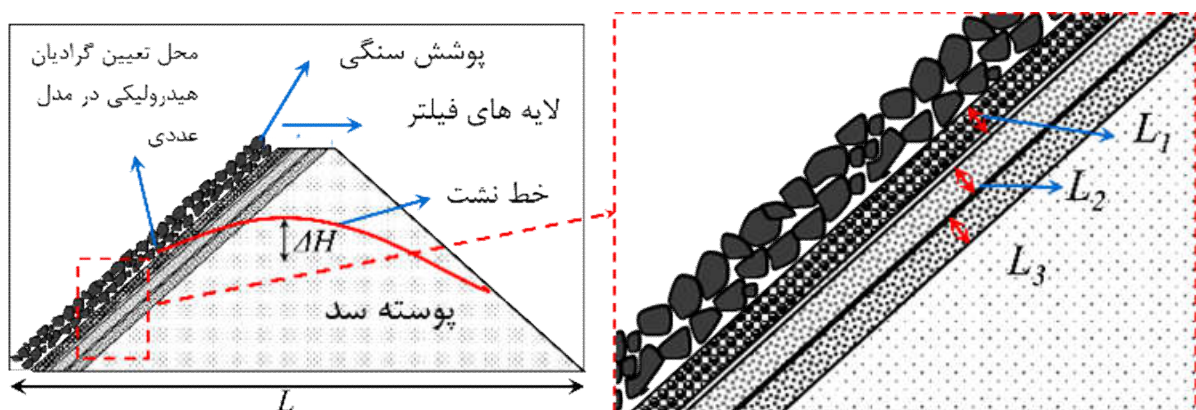
ویژگی‌های مواد نقش مهمی در الگوی جریان در هر پدیده نشست دارند. برای مدل آزمایشی سد خاکی، ترکیبی از مواد ماسه‌ای حاوی درصد کمی سیلت استفاده شد. شکل ۵-الف توزیع اندازه دانه مواد سد خاکی را نشان می‌دهد. دلیل استفاده از چنین موادی پاسخ سریع این خاک‌ها به تغییر در شرایط مرزی و در نتیجه صرفه جویی در وقت است. طی مراحل ساخت بدنه سد خاکی، لایه‌های خاک در ضخامت ۵۰ میلی‌متر ریخته شده و با غلتک دستی متراکم می‌شوند (شکل ۵-ب).

آزمایش مدل آزمایشگاهی

آزمون‌های نشست از بدنه سد خاکی در محدوده هددهای آبی مختلف مخزن بالادست از ۰/۱ تا ۰/۶ متر بصورت 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 نشست پایدار، سطح آب در پیژومترها ثابت شد. به منظور بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی در تحلیل نشست (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 نشست ناپایدار نیز انجام شد. افت سریع سطح آب مخزن در تجزیه و تحلیل نشست ناپایدار در فواصل ۰/۱ متر در هر ۱۰ دقیقه انجام شد. در مجموع، ۴ مرحله مختلف تجزیه و تحلیل نشست ناپایدار انجام شد. زمان شروع هر



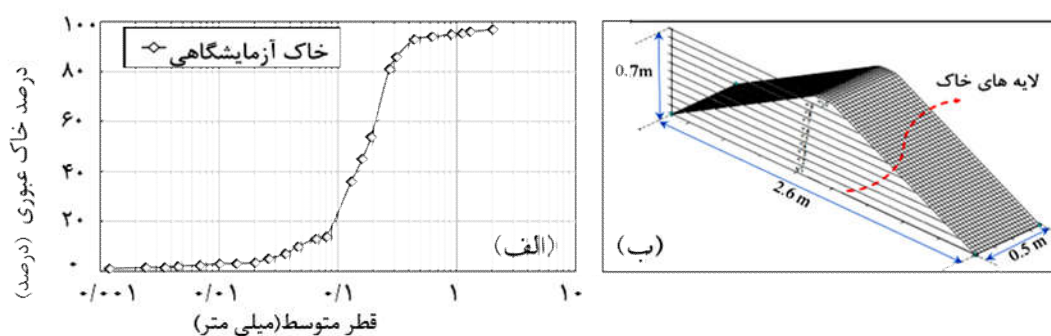
شکل ۳. مدل آزمایشگاهی؛ الف) مدل سد خاکی همگن $m=1$ ، ب) مدل سد خاکی همگن $m=2$ ، ج) مدل سد خاکی همگن $m=3$ ، د) موقعیت نصب ردیف پیزومترها، ه) موقعیت نصب چاهک‌های مشاهداتی، ی) موقعیت نصب چاهک‌های مشاهداتی در مدل آزمایشگاهی، ز) ابعاد فلوم آزمایشگاهی



شکل ۴. شماتیک لایه‌های فیلتر در نظر گرفته شده برای حفاظت شیب بالادست سدهای خاکی در زمان تخلیه ناگهانی مخزن

جدول ۱. مقادیر گرادیان هیدرولیکی بحرانی برای مصالح مختلف

گرادیان هیدرولیکی بحرانی i_{cr}	ضریب خزش لین PF	ضریب خزش بلای C	نوع خاک
۰/۱۱۸	۸/۵	۱۸	ماسه بادی و سیلت
۰/۱۴۳	۷	۱۵	ماسه ریز
۰/۱۵۷	۶	—	ماسه متوسط
۰/۲۰۰	۵	۱۲	ماسه درشت
۰/۱۳۳	۷/۵	—	ماسه و رس
۰/۱۴۳	۷	—	ماسه و سیلت
۰/۲۵۰	۴	—	شن ریز
۰/۲۸۶	۳/۵	—	شن متوسط
۰/۳۳۳	۳	۹	شن و ماسه
۰/۳۳۳	۳	—	شن درشت و قلوه سنگ
۰/۴۰۰	۲/۵	۶-۴	شن با قلوه سنگ
۰/۵۰۰	۲	—	شن و ماسه و تخته سنگ
۰/۳۳۳	۳	—	رس نرم (خمیری)
۰/۵۰۰	۲	—	رس متوسط
۰/۵۵۶	۱/۸	—	رس سخت
۰/۶۲۵	۱/۶	—	رس خیلی سخت



شکل ۵. توزیع اندازه ذرات در لایه‌های خاکریز بدنه سد؛ الف) توزیع اندازه ذرات، ب) مشخصه هندسی لایه‌های خاکریز

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

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. باتوجه به اینکه هدف اصلی این مطالعه، تجزیه و تحلیل تراوش از

دیفرانسیل حاکم استفاده شد (۹). شکل ۷، مدل اولیه سد خاکی را در شرایط پایدار نشان می‌دهد. به‌منظور ایجاد مدل عددی در شرایط گذرا، حل وضعیت حالت پایدار جدایی‌ناپذیر است. شرایط مرزی برای تجزیه و تحلیل تراوش در شکل ۷-ج نشان داده شده است. در مرز بالادست، هد ارتقاعی 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 نشتی از بدنه پایین دست سد وجود ندارد، گفته می‌شود. همچنین، شکل ۷-د یک مدل نشت پایدار را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل حساسیت مش

در این پژوهش از عناصر مثلثی و چهارضلعی با ۳ و ۴ نقطه ادغام گاوس استفاده شد. مقایسه اندازه شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد که اندازه مش ۰/۰۵ (متر) در این پژوهش مناسب است. تعداد اجزا و گره‌های مورد استفاده در مدل اصلی به ترتیب ۶۴۳۰ و ۱۶۷۷۹ در نظر گرفته شد. همچنین باید توجه داشت که اندازه‌های مختلف مش مورد آزمون قرار گرفتند تا اطمینان حاصل شود که نتایج عددی از تولید مش مستقل هستند (شکل ۸). ارزیابی‌ها نشان داد، مش ریز تفاوت معنی‌داری در نتایج نشان نمی‌دهد. نتیجه اخیر با پژوهشی که توسط بهشتی و همکاران در سال ۲۰۱۳ (۲) انجام شده است، مطابقت دارد.

روند آزمایش‌ها

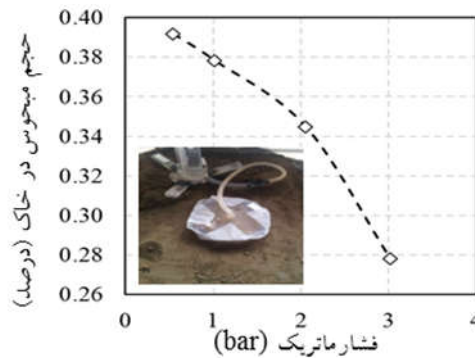
به‌منظور برآورد ضخامت لایه‌های فیلترهای نمایش داده شده در شکل ۹، ابتدا با استفاده از مدل آزمایشگاهی، مدل عددی سد خاکی واسنجی شد و با تغییر داده‌های ورودی از جمله تغییر افت ناگهانی سطح آب (در دو سناریو تخلیه مخزن در سه روز و چهار روز)، هدایت هیدرولیکی پوسته سد، تغییر شیب بدنه سد خاکی (در سه شیب ۱، ۲ و ۳، $m = 1$)، روند برگشت آب در بدنه سد خاکی مورد ارزیابی قرار می‌گرفت. با تغییر ضخامت لایه‌ها، مقدار ضخامت قابل قبول برای تامین شرایط ایمن (کمتر بودن مقدار گرادیان هیدرولیکی موجود از گرادیان هیدرولیکی مصالح سد) برآورد شد.

به‌منظور تعیین منحنی مشخصه رطوبت (برای نمونه؛ مقدار حجم آب و VWC)، آزمایش صفحه فشار با فشار مکش بیشینه ۳ (اتمافر) انجام شد. منحنی مشخصه آزمایشگاهی رطوبت در بدنه سد خاکی در شکل ۵ 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 نفوذ سنج کششی برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع تعیین شد. 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 (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 ۵-ب تصویری از دستگاه نفوذسنج استفاده شده روی تاج سد را نشان می‌دهد. آزمون نفوذ پذیری 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 به‌دست 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 به‌دست آمد. برای فشارهای بیشتر به شرایط اشباع (ارتفاع فشاری متر)، زمان رسیدن به‌سرعت نفوذ ثابت کاهش یافت. شکل ۶ سیستم دیسکی مکش را نشان می‌دهد.

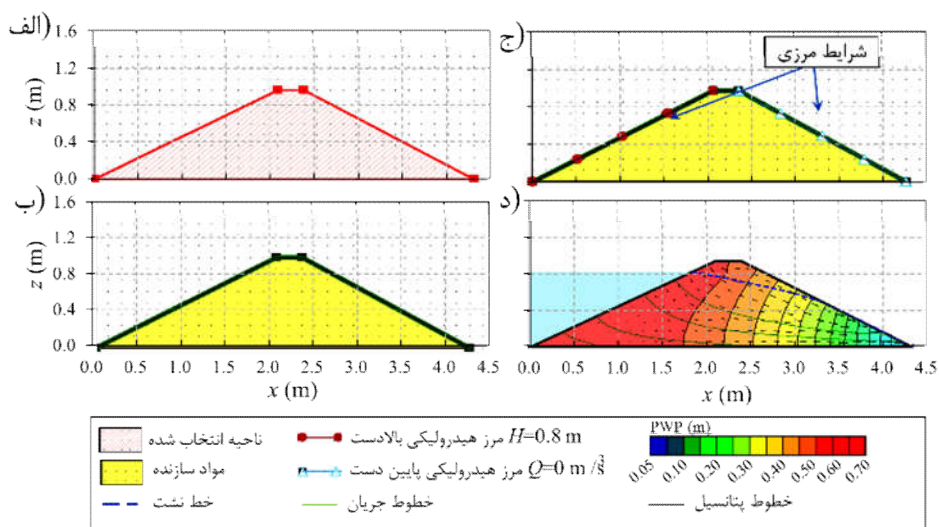
نتایج و بحث

مدل عددی

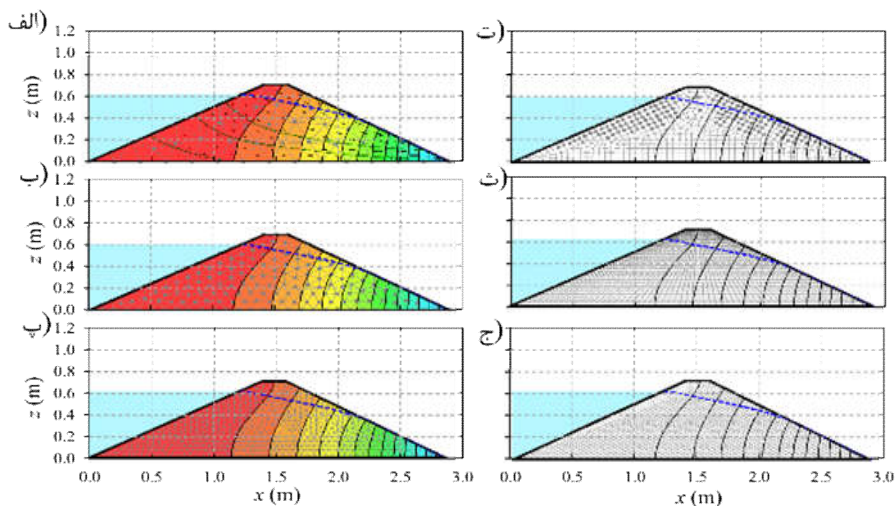
در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار قدرتمند اجزا محدود GeoStudio, 2007 با زیر برنامه SEEP/W، برای حل معادلات



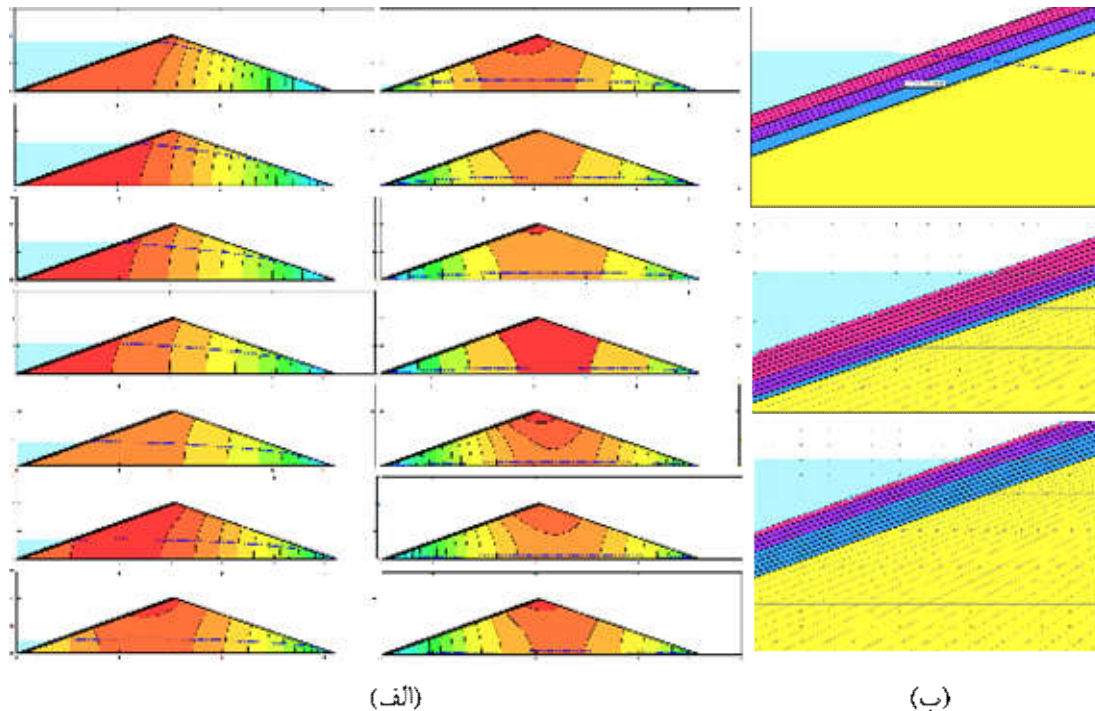
شکل ۶. محاسبه VWC؛ منحنی مشخصه آزمایشگاهی رطوبت در بدنه سد خاکی همگن همراه با سیستم مکش دیسکی نصب شده روی بدنه سد برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع نشده



شکل ۷. جزئیات مدل عددی؛ الف) هندسه مدل، ب) ورودی مواد سازنده سد، ج) شرایط مرزی، د) PWP از طریق مدل حالت پایدار



شکل ۸. تحلیل حساسیت شبکه؛ الف) شبکه مثلثی، اندازه شبکه ۰/۲ متر، ب) شبکه مثلثی، اندازه شبکه ۰/۱ متر، پ) شبکه مثلثی، اندازه شبکه ۰/۰۵ متر، ت) شبکه چهارگوش و مثلثی، اندازه شبکه ۰/۰۵ متر، ث) شبکه چهارگوش مستطیلی، اندازه شبکه ۰/۰۵ متر، ج) شبکه چهارگوشه مثلثی، اندازه شبکه ۰/۰۵ متر



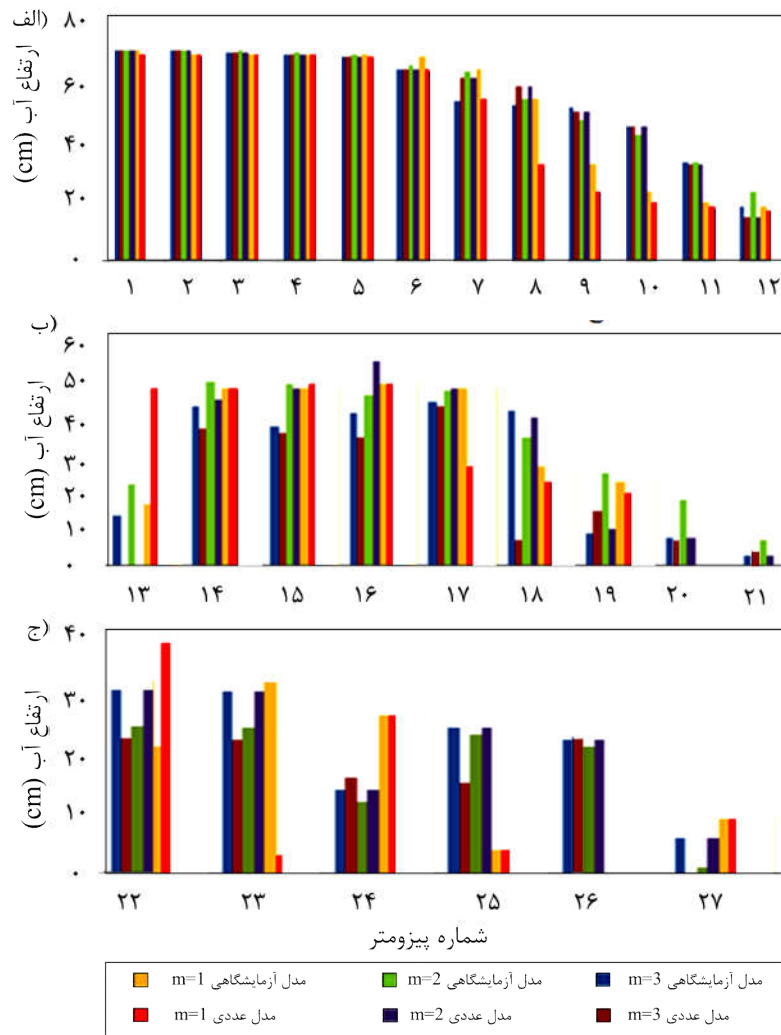
شکل ۹. روند برگشت آب در بدنه سد در مدل عددی، الف) مدل عددی تخلیه مخزن آب سدهای خاکی، ب) تعیین ضخامت لایه‌های حفاظتی در شیب بالادست برای جلوگیری از افزایش گرادیان هیدرولیکی

اعتبارسنجی مدل اشباع

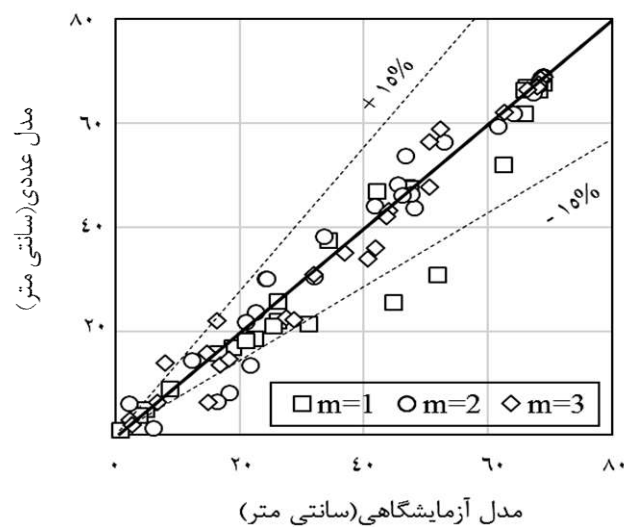
به منظور اعتبارسنجی مدل عددی توسط داده‌های تجربی، از اطلاعات پیزومتری ۲۷ پیزومتر نصب شده برای مقایسه بین دو مدل استفاده شد. مدل عددی بر اساس یکنواختی هدایت هیدرولیکی بدنه سد خاکی بر اساس نسبت افقی توسط هدایت هیدرولیکی عمودی کالیبره شد. دلیل استفاده از این تراز، بیشترین سهم مواد سد در جریان از بدنه سد بود. به دلیل شرایط پایدار، معادله ۱ برابر با صفر است. در نتیجه منحنی مشخصه رطوبت بر نتایج تأثیر نمی‌گذارد و مقدار هدایت هیدرولیکی پارامتری مؤثر است؛ بنابراین کالیبراسیون مدل عددی با مقایسه مقادیر مختلف فشار پیزومتریک ثبت شده در مدل آزمایشگاهی و عددی با میزان نشت از بدن سد انجام شد. شکل ۱۰ مقایسه فشارهای پیزومتریک به دست آمده از مدل عددی با داده‌های تجربی در سه تراز مختلف برای بیشترین تراز آب مخزن به دلیل متفاوت بودن هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۱، مقادیر فشار پیزومتریک به دست آمده از مدل‌های آزمایشگاهی با مدل عددی بررسی شد.

تعیین ضخامت لایه‌های فیلتر

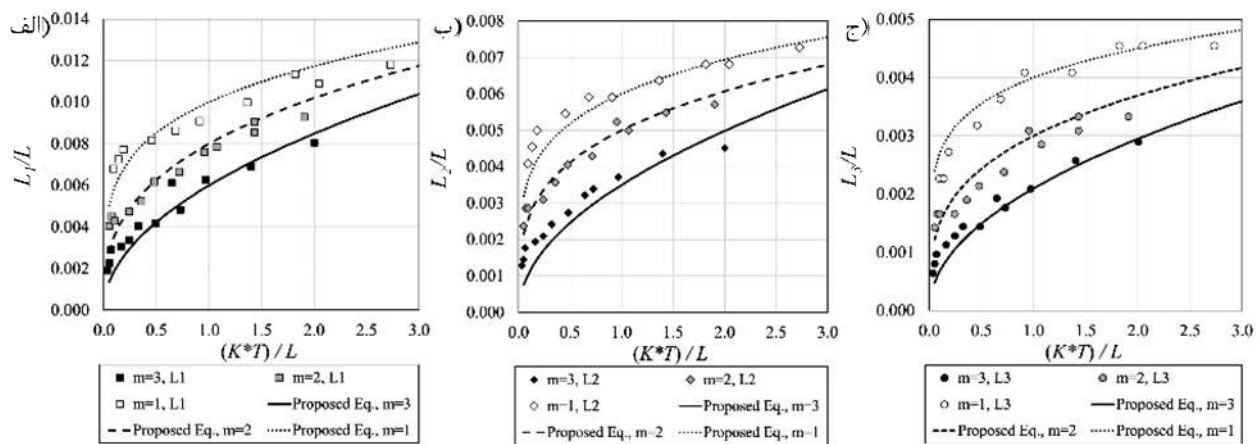
در شکل ۱۲، ضخامت لایه‌های فیلتر (شکل ۴ مشاهده شود) در شیب بالادست سد خاکی همگن در زمان تخلیه ناگهانی مخزن، به منظور جلوگیری از پدیده پایپیج و تجاوز گرادیان هیدرولیکی موجود از گرادیان هیدرولیکی مصالح سازنده سد (جدول ۱) نمایش داده شده است. به منظور تعیین این ضخامت‌ها، ابتدا در مدل عددی به ازای مقادیر مختلف هدایت هیدرولیکی خاک پوسته (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر روز در نظر گرفته شد)، زمان تخلیه مخزن سد (دو، سه و چهار روز) و شیب مختلف بدنه سد خاکی، مقدار گرادیان هیدرولیکی در نقطه خروج آب از بدنه سد و ورود به مخزن بالادست سد، مقادیر ضخامت‌ها اندازه‌گیری و تعیین می‌شد. در ادامه، با اعمال ضخامت مختلف لایه‌های فیلتر که بر اساس توصیه USBR در سه لایه از جنس ماسه، ماسه و شن و لایه شنی در نظر گرفته شده بود، مقادیر گرادیان هیدرولیکی در نقطه انتهایی (شکل ۴ مشاهده شود)



شکل ۱۰. مقایسه داده‌های پیزومتریک اندازه‌گیری شده و نتایج مدل عددی



شکل ۱۱. مقایسه میزان خطای مدل عددی با مدل آزمایشگاهی با استفاده از داده‌های فشار پیزومتریک



شکل ۱۲. تعیین ضخامت لایه‌های فیلتر بر اساس داده‌های مدل عددی

در نقطه‌ی انته‌ای خروج آب در شیب بالادست سد خاکی اندازه‌گیری شد. این مقادیر در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همچنین به منظور تعیین مقدار گرادیان هیدرولیکی موجود، پس از تخمین ضخامت لایه‌های فیلتر از معادلات (۴) تا (۶)، معادله (۷) بر داده‌های گرادیان هیدرولیکی برازش داده شد که مقایسه نتایج به دست آمده از مدل عددی و معادله ارائه شده نشان می‌دهد، این معادله با دقت قابل قبولی می‌تواند مقادیر گرادیان هیدرولیکی موجود در خاک را در زمان استفاده از لایه‌های حفاظتی تخمین بزند. ضرایب معادله ۷ در جدول ۳ نمایش داده شده است.

$$i_{av} = a \left(\frac{KT}{L} \right)^b \quad (7)$$

نتیجه‌گیری

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

۱. مقایسه بین مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد، 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.

تعیین و برآورد می‌شد. با مقایسه مقادیر گرادیان هیدرولیکی استحصال شده از مدل عددی و مقادیر گرادیان هیدرولیکی بحرانی، با تغییر ضخامت لایه‌ها، مقدار گرادیان هیدرولیکی موجود در خاک کنترل شد و در نهایت مقدار ضخامت لایه‌ها تعیین شد. در ادامه با استفاده از معادله شماره (۴) و (۵) و (۶)، ضخامت لایه‌های ورودی بر اساس داده‌های ورودی ارائه شد. همچنین در جدول ۲ ضرایب معادلات یاد شده و در شکل ۱۲، معادلات برازش داده شده نمایش داده شده است.

$$\frac{L_1}{L} = \alpha \left(\frac{KT}{L} \right)^b \quad (4)$$

$$\frac{L_2}{L} = \alpha \left(\frac{KT}{L} \right)^b \quad (5)$$

$$\frac{L_3}{L} = \alpha \left(\frac{KT}{L} \right)^b \quad (6)$$

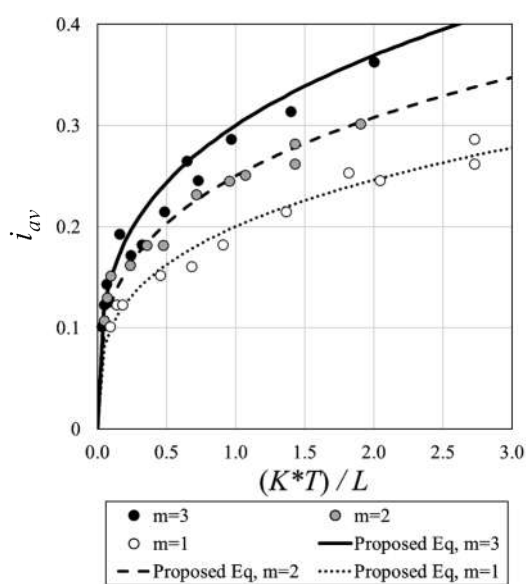
در این معادلات L_1 ، L_2 و L_3 به ترتیب ضخامت لایه‌های فیلتر ماسه، ماسه و شن و لایه شنی، L طول پی سد در جهت جریان رودخانه، K هدایت هیدرولیکی پوسته، T زمان تخلیه سد، a و b ضرایب معادله برازش داده شده است.

تعیین گرادیان هیدرولیکی

برای اطمینان از فراهم شدن شرایط ایمن در مقابل پدیده پایپینگ با استفاده از داده‌های مدل عددی، مقادیر گرادیان هیدرولیکی

جدول ۲. تعیین ضرایب معادلات (۴ تا ۶)

R ²	شیب بدنه سد خاکی			ضرایب	شماره معادله
	m=1	m=2	m=3		
۰/۹۱۲	۰/۵۱۰	۰/۳۵۲	۰/۲۳۱	a	۴
۰/۹۳۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۱۱	b	۴
۰/۹۴۱	۰/۵۱۰	۰/۲۸۱	۰/۲۱۱	a	۵
۰/۹۲۱	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	b	۵
۰/۸۹۱	۰/۴۹۲	۰/۳۲۱	۰/۱۷۱	a	۶
۰/۸۷۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	b	۶



شکل ۱۳. مقادیر گرادیان هیدرولیکی موجود در خاک پس از استفاده از لایه‌های حفاظتی

جدول ۳. ضرایب معادله (۷)

R ²	شیب بدنه سد خاکی			ضرایب
	m=1	m=2	m=3	
۰/۹۱	۰/۳۰	۰/۳۱	۰/۳۱	a
۰/۹۲	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۲۲	b

۳. مقایسه بین تراز پیزومتریک در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی نشان داد، 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.

۲. به‌منظور ایجاد بهترین انطباق بین مدل‌های آزمایشگاهی و عددی، مقادیر تجربی حجم آب در تابع هیدرولیک عددی استفاده شد. باین‌حال، هدایت هیدرولیکی به‌دلیل شرایط اشباع و غیراشباع گرفته شد.

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 چشمگیری بیشتر از اختلاف دیده شده در افت سریع سطح آب و تحلیل نشت پایدار است.

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 تحلیل تراوش پایدار و ناپایدار مشاهده شد. بیشترین اختلاف بین خطوط فریاتیک عددی و تجربی برای نشت حالت پایدار، در ناحیه پایین دست بدنه سد خاکی دیده شد. در جریان نشت ناپایدار و کشیدن

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).
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. 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. *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University ; no. 3.
6. Fredlund, D. G. 2006. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 132(3): 286-321.
7. 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.
8. 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.
9. GeoSlope Ltd. 2007. Sigma/W User's Guide for Stress-Deformation Analysis. GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alta.
10. 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.
11. 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.
12. Kumar, S., P. K. Sharma and K. S. Hari Prasad. 2014. Modeling of Unsaturated Flow Using Hydrus Software. *Race-2014, Paper ID*, 1434.
13. 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.
14. 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.
15. Morengstern, N. 1963. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. *Geotechnique*. 13(2): 121-131.
16. Nansheng, L., T. Bo and X. Lihui. 2015. Slope stability analysis of earth-rockfill dams using MGA and UST. *Journal of Computational Engineering*. 2015.
17. Pham, H. Q. 2005. A volume-mass constitutive model for unsaturated soils.
18. 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.
19. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1(5): 318-333.
20. 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.
21. Sedghi-Asl, M., H. Rahimi and H. Khaleghi. 2010. Experimental analysis of seepage flow under coastal dikes. *Experimental Techniques*. 34(4): 49-54.
22. Sica, S., L. Pagano and F. Rotili. 2019. Rapid drawdown on earth dam stability after a strong earthquake. *Computers and Geotechnics*. 116: 103187.

23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Wooding, R. A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*. 4(6): 1259-1273.

Determining the Thickness of the Filter Layers to Protect the Upstream Sideslope of the Homogeneous Earth Dam Due to Rapid Drawdown Condition with Experimental and Numerical Models

H. Azadbeygi*, M. Najarchi and S. H. Lajevardi¹

(Received: April 9-2023 ; Accepted: August 30-2023)

Abstract

The present research explores the experimental and numerical investigation of homogeneous earth dams in rapid drawdown conditions. The numerical model was evaluated and calibrated due to the saturation status using the experimental model. The calculated error between the piezometric pressure data and the seepage line in the numerical and experimental model indicated that the results of the Seep/W numerical model data had acceptable accuracy. Also, to determine the thickness of the filter adjusted in the upstream side slope of the homogeneous earth dam in rapid drawdown condition, input data to the numerical model including hydraulic conductivity, rate of the water level drop (depletion of the dam reservoir in three scenarios of 2, 3, and 4 days), the different side slopes of the body ($m = 1, 2,$ and 3), and the thickness of the filter layers were determined. It is worth mentioning that the number of layers and the soil properties of the filter materials were determined based on the USBR which consisted of three types of soil structure (sand, gravel, and gravel with sand). The maximum hydraulic gradient of the dam materials was used to estimate the thickness of the filter layers. Finally, some dimensional fewer numbers were presented to estimate the filter layers by changing the input data through the numerical model to attain the safe conditions for the values of the hydraulic gradient at the upstream side slope. Results of the numerical model indicated that for the construction of the dam with the thickness of the presented filter, the values of the available hydraulic gradient at the point of water exit from the upstream side slope of the body of the earth dam were lower than the critical hydraulic gradient of the earth dam materials in rapid drawdown condition.

Keywords: Thickness of the filter, Rapid drawdown, Earth dam, Hydraulic gradient, Seep/w

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Azad Islamic University, Arak Branch, Arak. Iran.

*: Corresponding author, Email: Hasanazadbeygi7202@gmail.com