



تعیین ارتفاع فیلتر قایم در سدهای غیرهمگن با هسته‌ی رسی قایم

سعید صالحی^۱ - کاظم اسماعیلی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۱

چکیده

یکی از مشکلات سدهای خاکی در هنگام بهره‌برداری، وقوع پدیده‌ی پایداری می‌باشد. این پدیده به خاطر بالا رفتن گرادیان هیدرولیکی موجود از گرادیان هیدرولیکی مجاز می‌باشد. راهکارهای مختلفی برای حل این مشکل پیشنهاد شده است. یکی از این راهکارها استفاده از ترکیب هسته رسی با فیلتر پایین دست هسته رسی می‌باشد. به همین منظور در این تحقیق با استفاده مدل آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری PLXIS V8.5 سعی در پیش‌بینی ابعاد بهینه این نوع فیلترها شده است. سه مدل آزمایشگاهی به طول ۴/۲ متر و ارتفاع یک متر و شیب بدنه ۱H : 2V در فلوم آزمایشگاهی تهیه شد. پس انجام آزمایشات و ترسیم خطوط نشت در مدل‌های آزمایشگاهی، با استفاده از مقایسه آماری بین مدل‌های آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری صحت داده‌های نرم‌افزاری با استفاده از آزمون آماری P-VALUE و RMSE سنجیده شد. در نهایت با استفاده از مدل نرم‌افزاری فیلتر پیشنهادی برای سدهای خاکی با هسته قایم ارایه شد. نتایج نشان داد که ارتفاع فیلتر رابطه مستقیمی با نسبت هدایت هیدرولیکی هسته به پوسته سدهای رسی با هسته‌ی قایم دارد. بدین صورت که با افزایش این نسبت ارتفاع فیلتر پیشنهادی نیز افزایش پیدا می‌کند. در نهایت ارتفاع این فیلتر ارایه شد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع فیلتر، ضخامت هسته رسی، مدل سد خاکی غیرهمگن، نرم‌افزار

مقدمه

سدهای خاکی به صورت قایم می‌باشد. این امر در مطالعات گذشته نشان داده است. در صورتی که هسته رسی به صورت مایل ساخته شود، اگر چه از ضریب پایداری شبروانی بیشتری برخوردار است ولی به خاطر نشست ناهمگون منابع سازند سد در عمر بهره‌برداری سد می‌شود، این امر موجب ایجاد خرابی‌های ساختمانی در فصل مشترک بین هسته و پوسته به خاطر تنش‌ها و کرنش‌های بوجود آمده، می‌شود (۴). به همین منظور در این تحقیق با ساختن مدل سد خاکی در ابعاد آزمایشگاهی، به بررسی و ارایه پیشنهاداتی برای ضخامت هسته رسی و همچنین ابعاد فیلتر پایین دست پرداخته شد.

مطالعات انجام شده

ابتدا در این بخش به مرور منابع گذشته مبحث پرداخته می‌شود و در ادامه مطالعاتی جدیدتر ارایه می‌گردد. از جمله مطالعاتی که در زمینه فیلترهای سدهای خاکی در سال‌های گذشته می‌توان اشاره نمود. مطالعات ترزاقی (۱۲)، ترزاقی (۱۳)، آرولاناندان و همکاران (۱)، خور و همکاران (۵) و چینگ و همکاران (۲) پرداخت.

ترزاقی (۱۲)، (۱۳) مباحثی در مورد ارایه راهکارهایی برای کنترل نشت و گرادیان هیدرولیکی در سدهای خاکی ارایه نمود. از جمله این راهکارها، استفاده از فیلترها برای کنترل نشت در سدهای خاکی را می‌توان اشاره کرد.

آرولاناندان و همکاران (۱) به بررسی نشت در سدهای خاکی

امروزه ساخت سدهای خاکی در تأمین آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعت اهمیت فراوانی دارد. این نوع سدهای در دو حالت همگن و غیرهمگن ساخته می‌شوند. سدهای خاکی با بدنه غیرهمگن معمولاً با پوسته همگن از جنس خاک غیر چسبنده و هسته‌ای در وسط ساخته می‌گردند (۶). از گذشته میزان ضخامت و محل قرارگیری این هسته در این نوع سدهای همیشه مورد بحث و آزمایش بوده است. عموماً در هنگام آبگیری این نوع سدها، نشت از بین بدنه سد جریان پیدا کرده و به سمت پایین دست ادامه پیدا می‌کند. در صورت افزایش این نشت، گرادیان موجود در منطقه بین هسته رسی و پوسته (به خاطر تغییر اندازه‌ی ذرات خاک و افزایش سرعت جریان) افزایش پیدا کرده و در نهایت از گرادیان هیدرولیکی مجاز خاک هسته بیشتر می‌گردد. این پدیده باعث شروع خرابی در این منطقه می‌شود. برای جلوگیری از این افزایش گرادیان استفاده از فیلترها در این محدوده در تحقیقات گذشته پیشنهاد می‌شود (۱۵).

نکته حایز اهمیت در این تحقیق استفاده از هسته رسی در

۱ و ۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: esmaili@um.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول

انتهای فیلترها بیشترین گرادیان هیدرولیکی را متحمل می‌شوند و امکان خرابی حاصل از پاپینگ در این مناطق به مراتب بیشتر از دیگر ناحیه‌های سد می‌باشد.

میشرا (۷) به بررسی پدیده نشت در بدنه سدهای خاکی پرداخت. در این تحقیق به بررسی خط نشت و ارایه روابط ریاضی برای تخمین این خط پرداخته شده است. در این تحقیق معادله دارسی با معادله چند درجه خط نشت باز نویسی شد. و فاکتورهای هیدرولیکی از جمله دبی و هد اولیه بر خط نشت مورد ارزیابی قرار داده شد. در نهایت روابطی برای طول زهکش افقی پیشنهاد شد. این مطالعه با مطالعات کاساگران مورد مقایسه قرار داده شد.

همچنین مطالعات در سال‌های اخیر در داخل صورت گرفته که به برخی از آنها در زیر اشاره می‌گردد.

کاربر و همکاران (۴) به بررسی رفتار استاتیکی و لرزه‌ای یک سد خاکی (سد بیدواز) با هسته رسی مایل در پایان ساخت را مورد بررسی قرار دادند. تحلیل‌های عددی برای همان سد، ولی با فرض هسته قائم، تکرار شده است. آنالیزهای حساسیت انجام شده برای زلزله با شتاب‌های متفاوت نشان از ایجاد تغییر شکل‌های زیاد و تمایل بیشتر به ناپایداری در سد با هسته مایل نسبت به سد با هسته قایم دارد.

نجف‌پور خویگانی و همکاران (۸) با مدل‌سازی سد خاکی همگن، تأثیر زهکش پنجه با زوایا و طول و ارتفاع‌های مختلف را بر روی روند نشت بررسی کردند. مدل‌سازی بوسیله نرم‌افزار PLXIS V8 و نرم‌افزار SAS انجام پذیرفت که با سطح اطمینان ۹۵ درصد خطایی بین داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری وجود نداشت. در نهایت با معرفی ارتفاع زهکش با نمایه P و ارتفاع آب در مخزن سد با نمایه h و همچنین زاویه α به عنوان زاویه زهکش پنجه، بهترین زهکش از لحاظ افت خط نشت نسبت به حالت بدون زهکش معرفی شد این زهکش با شاخص $P/h=0.25$ و زاویه ۴۵ درجه می‌باشد.

در ساخت سدهای خاکی با هسته‌ی رسی عموماً در پایین دست هسته رسی برای خارج کردن زه آب در هسته و پایین آوردن فشار آب منفذی در این ناحیه از فیلتر استفاده می‌شود. معمولاً ارتفاع ساخت این فیلتر با ارتفاع ساخت هسته‌ی رسی برابر در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی ساخت فیلتر در زمان ساخت بدنه سد دارای حساسیت خاص خود می‌باشد. ساختن آن با ارتفاع مناسب (نه ارتفاع کل هسته) امری است ضروری که به خودی خود باعث کاهش هزینه‌های ساخت سد می‌گردد. این امر مهم زمینه‌ای برای تحقیق در مورد ارتفاع فیلتر مورد نیاز در این نوع سدهای خاکی فراهم می‌آورد. در این تحقیق با استفاده از سه مدل آزمایشگاهی و تعمیم دادن داده‌های بدست آمده از آزمایشات محیطی با مدل نرم‌افزاری سعی در ارایه استاندارد با توجه به جنس خاک سازند سد ارایه می‌شود. با توجه به موارد گفته شده زمینه‌ای برای تحقیق در این مورد فراهم می‌باشد. که متأسفانه در مطالعات انجام شده در این حیطه تحقیق جامعی صورت نگرفته است. با توجه به این موارد سعی شد به این مورد پرداخته شود.

همگن پرداختند. در این تحقیق با توجه به جنس منابع قرضه بدنه سد، نمودارهای برای ارتفاع و ابعاد فیلترها در سدهای خاکی ارایه شد. در این تحقیق به عملکرد فیلترها با دانه‌بندی‌های مختلف و هدایت هیدرولیکی‌های گوناگون در هنگام شروع نشت در سدهای خاکی ارایه شد.

چینگ و همکاران (۲) با استفاده از روش اجزا محدود معادلات نشت به ارایه روشی برای حل معادلات نشت در سدها با فیلتر افقی پرداختند. در این تحقیق از داده‌های مدل آزمایشگاهی استفاده شد. در نهایت روش تحلیلی-ترسیمی برای برآورد طول فیلتر افقی در سدهای خاکی ارایه شد. این تحقیق جز مطالعاتی است که روش‌هایی برای حل عددی معادلات نشت ارایه می‌داد. و مطالعات را از فاز آزمایشگاهی به فاز استفاده از روش‌های عددی سوق می‌داد.

خور و همکاران (۵) با در نظر گرفتن جنس و دانه‌بندی فیلتر به بررسی عملکرد فیلترها در سدهای خاکی با هسته‌ی رسی پرداختند. در این تحقیق با توجه به جنس هسته‌ی رسی در سدهای خاکی به ارایه فیلترهایی با ساختار مکانیک خاکی مختلف پرداخته شد. در نهایت دانه فیلتر، به صورت لای لایه برای کنترل پاپینگ ارایه شد. در این تحقیق نشان داده شد که تغییرات دانه‌بندی در فیلتر از درشت به سمت ریز دانه باعث می‌شود که گرادیان هیدرولیکی به گرادیان هیدرولیک خرابی نرسد و انرژی آب در طول فیلتر به آرامی مستهلک شود.

همچنین در ادامه مطالعاتی که در سال‌های اخیر صورت گرفته می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود.

یا و همکاران (۱۶) به بررسی رفتار هسته‌ی رسی در یک سد واقعی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از چاهک‌هایی که در طول سد احداث شد. در یک سال بهره‌برداری رفتار هسته رسی و همچنین نشت از بدنه سد مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد زمان بارندگی و پر شدن مخزن و نشت از بدنه سد باعث کرنش سد به سمت دامنه پایین دست می‌شود. همچنین پیشنهاد شد که با تزریق گروت در فصل مشترک بین هسته و پوسته مقدار قابل توجهی از نشت را کاهش می‌دهد. این راهکار می‌تواند باعث کاهش دبی نشت و در نهایت کاهش گرادیان هیدرولیکی گردد. اگر چه دبی نشت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا نکرد ولی این راهکار باعث جلوگیری از خرابی‌های هیدرولیکی در بدنه‌ی سدهای خاکی می‌گردد.

تیموتی و همکاران (۱۵) به بررسی نشت در سدهای خاکی غیرهمگن پرداختند. در این مطالعه نشت از فیلتر، در هنگام اشباع بودن خاک مورد ارزیابی قرار داده شد. در هنگام تخلیه‌ی مخزن، دبی نشت برگشتی به مخزن با استفاده از مدل نرم‌افزاری مورد ارزیابی قرار داده شد. با استفاده از داده‌های نرم‌افزاری Seep-W مکان‌های خرابی حاصل از نشت در حالت غیراشباع پیش‌بینی شد. در نهایت عملکرد فیلتر بالادست هسته رسی مورد ارزیابی قرار گرفت و راهکارهایی برای افزایش عملکرد پیشنهاد شد. نتایج نشان داد قسمت

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایشات و محاسبه بهترین ارتفاع فیلتر از امکانات آزمایشگاهی استفاده شد که به ترتیب معرفی می‌گردند. همچنین آزمایشات نیز در زیر توضیح داده شده است.

تجهیزات آزمایشگاهی

۱- فلوم آزمایشگاهی: آزمایشات در یک فلوم (Flume) آزمایشگاهی به طول ۶ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱٫۲ متر واقع در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد، انجام گرفت. ساختمان فلوم متشکل از فولاد و پلاستیکی گلاس است که در آن کف فلوم و دیواره پشت فلوم از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت ۲ میلی‌متر و دیواره‌های دیگر فلوم از جنس پلاستیکی گلاس با ضخامت ۱۵ میلی‌متر که با استفاده از چسب‌های خارجی آکواریم آب‌بندی شده ساخته شد. برای جلوگیری از باز شدن ورق‌های گالوانیزه در کف، بالا و پشت فلوم تکیه گاه‌های (نبشی) در فواصل مشخص جوش داده شد (شکل ۱).

۲- جعبه زهکشی: به منظور جمع‌آوری آب حاصل از زهکشی مدل سد خاکی، باکسی با عرض ۰/۶ متر، طول ۰/۹ متر و ارتفاع ۰/۴

متر با ورق گالوانیزه ساخته شد. برای ورود آب حاصل از زهکشی از فلوم به داخل باکس، سوراخ‌هایی با قطر ۳ میلی‌متر در کف فلوم، براساس استاندارد قطر USBR سوراخ‌های زهکش، طراحی شد.

۳- پیزومترها و چاهک‌های مشاهداتی: برای اندازه‌گیری فشار آب داخل فلوم، ۳۰ عدد پیزومتر به صورت شبکه‌بندی شده، روی دیواره‌ی پلاستیکی گلاس تعبیه و آب‌بندی شد. این پیزومترها شامل فیلتر ورودی و لوله‌های پلاستیکی هستند. همچنین برای بررسی روند خط نشست، تعداد ۷ چاهک‌های مشاهداتی، از لوله‌ی گالوانیزه به قطر سه چهار اینچ و با سوراخ‌هایی به قطر ۱ سانتی‌متر ساخته شد (شکل ۱ و ۲).

۴- دستگاه مولتی‌متر: برای قرائت آب در داخل چاهک از دستگاه مولتی‌متر استفاده شد بدین صورت که قطب مثبت و منفی این دستگاه به سر میله‌ای به صورت عایق و بدون اتصال کنار هم قرار داده شد و در هنگام اتصال این قسمت با آب مولتی‌متر در حالت مقاومت‌سنجی مقاومتی را نشان می‌دهد پس از واسنجی مقاومت با ارتفاع آب از این روش برای قرائت آب در چاهک‌ها استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۳- استفاده از زوج میله‌ها در چاهک‌ها
Figure 3- Resistance related Height of instrument calibration



شکل ۲- چاهک‌های مشاهده‌ای
Figure 2- Observation wells

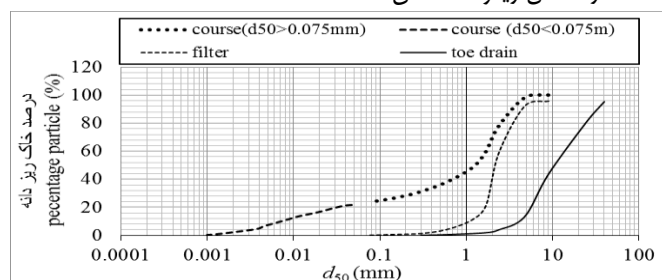


شکل ۱- وضعیت قرارگیری پیزومترها
Figure 1- Experimental Flume and Pizometer

آزمایشات

۱- آزمایشات مکانیک خاکی (دانه‌بندی): به منظور تعیین محدوده دانه‌بندی بکار رفته در ساخت مدل از آزمایش دانه‌بندی با الک‌های استاندارد و روش هیدرومتری برای بخش ریزدانه استفاده شد. دانه‌بندی قسمت‌های مختلف سد در شکل زیر مشخص شده

است. همچنین برای خاک پوسته درصد خاک ریز دانه در سه لایه مختلف مدل سد تعیین شد. که در لایه ۱ (اولین لایه تراکم)، لایه‌ی دوم (لایه‌ی میانی مدل‌ها) و لایه سوم (لایه در تاج سدها) مقدار درصد ریزدانه (عبوری از الک ۲۰۰) تعیین شد که به ترتیب برابر با ۱۹، ۲۰ و ۱۸ درصد بود.

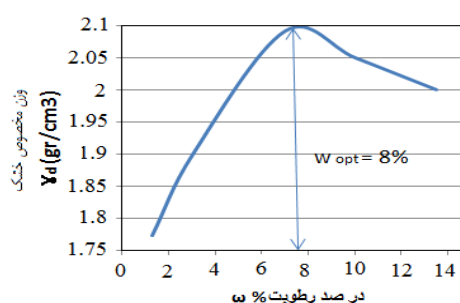


شکل ۴- دانه‌بندی خاک‌های استفاده شده در مدل‌ها
Figure 4- Drain, filter and crust classification of desert and laboratory compression

فاکتورهای تلاش برای تراکم برای رسیدن به پروکتور) مقدار از وزن خاک باقی مانده و در حجم مورد نظر جا داده نمی‌شود. با توجه به رابطه‌های ۲ و ۳ با بدست آوردن وزن جا داده شده به وزن کل، می‌توان درصد تراکم را محاسبه نمود (۱۵).

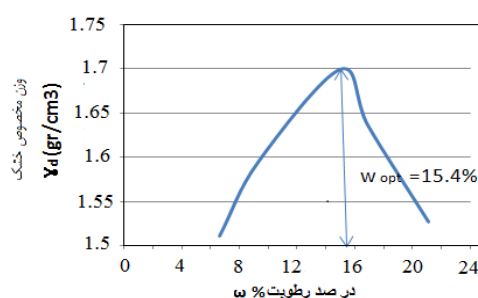
$$\gamma_{dmax} = \frac{W_s}{V} \Rightarrow W_s = \gamma_{dmax} \times V \quad (2)$$

$$R(\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \times 100 = \frac{\frac{W_s}{V}}{\frac{W_s}{V}} - \frac{W_s}{W_t} \times 100 \quad (3)$$



شکل ۵- رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک در خاک ۲۰ درصد ریزدانه

Figure 5- Dry density and Optimum damp of 20% fine.



شکل ۶- رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک در خاک ۶۰ درصد ریزدانه

Figure 6- Dry density and Optimum damp of 60% fine



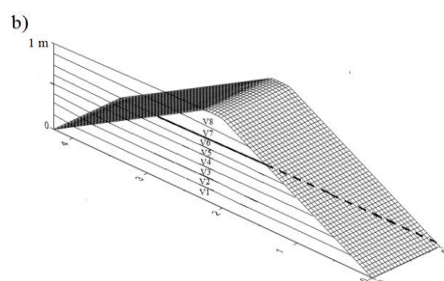
۲- آزمایش تراکم: در ساخت بدنه‌ی سدهای خاکی باید تراکم سد به حدی باشد که سد مقاومت لازم را در مقابل تنش‌های قایم و برشی حاصل از نیروی آب و همچنین نشت را داشته باشد. طبق نظر بر ام ج داس (۱۱) در صورتی که درصد تراکم نسبی خاک از ۸۵ درصد بیشتر باشد این خاک در محدوده‌ی خاک‌های بسیار متراکم تقسیم‌بندی می‌شود از این رو میزان تراکم نسبی برای مدل‌ها محاسبه شد که به صورت زیر به صورت مرحله به مرحله انجام گرفت.

$$R(\%) = \frac{\gamma}{\gamma_{max}} * 100 \quad (1)$$

γ : وزن مخصوص خاک در محل
 γ_{max} : وزن مخصوص ماکزیمم (پروکتور)

در این تحقیق برای این که مدل‌ها دارای تراکم قابل قبولی باشند، با استفاده از آزمایش پروکتور استاندارد برای نمونه‌های خاک ۲۰ و ۶۰ درصد ریزدانه رطوبت آنها محاسبه شد. نمودارهای وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه برای دو نوع خاک به صورت شکل (۵) و (۶) می‌باشد. لازم به ذکر است از خاک ۲۰ درصد ریزدانه برای ساخت پوسته و خاک ۶۰ درصد ریزدانه برای ساخت هسته استفاده شد.

بعد از بدست آوردن رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک خاک‌ها برای رسیدن به تراکم مورد نیاز بدین صورت عمل شد. ابتدا مقطع سد (شکل ۷-ب)) به دوزنقه‌ها مختلفی تقسیم‌بندی شد. با داشتن سطح این دوزنقه‌ها در عرض سد که همان ۰/۶ متر (عرض فلوم) بود حجم این قسمت‌ها بدست آورده شد. با داشتن وزن مخصوص خشک و حجم مورد نیاز خاک وزن خاک خشک محاسبه شد و با اضافه کردن رطوبت بهینه، خاک متراکم شد (با استفاده از چکش استاندارد- شکل ۷-الف). اگر این مقدار وزن مرطوب خاک در حجم مورد نظر جا داده شود وزن مخصوص فیلد با وزن مخصوص آزمایشگاهی (پروکتور) برابر می‌گردد که در این صورت تراکم نسبی صد درصد می‌شود. از آنجایی که در ساخت مدل‌ها امکان تراکم تا حد وزن مخصوص پروکتور وجود نداشته است، (به خاطر عدم وجود



شکل ۷- نمایی از خاکریز سد. الف) وسایل تراکم بدنه سد ب) تقسیم‌بندی بدنه سد

Figure7- Sketch of dam embankment; a) Soil compression instrument; b) Dam body fragmentation situation for compression layer respectively

جدول ۱- مشخصه‌های خاک‌های مورد استفاده

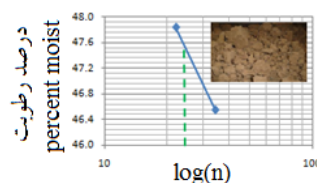
Table 1- Used soils specifications

Parameters پارامترها	Coarse درشت دانه	Core ریزدانه	Filter&drain فیلتر و زهکش
$\gamma_{dry} (KN/m^3)$ وزن مخصوص خشک	17.5	18.5	17.5
$\gamma_{sat} (KN/m^3)$ وزن مخصوص اشباع	19	20	19
$K_x (m/day)$ هدایت هیدرولیکی افقی	0.2	0.035	30
$K_y (m/day)$ هدایت هیدرولیکی قائم	0.2	0.035	30
$E_{ref} * 10^4 (KN/m^2)$ مدول الاستیسته	11	200	7
N عدد ثابت	0.35	0.3	0.3
$C_{ref} (KN/m^2)$ چسبندگی	1	2	1
$\Phi(phi)$ زاویه ایستایی خاک	40	35	45
$\Psi(psi)$ زاویه ساو	10	10	10

شهرکرد و منبع دوم خاک با بافت رسی موجود در محوطه دانشگاه بود. با توجه به این موضوع که کانی خاک رسی مورد استفاده باید از جنس کائولینیت به دلیل چسبندگی و تراکم‌پذیری بالا باشد. این دو میزان رس با هم ترکیب و حد روانی آنها با استفاده از دستگاه کاساگران تعیین شد که میزان رطوبت مربوط به ۲۵ ضربه آن با دستگاه کاساگرانده برابر با ۴۸ در صد بود که نشان می‌دهد این رس در محدوده حد روانی رس کائولینیت است. این خاک رس در استفاده از هسته‌های رسی کاربرد دارد (۶).

۳- مشخصه‌های خاک‌های مورد استفاده: مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد استفاده در جدول زیر است:

۴- نوع مصالح بدنه اصلی مدل: جنس پوسته‌ی سد خاکی غیرهمگن به منظور کاهش نفوذپذیری و جلوگیری از نشت زیاد آب از نوع SC (ماسه ورس) انتخاب شد. در این تحقیق برای تأمین رس از دو منبع خاک رسی استفاده شد یک منبع آن با توجه به این که رسوبات موجود در مخازن سدها دارای خاصیت کاملاً رسی‌اند از رسوبات جمع شده در مخزن سد پیر بلوط واقع در ۲۰ کیلومتری



clay	PL
Caolinit	35-100
Elite	55-120
Montmorionet	100-860

شکل ۸- تعیین حد روانی با استفاده از دستگاه کاساگران

Figure 8- Determination of clay soil via casagrand instrument

افتان و بار ثابت) برای دو نوع خاک صورت گرفت. آزمایش بار ثابت برای خاک ۲۰ درصد ریزدانه که در محدوده درشت‌دانه واقع است و آزمایش بار افتان برای خاک ریزدانه (۶۰ درصد ریزدانه) انجام شد. در نهایت با استفاده از روابط هدایت هیدرولیکی مشخص گردید که

۵- آزمایشگاه تعیین هدایت هیدرولیکی: در آزمایشگاه برای تعیین هدایت هیدرولیکی، دو نوع خاک ابتدا به تراکم مناسب (در وزن مخصوص پروکتور) کوبیده شد و به حداکثر تراکم آزمایشگاهی رسید. سپس نمونه‌ها در خود قالب تحت آزمایشات هدایت هیدرولیکی (با

$\frac{Q_b}{Q_t}$ با فرض این که دبی ورودی به محیط متخلخل و دبی خروجی به برابر باشد می‌توان تأثیر این عدد را حذف نمود. اشباع شدن سد و در نهایت ثابت شدن دبی خروجی این موضوع را اثبات می‌کند. لازم به ذکر است در کلیه آزمایشات دبی برداشتی به مقدار ثابتی می‌رسد. پس اعدادی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند، می‌توان از اعداد $\frac{\Delta h}{H}, \frac{a}{H}, \frac{k_2}{k_1}, \frac{h_2}{H}$ استفاده نمود. برای بدست آوردن ارتفاع فیلتر بهینه با توجه به مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری آزمایشاتی طرح‌ریزی شد که به صورت زیر می‌باشد.

۷- آزمایشات مدل‌ها: در تحقیق انجام شده از سه مدل اجرایی استفاده شد. مدل اول شامل دو جنس خاک ریزدانه و درشت‌دانه بود که از تاج سد تا بالادست خاک درشت‌دانه و از تاج سد تا پایین‌دست خاک ریزدانه استفاده گردید (شکل ۹). مدل دوم شامل سه قسمت می‌باشد ضخامت هسته رسی قایم به اندازه‌ی یک هفتم قاعده سد انتخاب شد و دو طرف آن خاک درشت‌دانه خاکریزی شد (شکل ۱۰). مدل سوم همانند مدل دوم با تفاوت ضخامت هسته رسی به میزان یک دهم قاعده سد ساخته شد (شکل ۱۱). علت بکارگیری مدل دوم و سوم بررسی تأثیر این ضخامت بر خط نشت آزاد در بدنه‌ی سد می‌باشد. در این مدل سه آزمایش بدون زهکش انجام گردیده شد. در مدل دوم آزمایشات همانند مدل یک، برای ماکزیمم ارتفاع آب در مخزن با $\frac{a}{L} = \frac{1}{7}$ انجام گرفت. دبی حجمی نشت، اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی تعبیه شده خط نشت ترسیم گردیده شد. در مدل سوم آزمایشات همانند مدل یک برای ماکزیمم با تعدا سه فیلتر با $\frac{a}{L} = \frac{1}{10}$ انجام گرفت. همچنین با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی تعبیه شده خط نشت این مدل نیز ترسیم گردیده شد.



شکل ۱۱- مدل سوم
 Figure 11- The third model



شکل ۱۰- مدل دوم
 Figure 10- The second model



شکل ۹- مدل اول
 Figure 9- The first model

برداشت و بررسی داده‌های حاصل از آزمایشات، مدل‌سازی در نرم‌افزار PLXIS انجام گردید. در ابتدا باید یک مدل هندسی از مقطع سد ایجاد گردد که برای این کار بر اساس مقطع اجرایی مدل آزمایشگاهی

هدایت $k_1=0.2\text{m/day}$ بدست آمد. $k_2=0.035\text{m/day}$

هیدرولیکی پوسته سد و k_2 هدایت هیدرولیکی هست سد می‌باشد. ۶- آنالیز ابعادی: در علم هیدرولیک همواره از شبیه‌سازی مدل برای کاهش هزینه و... استفاده می‌گردد. به همین علت برای تحقیق حاضر آنالیز ابعادی برای تعیین اعداد بی بعد تأثیرگذار استفاده شد. با توجه به قضیه پی باکینگهام و در نظر پارامترهای تأثیرگذار بر نشت می‌توان اعدادی به صورت زیر داشت (۱۰).

$$(۴) \quad \frac{\Delta h}{H}, \frac{a}{H}, \frac{k_2}{k_1}, \frac{h_2}{H}, Dr, \frac{\rho V D_{50}}{\mu}, \frac{Q_b}{Q_t}$$

Δh : افت خط نشت در هسته رسی	H : ارتفاع آب در مخزن	a : ضخامت هسته رسی قایم
K_2 : هدایت هیدرولیکی پوسته	K_1 : هدایت هیدرولیکی هسته	h_2 : ارتفاع فیلتر
Dr : تراکم نسبی	V : سرعت در معادله دارسی	D_{50} : قطر متوسط خاک
Q_b : دبی نشت	Q_t : دبی ورودی	

با توجه به اعداد بی بعد در نظر گرفته شده در این تحقیق، می‌توان بعضی از اعداد صرفه نظر کرد. از جمله این اعداد، اعداد $Dr, \frac{\rho V D_{50}}{\mu}, \frac{Q_b}{Q_t}$ می‌باشند. با توجه به این که تراکم نسبی در مدل‌ها مقدار قابل قبولیست به طوری که معادله دارسی برقرار باشد، می‌توان با در نظر گرفتن و ایجاد تراکم نسبی قابل قبولی از این مقدار صرفه نظر کرد. همچنین عدد $\frac{\rho V D_{50}}{\mu}$ نمایان‌گر عدد رینولدز در محیط متخلل می‌باشد. با توجه به این موضوع که معادله دارسی برقرار است. از این فاکتور نیز برای بررسی صرفه نظر شد. همچنین در عدد

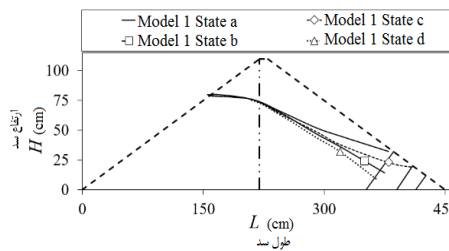
لازم به ذکر است، دبی نشت از بدنه‌ی سد خاکی از روش حجمی اندازه‌گیری از باکس تعبیه شده در انتهای فلولم اندازه‌گیری شد. ۸- تعریف مدل و تعیین شرایط اولیه و مرزی در نرم‌افزار: پس از

پس از انجام آزمایشات مدل آزمایشگاهی خط نشت با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی ترسیم شد. همچنین فشار پیزومتریک در ۳۰ پیزومتر در هنگام انجام آزمایشات اندازه‌گیری شد در ادامه این پارامترها در مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری مورد مقایسه آماری قرار داده شدند.

۱- خط نشت: خط نشت بدست آمده از مدل آزمایشگاهی سد خاکی غیرهمگن در زیر نشان داده شده است.

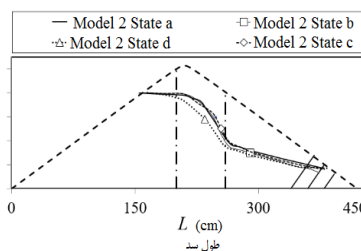
در فلو، مدل هندسی در برنامه PLXIS ایجاد شد. در مرحله دوم، ورود داده‌های مربوط به مصالح به کار رفته در بدنه سد در اولویت بود. لازم به ذکر است داده‌های مربوط به هدایت هیدرولیکی با استفاده از آزمایشات بار افتان و بار ثابت اندازه‌گیری شد و با مقایسه این مقادیر با جدول‌ها و روابط مختلف در نهایت مقدار قابل قبولی در نظر گرفته شد. در نهایت با ارایه مدل نرم‌افزاری همسان با مدل آزمایشگاهی آزمایشات مورد پیگیری قرار گرفت.

نتایج و بحث



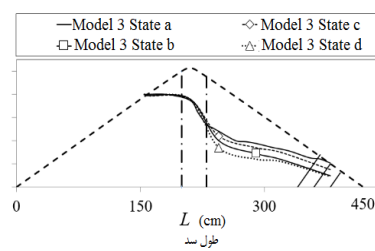
شکل ۱۲- مدل اول

Figure 12- The first model



شکل ۱۳- مدل دوم

Figure 13- The second model

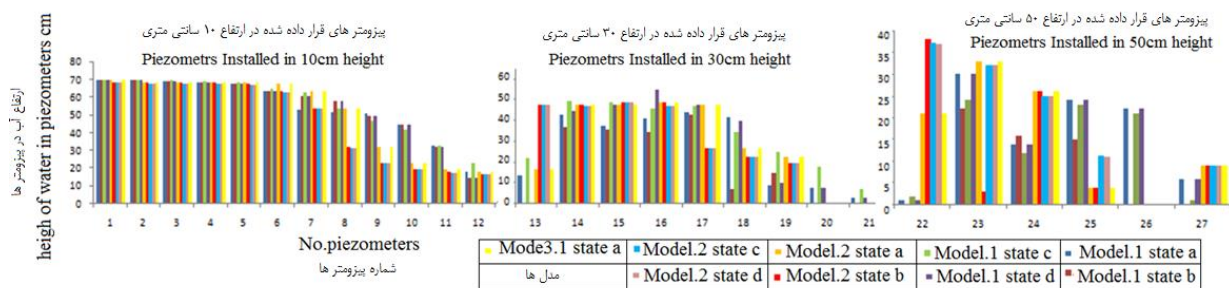


شکل ۱۴- مدل سوم

Figure 14- The third model

۲- بررسی داده‌های پیزومتری آزمایشگاهی و PLXIS با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS: ارتفاع آب در پیزومترها که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده‌اند به صورت شکل (۱۵) می‌باشد.

پس از برداشت خطوط نشت و فشار پیزومترها در آزمایش مدل مقایسه‌ی آماری بین مدل نرم‌افزاری و مدل آزمایشگاهی صورت گرفت. این مقایسات در دو قسمت، در زیر آورده شده است.



شکل ۱۵- سطح آب پیزومتریک در پیزومترها

Figure 15- Height of water in piezometers in three models

PLXES V8.5: با اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی پوسته و هسته سد خاکی با از آزمایش بار افتان و بار ثابت و استفاده از این مقادیر در مدل نرم‌افزاری مدل نرم‌افزاری با مدل‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار داده شد. شکل ۱۶ اجرای مدل‌های آزمایشگاهی را در نرم‌افزار PLXIS نشان می‌دهد. برای مقایسه مدل نرم‌افزاری با مدل آزمایشگاهی از ۲۰ نقطه خط نشت استفاده شد. با مقایسه ارتفاع خط نشت در این نقاط مدل آزمایشگاهی و مدل فزاری خطای موجود محاسبه شد.

با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS داده‌های فشار آب منفذی در مدل نرم‌افزاری و همچنین پیزومترهای تعبیه شده در فلو، آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار داده شد و آزمون آماری P-value انجام شد.

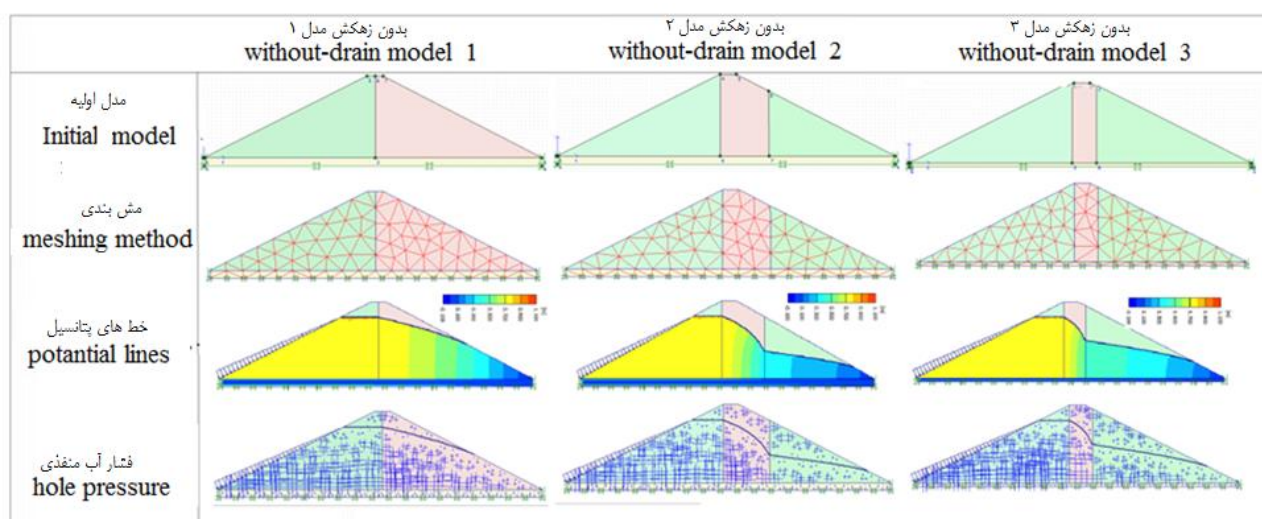
بر این اساس در سطح اعتماد ۹۰ تا ۹۸ درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همچنین مقداری خطای ریشه‌ی میانگین مربعات RMSE، برای همه‌ی حالات محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

۳- مقایسه خط نشت آزمایشگاهی مدل غیرهمگن با مدل نرم‌افزاری

جدول ۲- مقایسه‌ی داده‌های فشار آب منفذی با داده‌های پیزومتریک

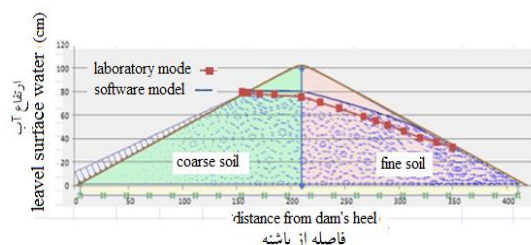
Table 2- Comparison of measured piezometers in laboratory and obtained piezometer pressure rate from software

مدل Model	1	2	3
P-value	0.03	0.095	0.062
آزمون (%) R^2	97	91	94
سطح اعتماد RMSE	0.561	0.424	0.475
مجموع مربعات خطاها			



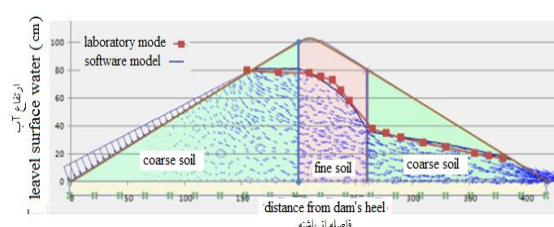
شکل ۱۶- ایجاد شرایط اولیه در مدل نرم‌افزاری PLXIS برای مدل یک و دو و سه برای حالت بدون زهکش

Figure 16- Steps of modeling in PLXIS software model for models no. 1, 2 & 3 in without-drain situation



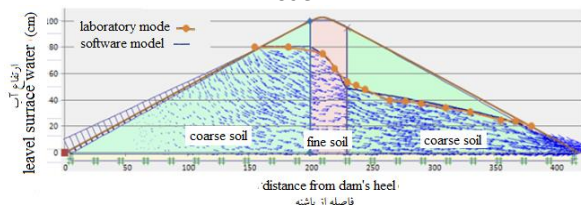
شکل ۱۷- مقایسه مدل ۱ آزمایشگاهی و مدل PLXIS

Figure 17- Comparison of laboratory model with PLXIS model 1



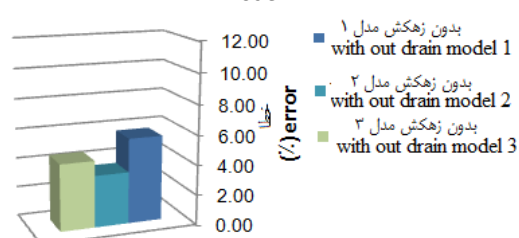
شکل ۱۸- مقایسه مدل ۲ آزمایشگاهی و مدل PLXIS

Figure 18- Comparison of laboratory model with PLXIS model 2



شکل ۱۹- مقایسه مدل ۳ آزمایشگاهی و مدل PLXIS

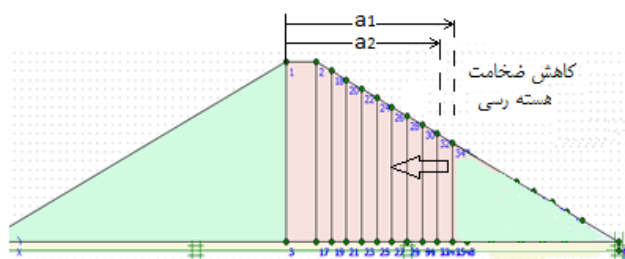
Figure 19- Comparison of laboratory model with PLXIS model 3



شکل ۲۰- خطای بین مدل نرم‌افزاری با آزمایشگاهی

Figure 20- Error between laboratory model and PLXIS model

شد. ابتدا مدلی همانند مدل‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار ترسیم شد. با وارد کردن پارامترهای مورد نیاز ضخامت هسته‌رسی با توجه به شکل ۲۱ تغییر داده شد. با ران کردن نرم‌افزار محل برخورد خط نشت با فصل مشترک پایین دست هسته رسی قایم این ارتفاع برداشت شد. با تغییر دادن مقدار هدایت هیدرولیکی پوسته و هسته (شکل ۲۲) این مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری پیگیری شد. با استفاده از بی بعد کردن مقدار افت در هسته رسی و همچنین نرمالیزه کردن دیگر پارامترها به ازای نسبت هدایت هیدرولیکی هسته به پوسته سد خاکی و ارتفاع آب در مخزن بالا، میزان افت در هسته رسی قایم به ازای ضخامت‌های مختلف تعیین شد. در ادامه ارتفاع فیلتر پیشنهادی که در شکل ۲۲ نمایش داده شده است، با بدست آوردن ارتفاع خط نشت در فصل مشترک پایین دست هسته رسی و پوسته سد ارتفاع فیلتر پیشنهاد می‌گردد. این مورد در بخش ۵ و ۶ نتایج و بحث ارایه شده است.



شکل ۲۱- نحوه‌ی زون‌بندی برای سعی و خطا کردن
Figure 21- Changing the thickness of the clay core as shown in software model

مدل به ازای ضخامت مختلف هسته رسی و نسبت هدایت هیدرولیکی‌ها مختلف) بدست آمد. ارتفاع فیلتر پیشنهادی با ضریب اطمینان ۱/۲ ارایه شد. این ارتفاع در شکل ۲۴ با توجه به ضخامت هسته رسی و نسبت هدایت هیدرولیکی ارایه شده است

نتیجه‌گیری

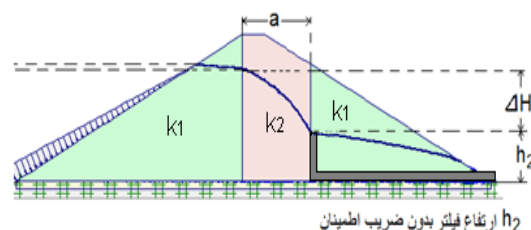
با توجه به موارد گفته شده از این تحقیق نتایج زیر قابل استحصال است.

۱- در برآورد ابعاد فیلتر در سدهای خاکی با هسته رسی قایم، پارامتر هدایت هیدرولیکی هسته به پوسته از اهمیت فراوانی برخوردار است با کاهش این مقدار از ۰/۰۰۲، ضخامت هسته رسی بر افت خط نشت در هسته‌ی رسی تأثیر کمتری پیدا خواهد کرد. این نتیجه به این خاطر است که با کم شدن این مقدار شکست خط نشت در فصل مشترک دو خاکر به ماکزیمم مقدار خود خواهد رسید. و اگر این مقدار باز کمتر شود خط نشت به صورت نفوذ قایم وارد هسته رسی می‌گردد.

در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مقایسه بین خط نشت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری و همچنین خطای آنها در شکل ۲۰ ارائه شده است.

مقایسه بین مدل آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده از مدل نرم‌افزاری PLXIS نشان داد، مقایسه بین فشار آب منفذی و فشار آب در پیژومترها با استفاده از آزمون آماری P-value دارای سطح اعتماد بالایی می‌باشد. که در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد. همچنین خطای بین خط نشت برداشتی در آزمایشگاه و خط نشت مدل نرم‌افزاری همان طور که در شکل (۲۰) مشخص شده است دارای خطای در حدود ۵ درصد است. با در نظر گرفتن این موارد می‌توان ادامه مطالعات را با استفاده از واسنجی بین مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری پیگیری کرد.

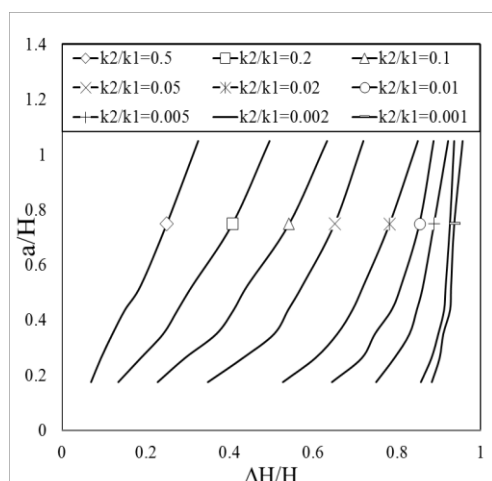
۴- استفاده از نرم‌افزار برای مدل‌ها: در ادامه تحقیق برای تعیین ارتفاع بهینه در سدهای رسی با هسته قایم از مدل نرم‌افزاری استفاده



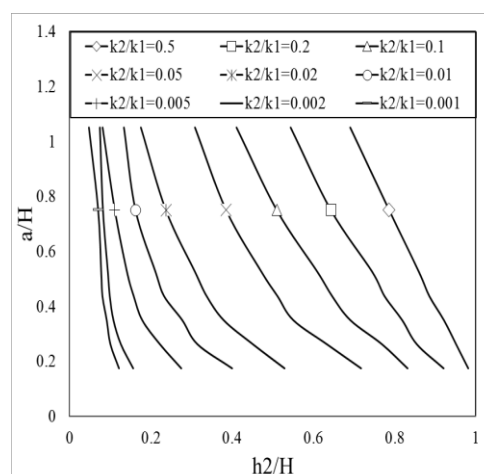
شکل ۲۲- نمایش پارامترهای مورد استفاده
Figure 22- Input parameters

۵- بدست آوردن میزان افت در خاک ریزدانه با استفاده از مدل نرم‌افزاری: با توجه به میزان افت سطح آب در خاک ریزدانه در داده‌های نرم‌افزاری، شکل ۲۳ ترسیم شد. این شکل میزان افت خط نشت را نسبت به ضخامت هسته رسی قایم برای هدایت هیدرولیکی‌ها مختلف نمایش می‌دهد. این نتیجه برداشت می‌گردد که هنگامی که $\frac{k_2}{k_1} \leq 0.002$ گردد دیگر ضخامت لایه ریز دانه بر افت کم می‌گردد.

۶- تعیین میزان ارتفاع فیلتر پیشنهادی با استفاده از مدل نرم‌افزاری: با داشتن خط نشت حاصله از مدل نرم‌افزاری در فصل مشترک پایین دست هسته و پوسته سد خاکی با هسته‌ی قایم، می‌توان محل برخورد خط نشت در خاک پوسته سدهای خاکی با هسته رسی قایم را پیش‌بینی نمود. با پیش‌بینی این مقدار از نرم‌افزار ارتفاع پیشنهادی فیلتری ارایه شد. به ازای اعمال و ساخت این فیلتر در پایین دست هسته رسی همواره به ازای ماکزیمم ارتفاع آب در مخزن سد خط نشت با نقطه‌ی بالایی فیلتر تماس پیدا خواهد کرد. این مورد باعث جلوگیری از بوجود آمدن پدیده پایپینگ در این نقطه می‌گردد. با داشتن این مقادیر که از مدل نرم‌افزاری (ران کردن ۲۷۰



شکل ۲۳- تأثیر ضخامت و نسبت هدایت هیدرولیکی‌ها بر افت در درشت‌دانه
Figure 23- Effect of thickness the clay and hydraulic conductivity on decline in water level



شکل ۲۴- تعیین ارتفاع فیلتر
Figure 24- Determinate of filter height

مدل قابل قبولی برای حل مسایل نشت می‌باشد و برای طراحی‌های مهندسی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۲- نتایج نشان داد که در به ازای یک مقدار $\frac{k_2}{k_1}$ با افزایش ضخامت هسته رسی از ارتفاع فیلتر پایین دست کاسته می‌گردد.
۳- با توجه به مقایسه آماری بین مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های نرم‌افزاری نتیجه‌گیری می‌گردد که مدل نرم‌افزاری PLXIS

منابع

- 1- Arulanandan K., Edward B., and Perry M. 1983. Members, Erosion in Relation to Filter Design Criterion in Earth Dams. J. Geotech. Engrg. 109:682-698.
- 2- Ching S., and Chang M. 1987. Boundary Element Method in Drawdown Seepage Analysis for Earth Dams. J. Comput. Civ. Eng. 1:83-98.
- 3- Eskorchi A. M. 2006. Soil Mechanic Laboratory. Third publish. Tehran University Publication. Tehran.
- 4- Karbar H., and Soroosh A. 2012. Numerical Comparing Behaviors Core dam with Vertical Core and Middle Slop Core. Journal of Civil engineering. (in Persian with English abstract)
- 5- Khor C., and Woo H. K. 1989. Investigation of Crushed Rock Filters for Dam Embankment. J. Geotech. Engrg. 115: 399-412.
- 6- Kharaghani S. 2005. Earth dam engineering. Shahid Chamran University Publication. Ahvaz.
- 7- Mishra G. C., and Singh A. K. 2005. Seepage through a Levee. International journal of geomechanics, ASCE 5:74-79.
- 8- Najafpoor Khoyegani N. 2013. Investigation Seepage Pattern in Earth Dam on Impermeable Base with and without Toe Drain by using physical Models. Agriculture Department. Shahrekord University.
- 9- Rahimi H. 2006. Earth Dam. Second Publish. Tehran University Publication. Tehran.
- 10- Shafahi Bajestani M. 2005. Hydraulic and Physical models. Second Publish. Shahid Chamran University Publication. Ahvaz.
- 11- Tahoni Sh. 2006. Implementation Principles in Earth Dam. 13th Publish. Thehran Pars Aien Institution. Tehran.
- 12- Terzaghi K. 1992. Der Grundbriich an Staveverken und Seine Verbutung. Die Wasser-Kraft, Vol. 17, 1922, pp. 445-449.
- 13- Terzaghi K. 1925. Erdbaumechnik auf Borden physikalischev, Grundlage, Devticke, Vienna, Australia, 1925.
- 14- Timothy D., Jafari N. H., Zhindon S. L., and Baghdagy A. 2016. Unsaturated and Transient Seepage Analysis of San Luis Dam J. Geotech. Geoenviron. Eng., 04016093.
- 15- Vafaeian M. 2006. Impalement Information for Earth Dam. Second Publish. Ardakan Knowledge Publication. Isfahan.
- 16- Yea G.G., Kim H. T., and Kim J. H. R. 2013. Rehabilitation of the Core Zone of an Earth-Fill Dam. J. Perform. Constr. Facil. 27: 485-495.

Determine the Height of the Vertical Filter for Inhomogeneous Dams with Vertical Clay Core

S. Salehi¹ - K. Esmaili^{2*}

Received: 17-11-2015

Accepted: 12-11-2017

Introduction: Today, always some occurrences threaten the earth. One of the most important of this event is seepage from earth dam. It can wash interior body of earth dam that finally might ruin whole the earth dam. For investigating these events in this research some experiments for expressing some alternatives to solve this problem in earth dam with clay core were investigated. In first step has been introduced new design in earth dam that it includes earth dam with clay core.

Materials and Methods: In order to determine the height of the filter after the vertical clay core in non-homogeneous earth dam, 3 experimental model with length 2/4 meter and a height of one meter and Body slope 1H: 2V was prepared. This model made in Shahrekord University. In flume that has 0.6 meter with, 6-meter length and 1-meter height. This flume has a drain in downstream which determine the discharge through earth dam. Front of flume made glass for visual inspection and behind flume made by steel sheet that was welded. Also, for embankment model, two types of fine-grained and coarse-grained soils were used that determine the range of hydraulic conductivity of soils was performed with Using aggregation experiments model and Soil Mechanics hydrometer. For embankment model use layer have 0.1 meter height and this layer was impacted after an after. Finally, dam was built. The slope of models was elected in reference that had normal range and had economical cases. In the first downstream the dam crest was used fine-grained soil and upstream of the dam crest was used coarse-grained soil finally experiment done. In models 2 and 3 with cutting fine grained soil from the toe of the dam to the dam crest vertical clay core was created. The parameter a/L was introduced. a is thickness of clay core and L is the Length base of the dam although in the second model $\frac{1}{7} = \frac{a}{L}$ and the third model $\frac{a}{L} = \frac{1}{10}$ was selected. Level of water in pound was performed in 3 water height 80 and 55 and 30 and in 3 level of water determinate pressure with 30 embedded piezometers and this data was used in method model .as well as phreatic line was determinate by using of wells and 30 embedded piezometers in the model. Seven holes were instated in body of earth dam in 3 models for visual inspection of phreatic line. In 3 model of earth dam decline clay core in laboratory for show this effect in discharge and phreatic line use Method model. Then the rates of decline in clay core in the laboratory with modeling in software PLAXIS V8.5 were compared. The rate of high filter after the clay core with safety factor 1.2 (Encounter Line Leak with 20% of the bottom filter) was introduced. Finally use SAS software to compare the result of data in filth and software after that comparing show can use software for continue the experiment with Method Model. With change the permeability in PLXIS V8.5 modeling another state. Permeability, this modeling showed that tackiness and permeability of vertical core soil effect in height of vertical filter in downstream. So, can decline this case with choose non-permeability in core. That show in result of this paper. With the class of soil and permeability and change the tackiness of core can estimate height of filter in downstream.

Results and Discussion: Finally, Analysis and comparison between water Failure in interface of fine-grained and coarse-grained soils, both of Software model and laboratory model have a relatively well fit. To obtain the height of Suggested filter, the software model was used to simulate the experiments and Subtracting the thickness of the fine-grained. By applying safety factor of 1.2, Height was designed to filter and after that the clay core was introduced. Software model results show that by increasing clay core thickness the angle of broken-seepage line is increased. Also, the experimental model can emphasize this matter. Finally, by using vertical clay core against the clay core with slop can improve the application of earth dam and by using his plan can improve and diminish the seepage from the earth dam body that this design process was expressed in this research.

Keywords: Height Filter, Model of non-homogeneous earth dam, Software PLAXIS V8.5, Thickness of the clay core

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Water and Science Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: esmail@um.ac.ir)