

Discharge Capacity of Earth Dams Toe Drain with and without Clay Core

SOBHAN MORADI¹, SAEED SALEHI¹, KAZEM ESMAILI¹

1. Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

(Received: July. 6, 2020- Revised: Sep. 6, 2020- Accepted: Sep. 21, 2020)

ABSTRACT

The objective of this study was to reduce the hydraulic gradient and consequently to weak the piping phenomenon. For this purpose, various models of geometric dimensions and hydraulic performance of clay core and toe drainage in earthen dams were investigated. Therefore, by using experimental modeling in both homogeneous and heterogeneous states, the seepage rate and the ferritic level in the earthen dam body with water level readings in seven observation wells and piezometric pressure measurement in 30 piezometers installed on the channel wall have been examined. Accordingly, three dimensionless ratios p/h with three heights (0.12, 0.20 and 0.28 m) at different angles (45, 60 and 90 degrees) were chosen to evaluate the performance and provide the optimal index P/h in the toes drainage design of earthen dams. Then the results of PLAXIS numerical model were validated by experimental data through calibration parameter and P-VALUE and RMSE statistical tests. The results showed that the optimal geometric dimensions of toe drainage due to direct relationship of reservoir water level with the position of the ferriatic line and its exit from the lower slope of homogeneous and heterogeneous earth dams are directly related to hydraulic conductivity and water level in the reservoir. In heterogeneous earthen dams, these values are inversely related to the thickness of the clay core. By comparing and using regression analysis, an equation was proposed to predict the drain height of the homogeneous dam, which is more accurate for larger values of P/h . Finally, the toe drainage size of homogeneous earth dam with an angle of 45 degrees and index of $P/h = 0.35$ and in heterogeneous state, the angle of 45 degrees with index of $P/h = 0.25$ have been reported as the optimal state.

Keywords: Homogeneous Earth Dam, Toe Drainage Geometry, Seepage Line, Plaxis.

ظرفیت تخلیه زهکش پنجه سدهای خاکی با و بدون هسته رسی

سبحان مرادی^۱، سعید صالحی^۱، کاظم اسماعیلی^{۱*}

۱. گروه علوم و مهندسی آب - سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۶/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۳۱)

چکیده

پژوهش حاضر با هدف کاهش گرادیان هیدرولیکی و در نهایت تضعیف پدیده پاپینگ، به بررسی مدل های مختلفی از ابعاد هندسی و عملکرد هیدرولیکی هسته رسی و زهکش پنجه در سدهای خاکی پرداخته است. از این رو، با مدل سازی آزمایشگاهی در دو حالت همگن و ناهمگن، میزان دبی نشت و سطح تراز فریاتیک در بدنه سد خاکی با قرائت تراز آب در ۷ حلقه چاهک مشاهداتی و اندازه گیری فشار پیزومتریک در ۳۰ پیزومتر نصب شده بر روی دیواره کانال، مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، سه نسبت بی بعد P/h با سه ارتفاع (۰/۱۲، ۰/۲۰ و ۰/۲۸ متر) در زوایای مختلف (۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) برای بررسی عملکرد و ارائه ی شاخص بهینه ی P/h در طراحی زهکش پنجه سدهای خاکی انتخاب گردید. سپس نتایج حاصل از مدل عددی PLAXIS، به واسطه پارامتر کالیبراسیون و آزمون آماری P-Value و RMSE با مدل های آزمایشگاهی صحت سنجی شد. نتایج نشان داد ابعاد هندسی مطلوب زهکش پنجه به دلیل ارتباط مستقیم تراز آب مخزن با موقعیت خط فریاتیک و محل خروج آن از شیب پایین دست سدهای خاکی همگن و ناهمگن مستقیماً با هدایت هیدرولیکی و ارتفاع سطح آب در مخزن سد ارتباط دارد. همچنین نتایج نشان داد که در سدهای خاکی ناهمگن، این مقادیر با ضخامت هسته رسی رابطه معکوس دارد. با مقایسه و استفاده از تحلیل رگرسیون، معادله ای برای پیش بینی ارتفاع زهکش پنجه سد همگن ارائه شد که به ازای مقادیر P/h بزرگتر، دارای دقت بیشتری می باشد. در نهایت، اندازه زهکش پنجه سد خاکی همگن با زاویه ۴۵ درجه و شاخص $P/h = 0.35$ و در حالت ناهمگن، زاویه ۴۵ درجه با شاخص $P/h = 0.25$ به عنوان بهینه ترین حالت گزارش شده است.

واژه های کلیدی: سد خاکی همگن، هندسه زهکش پنجه، خط نشت، Plaxis.

مقدمه

ساخت سدهای خاکی همواره در ذخیره آب آشامیدنی، کشاورزی، گردشگری و صنعت کاربردهای فراوانی داشته است. اما عواملی همچون اشباع بدنه، جوشیدن از پی، روگذری، پاپینگ و سایر پدیده ها می توانند سبب تخریب خاگریز سد شوند. در راستای کنترل عوامل مخرب، تاکنون راهکارهای زیادی همچون طراحی زهکش، دیوار آبنند و یا ناهمگنی در بدنه سد خاکی ارائه شده است. به طوری که در حالت بدنه ناهمگن سد، هسته رسی با نفوذپذیری کم برای کاهش میزان نشت به پایین دست پیشنهاد گردید. اما به دلیل هزینه بالای اجرا، همواره با ضخامت نسبی کم در طراحی پیشنهاد می شود. می دانیم حرکت ثقلی و روبه پایین جریان در پوسته پایین دست با ایجاد حفره (پدیده پاپینگ) سبب بی ثباتی سازه می شود. از این رو؛ برای جلوگیری از انقطاع خط فریاتیک نشت با پوسته پایین دست و انحراف جریان نشتی به حوضچه پمپاژ، زهکش پنجه یا زهکش افقی با ابعاد هندسی و

دانه بندی تعریف شده ای در پوسته پایین دست در نظر گرفته می شود.

تحقیقات قابل توجهی برای بهبود عملکرد زهکش ها در بدنه سد خاکی انجام شده است. به طوری که قوانین نشت داری در سدهای هسته دار و زهکشی شده از لحاظ نظریه کوزنی، ترزاقی، کاساگرانده و پاولوفسکی مورد مطالعه قرار گرفته است. جدیدترین پژوهش ها در مورد نشت از بدنه سدهای خاکی، به کمک مدل های عددی (CFD, FDM, BEM, FEM) اجازه می دهد تا حالت پایدار و گذرا را در شرایط اشباعیت و ناهمگنی بدنه سد در نظر بگیریم (Darbandi et al.; Borja and Kishnani, 1991; Ouria; Liggett and Liu, 1979; Fukuchi, 2018; al., 2007; Tayfur et al., 2005; and Toufigh, 2009). سرعت جریان ورودی در قسمت بالادست یک زهکش پنجه یا پتوی زهکشی کف از نظر تئوری نامحدود است (Pavlovsky, 1931). عملکرد پتوی زهکشی کف به دلیل ورود ذرات ریزدانه خاک پی همیشه در معرض تضعیف بوده و نصب مجدد آن به دلیل موقعیت غیرقابل

گرا دیان هیدرولیکی مناسب و نابرابر با تراز سطح آب پیژومتری در فیلتر است. بنابراین تحلیل انجام شده به واسطه FEM نتیجه دقیق تری را ارائه می دهد. (Akhtarpour and Salari (2017) با استفاده از نرم افزار Plaxis و مدل رفتاری پلاستیک سخت شونده مقادیر فشار آب منفذی و تنش های کل در هسته سد سنگریزه ای مسجد سلیمان را برای زمان ساخت و اولین آگیری محاسبه و با مقادیر حاصل از ابزار دقیق مقایسه کردند. نتایج نشان داد، آگیری اولیه علیرغم افزایش چشمگیری در فشار آب منفذی پوسته بالادست سبب افزایش ناچیزی در پوسته پایین دست هسته گردید، که نشان از عملکرد خوب هسته در تقلیل تراز فریاتیک جریان دارد. (Yea et al. (2013) با استفاده از چاهک های مشاهداتی نصب شده در بدنه سد خاکی، به بررسی رفتار هسته ی رسی و همچنین نشت از بدنه پرداختند. آن ها نشان دادند که زمان بارندگی و پر شدن مخزن، نشت از بدنه سد سبب جابجایی بدنه به سمت پوسته پایین دست می شود. (Stark et al., (2017) نشت از فیلتر در بدنه سد خاکی ناهمگن را به هنگام اشباع بودن خاک مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از نرم افزار seep-w در هنگام تخلیه ی مخزن، دبی نشت و موقعیت خط خزش حاصل از نشست در حالت غیراشباع مدل سازی شد. نهایتاً با ارزیابی عملکرد فیلتر در بالادست هسته رسی، نشان داده شد که قسمت انتهایی فیلترها بیشترین گرا دیان هیدرولیکی را متحمل می شوند و امکان خرابی حاصل از پاپینگ در این مناطق به مراتب بیشتر از دیگر نواحی سد می باشد.

مطابق پیشینه پژوهش انجام شده، در ساخت سدهای خاکی با هسته ی رسی عموماً برای خارج کردن زه آب، پایین آوردن فشار آب منفذی و جلوگیری از پدیده پاپینگ در بدنه سد از زهکش پنجه در پوسته پایین دست استفاده می شود. طراحی و ساخت زهکش پنجه با ارتفاع و شیب مناسب در زمان ساخت سد به دلیل حساسیت بالا، امری ضروری است که به خودی خود سبب کاهش هزینه های ساخت سد می گردد. از این رو با توجه به اینکه مطالعه ی جامعی در این حیطه صورت نگرفته، زمینه ای برای تحقیق در مورد ابعاد هندسی زهکش پنجه مورد نیاز در این نوع سدهای خاکی فراهم شده است. پژوهش حاضر با هدف ارائه استاندارد طراحی زهکش پنجه با توجه به جنس سازند خاکی سد، به تعمیم نتایج بدست آمده از داده های مدل آزمایشگاهی با مدل نرم افزاری پرداخته است.

مواد و روش ها

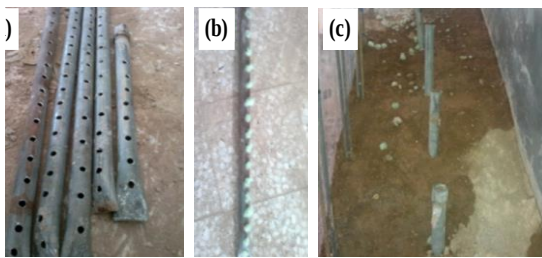
تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش ها در کانالی به مشخصات طول ۶ متر، عرض ۰/۶ متر و

دسترس تقریباً غیرممکن است. این در حالی که موقعیت مکانی زهکش پنجه در دسترس می باشد و در صورت لزوم قابل اصلاح است (Sherard, 1963). (Creager et al., (1944) در مطالعه آزمایشگاهی، ارتفاع زهکش پنجه را به عنوان موثرترین پارامتر در میزان تخلیه گزارش کردند. به طوری که ارتفاع زهکش پنجه در بازه ۲۵ تا ۳۵ درصد ارتفاع سد خاکی را بهینه ترین مقدار بیان کردند. همچنین تراز ارتفاعی خط نشت فریاتیک در پوسته پایین دست یک سد خاکی بدون زهکش پنجه را به عنوان معیاری برای تعیین بازه ارتفاع زهکش پنجه معرفی کردند. خط فریاتیک در بدنه سد دارای سه ناحیه عبور است: ۱. جریان در پوسته بالادست ۲. جریان در هسته رسی ۳. جریان در پوسته پایین دست (Wu et al., 2013).

بسیاری از محققان روش های تقریبی را بر اساس فرضیات دوپویی برای تعیین خط نشت در موقعیت های مختلف پای آب ارائه کردند. این در حالی است که (Kozeny (1931) با پیشنهاد توابع تحلیلی برای چندین مسئله در جریان دو بعدی، بیان داشت که هر تابع تحلیلی با استفاده از معادله لاپلاس، موقعیت مکانی خطوط جریان و پتانسیل را پیش بینی خواهد کرد. اگر شرایط مرزی مخزن با مکان خط هم پتانسیل برابر باشد، تابع تحلیلی یک راه حل دقیق برای مسائل نشت است. (Mishra and Parida, (2006) با توجه به موارد متعددی از تخریب سدهای خاکی همگن و ناهمگن، ضخامت هسته رسی و هدایت هیدرولیکی بدنه ی سد را در تعیین معیارهای طراحی شامل؛ ارتفاع و زاویه زهکش در پنجه سد، مؤثر دانستند. (Strzelecki and Kostecki, (2008) با بررسی نشت از بدنه یک سد خاکی در هنگام ساخت با پی نفوذناپذیر، تغییر شکل و ایجاد تنش ناشی از ادغام را ناچیز گزارش کردند. (Kasim and Fei, (2002) با شبیه سازی رفتار نفوذپذیری جریان در بدنه سد خاکی با استفاده از نرم افزار SEEP/W و مدل FEM (روش اجزاء محدود) سه حالت در نظر گرفته شد: برای حالت اول و دوم؛ آنالیز پارامتری و نشت بر روی بدنه یک سد خاکی همگن با هدایت هیدرولیک ثابت. و حالت سوم نیز بر اساس پارامترهای خاک مانند توزیع اندازه ذرات، رطوبت خاک، تراکم خاک خشک، هدایت هیدرولیکی متغیر فرض شده است. همچنین، محاسبات برای هر ناحیه با سه تراز آب مخزن انجام گردید. (Singh (2008) پدیده نشت در یک سد خاکی همگن به همراه فیلتر پاشنه افقی را با استفاده از مدل FEM مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان داد که فشار پیژومتری در تجزیه و تحلیل عددی فیلتر، روند کاهشی دارد، این در حالی است که خط پتانسیل در فیلتر برخلاف واقع صفر گزارش شده و این مطلب صحیح نمی باشد. بدیهی است که جریان در فیلتر با

بر اساس استاندارد USBR سوراخ‌هایی مورب به قطر ۳ میلی‌متر با فواصل ۲/۵ سانتی‌متر از یکدیگر در قسمت فوقانی جعبه زهکش در نظر گرفته شد (شکل ۱-ب). همچنین، برای بررسی و ترسیم روند خط نشست، ۷ حلقه چاهک مشاهداتی با لوله‌ی گالوانیزه به قطر ۵ سانتی‌متر و با سوراخ‌هایی به قطر ۱ سانتی‌متر در مدل‌های مورد آزمایش نصب گردید (شکل ۲).



شکل ۲- (a) لوله‌های سوراخ‌دار برای مدل‌سازی چاهک. (b) فیلتر پارچه ای ورودی (c) موقعیت نصب چاهک‌های مشاهداتی در بدنه سد

$$Rn'_p = Rn'_m \Rightarrow \left(\frac{\rho V D_{50}}{\mu} \right)_p = \left(\frac{\rho V D_{50}}{\mu} \right)_m \Rightarrow \frac{(D_{50})_p}{(D_{50})_m} = \frac{V_p}{V_m}$$

از طرفی در مدل و نمونه اصلی، جریان داری برقرار است.

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{(ki)_p}{(ki)_m} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در اینجا با برقراری برابری بین مقیاس مدل و نمونه اصلی داریم:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} \quad (\text{رابطه ۳})$$

همچنین باید توجه داشت که در معادله داری، مقیاس گرادین هیدرولیکی برابر است با:

$$\frac{i_p}{i_m} = \frac{\left(\frac{h}{L} \right)_p}{\left(\frac{h}{L} \right)_m} = \frac{h_p L_m}{h_m L_p} = \frac{L_r}{L_r} = 1 \quad (\text{رابطه ۴})$$

با توجه به روابط بالا می‌توان بیان نمود:

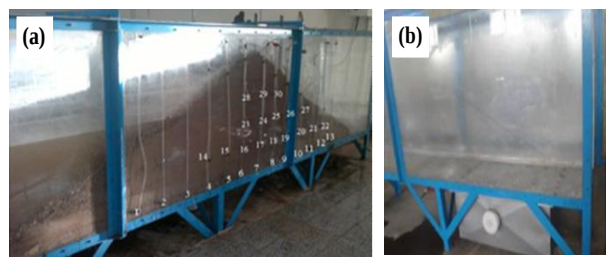
$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{(D_{50})_p}{(D_{50})_m} = \frac{k_p}{k_m} \quad (\text{رابطه ۵})$$

رابطه (۵) بدین معناست که نسبت سرعت، قطر متوسط و هدایت هیدرولیکی از مقیاس فیزیکی نمونه اصلی با توان یک تبعیت می‌کند. از رو اگر بین نمونه اصلی و مدل آزمایشگاهی معادله دبی داری در نظر گرفته شود:

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{(V)_p A_p}{(V)_m A_m} = L_r^3 \quad (\text{رابطه ۶})$$

رابطه (۶) بدین صورت است که برای تبدیل دبی

ارتفاع ۱/۲ متر انجام شد. برای اندازه‌گیری فشار آب منفذی، متاثر از نشست آب در بدنه سد خاکی، ۳۰ عدد پیزومتر به صورت شبکه-بندی شده در مقطع طولی سد (از وسط تا تراز صفر پوسته شیب-دار پایین‌دست) بر روی دیواره پلکسی گلاس تعبیه گردید (شکل ۱-ا). به منظور برآورد دبی نشست از بدنه سد خاکی به روش حجمی، جعبه‌ای به حجم ۰/۲ مترمکعب در قسمت زیرین کف‌بند کانال نصب شده است. برای ورود آب از کانال به جعبه زهکشی،



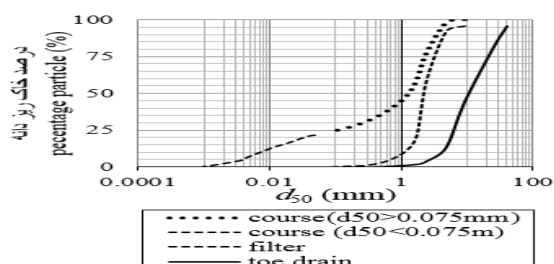
شکل ۳- (a) کانال آزمایش به همراه موقعیت پیزومترها در شرایط خاکریز سد ناهمگن با هسته عمودی. (b) جعبه زهکشی

مدل‌سازی سد خاکی

در این مطالعه از دو مدل سد خاکی همگن و ناهمگن با پی نفوذناپذیر استفاده شده است. مدل‌سازی با ارتفاع ۱ متر، عرض پی ۴/۵ متر، طول ۰/۶ متر (عرض فلو) و شیب بدنه ۱H:۲V در بالادست و پایین‌دست صورت گرفت (شکل ۳). بدیهی است، نتایج حاصل از آزمایش در مدل‌های آزمایشگاهی بزرگ‌تر به مدل واقعی نزدیک‌تر خواهد بود. (Shafai-Bajestan and Albertson, 1993). به جهت اینکه نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی برای مدل‌های بزرگ نیز قابل استناد باشد، کلیه‌ی نتایج بر اساس عدد بی‌بعد P/h ارایه شده است. در مدل‌های آزمایشگاهی محیط متخلخل ۱ به خاطر وجود جریان آرام در بین خلل و فرج ذرات، نیروی‌های دخیل در پدیده نشست عملاً "نیروی لزجت و اینرسی می‌باشند. در اینجا می‌توان از نیروی وزن به خاطر عدم وجود سطح آزاد جریان در بدنه سد چشم پوشی کرد و با توجه به دخیل بودن نیروی اینرسی و لزجت سیال، عدد رینولدز به عنوان عدد بی‌بعد تاثیرگذار در این پدیده شناخته خواهد شد. باید توجه داشت، عدد رینولدز در مدل و نمونه اصلی با هم برابر خواهد بود. در اینجا می‌توان از عدد رینولدز ذره استفاده نمود. چرا که از یک طرف مفهوم عدد رینولدز جریان را در خود داشته و از طرفی بر پایه قطر متوسط ذرات نوشته می‌شود. لذا در رابطه زیر با در نظر گرفتن خصوصیات سیال در مدل و نمونه اصلی می‌توان نوشت:

(رابطه ۱)

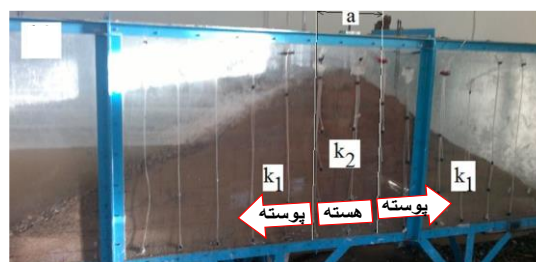
ساخت مدل، از آزمون الک استاندارد و برای مواد ریزدانه عبوری از الک با نمرة ۲۰۰ (ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر)، از روش هیدرومتری استفاده شد. نمودار دانه‌بندی قسمت‌های مختلف بدنه سد (پوسته، فیلتر و زهکش پنجه) در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- طبقه‌بندی پوسته خاکریز، زهکش پنجه و فیلتر در بدنه سد خاکی

توجه به رطوبت بهینه، خاک‌ها به روش پراکتور استاندارد به حداکثر تراکم آزمایشگاهی خود رسیدند. سپس هدایت هیدرولیکی نمونه خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب با روش بار افتان و بار ثابت تعیین شد. در نهایت با استفاده از روابط، هدایت هیدرولیکی نمونه خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳۵ متر در روز برآورد گردید. در همه مدل‌ها، هسته از خاک رس با هدایت هیدرولیکی k_2 و دو پوسته طرفین هسته سد با هدایت هیدرولیکی k_1 و همچنین مواد تشکیل دهنده زهکش پنجه با نفوذپذیری k_3 در نظر گرفته شد ($k_3 > k_1 > k_2$) (جدول ۱).

آزمایشگاهی به دبی واقعی لازم است مقیاس در نظر گرفته شد به توان سه رسیده و در مقدار دبی آزمایشگاهی ضرب گردد تا دبی در نمونه واقعی سد محاسبه شود. در این روابط اندیس p و m به ترتیب معرف نمونه واقعی و مدل آزمایشگاهی می‌باشند. به‌منظور تعیین محدوده دانه‌بندی مواد استفاده شده در



شکل ۳- خاکریز مدل ۳ و ۴ سد ناهمگن با هسته عمودی

درصد تراکم در ساخت بدنه سدهای خاکی باید بگونه‌ای باشد که در مقابل تنش‌های قائم و برشی حاصل از نیروهای ناشی از نشت آب در بدنه مقاومت داشته باشد. مطابق نظر Tahoni (2006), Sh. در صورتی که درصد تراکم نسبی خاک از ۸۵ درصد بیشتر باشد، این خاک در محدوده‌ی خاک‌های بسیار متراکم تقسیم‌بندی می‌شود. در پژوهش حاضر، خاک ریزدانه با مشخصه $d_{50} \leq 0.075 \text{ mm}$ به دلیل تراکم‌پذیری بالا و نفوذپذیری کم انتخاب شده است. همچنین، با استفاده از آزمایش پراکتور استاندارد برای نمونه‌های خاک با ۲۰ و ۶۰ درصد ریزدانه، رطوبت بهینه مطابق جدول (۱) محاسبه گردید.

برای تعیین هدایت هیدرولیکی سازند بدنه سد، ابتدا با

جدول ۱- مشخصه خاک‌های مدل سد ناهمگن

نمونه خاک	درصد ریزدانه خاک %	وزن مخصوص خشک γ_d (gr/cm ³)	درصد رطوبت بهینه % ω	هدایت هیدرولیکی K (m/day)
هسته (ریزدانه)	۶۰	۱/۷	۱۶	۰/۰۳۵
پوسته (درشت‌دانه)	۲۰	۲/۱	۷/۸	۰/۲

کاساگرانده تعیین شد که مطابق گزارش Singh (2008) با میزان رطوبت بهینه مربوط به ۲۵ ضربه برابر ۴۸ درصد، در محدوده حد روانی رس کائولینیت ($100 < PL < 35$ درصد) می‌باشد. مقدار رس ریزدانه به کار رفته در مدل سد خاکی همگن به دلیل سهولت در بررسی خط فریاتیک و نشت جریان از پنجه، ۱۰ درصد کمتر از مدل ناهمگن در نظر گرفته شد.

همچنین، برای سد خاکی ناهمگن با هسته رسی عمودی، سه مدل هندسی با دو نوع بافت خاک در نظر گرفته شد. از این‌رو

بعد از افزودن مقدار رطوبت بهینه محاسبه شده برای هر نمونه خاک، عملیات تراکم با خاکریزی در ضخامت‌های ۵ سانتی-متری در ۲۰ لایه انجام شد.

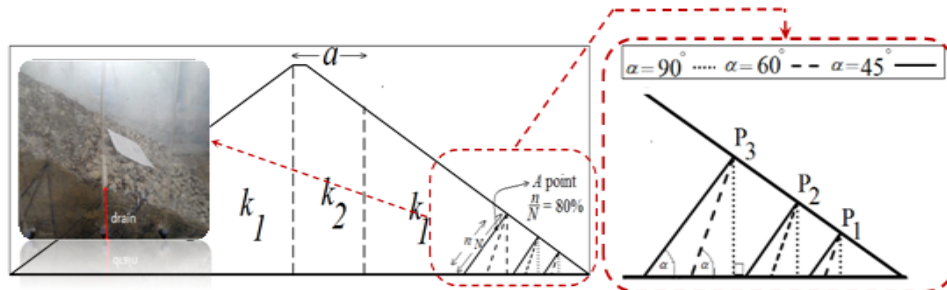
جنس بدنه سد خاکی همگن به منظور کاهش نفوذپذیری و جلوگیری از نشت آب از نوع درشت‌دانه SC (ماسه- رس) انتخاب شد. خاک SC در همه مدل‌ها از ۲۵ درصد خاک رس و ۷۵ درصد ماسه ترکیب شده است. لازم به ذکر است حد روانی خاک رس مورد استفاده در مدل‌سازی سد با استفاده از دستگاه

با در نظر گرفتن نمودار دانه‌بندی فیلتر و شاخص‌های USBR, (1947) (معادلات ۱ و ۲) مصالح زهکش پنجه طراحی شده است.

$$\frac{d_{15(\text{filter})}}{d_{85(\text{soil})}} = \frac{0.85\text{mm}}{3\text{mm}} = 0.3 \leq (5 - 6) \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$\frac{d_{15(\text{filter})}}{d_{15(\text{soil})}} = \frac{0.85\text{mm}}{0.2\text{mm}} = 4.25 \geq 4 \quad (\text{رابطه ۸})$$

پس از انجام آزمون‌های مربوط به مدل سد خاکی همگن، بدنه سد برای انجام آزمایش‌های مدل اول ناهمگن، از میانه تاج تا پنجه پایین‌دست با خاک ریزدانه مطابق جدول (۱) جایگزین شد. مدل دوم با ضخامت هسته رسی قائم به اندازه‌ی $a/L = 1/7$ و مدل سوم نیز همانند مدل دوم با تفاوت در ضخامت هسته رسی به میزان $a/L = 1/10$ ساخته شد (شکل ۵ و جدول ۲). لازم به ذکر است زهکش پنجه در زوایای ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه طراحی و اجرا گردید.



شکل ۵- طرح بدنه سد خاکی ناهمگن به همراه معرفی هندسه زهکش پنجه

مشاهداتی و فشار پیزومتریک در ۳۰ پیزومتر نصب شده بر روی دیواره کانال، اندازه‌گیری و ترسیم شد. از این رو؛ می‌توان موقعیت تقاطع خط فریاتیک با زهکش پنجه (نقطه "A") را در مدل‌ها به تصویر کشید. باید مد نظر داشت که اندازه‌گیری دبی، فشار پیزومتریک و همچنین روند خط فریاتیک، زمانی که دبی نشت در پایین‌دست سد ثابت شد، انجام پذیرفت. این امر با ثابت نگه داشتن سطح آب در مخزن بالادست محقق گردید. با رعایت این شرایط رطوبت خاک در محیط متخلخل زیر خط فریاتیک به حالت اشباع و در بالای این خط به درصدی از اشباع می‌رسد. در ادامه مقادیر این پارامترها در مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری همسان مورد مقایسه آماری قرار داده شدند.

جدول (۲) خلاصه‌ای از شرایط آزمایش در مدل‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. برای بررسی روند نشت و کنترل آن با حضور زهکش پنجه که هدف اصلی این تحقیق است، نسبت‌های بدون بعد P/h با سه زاویه مختلف برای اجرای زهکش پنجه انتخاب گردید. در این نسبت پارامتر P معرف ارتفاع زهکش پنجه و h ارتفاع آب در مخزن می‌باشد.

نتایج و بحث

مقایسه خط نشت در مدل‌های همگن و ناهمگن

شکل (۶) و (۷) با ارائه روند تغییر خطوط فریاتیک در شرایط ارتفاع و زاویه زهکش متغیر در پنجه، نشان می‌دهد که با به-کارگیری زهکش پنجه در بدنه سدهای خاکی همگن، همواره

در شکل (۵)، P ارتفاع زهکش پنجه و a معرف ضخامت خاکریزی ریزدانه در سد خاکی ناهمگن می‌باشد. برای ساخت مدل‌های زهکش با زوایای مختلف از تخلیه‌ی خاک متراکم پوسته پایین‌دست و جایگزینی با مصالح متخلخل زهکش انجام شده است. ابتدا با توجه به حجم مدل زهکش در حداقل ارتفاع با زاویه ۹۰ درجه، شیب پوسته پایین‌دست سد بعد از تخلیه با ذرات شن با قطر متوسط ۲/۶ سانتی‌متر پر گردید. در ادامه زهکش با زاویه ۶۰ و ۴۵ درجه پس از انجام آزمایش‌های زهکش ۹۰ درجه با پروسه مشابه ساخته و مورد آزمون نشت قرار گرفت. پس از انجام آزمایش‌ها با حداقل ارتفاع زهکش، مدل‌های زهکش با ارتفاع‌های بزرگتر نیز ساخته شد (شکل ۵).

روش آزمایش

پس از تعریف هندسه فیزیکی و شرایط اولیه مرزی در دو مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن و ناهمگن، با انجام آزمون‌ها در دو حالت با و بدون زهکش پنجه، ابتدا به واسطه تزریق مواد رنگی (محلول پرمنگنات پتاسیم)، مانیتورینگ شبکه نشت و جریان عبوری در بدنه سد انجام شد، و برای هر آزمون دبی نشت از پنجه سد با روش حجمی اندازه‌گیری گردید. گفتنی است ماده رنگی تزریق شده در ابتدا پدیده‌های نشتی (بالادست سد) را به خوبی نمایان کرده است، اما در ادامه به دلیل اثر موئین خاک رس و پدیده انتشار ماده رنگی، در راستای کاهش خطا در داده‌برداری، خط نشت فریاتیک با استفاده از قرائت تراز آب در چاهک‌های

زاویه زهکش پنجه، افت بار بیشتری در راستای مقطع عرضی سد، رخ خواهد داد. به طور مثال: در مدل‌های با زاویه زهکش ۹۰ درجه، با بزرگتر شدن ابعاد هندسی زهکش پنجه، افت بار در خطوط فریاتیک افزایش می‌یابد.

خط فریاتیک با افت بار بیشتری نسبت به حالت ناهمگن همراه خواهد بود. به طوری که در شرایط زاویه ثابت برای زهکش پنجه، این افت بار با افزایش ارتفاع زهکش، روند افزایشی بیشتری را در هر دو حالت از خود نشان داده است. به بیانی دیگر، با کاهش

جدول ۲- تعریف پارامترهای آزمایش و معرفی مدل‌های سد

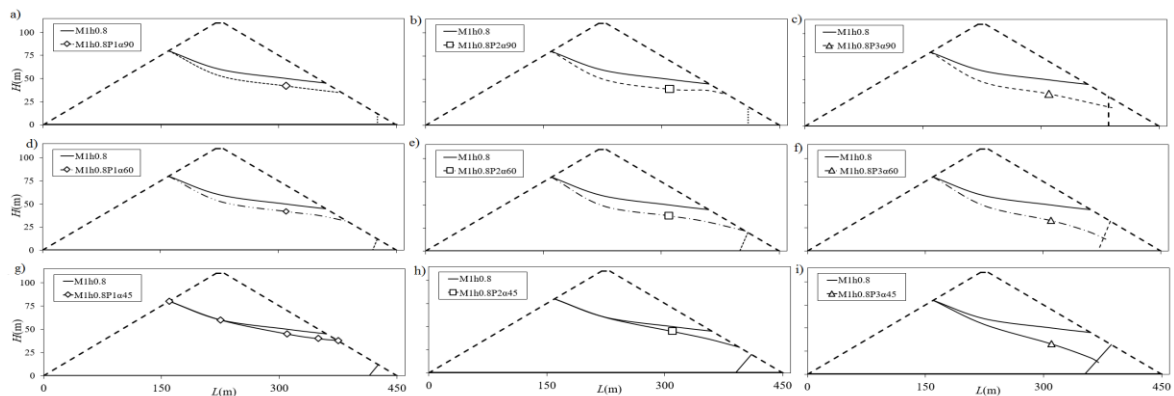
شماره	مدل آزمایش	h (m)	P (m)	α (°)	P/h	a (m)	k_1 (m/day)	k_2 (m/day)	k_3 (m/day)	a/L
۱	$M_1h_{0.8}$	۰/۸	-	-	-	۰	۰/۲	-	-	-
۲	$M_1h_{0.3}P_1\alpha_{90}$	۰/۳	۰/۱۲	۹۰	۰/۴	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۳	$M_1h_{0.3}P_1\alpha_{60}$	۰/۳	۰/۱۲	۶۰	۰/۴	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۴	$M_1h_{0.3}P_1\alpha_{45}$	۰/۳	۰/۱۲	۴۵	۰/۴	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۵	$M_1h_{0.6}P_1\alpha_{90}$	۰/۶	۰/۱۲	۹۰	۰/۲	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۶	$M_1h_{0.6}P_1\alpha_{60}$	۰/۶	۰/۱۲	۶۰	۰/۲	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۷	$M_1h_{0.6}P_1\alpha_{45}$	۰/۶	۰/۱۲	۴۵	۰/۲	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۸	$M_1h_{0.8}P_1\alpha_{90}$	۰/۸	۰/۱۲	۹۰	۰/۱۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۹	$M_1h_{0.8}P_1\alpha_{60}$	۰/۸	۰/۱۲	۶۰	۰/۱۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۰	$M_1h_{0.8}P_1\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۱۲	۴۵	۰/۱۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۱	$M_1h_{0.3}P_2\alpha_{90}$	۰/۳	۰/۲۰	۹۰	۰/۶۷	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۲	$M_1h_{0.3}P_2\alpha_{60}$	۰/۳	۰/۲۰	۶۰	۰/۶۷	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۳	$M_1h_{0.3}P_2\alpha_{45}$	۰/۳	۰/۲۰	۴۵	۰/۶۷	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۴	$M_1h_{0.6}P_2\alpha_{90}$	۰/۶	۰/۲۰	۹۰	۰/۳۳	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۵	$M_1h_{0.6}P_2\alpha_{60}$	۰/۶	۰/۲۰	۶۰	۰/۳۳	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۶	$M_1h_{0.6}P_2\alpha_{45}$	۰/۶	۰/۲۰	۴۵	۰/۳۳	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۷	$M_1h_{0.8}P_2\alpha_{90}$	۰/۸	۰/۲۰	۹۰	۰/۲۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۸	$M_1h_{0.8}P_2\alpha_{60}$	۰/۸	۰/۲۰	۶۰	۰/۲۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۱۹	$M_1h_{0.8}P_2\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۲۰	۴۵	۰/۲۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۰	$M_1h_{0.3}P_1\alpha_{90}$	۰/۳	۰/۲۸	۹۰	۱	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۱	$M_1h_{0.3}P_1\alpha_{60}$	۰/۳	۰/۲۸	۶۰	۱	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۲	$M_1h_{0.3}P_1\alpha_{45}$	۰/۳	۰/۲۸	۴۵	۱	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۳	$M_1h_{0.6}P_1\alpha_{90}$	۰/۶	۰/۲۸	۹۰	۰/۴۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۴	$M_1h_{0.6}P_1\alpha_{60}$	۰/۶	۰/۲۸	۶۰	۰/۴۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۵	$M_1h_{0.6}P_1\alpha_{45}$	۰/۶	۰/۲۸	۴۵	۰/۴۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۶	$M_1h_{0.8}P_1\alpha_{90}$	۰/۸	۰/۲۸	۹۰	۰/۳۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۷	$M_1h_{0.8}P_1\alpha_{60}$	۰/۸	۰/۲۸	۶۰	۰/۳۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۸	$M_1h_{0.8}P_1\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۲۸	۴۵	۰/۳۵	۰	۰/۲	-	۳۰	-
۲۹	$M_2h_{0.8}$	۰/۸	-	-	-	۲/۲	۰/۲	۰/۰۳۵	-	۰/۵
۳۰	$M_2h_{0.8}P_1\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۱۲	۴۵	۰/۱۵	۲/۲	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۵
۳۱	$M_2h_{0.8}P_2\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۲۰	۴۵	۰/۲۵	۲/۲	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۵
۳۲	$M_2h_{0.8}P_3\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۲۸	۴۵	۰/۳۵	۲/۲	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۵
۳۳	$M_3h_{0.8}$	۰/۸	-	-	-	۰/۶۵	۰/۲	۰/۰۳۵	-	۰/۱۴
۳۴	$M_3h_{0.8}P_1\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۱۲	۴۵	۰/۱۵	۰/۶۵	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۱۴
۳۵	$M_3h_{0.8}P_2\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۲۰	۴۵	۰/۲۵	۰/۶۵	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۱۴
۳۶	$M_3h_{0.8}P_3\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۲۸	۴۵	۰/۳۵	۰/۶۵	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۱۴
۳۷	$M_4h_{0.8}$	۰/۸	-	-	-	-	-	۰/۰۳۵	-	۰/۱
۳۸	$M_4h_{0.8}P_1\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۱۲	۴۵	۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۱
۳۹	$M_4h_{0.8}P_2\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۲۰	۴۵	۰/۲۵	۰/۴۵	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۱
۴۰	$M_4h_{0.8}P_3\alpha_{45}$	۰/۸	۰/۲۸	۴۵	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۲	۰/۰۳۵	۳۰	۰/۱

* در اینجا؛ $M_a h_b P_c \alpha_d$ نشان دهنده مدل a در تراز آب مخزن b متر، ارتفاع زهکش c متر و در زاویه زهکش d درجه می‌باشد.

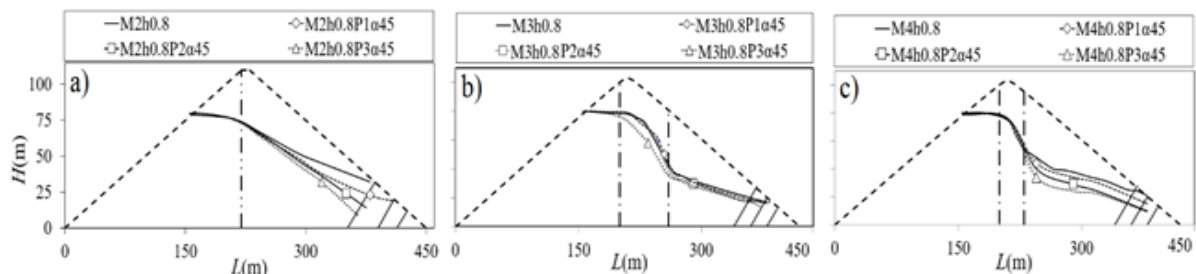
مطابق آنچه در شکل (۶) نشان داده شد، زهکش پنجه با مشخصه‌های هندسی $P/h = 0.35$ و $\alpha = 45$ درجه، با بیش‌ترین

عمودی در مدل‌های ناهمگن سد خاکی، به دلیل وجود هیدرولیک جریان متفاوت بین دو محیط متخلخل خاک، خط فریاتیک به صورت خط شکسته رخ دهد. از اینرو با تحلیل نتایج، مناسب‌ترین زهکش پنجه برای مدل‌های ناهمگن $M2^{st}$ و $M3^{nd}$ به ترتیب با شاخص هندسی $P/h=0.25$ و $P/h=0.35$ در زاویه $\alpha=45^\circ$ درجه پیشنهاد می‌شود.

افت بار در مدل‌های سد خاکی همگن، به عنوان بهترین شرایط طراحی زهکش پنجه معرفی می‌شود. لازم به ذکر است، به دلیل کم بودن احتمال رویت آزمایشگاهی خط فریاتیک نزدیک به زهکش، از دو نقطه آخر در تعیین خط فریاتیک در بدنه زهکش استفاده شده است (Chahar, 2006). در شکل (۷) بدیهی است که با کاهش ضخامت هسته



شکل ۶- بررسی روند خط فریاتیک برای مدل اول همگن. (a) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P1a90$; (b) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P2a90$; (c) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P3a90$; (d) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P1a60$; (e) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P2a60$; (f) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P3a60$; (g) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P1a45$; (h) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P2a45$; (i) خط فریاتیک در مدل $M1h0.8P3a45$



شکل ۷- خط فریاتیک رسم شده در زاویه زهکش 45° درجه برای مدل‌های دوم، سوم و چهارم ناهمگن

این بدان معناست که مدل عددی PLAXIS به خوبی می‌تواند مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن را شبیه‌سازی کند. بنابراین می‌توان با توجه به داده‌های ورودی (هدایت هیدرولیکی، جنس خاک، فیزیک مسئله و ...) از مدل عددی به جای مدل آزمایشگاهی استفاده کرد و با تسریع روند آزمایش، مشخصه‌های هندسی اجزای سد همچون زهکش پنجه را با هزینه کم پیش-بینی کرد (Mishra and Parida, 2006).

مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی در حالت ناهمگن

در شکل (۸) و (۹) با ارائه مراحل مدل‌سازی سد خاکی ناهمگن در نرم افزار PLAXIS با ورود مشخصه‌های خاک، مثل؛ هدایت هیدرولیکی k_1 و k_2 برای پوسته و هسته سد خاکی، خط فریاتیک ترسیم شد.

مطابق انتظار، نشت از بدنه سد خاکی ناهمگن به دلیل

مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی در حالت همگن ابتدا صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی سد خاکی همگن با نتایج مدل آماری SAS انجام شد. سپس داده‌های دبی آزمایشگاه و مدل عددی در شرایط یکسان هیدرولیکی مطابق جدول (۳) مورد مقایسه قرار داده شد. از سوی دیگر، داده‌های فشار آب منفذی با استفاده از مدل آماری SAS و پیرومترهای تعبیه شده بر روی مدل آزمایشگاهی مقایسه و آزمون آماری P-Value انجام شد. بر این اساس، نشان داده شد که با ضریب اطمینان ۹۰٪ تا ۹۸٪ تفاوت معنی‌داری در نتایج مشاهده نشده است. همچنین مقدار RMSE نیز به عنوان میانگین مجموع مربعات خطا برای هر مدل محاسبه و در جدول (۳) گزارش شده است. در اینجا نیز آنچه مشهود است، با افزایش ارتفاع زهکش پنجه در زاویه 45° درجه، ظرفیت تخلیه افزایش یافته است.

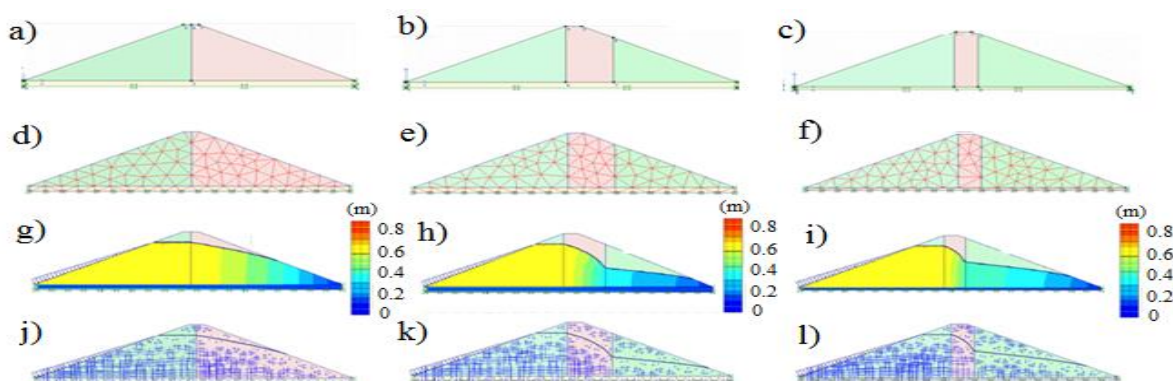
پوسته پایین دست سبب کنترل دبی نشت و افزایش پایداری سد خاکی گردد. در نهایت، نتایج تحلیل عددی فشار آب منفذی با مدل آزمایشگاهی مقایسه و مقدار خطای مدل سازی مطابق جدول (۴) گزارش شده است. به طوری که با ضریب اطمینان ۹۱٪ تا ۹۷٪، تفاوت معنی داری در نتایج مشاهده نشده است.

وجود هدایت هیدرولیکی متفاوت بدنه در شرایط وجود هسته رسی با نفوذپذیری کم، همواره به صورت افت ناگهانی بار هیدرولیکی و حرکت روبه پایین جریان رخ خواهد داد. از این رو بین نتایج آزمایشگاهی و عددی همخوانی خوبی وجود دارد. لازم به ذکر است، با توجه به خطوط نشت ترسیم شده مطابق شکل (۹)، تعبیه زهکش در پنجه می تواند با جلوگیری از تقاطع جریان با شیب

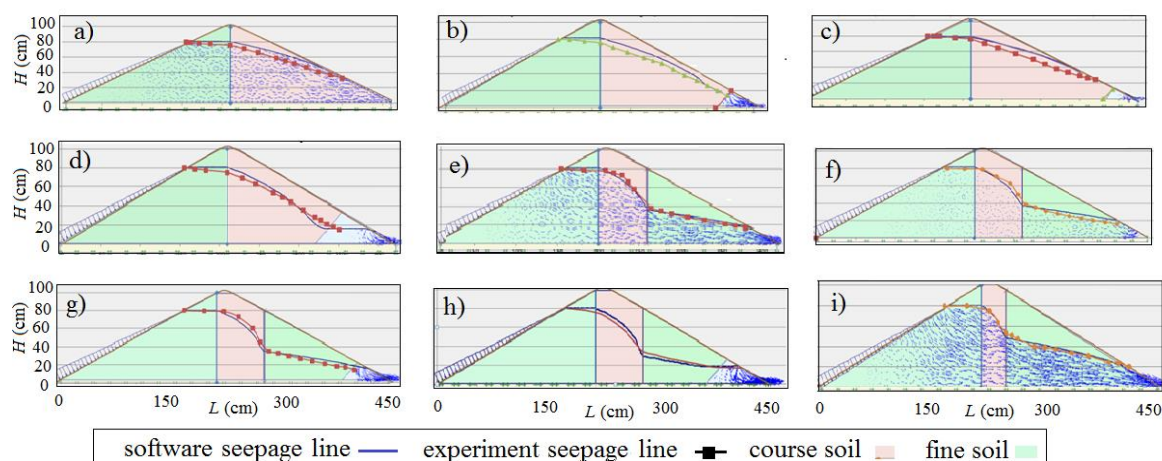
جدول ۳- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی PLAXIS به همراه صحت سنجی با آزمون P-Value و RMSE برای مدل سد خاکی همگن

مدل آزمایش	$M_{1h0.8}P_1\alpha_{90}$	$M_{1h0.8}P_2\alpha_{90}$	$M_{1h0.8}P_3\alpha_{45}$	$M_{1h0.8}P_3\alpha_{50}$	$M_{1h0.8}P_3\alpha_{60}$	$M_{1h0.8}P_3\alpha_{65}$	$M_{1h0.8}P_3\alpha_{70}$	$M_{1h0.8}P_3\alpha_{75}$	$M_{1h0.8}P_3\alpha_{80}$	$M_{1h0.8}P_3\alpha_{85}$
Q_f (lit/sec)	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
Q_s (lit/sec)	۰/۳۲۶	۰/۳۳۳	۰/۳۳۶	۰/۳۳۴	۰/۳۴۵	۰/۳۵۳	۰/۳۶۴	۰/۳۷۸	۰/۳۷۹	۰/۳۸
درصد خطا	۲/۴۱	۱/۲	۷/۹	۰/۷۷	۰/۲۵	۷/۴۲	۴/۰۴	۰/۹	۶/۱۲	۰/۴
آزمون مقدار احتمال	۰/۱	۰/۰۷۲	۰/۰۷۳	۰/۰۸۴	۰/۰۸۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۶	۰/۰۶۶	۰/۰۶۱	۰/۰۶۱
سطح اطمینان %	۹۰	۹۳	۹۳	۹۲	۹۲	۹۳	۹۴	۹۳	۹۴	۹۴
میانگین مجموع مربعات خطا	۰/۴۰۲	۰/۳۹۶	۰/۴۲۲	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۰/۳۷۹	۰/۷۰۶	۰/۴۱۹	۰/۴۸۶	۰/۴۸۶

* در جدول (۳)، Q_f معرف دبی نشت در مدل آزمایشگاهی و Q_s دبی نشت در مدل نرم افزاری می باشد.



شکل ۸- مراحل مدل سازی سد خاکی ناهمگن: (a) مدل اولیه M2h0.8 (b) مدل اولیه M3h0.8 (c) مدل اولیه M4h0.8 (d) مش بندی مدل M2h0.8 (e) مش بندی مدل M3h0.8 (f) مش بندی مدل M4h0.8 (g) خط فراتیک مدل M2h0.8 (h) خط فراتیک مدل M3h0.8 (i) خط فراتیک مدل M4h0.8 (j) فشار آب منفذی در مدل M2h0.8 (k) طرح فشار آب منفذی در مدل M3h0.8 (l) طرح فشار آب منفذی در مدل M4h0.8



شکل ۹- مقایسه نتایج مدل عددی PLAXIS و مدل آزمایشگاهی (a) M2h0.8 (b) M2h0.8P1a45 (c) M2h0.8P2a45 (d) M2h0.8P3a45 (e) M3h0.8 (f) M3h0.8P1a45 (g) M3h0.8P2a45 (h) M3h0.8P3a45 (i) M4h0.8

جدول ۴- مقایسه نتایج خط نشت مدل آزمایشگاهی و عددی به همراه صحت سنجی با آزمون RMSE و P-value

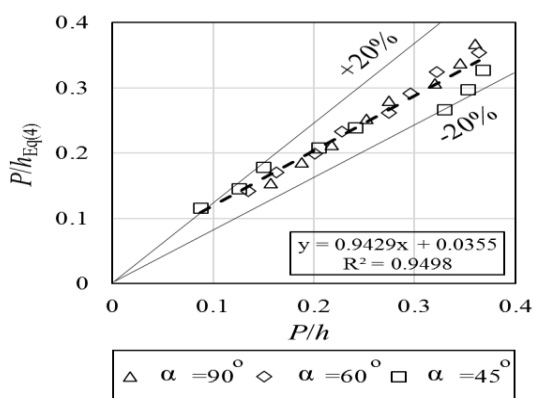
مدل آزمایش	$M_{2h0.8}$	$M_{2h0.8}P_{1\alpha_{45}}$	$M_{2h0.8}P_{2\alpha_{45}}$	$M_{2h0.8}P_{3\alpha_{45}}$	$M_{3h0.8}$	$M_{3h0.8}P_{1\alpha_{45}}$	$M_{3h0.8}P_{2\alpha_{45}}$	$M_{3h0.8}P_{3\alpha_{45}}$	$M_{4h0.8}$
درصد خطا	۴/۴۲	۹/۹	۶/۱	۴/۱	۳/۸	۵/۴	۵/۹	۶/۱	۴/۱
آزمون مقدار احتمال	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۷۲	۰/۰۷۳	۰/۰۹۵	۰/۰۷	۰/۰۵۵	۰/۰۳۱	۰/۰۶۲
سطح اطمینان %	۹۷	۸۵	۹۳	۹۲	۹۱	۹۳	۹۵	۹۷	۹۴
میانگین مجموع مربعات خطا	۰/۵۶	۰/۴۱	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۴۸

دارا بودن بهینه ترین عملکرد، از نظر ابعاد هندسی و هزینه اجرا نیز با صرفه اقتصادی همراه بوده و با ابعاد کوچکتری نسبت به دیگر زوایا طراحی شده است.

معادله (۳) برای پیش بینی ارتفاع زهکش پنجه سد خاکی همگن با شرایط شیب بالادست و پایین دست (۱: ۲) ارائه شده است:

$$\frac{P}{h} = 0.31k_1 - \frac{\cos(\alpha)}{30} + 0.13 \quad (\text{رابطه ۳})$$

لازم به ذکر است که در $k_1 < 3$ متر در روز خطای کمتری نسبت به $k_1 > 3$ رخ داده است، اما بدیهی است که این خطا می تواند باعث افزایش ضریب اطمینان در طراحی شود. در شکل (۱۱) با ارائه تحلیل خطای معادله (۳) با داده های آزمایشگاهی نشان داده شد که به ازای مقدار P/h بزرگتر این معادله دارای دقت بیشتری می باشد.



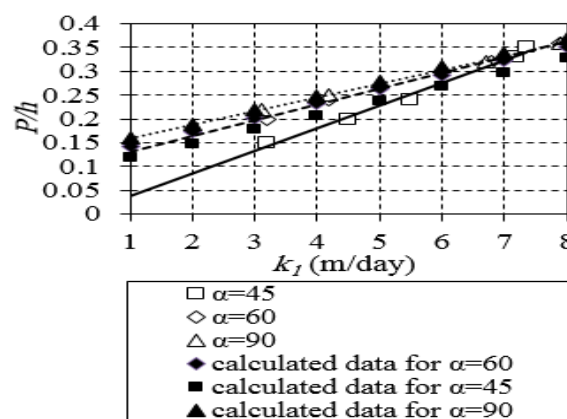
شکل ۱۱- تحلیل خطای معادله ۳ با داده های آزمایشگاهی

و با معادله (۴) مقایسه شده است. گفتنی است، با احتساب h_c به عنوان ارتفاع مویینگی خاک و بازدید از چاهک های مشاهداتی در بدنه سد می توان به واسطه معادله (۴) ارتفاع زهکش پنجه را تعیین کرد. به طوری که نشان داده شد، معادله (۳) با استفاده از پارامتر هدایت هیدرولیکی بدنه سد k_1 به خوبی می تواند ارتفاع

مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و نرم افزار PLAXIS نشان - دهنده پیش بینی قابل قبول این مدل عددی از موقعیت خط فریاتیک در بدنه سد خاکی می باشد. از سوی دیگر، بدیهی است که مدل سازی آزمایشگاهی سد خاکی، از نظر عملی بسیار وقت گیر و پرهزینه است. از این رو، می توان صحت نتایج خروجی رفتار جریان در مدل سازی عددی بدنه سد خاکی را مورد تایید فرض کرد و در ادامه از طریق کار با نرم افزار، تحلیل رفتار بدنه سد را مورد سنجش قرار داد.

نتایج مدل عددی PLAXIS برای سد خاکی همگن

شکل (۱۰) نشان دهنده تغییرات ارتفاع و اندازه زهکش پنجه به صورت شاخص P/h و زوایای مختلف پنجه در سد خاکی همگن بر اساس هدایت هیدرولیکی k_1 و نقطه تقاطع خط نشت با بدنه زهکش در A می باشد. بر این اساس می توان بیان کرد که در سدهای خاکی همگن، زهکش پنجه با زاویه ۴۵ درجه علاوه بر

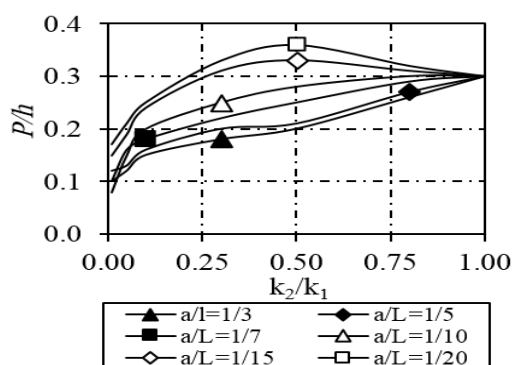

 شکل ۱۰- مقایسه داده های آزمایشگاهی و محاسبه شده از معادله ۳ - رابطه شاخص k_1 و نسبت P/h برای زهکش پنجه در سد خاکی همگن

معادله (۴) برای پیش بینی ارتفاع زهکش پنجه در شرایط با و بدون پای آب ارائه شده است (Mishra and Parida, 2006).

$$P = \frac{0.5(m_2^2 + 1)(\sqrt{d^2 + h^2} - d) + (m_2 h_c)}{m_2 + m_3} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در شکل (۱۲)، ارتفاع زهکش پنجه از معادله (۳) پیش بینی

خطا در پارامترهای طراحی همچون هدایت هیدرولیکی، ضخامت هسته و ابعاد زهکش پنجه برای کلیه مدل‌ها، مناسب‌ترین ابعاد هندسی زهکش پنجه در حالت ناهمگنی سد خاکی انتخاب شد. بهترین ابعاد هندسی زهکش پنجه بر اساس موقعیت خط نشت در نرم افزار و برخورد با نقطه A تعریف شده است و در نهایت ارتفاع بهینه زهکش پنجه در زاویه ۴۵ درجه، با نسبت $k_2/k_1 = 0.31$ و در نسبت $a/L = 1/10$ گزارش شده است.



شکل ۱۳- منحنی ارتفاع زهکش با زاویه ۴۵ درجه برای سدهای ناهمگن با هسته عمودی رسی

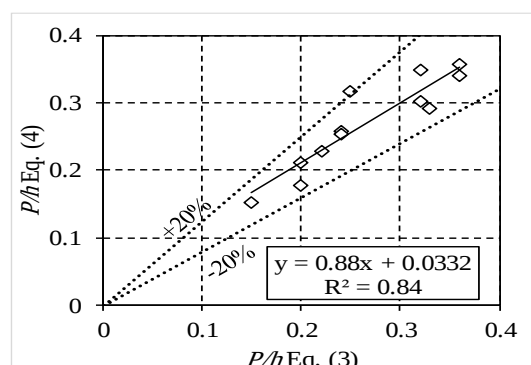
اندازه مطلوب زهکش پنجه سد خاکی همگن با زاویه ۴۵ درجه و شاخص $P/h = 0.35$ و در حالت ناهمگن نیز، زاویه ۴۵ درجه و شاخص نسبی $P/h = 0.25$ گزارش شده است.

نتایج مدل‌های آزمایشگاهی با مدل نرم افزاری PLAXIS ۷.۵ مقایسه و همخوانی خوبی مشاهده شد. بنابراین، گزارش می‌شود که این نرم‌افزار علاوه بر پیش‌بینی ابعاد بهینه زهکش پنجه، می‌تواند با استفاده از مقدار هدایت هیدرولیکی، ارتفاع سطح آب در مخزن سد خاکی و ضخامت هسته رسی، اندازه بهینه زهکش‌های پنجه را در سدهای خاکی ناهمگن محاسبه کند.

"هیچ‌گونه تعارض منابع بین نویسندگان وجود ندارد"

زهکش پنجه را پیش‌بینی کند. اما معادله (۴) برای پیش‌بینی ارتفاع زهکش پنجه نیاز به پارامتر ارتفاع موئین خاک دارد که محاسبه این پارامتر در بدنه سد بسیار دشوار است و به همین دلیل از میل به کاربرد این معادله کم خواهد شد.

نتایج مدل عددی PLAXIS برای سد خاکی ناهمگن
مطابق شکل (۱۳) با استفاده از مدل عددی PLAXIS و سعی و



شکل ۱۴- مقایسه معادلات ۳ و ۴ برای پیش‌بینی ارتفاع زهکش پنجه در سد خاکی همگن

نتیجه‌گیری

خلاصه‌ای از نتایج پژوهش آزمایشگاهی و تحلیل نرم‌افزاری به شرح زیر است؛

ابعاد هندسی مطلوب زهکش پنجه روی سدهای خاکی همگن و ناهمگن مستقیماً با هدایت هیدرولیکی و ارتفاع سطح آب در مخزن سد ارتباط دارد. همچنین نشان داده شد که در سدهای خاکی ناهمگن، این مقادیر با ضخامت لایه رس هسته رابطه معکوس دارد.

با مقایسه و استفاده از تحلیل رگرسیون، معادله‌ای برای پیش‌بینی ارتفاع زهکش پنجه سد همگن ارائه شد که به ازای مقادیر P/h بزرگتر، دارای دقت بیشتری می‌باشد.

فهرست علائم

d	فاصله زهکش پنجه یا عرض از مبدا، m	W_t	وزن بهینه حاصل از آزمایش پراکتور	h	ارتفاع آب در مخزن سد خاکی
d_{50}	قطر متوسط خاک، mm	α	زاویه زهکش پنجه	H	ارتفاع مدل‌های سد خاکی
d_{15}	قطری که ۱۵٪ از کل خاکدانه‌ها از آن کوچکتر است، mm	δ	زاویه شکست در خاک هسته	h_c	ظرفیت موئین خاک، m
d_{85}	قطری که ۸۵٪ از کل خاکدانه‌ها از آن کوچکتر است، mm	β	زاویه شکست در خاک پوسته	L	طول پی در مدل سد خاکی
R	تراکم نسبی	K_1	هدایت هیدرولیکی پوسته	m_i	شیب جانبی سد خاکی در بالادست
γ_{max}	حداکثر تراکم بهینه حاصل از آزمایش پراکتور	K_2	هدایت هیدرولیکی هسته	Q_e	دبی نشت در مدل آزمایشگاهی
γ	تراکم خاک خشک در مدل	K_3	هدایت هیدرولیکی زهکش پنجه	Q_s	دبی نشت در مدل نرم افزاری
W_s	وزن وارد شده در مدل	P	ارتفاع زهکش هسته	a	ضخامت هسته عمودی

REFERENCES

Akhtarpour, A., and Salari, M. (2017). Numerical simulation of the behavior of a long pebble barrier with regard to the particle fracture phenomenon. *Civil Engineering*, 56-47. (in Farsi)

Borja, R. I., and Kishnani, S. S. (1991). On the solution of elliptic free-boundary problems via Newton's method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88(3), 341-361.

- Chahar, B. R. (2006). Closure to "Determination of Length of a Horizontal Drain in Homogeneous Earth Dams" by Bhagu R. Chahar. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(1), 89-90.
- Creager W. P., Justin, J. D., and Hinds. (1944). Earth, rock-fill steel and timber dams. J. Eng. for dams. V III, Wiley, New York.
- Darbandi, M., Torabi, S. O., Saadat, M., Daghighi, Y., and Jarrahbashi, D. (2007). A moving-mesh finite-volume method to solve free-surface seepage problem in arbitrary geometries. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(14), 1609-1629.
- Fukuchi, T. (2018). New high-precision empirical methods for predicting the seepage discharges and free surface locations of earth dams validated by numerical analyses using the IFDM. *Soils and Foundations*, 58(2), 427-445.
- Kasim, F., and Fei, W. S. (2002). Numerical parametric simulations for seepage flow behaviour through an earthfill Dam. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 14(1).
- Kozeny, J. (1931). Grundwasserbewegung bei freiem spiegel, fluss und kanalversickerung. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, 26(3), 28.
- Liggett, J. A., and Liu, P. L. F. (1979). Unsteady interzonal free surface flow in porous media. *Water Resources Research*, 15(2), 240-246.
- Mishra, G. C., and Parida, B. P. (2006). Earth dam with toe drain on an impervious base. *International Journal of Geomechanics*, 6(6), 379-388.
- Ouria, A., and Toufigh, M. M. (2009). Application of Nelder-Mead simplex method for unconfined seepage problems. *Applied Mathematical Modelling*, 33(9), 3589-3598.
- Pavlovsky, N. N. (1931). Seepage through earth dams, Instit. Gidrotekhniki i Melioratsii, Leningrad, Translated by US Corps of Engineers.
- Shafai-Bajestan, M., & Albertson, M. L. (1993). Riprap criteria below pipe outlet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2), 181-200.
- Sherard, J. L. (1963). Earth and earth-rock dams.
- Singh, A. K. (2008). Analysis of flow in a horizontal toe filter. *International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 2449-2455.
- Stark, T. D., Jafari, N. H., Zhindon, J. S. L., and Baghdady, A. (2017). Unsaturated and transient seepage analysis of San Luis Dam. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(2), 04016093.
- Strzelecki, T. O. M. A. S. Z., and Kostecki, S. T. A. N. I. S. Ł. A. W. (2008). Seepage through dam and deformable soil medium with consolidation. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 30(3-4), 71-84.
- Tahoni Sh. (2006). Implementation Principles in Earth Dam. 13th Publish. Thehran Pars Aien Institution. Tehran.
- Tayfur, G., Swiatek, D., Wita, A., and Singh, V. P. (2005). Case study: Finite element method and artificial neural network models for flow through Jeziorsko earthfill dam in Poland. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(6), 431-440.
- Wu, M., Yang, L., and Yu, T. (2013). Simulation procedure of unconfined seepage with an inner seepage face in a heterogeneous field. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 56(6), 1139-1147.
- Yea, G. G., Kim, T. H., Kim, J. H., and Kim, H. Y. (2013). Rehabilitation of the core zone of an earth-fill dam. *Journal of performance of constructed facilities*, 27(4), 485-495.