

تعیین ابعاد بهینه زهکش پنجه‌ای بر اساس بهترین خط نشت در سدهای خاکی همگن با استفاده از مدل آزمایشگاهی

سعید صالحی^{۱*}، محمد شایان‌نژاد^۲، سید سعید اخروی^۳ و نویده نجف‌پور^۴

چکیده

در این مقاله تأثیر زاویه و ابعاد زهکش پنجه‌ای بر خط نشت آزاد آب در بدنه سدهای خاکی همگن با استفاده از مدل نرم آزمایشگاهی بررسی شده است. با توجه به خلأ مطالعاتی در مورد ارتفاع بهینه زهکش پنجه‌ای سدهای خاکی و عدم وجود استاندارد معروف و ملزوم، در این پژوهش به این موضوع مهم پرداخته و روش کار بحث شده است. بدین منظور مدل آزمایشگاهی مناسبی ایجاد شد. آزمایش‌ها با ارتفاع‌های مختلف آب در پشت دیواره سد خاکی همگن انجام شد و با استفاده از داده‌های پیژومتریک، وضعیت خط نشت آزاد آب در حالت‌های مختلف زهکش پنجه‌ای مقایسه شد. در پنجه سد سه نوع زهکش با زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در ارتفاعات مختلف ساخته شدند و روند خط نشت در بدنه سد خاکی در حالت‌های مختلف آزمایش و در حداکثر ارتفاع آب سد خاکی با استفاده از هفت چاهک مشاهداتی در بدنه سد و ۳۰ پیژومتر در دیواره فلوم برداشت شد. زهکش‌ها در سه مقطع با سه ارتفاع ساخته شدند که در ادامه ۹ مدل آزمایشگاهی آماده شد و داده‌های نشت و دبی برداشت گردیده شد. منحنی‌های برداشت شده در نقاط انتهایی خط نشت از روند خطی تبعیت می‌کردند این امر موجب شد معادلات ریاضی خط نشت در انتهای بدنه سد و ابتدای ورود به زهکش ترسیم گردد. و محل برخورد خط با بدنه زهکش از حل عددی معادلات ریاضی خط نشت و خط ریاضی در یک دستگاه حل معادلات برداشت شد. لازم به ذکر است مبدا مختصات در پاشنه سد قرار داده شده است و تمامی معادلات در این محور مختصات ترسیم شده بر اساس این مبدا می‌باشند. در ادامه نقطه برخورد خط نشت با زهکش به صورت نقطه A معرفی شد. که اختلاف ارتفاع این نقطه با حالت شاهد (بدون زهکش) میزان افت حاصل از جا نمایی زهکش معرفی شد و با مقایسه این افت‌ها بهترین زهکش که زهکش ۴۵ درجه می‌باشد، معرفی می‌گردید.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع زهکش، خط نشت، زاویه زهکش، زهکش پنجه‌ای، سد خاکی.

ارجاع: صالحی س. شایان‌نژاد م. اخروی س. س. و نجف‌پور ن. ۱۳۹۵. تعیین ابعاد بهینه زهکش پنجه‌ای بر اساس بهترین خط نشت در سدهای خاکی همگن با استفاده از مدل آزمایشگاهی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰: ۱-۱۰.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴- دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

* نویسنده مسئول: saeedsalehi100@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۱۶

مقدمه

از جمله عوامل مهم در تخریب سدهای خاکی، نشت از زیر و بدنه سد و خرابی حاصل از زه است. بررسی‌های گسترده روی ۶۰۰ سد تخریب شده در جهان نشان دهنده آن است که عمده خرابی سدهای خاکی، برخورد سطح آزاد نشت با شیب پایین دست سد و ایجاد آب‌شستگی داخلی با جریان نشت درون سد بوده است. با طراحی زهکش‌ها در پایین دست سدهای خاکی این چالش تا حدی برطرف خواهد شد (رحیمی، ۱۳۸۵).

اساس کار زه آب بدین صورت است که مولکول‌های آب به دلیل وجود انرژی پتانسیل در محیط متخلخل خاک جریان می‌یابند و با طی مسیر کم‌کم انرژی خود را به واسطه اصطکاک از دست می‌دهند. این پدیده نشت نام داشته و دارای اثرات نامطلوبی در سدهای خاکی می‌باشد (میشرا و سینگ، ۲۰۰۵). به دلیل قابلیت نفوذ مصالح سدهای خاکی همواره مقداری آب از طریق بدنه و پی سدهای خاکی به پایین دست نفوذ پیدا می‌کند و برای خروج ایمن این آب‌ها از سد و برای جلوگیری از پدیده آب‌شستگی پایین دست اقدامات مختلفی از جمله ایجاد زهکش پنجه‌ای به علت سادگی اجرا در پایین دست سد در نظر گرفته می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌ها و کمیت‌های مورد نظر بررسی و تحلیل سدهای خاکی، اندازه‌گیری فشار آب منفذی و زه آب خروجی از بدنه و پی آن است که اندازه‌گیری این کمیت‌ها از همان شروع ساخت سد شروع می‌شود (وفائیان، ۱۳۸۵).

مزندگی و باقری‌پور (۱۳۸۳) با مدل کردن سد خاکی همگن و غیرایزوتروپ به ارزیابی مدل تحلیلی نومروف در کنترل نشت آب از سدهای خاکی همگن پرداختند. سینگ (۲۰۰۸) روند نشت در یک سد خاکی همگن دارای فیلتر پاشنه‌ای افقی را با روش اجزاء محدود بررسی و مشاهده کرد که آنالیز عددی فشار پیزومتریک در درون فیلتر سد روند کاهشی داشته در حالیکه مدل تحلیلی یک خط هم‌پتانسیل صفر را در درون فیلتر نمایش داده است. رخسندرو و باقریه (۲۰۰۶) نحوه نشت در سد خاکی پانزده خرداد را پس از آبیگری با نرم‌افزار SEEP3D به صورت سه‌بعدی بررسی و مشخص کردند که ویژگی‌های نشت از سد و میزان آن تقریباً به وسیله منطقه اشباع مشخص می‌شود و منطقه غیراشباع یا منطقه مکش تأثیر بسیار کمی بر نشت دارد. نجف‌پور خویگانی و همکاران

(۱۳۹۰) با مدل‌سازی سد خاکی همگن، تأثیر زهکش پنجه با زوایا، طول و ارتفاع‌های مختلف را روی روند خط نشت بررسی کردند. مدل‌سازی با نرم‌افزار PLAXIS و SAS انجام شد.

آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش ارتفاع زهکش و طول آن نسبت به ارتفاع آب پشت دیواره سد خاکی و همچنین کاهش زاویه α میزان دبی نشت افزایش یافته است. آن‌ها نتیجه گرفتند که انتخاب بهترین ارتفاع در طراحی زهکش پنجه زمانی حاصل می‌شود که دبی نشت به حداقل خود برسد.

هدف از این پژوهش معرفی بهترین زهکش پنجه از لحاظ ایجاد مناسب‌ترین افت خط نشت می‌باشد که با تغییر دادن زهکش پنجه و تأثیر آن بر خط نشت سعی در معرفی این نوع زهکش شد.

مواد و روش‌ها

فلوم آزمایشگاهی: آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۶ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱/۲ متر در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد انجام شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده در ایجاد چنین مدل‌های آزمایشگاهی و امکانات در دسترس، فلوم مورد نظر از فولاد و پلاکسی‌گلاس ساخته شد. کف فلوم و دیواره پشت فلوم از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت ۲ میلی‌متر و دیواره‌های جانبی فلوم از جنس پلاکسی‌گلاس با ضخامت ۱۵ میلی‌متر است که با استفاده از چسب آکواریوم آب‌بندی شده است (شکل ۱).

باکس زهکشی: برای 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 شده که دارای یک دریچه دسترسی در دیواره و یک شیر تخلیه در کف بوده و داخل آن از شن و ماسه برای تصفیه آب حاصل از زهکشی تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری پر شده است.

پیزومترها: برای اندازه‌گیری فشار آب داخل فلوم ۳۰ عدد پیزومتر به صورت شبکه بندی روی دیواره پلاکسی‌گلاس از وسط به سمت انتهای فلوم آماده و آب‌بند شده است (شکل ۱).

مدل‌های اجرایی: برای بررسی این پژوهش از دو مدل سد خاکی همگن در شرایط متفاوت استفاده شد. در مدل اول از میزان خاک ریزدانه کمتری استفاده شده است و برای

تجمع یافته در مخزن سد پیر بلوط واقع در ۲۰ کیلومتری شهرکرد و نیز از خاک رسی محوطه دانشگاه شهرکرد انتخاب شد. با توجه به این موضوع که کانی خاک رسی مورد استفاده باید از جنس کائولینیت به دلیل چسبندگی توأم با تراکم‌پذیری بالا باشد، این دو رس با نسبت برابر باهم ترکیب و حد روانی آن‌ها به روش کاساگراند حدود ۴۸ به دست آمد که بر اساس طاحونی (۱۳۸۵) این جد روانی نشان دهنده محدوده حد روانی رس کائولینیت است.

ارتفاع حداقل پنجه سد باید چنان باشد که خط زه با اطمینان کامل از دامنه پایین‌دست دور نگه داشته شود. اندازه قطعات سنگ‌های تشکیل دهنده پنجه سنگی حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر معمول است. پنجه سنگی نیز باید با لایه‌های فیلتر به بدنه سد اتصال پیدا کند (رحیمیان، ۱۳۸۵ و وفاییان، ۱۳۸۵). در مدل آزمایشگاهی مذکور شن درشت و قطعات سنگ ۱ تا ۴ سانتی‌متر برای مصالح زهکش استفاده شد که با یک لایه فیلتر به بدنه اصلی سد متصل شد. دلیل اصلی استفاده از لایه فیلتر، عدم شسته شدن و حرکت مواد ریزدانه سازه خاکی است (اسکروچی، ۱۳۸۴). برای انتخاب مصالح فیلتر دو معیار کلی وجود دارد که لازم است برای هر فیلتر تأمین شود.

الف. معیار آب‌شستگی: اندازه حفرات مصالح فیلتر باید به قدری ریز باشند تا از شسته شدن خاک مورد حفاظت به داخل آن جلوگیری شود.

ب. معیار نفوذپذیری: مصالح فیلتر باید به قدری نفوذپذیر باشند تا از به وجود آمدن نیروی نشت زیاد و فشار هیدرواستاتیک در مصالح جلوگیری شود.

اساس پژوهش‌های تجربی دو محدوده زیر انتخاب و توصیه شده است (رحیمی، ۱۳۸۵):

$$\frac{D_{15}(\text{فیلتر})}{D_{85}(\text{خاک})} < 4 - 5 \quad (1)$$

$$\frac{D_{15}(\text{فیلتر})}{D_{15}(\text{خاک})} < 4 - 5 \quad (2)$$

در این پژوهش‌ها با توجه به مقدار D_{15} و D_{85} خاک SC و رعایت نسبت آب‌شستگی و نفوذپذیری با روش سعی و خطا مصالح فیلتر انتخاب شد.

برای تعیین دانه‌بندی در ساخت مدل از آزمایش‌های دانه‌بندی با الک استاندارد و روش هیدرومتری برای بخش

بررسی روند نشت و نمایش خطوط جریان و ترسیم خط فریاتیکی از تزریق مواد رنگی (محلول پرمنگنات پتاسیم) و اندازه‌گیری دبی نشت از پنجه سد و زهکش افقی به روش حجمی استفاده شد. لازم به ذکر است که مواد رنگی تزریق شده در ابتدا (بالادست سد) به خوبی روند نشت و خطوط جریان را مشخص کردند (شکل ۲). در مدل دوم میزان خاک ریزدانه بیشتری نسبت به مدل اول استفاده شده است. برای بررسی روند نشت و فشار در داخل بدنه سد از پیژومتر و برای تعیین محل خط فریاتیکی (خط نشت) از چاهک‌های مشاهده‌ای استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۱- مدل فیزیکی فلوم ساخته شده و پیژومترها



شکل ۲- تزریق مواد رنگی

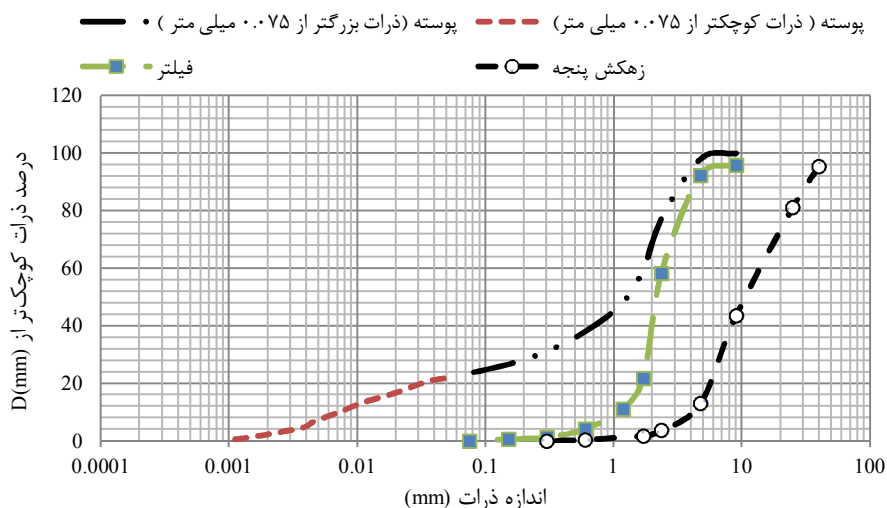


شکل ۳- چاهک‌های مشاهده‌ای

مصالح بدنه اصلی مدل: به دلیل شرایط آزمایشگاهی و کوچک بودن ابعاد مدل نسبت به نمونه اصلی و جلوگیری از نشت زیاد آب، جنس SC (ماسه و رس) برای مصالح بدنه سد خاکی همگن انتخاب شده است. ماسه مورد استفاده در آزمایش دارای دامنه دانه‌بندی ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر بود. رس مورد استفاده در این آزمایش از رسوبات

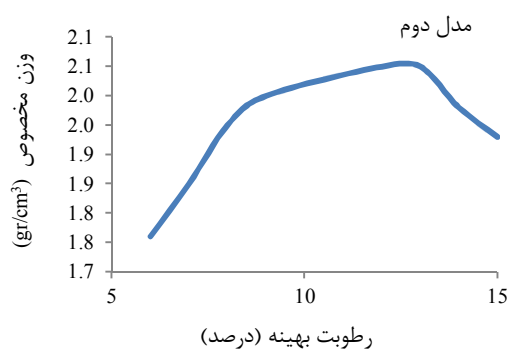
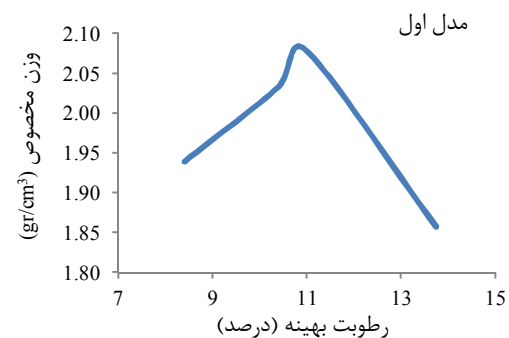
جدول ۲- درصد ذرات کوچک‌تر از ۰.۰۷۵ میلی‌متر				
شماره لایه	۱	۲	۳	۴
درصد ریز دانه	۲۲	۲۴	۲۳	۲۵/۵

ریزدانه استفاده شد. هنگام اجرا چهار نمونه خاک از چهار لایه مختلف برای دانه‌بندی برداشت شد (جدول ۲). در شکل ۵ منحنی دانه‌بندی پوسته، فیلتر و زهکش پنجه آورده شده است.



شکل ۵- منحنی دانه‌بندی پوسته، فیلتر و زهکش

تراکم بالای ۹۰ درصد (با توجه به نتایج آزمایش‌های تراکم) رسید.



شکل ۶- نتایج آزمایش تراکم استاندارد در دو نمونه رس

آزمایش تراکم آزمایشگاهی و صحرایی: آزمایش تراکم استاندارد برای تعیین درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد خشک خاک روی خاک‌های مورد استفاده در هر دو مدل انجام شد (شکل ۶).

ساخت مدل سد خاکی: در این مرحله ابتدا مصالح لازم شامل ماسه و خاک‌رس و مصالح فیلتر فراهم شدند. با توجه به شیب‌های مناسب برای ساخت سد خاکی همگن شیب 1V:2H برای بالادست و پایین‌دست بدنه انتخاب و روی فلوم ترسیم شد. برای اجرای مدل ابتدا لایه‌ای با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر از فیلتر به طول ۹۰ سانتی‌متر (برابر با طول زهکش افقی) و عرض ۵۰ سانتی‌متر در پایین‌دست مدل (از محل پنجه) اجرا شد. سپس ماسه با خاک رسی نرم مخلوط شده و در حدود رطوبت بهینه مرطوب شدند. لازم به ذکر است که در مدل اول کل ماسه مصرف شده برای ساخت مدل که حدود ۳۵۰۰ کیلوگرم بود با حدود ۳۵۰ کیلوگرم خاک رسی مخلوط شد. در اجرای مدل لایه‌های ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر از ماسه و رس در طول فلوم بر اساس شیب بالادست و پایین‌دست بدنه مدل پهن شده با غلطک ۳۰ کیلوگرمی در مدل اول با ۲۵ دور رفت و برگشت و در مدل دوم با ۲۰ دور رفت و برگشت و

آزمایش‌ها بررسی روند نشت با حضور زهکش افقی و پنجه: در این پژوهش همان‌طور که در آزمایش‌ها شاهد معلوم شد خط فریاتیکی با شیب پایین دست در فاصله ۸۶ سانتی‌متری از پنجه سد برخورد کرد. برای کنترل و عبور ایمن آن از دو نوع زهکش افقی و پنجه استفاده شده است.

بدین منظور از شاخص $\frac{p}{h}$ (ارتفاع زهکش و h ارتفاع آب مخزن) استفاده شده است. دلیل انتخاب این نسبت بی بعد در این پژوهش به عنوان یک پارامتر در طراحی زهکش پنجه رابطه مستقیم سطح آب در مخزن (h) با موقعیت خط فریاتیکی و محل خروج آن از شیب پایین دست و همچنین تغییر در ارتفاع زهکش پنجه است. قابل توجه است که زاویه ۴۵ درجه برای زهکش پنجه زاویه بهینه بوده که صحت این موضوع در پژوهش‌های زیاد بیان شده است (نجف‌پور خویگانی، ۱۳۹۰؛ میسرا و سینگ، ۲۰۰۵ و مرندی و باقری‌پور، ۱۳۸۳). در این تحقیق سه شاخص $\frac{p}{h}$ مختلف در نظر گرفته شده است. همچنین برای استفاده از شاخص $\frac{p}{h}$ باید در یک طول بهینه زهکش، خط فریاتیکی از داخل سیستم زهکش عبور کند (شکل ۷).



شکل ۷- زهکش پنجه در سه شاخص $\frac{p}{h}$ و سه زاویه

لازم به ذکر است در این پژوهش علاوه بر برداشت فشار آب منفذی با پیژومترها در نقاط مختلف و مقایسه آن با مدل نرم‌افزاری تلاش شده است که از داده‌های فشار پیژومتر و مقایسه آن‌ها با خطوط فریاتیکی در حالت‌های موجود برای ترسیم خطوط نشت دیگر حالت‌ها استفاده شود. خطای این روش در مقیاس طراحی بزرگ قابل صرف‌نظر کردن است. موقعیت نصب پیژومترها در مدل آزمایشگاهی در جدول ۳ و مشخصات زهکش‌های پنجه مدل در جدول ۴ آورده شده است.

آزمایش‌ها و برداشت داده‌ها: در این پژوهش آزمایش‌ها انجام شده برای تعیین الگوی نشت از بدنه سدهای خاکی به ۱۳ عدد تقسیم بندی شده است. قابل ذکر است که در آزمایش‌های انجام شده بررسی میزان و الگوی نشت با ۳ ارتفاع آب در بالادست و در حالت با و بدون زهکش افقی و پنجه بررسی شد.

آزمایش‌های مدل اول: برای بررسی روند نشت از مواد رنگی استفاده شد ولی همان‌طور که گفته شد خطوط رنگی جریان نشت با پخش شدن این مواد رنگی در خاک از بین رفته و محل خطوط جریان تا انتهای پایین دست مدل مشخص نشدند. در این مدل به دلیل کم بودن میزان رس، نفوذپذیری قائم بدنه سد نسبت به نفوذپذیری افقی زیادتر بوده و خطوط نشت به طور تقریبی در پایین دست به طور کامل افت کرده و در حالتی که زهکش افقی باز بوده است از زهکش افقی و در حالتی که زهکش افقی بسته بود از کف فلوم خارج می شدند. به همین دلیل از این مدل نتایج مطلوبی به دست نیامده است.

آزمایش‌های بررسی روند نشت بدون حضور زهکش: در این آزمایش‌های آب در بالادست سد در ۳ ارتفاع ۳۰ و ۵۵ و ۸۰ سانتی‌متری تنظیم شد. در هر آزمایش آب به تدریج به ارتفاع مورد نظر رسید و تا پایان هر آزمایش ارتفاع آب در سه سطح مذکور ثابت نگه داشته شد (اشباع شدن محیط خاک). با عبور جریان نشت، آب در داخل پیژومترها به تدریج بالا آمد و اشباع شدن محیط خاک ثابت شد. اشباع شدن محیط متخلخل خاک در حدود ۷ ساعت در هر آزمایش به طول انجامید. در ارتفاع ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری اولین خط جریان (خط فریاتیکی) هیچ نقطه از شیب پایین دست را قطع نکرده است و در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری آب در بالادست خط فریاتیکی شیب پایین دست را در فاصله ۸۶ سانتی‌متری از پنجه سد قطع کرد. این مجموعه آزمایش‌ها برای یافتن یک معیار مقایسه (شاهد) برای بررسی عملکرد زهکش افقی و پنجه‌ای در میزان افت خطوط جریان، خصوصاً اولین خط جریان انجام شد.

آزمایش‌های مدل دوم: در این مدل ۳ آزمایش بدون زهکش و با حضور زهکش افقی و ۹ آزمایش با حضور زهکش پنجه انجام شد. در زیر هر گروه از آزمایش‌ها توضیح داده شده است.

جدول ۳- موقعیت نصب پیزومترها در مدل آزمایشگاهی

پیزومتر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
x(m)	۱/۸	۲	۲/۲	۲/۴	۲/۶	۲/۸	۳	۳/۲	۳/۴	۳/۶
y(m)	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
پیزومتر	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
x(m)	۳/۸	۴	۴	۲/۲	۲/۴	۲/۶	۲/۸	۳	۳/۲	۳/۴
y(m)	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
پیزومتر	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
x(m)	۳/۶	۳	۲/۲	۲/۴	۲/۶	۲/۸	۳	۲	۲/۲	۲/۴
y(m)	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۷	۰/۷

جدول ۴- مشخصات زهکش پنجه‌ای در مدل آزمایشگاهی

وضعیت	۱	۲	۳
ارتفاع آب در مخزن (cm)	۸۰	۸۰	۸۰
ارتفاع زهکش (cm)	۱۷	۲۰	۲۸
طول زهکش (cm)	۳۸	۴۴	۶۲
p/h	۰/۲۱۲۵	۰/۲۵	۰/۳۵

آزمایش‌های نشت از مدل سد خاکی همگن: آزمایش‌های بررسی نشت با مدل آزمایشگاهی در این پژوهش در ۱۴ دسته طبقه‌بندی شد که شامل آزمایش‌های با و بدون زهکش پنجه‌ای است. مشاهدات و اندازه‌گیری‌های انجام شده در آزمایشگاه شامل اندازه‌گیری ارتفاع آب در ۳۰ پیزومتر نصب شده در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری بوده است. نتایج حاصل از این دو سری داده در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر آب در مخزن برای حالت‌های مختلف آورده شده است.

برای به دست آوردن خط فریاتیک در حالت‌های مختلف از ارتفاع آب در پیزومترها استفاده می‌شود. خط فریاتیک نهایتاً از روی پیزومترهای واقع در بدنه فلوم برداشت شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش تراز آب در پیزومترهایی که در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از کف قرار داشتند با خطوط فریاتیک اندازه‌گیری شده (با چاهک‌ها) در جدول ۵ مقایسه شدند. در این جدول نمونه‌ای از تعیین خط نشت از روی مقایسه بین پیزومترها و چاهک‌های مشاهداتی، بدین صورت قابل بیان است.

با در نظر گرفتن مقادیر T (خطای بین چاهک‌ها مشاهداتی و پیزومترها) برای موارد مختلف آزمایش شده

خط نشت برداشت شد. در ادامه از تلاقی خط برداشت شده با بدنه پایین دست سد خاکی (نقطه A نشان داده شد است) به دست آمد. مراحل تلاقی دادن، روابط ریاضی خطوط نشت در مدل‌های آزمایشگاهی با زهکش، شیب پایین دست و همچنین خط نشت در حالت بدون زهکش در جدول ۶ نشان داده شده است. در نهایت اختلاف ارتفاع خط نشت در حالت با زهکش و بدون زهکش به دست آمد که نماینده افت حاصل از زهکش می‌باشد. در نقاط انتهایی دو خط نشت (با زهکش و شاهد) با S نمایش داده شده است. پس هر قدر میزان S (افت حاصل از زهکش) بیشتر باشد زهکش مناسب‌تر است. لازم به ذکر است مقدار افت بین دو خط با زهکش و نمونه شاهد (بدون زهکش) با S در شکل‌ها نشان داده شده است. نکته حائز اهمیت مقایسه ارتفاع این نقطه با حالت بدون زهکش (شاهد) می‌باشد. این مقایسه، مقایسه بین ارتفاع نقاط انتهایی صورت پذیرفت و در نهایت اختلاف ارتفاع خط فریاتیک در مدل‌های مختلف با حالت بدون زهکش مقایسه شد و بهترین حالت برای زاویه و شاخص p/h زهکش پنجه معرفی شد. در شکل ۱۳ این موارد برای مدل‌های مختلف زهکش قابل مشاهده است. همچنین دیگر حالت‌های به همین ترتیب تعیین و با اضافه کردن این میزان اصلاحی به خط برداشتی از پیزومترها مقدار T

اختلاف خط برداشتی از چاهک‌ها و پیزومترها) اضافه شد و خط فریاتیکی برای محاسبات بعدی معرفی شده است.

جدول ۵- روش به دست آوردن (T) (میزان تغییر بین خط فریاتیکی و ارتفاع آب در پیزومترها را با پارامتر T نمایش داده شده است).

T	خط نشت	ارتفاع آب در پیزومتر پنجه ۴۵ درجه مقطع سه (cm)	ارتفاع آب از کف (cm) Y	پیزومتر	فاصله از پاشنه
-۲/۶	۶۶/۵	۵۴	۶۴	۱	۱۸۰
-۰/۲	۶۳/۲	۵۳	۶۳		۱۹۰
۲/۲	۵۹/۷	۵۲	۶۲	۲	۲۰۰
۴/۸۵	۵۶/۴	۵۱/۲۵	۶۱/۲۵		۲۱۰
۷/۵	۵۳	۵۰/۵	۶۰/۵	۳	۲۲۰
۹	۵۰	۴۹	۵۹		۲۳۰
۱۰/۵	۴۷	۴۷/۵	۵۷/۵	۴	۲۴۰
۱۱/۵	۴۱	۴۲/۵	۵۲/۵	۵	۲۶۰
۱۲/۷۵	۳۸	۳۹	۵۰/۷۵		۲۷۰
-۱۳	۲۸	.	۱۵	۸	۳۲۰
-۱۵	۱۵	.	.	۹	۳۴۰

جدول ۶- تعیین بهترین زهکش (منظور از پنجه ۱ و ۴۵) زهکش با زاویه ۴۵ درجه در مقطع ۱ است).

نوع زهکش	معادله به دست آمده از دو نقطه آخر	معادله خط زهکش	معادله بندنه پایین دست	نقطه B		نقطه A		S
				x	y	x	p	
بدون زهکش	$y=-0.217x+110.4$		$y=-0.5x+210$	۳۵۱/۹	۳۴/۰۲			
پنجه (۱ و ۴۵)	$y=-0.23x+112.4$	$y=x-382$	$y=-0.5x+210$	۴۰۱/۲	۱۹/۲	۳۹۴/۵	۱۲/۶	*
پنجه (۲ و ۴۵)	$y=-0.24x+114.8$	$y=x-376$	$y=-0.5x+210$	۳۹۴/۲	۱۸/۲	۳۹۰/۴	۱۴/۶	*
پنجه (۳ و ۴۵)	$y=-0.48x+182$	$y=x-385$	$y=-0.5x+210$	۳۶۴/۶	۶/۶۱	۳۷۸/۶	۲۰/۶	۱۹/۷
پنجه (۱ و ۶۰)	$y=-0.245x+114.1$	$y=1.73x-662.4$	$y=-0.5x+210$	۳۹۳/۴	۱۷/۸۱	۳۹۰/۵	۱۴/۶۲	*
پنجه (۲ و ۶۰)	$y=-0.258x+116$	$y=1.73x-652$	$y=-0.5x+210$	۳۸۵	۱۶/۶	۳۸۵/۸	۱۶/۸	۰/۲۸
پنجه (۳ و ۶۰)	$y=-0.305x+123.9$	$y=1.73x-620$	$y=-0.5x+210$	۳۶۵/۲	۱۲/۵	۳۷۱/۸	۲۳/۸	۱۳
پنجه (۱ و ۹۰)	$y=-0.243x+114.2$	$x=382$	$y=-0.5x+210$	۳۸۲	۲۱/۳	۳۸۲	۱۹	*
پنجه (۲ و ۹۰)	$y=-0.251x+114.9$	$x=376$	$y=-0.5x+210$	۳۷۶	۲۰/۵	۳۷۶	۲۲	۱۵
پنجه (۳ و ۹۰)	$y=-0.3x+134.3$	$x=358$	$y=-0.5x+210$	۳۸۵	۱۷/۴	۳۵۸	۳۱	۹/۵

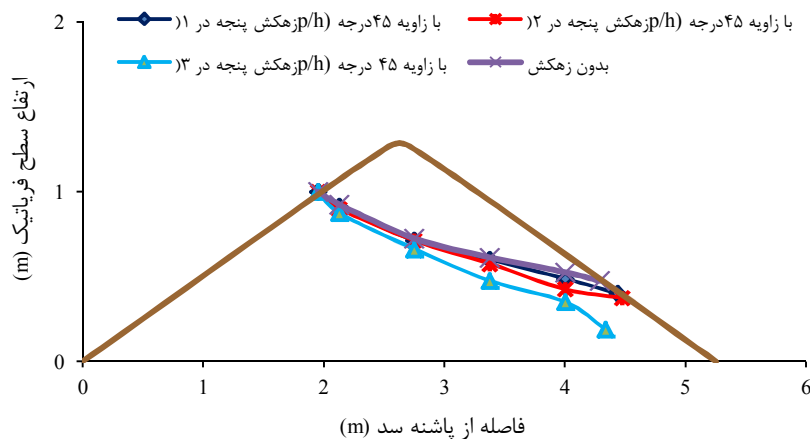
شده است. این افت رابطه مستقیمی با میزان $\frac{p}{h}$ دارد. در این نمودار وضعیت خط فریاتیکی در حالت‌های مختلف مقایسه شده و شاخص بی‌بعد $\frac{p}{h}$ برای کاربرد در دیگر مدل‌ها معرفی شده است. به همین دلیل برای بی‌بعد کردن این نمودار لازم است که ارتفاع سد و طول در پی سد به پارامتر مستقل مؤثری تقسیم شده باشد. در این

چاهک‌های مشاهداتی: خط نشت از قرائت چاهک‌های مشاهداتی و اصلاح کردن آن برداشت شده است. آزمایش برای عمق آب ۸۰ سانتی‌متری انجام شد و نتایج به صورت شکل ۸ حاصل شده است.

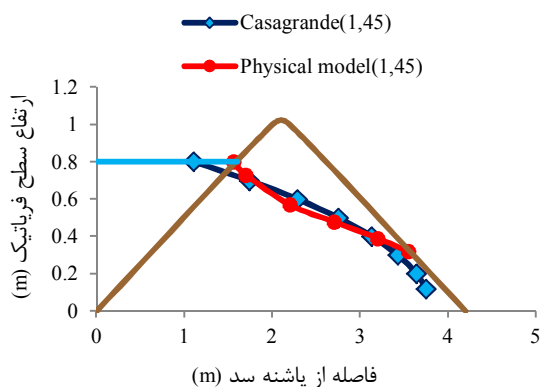
همان‌طور که دیده می‌شود، زهکش با زاویه ۴۵ درجه بهترین عملکرد را دارد و خط فریاتیکی دارای افت بیشتری

است. نتایج این آزمایش‌ها با روش کاساگراند در شکل‌های ۹ تا ۱۲ مقایسه شده‌اند.

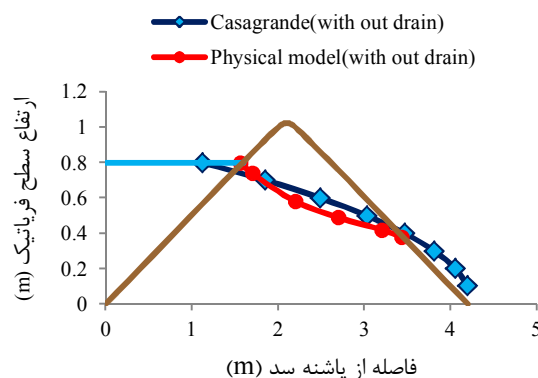
پژوهش ارتفاع آب در پشت دیواره در حالت حداکثر به عنوان پارامتر مستقل و مناسب اختیار شده است. مقایسه خطوط نشت آزمایشگاهی با روش کاساگراند: نتایج نشان داده است که بهترین زاویه برای زهکش ۴۵ درجه



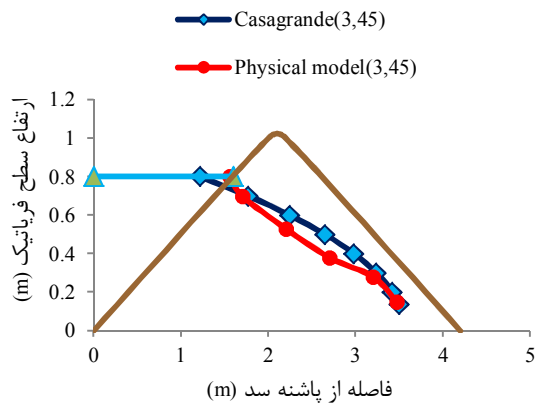
شکل ۸- خطوط فریاتیگ برداشت شده حاصل از آزمایش



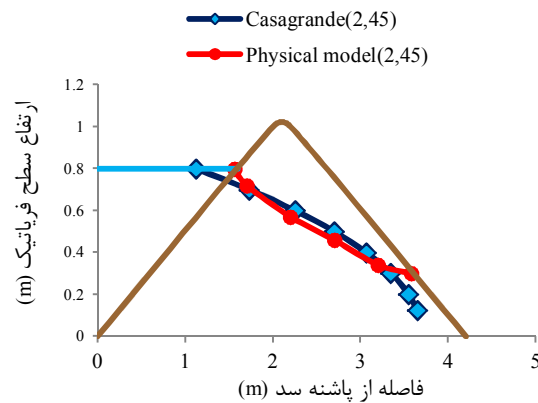
شکل ۹- مقایسه خط فریاتیگ در مدل فیزیکی با روش کاساگراند در حالت $p/h=1$ با زاویه ۴۵ درجه



شکل ۱۰- مقایسه خط فریاتیگ در مدل فیزیکی با روش کاساگراند در حالت بدون زهکش



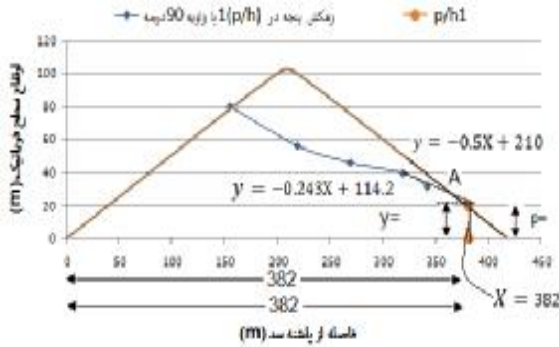
شکل ۱۱- مقایسه خط فریاتیگ در مدل فیزیکی با روش کاساگراند در حالت $p/h=3$ با زاویه ۴۵ درجه



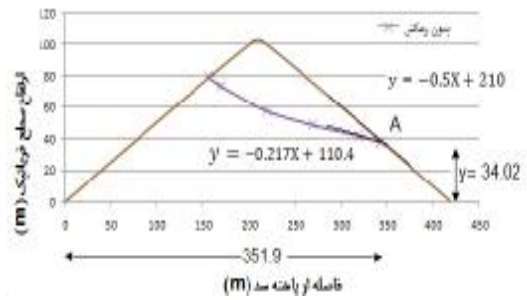
شکل ۱۲- مقایسه خط فریاتیگ در مدل فیزیکی با روش کاساگراند در حالت $p/h=2$ با زاویه ۴۵ درجه

خط در یک دستگاه به دست می‌آید. از برخورد خط پایین دست بدنه سد با خط زهکش مختصات نقطه B به دست آمده است که فاصله این دو نقطه نمایانگر مقدار S است، که در شکل‌های ۱۳ برای حالت‌های با زهکش و بدون زهکش نمایش داده شده است.

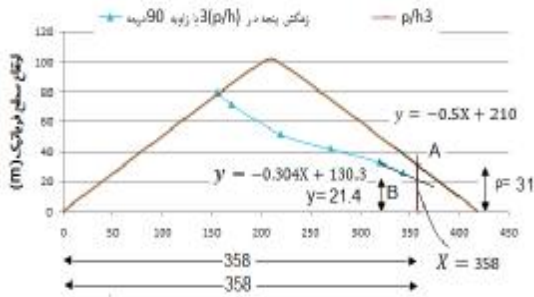
به دست آوردن معادلات خطوط نشت آزاد: در بررسی‌ها از دو نقطه آخر مدل آزمایشگاهی برای رسم خط فریاتیک استفاده شد. برای به دست آوردن محل برخورد خط نشت با پایین دست، معادله خط حاصل با معادله خط زهکش معادل قرار داده می‌شود (نقطه A) و مقدار Y (فاصله محل برخورد خط نشت با زهکش تا کف فلوم) از حل دو معادله



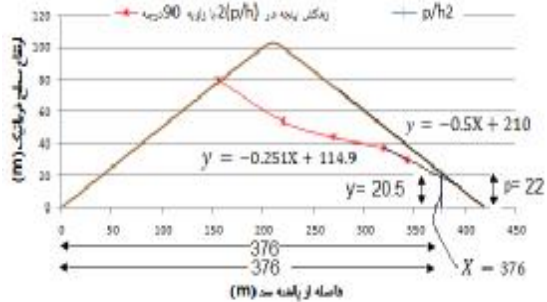
ب) خط نشت زهکش (p/h) با زاویه ۹۰



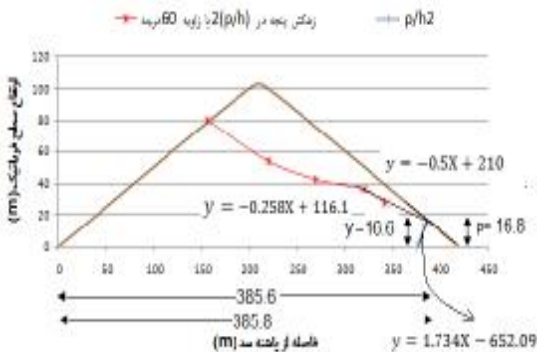
الف) خط نشت آزاد حالت بدون زهکش



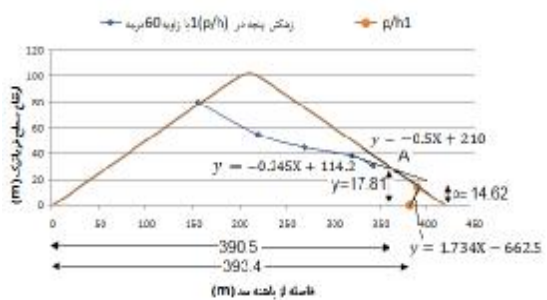
ت) خط نشت زهکش ۳ (p/h) با زاویه ۹۰



پ) خط نشت زهکش ۲ (p/h) با زاویه ۹۰

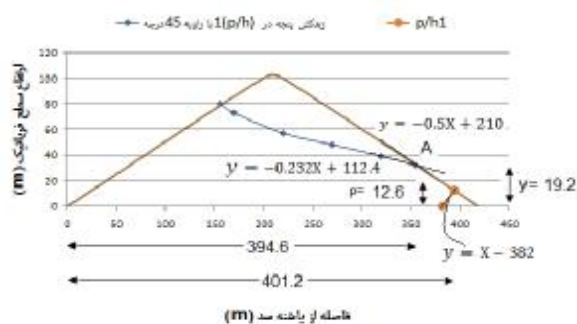


ج) خط نشت زهکش ۲ (p/h) با زاویه ۶۰

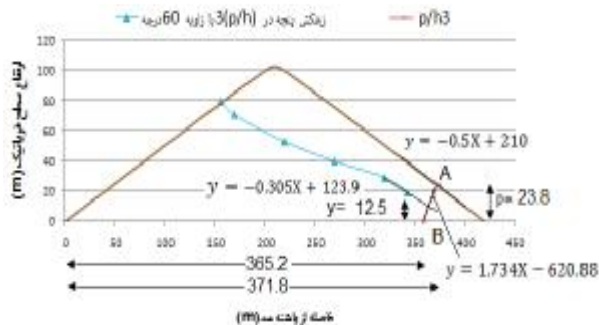


ث) خط نشت زهکش ۱ (p/h) با زاویه ۶۰

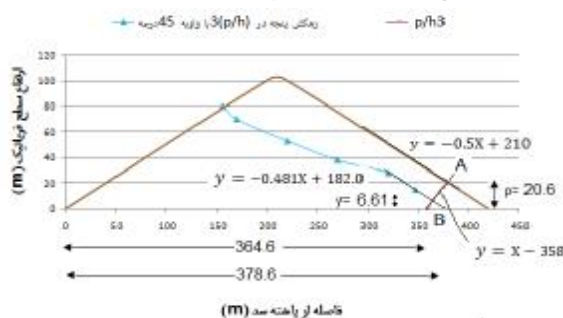
شکل ۱۳- حالت‌های مختلف خط نشت



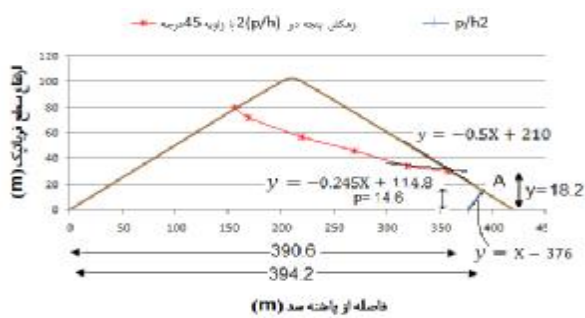
ح) خط نشت زهکش (p/h) ۱ با زاویه ۴۵



چ) خط نشت زهکش ۳ (p/h) با زاویه ۶۰



د) خط نشت زهکش ۳ (p/h) با زاویه ۴۵



خ) خط نشت زهکش ۲ (p/h) با زاویه ۴۵

ادامه شکل ۱۳-

۲. رحیمی ح. ۱۳۸۵. سدهای خاکی (چاپ دوم). انتشارات دانشگاه تهران. ۳۵۸ ص.
۳. طاحونی ش. ۱۳۸۵. اصول اجرایی در مورد سدهای خاکی، چاپ سیزدهم، مؤسسه انتشارات پارس آیین تهران. ۵۷۵ ص.
۴. مردندی م. و باقری پور م. ح. ۱۳۸۳. ارزیابی مدل تحلیلی نومروف در کنترل نشت آب از سدهای خاکی همگن و ایزوتروپ. اولین کنگره ملی مهندسی عمران، ۲۲ تا ۲۳ اردیبهشت ماه. دانشگاه صنعتی شریف.
۵. وفائیان م. ۱۳۸۵. اطلاعات اجرایی در مورد سدهای خاکی (چاپ دوم). انتشارات ارکان دانش اصفهان. ۴۸۴ ص.
6. Mishra G. C. and Singh A. K. 2005. Seepage through a levee. International Journal of Geomechanic ASCE. 5: 74-79.
7. Rakshshanderoo G. and Bagherieh A. 2006. Three dimensional analysis of seepage in 15 KHORDAD dam after impoundment. Iranian journal of Science and Technology. 30(B1): 55-68.
8. Singh A. K. 2008. Analysis of flow in a horizontal toe filter. The 12th international conference of International Association for computer methods and advance in geomechanics (IACMAG), 1-6 October, Gao, India. pp. 2449-2455.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که از قبل نیز اشاره شده بود، P ارتفاع زهکش و Y ارتفاع برخورد خط فریاتیک با زهکش است که مقدار S از رابطه فاصله دو نقطه در صفحه محاسبه شده است. فاصله دو نقطه A تا B از این روش محاسبه شده و در جدول ۶ نشان داده شده است. مقدار S برای حالت‌هایی که خط نشت از داخل زهکش عبور می‌کند در جدول ۶ نشان داده شده است که با توجه به بیشترین میزان S، بهترین حالت برای زهکش پنجه‌ای (۳ و ۴) است که مقدار h میزان آب پشت دیواره و همچنین ارتفاع p برای بهترین حالت $p/h = 0.35$ به دست آمده است. بدین ترتیب برای طراحی سد خاکی همگن با ارتفاع حداکثر آبی، می‌توان بهترین زهکش (ارتفاع زهکش معرفی شده از شاخص بی‌بعد با زاویه به طور تقریبی ۴۵ درجه) را برای بند خاکی طراحی کرد. با در نظر گرفتن این امر مهم که حتماً خط نشت در زهکش برخورد کند تا از رگاب در بدنه سد خاکی جلوگیری به عمل آورد.

منابع

۱. اسکروچی ع. م. ۱۳۸۴. آزمایشگاه مکانیک خاک (چاپ سوم). انتشارات دانشگاه تهران. ۴۳۵ ص.