عنوان

چکیده:

به‌طور معمول برای جمع‌آوری و هدایت زه آب در سدهای خاکی از سیستم زهکشی استفاده می‌شود. هدف آناز این کار خشک نگه داشتن شیب پایین دست سد و جلوگیری از افزایش فشار آب منفذی در بدنه است. علاوه بر این، زهکش بایستی که با پایدار نمودن بدنه سد خاکی دارای حداقل ابعاد نیز باشد. با توجه به این موضوع به نظر می‌رسد که یافتن راهی جهت محاسبه ابعاد و شکل بهینه زهکش در سد خاکی همگن و ناهمگن از اهمیت اقتصادی و فنی بالایی برخوردار باشد. بنابراین هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی برخی پارامترهای مهم سد بود که این پارامترها دارای نقش اساسی در هزینه‌های ساخت سد و قابلیت اطمینان سد هستند. در این راستا ابتدا ضریب اطمینان سد به‌ازای طول‌های مختلف زهکش و سایر پارامترهای مهم سد محاسبه شد و سپس میزان تاثیر هر کدام از این پارامترها در شرایط برابر، بر ضریب اطمینان مشخص گردید. نتایج نشان داد که در اغلب موارد برای فراهم آوردن حداقل ضریب اطمینان برای سدهای همگن و ناهمگن، استفاده از حداکثر مقدار ممکن برای شیب سد و نیز استفاده از مصالح با کیفیت پایین در بدنه سد بلامانع بود. البته با بالا رفتن حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز سد ممکن است چنین چیزی امکان‌پذیر نباشد. در نهایت نتایج نشان داد که به‌منظور حصول ابعاد بهینه زهکش کافی است که یک درون‌یابی ساده انجام شود.

کلمات کلیدی: سد همگن، سد ناهمگن، زهکش، پایداری شیروانی، ژئواستودیو.

۱- مقدمه

سدها یکی از سازه‌های مهم در سیستم‌های انتقال و منابع آب می‌باشند. این سازه‌ها از زمان‌های قدیم بدون دست‌یابی به اطلاعات کامل هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، هیدرومکانیکی و غیره ساخته شده‌اند. (پیرستانی و شفقتی، ۱۳۸۸). پایداری سد در هنگام تخلیه سریع آب پشت سد از موارد بسیار مهم طراحی سد می‌باشد. در طی فرآیند تخلیه سریع آب، اثرات پایداری آب در بالادست از بین می‌رود، اما فشار آب منفذی در خاکریز ممکن است که کماکان بالا بماند. بر اثر این پدیده، پایداری خاکریز بالادست می‌تواند بیشتر کاهش یابد. استفاده از زهکش افقی راه‌حلی بسیار مناسب برای کاهش فشار آب منفذی و افزایش پایداری خاکریز بالادست است (محرمی و همکاران[1]، ۲۰۱۴). اگرچه این زهکش‌ها با کاهش فشار حفره‌ای اضافی باعث بهبود هرچه بیش‌تر پایداری شیروانی خاکی می‌شوند، اما از سوی دیگر منجر به افزایش دبی نشت پایدار می‌گردند. از همین‌رو برای رسیدن به طرح مناسب این زهکش بایستی پارامترهای مختلف طراحی از جمله عرض، طول، تعداد و موقعیت زهکش‌ها را در نظر گرفت. بررسی این‌گونه از مسائل به روش المان محدود قابل انجام است (زمردیان و عبدالله‌زاده، ۱۳۹۱). در سال‌های اخیر مطالعاتی در خصوص بررسی اثر زهکش‌ها بر پایداری سد خاکی انجام شده است.

[1] Moharrami et al.

هره‌بر و همکاران (۱۳۹۶) آزمایش‌هایی را جهت تعیین مناسب‌ترین نوع سیستم زهکش جهت جلوگیری نشت انجام دادند. نتایج آنان نشان داد که سیستم زهکشی پنجه در طول و ضخامت متوسط دارای کم‌ترین میزان نشت است. همچنین زهکش پنجه با داشتن ضریب اطمینان ۱/۶۵۶ دارای بیش‌ترین پایداری در مقابل لغزش است. سیف‌الهی و سلماسی (۱۳۹۶) پایداری شیب بالادست سدهای خاکی در دو حالت بدون استفاده از زهکش‌های افقی بالادست و در حضور زهکش‌های افقی بالادست در حالت افت سریع تراز آب مخزن را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که مقدار ضریب اطمینان در حالت استفاده از زهکش‌های افقی، افزایش محسوسی می‌یابد. اژدری مقدم وربانی‌فر (۱۳۹۶) اثر نفوذپذیری پی بر ابعاد زهکش افقی در سد خاکی با هسته رسی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که تعبیه زهکش افقی با نفوذپذیری مناسب و طول ماکزیمم باعث کاهش ۹۰ درصد از دبی پی می‌شود؛ در صورتی‌که پرده آب‌بند به‌طول تمام ارتفاع پی باعث درصد بسیار متفاوتی از کاهش آن می‌شود. نوروزی‌سرکارآبادی و سلماسی (۱۳۹۶) اثر زهکش افقی بر مقدار دبی نشتی از سد را به‌صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که با افزایش طول زهکش افقی، دبی نشتی افزایش ولی ارتفاع خط فریاتیک کاهش می‌یابد. وطن‌خواه و وفایی‌پورسرخابی (۱۳۹۵) اثر استفاده از زهکش افقی، در کاهش اثرات نشت از سد خاکی همگن را توسط نرم‌افزار Seep/w بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که با افزایش طول زهکش افقی، دبی نشت افزایش یافته، ولی وجود زهکش باعث کاهش خطر پدیده زیرشویی پی و بدنه می‌گردد. دارایی و ملکی (۱۳۹۷) اثر هندسه زهکش بر پاسخ دینامیکی سد خاکی همگن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مرحله لرزه‌ای، زهکش دودکشی قائم طی زلزله اضافه فشار آب حفره‌ای کم‌تری نسبت به زهکش مایل ایجاد می‌کند. همچنین در مرحله پسالرزه‌ای مقادیر نشست ناشی از تحکیم با افزایش زاویه زهکش افزایش پیدا می‌کند.

ایمانی و نگهدار (۱۳۹۲)، تأثیر طول زهکش دودکشی در کاهش گرادیان خروجی در سد موردی جغناب در شرایط تراوش ماندگار با استفاده از نرم‌افزار Seep/W را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با اتصال زهکش افقی به زهکش مایل، میزان جریان نشتی از زهکش بسیار افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که قابلیت تخلیه آب زهکش تا حدود ۱۵٪ بیش‌تر می‌شود. در شرایط ناهمسان، با افزایش ضریب نفوذپذیری جهت x مصالح پوسته نسبت به جهت y، افزایش طول زهکش مایل نیز باعث افزایش جریان نشتی می‌شود. بهترین حالت زهکش برای سد هسته‌دار، ترکیب زهکش افقی با مایل خواهد بود. داوری و برخورداری بافقی (۱۳۹۴) اثر تغییر ابعاد و ضریب نفوذپذیری زهکش افقی سد خاکی خیرآباد بر میزان جریان نشتی از این سد با استفاده از نرم‌افزار Seep/w را انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش طول و ضخامت و ضریب نفوذپذیری، دبی افزایش یافته اما تاثیر طول بیش از ضخامت و ضریب نفوذپذیری است و تاثیر ضخامت کمتر از طول و ضریب نفوذپذیری می‌باشد. محمود (۱۳۹۵) اثر زهکش افقی در سد خاکی همگن را با Seep/W بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که افزایش طول زهکش افقی متناسب با دبی نشتی از سد بوده و نسبت عکس با نیروی زیر فشار دارد. کانچانا[2] و همکاران (۲۰۱۵) بررسی کنترل نشت در سدهای خاکی در قسمت هسته رسی را انجام دادند و با تجزیه و تحلیل مواد مختلف و مطالعه رفتار خط فریاتیک در پایین‌دست با تغییر طول موثر زهکش افقی به نتایج و فرمول‌هایی برای پایداری سد خاکی دست یافتند. کالاماک[3] (۲۰۱۸) بررسی اثر زهکش پنجه‌ای و دودکشی را در سد خاکی همگن به‌صورت عددی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش طول زهکش، سرعت تراوش افزایش می‌یابد و خط فریاتک کوتاه می‌شود. اگر جنس مصالح زهکش دودکشی نسبتاً درشت باشد، خط فریاتک در هسته تندتر می‌شود و هنگامی که ارتفاع زهکش پنجه‌ای افزایش می‌یابد سرعت تراوش بیش‌تر می‌شود. لیو[4] و همکاران (۲۰۱۸) ارزیابی نشت و پایداری یک سیستم زهکش جدید به‌منظور افزایش ارتفاع سدهای باطله را انجام دادند. نتایج نشان داد که سیستم زهکشی جدید می‌تواند به‌طور موثری فشار نشت را از بین ببرد، سطح فریاتیک را کاهش دهد و ضریب ایمنی پایداری شیب را بهبود بخشد. الجنابی[5] و همکاران (۲۰۲۰) بررسی نشت در سدهای خاکی توسط مدل‌های فیزیکی، ریاضی و عددی را بررسی نمودند. در این تحقیق هفت نوع سد شامل چهار سد همگن و سه سد ناهمگن

[2] Kanchana
[3] Calamak
[4] Liu
[5] Al-Janabi

بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که اگر مقدار کافی خاک ماسه سیلتی در اطراف محل سد موجود باشد، یک سد خاکی همگن با طول زهکش متوسط به ضخامت ۰/۵ متر بهترین نوع طراحی است. در غیر این صورت، سد با هسته مرکزی و شیب ۰/۱:۵ ترجیح داده می شود. اگرچه روش استفاده از زهکش‌های افقی در سدهای خاکی، یک نظریه به‌خوبی اثبات شده است ولی به نظر می‌رسد که منابع موجود برای طراحی زهکش‌های افقی محدود است. همچنین در صورت یافتن ابعاد بهینه آن‌ها عملکرد این‌گونه سدها بهبود یافته و از لحاظ هزینه‌های مالی و صرف هزینه، عملیات احداث سد بسیار کوتاه و به‌صرفه خواهد بود. لذا با توجه به مطالب فوق‌الذکر، ضرورت بررسی پژوهش حاضر تعیین می‌گردد. بنابراین این پژوهش با هدف رسیدن به ابعاد بهینه زهکش افقی در سد خاکی همگن و ناهمگن و کاهش هزینه‌های ساخت صورت گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

به‌طور کلی دو رویکرد متفاوت توسط محققین برای تعیین فشار آب منفذی پس از افت سطح آب در مخزن اتخاذ گردیده است که طی آن عده‌ای از محققین رفتار زهکشی شده و عده‌ای دیگر رفتار غیر زهکشی شده را برای سد خاکی در نظر گرفتند. اسوانو و نوردال (۱۹۸۷)، رایت و دانکن (۱۹۸۷)، لین و گریفیس (۲۰۰۰) و برگلین (۲۰۰۷) جهت بررسی پایداری شیب خاکی پس از تغییرات سطح آب مخزن، پارامترهای مقاومت برشی مؤثر خاک را در شرایط زهکشی شده مورد بررسی قرار دادند. بر اساس تحقیقات آن‌ها بیش از ۹۹ درصد اضافه فشار آب منفذی ناشی از افت سطح آب مخزن به ازای $T\geq 3$ مستهلک گردیده و به ازای زمان‌های بیش‌تر از آن باید رفتار زهکشی شده در تحلیل پایداری شیب خاکی در نظر گرفته شود.

$$T = \frac{C_v . T_d}{H^2} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، H طول مسیر زهکشی، C_v ضریب تحکیم و T_d زمان تحکیم است (ملک‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

۲-۱- معرفی سد

سد مروک یکی از سدهای خاکی (سنگریزه‌ای با هسته رسی) استان لرستان در شهرستان درود می‌باشد که در سال ۱۳۸۲ و با هدف قابلیت ذخیره‌سازی تا حدود ۱۲۰ میلیون متر مکعب در سال از آب تیره‌رود، تامین نیاز آبی اراضی توسعه کشاورزی پایاب سد در حدود ۵۰ میلیون متر مکعب در دشت سیلاخور (منطقه ۷) به وسعت ۵۵۰۰ هکتار، تامین حق آبه‌های اراضی موجود و کنترل سیلاب احداث شده است. این سد دارای ارتفاع ۶۷ متر از کف رودخانه و طول تاج ۴۵۱ متر است.

۲-۲- روش پژوهش

در این پژوهش ابتدا دو نوع سد خاکی همگن و ناهمگن با مشخصات فیزیکی مختلف در نرم‌افزار Geostudio مورد تحلیل قرار گرفت. در این بررسی با تغییر دادن ابعاد زهکش، جنس مصالح و همچنین شیب بدنه سد، ضریب اطمینان به‌دست آمده از نرم‌افزار محاسبه گردید. پس از به‌دست آمدن ضرایب اطمینان سد برای حالات مختلف، نتایج خروجی به‌دست آمده با کمک نرم‌افزار Matlab تحلیل و با بهره‌گیری از شبکه عصبی، بهینه‌سازی گردید تا با کمک نتایج این پژوهش بتوان بهینه‌ترین حالت را برای ساخت سدهای خاکی تعیین کرد. در سد ناهمگن دامنه تغییرات زاویه Ø مصالح بدنه سد از ۲۷ تا ۳۵ و برای زهکش سد از ۳۳ تا ۴۰ است.

جهت بررسی مدل همگن از سه ارتفاع به اندازه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر استفاده شده است. فرمول محاسبه طول تاج سد $BS\frac{H}{5}+3$ می‌باشد. در سد همگن دو شیب ۱:۲ و ۱:۳ مفروض است که در شیب ۱:۲، بدنه سد دارای شیب بیش‌تری است. بدیهی است که با کم کردن شیب بدنه سد از حجم عملیات خاکی ساخت کاسته شده و هزینه اجرا نیز به‌تبع آن کاهش می‌یابد.

عوامل تاثیرگذار بر ضریب اطمینان، میزان شیب سد و زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه سد و زهکش می‌باشد. مقادیر بهینه پارامترهای تاثیرگذار در ضریب اطمینان سد باید به ترتیب اولویت بتوانند شرایط زیر را برای سد فراهم کنند:

۱- حداقل ضریب اطمینان خواسته شده برای سد فراهم شود.
۲- شیب سد و یا جنس مصالح سد بهینه باشد؛ یعنی در صورت امکان سد دارای بیش‌ترین شیب ممکن و یا مصالح دارای زاویه اصطکاک داخلی کم باشند که این دو عامل هر کدام به تنهایی و یا هر دو با هم هزینه‌های ساخت سد را به شکل چشم‌گیری کاهش می‌دهند.
۳- ابعاد زهکش سد بهینه باشد یعنی حاصل‌ضرب طول در ضخامت زهکش دارای حداقل مقدار ممکن باشد. جدول (۱) انواع حالات در نظر گرفته شده برای سد همگن و جدول (۲) حالات در نظر گرفته شده برای سد ناهمگن را نشان می‌دهد.

جدول (۱): ابعاد در نظر گرفته شده برای سد همگن

ارتفاع	طول تاج	طول قائده	شیب
۱۰	۵	۴۵	۱:۲
۲۰	۷	۸۶	۱:۲
۲۰	۷	۱۲۶	۱:۳
۱۰	۵	۶۲	۱:۳
۳۰	۹	۱۳۰	۱:۲
۳۰	۹	۱۸۹	۱:۳

جدول (۲): شرایط اولیه برای سد ناهمگن

	زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد	زاویه اصطکاک مصالح زهکش	شیب سد	طول زهکش	ضخامت زهکش
حالت اول	۲۷	۳۳	۱:۳	۱۳۱	۲/۲۵
حالت دوم	۳۵	۴۰	۱:۳	۱۳۱	۲/۲۵

علت در نظر گرفتن دو حالت فوق، ایجاد شرایطی برابر برای پیدا کردن بیش‌ترین تاثیر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد و زاویه اصطکاک مصالح زهکش در ضریب اطمینان سد است. به‌عبارت دیگر اگر فقط مقادیر حالت اول در نظر گرفته می‌شد؛ در اینصورت زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد می‌توانست بین ۲۷ تا ۳۰ تغییر کند. در حالی‌که زاویه اصطکاک مصالح زهکش می‌تواند بین ۳۳ تا ۴۰ تغییر کند و اگر فقط مقادیر حالت دوم در نظر گرفته می‌شد؛ در اینصورت زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد می‌توانست بین ۲۷ تا ۳۵ تغییر کند در حالی‌که زاویه اصطکاک مصالح زهکش می‌تواند بین ۳۷ تا ۴۰ تغییر کند. در هر کدام از دو حالت فوق یا زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد یا زاویه اصطکاک مصالح زهکش نمی‌توانند حداکثر تغییرات ممکن خود را داشته باشند. بنابراین حداکثر تاثیرگذاری آن‌ها در ضریب اطمینان سد قابل حصول نبود. در ادامه نتایج بررسی حالات فوق ارائه می‌گردد.

۲-۳- شبکه عصبی سدهای همگن

در این پژوهش از تولباکس شبکه عصبی نرم‌افزار متلب جهت آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. شبکه عصبی مورد استفاده برای سد همگن دارای دو لایه و شش ورودی و یک خروجی می‌باشد. ورودی‌های شبکه عصبی به ترتیب عبارتند از ۱- زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه سد ۲- زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه زهکش ۳- شیب سد ۴- ضخامت زهکش ۵- ارتفاع سد و ۶- طول زهکش، و خروجی شبکه عصبی برابر با ضریب اطمینان سد می‌باشد. در شبکه عصبی مربوط به سد همگن از ۳۵ نرون در لایه اول و یک نرون در لایه دوم استفاده شده است. الگوریتم آموزشی مورد استفاده برای شبکه عصبی Bayesian Regularization است که نسبت به سایر الگوریتم‌های آموزشی، دارای زمان اجرای طولانی‌تر و در عوض دقت بالاتری در آموزش شبکه عصبی است.

۲-۴- شبکه عصبی سدهای ناهمگن

شبکه عصبی در نظر گرفته شده برای سد ناهمگن نیز دارای دو لایه ولی پنج ورودی و یک خروجی است. ورودی‌های شبکه عصبی سد ناهمگن به ترتیب عبارتند از ۱- زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه سد ۲- زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه زهکش ۳- شیب سد ۴- ضخامت زهکش و ۵- طول زهکش، و خروجی شبکه عصبی برابر با ضریب اطمینان سد می‌باشد. در شبکه عصبی مربوط به سد ناهمگن از ۲۵ نرون در لایه اول و یک نرون در لایه دوم استفاده شده است. الگوریتم آموزشی مورد استفاده برای شبکه عصبی سد ناهمگن نیز Bayesian Regularization است.

۳- بحث و نتایج

در این قسمت بررسی حالت اول در نظر گرفته شده برای شرایط اولیه سد ناهمگن ارائه شده است.

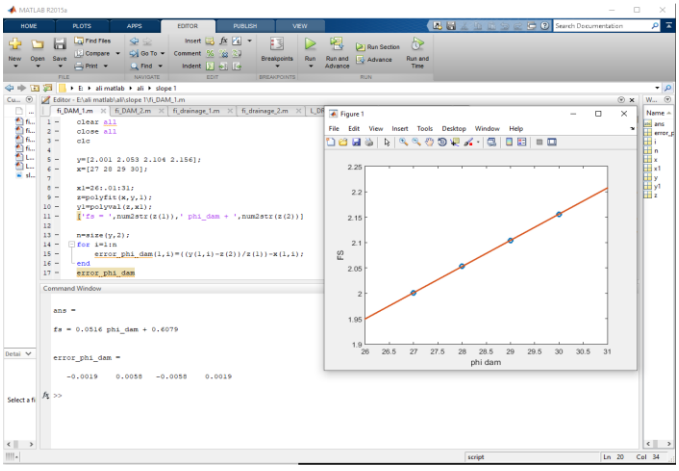
۳-۱- بررسی تاثیر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد در ضریب اطمینان سد

در این حالت، زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد به‌صورت پله‌های واحد از ۲۷ تا ۳۰ تغییر داده شد. نتایج این بررسی در جدول (۳) ارائه شده است. در این حالت، حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به ازای حداکثر تغییر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد برابر ۰/۱۵۵ است.

جدول (۳): تاثیر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد در ضریب اطمینان سد به ازای حالت اول از شرایط اولیه

زاویه اصطکاک سد	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
ضریب اطمینان سد	۲/۰۰۱	۲/۰۵۳	۲/۱۰۴	۲/۱۵۶

در ادامه، جدول فوق توسط نرم‌افزار متلب ترسیم گردید که در شکل (۲) نشان داده است. در این شکل، محور عمودی برابر ضریب اطمینان سد و محور افقی برابر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد است. مطابق شکل (۲) خط ترسیم شده دقیقا از تمام نقاط عبور می‌کند اما جهت حذف خطاهای بصری از این مسئله، ضرایب اطمینان موجود را به تابع خطی تقریب زده شده، داده و ضریب اصطکاک سد تقریب زده شده، محاسبه گردیده و سپس با مقدار دقیق ضریب اصطکاک سد مقایسه شده و اختلاف آن‌ها به عنوان خطای ضریب اصطکاک سد در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقادیر این خطا بسیار ناچیز است. بنابراین تقریب خطی برای این حالت بسیار مناسب است یعنی با تقریب مناسب می‌توان گفت که رابطه ضریب اصطکاک سد با ضریب اطمینان سد خطی است.



شکل (۲): تقریب خطی مربوط به تاثیر زاویه فی مصالح بدنه سد بر ضریب اطمینان سد ناهمگن به ازای حالت اول از شرایط اولیه

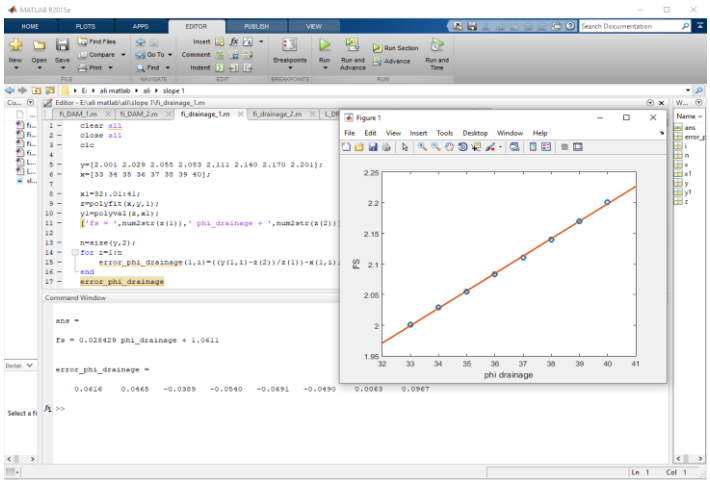
۳-۲- بررسی تاثیر زاویه اصطکاک مصالح زهکش در ضریب اطمینان سد

در این حالت، زاویه اصطکاک مصالح زهکش به‌صورت پله‌های واحد از ۳۳ تا ۴۰ تغییر داده شد. نتایج این بررسی در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین در شکل (۳) تقریب خطی تاثیر زاویه اصطکاک مصالح زهکش در این حالت ارائه شده است.

جدول (۴): تاثیر زاویه اصطکاک مصالح زهکش در ضریب اطمینان سد به ازای حالت اول از شرایط اولیه

زاویه اصطکاک زهکش	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
ضریب اطمینان سد	۲/۰۰۱	۲/۰۲۹	۲/۰۵۵	۲/۰۸۳	۲/۱۱۱	۲/۱۴	۲/۱۷	۲/۲۰۱

در این حالت، حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به ازای حداکثر تغییر زاویه اصطکاک زهکش برابر ۰/۲ است. مطابق با شکل (۳) مشاهده می‌شود که زاویه اصطکاک مصالح زهکش با ضریب اطمینان سد، رابطه خطی دارد.



شکل (۳) تقریب خطی مربوط به تاثیر زاویه اصطکاک مصالح زهکش بر ضریب اطمینان سد ناهمگن به ازای حالت اول از شرایط اولیه

۳-۳- بررسی تاثیر شیب سد در ضریب اطمینان سد

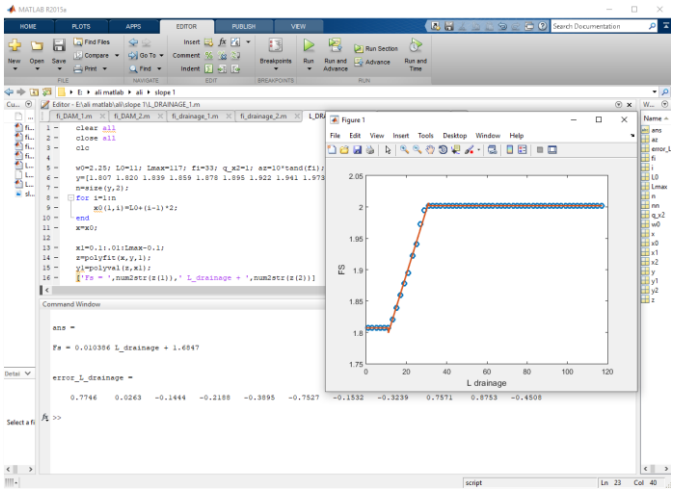
در این بررسی شیب ۳ شیب اصلی سد مروک است و شیب ۲ نسبت به شیب ۳ و شیب ۱ نسبت به شیب ۲ تندتر است. نتایج حاصل از این بررسی در جدول (۵) ارائه شده است. در این حالت، حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به ازای حداکثر تغییر شیب سد برابر ۰/۱۹۵ است.

جدول (۵): تاثیر شیب سد در ضریب اطمینان سد به ازای حلت اول از شرایط اولیه

شیب سد	شیب ۱	شیب ۲	شیب ۳
ضریب اطمینان سد	۱/۸۰۶	۱/۸۸۱	۲/۰۰۱

۳-۴- بررسی تاثیر طول زهکش در ضریب اطمینان سد

در این حالت، طول زهکش در پله‌های بزرگ‌تری مطابق با جدول (۶) تغییر داده شد (در پله‌های ۴ متری به جای ۲ متری). در این حالت، حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به‌ازای حداکثر تغییر طول زهکش برابر ۰/۱۹۵ است. در شکل (۴) نیز تقریب خطی مربوط به تاثیر طول زهکش بر ضریب اطمینان سد ناهمگن نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در این حالت، نیز طول زهکش با ضریب اطمینان سد رابطه خطی دارد.



شکل (۴): تقریب خطی مربوط به تاثیر طول زهکش بر ضریب اطمینان سد ناهمگن به‌ازای حالت اول از شرایط اولیه

۳-۵- بررسی تاثیر ضخامت زهکش در ضریب اطمینان سد

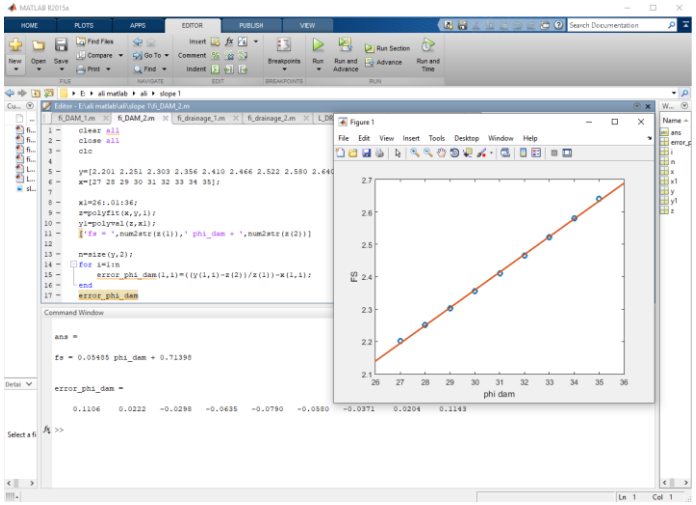
ضخامت زهکش در این سد ناهمگن تنها دارای دو مقدار مجاز ۲/۲۵ و ۳/۲۵ متر است که ضریب اطمینان متناظر با آن‌ها به ترتیب برابر ۲/۰۰۱ و ۲/۰۱۹ است. در این حالت حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به‌ازای حداکثر تغییر ضخامت زهکش برابر ۰/۰۱۸ است که از همین‌جا می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر ضخامت زهکش در ضریب اطمینان سد کم است؛ زیرا محدوده مجاز تغییرات آن بسیار محدود است. در ادامه نتایج بررسی حالت دوم که برای شرایط اولیه سد ناهمگن در نظر گرفته شده، ارائه گردیده است.

۳-۶- بررسی تاثیر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد در ضریب اطمینان سد

در این حالت، زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد به‌صورت پله‌های واحد از ۲۷ تا ۳۵ تغییر یافت. نتایج این بررسی در جدول (۶) و نتایج تقریب خطی زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد بر ضریب اطمینان سد ناهمگن در شکل (۵) ارائه شده است. در این حالت، حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به‌ازای حداکثر تغییر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد برابر ۰/۴۳۹ است. مطابق با شکل (۵) زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد با ضریب اطمینان سد، رابطه خطی دارد.

جدول (۶): تاثیر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد در ضریب اطمینان سد به ازای حالت دوم از شرایط اولیه

زاویه اصطکاک سد	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵
ضریب اطمینان سد	۲/۲۰۱	۲/۲۵۱	۲/۳۰۳	۲/۳۵۶	۲/۴۱	۲/۴۶۶	۲/۵۲۲	۲/۵۸	۲/۶۴



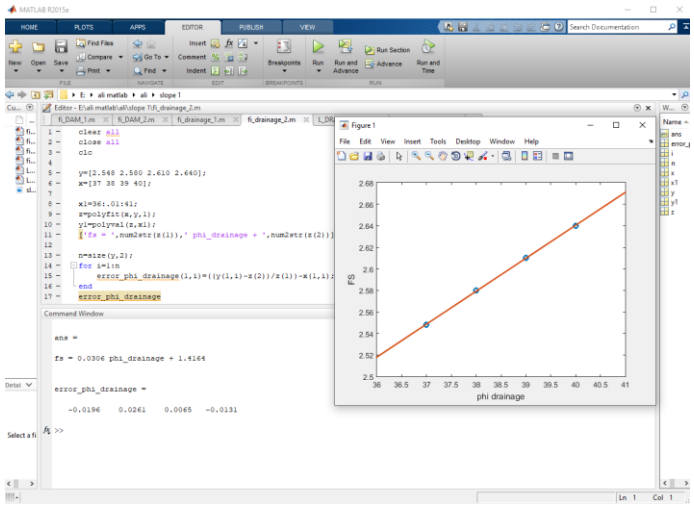
شکل (۵): تقریب خطی مربوط به تاثیر زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد بر ضریب اطمینان سد ناهمگن به‌ازای حالت دوم از شرایط اولیه

۳-۷- بررسی تاثیر زاویه اصطکاک مصالح زهکش در ضریب اطمینان سد

در این حالت زاویه اصطکاک مصالح زهکش به‌صورت پله‌های واحد از ۳۷ تا ۴۰ تغییر یافت. نتایج این بررسی در جدول (۷) و نتایج تقریب خطی زاویه اصطکاک مصالح زهکش بر ضریب اطمینان سد ناهمگن در شکل (۶) ارائه شده است. در این حالت حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به‌ازای حداکثر تغییر زاویه اصطکاک مصالح زهکش برابر ۰/۰۹۲ است. مطابق با شکل (۶) مشاهده می‌شود که زاویه اصطکاک مصالح زهکش با ضریب اطمینان سد، رابطه خطی دارد.

جدول (۷): تاثیر زاویه اصطکاک مصالح زهکش در ضریب اطمینان سد به‌ازای حالت دوم از شرایط اولیه

زاویه اصطکاک زهکش	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
ضریب اطمینان سد	۲/۵۴۸	۲/۵۸	۲/۶۱	۲/۶۴



شکل (۶): تقریب خطی مربوط به تاثیر زاویه اصطکاک مصالح زهکش بر ضریب اطمینان سد ناهمگن به‌ازای حالت دوم از شرایط اولیه

۳-۸- بررسی تاثیر شیب سد در ضریب اطمینان سد

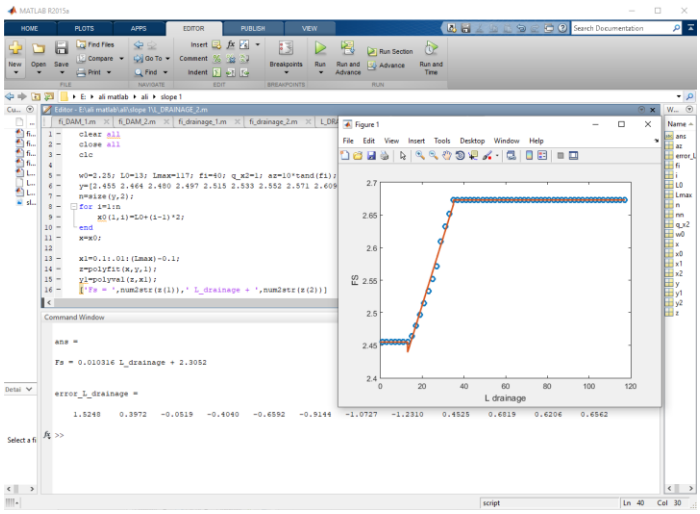
در این بررسی شیب ۳ شیب اصلی سد مروک است و شیب ۲ نسبت به شیب ۳ و شیب ۱ نسبت به شیب ۲ تندتر است. نتایج حاصل از این بررسی در جدول (۸) ارائه شده است. در این حالت، حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به‌ازای حداکثر تغییر شیب سد برابر ۰/۲۵۷ است.

جدول (۸): تاثیر شیب سد در ضریب اطمینان سد به‌ازای حالت دوم از شرایط اولیه

شیب سد	شیب ۱	شیب ۲	شیب ۳
ضریب اطمینان سد	۲/۳۸۳	۲/۴۸	۲/۶۴

۳-۹- بررسی تاثیر طول زهکش در ضریب اطمینان سد

در جدول (۹) طول زهکش در پله‌های بزرگ‌تری (در پله‌های ۴ متری به جای ۲ متری) تغییر یافته است. در این حالت حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به‌ازای حداکثر تغییر طول زهکش برابر ۰/۲۱۸ است. در شکل (۷) نیز تقریب خطی مربوط به تاثیر طول زهکش بر ضریب اطمینان سد ناهمگن ارائه شده است. مطابق شکل (۷) مشاهده می‌شود که طول زهکش با ضریب اطمینان سد، رابطه خطی دارد.



شکل (۷): تقریب خطی مربوط به تاثیر طول زهکش بر ضریب اطمینان سد ناهمگن به‌ازای حالت دوم از شرایط اولیه

۳-۱۰- بررسی تاثیر ضخامت زهکش در ضریب اطمینان سد

ضخامت زهکش در این سد ناهمگن تنها دارای دو مقدار مجاز ۲/۲۵ و ۳/۲۵ متر است که ضریب اطمینان متناظر با آن‌ها به ترتیب برابر ۲/۶۴ و ۲/۶۵۷ است. در این حالت حداکثر میزان تغییر ضریب اطمینان به‌ازای حداکثر تغییر ضخامت زهکش برابر ۰/۰۱۷ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر ضخامت زهکش در ضریب اطمینان سد کم است زیرا محدوده مجاز تغییرات آن بسیار محدود است. در جدول (۹) خلاصه نتایج حاصل از تاثیر هریک از عوامل ذکر شده در قسمت‌های پیشین بر ضریب اطمینان سد مروک ارائه شده است.

جدول (۹): خلاصه نتایج

	حداکثر تاثیر روی ضریب اطمینان (حالت اول شرایط اولیه)	حداکثر تاثیر روی ضریب اطمینان (حالت دوم شرایط اولیه)	میانگین حداکثر تاثیر روی ضریب اطمینان
زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد	۰/۱۵۵	۰/۴۳۹	۰/۲۹۷
زاویه اصطکاک مصالح زهکش	۰/۲	۰/۰۹۲	۰/۱۴۶

شیب سد	۰/۱۹۵	۰/۲۵۷	۰/۲۲۶
طول زهکش	۰/۱۹۵	۰/۲۱۸	۰/۲۰۷
ضخامت زهکش	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷۵

از جدول فوق می‌توان نتیجه گرفت عوامل موثر در ضریب اطمینان سد ناهمگن در این مورد مطالعاتی به ترتیب عبارتند از: ۱- زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه سد یا به اختصار زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد ۲- شیب پایین‌دست سد ۳- طول زهکش سد ۴- زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه زهکش ۵- ضخامت زهکش سد. عوامل (۱) و (۲) نه تنها بیش‌ترین تاثیر را در ضریب اطمینان سد دارند؛ بلکه قسمت عمده‌ای از هزینه‌های ساخت سد را نیز به خود اختصاص می‌دهند. از طرفی تاثیر عوامل (۳) و(۴) در ضریب اطمینان سد دست کمی از عوامل (۱) و (۲) ندارند؛ با این تفاوت که هزینه‌های ساخت آن‌ها به مراتب کمتر است. بنابراین از نقطه نظر هزینه و ضریب اطمینان در سد ترجیح داده می‌شود که در صورت امکان و عدم وجود محدودیت و فراهم شدن حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز سد، جهت کاهش هزینه‌های ساخت سد از مصالح با زاویه اصطکاک داخلی کم (ارزان قیمت) در بدنه سد استفاده شود و یا سد دارای بیش‌ترین شیب ممکن باشد. همچنین جهت تامین حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز سد باید از مصالح با زاویه اصطکاک داخلی بالا (گران قیمت) در بدنه زهکش استفاده شود. البته به شرطی‌که استفاده از مصالح با زاویه اصطکاک داخلی پایین (ارزان قیمت) در بدنه زهکش، به ازای هیچ مقداری از طول زهکش قادر به تامین حداقل ضریب اطمینان برای سد نباشد و یا طول زهکش دارای مقدار مناسبی باشد. البته ممکن است با استفاده از مصالح با زاویه اصطکاک داخلی بالا در بدنه زهکش و در نظر گرفتن حداکثر طول ممکن برای زهکش، حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز سد فراهم نشود که در این حالت باید استفاده از عوامل (۱) یا (۲) و یا هر دو باهم (هر کدام که هزینه کم‌تری داشته باشد و حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز سد را نیز فراهم کند) نسبت به افزایش ضریب اطمینان سد تا رسیدن به حداقل مورد نیاز اقدام شود.

در ادامه از روش شبکه عصبی برای یافتن ضرایب اطمینان سد به ازای پارامترهای مختلف استفاده شده است.

۳-۱۱- بهینه‌سازی پارامترهای سدهای همگن و ناهمگن

به علت هزینه‌های بالای ساخت سدهای خاکی، این سدها می‌بایست از یک حداقل ضریب اطمینان بهره‌مند باشند. در این پژوهش، حداقل ضریب اطمینان برای سدهای همگن و ناهمگن برابر دو در نظر گرفته شد و سعی بر این بود که این حداقل ضریب اطمینان توسط زهکش برای سد تامین شود. در این راستا یک برنامه M-file در نرم‌افزار متلب نوشته شد که همخوانی کامل با تابع شبکه عصبی سدهای همگن و ناهمگن داشت و قادر بود ضریب اطمینان حداقل را برای سد به گونه‌ای فراهم آورد که علاوه بر کاهش هزینه‌های ساخت سد، ابعاد زهکش سد نیز بهینه شود. با اجرای برنامه برای سد همگن، جدول (۱۰) به‌دست آمد.

جدول (۱۰): بهینه‌سازی پارامترهای سد همگن

زاویه اصکاک سد	زاویه اصطکاک زهکش	ارتفاع سد	شیب سد	طول بهینه زهکش	ضخامت بهینه زهکش	ضریب اطمینان سد
۲۷	۳۳	۱۰	۰/۵	۱۲	۰/۵	۲/۰۰۴
۲۷	۳۳	۱۰	۰/۳۳۳	۱۷	۰/۵	۲/۰۲۷
۲۷	۳۳	۲۰	۰/۵	-	۱/۵	همواره کمتر از ۲
۲۷	۳۳	۲۰	۰/۳۳۳	۳۳	۱	۲/۰۱۲
۲۷	۳۳	۳۰	۰/۵	۰→۳۰	۱	۲/۲۶۴
۲۷	۳۳	۳۰	۰/۳۳۳	۵۲	۱	۲/۰۱۴
۳۳	۴۰	۱۰	۰/۵	۰→۸	۰/۵	۲/۳۲۹
۳۳	۴۰	۱۰	۰/۳۳۳	۰→۱۵/۵	۰/۵	۲/۷۶۱
۳۳	۴۰	۲۰	۰/۵	۲۶	۱	۲/۰۲۲

۳۳	۴۰	۲۰	۰/۳۳۳	۰→۲۷	۱	۲/۴۱۶
۳۳	۴۰	۳۰	۰/۳	۰→۳۰	۱	۲/۲۵۷
۳۳	۴۰	۳۰	۰/۳۳۳	۰→۴۵	۱	۲/۳۹۶

در جدول فوق استفاده از اپراتور $0 \rightarrow b$ به این معناست که در این حالت جهت فراهم آمدن حداقل ضریب اطمینان برای سد نیازی به استفاده از زهکش نیست به همین دلیل حداقل طول موثر زهکش که برابر b متر است به‌عنوان طول زهکش انتخاب می‌شود. از جدول فوق چنین نتیجه شد که اگر ارتفاع سد همگن برابر ۱۰ متر باشد آن‌گاه پارامترهای سد دارای مقادیر بهینه زیر است.

جدول (۱۱): مقادیر بهینه پارامترهای سد همگن با ارتفاع ۱۰ متر

زاویه اصطکاک سد	زاویه اصطکاک زهکش	ارتفاع سد	شیب سد	طول بهینه زهکش	ضخامت بهینه زهکش	ضریب اطمینان سد
۲۷	۳۳	۱۰	۰/۵	۱۲	۰/۵	۲/۰۰۴

برای سد همگن با ارتفاع ۱۰ متر حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز فراهم شده، در بدنه سد از مصالح ارزان قیمت استفاده شده است. شیب سد در حداکثر مقدار ممکن قرار دارد و ابعاد زهکش سد نیز مینیمم است که تمامی این موارد به معنای کاهش هزینه‌های ساخت سد است. اگر ارتفاع سد همگن برابر ۲۰ متر باشد آن‌گاه پارامترهای سد می‌تواند هر کدام از دو مقدار زیر را اختیار کند:

جدول (۱۲): مقادیر بهینه پارامترهای سد همگن با ارتفاع ۲۰ متر

زاویه اصطکاک سد	زاویه اصطکاک زهکش	ارتفاع سد	شیب سد	طول بهینه زهکش	ضخامت بهینه زهکش	ضریب اطمینان سد
۲۷	۳۳	۲۰	۰/۳۳۳	۳۳	۱	۲/۰۱۲
۳۳	۴۰	۰	۰/۵	۲۶	۱	۲/۰۲۲

در مقادیر سطر اول، شیب سد کم‌تر است ولی در عوض در بدنه سد از مصالح ارزان قیمت استفاده شده است ولی در مقادیر سطر دوم، شیب سد بیش‌تر است ولی در عوض در بدنه سد از مصالح گران قیمت استفاده شده است. جهت انتخاب جواب بهینه باید بررسی شود که بین این دو حالت کدامیک هزینه کم‌تری خواهد داشت که در این راستا عواملی مانند هزینه فراهم آوردن مصالح مرغوب، هزینه حمل و نقل آن‌ها و مصالح محلی موجود و غیره تاثیرگذار هستند.

اگر ارتفاع سد همگن برابر ۳۰ متر باشد؛ آن‌گاه پارامترهای سد دارای مقادیر بهینه زیر است:

جدول (۱۳): مقادیر بهینه پارامترهای سد همگن با ارتفاع ۳۰ متر

زاویه اصطکاک سد	زاویه اصطکاک زهکش	ارتفاع سد	شیب سد	طول بهینه زهکش	ضخامت بهینه زهکش	ضریب اطمینان سد
۲۷	۳۳	۳۰	۰/۵	۰→۳۰	۱	۲/۲۶۴

برای سد همگن با ارتفاع ۳۰ متر، حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز سد فراهم شده، از مصالح ارزان قیمت استفاده شده است، شیب سد در حداکثر مقدار ممکن قرار دارد و ابعاد زهکش سد نیز مینیمم است که تمامی این موارد به‌معنای کاهش هزینه‌های ساخت سد است. با اجرای برنامه مذکور برای سد ناهمگن، جدول (۱۴) حاصل می‌شود.

جدول (۱۴): بهینه‌سازی پارامترهای سد ناهمگن

زاویه اصطکاک سد	زاویه اصطکاک زهکش	شیب سد	طول بهینه زهکش	ضخامت بهینه زهکش	ضریب اطمینان سد
۲۷	۳۳	۳	۵۰	۲/۲۵	۲/۰۰۰۲

۲۷	۳۳	۲	-	۲/۲۵	همواره کمتر از ۲
۲۷	۳۳	۱	-	۲/۲۵	همواره کمتر از ۲
۳۵	۴۰	۳	۰→۱۳	۲/۲۵	۲/۴۵۸۱
۳۵	۴۰	۲	۰→۱۲	۲/۲۵	۲/۳۳۷۶
۳۵	۴۰	۱	۰→۸	۲/۲۵	۲/۲۶۵۵

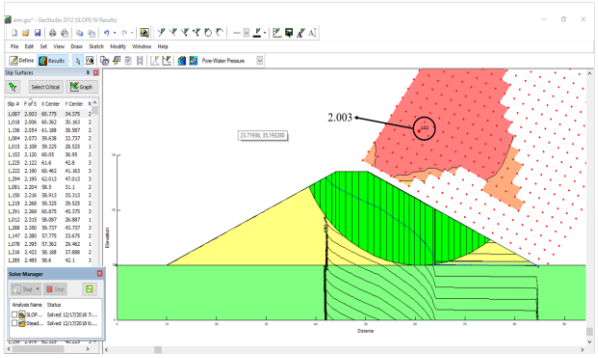
از جدول فوق می‌توان نتیجه گرفت که در سد ناهمگن مورد مطالعه در این پژوهش (سد مروک) پارامترهای سد دارای مقادیر بهینه جدول (۱۵) است. برای این سد حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز فراهم شده، از مصالح ارزان قیمت استفاده شده است، شیب سد در حداکثر مقدار ممکن قرار دارد و ابعاد زهکش سد نیز مینیمم است که تمامی این موارد به معنای کاهش هزینه‌های ساخت سد است. البته پارامترهای به‌دست آمده برای این سد در طی این مسئله بهینه‌سازی، ابعاد واقعی این سد را زیر سوال نمی‌برد زیرا در عمل به دلیل هزینه‌های بالای ساخت سدهای خاکی و نیز استهلاک سد در طول زمان، سدهای خاکی را با ضریب اطمینانی به مراتب بالاتر از حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز می‌سازند که همین دلیل موجب متفاوت بودن ابعاد سد در واقعیت می‌شود.

جدول (۱۵): مقادیر بهینه پارامترهای سد ناهمگن

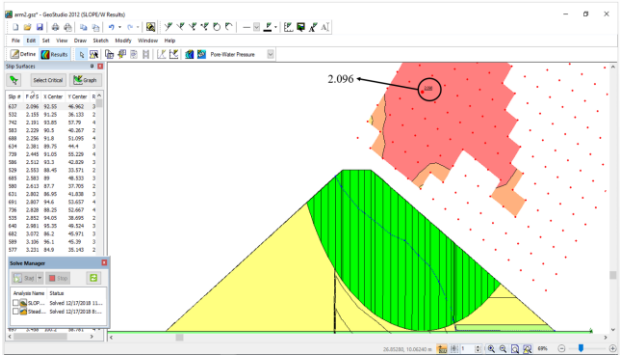
زاویه اصطکاک سد	زاویه اصطکاک زهکش	شیب سد	طول بهینه زهکش	ضخامت بهینه زهکش	ضریب اطمینان سد
۲۷	۳۳	۳	۵۰	۲/۲۵	۲/۰۰۰۲

۳-۱۲- درون‌یابی مساحت بهینه زهکش در سد همگن

به‌منظور بررسی این که آیا می‌توان ابعاد بهینه زهکش سد را با استفاده درون‌یابی به‌دست آورد یا خیر، دو سد با ارتفاع‌های ۱۷ و ۲۵ متر مدل گردید. به ازای سد همگن با ارتفاع ۱۰ متر، ابعاد بهینه زهکش برابر ۱۲×۰/۵ مترمربع و به ازای ارتفاع ۳۰ متر، ابعاد بهینه زهکش برابر ۳۰×۱ مترمربع می‌شود. با یک درون‌یابی ساده، رابطه ارتفاع سد با ابعاد بهینه زهکش به‌صورت [A=1/2h-6] به‌دست آمد که در آن h ارتفاع سد و A مساحت زهکش سد است. با استفاده از رابطه تقریبی فوق، ابعاد بهینه زهکش سد برای ارتفاع‌های ۱۷ و ۲۵ متر به ترتیب اعداد ۱۴/۴و ۲۴ متر مربع به‌دست آمد. این مساحت‌های بهینه باید بتوانند حداقل ضریب اطمینان ۲ را برای سد همگن فراهم آورند. با استفاده از نرم افزار Geostudio ابعاد بهینه زهکش ۱۵/۲=۲۰/۲۵×۰/۷۵ مترمربع برای سد همگن با ارتفاع ۱۷ متر و ۲۶/۶=۲۸×۰/۹۵ مترمربع برای سد همگن با ارتفاع ۲۵ متر به‌دست آمد (شکل ۸ و ۹). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد بهینه، حاصل از درونیابی تقریبی هستند. مقادیر ابعاد دقیق بهینه و ابعاد تخمین زده شده بهینه به هم نزدیک هستند و در ضمن ابعاد دقیق بهینه قادر هستند حداقل ضریب اطمینان ۲ را برای سد فراهم آورند.



شکل (۸): سد همگن با ارتفاع ۱۷ متر



شکل (۹): سد همگن با ارتفاع ۲۵ متر

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که عوامل ۱- زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه سد و ۲- شیب سد نه تنها بیش‌ترین تاثیر را در ضریب اطمینان سد دارند بلکه قسمت عمده‌ای از هزینه‌های ساخت سد را نیز به خود اختصاص می‌دهند. از طرفی تاثیر ۳- زاویه اصطکاک داخلی مصالح زهکش و ۴- طول زهکش در ضریب اطمینان سد دست کمی از دو عامل فوق ندارد؛ با این تفاوت که هزینه‌های ساخت آن‌ها به مراتب کم‌تر است. بنابراین از نقطه نظر هزینه و ضریب اطمینان در سد ترجیح داده می‌شود که در صورت امکان و عدم وجود محدودیت و فراهم شدن حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز سد، جهت کاهش هزینه‌های ساخت سد عوامل (۱) و (۲) را بهینه کرد و در صورت امکان جهت تامین حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز سد از عوامل (۳) و (۴) استفاده کرد. نتایج شبکه عصبی نیز نشان داد که ابعاد بهینه زهکش به‌دست آمده برای سدهای همگن به‌ازای سه ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر قابل تعمیم به سایر ارتفاع‌های بین ۱۰ تا ۳۰ متر هستند و برای این‌کار کافی است که یک درون‌یابی ساده انجام گیرد.

۵- منابع

۱- اژدری مقدم، مهدی و ربانی‌فر، مطهره، ۱۳۹۶. بررسی تاثیر نفوذپذیری پی بر ابعاد بهینه زهکش افقی در سد خاکی با هسته رسی. کنفرانس ملی معماری و عمران شهری، تربت جام، موسسه آموزش عالی وحدت تربت جام.

۲- ایمانی، ام البنین و نگهدار، رحمت الله، ۱۳۹۲. تأثیر طول زهکش مایل بر میزان دبی نشتی از بدنه سد خاکی هسته‌دار. همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین، کرج، شرکت سازه کویر.

۳- پیرستانی، محمدرضا؛ مهدی، شفقتی، ۱۳۸۸. بررسی اثرات زیست‌محیطی احداث سد. نشریه نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی، دوره ۱، شماره ۳.

۴- دارابی، مهدیه و ملکی، محمد، ۱۳۹۷. تأثیر هندسه زهکش بر پاسخ دینامیکی سدهای خاکی همگن. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷.

۵- داوری. رضا و برخورداری بافقی، کاظم، ۱۳۹۴. اثر تغییرات ابعاد و نفوذپذیری زهکش افقی بر روی دبی نشت در سدهای خاکی غیرهمگن مطالعه موردی سد خیرآباد. همایش بین‌المللی معماری عمران و شهرسازی در آغاز هزاره سوم، تهران، کانون سراسری انجمن‌های صنفی مهندسان معمار ایران.

۶- زمردیان، سیّد محمد علی؛ عبدالله‌زاده، سیّد مهدی، ۱۳۹۱. تاثیر زهکش‌های افقی بر پایداری شیروانی بالادست سدهای خاکی در حین تخلیه سریع مخزن. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد۴۲ ، شماره ۱.

۷- سیف اللهی، یاشار و سلماسی، فرزین، ۱۳۹۶. بررسی عددی پایداری شیب سدهای خاکی با احداث زهکش افقی در پوسته بالادست آن (مطالعه موردی: سد ستارخان). پنجمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس.

۸- محمود، علی، ۱۳۹۵. اثر طول زهکش افقی بر دبی نشتی، نیروی زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی در سد خاکی همگن توسط شبیه‌سازی عددی. فصلنامه علمی تخصصی مهندسی و مدیریت ساخت، سال اول، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵.

۹- نوروزی سرکارآبادی، رضا و سلماسی، فرزین، ۱۳۹۶. بررسی اثر زهکش افقی بر رفتار سد خاکی ناهمگن. اولین سمینار ملی بررسی چالش‌ها و راهکارهای مهندسی و مدیریتی دریاچه ارومیه، تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

۱۰- وطن خواه چرمخوران. عارف و وفایی پورسرخابی، رامین، ۱۳۹۵. بررسی تاثیر طول زهکش افقی بر میزان آبدهی در سدهای خاکی. کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس.

۱۱- هره بر، امیررضا؛ بوذری، علی و بیره بر، فرشاد، ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی اثر نوع سیستم زهکش بر میزان نشت از بدنه و پی سد خاکی همگن. ششمین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران، موسسه آموزش عالی میراروند-مرکز راه‌کارهای دستیابی به توسعه پایدار.

12- A Moharrami, Y Hassanzadeh, F Salmasi - Performance of the horizontal drains in upstream shell of earth dams on the upstream slope stability during rapid drawdown conditions, Arabian Journal of – Springer. 2014.
13- Berilgen MM, 2007. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. J Computers and Geotech 34: 81-91.
14- Kanchana H.J and et al(2015), "Adequacy of Seepage Analysis in Core Section of the Earthen Dam with Different Mix Proportions , Aquatic Procedia 4 (2015) 868 –875.
15- Lane PA and Griffiths DV, 2000. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. J Geotech and Geoenv Eng, ASCE 126(5): 443-450.
16- Svano G and Nordal S, 1987. Undrained effective stability analysis. Proc of the 9th European Conf on Soil Mech and Found Eng, 31 Aug-3 Sep. Dublin.
17- Wright SG and Duncan JM, 1987. An examination of slope stability computation procedures for sudden drawdown. Report GL-87-25. US Army Corps Engineering, Waterway Experiment Station.
18- Calamak, M, Yilmaz, A, Yanmaz, A. M. 2018. Performance Evaluation of Internal Drains of Earthen Dams. Journal of performance of constructed facilities, Vol. 32, No. 6.
19- Al-Jenabi, A. M., Ghazali, A. H., Ghazaw, Y. M., Afan, H. A., Al-Ansari, N. A., Yaseen, Z. M. 2020. Experimental and Numerical Analysis for Earth-Fill Dam Seepage. Journal of sustainability, Vol 12, 2490, pp. 1-14.
20- Liu, C, Shen, Z, Gan, L, Xu, L, Zhang, K, and Jin, T, 2018. The Seepage and Stability Performance Assessment of a New Drainge System to Increase the Height of a Tailing Dam. Journal of Environmental and Sustainable Science and Technology, Vol. 8, No. 10,