نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و هشتم/ شماره چهارم / زمستان ۱۴۰۳/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۷۷ تا ۱۹۲

تحلیل جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در بدنه و پی سد خاکی علویان

مهدی کوهدرق[۱*]، مهدی ماجدی اصل[۲]، توحید امیدپور علویان[۲]، ناصر نوبهاری[۲] و مرتضی ایامی لرد[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۱۹)

چکیده

سدها به‌عنوان سازه‌های مصنوعی دست‌ساز بشر، نقش بسیار مهمی در تأمین نیازهای آبی انسان در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت، تولید برق، و کنترل سیلاب ایفا می‌کنند. از مصالح مختلف خاکی مانند ماسه‌ای، رسی و سنگی برای ساخت و استقرار سدهای خاکی استفاده می‌شود. در این پژوهش با عنوان بررسی و تحلیل جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در بدنه و پی سد خاکی علویان با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W به بررسی اثرات جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در بدنه و پی پرداخته می‌شود. این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W به تحلیل جزئیات این فرایند می‌پردازد و نتایج به‌دست‌آمده را تجزیه‌وتحلیل می‌کند. مبانی نظری مرتبط با جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در سدهای خاکی و اهمیت آن‌ها در پایداری سدها، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی عمران مورد بحث‌وبررسی قرار می‌گیرند. روش‌های کنترل نشت آب از سدهای خاکی شامل استفاده از آب‌بند، دیواره‌های ساخته شده با ملات دوغاب، هسته‌های نفوذناپذیر، سپرکوبی فلزی و پتوهای نفوذناپذیر در بالادست سد است. در این مطالعه از زهکش، آب‌بند و پتوی رسی به‌عنوان روش‌های کنترل نشت آب استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از دیوار آب‌بند باعث کاهش میزان نشتی می‌شود؛ زیرا این دیواره مانع هدایت آب از بدنه سده می‌شود. به‌طور کلی، این پژوهش با ارائه نتایج به حالت کمی و توصیه‌هایی برای بهبود پایداری سدها و کاهش احتمال خطرات ناشی از جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی به پایان می‌رسد و عناصر مهمی را که در طراحی و ساخت سدهای خاکی باید در نظر گرفته شوند، بررسی می‌کند. در این مطالعه به بررسی اثرها و عملکرد سدهای خاکی با استفاده از روش‌های المان محدود پرداخته شده است و عملکرد هر یک از این سدها ارزیابی شده است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار المان محدود GEOSTUDIO استفاده شده است. نتایج حاصل از این مدل‌سازی شامل بررسی پارامترهایی مانند خطوط فریاتیک، تأثیر سطح آب پشت سد، پتوی رسی و آب‌بند است. همچنین مقدار دبی نشت یا به عبارت دیگر، میزان نشتی از بدنه سد برای حالت‌های مختلف تعریف‌شده در مدل استخراج و تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی، گرادیان هیدرولیک ، پرده رسی، ژئواستودیو

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملکان، آذربایجان شرقی، ایران.
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Mehdi_k550@yahoo.com

مقدمه

آب مهم‌ترین منابع طبیعی روی زمین است که روز به روز با افزایش سریع جمعیت نیاز به آن بیشتر می‌شود. امروزه تأمین آب در بسیاری از نقاط جهان به یکی از مسائل حیاتی تبدیل شده است و به همین دلیل ساخت سدهای ایمن و اقتصادی که بتوانند آب‌های سطحی و اضافی را مهار کنند، از اهمیت خاصی برخوردار است. محدودیت منابع آب در کشور ایران با متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر، آن را جزء مناطق خشک و نیمه خشک قرار داده است. این موضوع از زمان‌های قدیم عمده‌ترین مشکلات مردم را تشکیل داده و از موانع اصلی پیشرفت‌های کشاورزی، اقتصادی، اجتماعی و توسعه صنعتی است. گرایش روزافزون مردم به شهرنشینی، رشد اقتصادی و کشاورزی ضرورت ایجاد تأسیسات زیربنایی برای افزایش رفاه و سطح زندگی شهروندان و از طرفی عدم بازداری از این گرایش غیرصحیح، احداث سدهای آبی و بهره برداری بهینه از منابع آب موجود و به‌طور کلی تأمین نیازهای آبی در قطب‌های کشاورزی، صنعتی و غیره را الزام‌آور می‌سازد. در همین راستا یکی از روش‌های استفاده از منابع آب‌های سطحی، احداث سد در مسیر رودخانه‌هاست. از این طریق نه‌تنها می‌توان سیلاب‌ها را مهار کرده و از بروز خسارات جلوگیری کرد، بلکه می‌توان کمبود آب را به‌خصوص در امور کشاورزی به میزان چشمگیری جبران کرد. برای اجرای هر پروژه سدسازی، بررسی وضعیت آبگذری ساختگاه از جمله مهم‌ترین بخش‌های فازهای شناسایی، اجرا و بهره برداری است. مسئله آبگذری پی و تکیه‌گاه‌های سدها به‌شدت به خصوصیات زمین‌شناسی منطقه وابسته است و از آنجا که این خصوصیات در هر ساختگاه منحصر به فرد هستند، بنابراین الگوی ارائه‌شده برای هر ساختگاه متناسب با شرایط محل تعیین می‌شود. انجام چنین مطالعاتی برای هر طرح ضروری و دارای اهمیت است و بایستی روش مناسب آب‌بندی انتخاب شده و اجرا شود. تغییرات شبکه جریان آب زیرزمینی و افزایش بار هیدرولیکی آب در تکیه‌گاه‌ها و پی سد پس از آبگیری سدها از تبعات منفی احداث سد است. به‌منظور جلوگیری از پیامدهای منفی مانند فرسایش شالوده، شکست هیدرولیکی و فرار آب مخزن، روش‌های مختلفی اتخاذ می‌شود که احداث پرده آب‌بند یکی از این تدابیر محسوب می‌شود. میزان تأثیر پرده آب‌بند روی کاهش میزان دبی نشت از تکیه‌گاه‌ها و پی را می‌توان با استفاده از مدل‌سازی عددی از هر کدام از تکیه‌گاه‌ها و پی بررسی کرد. جریان آب از داخل پی و تکیه‌گاه سدها درصورتی‌که از حد مجاز تجاوز نکنند، از نقطه نظر مهندسی مسئله‌ای ندارد؛ ولی درصورتی‌که مقدار تلفات آب آنقدر باشد که از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد، کنترل آن لازم است. آب خارج‌شده از سدها به‌عنوان آب تلف‌شده محسوب می‌شود؛ اما این امکان وجود دارد که با کاهش نسبی عبور مقداری از جریان از طریق پی و تکیه‌گاه در حدود قابل قبول، هزینه‌های عملیات ساختمانی را کاهش داد. فتاحی (۵) در مطالعه‌ای بیان کردند صنعت سدسازی به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و پیچیده‌ترین فعالیت‌های عمرانی و ژئوتکنیکی، همواره مد نظر جوامع مختلف بوده و از نظر اقتصادی نیز یکی از منابع مهم اقتصادی هر کشور محسوب می‌شود. به‌علاوه طی سالیان اخیر در زمینه مهندسی سدسازی در موضوعات مختلف مطالعات زیادی انجام شده است. درخشندی و همکاران (۲) در مطالعه‌ای به مدل‌سازی عددی سد سنگریزه‌ای ونیار در ایران پرداختند و در این مدل‌سازی میزان نشت، فشار آب حفره‌ای و تنش کل برای ارزیابی رفتار کلی سد استفاده شد. مرادی و همکاران (۹) با هدف نهایی هیدرولیکی و درنهایت تضعیف پدیده پایپینگ، به بررسی مدل‌های مختلف از ساختار هندسی و عملکرد هیدرولیکی هسته رسی و زهکش پنجه در سدهای خاکی پرداختند. ازاین‌رو با مدل‌سازی 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 اندازه‌گیری فشار پیزومتریک در ۳۰ پیزومتر نصب‌شده روی کانال دیواره بررسی شدند. بر این اساس، سه

نسبت بی‌بعد با سه ارتفاع (۱۲، ۲۰ و ۲۸ متر) در زوایای مختلف (۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) برای عملکرد و ارائه شاخص بهینه در طراحی زهکش پنج سد خاکی انتخاب شد. سپس نتایج حاصل از مدل PLAXIS، به واسطه آماری کالیبراسیون و آزمون P-VALUE و RMSE با مدل‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. با مقایسه و استفاده از تحلیل رگرسیون، معادله‌ای برای پیش‌بینی ارتفاع زهکش پنجه سد ارائه شده است که به‌ازای مقادیر بزرگ‌تر، دارای دقت بیشتری است. درنهایت، اندازه زهکش پنجه سد خاکی همگن با زاویه ۴۵ درجه و شاخص P/h=۰/۳۵ و در حالت ناهمگن با زاویه ۴۵ درجه با شاخص P/h=۰/۲۵ بهینه‌ترین حالت گزارش شده است. با مقایسه و استفاده از تحلیل رگرسیون، معادله‌ای برای پیش‌بینی ارتفاع زهکش پنجه سد ارائه شده است که به‌ازای مقادیر بزرگ‌تر دارای دقت بیشتری است. درنهایت، اندازه زهکش پنجه سد خاکی همگن با زاویه ۴۵ درجه و شاخص آماری RMSE برابر ۰/۴۲ و در حالت ناهمگن، زاویه ۴۵ درجه با شاخص آماری RMSE برابر ۰/۴۸ بهینه‌ترین حالت گزارش شده است. دلاور و همکارانش (۳) در پژوهشی با عنوان شبیه‌سازی نشت در بدنه سد خاکی با استفاده از روش عددی بدون شبکه المان طبیعی از روش بدون شبکه المان طبیعی (NEM) با درون یاب سیبسون برای مدل‌سازی نشت در بدنه سد خاکی درودزن استفاده کردند. در ابتدا به‌منظور صحت‌سنجی دقت روش NEM، شبیه‌سازی رفتار جریان متخلخل و میزان دبی نشت درون بدنه یک بند نیمه‌تراوا صورت پذیرفت. پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل، شبیه‌سازی نشت در بدنه سد درودزن انجام شد. به‌منظور کنترل نتایج، مقادیر محاسباتی با برداشت‌های مشاهداتی تراز سطح آب پیزومترهای بدنه مقایسه شد. باتوجه‌به میانگین خطای تفاضلی نسبی کمتر از ۵ درصد، می‌توان بر صحت نتایج شبیه‌سازی صحه گذاشت. یافته‌های حاصل از پژوهش عدم وجود پدیده فرسایش داخلی و رگاب در بدنه سد را به فراخور تغییر نکردن ضریب نفوذپذیری طی زمان و عملکرد صحیح زهکش بدنه را تایید می‌کند. کاسیم و همکاران (۸) به مطالعه تأثیر نفوذپذیری در الگوی نشت از سدهای خاکی پرداختند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Seep/w به بررسی الگوی حرکت آب در سدهای همگن و غیرهمگن پرداختند. رابطه بین مقدار نشت و سطح آب در مخزن به‌صورت غیر خطی بوده و برای داده‌های ورودی مختلف، تابع هدایت هیدرولیکی متفاوت خواهد بود. دیمی‌نیت و همکاران (۱) در پژوهش خود یک طرح هندسی بهینه شده برای هسته رسی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های رگرسیونی عملکرد بسیار موفقی داشته و برنامه قادر به طرح بهینه ابعاد هسته رسی، تحت شرایط پایداری سدهای خاکی است. خلیلی شایان و امیری توکلدانی (۷) به بررسی نیروی زیرفشار، گرادیان خروجی و دبی نشت در شرایط حضور یک دیوار سپری و بلانکت در بدنه‌های انحرافی پرداختند. آن‌ها معادلاتی بدون بعد برای تغییرات عمق پرده آب‌بند و فاصله از مبدا ارائه کردند و همچنین قوانین لین، بلای و خوسلا را با روش عددی اجزای محدود مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که روش خوسلا مقادیر حقیقی‌تری را برای برآورد نیروی زیرفشار در سازه‌های آبی ارائه می‌دهد. یوسفی و همکاران (۱۴) تأثیر سپرهای قائم و مایل در کنترل نشت و پدیدهٔ جوشش در پی سازه‌های آبی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، در صورت استفاده از پرده آب‌بند قائم و به‌ازای نسبت عمق پرده به ضخامت پی ۰/۳۴ و بیشترین تراز آب بالادست، پدیدهٔ جوشش رخ نمی‌دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی در محدودهٔ مجاز قرار دارند. سلیمان‌بیگی و جعفرزاده (۱۲)، عوامل مؤثر بر نتایج نشت سد خاکی با هسته رسی قائم را بررسی کردند. در این مقاله سرعت تخلیه پایین‌دست، سطح فراتیک و گرادیان هیدرولیکی را بررسی کردند و متغیرها به مدل اعمال شد تا وابستگی نتایج را ارزیابی کنند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات مشخصات مصالح و عمق پرده آب‌بند بر سرعت تخلیه آب هسته و پی تأثیرگذار است و تغییر طول پرده آب‌بند در یک لایه، تغییر قابل توجهی

در نتیجه جریان آب ندارد. قیاسی و همکاران (۶) در پژوهشی رفتار سد خاکی – سنگریزه‌ای رودبار لرستان را با استفاده از نتایج رفتارسنجی و تحلیل برگشتی به کمک نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 2D مطالعه کردند و به‌منظور تدقیق پارامترهای درنظرگرفته‌شده در مراحل طراحی سد و ساخت مدل عددی منطبق بر شرایط واقعی احداث سد، مدل‌سازی‌های عددی انجام و نیز با استفاده از نتایج رفتارسنجی، تحلیل برگشتی انجام دادند. همچنین آن‌ها در مدل‌سازی عددی، مدل رفتاری مصالح به‌کاررفته در ساخت هسته سد، مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر – کولمب را انتخاب کردند. نتایج نشان داد که از مقایسه مدل‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط ابزاردقیق نصب‌شده، انطباق و همخوانی مناسبی وجود دارد. نوری و سلماسی (۱۱)، پژوهشی به‌منظور بررسی دقیق تأثیر پتوی رسی در کاهش مقادیر نشت ارائه دادند. در این پژوهش مدل کامپیوتری تهیه شده و معادله عمومی جریان آب در خاک به روش المان محدود حل شد. در پایان، رابطه‌ای جامع برای نشان‌دادن تأثیر پتوی رسی در نشت از پی سدها ارائه شد. بدین منظور همه پارامترهای مهم و تأثیرگذار در ۳۵۰ مدل توسط نرم‌افزار SEEP/W 2012 مدل‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار SPSS 23 و رگرسیون آن مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته و در پایان نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی با نتایج نرم‌افزار و رابطه اداره عمران ارتش آمریکا مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از این مقایسه، کامل‌بودن رابطه پیشنهادی و اختلاف بسیار کم آن با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌ها را نشان داد. بر اساس نتایج تحلیل‌ها، طول مؤثر پتوی رسی چهار برابر ارتفاع آب پشت سد پیشنهاد شده است. همچنین در ضخامت‌های کم پتوی رسی، تأثیر مقادیر مختلف ضریب نفوذپذیری بر مقدار نشت تقریباً یکسان است و کاهش نفوذپذیری پتوی رسی زمانی مؤثر است که ضخامت آن افزایش یابد. شاه‌کرمی و بیات (۱۳) در پژوهشی علاوه بر تحلیل رفتار استاتیکی سد بلند آزاد در شرایط واقعی (با هسته رسی قائم) در نرم‌افزار GeoStudio، تحلیل تراوش، تنش – کرنش، قوس‌زدگی و پایداری دامنه‌های سد با زوایای مختلف هسته (صفر، پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۲ درجه نسبت به امتداد قائم) در دو فاز پایان ساخت و تراوش دائم را نیز مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد برای یک عمق مشخص، با افزایش زاویه تمایل هسته، دبی تراوش از بدنه و پی سد (به‌طور محسوس‌تر در زوایای بیش از ۱۵ درجه) و جابه‌جایی قائم خط مرکزی هسته افزایش یافت. همچنین با افزایش زاویه، متوسط ضریب اطمینان پایداری برای دامنه پایین‌دست سد به‌طور غیر محسوس افزایش، اما برای دامنه بالادست به‌ویژه برای زوایای بیش از ۱۵ درجه، کاهش بارز ۲۲/۶ درصدی داشت. روند افزایش تنش قائم کل خط مرکزی هسته با افزایش عمق نیز برای زوایای مختلف هسته، فاقد تغییرات چشمگیر بود. در مورد قوس‌زدگی، به‌جز در محدوده ارتفاعی ۰/۳ ارتفاع از تاج، احتمال آن با افزایش زاویه تمایل هسته کم شد. موسوی و ملک‌پور (۱۰)، طرحی با عنوان ارزیابی امکان احیاء مخزن سد آرباتان هریس با اجرای پتوی رسی ارائه دادند. این طرح با هدف امکان‌سنجی فنی و اقتصادی احیای دوباره این سد با استفاده از پتوی رسی برای پوشش کف مخزن آن ارائه شد. برای این منظور، پس از شناخت خصوصیات زیرسطحی مخزن، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزارSEEP/W انجام شد. همچنین با استفاده از روش بنت، میزان تراوش آب درحالتی‌که سد دارای پتوی رسی است، تعیین شد. بررسی نتایج حاصل از دو روش عددی و بنت نشان داد که مقدار تراوش آب از مخزن سد پوشیده با پتوی رسی، به‌ترتیب برابر ۲۳۵۶۹ و ۵۸۴۰۰۰ مترمکعب در مدت ۱۸۰ روز خواهد بود. بنابراین با وجود مقدار زیاد تراوش، کارآیی این روش برای احیای این سد مفید و راهگشا نخواهد بود. به‌طور کلی این حجم نشت ممکن است منجر به گسیختگی دوباره بدنه سد و پتوی رسی شود. دانشفراز و همکاران (۴) به تجزیه‌وتحلیل عددی نشت در حالت جریان ثابت و گذرا پرداختند. در پژوهش حاضر، رفتار سد خاکی علویان با استفاده از نرم‌افزار GEOSTUDIO تجزیه‌وتحلیل شده است. در این

فرایند، انواع آب‌بندها، پرده‌های رسی و ترازهای مختلف سطح آب به‌دقت بررسی شده‌اند. این تحلیل‌ها می‌توانند اطلاعات ارزشمندی در زمینه بهینه‌سازی طراحی و مدیریت سدهای خاکی ارائه دهند.

مواد و روش‌ها

بخش اول این پژوهش با تمرکز بر پردازش و ارزیابی داده‌ها آغاز می‌شود. داده‌های مرتبط با این مطالعه از منابع معتبر مانند مجلات و مقالات تخصصی در زمینه سدهای خاکی علویان مراغه تهیه شده است. جمع‌آوری دقیق این داده‌ها برای درک روندهای طراحی در روش‌های متداول و مدرن اهمیت زیادی دارد. در شکل ۱ فلوچارت روش کار پژوهش حاضر نشان داده شده است. این فرایند نه‌تنها به آماده‌سازی برای مدل‌سازی داده‌ها کمک می‌کند، بلکه پایه‌ای برای تحلیل‌های دقیق‌تر فراهم می‌آورد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار GEOSTUDIO، رفتار سد خاکی علویان مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است که شامل بررسی انواع آب‌بندها، پرده‌های رسی و ترازهای مختلف سطح آب می‌شود.

سد خاکی علویان با هسته رسی در ۳.۵ کیلومتری شمال غرب شهرستان مراغه به‌منظور جمع‌آوری آب‌های سطحی و کنترل آب رودخانه صوفی چای برای اهداف تأمین آب شرب مراغه و همچنین تأمین آب زراعی ۱۰۰۰۰ هکتار از اراضی پایاب، روی رودخانه صوفی چای آذربایجان شرقی به‌دست کارشناسان و متخصصان متعهد و تلاشگر صنعت آبی کشور احداث شده که در شکل ۲ نمایی از شیب بالا و پایین‌دست سد خاکی علویان نشان داده شده است.

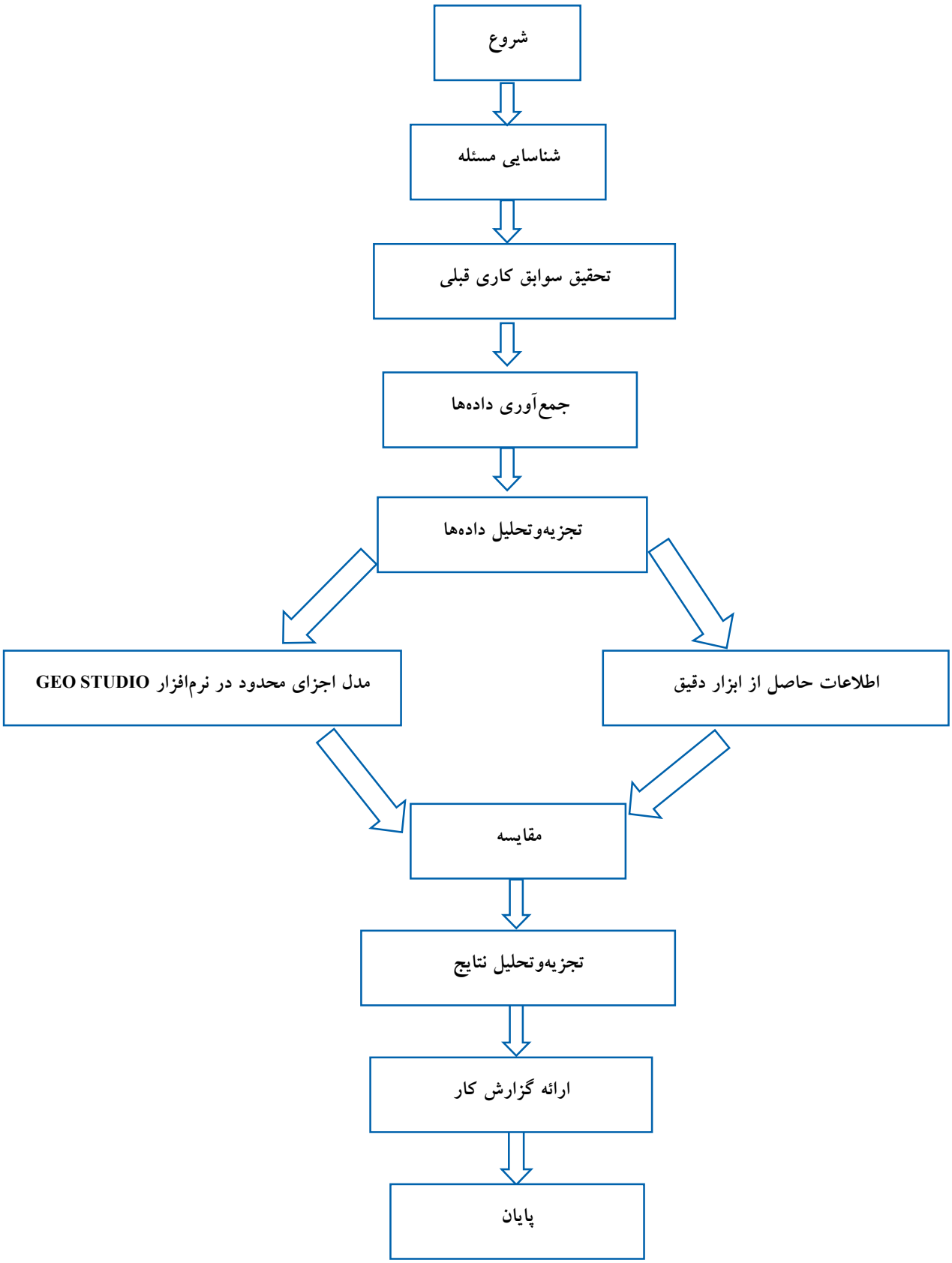
ارتفاع بالادست سد برابر ۷۶ متر است که طول آن ۹۳۵ متر و عرض تاج سد برابر ۱۰ متر است. حجم کل مصالح سد ۴.۸ میلیون مترمکعب و ارتفاع تاج آن ۱۵۷۲ متر از سطح آزاد دریاست. حجم مخزن سد در تراز نرمال آن حدوداً برابر با ۵۸ میلیون مترمکعب است. نرم‌افزارهای مختلفی بر اساس روش اجزاء محدود و با تفاضل محدود در بازار موجودند (PLAXIS فلک، فلک سه‌بعدی، ژئواسلوپ، انسیس و...). از بین نرم‌افزارها، نرم‌افزار GEOSTUDIO انتخاب شده است. GeoStudio یک نرم‌افزار ژئوتکنیکی مبتنی بر روش المان‌های محدود است که کاربرد فراوانی در مهندسی ژئوتکنیک دارد.

نرم‌افزار GEO STUDIO

نرم‌افزار GeoStudio محصول شرکت کانادایی Geoslope بوده و دارای چندین ماژول جامع و پرکاربرد است که برای پروژه‌های مختلف عمرانی و محیط‌زیست به‌کار می‌روند. این نرم‌افزار دارای چندین مدل رفتاری و روش‌های تحلیل مختلف است که کاربر می‌تواند از آن‌ها استفاده کند و درعین‌حال دارای محیط گرافیکی ساده و جذاب بوده و می‌تواند برای مدل‌سازی و طراحی استفاده شود. به کمک این نرم‌افزار می‌توان مدل‌ها را قبل از ساخت، بررسی کرده و طراحی‌های لازم را انجام داد. نرم‌افزار GeoStudio (ژئواستودیو) از نرم‌افزارهای نام‌آشنا و بسیار کاربردی دوبعدی در مهندسی ژئوتکنیک است. این نرم‌افزار که محصول کمپانی کانادایی ژئواسلوپ است، هم‌اکنون در بیش از ۱۰۰ کشور جهان به‌کار گرفته می‌شود. ژئواستودیو همچون دیگر نرم‌افزارهای تخصصی ژئوتکنیک مانند FLAC و Plaxis، بر مبنای روش‌های عددی کار می‌کند. روش المان محدود، مبنای تحلیل‌هایی است که در این نرم‌افزار انجام می‌شود. مهندسان معدن و مهندسان عمران در گرایش‌های دیگری همچون منابع آب، زلزله و محیط‌زیست از قابلیت‌های ژئواستودیو بهره می‌برند. دامنهٔ کاربردهای ژئواستودیو بسیار گسترده است. در این نرم‌افزار امکان انجام تحلیل‌های تنش ـ کرنش، جریان و تراوش وجود دارد. همچنین تحلیل پایداری شیروانی‌ها، پایداری سدهای خاکی و تحلیل دینامیکی سازه‌های ژئوتکنیکی هم در ژئواستودیو انجام می‌شود. مدل‌سازی نیلینگ، مدل‌سازی پدیدهٔ روانگرایی در خاک‌های مستعد و شبیه‌سازی پدیدهٔ نشست از دیگر کارایی‌های ژئواستودیو است.

مطالعه موردی (سد علویان)

سد علویان روی رودخانه صوفی چای در ۳/۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی احداث شده است. سد علویان در قسمت شمالی مراغه در مسیر رودخانه



شکل ۱. فلوچارت روش کار پژوهش

شکل ۲. نمایی از شیب بالا و پایین‌دست سد خاکی علویان

صوفی چای و کوهپایه‌های سهند قرار گرفته است و سد علویان یکی از مکان‌های سیاحتی برای گردشگران است. رودخانه صوفی چای که از ارتفاعات سهند سرچشمه می‌گیرد، پس از عبور از غرب شهر مراغه و جنوب شهر بناب به دریاچه ارومیه می‌ریزد. هدف از احداث سد علویان جمع‌آوری و کنترل جریان‌های سطحی صوفی چای برای تأمین آب شرب شهر مراغه و پادگان نظامی و جبران قسمتی از کمبود نیازهای آبیاری و کشاورزی دشت مراغه و باغات اطراف آن است. محل قرارگیری سد علویان یک قسمت فعال از منطقه لرزه‌خیزی مدیترانه بوده و تصور می‌شود، نزدیک‌ترین مرکز یک زلزله بزرگ واقع در ۵۳ کیلومتری شمال سد علویان باشد. موقعیت قرارگیری سد علویان نسبت به شهرستان مراغه در شکل ۳ نشان داده شده است. نزدیک‌ترین گسل فعال، گسل شمال تبریز به طول حدود ۱۶۰ کیلومتر است که از ۶۴ کیلومتری شمال شرقی سد می‌گذرد و در قرون گذشته موجب زلزله‌های ویرانگری شده است. مسئله عمده در بررسی لرزه زمین‌ساختی ناحیه سد علویان، وجود پوششی از فرآورده‌های آتش‌فشانی سهند به شکل گدازه، نهشته‌های خاکستر آتش‌فشانی و غیره است که احتمالاً بخشی از زمین ساختمان‌های واقع در ناحیه لغزش را پوشانده است.

مدل‌های مورد بررسی

مدل‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

در راستای اهداف بیان‌شده در این پژوهش، لازم است متغیرهای مورد بررسی در مدل‌ها گنجانده شود. برخی مدل‌ها دارای دیوار آب‌بند و دیگری دارای پرده رسی است. همچنین سطح آب پشت سد نیز از پارامترهای مورد بررسی است؛ بنابراین در شکل ۴ مدل‌های بررسی‌شده در این مدل‌سازی نشان داده شده است.

نتایج و بحث

در این بخش از مطالعه به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی پرداخته شده است. گفتنی است که برای خروجی‌ها از خطوط فریاتیک و دبی نشت استفاده شده است. مدل‌های بررسی‌شده در جدول ۱ ارائه شده است.

خط فریاتیک

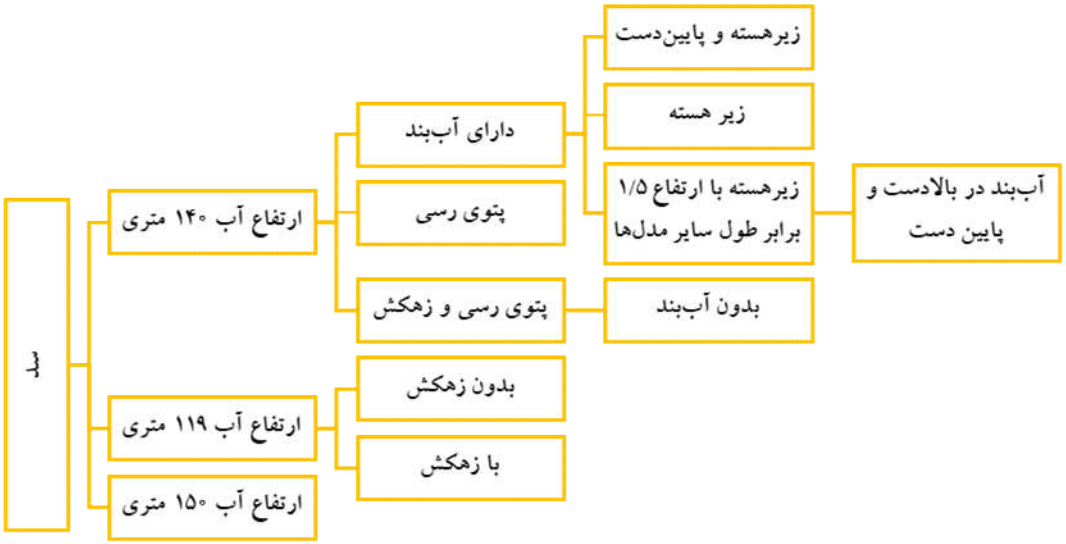
یکی از خروجی‌هایی که در این مطالعه به بررسی آن پرداخته شده است، میزان خط فریاتیک در سد است. بدین منظور در قسمت خروجی نرم‌افزار (در سمت نمودارها) یک محور به‌عنوان محور خط فریاتیک انتخاب شده و محور دیگر حاکی از فاصله است. سپس نقاط مد نظری که هد آب از آن استخراج می‌شود، تعیین شده و نمودار به‌عنوان خروجی داده شده است. یکی از نکات مهم در مراحل مطالعه و در طول ساخت‌وساز در سدهای خاکی، نشت مداوم آب از وجه بالادست سد به سمت

شکل ۳. موقعیت قرارگیری سد علویان نسبت به شهرستان مراغه

جدول ۱. مدل‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر

شماره مدل	ارتفاع آب (متر)	آب‌بند	پتوی رسی	زهکش
۱	۱۱۹	—	—	—
۲	۱۴۰	—	—	—
۳	۱۵۰	—	—	—
۴	۱۴۰	دو آب‌بند (زیر هسته و پایین‌دست)	—	—
۵	۱۴۰	—	پتوی رسی بالادست	—
۶	۱۱۹	—	—	وجود دارد
۷	۱۴۰	—	پتوی رسی بالادست	وجود دارد
۸	۱۴۰	یک آب‌بند زیر هسته	—	—
۹	۱۴۰	آب‌بند یک عدد در زیر هسته با طول ۱/۵ برابر طول حالت ۸	—	—
۱۰	۱۴۰	آب‌بند در بالادست	—	—
۱۱	۱۴۰	آب‌بند در دو طرف (بالادست و پایین‌دست)	—	—

وجه پایین‌دست آن است. موقعیت سطح ایجادشده که به سطح فریاتیک مشهور است، در پایداری سد خاکی تأثیرگذار است. سطح فریاتیک در سدهای خاکی باید درون یا زیر پنجه پایین‌دست سد نگهداری شود. سطح فریاتیک درون یک سد می‌تواند توسط طراحی درست زهکش کنترل شود. تأمین ایمنی سدها یکی از مهم‌ترین چالش‌های مهندسان است. برای جلوگیری از خرابی سدها پیش‌بینی مخاطرات نقش بسزایی دارد. مسیر زه آزاد (سطح فریاتیک) سطحی است که در زیر این سطح، فشار آب مثبت است و بالای این سطح، منطقه آب مویینگی و با فشار منفذی منفی قرار دارد. وضعیت این سطح که بالاترین مسیر جریان را نشان می‌دهد، بستگی به نفوذپذیری محیط ندارد؛ مشروط بر آنکه محیط زه کاملاً همگن و همسان باشد



شکل ۴. مدل‌های مورد بررسی

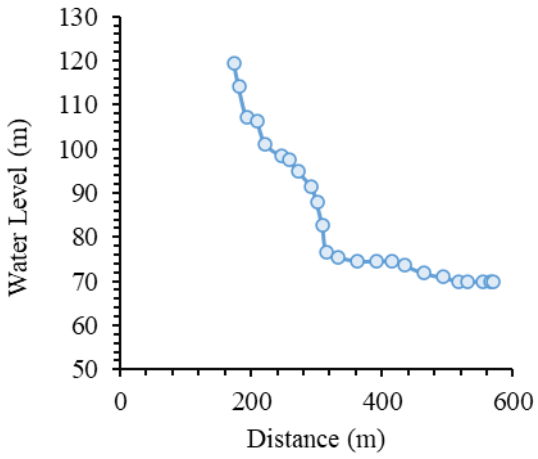
و در این صورت شکل آن فقط تابع مشخصات هندسی، شرایط زهکشی در پایاب و مقدار ارتفاع آب است. طبق نظر کاساگراند، حتی نفوذپذیری یا عدم نفوذپذیری شالوده نیز تأثیری بر وضعیت مسیر زه آزاد (سطح فریاتیک) ندارد. خط فریاتیک نشان‌داده‌شده برای مدل ۱ الی ۳ دارای تفاوت میزان آب پشت سد است. خطوط برداشته‌شده از نقطه بالادست شروع شده و به نقطه پایین‌دست خاتمه یافته است. میزان خط فریاتیک ایجادشده در اولین نقطه بالادست (محل تلاقی بدنه سد و سطح آب) خط فریاتیک، برابر با میزان سطح آب پشت سد است. یعنی در حالت وجود آب ۱۱۹ متری، میزان هد آبی برای ۱۱۹ متر و در حالت وجود آب ۱۴۰ متری، میزان هد آبی ۱۴۰ متر است. در تمامی شکل‌های ۵ تا ۱۰، افت شدیدی در میزان خط فریاتیک وجود دارد؛ زیرا نفوذپذیری هسته کم است.

برای درک بهتر این موضوع و نشان‌دادن خطوط فریاتیک در بدنه سد، شماتیک خروجی‌ها در بند کنتور خطوط فریاتیک نشان داده شده است. برای انجام مقایسه، هد آبی استخراج‌شده برای سه هد آبی در نمودار ۹ نشان داده شده است. باتوجه‌به شکل ۹، با افزایش سطح آب پشت سد، میزان خط فریاتیک آب نیز افزایش یافته است. پس سطح آب پشت سد در میزان خط فریاتیک ایجادشده تأثیرگذار است.

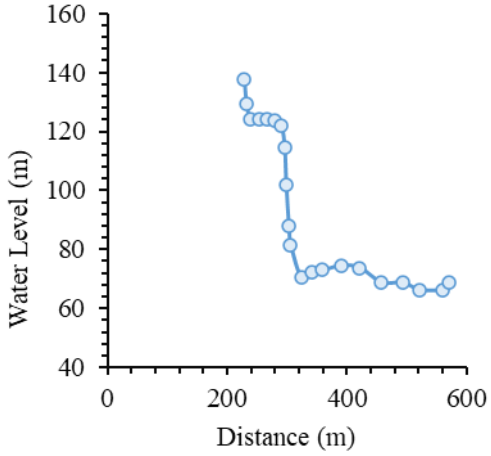
یکی از روش‌های کنترل نشت از زیر سدهای خاکی که روی پی‌های آبرفتی با نفوذپذیری زیاد احداث شده‌اند، استفاده از یک لایه پوشش با نفوذپذیری خیلی کم در سطح بستر رودخانه و کف مخزن و اتصال آن به هسته میانی سد است که در واقع نقش این پوشش و این‌گونه روش‌ها، طولانی‌کردن مسیر جریان و درنتیجه افزایش افت پتانسیل و کاهش انرژی آب است که درنهایت موجب کاهش مقدار آب نفوذی و تلفات حاصل از آن است. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، به هنگام استفاده از پتوی رسی میزان افت هد در ابتدای مسیر بیشتر از حالتی است که سد بدون پتوی رسی باشد. دلیل این امر آن است که مسیر جریان با استفاده از پتوی رسی طولانی‌تر شده و افت پتانسیل افزایش یافته است. در نتیجه، انرژی آب کاهش یافته و مقدار نفوذ آب و تلفات حاصل از آن محدود شده است.

دبی نشتی از بدنه سد

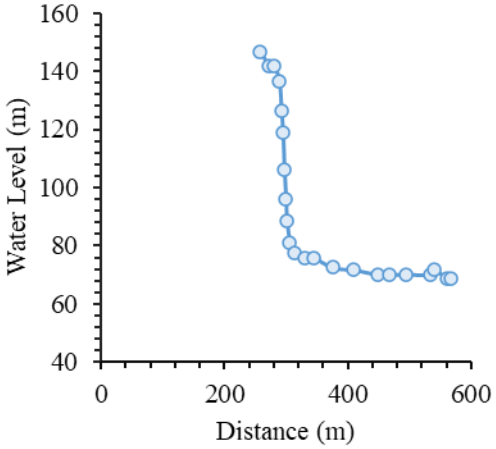
ماهیت کنترل نشت در واقع کنترل انرژی پتانسیل ذرات آب است که موجب نشت و تلفات بعدی آن می‌شود. هرچند نمی‌توان مقدار نشت را به صفر رساند؛ ولی با اتخاذ روش‌هایی می‌توان مقدار نشت را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. دبی نشت یا به اصلاح میزان نشتی که از بدنه سد رخ می‌دهد، برای



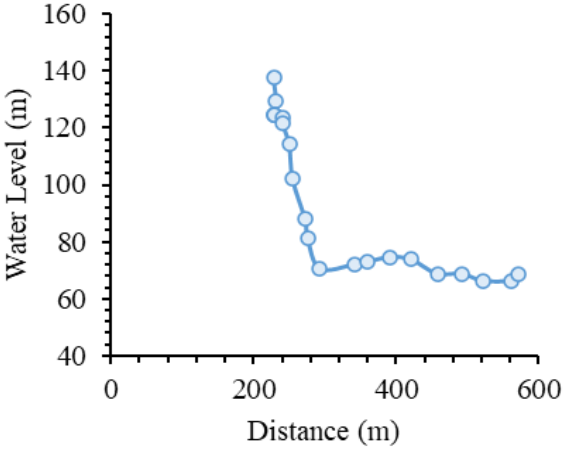
شکل ۵. خط فریاتیک برای سد واقعی با سطح آب ۱۱۹ متری (مدل ۱)



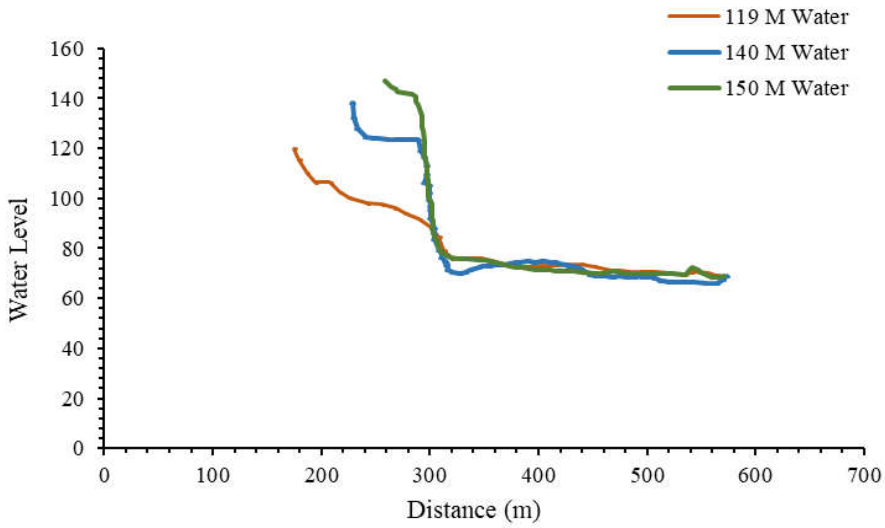
شکل ۶. خط فریاتیک برای سد واقعی با سطح آب ۱۴۰ متری (مدل ۲)



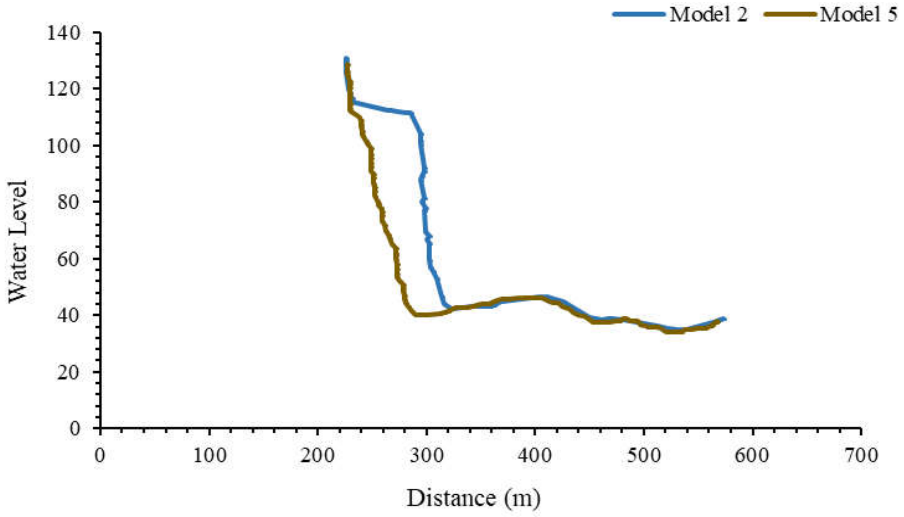
شکل ۷. خط فریاتیک برای سد واقعی با سطح آب ۱۵۰ متری (مدل ۳)



شکل ۸. خط فریاتیک برای سد واقعی با پرده رسی (مدل ۵)



شکل ۹. مقایسه خط فریاتیک برای سه سطح مختلف آب



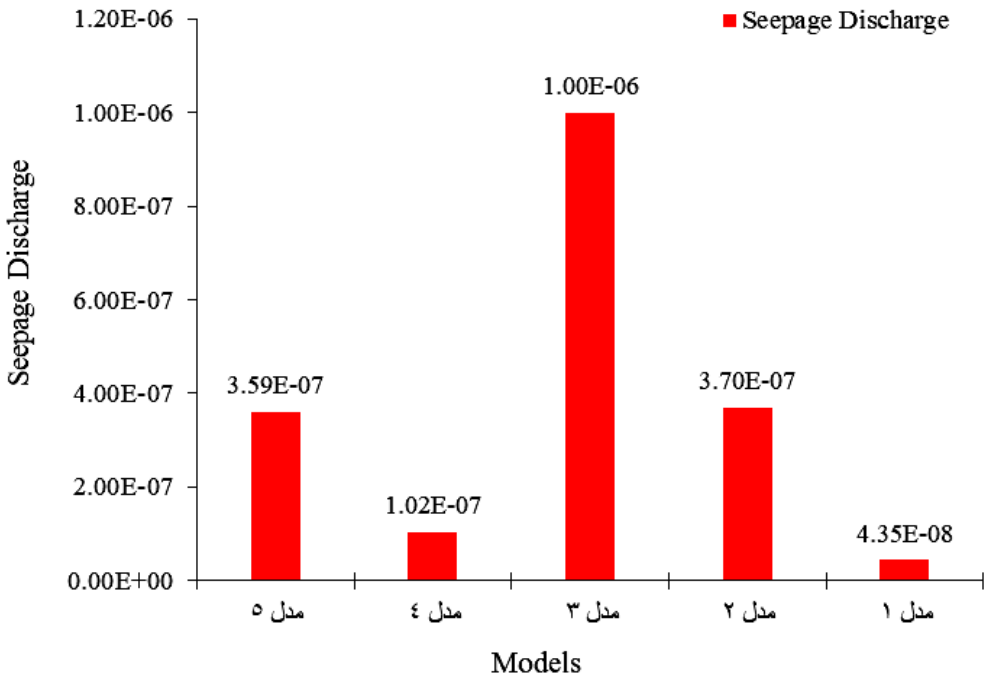
شکل ۱۰. مقایسه خط فریاتیک کل برای سد واقعی بدون پرده رسی و با پرده رسی (مدل ۲ و ۵)

انواع حالات یادشده در مدل‌ها استخراج شده است. میزان نشت از بدنه سد برای سد واقعی و سطح آب ۱۱۹ متری (مدل ۱)، سطح آب ۱۴۰ متری (مدل ۲)، سطح آب ۱۵۰ متری (مدل ۳) و سد واقعی دارای دو دیوار آب‌بند (مدل ۴) و دارای پرده رسی (مدل ۵) در نمودار ستونی شکل ۱۱ نشان داده شده است.

طبق نمودار ستونی، افزایش میزان آب پشت سد باعث افزایش اختلاف هد به‌وجودآمده در قسمت پایین‌دست و بالادست شده است. همین افزایش باعث می‌شود تا دبی نشت عبوری از بدنه سد که نقطه برداشت داده برای نمودارهای یادشده است، افزایش یابد. به علت اختلاف بار آبی که در دو طرف سازه‌های آبی احداث‌شده روی پی‌های نفوذپذیر وجود دارد، همواره نشت آب از پی این‌گونه سازه‌ها وجود دارد. اثرهای تراوش از خاک پی این سازه‌ها را می‌توان در سه بخش ایجاد نیروی زیر فشار، دبی نشت و گرادیان خروجی طبقه‌بندی کرد. نیروی زیر فشار، سبب کاهش مقاومت برشی بین سد و پی آن شده و باعث ایجاد تنش کششی، کاهش ضریب اطمینان پایداری در برابر پدیده‌های لغزش و واژگونی می‌شود. چنانچه سرعت نشت جریان آب در قسمت انتهایی سدها افزایش یابد، ممکن است که این سرعت زیاد سبب حرکت ذرات خاک شود. هدف از احداث پرده تزریق، پرده آب‌بند و سایر روش‌های آب‌بندی، جلوگیری این پدیده است. طبق آنچه در جدول ۲ قابل مشاهده است، با استفاده از دو دیوار آب‌بند میزان نشتی از بدنه سد کاهش یافته است. این امر باتوجه‌به افزایش طول خطوط جریان خزشی و کاهش شیب متوسط هیدرولیکی از رابطه دارسی نیز قابل استنباط است. همچنین استفاده از پرده رسی نیز باعث کاهش میزان نشتی می‌شود؛ زیرا پرده رسی باعث طولانی‌شدن مسیر و کاهش انرژی می‌شود.

یکی از روش‌های کاهش نشت از بدنه سد، استفاده از دیوار آب‌بند است. حال‌آنکه این دیوار آب‌بند در کجای مدل و به چه طولی باشد، خود جای بحث دارد. میزان نشت عبوری برای مدل‌های بدون آب‌بند (مدل ۲)، دارای یک آب‌بند زیر هسته (مدل ۸) و آب‌بند در بالادست (مدل ۱۰) به‌ترتیب در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

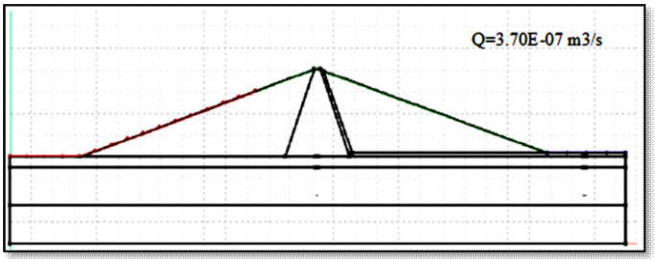
برای مقایسه بهتر شکل ۱۵ ارائه شده است. به علت امکان نفوذ و نشت آب از بالادست به سمت پایین‌دست در زیر بدنه سد خاکی، می‌بایست با طراحی و اجرای پرده آب‌بند، مسیر حرکت آب در زیر سد را افزایش داده تا با ایجاد افت فشار، امکان تراوش آب در پایین‌دست را به صفر رساند. طبق نمودار شکل ۱۵، با اجرای دیوار آب‌بند میزان دبی عبوری از بدنه سد کاهش یافته است. علت این امر هدایت‌شدن جریان آب به سمت دیوار آب‌بند است که باعث کاهش نشت از بدنه سد می‌شود. با مقایسه مدل ۹ و ۸ می‌توان دید که با افزایش عمق دیوار آب‌بند، گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد و مجموع کل فشار بالابر کاهش می‌یابد.



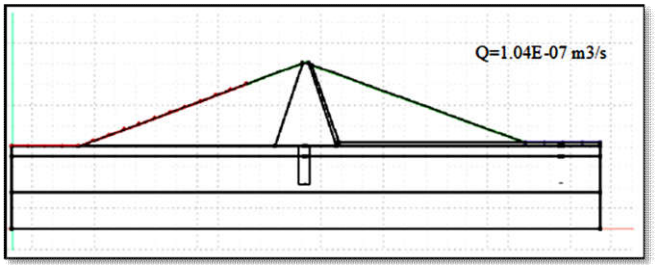
شکل ۱۱. مقایسه دبی نشت در مدل‌های مختلف

جدول ۲. میزان نشتی برای مدل‌های مختلف

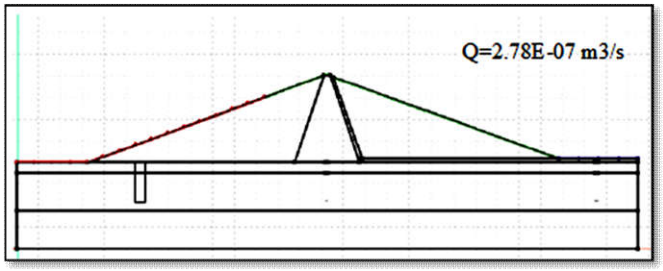
شماره مدل	ارتفاع آب (متر)	آب‌بند	پتوی رسی	دبی عبوری (مترمکعب بر ثانیه)
۱	۱۱۹	—	—	0.435E-7
۲	۱۴۰	—	—	3.7E-7
۳	۱۵۰	—	—	10E-7
۴	۱۴۰	دو آب‌بند (زیر هسته و پایین‌دست)	—	1.022E-7
۵	۱۴۰	—	پتوی رسی بالادست	3.59E-7
۶	۱۱۹	—	—	0.435E-7
۷	۱۴۰	—	پتوی رسی بالادست	3.59E-7
۸	۱۴۰	یک آب‌بند زیر هسته	—	1.04E-07
۹	۱۴۰	آب‌بند یک عدد در زیر هسته با طول ۱/۵ برابر طول حالت ۸	—	8.34E-08
۱۰	۱۴۰	آب‌بند در بالادست	—	2.78E-07
۱۱	۱۴۰	آب‌بند در دو طرف (بالادست و پایین‌دست)	—	2.96E-07



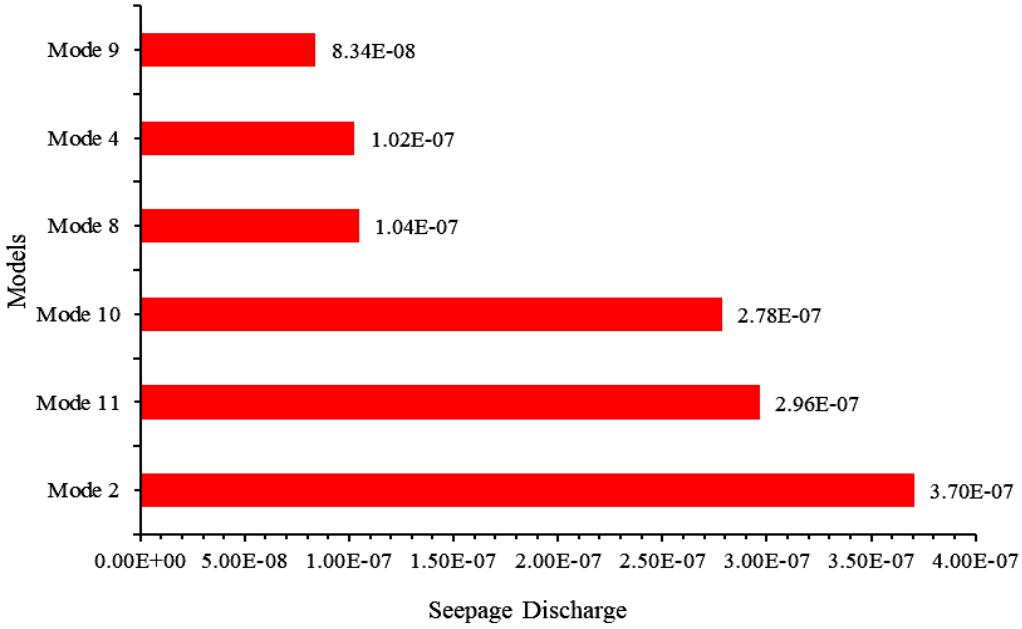
شکل ۱۲. دبی نشت از مدل ۲



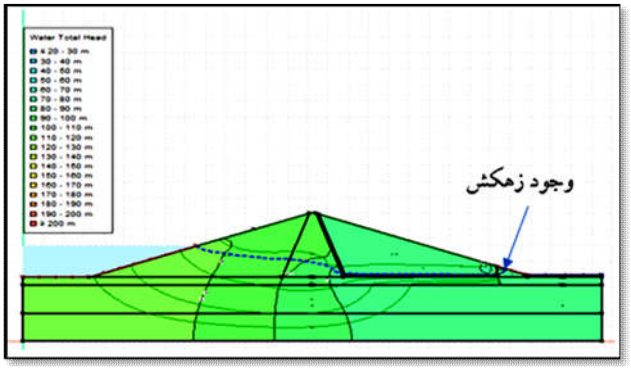
شکل ۱۳. دبی نشت از مدل ۸



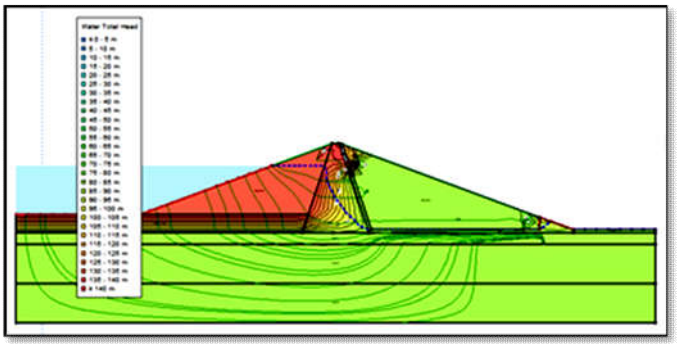
شکل ۱۴. دبی نشت از مدل ۱۰



شکل ۱۵. مقایسه دبی عبوری برای حالت‌های مختلف دیوار آب‌بند



شکل ۱۶. خط فریاتیک برای ارتفاع آب ۱۱۹ متری در صورت وجود زهکش (مدل ۶)



شکل ۱۷. شماتیک خط فریاتیک در مدل ۷

بررسی تأثیر زهکش

برای بررسی تأثیر وجود زهکش در سد خاکی، برای سد با ارتفاع آب ۱۱۹ متری و سد با ارتفاع آب ۱۴۰ متری و دارای پتوی رسی، از زهکش استفاده شده است. نتایج حاصله به‌صورت شکل ۱۶ است. دبی حاصله برای مدل ۱ و مدل ۶ نشان می‌دهد که میزان دبی عبوری در مدل ۶ برابر ۳/۵e۷ است که در مقایسه با مدل ۱ دبی کمتری دارد؛ زیرا در شرایط وجود زهکش، مسیر آبی تغییر یافته است. آب موجود در پشت سد کوتاه‌ترین مسیر برای رسیدن به فشار صفر را انتخاب خواهد کرد که در اطراف زهکش نیز به‌دلیل وجود فشار صفر، میزان دبی عبوری کاهش یافته است.

وجود زهکش در سد با ارتفاع آبی ۱۴۰ متری و پتوی رسی (مدل ۵ و ۷) و همچنین تأثیر وجود زهکش در سد با ارتفاع آب ۱۴۰ متری دارای پتوی رسی در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

در حالت وجود زهکش پایداری سد افزایش یافته است؛ زیرا خط فریاتیک از قسمت پایین‌دست سد عبور نکرده و تراز کاهشی نسبت به حالت بدون زهکش دارد و به این دلیل میزان دبی از ۱/۶۶e۷ به 1e-7 کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

با افزایش سطح آب زیرزمینی، میزان خط فریاتیک آب نیز افزایش یافته است. سطح آب پشت سد در میزان خط فریاتیک ایجادشده تأثیرگذار است و با استفاده از دیوار آب‌بند میزان نشتی کاهش یافته است. این کاهش به‌دلیل وجود دیوار آب‌بند است که هدایت آب از بدنه کمتر می‌شود. همچنین استفاده از پرده رسی نیز باعث کاهش میزان نشتی می‌شود؛ زیرا پرده رسی باعث طولانی‌شدن مسیر شده و انرژی و میزان نشتی در حالت وجود آب‌بند ۲۳ درصد کاهش یافته است. وجود پرده رسی باعث کاهش ۲۶ درصدی نشتی شده و مسیر آبی برای حالت دارای آب‌بند و پتوی رسی و سد واقعی متفاوت از یکدیگر است و همین تفاوت باعث به‌وجودآمدن تفاوت در میزان خط فریاتیک و نشت شده و بهترین مکان برای دیوار آب‌بند زیر هسته رسی است.

منابع مورد استفاده

1. Dimi Niyat, A. 2008. Optimization of clay core dimensions under the stability conditions of earth dams using genetic algorithms. Master thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, I.R. Iran.
2. Derakhshandi, M., M. Honarmand and A. H. Sadeghpour. 2022. Narrow Canyon Effect on the Behavior of Earth Dams at the End of Construction (Case Study: Vanyar Dam). *Journal of Engineering Geology* 16(1): 157-179.
3. Delavar, E., M. Zounemat-Kermani and G. Baradaran. 2016. Seepage Simulation through the Body of Earth Dam Using Natural Element Meshless Numerical Method, Case Study: Droodzan Dam. *Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant* 3(8): 45-55.
4. Daneshfaraz , R., S. Sadeghfam, R. Adami and H. Abbaszadeh. 2023. Numerical Analysis of Seepage in Steady and Transient Flow State by the Radial Basis Function Method Rasoul. *Numerical Methods in Civil Engineering* 8(1): 58-68.
5. Fattahi, H. 2020. A new approach for the evaluation of seismic slope performance. *International Journal of Op timization in Civil Engineering* 10(2): 261-275.
6. Ghiasi, V., F. Heydari and H. Behzadineghad. 2020. Evaluation of Settlement of Lurestan Rudbar earth and Rockfill Dam using Monitoring results and back analysis. *Scientific Research Quarterly Journal of Asas* 22(59).
7. Khalili Shayan, H. and H. Amiri Tokaldany. 2014. Effects of blanket, drains, and cutoff wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structures. *International Journal of Civil Engineering* 13(4): 486-500.
8. Kasim, P. F. and S. N. B. Jusoh. 2003. Effects of permeability disparity on seepage pattern of earth fill dam. *Pertanika Journal of Science and Technology* 17(2): 384-395.
9. Moradi, S. S. and A. Kazemi. 2020. Drainage capacity of earthen dams with and without a clay core. *Iranian Journal of Water and Soil Research* 51(11): 2889-2900.
10. Moosavi, M. M. and M. R. Malekpoor. 2017. Feasibility Study of Arbatan Dam Reservoir Restoration by Clay Blanket M. *Danesh Water and Soil Journal* 28(3): 27-40.
11. Noori, M. and F. Salmasi. 2017. Numerical investigation of the impact of a drainage blanket on reducing seepage from the foundation of earthen dams. *Hydrogeology* 2(1): 58-70.
12. Soleimanbeigi, A. and F. Jafarzadeh. 2005. 3D steady-state seepage analysis of embankment Dams. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 10.
13. Shahkaram, N. and M. Bayat. 2022. Numerical analysis of static behavior of earthen dam under the influence of core slope change (case study: free dam). *Water and Irrigation Management Quarterly* 12(3).
14. Yousefi, F., M. Sedghi Asl and M. Parvizi. 2015. Experimental study of the effect of vertical and inclined cutoffs in the control of seepage and piping in water structures foundations. *Iranian Journal of Water and Soil Research* 46(1): 59-70 (in Farsi).

Journal of Water and Soil Science
Vol. 28, No. 4, Winter 2025, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Analysis of Seepage Flow and Hydraulic Gradient in the Body and Foundation of Alavian Earth Dam

M. Koohdaragh[1*], M. Majedi Asl[2], T. Omidpour Alavian[2], N. Nobahari[2] and M. Ayami Lord[2]

(Received: June 23-2024 ; Accepted: November 9-2024)

Abstract

Dams, as man-made artificial structures, play a significant role in providing water in various sectors, including agriculture, industry, electricity generation, and flood control. Various soil compounds such as sand, clay, and stone are used for the construction and establishment of earth dams. In this research entitled "Investigation and analysis of Seepage flow and hydraulic gradient in the body and foundation of Alaviyan earth dam using SEEP/W software", the effects of Seepage flow and hydraulic gradient in the body and foundation are investigated. This research analyzes the details of this process using SEEP/W software and analyzes the obtained results. Theoretical foundations related to Seepage flow and hydraulic gradient in earth dams and their importance in the stability of dams are discussed as one of the most important issues of civil engineering. Methods of controlling water seepage from earth dams include the use of seals, walls made with grout mortar, impermeable cores, metal shielding, and impermeable blankets upstream of the dam. In this study, drains, seals, and clay blankets are used as water seepage control methods. The results show that the use of a watertight wall reduces the amount of Seepage because this wall prevents water from flowing through the body of the dam. In general, this research ends by providing quantitative results and recommendations to improve the stability of dams and reduce the possibility of risks caused by seepage flow and hydraulic gradient, and the important elements that should be considered in the design and construction of earth dams. Reviews. In this study, the effects and performance of earth dams have been investigated using finite element methods, and the performance of dams has been evaluated. GEOSTUDIO finite element software was used for modeling. The results of modeling include the investigation of parameters such as phreatic lines, the effect of the water level behind the dam, the clay blanket, and the water seal. Also, the leakage rate from the dam has been extracted and analyzed for different states defined in the model.

Keywords: Earth Dam, Hydraulic Gradient, Clay Core, Geo Studio

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Malekan Branch, East Azerbaijan, Iran.
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, East Azerbaijan, Iran.
*: Corresponding author, Email: Mehdi_k550@yahoo.com