

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

مهدی کوهدرق\*مهدی ماجدی اصل<sup>۲</sup>، توحید امیدپور علویان<sup>۳</sup>، ناصر نوبهاری<sup>۴</sup>، مرتضی ایامی لرد<sup>۵</sup>،

- ۱- \*گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملکان، آذربایجان شرقی، ایران Mehdi\_k550@yahoo.com
  - ۲- دانشجوی دکترا، مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی-دانشگاه مراغه، مراغه، ایران tohidomidpour1377@gmail.com
  - ۳- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی-دانشگاه مراغه، مراغه، ایران Nasser75nobahari@gmail.com
  - ۴- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی-دانشگاه مراغه، مراغه، ایران Mortezalord1362@gmail.com
  - ۵- دانشیار دانشگاه مراغه-گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران mehdi.majedi@gmail.com
- \*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Mehdi\_k550@yahoo.com

### چکیده

سدها به عنوان 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 فرآیند می‌پردازد و نتایج به دست آمده را تجزیه و تحلیل می‌کند. مبانی نظری مرتبط با جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در سدهای خاکی و اهمیت آنها در پایداری سدها به عنوان یکی از مهمترین مسائل مهندسی عمران مورد بحث و بررسی 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 به عنوان روش‌های کنترل نشت آب از سدهای خاکی شامل استفاده از آب‌بند، دیوار آب‌بند باعث کاهش میزان نشتی می‌شود زیرا این دیواره مانع هدایت آب از بدنه سده می‌شود. به طور کلی، این تحقیق 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، مورد بررسی قرار می‌دهد. در این مطالعه به بررسی اثرات و عملکرد سدهای خاکی با استفاده از روش‌های المان محدود پرداخته شده است و عملکرد هر یک از این سدها مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار المان محدود GEOSTUDIO استفاده شده است. که نتایج حاصله به بررسی خروجی‌ها از خطوط فریاتیکی، از سطح آب پشت سد در میزان خط فریاتیکی ایجاد شده تاثیر گذار آن است و میزان دبی نشت یا به اصلاح میزان نشتی که از بدنه سد رخ می‌دهد برای انواع حالات ذکر شده در مدل‌ها استخراج گردیده است.

**کلمات کلیدی:** سد خاکی - گرادیان هیدرولیک - پرده رسی - ژئواستادیو

آب مهم‌ترین منابع طبیعی در روی زمین است که روز به روز با افزایش سریع جمعیت نیاز به آن بیشتر می‌شود. امروزه تأمین آب در بسیاری از نقاط جهان از مسائل حیاتی 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 جزو مناطق خشک و نیمه خشک قرار داده است. از زمان‌های قدیم عمده‌ترین مشکلات مردم را تشکیل داده و از موانع اصلی پیشرفت‌های کشاورزی، اقتصادی، اجتماعی و توسعه صنعتی می‌باشد. گرایش روزافزون مردم به شهرنشینی، رشد اقتصادی و کشاورزی ضرورت ایجاد تاسیسات زیربنایی جهت افزایش رفاه و سطح زندگی شهروندان و از طرفی عدم بازدارندگی از این گرایش غیرصحیح، احداث سدهای آبی و بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود و بطور کلی تأمین نیازهای آبی در قطب‌های کشاورزی، صنعتی و غیره را الزام آور می‌سازد. در همین راستا یکی از روش‌های استفاده از منابع آب‌های سطحی، احداث سد در مسیر رودخانه‌ها می‌باشد. از این طریق نه تنها می‌توان سیلاب‌ها را مهار کرده و از بروز خسارات جلوگیری نمود، بلکه می‌توان کمبود آب را بخصوص در امور کشاورزی به میزان قابل ملاحظه‌ای جبران کرد. برای اجرای هر پروژه سدسازی بررسی وضعیت آبگذری ساختگاه از جمله مهم‌ترین بخش‌های فازهای شناسایی، اجرا و بهره‌برداری است. مسأله آبگذری پی و تکیه‌گاه‌های سدها به خصوصیات زمین‌شناسی منطقه شدیداً وابسته است و از آنجا که این خصوصیات در هر ساختگاه منحصر به فرد می‌باشند، بنابراین الگوی ارائه شده برای هر ساختگاه متناسب با شرایط محل تعیین می‌شود. انجام چنین مطالعاتی برای هر طرح ضروری و حائز اهمیت است و بایستی روش مناسب آب‌بندی انتخاب شده و اجرا گردد. تغییرات شبکه جریان آب زیرزمینی و افزایش بار هیدرولیکی آب در تکیه‌گاه‌ها و پی سد پس از آبیگری سدها از تبعات منفی احداث سد می‌باشد. به منظور جلوگیری از پیامدهای منفی مانند، فرسایش شالوده و شکست هیدرولیکی و فرار آب مخزن، روش‌های مختلفی اتخاذ می‌شود، که احداث پرده آب‌بند یکی از این تدابیر محسوب می‌شود. میزان تاثیر پرده آب‌بند بر روی کاهش میزان دبی نشت از تکیه‌گاه‌ها و پی می‌تواند با استفاده از مدل‌سازی عددی از هر کدام از تکیه‌گاه‌ها و پی مورد بررسی قرار داد. جریان آب از داخل پی و تکیه‌گاه سدها در صورتی که از حد مجاز تجاوز ننماید، از نقطه نظر مهندسی مسأله‌ای نمی‌باشد، ولی در صورتی که مقدار تلفات آب آنقدر باشد که از نظر اقتصادی توجیه پذیر نباشد، کنترل آن لازم می‌گردد. آب خارج شده از سدها به عنوان آب تلف شده محسوب می‌گردد، 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) صنعت سد سازی به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و پیچیده‌ترین فعالیت‌های عمرانی و ژئوتکنیکی، همواره مدنظر جوامع مختلف بوده و از نظر اقتصادی نیز یکی از منابع مهم اقتصادی هر کشور محسوب می‌شود. بعلاوه طی سالیان اخیر در زمینه مهندسی سد سازی در موضوعات مختلف مطالعات زیادی انجام شده است. درخشندی و همکاران (۲) در مطالعه‌ای به مدل‌سازی عددی سد سنگریزه‌ای و نیار در ایران پرداختند و در این مدل‌سازی میزان نشت، فشار آب حفره‌ای و تنش کل برای ارزیابی رفتار کلی سد مورد ارزیابی قرار گرفت. مرادی و همکاران (۹) با هدف نهایی هیدرولیکی و در نهایت تضعیف پدیده پایینگ، به بررسی مدل‌های مختلف از ساختار هندسی و عملکرد هیدرولیکی هسته رسی و زهکش پنجه در سدهای خاکی پرداختند. از اینرو، با مدل‌سازی آزمایشگاهی در دو حالت همگن و ناهمگن، میزان دبی نشت و سطح تراز فریاتیگ در بدنه سد خاکی با قرائت تراز آب در ۷ حلقه چاهک مشاهداتی و اندازه‌گیری فشار پیزومتریک در ۳۰ پیزومتر نصب شده روی کانال دیواره، مورد بررسی قرار گرفتند. بر این اساس، سه نسبت بی بعد 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 صحت سنجی شد. با مقایسه و استفاده از تحلیل رگرسیون، معادله‌ای برای پیش‌بینی ارتفاع زهکش پنجه سد ارائه شده است که به ازای مقادیر بزرگتر، دارای دقت بیشتری است. در نهایت، اندازه زهکش پنجه سد خاکی همگن با زاویه ۴۵ درجه و شاخص  $P/h=0/35$  و در حالت ناهمگن، زاویه ۴۵ درجه با شاخص  $P/h=0/25$  بهینه‌ترین حالت گزارش شده است. با مقایسه و استفاده از تحلیل رگرسیون، معادله‌ای برای پیش‌بینی ارتفاع زهکش پنجه سد ارائه شده است که به ازای مقادیر بزرگتر دارای دقت بیشتری است. در نهایت، اندازه زهکش پنجه سد خاکی همگن با زاویه ۴۵ درجه و شاخص و در حالت ناهمگن، زاویه ۴۵ درجه با شاخص 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 سیسسون برای مدل‌سازی نشت در بدنه سد خاکی درودزن استفاده کردند. در ابتدا به منظور صحت سنجی 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. به منظور کنترل نتایج، مقادیر محاسباتی با برداشت‌های مشاهداتی تراز سطح آب پیزومترهای بدنه مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به میانگین خطای تفاضلی نسبی کمتر از ۵ درصد، می‌توان بر صحت نتایج شبیه‌سازی صحت گذاشت. یافته‌های حاصل از پژوهش عدم وجود پدیده فرسایش داخلی و رگاب در بدنه سد را به فراخور تغییر نکردن ضریب نفوذپذیری در طی زمان و عملکرد صحیح زهکش بدنه را تایید می‌نماید. کاسیم و همکاران (۸) به مطالعه تاثیر نفوذپذیری در الگوی نشت از سدهای خاکی پرداختند. در این تحقیق 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 به صورت غیر خطی بوده و برای داده‌های ورودی مختلف، تابع هدایت هیدرولیکی متفاوت خواهد بود. دیمی نیت و همکاران (۱) در تحقیق 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 می‌باشد. خلیلی شایان و امیری توکلدانی (۷) به بررسی نیروی زیرفشار، گرادیان خروجی، 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 نمودند و همچنین قوانین لین، بلائی و خوسلا را با روش عددی اجزای محدود مقایسه نموده و به این نتیجه رسیدند که روش خوسلا مقادیر حقیقی تری را برای برآورد نیروی زیرفشار در سازه‌های آبی ارائه می‌دهد. یوسفی و همکاران (۱۴) تاثیر سپرهای قائم و مایل در کنترل نشت و پدیده‌ی جوشش در پی سازه‌های آبی مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد در صورت استفاده از پرده‌ی آب‌بند قائم و به ازای نسبت عمق پرده به ضخامت پی  $0/34$  و بیشترین تراز آب بالادست، پدیده‌ی جوشش رخ نمی‌دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی در محدوده‌ی مجاز قرار دارند. سلیمان بیگی و جعفرزاده (۱۲)، عوامل موثر 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 تاثیر گذار است و تغییر طول پرده آب‌بند در یک لایه، تغییر قابل توجهی در نتیجه جریان آب ندارد. قیاسی و همکاران (۶) در تحقیق رفتار سد خاکی - سنگریزه‌ای رودبار لرستان با استفاده از نتایج رفتارسنجی و تحلیل برگشتی به کمک نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 2D مورد مطالعه قرار دادند، و به منظور تدقیق پارامترهای در نظر گرفته شده 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. در مدل‌سازی عددی، مدل رفتاری مصالح به کار رفته در ساخت هسته سد، مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر -

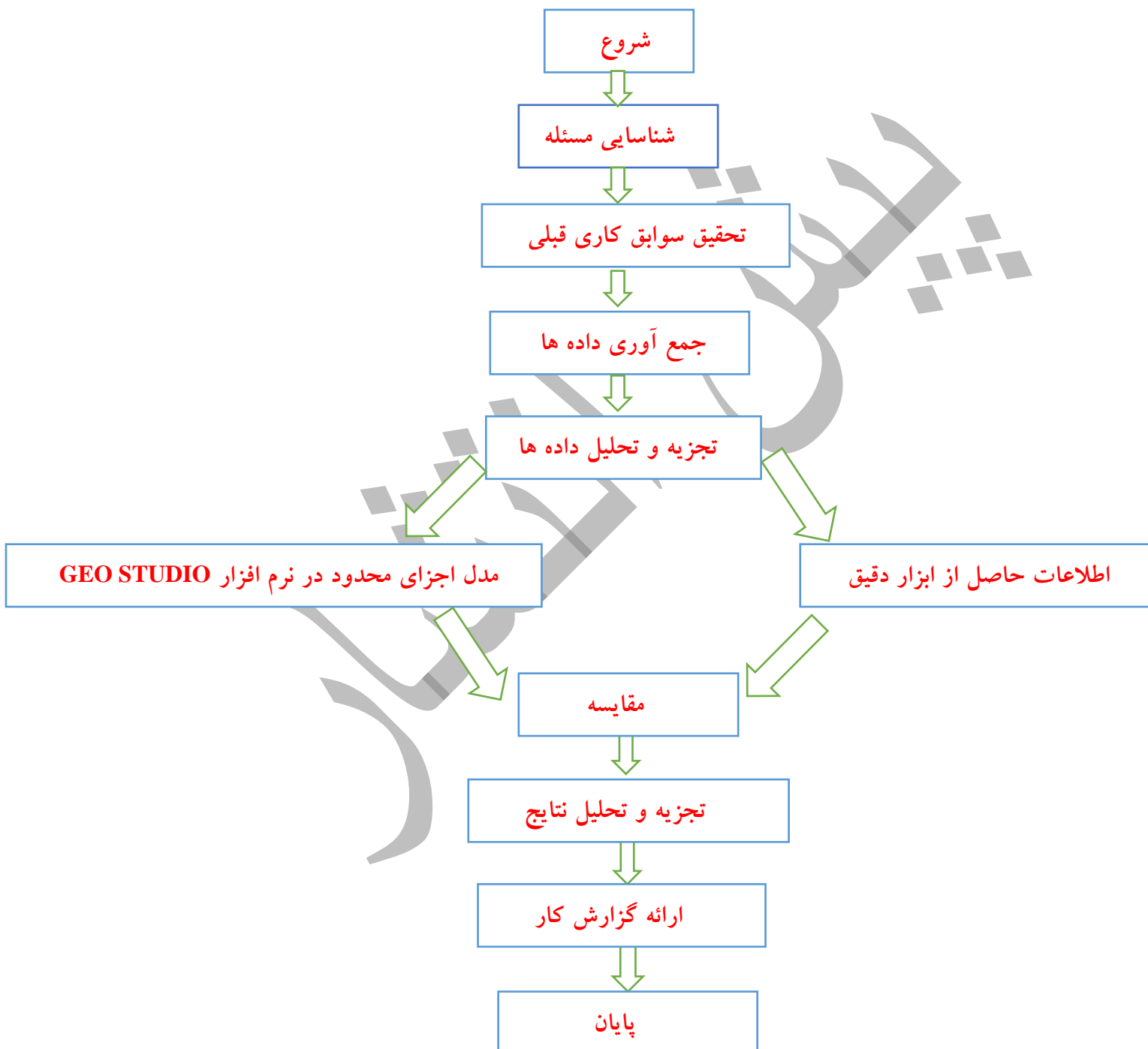
کولمب انتخاب کردند. نتایج نشان داد که از مقایسه مدل‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق نصب شده، انطباق و هم‌خوانی مناسبی وجود دارد. نوری و سلماسی (۱۱)، تحقیقی به‌منظور بررسی دقیق تأثیر پتوی رسی در کاهش مقادیر نشت ارائه دادند و در این تحقیق مدل کامپیوتری تهیه شده و معادله عمومی جریان آب در خاک به روش المان محدود حل گردید. در پایان، رابطه‌ای جامع برای نشان دادن تأثیر پتوی رسی در نشت از پی سدها ارائه گردید. بدین منظور همه پارامترهای مهم و تأثیرگذار در ۳۵۰ مدل توسط نرم‌افزار SEEP/W 2012 مدل‌سازی شد. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار SPSS 23 و رگرسیون آن مورد تجزیه و تحلیل 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 کامل بودن رابطه پیشنهادی و اختلاف بسیار کم آن با نتایج بدست آمده 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. شاه کرمی و بیات (۱۳) در تحقیقی ضمن 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 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 جابجایی 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 قابل ملاحظه بود. در مورد قوس‌زدگی، به جز 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 نرم‌افزار SEEP/W انجام شد. هم‌چنین با استفاده از روش بنت، میزان تراوش آب، در حالتی که سد دارای پتوی رسی می‌باشد، تعیین گردید. بررسی نتایج حاصل از دو روش عددی و بنت نشان داد که مقدار تراوش آب از مخزن سد پوشیده با پتوی رسی، به ترتیب برابر ۲۳۵۶۹ و ۵۸۴۰۰۰ مترمکعب در مدت ۱۸۰ روز خواهد بود. بنابراین با وجود مقدار زیاد تراوش، کارایی این روش برای احیای این سد مفید و راهگشا خواهد بود. بطور کلی این حجم نشت ممکن است منجر به گسیختگی دوباره بدنه سد و پتوی رسی گردد. دانشفراز و همکاران (۴) به تجزیه و تحلیل عددی نشت در حالت جریان ثابت و گذرا پرداختند. در تحقیق حاضر، رفتار سد خاکی علویان با استفاده از نرم‌افزار GEOSTUDIO تجزیه و تحلیل شده است. در این فرآیند، انواع آب‌بندها، پرده‌های رسی و ترازهای مختلف سطح آب، به‌دقت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این تحلیل‌ها می‌تواند 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

## نشریه علوم آب و خاک

در روش‌های متداول و مدرن اهمیت بالایی دارد. این فرآیند نه تنها 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 تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، که شامل بررسی انواع آب‌بندها، پرده‌های رسی و ترازهای مختلف سطح آب می‌شود.



شکل ۱- فلوچارت روش کار این تحقیق

## نشریه علوم آب و خاک

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



شکل ۲- نمایی از شیب بالا و پایین دست سد خاکی علویان

ارتفاع بالادست سد برابر ۷۶ متر است که ۹۳۵ متر طول آن و عرض تاج سد برابر ۱۰ متر می‌باشد. 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 می‌باشد. نرم افزارهای مختلفی براساس روش اجزاء محدود و با تفاضل محدود در بازار موجودند PLAXIS فلک، فلک سه بعدی، ژئوسلپ، و انسیس و ... از بین نرم افزارها نرم افزار GEOSTUDIO انتخاب شده است. GeoStudio یک نرم افزار ژئوتکنیکی مبتنی بر روش المان‌های محدود می‌باشد که کاربرد فراوانی در مهندسی ژئوتکنیک دارد.

### نرم افزار GEO STUDIO

نرم افزار GeoStudio محصول شرکت کانادایی Geoslope بوده و دارای چندین ماژول جامع و پرکاربرد است که برای پروژه‌های مختلف عمرانی و محیط زیست به کار می‌روند. این نرم افزار دارای چندین مدل رفتاری و روش‌های تحلیل مختلف است که کاربر می‌تواند از آن‌ها استفاده کند و در عین حال دارای محیط گرافیکی ساده و جذاب بوده و می‌تواند برای مدل‌سازی و طراحی مورد استفاده قرار بگیرد. به کمک این نرم افزار می‌توان مدل‌ها را قبل از ساخت، مورد بررسی قرار داده و طراحی‌های لازم را انجام داد. نرم افزار GeoStudio (ژئواستودیو) از نرم افزارهای نام‌آشنا و بسیار کاربردی دوبعدی در مهندسی ژئوتکنیک است. این نرم افزار که محصول کمپانی کانادایی ژئوسلپ است، هم‌اکنون در بیش از ۱۰۰ کشور جهان به کار گرفته می‌شود. ژئواستودیو هم‌چون دیگر نرم افزارهای تخصصی ژئوتکنیک مانند FLAC و Plaxis، بر مبنای روش‌های عددی کار می‌کند. روش المان محدود، مبنای تحلیل‌هایی است که در این نرم افزار انجام می‌شود. مهندسان معدن و مهندسان عمران در گرایش‌های دیگری هم‌چون منابع آب، زلزله و محیط زیست از قابلیت‌های ژئواستودیو بهره می‌برند. دامنه‌ی کاربردهای ژئواستودیو بسیار گسترده است. در این نرم افزار امکان انجام تحلیل‌های تنش - کرنش، جریان و تراوش وجود دارد. هم‌چنین تحلیل پایداری شیروانی‌ها، پایداری سدهای خاکی و تحلیل

## نشریه علوم آب و خاک

دینامیکی سازه‌های ژئوتکنیکی هم در ژئواستودیو انجام می‌شود. مدل‌سازی نیلینگ، مدل‌سازی پدیده‌ی روانگرایی در خاک‌های مستعد و شبیه‌سازی پدیده‌ی نشست از دیگر کارایی‌های ژئواستودیو است.

### مطالعه موردی (سد علویان)

سد علویان بر روی رودخانه صوفی چای در ۳/۵ کیلومتری شمال‌غربی شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی احداث گردیده است. سد علویان در قسمت شمالی مراغه در مسیر رودخانه صوفی چای و کوه‌پایه‌های سه‌سند قرار گرفته است و سد علویان یکی از مکان‌های سیاحتی برای گردشگران می‌باشد احداث شده است. رودخانه صوفی چای که از ارتفاعات سه‌سند سرچشمه می‌گیرد، پس از عبور از غرب شهر مراغه و جنوب شهریناب به دریاچه ارومیه می‌ریزد. هدف از احداث سد علویان جمع‌آوری و کنترل جریان‌های سطحی صوفی چای جهت تامین آب شرب شهر مراغه و پادگان نظامی، جبران قسمتی از کمبود نیازهای آبیاری و کشاورزی دشت مراغه و باغات اطراف آن می‌باشد. 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 سه‌سند به شکل گدازه، نهشته‌های خاکستر آتش‌فشانی و غیره است که احتمالاً بخشی از زمین‌ساختمان‌های واقع در ناحیه لغزش را پوشانده است.



شکل ۳- موقعیت قرارگیری سد علویان نسبت به شهرستان مراغه

## نشریه علوم آب و خاک

### مدل‌های مورد بررسی

مدل‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مدل‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر

شماره مدل	ارتفاع آب (متر)	آب‌بند	پتوی‌رسی	زهکش
۱	۱۱۹	-	-	-
۲	۱۴۰	-	-	-
۳	۱۵۰	-	-	-
۴	۱۴۰	دو آب‌بند (زیر هسته و پایین دست)	-	-
۵	۱۴۰	-	پتوی‌رسی بالادست	-
۶	۱۱۹	-	-	وجود دارد
۷	۱۴۰	-	پتوی‌رسی 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 پایین دست)	-	-

به جهت اهداف بیان شده در این تحقیق، لازم است تا متغیرهای مورد بررسی در مدل‌ها گنجانده شود. برخی مدل‌ها دارای دیوار آب‌بند، دیگری دارای پرده‌رسی است. همچنین سطح آب پشت سد نیز از پارامترهای مورد بررسی است. بنابراین در شکل ۴



مدل‌های مورد بررسی در این مدل‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل‌های مورد بررسی

## نتایج و بحث

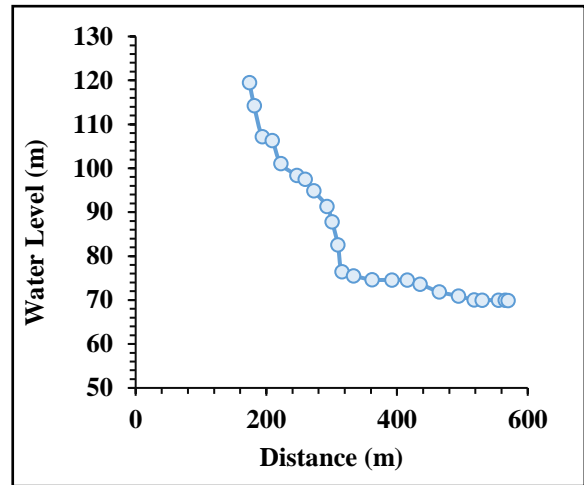
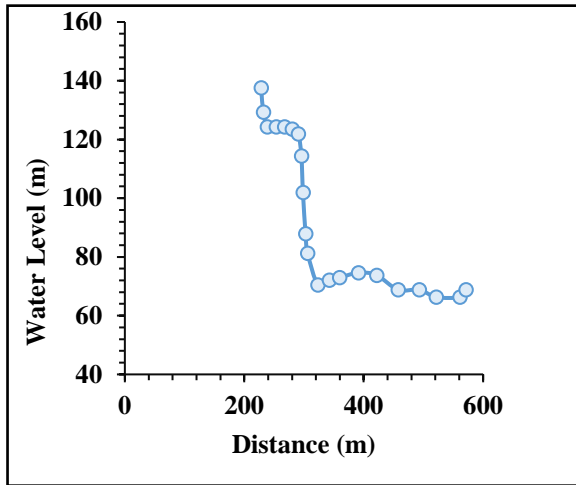
در این بخش از مطالعه به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی پرداخته شده است. قابل ذکر است که برای خروجی‌ها از خطوط فریاتیکی و دبی نشت استفاده گردیده است. مدل‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه گردیده است.

## خط فریاتیکی

یکی از خروجی‌هایی که در این مطالعه به بررسی آن پرداخته شده است، میزان خط‌فریاتیکی در سد می‌باشد. بدین منظور در قسمت خروجی نرم‌افزار (در سمت نمودارها) یک محور به عنوان محور خط‌فریاتیکی انتخاب شده و محور دیگر حاکی از فاصله می‌باشد. سپس نقاط مورد نظری که هد آب از آن استخراج می‌شود، تعیین شده و نمودار به عنوان خروجی داده شده است. یکی از نکات مهم در مراحل مطالعه و در طول ساخت و ساز در سدهای خاکی نشت مداوم آب از وجه بالادست سد به سمت وجه پایین‌دست آن است. موقعیت سطح ایجادشده که به سطح فریاتیکی مشهور است، در پایداری سد خاکی تأثیرگذار است. سطح فریاتیکی در سدهای خاکی باید درون یا زیر پنجه پایین‌دست سد نگهداری شود. سطح فریاتیکی درون یک سد می‌تواند توسط طراحی درست زهکش کنترل شود. تأمین ایمنی سدها یکی از مهمترین چالش‌های مهندسی است. برای جلوگیری از خرابی سدها پیش‌بینی مخاطرات نقش بسزایی دارد. مسیر زه آزاد (سطح فریاتیکی) سطحی است که در زیر این سطح، فشار آب مثبت است و بالای این سطح، منطقه آب مویبگی و با فشار منفی منفی قرار دارد. وضعیت این سطح که بالاترین مسیر جریان را نشان می‌دهد بستگی به نفوذپذیری محیط ندارد، مشروط بر آن که محیط زه کاملاً همگن و همسان باشد و در این صورت شکل آن صرفاً تابع مشخصات هندسی، شرایط زهکشی در پایاب و مقدار ارتفاع آب می‌باشد. طبق نظر کاساگراند، حتی نفوذپذیری یا عدم نفوذپذیری شالوده نیز

## نشریه علوم آب و خاک

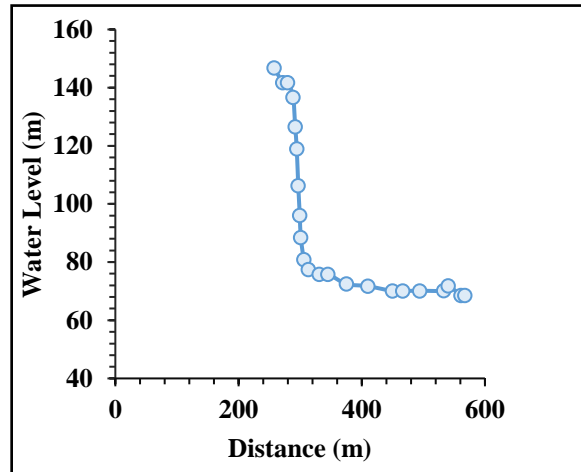
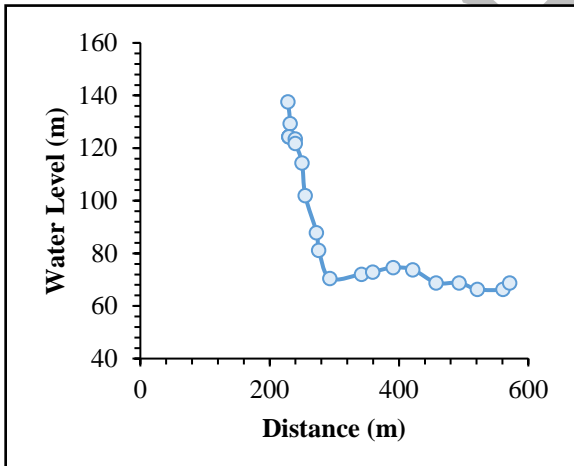
تأثیری بر وضعیت مسیر زه آزاد (سطح فریاتیك) ندارد. خط فریاتیك نشان داده شده برای مدل ۱ الی ۳ دارای تفاوت میزان آب پشت سد است. خطوط برداشته شده از نقطه بالادست شروع شده و به نقطه پایین دست خاتمه یافته است. میزان خط فریاتیك ایجاد شده در اولین نقطه بالادست (محل تلاقی بدنه سد و سطح آب) خط فریاتیك برابر با 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 نمودارهای ۵ الی ۱۰ افت شدیدی در میزان خط فریاتیك وجود دارد. زیرا نفوذپذیری هسته کم است.



۵- خط فریاتیك برای سد واقعی با سطح آب ۱۱۹

متری (مدل ۱)

۶- خط فریاتیك برای سد واقعی با سطح آب ۱۴۰ متری (مدل ۲)



شکل ۸- خط فریاتیك برای سد واقعی با پرده رسی

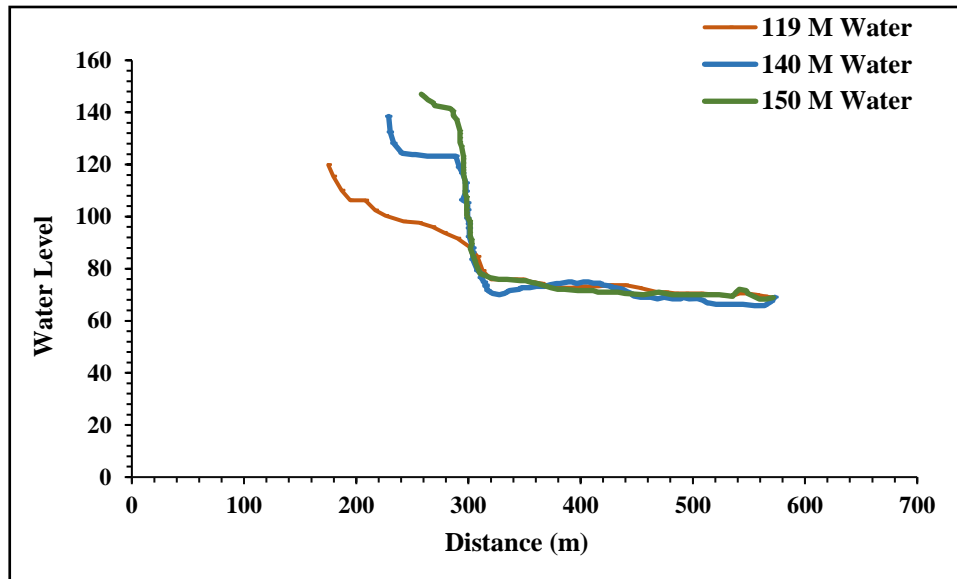
(مدل ۵)

شکل ۷- خط فریاتیك برای سد واقعی با سطح آب

۱۵۰ متری (مدل ۳)

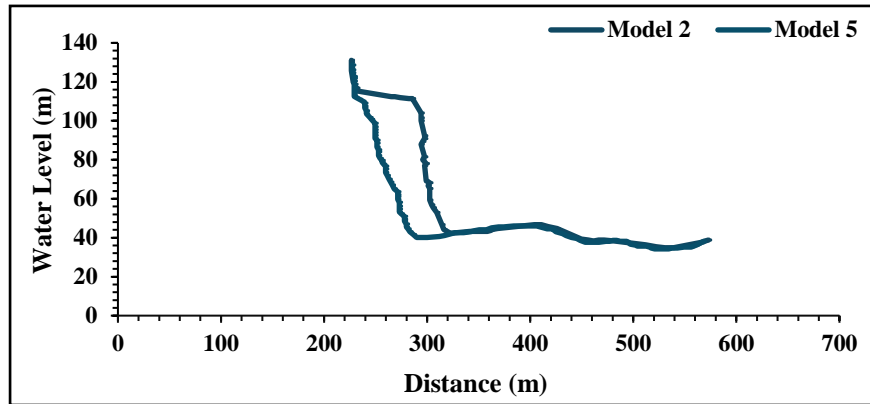
## نشریه علوم آب و خاک

برای درک بهتر این موضوع و نشان دادن خطوط فریاتیکی در بدنه سد، شماتیک خروجی‌ها در بند کنتور خطوط فریاتیکی نشان داده شده است. برای انجام مقایسه، هد آبی استخراج شده برای سه هد آبی در نمودار ۹ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل ۹ قابل مشاهده است، با افزایش سطح آب پشت سد، میزان خط فریاتیکی آب نیز افزایش یافته است. پس سطح آب پشت سد در میزان خط فریاتیکی ایجاد شده تاثیر گذار است.



شکل ۹- مقایسه خط فریاتیکی برای سه سطح مختلف آب

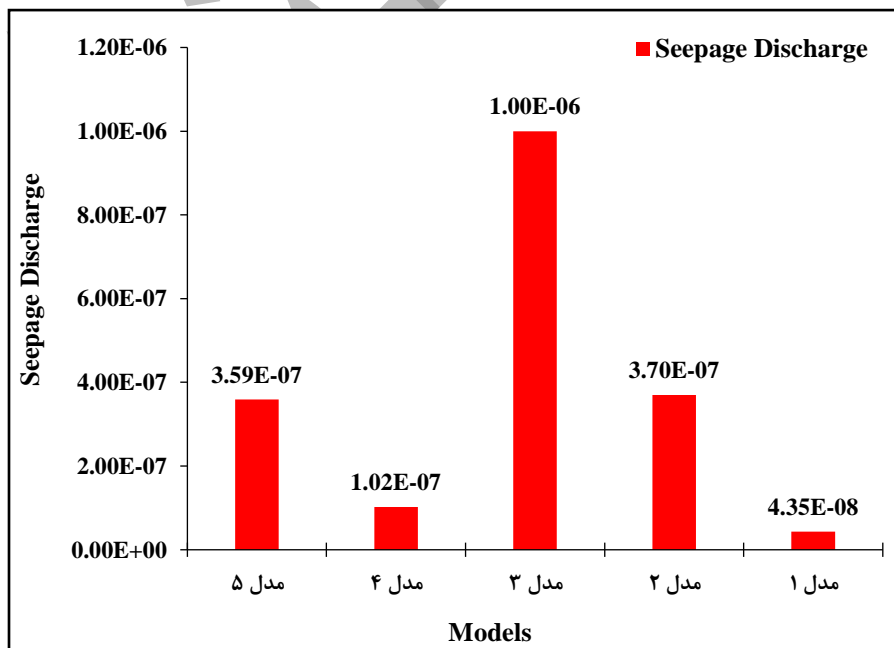
یکی از روش‌های کنترل نشست از زیر سدهای خاکی که بر روی پی‌های آبرفتی با نفوذپذیری زیاد احداث شده‌اند، استفاده از یک لایه پوشش با نفوذپذیری خیلی کم در سطح بستر رودخانه و کف مخزن و اتصال آن به هسته میانی سد است که در واقع نقش این پوشش و اینگونه روش‌ها طولانی کردن مسیر جریان و در نتیجه افزایش افت پتانسیل و کاهش انرژی آب است که در نهایت موجب کاهش مقدار آب نفوذی و تلفات حاصل از آن است. همانگونه که از شکل ۱۰ قابل مشاهده است، به هنگام استفاده از پتوی رسی، میزان افت هد در ابتدای مسیر بیشتر از حالتی است که سد بدون پتوی رسی است زیرا در نتیجه استفاده از پتوی رسی در واقع نقش این پوشش و اینگونه روش‌ها طولانی کردن مسیر جریان و در نتیجه افزایش افت پتانسیل و کاهش انرژی آب است که در نهایت موجب کاهش مقدار آب نفوذی و تلفات حاصل از آن است.



شکل ۱۰- مقایسه خط فریاتیک کل برای سد واقعی بدون پرده‌رسی و با پرده‌رسی (مدل ۲ و ۵)

### دبی نشتی از بدنه سد

ماهیت کنترل نشت در واقع کنترل انرژی پتانسیل ذرات آب است که موجب نشت و تلفات بعدی آن می‌گردد. 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 انواع حالات ذکر شده در مدل‌ها استخراج گردیده 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)، سد واقعی دارای دو دیوار آب‌بند (مدل ۴) و دارای پرده‌رسی (مدل ۵) در نمودار ستونی شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- مقایسه دبی نشت در مدل‌های مختلف

## نشریه علوم آب و خاک

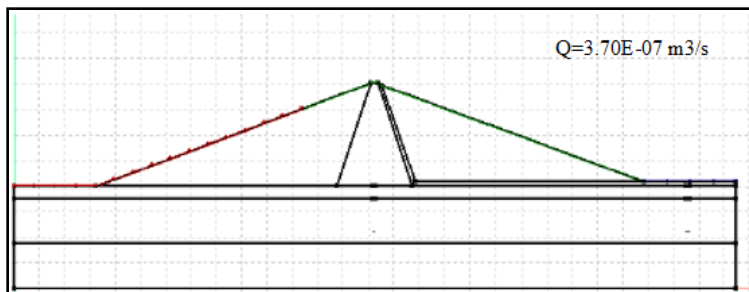
طبق نمودار ستونی با افزایش میزان آب پشت سد، باعث گردیده است تا اختلاف هد به وجود آمده در قسمت پایین دست و بالادست افزایش یابد. همین افزایش باعث می شود تا دبی نشت عبوری از بدنه سد که نقطه برداشت داده برای نمودارهای فوق است، افزایش یابد. به علت اختلاف بار آبی که در دو طرف سازه های آبی احداث شده بر روی پی های نفوذپذیر وجود دارد، همواره نشت آب از پی اینگونه سازه ها وجود دارد. اثرات تراوش از خاک پی این سازه ها را می توان در سه بخش ایجاد نیروی زیر فشار، دبی نشت و گرادیان خروجی طبقه بندی نمود. نیروی زیر فشار، سبب کاهش مقاومت برشی بین سد و پی آن شده و باعث ایجاد تنش کششی، کاهش ضریب اطمینان پایداری در برابر پدیده های لغزش و واژگونی می شود. چنانچه سرعت نشت جریان آب در قسمت انتهایی سدها افزایش یابد، ممکن است که این سرعت بالا سبب حرکت ذرات خاک گردد. هدف از احداث پرده تزریق، پرده آب بند و سایر روش های آب بندی، جلوگیری این پدیده است. طبق آنچه در جدول ۲ قابل مشاهده است، با استفاده از دو دیوار آب بند میزان نشتی از بدنه سد کاهش یافته است. این امر با توجه به افزایش طول خطوط جریان خزشی و کاهش شیب متوسط هیدرولیکی از رابطه داری نیز قابل استنباط است. همچنین استفاده از پرده رسی نیز باعث کاهش میزان نشتی می شود. زیرا پرده رسی باعث طولانی شدن مسیر و کاهش انرژی می شود.

جدول ۲- میزان نشتی برای مدل های مختلف

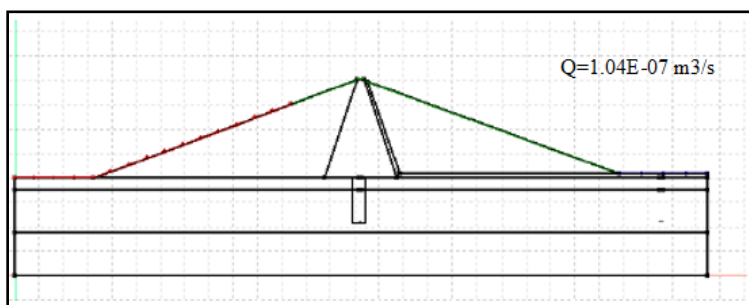
شماره مدل	ارتفاع آب (متر)	آب بند	پتوی رسی	دبی عبوری (متر مکعب بر ثانیه)
۱	۱۱۹	-	-	0/435E - 7
۲	۱۴۰	-	-	3./7E - 7
۳	۱۵۰	-	-	10E - 7
۴	۱۴۰	دو آب بند (زیر هسته و پایین دست)	-	1/022E - 7
۵	۱۴۰	-	پتوی رسی بالادست	3/59E - 7
۶	۱۱۹	-	-	0/435E - 7
۷	۱۴۰	-	پتوی رسی بالادست	3/59E - 7
۸	۱۴۰	یک آب بند زیر هسته	-	1/04E-07
۹	۱۴۰	آب بند یک عدد در زیر هسته با طول ۱/۵ برابر طول حالت ۸	-	8/34E-08
۱۰	۱۴۰	آب بند در بالادست	-	2/78E-07
۱۱	۱۴۰	آب بند در دو طرف (بالادست و پایین دست)	-	2/96E-07

یکی از روش های کاهش نشت از بدنه سد، استفاده از دیوار آب بند است. حال آنکه این دیوار آب بند در کجای مدل و به چه طولی باشد، خود جای بحث دارد. در ادامه میزان نشت عبوری برای مدل های دارای دیوار آب بند ارائه گردیده است.

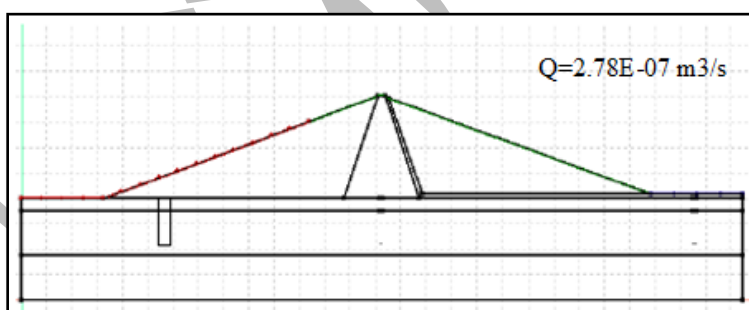
## نشریه علوم آب و خاک



شکل ۱۲- دبی نشت از مدل ۲

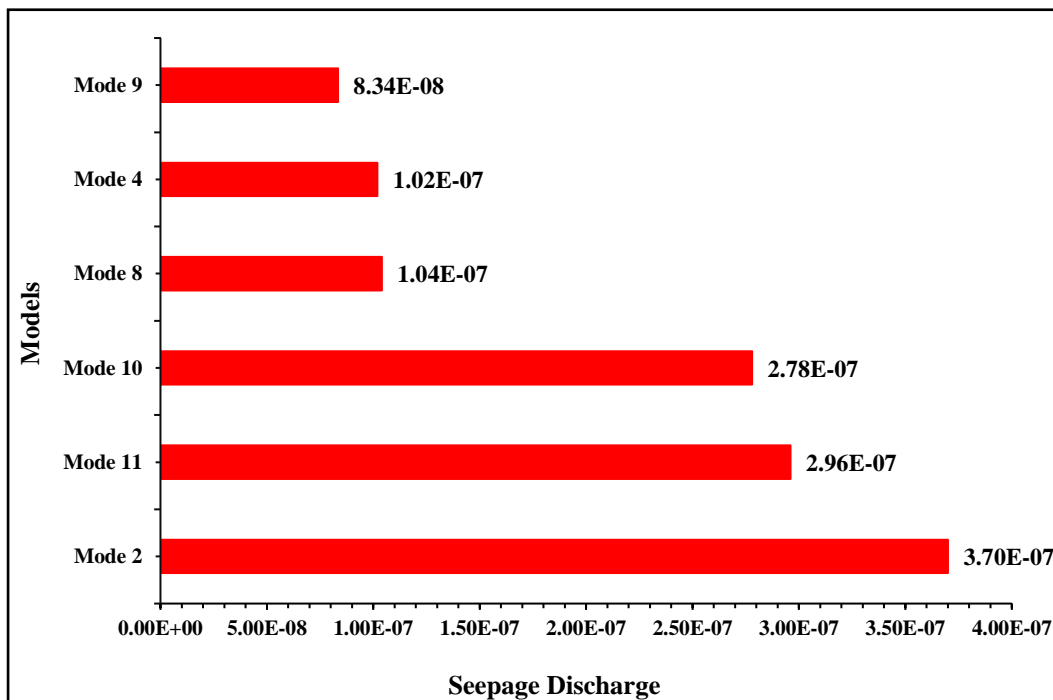


شکل ۱۳- دبی نشت از مدل ۸



شکل ۱۴- دبی نشت از مدل ۱۰

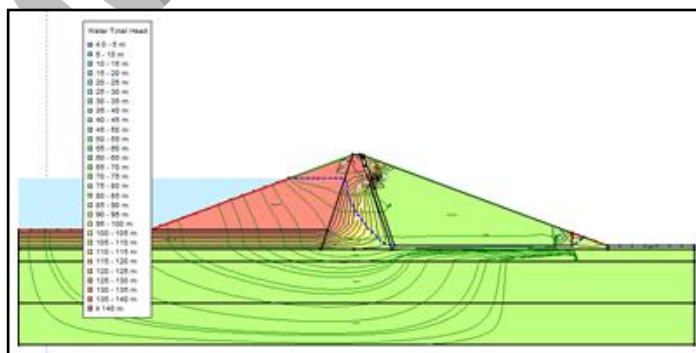
برای مقایسه بهتر شکل ۱۵ ارائه گردیده است. به علت امکان نفوذ و نشت آب از بالادست به سمت پایین دست در زیر بدنه سد خاکی، می بایست با طراحی و اجرای پرده آب بند، مسیر حرکت آب در زیر سد را افزایش داده تا با ایجاد افت فشار، امکان تراوش آب در پایین دست را به صفر رساند. طبق نمودار شکل ۱۵ قابل مشاهده است که با اجرای دیوار آب بند میزان دبی عبوری از بدنه سد کاهش یافته است. علت این امر هدایت شدن جریان آب به سمت دیوار آب بند است که باعث کاهش نشت از بدنه سد می شود. با مقایسه مدل ۹ و ۸ می توان مشاهده نمود که با افزایش عمق دیوار آب بند، گرادیان هیدرولیکی افزایش می یابد و مجموع کل فشار بالابرهاش می یابد.



شکل ۱۵ - مقایسه دبی عبوری برای حالت‌های مختلف دیوار آب‌بند

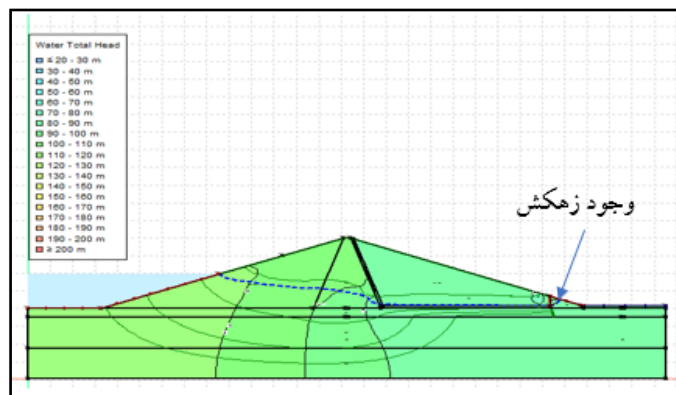
### بررسی تاثیر زهکش

برای بررسی تاثیر 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 به صورت شکل ۱۶ می‌باشد. دبی حاصله برای مدل ۱ و مدل ۶ نشان می‌دهد که میزان دبی عبوری در مدل ۶ برابر ۳/۵۷ می‌باشد 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 به دلیل وجود فشار صفر، میزان دبی عبوری کاهش یافته است.



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

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



شکل ۱۷- شماتیک خط فریاتیك در مدل ۷

در حالت وجود زهکش پایداری سد افزایش یافته است. زیرا خط فریاتیك از قسمت پایین دست سد عبور نکرده و تراز کاهشی نسبت به حالت بدون زهکش دارد. به این دلیل میزان دبی از  $1/66e7$  به  $1e-7$  کاهش یافته است.

#### نتیجه گیری

با افزایش سطح آب زیرزمینی، میزان خط فریاتیك آب نیز افزایش یافته است. سطح آب پشت سد در میزان خط فریاتیك ایجاد شده تاثیر گذار و با استفاده از دیوار آب بند میزان نشتی کاهش یافته است. این کاهش به دلیل وجود دیوار آب بند که هدایت آب از بدنه کمتر می شود. همچنین استفاده از پرده رسی نیز باعث کاهش میزان نشتی می شود زیرا پرده رسی باعث طولانی شدن مسیر و کاهش انرژی و میزان نشتی در حالت وجود آب بند ۲۳ درصد کاهش یافته است. وجود پرده رسی باعث کاهش ۲۶ درصدی نشتی شده و مسیر آبی برای حالت دارای آب بند و پتوی رسی و سد واقعی متفاوت است و همین تفاوت باعث به وجود آمدن تفاوت در میزان خط فریاتیك و نشت شده و بهترین مکان برای دیوار آب بند زیر هسته رسی است.

#### منابع

- 1- Dimi Niyat, A. (2008). Optimization of clay core dimensions under the stability conditions of earth dams using genetic algorithms. *Master's thesis in hydraulic structures*, Faculty of Agriculture, Urmia University.
- 2- Derakhshandi, M., M. Honarmand, A H. Sadeghpour. Narrow Canyon Effect on the Behavior of Earth Dams at the End of Construction (Case Study: Vanyar Dam). *Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, No. 1, Spring 2022.
- 3- Delavar E., Zounemat-Kermani M, Baradaran G. Seepage Simulation through the Body of Earth Dam Using Natural Element Meshless Numerical Method, Case Study: Droozan Dam. *Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant 3rd Year*. No. 8, June 2016.
- 4- Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam, R. Adami, H. Abbaszadeh. Numerical Analysis of Seepage in Steady and Transient Flow State by the Radial Basis Function Method Rasoul. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 8-1 (2023) 58-68.
- 5- Fattahi, H. (2020). A new approach for the evaluation of seismic slope performance. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 10, 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 & Technology*, University Technology Malaysia, 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).
- 10- Moosavi, M.M., M. R. Malekpoor. Feasibility Study of Arbatan Dam Reservoir Restoration by Clay Blanket M. *Danesh Water and Soil Journal / Volume 28 Number 3 / Year 2017*.
- 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 (EJGE)*jhjh, 10.
- 13- Shahkaram, N., M. Bayat. Numerical analysis of static behavior of earthen dam under the influence of core slope change (case study: free dam). *Water and Irrigation Management Quarterly*. Volume 12, Number 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).