

## ارزیابی سطح فریاتیکی در سدهای خاکی به کمک تحلیل عددی (مطالعه موردی: سد پانزده خرداد)

مهدی کماسی<sup>۱\*</sup>

سید محمدرضا هاشمی<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مقاله پس از مدل‌سازی سد ۱۵ خرداد با نرم‌افزار FLAC، محل منحنی فریاتیکی، اثر تغییرات سطح آب مخزن و تغییر شیب سطح بالادست و پایین‌دست بر منحنی فریاتیکی، فشار آب منفذی و ضریب اطمینان بدنه سد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ضریب اطمینان با افزایش شیب طرفین بدنه سد به اندازه ۵ و ۱۰ درجه در تراز ثابت مخزن به مقدار ۱/۵۴ و ۱/۶۹ رسید و با کاهش شیب طرفین به همان میزان ضریب ایمنی به ترتیب به مقدار ۱/۳۹ و ۱/۳۰ کاهش یافت. با افزایش سطح ایستابی، میزان فشار آب منفذی و احتمال وقوع خط نشت نیز افزایش یافت. همچنین مناطق بیشتری از بدنه اشباع و نیز توسعه مدل ناحیه پلاستیک سبب کاهش ضریب اطمینان تا میزان ۱/۰۱ شد. نتایج پژوهش بیانگر آن است که با کاهش حجم خاک‌ریزی ضریب اطمینان به میزان قابل توجهی کاهش یافت که با توجه به تغییرات سالانه آب در بالادست، می‌تواند پایداری بلندمدت سد را دچار مشکل نماید؛ بنابراین شیب اجراشده سد مناسب هست.

### واژه‌های کلیدی:

پایداری، تراوش، خط فریاتیکی، سد ۱۵ خرداد، فشار آب منفذی، نفوذپذیری.

۱. \* استادیار، دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره)، [komasi@abru.ac.ir](mailto:komasi@abru.ac.ir).  
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره).

## مقدمه

بسته‌های نرم‌افزاری قدرتمندی برای تحلیل شرایط محیط متخلخل ارائه شده است که مبنای کار آن‌ها استفاده از روش‌های عددی مختلف مانند تفاضل محدود و اجزاء محدود است (شرارد<sup>۵</sup> و همکاران، ۱۹۶۳). در طراحی سدها از تحلیل عددی با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری به‌طور گسترده برای مدل‌سازی جریان تراوش در سدهای خاکی در شرایط مختلف، استفاده می‌شود. از آنجاکه تعیین خط فریاتیکی در سدهای خاکی در دوران بهره‌برداری اهمیت زیادی دارد، به‌منظور دستیابی به این هدف، پژوهشگران روش‌های تحلیلی و تجربی مختلفی از جمله روش تجربی رزک<sup>۶</sup> را پیشنهاد کرده و داده‌های حاصله را به‌صورت مستمر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند تا در نهایت سطح فریاتیکی در سد خاکی را درون یا زیر پنجه پایین دست سد نگهداری کنند و در این راستا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تحقیقات خود را کامل تر می‌کنند به‌گونه‌ای که شاهنگیان و شمسیایی (۱۳۸۰) با استفاده از مدل شبیه‌سازی الکتریکی، دبی تراوش از سدهای خاکی را محاسبه و سپس با استفاده از این روش مقدار دقیق سطح تراوش را برای چند سد خاکی همگن، همسان و فاقد فیلتر به دست آورده و روش کاساگرانده<sup>۷</sup> را اصلاح نمودند. در روش آن‌ها فرض شد جریان آب در خاک مشابه جریان الکتریسیته در یک محیط هادی بوده که عامل اصلی این شباهت، تشابه دو قانون دارسی و اهم است. نتایج این تحقیق نشان داد که روش آزمایشگاهی شبیه‌سازی الکتریکی برای محیط‌های همگن و همسان از دقت خوبی برخوردار است. در این مدل تنها از سد خاکی همگن و همسان و بدون زهکش استفاده شده درحالی‌که رزک و ستون<sup>۸</sup> (۲۰۱۱) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی که برای سد خاکی با هسته رسی انجام داده‌اند، یک‌راه حل تحلیلی برای مسئله تراوش پیشنهاد دادند و آن را با کار ارائه شده توسط روزانف<sup>۹</sup> مقایسه و صحت سنجی نمود و نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت نفوذپذیری هسته به بدنه نسبت دبی عبوری تراوش افزایش و هرچه عرض

آمار سدهای دنیا و سدهای داخلی نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد سدها از نوع خاکی و سنگ‌ریزه‌ای هستند (صدر نژاد، ۱۳۹۰). تأمین ایمنی سدها یکی از مهم‌ترین چالش‌های مهندسی است. برای جلوگیری از خرابی سدها پیش‌بینی مخاطرات نقش بسزایی دارد. از طرفی بیشترین تعداد خرابی مربوط به سدهای خاکی است (نجم، ۱۳۷۹). وفائیان (۱۳۹۱) اعلام کردند که تا قبل از سال‌های ۱۹۶۵، حدود ۲۵ درصد خرابی سدهای خاکی در اثر تراوش غیرمجاز و شسته شدن خاک اتفاق افتاده است که در این بین حدود ۳۴ درصد سدها در پنج سال اول پس از ساخت و شروع کار سد و آگیری آن‌ها تخریب شده‌اند. بررسی‌های جامع اخیر توسط فاستر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۰) و فل<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۲) نشان می‌دهد که فرسایش داخلی و پدیده رگاب<sup>۳</sup> از عوامل اصلی شکست و حوادث مؤثر بر سدهای خاکی هستند و این نسبت از ۴۳ درصد قبل از سال ۱۹۵۰ به ۵۴ درصد پس از سال ۱۹۵۰ افزایش یافته است؛ بنابراین یکی از دلایل اصلی شکست سدهای خاکی، تراوش آن است. یکی از نکات مهم در مراحل مطالعه و در طول ساخت و ساز در سدهای خاکی حرکت مداوم آب از بالادست سد به سمت پایین دست آن است. در بررسی جریان و ترسیم شبکه جریان در سدهای خاکی، نکته اساسی معین بودن موقعیت اولین خط جریان است که در اصطلاح به خط اشباع یا خط فریاتیکی مشهور است؛ بنابراین موقعیت سطح ایجاد شده که به سطح فریاتیکی مشهور است، در پایداری سد خاکی تأثیرگذار است (ضیائی موئید<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). سطح فریاتیکی درون یک سد می‌تواند توسط طراحی درست زهکش کنترل شود. حل ترسیمی معادله لاپلاس حرکت آب در خاک در حالت دوبعدی نیازمند رسم دو سری خطوط عمود بر هم می‌گردد که خطوط جریان و هم‌پتانسیل نام دارند. این خطوط شبکه جریان را تشکیل می‌دهند. روش دیگر حل معادله لاپلاس حل عددی آن است. امروزه

5. Sherard  
6. Rezk  
7. Casagrande  
8. Senoon  
9. Rozanov

1. Foster  
2. Fell  
3. Piping  
4. Ziaie Moayed

بدنه و پی سد خاکی را به روش تحلیل عددی با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تفاوت‌هایی در شکل و گستردگی نمودارهای مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد که دلیل آن می‌تواند در نحوه مدل کامپیوتری که در آن نفوذپذیری‌ها ثابت و لایه‌بندی شده نیستند و بانفوذ مواد ریزدانه‌تر در مرز تماس لایه‌ها نفوذپذیری به‌تدریج تغییر می‌کند. در این راستا، ملک‌پور<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول و ضخامت زهکش‌های افقی بر نشت ماندگار از بدنه سد خاکی همگن را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش ضخامت و طول زهکش، پارامتر پوشش شیب پایین‌دست به مقدار زیادی افزایش می‌یابد در حالی که تأثیر پارامتر ضخامت در روابط تحلیلی موجود لحاظ نگردیده است. همچنین شدت دبی نشت با افزایش ضخامت زهکش به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این نرخ افزایش دبی با افزایش مقدار ضخامت به بیش از ضخامت حداکثر مورد نظر در این تحقیق کاهش می‌یابد. محمد شریفی و همکاران (۱۳۹۰) به نشست سد خاکی ۱۵ خرداد در دوره بهره‌برداری با استفاده از داده‌های ابزار دقیق و نقاط نشانه پرداختند و نتیجه گرفتند که تغییر مکان‌های قائم سد در حد مجاز بوده و از این نظر مشکلی وجود ندارد اما با توجه به این‌که سد جابجایی افقی نیز دارد ضرورت دارد برای انحراف سنج‌ها رفع نقص صورت گرفته و داده‌های آن‌ها قرائت و مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در روش‌هایی که بدون استفاده از نرم‌افزار یا به عبارتی تحلیل دستی است از جمله روش رزک، محدودیت‌هایی نظیر همسانگرد بودن خاک و عدم پیچیدگی در طراحی فیلتر و زهکش دارد. روش‌های مورد استفاده پژوهشگرانی از جمله ضیائی، عبادی و شریفی به دلیل استفاده از نرم‌افزار از دقت و سرعت عمل بسیار بیشتری نسبت به روش تحلیل دستی و همچنین تحلیل‌های آزمایشگاهی دارد. لازم به ذکر است که عدم دقت و توجه کافی ممکن است در تمامی روش‌های حل، خطاهای غیرقابل قبولی تولید کند. از آنجاکه احتمال خطا وجود دارد جهت کنترل و کاهش آن در تجزیه و تحلیل‌ها، با داده‌های

هسته بیشتر باشد دبی عبوری تراوش کاهش یافته است. همچنین با افزایش نسبت نفوذپذیری هسته به بدنه، میزان افت خط فریاتیک در هسته کاهش و با افزایش عرض هسته، این میزان افزایش می‌یابد. از طرفی ضیائی مؤید<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی و تحلیل خط فریاتیک در سدهای خاکی همگن با سیستم‌های زهکشی متفاوت را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که در حالت پایدار، نصب و راه‌اندازی زهکش پنجه فقط در تلاش برای جلوگیری از فرسایش پنجه پایین‌دست و کاهش راندمان آن به هنگام افزایش سطح ایستابی آب مخزن است و استفاده از زهکش دودکش قابلیت خوبی در به عقب بردن خط فریاتیک و کاهش فشار منفذی دارد. استفاده از زهکش‌های افقی در پایین‌دست سدهای خاکی باعث می‌شود که نشت عبوری از سد به سمت خروجی زهکش بهتر باشد و امتداد خط فریاتیک گرایش به سمت شیب پایین‌دست و نهایتاً به داخل زهکش داشته باشد. در این راستا گلداران و همکاران (۱۳۸۶)، بررسی اثر نفوذپذیری نسبی مصالح بدنه سد خاکی در تغییرات منحنی فریاتیک در بدنه را به روش تحلیل عددی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ثابت ماندن نفوذپذیری‌های بدنه و افزایش نفوذپذیری لایه فیلتر تأثیری بر روی شکل و موقعیت منحنی فریاتیک ندارد. همچنین آن‌ها دریافتند که با ثابت ماندن نفوذپذیری‌های بدنه و کاهش نفوذپذیری هسته، منحنی فریاتیک در هسته به سمت عقب (پایین‌دست هسته) انتقال یافته و تأثیر بسزایی در انحراف خط جریان و هدایت آن به سمت پایین‌دست داشته است. با افزایش نفوذپذیری هسته، منحنی فریاتیک در هسته سد به سمت جلو (بالادست هسته) جابجا شده است و فیلتر پایین‌دست را در ترازهای بالاتر قطع می‌کند. با کاهش دادن نفوذپذیری زهکش افقی، خط جریان در آن افزایش ارتفاع داده و در فیلتر و پوسته پایین‌دست نیز توسعه پیدا کرده است. همچنین اثر نفوذپذیری نسبی مصالح بدنه سد خاکی در تغییرات سطح منحنی فریاتیک در بدنه را به روش تحلیل عددی مورد بررسی قرار دادند. عبادی و همکاران (۱۳۸۴)، بررسی روند تغییرات فشار آب منفذی در

جاده آسفalte قم - اصفهان امکان پذیر است (سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۶۱).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی سد ۱۵ خرداد

جدول (۱): مشخصات اصلی سد ۱۵ خرداد

نوع سد	خاکی
ارتفاع از بستر رودخانه	۵۴/۳۰ متر
ارتفاع از سنگ کف	۸۹/۵ متر
طول تاج	۳۲۰ متر
عرض تاج	۱۰ متر
عرض دره در بستر رودخانه	۱۳۰ متر
رقوم بستر رودخانه	۱۳۹۴ متر از سطح دریا
رقوم تاج سد	۱۴۴۸ متر از سطح دریا
رقوم نرمال سطح آب	۱۴۴۰/۵ متر از سطح دریا
رقوم حداکثر سطح آب	۱۴۴۶ متر از سطح دریا
سرریز	لاله‌ای و فیوزپلاک
سیل طراحی	۵۶۰۰ مترمکعب در ثانیه
حجم مخزن	۲۰۰ میلیون مترمکعب
سطح مخزن	۱۴۶۰ هکتار

### مدل سازی مطالعه موردی

#### مدل سازی تفاضل محدود برای تعیین خط فریاتیک

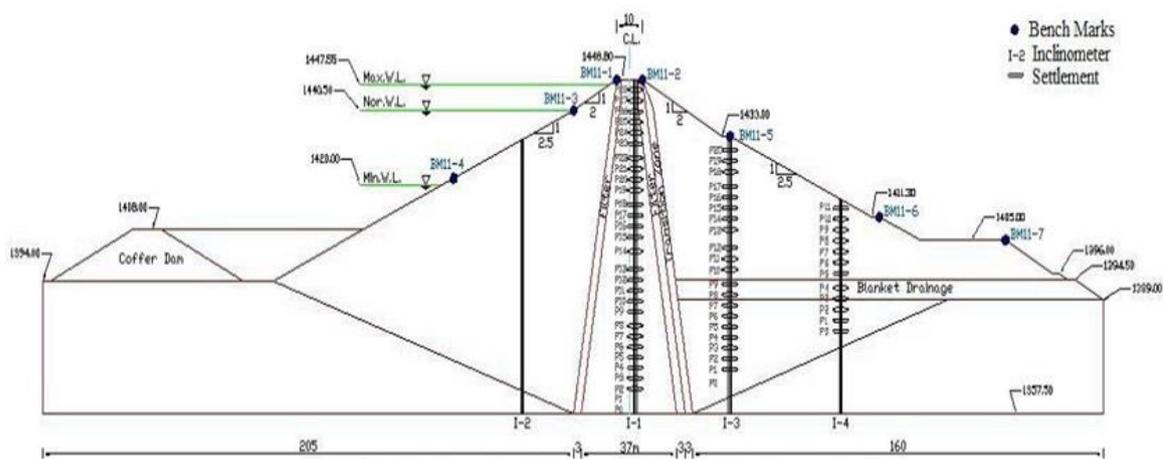
نرم افزار FLAC یک برنامه تفاضل محدود برای محاسبات مهندسی می باشد. این برنامه رفتار ساختارهای خاک، سنگ و یا دیگر مواد را که ممکن است هنگام نزدیک شدن به محدوده شکست، رفتارهای گوناگونی از خود نشان دهند را مدل سازی می کند که مواد به صورت اجزا یا مناطق نشان داده می شوند. این اجزا شبکه‌ای را که کاربر برای

ابزار دقیق مقایسه و در صورت مشاهده عدم تطابق، مدل در هر مرحله اصلاح و سپس آنالیز می شود. از آنجاکه مشاهده و ثبت رفتار سدهای خاکی طی مرحله ساخت و در دوران بهره‌برداری اهمیت زیادی دارد، به منظور دستیابی به این هدف، وسایل و ابزار مناسبی در پی، تکیه‌گاه‌های جانبی، بدنه سد و سازه‌های جانبی نصب و داده‌های حاصله به صورت مستمر مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. باروی داشت به پژوهش‌های یادشده در این مقاله سعی بر آن گردید که برای سد ۱۵ خرداد روش عددی با نرم افزار FLAC مدل شود و نتایج آن مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد. در این راستا برای شیب‌های متفاوت و همچنین در شرایط متفاوت تراز آب مخزن محاسبه و مدل سازی انجام گردید تا از رفتار خط فریاتیک و پایداری در سد ۱۵ خرداد اطلاعات کافی به دست آید.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی سد مورد مطالعه

سد خاکی ۱۵ خرداد به منظور تأمین نیاز آب کشاورزی اراضی حاشیه رودخانه قمرود از محل عباس آباد تا سمت قم و قسمتی از این دشت جمعاً به وسعت ۸۰۰۰ هکتار و همچنین تأمین قسمتی از نیاز آب شرب شهر قم به مقدار ۱ تا ۱/۲ مترمکعب در ثانیه احداث شده است. این سد خاکی در ۵ کیلومتری جاده دلیجان- قم بر روی رودخانه قمرود ساخته شده است. این سد یک سد خاکی غیر همگن با هسته رسی غیرقابل نفوذ و بازوی خاکی در سمت راست آن به انضمام تونل‌های انحراف و تونل سرریز نیلوفری می باشد. بدنه اصلی به ارتفاع ۹۶/۸ متر از سنگ کف و ۵۴/۳ متر از کف رودخانه با طول تاج ۳۲۰ متر بوده و با حجم خاکریزی بیش از دو میلیون مترمکعب ساخته شده است. این سد در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۰ هجری شمسی احداث شده، در سال ۱۳۷۳ آبگیری و از سال ۱۳۷۴ به بهره‌برداری رسیده است (اداره بهره‌برداری سد ۱۵ خرداد، ۱۳۹۰). مطابق شکل (۱)، محل سد ۱۵ خرداد در مجاورت دهکده عباس آباد و با ارتفاع ۱۳۹۵ متر از سطح دریا بر روی رودخانه قمرود بنا گشته که دسترسی به محل سد از طریق



شکل (۲): مقطع عرضی حداکثر سد ۱۵ خرداد (مقطع ۱۱-۱۱) و نمایش محل قرارگیری نشست سنج‌ها، انحراف سنج‌ها و نقاط نشانه (اداره بهره‌برداری سد ۱۵ خرداد، ۱۳۹۰)

جریان در محیط‌های با درجه اشباع متغیر را می‌توان تحلیل نمود. همچنین امکان یافتن جریان آزاد سطح سیال و اعمال بارهای مکانیکی وابسته به زمان وجود دارد (ضمیران، ۱۳۹۳).

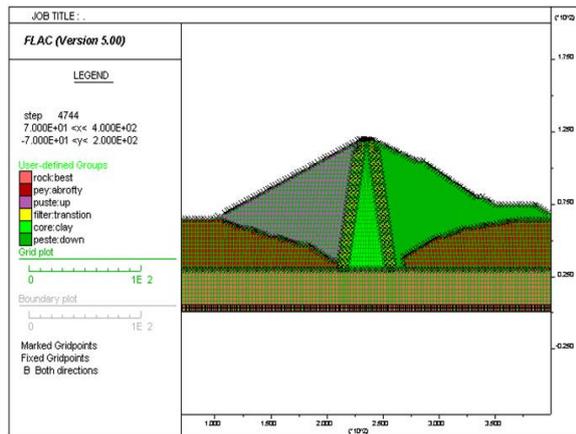
#### تعیین مش بهینه در مدل

شبکه تفاضل محدود در نرم‌افزار FLAC به صورت مجموعه‌ای از المان‌های چهارضلعی می‌باشد. پس از تشکیل شبکه در نرم‌افزار توسط کاربر، هر المان چهارضلعی به دو مجموعه قرار گرفته بر روی هم از المان‌های مثلثی تقسیم می‌گردند. در مدل‌سازی دقت شده که نسبت طول به عرض زون‌ها نزدیک به واحد باشد، در حالی که این نسبت از ۱/۵ تجاوز نماید، از دقت جواب‌ها کاسته می‌شود. علاوه بر این سعی شده که نسبت مساحت زون‌های مجاور از ۱/۴ تجاوز ننماید. تعیین ابعاد مدل عددی سد با استفاده از نقشه برش عرضی صورت گرفته است. بدین منظور از بزرگ‌ترین مقطع سد که مقطع میانی آن (۱۱-۱۱) می‌باشد، به عنوان بحرانی‌ترین مقطع برای ایجاد مدل در نرم‌افزار استفاده شده که در شکل (۲) نشان داده شده است. از آنجاکه خاک یک محیط نیمه بینهایت است، در هیچ برنامه تفاضل محدود یا اجزاء محدود نمی‌توان محیط نیمه بینهایت را به صورت مستقیم مدل نمود. برای حل این مشکل به جای یک محیط نیمه بینهایت قسمتی از خاک مدل می‌شود و برای اینکه این

مدل‌سازی موضوع مورد نظر طراحی کرده است را تشکیل می‌دهد. اجزا می‌توانند طبق خواص داده شده، شکسته شوند یا جریان یابند و شبکه می‌تواند تغییر ساختارهای متعددی را که در این برنامه وجود دارد، مدل‌سازی کند موادی را که رفتارشان بسیار غیرخطی می‌باشد را ممکن سازد (ضمیران، ۱۳۹۳).

نرم‌افزار FLAC با قابلیت‌های فراوان از جمله، در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، تغییر شکل‌های بزرگ، مدل‌های رفتاری مختلف خاک، فشار آب حفره‌ای و دیگر موارد نسبت به دیگر نرم‌افزارها از سابقه‌ی بیشتری برخوردار است و هر چهار سال یک‌بار اجلاسی برگزار می‌شود که در آن پژوهش‌های انجام شده در کلیه زمینه‌های ژئوتکنیکی ارائه می‌گردد که نشان‌دهنده کاربرد وسیع و مقبولیت استفاده از آن می‌باشد (آشوک<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳)؛ بنابراین در این مقاله استفاده از این نرم‌افزار مناسب‌تر تشخیص داده شد. نرم‌افزار FLAC قابلیت مدل‌سازی جریان در محیط‌های متخلخل را دارا است. در این نرم‌افزار امکان انجام محاسبات مکانیکی یا جریان سیال به‌تنهایی و جدای از محاسبات مکانیکی یا محاسبات مکانیکی و جریان سیال به‌عنوان اندرکنش کامل خاک و آب وجود دارد (گروه مشاوره آیتاسکا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴). با استفاده از این نرم‌افزار جریان در محیط‌های کاملاً اشباع و

1. Ashok  
2. Itasca Consulting Group



شکل (۳): تخصیص مصالح به مدل عددی سد

### نتایج و تفسیر

#### مدل سازی سد برای ایجاد سطح فریاتیکی

به طور خلاصه می توان گفت پس از تحلیل پی سد و صفر کردن تغییر مکان ها، لایه های خاک ریزی به گونه ای انجام می شود که شرایط مدل با آنچه در سد رخ داده به طور کامل هماهنگی داشته باشد. در مرحله مدل سازی پی سد می بایست تغییر مکان حاصل از آن را ثابت (صفر) کرد. بدین منظور از روش خاصی در خاک ریز استفاده شده است تا مطابق سد بیشترین نشست در نزدیکی تاج سد رخ دهد. از آنجا که هدف بررسی رفتار سد در دوران بهره برداری می باشد، بنابراین مقدار مدول حجمی آب در زمان ساخت سد برابر صفر در نظر گرفته شد تا فشار آب منفذی در زمان ساخت سد در بدنه ایجاد نگردد. علت مجاز بودن این کار این است که سد بعد از گذشت سال های زیاد از زمان آب گیری و ایجاد تراوش پایدار در بدنه، فشار آب منفذی ناشی از ساخت سد از بین رفته است و تنها شرایط تراوش و سطح فریاتیکی تعیین کننده نحوه توزیع فشار آب منفذی در بدنه سد خواهد بود. شکل (۴) گویای این مطلب است.

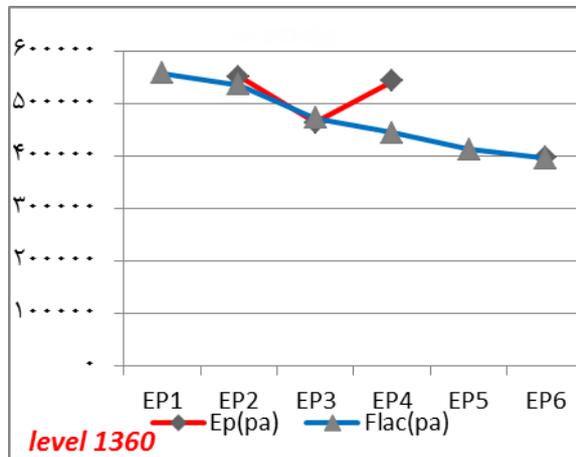
پس از مرحله ساخت بدنه، مدل سازی مرحله آبگیری و تحلیل تراوش سد در حالت تراوش پایدار، با توجه به خصوصیات نفوذپذیری مصالح و نیز نسبت تخلخل آن ها طبق جدول (۲) انجام شد. همچنین پس از شبیه سازی پی و بدنه و مخزن سد در حالت تراوش پایدار و اعمال اثر هم زمان هیدرولیکی و مکانیکی به مخزن سد و اعمال اصلاحاتی بر روی پی، برای مقادیر فشار منفذی، با انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مدل اصلی، پارامترهای قابل تغییر و مؤثر

مدل تا حد امکان به واقعیت نزدیک شود باید شرایط مرزی یا تکیه گاهی اولیه به دقت رعایت گردد. به لحاظ پایدار ماندن فیزیکی مدل بایستی جلوی حرکت صلب مدل با به وجود آوردن شرایط تکیه گاهی منطبق با واقعیت مسئله گرفته شود. مرزهای جانبی مدل بایستی آن قدر از منطقه ساخت سد فاصله داشته باشد تا تغییر محسوسی از نظر تنش و کرنش در المان های مرزی رخ ندهد و ضمناً نتایج به دست آمده تحت تأثیر محل قرارگیری مرزها نباشد و همچنین نقاط مجاور مرزها تغییر مکان نداشته باشند و مقادیر تنش ها بعد و قبل از حل مدل تفاوتی نکند بدین جهت نقاط مرزی مدل در دو انتهای چپ و راست می توانند آزادانه در جهت قائم حرکت کنند و در مقابل تغییر مکان های جانبی محدود می شوند، همچنین تغییر مکان نقاط واقع در مرز پایین مدل نیز در جهت قائم محدود می شود. با توجه به موارد ذکر شده حدود ۲۰۰ متر طول و ۱۰۰ عرض بیشتر برای ابعاد در مدل عددی جهت برآورده شدن شرایط در نظر گرفته شده است. با انجام مدل سازی های متعدد (حدود ۳۰۰ مدل) مش بهینه مشخص شد و تعداد ۵۵۰۰ المان در نظر گرفته شده است که این تعداد المان از یک سو زمان محاسبات را افزایش داده و از سوی دیگر تأثیر بسزایی در دقت جواب ها داشته است. این موضوع سبب شد که روند محاسبات به سمت هدایت شود (هاشمی، ۱۳۹۴).

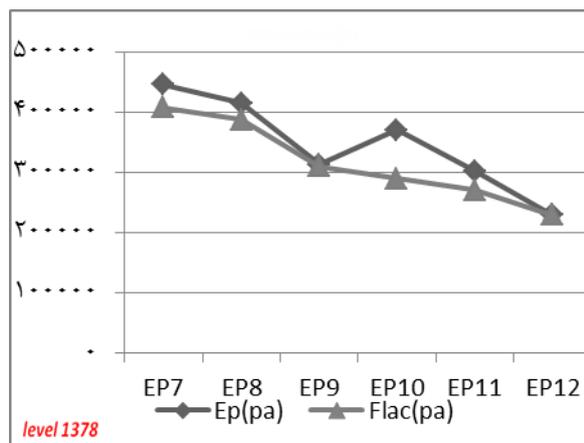
#### تخصیص مصالح به بدنه و پی

برای مصالح بکار رفته در سد در کد محاسباتی نرم افزار FLAC، پس از ساخت هندسه مدل، رفتار الاستو-پلاستیک کامل موهر - کولمب که شناخته ترین مدل در مصالح خاکی می باشد استفاده شده است. در شکل (۳) تخصیص مصالح به قسمت های مختلف کاملاً مشخص شده است.

پیزومترها با خروجی نرم افزار در ترازهای مختلف هسته در تراز آب مخزن ۱۴۲۰ پرداخته است. مقایسه خروجی های نرم افزار و پیزومترها نشان از دقت نسبتاً بالای صحت سنجی مدل دارد.



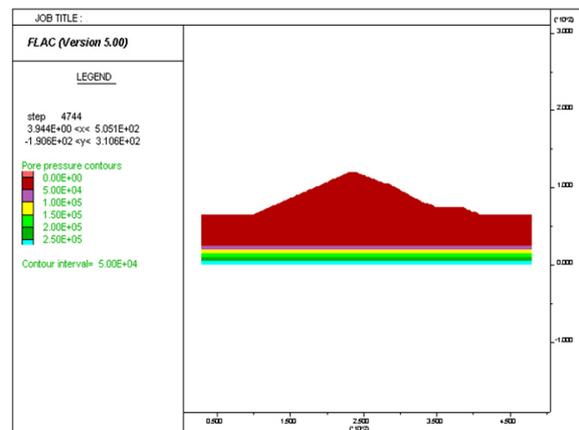
شکل (۵): مقایسه پیزومتر تراز ۱۳۶۰ هسته با خروجی نرم افزار در تراز آب مخزن ۱۴۲۰، (واحد Pa)



شکل (۶): مقایسه پیزومتر تراز ۱۳۷۸ هسته با خروجی نرم افزار در تراز آب مخزن ۱۴۲۰، (واحد Pa)

با توجه به نمودارهای ترسیم شده مشخص است که خروجی های نرم افزار و پیزومترها با دقت بسیار بالایی کالیبره شده است. مقایسه تراز فشار آب حفره ای در پیزومترهای واقع در ترازهای مختلف هسته و نرم افزار به طور مجزا نشان داده شده است. آنچه مشاهده می شود، روند تغییرات فشار آب حفره ای در پیزومترها در طول دوران بهره برداری، مطابقت خوبی با روند آب مخزن دارد و از آن تأثیر گرفته است. کالیبره کردن فشار آب منفذی مدل سبب شد در ترازهای بالای آب مخزن مقدار دقیق فشار آب منفذی پیش بینی

بر رفتار سد در دوران بهره برداری به دست آورده شد. سپس با کالیبراسیون مدل (آنالیز برگشتی) که بسیار پیچیده و حساس است، به مدل دقیق تری از سد ۱۵ خرداد دست یافته شد (هاشمی، ۱۳۹۴).



شکل (۴): نحوه توزیع فشار آب منفذی در سد در زمان ساخت KPa

جدول (۲): خصوصیات نفوذپذیری مصالح بدنه سد

مصالح	نفوذپذیری افقی Cm/s	$K_v/K_h$
هسته رسی	$1 \times 10^{-7}$	۱/۱۰
فیلترها	$5 \times 10^{-2}$	۱
مناطق انتقالی	۱	۱
پوسته	$1 \times 10^{-1}$	۱
پی آبرفتی	$1 \times 10^{-2}$	۱
پی سنگی	$1 \times 10^{-5}$	۱
منطقه تزریق شده	$1 \times 10^{-7}$	۱

### تجزیه و تحلیل و صحت سنجی

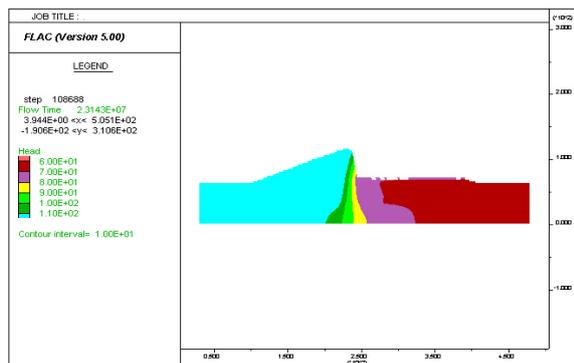
ابتدا صحت سنجی فشار آب منفذی در تراز ۱۴۲۰ که تقریباً تراز پایینی برای مخزن محسوب می شود، انتخاب شد. سپس سطح آب مخزن و آنالیز تراوش انجام شد. بعد از آنالیز برگشتی و صحت سنجی فشار آب منفذی در این تراز مخزن، به مقایسه پیزومترهای مقطع اصلی سد با خروجی نرم افزار پرداخته شده است. اشکال (۵) تا (۸) به مقایسه

علت ریزش باران یا عدم خروج آب از غلاف اطراف پیژومتر باشد.

(۳) به دلیل اینکه این افزایش ناگهانی فشار آب در ترازهای مختلف و در مقاطع متفاوت سد نیز مشاهده شد، احتمال ترک در هسته هم مطرح می‌شود.

از طرفی نتایج کارهای انجام‌شده، از نظر نشست سد، جابجایی افقی سد در ترازهای مختلف، با مدل ساخته‌شده حاضر مقایسه شد. نتیجه حاصل از مقایسه و صحت سنجی مدل اختلافات چندانی در این موارد باهم نداشتند (هاشمی، ۱۳۹۴). طبق نظریه کاساگرانده حتی نفوذپذیری یا عدم نفوذپذیری شالوده نیز تأثیری بر وضعیت مسیر زه آب (سطح فریاتیک) ندارد.

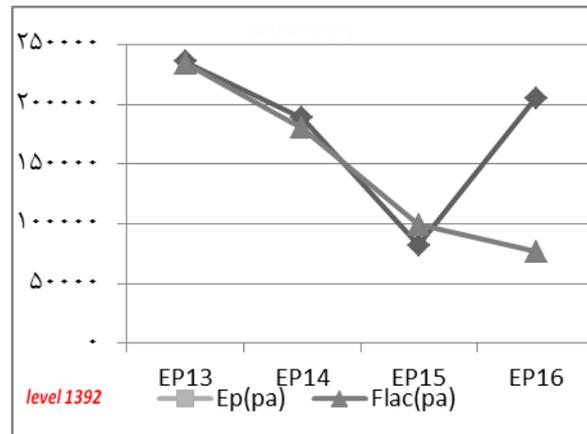
در ادامه به بررسی خط نشت و هد آب در بدنه در تراز ۱۴۴۵ که تا به حال سد کمتر تجربه کرده است پرداخته خواهد شد. این تراز مخزن برای سد بالاترین تراز در دوران بهره‌برداری محسوب می‌شود؛ و با توجه به دبی ورودی مخزن شاید هرگز برای سد رخ ندهد. تحلیل در این سطح سبب می‌شود ابعاد رفتار متفاوت بدنه سد کاملاً نمایان شود. شکل‌های (۹) تا (۱۲) تغییرات کنترهای هد آب، خط نشت و فشار آب منفذی در بدنه سد را در تراز ۱۴۴۵ مخزن در دوران بهره‌برداری نمایش داده است.



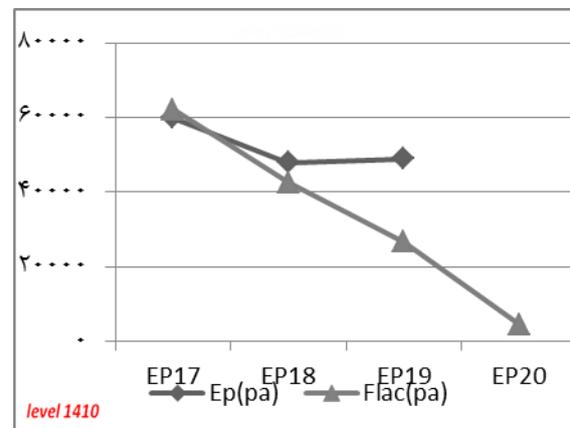
شکل (۹): تغییرات کنترهای هد آب و خط نشت در بدنه سد در تراز ۱۴۴۵ مخزن

از تحلیل حاصل از نرم‌افزار این نتیجه حاصل شد که عملاً فقط در هسته کاهش شدید سطح فریاتیک مشاهده شد که این میزان به قدری بود که خط فریاتیک در پایین‌دست در ترازهای پایین‌تر تشکیل نشد. بررسی و تحلیل در تراز کمتر

شود؛ اما قبل از این مسئله، آنچه در تمام مدت کالیبره کردن با پیژومترها خودنمایی می‌کرد افزایش ناگهانی بعضی از پیژومترها در ترازهای مختلف هسته بوده است. این پیژومترها به ترتیب شامل: EP4 در تراز ۱۳۶۰ و EP10 در تراز ۱۳۷۸ و EP16 در تراز ۱۳۹۲ و EP19 در تراز ۱۴۱۰ در مقطع ۱۱-۱۱ در هسته سد هستند.



شکل (۷): مقایسه پیژومتر تراز ۱۳۹۲ هسته با خروجی نرم‌افزار در تراز آب مخزن ۱۴۲۰، (واحد Pa)



شکل (۸): مقایسه پیژومتر تراز ۱۴۱۰ هسته با خروجی نرم‌افزار در تراز آب مخزن ۱۴۲۰، (واحد Pa)

با بررسی‌های به‌عمل‌آمده در مورد دلایل افزایش ناگهانی برخی از پیژومترها سه احتمال کلی در این زمینه مطرح شد: (۱) عدم کالیبره شدن ابزار در زمان نصب و قرائت. این عامل می‌تواند منشأ طبیعی یا انسانی داشته باشد.

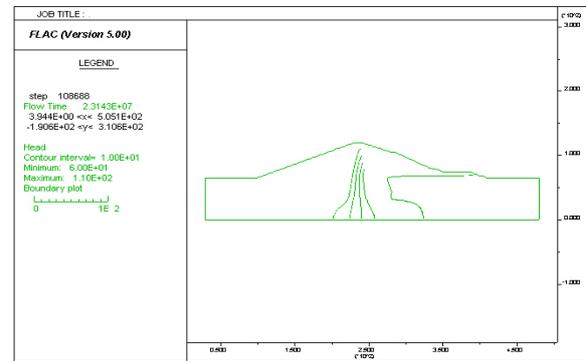
(۲) می‌تواند ابزار درست نصب و کالیبره شده باشد اما به علت تجمع آب در اطراف پیژومتر موردنظر، این پیژومتر مقدار بیشتری نسبت به بقیه نشان دهد. این می‌تواند به

مدل عددی به تراوش پایدار (بهره‌برداری) فرضیات زیر در نظر گرفته شد:

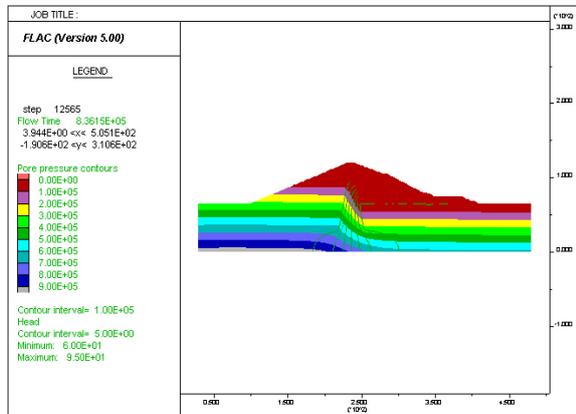
الف- کلیه ارتفاع پله‌ها ثابت نگه‌داشته شده است. ب- عرض برم‌ها ثابت نگه‌داشته شده است. ج- شیب کلی افزایش و یا کاهش پیدا کرده است.

ابتدا شیب طرفین ۵ و ۱۰ درجه افزوده شد (شیب‌ها در طرفین گسترانیده شد). لازم به ذکر است به علت طول زیاد شیب‌ها در طرفین (مقطع عرضی بزرگ سد) بیش از این مقدار امکان افزایش شیب‌ها نبوده است. اشکال (۱۳) و (۱۴) فشار آب حفره‌ای و خط نشت را در تراز ۱۴۲۰ برای شیب‌های ۵ و ۱۰ درجه نشان می‌دهند.

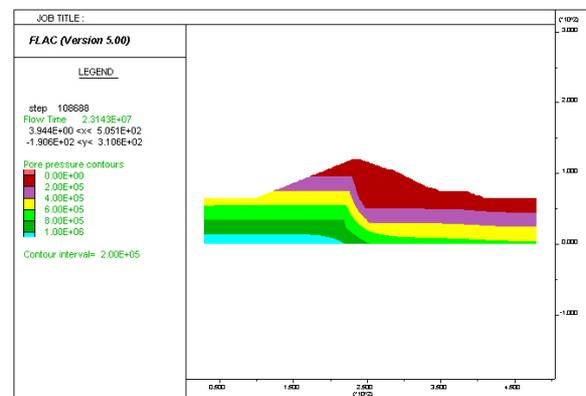
۱۴۴۰,۵ (نرمال) نیز بررسی شد و همین نتیجه حاصل شد (هاشمی، ۱۳۹۴).



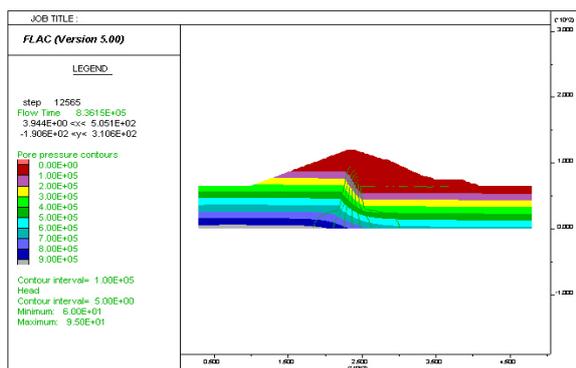
شکل (۱۰): تغییرات هد آب و خط نشت در بدنه سد در تراز ۱۴۴۵ مخزن



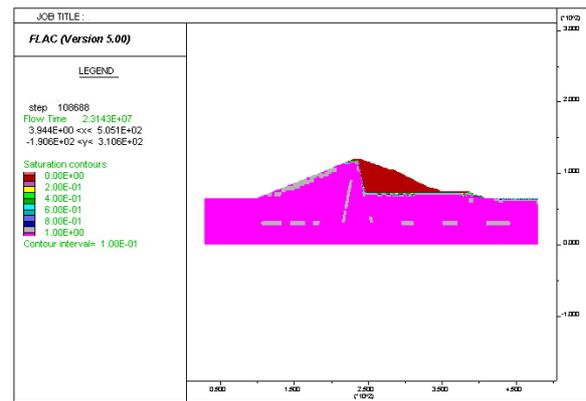
شکل (۱۳): نمایش فشار آب حفره‌ای و خط نشت در بدنه سد با افزایش شیب طرفین (۵+ درجه) (واحد Pa)



شکل (۱۱): تغییرات فشار آب منفذی در بدنه سد در تراز ۱۴۴۵ مخزن



شکل (۱۴): نمایش فشار آب حفره‌ای و خط نشت در بدنه سد با افزایش شیب طرفین (۱۰+ درجه) (واحد Pa)



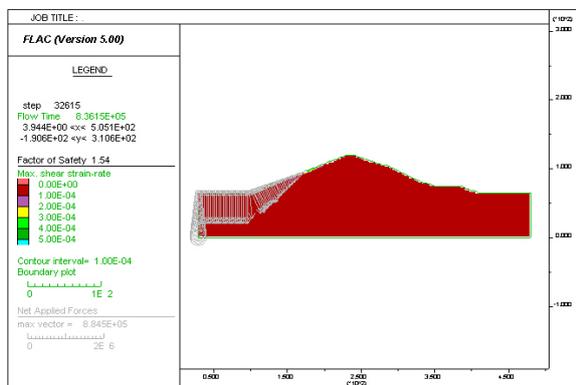
شکل (۱۲): نمایش مناطق اشباع در بدنه سد زمان تراوش پایدار در تراز ۱۴۴۵ مخزن

همچنین به مواردی چون ضریب نفوذپذیری مصالح، شیب پوسته بالادست و پایین‌دست و همچنین عوامل دیگر می‌توان اشاره کرد که هر یک می‌تواند سبب جابجایی این

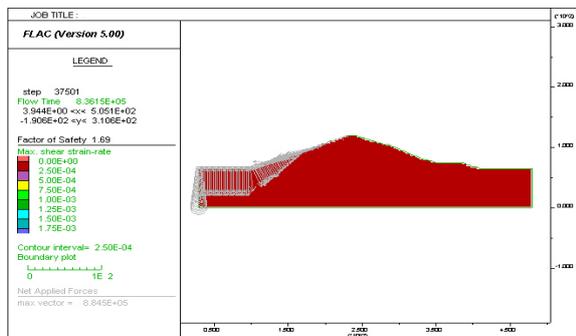
پس از تحلیل و ساخت و صحت سنجی مدل عددی کالیبره به تحلیل خط فریاتیک در شیب‌های متفاوت بدنه سد پرداخته شد. در هنگام ساخت مدل هندسی سد و رساندن

۳) باگذشت زمان نیز به علت رسوب گذاری در مخزن سد مقدار زیادی از حجم مفید سد از بین رفته و در نتیجه باعث کاهش فشار آب می شود.

در انتها لازم است که به تحلیل و محاسبه ضریب اطمینان در شیب های متفاوت بدنه سد پرداخته شود. برای به دست آوردن ضریب ایمنی کل سد خاکی از کد محاسباتی FLAC که بر اساس نظریه حد پایداری تهیه شده، استفاده شده است. با افزایش شیبها به اندازه ۵ و ۱۰ درجه در تراز ثابت مخزن (۱۴۳۵) به ترتیب ضریب اطمینان به مقدار ۱/۵۴ و ۱/۶۹ همان طور که در اشکال (۱۶) و (۱۷) مشهود است، افزایش پیدا کرده است. دلیل این امر کاهش شیب عمومی بدنه و در نتیجه پایداری بیشتر می باشد. با کاهش شیب طرفین بدنه در تراز ثابت مخزن (۱۴۳۵) به اندازه ۵ و ۱۰ درجه ضریب اطمینان به ترتیب به مقدار ۱/۳۹ و ۱/۳ کاهش پیدا کرده است که دلیل این امر افزایش شیب عمومی بدنه و کاهش پاشنه و در نتیجه پایداری کمتر است که در اشکال (۱۸) و (۱۹) مشخص است.

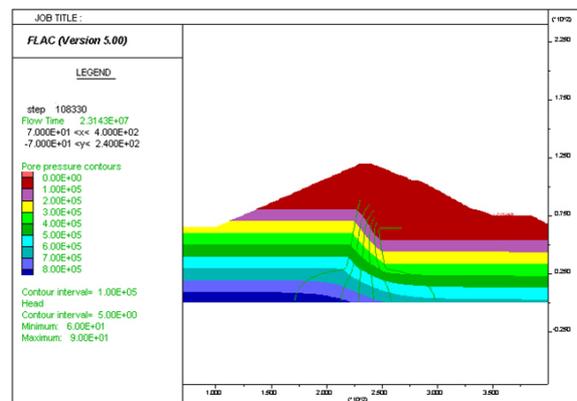


شکل (۱۶): محاسبه ضریب ایمنی با افزایش شیب طرفین ۵ درجه



شکل (۱۷): محاسبه ضریب ایمنی با افزایش شیب طرفین ۱۰ درجه

خط شوند. ملاحظه شد باوجود افزایش حجم خاکریزی در پوسته ها، تغییرات زیادی در خط فریاتیک و میزان فشار آب منفذی مشاهده نشد. با تحلیل نتایج خروجی های نرم افزار مشخص گردید که تنها خط فریاتیک در هسته افت داشته و با تغییر شیب تغییر نکرده است. با کاهش شیب طرفین به ۵ و ۱۰ درجه در تراز ۱۴۲۰ همان طور که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است، باوجود کاهش حجم خاکریزی در پوسته ها، اما بازم تغییرات زیادی در خط فریاتیک مشاهده نشد که علت این امر می تواند نفوذ بالای پوسته (۰/۰۰۱m/s) و نفوذپذیری بسیار پایین هسته باشد که سبب شده خود پوسته ها همانند زهکش عمل کنند.



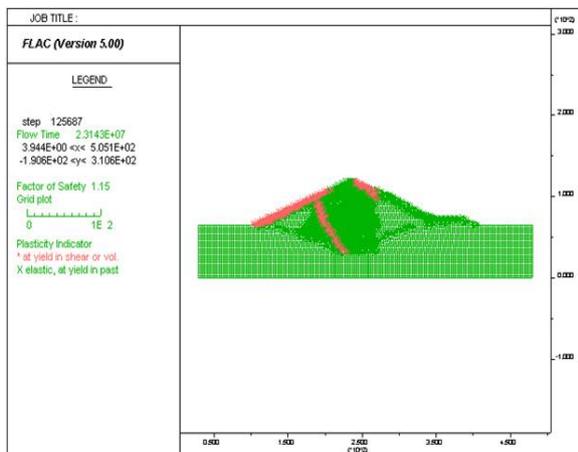
شکل (۱۵): تغییرات خط نشت در بدنه سد با کاهش شیب طرفین (واحد Pa)

با توجه به افت هد آب تنها در هسته و با توجه به سطح فریاتیک در پوسته بالادست، می توان پوسته را به عنوان زهکش آزاد تصور کرد. امکان ایجاد خط نشت در پوسته پایین دست در زمان نسبتاً طولانی وجود دارد که علت عدم تشکیل آن را بدین گونه می توان توجیه کرد:

۱) چون حداکثر سطح آب مخزن سد در مواقع سیلابی و مدت زمان کوتاهی رخ داده است و سطح آب مخزن در سد معمولاً پایین بوده، پس سطح نشت منطبق با حداکثر سطح آب در پایین دست تشکیل نشده است.

۲) تفاوت نفوذپذیری در کل بدنه نسبت به پی آبرفتی، معمولاً آب مسیر کم انرژی تر برای عبور انتخاب می کنند و این عامل سبب هدایت آب به پی می شود.

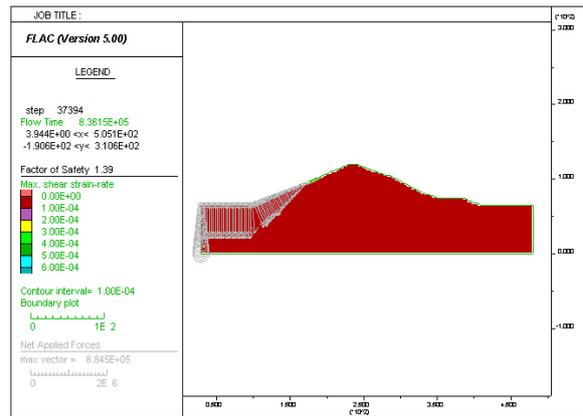
در ادامه به منظور مشخص کردن میزان تأثیر تراز آب مخزن بر ضریب اطمینان، تراز آب به مقدار ۱۴۴۰/۵ رسانده شد و آنگاه ضریب ایمنی کل سد محاسبه شد. در این حالت ضریب ایمنی محاسبه شده برابر ۱/۱۵ شد. علت این امر را می توان با بررسی مدل زون پلاستیک نشان داد که با افزایش سطح آب، زون پلاستیک تغییر می کند؛ یعنی با افزایش سطح آب در سد به علت فشار بیشتر بر بدنه تنش ها در بدنه رشد کرده و این امر می تواند سبب جابجایی بیشتر در بدنه و در نتیجه توسعه زون پلاستیک شود که در شکل (۲۱) مشخص شده است.



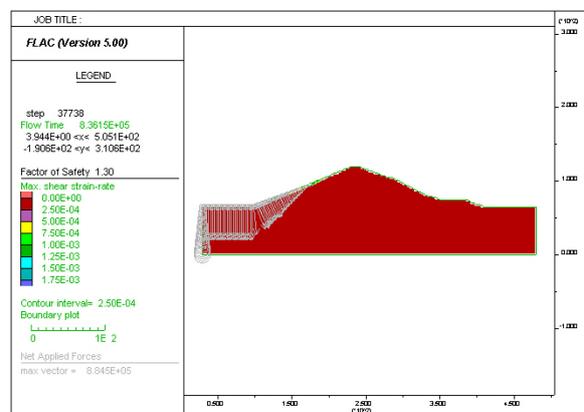
شکل (۲۱) محاسبه ضریب ایمنی و نمایش مناطق پلاستیک برای تراز مخزن ۱۴۴۰/۵

سپس تراز آب به ۱۴۴۶ تغییر یافت به گونه ای که ممکن است سد تابه حال این تراز را تجربه نکرده باشد و احتمالاً تا آخر عمر مفید سد تجربه نخواهد کرد. همان طور که در شکل (۲۱) مشخص است ضریب ایمنی محاسبه شده برابر ۱/۰۱ شد. علت کاهش شدید این ضریب، قرار گرفتن مناطق پلاستیک بیشتری نسبت به تراز ۱۴۳۵ در پوسته بالادست و در بخش هایی از هسته است. در این حالت باید ابزارها در تراز بالای مخزن بیشتر و با تعداد دفعات زیادتر کنترل شوند تا از تغییرات احتمالی جلوگیری شود. با توجه به مراجع مختلف داخلی و خارجی از جمله آیین نامه ۴۱۳ و ۱۶۱ و ۳۹۴ و معتبرترین آن ها آشتو<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۴ می توان گفت که ضریب اطمینان کلی شیب در دوران ساخت برابر ۱/۳ و

1 ASHTO

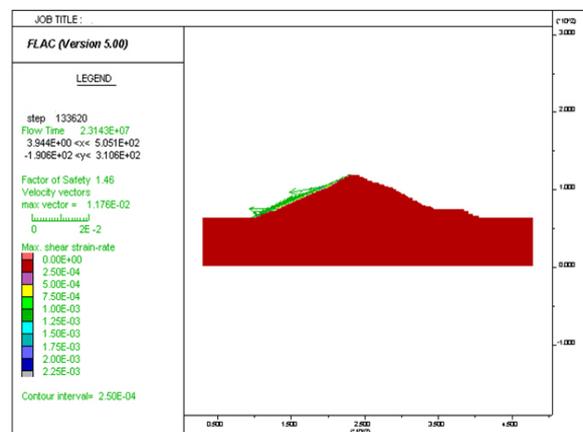


شکل (۱۸) محاسبه ضریب ایمنی با کاهش شیب طرفین (درجه)



شکل (۱۹) محاسبه ضریب ایمنی با کاهش شیب طرفین (درجه)

سپس در این راستا، شیب طرفین ثابت و تراز مخزن تغییر یافت و ضریب اطمینان در این شرایط نیز محاسبه شد. در تراز ۱۴۳۵ ضریب ایمنی برابر ۱/۴۶ شد که این میزان از حد قابل قبول یعنی یک واحد بیشتر است (شکل ۲۰).



شکل (۲۰) محاسبه ضریب ایمنی با شیب ثابت طرفین برای تراز

۱۴۳۵

در دوران بهره‌برداری ۱/۵ و در زمان وقوع زلزله ۱/۱ می‌باشد. با مقایسه مقادیر ضریب اطمینان پیشنهادی با مقادیر محاسبه‌شده مشخص شد در ترازهای نرمال مخزن در رنج مناسبی قرار گرفته اما با افزایش تراز مخزن به تراز بیشینه ضریب اطمینان کاهش می‌یابد که این موضوع می‌بایست مدنظر مسئولان قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود که در شیب‌ها و ترازهای مختلف با روش‌های تجربی دیگر و یا عددی مانند اجزا محدود نیز این روش مورد صحت‌سنجی قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

سطح فریاتیکی رسم شده توسط نرم‌افزار FLAC با نتایج ابزار دقیق تطابق خوبی دارد و با توجه به این مطلب می‌توان به رفتارنگاری سد پرداخت. همچنین به‌منظور بررسی بیشتر خط فریاتیکی شیب‌های بالادست و پایین‌دست به میزان ۵ و ۱۰ درجه افزایش و سپس به میزان ۵ و ۱۰ درجه کاهش داده شد. مشخص گردید که خط فریاتیکی تغییر محسوسی نکرده است. علت این امر نیز همان‌طور که بیان شد نفوذپذیری بالای پوسته‌ها (۰/۰۰۱) می‌باشد که سبب شده خود پوسته‌ها همانند زهکش عمل کنند. در این راستا با محاسبه‌ی ضریب اطمینان توسط نرم‌افزار در شیب‌های متفاوت بدنه در تراز ثابت (۱۴۳۵) که تراز میانگین دوران بهره‌برداری برای سد محسوب می‌شود، مشخص شد که ضریب اطمینان با افزایش شیب‌ها رشد کرده که دلیل این امر کاهش شیب عمومی بدنه و در نتیجه پایداری بیشتر می‌باشد. با کاهش شیب‌های طرفین ضریب اطمینان کلی بدنه کم شده که دلیل این امر افزایش شیب عمومی بدنه و در نتیجه ناپایداری بیشتر می‌باشد. همچنین با تغییر سطح آب مخزن در بالادست، خط فریاتیکی و مناطق اشباع دچار تغییر شدند. همان‌طور که خروجی‌ها نشان دادند، با افزایش سطح آب در بالادست مناطق بیشتری از بدنه اشباع شد و احتمال وقوع خط نشت وجود دارد. با افزایش سطح آب در بالادست مدل زون پلاستیک توسعه بیشتری یافته که این امر سبب کاهش ضریب اطمینان کلی بدنه شد. همان‌طور که نتایج تحلیل‌ها نشان داد، با کاهش حجم خاک‌ریزی ضریب اطمینان به میزان قابل‌توجهی کاهش یافت که با توجه به

تغییرات سالانه آب در بالادست، می‌توان نتیجه گرفت کاهش حجم خاک‌ریزی در سد موجود می‌تواند پایداری بلندمدت را دچار مشکل نماید؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت شیب فعلی در نظر گرفته‌شده بهینه می‌باشد و جهت رفتارنگاری دقیق‌تر شایسته است نسبت به رفع نقص پیزمترها اقدام شود. همچنین علت عدم تشکیل خط فریاتیکی در پایاب و پایین‌دست را می‌توان با چند دلیل بیان کرد:

الف) چون حداکثر سطح آب مخزن سد در مواقع سیلابی و مدت‌زمان کوتاهی رخ داده است و سطح آب مخزن در سد معمولاً پایین بوده، پس سطح نشت منطبق با حداکثر سطح آب در پایین‌دست تشکیل نشده است.

ب) تفاوت نفوذپذیری در کل بدنه نسبت به پی آبرفتی، معمولاً آب مسیر کم انرژی تر برای عبور انتخاب می‌کند و این عامل سبب هدایت آب به پی می‌شود.

ج) نفوذپذیری نسبی  $\left(\frac{Kc}{Kd}\right)$  بسیار پایین برای سد که سبب شد هد آب تنها در هسته افت داشته باشد که این امر با نتایج کار عبادی و همکاران تطابق خوبی داشت.

د) زمانی که زهکش دودکش نصب‌شده است خط فریاتیکی تمایل دارد که عمدتاً در سمت بالادست بماند و نشت در سراسر خاک‌ریز نمی‌خواهد ادامه یابد که با نتیجه حاصل از فعالیت ضیائی و همکاران کاملاً تطابق دارد.

### مراجع

- ۱- اداره بهره‌برداری سد ۱۵ خرداد، (۱۳۹۰). "گزارش سالیانه کنترل و پایداری سد ۱۵ خرداد"، ایران.
- ۲- سازمان زمین‌شناسی کشور، (۱۳۶۱). "نقشه‌های زمین‌شناسی محدوده قم و سد"، ایران.
- ۳- شاهنگیان، ع. و شمسایی، ا. (۱۳۸۰). "تحلیل تراوش در سدهای خاکی با مدل‌های الکتریکی"، اجلاس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی، ۱۲ تا ۱۳ اردیبهشت‌ماه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صفحات ۱ تا ۸.
- ۴- صدر نژاد، ا. ا. (۱۳۹۰). "سدهای خاکی و تحلیل عددی آن"، انتشارات دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، ۶۹۸ ص.
- ۵- ضمیران، س. (۱۳۹۳). "مدل‌سازی و تحلیل سازه‌های خاکی و سنگی در FLAC"، انتشارات نوآور، چاپ دوم، تهران، ۳۰۴ ص.
- ۶- عبادی، ح، امین فر، م. ح. و فرهمند آذر، ب. (۱۳۸۴). "بررسی روند تغییرات فشار آب منفذی در بدنه و پی سد خاکی با استفاده از ابزار

دقیق و مقایسه آن با نتایج تحلیلی"، پنجمین اجلاس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر تهران .

۷- گلداران، ر. و عبادی، ح. (۱۳۸۶). "بررسی اثر نفوذپذیری نسبی مصالح بدنه سد خاکی در تغییرات منحنی فریاتیك در بدنه"، سومین کنگره ملی مهندسی عمران .

۸- محمد شریفی، ا. قادری، ک. رهنما، م. ب. (۱۳۹۰). "آنالیز نشست سد خاکی ۱۵ خرداد در دوره بهره‌برداری با استفاده از ابزار دقیق و نقاط نشانه"، یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۹- نجم، ک. (۱۳۷۹). "رفتارسنجی و ابزار دقیق در سدها"، چهارمین اجلاس سدسازی ایران، تهران، صفحات ۴۷۲ تا ۴۸۴.

۱۰- وفائیان، م. (۱۳۹۱). "سدهای خاکی"، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۵۱۲ ص.

۱۱- هاشمی، س. م. (۱۳۹۴). "تعیین سطح فریاتیك به روش تحلیل عددی به‌منظور بررسی تراوش و پایداری سدهای خاکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی (ره).

12- Ashok K. Chugh. (2003). "A method for locating critical slip surfaces in slope stability analysis." Canadian Geotechnical Journal, 38: 328-337.

13- Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D. (1992). "Geotechnical Engineering of Embankment Dams." Publisher: Aa Balkema, Rotterdam, Brookfield, ISBN-10: 9054101288.

14- Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M. (2000). "A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping." Canadian Geotechnical Journal. 37(5), 1025-1061.

15- Itasca Consulting Group, Inc. (2004). "FLAC User Manual." Version 5.0. USA

16- Malekpour, A., Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh dalir, A. and Sadrekarimi, J. (2012), "Effect of horizontal drain size on the stability of an embankment dam in steady and transient seepage conditions." Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, 36, pp: 139-152.

17- Rezk, M. and Senoon, A.A. (2011). "Analytical solution of seepage through earth dam with an internal core." Alexandria Engineering Journal. 50(1), 111-115.

18- Sherard J.L., Woodward R.J., Gizienski S.F. and Clevenger W.A. (1963). "Earth and Earth-Rock Dams." John Wiley and Sons. New York.

19- Ziaie Moayed, R., Rashidian, V. and Izadi, E. (2012). "Evaluation of phreatic line in homogeneous earth dams with different drainage systems." Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, pp: 619-626.