نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال چهارم / شماره سیزدهم / تابستان ۱۳۹۶

Journal of Dam and Hydroelectric Power Plant
4rd Year / No. 13 / March 2017

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

مهدی کماسی*[۱]
سید محمدرضا هاشمی[۲]

چکیده

در این مقاله پس از مدل‌سازی سد ۱۵ خرداد با نرم‌افزار FLAC، محل منحنی فریاتیک، اثر تغییرات سطح آب مخزن و تغییر شیب سطح بالادست و پایین‌دست بر منحنی فریاتیک، فشار آب منفذی و ضریب اطمینان بدنه سد مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته است. ضریب اطمینان با افزایش شیب طرفین بدنه سد به‌اندازه 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 قابل‌توجهی 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 فریاتیک، 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.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی(ره).

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۹ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۱

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

مقدمه

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 مهندسین 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 دراین‌بین حدود ۳۴ درصد سدها در پنج سال اول پس از ساخت و شروع کار سد و آبگیری آن‌ها تخریب شده‌اند. بررسی‌های جامع اخیر توسط فاستر[1] و همکاران (۲۰۰۰) و فل[2] و همکاران (۱۹۹۲) نشان می‌دهد که فرسایش داخلی و پدیده رگاب[3] 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 افزایش‌یافته است؛ بنابراین یکی از دلایل اصلی شکست سدهای خاکی، تراوش آن است. یکی از نکات مهم در مراحل مطالعه و در طول ساخت‌وساز در سدهای خاکی حرکت مداوم آب از بالادست سد به سمت پایین‌دست 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 فریاتیک مشهور است؛ بنابراین موقعیت سطح ایجادشده که به سطح فریاتیک مشهور است، در پایداری سد خاکی تأثیرگذار است (ضیائی موئید[4] و همکاران، ۲۰۱۲). سطح فریاتیک 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 بسته‌های نرم‌افزاری قدرتمندی برای تحلیل شرایط محیط متخلخل ارائه‌شده است که مبنای کار آن‌ها استفاده از روش‌های عددی مختلف مانند تفاضل محدود و اجزاء محدود است (شرارد[5] 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. ازآنجاکه تعیین خط فریاتیک در سدهای خاکی در دوران بهره‌برداری اهمیت زیادی دارد، به‌منظور دستیابی به این هدف، پژوهشگران روش‌های تحلیلی و تجربی مختلفی ازجمله روش تجربی رزک[6] را پیشنهاد کرده و داده‌های حاصله را به‌صورت مستمر مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌دهند تا درنهایت سطح فریاتیک در سد خاکی را درون یا زیر پنجه پایین‌دست سد نگهداری کنند و در این راستا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تحقیقات خود را کامل‌تر می‌کنند به‌گونه‌ای که شاهنگیان و شمسایی (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[7] 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 استفاده‌شده درحالی‌که رزک و ستون[8] (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 ارائه‌شده توسط روزانف[9] مقایسه و صحت سنجی نمود و نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت نفوذپذیری هسته به بدنه نسبت دبی عبوری تراوش افزایش و هرچه عرض

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

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

هسته بیشتر باشد دبی عبوری تراوش کاهش‌یافته 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 موئید[1] و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی و تحلیل خط فریاتیک در سدهای خاکی همگن با سیستم‌های زهکشی متفاوت را موردبررسی قراردادند 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 موردبررسی قراردادند و به این نتیجه رسیدند که ثابت ماندن نفوذپذیری‌های بدنه و افزایش نفوذپذیری لایه فیلتر تأثیری بروی 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) انتقال‌یافته 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 پیداکرده است. همچنین اثر نفوذپذیری نسبی مصالح بدنه سد خاکی در تغییرات سطح منحنی فریاتیک در بدنه را به روش تحلیل عددی موردبررسی قراردادند. عبادی و همکاران (۱۳۸۴)، بررسی روند تغییرات فشار آب منفذی در بدنه و پی سد خاکی را به روش تحلیل عددی با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق را موردبررسی قراردادند 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[2] و همکاران (۲۰۱۲)، بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول و ضخامت زهکش‌های افقی بر نشت ماندگار از بدنه سد خاکی همگن را موردبررسی قراردادند و نتیجه گرفتند که با افزایش ضخامت و طول زهکش، پارامتر پوشش شیب پایین‌دست به مقدار زیادی افزایش می‌یابد درحالی‌که 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 موردنظر 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 تجزیه‌وتحلیل قرار گیرد. در روش‌هایی که بدون استفاده از نرم‌افزار یا به عبارتی تحلیل دستی است ازجمله روش رزک، محدودیت‌هایی نظیر همسانگرد بودن خاک و عدم پیچیدگی در طراحی فیلتر و زهکش دارد. روش‌های مورداستفاده پژوهشگرانی ازجمله 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. ازآنجاکه احتمال خطا وجود دارد جهت کنترل و کاهش آن در تجزیه‌وتحلیل‌ها، با داده‌های

1. Ziaie Moayed

2. Malekpour

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

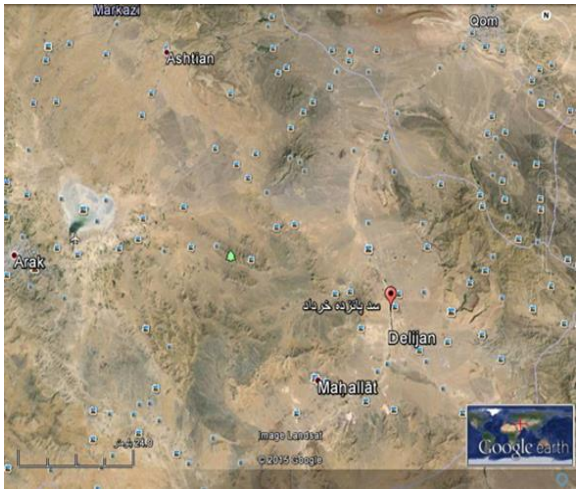
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

ابزار دقیق مقایسه و در صورت مشاهده عدم تطابق، مدل در هر مرحله اصلاح و سپس آنالیز می‌شود. ازآنجاکه مشاهده و ثبت رفتار سدهای خاکی طی مرحله ساخت و در دوران بهره‌برداری اهمیت زیادی دارد، به‌منظور دستیابی به این هدف، وسایل و ابزار مناسبی در پی، تکیه‌گاه‌های جانبی، بدنه سد و سازه‌های جانبی نصب و داده‌های حاصله به‌صورت مستمر مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. باروی داشت به پژوهش‌های یادشده در این مقاله سعی بر آن گردید که برای سد ۱۵ خرداد روش عددی با نرم‌افزار 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 مدل‌سازی انجام گردید تا از رفتار خط فریاتیک و پایداری در سد ۱۵ خرداد اطلاعات کافی به دست آید.

مواد و روش‌ها

معرفی سد موردمطالعه

سد خاکی ۱۵ خرداد به‌منظور تأمین نیاز آب کشاورزی اراضی حاشیه رودخانه قمرود از محل عباس‌آباد 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 احداث‌شده است. این سد خاکی در ۵ کیلومتری جاده دلیجان- قم بر روی رودخانه قمرود ساخته‌شده 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 می‌باشد. 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 ساخته‌شده است. این سد در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۰ هجری شمسی احداث‌شده، 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 عباس‌آباد و با ارتفاع ۱۳۹۵ متر از سطح دریا بر روی رودخانه قمرود بنا گشته که دسترسی به محل سد از طریق جاده آسفالته قم – اصفهان امکان‌پذیر است (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۶۱).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی سد ۱۵ خرداد

جدول (۱): مشخصات اصلی سد ۱۵ خرداد

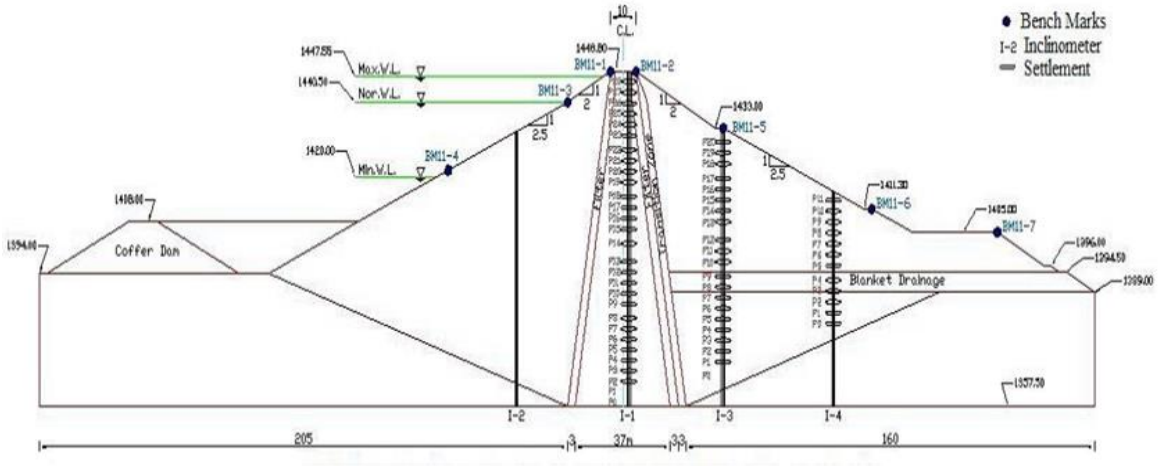
نوع سد	خاکی
ارتفاع از بستر رودخانه	۵۴/۳۰ متر
ارتفاع از سنگ کف	۸۹/۵ متر
طول تاج	۳۲۰ متر
عرض تاج	۱۰ متر
عرض دره در بستر رودخانه	۱۳۰ متر
رقوم بستر رودخانه	۱۳۹۴ متر از سطح دریا
رقوم تاج سد	۱۴۴۸ متر از سطح دریا
رقوم نرمال سطح آب	۱۴۴۰/۵ متر از سطح دریا
رقوم حداکثر سطح آب	۱۴۴۶ متر از سطح دریا
سرریز	لاله‌ای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

مدل‌سازی مطالعه موردی

مدل‌سازی تفاضل محدود برای تعیین خط فریاتیک

نرم‌افزار FLAC یک برنامه تفاضل محدود برای محاسبات مهندسی می‌باشد. 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 مدل‌سازی می‌کند که مواد به‌صورت اجزا یا مناطق نشان داده می‌شوند. این اجزا شبکه‌ای را که کاربر برای

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]



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)

مدل‌سازی موضوع موردنظر طراحی کرده است را تشکیل می‌دهد. اجزا می‌توانند طبق خواص داده‌شده، 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 باقابلیت‌های فراوان ازجمله، درنظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، تغیر 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 انجام‌شده در کلیه زمینه‌های ژئوتکنیکی ارائه می‌گردد که نشان‌دهنده کاربرد وسیع و مقبولیت استفاده از آن می‌باشد (آشوک[1]، ۲۰۰۳)؛ بنابراین در این مقاله استفاده از این نرم‌افزار مناسب‌تر تشخیص داده شد. نرم افزا 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[2]، ۲۰۰۴). با استفاده از این نرم‌افزار جریان در محیط‌های کاملاً اشباع و 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 به‌صورت مجموعه‌ای از المان‌های چهارضلعی می‌باشد. پس از تشکیل شبکه در نرم‌افزار توسط کاربر، هر المان چهارضلعی به دو مجموعه قرارگرفته بر روی‌هم از المان‌های مثلثی تقسیم می‌گردند. در مدل‌سازی دقت شده که نسبت طول به عرض زون‌ها نزدیک به واحد باشد، در حالتی 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، به‌عنوان بحرانی‌ترین مقطع برای ایجاد مدل در نرم‌افزار استفاده‌شده که در شکل (۲) نشان داده‌شده است. ازآنجاکه خاک یک محیط نیمه بینهایت است، در هیچ برنامه تفاضل محدود یا اجزاء محدود نمی‌توان محیط نیمه بینهایت را به‌صورت مستقیم مدل نمود. برای حل این مشکل به‌جای یک محیط نیمه بینهایت قسمتی از خاک مدل می‌شود و برای اینکه این

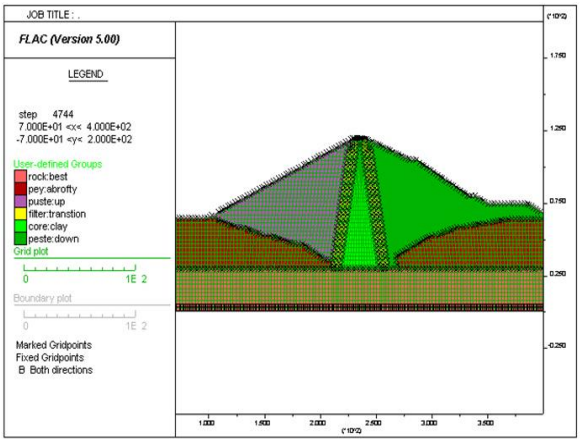
1. Ashok
2. Itasca Consulting Group

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

مدل تا حد امکان به واقعیت نزدیک شود باید شرایط مرزی یا تکیه‌گاهی اولیه به‌دقت رعایت گردد. به لحاظ پایدار ماندن فیزیکی مدل بایستی جلوی حرکت صلب مدل با به وجود آوردن شرایط تکیه‌گاهی منطبق با واقعیت مسئله گرفته شود. مرزهای جانبی مدل بایستی آن‌قدر از منطقه ساخت سد فاصله داشته باشد تا تغییر محسوسی ازنظر تنش و کرنش در المان‌های مرزی رخ ندهد و ضمناً نتایج به‌دست‌آمده تحت تأثیر محل قرارگیری مرزها نباشد و همچنین نقاط مجاور مرزها تغییر مکان قائم نداشته باشند و مقادیر تنش‌ها بعد و قبل از حل مدل تفاوتی نکند بدین‌جهت نقاط مرزی مدل در دو انتهای چپ و راست می‌توانند آزادانه در جهت قائم حرکت کنند و در مقابل تغییر مکان‌های جانبی محدود می‌شوند، همچنین تغییر مکان نقاط واقع در مرز پایین مدل نیز در جهت قائم محدود می‌شود. با توجه به موارد ذکرشده حدود ۲۰۰ متر طول و ۱۰۰ عرض بیشتر برای ابعاد در مدل عددی جهت برآورده شدن شرایط درنظر گرفته‌شده است. با انجام مدل‌سازی‌های متعدد (حدود ۳۰۰ مدل) مش بهینه مشخص شد و تعداد ۵۵۰۰ المان درنظر گرفته‌شده است که این تعداد المان از یک‌سو زمان محاسبات را افزایش داده و از سوی دیگر تأثیر بسزایی در دقت جواب‌ها داشته است. این موضوع سبب شد که روند محاسبات به سمت درست هدایت شود (هاشمی، ۱۳۹۴).

تخصیص مصالح به بدنه و پی

برای مصالح بکار رفته در سد در کد محاسباتی نرم‌افزار FLAC، پس از ساخت هندسه مدل، رفتار الاستو-پلاستیک کامل موهر – کولمب که شناخته‌ترین مدل در مصالح خاکی می‌باشد استفاده‌شده است. در شکل (۳) تخصیص مصالح به قسمت‌های مختلف کاملاً مشخص‌شده است.



شکل (۳): تخصیص مصالح به مدل عددی سد

نتایج و تفسیر

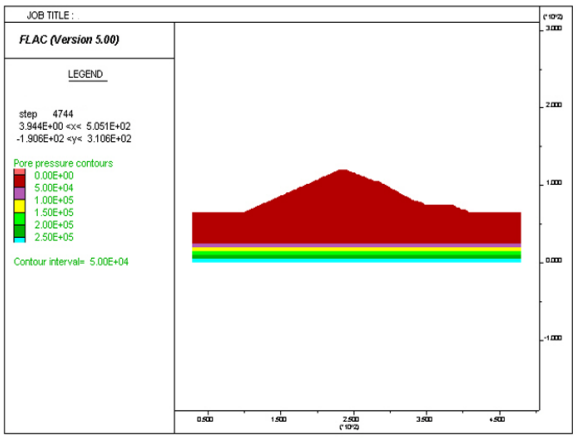
مدل‌سازی سد برای ایجاد سطح فریاتیک

به‌طور خلاصه می‌توان گفت پس از تحلیل پی سد و صفر کردن تغیر مکان‌ها، لایه‌های خاک‌ریزی به‌گونه‌ای انجام می‌شود که شرایط مدل با آنچه در سد رخ‌داده به‌طور کامل هماهنگی داشته باشد. در مرحله مدل‌سازی پی سد می‌بایست تغییر مکان حاصل از آن را ثابت (صفر) کرد. بدین منظور از روش خاصی در خاک‌ریز استفاده‌شده است تا مطابق سد بیشترین نشست در نزدیکی تاج سد رخ دهد. ازآنجاکه هدف بررسی رفتار سد در دوران بهره‌برداری می‌باشد، بنابراین مقدار مدول حجمی آب در زمان ساخت سد برابر صفر درنظر 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 سال‌های زیاد از زمان آب‌گیری و ایجاد تراوش پایدار در بدنه، فشار آب منفذی ناشی از ساخت سد از بین رفته است و تنها شرایط تراوش و سطح فریاتیک تعیین‌کننده نحوه توزیع فشار آب منفذی در بدنه سد خواهد بود. شکل (۴) گویای این مطلب است.

پس از مرحله ساخت بدنه، مدل‌سازی مرحله آبگیری و تحلیل تراوش سد در حالت تراوش پایدار، با توجه به خصوصیات نفوذپذیری مصالح و نیز نسبت تخلخل آن‌ها طبق جدول (۲) انجام شد. همچنین پس از شبیه‌سازی پی و بدنه و مخزن سد در حالت تراوش پایدار و اعمال اثر هم‌زمان 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 قابل‌تغییر و مؤثر

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

بر رفتار سد در دوران بهره‌برداری به دست آورده شد. سپس با کالیبراسیون مدل (آنالیز برگشتی) که بسیار پیچیده و حساس است، به مدل دقیق‌تری از سد ۱۵ خرداد دست‌یافته شد (هاشمی، ۱۳۹۴).



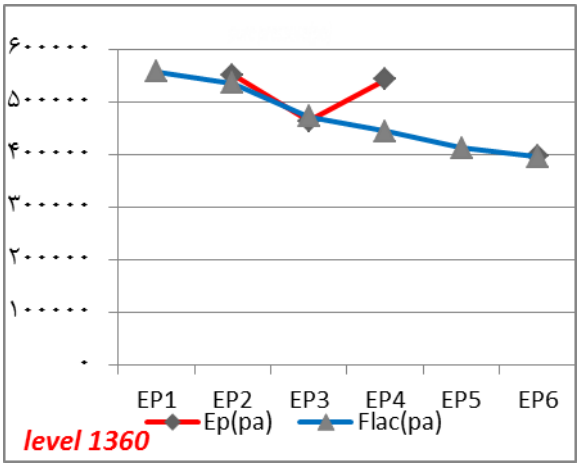
شکل (۴): نحوه توزیع فشار آب منفذی در سد در زمان ساخت KPa

جدول (۲): خصوصیات نفوذپذیری مصالح بدنه سد

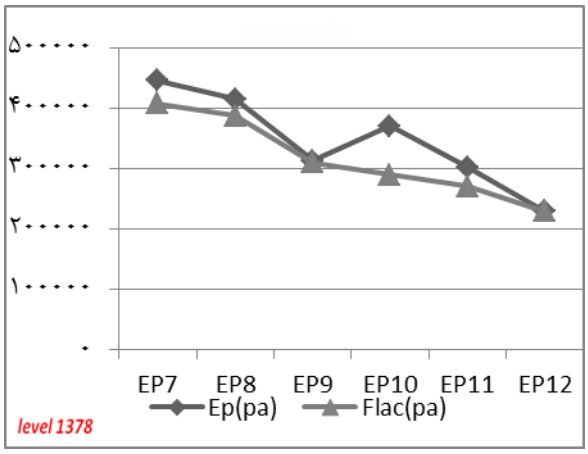
مصالح	نفوذپذیری افقی Cm/s	K_v/K_h
هسته رسی	۱×۱۰^{-۷}	۱/۱۰
فیلترها	۵×۱۰^{-۲}	۱
مناطق انتقالی	۱	۱
پوسته	۱×۱۰^{-۱}	۱
پی آبرفتی	۱×۱۰^{-۲}	۱
پی‌سنگی	۱×۱۰^{-۵}	۱
منطقه تزریق‌شده	۱×۱۰^{-۷}	۱

تجزیه‌وتحلیل و صحت سنجی

ابتدا صحت سنجی فشار آب منفذی در تراز ۱۴۲۰ که تقریباً تراز پایینی برای مخزن محسوب می‌شود، 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 نرم‌افزار پرداخته‌شده است. اشکال (۵) تا (۸) به مقایسه پیزومترها با خروجی نرم‌افزار در ترازهای مختلف هسته در تراز آب مخزن ۱۴۲۰ پرداخته است. مقایسه خروجی‌های نرم‌افزار و پیزومترها نشان از دقت نسبتاً بالای صحت سنجی مدل دارد.



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

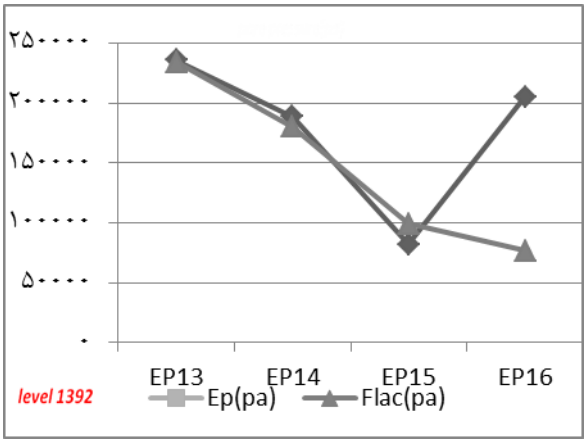


شکل (۶): مقایسه پیزومتر تراز ۱۳۷۸ هسته با خروجی نرم‌افزار در تراز آب مخزن ۱۴۲۰، (واحد Pa)

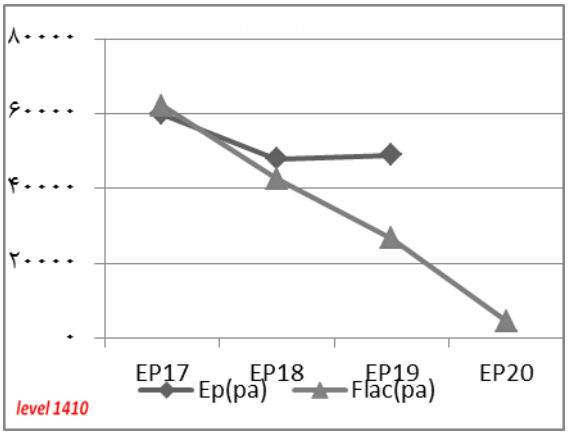
با توجه به نمودارهای ترسیم‌شده مشخص است که خروجی‌های نرم‌افزار و پیزومترها با دقت بسیار بالایی کالیبره شده است. مقایسه تراز فشار آب حفره‌ای در پیزومترهای واقع در ترازهای مختلف هسته و نرم‌افزار به‌طور مجزا نشان داده‌شده است. آنچه مشاهده می‌شود، روند تغییرات فشار آب حفره‌ای در پیزومترها در طول دوران بهره‌برداری، 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 پیش‌بینی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

شود؛ اما قبل از این مسئله، آنچه در تمام مدت کالیبره کردن با پیزومترها خودنمایی می‌کرد افزایش ناگهانی بعضی از پیزومترها در ترازهای مختلف هسته بوده است. این پیزومترها 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 پیزومتر تراز ۱۳۹۲ هسته با خروجی نرم‌افزار در تراز آب مخزن ۱۴۲۰، (واحد Pa)



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

با بررسی‌های به‌عمل‌آمده در مورد دلایل افزایش ناگهانی برخی از پیزومترها سه احتمال کلی در این زمینه مطرح شد:

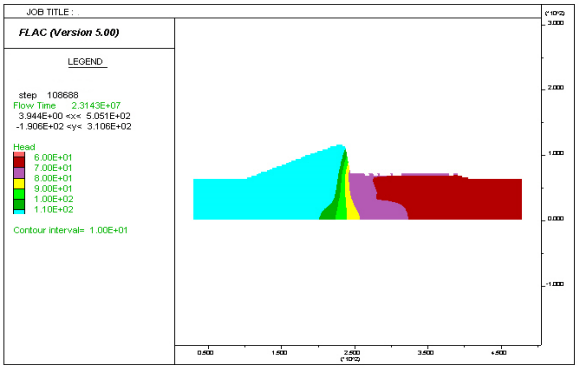
(۱) عدم کالیبره شدن ابزار در زمان نصب و قرائت. این عامل می‌تواند منشأ طبیعی یا انسانی داشته باشد.

(۲) می‌تواند ابزار درست نصب و کالیبره شده باشد اما به علت تجمع آب در اطراف پیزومتر موردنظر، این پیزومتر مقدار بیشتری نسبت به بقیه نشان دهد. این می‌تواند به علت ریزش باران یا عدم خروج آب از غلاف اطراف پیزومتر 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، ازنظر 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 تابه‌حال 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 کنتورهای هد آب، خط نشت و فشار آب منفذی در بدنه سد را در تراز ۱۴۴۵ مخزن در دوران بهره‌برداری نمایش داده است.



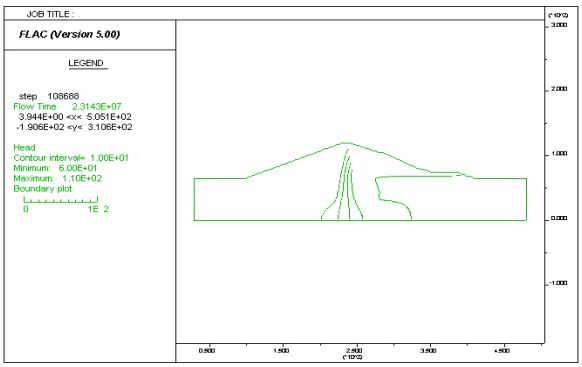
شکل (۹): تغییرات کنتورهای هد آب و خط نشت در بدنه سد در تراز ۱۴۴۵ مخزن

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

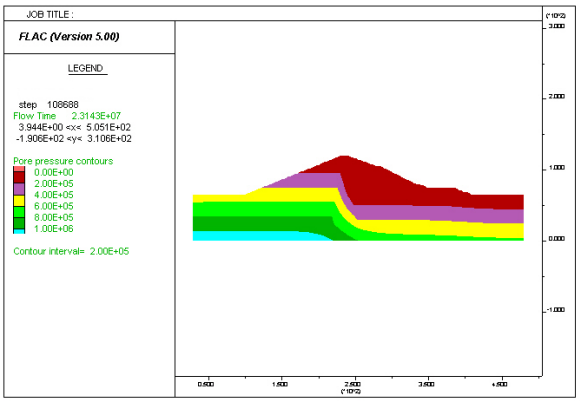
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

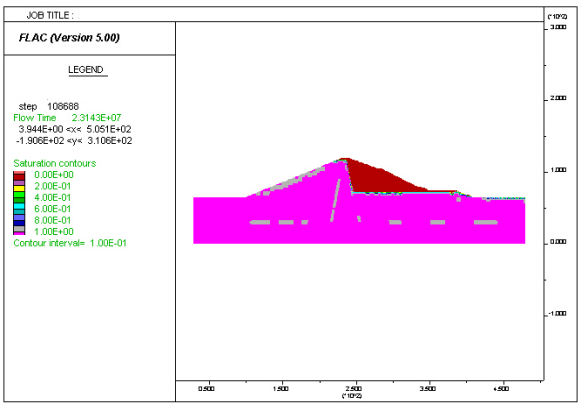
۱۴۴۰٫۵ (نرمال) نیز بررسی شد و همین نتیجه حاصل شد (هاشمی، ۱۳۹۴).



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



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

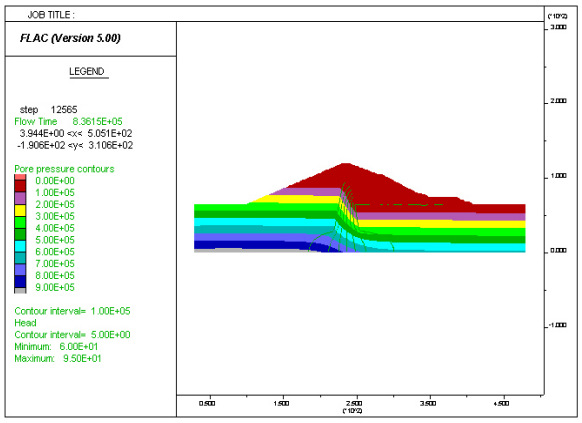


شکل (۱۲): نمایش مناطق اشباع در بدنه سد زمان تراوش پایدار در تراز ۱۴۴۵ مخزن

پس از تحلیل و ساخت و صحت سنجی مدل عددی کالیبره به تحلیل خط فریاتیک درشیب‌های متفاوت بدنه سد پرداخته شد. در هنگام ساخت مدل هندسی سد و رساندن مدل عددی به تراوش پایدار (بهره‌برداری) فرضیات زیر درنظر گرفته شد:

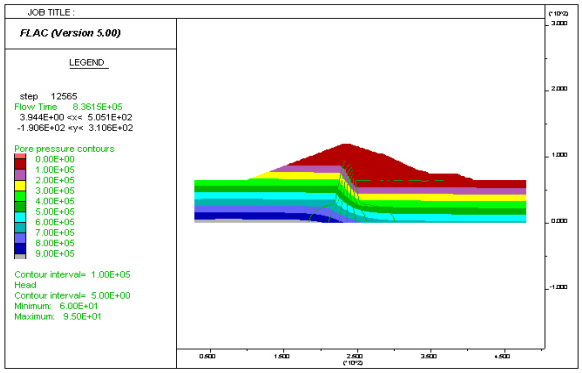
الف- کلیه ارتفاع پله‌ها ثابت نگه‌داشته شده است. ب- عرض برم‌ها ثابت نگه‌داشته شده است. ج- شیب کلی افزایش و یا کاهش پیداکرده است.

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.



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

(واحد Pa)



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

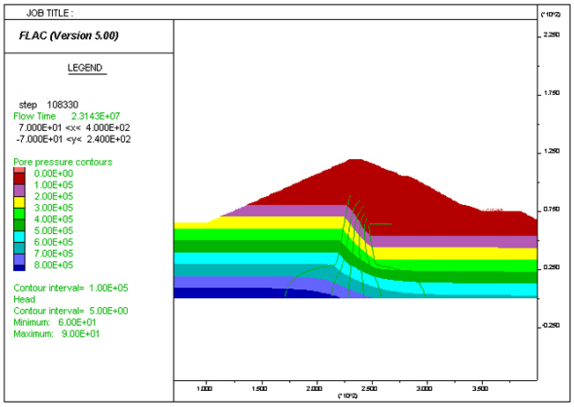
(واحد Pa)

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

خط شوند. ملاحظه شد باوجود افزایش حجم خاک‌ریزی در پوسته‌ها، تغییرات زیادی در خط فریاتیک و میزان فشار آب منفذی مشاهده نشد. با تحلیل نتایج خروجی‌های نرم‌افزار 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 همان‌طور که در شکل ۱۵ نمایش داده‌شده است، باوجود کاهش حجم خاک‌ریزی در پوسته‌ها، اما بازهم تغییرات زیادی در خط فریاتیک مشاهده نشد که علت این امر می‌تواند نفوذ بالای پوسته (۰/۰۰۱m/s) و نفوذپذیری بسیار پایین هسته باشد که سبب شده خود پوسته‌ها 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، می‌توان پوسته را به‌عنوان زهکش آزاد تصور کرد. امکان ایجاد خط نشت در پوسته پایین‌دست در زمان نسبتاً طولانی وجود دارد که علت عدم تشکیل آن را بدین گونه می‌توان توجیه کرد:

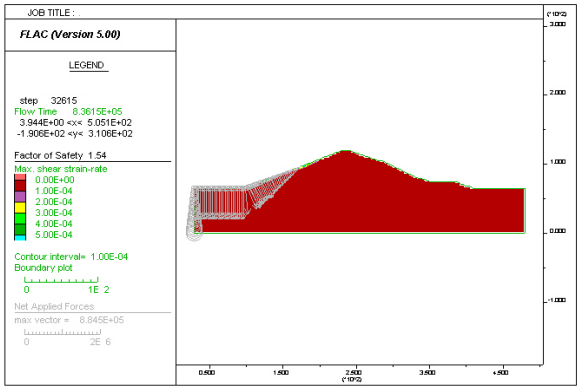
۱) چون حداکثر سطح آب مخزن سد در مواقع سیلابی و مدت‌زمان کوتاهی رخداده است و سطح آب مخزن در سد معمولاً پایین بوده، پس سطح نشت منطبق با حداکثر سطح آب در پایین‌دست تشکیل نشده است.

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

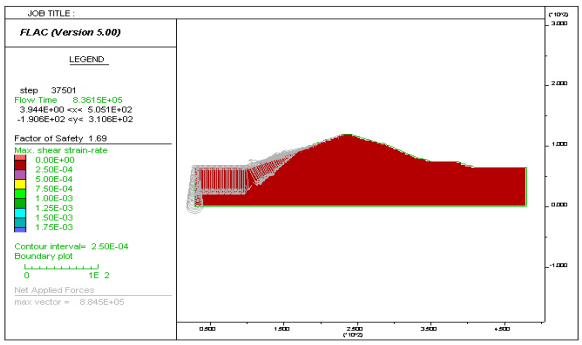
۳) باگذشت زمان نیز به علت رسوب‌گذاری در مخزن سد مقدار زیادی از حجم مفید سد از بین رفته و درنتیجه باعث کاهش فشار آب می‌شود.

در انتها لازم است که به تحلیل و محاسبه ضریب اطمینان درشیب‌های متفاوت بدنه سد پرداخته شود. برای به دست آوردن ضریب ایمنی کل سد خاکی از کد محاسباتی FLAC که بر اساس نظریه حد پایداری تهیه‌شده، استفاده‌شده است.

با افزایش شیب‌ها به‌اندازه ۵ و ۱۰ درجه در ترازثابت مخزن (۱۴۳۵) به ترتیب ضریب اطمینان به مقدار ۱/۵۴ و ۱/۶۹ همان‌طور که در اشکال (۱۶) و (۱۷) مشهود است، افزایش پیداکرده است. دلیل این امر کاهش شیب عمومی بدنه و درنتیجه پایداری بیشتر می‌باشد. با کاهش شیب طرفین بدنه در ترازثابت مخزن (۱۴۳۵) به‌اندازه ۵ و ۱۰ درجه ضریب اطمینان به ترتیب به مقدار ۱/۳۹ و ۱/۳ کاهش پیداکرده است که دلیل این امر افزایش شیب عمومی بدنه و کاهش پاشنه و درنتیجه پایداری کمتر است که در اشکال (۱۸) و (۱۹) مشخص است.



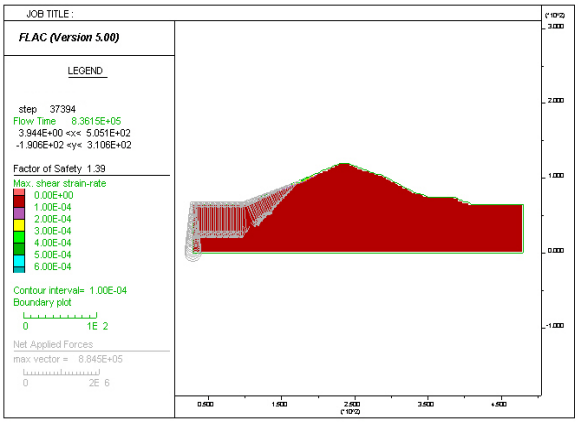
شکل (۱۶): محاسبه ضریب ایمنی با افزایش شیب طرفین (۵ درجه)



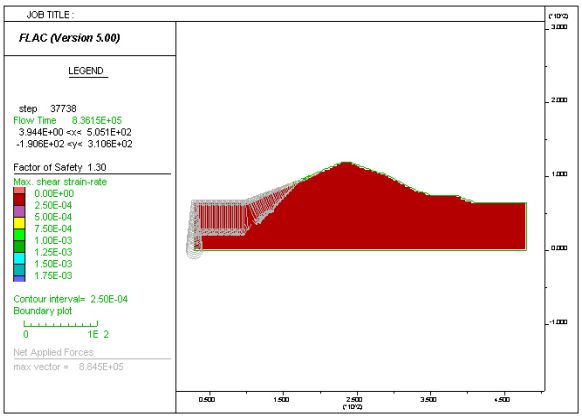
شکل (۱۷): محاسبه ضریب ایمنی با افزایش شیب طرفین (۱۰ درجه)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

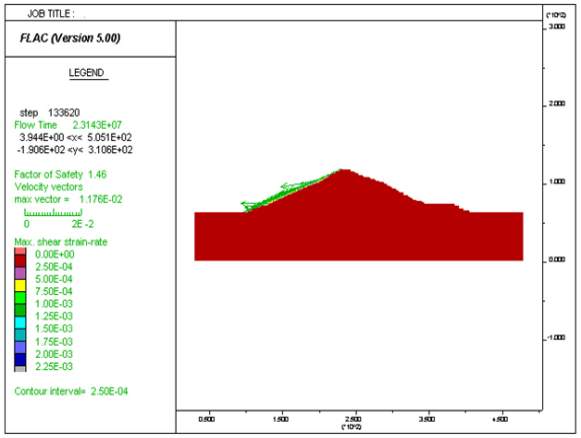


شکل (۱۸): محاسبه ضریب ایمنی با کاهش شیب طرفین (۵ درجه)



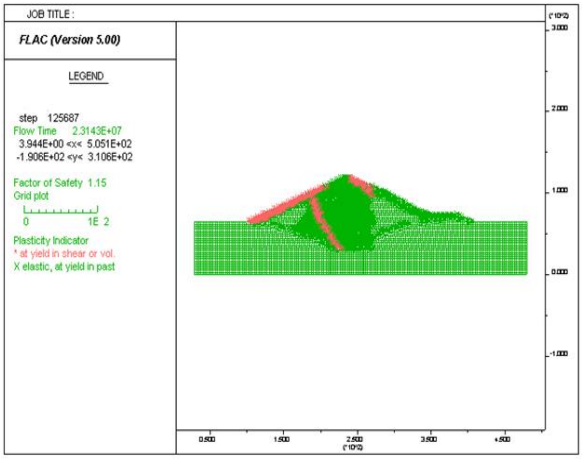
شکل (۱۹): محاسبه ضریب ایمنی با کاهش شیب طرفین (۱۰ درجه)

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 قابل‌قبول یعنی یک واحد بیشتر است (شکل ۲۰).



شکل (۲۰): محاسبه ضریب ایمنی با شیب ثابت طرفین برای تراز ۱۴۳۵

در ادامه به‌منظور 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 محاسبه‌شده برابر ۱/۱۵ شد. علت این امر را می‌توان با بررسی مدل زون پلاستیک نشان داد که با افزایش سطح آب، زون پلاستیک تغییر می‌کند؛ یعنی با افزایش سطح آب در سد به علت فشار بیشتر بر بدنه تنش‌ها در بدنه رشد کرده و این امر می‌تواند سبب جابجایی بیشتر در بدنه و درنتیجه توسعه زون پلاستیک شود که در شکل (۲۱) مشخص‌شده است.



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

سپس تراز آب به ۱۴۴۶ تغییر یافت به‌گونه‌ای که ممکن است سد تابه‌حال این تراز را تجربه نکرده باشد و احتمالاً تا آخر عمر مفید سد تجربه نخواهد کرد. همان‌طور که در شکل (۲۱) مشخص است ضریب ایمنی محاسبه‌شده برابر ۱/۰۱ شد. علت کاهش شدید این ضریب، قرار گرفتن مناطق پلاستیک بیشتری نسبت به تراز ۱۴۳۵ در پوسته بالادست و در بخش‌هایی از هسته است. در این حالت باید ابزارها در ترازبالای مخزن بیشتر و با تعداد دفعات زیادتر کنترل شوند تا از تغییرات احتمالی جلوگیری شود. با توجه به مراجع مختلف داخلی و خارجی ازجمله آیین‌نامه ۴۱۳ و ۱۶۱ و ۳۹۴ و معتبرترین آن‌ها آشتو[1] در سال ۲۰۰۴ می‌توان گفت که ضریب اطمینان کلی شیب در دوران ساخت برابر ۱/۳ و

1 ASHTO

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

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 قرارگرفته اما با افزایش تراز مخزن به تراز بیشینه ضریب اطمینان کاهش می‌یابد که این موضوع می‌بایست مدنظر مسئولان قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود که درشیب‌ها و ترازهای مختلف با روش‌های تجربی دیگر و یا عددی مانند اجزا محدود نیز این روش مورد صحت‌سنجی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

سطح فریاتیک 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 فریاتیک 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 فریاتیک 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 درشیب‌های متفاوت بدنه در ترازثابت (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 درنتیجه پایداری بیشتر می‌باشد. با کاهش شیب‌های طرفین ضریب اطمینان کلی بدنه کم شده که دلیل این امر افزایش شیب عمومی بدنه و درنتیجه ناپایداری بیشتر می‌باشد. همچنین با تغییر سطح آب مخزن در بالادست، خط فریاتیک 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 درنظر گرفته‌شده بهینه می‌باشد و جهت رفتارنگاری دقیق‌تر شایسته است نسبت به رفع نقص پیزمترها اقدام شود. همچنین علت عدم تشکیل خط فریاتیک در پایاب و پایین‌دست را می‌توان با چند دلیل بیان کرد:

الف) چون حداکثر سطح آب مخزن سد در مواقع سیلابی و مدت‌زمان کوتاهی رخداده 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 می‌کنند و این عامل سبب هدایت آب به پی می‌شود.

ج) نفوذپذیری نسبی$(\frac{Kc}{Kd})$ 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 فریاتیک 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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]

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 فریاتیک 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 فریاتیک 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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.3.8]