

## ارزیابی نسبت نفوذپذیری مصالح بدنه سد خاکی با هسته رسی با استفاده از مدل رفتار تراوش سه‌بعدی (مطالعه موردی: سد ستارخان اهر)

رضا پرکم شادباد<sup>۱</sup>، سینا فرد مرادی‌نیا<sup>۲\*</sup>، علیرضا علیزاده مجدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی  
<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۱/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۰، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۱/۲۰

### چکیده

در این تحقیق تراوش از بدنه سد ستارخان اهر با استفاده از نرم‌افزار Flac3D به‌روش تفاضل محدود پرداخته شده است. به‌دلیل ماهیت سه‌بعدی نفوذپذیری جریان، رفتار مدل تحلیل تراوش به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی بررسی گردید. در بیشتر زمان‌های شبیه‌سازی اختلاف دو حالت کم و حداکثر به ۱۷ درصد می‌رسد لذا درسد مذکور بردار جریان آب به موازات محور سد تعیین‌کننده نبوده و روند تولید فشار آب حفره‌ای از همان رویکرد مدل دوبعدی تبعیت می‌کند. نتایج تحلیل عددی مذکور با نتایج ابزار دقیق سد نیز مقایسه گردیده و تطابق خوبی نشان می‌دهد و اختلاف نتایج مدل با قرائت‌ها کمتر از ۵ درصد می‌باشد. متغیر اصلی در تحلیل تراوش سد، ضریب نفوذپذیری مصالح بوده و با انجام تحلیل حساسیت از ۰/۱ تا ۱۰ برابر نفوذپذیری مصالح هسته و پوسته، نقش آن در نتایج و رفتار تراوش بدنه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد نسبت نفوذپذیری پوسته به هسته در رفتار تراوش آن مؤثر بوده و با کاهش آن رفتار بدنه به حالت یکنواخت و همانند یک سد همگن نزدیک‌تر می‌گردد. این موضوع در بررسی روند تغییرات فشار آب حفره‌ای در پوسته و هسته و با حرکت از بالادست به پایین‌دست به‌خوبی مشاهده می‌گردد. با ثابت ماندن این نسبت الگوی تراوش در بدنه تغییری نکرده و تنها با توجه به مقادیر نفوذپذیری مصالح، زمان بروز فشار آب حفره‌ای تولیدشده تغییر می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** تراوش، سد خاکی ستارخان، نفوذپذیری، فشار آب حفره‌ای، نرم‌افزار Flac3D.

### ۱- مقدمه

اعمال چنین ضرایبی منجر به افزایش هزینه‌های اجرایی می‌گردد. برای ارزیابی رفتار سازه‌ای سد و افزایش اطمینان از ایمنی آن، ابزارگذاری و رفتارنگاری سد نیز الزامی می‌باشد. بررسی عملکرد یک سد و نتایج حاصل از مدل‌سازی آن پیش از احداث، باعث می‌شود که متخصصین درک بهتری از رفتار سد داشته باشند در طراحی سدهای خاکی انجام تحلیل تراوش نسبت به سایر تحلیل‌ها از جمله تنش و مقاومت، از تقدم برخوردار می‌باشد. با توجه به ماهیت تراوش آب به‌صورت سه‌بعدی در خاک، انجام تحلیل سه‌بعدی تراوش از بدنه سد می‌تواند در ارزیابی رفتار واقعی‌تر آن کارایی بهتر و نتایج واقع‌بینانه‌تری داشته باشد. همچنین بر اساس تجربیات گذشته و مشاهده اختلاف در مقادیر مشاهداتی ناشی از نتایج رفتارسنجی مربوط به تراوش در بدنه‌ی سدهای خاکی با نتایج ناشی از تحلیل‌های دوبعدی، لزوم انجام تحلیل‌های سه‌بعدی ضروری به‌نظر می‌رسد. در هر حال کنترل و

موضوع کنترل پدیده‌ی تراوش به‌عنوان یکی از عوامل مخرب در سدهای خاکی حائز اهمیت می‌باشد. یکی از موارد تعیین‌کننده در ارزیابی پایداری سدهای خاکی، آنالیز تراوش بوده و اثرات مخرب ناشی از آن مانند بروز نیروهای تراوش و فشار آب حفره‌ای، تهدیدی برای پایداری سد خواهد بود (Allaa و همکاران ۲۰۲۱). از عوامل دیگر بروز فشار آب حفره‌ای در سدهای خاکی به نحوه خاکریزی سد در دوره احداث آن نیز می‌توان اشاره نمود. این موضوع می‌تواند ناشی از سرعت زیاد عملیات خاکریزی بدنه این سدها باشد که به بروز شکست هیدرولیکی در سد می‌انجامد. همچنین مطالعات ناکافی در طراحی پی، انتخاب مصالح نامناسب برای بدنه سد و عدم اطمینان از رفتار سازه سد در حین ساخت و بهره‌برداری، عوامل خطرناکی هستند که برای مقابله با آن‌ها، نیاز به اعمال ضرایب اطمینان کافی برای تضمین ایمنی سد می‌باشد.

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۹۸۹۱۴۳۱۴۲۶۱۹

مطهری نژاد (۱۳۸۹)، با مطابقت فرمول‌های کوزنی بر روی سد خاکی همگن و استفاده از مدل تحلیل plaxis به محاسبه دبی تراوش پرداخته است.

Zoorasna و همکاران (۲۰۰۸)، بر روی تراوش از پی سد خاکی با هسته رسی کرخه مطالعه نموده‌اند. در این تحقیق مقدار نشت با متغیر قرار دادن ضریب نفوذپذیری پرده آب‌بند برآورد شده است. همچنین تغییرات میزان نشت با تغییر در میزان ضخامت پرده آب‌بند مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعاتی توسط Turkman و همکاران (۲۰۰۲) برای بررسی و ارائه راهکارهای جلوگیری از تراوش در پی سد خاکی کالسیک<sup>۲</sup> ترکیه انجام شده است. این سد به ارتفاع ۷۷ متر با هدف آبیاری قسمت پائین دست سد ساخته شده است. در پی جناح راست این سد از جنس کنگلومرا آهکی<sup>۳</sup> مربوط به دوره سوم زمین‌شناسی، شکاف‌های موجود به سمت بدنه سد در حال گسترش بودند. بعد از آبیاری و تشکیل مخزن در پشت سد، مجاری جدیدی نیز در اطراف ناحیه نشت مشاهده گردید. با وجود کنترل مقدار نشت از تکیه‌گاه با انجام عملیات تزریق همچنان نشت در بدنه سد وجود دارد که نیازمند بررسی‌های بیشتر و کامل‌تری می‌باشد.

Marandi و همکاران (۲۰۰۵) بر روی اثرات تغییر در موقعیت مکانی زهکش افقی در نشت دوبعدی و سه‌بعدی مطالعه نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که موقعیت مکانی زهکش افقی اثر قابل توجهی بر روی آنالیز نشت در بدنه سدهای خاکی دارد. همچنین مکان زهکش افقی در مدل‌های سه‌بعدی تأثیرگذارتر از مدل‌های دوبعدی می‌باشد.

Lee و همکاران (۲۰۰۷) تحقیق دیگری بر روی سد سنگریزه-ای با هسته رسی احداث شده بر روی رودخانه ناک‌دنگ<sup>۴</sup> کشور کره به منظور تعیین مسیرهای تراوش آب انجام دادند. آبیگری این سد در آگوست ۱۹۹۴ آغاز و در آوریل ۱۹۹۸ مخزن پر گردید. هنگامی که ارتفاع آب در پشت سد به ۱۵۰ متر رسید، سه حفره نشت در پوسته سد مشاهده گردید. برای تعیین کردن مسیرهای ممکن تراوش در نواحی آسیب دیده بالقوه در سد، از روش‌های ردیابی مسیر نشت مانند آزمایش تراسر<sup>۵</sup> استفاده شده است.

جهانگیری و همکاران (۱۳۹۷)، به بررسی عددی تراوش در سدهای خاکی با محور قوس شکل با استفاده از مدل سه‌بعدی پرداختند. برای این منظور یک سری تحلیل توسط نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D انجام شده و تأثیر متغیرهای مختلف از جمله شکل دره، ارتفاع سد و شعاع قوس را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این تحقیق احداث سد در حالت قوسی، دبی عبوری از بدنه سد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بدین‌نحوکه با افزایش شعاع

تعیین مقدار تراوش و همچنین کیفیت آب زهکشی شده در طرح هر سد می‌تواند یکی از مهم‌ترین معیارها در ارزیابی رفتار و عملکرد یک سد باشد. بررسی و پیش‌بینی دقیق جریان تراوش مخصوصاً در اولین آبیگری سد بسیار ضروری می‌باشد. تراوش باعث کاهش سریع مکش در مصالح پوسته بالادست و کاهش تنش مؤثر می‌گردد. روند کاهش مکش در هسته با اشباع شدن آن، در اصل با نفوذپذیری رس در حالت‌های اشباع و غیراشباع کنترل می‌گردد. در هر دو حالت تغییرشکل‌های حجمی نتیجه شده شامل چندین مؤلفه از جمله بروز یک تورم محدود در اثر کاهش مکش و یک کرنش الاستیک بر اثر کاهش تنش مؤثر در زمان اشباع شدن تدریجی خاک می‌تواند باشد. مؤلفه‌های کرنش برشی نیز ممکن است به اثرات اتساعی در بعضی نقاط منجر شود و تغییرات تنش کل نیز اتفاق بیفتد در نتیجه مدل‌سازی مصالح بدنه با استفاده از رفتاری که بتواند این تغییرات را در خود جای دهد ضروری به نظر می‌رسد (Kutzner, ۱۹۹۷).

در این تحقیق به تحلیل تراوش با مطالعه موردی بدنه سد ستارخان اهر به روش تفاضل محدود با استفاده از نرم‌افزار Flac3D پرداخته شده است. نتایج تحلیل با فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده توسط پیزومترهای منصوبه در هسته مورد بررسی و صحت-سنجی قرار گرفته است. نتایج مدل سه‌بعدی با دوبعدی و رفتار بدنه از نظر تراوش ارزیابی شده است. همچنین نقش ضریب نفوذپذیری مصالح هسته و پوسته در شکل‌گیری الگوی تراوش بدنه با انجام تحلیل حساسیت بر روی متغیر نفوذپذیری مصالح پوسته و هسته مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- پیشینه تحقیق

چشمگیرترین پیشرفت در زمینه رفتار سدها در ارتباط با مسئله تراوش در سد خاکی و تأثیر آن بر پایداری سد بوده است. خرابی‌هایی که در پی سدها بر اثر تراوش و به‌دلیل شسته شدن دانه‌های خاک<sup>۱</sup> به‌وقوع پیوسته برای اولین بار توسط Terzaghi (۱۹۵۸) به‌درستی توضیح داده شده است. ایشان به اهمیت نیروهایی که بر اثر نشت آب در سدهای خاکی به‌وجود می‌آیند توجه نمود. از سال‌های ۱۹۳۰ به بعد، پیشرفت‌های عمده‌ای درباره حل مسئله تراوش و جریان آب در خاک، با سطح آزاد، جریان آب در مصالح غیرایزوتروپیک و خصوصیات جریان در مرز دو مصالح مختلف، انجام گرفت (رحیمی، ۱۳۹۳).

در سال ۱۸۵۶، Darcy رابطه ساده خود را برای جریان آب در خاک مربوط به مسئله تراوش در سد خاکی ارائه نمود (خرقانی، ۱۳۸۳).

4. Nakdong  
5. Tracer

1. Piping  
2. Kalcik  
3. Karstic Limestone

میرقاسمی و همکاران (۱۳۹۹)، نتایج ابزار منصوبه در سد چراغ ویس را مورد تحلیل و بررسی قرار داده‌اند. همچنین تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی سد مطابق با منحنی زمان-ساخت آن توسط نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus به‌صورت لایه لایه مدل گردیده است در این تحقیق مشخصات کالیبره شده مصالح برای هر دو مدل به تفکیک ارائه شده و پس از آن، آبیگری مرحله به مرحله در مدل سه‌بعدی لحاظ گردیده است. با نتایج به‌دست آمده از بدنه سد در دوران آبیگری، نشست‌های بدنه و فشار آب حفره‌ای ایجاد شده پیش‌بینی شده و به‌کمک آنالیز پایداری شیروانی‌ها، پایداری خاکریز پایین دست پس از دوران آبیگری بررسی گردیده است.

اسلامیان و همکاران (۱۴۰۰)، تراوش ناپایدار برای حالت دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزارهای SEEP/W و SEEP 3D بر پایه المان محدود، در مخزن بالادست و پایین‌دست برای حالت اشباع و نیمه‌اشباع را بررسی نمودند. با در نظر گرفتن این مدل‌سازی، با افزایش سطح آب در مخزن بالادست میزان تراوش سد افزایش می‌یابد و بالعکس، که بیانگر رابطه مستقیم بین آن‌ها می‌باشد. دقت تراوش محاسبه شده با نرم‌افزار SEEP3D در حالت سه‌بعدی از نرم‌افزار SEEP/W در حالت دوبعدی برای حالت اشباع، در بالادست سد بیشتر است که ضریب تعیین آن با استفاده از نرم‌افزار SPSS در مقایسه با تراوش واقعی در آن نقطه، برابر با ۰/۹۲ است که نشان‌دهنده تطابق بالای این نرم‌افزار با واقعیت می‌باشد. برای حالت نیمه‌اشباع در پایین‌دست سد زمانی که سطح آب در بالادست کاهش می‌یابد، دقت تراوش محاسبه شده در نرم‌افزار SEEP/W بیشتر از نرم‌افزار SEEP3D می‌باشد و ضریب تعیین آن معادل ۰/۷۲ است که بیانگر برتری نرم‌افزار SEEP/W برای مدل‌سازی دوبعدی تراوش ناپایدار، در حالت نیمه‌اشباع است.

امیری و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از نرم‌افزار Flac2D تأثیر هندسه زهکش را بر روی رفتار یک سد خاکی در مرحله آبیگری مطالعه نموده‌اند. این تحقیق بر روی سد خاکی همگن کلان ملایر انجام شده و تأثیر زاویه زهکش دودکشی بر روی رفتار سد از نکته نظر نشست بدنه، فشار آب حفره‌ای و تنش- کرنش بررسی شده است.

کلاته و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی تأثیر تغییرات ناشی از هندسه بدنه سد خاکی و ارتفاع آن و همچنین عدم قطعیت‌های ناشی از خصوصیات مصالح به‌منظور رسیدن به بحرانی‌ترین حالت شکست سد از نکته نظر پایبندی پرداخته شده است. از روش آنالیز مونت کارلو با اعمال ۱۰۰۰۰ عدد تصادفی به‌ازاء پارامترهای عدم قطعیت استفاده شده است.

Shivakumar و همکاران (۲۰۱۵) تراوش از بدنه سد خاکی را در دو حالت پایدار و گذرا به‌وسیله روش اجزای محدود مدل

قوس (انحنای کمتر) دبی خروجی از سد در هر دو حالت دره با شکل و مقطع ثابت و تنگ‌شونده، کمتر می‌گردد و رابطه دبی با طول قوس به صورت خطی می‌باشد.

حقیقت‌اندیش و همکاران (۱۳۹۴)، مدلی برای بهینه‌سازی هندسه هسته سد حصار سنگی بیرجند براساس تلفیق معادلات حاصل از شبیه‌سازی تراوش، ضریب پایداری و گرادیان هیدرولیکی با رویکرد بهینه‌سازی تکامل رقابتی جوامع (SCE) توسعه دادند. نتایج به‌دست آمده از مدل توسعه داده شده برای تعیین ابعاد بهینه هسته سد خاکی در مقایسه با مقادیر واقعی سد حصار سنگی بیرجند، بیانگر کاهش ۸/۵ درصدی حجم مصالح لازم برای ساخت پوسته سد و کاهش ۲۴ درصدی مصالح هسته سد بوده است. عملکرد مدل توسعه داده شده نشان از توانایی‌های بالای این مدل در طراحی بهینه ابعاد هسته رسی تحت شرایط پایدار سدهای خاکی می‌باشد.

احمدپور و عامل‌سخی (۱۳۹۶)، یک سد خاکی را با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS مدل کرده و اثرات تعداد و شکل لایه‌ها در شرایط خشک و هم‌چنین تراوش را بررسی نمودند. نتایج حاصل از تحلیل‌های استاتیکی و شبه‌استاتیکی نشان می‌دهد که مدل‌سازی سد خاکی در لایه‌بندی‌های مختلف اثرات مهمی بر تنش-های برشی و تغییر مکان‌های افقی بدنه سد دارد.

کماسی و بیرانوند (۱۳۹۸)، به بررسی شکست هیدرولیکی سد تاج امیر در شرایط بارگذاری استاتیکی در مرحله پایان ساخت و تراوش پایدار توسط نرم‌افزار Plaxis با مدل رفتاری موهر کولمب پرداختند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مقادیر نسبت فشار آب حفره‌ای (Ru) و تنش-کرنش در حد قابل قبول بوده است و مشکلی از نظر پایداری برای سد ایجاد نمی‌شود. همچنین مقدار ضریب قوس‌زدگی بحرانی برابر ۰/۵۳ که در یک سوم ارتفاع هسته از کف فونداسیون برآورد گردیده که در حد متعارف ارزیابی می‌شود و همچنین بروز گسیختگی هیدرولیکی در هسته سد محتمل نخواهد بود.

کماسی و بیرانوند (۱۳۹۸)، با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود Plaxis و Geostudio، مقادیر فشار آب حفره‌ای هسته و پی سد خاکی سیوند را پس از اولین دوره آبیگری محاسبه و با نتایج داده‌های مشاهداتی مقایسه و صحت‌سنجی نمودند. بررسی تغییرات گرادیان هیدرولیکی و فشار آب منفذی سد سیوند نشان داد که در ساخت سد از مصالح با نفوذپذیری مناسب استفاده شده است. همچنین نتایج ارزیابی مدل‌ها با داده‌های ابزار دقیق بر اساس خطای ریشه مربعات و خطای استاندارد نسبی بیش از ۸۶ درصد انطباق را نشان می‌دهد که بیانگر عملکرد مناسب هسته رسی و پرده آبنند در اثر تغییرات تراز آب مخزن است.

تغییردادن پارامترهای نفوذپذیری هسته و پوسته به بررسی تأثیر این تغییرات در رفتار تراوش از بدنه سد پرداخته شده است.

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- معرفی سد ستارخان اهر

سد مخزنی ستارخان اهر در استان آذربایجان شرقی در ۷۵۰ کیلومتری شمال غرب تهران، ۱۲۰ کیلومتری شمال شرقی تبریز و در ۱۵ کیلومتری غرب شهرستان اهر بر روی رودخانه اهرچای احداث شده است. سد از نوع خاکی با هسته رسی قائم بوده و ارتفاع از پی ۷۸ متر و طول تاج سد ۳۵۰ متر می‌باشد. با احداث سد ستارخان ضمن کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی رودخانه اهر، آب مورد نیاز بخشی از اراضی کشاورزی پایین‌دست سد و آب شهرستان اهر تأمین می‌گردد. شکل (۱) تصویر عمومی سد را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت و تصویر عمومی سد ستارخان اهر  
(گزارش رفتارنگاری سد ستارخان، سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، ۱۳۹۰)

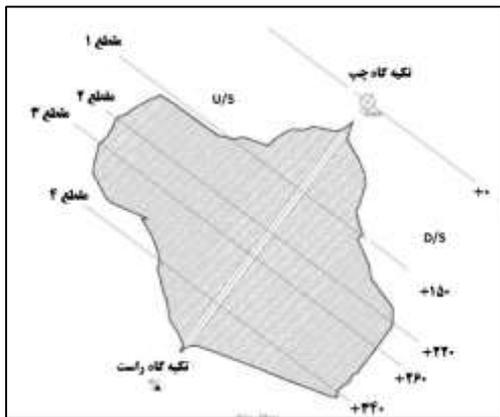
مشخصات مصالح به کار رفته در بدنه و پی سد ستارخان اهر در جدول (۱) گردآوری شده است. در این تحقیق برای مدل رفتاری مصالح بدنه سد که از مصالح آبرفتی برای پوسته و قرصه رسی منطقه برای هسته استفاده شده است.

کرده و اثرات آن بر روی پایداری بدنه را بررسی نموده‌اند. در این مطالعه تحلیل حساسیت بر روی پارامترها هم انجام شده است. مطالعه توأم تراوش و پایداری اهمیت اثرات هم‌زمان را بر روی پایداری عمومی بدنه نشان می‌دهد. تحلیل توأم تراوش و پایداری لازمه ارزیابی طراحی و کرائی سد خاکی تحت شرایط تراوش و پایداری می‌باشد. با افزایش مدول الاستیسته مصالح هسته و پوسته، کاهش حداکثر جابه‌جایی تاج سد را نتیجه می‌دهد. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی مصالح نیز نقش اساسی و تکمیل‌کننده در محدوده پایداری کلی بدنه دارد.

Ade و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحلیل دوبعدی تراوش سدخاکی را با استفاده از نرم‌افزار Geo-Studio با مطالعه موردی سد Kas در کشور هند انجام داده‌اند. در این تحقیق شیب دامنه‌های سد و عرض برم‌ها، نوع مصالح و اثرات آن‌ها بر روی خط اشباع آب داخل بدنه و پایداری سد بررسی شده است.

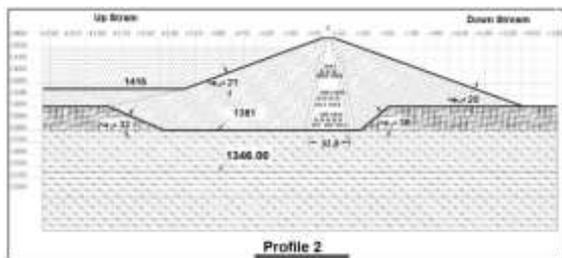
Al-Mansori و همکاران (۲۰۲۰) مدل‌سازی تراوش سد Khassa را به روش اجزای محدود انجام داده و تغییرات تراوش از بدنه سد را در ترازهای مختلف بررسی نمودند. همچنین با انجام تحلیل حساسیت بر روی نفوذپذیری مصالح هسته، با کاهش نفوذپذیری از  $10^{-6}$  به  $10^{-7}$  متر بر ثانیه میزان کاهش در تراوش بدنه به‌ازای ترازهای مختلف مخزن را مطالعه کردند. همچنین تغییرات آنیزوتروپی نفوذپذیری هسته ( $Kx/Ky$ ) را بر روی میزان تراوش از بدنه بررسی نمودند. در نهایت از مدل شبکه عصبی مصنوعی<sup>۸</sup> نیز برای ارزیابی ارتباط بین گرادیان جریان و مقدار تراوش استفاده گردید. نتایج هر دو مدل نشانگر برآورد خوب با ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بزرگ‌تر ۰/۹ می‌باشد.

Abdel-Kawy و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر خصوصیات هسته را بر روی تراوش از بدنه سدهای خاکی مطالعه نمودند. در این تحقیق چهار شکل مختلف قائم، دوزنقه، مایل به سمت بالادست و مایل به سمت پایین‌دست برای هسته در نظر گرفته شده است. شکل دوزنقه بیشترین تأثیر در کاهش تراوش از بدنه را داشته است. معادلات طراحی برای هر کدام از حالت‌ها نیز ارائه گردیده است. هدف اصلی این تحقیق بررسی تغییرات دبی تراوش با توجه به خصوصیات مختلف در نظر گرفته شده برای مصالح سد خاکی با مطالعه موردی سد خاکی ستارخان اهر واقع در استان آذربایجان شرقی در حالت سه‌بعدی می‌باشد. تراز آب مخزن از ابتدای آبرگیری سد و تغییرات فشار آب حفره‌ای در پی‌زومترهای نصب شده با مطالعه اطلاعات ابزار دقیق در این بازه، بررسی شده و وضعیت تراوش سد با نتایج حاصل از تحلیل برنامه FLAC3D مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش دوم با انجام تحلیل حساسیت و با

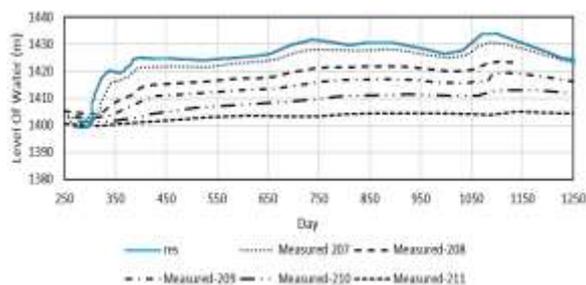


شکل ۲- پلان ابزاربندی سد ستارخان اهر

زمان مبنای شروع قرائت‌های پیزومترها تاریخ ۱۳۷۶/۲/۱۸ بوده و این تاریخ در بررسی‌ها و نمودارها، به‌عنوان قرائت مینا (قرائت صفر) منظور شده است. طبق گزارشات سد، سطح آب مخزن در دوره بررسی ۱۲۵۰ روزه تا تراز ۱۴۳۰ متر را تجربه کرده است. تراز نرمال مخزن ۱۴۵۱ می‌باشد. لذا مصالح هسته استحکیم نیافته خواهند بود. شکل (۴) تغییرات فشار آب حفره‌ای اندازه-گیری شده در پیزومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱ مربوط به پایین‌ترین تراز نصب (تراز حدود ۱۳۸۸) درمقطع ابزاربندی مذکور را در مقایسه با تغییرات تراز آب مخزن نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود. به‌طور کلی تغییرات فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده با حرکت به‌سمت پایین‌تر، با کاهش هد آب کمتر شده است.



شکل ۳- موقعیت نصب پیزومترهای الکتریکی مقطع ابزاربندی ۲ به‌عنوان مرتفع‌ترین مقطع سد



شکل ۴- تغییرات فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده مقطع ابزاربندی ۲، در پیزومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱

جدول ۱- مشخصات مصالح بدنه و پی سد ستارخان اهر

پارامترهای مصالح	پوسته بالا دست	پوسته هسته دست	پوسته پایین دست	فیلتر آبرفتی	پی بسترستگی
چسبندگی (Kpa)	۰	۴۵	۰	۰	۷۵۰
زاویه اصطکاک خاک	۴۰	۲۰	۴۰	۳۶	۳۵
زاویه اتساع خاک	۱۰	۰	۱۰	۰	۸
مدول الاستیسیته (Mpa)	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۴۰	۱۰۰
ضریب پواسن	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۰
وزن مخصوص خشک (Kg/m <sup>3</sup> )	۲۱۰۰	۲۰۳۰	۲۱۰۰	۱۵۶۰	۲۱۰۰
وزن مخصوص اشباع (Kg/m <sup>3</sup> )	۲۳۰۸	۲۳۰۵	۲۳۰۸	۱۹۷۱	۲۲۳۹
ضریب نفوذپذیری (cm/s)	۱×۱۰ <sup>-۱۰</sup>				
سرعت موج برشی (m/s)	۱۷۶	۸۳	۱۷۶	۱۲۹	۱۷۴
سرعت موج حجمی (m/s)	۱۸۳	۱۲۷	۱۸۳	۱۳۴	۱۸۱

در طول محور سد ستارخان، چهار مقطع ابزاربندی شامل دو مقطع در بخش میانی دره و حداکثر ارتفاع و دو مقطع بر روی تکیه‌گاه‌ها در نظر گرفته شده است که این موضوع در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. این انتخاب با فرض این‌که علاوه بر امکان کنترل پایداری سد درمقاطع حداکثر، امکان کنترل جریان‌های ناشی مخزن از تکیه‌گاه‌ها نیز فراهم آید، در نظر گرفته است. مقاطع میانی ۲ و ۳ به ترتیب در کیلومترهای ۲۲۰+ و ۲۶۰+ و مقاطع کناری ۱ و ۴ به ترتیب در کیلومترهای ۱۵۰+ و ۳۴۰+ پیش-بینی شده‌اند. در سد ستارخان در مقاطع میانی در سه تراز اقدام به جانمایی و نصب پیزومترهای الکتریکی شده است که این موضوع برای مرتفع‌ترین مقطع سد (مقطع ابزاربندی ۲) در شکل (۳) نشان داده شده است.

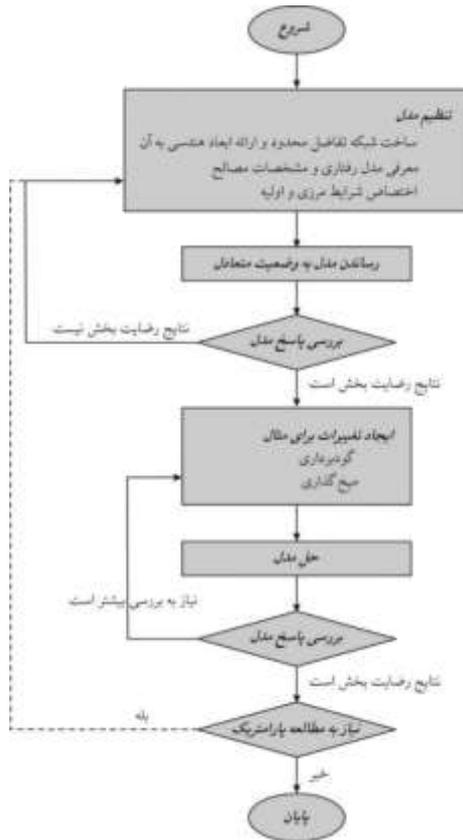
۳-۲- روش مدل سازی سد

نرم افزار FLAC به عنوان یک برنامه تفاضل محدود صریح شناخته می شود که بر پایه تحلیل لاگرانژی عمل می نماید. در روش تفاضل محدود، هر یک از مشتقات معادلات حاکم با یک توصیف جبری جایگزین می گردند.

کرمی و همکاران (۱۳۹۳) در کتاب آموزش کاربردی Flac3d چرخه محاسباتی متداول در نرم افزار FLAC مطابق شکل (۵) بیان نموده اند. در این روش ابتدا از معادلات حرکت و تنش های موجود در زون ها شامل وزن هر زون و یا تنش های اولیه اختصاص یافته به زون ها استفاده شده و اقدام به تعیین سرعت ها و جابه جایی های جدید می گردد. سپس با استفاده از روابط سازگاری کرنش از معادلات رفتاری، اقدام به تعیین دوباره تنش ها در هر زون و نیروها در هر گره می گردد.



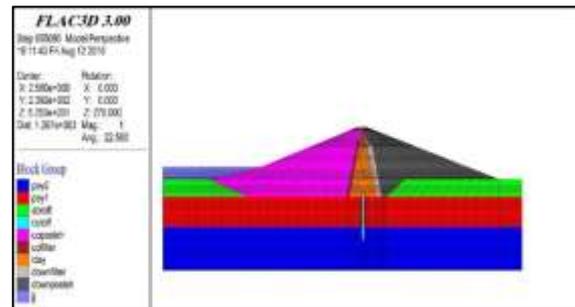
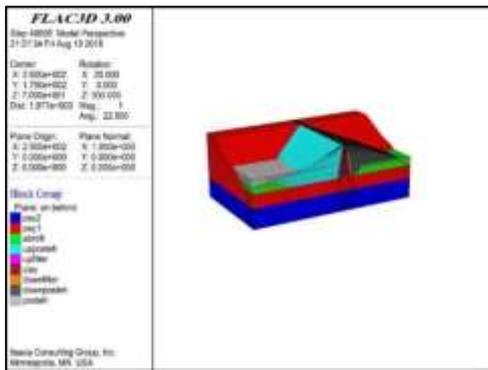
شکل ۵- چرخه محاسباتی نرم افزار FLAC برای به تعادل رسیدن سیستم



شکل ۶- الگوریتم مدل سازی در نرم افزار FLAC

شکل (۷)، هندسه مدل تهیه شده برای سد ستارخان را نشان می دهد. دوره های شبیه سازی مدل شامل دوره های مهم یک سد خاکی دوره ساخت، اجرای خاکریزی بدنه، مرحله آبیگری و در نهایت تراوش دائم در نظر گرفته شده است (رحیمی، ۱۳۹۳). لذا جهت شبیه سازی دوره ساخت، ابتدا پی سنگی به همراه پی آبرفتی موجود در منطقه، مورد تحلیل قرار گرفته تا تنش های اولیه به زون های آن بخش اعمال شود. سپس با ضخامت های ۵ متری وضعیت خاکریزی معرفی شده تا مراحل ساخت تا حد امکان شبیه سازی گردد. این امر تا پایان ساخت ادامه می یابد. مدل رفتاری مورد استفاده در تحلیل عددی از نوع موهر کلمب می باشد. برای مشخصات هر مصالح بدنه از جدول (۱) بهره گرفته شده است. پس از تعریف هندسه کامل سد، مرحله آبیگری مدل منظور گردیده و تراز آب در بالادست مخزن بر اساس مقادیر اندازه گیری شده، تراز ۱۴۳۰ در نظر گرفته شده است. تحلیل تراوش پایدار جریان در سد خاکی برقرار گردیده است. بر اساس گزارش بررسی عملکرد آب بند تزریقی و پی سنگی موجود با توجه به عملکرد مناسب پرده تزریق، نفوذپذیری بسیار پایین برای پی در نظر گرفته شده است. لذا تراوش عمده از بدنه سد انجام می گیرد. در ادامه نتایج تحلیل تراوش با نتایج اندازه گیری شده توسط پیزومترها مورد بررسی و تحلیل انجام خواهد شد.

با اختصاص شبکه تفاضل محدود می توان هندسه محیط را به نرم افزار معرفی نمود. مدل رفتاری و مصالح معرفی شده در مدل نحوه عملکرد مدل تحت تغییر شکل ها را مشخص می نماید. در نهایت شرایط اولیه و مرزی، وضعیت محیط شبیه سازی شده در حالت درجا را معرفی می نماید. بعد از اعمال این مشخصات، مدل تحلیل شده تا به وضعیت تعادل اولیه برسد. پس از این مرحله تغییرات مورد نیاز مانند گودبرداری، عملیات میخ گذاری، خاکریزی (در این تحقیق) و ... اعمال می شود و نحوه عملکرد مدل تحت این تغییرات مورد بررسی قرار می گیرد. شکل (۶) برگرفته از کتاب آموزش کاربردی نرم افزار Flac3d (کرمی و همکاران، ۱۳۹۳) الگوریتم کلی مدل سازی و تحلیل در نرم افزار FLAC را نشان می دهد.



شکل ۷- مقطع عرضی نهایی مدل سد ستارخان

شکل ۱۰- مقطع عرضی سه بعدی مدل شده از موقعیت هندسه هسته، پوسته و فیلتر

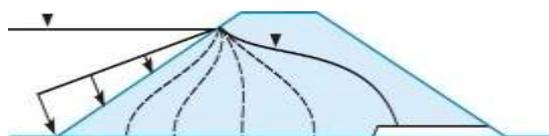
پس از ارزیابی نتایج فشار آب حفره‌ای در حالت‌های رفتار مدل دوبعدی و سه بعدی و مقایسه نتایج با نتایج اندازه‌گیری شده در بخش آخر، با انجام تحلیل حساسیت از ۱/۱ تا ۱۰ برابر نفوذپذیری مصالح هسته و پوسته، مقدار نفوذپذیری پوسته و هسته را طبق حالت‌های جدول (۲) تغییر داده و تأثیر آن در رفتار تراوش سد بررسی گردیده است. در این جدول  $K_C$  نفوذپذیری هسته و  $K_S$  نفوذپذیری پوسته می‌باشد.

جدول ۲- مدل‌های مورد بررسی بر اساس تغییرات ضریب نفوذپذیری پوسته و هسته سد

نام مدل‌ها	ضریب نفوذپذیری پوسته	ضریب نفوذپذیری هسته
K0	$K_S$	$K_C$
K1	$K_S$	$0.1K_C$
K2	$0.1K_S$	$K_C$
K3	$0.1K_S$	$0.1K_C$
K4	$K_S$	$10K_C$
K5	$10K_S$	$10K_C$

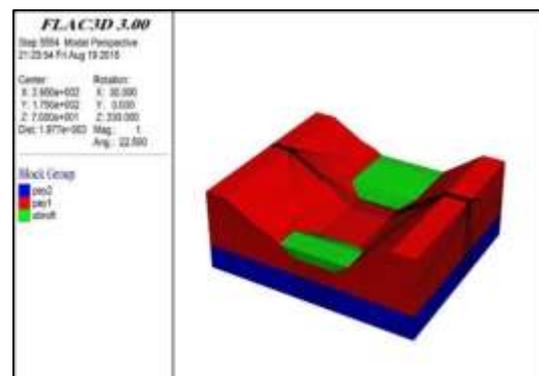
شکل ۳-۳- بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی دو بعدی تراوش بدنه سد ستارخان

جهت بررسی صحت‌سنجی نتایج تحلیل عددی با استفاده از مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج اندازه‌گیری شده، تراز آب در سمت بالادست در ارتفاع ۱۴۳۰ متری قرار داشته و جریان در اثر گذشت زمان با توجه به ضرایب نفوذپذیری مصالح بدنه، به داخل بدنه سد گسترش می‌یابد. شکل شماتیک این موضوع در شکل (۱۱) آمده است.

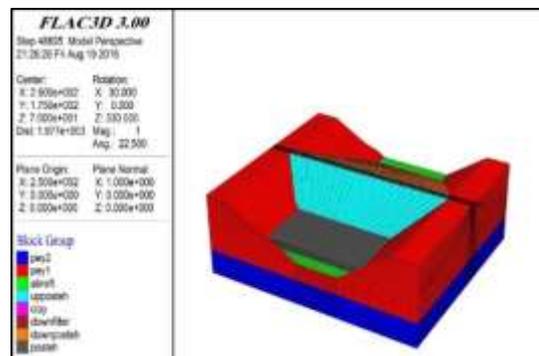


شکل ۱۱- روند نفوذ آب از تراز آب در بالادست به داخل بدنه سد با گذشت زمان

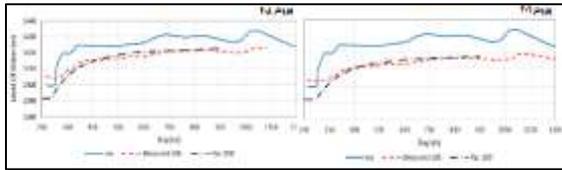
شکل (۸)، هندسه محل احداث سد با دید از سمت بالادست را بر اساس نقشه‌های موجود که در نرم‌افزار Flac3D مورد تحلیل قرار گرفته، نشان می‌دهد. پس از شبیه‌سازی دوران ساخت با خاکریزی ۵ متری، انتهای دوران ساخت شکل هندسی همانند شکل (۹) خواهد داشت. در شکل (۱۰) مقطع عرضی سه بعدی تهیه شده از مدل ارائه شده است. بیشترین پارامتر تأثیرگذار در رفتار سدهای خاکی طی تراوش آب از بدنه، پارامتر نفوذپذیری مصالح می‌باشد. لذا در بررسی رفتار تراوش از بدنه سد خاکی سد ستارخان، متغیر اصلی مورد بررسی ضریب نفوذپذیری می‌باشد.



شکل ۸- هندسه محل احداث سد بر اساس نقشه‌های موجود



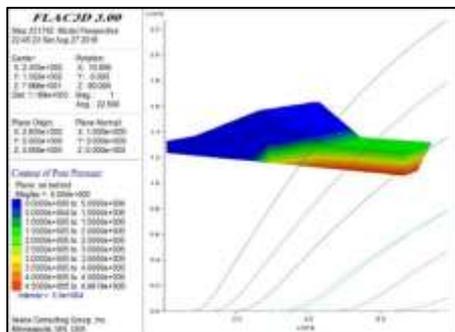
شکل ۹- مدل سه بعدی شبیه‌سازی شده دوران ساخت خاکریزی ۵ متری تا انتهای دوران ساخت



شکل ۱۴- مقایسه و صحت‌سنجی نتایج مدل تهیه شده و نتایج اندازه‌گیری شده پیژومترهای ۲۰۸ و ۲۰۹

### ۳-۴- مقایسه بین نتایج حاصل از تحلیل سه‌بعدی با نتایج تحلیل دوبعدی

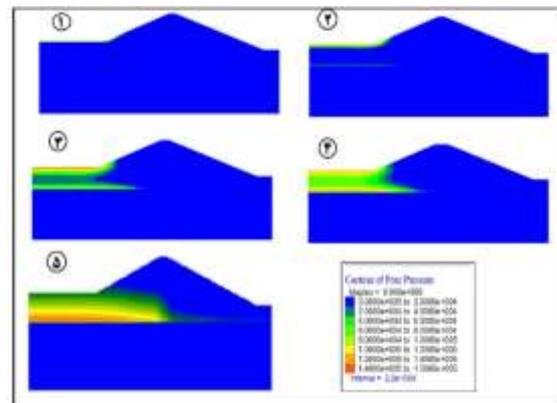
یکی از موارد قابل توجه در تحلیل تراوش به‌روش تفاضل محدود در نرم‌افزار Flac زمان‌بر بودن آنالیز می‌باشد. به‌طوری‌که در تحقیق حاضر برای تحلیل‌های دوبعدی در حدود یک روز و برای تحلیل‌های سه‌بعدی بیش از سه تا چهار روز زمان مورد نیاز می‌باشد. این امر نیز به دلیل نحوه رابطه‌سازی تفاضل محدود صریح مورد استفاده در نرم‌افزار Flac می‌باشد که جهت جلوگیری از ناپایداری عددی، گام‌های زمانی بسیار کوچک انتخاب می‌شود. با این حال، به‌علت طولانی بودن دوره تحلیل نرم‌افزار، در تحلیل سه‌بعدی نسبت به تحلیل دوبعدی، زمان کمتری اجازه داده شده است تا آب از بدنه سد عبور نماید. در شکل (۱۵) توزیع فشار آب حفره‌ای در بدنه سد و عمیق‌ترین بخش مدل نشان داده شده است.



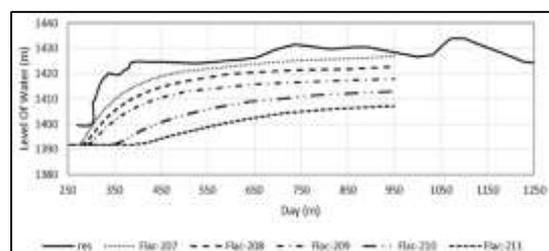
شکل ۱۵- نتیجه مدل سه‌بعدی توزیع فشار آب حفره‌ای در بدنه سد (واحد فشار آب کیلوپاسکال)

به‌طورکلی از مقایسه نتایج مدل سه‌بعدی با دوبعدی مشاهده می‌گردد که مخصوصاً در زمان‌های اولیه تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد ولی با گذشت زمان نتایج مدل سه‌بعدی اندکی بزرگ‌تر از نتایج مدل دوبعدی می‌باشند به‌عنوان نمونه در شکل (۱۶) مقایسه نتایج این مدل‌ها برای پیژومترهای ۲۰۸ و ۲۰۹ ارائه شده است که به‌دلیل ماهیت و رفتار نفوذپذیری سه‌بعدی و واقعی‌تر می‌تواند قابل توجیه باشد. در هر حال، طبق ادبیات فنی از قبیل نتایج تحقیق (Eslamian و همکاران، ۲۰۲۱) و با توجه به‌طول قابل‌توجه این سد که بیش از ۴ برابر ارتفاع آن می‌باشد بردار

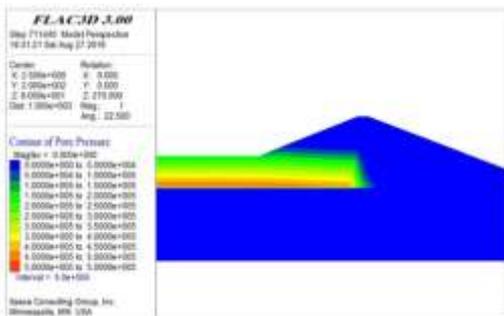
در شکل (۱۲) شبیه‌سازی صورت گرفته در سد ستارخان درخصوص نحوه توزیع نفوذ جریان و افزایش فشار آب حفره‌ای در زمان‌های مختلف در بدنه سد نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پس از رسیدن جریان به هسته رسی (مرحله ۵ در شکل (۱۲))، افزایش فشار آب حفره‌ای تحت تأثیر هسته به‌علت نفوذپذیری پایین هسته در مقایسه با پوسته قرار می‌گیرد. نتایج تغییرات فشار آب حفره‌ای در پیژومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱ حاصل از مدل تهیه شده در شکل (۱۳) ارائه شده است. روند کلی تغییرات فشار آب حفره‌ای و تبعیت آن‌ها از هد آب مخزن و البته متناسب با افت ناشی از فاصله با نتایج اندازه‌گیری شده (شکل (۳)) مطابقت دارد و اختلاف نتایج مدل با قرائت‌ها به‌غیر از زمان‌های اولیه مربوط به اشباع شدن بدنه کمتر از ۵ درصد می‌باشد. به‌عنوان نمونه مقایسه نتایج برای پیژومترهای ۲۰۸ و ۲۰۹ در شکل (۱۴) ارائه شده است. به‌طورکلی با توجه به نتایج مدل و همچنین اندازه‌گیری‌ها می‌توان نتیجه گرفت تغییرات فشار در مقطع عرضی از پیژومتر ۲۰۷ تا ۲۱۱ کاملاً تابع فاصله پیژومتر از بالادست هسته می‌باشد.



شکل ۱۶- شبیه‌سازی مراحل نفوذ آب و تأثیر هسته در رفتار بدنه سد (واحد فشار آب کیلوپاسکال)

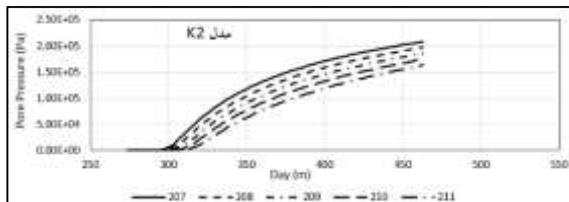


شکل ۱۷- نتایج فشار آب حفره‌ای در موقعیت پیژومترهای نصب‌شده ۲۰۷ تا ۲۱۱ مقطع ۲ با استفاده از مدل تهیه شده

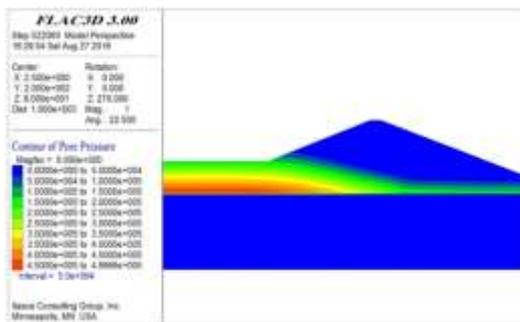


شکل ۱۸- توزیع فشار آب حفره‌ای در مدل K1 در انتهای ۵۳۵ روز (واحد فشار آب کیلوپاسکال)

نتایج مدل K2 در شکل (۱۹) ارائه شده است با کاهش نفوذپذیری پوسته در مدل k2 و با توجه به نقش پوسته در بدنه سد، نتایج به نتایج مدل مبنا طبق شکل (۱۳) نزدیک‌تر می‌باشد. با کاهش نفوذپذیری پوسته و با حرکت به سمت پایین دست هسته، فشار آب حفره‌ای افت بیشتری نشان می‌دهد. به‌طور کلی در این حالت با کاهش نفوذپذیری پوسته و نزدیک شدن نفوذپذیری پوسته و هسته، رفتار بدنه سد همان‌گونه که در شکل (۲۰) ارائه شده، به رفتار سدهای همگن نزدیک‌تر می‌شود.



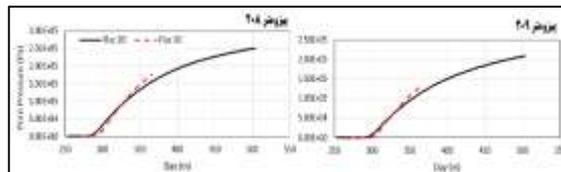
شکل ۱۹- تغییرات فشار آب حفره‌ای مدل K2 در پیرومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱



شکل ۲۰- توزیع فشار آب حفره‌ای در مدل K2 در انتهای ۵۳۵ روز (واحد فشار آب کیلوپاسکال)

با کاهش نفوذپذیری‌های هسته و پوسته در مدل k3، نتایج پیرومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱ در شکل (۱۹) ارائه شده است. با توجه به تغییرات کاهش ضریب نفوذپذیری به یک اندازه، تأثیری در

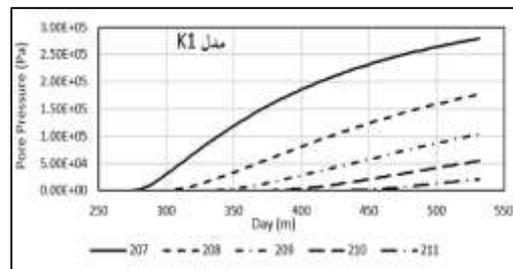
جریان آب به‌موازات محور سد تعیین‌کننده نبوده و در بیشتر زمان‌های شبیه‌سازی اختلاف کم و حداکثر اختلاف در پایان مدت یکسال به ترتیب در پیرومترهای ۲۰۸ و ۲۰۹ برابر ۱۷ و ۱۶ درصد می‌باشد. لذا روند تولید فشار آب حفره‌ای در پیرومترها بیشتر از همان رویکرد مدل دوبعدی که در بخش (۳-۲) با نتایج اندازه‌گیری پیرومترها مقایسه گردیده، تبعیت می‌نماید.



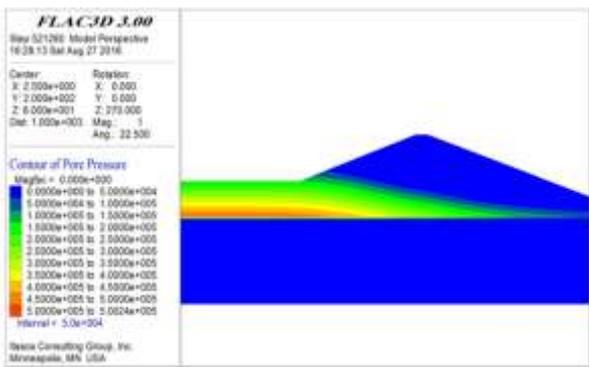
شکل ۱۶- مقایسه فشار آب حفره‌ای حاصل از تحلیل دوبعدی با تحلیل سه‌بعدی در پیرومتر ۲۱۱

### ۳-۵- تحلیل حساسیت رفتار تراوش سد از نظر نفوذپذیری مصالح بدنه

در این بخش با تغییر در میزان نفوذپذیری مصالح سد، به‌عنوان مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار در تراوش از بدنه سد خاکی، به بررسی رفتار تراوش از بدنه سد خاک پرداخته شده است. میزان تأثیر نفوذپذیری مصالح بر روی نتایج فشار آب حفره‌ای در موقعیت پیرومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱ بررسی شده است. مدل K0، به‌عنوان مدل مبنا بوده و نتایج سایر مدل‌ها طبق جدول (۲) با نتایج این مدل مقایسه شده است. در مدل K1 به‌طور کلی با کاهش نفوذپذیری هسته و با حرکت به سمت پایین دست هسته، افت فشار آب در هسته کاهش بیشتری نشان می‌دهد. خلاصه نتایج این مدل در شکل (۱۷) ارائه شده است. در پیرومترهای ۲۱۰ و ۲۱۱ کاهش قابل توجه دیده می‌شود و همان‌گونه که در شکل (۱۸) نشان داده شده در انتهای ۵۳۵ روز، هنوز آب نتوانسته از هسته رسی عبور کرده و وارد پایین دست گردد.

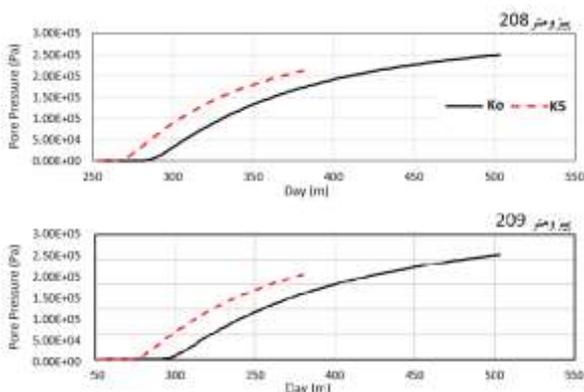


شکل ۱۷- تغییرات فشار آب حفره‌ای مدل K1 در پیرومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱



شکل ۲۴- توزیع فشار آب حفره‌ای در مدل K4 در انتهای ۵۳۵ روز (واحد فشار آب کیلوپاسکال)

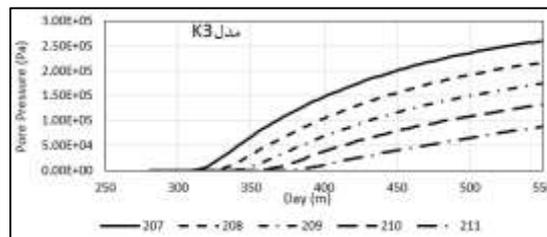
همچنان که در شکل (۲۴) مشاهده می‌شود الگوی نفوذ آب از مصالح همگن تر همانند مدل K2 را نشان می‌دهد و البته به دلیل نفوذپذیری بزرگ تر مصالح افت شدیدی در هسته روی نمی‌دهد. تغییرات فشار آب حفره‌ای تولید شده در پیژومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱ برای مدل K5 بررسی شده و در نتیجه با افزایش هم‌زمان نفوذپذیری هسته و پوسته در این مدل، اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به مدل مبنا K0 سریع تر تولید شده اما الگوی آن نسبت به مدل مبناً و حتی نسبت به مدل K3 تغییر نکرده است، یعنی با کاهش هم‌زمان ضریب نفوذپذیری مصالح در مدل K3 برخلاف مدل K5 تنها زمان نفوذ فشار آب حفره‌ای به داخل بدنه سد تغییر و کاهش نموده است. نمونه‌ای از تغییرات فشار آب حفره‌ای حاصل از نتایج تحلیل مدل K5 در موقعیت نصب پیژومترهای ۲۰۸ و ۲۰۹ مربوط به نتایج مدل K5 در شکل (۲۵) نشان داده شده است.



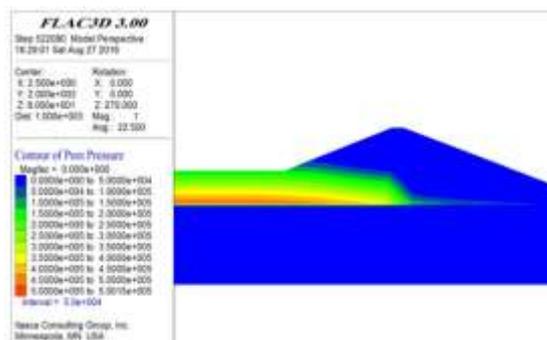
شکل ۲۵- مقایسه فشار آب حفره‌ای تولید شده در پیژومترهای ۲۰۸ و ۲۰۹ برای دو مدل K0 و K5

خلاصه نتایج تحلیل حساسیت در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد نسبت نفوذپذیری پوسته به هسته در رفتار تراوش آن مؤثر بوده و با کاهش آن رفتار بدنه به حالت یکنواخت و همانند یک سد همگن نزدیک تر می‌گردد. این موضوع

الگوی تولید و توزیع فشار آب حفره‌ای نداشته و تنها افت زمانی را منجر می‌شود. در شکل (۲۱) نیز، توزیع فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان برای پیژومترهای مدل K3 نشان داده شده است. شکل (۲۲)، الگوی توزیع فشار آب حفره‌ای تولید شده در بدنه سد را نشان می‌دهد که کاملاً مطابق ولی با تاخر زمانی قابل توجه با الگوی توزیع فشار آب حفره‌ای برای مدل K0 در شکل (۱۳) می‌باشد.

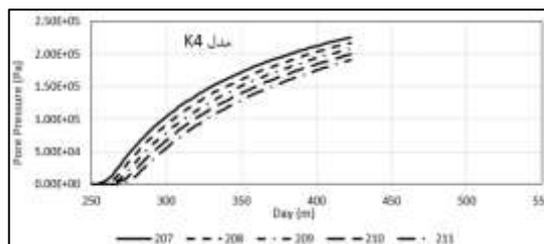


شکل ۲۱- تغییرات فشار آب حفره‌ای مدل K3 در پیژومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱



شکل ۲۲- توزیع فشار آب حفره‌ای در مدل K3 در انتهای ۵۳۵ روز (واحد فشار آب کیلوپاسکال)

با افزایش نفوذپذیری هسته تغییرات فشار آب حفره‌ای تولید شده در پیژومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱ برای مدل K4 در شکل (۲۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها تولید اضافه فشار آب حفره‌ای نرخ بیشتری به خود می‌گیرد اما به علت این که مصالح از نظر نفوذپذیری رفتار همگن تری پیدا می‌کنند.



شکل ۲۳- تغییرات فشار آب حفره‌ای مدل K4 در پیژومترهای ۲۰۷ تا ۲۱۱

قابل توجه سد که بیش از ۴ برابر ارتفاع آن می‌باشد بردار جریان آب به موازات محور سد تعیین کننده نبوده و روند تولید فشار آب حفره‌ای در پیژومترها از همان رویکرد مدل دوبعدی تبعیت می‌کند. با افزایش اختلاف بین ضرایب نفوذپذیری مصالح هسته و پوسته و بروز رفتار غیر یکنواخت‌تر در بدنه، زمان تحلیل نیز افزایش می‌یابد. متغیر اصلی در تحلیل تراوش سد، ضریب نفوذپذیری مصالح بوده و با انجام تحلیل حساسیت از ۰/۱ تا ۱۰ برابر نفوذپذیری مصالح هسته و پوسته، نقش آن در نتایج و رفتار تراوش بدنه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل به مقدار نفوذ پذیری مصالح هسته وابستگی بیشتری دارد. با کاهش نسبت اختلاف نفوذپذیری هسته و پوسته رفتار تراوش بدنه به حالت یکنواخت و همانند یک سد همگن نزدیک‌تر می‌گردد. همچنین با ثابت ماندن نسبت نفوذپذیری هسته و پوسته، الگوی تراوش در بدنه تغییری نکرده و تنها با توجه به مقادیر نفوذپذیری مصالح، زمان بروز فشار آب حفره‌ای تولیدشده تغییر می‌یابد. در طراحی بدنه سدهای خاکی بررسی نسبت ضرایب نفوذپذیری هسته و پوسته با توجه به خصوصیات منابع قرضه واقع در محدوده ساختگاه سد ضروری خواهد بود.

#### ۵- مراجع

رحیمی ح، "سدهای خاکی"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۳.  
 خرقانی س، فخاری ن، "مهندسی سدهای خاکی"، انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق، ۱۳۸۳.  
 مطهری‌نژاد م، "ارائه فرمول‌های کاربردی به‌روش اجراء محدود جهت تراوش"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ۱۳۸۰.  
 کریمی م، آبره ب، فرامرزی ل، "آموزش کاربردی نرم‌افزار Flac3d"، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی، ۱۳۹۳.  
 سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی "گزارش رفتارنگاری سد ستارخان اهر"، ۱۳۹۰.

کلاته ف، احدی‌فر ر، "بررسی تأثیر تغییرات هندسی بدنه سد خاکی در برآورد سیل ناشی از شکست سد در اثر پایپینگ با لحاظ عدم قطعیت در خصوصیات مکانیکی مصالح"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۴۰۱، ۵۲ (۳)، ۹۳-۱۰۳.

10.22034/JCEE.2021.33869.1798/https://doi.org

امیری م، ریسی ماکانی ی، صالحیان ر، "ارزیابی تأثیر اثر هندسه زهکش بر رفتار سدهای خاکی همگن (مطالعه موردی: سد کلان ملایر)"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۴۰۰، ۵۱ (۳)، ۱۴۸-۱۳۷.

https://doi.org/10.22034/JCEE.2020.11227

در بررسی روند تغییرات فشار آب حفره‌ای در پوسته و هسته و با حرکت از بالادست به پایین‌دست به‌خوبی مشاهده می‌گردد. با ثابت ماندن این نسبت الگوی تراوش در بدنه تغییری نکرده و تنها در زمان بروز فشار آب حفره‌ای تولیدشده در بدنه با توجه به مقدار ضرایب نفوذپذیری مصالح تغییر ایجاد می‌شود.

#### جدول ۳- خلاصه نتایج حاصل از تحلیل حساسیت رفتار بدنه سد خاکی ستارخان بر اساس نفوذپذیری مصالح بدنه

مدل	تغییرات نفوذپذیری هسته و پوسته*	بازخورد مدل
K1	کاهش نفوذپذیری هسته به (0.1Kc)	با حرکت به سمت پایین‌دست، افت بیشتری در هد آب روی می‌دهد بروز رفتار غیر یکنواخت بدنه (پوسته و هسته) از نظر نفوذپذیری
K2	کاهش نفوذپذیری پوسته به (0.1Ks)	با حرکت به سمت پایین‌دست هد آب حفره‌ای سریع‌تر افت می‌کند. - نزدیک شدن نفوذپذیری هسته و پوسته به هم و یکنواخت‌تر شدن رفتار بدنه مانند یک سد همگن
K3	کاهش هم‌زمان نفوذپذیری هسته و پوسته به (0.1Kc, 0.1Ks)	باعث ایجاد تأخیر زمانی در توزیع فشار آب حفره‌ای تولید شده می‌گردد. - تأثیری در الگوی توزیع فشار آب حفره‌ای در هسته و پوسته ندارد.
K4	افزایش نفوذپذیری هسته به (10Kc)	با حرکت به پایین دست فشار آب حفره‌ای سریع‌تر تولید می‌شود. - نزدیک شدن نفوذپذیری هسته و پوسته به هم و یکنواخت‌تر شدن رفتار بدنه مانند یک سد همگن
K5	افزایش هم‌زمان نفوذپذیری هسته و پوسته به (10Kc, 10Ks)	- باعث ایجاد کاهش در زمان تولید توزیع فشار آب حفره‌ای می‌گردد. تأثیری در الگوی توزیع فشار آب حفره‌ای در هسته و پوسته ندارد.

نفوذپذیری هسته = Kc= نفوذپذیری پوسته = Ks \*

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق به تحلیل سه‌بعدی تراوش با مطالعه موردی بدنه سد ستارخان اهر با استفاده از نرم‌افزار Flac3D به‌روش عددی تفاضل محدود پرداخته شده است. نتایج تحلیل عددی مذکور با نتایج ابزار دقیق سد مقایسه گردید و تطابق خوبی نشان می‌دهد. اختلاف نتایج مدل با قرائت‌ها به غیر از زمان‌های اولیه مربوط به اشباع شدن بدنه کمتر از ۵ درصد می‌باشد. در ادامه تحقیق از این روش جهت تحلیل رفتار تراوش سد در حالت‌های مورد بررسی استفاده گردیده است. به دلیل ماهیت رفتار سه‌بعدی نفوذپذیری، رفتار مدل دوبعدی و سه‌بعدی نیز بررسی و مقایسه شده و در بیشتر زمان‌های شبیه‌سازی اختلاف کم و در نهایت حداکثر ۱۷ درصد می‌باشد لذا با در نظر گرفتن هندسه مدل و با توجه به طول

- Komasi M, Beiranvand B, "Study of Hydraulic Failure Mechanism in Core of Earth Dam (A Case Study: Taj-Amir Norabad Dam)", *Journal of Tectonics*, 2020, 3 (9), 57-69. <https://doi.org/10.22077/JT.2020.1370>
- Kutzner C, "Earth and Rock fill Dams", published by A. Balkema, Rotterdam/Brodfield, 1997.
- Mazaheri A, Rozbahani MZ, Beiranvand B, "Comparison of static and dynamic stress-strain analysis in earth dams (Case Study: Azadi Earth Dam)", *Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 2020, 13 (3), 83-95.
- Mirghasemi A, Tabarestani ES, Majidi A, "Monitoring of Cheragh-veis Dam during Construction Using Instrumentation Data and Investigation of dam behavior during impounding", *Journal of Iranian Dam and Hydropower*, 2020, 7 (25), 14-23. <https://doi.org/20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4>
- Turkman S, Ozguler E, Taga H, Karaogullarindan T, "Seepage problems in the karstic limestone foundation of the Kalecik Dam (south Turkey)", *Engineering Geology*, 2002, 63, 247-257. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00085-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00085-0)
- Zoorasna Z, Hamidi A, Ganbari A, "Mechanical and Hydraulic Behavior of Cut off-Core Connecting Systems in Earth Dams", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 13.
- جهانگیری ش، کیلانه ئی ف، حسنلوراد م، "بررسی اثر شکل دره و شعاع قوس بر نتایج آنالیز تراوش سدهای خاکی قوسی با مدل سازی عددی سه بعدی"، *مجله علمی- پژوهشی انجمن هیدرولیک ایران*، ۱۳۹۷، ۱۳ (۲)، ۸۳-۹۳.
- Allaa O, Abdel-Kawy, Nahla M, AboulAtta, Doaa A, El-Molla, "Effects of core characteristics on seepage through earth dams", *Water Practice & Technology* 2021, 16 (4), 1248-1264. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.053>
- Al-Mansori NJ, Al-Fatlawi TJ, Othman NY, Al-Zubaidi LS. Numerical analysis of seepage in earth-fill dams. *Civ Eng J*, 2020, 6 (7), 1336-48.
- Athani SS, Solanki CH, Dodagoudar GR. Seepage and stability analyses of earth dam using finite element method. *Aquatic Procedia*, 2015, 4, 876-883. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.110>
- Ahmadpour B, Sakhi MA, "Static and pseudo static study of stress and displacement of earth-fill dam using layered and single-layer models", *Journal of Engineering Geology*, 2017 11 (3), 1-22, <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.11.3.1>
- Aliyari T, Fazeli M, "Simulating nonlinear behavior of CMD material in seismic analysis of concrete gravity dam", *Journal of Iranian Dam and Hydropower*, 2019, 21 (6), 77-88. <https://doi.org/20.1001.1.23225882.1398.6.21.7.2>
- Bagheripour MH, Movahed Asl R, Safapour P, Marandi SM. Two and three-dimensional seepage analysis of earth dams considering horizontal filter blanket effects (research note). *International Journal of Engineering*, 2005, 18 (2), 187-95.(6) 179-187
- Eslamian S, Bayat M, Shams G, Hajiannia A, "2D and 3D Modeling of Transient Seepage from Earth Dams Thorough Finite Element Model (Case Study: Kordaliya Dam)", *Journal of Water Engineering*, 2021, 14 (48), 86-97. <https://doi.org/10.30495/WEJ.2021.4591>
- Haghighatandish S, Mohamadi M, Barani G, "Optimization of clay core dimensions in earth dams using shuffled complex evolution", *Journal of Iranian Water Research Journal*, 2015, 9 (18), 19-26.
- Jahangiri S, Kilanehei F, Hassanlourad M, "Research Note «Investigation of the Effects of Valley Shape and Arc Radius on the Seepage Analysis of Arched Earth Dams using 3D Numerical Modeling", *Journal of Hydraulics*, 2018, 13 (2), 83-93. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2018.60139>
- Khiavi MP, Jalali M, "Investigation of Nonlinear Behavior of Material on Seismic Performance of Roller Compacted Concrete Dam", *Journal of Iranian Dam and Hydropower*, 2019, 6 (20), 1-9. <https://doi.org/20.1001.1.23225882.1398.6.20.1.4>
- Komasi M, Beiranvand B, "Evaluation of pore water pressure foundation and core of Sivand dam after the first dewatering period in comparison with the actual instrument results", *Journal of Iranian Dam and Hydropower*, 2019, 6 (21), 63-76. <https://doi.org/20.1001.1.23225882.1398.6.21.1.6>

## EXTENDED ABSTRACT

# Evaluation of the Material Permeability Ratio of Earthen Dam with Clay Core Using By 3D Seepage Modelling (Case Study: Sattarkhan Dam)

Reza Parkam Shadbad<sup>a</sup>, Sina Fard Moradinia<sup>b,c\*</sup>, Alireza Alizadeh Majdi<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Science In Civil Engineering in Soil Mechanics and Foundations, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

<sup>b</sup> Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

<sup>c</sup> Robotics and Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

**Received:** 09 January 2023; **Review:** 05 April 2023; **Accepted:** 09 April 2023

---

### Keywords:

Seepage, Sattarkhan dam, Permeability, Pore water pressure, Flac3D software.

---

## 1. Introduction

One of the most important issues in the design of earth dams is the analysis of dam body and foundation seepages. Seepage problems may be caused by the characteristics of the foundation, support, floor and walls of the reservoir or dam body materials. Therefore, one of the determining parameter in the stability evaluations of earth dams is seepage analysis. In this study, seepage analysis of Sattarkhan dam is located in East Azarbaijan province, has been done by using the finite difference method, Flac3D software. The behavior of the seepage analysis model has been investigated and compared in two and three-dimensional case. The results of the analysis have been compared and validated with the pore water pressure measured by piezometers installed in the core and have been in good agreement. The main variable in the seepage analysis of dam is the permeability coefficient of the material. The role of this coefficient in the results of the seepage analysis of the dam body has been investigated by sensitivity analysis. In general, it can be said that in the mentioned dam, the water flow vector parallel to the dam axis is not decisive, and the pore water pressure production process complies the two-dimensional model approach. Also, the results show that the permeability ratio of the shell related to the core is effective in its seepage behavior, and in the design of the earth dam body s, it will be necessary to check this ratio according to the property of the borrow mines located in the dam construction area.

## 2. Methodology

### 2.1. Case study

The seepage flows have been evaluated according to the different properties of materials in Sattarkhan dam by using FLAC3D software. The type of this dam is an earthen dam with a vertical clay core. According to the monitoring report of this dam, the Sattarkhan reservoir dam is located in East Azerbaijan with crest height is 78 meters and the length of the crest is 350 meters (Regional Water Company of East Azerbaijan, 2011).

The main objectives of the construction of this dam were included controlling and regulating the surface flows of the Ahar River and supplying the water needed for part of the agricultural lands of upstream and the water of Ahar city. The summary of the important characteristics of the materials used in the body and foundation of Sattarkhan dam is according to Table (1).

---

\* Corresponding Author: Sina Fard Moradinia

E-mail addresses: reza.rr88@yahoo.com (Reza Parkam Shadbad), fardmoradinia@iaut.ac.ir (Sina Fard Moradinia), ali\_majdi@iaut.ac.ir (Alireza Alizadeh Majdi).

**Table.1.** Summary of dam body and foundation properties of Sattarkhan dam (EARWO, 2011)

Material property	Upstream shell	Clay core	Downstream shell	Filter	foundation	bedrock
Cohesion (kpa)	0	45	0	0	0	750
Friction angle	40	20	40	36	35	50
Elasticity modulus (Mpa)	100	20	100	40	100	2000
Saturation Density(kg/m <sup>3</sup> )	2308	2305	2308	1971	2239	2450
Permeability coefficient (cm/s)	1x10 <sup>-2</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	impermeable

### 2.2. FE modeling

Fig. 1 shows the general view of the dam and its prepared 3D model by Flac3D software. The properties of the dam body and foundation materials according to Table 1. The constitutive model of Mohr-coulomb were considered.

The simulation periods of the model included the important periods of an earthen dam (Rahimi, 2013), the construction, the dewatering, and finally the permanent seepage (up to the reservoir water level of 1430 according to the monitoring report (RWCEA2011). Also, sensitivity analysis has been done on the permeability ratio of core and shell materials.

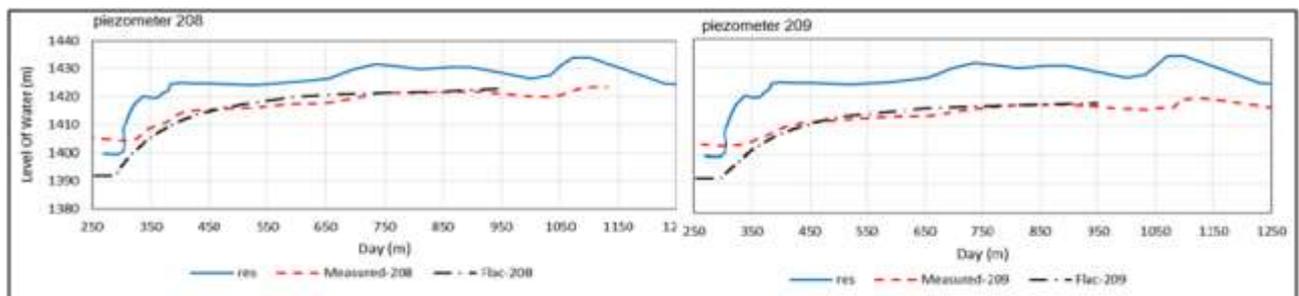


**Fig. 2.** General view of Sattarkhan Dam and its3D modeling

## 3. Results and discussion

### 3.1. Validation

The results of numerical analysis for the piezometers located in the highest cross-section of the dam and the deepest location installation have been determined, which is consistent with the measurements. The pore water pressure changes were followed to the reservoir water level and proportional loss caused by the distance. For example, the results of piezometers 208 and 207 located in the highest cross section of the dam were presented in Fig. 2.



**Fig. 2.** Comparison between model results and measured results

Here is a good match between the results of the three and two dimensional models. Anyway, according to technical literature such as research results (Eslamian et al., 2021) by considering the significant length of this

dam, which is more than 4 times the height of the dam, therefore the water flow vector parallel to the axis of the dam is negligible.

### 3.2. Sensivity analysis

In the sensitivity analysis study, the effect of the permeability ratio of the dam materials (core and shell), as the most important influencing variable in seepage, was studied in five cases. For example, by reducing the permeability of the core to one-tenth of the existing permeability, the results according to Fig. 3 are obtained for the deepest piezometers installed at the highest section of the dam with significant changes in the pore water pressure results (model K1). This shows the sensitivity of the analysis to the permeability of core material. While by reducing the permeability of the shell to one-tenth of the existing permeability of the shell material (model K2), no significant changes were observed in the distribution of pore water pressure inside the core.

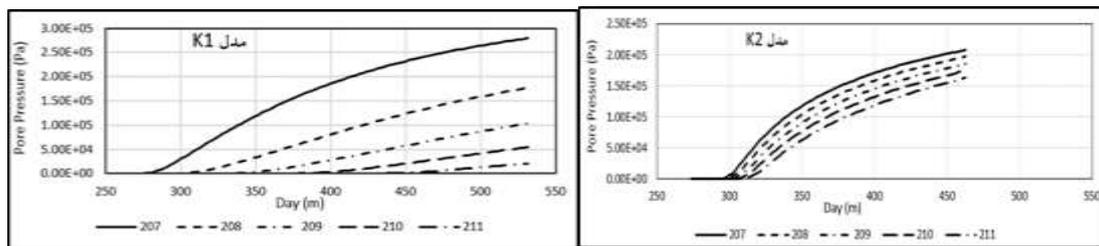


Fig.3. Pore water pressure changes with decreasing permeability in piezometers 207-211 (core K1, shell K2)

In general, by reducing the permeability of the shell, dam behavior becomes similar to the homogeneous dams. When the permeability of together the core and the shell had been reduced, more time was needed to form the pattern without creating a noticeable change in the pore water pressure distribution pattern. Also, by increasing the permeability of the core compared to the shell, the pattern of water penetration was similar to a dam with a homogeneous body. In this case, a significant head loss did not occur in the core due to the greater permeability of the materials.

## 4. Conclusions

The results of numerical analysis of the three-dimensional seepage model for Sattarkhan Dam were compared with the results of piezometers and showed a good agreement. The water flow vector parallel to the dam axis has less effect on the results in the analysis of seepage by considering the geometry of this dam. The main variable in dam seepage analysis is the permeability coefficient of the material. The results of sensitivity analysis were showed that with increasing in the ratio of the difference between the permeability coefficient of core and shell materials, non-uniform behavior was occurred in seepage. In this case, needed time for analysis were increased. The analysis results were more dependent on the permeability of core materials. By reducing the ratio of the permeability difference between the core and the shell, the seepage behavior of the body becomes similar to a homogeneous dam. Also, if the permeability ratio of core and shell were remained constantly, the seepage pattern in the body would not changed. The time of occurrence of produced pore water pressure changes. In the design of the body of earthen dams, it will be necessary to study the ratio of the permeability coefficients of the core and the shell according to the characteristics of the borrow resources located in the site of the dam construction.

## 5. References

- Allaa O, Abdel-Kawy, Nahla M, AboulAtta, Doaa A, El-Molla, "Effects of core characteristics on seepage through earth dams", *Water Practice and Technology* 2021, 16 (4), 1248-1264. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.053>
- Eslamian S, Bayat M, Shams G, Hajiannia A, "2D and 3D Modeling of Transient Seepage from Earth Dams Thorough Finite Element Model (Case Study: Kordaliya Dam)", *Journal of Water Engineering*, 2021, 14 (48), 86-97. <https://doi.org/10.30495/WEJ.2021.4591>
- Rahimi H, "Earth Dams. Tehran University Publisher", 2014, (In Persian).
- Regional Water Company of East Azarbaijan, "Sattarkhan Dam Monitoring Report", 2011.