

مطالعه و بررسی عددی سدهای خاکی بعد ساخت و اولین آبیگری (مطالعه موردی: سد خاکی دویرج)

احمدرضا مظاهری^{*}، مهدی کماسی^۱، مجید ویسی^۲

^۱ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی^(ع)

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی^(ع)

(دریافت: ۹۶/۱۰/۱۵، پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۲، نشر آنلاین: ۹۸/۱۰/۲۲)

چکیده

کنترل ایمنی و پایداری سدهای خاکی در دوران ساخت، انتهای ساخت، اولین آبیگری و بهره‌برداری آن بسیار حائز اهمیت است. ارزیابی مقایسه‌ای نتایج تجزیه و تحلیل‌ها برای ایمنی ساختار و همچنین عملیات نگهداری منظم ضروری است. علاوه بر این واضح است که مطالعات دقیق مبتنی بر چنین مقایسه‌هایی برای به‌دست آوردن تجربه برای طرح‌های آینده مفید خواهد بود. در این مطالعه سد خاکی دویرج از نظر پارامترهای فیزیکی مانند، جابه‌جایی‌ها، تغییر شکل‌ها، تنش‌ها، فشار آب منفذی و پایداری آن در پایان ساخت و اولین آبیگری مورد بررسی مقایسه‌ای قرار گرفت. مدل‌سازی عددی با استفاده از دو نرم‌افزار FLAC 2D و GEO STUDIO با مدل رفتاری موهر-کلمب (Mohr-Coulomb) انجام شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد بیشترین نشست عمودی در تاج هسته رسی بعد از اولین آبیگری با مقدار ۷۰ سانتی‌متر و همچنین بیشترین مقدار جابه‌جایی افقی در پایین‌دست سد برابر ۱۲ سانتی‌متر رخ داده است. در بررسی تنش‌ها نیز مشخص شد که مقدار بیشینه تنش‌های حاصل در مقطع هسته حدود ۱۰۰۰ کیلو پاسکال به‌دست آمده است.

کلیدواژه‌ها: کنترل ایمنی، پایداری، تنش‌ها، نشست‌ها، FLAC، GEO STUDIO.

۱- مقدمه

ساختمانی بزرگ، حفاظت زیست‌محیطی و توسعه اقدامات مربوط به کاهش در موارد بلایای طبیعی، نیاز به درک خوبی از علل و مکانیزم روند تغییر شکل ساختاری سازه‌ها را دارد (Sowers و Sally، ۱۹۶۲). اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها، تنش کل، فشار آب منفذی و نسبت قوس‌زدگی مهم است، زیرا انجام تعدادی از کارها را قادر می‌سازد (ICOLD، ۱۹۸۹) مانند، مشخص کردن رفتار کلی سد (Pagano و همکاران، ۱۹۹۸)، بررسی رفتار مناطق خاص، به‌دست آوردن اطلاعات در مورد خواص مکانیکی در خاک‌ریزهای خاکی (Marsal و Resendiz، ۱۹۷۵) و در نهایت حمایت از کار دشوار ارزیابی ایمنی و بهره‌وری سد می‌باشد (Lacy و Gould، ۱۹۹۳). Naylor و همکاران (۱۹۹۷) روش‌هایی را برای پیوستن نشست‌های فروریزی سنگ‌ریزه‌ها که باعث پیچیدگی بیشتر و عدم قطعیت بیشتری در برآورد پارامترها به‌وجود می‌آورد به داخل مدل‌های سازنده پیشنهاد دادند که در تجزیه و تحلیل سد Beliche مورد استفاده قرار گرفت. اثر تعدیل فشار آب منفذی در خاک‌ریز در طول ساخت‌وساز نیز توسط تعدادی از محققین از جمله

تحقیقات مهندسی و اقتصادی در پروژه‌های ساخت‌وساز در سراسر جهان نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد سدهای سنگ-ریزه‌ای، با هسته رسی غیرقابل نفوذ بهترین انتخاب برای طراحی نهایی هستند. این رویکرد، تحقیقات در مورد مسائل مختلفی را صورت می‌دهد که در پایداری سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی، ایمنی سد، اولین و مهم‌ترین دلیل کنترل تغییر شکل‌ها و پارامترهای فیزیکی در سدهاست. دلیل دیگر، اهمیت در مفاهیم پایه‌ای طراحی برای مهندسين، جهت کاربرد در طرح‌های آبی و نیز درک ویژگی‌های مقاومتی و رفتاری خاک و سنگ‌ریز می‌باشد. جهت تفسیر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی سازه‌های همچون سد، استفاده از داده‌ها و مقایسه داده‌های حاصل، با پیش‌بینی‌های مدل‌سازی عددی، از مؤثرترین راهکارها می‌باشد.

در زمینه سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای نظارت بر مقادیر فیزیکی معمول یک فعالیت اساسی است. ایمنی سازه‌های

فرضیه‌های اولیه برای این توسعه داده شد و تعداد المان‌ها و تأثیر آن‌ها بر نتایج تجزیه و تحلیل از طریق روش‌های تحکیم و خاک غیراشباع، تحلیل همبسته و تحلیل غیر همبسته مورد بررسی قرار گرفت و همچنین نشان داده شد این روش برای سدهای با ارتفاع بلند چندان اقتصادی نخواهد بود (Rashidi و Rasouli، ۱۹۷۵).

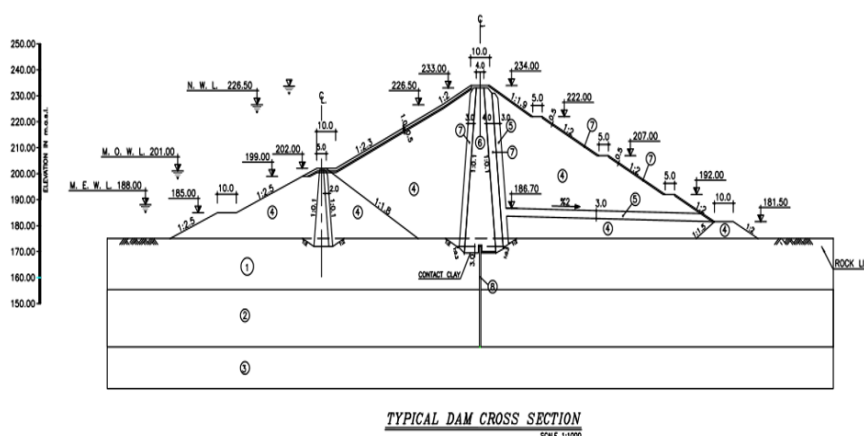
در این مقاله، رفتار سد خاکی دویرج در پایان ساخت و اولین آنگیری مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. فرآیند تکنیک پذیرفته شده در این مطالعه برای مدل‌سازی عددی، بر مبنای رویکرد تفاضل محدود و اجزاء محدود، با استفاده از نرم‌افزارهای Geo studio و FLAC 2D استوار است که در شرایط تنش صفحه‌ای دوبعدی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل‌سازی برای استفاده در تحلیل‌های عددی از مدل رفتاری موهر-کلمب در دو نرم‌افزار به کار گرفته شده است.

۲- تعریف مسئله

هدف اصلی و عمده احداث این سد، آبیاری حدود ده هزار هکتار اراضی کشاورزی دشت موسیان می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام شده و با توجه به شرایط توپوگرافی، زمین‌شناسی مهندسی و اقتصادی طرح، گزینه سد خاکی با هسته نفوذناپذیر رسی برای ساختگاه سد مخزنی دویرج پیشنهاد شده است. تراز عادی بهره‌برداری در این سد ۲۲۶/۵ متر و تراز کف رودخانه آن ۱۷۶ متر از سطح دریا می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی این سد خاکی در انتهای ساخت و اولین آنگیری با مدل‌های رفتاری مشترک می‌باشد. در واقع ارزیابی عملکرد این سد از طریق استفاده از نتایج تحلیل‌های صورت گرفته مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقطع سد خاکی مورد مطالعه در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

Law و Eisenstein (۱۹۹۷) در مدل‌سازی سد مایکا^۱ در نظر گرفته شد. برای این موارد، ساخت‌وساز تکاملی به عنوان یک روند دومرحله‌ای مدل‌سازی شد، مرحله اول مدل‌سازی ساختار یک‌لایه جدید با استفاده از مشخصات تضعیف شده برای هسته و مرحله دوم مدل‌سازی اتلاف فشار آب منفذی بود. زمردیان و کوچی (۱۳۸۶)، تغییر شکل‌های درونی، فشار آب منفذی و تنش‌های عمودی کل را در سد مسجد سلیمان بررسی کردند و آن را با نتایج عددی مقایسه نمودند، آن‌ها همچنین نشان دادند که رشد فشار آب منفذی اضافی در هسته رسی سدهای خاکی زون‌بندی شده در طول ساخت‌وساز ممکن است منجر به شروع یا پیشرفت شکست هیدرولیکی شود.

تجزیه و تحلیل‌های عددی برای حل مسائل پیچیده پایداری به‌طور گسترده استفاده می‌شود (Ormann و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور مثال، رفتار نشست سد Shuibuya در طول ساخت‌وساز و آنگیری اولیه، با استفاده از تجزیه و تحلیل دوبعدی FEM^۲ توسط Zhou و همکاران (۲۰۱۱) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نتایج را با داده‌های اندازه‌گیری ابزار دقیق در رقوم نشست‌ها نیز مقایسه کردند. با مقایسه نتایج این‌گونه تحلیل‌ها با واقعیت که همان نتایج ابزار دقیق است، نیز علاوه بر اعتبار بخشی به تحلیل عددی، می‌توان مبنای مناسبی برای انجام یک تحلیل برگشتی^۳ برای حصول به پارامترهای دقیق ژئوتکنیکی ایجاد کرد (Rashidi و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال، نتایج حاصل از این تحلیل‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای تحلیل‌های بعدی از جمله رفتارنگاری در دوران بهره‌برداری و تحلیل عددی دینامیکی سد باشد. همچنین با توجه به این‌که رفتار سدهای خاکی و سنگی در مراحل مختلف بهره‌برداری، ساخت‌وساز و آنگیری، غیرقابل اعتماد است، این موضوع یک مسئله اجتناب‌ناپذیر و ضروری با توجه به خطرات جدی ناشی از شکست این سازه‌های مهم است، بدین ترتیب



شکل ۱- بزرگ‌ترین مقطع سد خاکی دویرج

3. Back analysis

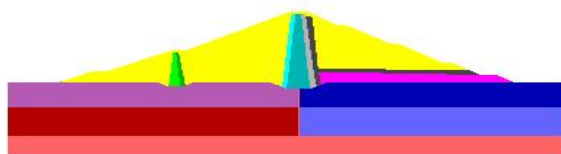
1. Mica

2. Finite Element Method

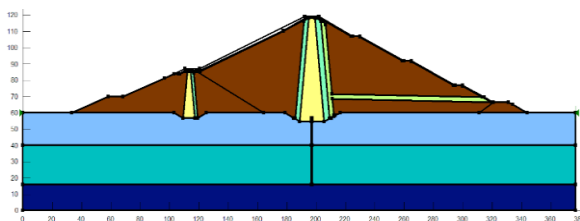
بدنه سد نیز در ۸ لایه با ضخامت لایه‌ای یکسان مدل‌سازی گردیده است تا شرایط ساخت مرحله‌ای سد رعایت شده باشد. عملیات ساخت‌وساز سد دوبرج در طی ۳ سال تکمیل شد و آبیگری مخزن آن نیز طی سه مرحله به مدت ۶ ماه صورت گرفته است.

۲-۲- مدل‌سازی نرم‌افزاری

با توجه به مقطع سد با بیشترین ارتفاع، نقاط مختلف سد به‌طور کامل و با جزئیات کامل برداشته شده و سپس مدل‌سازی شده است. در تمام مقطع سد سعی شده با توجه به توصیه‌های منابع ذکرشده، از المان‌های مربعی و مثلثی ۳ و ۴ گرهی در اندازه‌های تقریباً یکسانی استفاده شود و کلیه نقاط المان‌ها بر روی یکدیگر منطبق گردند. شبکه‌بندی هسته نیز با المان‌های ریزتری به دلیل اهمیت آن انجام شده است. پس از ساخت هندسه مدل، با توجه به طبیعت غیرخطی مصالح ژئوتکنیک به‌ویژه خاک، لازم است مدل رفتاری غیرخطی مناسبی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو برای مصالح به کار رفته در این سد، مدل رفتاری الاستوپلاستیک^۴ کامل موهر- کلمب که شناخته‌ترین مدل در مصالح خاکی است، در دو نرم‌افزار استفاده شده است. هدف از استفاده از این مدل در واقع علاوه بر این‌که دارای بیشترین کاربرد را به‌خصوص در علوم مهندسی ژئوتکنیک دارد، با خاطر این‌که اطلاعات ورودی این مدل رفتاری ساده بوده و انطباق زیادی با آزمایش‌ها و برداشت‌های ژئوتکنیکی مرسوم دارد و همچنین در بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی، هدف بررسی مسئله از دیدگاه مکانیزم تنش- گسیختگی است که معیار گسیختگی مورکلمب بر پایه معادله شکست برشی مورکلمب و همچنین حد نهایی کشش، رفتار ماده را توصیف می‌کند. در شکل‌های (۲) و (۳) مقطع عرضی سد که در نرم افزار مدل سازی شده است نشان داده شده است.



شکل ۲- مقطع مدل‌سازی شده سد در نرم‌افزار FLAC



شکل ۳- مقطع مدل‌سازی شده در نرم‌افزار Geo studio

۲-۱- سد خاکی دوبرج

سد خاکی دوبرج در فاصله حدود ۱۳ کیلومتری شمال شهر موسیان و ۲۲ کیلومتری جنوب شرق دهلران در جنوب غرب استان ایلام واقع شده است. از اهداف دیگر احداث این سد ذخیره و کنترل سیلاب و تنظیم آب رودخانه دوبرج می‌باشد. ارتفاع سد از بستر رودخانه ۵۸ متر، طول تاج آن ۱۱۶۰ متر، عرض تاج آن ۱۰ متر و همچنین حجم مخزن قبل از رسوب‌گذاری ۱۹۴/۲ میلیون مترمکعب هست. اکثر پارامترهای مهندسی فرض شده توسط طراح، مقادیر آزمایش‌ها در محل و منابع قرضه و نیز نتایج آزمایش‌ها و پیشنهادات شرکت مهتاب قدس در جدول (۱) ارائه گردیده است.

برای آنالیز کرنش مسطح از یک مدل دوبعدی از مقطع میانی سد که دارای بیشتری ارتفاع از پی‌سنگی می‌باشد، استفاده شده است. در فونداسیون سد لایه‌های آن به‌طور یکنواخت نبوده به همین خاطر میانگین لایه‌ها در نظر گرفته شده است که بدین‌صورت پی دارای سه‌لایه که لایه اول با ضخامت ۲۰ متر که ویژگی‌های مقاومتی پایینی است، به‌همین علت به‌منظور بهبود بخشیدن به پارامترهای ژئوتکنیکی این قسمت از پی از تزریق تحکیمی استفاده شده است. لایه دوم با ضخامت ۲۰ متر دارای خواص مقاومتی ضعیف‌تر نسبت به لایه اول می‌باشد و لایه سوم با ضخامت ۱۰ متر دارای نفوذپذیری بسیار پایین و مقاومت مکانیکی بالایی می‌باشد. میزان طول پی در هر طرف از پنجه و پاشنه سد حدود ۳۰ متر در نظر گرفته شده است تا در شرایط واقعی‌تر مدل‌سازی پی سد انجام شده باشد.

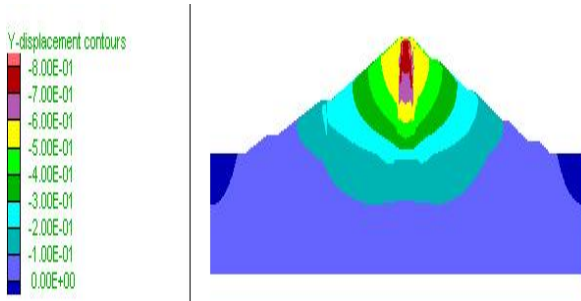
جدول ۱- مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده سد خاکی

دوبرج در تحلیل‌ها						نوع مواد
Φ Deg	K m/s	Poissons Ratio	C (MPa)	γ ^d (kN/m ³)	E (MPa)	
۳۲	۳/۹ ^{۸۵}	۰/۳	۰	۲۰	۳۰۰	فونداسیون لایه ۱
۳۲	۷/۷ ^{۸۶}	۰/۳	۰	۲۰	۲۰۰	فونداسیون لایه ۲
۳۵	۱ ^{۸۹}	۰/۳	۵۰	۲۲	۱۰۰۰	فونداسیون لایه ۳
۳۸	۱ ^{۸۶}	۰/۳۳	۰	۱۹/۵	۱۰۰	پوسته
۳۹	۱ ^{۸۳}	۰/۲۵	۰	۲۱	۹۰	زهکش
۱۳	۱ ^{۸۹}	۰/۲۵	۵۰	۲۰/۵	۷۵	هسته
۳۵	۱ ^{۸۵}	۰/۳۵	۰	۱۹/۵	۳۵	فیلتر

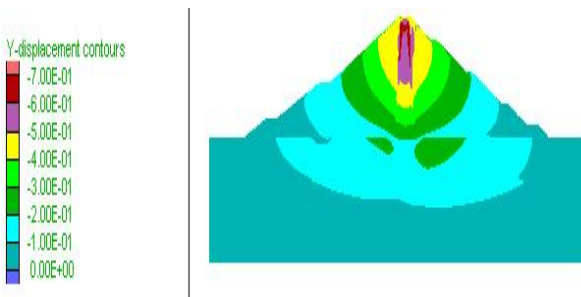
ارتفاع هسته و تاج سد به‌میزان ۵۸ متر در مدل‌سازی و همچنین ابعاد فیلترها و بدنه زهکش به‌طور دقیق مدل شده است.

4. Elastoplastic

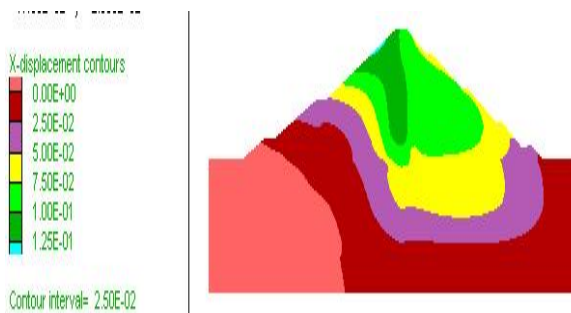
افقی در دو نرم افزار باهم برابر است و در مقدار جابه‌جایی‌های قائم اختلافی به اندازه حدود ۷ درصد، یعنی ۵ سانتی‌متر دیده می‌شود که این مقدار نیز قابل صرف‌نظر کردن است.



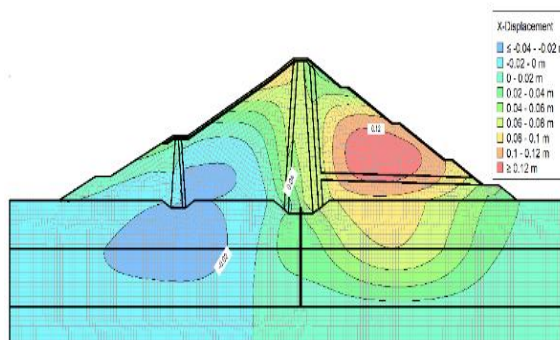
شکل ۴- نشست‌های عمودی قبل از آنگیری در نرم‌افزار FLAC



شکل ۵- نشست‌های عمودی بعد از آنگیری در نرم‌افزار FLAC



شکل ۶- تغییر مکان افقی بعد از اولین آنگیری در نرم‌افزار FLAC



شکل ۷- تغییر مکان افقی بعد از اولین آنگیری در Geo studio

به‌منظور مدل کردن تغییرات پارامترهای مصالح خاکریز (زاویه اصطکاک و مدول برشی) از زبان برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. همچنین از این زبان برنامه‌نویسی (FISH) جهت معرفی مدل غیرخطی موهر-کلمب در تحلیل‌های استاتیکی استفاده شده است.

برای اعتبارسنجی و صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده، یک ارزیابی مقایسه‌ای صورت گرفته است. براساس بخش ایمنی سدها در دپارتمان منابع آب کالیفرنیا (DSOD) سدهایی را که تغییر مکان‌هایی تا ۱/۵ متر در آن اتفاق می‌افتد و کاهش زیادی در ارتفاع مشاهده نمی‌شود را پایدار معرفی می‌کند. همچنین بر اساس استاندارد USBR 1987 ضریب اطمینان در پایان ساخت در رویکرد تحلیلی تنش کل برابر ۱/۳ و در شرایط تحلیلی بهره‌برداری تراز نرمال آب مخزن حداقل ضریب اطمینان برابر ۱/۵ می‌باشد. با این حال با توجه به مطالب گفته‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل تغییر شکل‌ها و ضرایب اطمینان به‌دست‌آمده سد مذکور پایداری لازم را دارا می‌باشد.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- بررسی نشست‌ها در بدنه سد

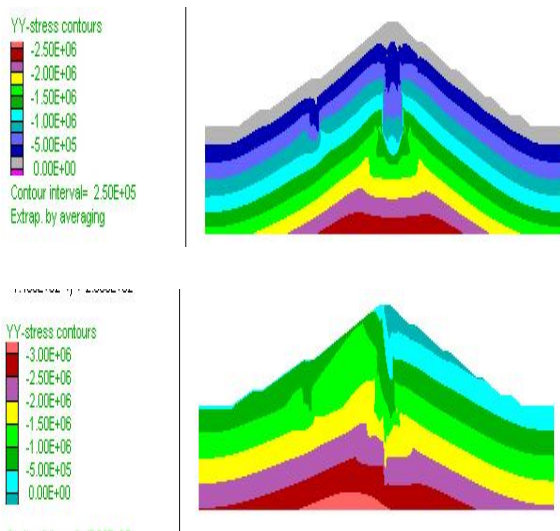
نشست‌های ایجادشده پس از پایان ساخت مؤید این واقعیت است که اصلی‌ترین بارهای وارد بر بدنه سد، بارگذاری ناشی از خود بدنه در حین ساخت می‌باشد. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود، مقدار نشست حداکثر از مقاطع کناری به سمت مقطع میانی افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در مقطع میانی که مقطع حداکثر نیز می‌باشد، رخ داده است. قسمت‌های کناری هسته رسی که در مجاورت مصالح هسته قرار می‌گیرند، به دلیل اصطکاک موجود در مرز دو مصالح تا حدودی بر روی مصالح فیلتر و ناحیه انتقالی تکیه کرده و کم‌تر از نواحی میانی هسته رسی نشست می‌کنند. مقادیر نشست‌های عمودی قبل و بعد از آنگیری توسط دو نرم‌افزار در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده می‌شود. همچنین مقادیر تغییر مکان‌های افقی بعد از اولین آنگیری در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود.

شکل‌های (۴) و (۵) میزان نشست‌های عمودی قبل و بعد از آنگیری را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که سد دوبرج یک سد غیرهمگن خاکی با هسته‌ی رسی است که شامل منطقه‌های هسته، فیلتر، زهکش و پوسته است، به دلیل تفاوت در خواص مصالح و نامساوی بودن تغییر شکل‌پذیری این مصالح و همچنین عدم اجرای یکنواخت خاکریز به دلیل محدودیت‌های اجرایی، روند نشست‌های ناهمگون قابل انتظار است. مقدار بیشینه نشست‌ها قبل و بعد از آنگیری حدود ۸۰ و ۷۰ سانتی‌متر در تاج هسته رسی اتفاق افتاده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی‌های

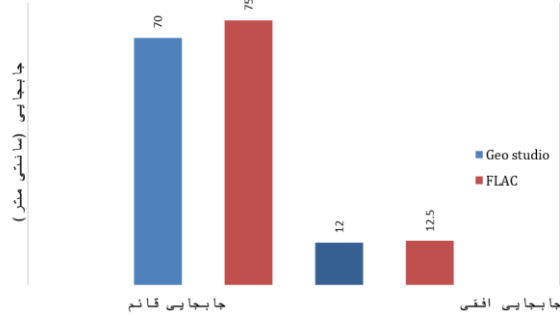
فیلترها، در مقایسه با نیروی وزن هسته در آن محدوده، مقدار قابل توجهی باشد این پدیده رخ می‌دهد که ممکن است در یک سوم بالایی بدنه سد منجر به بروز ترک در هسته شود. پدیده قوس‌زدگی، در اثر انتقال نیروی وزن بخشی از توده خاک نرم به خاک مجاور که صلب‌تر است، به وجود می‌آید. تأثیر چنین پدیده‌ای کاهش یافتن تنش‌های قائم حاصل از وزن خاک در ترازهای پایین‌تر است. این کاهش تنش منجر به کاهش سرعت فشردگی خاک و به دنبال آن کاهش سرعت تحکیم خواهد شد. مقاومت برشی ایجادشده در مرز دو محیط از جابه‌جا شدن (نشست) خاک نرم‌تر تا حدی جلوگیری می‌کند. به عبارتی در داخل خاک نرم‌تر هرچه از مرز دورتر شویم نشست راحت‌تر انجام می‌شود.

در شکل (۹) توزیع تنش بارهای قائم کل در پایان در مقطع دیده می‌شود. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود مقدار تنش‌های قائم در هسته سد نسبت به پوسته کاهش می‌یابد که علت آن کم‌تر بودن سختی مصالح هسته نسبت به پوسته است. مقدار بیشینه تنش قائم کل حاصل از تحلیل هسته در این مقطع در حدود ۱۰۰۰ کیلو پاسکال است. همچنین به خوبی می‌توان اثر قوس‌زدگی را در هسته دید.

در شکل (۱۰) نیز میزان تنش‌های افقی قبل و بعد از آبگیری نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود میزان تنش‌های افقی بعد از آبگیری در مخزن با اندازه ۲۵۰ کیلو پاسکال افزایش یافته است که علت آن در اثر فشار جانبی مخزن در حالت پر می‌باشد. مشاهده می‌شود که کنتور تنش‌های افقی قبل از آبگیری به صورت متقارن می‌باشد اما تنش‌های افقی بعد از آبگیری در شیب پایین دست کاهش داشته و در شیب بالادست به دلیل فشار جانبی مخزن افزایش پیدا کرده است.



شکل ۹- تنش‌های عمودی قبل و بعد از آبگیری در نرم‌افزار FLAC



شکل ۸- نمودار مقایسه جابه‌جایی‌ها در دو نرم‌افزار

۳-۲- بررسی تنش‌ها در بدنه سد

وضعیت تنش در بدنه سدهای خاکی یکی از مهم‌ترین متغیرهای مورد بررسی برای ارزیابی ایمنی سد است. آنالیز و بررسی رفتار سدهای خاکی مستلزم توجه به شرایط تنش ایجادشده در هنگام ساخت و رابطه تنش- کرنش مصالح است. در سدهای خاکی منطقه‌بندی شده (غیر همگن)، اعمال شرایط تنش کل و مؤثر و همچنین اندرکنش میان مناطق مختلف در آنالیزهای عددی اهمیت خاصی دارد. در این‌گونه سدها، تحلیل وضعیت تنش‌ها، به دلیل تغییر شکل‌پذیری متفاوت هسته و پوسته، اهمیت بیشتری دارد. افزون بر این، به دلیل نشست کم‌تر پوسته در مقایسه با هسته، بخش‌هایی از هسته به صورت معلق به پوسته آویزان می‌شود و تنش حاصل از لایه‌های خاک‌ریز به‌طور کامل به بخش پایین‌تر و پی منتقل نخواهد شد.

در شکل (۹) توزیع تنش بارهای قائم کل در پایان در مقطع دیده می‌شود. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود مقدار تنش‌های قائم در هسته سد نسبت به پوسته کاهش می‌یابد که علت آن کم‌تر بودن سختی مصالح هسته نسبت به پوسته است. مقدار بیشینه تنش قائم کل حاصل از تحلیل هسته در این مقطع در حدود ۱۰۰۰ کیلو پاسکال است. همچنین به خوبی می‌توان اثر قوس‌زدگی را در هسته دید.

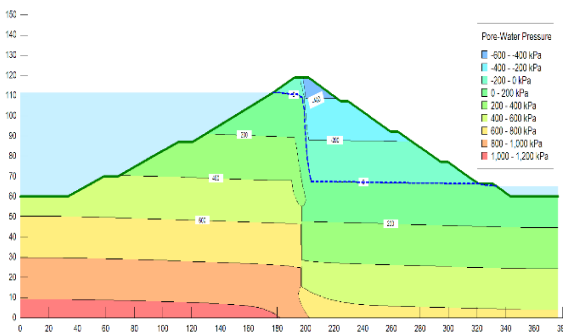
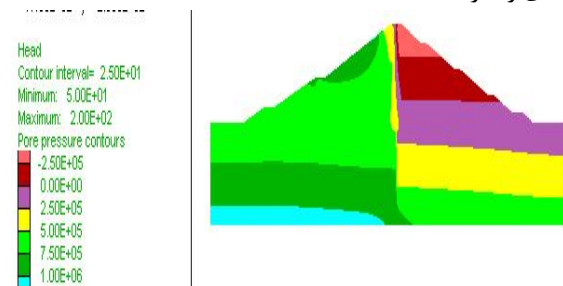
در شکل (۱۰) نیز میزان تنش‌های افقی قبل و بعد از آبگیری نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود میزان تنش‌های افقی بعد از آبگیری در مخزن با اندازه ۲۵۰ کیلو پاسکال افزایش یافته است که علت آن در اثر فشار جانبی مخزن در حالت پر می‌باشد. مشاهده می‌شود که کنتور تنش‌های افقی قبل از آبگیری به صورت متقارن می‌باشد اما تنش‌های افقی بعد از آبگیری در شیب پایین دست کاهش داشته و در شیب بالادست به دلیل فشار جانبی مخزن افزایش پیدا کرده است.

همان‌طور که در شکل (۱۱) بزرگ‌نمایی شده هسته مشاهده می‌شود، تنش قائم در هسته افت پیدا کرده است که این امر نشان‌دهنده پدیده قوس‌زدگی می‌باشد. در بخش‌های از هسته که ممکن است نیروی مقاومت اصطکاکی مرز بین دو ناحیه هسته و

در شکل (۱۲) نتایج تنش قائم در تراز ۸۷/۵ متری در دو نرم افزار FLAC و Geostudio با هم مقایسه شده‌اند.

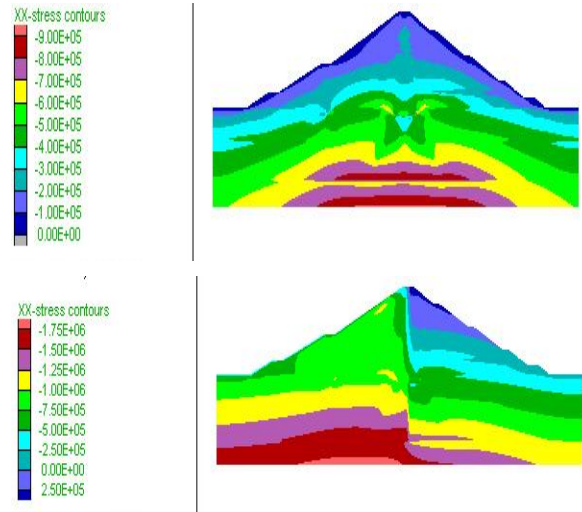
۳-۳- بررسی فشار آب منفذی

فشار آب منفذی بعد از آبیگری در حالت استاتیکی در دو نرم افزار در شکل (۱۳) نشان داده شده است. از تحلیل مکانیکی و جریان توأم برای مدل سازی در این مرحله استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود مقادیر فشار آب منفذی کمی زیادت از حد معمول مقادیر مشاهده شده دیگر سدهای مشابه است. علت زیاد بودن فشار آب منفذی در انتهای ساخت را می توان روند کند تحکیم دانست. شکل (۱۳) کنتورهای فشار آب حفره ای پیش بینی شده را بعد از اولین مرحله آبیگری نشان می دهد. الگوی کنتورهای فشار آب حفره ای به نظر منطقی می رسد. با توجه به ابزار دقیق پیزومتر^۵ شماره EP 10-5 که در ارتفاع ۲۱ متری هسته رسی از کف فونداسیون قرار دارد، مقدار فشار آب منفذی در انتهای ساخت و اولین آبیگری حدود ۵ کیلو پاسکال به دست آمده است که این مقدار، اختلاف بسیار زیادی با نتایج حاصل از تحلیل های عددی را دارد.

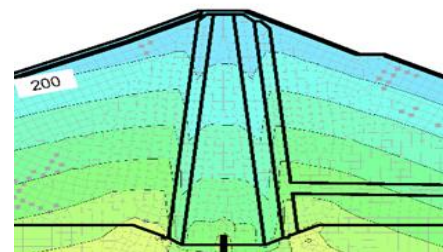
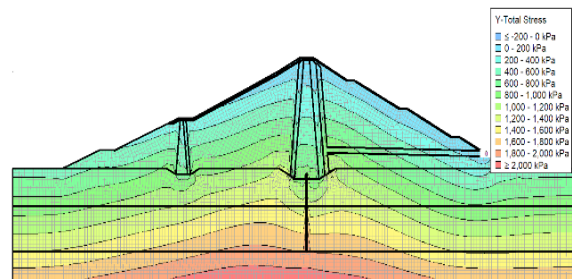


شکل ۱۳- فشار آب منفذی انتهای ساخت در دو نرم افزار

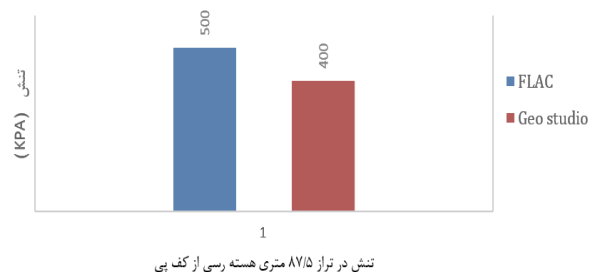
به طور کلی دو عامل را می توان علت این اختلاف بسیار زیاد دانست؛ در وهله اول، این که نتایج قرائت های ابزار دقیق به درستی ثبت نشده اند و قرائت ها غلط می باشند و در وهله دوم، می توان گفت که احتمالاً در لحظات اتمام خاک ریزی فشار آب منفذی ایجاد شده به علت نفوذ پذیری پایین مصالح، کاملاً به ابزار منتقل



شکل ۱۰- تنش های افقی قبل و بعد از آبیگری در نرم افزار FLAC



شکل ۱۱- تنش های عمودی بعد از آبیگری و تصویر بزرگ- نمایی شده هسته در نرم افزار Geo studio



شکل ۱۲- مقایسه تنش قائم در تراز ۸۷/۵ متری کف پی در دو نرم افزار

5. Piezometer

۴-۳- بررسی پایداری در انتهای ساخت و اولین آبیگری

نتایج حاصل از مدل‌سازی سد در حالت استاتیکی توسط نرم‌افزار Slope/w در جدول (۲) نشان داده شده است. جهت تحلیل پایداری سد دوبرج حالت مخزن خالی (حالت خشک) و مخزن پر (بعد از آبیگری) مدنظر قرار گرفت. تحلیل‌های استاتیکی پایداری برای هر دو شیب بالادست و پایین‌دست انجام شد. در نرم‌افزار از روش Morgenstern-price برای تحلیل پایداری شیب استفاده شد. مشاهده می‌شود که ضریب اطمینان در شیب‌های بالادست و پایین‌دست در حد مجاز آیین‌نامه‌ای می‌باشد و در بحرانی‌ترین حالت پایداری مناسبی در شیب‌ها وجود دارد.

نشده و برای این‌که ابزار اندازه‌گیری کاملاً اشباع شود، نیاز به گذشت زمان دارد.

لذا تطبیق مناسبی بین قرائت‌های ابزار دقیق و نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی وجود ندارد. از موارد دیگری که در این قسمت از تحلیل‌ها در سد مشاهده می‌شود، این است که مقدار فشار آب حفره‌ای در مرکز هسته و پایین‌دست هسته متفاوت است. در توجیه این پدیده نیز می‌توان گفت که نفوذپذیری افقی هسته رسی بسیار پایین است. نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد، عملکرد مناسب دیوار آب‌بند و نفوذناپذیر بودن هسته رسی است، چراکه با توجه به الگوی فشار آب منفذی مشاهده می‌شود که مقادیر آن در پایین‌دست سد، یعنی بعد از هسته رسی و دیوار آب‌بند کاهش پیدا کرده است.

جدول ۲- ضریب اطمینان پایداری بدنه سد در حالات مختلف توسط نرم‌افزار Slope/w

شیب	مرحله	تراز آب مخزن	شرایط	ضریب اطمینان سطح لغزش بحرانی دایره	ضریب اطمینان مجاز	وضعیت پایداری
بالا	پایان ساخت	فرازبند	استاتیکی	۱/۴۳۳	۱/۳	پایدار
دست	تراوش پایدار از مخزن پر	تراز نرمال	استاتیکی	۱/۶۲۴	۱/۵	پایدار
پایین	پایان ساخت	فرازبند	استاتیکی	۱/۳۳۲	۱/۳	پایدار
دست	تراوش پایدار از مخزن پر	تراز نرمال	استاتیکی	۱/۵۸۳	۱/۵	پایدار

earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 88, 124-142.

Eisenstein Z, Law STC, "Analysis of consolidation behavior of Mica dam", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103 (GT8), 879-95.

Eberhardt E, "Rock slope stability analysis-utilization of advanced numerical techniques", Departement of Earth and Ocean Sciences at UBC Report, University of British Columbia (UBC), Vancouver, Canada, 41.

Gould JP, Lacy HS, "Seepage control in dam rehabilitation. In: Proceedings of the Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation", ASCE, 1993, 240-55.

GeoSlope International Ltd, "SEEP/W Users Guide", GeoSlope International, Calgary, Canada, 2007.

Huang YH, "Stability Analysis of Earth Slopes", Van Nostrand Reinhold Co, 1983, New York.

ICOLD, "Lessons from dam incidents", In: International commission of large dams, Abridged ed, MA (USA): 1973, USCOLD.

ICOLD, "Monitoring of dams and their foundations - state of the art", Bulletin, 1989, 681-327.

Rashidi A, Mohsen Haeri B, "Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering", 2017, 9, 709-725.

Rashidi M, Heidar M, Azizyan G, "Numerical analysis and monitoring of an embankment dam during construction and first impounding (case study: Siah Sang Dam)", Scientia Iranica, 2018, 25 (2), 505-516.

۴- نتیجه‌گیری

- بیشترین حرکت افقی بعد از آبیگری در تحلیل‌های دو نرم‌افزار در پایین‌دست سد اتفاق افتاده است که به علت حرکت سد به سمت پایین‌دست در اثر فشار آب افقی مخزن می‌باشد.
- نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که فشار آب در بالادست هسته باعث افزایش تنش‌های کششی کل جانبی شده و سد را به سمت پایین‌دست حرکت می‌دهد.
- مهم‌ترین عامل نشست‌های عمودی که باعث کاهش مقاومت اصطکاکی و سختی مواد سد در زیر لایه آبیگری می‌شود، وزن سنگین لایه‌های خاک‌ریز می‌باشد.
- کاهش تنش مؤثر در پوسته بالادست ناشی از پدیده شناورسازی است که تا حدودی در این منطقه باعث افزایش شناوری می‌شود که در نهایت کاهش پارامترهای مقاومت برشی و مدول الاستیسیته مواد پوسته بالادست را به دنبال دارد و سبب ایجاد نشست‌ها در سد می‌شود.
- به‌طور کلی، دو نرم‌افزار در تمامی پارامترهای فیزیکی تقریباً در توافق خوبی قرار دارند.

۵- مراجع

Bo Han, Lidija Zdravkovic, Stavroula Kontoe, David M.G. Taborda, "Numerical investigation of ther esponse of the Yele rockfill dam during the 2008 Wenchuan

- Mortazavi Zanjani A, Soroushn M, Khoshini M, "Two-dimensional numerical modeling of fault rupture propagation through earth dams under steady state seepage", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 88, 60-71.
- Marsal RJ, Resendiz D, "Earth dams and rockfill", Mexico City, Mexico: Limusa, 1975 (in Spanish).
- Rashidi M, Rasouli H, "Initial Hypotheses for Modeling and Numerical Analysis of Rockfill and Earth Dams and Their Effects on the Results of the Analysis", *Advances in Civil Engineering*, 2018, Article ID 3974675, 7 pages.
- Naylor DJ, "Collapse settlement e some developments", In: *Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*, Rotterdam: A. A. Balkema, 1997, 37-54.
- Ormann L, Zardari MA, Mattsson H, Bjelkevik A, Knutsson S, "Numerical analysis of strengthening by rockfill embankments on an upstream tailings dam", *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, (50), 391-9.
- Pagano L, Desideri A, Vinale F, "Interpreting the settlement profiles of earth dams", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124 (10), 923-932.
- Si-hong Liu Liu-jiang Wang, Zi-jian Wang, Erich Bauer, "Numerical stress-deformation analysis of a cut-off wall in clay-core rockfill dam on thick overburden", *Water Science and Engineering*.
- Sowers G, Sally H, "Earth and rockfill dam engineering", London (UK), 1989, Asia Publishing House.
- U.S. Army corps of Engineers, "Stability of Earth and Rock-Fill Dams", U.S. Department of my, Crops of Eng, 1970, EM 110-2-1902.
- Zhou W, Hua J, Chang X, Zhou C, "Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam", *Computers and Geotechnics*, 2011, 38 (2), 269-80.
- Zomorodian SMA, Chochi H, "Numerical Analysis of Earth-Rockfill Dams Behavior During Construction and First Stage Impounding", Water Engineering Department, Shiraz University, 2014 Shiraz, Iran.

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Study of Earthdams after Construction and First Impounding (Case Study of Doyraj EarthDam)

Ahmad R. Mazaheri *, Mehdi Komasi, Majid Viesi

Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ayatollah Borujerdi University

Received: 06 January 2018; **Accepted:** 13 January 2020

Keywords:

Safety Control, Stability, Stresses, settlement, FLAC, GEO STUDIO

1. Introduction

Engineering and economic investigations in dam construction projects throughout the world indicate that, in many cases, rockfill dams with impervious clay cores are the best selection for the final design (Rezaei and Salehi, 2011). This approach makes the investigation of different issues affecting the stability of rockfill dams worthwhile. In general, dam safety is the first and foremost reason for controlling deformation and physical parameters in dams. Another reason is the importance of basic design concepts for engineers to apply in future designs as well as understanding the resistive and behavioral characteristics of soil and pebbles. One of the most effective approaches for interpreting the mechanical and hydraulic behavior of structures such as dams is to use data and compare the results with numerical modeling predictions.

In the field of earth and rockfill dams, monitoring of typical physico-mechanical behaviors is a fundamental issue. Measurements of displacements, total stresses, pore water pressures, and arching ratio can be used to carry out a number of tasks (ICOLD, 1982), such as characterizing the dam's overall behavior (Pagano et al., 1998), checking the behavior of specific zones, obtaining information about the in situ mechanical properties of embankment soils (Marsal and Resendiz, 1975), and finally, supporting the difficult task of evaluating dam safety and efficiency (Gould and Lacy, 1993). Justo (1991) and Naylor (1997) proposed methods for the incorporation of collapse settlement of rockfill into constitutive models. Naylor (1991) performed the finite element analysis for Beliche dam, a central core earth and rockfill dam, by considering the collapse settlement of the upstream rockfill in the modeling. The effect of pore water pressure dissipation in earthfill during construction was also considered by a number of authors including Eisenstein and Law (1977) and Cavounidis and Hoeg (1977), amongst others. For these cases, the incremental embankment construction was modeled as a two-stage process, the first stage modeling the new layer construction using undrained properties for the core and the second stage modeling pore water pressure dissipation. Zomorodian and Kuchi studied internal deformation, pore water pressure, and total vertical stresses in Masjed Soleiman Dam and compared it to numerical results, they also showed that the development of excess pore water pressure in the clay core of zoned earth dams during construction may lead to the onset or progression of hydraulic failure.

Numerical analysis is widely used to solve complex sustainability problems. For example, Zhou et al. (2011) assessed the settlement behavior of Shuibuya dam during construction, initial impounding, and two years after the operation. They carried out two-dimensional (2D) numerical analyses using the finite element method (FEM), and compared the results with the data measured by the instruments in terms of settlements.

* Corresponding Author

E-mail addresses: a.mazaheri@abru.ac.ir (Ahmad R. Mazaheri), komasi@Ab.ru.ac.ir (Mehdi Komasi), majidviesi453@gmail.com (Majid Viesi). www.SID.ir

2. Methodology

2.1. Case study

In this paper, the behavior of the Doyraj earth dam at the end of construction and first impounding is investigated and analyzed. The technique process adopted in this study for numerical modeling, based on the finite difference and finite element approach, is based on FLAC 2D and Geo studio software, which is used in two-dimensional plane stress conditions. In this modeling, for use in numerical analysis, Mohr-Columb's behavioral model is applied in two software.

2.2. Software Modeling

In all sections of the dam, according to the recommendations of the sources cited above, square and triangular elements of 3 and 4 nodes should be used of approximately the same size. Nuclear elementalization is also done with finer elements because of its importance. After constructing the model geometry, due to the nonlinear nature of the geotechnical materials, especially the soil, it is necessary to use a nonlinear behavioral model in the analysis. Therefore, for the materials used in this dam, the complete Mohr-Columb elastoplastic behavior model, which is the most well-known model in soil materials, has been used in two applications. The purpose of using this model is in addition to being widely used, especially in geotechnical engineering, because the input information of this behavior model is simple and very consistent with conventional geotechnical experiments and interpretations.

3. Results and discussion

3.1. Investigation of settlements in the dam body

The settlements created after the end of construction confirm the fact that the main loads on the dam body are the loading caused by the body itself during construction. As predicted, the maximum settlement value increased from the lateral sections to the intermediate sections, and most of it happened in the middle. The values of vertical settlements before and after impounding by the two software are shown in the following figures.

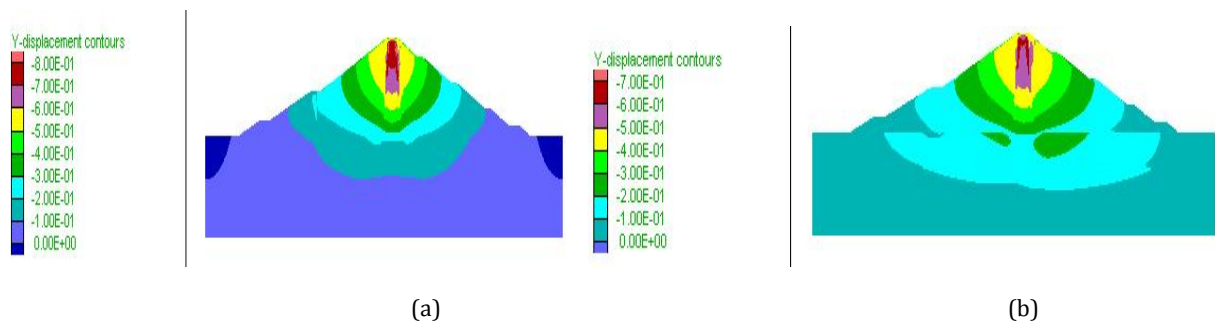


Fig. 1. a) Vertical displacement before impounding in FLAC software, b) Vertical displacement after impounding in FLAC software

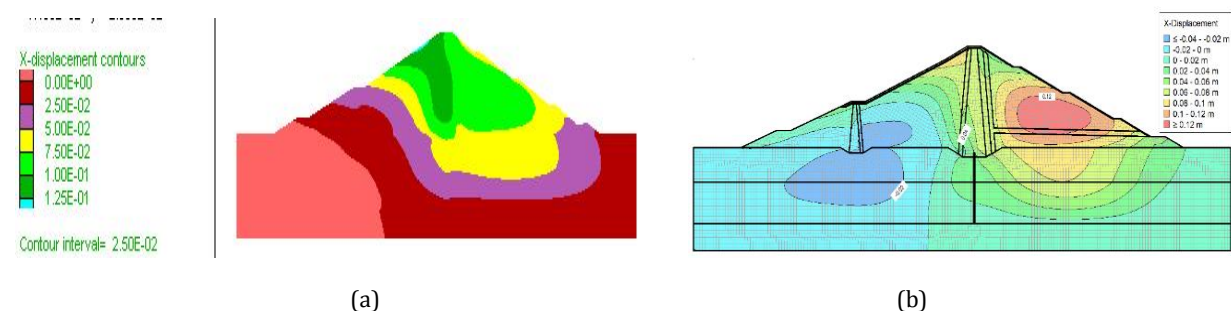


Fig. 2. a) Horizontal displacement before impounding in FLAC software, b) Horizontal displacement after impounding in Geo studio software

4. Conclusions

- Most of the horizontal movement after impounding occurred in the analysis of the two software downstream of the dam this is due to the movement of the dam downstream due to the horizontal water pressure of the reservoir.
- The analysis results show that water pressure upstream of the core increases the total lateral tensile stresses and moves the dam downstream.
- The most important factor for vertical settlements that reduces frictional resistance and hardness of barrier materials under the impound layer is the heavy weight of the embankment layers.
- In general, the two software are in pretty good agreement on all physical parameters.

5. References

- Eisenstein Z, Law STC, "Analysis of consolidation behavior of Mica dam", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103 (GT8), 879-95.
- ICOLD, "Lessons from dam incidents", In: International commission of large dams, Abridged ed, MA (USA): 1973, USCOLD.
- ICOLD, "Monitoring of dams and their foundations- state of the art", Bulletin, 1989, 681-327.
- Marsal RJ, Resendiz D, "Earth dams and rockfill", Mexico City, Mexico: Limusa, 1975 (in Spanish).
- Naylor DJ, "Collapse settlement e some developments", In: Applications of computational mechanics in geotechnical engineering, Rotterdam: A.A. Balkema; 1997, 37-54.
- Zhou W, Hua J, Chang X, Zhou C, "Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam", Computers and Geotechnics, 2011, 38 (2), 269-80.
- Zomorodian SMA, Hossein Chochi, "Numerical Analysis of Earth-Rockfill Dams Behavior During Construction and First Stage Impounding" Water Engineering Department, Shiraz University, 2014 Shiraz, Iran.