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

احمدرضا مظاهری\*۱، مهدی کماسی۱، مجید ویسی۲

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیتالله العظمی بروجردی<sup>(ره)</sup> <sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیتالله العظمی بروجردی<sup>(ره)</sup>

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

### چکیدہ

کنترل ایمنی و پایداری سدهای خاکی در دوران ساخت، انتهای ساخت، اولین آبگیری و بهرهبرداری آن بسیار حائز اهمیت است. ارزیابی مقایسهای نتایج تجزیهوتحلیلها برای ایمنی ساختار و همچنین عملیات نگهداری منظم ضروری است. علاوه براین واضح است که مطالعات دقیق مبتنی بر چنین مقایسههایی بررای 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 آبگیری موردبررسی مقایسهای قرار گرفت. مدلسازی عددی با استفاده از دو نرمافزار 2D FLAC و STUDIO با مدل رفتاری موهر - کلمب (Mohr-Coulom) انجام شد. نتایج بررسیها نشان داد بیشترین نشست عمودی در تاج هسته رسی بعد از اولین آبگیری 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 ۲۰۰۰ کیلو پاسکال بهدستآمده است.

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

### ۱– مقدمه

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. بهطورکلی، ایمنی سد، اولین و مهمترین دلیل کنترل اهمیت در مفاهیم پایهای طراحی برای مهندسین، جهت کاربرد در طرحهای آتی و نیز درک ویژگیهای مقاومتی و رفتاری خاک و سنگریز میباشد. جهت تفسیر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی اسازههای 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

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، ۲۹۶۲). اندازه گیری جابه جایی ها، تنش کل، فشار آب منفذی و نسبت قوس زدگی 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 درنهایت حمایت از کار دشوار ارزیابی ایمنی و بهرهوری سد میباشد (Gould و Lacy Naylor ). ۱۹۹۳ و همکاران (۱۹۹۷) روشهایی را برای پیوستن نشستهای فروریزشی سنگریزهها که باعث پیچیدگی بیشتر و عدم قطعیت بیشتری در برآورد پارامترها بهوجود می آورد به داخل مدل های سازنده پیشنهاد دادند که در تجزیهوتحلیل سد Beliche مورداستفاده قرار گرفت. اثر تعدیل فشار آب منفذی در خاکریز در طول ساختوساز نیز توسط تعدادی از محققین ازجمله

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول؛ ۰۹۱۲۲۸۶۱۷۲۸

آدرس ایمیل: a.mazaheri@abru.ac.ir (ا. مظاهری)، komasi@abru.ac.ir (م. کماسی)، majidviesi453@gmail.com (م. ویسی).

Eisenstein و Eisenstein در مدلسازی سد مایکا <sup>۱</sup> در نظر گرفته شد. برای این موارد، ساختوساز تکاملی بهعنوان یکروند دومرحلهای مدلسازی شد، مرحله اول مدلسازی ساختار یکلایه جدید با استفاده از مشخصات تضعیفشده 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 مسجدسلیمان 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.

تجزيهوتحليلهاى عددى براى حل مسائل پيچيده پايدارى بهطور گسترده استفاده می شود (Ormann و همکاران، ۲۰۱۳). به طور مثال، رفتار نشست سد Shuibuya در طول ساخت وساز و آبگیری اولیه، با استفاده از تجزیهوتحلیل دوبعدی FEM توسط Zhou و همکاران (۲۰۱۱) موردبررسی قرار گرفت. آنها نتایج را با دادههای اندازه گیری ابزار دقیق در رقوم نشستها نیز مقایسه كردند. با مقايسه نتايج اين گونه تحليلها با واقعيت كه همان نتايج ابزار دقيق است، نيز علاوه بر اعتباربخشى به تحليل عددى، میتوان مبنای مناسبی برای انجام یک تحلیل برگشتی<sup>۳</sup> برای حصول به پارامترهای دقیق ژئوتکنیکی ایجاد کرد (Rashidi و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال، نتایج حاصل از این تحلیل ها می تواند مبنای مناسبی برای تحلیلهای بعدی ازجمله رفتارنگاری در دوران بهرهبرداری و تحلیل عددی دینامیکی سد باشد. همچنین با توجه به این که رفتار سدهای خاکی و سنگی در مراحل مختلف بهرهبرداری، ساختوساز و آبگیری، غیرقابل اعتماد است، این موضوع یک مسئله اجتنابناپذیر و ضروری با توجه به خطرات جدی ناشی از شکست این سازههای مهم است، بدین ترتیب

فرضیههای اولیه برای این توسعه داده شد و تعداد المانها و تأثیر آنها بر نتایج تجزیهوتحلیل از طریق روشهای تحکیم و خاک غیراشباع، تحلیل همبسته و تحلیل غیر همبسته موردبررسی 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 آبگیری موردبررسی و تجزیهوتحلیل قرار گرفت. فرآیند تکنیک پذیرفتهشده در این مطالعه برای مدلسازی عددی، بر مبنای رویکرد تفاضل محدود و اجزاء محدود، با استفاده از نرمافزارهای FLAC 2D و Geo studio استوار است که در شرایط تنش صفحهای دوبعدی مورداستفاده 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- تعريف مسئله

هدف اصلی و عمده احداث این سد، آبیاری حدود ده هزار هکتار اراضی کشاورزی دشت موسیان میباشد. بر اساس مطالعات انجامشده و با توجه با شرایط توپوگرافی، زمین شناسی 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 آبگیری با مدلهای رفتاری مشترک میباشد. درواقع ارزیابی عملکرد این سد از طریق استفاده از نتایج تحلیلهای صورت گرفته موردبررسی قرار می گیرد. مقطع سد خاکی موردمطالعه در شکل (۱) مشاهده میشود.



شکل ۱- بزرگ ترین مقطع سد خاکی دویرج

1. Mica 2. Finite Element Method

3. Back analysis

### ۲-۱- سد خاکی دویرج

سد خاکی دویرج 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 دویرج میباشد. ارتفاع سد از بستر رودخانه ۸۸ متر، طول تاج آن ۱۱۶۰ متر، عرض تاج آن ۱۹۴/۸ 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 مهاب 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 ویژگیهای مقاومتی پایینی است، بههمین علت بهمنظور بهبود بخشیدن به پارامترهای ژئوتکنیکی این قسمت از پی از تزریق تحکیمی استفاده شده است. لایه دوم باضخامت ۲۰ متر دارای خواص مقاومتی ضعیفتر نسبت به لایه اول میباشد و لایه سوم باضخامت 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 واقعی تر مدلسازی پی سد انجام شده باشد.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مواد مورداستفاده سد خاکی

دويرج در تحليلها								
Ф Deg	K m/s	Poissons Ratio	C (MPa)	γd (kN/m3)	E (MPa)	نوع مواد		
٣٢	۳/۹۸۵	۰ /٣	•	۲.	٣٠٠	فونداسيون لايه ۱		
٣٢	Y/Y^۶	۰ /٣	•	۲.	۲۰۰	فونداسيون لايه ۲		
۳۵	١^٩	• /٣	۵۰	22	١٠٠٠	فونداسيون لايه ۳		
۳۸	۱^۶	۰ /۳۳	•	۱۹/۵	١٠٠	پوسته		
٣٩	۱۸۳	۰/۲۵	•	21	٩٠	زهکش		
۱۳	۱^٩	٠/٢۵	۵۰	۲۰/۵	۷۵	هسته		
۳۵	۱۸۵	٠/٣۵	•	۱۹/۵	۳۵	فيلتر		

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

بدنه سد نیز در ۸ لایه باضخامت لایهای یکسان مدلسازی گردیده است تا شرایط ساخت مرحلهای سد رعایت شده باشد. عملیات ساختوساز سد دویرج در طی ۳ سال تکمیل شد و آبگیری 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 بهدلیل اهمیت آن انجام شده است. پس از ساخت هندسه مدل، با توجه به طبيعت غيرخطى مصالح ژئوتكنيك بهويژه خاك، لازم است مدل رفتاری غیرخطی مناسبی در تحلیلها مورداستفاده قرار گیرد. ازاینرو برای مصالح به کار رفته در این سد، مدل رفتاری الاستوپلاستیک<sup>۴</sup> کامل موهر- کلمب که شناختهترین مدل در مصالح خاکی است، در دو نرمافزار استفاده شده است. هدف از استفاده از این مدل درواقع علاوه بر این که دارای بیشترین کاربرد را بهخصوص در علوم مهندسی ژئوتکنیک دارد، با خاطر این که 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 توصيف مي كند. در شكل هاي (٢) و (٣) مقطع عرضي 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

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 1987 USBR نریب 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. بااینحال 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. همان طور که پیش بینی میشود، مقدار نشست حداکثر از مقاطع کناری به سمت مقاطع میانی افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در مقطع میانی که مقطع حداکثر نیز میباشد، رخداده است. قسمتهای کناری هسته رسی که در مجاورت مصالح هسته قرار می گیرند، 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 می کنند. مقادیر نشستهای عمودی قبل و بعد از آبگیری توسط دو نرم افزار در شکلهای (۴) و (۵) نشان داده می شود. همچنین مقادیر تغییر مکانهای افقی بعد از اولین آبگیری در شکلهای (۶)

شکلهای (۴) و (۵) میزان نشستهای عمودی قبل و بعد از آبگیری را نشان میدهد. با توجه به این که سد دویرج یک سد غیرهمگن خاکی با هستهی رسی است که شامل منطقههای هسته، فیلتر، زهکش و پوسته است، بهدلیل تفاوت در خواص مصالح و نامساوی بودن تغییر شکل پذیری این مصالح و همچنین عدم اجرای یکنواخت خاک ریز بهدلیل محدودیتهای اجرایی، روند نشستهای ناهمگون قابل انتظار است. مقدار بیشینه نشستها قبل و بعد از آبگیری حدود ۸۰ و ۲۰ سانتی متر در تاج هسته رسی اتفاق افتاده است. نتایج نشان میدهد که میزان جابه جایی های

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











شکل ۶– تغییر مکان افقی بعد از اولین آبگیری در نرمافزار FLAC



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



شکل ۸- نمودار مقایسه جابهجاییها در دو نرمافزار

### ۲-۳- بررسی تنشها در بدنه سد

وضعیت تنش در بدنه سدهای خاکی یکی از مهمترین متغیرهای موردبررسی 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 این گونه سدها، تحلیل وضعیت تنش ها، به دلیل تغییر شکل پذیری متفاوت هسته و پوسته، اهمیت بیشتری دارد. افزون بر این، به دلیل نشست کمتر پوسته در مقایسه بیشتری دارد. افزون بر این، به دلیل نشست کمتر پوسته در مقایسه بیشتری دارد. افزون بر این، به دلیل نشست کمتر پوسته در مقایسه پایشتری و پی منتقل نخواهد شد.

در شکل (۹) توزیع تنش بارهای قائم کل در پایان در مقطع دیده می شود. همان گونه که در شکل دیده می شود مقدار تنش های قائم در هسته سد نسبت به پوسته کاهش می یابد که علت آن کم تر بودن سختی مصالح هسته نسبت به پوسته است. مقدار بیشینه تنش قائم کل حاصل از تحلیل هسته در این مقطع در جدود ۱۰۰۰ کیلو پاسکال است. همچنین به خوبی می توان اثر قوس زدگی را در هسته دید.

در شکل (۱۰) نیز میزان تنشهای افقی قبل و بعد از آبگیری نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود 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 می باشد. مشاهده می شود که کنتور تنشهای افقی قبل از آبگیری به صورت متقارن می باشد اما تنشهای افقی بعد از آبگیری در شیب پایین دست کاهش داشته و در شیب بالادست به دلیل فشار جانبی مخزن افزایش پیداکرده 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

فیلترها، در مقایسه با نیروی وزن هسته در آن محدوده، مقدار قابلتوجهی باشد این پدیده رخ می دهد 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 صلب تر است، به وجود می آید. تأثیر چنین پدیده ای کاهش یافتن تنشهای قائم حاصل از وزن خاک در ترازهای پایین تر 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 جابه جا شدن (نشست) خاک نرم تر تا حدی جلوگیری می کند. به عبارتی در داخل خاک نرم تر هرچه از مرز دورتر شویم نشست راحت تر انجام می شود.

در شکل (۹) توزیع تنش بارهای قائم کل در پایان در مقطع دیده می شود. همان گونه که در شکل دیده می شود مقدار تنش های قائم در هسته سد نسبت به پوسته کاهش می یابد که علت آن کم تر 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 می توان اثر قوس زدگی را در هسته دید.

در شکل (۱۰) نیز میزان تنشهای افقی قبل و بعد از آبگیری نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود 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 می باشد. مشاهده می شود که کنتور تنشهای افقی قبل از آبگیری به صورت متقارن می باشد اما تنشهای افقی بعد از آبگیری در شیب پایین دست کاهش داشته و در شیب بالادست به دلیل فشار جانبی مخزن افزایش پیداکرده است.



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



شکل ۱۰- تنشهای افقی قبل و بعد از آبگیری در نرمافزار FLAC





شکل ۱۱- تنشهای عمودی بعد از آبگیری و تصویر بزرگ-نمایی شده هسته در نرمافزار Geo studio



شکل ۱۲– مقایسه تنش قائم در تراز ۸۷/۵ متری کف پی در دو نرمافزار

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

# ۳-۳- بررسی فشار آب منفذی

فشار آب منفذی بعد از آبگیری در حالت استاتیکی در دو نرمافزار در شکل (۱۳) نشان داده شده است. از تحلیل مکانیکی و جریان توأم برای مدلسازی در این مرحله استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود مقادیر فشار آب منفذی کمی زیادتر 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 حفرهای پیش بینی شده را بعد از اولین مرحله آبگیری نشان می دهد. الگوی کنتورهای فشار آب حفرهای به نظر منطقی می رسد. با توجه به ابزاردقیق پیزومتر<sup>۵</sup> شماره 5-10 EP که در ارتفاع ۲۱ متری هسته رسی از کف فونداسیون قرار دارد، مقدار فشار آب منفذی در انتهای ساخت و اولین آبگیری حدود ۵ کیلوپاسکال به دست آمده است که ساخت و اولین آبگیری حدود ۵ کیلوپاسکال به دست آمده است که عددی را دارد.



شکل ۱۳- فشار آب منفذی انتهای ساخت در دو نرمافزار

بهطورکلی دو عامل را میتوان علت این اختلاف بسیار زیاد دانست؛ در وهله اول، این که نتایج قرائتهای ابزاردقیق بهدرستی ثبت نشدهاند و قرائتها غلط میباشند و در وهله دوم، میتوان گفت که احتمالاً در لحظات اتمام خاکریزی فشار آب منفذی ایجادشده بهعلت نفوذپذیری پایین مصالح، کاملاً به ابزار منتقل ۲۳۲

5. Piezometer

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 می شود، این است که مقدار فشار آب حفرهای در مرکز هسته و پایین دست هسته متفاوت است. در توجیه این پدیده نیز میتوان گفت که نفوذپذیری افقی هسته مرسی 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 می شود که مقادیر آن در پایین دست سد، یعنی بعد از هسته رسی و دیوار آببند کاهش پیداکرده است.

# ۳-۴- بررسی پایداری در انتهای ساخت و اولین آبگیری

نتایج حاصل از مدلسازی سد در حالت استاتیکی توسط نرمافزار Slope/w در جدول (۲) نشان داده شده است. جهت تحلیل پایداری سد دویرج حالت مخزن خالی (حالت خشک) و مخزن پر (بعد از آبگیری) 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 می شود که ضریب اطمینان در شیبهای بالادست و پاییندست در حد مجاز آیین نامه ای می باشد و در بحرانی ترین حالت پایداری مناسبی در شیبها وجود دارد.

وضعبت بابداري	ضريب اطمينان	ضريب اطمينان سطح	شرابط	تراز آب مخزن	م, حله	شيب
	مجاز	لغزش بحراني دايره		6, , , , ,	5	
پايدار	١/٣	1/477	استاتيكي	فرازبند	پايان ساخت	بالا
پايدار	۱/۵	1/874	استاتيكي	تراز نرمال	تراوش پايدار از مخزن پر	دست
پايدار	١/٣	۱/۳۳۲	استاتيكي	فرازبند	پايان ساخت	پايين
پايدار	۱/۵	١/۵٨٣	استاتیکی	تراز نرمال	تراوش پایدار از مخزن پر	دست

Slope/w	نرمافزار	توسط	حالات مختلف	نه سد در	پایداری بد	اطمينان	۲- ضریب	جدول
---------	----------	------	-------------	----------	------------	---------	---------	------

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 Reihold 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 آبگیری در تحلیلهای دو نرمافزار در پاییندست سد اتفاق افتاده است که بهعلت 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.
- مهم ترین عامل نشستهای عمودی که باعث کاهش مقاومت
  اصطکاکی و سختی مواد سد در زیر لایه آبگیری می شود، وزن
  سنگین لایه های خاکریز می باشد.
- کاهش تنش مؤثر در پوسته بالادست ناشی از پدیده شناورسازی است که تا حدودی در این منطقه باعث افزایش شناوری میشود که درنهایت کاهش پارامترهای مقاومت برشی و مدول الاستیسیته مواد پوسته بالادست را بهدنبال دارد و سبب ایجاد نشستها در سد میشود.
- بهطورکلی، 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 theYele rockfill dam during the 2008 Wenchuan

- Mortazavi Zanjani A, Soroushn M, Khoshini M, "Twodimensional 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 crops of Engineers, "Stability of Earth and Rock-Fill Dams", U.S. Department of my, Crops of Engs, 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<sup>\*</sup>, 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@Abru.ac.ir (Mehdi Komasi), majidviesi453@gmail.com (Majid Viesi).

### 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 ofter impounding in FLAC software



Fig. 2. a) Horizontal displacement before impounding in FLAC software, b) Horizontal displacement ofter 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.