

ارزیابی رفتار مکانیکی سد مارون با استفاده از تحلیل عددی سه بعدی

مهرنوش صادقی پور^{*۱}
عباس سروش^۲
آرش حسینزاده^۳

چکیده

یکی از موارد نامطلوب برای سدهای خاکی، احداث آن در «دره تنگ» است؛ زیرا در این شرایط احتمال وقوع پدیده انتقال بار یا انتقال تنش (Load Transfer) و به تبعیت از آن، احتمال تفاوت در نتایج تحلیل‌های دو بعدی و سه بعدی سد افزایش می‌یابد. در واقع رفتار سدهای خاکی - سنگریزه‌ای در دره‌های تنگ، متأثر از اثر سه بعدی دره است. هندسه سد و به‌طور خاص، نسبت طول تاج به ارتفاع سد بر اثر سه بعدی تأثیرگذار است و در مواردی که فاصله تکیه‌گاه‌های سد کم و دره سد تنگ باشد، انجام تحلیل سه بعدی برای سدهای بزرگ واقع در دره‌های تنگ، ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای با عناوین و اهدافی شبیه هدف تحقیق حاضر، بر روی دامنه گسترده‌ای از سدهای خاکی و سنگریزه‌ای انجام گرفته است، اما نظر به اینکه بیشتر تحقیقات به‌صورت مدل‌سازی و تحلیل دو بعدی است؛ مطالعه‌ی جامع‌تر و به‌صورت سه بعدی ضروری به نظر می‌رسد تا تفاوت‌های این دو نوع آنالیز به‌منظور انتخاب روش بهینه به دست آید.

این مقاله تلاشی برای بررسی اثر سه بعدی دره تنگ بر رفتار سد سنگریزه‌ای مارون است که با ۳۶۵ متر طول تاج و ۱۶۵ متر ارتفاع ($L/H=2/1$) در جنوب غربی ایران واقع شده است. در راستای این هدف، تحلیل‌های دو بعدی و سه بعدی سد با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS برای بررسی فشار آب حفره‌ای و تغییرشکل‌های افقی ناشی از آبدگیری انجام گرفته و نتایج به دست آمده از این دو نوع تحلیل به تفصیل با یکدیگر و با نتایج ابزار، مورد مقایسه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی

سد خاکی - سنگریزه‌ای، سد مارون، تحلیل سه بعدی، دره تنگ، فشار آب حفره‌ای، قوس زدگی.

۱. دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. mehrnoosh.sadeghipoor@gmail.com
۲. دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. soroush@aut.ac.ir
۳. دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. arash.hosseinzadeh@gmail.com

مقدمه

سدهای خاکی - سنگریزه‌ای، به دلیل مزایای فراوانی که در مقایسه با سایر انواع سدها دارند، (مزایایی؛ مانند: پایین بودن هزینه‌های اجرایی، سرعت و سهولت در اجرا، قابلیت اجرا روی انواع پی و ...) همواره مورد توجه بوده‌اند و تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌های گوناگون روی این نوع از سدها صورت گرفته است.

این نوع سدها با وجود مزایایی که دارند در اجرا با محدودیت‌هایی نیز روبرو هستند. محدودیت‌هایی؛ مانند: محدودیت هندسی و به‌ویژه محدودیت شکل دره سد، که پژوهش حاضر بر آن تمرکز دارد.

شکل و نوع دره در تمامی مراحل پروژه یک سد، از مطالعات اولیه و انتخاب سایت، تا اجرا و رفتار سد، در طول عمر آن تأثیرگذار است؛ بنابراین، لازم است که این عامل به‌طور مؤثر و همه‌جانبه در همه مراحل لحاظ شود. با توجه به تحقیق‌هایی که تاکنون صورت گرفته است ممکن است میزان تأثیر این عامل بر مراحل مختلف، تا حدودی مشخص باشد، اما به‌طور معمول، به شکل مؤثری در تحلیل و طراحی لحاظ نمی‌شود.

دره‌های تنگ همواره به‌عنوان مانعی برای احداث سدهای خاکی محسوب می‌شوند. این نوع دره‌ها نیاز به تحلیل و طراحی سه‌بعدی را با در نظر گرفتن شرایطی خاص ایجاد می‌کنند. با توجه به این موضوع، در این پژوهش تمرکز بر سدهایی است که در دره‌های تنگ واقع شده است تا در این راستا تأثیر هندسه دره بر نتایج آنالیز به دست آمده و با توجه به شکل دره، آنالیز دقیق‌تری برای سد صورت گیرد.

تاکنون تحقیق‌های گسترده‌ای با عناوین و هدف‌های مشابه با تحقیق حاضر، روی دامنه گسترده‌ای از سدهای خاکی و سنگریزه‌ای انجام گرفته است، اما با توجه به اینکه

تحقیق‌های یادشده، بیشتر به‌صورت مدل‌سازی و تحلیل دوبعدی بوده است؛ لزوم مطالعه‌ای جامع به‌صورت سه‌بعدی ضروری به نظر می‌رسد.

آناگنوستی نخستین کسی بود که گفت پدیده قوس زدگی یا انتقال بار فقط بین هسته و پوسته سنگریزه‌ای رخ نمی‌دهد؛ بلکه در یک دره تنگ، بین دو تکیه گاه نیز صورت می‌گیرد. (توللی، عباس، ۱۳۷۶) کاهش تنش قائم در قسمت میانی سد از مقدار فشار بالاسری γh اثر این پدیده است. (Yu et al., 2005) گسترش کاهش تنش به‌وسیله قوس زدگی، به عرض دره و شیب تکیه گاه‌ها بستگی دارد؛ برای مثال حالت سدی فرضی با ارتفاع ۳۰ متر را در نظر بگیرید که در یک دره باریک ۷ شکل با تکیه‌گاه‌هایی از زاویه شیب ۳۰ تا ۶۰ درجه قرار گرفته است. تنش قائم برای هر حالت به وسیله روش المان‌های محدود به دست آمده و بررسی شده است. از این بررسی چنین نتیجه‌گیری شد که برای زاویه‌های شیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب ۲۸، ۴۴ و ۵۸ درصد تنش انتقال پیدا می‌کند. (Sherard, 1984) انتقال تنش برای دره‌هایی با زاویه بیشتر از ۶۰ درجه، افزایش قابل ملاحظه‌ای ندارد. این نتایج اثر دره تنگ را در انتقال تنش نشان می‌دهد. (Chen et al., 2001) به‌عنوان نمونه، در سد Manicouagan که با ۱۰۷ متر ارتفاع در یک دره تنگ قرار گرفته است، قوس‌زدگی اتفاق افتاد. بررسی اثر سه‌بعدی بر پایداری شیروانی‌ها یکی از موضوعات مورد توجه بوده است، در این زمینه نیز تحقیقات زیادی انجام شده است. (Seed et al., 1990) همچنین در همین زمینه، طی تحقیقات گسترده‌ای اثر سه‌بعدی برای خاکبرداری‌ها تحلیل و بررسی شده است. (Faheem et al., 2004)

اثرهای سه‌بعدی علاوه بر ایجاد پایداری در شیروانی‌ها (Ugai, 1989) در پایداری سد خاکی - سنگریزه‌ای که یکی از مهمترین انواع شیروانی‌های مصنوعی و معروف‌ترین نوع

سازه‌های نگهدارنده آب است، نیز نقش مهمی دارد. (Chen and Chameau, 1983) پیش از این، تأثیر توپوگرافی دره بر تنش‌های درون بدنه سد با استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی، مورد بررسی قرار گرفته است و چنین نتیجه گرفته شد که تحلیل‌های دوبعدی برای مطالعه سدهایی که در دره‌های دارای دامنه‌های با شیب تند واقع شده اند، قابل استفاده نیست. (Belyakov, 1989)

مطالعات نشان می‌دهد که اغلب آثار سه‌بعدی در سدهای خاکی با هدف افزایش ایمنی و پایداری بررسی شده است. (Marsal and Ramirez, 1967) از زمانی که استفاده از تحلیل‌های سه‌بعدی معمول شد، تأثیرهای سه‌بعدی در دره‌های V شکل متقارن، بررسی گردید و نشان داده شد که انتقال بار در مقطع سد همانند انتقال بار در مقطع طولی صورت می‌گیرد. (Lefebvre et al., 1973) با این وجود، روش‌های لازم در محاسبه‌های سه‌بعدی هنوز مورد ملاحظه است. (Elgamal and Abdel-Ghaffar, 1987)

مطالعاتی توسط توماس و فرد (Thomas M. Gurtowski and Fred H. kulhawy) در سال ۱۹۷۶ میلادی بر پایه روش اجزای محدود با استفاده از رابطه‌های «هندلولی غیرخطی» و «مدول‌های مماسی» و «ضریب پواسون مماسی» وابسته به تنش و عملکرد ساخت مرحله‌ای، روی نمونه سد خاکریز «زون دار» انجام گرفت. این ۱۴ تحلیل، المان محدود کرنش مسطح برای سدهای غیرهمگن، روی فونداسیون صلب با هدف تشخیص انتقال تنش پتانسیل ترک هیدرولیکی و مقاومت با هندسه‌ها و خواص مصالح متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

این تحلیل‌ها با ساختار مرحله‌ای و خواص مصالح غیرخطی وابسته به تنش با مقاومت کششی صفر، مدل‌سازی شد و براساس آن این نتایج استخراج گردید:

- تغییر در خواص مصالح ناحیه انتقالی و ضخامت آنها

چندان اهمیتی ندارد؛

- شیب تند سد باعث افزایش تنش، پتانسیل ترک هیدرولیکی و مقاومت می‌شود؛

- تأثیر ارتفاع سد نسبتا کم است ولی برای نمونه‌هایی که تحلیل شد، سدهای مرتفع‌تر دارای انتقال تنش کمتر، پتانسیل کمتر ترک هیدرولیکی در امتداد صفحه افقی، پتانسیل بیشتر ترک هیدرولیکی در امتداد صفحه قائم و مقاومت بیشتر می‌باشند؛

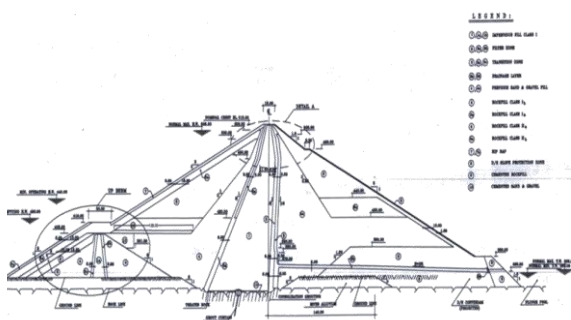
- هسته‌های قائم نازک (شیب تند) باعث انتقال تنش بیشتر، پتانسیل بیشتر ترک هیدرولیکی و مقاومت بیشتر با پوسته نسبتا متراکم و مقاومت کمتر با پوسته متراکم می‌شود.

هسته مایل و قائم، اغلب تنش مشابهی دارند ولی هسته قائم، پتانسیل ترک هیدرولیکی بیشتری دارد. زمانی که مقاومت در هسته مایل بیشتر باشد، در هسته قائم مقاومت در لایه‌های انتقالی و پوسته توسعه پیدا می‌کند. اثر شیب هسته در هسته‌های مایل کم است ولی شیب‌های کندتر باعث افزایش مقاومت در هسته و کاهش آن در لایه انتقالی و پوسته پایین دست می‌شود.

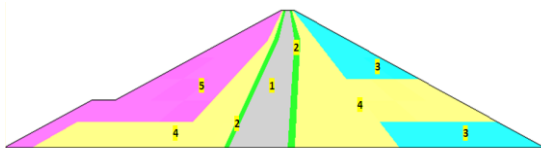
در این مقاله ابتدا به ارزیابی نتایج تحلیل دوبعدی پرداخته می‌شود، سپس تحلیل سه‌بعدی سد بررسی شده و در ادامه، نتایج به دست آمده از تحلیل سه‌بعدی با نتایج دوبعدی مقایسه می‌گردد.

معرفی سد مخزنی مارون

سد مارون در کوه‌های زاگرس و در یال شمال شرقی تاقدیس بزرگی که از جنس آهک آسماری است قرار دارد. در این ناحیه، رودخانه مارون مسیر خود را در سنگ آهک آسماری و لایه‌های شیل و مارن زیر آن باز کرده و تنگه‌ای به طول ۸ کیلومتر را به وجود آورده است. باریک‌ترین نقاط تنگه، ابتدا و انتهای آن است که عرض آن در باریک‌ترین حد خود در بستر رودخانه، حدود ۳۰ متر می‌باشد. فاصله

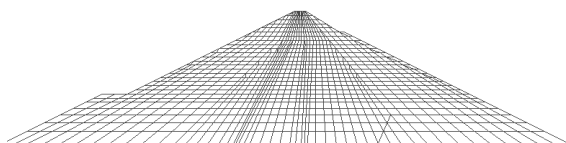


شکل (۱): مقطع عمومی و مصالح مختلف سد



شکل (۲): مقطع ایده‌آل‌سازی شده سد مارون

شکل (۳) نمایشگر مش‌های اجزای محدود مورد استفاده برای تحلیل مقطع یادشده می‌باشد. در مش‌بندی این مدل‌ها از المان‌های کرنش مسطح خطی (Bilinear CPE4P در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است که displacement and pore pressure elements موسوم به المان‌های کرنش مسطح، چهارضلعی و چهارگره‌می باشد که هر گره علاوه بر درجات آزادی مربوط به تغییرشکل، دارای یک درجه آزادی مربوط به فشار آب حفره‌ای نیز می‌باشد. در مسیر تحلیل‌ها از مش‌بندی متراکم « dense mesh» استفاده شد که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود.



شکل (۳): مش متراکم اجزای محدود مدل هندسی مقطع عمومی سد مارون همچنین به منظور مدل‌سازی رفتار مصالح، از دو مدل رفتاری الاستیک و الاستوپلاستیک موهر کولمب استفاده شده است که مشخصه‌های مکانیکی مصالح با استناد به گزارش‌های فنی موجود انتخاب گردیده است. با توجه به ناحیه‌بندی‌های موجود در بدنه سد مارون از پنج نوع مصالح با مشخصه‌های فنی بیان شده در جدول (۲) استفاده شده است.

بین این دو نقطه (عرض تنگه) ۱/۵ کیلومتر است. مناسب‌ترین محل برای ذخیره آب و سایر هدف‌های انتخاب‌شده، در ابتدای تنگ دره قرار دارد که از سنگ آهک آسماری تشکیل شده است. سد مارون در این دره تنگ قرار گرفته است و دارای نسبت طول تاج سد به ارتفاع ۲ بوده و با شیب متوسط ۱ در کناره‌ها اجرا شده است. مشخصه‌های کلی این سد در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصه‌های کلی سد مارون

سیستم آب‌بندی بدنه	هسته رسی مایل
طول تاج	۳۴۵ متر
عرض تاج	۱۵ متر
رقوم تاج	۵۱۵ متر نسبت به سطح دریا
ارتفاع آزاد (Free board)	۶/۵ متر
حجم کل خاکریز	۷۴۷۰ هزار متر مکعب
رقوم عادی سطح آب در مخزن	۵۰۵ متر نسبت به سطح دریا
رقوم حداکثر عادی سطح آب	۵۰۸/۵ متر نسبت به سطح دریا
رقوم حداکثر آب (سیل ۱۰ هزار ساله)	۵۱۴/۸۵ متر نسبت به سطح دریا
مساحت مخزن	۲۵ کیلومتر مربع
حجم مخزن	۱۲۰۰ میلیون متر مکعب

مدل‌سازی دوبعدی اجزای محدود سد مارون

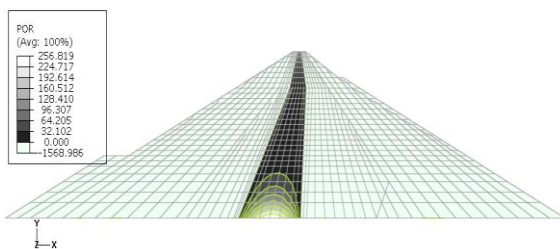
مدل مورد استفاده در تحلیل عددی سد مارون براساس تقسیم‌بندی هندسه سد به المان‌های اجزای محدود، در نرم‌افزار ABAQUS می‌باشد. شکل (۱) مقطع عمومی و مصالح مختلف سد را نشان می‌دهد. شکل (۲) نشان‌دهنده مقطع ایده‌آل‌سازی شده مطابق با شکل (۱) برای آنالیز می‌باشد.

حالت تعادل با دادن زمان طولانی به مدل، مدل سازی شد. با توجه به اینکه آبیگری سد به صورت آبی مدل نشده و طی زمان طولانی صورت گرفته است، بخشی از حالت تراوش پایدار در مرحله آبیگری به دست آمده است، به نحوی که نتایج این دو بخش تفاوت اندکی با یکدیگر دارند.

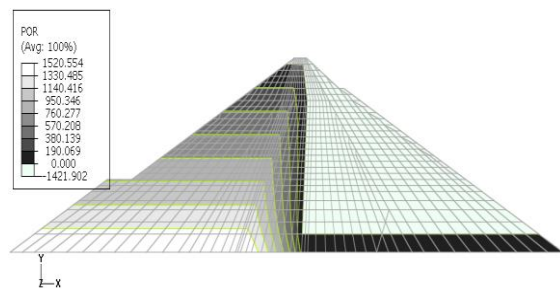
بررسی نتایج آنالیز دوبعدی فشار آب حفره‌ای سد

مقدار فشار آب حفره‌ای در پایان مرحله ساخت پس از آبیگری و در حالت تراوش پایدار به ترتیب در شکل (۴) آمده است. همچنین برای مشخص تر شدن توزیع فشار آب حفره‌ای در شکل (۵) کانتورهای هسته رسی به‌طور جداگانه آورده شده است. (مقادیر ارائه شده بر حسب کیلوپاسکال می‌باشند).

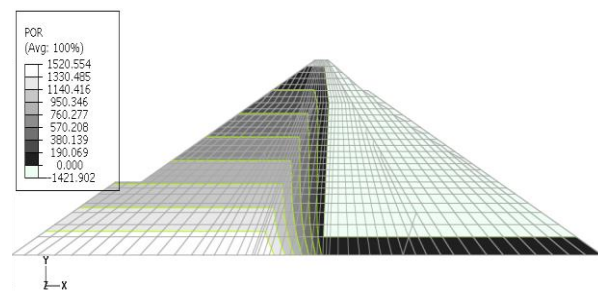
شکل (۴)؛



شکل (۴ - الف): کانتور فشار آب حفره‌ای سد در پایان ساخت



شکل (۴ - ب): کانتور فشار آب حفره‌ای سد پس از آبیگری



شکل (۴ - ج): کانتور فشار آب حفره‌ای سد در زمان تراوش پایدار

جدول (۲): مشخصه‌های فنی مصالح به کار رفته در مدل سد مارون

ردیف	نوع مصالح	γ (kN/m ³)	k (cm/sec)	E (MPa)	ν
۱	هسته	۲۱/۵	۱۰E-۷	۲۰	۰/۴۰
۲	فیلتر و ترانزیشن	۱۹/۵	۱۰E-۴	۴۰	۰/۳
۳	سنگریز پایین دست	۲۱/۰	۴۰۰	۸۰	۰/۲۵
۴	شن و ماسه نفوذپذیر	۲۰/۵	۱۰	۶۵	۰/۲۵
۵	سنگریز بالا دست	۲۱/۰	۵۰۰	۹۰	۰/۲۵

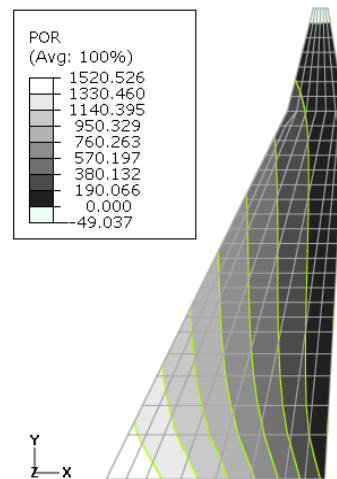
مدل سازی و آنالیز دوبعدی سد مارون در چند مرحله صورت گرفت که عبارتند از:

۱. مدل سازی و آنالیز زمان ساخت: با توجه به تاریخچه ساخت سد، به منظور مدل سازی دقیق آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد، مدل سازی زمان ساخت طی ۵ سال و برای مقطع عمومی مورد توجه این پژوهش در ۲۷ مرحله (هر مرحله حدود ۷۵ روز) صورت گرفت. بارگذاری به صورت زهکشی شده مدل گردیده و در حین ساخت سد امکان تحکیم به آن داده شد؛

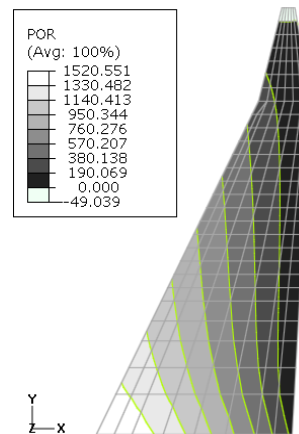
۲. مدل سازی زمان آبیگری: آبیگری سد مارون به صورت اعمال فشار آب مخزن بر پوسته بالادست سد در نظر گرفته شد که این فرآیند شامل اعمال فشار هیدرو استاتیکی بر المان‌های پوسته بالادست و پایین دست سد و تعریف شرایط مرزی فشار آب در تک تک گره‌های بالادست و پایین دست سد می‌باشد. در راستای مدل سازی شرایط واقعی، اعمال فشار آب دریاچه بر پوسته بالادست به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته شده است، به طوری که با بالا رفتن تراز آب دریاچه، میزان فشار وارد شده به تدریج افزایش می‌یابد؛

۳. مدل سازی زمان تراوش دائم: به منظور بررسی شرایط کنونی سد، شرایط تراوش پایدار نیز برای رسیدن به

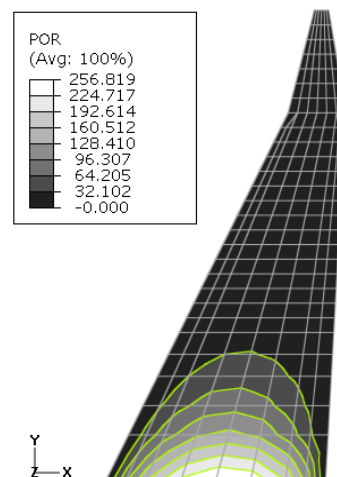
همان‌طور که در شکل (۴ - الف) و شکل (۵) دیده می‌شود پس از پایان دوران ساخت سد، فشار آب حفره‌ای تنها در قسمت هسته باقی مانده است و قسمت‌های دیگر خاکریز همچنان دارای فشار آب حفره‌ای حدود صفر می‌باشند؛ به عبارت دیگر در پایان ساخت و پس از تحکیم سد، فشارهای حفره‌ای در پوسته مستهلک شده و تنها در هسته باقی مانده است.



همچنین در مدل‌سازی زمان ساخت، چنین مشاهده شد که فشارهای آب حفره‌ای محاسباتی در هسته رسی با افزایش تدریجی ارتفاع خاکریزی افزایش می‌یابند. باتوجه به شکل (۴ - ب) و شکل (۵) همان‌طور که انتظار می‌رود پس از آبیگری فشارهای آب حفره‌ای در هسته و بالادست به مقدار محسوسی افزایش می‌یابد. در این شکل‌ها، سطح فراتیک (Pheratic surface) شکل گرفته به خوبی مشخص است. علاوه بر این، شکل (۴ - ج) و شکل (۵) نشان می‌دهد که گذشت زمان در سطح فراتیک تغییر خاصی ایجاد نمی‌کند و همچنین فشارهای آب حفره‌ای در نواحی مختلف سد اندکی کاهش می‌یابد که دلیل آن استهلاک فشارهای حفره‌ای اضافی است.



بررسی نتایج آنالیز دوبعدی تغییر شکل‌های افقی سد
مقدارهای تغییر شکل‌های افقی در پایان مرحله ساخت، پس از آبیگری، ناشی از آبیگری و در حالت تراوش پایدار در شکل (۶) آمده است. (مقدارهای ارائه شده بر حسب متر می‌باشد).



شکل (۵): کانتور فشار آب حفره‌ای هسته سد؛

(از بالا به پایین در پایان ساخت، پس از آبیگری و در زمان تراوش پایدار)

که اندک عدم تقارن موجود را می‌توان به تفاوت در جنس مصالح نسبت داد.

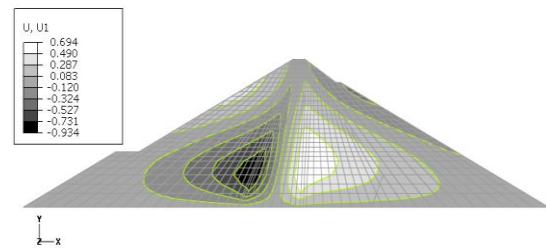
باتوجه به شکل (۶ - ب و ج) با شروع آبیگری، تغییرشکل‌های افقی به نسبت باز توزیع شده، تقارن موجود به هم خورده و سد به‌طور محسوسی به سمت بالادست حرکت می‌کند.

شکل (۶ - ج) نشان می‌دهد که با ادامه آبیگری سد از حرکت سد به سمت مخزن کاسته شده و سد مجدد به روند سابق تغییرشکل‌های افقی خود بازمی‌گردد و آرایش تغییرشکل‌های افقی نسبت به اوایل آبیگری تغییر می‌کند.

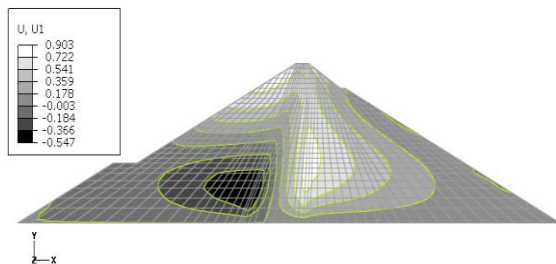
در شکل (۶ - د) با گذشت زمان، توزیع تغییرشکل‌های افقی نسبت به پایان آبیگری، تغییر محسوسی نکرده و تنها اندکی به مقدار آنها افزوده می‌شود که دلیل آن را می‌توان به پایداری شدن شرایط و ادامه حرکت بسیار آهسته سد به سمت پایین دست، نسبت داد.

مدل‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود سد مارون
شکل (۷) نمایشگر مش‌های اجزای محدود مورد استفاده برای تحلیل است. در مش‌بندی این مدل‌ها، از المان‌های هشت‌گره‌ی سه‌خطی جابه‌جایی و فشار آب حفره‌ای (8-node trilinear displacement and pore pressure elements) موسوم به C3D8P در نرم افزار ABAQUS استفاده شده است که المان‌های هشت‌گره‌ی می‌باشند. هر گره علاوه بر درجه‌های آزادی مربوط به تغییر شکل، دارای درجه آزادی مربوط به فشار آب حفره‌ای نیز می‌باشد.

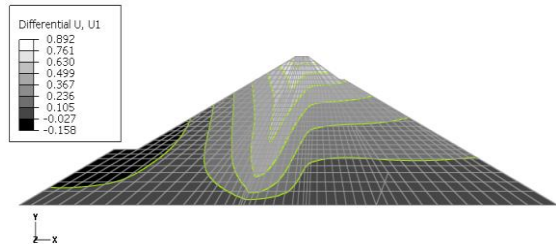
شکل (۶)؛



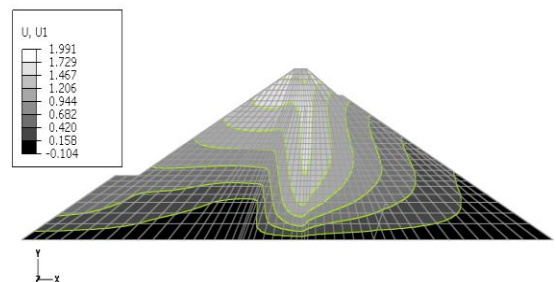
شکل (۶ - الف): کانتور تغییرشکل‌های افقی سد در پایان ساخت



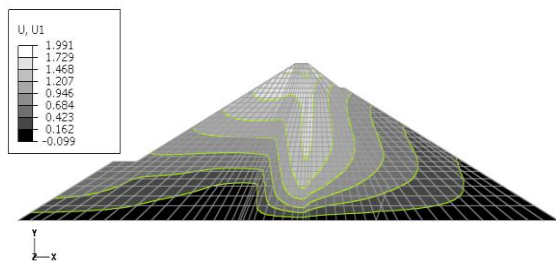
شکل (۶ - ب): کانتور تغییرشکل‌های افقی سد پس از آبیگری مرحله دوم



شکل (۶ - ج): کانتور تغییرشکل‌های افقی ناشی از اوایل آبیگری سد



شکل (۶ - د): کانتور تغییرشکل‌های افقی سد پس از آخرین مرحله آبیگری

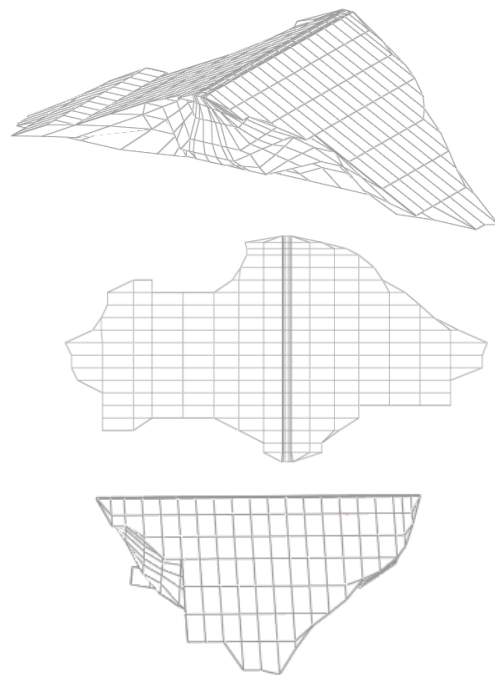


شکل (۶ - ه): کانتور تغییرشکل‌های افقی سد، در زمان تراوش پایدار

همان‌طور که از شکل (۶ - الف) قابل درک است، تغییرشکل‌های افقی از توزیع نسبتاً متقارنی برخوردار است

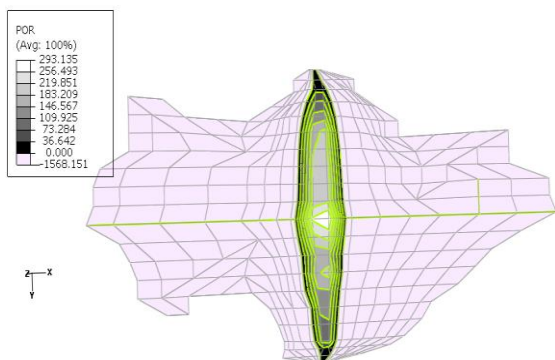
به منظور بررسی شرایط کنونی سد، شرایط تراوش پایدار نیز با لحاظ نمودن زمان طولانی به مدل برای رسیدن به حالت تعادل، مدل سازی شد.

بررسی نتایج آنالیز سه بعدی فشار آب حفره‌ای سد
 مقدار فشار آب حفره‌ای در پایان مرحله ساخت پس از آبیگری و در حالت تراوش پایدار به ترتیب در شکل‌های (۸) تا (۱۰) آمده است. (مقدارهای ارائه شده بر حسب کیلو پاسکال می باشد).

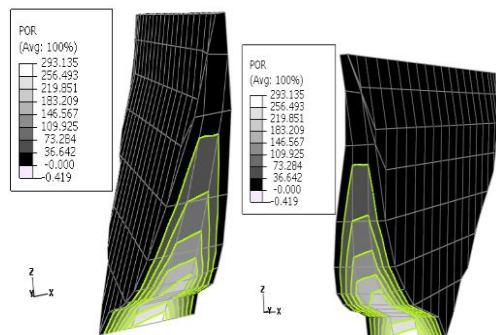


شکل (۷): مش اجزای محدود مدل هندسی سه بعدی سد مارون، بدون در نظر گرفتن پی و تکیه گاه‌ها

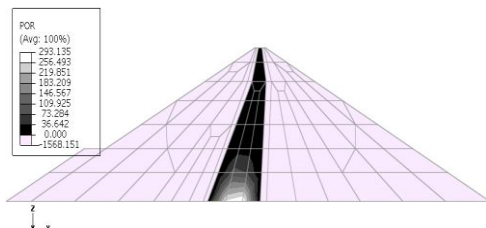
شکل (۸):



شکل (۸ - الف): کانتور فشار آب حفره‌ای سد در پایان ساخت



شکل (۸ - ب): از راست به چپ؛ کانتور فشار آب حفره‌ای هسته سد در سمت پایین دست و بالادست و در پایان ساخت



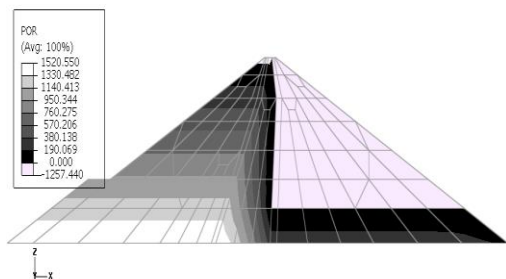
شکل (۸ - ج): کانتور فشار آب حفره‌ای در مقطع میانی سد در پایان ساخت

در حالت سه بعدی نیز مدل سازی و آنالیز سد مارون در چند مرحله صورت گرفت که عبارتند از:

۱. مدل سازی و آنالیز زمان ساخت: به منظور مدل سازی دقیق آنچه در واقعیت اتفاق می افتد، با توجه به تاریخچه ساخت سد، مدل سازی زمان ساخت در ۷ مرحله و طی ۵ سال (هر مرحله حدود ۸ ماه و ۱۵ روز) صورت گرفت. بارگذاری به صورت زهکشی شده مدل شد و در حین ساخت سد، امکان تحکیم به آن داده شد؛

۲. مدل سازی زمان آبیگری: آبیگری سد مارون به صورت اعمال فشار آب مخزن بر پوسته بالادست سد در نظر گرفته شد که این پروسه شامل اعمال فشار هیدرو استاتیکی بر المان‌های پوسته بالادست و پایین دست سد و تعریف شرایط مرزی فشار آب در گره‌های بالادست و پایین دست سد است؛

۳. مدل سازی زمان تراوش پایدار: در حالت سه بعدی نیز

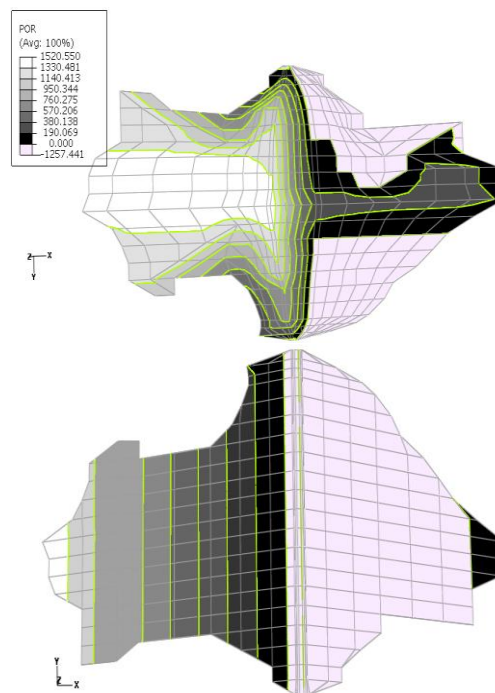


شکل (۹-ج): کانتور فشار آب حفره‌ای در مقطع میانی سد پس از آگیری همان‌طور که در شکل (۸: الف - ب - ج) دیده می‌شود همانند رفتار دیده شده برای حالت دوبعدی پس از پایان دوران ساخت سد، فشار آب حفره‌ای تنها در قسمت هسته باقی مانده است و در قسمت‌های دیگر خاکریز، تقریباً فشار آب حفره‌ای برابر با صفر می‌باشد. چنانچه مشخص است، فشارهای حفره‌ای به دست آمده از تحلیل سه‌بعدی نسبت به مقادیر مشابه حاصل از تحلیل دوبعدی، مقادیر بیشتری دارند که دلیل آن لحاظ کردن هندسه واقعی در حالت سه بعدی، به جای هندسه نامحدود در حالت دوبعدی است.

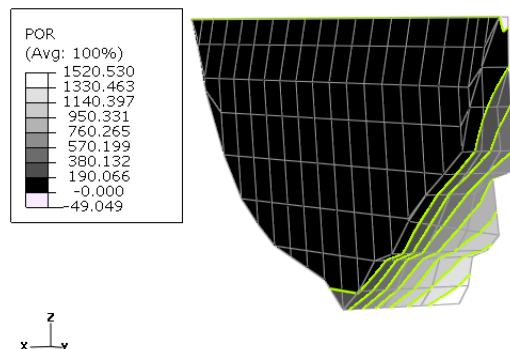
همچنین باتوجه به شکل (۹: الف - ب - ج) همان‌طور که انتظار می‌رود پس از آگیری فشارهای آب حفره‌ای در هسته و بالادست به مقدار محسوسی افزایش می‌یابد. در این شکل‌ها سطح آزاد آب شکل گرفته به خوبی قابل تشخیص است.

در این مرحله نیز فشارهای حفره‌ای به دست آمده از تحلیل سه‌بعدی نسبت به مقادیر مشابه حاصل از تحلیل دوبعدی، مقادیر نسبتاً یکسانی دارند.

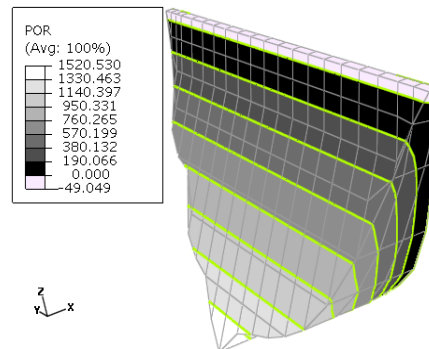
شکل (۹):



شکل (۹ - الف): کانتور فشار آب حفره‌ای سد پس از آگیری

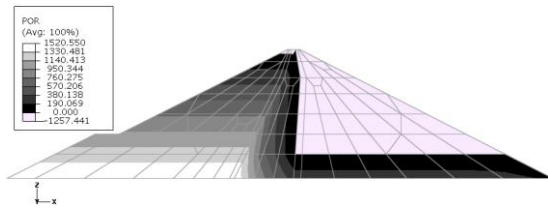


شکل (۹ - ب): از بالا به پایین؛ کانتور فشار آب حفره‌ای هسته سد در سمت بالادست و پایین دست پس از آگیری



شکل (۹ - ب): از بالا به پایین؛ کانتور فشار آب حفره‌ای هسته سد در سمت بالادست و پایین دست پس از آگیری

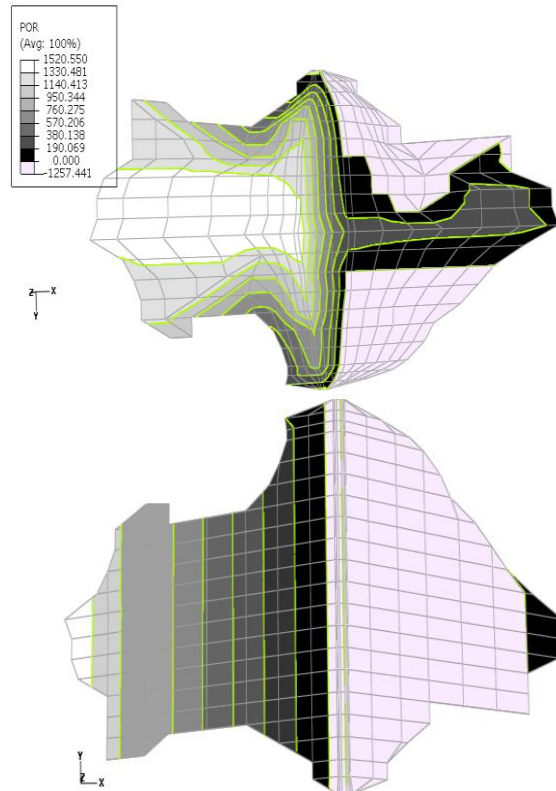
شکل (۱۰) :



شکل (۱۰ - ج): کانتور فشار آب حفره‌ای در مقطع ۹ - ۹ سد در زمان تراوش پایدار

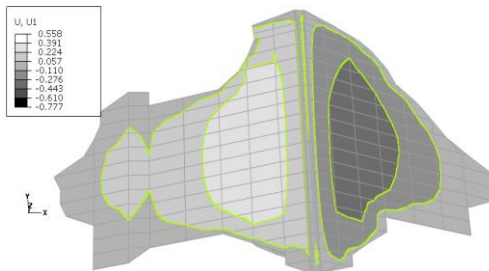
در مورد شرایط تراوش پایدار چنانچه شکل (۱۰): الف - ب - ج نشان می‌دهد؛ گذشت زمان باعث می‌شود سطح آزاد آب، اندکی منظم‌تر شود و همچنین فشارهای آب حفره‌ای در هسته اندکی کاهش یابند که دلیل آن استهلاک فشارهای حفره‌ای اضافی و پایدارتر شدن شرایط سد است.

بررسی نتایج آنالیز سه بعدی تغییر شکل های افقی سد
مقدارهای تغییر شکل های افقی در پایان مرحله ساخت و پس از آبیگری به ترتیب در شکل های (۱۱) و (۱۲) آمده است. (مقادیر ارائه شده بر حسب متر می‌باشد).

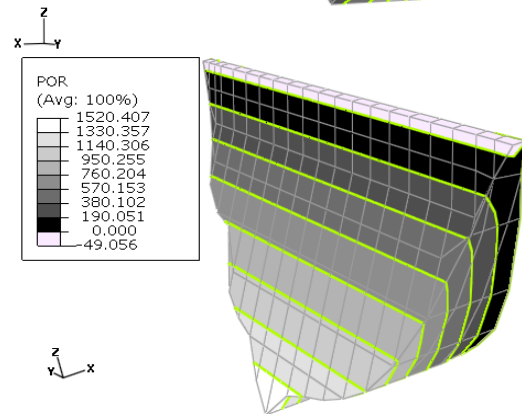
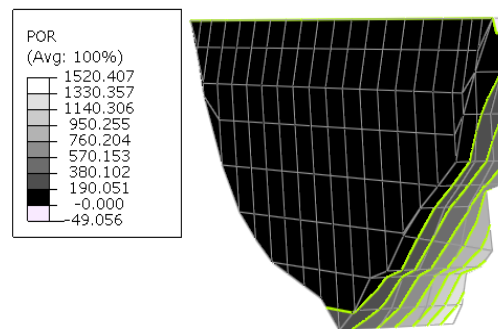
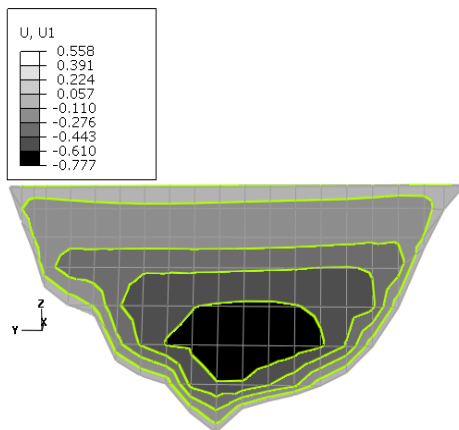


شکل (۱۰ - الف): کانتور فشار آب حفره‌ای سد در زمان تراوش پایدار

شکل (۱۱) :

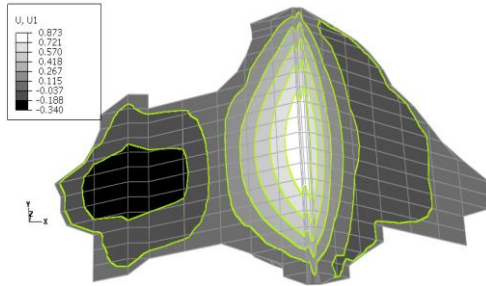


شکل (۱۱ - الف): کانتور تغییر شکل های افقی سد در پایان ساخت

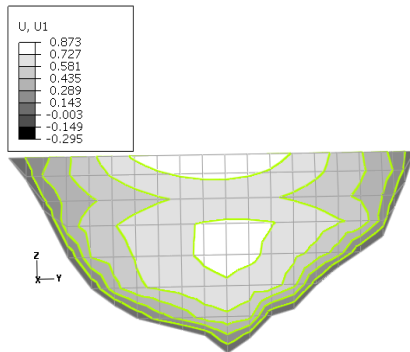


شکل (۱۰ - ب): از بالا به پایین؛ کانتور فشار آب حفره‌ای هسته سد در سمت بالادست و پایین دست در زمان تراوش پایدار

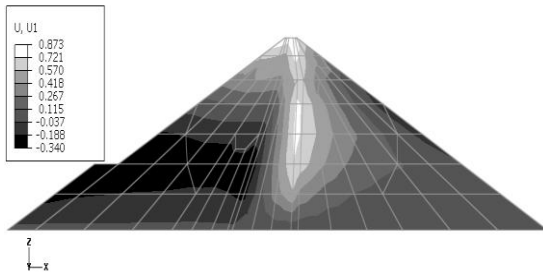
شکل (۱۲):



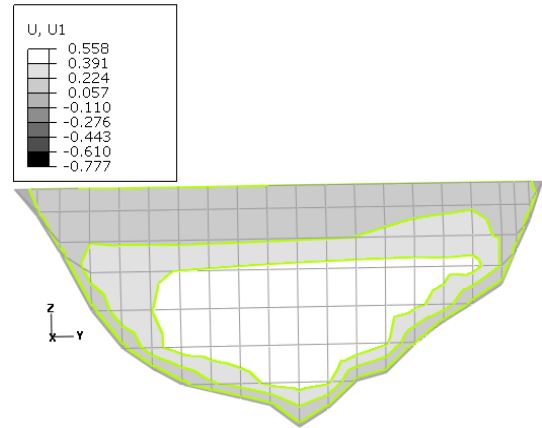
شکل (۱۲ - الف): کانتور تغییرشکل‌های افقی سد پس از آبیگری



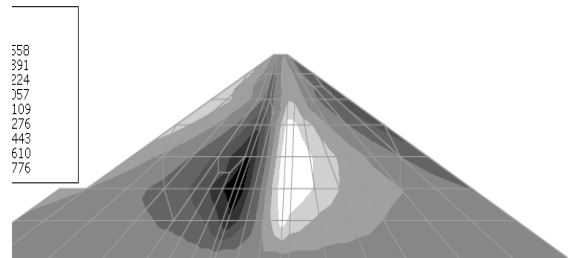
شکل (۱۲ - ب): از بالا به پایین؛ کانتور تغییرشکل‌های افقی هسته سد در سمت پایین دست و بالادست و پس از آبیگری



شکل (۱۲ - ج): کانتور تغییر شکل‌های افقی در مقطع میانی سد پس از آبیگری



شکل (۱۱ - ب): از بالا به پایین؛ کانتور تغییرشکل‌های افقی هسته سد در سمت بالادست و پایین دست و در پایان ساخت



شکل (۱۱ - ج): کانتور تغییرشکل‌های افقی در مقطع میانی سد در پایان ساخت

همان‌طور که از شکل (۱۱: الف - ب - ج) در مورد پایان ساخت سد قابل استنباط است، تغییرشکل‌های افقی از توزیع به نسبت متقارنی برخوردار نیستند؛ چراکه هندسه سه بعدی سد در مقاطع مختلف عرضی و طولی متقارن نیست؛ اما در مقاطع نسبتاً متقارن، نیز مانند حالت دوبعدی تقارن نسبی، تغییر شکل‌های افقی را می‌توان مشاهده کرد.

علاوه بر این، با مقایسه نتایج تحلیل دوبعدی و سه بعدی، این نتیجه به دست می‌آید که در مورد تغییرشکل‌های افقی آنالیز سه بعدی مقادیر کمتری حاصل می‌شود که دلیل آن را می‌توان اثرهای سه بعدی محدودکنندگی دره دانست.

باتوجه به شکل‌های (۱۲) و (۱۳) با شروع آبگیری، توزیع تغییرشکل‌های افقی شروع به تغییر کرده و به سمت بالادست سد افزایش می‌یابد بوده است. مقادیر تغییرشکل افقی به دست آمده از آنالیز سه‌بعدی در این مرحله نیز از آنالیز دوبعدی کمتر است.

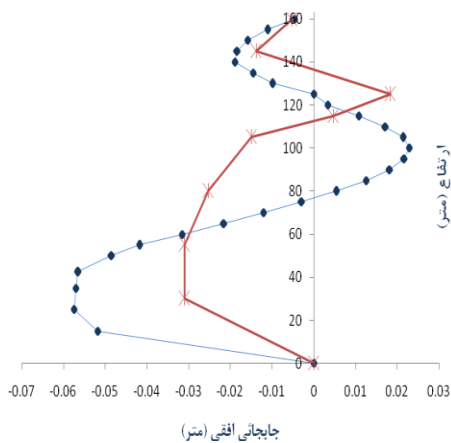
همان‌طور که مشاهده می‌شود با فاصله گرفتن از کناره‌ها، کانتورها شکل‌های منظم‌تری را ارائه می‌دهند که دلیل این رخداد را می‌توان کم‌رنگ‌تر شدن اثر شرایط مرزی دانست.

شکل (۱۳: الف - ب - ج) نیز نشان می‌دهد که با گذشت زمان توزیع، تغییرشکل‌های افقی نسبت به پایان آبگیری تغییر محسوسی نکرده و تنها، اندکی از مقدار آن کاسته می‌شود، که دلیل آن را می‌توان به پایدارتر شدن شرایط نسبت داد.

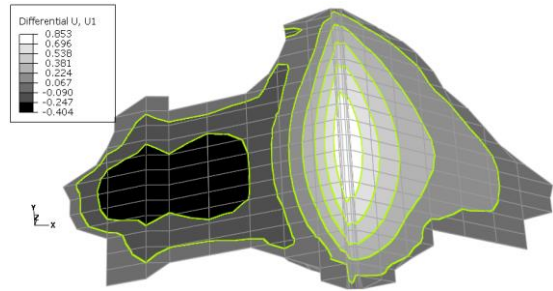
مقایسه آنالیز دوبعدی و آنالیز سه بعدی

نتایج تحلیل‌های جابه‌جایی سد در دو مرحله تحلیل (پایان ساخت، پایان آبگیری) در هسته سد و در پوسته بالادست با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج مقایسه در شکل (۱۴) آمده است.

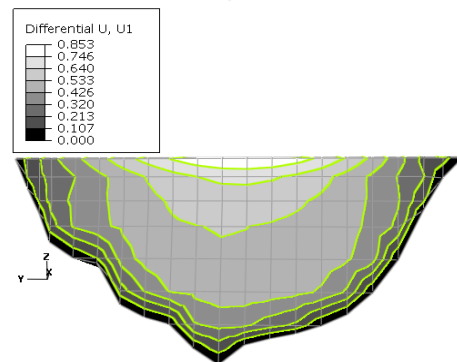
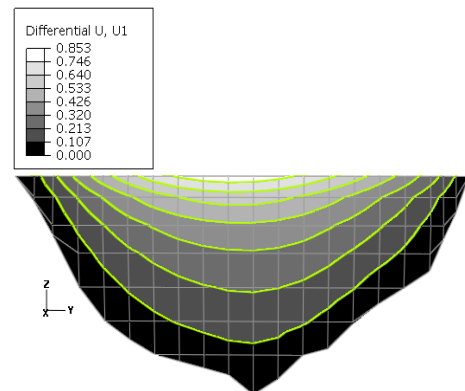
شکل (۱۴):



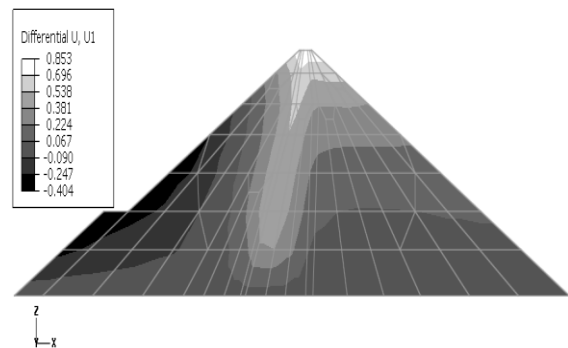
شکل (۱۴ - الف): جابه‌جایی افقی در هسته مقطع میانی، پس از ساخت



شکل (۱۳ - الف): کانتور تغییرشکل‌های افقی ناشی از آبگیری



شکل (۱۳ - ب) از بالا به پایین: کانتور تغییرشکل‌های افقی هسته سد ناشی از آبگیری در سمت پایین دست و بالادست

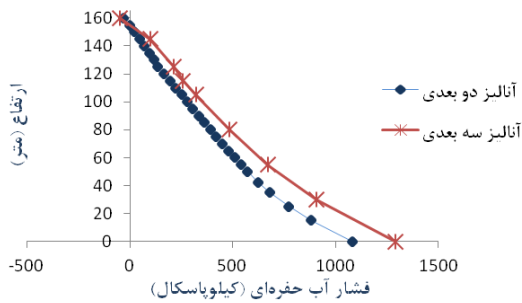


شکل (۱۳ - ج): کانتور تغییر شکل‌های افقی ناشی

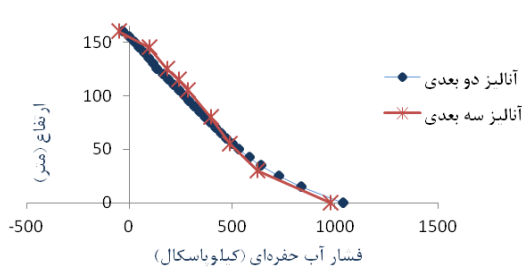
از آبگیری در مقطع میانی سد

شکل (۱۵):

شکل (۱۵ - الف): فشار آب حفره‌ای در هسته مقطع میانی سد مارون، در پایان ساخت



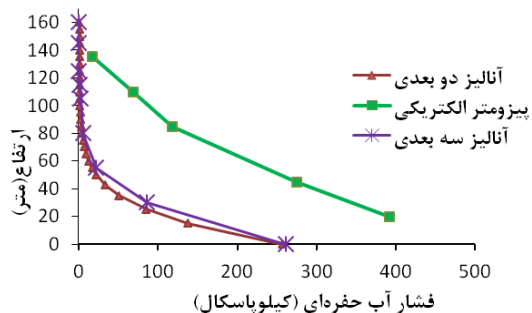
شکل (۱۵ - ب): فشار آب حفره‌ای در هسته مقطع میانی سد مارون، پس از آبیگری



شکل (۱۵ - ج): فشار آب حفره‌ای در هسته مقطع میانی سد مارون در شرایط تراوش دائم

مقایسه نتایج با ابزار دقیق

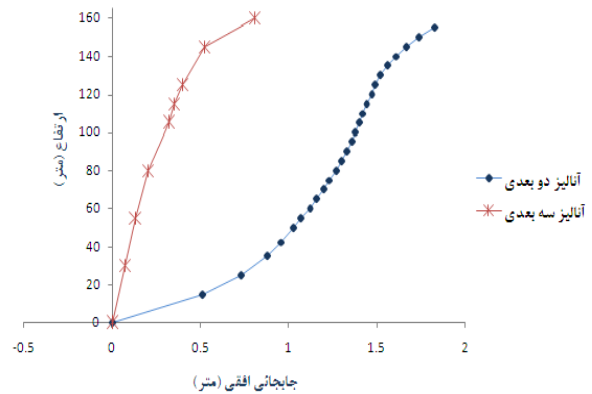
در شکل (۱۶) نتایج آنالیزهای دوبعدی و سه‌بعدی سد مارون در کنار نتایج ابزار دقیق آورده شده است.



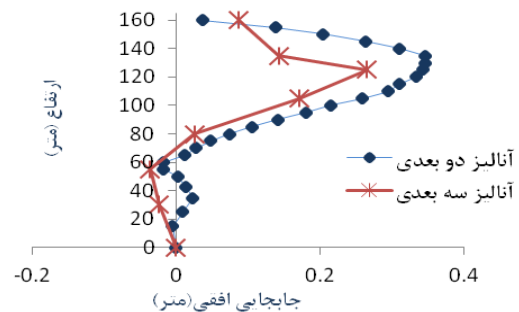
شکل (۱۶): تغییرهای فشارهای پیزومتریک، در طول ارتفاع هسته رسی

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

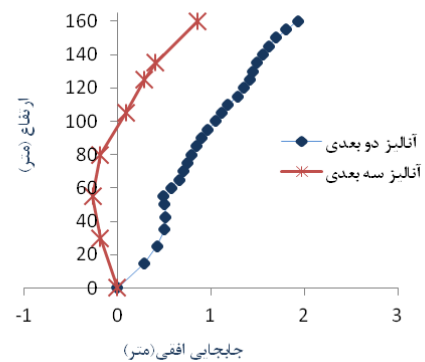
نتایج به دست آمده از تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی سد مارون در مقطع با حداکثر ارتفاع (تقریباً وسط دهانه سد) روند تغییرهای مشابه و مرتبط با واقعیت را نشان داده‌اند.



شکل (۱۴ - ب): جابه‌جایی افقی در هسته مقطع میانی پس از آبیگری



شکل (۱۴ - ج): جابه‌جایی افقی در پوسته بالادست مقطع میانی، پس از ساخت



شکل (۱۴ - د): جابه‌جایی افقی در پوسته بالادست مقطع میانی، پس از آبیگری

نتایج به دست آمده برای فشار آب حفره‌ای، نیز در سه مرحله تحلیل (پایان ساخت، پایان آبیگری و در شرایط تراوش دائم) و در قسمت هسته رسی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

- Hydrotech. Constr. 1989; 22(12): 718–25.
6. Chen, Z.Y., Wang, X.G., and Haberfield, C. (2001), "A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem: Part I: theory and methods", Int. J. Rock Mech. Mining Sci. 2001;38:369–78.
7. Chen, R., and Chameau, J.L. (1983), "Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes", J. Geotechnique 1983;33(1):31–40.
8. Elgamal, M.A.W., and Abdel-Ghaffar, M. (1987), "Elasto-plastic seismic response of 3D earth dams application", ASCE G.T., Vol. 113, No. 11.
9. Faheem, H., Cai, F., and Ugai, K. (2004), "Three-dimensional base stability of rectangular excavations in soft soils using FEM" J. Comput. Geotech. 2004;31:67–74.
10. Seed, R.B., Mitchell, J.K., and Seed, H.B. (1990), "Kettleman Hills waste landfill Slope Failure", J. Geotech. Eng. ASCE 1990; 116(4):669–90. slope failure",
11. Sherard, J.L. (1984), "Trends and debatable aspects in embankment dam engineering", Water Power and Dam Construction, 1984.
12. Ugai, K. (1989), "A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM", J. Soils Found. 1989; 29(2):190–5.
13. Yu, Y., Xie, L., and Zhang, B. (2005), "Stability of earth-rockfill dams: Influence of geometry on the three-dimensional effect", Comput. Geotech. Journal, Vol.32, pp.326–339.
14. Marsal, R.J., and Ramirez de Arellano, L. (1967), "Performance of El Infiernillo dam", 1963-1966, ASCE, 1967, pp. 265-298
15. Lefebvre, G., Duncan, J.M., and Wilson, E.L. (1973), "Three-Dimensional finite element analysis of dams", J. Soil Mech. Found. Div. ASCE 1973; 99(SM7):495–507.

مقدار فشار آب حفره‌ای ناشی از هر دو تحلیل، یکسان هستند و هر دو از مقدارهای واقعی کم‌ترند که احتمال دارد دلیل آن فرضیه‌های ساده‌کننده استفاده شده برای آنالیزها باشد. یکسان بودن نتایج فشار آب حفره‌ای در هر دو تحلیل این واقعیت را آشکار می‌سازد که اثر سه‌بعدی دره بر فشار آب حفره‌ای ناچیز است و این متغیر در عمل از نوع تحلیل تأثیر نمی‌پذیرد.

در مورد تغییر شکل‌های افقی سد آنچه قابل توجه است، دست بالا بودن نتایج تحلیل دوبعدی در همه مراحل تحلیل است؛ به بیان دیگر، نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی برای تغییر شکل‌های افقی، مقادیر بیشتری را نسبت به حالت سه‌بعدی ارائه دادند که دلیل آن لحاظ نشدن هندسه واقعی دره تنگ در تحلیل کرنش مسطح است.

مراجع

۱. توللی، عباس، ۱۳۷۶، بررسی پدیده انتقال تنش در هسته رسی سدهای خاکی احداث شده در دره‌های تنگ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
۲. حائری، سید محسن، ۱۳۶۳، اصول طرح سدهای خاکی، نشر گروه مهندسی عمران و صنایع
3. Abaqus user's manual, version 6.7, Dassault Systèmes, (2007)
4. http://www.simulia.com/products/products_legal.html
5. Belyakov, A.A. (1989), "Three-dimensional behavior of an earth dam at a wide site", J.