

مقایسه تحلیل شبه استاتیکی و دینامیکی تنش - کرنش در سد خاکی آزادی

احمد رضا مظاهری^۱، مصطفی زین العبادی روزبهانی^۲، بهرننگ بیرانوند^{۳*}

۱. استادیار گروه عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.
۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰



چکیده

تحلیل لرزه‌ای سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، عموماً با دو روش شبه استاتیکی و دینامیکی انجام می‌گیرد. هرچند که روش شبه استاتیکی با کاربرد آسان و فرضیات ساده، ایمنی سد را ارائه می‌دهد؛ اما بعضاً ممکن است به نتایج غیر ایمن و غیر اقتصادی منجر گردد. در این پژوهش تنش و کرنش سد خاکی آزادی توسط تحلیل شبه استاتیکی و همچنین تحلیل دینامیکی تحت اثر زلزله طبرس به صورت غیرخطی بررسی و مقایسه شده است. همچنین از مدل رفتاری ساده الاستوپلاستیک مبتنی بر معیار موهر - کولمب در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مقایسه نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در هر دو تحلیل بیشترین کرنش در ترازهای بالایی هسته و بیشترین تنش در قسمت کف رخ داده است. همچنین تنش در حالت دینامیکی نسبت به شبه استاتیکی در جهت σ_{xx} ۴۹٪، در جهت σ_{xy} ۳۰٪ و در جهت σ_{yy} ۲۸٪ بیشتر است. در تراز کف حداکثر تنش پوسته ۲۹٪، در تراز میانی ۶۸٪ و در تراز بالا ۷۲٪ بیشتر از هسته است.

کلمات کلیدی: آباکوس، تحلیل شبه استاتیکی، تحلیل دینامیکی، تنش، کرنش

مقدمه

با رفتار غیرخطی از مواد ژئوماتیک ارزیابی می‌شود را می‌توان با روشی معادل خطی در نظر گرفت. همچنین الیا و همکاران (Elia et al., 2011)، به بررسی رفتار لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای سد همگن مارانا، در ایتالیا پرداختند. موکر جی (Mukherjee, 2013) مفاهیم اولیه روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل پایداری لرزه‌ای شیب سدهای خاکی را همراه با ویژگی‌های برجسته، مزایا و محدودیت‌های هریک را مورد بررسی قرار داد. برای پیش‌بینی واقع بینانه از پاسخ سد خاکی در هنگام زلزله می‌بایست عوامل رفتار الاستیک غیر خطی خاک، وابستگی فشار محصور خاک به سفتی آن، هندسه دره و تقاطع سد با آبرفت را به دقت در نظر گرفت. هانگ (Huang, 2014) به تجزیه و تحلیل پاسخ لرزه‌ای سد خاکی با مصالح پایدار کننده، ماده‌ای با کنترل مقاومت پایین CLSM با استفاده از روش المان محدود پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که استفاده از CLSM برای پایداری در خاکریزها می‌تواند در مقابل تحریک لرزه‌ای بالاتر از خاک محافظت کند. طبق بررسی‌های پانالیونا و هارابینوا (Panulinova and Harabinova, 2014) سدهای خاکی به طور عمده برای پایداری در برابر لغزش یا اثرات لرزه‌ای باید طوری طراحی شوند که بر اثر تغییر خواص خاک یا اثرات خارجی، خاکریز فرو نریزد. باندینی و همکاران (Bandini et al., 2015) روشی کامل‌تر بر اساس مدل تعادل حدی که در آن تغییرات هندسه بلوک و نیز تغییرات مقاومت برشی ناشی از لغزش را منظور نموده‌اند ارائه دادند. ایشان نتایج مدل‌های فیزیکی را با نتایج محاسبات مقایسه نمودند. در تمام این مقایسه‌ها رفتار مشاهده شده با پیش‌بینی شده مطابقت داشته که نشان دهنده لزوم منظور نمودن تغییر هندسه بلوک و مقاومت برشی ناشی از برش در محاسبات است. در این مطالعه به بررسی و مقایسه تحلیل استاتیکی و دینامیکی تنش و کرنش سد خاکی آزادی پس از پایان مرحله ساخت و در حالت تراوش پایدار با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و آنالیزهای غیرخطی پرداخته شده است.

مشخصات سد آزادی

ساختمان سد مخزنی آزادی در استان کرمانشاه، در فاصله ۵۰۰ متری پایین دست پل شاهگرد و حدود ۹۰ کیلومتری شهر جوانرود در مختصات ۲۱-۴۶ درجه طول شرقی و ۳۳-۳۴ درجه عرض شمالی بر روی رودخانه زمکان واقع شده است. مساحت حوزه آبریز این رودخانه تا محور سد آزادی ۱۰۵۴ کیلومتر مربع است. دسترسی به تکیه گاه‌های چپ و راست سد مخزنی آزادی از طریق محور کرمانشاه، کوزران - پل شاهگرد امکان پذیر

تحلیل و طراحی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای در مقابل زلزله، با دو روش شبه استاتیکی و دینامیکی انجام می‌گیرد. روش تحلیل دینامیکی عمدتاً براساس تحلیل تنش و تغییر مکان استوار می‌باشد که معمولاً به کمک روش‌های اجزاء محدود انجام می‌گیرد. این روش معمولاً برای آنالیز پایداری سدهای بزرگ در فاز مطالعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کمبود امکانات نرم‌افزاری تحلیل دینامیکی دقیق سدهای خاکی، محدود بودن تعداد متخصصین آگاه به مسائل آنالیز دینامیکی، پیچیدگی روش آنالیز دینامیکی، گران قیمت بودن آزمایشات تعیین خواص دینامیکی خاک، فراوانی امکانات نرم‌افزاری تحلیل شبه استاتیکی و سهل بودن کار با آنها از جمله دلایلی است که استفاده گسترده از آنالیز شبه استاتیکی را توجیه می‌نماید. با توجه به این موارد تعیین مقدار دقت روش شبه استاتیکی و ایجاد یک رابطه بین جواب‌های دو روش شبه استاتیکی و دینامیکی در صورت امکان مورد توجه مهندسان طراح سد خاکی و سنگریزه‌ای است. امروزه با پیشرفت سریع علم و نرم‌افزارهای المان محدود و تفاضل محدود شرایطی را فراهم کرده که استفاده از تحلیل دینامیکی نیز مانند تحلیل شبه استاتیکی، با سهولت انجام می‌گیرد. آمبراسیس و سارما (Ambraseys and Sarma, 1967) به مطالعه واکنش سدهای خاکی برای چند زلزله اتفاق افتاده پرداختند و تاریخچه زمانی و توزیع شتاب زلزله بدنه سد را محاسبه نمودند. سارما (Sarma, 1975) نمودارهایی را در رابطه با محاسبه شتاب افقی بحرانی تهیه نمود که در آنها شتاب افقی بحرانی عبارت است از شتابی که بتواند توده خاک محدود به یک سطح لغزش را به حالت تعادل حدی برساند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2006) مدل جدیدی را در نرم افزار FLAC گنجانده و چند سد خاکی را در فضای تنش موثر را تحلیل دینامیک نمودند. در این مطالعه تغییر شکل‌های ماندگار محاسبه شده این سدها را با مقادیر برآورد شده با استفاده از سایر مدل‌ها مقایسه نمودند. تسای و همکاران (Tsai et al., 2006) با بررسی پاسخ دینامیکی از سد پائوشان (Pao-Shan) به تأثیر ابعاد هسته در پتانسیل پاسخ سد خاکی، و به مطالعه تأثیر نسبت عرض و ارتفاع هسته و نسبت طول و ارتفاع سد در اولین فرکانس طبیعی پرداختند. تسامپاناکیس و همکاران (Tsompanakis et al., 2009) با استفاده از شبکه عصبی، به ارزیابی پاسخ دینامیکی خاکریز نمونه با استفاده از روش اجزاء محدود پرداختند. ایشان نشان داد که پاسخ دینامیکی خاکریزها با استفاده از روش المان محدود، که



تحلیل پایداری در این حالت برای شیب شیروانی بالادست، مورد بررسی واقع شده است. برای پایان ساخت از نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده تحکیم نیافته (UU)، برای حالت نشت دائم از نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده و تحکیم یافته (CD) و برای حالت افت سریع از نتایج آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) استفاده می شود. افزایش درصد رطوبت خاک در هنگام خاکریزی و اعمال تنش های روبار ناشی از وزن لایه های فوقانی باعث ایجاد فشار منفذی در هسته سد می گردد. در خاکریزهایی که با درصد رطوبت بیشتر از درصد رطوبت بهینه کوبیده می شود فشار آب منفذی نسبتاً بالایی ایجاد می گردد در حالیکه در خاکریزهای کوبیده شده با درصد رطوبت بهینه و یا کمتر از آن، مقدار فشار منفذی تولید شده به مراتب کمتر است. مقدار فشار آب منفذی ایجاد شده تابع مشخصات فیزیکی مصالح، عرض هسته و زمان اجرا می باشد. در اثر ایجاد فشار آب حفره ای در مصالح و زوال آن در مدت زمان ساختمان و بهره برداری از سد، نشست تحکیمی بروز می گردد. در پروژه سد مخزنی آزادی، با توجه به نفوذپذیری بالای مصالح پوسته، احتمال بروز فشار آب منفذی و نشست تحکیمی خیلی کم می باشد به همین جهت نشست تحکیمی در پروژه مورد مطالعه برای هسته سد مورد بررسی قرار می گردد. براساس تئوری تحکیم یک بعدی ترازقی، نشست تحکیمی برای یک لایه خاک به ضخامت H با رابطه (۱) محاسبه می گردد:

$$S_c = m_v \cdot H \cdot \Delta \sigma' / S_c = m_v \cdot H \cdot \Delta \sigma' \quad (1)$$

که: m_v ضریب قابلیت فشرده گی حجمی و $\Delta \sigma'$ افزایش تنش روبار موثر می باشد.

معادله دینامیکی حاکم بر محیط سازه

با گسسته سازی معادله دینامیکی سازه و با در نظر گرفتن نیروهای اعمالی زلزله در حوزه زمان و با استفاده از رویکرد اجزاء محدودی معادله دینامیکی حاکم بر سد و پی به فرم ماتریسی (۲) نوشته خواهد شد:

$$[M]\{U''\} + [C]\{U'\} + [K]\{U\} = \{F_1\} - [M]\{U_g''\} + [Q]\{P\} \quad (2)$$

سازه می باشند. $\{U''\}$, $\{U'\}$, $\{U\}$, $\{U_g''\}$, $\{U_g'\}$, $\{U_g\}$ بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب سازه و $\{F_1\}$ و $\{U_g\}$ بردار نیروهای بدنه ای و شتاب زمین لرزه می باشد.

می باشد. بدنه سد مخزنی آزادی، بر پایه بررسی های انجام شده در طی مطالعات مرحله دوم از نوع خاکی با هسته رسی قائم می باشد. بر پایه مطالعات لرزه خیزی انجام شده در گستره ساختگاه سد آزادی، مقادیر پارامترهای لرزه خیزی مبنای طراحی DBL، بالای طراحی MDL و حداکثر پذیرفتنی MCL به ترتیب ۰/۲۰، ۰/۳۰ و ۰/۵۱ شتاب ثقل برآورد شده و حداکثر زلزله رخ داده در منطقه دارای بزرگای ۷ ریشتر بوده است. همچنین از تحلیل دینامیکی یا بازه زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه استفاده شده است. تحلیل پایداری بدنه سد آزادی در حالت های پایان زمان ساخت، تراوش دائمی و تخلیه سریع شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیک (بازلزله) مورد بررسی و نتایج حاصله در حالت های مختلف با نتایج ابزار دقیق ارائه شده از سد آزادی مقایسه و تحلیل می شود. در حالت پایان ساخت، تحلیل پایداری با پارامترهای تنش کل انجام می گردد که نتایج حاصل از آنالیز برای شرایط استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار می گیرد. در حالت تراوش پایدار حالت دوران بهره برداری با تراوش دائمی مربوط به زمان بهره برداری از سد و با مخزن پر (تا تراز نرمال) می باشد. این حالت جزو حالت دائمی سد بوده و تامین پایداری برای بدنه با ضریب اطمینان کافی ضروری است. جهت بررسی پایداری بدنه سد، پارامترهای مقاومت برشی مورد استفاده در شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیک با ضریب زلزله ۰/۱۷ و نتایج حاصل از تحلیل ارائه می شود. حالت تخلیه سریع مخزن، تحت شرایطی خاص و به دنبال حوادث ناگهانی که مستلزم تخلیه مخزن در مدت زمان خیلی کم با حداکثر ظرفیت تخلیه تحتانی باشد، رخ می دهد. در اثر چنین حالتی، وضعیت جریان آب در داخل بدنه که در شرایط نرمال از بالادست به سمت پایین دست می باشد مختل شده و جهت جریان معکوس می گردد و با توجه به نیروی ناشی از زه آب به سوی بالادست و حذف عامل مقاوم آب مخزن، باعث کم شدن ضریب اطمینان پایداری پوسته بالادست می گردد. جهت مدل نمودن بدنه سد و کنترل پایداری آن در این حالت، آب مخزن از تراز نرمال با نمو کاهشی ۵ متر تا تراز تاج فرازبند ۱۲۸۱ متر افت داده شده و وضعیت پایداری آن با توجه به وضعیت شبکه جریان مورد وقوع در بدنه، کنترل می شود. براین اساس، وضعیت فشار آب منفذی (سطح آزاد آب) در توده بدنه سد، به طور محافظه کارانه در نظر گرفته شده است. همچنین تحلیل پایداری در حالت تخلیه سریع، در ترازهای مختلف و در شرایط استاتیکی و دینامیکی با اعمال ضریب زلزله ۰/۰۹ معادل نصف ضریب زلزله مبنای طراحی است. با توجه به عدم تأثیر افت تراز آب مخزن روی شیب پایین دست،



تحلیل الاستوپلاستیک کامل خاکریز با فرض معیار خمیری موهر کولمب

در تحلیل الاستیک-پلاستیک کامل، قسمت ابتدای منحنی تنش- کرنش خطی بوده و محدوده پلاستیک آن خطی ثابت است. به منظور ارزیابی این که نقطه‌ای به حد پلاستیک رسیده یا خیر باید یک تابع تسلیم تعریف شود. معیار تسلیم معمولاً بر حسب تنش‌های اصلی و یا نامتغیرهای تانسور تنش بیان می‌گردد. در واقع شروع حالت با معیار تسلیم مشخص می‌گردد. فرم کلی معیار تسلیم را می‌توان به صورت رابطه (۳) ارائه داد:

$$F = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, n_1, n_2, n_3) \quad (3) \quad F = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, n_1, n_2, n_3)$$

که n_i جهت تنش‌های اصلی σ_i را نشان می‌دهند. در صورتیکه مصالح همسان باشند رابطه تسلیم به شکل ساده رابطه (۴) در می‌آید:

$$F = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (4)$$

در صورتیکه میدان تنش طوری باشد که $F(\sigma) < 0$ در صورتیکه $F(\sigma) < 0$ رفتار مصالح الاستیک است و به محض رسیدن به حد تسلیم $F(\sigma) = 0$ رفتار پلاستیک مصالح آغاز می‌شود. در مدل الاستیک کامل نمو کرنش به دو مولفه الاستیک و پلاستیک تقسیم می‌شود (رابطه ۵):

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (5)$$

جهت کرنش‌های پلاستیک توسط قانون جریان معین می‌گردد. در قانون جریان فرض می‌شود که کرنش پلاستیک بر یک سطح عمود است این قانون به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma'} d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma'} \quad (6)$$

که در آن λ اسکالر و $f(\sigma)$ یک سطح تابع تنش است. در صورتی که $f(\sigma)$ همان تابع تسلیم باشد، قانون جریان مرتبط برقرار است. در غیر این صورت قانون جریان غیر مرتبط خواهد بود که در این صورت علاوه بر تعریف تابع تسلیم، تابع جدیدی $[g(\sigma)]$ تعریف می‌شود، که نمو کرنش پلاستیکی عمود بر آن خواهد بود (رابطه ۷):

$$d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'} d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \quad (7)$$

که در این رابطه λ ضریب پلاستیک نامیده می‌شود که در شرایط الاستیک مقدار آن صفر و در حالت پلاستیک مقداری بزرگتر از صفر خواهد داشت. بر اساس مطالب گفته شده رابطه کلی نمو تنش موثر با نمو کرنش را می‌توان بصورت رابطه (۸) و (۹) بیان کرد:

$$\sigma' = [D^e - \frac{\alpha}{d} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} D^e] \varepsilon^0 \quad (8)$$

$$\sigma' = [D^e - \frac{\alpha}{d} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} D^e] \varepsilon^0 \quad (8)$$

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'} d = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \quad (9)$$

اگر رفتار خاک الاستیک باشد، در این رابطه α صفر است. در غیر اینصورت α مساوی یک فرض می‌شود. در روابط بالا f تابع تسلیم و g سطح پتانسیل پلاستیک است. در صورتی که معیار تسلیم موهر-کولمب باشد معیار تسلیم به صورت روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌شود:

$$f_1 = 1/2 |\sigma'_2 - \sigma'_3| + 1/2 (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \geq 0 \quad (10)$$

$$f_1 = 1/2 |\sigma'_2 - \sigma'_3| + 1/2 (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \geq 0 \quad (10)$$

$$f_2 = 1/2 |\sigma'_3 - \sigma'_1| + 1/2 (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \geq 0 \quad (11)$$

$$f_2 = 1/2 |\sigma'_3 - \sigma'_1| + 1/2 (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \geq 0 \quad (11)$$

$$f_3 = 1/2 |\sigma'_1 - \sigma'_2| + 1/2 (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \geq 0 \quad (12)$$

$$f_3 = 1/2 |\sigma'_1 - \sigma'_2| + 1/2 (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \geq 0 \quad (12)$$

پارامترهای اصلی معرف تابع تسلیم عبارتند از φ و c که به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک می‌باشند. شکل تابع به صورت مخروطی است که نقاط داخل آن محدوده الاستیک و نقاط مرزی، آستانه پلاستیک را نشان می‌دهد. از آنجا که در معیار تسلیم موهر-کولمب قانون جریان مرتبط برقرار نیست تابع g برای این مدل به شکل رابطه (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) تعریف می‌شود:

$$g_1 = 1.2 |\sigma'_2 - \sigma'_3| + 1.2 (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \Psi \quad (13)$$

$$g_1 = 1.2 |\sigma'_2 - \sigma'_3| + 1.2 (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \Psi \quad (13)$$

$$g_2 = 1.2 |\sigma'_3 - \sigma'_1| + 1.2 (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \Psi \quad (14)$$

$$g_2 = 1.2 |\sigma'_3 - \sigma'_1| + 1.2 (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \Psi \quad (14)$$

$$g_3 = 1.2 |\sigma'_1 - \sigma'_2| + 1.2 (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \Psi \quad (15)$$

$$g_3 = 1.2 |\sigma'_1 - \sigma'_2| + 1.2 (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \Psi \quad (15)$$

این تابع سومین پارامتر مدل را Ψ معرفی می‌کند. این پارامتر جهت مدل کردن کرنش‌های حجمی پلاستیک در خاک‌هایی که حین برش افزایش حجم می‌دهند به کار می‌رود. همچنین در صورت وجود چسبندگی مدل موهر-کولمب اجازه کشش در المان را می‌دهد اما در مدل تسلیم موهر کلمب اصلاح شده مورد استفاده را می‌توان با تعریف توابعی تکمیلی نقاط تحت کشش را حذف کرد. این توابع به صورت روابط (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) تعریف می‌شوند:

$$f_4 = \sigma'_1 - \sigma'_2 \geq 0 \quad f_4 = \sigma'_1 - \sigma'_2 \geq 0 \quad (16)$$

$$f_5 = \sigma'_2 - \sigma'_3 \geq 0 \quad f_5 = \sigma'_2 - \sigma'_3 \geq 0 \quad (17)$$

$$f_6 = \sigma'_3 - \sigma'_1 \geq 0 \quad f_6 = \sigma'_3 - \sigma'_1 \geq 0 \quad (18)$$

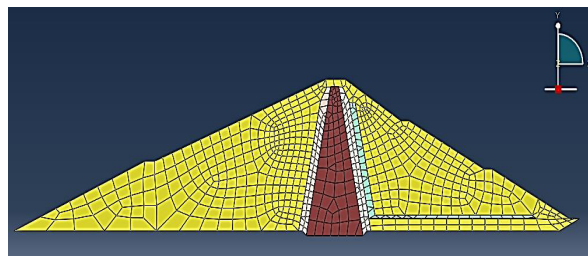
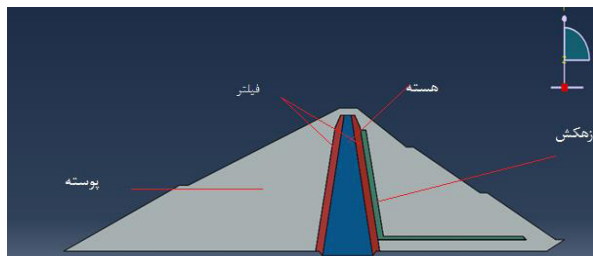
در سطوح جدید فرض می‌شود قانون مرتبط برقرار باشد. در صورت قرار داشتن محدوده تنش درون تابع تسلیم رفتار بدنه تابع مدل خطی هوک خواهد بود. با توجه به آنچه گفته

وجود امکان اسکرپت نویسی در داخل نرم افزار، قابلیت های مدل سازی آن را دو چندان می کند. در این پژوهش محاسبه فشار آب حفره ای به فرض رفتار کرنش مسطح در سد استفاده شده است. بدین منظور بزرگ ترین مقطع سد با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل سازی و با المان های هشت گره ای مورد تحلیل قرار گرفته است. برای تحلیل دینامیکی ابتدا باید تحلیل استاتیکی انجام شده و پس از تعادل تحلیل دینامیکی شروع می شود. همچنین جهت مدل سازی از مدل رفتاری الاستو پلاستیک موهر- کولمب استفاده شده است. میرایی به کار رفته از نوع رایلی است. میرایی رایلی جهت افزایش سطح میرایی هیستریزس و جبران کمبود آن مورد استفاده قرار گرفته است. درصد میرایی با توجه به الاستو-پلاستیک بودن مدل رفتاری مصالح، معادل یک درصد در نظر گرفته شده است. در مدل های رفتاری که به خاک اجازه ورود به بخش پلاستیک داده می شود (مانند مدل مور-کلمب)، با توجه به قابلیت استهلاک انرژی در این مدل، منظور کردن میرایی بین صفر تا یک درصد منطقی می باشد. در واقع برای اکثر تحلیل های دینامیکی که شامل شرایط کرنش بزرگ می شوند تنها درصد کوچکی میرایی مورد نیاز است. شکل ۱ مدل سازی و مش بندی سد آزادی را نشان می دهد.

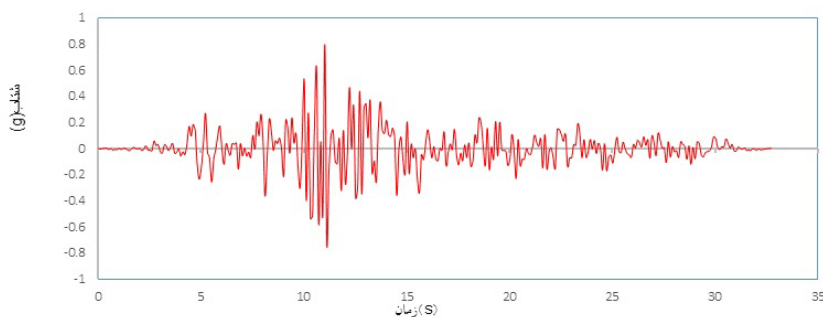
شد، در این مدل با تعریف ۵ پارامتر که بوسیله آزمایش های شناخته شده و متداول در خاک قابل دستیابی است، رابطه تنش- کرنش تعریف می شود. این پارامترها عبارتند از مدول برشی خاک، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک، چسبندگی و زاویه اتساع که در معادلات تعادل و سازگاری در هر یک از المان ها با فرض کرنش های مسطح فرمول بندی شده و با اعمال تدریجی بار و مقایسه آن با سطوح تسلیم معرفی شده، تغییر مکان ها تعیین می شود.

مدلسازی سد آزادی در نرم افزار آباکوس

آباکوس یک مجموعه از برنامه های مدل سازی بسیار توانمند مبتنی بر روش اجزاء محدود است که قابلیت حل مسایل تحلیل خطی ساده تا پیچیده و مدل سازی غیر خطی را دارد. آباکوس در یک تحلیل غیر خطی، به طور اتوماتیک میزان نمو بار و رواداری های همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می کند. در نتیجه کاربر به ندرت می بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند. همچنین این نرم افزار از زبان برنامه نویسی منبع باز پایتون برای برنامه نویسی در داخل نرم افزار پشتیبانی می کند.



شکل ۱- مدل سازی و مش بندی سد آزادی در نرم افزار آباکوس



شکل ۲- شتاب نگاشت محرک ورودی در تحلیل دینامیکی سد آزادی (زلزله طبس)



همین منظور ایستگاه‌هایی مد نظر قرار گرفته‌اند که تعیین خاک محل آنها بر اساس روش‌های ژئوفیزیکی نیز صورت گرفته است. بنابراین برای انجام تحلیل دینامیکی و جهت استخراج محرک ورودی، با ایده گرفتن از شتاب نگاشت‌های زلزله طبس استفاده شده است شکل ۲.

نتایج و بحث تحلیل تنش و کرنش سد آزادی در حالت تراوش پایدار

همچنین مشخصات مکانیکی مصالح سد آزادی مطابق جداول ۱ و ۲ مدلسازی شده است.

به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های سد موجود و طراحی لرزه‌ای سدهای مقاوم در برابر زلزله، باید نیروی ناشی از زلزله با روشی مناسب به سازه سد اعمال شده و با انجام تحلیل غیرخطی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه سد محاسبه شوند. نظر به اینکه ساختگاه سد آزادی بر روی پی سنگی شیلی قرار دارد، باید کوشش شود تا جایی که ممکن است از شتابنگاشت‌هایی استفاده شود که محل استقرار دستگاه شتابنگار با شرایط زمین شناسی ساختگاه همسان باشد. بنابراین شتابنگاشت زمین لرزه‌هایی انتخاب شده است که بر روی سنگ یا سنگ‌های با سرعت برشی کمتر از ۷۶۰ متر بر ثانیه به ثبت رسیده‌اند. لازم به ذکر است که شتابنگاشت‌ها بر اساس نوع خاک (خاک تپ دو) محل ایستگاه انتخاب شده‌اند به

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی آنالیز تنش-کرنش کوتاه مدت

پارامترها المان‌های بدنه سد	دانسیته	پارامترهای مقاومت برشی c (kN/m ²) φ (°)	مدول الاستیسیته (kN/m ²)	ضریب پواسون	ضریب فشار جانبی
هسته	۲۰/۴	۱۰۰	۲۷۵۰۰	۰/۴۲	۰/۷۲
فیلتر	۲۱/۲	۰	۳۵۰۰۰	۰/۳۶	۰/۵۴
زهکش	۲۱/۷	۰	۴۵۰۰۰	۰/۳۴	۰/۵۲
پوسته سنگریزه‌ای	۲۱/۸	۰	۷۰۰۰۰	۰/۳۲	۰/۴۷
سنگ بستر	۲۵/۳	۱۰۸۰	$۲/۶ \times ۱۰^۶$	۰/۲۵	۰/۳۳

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در تحلیل پایداری بدنه سد آزادی

وزن مخصوص (gr/cm ³)			پارامترهای برشی		مقادیر پارامترها المان‌های بدنه سد
اشباع (γ_{sat}) (γ_{sat})	مرطوب (γ_t) (γ_t)	خشک (γ_d) (γ_d)	φ (°)	c ($\frac{kg}{cm^2}$)	
۲/۰۸	۲/۰۴	۱/۷۰	۳۰	۱	UU
			۱۸	۰/۵	CU
			۲۵	۰/۳	CD
۲/۲۰	۲/۱۲	۱/۹۰	۳۲	۰	فیلتر
۲/۲۵	۲/۱۷	۲	۳۵	۰	زهکش
۲/۳۸	۲/۳۵	۲/۱۸	۳۷/۴	۰	عمق ۸ تا ۸ متر
			۳۸	۰	عمق ۸ تا ۱۶ متر
			۳۹/۴	۰	عمق بیش از ۱۶ متر
۲/۵۳	--	۲/۴۶	۲۴	۱۰/۸	سنگ بستر



به قبل از سال ۱۹۵۰ باز می‌گردد. در شکل ۳ کانتور تنش به روش استاتیکی نشان داده شده است.

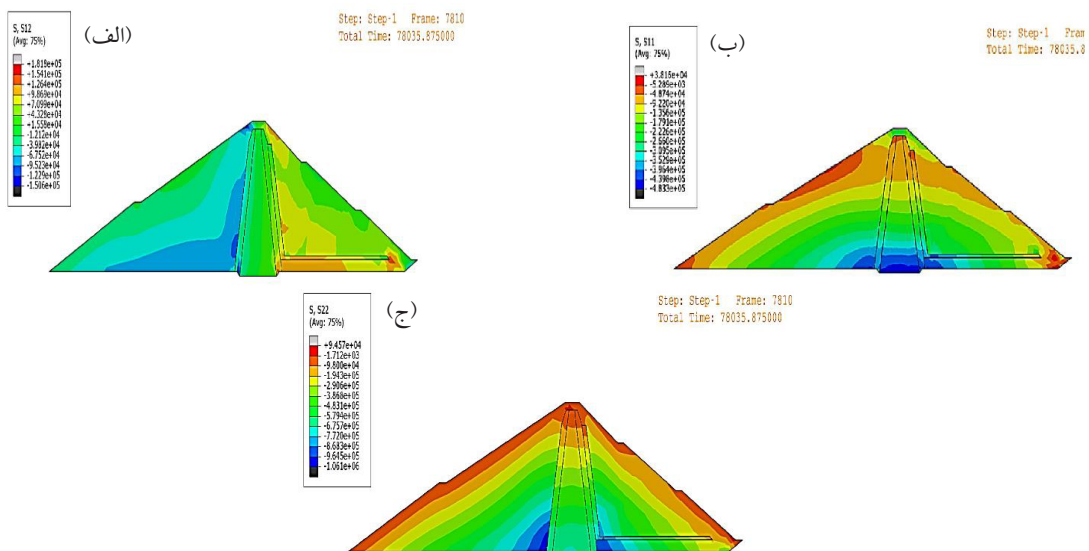
جدول ۳- کمیت‌های تحلیل سد آزادی با نرم افزار آباکوس

کمیت	صفحه	جهت
σ_{xx}	XZ	X
σ_{xy}	XZ	Y
σ_{yy}	YZ	X
γ_{xx}	XZ	X
γ_{xy}	XZ	Y
γ_{yy}	YZ	X

تحلیل تنش و کرنش سد آزادی به روش استاتیکی

در این پژوهش مدل مورد مطالعه سد آزادی در کرمانشاه است که با نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدلسازی شده است. لازم به ذکر است مدل سازی تنش و کرنش به دو روش استاتیکی و دینامیکی تحلیل می‌شوند. همچنین تحلیل دینامیکی در حالت مخزن پر (دوره آبگیری) انجام شده است. کمیت‌ها به صورت جدول ۳ تعریف شده اند.

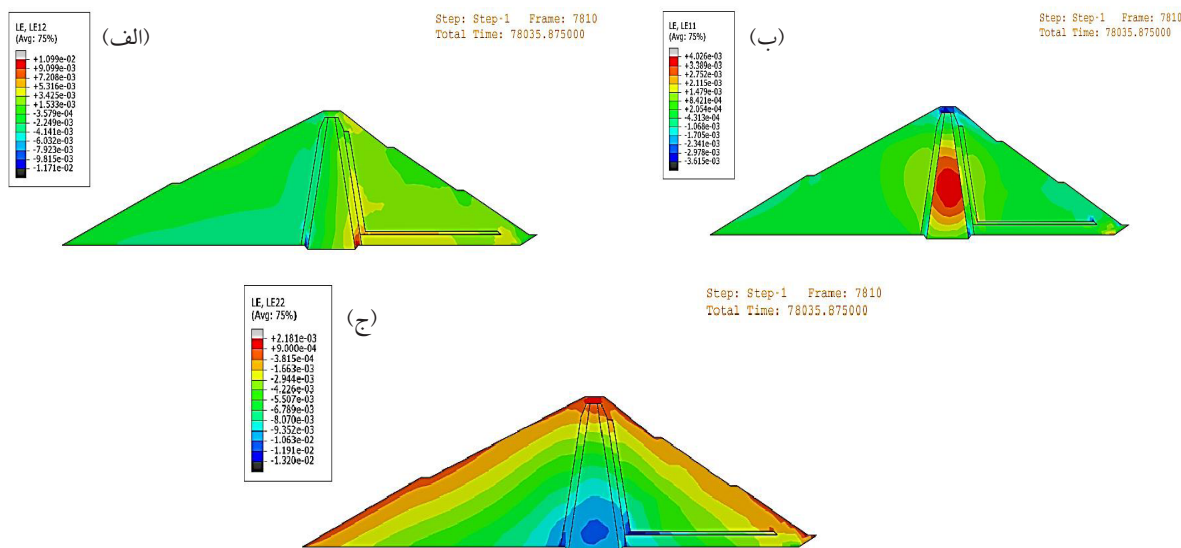
ساده ترین راه در تحلیل رفتار یک سازه در زلزله، روش شبه استاتیک است. این روش نسبت به سایر روش‌ها تحلیل لرزه‌ای، متداول تر و به لحاظ قدمت، قدیمی تر است. در واقع در این روش اثر زلزله به صورت استاتیکی و با اعمال نیروهای که از حاصل ضرب ضرایب زلزله در وزن توده لغزنده در دو امتداد افق و قائم به دست می‌آید، در تحلیل لحاظ می‌شود. قدمت استفاده از این روش



شکل ۳- مدلسازی تنش به روش استاتیکی در جهات و صفحات مختلف نرم‌افزار آباکوس، (الف) σ_{xx} (ب) σ_{xy} (ج) σ_{yy}

تنش زیادی رخ می‌دهد که این خود نیاز به تمهیدات خاصی دارد، این مقدار تمرکز تنش در پوسته بالادست ۱۲۲ کیلوپاسکال و در پوسته پایین دست ۱۵۴ کیلوپاسکال است. بیشترین تنش در حالت σ_{yy} در پوسته بالادست و پایین دست کنار هسته رخ داده است که مقدار این تنش ۹۶۴ کیلوپاسکال است. در هسته، تنشی برابر ۳۸۶ کیلوپاسکال به وجود آمده است که کاهشی ۶۱٪ نسبت به پوسته دارد. کاهش تنش در پوسته و هسته به سمت بالا به یک گونه نمی‌باشد و سرعت این کاهش در هسته نسبت به پوسته بیشتر است علت این پدیده درشت دانه بودن مصالح پوسته و سختی بیشتر آن است. کانتور کرنش سد در روش استاتیکی در شکل ۴ نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تنش در جهت σ_{xx} به دلیل چسبندگی بالای رس در قسمت پایین هسته به مقدار ۴۸۳ کیلوپاسکال و در جهت خلاف محور X رخ داده است. همچنین تنش در دو طرف هسته (پوسته بالادست و پایین دست) مقدار ۳۹۶ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد که به مقدار ۱۸٪ کاهش یافته و با دور شدن از هسته مقدار تنش روند کاهشی داشته و به مقدار ۱۳۵ کیلوپاسکال می‌رسد. این کاهش تنش در این جهت به علت ناهمگون بودن مصالح است. بیشترین تنش در حالت σ_{xy} در پوسته بالادست اتفاق افتاده است و این مقدار با شکل هندسی خاصی به سمت بالا کاهش یافته است و مقدار این کاهش ۳۲٪ است. لازم به ذکر است در این حالت تمرکز



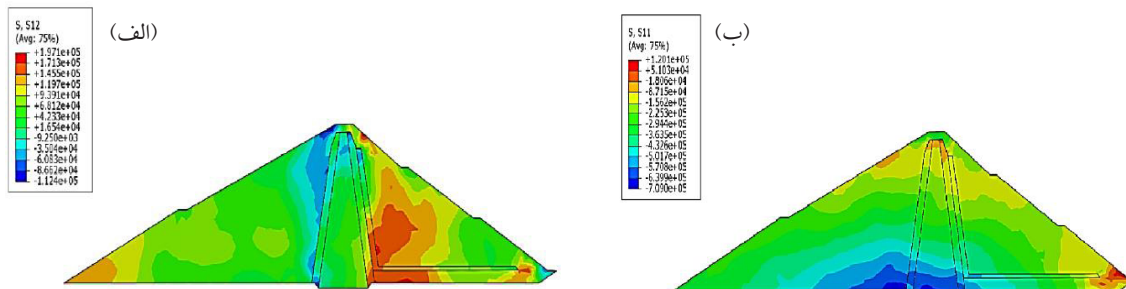
شکل ۴- مدل سازی کرنش به روش استاتیکی در جهات و صفحات مختلف نرم افزار آباکوس، الف) γ_{xx} ب) γ_{xy} ج) γ_{yy}

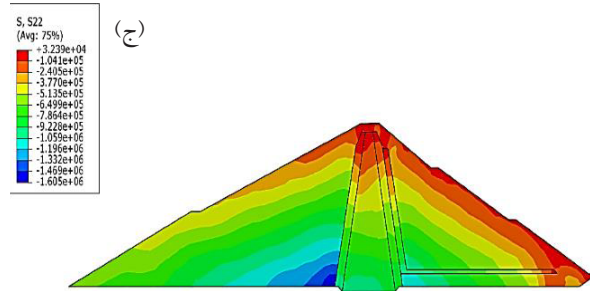
نسبت به دو حالت قبل بیشتر است، دلیل این رفتار مقاومت و سختی مختلف در مصالح سدهای ناهمگن است.

تحلیل تنش و کرنش سد آزادی به روش دینامیکی

تحلیل دینامیکی در واقع انجام تحلیل های عددی بر روی مدل بدنه و در صورت نیاز پی سد، می باشد که در طی آن، به واسطه در نظر گرفتن رفتار تنش-کرنش مصالح، به بررسی رفتار سد در زمان اعمال بارهای تناوبی لرزه ای و نیز تحلیل و بررسی رخدادهای احتمالی پس از وقوع زلزله، پرداخته می شود. کانتور تنش سد به روش دینامیکی در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است بیشترین کرنش در جهت γ_{xx} درون هسته رخ می دهد، این ماکزیمم کرنش به دلیل ریزدانه بودن مصالح در این قسمت می باشد، مقدار ماکزیمم آن برابر $0/0034$ است که با سرعت تقریباً زیاد به طرف پوسته زیاد شده و به مقدار $0/0002$ در کنار بدنه می رسد. نامنظمی کرنش در جهت γ_{xy} نسبت به حالت قبل و بعد بیشتر است، دلیل این امر رفتار چندگانه مصالح ناهمگون سد در این حالت است، بیشترین مقدار کرنش در این حالت در کنار هسته و کمترین مقدار آن در پوسته سد به مقدار $0/0015$ است. بیشترین کرنش در جهت γ_{yy} در کف هسته و به مقدار $0/00132$ است، نظم کاهش مقدار کرنش در این حالت

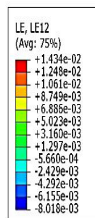




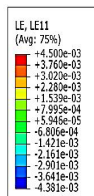
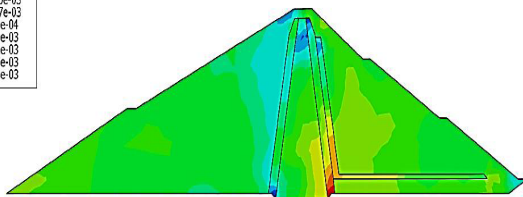
شکل ۵- مدلسازی تنش به روش دینامیکی در جهات و صفحات مختلف نرم افزار آباکوس، الف) σ_{xx} (ب) σ_{xy} (ج) σ_{yy}

بیشترین مقدار تنش در جهت σ_{yy} پس از زلزله در پوسته بالادست و به فاصله ۱۵ درصد از هسته رخ می‌دهد که مقدار آن برابر ۱۳۳۰ کیلوپاسکال به دست آمده است و به سمت بالا و با زاویه تقریباً ۴۵ درجه کاهش مقدار تنش را مشاهده می‌کنیم به طوری‌که در میانه پوسته به مقدار ۶۵۰ کیلوپاسکال رسیده است. تنش در پوسته پایین دست و در ترازهای پایین بیشترین مقدار را دارد و به سمت بالا کاهش یافته است لازم به ذکر است سرعت کاهش آن نسبت به پوسته بالادست بیشتر است، بیشترین مقدار تنش در این قسمت برابر ۱۰۵۹ کیلوپاسکال و در میانه پوسته برابر ۲۵۰ کیلوپاسکال است. کانتورهای کرنش سد آزادی به روش دینامیکی در شکل ۶ نشان داده شده است.

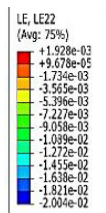
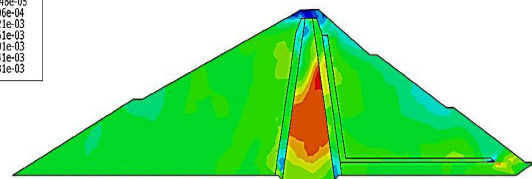
بیشترین مقدار تنش در جهت σ_{xx} پس از زلزله در کف هسته تا ۳۰٪ عرض پوسته ادامه پیدا می‌کند، این مقدار در هسته برابر ۵۰۲ کیلوپاسکال و در پوسته برابر ۶۴۰ کیلوپاسکال است، دلیل این موضوع درشت دانه بودن مصالح پوسته سد و به طبع آن بالا بودن سختی این قسمت می‌باشد. در هر دو قسمت به سمت بالا زیاد می‌شود که این کاهش در هسته نسبت به پوسته دارای سرعت بیشتری است. تنش در جهت σ_{xy} در پوسته پایین دست و ۲۰٪ کنار هسته در پایین آن رخ می‌دهد که مقدار آن بین ۱۷۱-۱۴۵ کیلوپاسکال است. بیشترین تغییرات تنش در این حالت در پوسته پایین دست رخ می‌دهد، دلیل آن وجود خط فریاتیك در این ناحیه است. هسته در این حالت تقریباً تنشی منظم به مقدار ۴۲ کیلوپاسکال دارد.



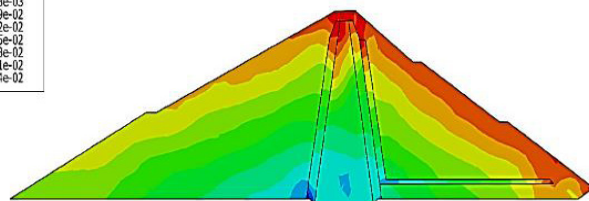
الف)



ب)



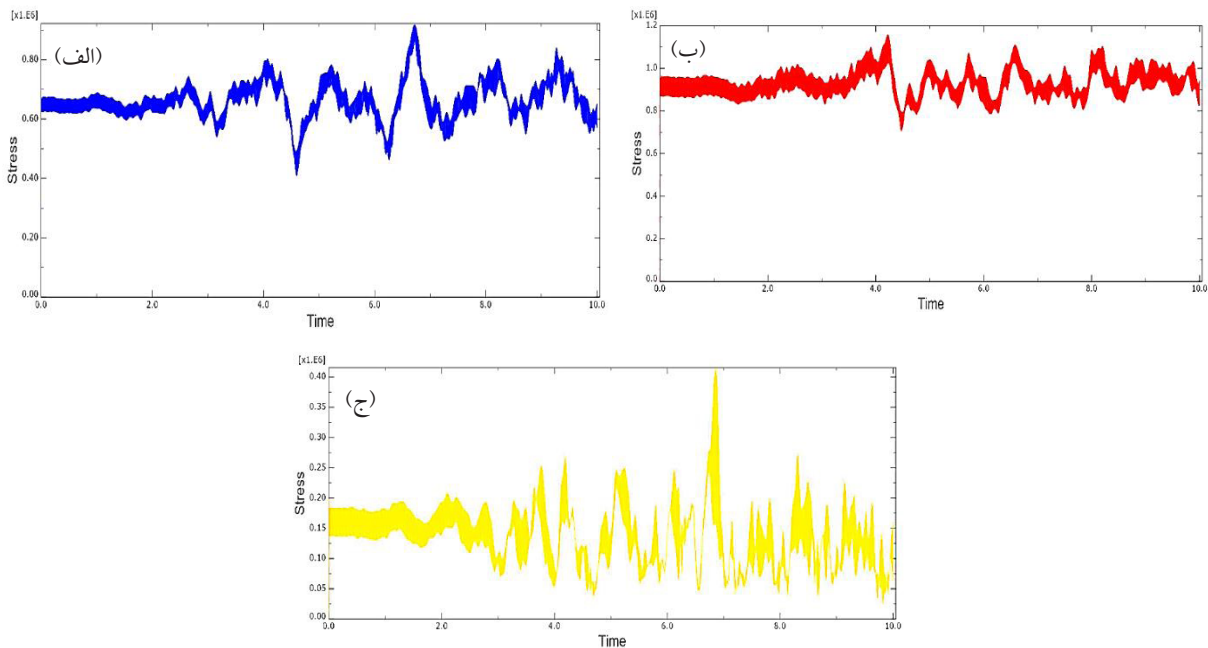
ج)



شکل ۶- مدلسازی کرنش به روش دینامیکی در جهات و صفحات مختلف نرم افزار آباکوس، الف) γ_{xx} (ب) γ_{xy} (ج) γ_{yy}

کرنش تقریباً یکسان و برابر ۰/۰۱۱ است، دلیل آن مقاوم بودن مصالح پوسته در این حالت است. بیشترین کرنش در حالت در جهت γ_{yy} پس از زلزله به فاصله ۰/۱۲۵ عرض پوسته بالادست کنار هسته رخ می‌دهد و مقدار آن تقریباً ۰/۰۱۶ می‌باشد و با زاویه‌ای تقریباً ۳۰ درجه به سمت بالا کاهش می‌یابد و در میانه به مقدار ۰/۰۰۷ می‌رسد. در هسته مقدار بیشترین کرنش ۰/۰۱۴ است و به سمت بالا کاهش می‌یابد. از سه تراز کف، میانه و بالای پوسته برای استخراج نمودارهای تنش پوسته استفاده شده است (شکل ۷).

در حالت کرنش در جهت γ_{xx} همان‌طور که انتظار می‌رفت بیشترین کرنش در هسته رخ می‌دهد، دلیل آن ریزدانه بودن مصالح در این ناحیه و تراکم زیاد آنها پس از زلزله می‌باشد و مقدار بیشترین کرنش در این ناحیه برابر ۰/۰۳۷ و کمترین مقدار ۰/۰۰۷ می‌باشد. کرنش در این حالت در پوسته بالادست تقریباً یکسان و برابر ۰/۰۱۵ است، دلیل آن مقاوم بودن مصالح پوسته در این حالت است. در حالت کرنش در جهت γ_{xy} بیشترین کرنش به اندازه ۰/۰۱۲۴ در کنار هسته رخ می‌دهد سپس به سمت داخل هسته کاهش یافته و به مقدار ۰/۰۰۳ می‌رسد. در پوسته بالادست



شکل ۷- تحلیل تنش پوسته سد آزادی به روش دینامیکی (الف کف ب میانه ج) بالا

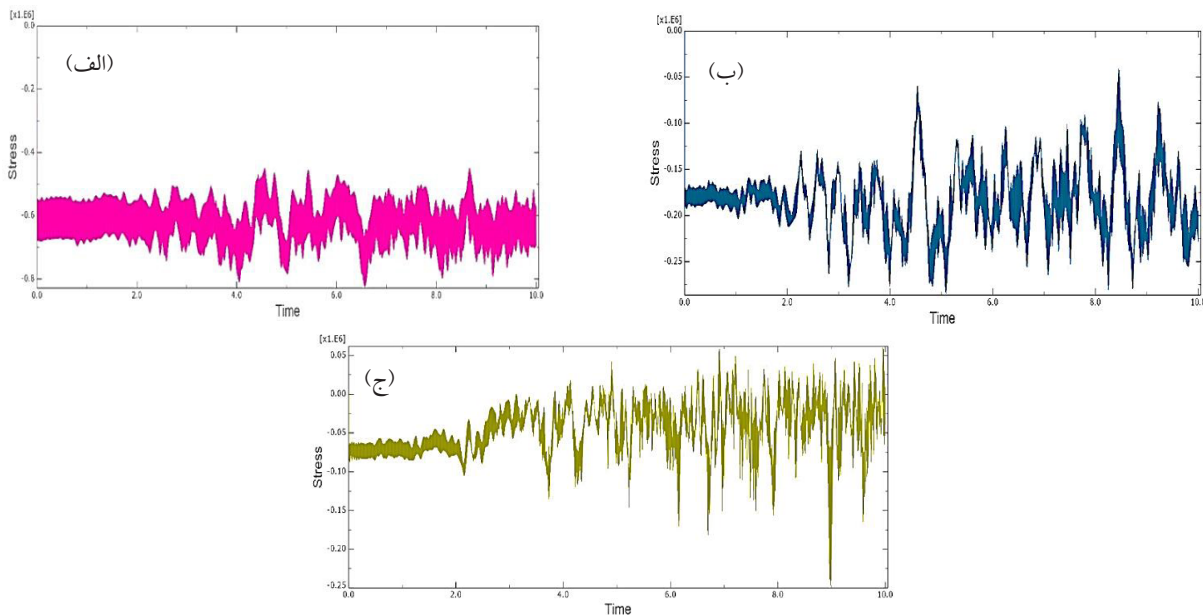
تفسیر شکل ۷ به صورت جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- مقدار تنش در ترازهای مختلف پوسته

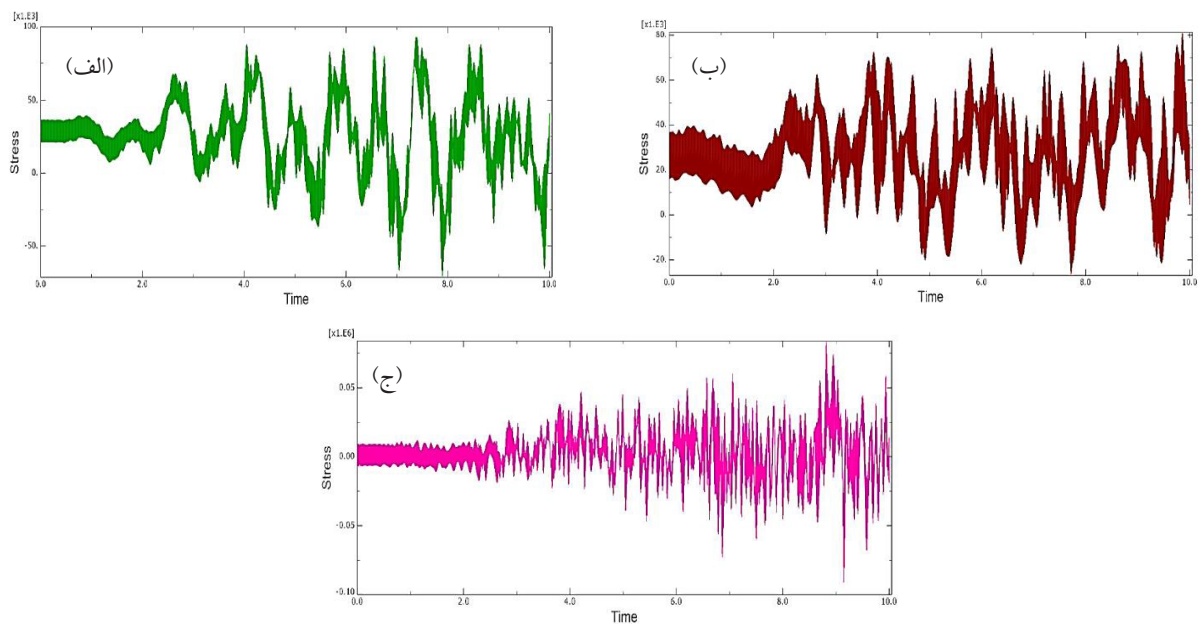
تراز	بیشینه زمان (s)	بیشترین مقدار تنش (kpa)	کمینه زمان (s)	کمترین مقدار تنش (kpa)	زمان یکنواختی با فرکانسی خاص (s)	تنش با فرکانس خاص (kpa)
بالا	۴/۳۵	۱۱۷۰	۴/۱	۷۱۰	۳/۵	۸۵۰-۹۵۰
میانه	۶/۶	۹۱۰	۴/۶	۴۱۳	۲/۱۴	۶۱۰-۶۴۰
کف	۶/۸	۴۱۰	۹/۸	۵۰	۱/۸	۱۴۵-۱۹۰

است که چند ثانیه اول زلزله سد با فرکانسی خاصی (که مربوط به شتاب نگاشت است) از خود در برابر آن مقاومت نشان می‌دهد. همچنین تحلیل تنش در هر سه جهت σ_{xy} , σ_{yy} و σ_{xx} در هسته بررسی شده است (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰).

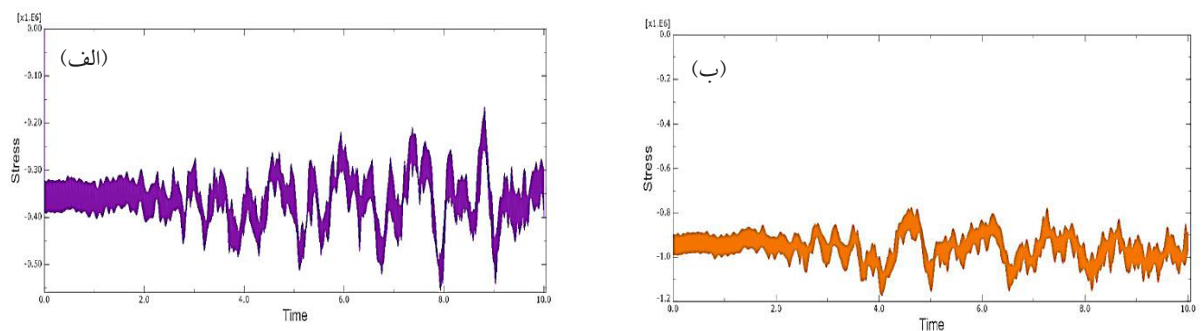
طبق جدول ۴ بیشترین تنش در کف رخ می‌دهد و مقدار آن نسبت به تراز میانه ۲۹٪ بیشتر است و نسبت به تراز بالای سد تقریباً ۲ برابر (۱/۸۵) است و مقدار حداقل تنش نسبت به میانه ۷۲٪ بیشتر و نسبت به تراز بالا ۴ برابر خواهد بود. لازم به ذکر

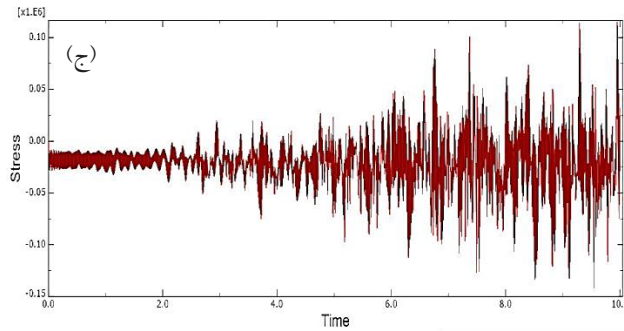


شکل ۸- تحلیل تنش در جهت σ_{xx} در ترازهای مختلف هسته به روش دینامیکی (الف) کف (ب) میانه (ج) بالا



شکل ۹- تحلیل تنش در جهت σ_{xy} در ترازهای مختلف هسته به روش دینامیکی (الف) کف (ب) میانه (ج) بالا





شکل ۱۰- تحلیل تنش در جهت σ_{yy} در ترازهای مختلف هسته به روش دینامیکی الف) کف ب) میانه ج) بالا

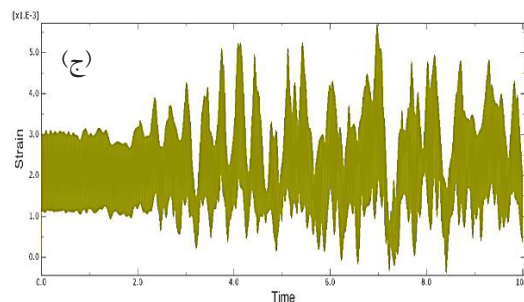
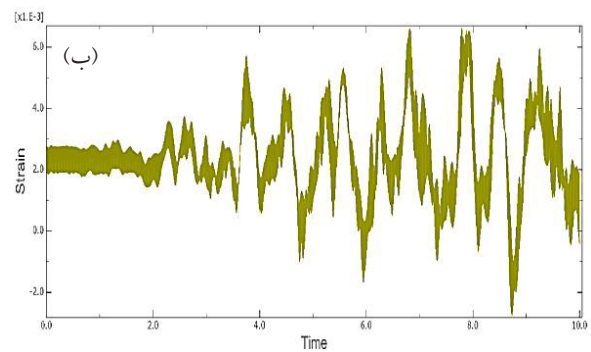
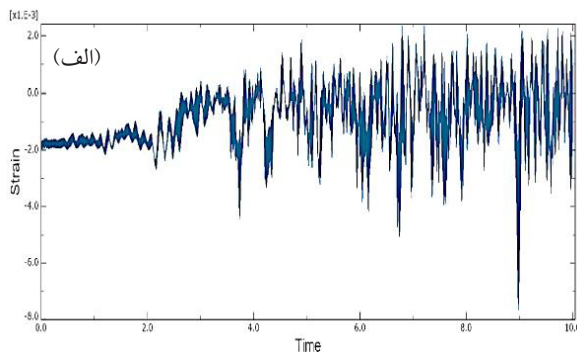
تفسیر اشکال ۸ تا ۱۰ به صورت جدول ۵ می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر تنش در هسته سد آزادی

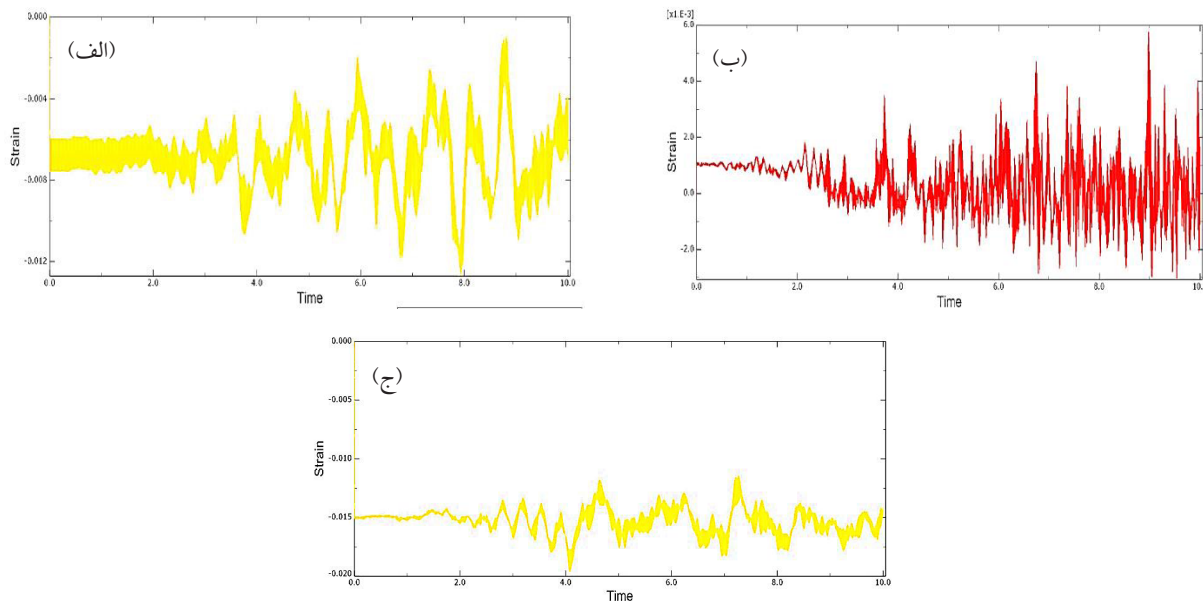
تراز	زمان σ_{xx} (s)	σ_{xx} (kPa)	زمان σ_{xy} (s)	σ_{xy} (kPa)	زمان σ_{yy} (s)	σ_{yy} (kPa)
کف	۶/۷	۸۳۰	۹/۸	۸۱	۴/۱	۱۱۰۰
وسط	۹	۲۷۰	۷/۹	۵۸	۸	۵۳۰
بالا	۹/۲	۱۲۰	۹/۱	۵۴	۹/۴	۲۲۵

با فرکانس محدود کم و زیاد می‌شود پس از آن با شیبی نسبتاً زیاد مقادیر تنش به حداقل و حداکثر خود خواهد رسید. نمودارهای کرنش در اشکال ۱۱ تا ۱۳ در هر سه جهت γ_{xx} ، γ_{xy} و γ_{yy} در هسته سد آزادی بررسی شده است.

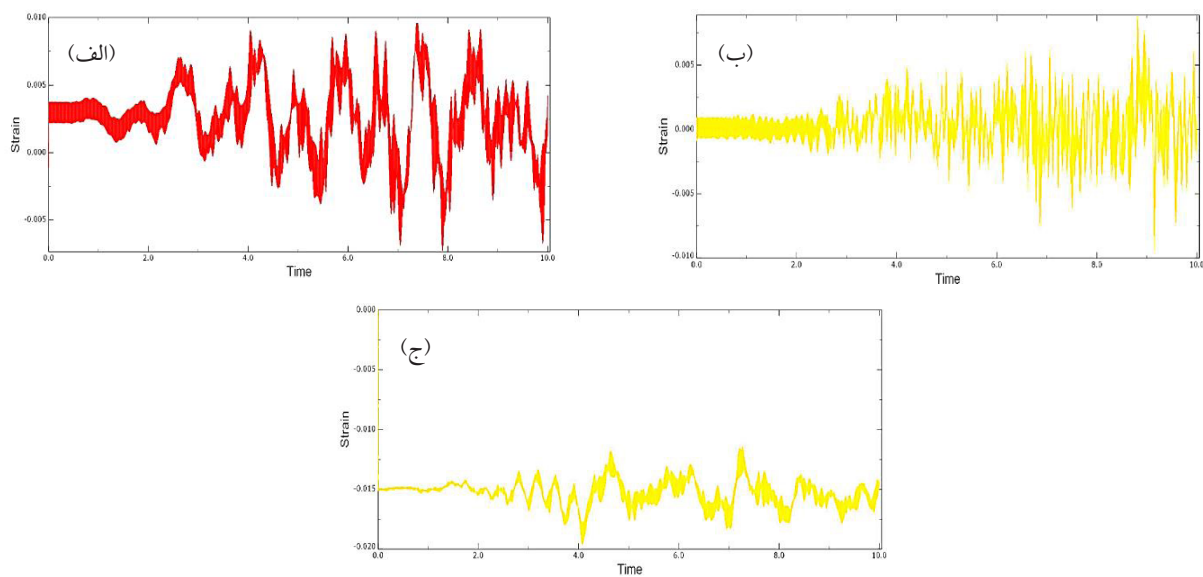
همان‌طور که انتظار داشتیم بیشترین تنش هسته سد آزادی در هنگام زلزله در همه حالات در قسمت کف اتفاق افتاده است، بیشترین تنش هسته مربوط به جهت σ_{yy} است که در کف ۴۶٪ در میانه ۴۹٪ و در بالا ۴۹٪ از بقیه حالات بیشتر است. در تمام حالات تا زمان ۲/۵ ثانیه تقریباً تنش‌ها



شکل ۱۱- تحلیل کرنش در جهت γ_{xx} در ترازهای مختلف هسته به روش دینامیکی الف) کف ب) میانه ج) بالا



شکل ۱۲- تحلیل کرنش در جهت γ_{yy} در ترازهای مختلف هسته به روش دینامیکی (الف) کف (ب) میانه (ج) بالا



شکل ۱۳- تحلیل کرنش در جهت γ_{xy} در ترازهای مختلف هسته به روش دینامیکی (الف) کف (ب) میانه (ج) بالا

تفسیر اشکال ۱۱ تا ۱۳ به صورت جدول ۶ می باشد.

جدول ۶- مقادیر کرنش در هسته سد آزادی

γ_{yy} (kpa)	زمان کرنش γ_{yy}	γ_{xy} (kpa)	زمان کرنش γ_{xy}	γ_{xx} (kpa)	زمان کرنش γ_{xx}	تراز
۰/۰۰۲۸	۹/۲	۰/۰۰۰۲۱	۸/۸	۰/۰۰۲۵	۹	کف
۰/۰۰۵۷	۷/۵	۰/۰۱۲	۷/۸	۰/۰۰۵	۸/۵	وسط
۰/۰۱	۴/۴	۰/۰۲	۴/۱	۰/۰۵۳	۷	بالا

بیشترین کرنش در جهت γ_{xy} و ترازهای بالا رخ می دهد، تقریباً دو برابر حالات دیگر می باشد.



نتیجه گیری

برای کنترل تنش‌های در هنگام زلزله باید مواد درشت دانه‌تر بیشتر شود. تنش در حالت دینامیکی نسبت به استاتیکی در جهت σ_{xx} ۴۹٪ در جهت σ_{xy} ۳۰٪ و در جهت σ_{yy} ۲۸٪ بیشتر است. در تراز کف پوسته حداکثر تنش ۲۹٪ در تراز میانه ۶۸٪ و در تراز بالا ۷۲٪ بیشتر از هسته است. در حالت

کرنش در جهت γ_{xx} همان طور که انتظار می‌رفت بیشترین کرنش در هسته رخ می‌دهد، دلیل آن ریزدانه بودن مصالح در این ناحیه و تراکم زیاد آنها پس از زلزله می‌باشد و مقدار بیشترین کرنش در این ناحیه برابر ۰/۰۰۳۷ و کمترین مقدار ۰/۰۰۰۷ می‌باشد.

References

- ABAQUS Theory Manual, version 6.11-3., 2011. Dassault Systems.
- Ambraseys, N. N., and Sarma, S.K., 1967. The response of earth dams to strong earthquakes, *Geo-Technique*, 7, 181-213.
- Bandini, V., Biondi, G., Cascone, E., Rampello, S., 2015. A GLE-based model for seismic displacement analysis of slopes including strength degradation and geometry rearrangement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 71, 128-142.
- Elia, G., Amorsi, A., Chan, A.H.C., Kavadas, M.J., 2011. Numerical Prediction of the Dynamic Behavior of two Earth Dams in Italy Using a Fully Coupled Nonlinear Approach, *International Journal of Geomechanics*, 11, 504-518
- Huang, L.J., 2014. Seismic Response Analysis of Earth Dam s Embanked with Soil based Controlled Low Strength Material s Using Finite Element Method, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4, 159-165
- Mukherjee, S., 2013. Seismic slope stability analysis of earth dam: some modern practices, *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*, 2, 41-50
- Panulinova, E., and Harabinova, S., 2014. Methods for analyzing the stability of an earthen dam slope, *advanced materials research*, 969, 245-248.
- Sarma, S. K., 1975. Seismic stability of earth dams and embankments. *Géotechnique*, 25, 743.761
- Tsai, P., Hsu, S., Lai, J., 2009. Effects of core on dynamic responses of earth dam, ASCE, *Geotechnical special publication*, 197, 8-13.
- Tsompanakis, Y.D., Lagaros, N.N., Psarropoulos, P.C., Georgopoulos, E., 2009. Simulating the seismic response of embankments via artificial neural networks. *Soil dynamics and earthquake Engineering*, 29, 782-798.
- Wang, Z.L., Makdisi, F.I., and Egan, J., 2006. Practical applications of a nonlinear approach to analysis of earthquake-induced liquefaction and deformation of earth structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 231-252.
- Zienkiewicz, O.C., 1977. *The finite element method*, McGraw Hill, London.



Comparison of Quasi-Static and Dynamic Stress-Strain Analysis in Azadi Earth Dam

A.R. Mazaheri¹, M. zeinolebadi rozbahani², B. Beiranvand^{*3}

1. Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerd, Iran.
2. M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerd, Iran.
3. M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerd, Iran.



Abstract

Seismic analysis of earth and rockfill dams is generally done in two ways: quasi-static and dynamic. However, a quasi-static method with easy application and simple assumptions may lead to unsafe and uneconomical results. In the present study, two static and dynamic analyzes have been used nonlinearly using the Rayleigh Damping rule to calculate the stress and strain of Azadi Dam in the stages of the end of construction and steady-state seepage. Also, in numerical analysis, Abaqus software and simple elastoplastic behavior model based on the Mohr-Coulomb criterion have been used. The results show that in both quasi-static and dynamic seismic analysis, the highest strain of the Azadi Dam core occurred at the upper levels of the core and the highest stress occurred at the level of the core floor. The stress in the dynamic state is higher than the quasi-static one in the directions σ_{xx} 49%, σ_{xy} 30%, and σ_{yy} 28%. Also, the maximum crust stress on the floor, middle and upper levels is 29%, 68%, and 72% higher than the core, respectively.

Keywords: Abaqus, quasi-static analysis, dynamic analysis, stress, strain

* Behrang220@gmail.com