

## (یادداشت فنی)

### تحلیل استاتیکی و دینامیکی تنش- کرنش در سدهای خاکی با استفاده از نرم افزار

#### آباکوس (مطالعه موردی: سد خاکی آزادی)

احمدرضا مظاهری<sup>۱</sup>، مصطفی زین العبادی روزبهانی<sup>۲</sup>، بهرنگ بیرانوند<sup>۳\*</sup>

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۲۵

دریافت مقاله: ۹۸/۰۸/۰۳

#### 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 مطالعه حاضر از قاعده میرایی رایلی در محاسبات تنش و کرنش سد خاکی آزادی پس از پایان مرحله ساخت و در حالت تراوش پایدار و از دو تحلیل استاتیک و دینامیک به صورت غیرخطی استفاده شده است. همچنین از مدل رفتاری ساده الاستوپلاستیک مبنی بر معیار موهر-کولمب در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در هر دو تحلیل بیشترین کرنش هسته سد آزادی در بالای هسته و بیشترین تنش در هنگام زلزله در قسمت کف اتفاق افتاده است. همچنین تنش در حالت دینامیکی نسبت به استاتیکی در جهت  $\sigma_{xx}$  ۴۹٪، در جهت  $\sigma_{xy}$  ۳۰٪ و در جهت  $\sigma_{yy}$  ۲۸٪ بیشتر است. در تراز کف حداکثر تنش پوسته ۲۹٪، در تراز میانی ۶۸٪ و در تراز بالا ۷۲٪ بیشتر از هسته است.

**کلید واژه‌ها:** آباکوس، تحلیل استاتیک، تحلیل دینامیک، تنش، کرنش

۱. استادیار گروه عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد

۲. دانش آموخته، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد

۳. دانش آموخته، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد behrang220@gmail.com

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

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 در 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 پاوشان (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 با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای مصالح خاکی به این نتیجه دست یافتند که با افزایش شتاب بیشینه زلزله و ورود مصالح به بخش غیرخطی، مدول بزرگنمایی، کوچک می‌شود. همچنین الیا و همکاران (Elia et al., 2011)، به بررسی رفتار لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای سد همگن مارانا، در ایتالیا پرداختند. موکرجی (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 پیش بینی 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 سدخاکی با مصالح پایدارکننده، ماده‌ای با کنترل مقاومت پایین CLSM با استفاده از روش المان محدود پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که استفاده از CLSM برای پایدارسازی در خاکریزها می‌تواند در مقابل تحریک لرزه‌ای بالاتر از خاک محافظت کند. طبق بررسی‌های پانالینو و هارابینوفا (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 براساس 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

و جنوب غربی ایران دارای گذشته پرتنش از لحاظ فعالیت‌های تکتونیکی بوده است. بالطبع در این محدوده چین خوردگی و گسلش سازندها امری عادی و طبیعی است (مهندسین مشاور آبدان فراز).

### ۳. معادله دینامیکی حاکم بر محیط سازه

با گسسته‌سازی 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 (۱) نوشته خواهد شد:

$$[M]\{U\} + [C]\{U\} + [K]\{U\} = \{F_1\} - [M]\{U_g\} + [Q]\{P\} \quad (1)$$

[M]، [C] و [K] به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند. به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب سازه و بردار نیروهای بدنه‌ای و شتاب زمین لرزه می‌باشد.

۳-۱. تحلیل الاستوپلاستیک کامل خاکریز با فرض معیار خمیری موهر-کولمب

در تحلیل الاستیک-پلاستیک (خمیری 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 برحسب 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 (۲) ارائه داد:

$$F = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \eta_1, \eta_2, \eta_3) \quad (2)$$

که  $\eta_i$ ها جهت تنش‌های اصلی  $\sigma_i$  را نشان می‌دهند. در صورتی که مصالح همسان باشند رابطه تسلیم به شکل ساده رابطه (۳) در می‌آید:

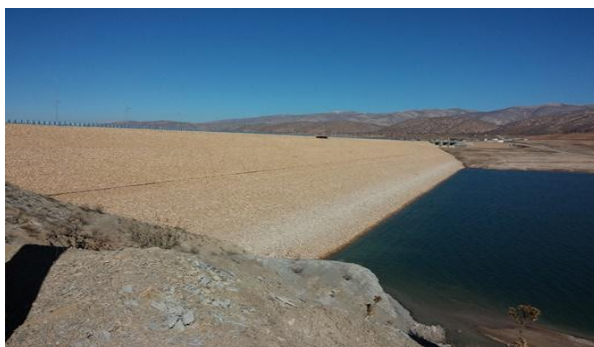
$$F = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (3)$$

در صورتی که میدان تنش طوری باشد که  $F(\sigma) < 0$  رفتار مصالح الاستیک است و به محض رسیدن به حد تسلیم  $= 0$   $F(\sigma)$ ، رفتار پلاستیک مصالح آغاز می‌شود. در مدل الاستیک

تغییرهندسه بلوک و مقاومت برشی ناشی از برش در محاسبات است. در این مطالعه به بررسی و مقایسه تحلیل استاتیکی و دینامیکی تنش و کرنش در سد خاکی آزادی پس از پایان مرحله ساخت و در حالت تراوش پایدار با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و آنالیزهای غیرخطی پرداخته شده است.

### ۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی سد آزادی

سد مخزنی آزادی در استان کرمانشاه، در فاصله ۵۰۰ متری پایین‌دست پل شاهگذر و حدود ۹۰ کیلومتری شهر جوانرود در مختصات  $21^{\circ}46'$  طول شرقی و  $33^{\circ}34'$  عرض شمالی بر روی رودخانه زمکان واقع شده است. مساحت حوزه آبریز این رودخانه تا محور سد آزادی ۱۰۵۴ کیلومتر مربع است. دسترسی به تکیه‌گاه‌های چپ و راست سد مخزنی آزادی از طریق محور کرمانشاه، کوزران-پل شاهگذر امکان‌پذیر می‌باشد. سد آزادی از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با ارتفاع ۶۴ متر از پی تا تراز ۱۳۱۲ متر از سطح دریا و طول تاج ۷۳۷ متر می‌باشد. حجم مخزن سد در تراز نرمال ۵۷/۴۷ میلیون متر مکعب و حجم مفید ۵۰ میلیون متر مکعب است (شکل ۱).



شکل ۱. سد خاکی آزادی

ساختگاه سد مخزنی آزادی از دو بخش سنگی رسوبات شیلی امیران و آهک مارنی سازند گورپی و واحد رسوبات آبرفتی- واریزه‌ای عهد حاضر در کوله راست محور و زیر سرریز تشکیل شده است. از نظر زمین‌ساختاری، محدوده سد آزادی و تأسیسات وابسته، متعلق به واحد ساختاری زاگرس چین‌خورده در لرستان خاوری است. این واحد ساختاری همانند سایر مناطق زاگرس چین‌خورده در جنوب

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 (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) تعریف می‌شود:

$$g_1 = 1.2|\sigma'_2 - \sigma'_3| + 1.2(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin\Psi \quad (12)$$

$$g_1 = 1.2|\sigma'_3 - \sigma'_1| + 1.2(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\Psi \quad (13)$$

$$g_1 = 1.2|\sigma'_1 - \sigma'_2| + 1.2(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin\Psi \quad (14)$$

این تابع سومین پارامتر مدل را  $\Psi$  معرفی می‌کند. این پارامتر جهت مدل کردن کرنش‌های حجمی پلاستیک در خاک‌هایی که حین برش افزایش حجم می‌دهند بکار 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 در برنامه می‌توان با تعریف تابعی تکمیلی نقاط تحت کشش را حذف کرد. این توابع به صورت روابط (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) تعریف می‌شوند:

$$f_4 = \sigma'_1 - \sigma_t \geq 0 \quad (15)$$

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

$$f_4 = \sigma'_3 - \sigma_t \geq 0 \quad (17)$$

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 که گفته شد، در این مدل با تعریف ۵ پارامتر که به وسیله آزمایش‌های شناخته شده و متداول در خاک قابل دستیابی است، رابطه تنش-کرنش تعریف می‌شود. این پارامترها عبارتند از مدول برشی خاک، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک، چسبندگی و زاویه اتساع که در معادلات تعادل و سازگاری در هریک از المان‌ها با فرض کرنش‌های مسطح فرمول‌بندی شده و با اعمال تدریجی بار و مقایسه آن با سطوح تسلیم معرفی شده، تغییر مکان‌ها تعیین می‌شود (زینکوویچ و همکاران، ۱۹۷۷).

کامل نمو کرنش به دو مولفه الاستیک و پلاستیک تقسیم می‌شود (رابطه ۴):

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (4)$$

جهت کرنش‌های پلاستیک قانون جریان معین می‌گردد. در قانون جریان فرض می‌شود که کرنش پلاستیک بر یک سطح عمود است این قانون به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma'} \quad (5)$$

که در آن  $\lambda$  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 جدید  $[g(\sigma)]$  تعریف می‌شود، که نمو کرنش پلاستیکی عمود بر آن خواهد بود (رابطه ۶):

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

که در این رابطه  $\lambda$  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 (۷) و (۸) بیان کرد:

$$\sigma' = [D^e - \frac{\alpha}{d} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'}] D^e \varepsilon^0 \quad (7)$$

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \quad (8)$$

اگر رفتار خاک الاستیک باشد، در این رابطه  $\alpha$  صفر است. در غیر این صورت  $\alpha$  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 (۹)، (۱۰) و (۱۱) تعریف می‌شود:

$$f_1 = 1/2 |\sigma'_2 - \sigma'_3| + 1/2 (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin\phi - c \cdot \cos\phi \geq 0 \quad (9)$$

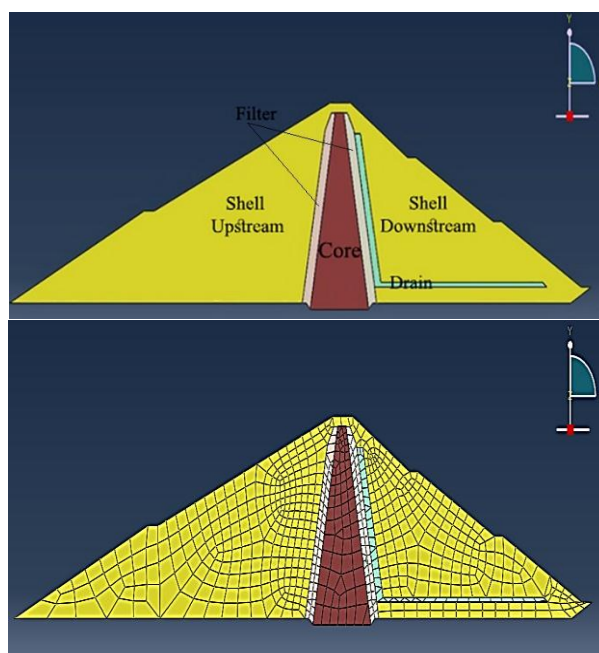
$$f_1 = 1/2 |\sigma'_3 - \sigma'_1| + 1/2 (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin\phi - c \cdot \cos\phi \geq 0 \quad (10)$$

$$f_1 = 1/2 |\sigma'_1 - \sigma'_2| + 1/2 (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin\phi - c \cdot \cos\phi \geq 0 \quad (11)$$

پارامترهای اصلی معرف تابع تسلیم عبارتند از  $\phi$  و  $c$  که به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک می‌باشند. شکل تابع به صورت مخروطی است که نقاط داخل آن

#### ۴. مدل‌سازی سد آزادی در نرم‌افزار آباکوس

آباکوس یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند مبتنی بر روش اجزاء محدود است که قابلیت حل مسایل تحلیل خطی ساده تا پیچیده و مدل‌سازی غیرخطی را دارد. آباکوس در یک تحلیل غیرخطی، به طور اتوماتیک مقدار رواداری‌های همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند. همچنین این نرم‌افزار از زبان برنامه‌نویس منبع باز پایتون برای برنامه نویسی در داخل نرم‌افزار پشتیبانی می‌کند. وجود امکان اسکریپت نویسی در داخل نرم‌افزار، قابلیت‌های مدل‌سازی آن را دو چندان می‌کند. در این پژوهش محاسبه فشار تنش و کرنش به فرض رفتار کرنش مسطح در سد استفاده شده است. بدین منظور بزرگ‌ترین مقطع سد با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و با المان‌های هشت گره‌ای مورد تحلیل قرار گرفته است. شکل ۲ مدل‌سازی و مش‌بندی سد آزادی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مدل‌سازی و مش‌بندی سد آزادی در نرم‌افزار آباکوس

برای تحلیل دینامیکی ابتدا باید تحلیل استاتیکی انجام شده و پس از تعادل تحلیل دینامیکی شروع می‌شود. میرایی به کار رفته از نوع راییلی است. میرایی راییلی مرسوم ترین نوع میرایی مکانیکی است که در تحلیل‌های دینامیکی به کار گرفته می‌شود. به طور کلی در برنامه‌هایی که در حوزه زمان عمل می‌کنند، معمولاً جهت فراهم کردن میرایی که تقریباً مستقل از فرکانس است، از میرایی راییلی استفاده می‌شود. درصد میرایی با توجه به الاستو-پلاستیک بودن مدل رفتاری مصالح، معادل یک درصد در نظر گرفته شده است. در مدل‌های رفتاری که به خاک اجازه ورود به بخش پلاستیک داده می‌شود (مانند مدل مور-کلمب)، با توجه به قابلیت استهلاک انرژی در مدل، منظور کردن میرایی بین صفر تا یک درصد منطقی می‌باشد. در واقع برای اکثر تحلیل‌های دینامیکی که شامل شرایط کرنش بزرگ می‌شوند تنها درصد کوچکی میرایی مورد نیاز 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 که حتی الامکان 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 تیپ دو) محل ایستگاه انتخاب شده‌اند به همین منظور ایستگاه‌هایی مد نظر قرار گرفته‌اند که تعیین خاک محل آنها بر اساس روش‌های ژئوفیزیکی نیز انجام شده است. برپایه مطالعات لرزه‌خیزی انجام شده در گستره ساختگاه سد آزادی، مقادیر پارامترهای لرزه‌خیزی مبنای طراحی DBL، بالای طراحی MDL و حداکثر پذیرفتنی MCL به ترتیب ۰/۲۰، ۰/۳۰ و ۰/۵۱ برای بیشینه شتاب افقی و ۰/۱۲، ۰/۲۰ و ۰/۳۴

## ۵. نتایج و بحث

۵-۱. تحلیل تنش و کرنش سد آزادی در حالت تراوش پایدار تحلیل اجزاء محدود بدنه سد آزادی، پس از اتمام مرحله ساخت و برای شرایط تراوش پایدار با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام گرفته است. مدل مورد استفاده در این تحلیل، الاستوپلاستیک موهر-کولمب بوده و آنالیز مطابق با شرایط پارامتریک تنش کل انجام شده است. همچنین مشخصات مکانیکی مصالح سد آزادی مطابق جدول ۲ مدل سازی شده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی آنالیز تنش-کرنش

کوتاه مدت

Material parameters	Dry density (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Friction angle (φ)	Elastic modulus (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio (ν)	Pressure coefficient (K <sub>0</sub> )
<b>Core</b>	20.4	100	30	27500	0.42	0.72
<b>Filter</b>	21.2	0	32	35000	0.36	0.54
<b>Drain</b>	21.7	0	35	45000	0.34	0.52
<b>Shell</b>	21.8	0	38	70000	0.32	0.47
<b>Foundation</b>	25.3	1080	24	2.6×10 <sup>6</sup>	0.25	0.33

لازم به ذکر است مدل سازی تنش و کرنش به دو روش استاتیکی و دینامیکی تحلیل می شوند. همچنین تحلیل دینامیکی در حالت مخزن پر (تراوش پایدار) انجام شده است. کمیت ها در جدول ۳ تعریف شده اند. کمیت تنش با  $\sigma$  و کمیت کرنش با نماد  $\gamma$  مشخص شده است.

جدول ۳. کمیت های تحلیل تنش و کرنش سد آزادی در نرم

افزار آباکوس

direction	Sheet	Quantity
X	XZ	$\sigma_{xx}$
Y	XZ	$\sigma_{xy}$
Y	YZ	$\sigma_{yy}$
X	XZ	$\gamma_{xx}$
Y	XZ	$\gamma_{xy}$
Y	YZ	$\gamma_{yy}$

۵-۲-۱. تحلیل تنش و کرنش سد آزادی به روش استاتیکی

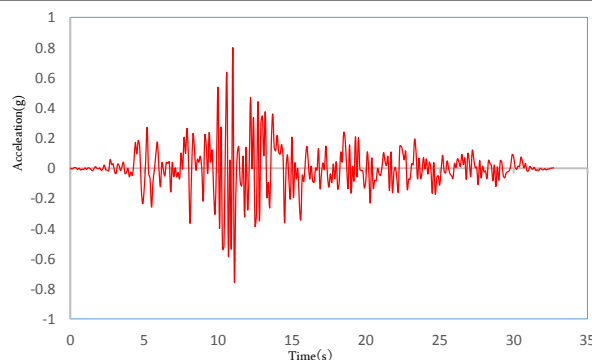
ساده ترین راه در تحلیل رفتار یک سازه در زلزله، روش شبه استاتیک است. این روش نسبت به سایر روش ها تحلیل

برای بیشینه شتاب قائم برآورد شده و حداکثر زلزله رخ داده در منطقه دارای بزرگای ۷ ریشتر بوده است (مهندسین مشاور آبدان فراز). براین اساس در ساختگاه مورد مطالعه، ضریب زلزله جهت تحلیل پایداری ۰/۱۷ (معادل یک سوم زلزله حداکثر متحمل، براساس توصیه پایک (Pyke)) تعیین و انتخاب شده است. محدود کردن مقدار حداکثر شتاب محرک ورودی ۰/۱۷g علت فرض رفتار خطی خاک مربوط می شود که در تحلیل دینامیکی تحت زمین لرزه های متمایه و ضعیف می توان با قبول خطای کم از فرض مذکور استفاده کرد. همچنین به پرهیز از ایجاد تنش های کششی غیر واقعی در المان های از پوسته پایین دست مربوط می شود که پس از افزودن تنش های دینامیکی به استاتیکی در حالات استفاده از زمین لرزه های بزرگتر از ۰/۱۷g به دلیل استفاده از فرض رفتار خطی به وقوع می پیوندد (در فرض رفتار واقعی تر غیر خطی برای خاک و عدم امکان تحمل کشش برای مصالح دانه ای، این مشکل قابل حل است). بنابراین برای انجام تحلیل دینامیکی و جهت استخراج محرک ورودی، با ایده گرفتن از شتاب نگاشت های زلزله طبس با بیشینه شتاب ۰/۸۳g و زمان

۳۳ ثانیه استفاده شده است (جدول ۱ و شکل ۳).

جدول ۱. مشخصات زلزله مورد استفاده در تحلیل دینامیکی

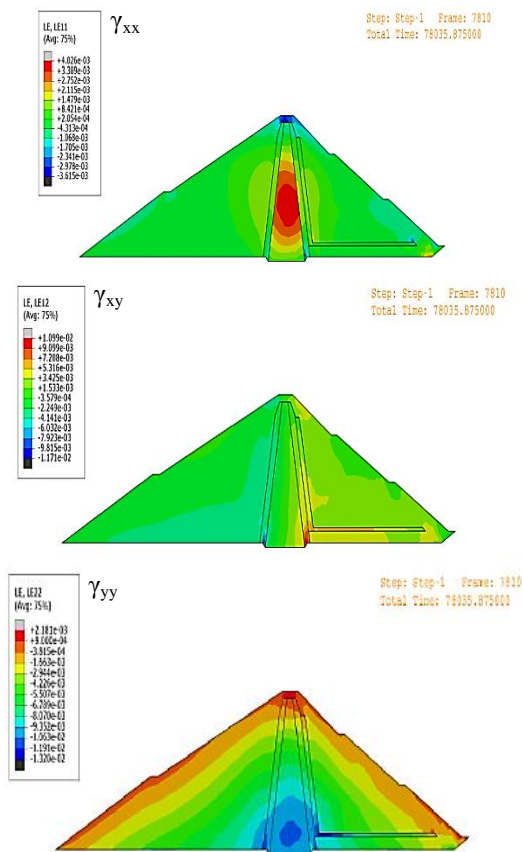
Earthquake	Time (sec)	Maximum Horizontal displacement (m)	Maximum velocity (m/sec)	Maximum acceleration (g)
Tabas	16.42	0.38	0.97	0.83



شکل ۳. شتاب نگاشت مورد استفاده در تحلیل دینامیکی سد آزادی (زلزله طبس)



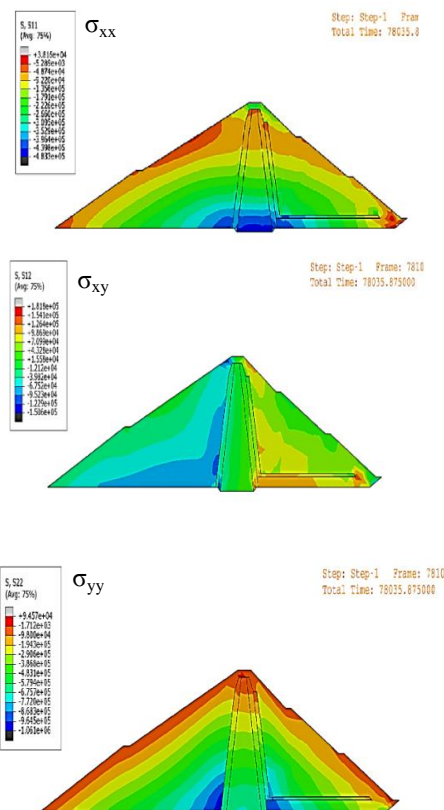
افزاده است و این مقدار با شکل هندسی خاصی به سمت بالا کاهش یافته است و مقدار این کاهش ۳۲٪ است. لازم به ذکر است در این حالت تمرکز تنش زیادی رخ می‌دهد که این خود نیاز به تمهیدات خاصی دارد، این مقدار تمرکز تنش در پوسته بالادست ۱۲۲ کیلوپاسکال و در پوسته پایین دست ۱۵۴ کیلوپاسکال است. بیشترین تنش در حالت  $\sigma_{yy}$  در پوسته بالادست و پایین دست کنار هسته رخ داده است که مقدار این تنش ۹۶۴ کیلوپاسکال است. در هسته، تنش برابر ۳۸۶ کیلوپاسکال به وجود آمده است که کاهش 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 درشت‌دانه بودن مصالح پوسته و سختی بیشتر آن است. کانتور کرنش سد در روش استاتیکی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. توزیع کرنش سد آزادی در حالت استاتیکی در

راستای  $\gamma_{xx}$ ,  $\gamma_{xy}$  و  $\gamma_{yy}$

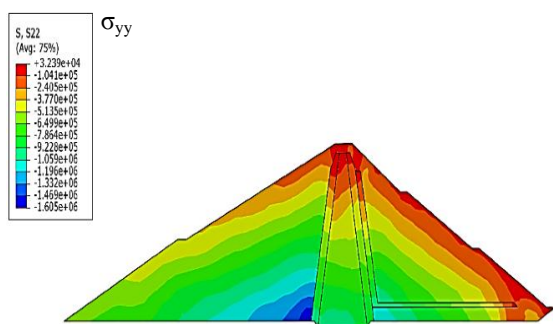
لرزه‌ای، متداول‌تر و به لحاظ قدمت، قدیمی‌تر است. در واقع در این روش اثر زلزله به صورت استاتیکی و با اعمال نیروهای که از حاصل ضرب ضرایب زلزله در وزن توده لغزنده در دو امتداد افق و قائم به دست می‌آید، در تحلیل لحاظ می‌شود. قدمت استفاده از این روش به قبل از سال ۱۹۵۰ باز می‌گردد. در شکل ۴ کانتور تنش به روش استاتیکی نشان داده شده است.



شکل ۴. توزیع تنش سد آزادی در حالت استاتیکی در راستای

$\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xy}$  و  $\sigma_{yy}$

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تنش در جهت  $\sigma_{xx}$  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  $\sigma_{xy}$  در پوسته بالادست اتفاق



شکل ۶. توزیع تنش سد آزادی در حالت دینامیکی در راستای

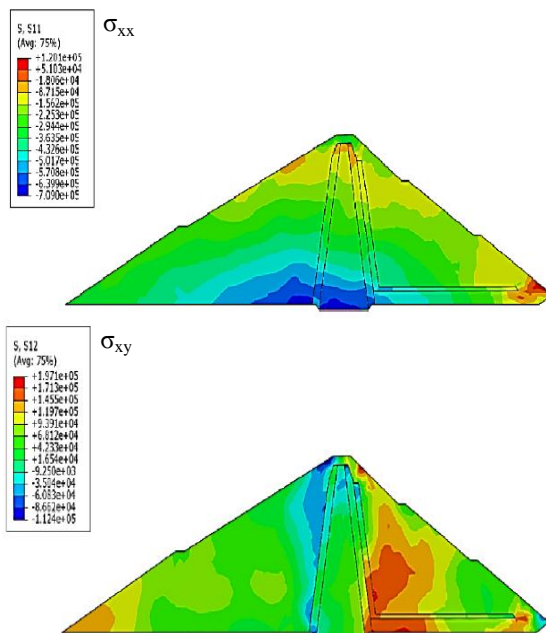
$$\sigma_{xx}, \sigma_{xy} \text{ و } \sigma_{yy}$$

بیشترین مقدار تنش در جهت  $\sigma_{xx}$  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  $\sigma_{xy}$  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 فریاتیکی در این ناحیه است. هسته در این حالت تقریباً تنشی منظم به مقدار ۴۲ کیلوپاسکال دارد. بیشترین تنش در جهت  $\sigma_{yy}$  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 کاهشی 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 ۷ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است بیشترین کرنش در جهت  $\gamma_{xx}$  درون هسته رخ می‌دهد، این ماکزیمم کرنش به دلیل ریزدانه بودن مصالح در این قسمت می‌باشد، مقدار ماکزیمم آن برابر ۰/۰۰۳۴ است که با سرعت تقریباً زیاد به طرف پوسته زیاد شده و به مقدار ۰/۰۰۰۲ در کنار بدنه می‌رسد. نامنظمی کرنش در جهت  $\gamma_{xy}$  نسبت به حالت قبل و بعد بیشتر است، دلیل این امر رفتار چند گانه 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 ۰/۰۰۱۵ است. بیشترین کرنش در جهت  $\gamma_{yy}$  در کف هسته و به مقدار ۰/۰۰۱۳۲ است، نظم کاهش مقدار کرنش در این حالت نسبت به دو حالت قبل بیشتر است، دلیل این رفتار مقاومت قسمت‌ها مختلف سد ناهمگون در این جهت است.

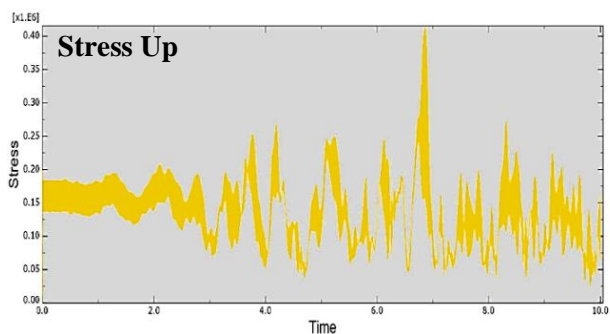
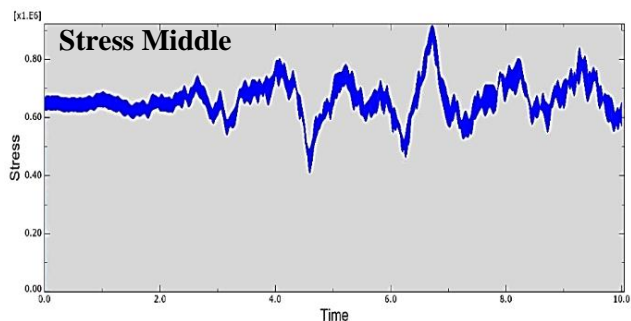
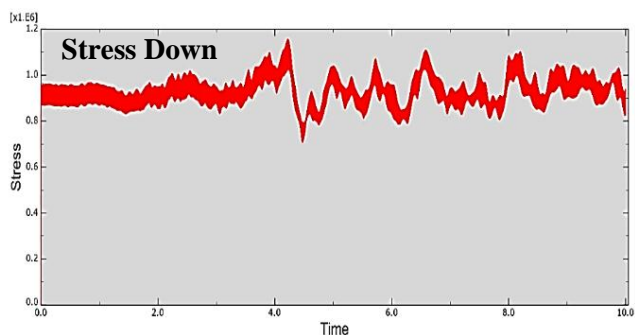
### ۲-۲-۵. تحلیل تنش و کرنش سد آزادی به روش دینامیکی

تحلیل دینامیکی در واقع انجام تحلیل‌های عددی بر روی مدل بدنه و در صورت نیاز پی سد، می‌باشد که در طی آن، به واسطه در نظر گرفتن رفتار تنش-کرنش مصالح، به بررسی رفتار سد در زمان اعمال بارهای تناوبی لرزه‌ای و نیز تحلیل و بررسی رخدادهای احتمالی پس از وقوع زلزله، پرداخته می‌شود. کانتور تنش سد به روش دینامیکی در شکل ۶ نشان داده شده است.



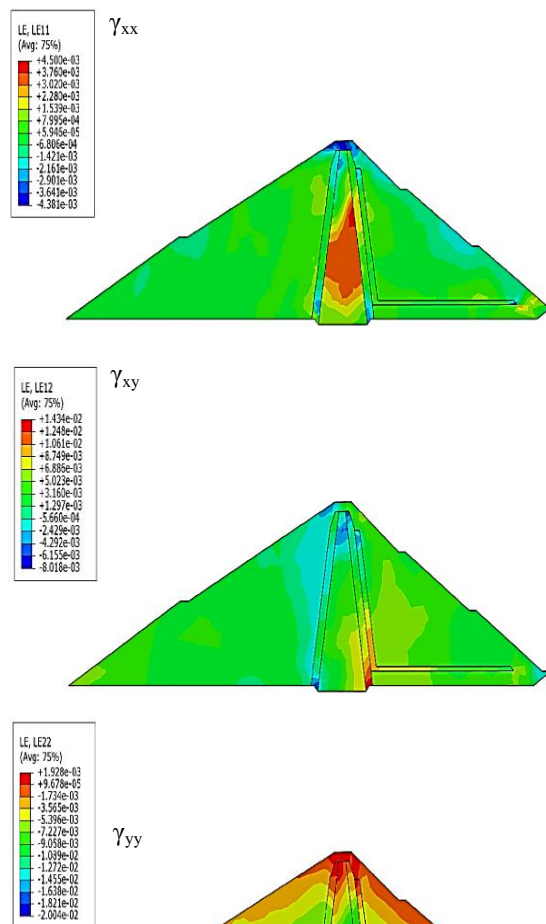


حالت است. بیشترین کرنش در حالت در جهت  $\gamma_{yy}$  پس از زلزله به فاصله  $0/125$  عرض پوسته بالادست کنار هسته رخ می‌دهد و مقدار آن تقریباً  $0/016$  می‌باشد و با زاویه‌ای تقریباً  $30$  درجه به سمت بالا کاهش می‌یابد و در میانه به مقدار  $0/007$  می‌رسد. در هسته مقدار بیشترین کرنش  $0/014$  است و به سمت بالا کاهش می‌یابد. از سه تراز کف، میانه و بالای پوسته برای استخراج نمودارهای تنش پوسته استفاده شده است (شکل ۸).



شکل ۸. منحنی تنش در ترازهای مختلف پوسته سد آزادی (کف، میانه و بالا)

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



شکل ۷. توزیع کرنش سد آزادی در حالت دینامیکی در

راستای  $\gamma_{xx}$ ،  $\gamma_{xy}$  و  $\gamma_{yy}$

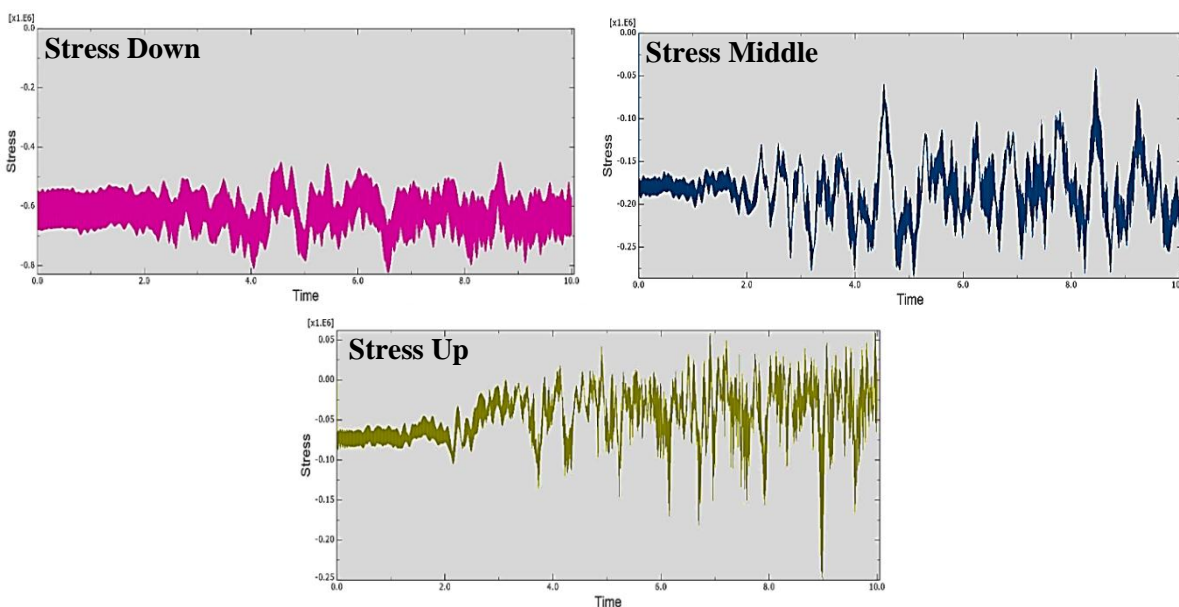
در حالت کرنش در جهت  $\gamma_{xx}$  همان‌طور که انتظار می‌رفت بیشترین کرنش در هسته رخ می‌دهد، دلیل آن ریزدانه بودن مصالح در این ناحیه و تراکم زیاد آنها پس از زلزله می‌باشد و مقدار بیشترین کرنش در این ناحیه برابر  $0/0037$  و کمترین مقدار  $0/0007$  می‌باشد. کرنش در این حالت در پوسته بالادست تقریباً یکسان و برابر  $0/0015$  است، دلیل آن مقاوم بودن مصالح پوسته در این حالت است. در حالت کرنش در جهت  $\gamma_{xy}$  بیشترین کرنش به اندازه  $0/0124$  در کنار هسته رخ می‌دهد سپس به سمت داخل هسته کاهش یافته و به مقدار  $0/003$  می‌رسد. در پوسته بالادست کرنش تقریباً یکسان و برابر  $0/0011$  است، دلیل آن مقاوم بودن مصالح پوسته در این

میان ۷۲٪ بیشتر و نسبت به تراز بالا ۴ برابر خواهد بود. لازم به ذکر 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  $\sigma_{xx}$  و  $\sigma_{xy}$ ،  $\sigma_{yy}$  در هسته بررسی شده است (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱).

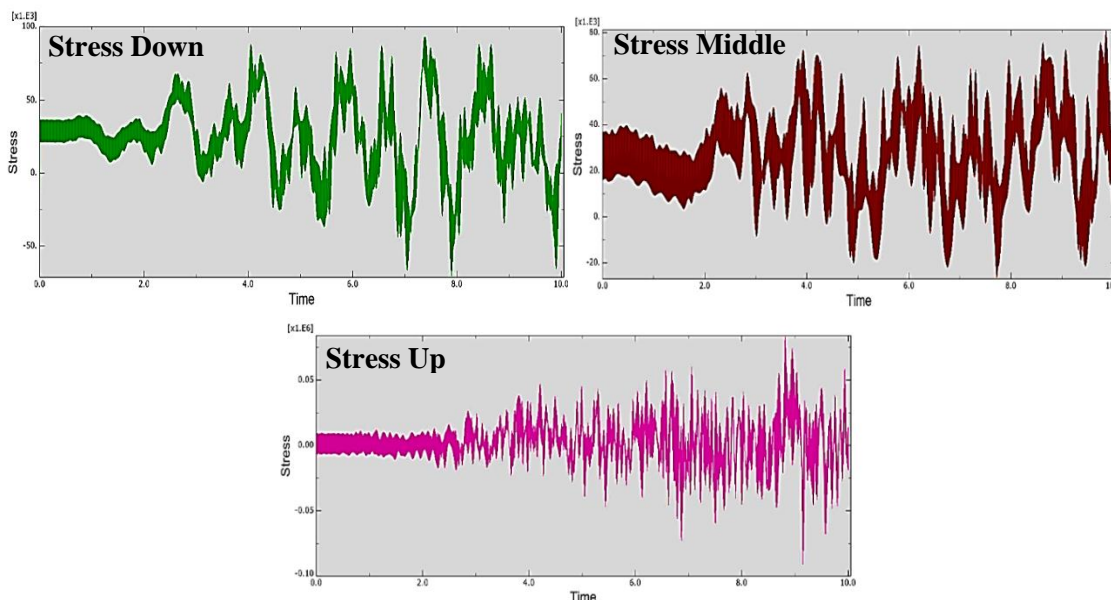
جدول ۴. مقادیر تنش در ترازهای مختلف پوسته سد آزادی

Level	Maximum stress (kPa)	Minimum stress (kPa)	Frequency uniformity time (sec)	Specific frequency stress (kPa)
Up	4.1	1170	4.35	710
Middle	6.6	910	4.6	413
Down	6.8	410	9.8	50

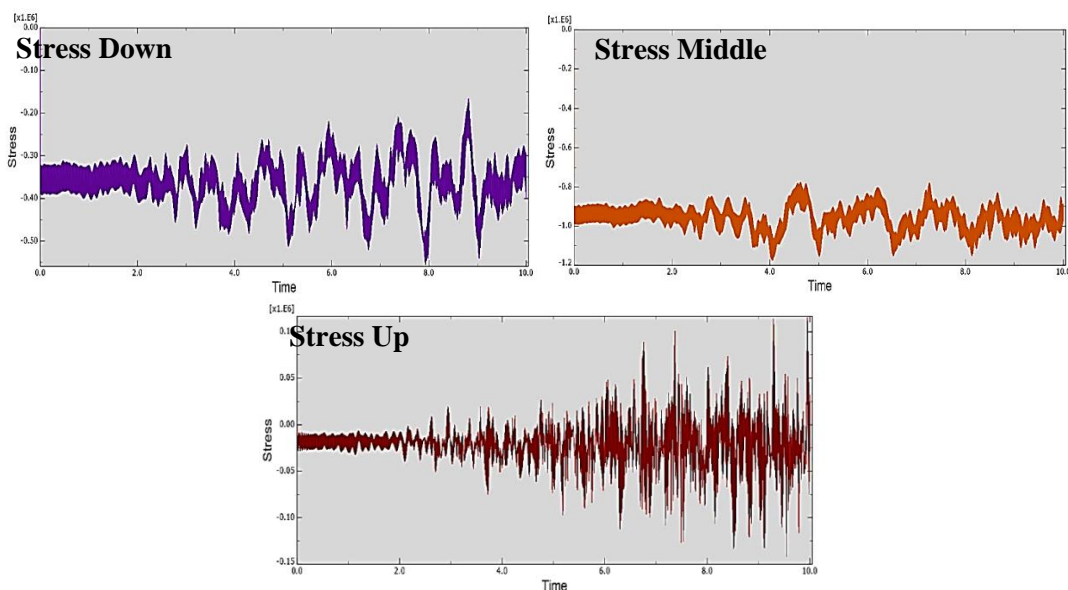
طبق جدول ۴ بیشترین تنش در کف رخ می‌دهد و مقدار آن نسبت به تراز میانه ۲۹٪ بیشتر است و نسبت به تراز بالای سد تقریباً ۲ برابر (۱/۸۵) است و مقدار حداقل تنش نسبت به



شکل ۹. منحنی تنش در جهت  $\sigma_{xx}$  در ترازهای مختلف هسته سد آزادی (کف، میانه و بالا)



شکل ۱۰. منحنی تنش در جهت  $\sigma_{xy}$  در ترازهای مختلف هسته سد آزادی (کف، میانه و بالا)



شکل ۱۱. منحنی تنش در جهت  $\sigma_{yy}$  در ترازهای مختلف هسته سد آزادی (کف، میانه و بالا)

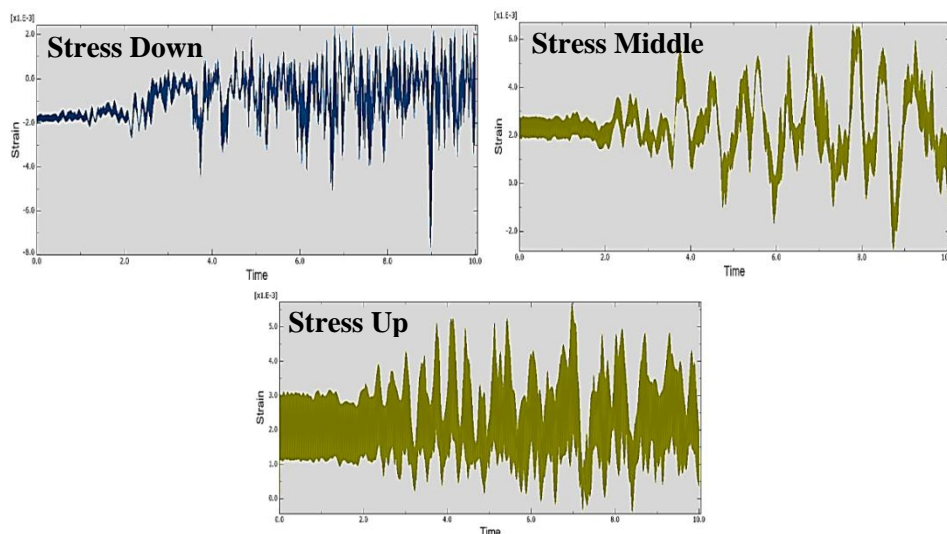
بیشترین تنش هسته مربوط به جهت  $\sigma_{yy}$  است که در کف ۴۶٪ در میانه ۴۹٪ و در بالا ۴۹٪ از بقیه حالات بیشتر است. در تمام حالات تا زمان ۲/۵ ثانیه تقریباً تنش‌ها با فرکانس محدود کم و زیاد می‌شود پس از آن با شیبی نسبتاً زیاد مقادیر تنش به حداقل و حداکثر خود خواهد رسید. نمودارهای کرنش در اشکال ۱۲ تا ۱۴ در هر سه جهت  $\gamma_{xx}$  و  $\gamma_{xy}$  و  $\gamma_{yy}$  در هسته سد آزادی بررسی شده است.

تفسیر اشکال ۹ تا ۱۱ به صورت جدول ۵ می‌باشد. جدول ۵. مقادیر تنش در ترازهای مختلف هسته سد آزادی در

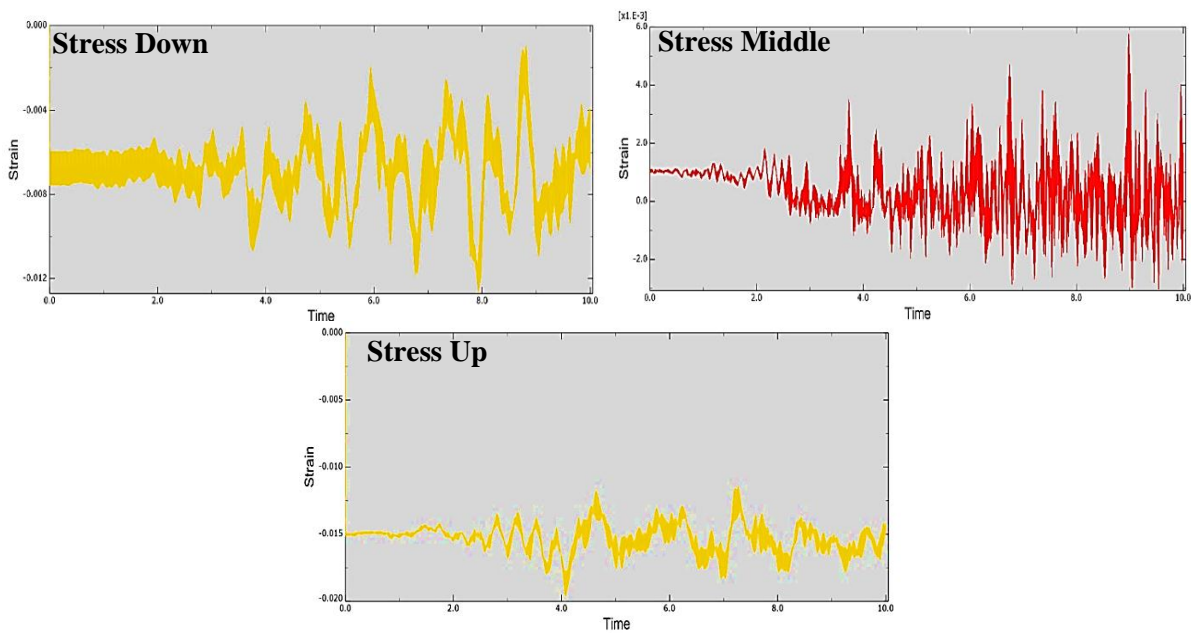
راستای  $\sigma_{xx}$ ،  $\sigma_{xy}$  و  $\sigma_{yy}$

Level	$\sigma_{yy}$ (kPa)	Stress time(sec) $\sigma_{yy}$	$\sigma_{xy}$ (kPa)	Stress time(sec) $\sigma_{xy}$	$\sigma_{xx}$ (kPa)	Stress time(sec) $\sigma_{xx}$
Up	1100	4.1	81	9.8	830	6.7
Middle	530	8	58	7.9	270	9
Down	225	9.4	54	9.1	120	9.2

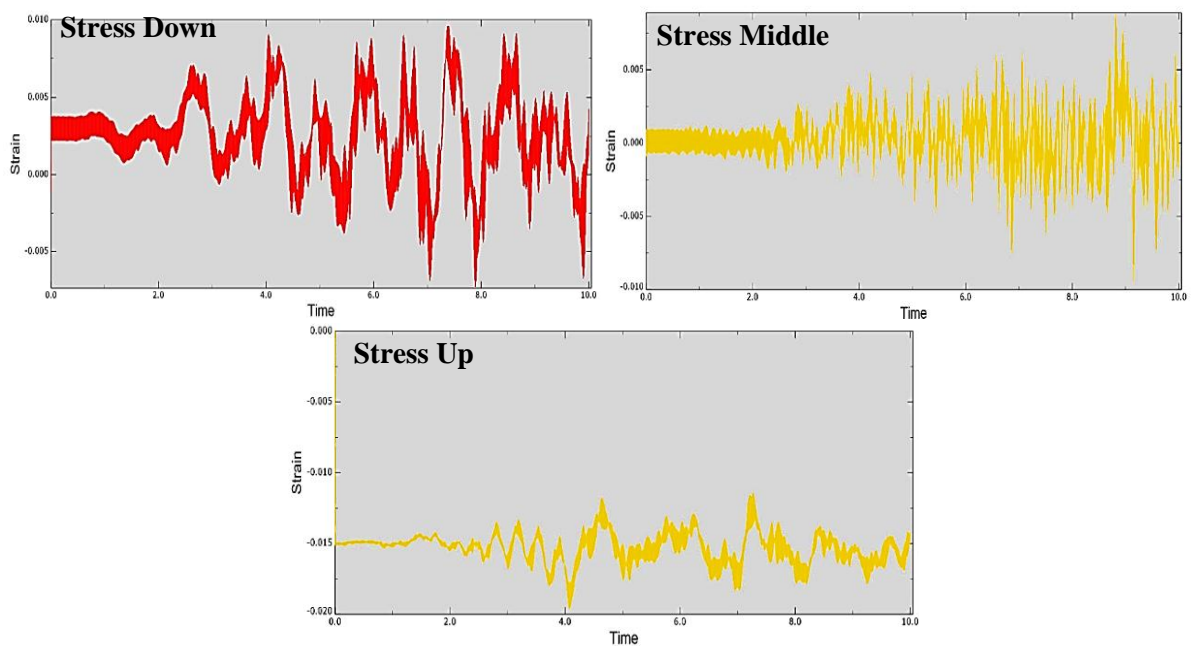
همان‌طور که انتظار داشتیم بیشترین تنش هسته سد آزادی در هنگام زلزله در همه حالات در قسمت کف اتفاق افتاده است،



شکل ۱۲. منحنی کرنش در جهت  $\gamma_{xx}$  در ترازهای مختلف هسته سد آزادی (کف، میانه و بالا)



شکل ۱۳. منحنی کرنش در جهت  $\gamma_{yy}$  در ترازهای مختلف هسته سد آزادی (کف، میانه و بالا)



شکل ۱۴. منحنی کرنش در جهت  $\gamma_{xy}$  در ترازهای مختلف هسته سد آزادی (کف، میانه و بالا)

تفسیر اشکال ۱۲ تا ۱۴ به صورت جدول ۶ می باشد.

## ۶. نتیجه گیری

برای کنترل تنش‌های در هنگام زلزله باید مواد درشت دانه‌تر بیشتر شود. تنش در حالت دینامیکی نسبت به استاتیکی در جهت  $\sigma_{xx}$  ۴۹٪ در جهت  $\sigma_{xy}$  ۳۰٪ و در جهت  $\sigma_{yy}$  ۲۸٪ بیشتر است. در تراز کف حداکثر تنش پوسته ۲۹٪ در تراز میانه ۶۸٪ و در تراز بالا ۷۲٪ بیشتر از هسته است. در حالت کرنش در جهت  $\gamma_{xx}$  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 ۰/۰۰۳۷ و کمترین مقدار ۰/۰۰۰۷ می‌باشد.

جدول ۶. مقادیر کرنش در ترازهای مختلف هسته سد آزادی

در راستای  $\gamma_{xx}$ ،  $\gamma_{xy}$  و  $\gamma_{yy}$

Level	$\gamma_{xx}$ (kPa)	Strain time(sec) $\gamma_{xy}$	$\gamma_{yy}$ (kPa)	Strain time(sec) $\gamma_{yy}$
Up	0.0025	9	0.00021	9.2
Middle	0.005	8.5	0.012	7.5
Down	0.053	7	0.02	4.4

بیشترین کرنش در جهت  $\gamma_{xy}$  و ترازهای بالا رخ می‌دهد، تقریباً دو برابر حالات دیگر می‌باشد.

## منابع

- طرح سد مخزنی آزادی، ۱۳۸۲. مطالعات مرحله دوم، لوزه‌خیزی و مهندسی زلزله مهندسین مشاور آبدان فراز، شرکت سهامی آب منطقه‌ای غرب
- 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.