



مدل سازی عددی اثر تحریکات لرزه ای بر رفتار سد بتنی قوسی تحت شتابنگاشت سطح پایه محتمل (MCL)

عبدالکریم ایمنی

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان

Mohamademeni@yahoo.com

چکیده

اثرات زلزله معمولاً با تعریف یک ضریب زلزله اعمال می‌گردد، همچنین با پیشرفت دانش در زمینه مهندسی زلزله و توسعه روش‌های دقیق‌تر برای برآورد شدت زلزله‌های محتمل از جمله روش فناوری و مدل‌سازی سازه با نرم افزار آباکوس (Abaqus)، فرآیند تحلیل و ارزیابی لرزای سازه‌ها کامل‌تر گردیده و تاثیر پارامترهای بیشتری را می‌توان در ارزیابی ریسک هر سازه لحاظ نمود، در تحقیق پیش‌رو پاسخ فناوری لرزه‌ای سد بتنی قوس دز تحت اثر تحریکات زلزله در یک تحلیل عددی و بصورت سه بعدی بررسی می‌شود. اثرات ناشی از اندرکنش سد، مخزن، تکیه‌گاه‌ها و رفتار غیرخطی بتن و همچنین سهم پاسخ هر یک از عوامل پایداری در برابر لرزه‌ای و شتابنگاشت زلزله منجیل بر سد بتنی قوسی دز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: تحریکات زلزله MCL، فناوری نرم‌افزار آباکوس، رفتار سد بتنی قوسی، سد بتنی قوسی دز

۱- مقدمه

در سدهای قوسی بتنی که با الگوی هندسه بهینه‌ای طرح می‌شوند، حجم بتن مصرفی کمتری دارند. این گونه از سازه‌ها به دلیل سبک بودن در برابر زمین لرزه‌ها بهتر مقاومت می‌کنند و ارزان‌تر ساخته می‌شوند. الگوی فناوری و بهینه‌سازی سد اید کلیه ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و هندسه سازه را وارد و تحلیل کند. در سال ۱۹۵۹ سد قوسی مالپاست فرانسه به دلیل لغزش بدنه سد به همراه لایه عمیق سنگی شالوده، فرو ریخت که این اتفاق منجر به مرگ ۴۰۰ نفر و از دست رفتن سرمایه‌ای اقتصادی هنگفتی شد. بنابراین باید بررسی‌های عمیقی به سمت تنش، تغییر شکل و مکانیزم تخریب در حین بهره‌برداری از این سدها سوق داده شود. ترک می‌تواند روی عملکرد، دوام و ظاهر سازه موثر باشد. مهمترین عامل کاهش عمر مفید یک سد بتنی، نشست آب می‌باشد و یکی از علل عمده نشست آب ترک خوردن بتن می‌باشد. در نتیجه می‌بایست تلاش نمود تا از بروز ترک در قسمتهایی از سازه که در معرض تماس با فشار بالای آب می‌باشد ممانعت به عمل آورد. لذا در این مقاله پس از بررسی مکانیک شکست در سدهای بتنی قوسی به مطالعه موردی سد دز تحت تحریکات لرزه ای و فناوری جلوگیری از آن می‌پردازد.

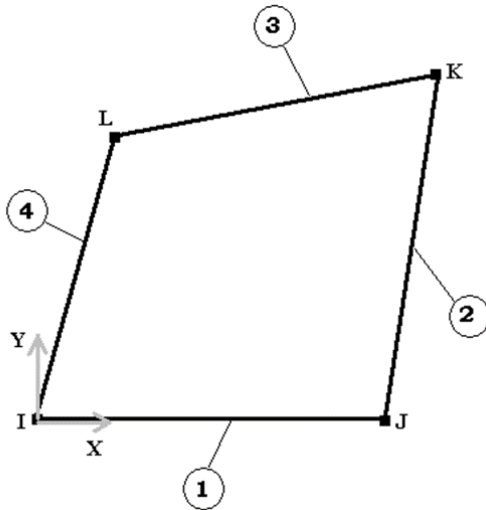
۲- فناوری طراحی و بررسی تحركات لرزه‌ای:

۲-۱- مدل سازی در نرم افزار:

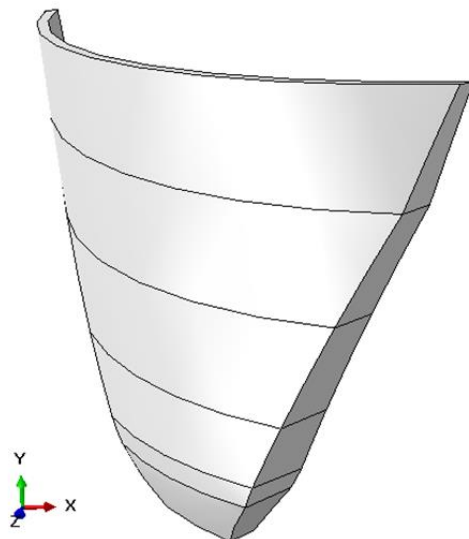
مدول الاستیسیته استاتیکی برابر $۲۶/۵$ گیگاپاسکال، ضریب پواسون برابر $۰/۲$ ، مقاومت کششی برابر $۳/۲$ مگاپاسکال می باشد. جهت تعریف پارامتر ترک خوردگی به نرم افزار آباکوس نیاز است که نمودارهای تنش- کرنش شکل های ۴ تا ۶ وارد نرم افزار گردد. لذا ترک خوردگی کششی و فشاری جداگانه به نرم افزار معرفی می گردد. هرگاه میزان تنش ایجاد شده در اثر این جابجایی ها بیشتر از حد الاستیک باشد ماده وارد محدوده پلاستیک شده و مستعد آسیب های جدی می گردد. به ماکزیمم کرنشی که به ازای آن مصالح همچنان در حالت الاستیک باقی می ماند کرنش الاستیک می گویند. پس از کرنش الاستیک با وقوع اولین ترک و تغییر شکل ماندگار در مصالح از مقاومت آن کاسته می شود و پارامتر ترک خوردگی سرعت و شدت بیشتری به خود می گیرد.

جدول شماره ۲ - پارامترهای به کار رفته در تعریف بتن

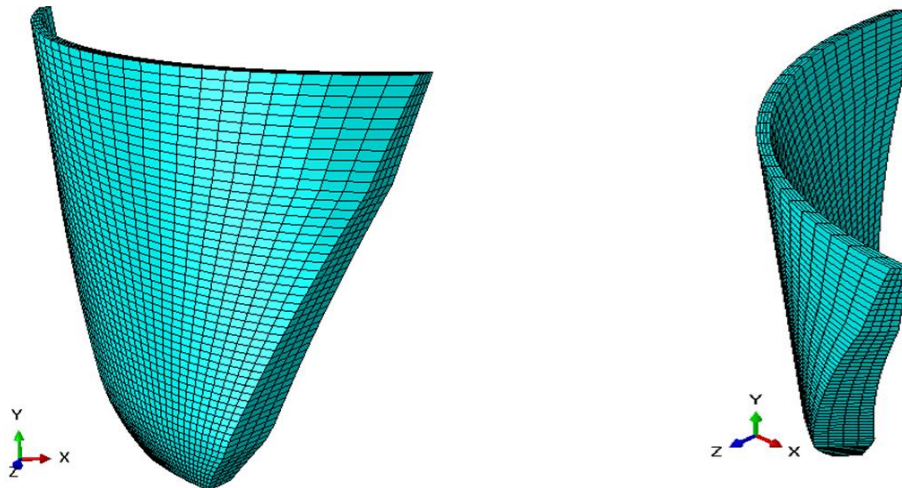
چگالی بتن	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون
۲۴۰۰ Kg/m ³	۲۵ GPa	۰/۲



شکل ۵: المان ۴ گره ای دو



شکل ۴: مدل سد دز ساخته شده در نرم افزار آباکوس بعدی **SOLID**



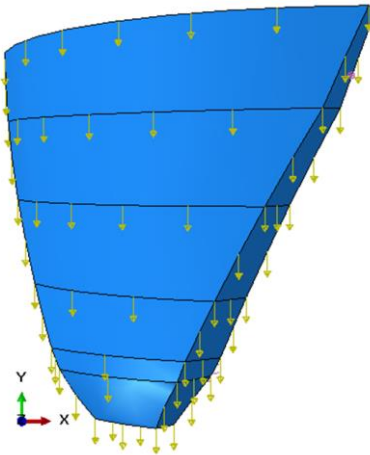
شکل ۶: مدل مش بندی شده سد دز در نرم افزار آباکوس

۲-۲- فرضیات:

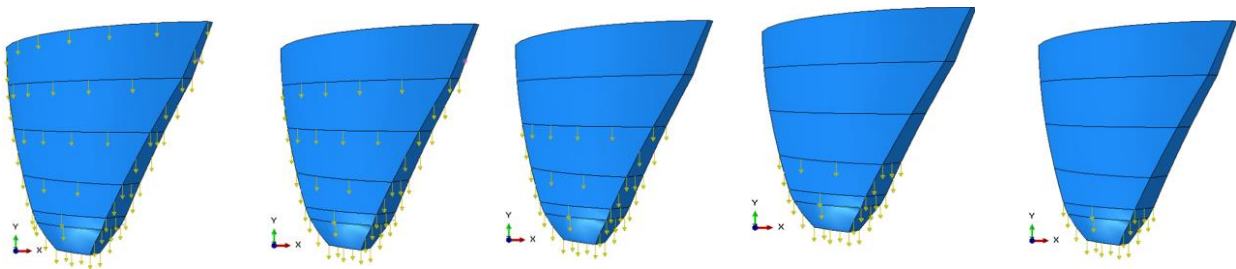
- ۱- حرکت سیستم سد و آب به صورت دو بعدی در نظر گرفته و جابجایی‌ها در صفحات عمود بر محور سد یکسان‌اند
- ۲- وجه بالادست سد قائم می‌باشد .
- ۳- کف مخزن افقی، عمق آب H و گسترش آب در سمت بالادست بی‌نهایت منظور شده است .
- ۴- آب به صورت خطی تراکم پذیر فرض شده، از ویسکوزیته داخلی آن صرف‌نظر می‌شود .
- ۵- تأثیر امواج در سطح آزاد آب با علم به این که خطاهای ایجاد شده کوچک است، نادیده گرفته شده است .
- ۶- با در نظر گرفتن بازتاب سد در مقابل مولفه قائم حرکت زمین، تأثیر انعطاف پذیری کف مخزن بر فشار هیدرودینامیک منظور می‌شود .
- ۷- فرض می‌شود که حرکت زمین در یک زمان به تمام نقاط کف می‌رسد. یعنی سرعت افقی حرکت زمین بی‌نهایت است.

۳-۲- نحوه مدل سازی در نرم افزار:

در این مقاله فرآیند ساخت سد را پنج مرحله‌ای در نظر گرفته و لذا پنج (step) در نرم افزار تعریف نموده و در هر مرحله (step) وزن قسمتی از سد را اضافه می‌کنیم تا شرایط واقعی تر گردد

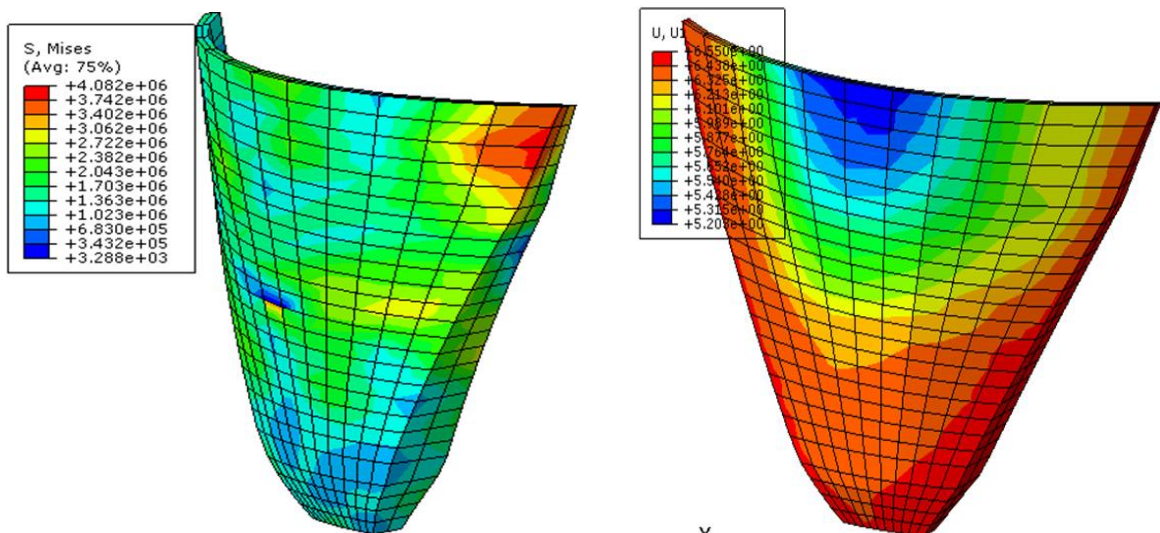


شکل ۷: اعمال وزن سد در یک مرحله



شکل ۸: اعمال وزن سد در پنج مرحله

این مدل جهت بسط و گسترش انتخاب گردید. در شکل ۱۲ تفاوت بین تنشهای تکیه گاهی در دو حالت بار وزنی ۵ مرحله ای و بار وزنی یک مرحله ای نمایش داده شده است.



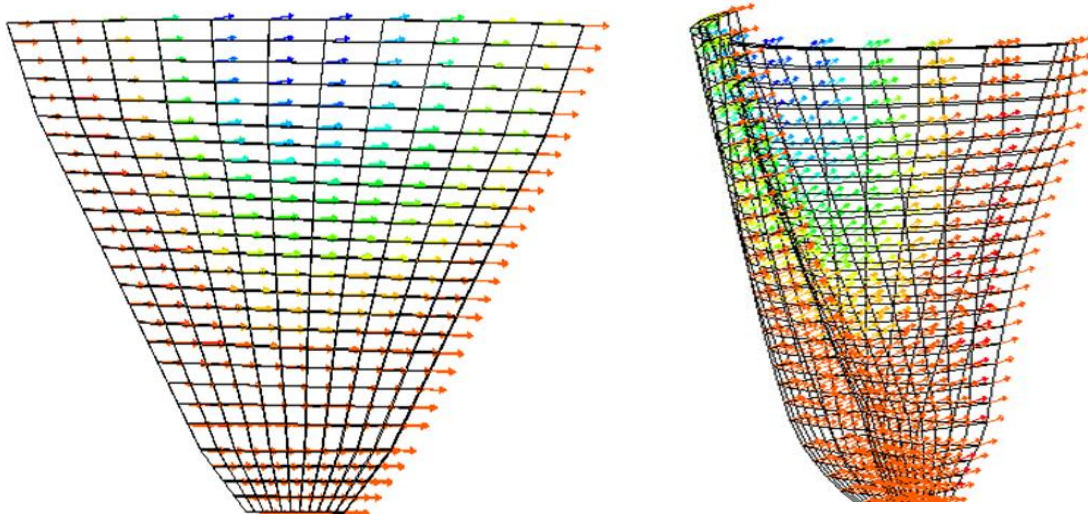
(ب)

(الف)

شکل ۹: کانتور توزیع تنش در الف) توزیع وزن ۵ مرحله ای - ب) توزیع وزنی تک مرحله ای

۴-۲- تحلیل استاتیکی بدنه تحت بار ثقلی و هیدرو استاتیکی:

تحلیل رفتار بدنه سد تحت نیروی وزن خود و نیروی فشار آب پشت سد مورد بررسی واقع شده است، لذا سد مورد نظر را تحت این شرایط قرار داده و نتایج مورد بررسی واقع می گردد. در شکل ۴-۱۱ کانتور جابجایی سد آورده شده است.

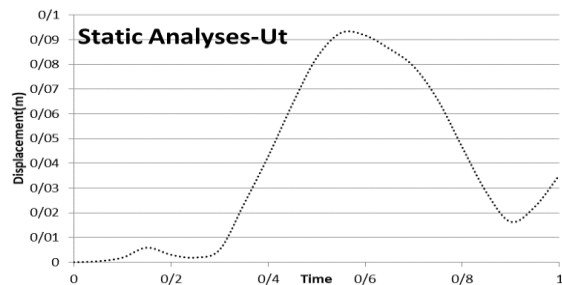
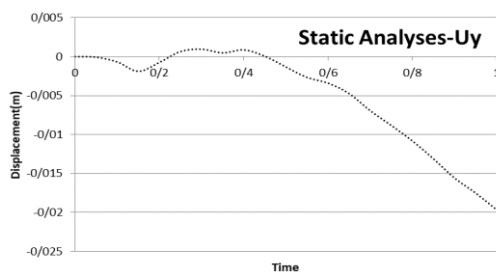


ب) کانتور برداری جابجایی کلی

الف) کانتور جابجایی افقی

شکل ۱۰: کانتور جابجایی در آنالیز استاتیکی بدنه تحت بار ثقلی و هیدرو استاتیکی

همانگونه که از شکل ۹ مشخص است بیشترین جابجایی در تاج سد رخ می دهد که در نمودار ۴-۴ نمودار جابجایی در بازه زمان تاج سد در اثر آنالیز استاتیکی بدنه تحت بار ثقلی و هیدرو استاتیکی نشان داده شده است.



نمودار ۳: نمودار جابجایی قائم

نمودار ۲: نمودار جابجایی زمان تاج سد

تاج سد

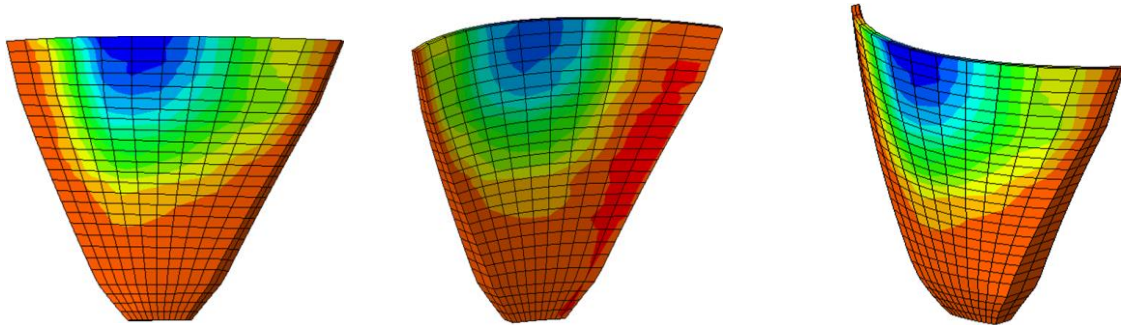
در اثر آنالیز استاتیکی بدنه تحت بار

در اثر آنالیز استاتیکی بدنه تحت بار ثقلی و هیدرو استاتیکی

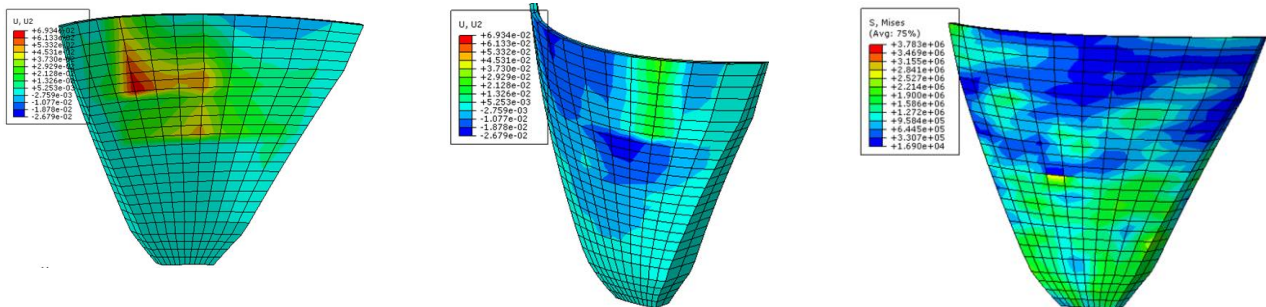
ثقلی و هیدرو استاتیکی

۵-۲- آنالیز استاتیکی بدنه تحت بار ثقلی:

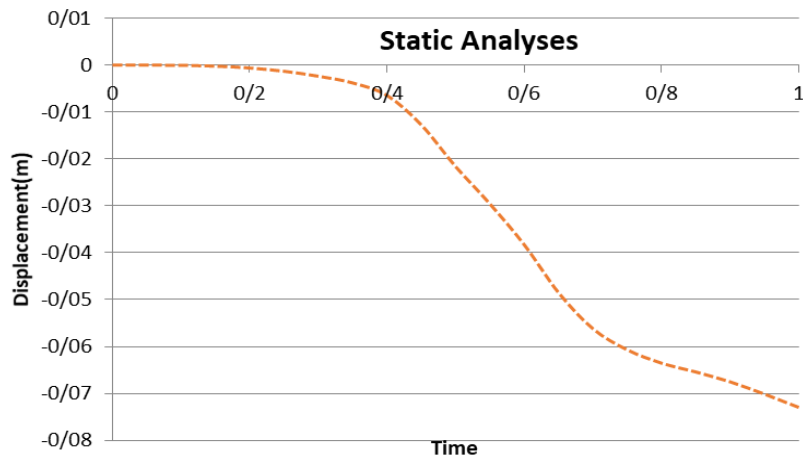
این بار به تنهایی بدنه تحت بار ثقلی قرار می‌گیرد و نشست آن و جابجایی کلی آن بررسی می‌گردد. شکل ۱۰ نمایش دهنده کانتور جابجایی بدنه سد تحت بار ثقلی می‌باشد.



شکل ۱۱: کانتور جابجایی کلی بدنه تحت بار ثقلی



شکل ۱۲: کانتور نشست بدنه تحت بار ثقلی



نمودار ۵: نمودار نشست قائم بدنه تحت بار ثقلی

جدول ۳: جابجایی قائم و کلی مدل تحت آنالیز استاتیکی

جابجایی کلی (سانتیمتر)	جابجایی قائم یا نشست (سانتیمتر)	
۹	۱/۹	آنالیز استاتیکی تاج سد تحت بار ثقلی
۷/۳	۷/۲	آنالیز استاتیکی بدنه تحت بار ثقلی

۲-۶- بارگذاری زلزله با تابنگاشت سطح پایه محتمل (MCL):

تحلیل‌های دینامیکی سازه سد در این مطالعه با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در محل پی و به کارگیری محاسبات متعارف دینامیک سازه‌ها انجام می‌شود. شتاب زمین بر اساس شرایط شتاب نگاشتهای موجود تعیین می‌شود. شتابنگاشتها تنها در جهت افقی یا همان امتداد اصلی بدنه سد اثر داده می‌شوند. در این تحلیل میرایی خطی ۵٪ در نظر گرفته شده است. ($\alpha=1.0485, \beta=0.0018$)

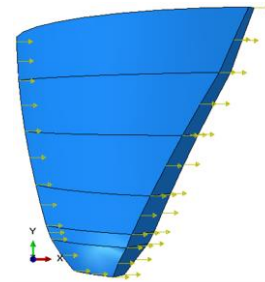
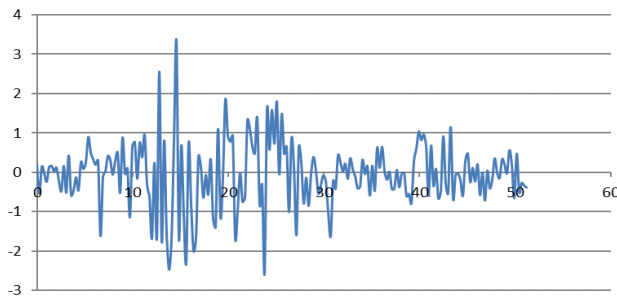
با توجه به مطالعات لرزه خیزی ساختگاه سد دز شتاب بیشینه زمین مطابق با جدول ۵ تخمین زده شده است. در مدلسازی‌ها جهت مدلسازی بار دینامیکی از زلزله شامل سه زلزله سطح پایه محتمل (Maximum Credible Level) در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: شتاب‌های بیشینه در ساختگاه سد

شتاب بیشینه عمودی	شتاب بیشینه افقی	سطح زلزله
0.26 g	0.49 g	سطح حداکثر محتمل MCL

جدول ۵: خلاصه زلزله های استفاده شده جهت مدلسازی های دینامیکی

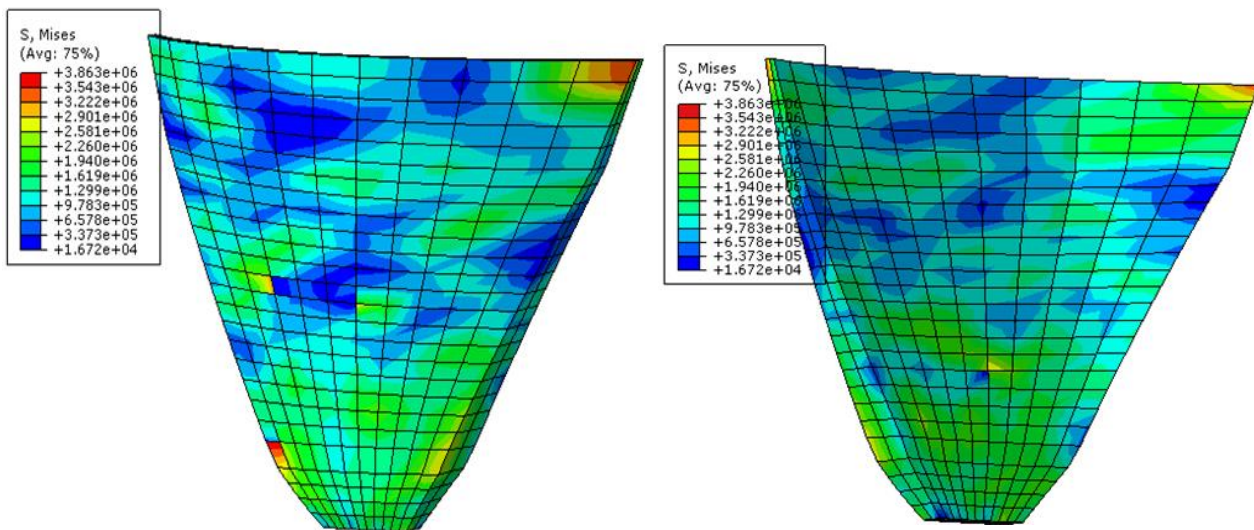
سطح زلزله	نام زلزله	بزرگی زلزله	بیشینه شتاب زلزله		
			عمودی	افقی	افقی
سطح حداکثر محتمل MCL	Irpinia	6.8	0.347 g	0.349 g	0.238 g
	Landers	7.3	0.382 g	0.325 g	0.207 g
	Manjil	7.3	0.336 g	0.372 g	0.257 g



نمودار ۶: شتابنگاشت منجیل در جهت X

شکل ۱۳: محل اعمال زلزله در جهت X

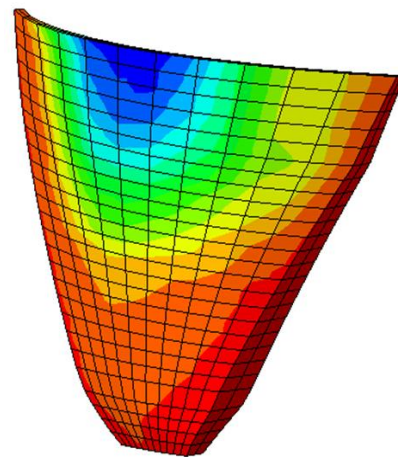
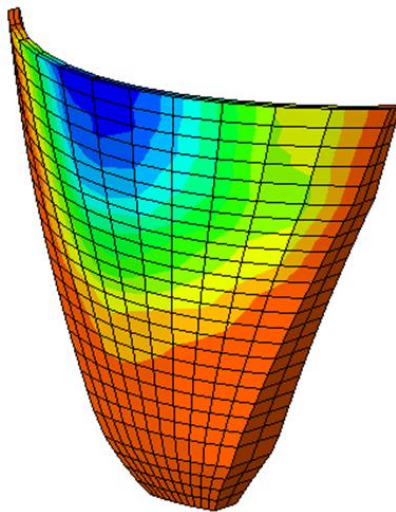
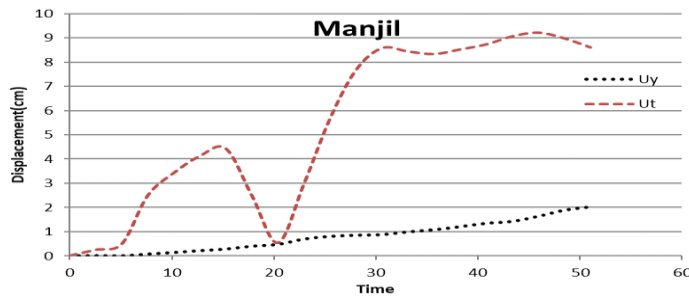
پس از اعمال بارگذاری شتابنگاشت زلزله منجیل بر روی سد بتنی قوسی دز تنش های کششی ایجاد شده در ادامه و در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۴: شکل تنش کششی توزیع یافته در سد دز تحت بارگذاری زلزله منجیل

همان گونه که از شکل ۱۴ مشخص است میزان تنش در گوشه های سد و در محل اتصال سد به زمین و در قسمت پایین دست

بیشینه مقدار را دارد و آشفستگی ایجاد شده در سد باعث بالا رفتن نیروهای درونی در سازه می‌گردد، این نیروها به صورت انباشته به سد وارد می‌شوند. بدیهی است که تنش‌هایی در سد به ازای این نیروها ایجاد می‌گردد. این تنش‌ها در کف و پایین دست ایجاد گشته و به کل سد انتقال می‌یابد. تنش‌های ایجاد شده در حالت کششی وقتی که از مقاومت کششی بتن فراتر می‌رود سبب ایجاد ترک خوردگی و آسیب می‌گردد.



نمودار ۷: نمودار جابجایی سد تحت زلزله منجیل

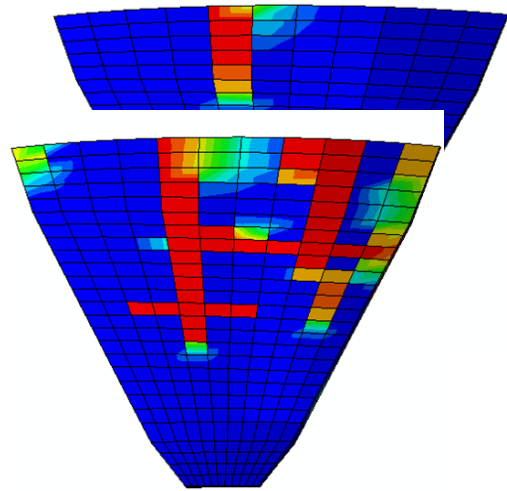
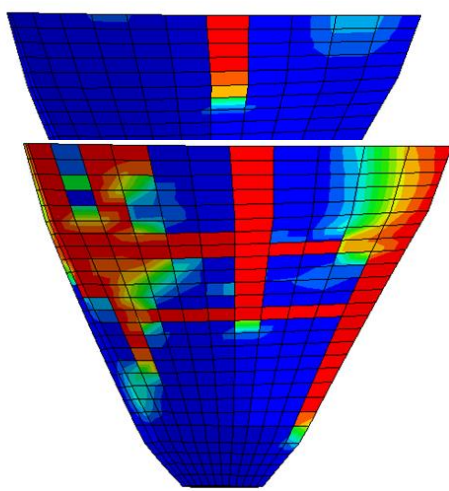
(ب)

(الف)

شکل ۱۵: کانتور جابجایی (الف) در جهت قائم و (ب) کلی

۳-۷- آسیب دیدگی سد بتنی قوسی:

با اعمال شتابنگاشت زلزله منجیل به مدل سد در ملاحظه می‌گردد که سد در نقاط اتصال به فونداسیون مستعد آسیب دیدگی می‌باشد، در زیر و در شکل ۴-۲۳ کانتور آسیب بتن در سد در ابتدا و انتهای بارگذاری نمایش داده شده است.





شکل ۱۶: کانتور آسیب سد دز تحت زلزله منجیل در بالادست و پایین دست

۸- تفسیر نتایج

قسمت مهمی از سدهای موجود در ایران را سدهای بتنی تشکیل می‌دهند. به طور کلی ارزیابی نتایج ارائه شده در این مقاله با توجه به تحلیل‌های انجام شده به صورت زیر ارائه می‌گردند. لازم به ذکر است که این نتایج عمومی نبوده و تنها با سازه مورد بررسی و رکورد زلزله به کار گرفته شده مرتبط هستند.

- شکست یک شکل مهم از تغییر شکل و خرابی در پهنه سازه‌های بتنی است. در جهت دقت در پیش بینی رفتار شکست، اغلب لازم است تا تحلیل المان محدود صورت گیرد.

- رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی، با در نظر گرفتن اندرکنش سد-دریاچه و پدیده‌های غیرخطی مانند ترک خوردگی و رفتار غیرخطی مصالح بتن، توسط تکرار تحلیل خطی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا روش تکرار تحلیل خطی به گونه‌ای تغییر یافته است که اثرات پدیده‌های مذکور در رفتار لرزه‌ای سدها لحاظ شود. بررسی نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که روش مذکور می‌تواند برای تحلیل‌های اولیه و نیز ارزیابی ایمنی سدهای موجود مفید واقع شود.

- تحلیل‌های انجام شده روی سد دز، بیانگر تجمع تنش کششی اصلی در گردن سد (در محل تغییر شیب در پایین دست و تقریباً روبروی آن در بالادست) می‌باشد، که نتایج تحلیل به صورت دقیق‌تر نتایج فوق را تأیید می‌نماید.

- مقادیر تنش‌ها در محل تمرکز در تحلیل‌ها غیرخطی، تجاوز از محدوده خطی را نشان می‌دهد و ترک در این نواحی انتظار می‌رود.

- تحلیل‌های غیرخطی، شروع ترک از محل تغییر شیب در پایین دست را تایید کرده و این ترک پس از تمایل به گسترش در وجه مقابل (بالادست) نیز ترک خوردگی آغاز می‌گردد.

- با مطالعه نتایج می‌توان به این نکته رسید که بیشترین آسیب‌های وارده به سد دز در زلزله منجیل بوده است و علت آن را می‌توان به قوی تر بودن این زلزله مرتبط دانست.

میزان تنش در گوشه‌های سد و در محل اتصال سد به زمین و در قسمت پایین دست بیشینه مقدار را دارد و آشفتنگی ایجاد شده در سد باعث بالا رفتن نیروهای درونی در سازه می‌گردد، این نیروها به صورت انباشته به سد وارد می‌شوند. بدیهی است که تنش‌هایی در سد به ازای این نیروها ایجاد می‌گردد. این تنش‌ها در کف و پایین دست ایجاد گشته و به کل سد انتقال می‌یابد. تنش‌های ایجاد شده در حالت کششی وقتی که از مقاومت کششی بتن فراتر می‌رود سبب ایجاد ترک خوردگی و آسیب می‌گردد.

- مدل دارای ۵ مرحله بارگذاری وزنی علاوه بر شرایط مناسب تنش در تکیه گاه‌ها دارای شرایطی نزدیک به واقعیت است. بیشترین جابجایی ایجاد شده در تاج سد در اثر اعمال زلزله به بزرگی ۷,۳ ریشتر مربوط می‌شود که به میزان ۱۴۰ میلی‌متر است که خود معرف شدت آسیب دیدگی‌ها در اثر اعمال این بارگذاری در سد دز می‌باشد.



۹- منابع و مراجع

- (۱) جباری، م.م. - "جزوه اصول مهندسی سد"، انتشارات دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات فارس - ۱۳۹۰
- (۲) مهدوی نژاد سیامک - ۱۳۸۸ - "مهندسی سد" - انتشارات دریای اندیشه
- (۳) گزارش شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس در زمینه سد کارون ۳ - ۱۳۸۵
- (۴) عمو شاهی، محسن ۱۳۸۶ "آسیب شناسی سدهای بتنی تحت اثر بارهای مختلف با تکیه به بار زلزله". پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس.
- (۵) مردفکری، مریم ۱۳۸۵ "کاربرد تحلیل های ساده شده ی غیر خطی در سدهای بتنی وزنی، پایان نامه کارشناسی ارشد - دانشگاه تهران
- (۶) آنالیز عددی - دیوید کینکید - وارد چنی - فائزه توتونیان - منصوره صائمی - انتشارات دانشگاه امام رضا (ع) مشهد - ۱۳۸۱
- (۷) اصغر کرایه چیان - "محاسبات عددی برای دانشجویان علوم و مهندسی" - ناشر: رواق مهر - ۱۳۸۸
- (۸) محمدرضا مرادی مقدم - ۱۳۸۹ - "اثر فونداسیون در رفتار لرزه ای سدهای بتنی قوسی با در نظر گرفتن اندرکنش سد و دریاچه" - مجله فنی مهندسی دانشگاه شریف

(12) ICOLD bulletin 99 (1995) "Dam Failures, Statistical Analysis"

(13) P. Novak, A.I.B. Moffat and C. Nalluri-2005- "Hydraulic Structures"- Fourth Edition- Taylor and Francis publishment.

(14) ENGINEERING GUIDELINES FOR THE EVALUATION OF HYDROPOWER PROJECTS-1999-Chapter 11-Arch Dams"- Federal Energy Regulatory Commission Division of Dam Safety and Inspections Washington, DC 20426. ABAQUS, (2007). "Finite

(15) element method software documentation.", Release 6.10. Chong-Shien Tsai-1988- "An Improved Solution Procedure to the Fluid-structure Interaction Problem as Applied to the (16) Dam-reservoir System"- State University of New York at Buffalo Publisher.

(17) James H. McGrew - 2009 - "Basic Practice Series: FERC (Federal Energy Regulatory Committee)" - American Bar Association; 2nd Edition edition.