

بررسی اثرات بارگذاری انفجاری بر پایداری سدهای بتنی قوسی (مطالعه موردی سد کارون ۴)

حسانه قنبری^۱، رضا تارینژاد^{۲*}، فرهود کلاته^۳

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
- ۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

*r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۰/۱۵]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۱۰/۳]

چکیده- به علت اهمیت سدها، بررسی پایداری آنها در برابر بارهای ناشی از انفجار عامل مهمی در ایمنی کلی سازه است. در این تحقیق، اثرات موج ناشی از انفجار مواد منفجره (TNT) بر روی سد کارون ۴ مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور تحلیل دینامیکی سیستم سد-مخزن و تکیه‌گاه به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. برای معادلسازی بارگذاری انفجار از تئوری CONWEP استفاده شده است. پس از تحلیل عملکرد سازه تحت این بارگذاری و پاسخ سد با در نظر گرفتن شرایط مختلف تراز آب مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از آن است که تحلیل عددی سازه سد تحت اثر بار انفجار حساسیت زیادی به ابعاد المان‌های بکار رفته دارد و نیز حجم آب موجود در مخزن و ترازهای مختلف ارتفاعی تأثیر کمی بر میزان بار انفجاری لازم برای گسیختگی سد قوسی دارد.

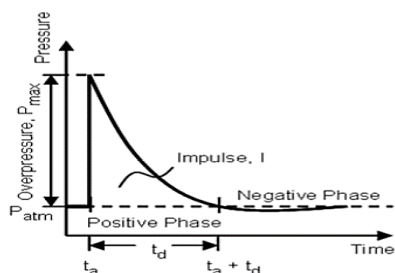
واژگان کلیدی: انفجار در هوا، تحلیل دینامیکی غیرخطی، اندرکنش سد-مخزن-تکیه‌گاه.

۱- مقدمه

بوده و اگر سازه سد قادر به مقاومت و پایداری در برابر این نوع بار نباشد عواقب جبران‌ناپذیری به دنبال خواهد. از نخستین مطالعات مرتبط با انفجار می‌توان به مطالعات K.Ramajeyathilagam و همکاران در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد. آنها یک مقایسه از اثر بار انفجار داخل آب بر روی یک صفحه مستطیلی نازک با ابعاد مشخص را به صورت عددی و آزمایشگاهی انجام داده‌اند [۱]. در سال ۲۰۰۶ Michael و همکاران تحلیل المان طیفی- المان محدود یک سازه شبیه

سدها یکی از مهم‌ترین سازه‌های ساخت بشر می‌باشند که با صرف هزینه‌های کلان ملی جهت تأمین آب مصارف مختلف شرب، کشاورزی، صنعتی و کنترل سیلاب و تولید انرژی برقآبی احداث می‌گردند. با توجه به اهمیت سازه سدها و صرف هزینه‌ی هنگفت برای ساخت آنها، ارزیابی ایمنی این سازه‌ها در برابر بارهای انفجار بسیار ضروری می‌باشد. بسته به میزان انرژی آزاد شده ناشی از انفجار، پاسخ سازه سد متفاوت

صورت احتراق گازها، انفجار هسته‌ای یا در اثر انواع مختلف بمب باشد. واحد TNT معمولاً به عنوان مرجعی برای تعیین قدرت انفجار استفاده می‌شود. از مشخصه‌های اساسی یک انفجار که باعث وارد شدن نیرو بر سازه می‌شود، می‌توان به اتفاقی بودن موقعیت انفجار، دینامیکی و گذرا بودن نیرو، زمان اثر کم (بین چند میلی‌ثانیه تا چندثانیه) اشاره کرد. در شکل ۱ نمودار تغییرات فشار ناشی از انفجار که شامل فازهای مثبت و منفی است نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمودار تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار در هوا

Borenstein و Benaroya رابطه‌ای برای محاسبه فشار بیان کرده‌اند:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & t < t_a \\ P_{\max} \left(1 - \frac{t - t_a}{t_d}\right) e^{-b \left(\frac{t - t_a}{t_d}\right)} & t_a \leq t \leq t_a + t_d \\ 0 & t > t_a + t_d \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه ۱ $P(t)$ فشار حداکثر در زمان t بعد از انفجار است، P_{\max} پیک فشار است، t_a زمان ورودی موج شوک، t_d مدت زمان لازم تا موج شوک به P_{\max} برسد و b ثابت کاهش^۱ است. P_{\max} برابر با بیشترین مقدار بین P_s فشار در سمت انفجار P_r ، ماکزیمم فشار بازتاب است [۷].

۲-۱- انواع مقیاس برای انفجار در هوا

دو نوع مقیاس برای انفجار در هوا استفاده شده است. مقیاس Sach و مقیاس Hopkinson. مقیاس Sach از مقیاس Hopkinson عمومی‌تر است و بخصوص برای پیش‌بینی مشخصات موج انفجار با شدت زیاد مانند انفجار بمب‌های اتمی مناسب‌تر است. در اینجا چون انفجار بوسیله مواد منفجره معمولی می‌باشد از مقیاس Hopkinson استفاده شده است.

بر اساس مقیاس Hopkinson وقتی دو ماده منفجره با مواد

کشتی که در معرض انفجار زیر آب قرار دارد را مورد بررسی قرار دادند [۲]. در سال ۲۰۰۸ فلاح‌زاده و همکاران به بررسی اثر انفجار بر سازه‌های سطحی و زیرزمینی پرداخته‌اند [۳]. در سال ۲۰۰۹ Langrand و همکاران یکپارچگی بدنه زیر دریایی را تحت بار انفجاری زیر آب بررسی کرده‌اند [۴]. در سال ۲۰۱۰ فراهانی و همکاران به بررسی اثر شکل‌پذیری بر رفتار قاب‌ها، تحت اثر بارهای انفجاری پرداخته‌اند [۵]. در سال ۲۰۱۰ محتشمی و همکاران ارزیابی رفتار قاب‌های فولادی در برابر بار انفجار را ارائه داده‌اند. بدین منظور، یک قاب خمشی فولادی ۳ طبقه، تحت اثر بار انفجاری تحلیل شده است [۶]. در سال ۲۰۱۰ Guzas و همکاران به بررسی شبیه‌سازی پاسخ سازه تحت بار انفجار در هوا پرداختند [۷]. در سال ۲۰۱۱ شوشتری و همکاران تحلیل دینامیکی سازه‌های نامتقارن تحت اثر بارهای انفجار را ارائه داده‌اند [۸]. در سال ۲۰۱۲ مرتضایی ارزیابی عملکرد ستون‌های بتن آرمه مقاوم‌سازی شده تحت اثر انفجار را مورد بررسی قرار داده‌است [۹]. در سال ۲۰۱۳ Zhang و همکاران شبیه‌سازی عددی مودهای گسیختگی سد بتنی وزنی تحت انفجار زیر آب را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در سال ۲۰۱۴ Wang و همکاران مشخصات پخش موج و اثرات کواویتاسیون تحت انفجار نزدیک مرز را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. در سال ۲۰۱۴ Wang و همکاران پیش‌بینی آسیب‌های وارده بر سد بتنی وزنی تحت انفجار را مورد پژوهش قرار داده‌اند [۱۲]. کلاته و همکاران در سال ۲۰۱۵ مدل‌سازی عددی اثرات بار انفجاری در داخل مخزن بر رفتار دینامیکی سدهای وزنی بتنی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳].

تا کنون تحقیقاتی که در خصوص اثر انفجار در هوا بر سازه‌ها انجام شده عمدتاً مربوط به ساختمان‌ها، بناها، سازه‌های تجاری و یا مسکونی می‌باشد و مطالعات بررسی اثر انفجار بر روی سد عمدتاً معطوف به انفجار داخل مخزن بوده است. بنابراین با توجه به جدید بودن و اهمیت زیاد موضوع، بررسی اثر انفجار بر روی سدها ضروری است.

۲- انفجار

انفجار حاصل آزاد شدن ناگهانی انرژی است که می‌تواند به

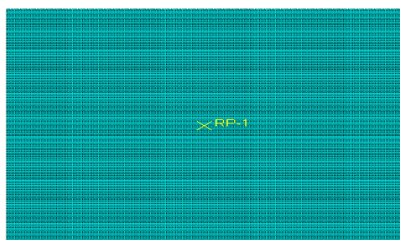
^۱ Decay constant

$$P_r = P_s \left[\frac{0.03851 P_s}{1 + 0.0025061 P_s + 4.041 \times 10^{-7} P_s^2} + 2 + \frac{0.004218 + 0.7011 P_s + 0.001442 P_s^2}{1 + 0.1160 P_s + 8.086 \times 10^{-4} P_s^2} \right] \quad (6)$$

در اینجا P_s مجدداً برابر است با اضافه فشار حداکثر بر حسب بار [۷].

۳- صحت‌سنجی نرم‌افزار

در اینجا برای صحت‌سنجی تحقیق و درست بودن تحلیل بار انفجار توسط نرم‌افزار آباکوس، مدل موجود در مقاله Emily L. Guzas توسط نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. مدل مورد نظر یک صفحه فولادی به ابعاد $3.18 \times 9.14 \times 9.14$ میلیمتر می‌باشد. در شکل ۲ مدل مش‌بندی شده صفحه نشان داده شده است. بار انفجار برابر $1/36$ کیلوگرم TNT است و در فاصله $1/52$ متری از مرکز صفحه اعمال شده است. پارامترهای مدل Johnson-Cook برای صفحه فولادی در جدول ۱ آورده شده است.

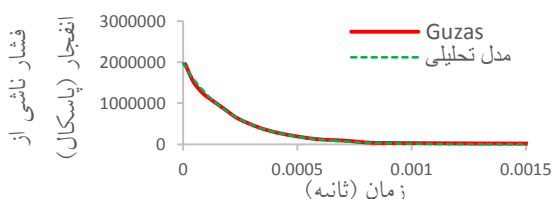


شکل ۲- مدل مش‌بندی شده صفحه فولادی

جدول ۱- مشخصات مصالح صفحه فولادی

| خواص پلاستیک | | | | | خواص الاستیک | | |
|--------------|-----|--------|-------|--------------|--------------|-------------------|-------|
| A | B | C | N | ϵ_0 | E | ρ | ν |
| MPa | MPa | | | 1/s | GPa | kg/m ³ | |
| ۳۱۹ | ۵۵۴ | ۰/۰۳۲۷ | ۰/۱۳۵ | ۰/۰۰۵۷ | ۲۰۹ | ۷۸۵۰ | ۰/۳ |

همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود خروجی‌های نرم‌افزار با نتایج مقاله انطباق خوبی دارد و این نشان‌دهنده این است که نرم‌افزار بار انفجار را به درستی مدل کرده است [۷].



یکسان و شرایط اتمسفری یکسان منفجر شوند اثرات موج شوک آنها معادل Z^1 بیان شده است.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2)$$

در اینجا R فاصله نقطه مورد نظر تا مرکز انفجار و W وزن ماده منفجره است. رابطه بیان شده مربوط به وزن ماده منفجره برابر ۱ کیلوگرم یا پوند TNT است [۷].

۲-۲- پارامترهای انفجار در هوا

معادلات پارامترهای انفجار در هوا که در این بخش اشاره شده برگرفته از روابط اصلاح‌شده Brode و Kinney و Graham است. مدت زمان اعمال بار انفجاری به طور مستقیم از رابطه Kinney و Graham محاسبه شده است:

$$\frac{t_d}{W^{1/3}} = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54} \right)^{10} \right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0.74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9} \right)^2}} \quad (3)$$

در اینجا t_d مدت زمان در لحظه فاز مثبت پروفایل انفجار بر حسب ثانیه است.

P_s (پیک فشاری که بصورت مستقیم در اثر انفجار به سازه اعمال شده) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_s = 808 P_{atm} \frac{\left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{6.9} \right)^2 \right]}} \quad (4)$$

در اینجا P_s برابر است با اضافه فشار اعمال شده به سازه در واحد بار، P_{atm} فشار اتمسفر در واحد بار و Z فاصله مقیاس شده می‌باشد.

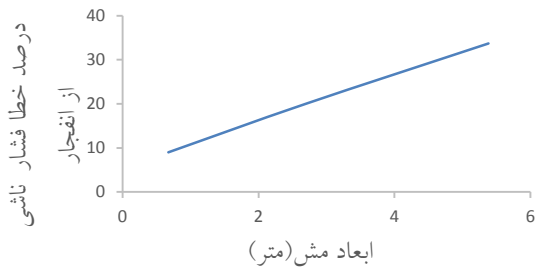
محاسبه P_s بسیار راحت‌تر از P_r است. Brode ارتباط بین P_s و P_r را به صورت رابطه زیر بیان کرده است.

$$P_r = P_s \left(2 + \frac{6P_s}{P_s + 7P_{atm}} \right) \quad P_s < 6.9 \text{ bar} \quad (5)$$

در رابطه ۵، P_r ، ماکزیمم اضافه فشار منعکس شده و P_s فشار مضاعف و P_{atm} فشار هوا است.

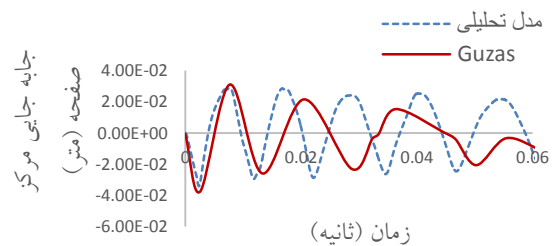
وقتی اضافه فشار $P_s \geq 6.9 \text{ bar}$ باشد، مولکول‌های هوا شروع به تعامل با یکدیگر کرده و فرض گاز ایده‌آل دیگر اعتباری ندارد. در این حالت Brode رابطه زیر را ارائه داده است:

¹ Scaled distances



شکل ۳- درصد خطای فشار ناشی از انفجار برحسب ابعاد مش

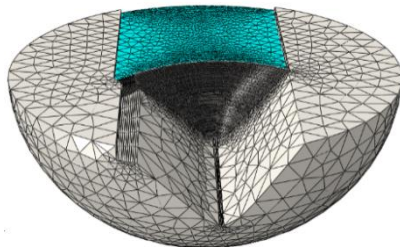
شکل ۳- مقایسه منحنی تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار



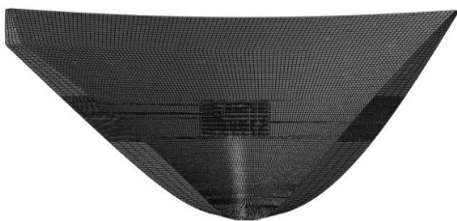
شکل ۴-مقایسه منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی مرکز صفحه

۴-۲- مدل عددی سد کارون ۴

مدل المان محدود سیستم سد-مخزن-تکیه‌گاه کارون ۴، بصورت شکل زیر مدل‌سازی شده است.



شکل ۷- مدل سد-مخزن-پی سد کارون ۴ برای ارتفاع ۱۱۵ متر



شکل ۸- مدل اجزای محدود سد کارون ۴ برای ارتفاع ۱۱۵ متری

سیستم سد-مخزن-فونداسیون و بلوک‌های فشاری مانند شکل-های ۷ و ۸ مش‌بندی شده است. برای مش‌بندی سد از آنجاکه مش سد باید خیلی ریز باشد و با این کار زمان تحلیل بسیار بالا می‌رود، فقط مش نواحی اطراف محل انفجار بسیار ریز شده است. شکل ۸ مدل بدنه سد را تحت اثر بار انفجار در ارتفاع ۱۱۵ متری (وسط ارتفاع بدنه سد) نشان می‌دهد. که در آن برای سیستم سد ۱۵۶۷۰۶ المان خطی مکعبی شکل ۸ گرهی بکار رفته است. تکیه‌گاه بصورت بخشی از کره به شعاع سه برابر ارتفاع سد در نظر گرفته شده است و دارای ۴۱۱۳۱ المان خطی هرمی شکل ۴ گرهی است. طول مخزن ۳ برابر ارتفاع سد با ۲۵۸۹۷۷ المان خطی آکوستیک هرمی ۴ گرهی مدل شده است. همچنین بلوک فشاری شامل ۳۰۰ المان خطی

۴-۱- بررسی اثر انفجار بر سد کارون ۴



شکل ۵- سد کارون ۴

سد دو قوسی کارون ۴ در استان چهارمحال و بختیاری در فاصله ۱۸۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرکرد و چهار کیلومتری پایین‌دست محل تلاقی رودخانه‌های ارمند و بازفت واقع شده است. این سد از نوع دو قوسی بوده و دارای ارتفاع ۲۳۰ و طول تاج ۴۴۰ متر می‌باشد. ضخامت بدنه سد نیز در تراز تاج و پی به ترتیب برابر ۷ و ۵۲ متر می‌باشد.

۴-۱-۱- تحلیل حساسیت به مش

از آنجاییکه اندازه مش بر دقت پاسخ‌های ناشی از بار انفجار تأثیر زیادی دارد برای بدست آوردن مش مناسب طی چندین مرحله مش را ریز کرده تا اختلاف فشار ماکزیم ناشی از انفجار با مقدار فشار ماکزیم بدست آمده از روابط ۵ و ۶ به حداقل برسد. فشار ناشی از انفجار در حالت مش با ابعاد ۵/۳۸۲۶۹۹ ، ۲/۶۹۴۰۳۶ و ۰/۶۷۳۹۱۵ متر محاسبه و با روابط تحلیلی مقایسه شد و نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که تحت مش با ابعاد ۰/۶۷۳۹۱۵ متر میزان خطا ۹٪ بوده و برای تحلیل مناسب است. شکل ۶ درصد خطای فشار ناشی از انفجار بر حسب ابعاد مش بدنه سد را برای بار ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متری نشان می‌دهد.

| | | |
|------------------------|-----------|----|
| $2600 \frac{kg}{cm^2}$ | چگالی | |
| $1000 \frac{kg}{cm^2}$ | چگالی | آب |
| ۲/۱۳ GPa | مدول بالک | |

مکعبی ۸ گرهی می باشد.

۴-۲-۱- مشخصات مصالح مدل المان محدود

مشخصات مصالح بکار رفته برای تحلیل سد کارون ۴ در جدول ۲ آورده شده است. برای مدل سازی رفتار پلاستیک و گسیختگی بتن نیز از مدل آسیب پلاستیک بتن استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح مربوط به سد کارون ۴

| | | |
|------------------------|--------------------------|--------|
| ۲۴ GPa | مدول الاستیسیته استاتیکی | بتن |
| ۳۰ GPa | مدول الاستیسیته دینامیکی | |
| ۰/۲ | ضریب پواسون | |
| $2400 \frac{kg}{cm^2}$ | چگالی | |
| ۱۰ GPa | مدول الاستیسیته دینامیکی | سنگ پی |
| ۰/۳ | ضریب پواسون | |

تاج، ۱۱۵ متری (میانه سد) و ۵ متری (نزدیک کف سد) بررسی شده است. در ابتدا برای هر ارتفاع بعد از چندین بار تحلیل، کمترین باری که با آن سد دچار گسیختگی می شود، محاسبه گردیده است و خروجی ها بر حسب آن محاسبه شده اند. محل انفجار در هر سه حالت در فاصله ۱۰ متری از سد در نظر گرفته شده است. تمامی این حالات برای دو حات مخزن پر و خالی بررسی شده است.

۵-۱-۱-۱- نتایج تحلیل دینامیکی در حالت مخزن پر

در این حالت پاسخ سیستم سد برای سه ارتفاع مختلف قرارگیری بار انفجاری برابر ۲۲۵ متری، ۱۱۵ متری و ۵ متری از کف سد و وقتی که آب مخزن در تراز نرمال قرار دارد، بررسی شده است. در تمامی سه حالت در ابتدا وزن ماده منفجره ای که موجب گسیختگی سازه می گردد، با طی یک فرایند سعی و خطا محاسبه می شود. بدین منظور تحلیل های متعددی با مقادیر مختلف ماده منفجره شامل ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم تی-ان تی برای ارتفاع ۲۲۵ متری، ۱۸۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم تی ان تی برای ارتفاع ۱۱۵ متری و ۱۵۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم تی ان تی برای ارتفاع ۵ متری انجام شده است. بطوریکه در حالت مخزن پر هنگامی که محل انفجار در ارتفاع

۵- نتایج

در این قسمت سیستم سد- مخزن- تکیه گاه تحت بارهای انفجار در ارتفاعات مختلف تحلیل شده و خروجی های هر قسمت با یکدیگر مقایسه شده است.

۵-۱-۱-۱- حالت های بررسی بار انفجار

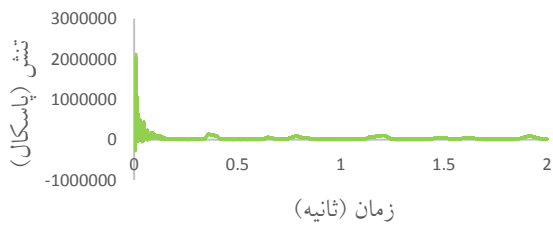
بار انفجاری در سه ارتفاع مختلف ۲۲۵ متری (نزدیک

۲۲۵ متری سد قرار دارد، سد تحت بار ۱۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی، وقتی در ارتفاع ۱۱۵ متری قرار دارد سد تحت بار ۲۰۰۰ کیلوگرم تی ان تی و در حالتیکه در ارتفاع ۵ قرار دارد سد تحت بار ۱۸۰۰ کیلوگرم تی ان تی دچار گسیختگی شده است.

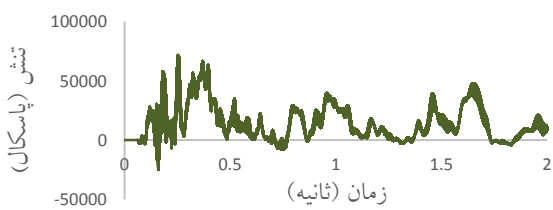
۵-۱-۱-۱-۱-۱- جابه جایی:

شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودار جابه جایی تاج سد و نقطه روبه رو محل انفجار بر روی بدنه سد را برای سه ارتفاع نشان می دهند. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، از آنجایی که محل انفجار به تاج سد نزدیک می باشد، اختلاف نمودار جابه جایی در هر دو حالت بسیار کم می باشد و از طرفی پیک جابه جایی برای هر دو حالت تقریباً در یک زمان اتفاق افتاده است. در شکل ۱۰، انفجار در ارتفاع ۱۱۵ متری اتفاق افتاده که مشاهده می شود چون محل انفجار از تاج فاصله دارد، زمان جابه جایی ماکزیمم در تاج و محل انفجار متفاوت است. در اینجا ماکزیمم جابه جایی تاج در لحظه ۰/۴ ثانیه اتفاق افتاده است. در شکل ۱۱ به دلیل فاصله زیاد محل انفجار تا تاج سد، پیک جابه جایی در محل انفجار در همان لحظات اول اتفاق افتاده اما در تاج تقریباً در لحظه ۰/۷۳ ثانیه رخ داده که این مقدار تقریباً دو برابر مقدار مشابه در حالت انفجار در میانه سد

مشاهده می‌شود ماکزیمم تنش تاج در ارتفاع ۲۲۵ متری به دلیل نزدیک بودن بار انفجاری به تاج سد اتفاق افتاده و مقدار آن برابر ۲/۱۳ مگاپاسکال بدست آمده است.

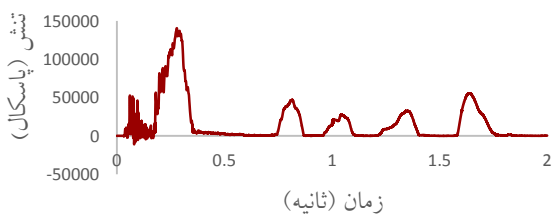


(الف)

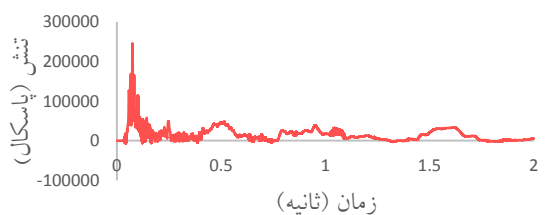


(ب)

شکل ۹- منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی در ارتفاع ۲۲۵ متر
شکل ۱۰- تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۲۲۵ متر (الف) تاج سد (ب) کف سد



(الف)



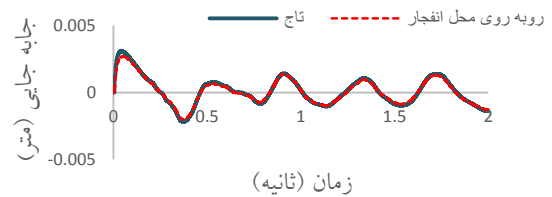
(ب)

شکل ۱۱- منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی در ارتفاع ۵ متر
شکل ۱۲- تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۱۱۵ متر (الف) تاج سد (ب) کف سد

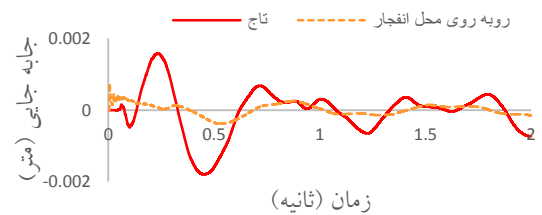


(الف)

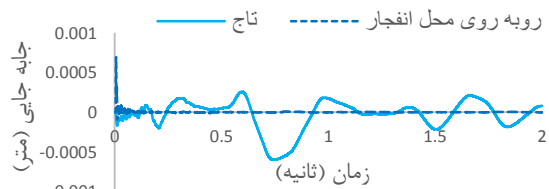
است. با مقایسه مقادیر جابه‌جایی در سه ارتفاع مشاهده می‌شود که میزان جابه‌جایی حداکثر در ارتفاع ۲۲۵ متری، حدود ۳/۱۲ میلی‌متر و در جهت مخزن، در ارتفاع ۱۱۵ متری، ۱/۸ میلی‌متر و در جهت پایین‌دست و در ارتفاع ۵ متری ۰/۶ میلی‌متر است. حداکثر جابه‌جایی گره روبه‌روی محل انفجار در ارتفاع ۲۲۵ متری از همه بیشتر و به ترتیب در ۱۱۵ و ۵ متری کم شده است.



شکل ۹- منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی در ارتفاع ۲۲۵ متر



شکل ۱۰- منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی در ارتفاع ۱۱۵ متر



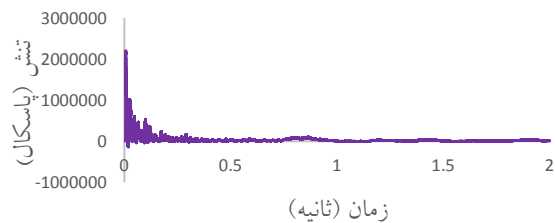
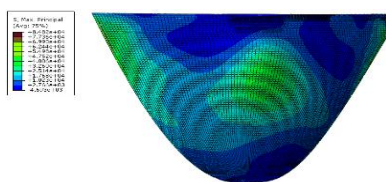
شکل ۱۱- منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی در ارتفاع ۵ متر

۵-۱-۱-۲- تنش:

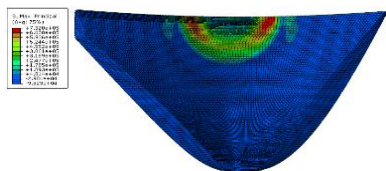
کانتورهای تنش مطابق شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ برای سه ارتفاع و دو حالت مختلف شامل، لحظه‌ای که بیشترین مقدار جابه‌جایی اتفاق افتاده و زمان یک ثانیه آورده شده است. در لحظه‌ی وقوع جابه‌جایی ماکزیمم در بدنه سد تنش به ترتیب ۰/۷۳۲ مگاپاسکال برای بار انفجار در ارتفاع ۲۲۵ متری، ۰/۱۸۱۰ مگاپاسکال در ارتفاع ۱۱۵ متری و برابر ۰/۳۸۴۲ مگاپاسکال در ارتفاع ۵ متری بدست آمده است.

نمودارهای تنش برای تاج و کف مطابق شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ برای سه ارتفاع مختلف رسم شده است. همانطور که

(الف)

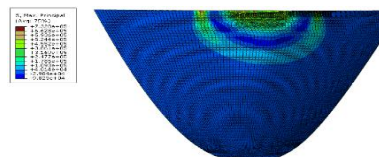
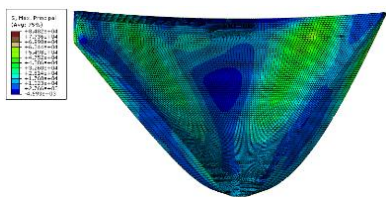


(ب)

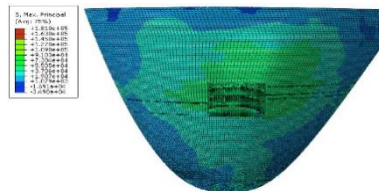


(ب)

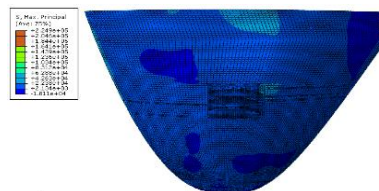
شکل ۱۴- تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۵ متر (الف) تاج سد (ب) کف سد



شکل ۱۵- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۲۵متری: (الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه‌جایی (ب) زمان ۱ ثانیه

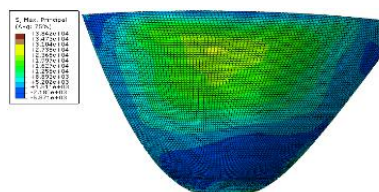
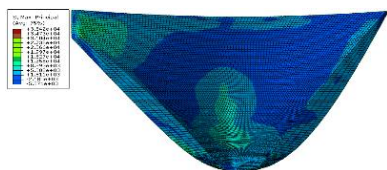


(الف)



(ب)

شکل ۱۶- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۱۵متری: (الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه‌جایی (ب) زمان ۱ ثانیه



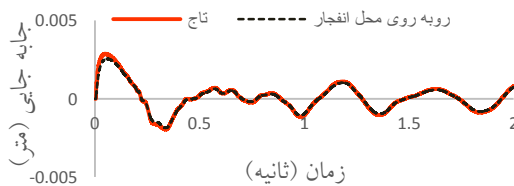
(الف)



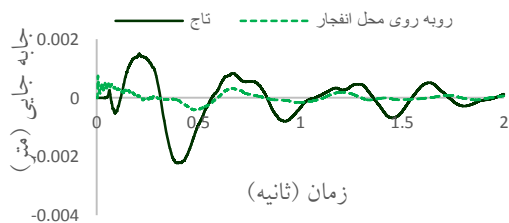
(ب)

شکل ۱۷- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۵ متری: (الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه‌جایی (ب) زمان ۱ ثانیه

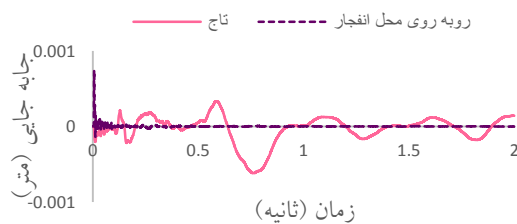
حداکثر در تاج رخ داده است. با مقایسه جابه‌جایی تاج در سه ارتفاع مشاهده می‌شود که در ارتفاع ۲۲۵ متری به دلیل نزدیک بودن محل انفجار به تاج، بیشترین جابه‌جایی اتفاق افتاده است. جابه‌جایی روبروی محل انفجار در ارتفاع ۲۲۵ متری برابر $2/55$ میلیمتر، در ارتفاع ۱۱۵ متری برابر $0/75$ میلیمتر و در ارتفاع ۵ متری برابر $0/74$ است.



شکل ۱۸- منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی در ارتفاع ۲۲۵ متر



شکل ۱۹- منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی در ارتفاع ۱۱۵ متر



شکل ۲۰- منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی در ارتفاع ۵ متر

۵-۱-۲-۲- تنش:

کانتورهای تنش برای موقعیت بار انفجاری در سه ارتفاع مختلف ۲۲۵، ۱۱۵ و ۵ متری در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. همانطور که در کانتورها مشخص است در لحظه‌ای که بیشترین جابه‌جایی اتفاق افتاده، مقدار تنش در ارتفاع ۲۲۵ متری بیشتر بوده و برابر $0/5683$ مگاپاسکال و در

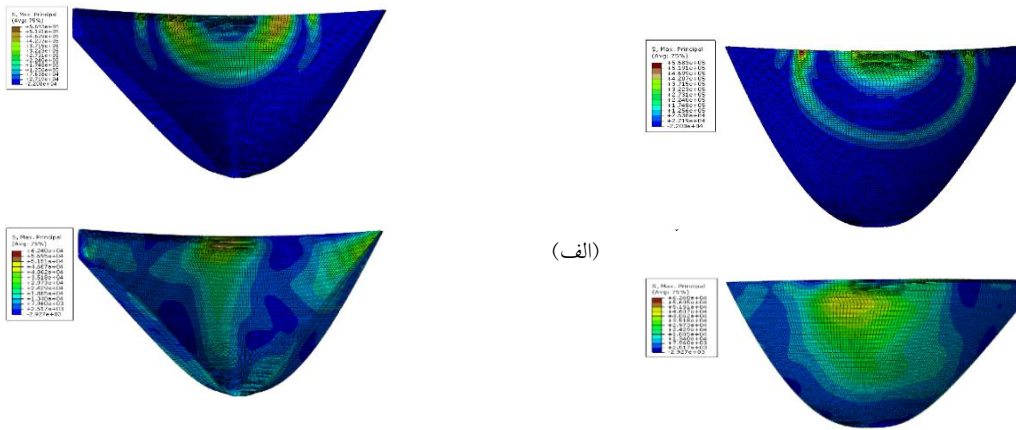
۵-۱-۲- نتایج تحلیل دینامیکی در حالت مخزن خالی

در این حالت مخزن سد خالی در نظر گرفته شده و برای سه موقعیت ارتفاعی مختلف بار انفجاری واقع در ۲۲۵ متری، ۱۱۵ متری و ۵ متری مجدداً مانند حالت قبل تحلیل‌ها انجام شده است. در ابتدا بر اساس سعی و خطا وزن ماده منفجره که سبب گسیختگی سد در هر ارتفاع شده، بدست آمده است. که در این حالت برای موقعیت بار انفجاری واقع در ۲۲۵ متری تحت بارهای ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی، برای موقعیت بار انفجاری در ۱۱۵ متری تحت بارهای ۱۹۰۰، ۱۹۵۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی و برای موقعیت بار انفجاری در ۵ متری تحت بارهای ۱۸۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی تحلیل انجام گرفته است و مشاهده شده زمانیکه محل انفجار در ارتفاع ۲۲۵ متری است سد تحت بار ۱۳۰۰ کیلوگرم، در ارتفاع ۱۱۵ متری بار ۲۰۰۰ کیلوگرم و در ارتفاع ۵ متری تحت بار ۲۰۰۰ کیلوگرم گسیخته شده است. توسط این بارها سایر تحلیل‌ها انجام گرفته است.

۵-۱-۲-۱- جابه‌جایی:

نمودارهای تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج و گره روبروی محل انفجار بر روی بدنه سد برای سه ارتفاع مورد نظر در شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۸ مشخص است، جابه‌جایی تاج و محل انفجار به یکدیگر نزدیک می‌باشد که بدلیل نزدیک بودن نقطه انفجار به تاج سد است. از طرفی زمان جابه‌جایی ماکزیمم در هر دو حالت در همان لحظات اولیه انفجار می‌باشد. در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به دلیل فاصله بین محل انفجار تا تاج سد، مشاهده می‌شود که زمان جابه‌جایی حداکثر در نقطه روبروی محل انفجار در ثانیه‌های اولیه اتفاق افتاده و چند صدم ثانیه بعد جابه‌جایی

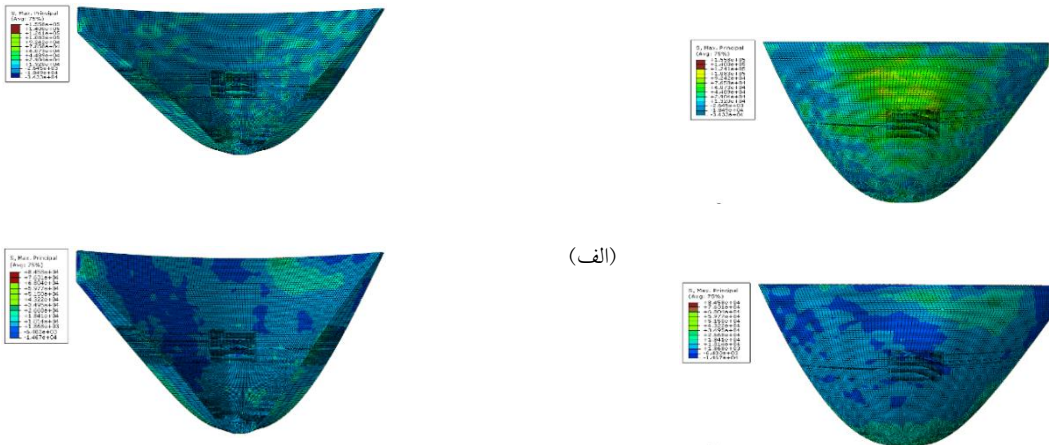
ارتفاع ۱۱۵ و ۵ متری به ترتیب برابر ۰/۱۵۵۸ و ۰/۰۵۳۸۶ مگاپاسکال بدست آمده است.



(الف)

(ب)

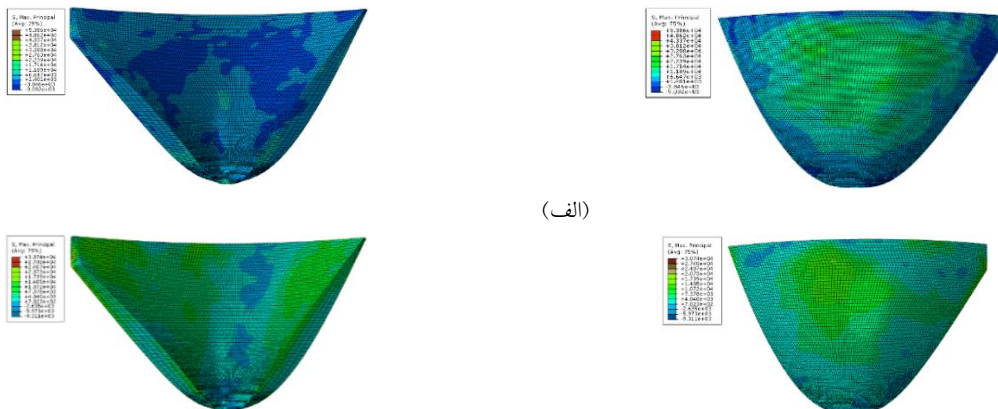
شکل ۲۱- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۲۲۵متری:(الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه‌جایی (ب) زمان ۱ ثانیه



(الف)

(ب)

شکل ۲۲- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۱۱۵متری:(الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه‌جایی (ب) زمان ۱ ثانیه

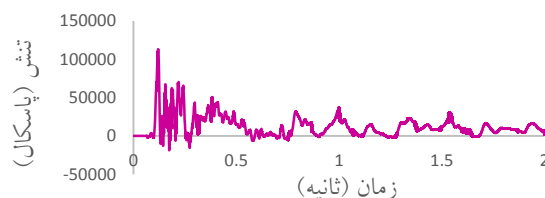
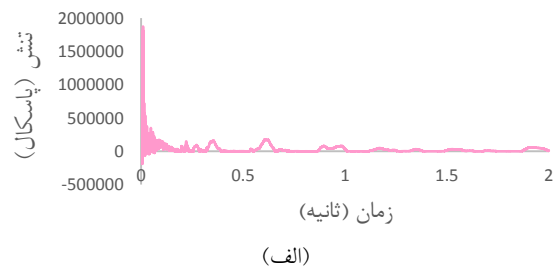


(الف)

(ب)

شکل ۲۳- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۵متری:(الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه‌جایی (ب) زمان ۱ ثانیه در شکل‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶ نمودارهای تنش نشان داده شده در ارتفاع ۵متری و نزدیک کف وارد شده است. ماکزیمم تنش در کف زمانی اتفاق افتاده که بار انفجاری

شکل ۲۶- تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۵ متر (الف) تاج سد (ب) کف سد



۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر سیستم سد-مخزن-فونداسیون سد کارون ۴ تحت بار انفجار محیطی در سه ارتفاع مختلف و دو حالت مخزن پر و خالی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح بدنه سد، به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده است.

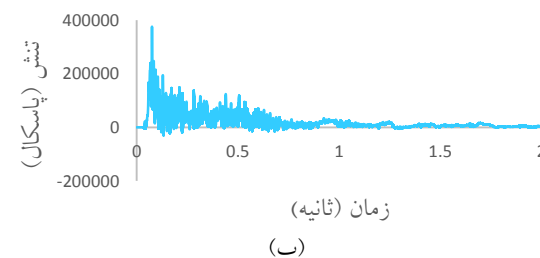
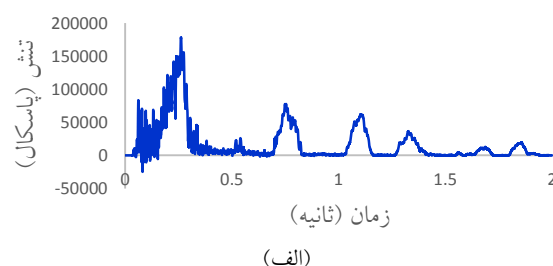
در تحلیل سیستم سد-مخزن-فونداسیون تحت بار انفجار، نتایج وابستگی بسیار زیادی به مش‌بندی را نشان می‌دهند. برای صحت‌سنجی مش‌بندی صورت گرفته، تحلیل‌های حساسیت به مش انجام شده مش با ابعاد 0.67×0.67 متر با میزان خطا کمتر از ۱۰٪، برای تحلیل مناسب تشخیص داده شده است. به منظور کم کردن زمان انجام محاسبات ناحیه‌ای از بدنه سد که در مقابل انفجار قرار داشته، با مش ریزتر و بقیه نواحی با مش درشت‌تر مدل‌سازی شده است.

بدنه سد در حالت مخزن پر در ارتفاع ۲۲۵ متری تحت بار ۱۵۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی، در ارتفاع ۱۱۵ متری تحت بار ۲۰۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی و در ارتفاع ۵ متری تحت بار ۱۸۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی گسیخته شده است.

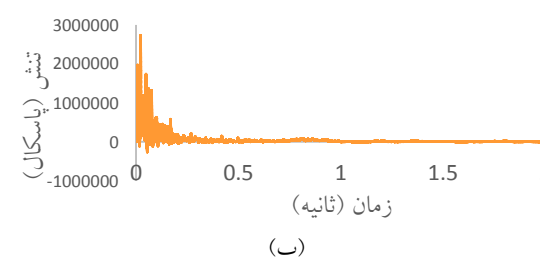
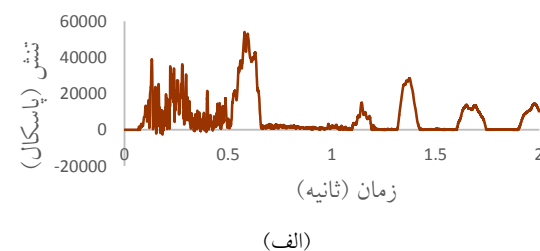
میزان بار انفجاری مورد نیاز برای گسیختگی میانه سد در دو حالت مخزن پر و خالی به ترتیب ۲۰۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی و ۲۰۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی بوده که نسبت به تاج که ۱۵۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی و ۱۳۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی است بیشتر بوده و علت آن زیاد بودن سختی بدنه در میانه نسبت به تاج می‌باشد.

با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته در سه ارتفاع ۲۲۵ متری، ۱۱۵ متری و ۵ متری، میزان جابه‌جایی تاج سد تحت بار انفجاری که در ارتفاع ۲۲۵ متری قرار دارد از دو حالت دیگر بیشتر و برابر $3/12$ و $2/7$ میلیمتر برای مخزن پر و خالی می‌باشد.

شکل ۲۴- تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۲۲۵ متر (الف) تاج سد (ب) کف سد



شکل ۲۵- تنش ناشی از بار انفجار در ارتفاع ۱۱۵ متر (الف) تاج سد (ب) کف سد



[6] محتشمی، احسان، سینایی، سینا، شوشتری، احمد، "ارزیابی رفتار سازه های فولادی در برابر بارهای انفجاری"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، ۱۳۸۹.

[7] Guzas; E.L; Earls; C. J; "Air blast load generation for simulating structural response"; Steel Composit Struct; vol. 10; 2010; pp. 429-455

[8] شوشتری، احمد، صالح آباد، مصطفی، "تحلیل دینامیکی ساختمانهای بتنی نامتقارن تحت اثر بارهای انفجار"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه سمنان، ایران، ۱۳۹۰

[9] مرتضایی، علیرضا، "ارزیابی عملکرد ستونهای بتن آرمه مقاوم سازی شده با FRP تحت اثر انفجار"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، تهران، ایران، ۱۳۹۱.

[10] Zhang; S; Wang; G; Wang; C; Pang; B; Du; C; "Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion"; Engineering Failure Analysis; Vol. 36; 2014; pp.49-64

[11] Wang; G; Zhang; S; Yu; M; Li; H; Kong; Y; "Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries"; Applied Ocean Research; Vol. 46; 2014; pp. 40-53

[12] Wang; G; Zhang; S; "Damage prediction of concrete gravity dams subjected to underwater explosion shock loading"; Engineering Failure Analysis; Vol. 39; 2014; pp72-91

[13] نوروزی، فردین، کلاته، فرهود، قنبری، حسانه، "مدلسازی عددی اثرات بار انفجاری در داخل مخزن بر رفتار دینامیکی سدهای وزنی بتنی"، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تبریز، ۱۳۹۴

تحلیل سد-مخزن-فونداسیون در دو حالت مخزن پر و خالی نشان دهنده این است که، زمانی که مخزن خالی است میزان بار انفجار مورد نیاز برای گسیخته شدن سد نسبت به حالت مخزن پر تغییر زیادی نداشته و معمولاً اندکی کاهش داشته است. مثلاً برای انفجار در ارتفاع ۲۲۵ متری در حالتی که مخزن پر است تحت بار ۱۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی و زمانی که مخزن خالی است تحت بار ۱۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی گسیخته شده است.

۷- منابع

[1] Ramajeyathilagam; K; Vendhan; C.P; "Deformation and rupture of thin rectangular plates subjected to underwater shock"; International Jornal Impact Engineering; vol. 30; 2004; pp. 699-719

[2] Sprague; M.A.; Geers; T.L.; "Aspectral-element/finite-element analysis of a ship-like structure subjected to an underwater explosion"; Computer methods in applied mechanics and engineering; Vol.19; 2006; pp. 2149-2167

[3] فلاح زاده، پوران، بازاریار، محمد حسن، "بررسی اثر انفجار بر سازه های سطحی زیرزمینی"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور دانشگاه سمنان، ایران، ۱۳۸۷

[4] Langrand; B; Leconte; N; Menegazzi; A; Millot; T; "Submarine hull integrity under blast loading International Journal of Impact Engineering"; vol. 36; 2009; pp. 1070-107

[5] فراهانی، احمد، هادیان فرد، محمدعلی، "بررسی اثر شکل پذیری بر رفتار قاب ها، تحت اثر بارهای انفجاری"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، ۱۳۸۹.

Effects of blast loading on the stability of concrete arch dam (Case study: Karun 4)

Abstract:

Dams are one of the most important structures which are built to prepare water for different usages such as drinking, agriculture, industrial, flood control and hydro power generation. Due to the importance of dams and increasing number of terrorist attack, Stability of dam structures against blast loading is important. Dam responses depend on magnitude of released energy and if the dam structure could not be able to resist and maintain its stability against this energy, irreparable consequences will happen. Explosion is a sudden release of energy which could be like gases combustion, nuclear explosion or any kind of bombs. TNT unit usually used as reference to determine the explosion power. Some of basic properties of an explosion are random location of explosion, transient loading and short time loading (up to few seconds). When blast loading happened, energy will released suddenly and this released energy include thermal radiation and wave scattering in air and earth. The waves which scattered in the air are the main factor to structural damage. These waves move faster than sound wave velocity and impact the structure. Due to reflex from structure surface, the pressure of these waves increased and also some air waves penetrate to structural elements from openings such as doors and windows. This process continues until all available parts of the structure affected by pressure waves. In this research, the effects of blast loading on Karun 4 dam are investigated. To this purpose, dynamic analysis of dam-reservoir-foundation system is performed by finite element model using ABAQUS software. Dam-reservoir-foundation modeled three dimensional in which reservoir length is three times greater than dam height. The foundation modeled as a hemi-sphere with a radius of three times greater than dam height. Non-linear material behavior also considered by using concrete damage plasticity method. The CONWEP theory is used to model blast loading. To verify the blast modeling theory and software abilities, a steel plate which investigated under blast loading in references has been modeled and the results shows same responses with the paper. The responses of dam are investigated under two different reservoir conditions include full and empty conditions. Analysis also done for three different explosion points in three different elevations. Explosion points are near base, mid height of dam and near dam crest respectively. All these points have 10 m distance from dam structure. TNT mass used in each noticed conditions, is the minimum amount of TNT which cause damage in dam body. The results indicate that the responses of the dam is very sensitive to mesh dimensions. The results also show, water level has not great effect on explosive mass which is needed for structural damage of the dam. In both full and empty reservoir conditions, when explosion happened near the dam crest, the displacement is more than other cases. It is noteworthy that when the explosion happened near the crest, the maximum displacement of the crest and the point in front of the explosion point, occur in same time but when the explosion point is in middle and also near the base, theses displacements are not in same time.

Keywords: Explosion in the air, Nonlinear Dynamic Analysis, Interactions of dam-reservoir-foundation,