

## بررسی تأثیر ارتفاع آب در مخزن بر پاسخ دینامیکی سد بتنی دو قوسی کارون ۴ تحت بارگذاری انفجاری در هوای آزاد

فرهود کلاته<sup>۱\*</sup>، حسانه قنبری<sup>۲</sup>، آرمان روشن روان<sup>۳</sup>

۱- استادیار ۲ و ۳- کارشناس ارشد، دانشگاه تبریز

(تاریخ وصول: ۹۶/۵/۱۰، تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۱)

### چکیده

با توجه به ضرورت ایمنی در سدها و هزینه هنگفت ساخت سد و سازه‌های جانبی آن‌ها، بررسی کامل این سازه‌ها در برابر هرگونه مخاطره اعم از انفجار ضروری می‌باشد. در این پژوهش، اثرات مخزن روی پاسخ دینامیکی سد بتنی دو قوسی کارون ۴، با در نظر گرفتن شرایط مختلف تراز آب مخزن، تحت بارگذاری انفجار مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور سیستم سد-مخزن-فونداسیون به صورت سه بعدی توسط نرم افزار المان محدود آباکوس تحلیل شده است. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد، نوسانات تراز آب مخزن تأثیر قابل توجهی در پاسخ دینامیکی سد بتنی دو قوسی در برابر بار انفجاری داشته بطوریکه در حالت سد با مخزن کاملاً پر وزن ماده انفجاری لازم برای گسیختگی نهایی سد نسبت به مخزن نیمه پر و خالی افزایشی برابر ۱۵ درصد می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** سد بتنی دو قوسی کارون ۴، تحلیل دینامیکی غیرخطی، بارگذاری انفجار، اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون.

## Investigation of Water Level in the Reservoir on Dynamic Response of Karun IV Arch Dam under Air Blast Loading

F. Kalateh\*, H. Ghanbari, A. Roshan Ravan

University of Tabriz

(Received: 8/01/2017, Accepted: 11/22/2017)

### Abstract

Safety evaluation of concrete dam under critical situations such as blast loading has gained importance in recent years due to the great number of accidental events and terrorist bombing attacks. In the present study, the dynamic response of Karun IV double curved concrete dam with considering different reservoir levels under air blast loading has been evaluated. A finite element model of dam-reservoir-foundation system is built using abaqus software. The results show that the water level of the reservoir has significant effect on dynamic response of arch dam and in the full reservoir the required weight of explosive material for failure of dam body is increased 15 percent compared to half full and empty reservoir.

**Keywords:** Karun IV Concrete Arch Dam, Nonlinear Dynamic Analysis, Air Blast Loading, Interaction of Dam - Reservoir - Foundation.

\* Corresponding Author E-mail: fkalateh@tabrizu.ac.ir

## ۱- مقدمه

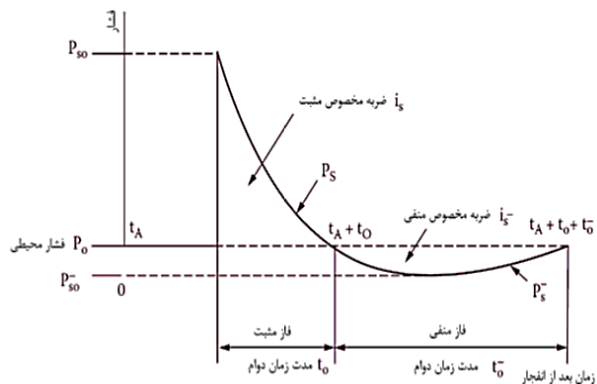
انفجاری، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل سه‌بعدی سیستم سد- مخزن- فونداسیون طراحی و تحت بار انفجار تحلیل شده است.

## ۲- بررسی اثر انفجار

انفجار حاصل آزاد شدن ناگهانی انرژی است که می‌تواند به صورت انفجار گازها، واکنش هسته‌ای یا در اثر انواع مختلف بمب باشد. یکی از رخدادهای مهمی که ممکن است بعد از انفجار در سازه‌ها اتفاق بیفتد خرابی پیش‌رونده می‌باشد. خرابی پیش‌رونده با حذف ظرفیت باربری موضعی قسمت کوچکی از سازه آغاز می‌شود، و در ادامه به سایر المان‌های سازه‌ای منتقل می‌شود. این خرابی ممکن است در کل سازه یا سطح وسیعی از آن گسترش پیدا کند.

## ۲-۱- انفجار در مجاورت از سازه در هوای آزاد

شکل عمومی تاریخچه فشار- زمان مربوط به موج شوک یک انفجار در هوای آزاد، در شکل (۱) نشان داده شده است. جبهه موج به دلیل افزایش ناگهانی فشار ناشی از وقوع انفجار، عمودی است. فشار حداکثر ناشی از انفجار که با  $p_0$  نشان داده می‌شود، در انتهای این فاز (فاز افزایش فشار) ایجاد می‌شود. سرعت انتشار  $V$  با زمان و فاصله کاهش می‌یابد، ولی معمولاً از مقدار سرعت صوت در محیط بیشتر است. جبهه شوک در زمان  $t_A$  به هدف می‌رسد. بعد از گذشت  $t_r$  از زمان رسیدن موج به هدف یعنی  $t_A$ ، فشار به میزان حداکثر خود یعنی  $p_{s0}$  خواهد رسید. از آنجایی که فاصله زمان مابین رسیدن جبهه شوک به هدف و وقوع فشار حداکثر  $t_r$  بسیار کوتاه است، می‌توان فرض کرد که رسیدن به مقدار فشار حداکثر، به صورت آنی بعد از رسیدن جبهه شوک اتفاق می‌افتد. فشار حداکثر  $p_{s0}$  در مدت زمان  $t_0$  افت نموده و برابر با فشار اولیه محیط می‌شود. که این فاصله به‌عنوان فاز مثبت پالس فشار تعریف می‌گردد.



شکل ۱- نمودار تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار در هوا [۶].

بعد از این مرحله، فاز منفی اتفاق می‌افتد که به مدت  $t_0$  ادامه خواهد داشت و در این فاصله، میزان فشار از فشار اولیه محیط کمتر خواهد بود. فاز منفی در طراحی سازه‌های معمولی اهمیت چندانی ندارد (به جز

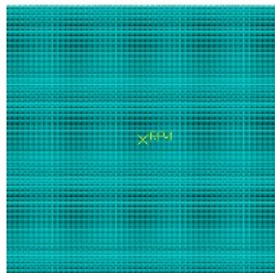
امروزه با افزایش حملات تروریستی، تحلیل و شناسایی رفتار سازه‌ها در مقابل بارهای ناشی از انفجار به‌ویژه سازه‌های مهم و زیر بنایی از جمله سدها مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. هنگامی که یک انفجار رخ می‌دهد، انتشار امواج در فضا می‌تواند منجر به بروز خسارات شدید در سازه شود. با توجه به اینکه سدها به‌طور معمول بر اساس بارهای ثقلی و لرزه‌ای متعارف مورد طراحی قرار گرفته‌اند، نیاز است عملکرد این سازه‌ها تحت بارهای ناشی از انفجار نیز مورد بررسی قرار گیرد. از نخستین مطالعات مرتبط با انفجار می‌توان به مطالعات راماجیاتیاگام و همکاران [۱] اشاره کرد. آن‌ها مقایسه‌ای از اثر بار انفجار داخل آب بر روی یک صفحه مستطیلی نازک با ابعاد مشخص را به صورت عددی و آزمایشگاهی انجام داده‌اند. ژو و همکاران [۲] بررسی عددی اثرات شوک بر سازه‌های دریایی کامپوزیتی را انجام دادند. عرب زاده و همکاران [۳] به بررسی انفجار سطحی ناشی از مواد منفجره متمرکز بر روی سازه‌های بتنی پرداخته‌اند. لانگرن و همکاران [۴] یکپارچگی بدنه زیردریایی را تحت بار انفجاری زیر آب بررسی کرده‌اند. سابرامانیام و همکاران [۵] شبیه‌سازی پاسخ انفجار یک سازه الاستیک با تأکید بر ارزیابی اثر اندرکنش سازه- سیال را بررسی کردند. گازاس و همکاران [۶] به شبیه‌سازی پاسخ سازه تحت بار انفجار در هوا پرداختند. شوشتری و همکاران [۷] تحلیل دینامیکی سازه‌های نامتقارن تحت اثر بارهای انفجار را ارائه داده‌اند. آن‌ها روش‌های تعیین پارامترهای انفجار سطحی را مورد مقایسه قرار دادند. لی و همکاران [۸] پاسخ گذرای دینامیکی پوسته کره‌ای مستغرق که از یک سمت تحت بار انفجاری زیر آب قرار دارد را بررسی کرده‌اند. ژانگ و همکاران [۹] با استفاده از شبیه‌سازی عددی مودهای گسیختگی سد بتنی وزنی تحت انفجار زیر آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده این است که با افزایش ارتفاع سد، میزان جابه‌جایی بیشینه تاج سد کاهش یافته است. وانگ و همکاران [۱۰] پیش‌بینی آسیب‌های وارده بر سد بتنی وزنی تحت انفجار را مورد پژوهش قرار داده‌اند. کلاته و همکاران [۱۱] مدل‌سازی عددی اثرات بار انفجاری در داخل مخزن بر رفتار دینامیکی سدهای وزنی بتنی را مورد بررسی قرار داده‌اند. وویاک [۱۲] به مدل‌سازی سازه مستغرق تحت بار انفجار زیر آب با آباکوس پرداخته است. اسپراگو و همکاران [۱۳] تحلیل المان طیفی- المان محدود یک سازه شبیه کشتی که در معرض انفجار زیر آب قرار دارد را مورد بررسی قرار دادند. واحدی و همکاران [۱۴] به مروری بر روش‌های تخمین بارهای انفجاری و اثرات این نوع بارگذاری بر خواص مصالح پرداخته‌اند. فلاح زاده و همکاران [۱۵] به بررسی اثر انفجار بر سازه‌های سطحی و زیرزمینی پرداخته‌اند. وانگ و همکاران [۱۶] مشخصات پخش موج و اثرات کواپتاسیون تحت انفجار نزدیک مرز را مورد بررسی قرار دادند. هدف از پژوهش حاضر مطالعه اثر انفجار در هوای آزاد بر سد بتنی قوسی است و بررسی تأثیر تراز آب داخل مخزن بر پاسخ دینامیکی آن می‌باشد. برای این منظور، ضمن ارائه مثال صحت سنجی جهت تحقیق درستی روش بکار گرفته شده در معرفی و مدل‌سازی بار

$$P_r = P_s \cdot \left( 2 + \frac{0.03851 \cdot P_s}{1 + 0.0025061 \cdot P_s + 4.041 \times 10^{-7} \cdot P_s^2} + \frac{0.004218 + 0.7011 \cdot P_s + 0.001442 \cdot P_s^2}{1 + 0.1160 \cdot P_s + 8.086 \times 10^{-4} \cdot P_s^2} \right), \quad P_s \geq 6.9 \text{ bar} \quad (5)$$

بطوریکه  $P_s$  مجدداً برابر است با اضافه فشار حداکثر بر حسب بار می- باشد [۶].

### ۳- صحت سنجی نرم افزار

در این بخش برای صحت سنجی پژوهش انجام شده تحقیق درستی مدلسازی و تحلیل بار انفجار توسط نرم افزار آباکوس و روش اتخاذ شده در مطالعه حاضر، مدل ارائه شده در مرجع [۶] توسط نرم افزار آباکوس مدلسازی شده است. مدل مورد نظر یک صفحه فولادی به ابعاد  $3.18 \times 9.14 \times 9.14$  میلیمتر می باشد. در شکل (۲) مدل مش بندی شده صفحه نشان داده شده است. به طوری که شامل  $66978$  المان خطی مکعبی شکل  $8$  گرهی می باشد. بار انفجار برابر  $1/36$  کیلوگرم TNT بوده و در فاصله  $1/52$  متری از مرکز صفحه اعمال گردیده است. مشخصات مصالح صفحه فولادی با توجه به مدل رفتاری جانسون - کوک در جدول (۱) ارائه گردیده است.



شکل ۲- مدل مش بندی شده صفحه فولادی [۶].

جدول ۱- مشخصات مصالح صفحه فولادی [۶].

خواص الاستیک				
$r$ ( $kg/m^2$ )	E (GPa)	$\nu$		
۷۸۵۰	۲۰۹	۰/۳		
خواص پلاستیک				
(MPa) A	B (MPa)	C	N	$\epsilon_0$ ( $1/S$ )
۳۱۹	۵۵۴	۰/۰۳۲۷	۰/۱۳۵	۰/۰۰۵۷

همان طور که در شکل (۳) و شکل (۴) مشاهده می شود نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس با نتایج مقاله انطباق خوبی دارند و این نشان دهنده این است که نرم افزار اثرات ناشی از بار انفجاری را به درستی مدل می نماید و همچنین تأییدی بر صحت چگونگی مدلسازی بار انفجاری توسط این نرم افزار می باشد. اختلاف مشاهده شده در جابه جایی مرکز صفحه ناشی از تفاوت در فرضیات استفاده شده در تحلیل و روش عددی می باشد [۶].

در مورد سازه هایی که در کشش ضعیف هستند، مانند سازه های خاکی مسلح و معمولاً از آن صرف نظر می شود. مقدار ضربه ای که در اثر موج انفجار به هدف وارد می گردد، برابر مساحت زیر منحنی در فاز مثبت منحنی فشار- زمان است و با  $t_s$  نمایش داده می شود [۶].

### ۲-۲- فشار ناشی از انفجار

معمول ترین روش برای مقیاس کردن انفجار، روش هایپکینز-کرانز و یا ریشه سوم می باشد. این روش برای اولین بار توسط هایپکینز در سال ۱۹۱۵ رابطه سازی شد و بعد از آن به صورت مستقل توسط کرانز در سال ۱۹۲۶، ارائه گردید. بر اساس این نگرش، پارامتر  $Z$  به عنوان فاصله مقیاس شده همانند آنچه در رابطه (۱) تعریف شده، مورد استفاده قرار می گیرد.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

در این رابطه  $W$  وزن ماده منفجره TNT بر حسب کیلوگرم و  $R$  فاصله اثر مواد منفجره بر حسب متر است [۶]. معادلات پارامترهای انفجار در هوای آزاد بر اساس مراجع [۱۷-۱۸] می باشند. مدت زمان اعمال بار انفجاری به طور مستقیم از رابطه (۲) محاسبه شده است:

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

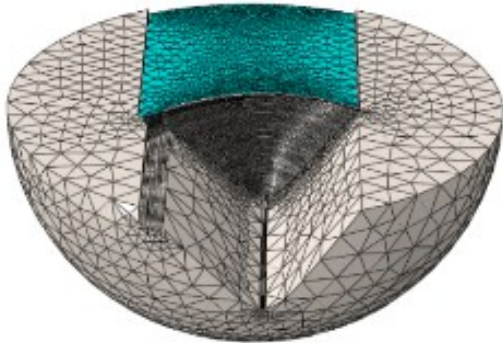
در اینجا  $t_d$  مدت زمان در لحظه فاز مثبت پروفایل انفجار بر حسب ثانیه است.  $P_s$  (پیک فشاری که به صورت مستقیم در اثر انفجار به سازه اعمال شده) طبق رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$P_s = 808 \cdot P_{am} \cdot \frac{\left[ 1 + \left( \frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left[ 1 + \left( \frac{Z}{0.048} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Z}{0.32} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Z}{1.35} \right)^2 \right]}} \quad (3)$$

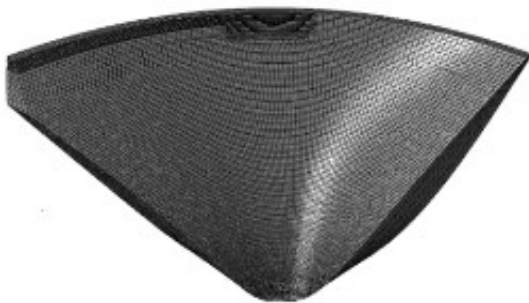
در این رابطه  $P_s$  برابر است با اضافه فشار اعمال شده به سازه در واحد بار،  $P_{am}$ ، فشار اتمسفر در واحد بار و  $Z$  فاصله مقیاس شده می باشد. محاسبه  $P_s$  بسیار راحت تر از  $P_r$  است. Brode [۱۷] ارتباط مابین  $P_r$  و  $P_s$  را به صورت رابطه (۴) بیان کرده است.

$$P_r = P_s \cdot \left( 2 + \frac{6 \cdot P_s}{P_s + 7P_{am}} \right), \quad P_s < 6.9 \text{ bar} \quad (4)$$

در رابطه (۴)  $P_r$ ، ماکزیمم اضافه فشار منعکس شده و  $P_s$  فشار مضاعف و  $P_{am}$  فشار هوا است. وقتی اضافه فشار  $P_s \geq 6.9 \text{ bar}$  باشد، مولکول های هوا شروع به تعامل با یکدیگر کرده و فرض گاز ایده آل دیگر اعتباری ندارد. در این حالت Brode [۱۷] رابطه (۵) را ارائه داده است:



شکل ۵- مدل سد-مخزن-پی سد کارون ۴ برای ارتفاع ۲۲۵ متر.



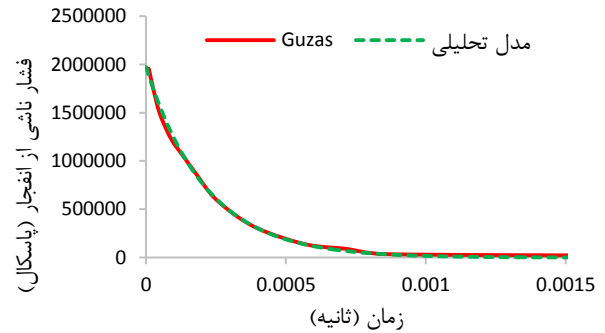
شکل ۶- مدل اجزای محدود سد کارون ۴ برای ارتفاع ۲۲۵ متری.

#### ۴-۱- مشخصات مصالح سد کارون ۴

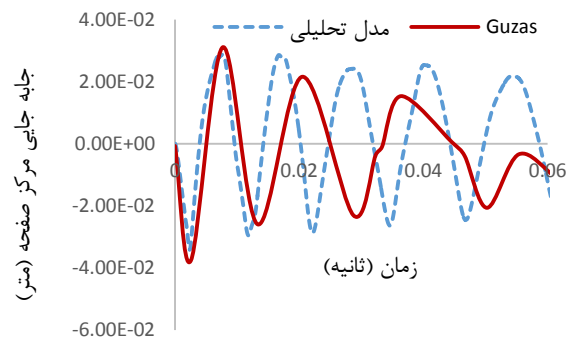
مشخصات مصالح بکار رفته برای تحلیل سد کارون ۴ در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به استفاده از مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن<sup>۲</sup> (CDP) جهت تحلیل رفتار غیرخطی مصالح بتنی بدنه سد و با توجه به توانایی این روش در مدلسازی ترک خوردگی بتن ناشی از تنش‌های کششی و خردشدگی بتن تحت تنش‌های فشاری نیاز به معرفی تغییرات آسیب کششی و فشاری نسبت به کرنش پلاستیک می‌باشد، نمودارهای تنش-کرنش تک‌محوره قابلیت تبدیل به منحنی‌های تنش-کرنش پلاستیک را دارا هستند بطوریکه با استفاده از تنش‌های داده شده و کرنش‌های غیر الاستیک توسط کاربر به برنامه معرفی می‌شوند. نمودارهای تغییرات آسیب فشاری و کششی بتن در برابر کرنش پلاستیک، در شکل (۷) ارائه شده است.

#### ۴-۲- حساسیت به مش

با توجه به ماهیت بار انفجاری که در زمان بسیار کوتاه موج ناشی از انفجار با شدت بسیار زیاد و سطح تماس اولیه کم به سازه مجاور اعمال می‌گردد، استفاده از المان‌های بسیار ریز اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. لزوم به‌کارگیری مش بندی ریز و اثرات اندازه مش مورد استفاده در مدل المان محدود، توسط لوسیونی و همکاران [۱۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد چنانچه بعد مش به میزان کافی ریز باشد، بطوریکه میزان



شکل ۳- مقایسه منحنی تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار.



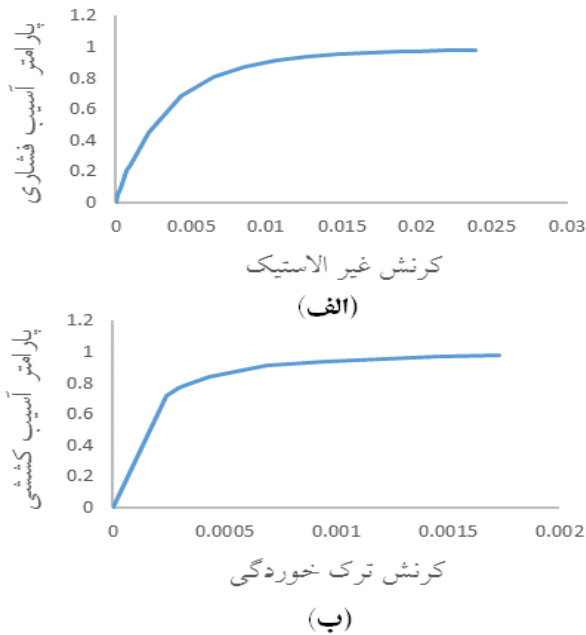
شکل ۴- مقایسه منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی مرکز صفحه.

#### ۴-۲- مدل المان محدود سد کارون ۴

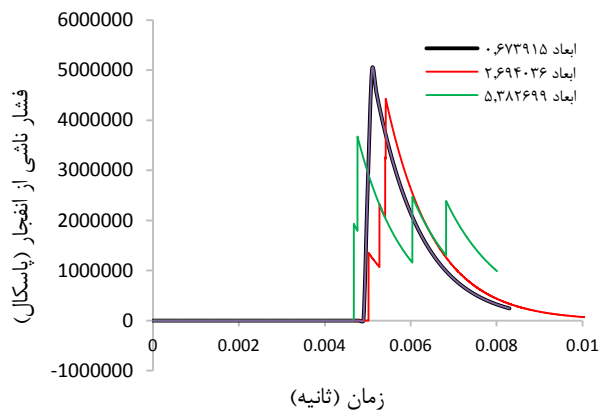
مدل المان محدود سیستم سد-مخزن-فونداسیون کارون ۴، در شکل (۵) ارائه شده است. به‌منظور افزایش راندمان و کارایی مش بندی مورد استفاده از تکنیک مش بندی با ناحیه بندی<sup>۱</sup> استفاده شده است، از آنجاکه به‌کارگیری مش ریز در کل بدنه سد موجب افزایش تعداد المان‌های مدل گردیده و زمان تحلیل به‌شدت افزایش می‌یابد، تا حد امکان مش بندی مورد استفاده در بخش‌های مختلف سد ریز گردیده ولی از مش ریزتر برای نواحی اطراف محل انفجار استفاده شده است. شکل (۶) مدل بدنه سد را تحت اثر بار انفجار در ارتفاع ۲۲۵ متری (نزدیک تاج سد) نشان می‌دهد. بطوریکه در آن برای سیستم سد ۴۵۵۹۲ المان خطی مکعبی شکل ۸‌گره‌ای بکار رفته است. فونداسیون سد به‌صورت بخشی از کره به شعاع سه برابر ارتفاع سد در نظر گرفته شده است و دارای ۴۱۱۳۱ المان خطی هرمی شکل (۴) گره‌ای است. طول مخزن ۳ برابر ارتفاع سد با ۲۵۸۹۷۷ المان خطی آکوستیک هرمی ۴‌گره‌ای مدل شده است. همچنین بلوک فشاری شامل ۳۰۰ المان خطی مکعبی ۸‌گره‌ای می‌باشد.

2- Concrete Damage Plasticity Model

1- Sub-Zone Mesh Generation Method



شکل ۷- نمودار پارامتر آسیب بتن در برابر کرنش. الف) پارامتر آسیب فشاری. ب) پارامتر آسیب کششی.



شکل ۸- مقایسه فشار ناشی از انفجار بر اساس ابعاد مش مختلف.

تحلیل در سه حالت مخزن پر (قرارگیری آب در تراز نرمال)، مخزن نیمه پر (قرارگیری آب در نصف ارتفاع) و مخزن خالی انجام گرفته است. در ابتدا وزن ماده منفجره‌ای را که موجب گسیختگی سازه می‌گردد با طی یک فرایند سعی و خطا محاسبه گردیده و در ادامه سایر تحلیل‌ها تحت بار انفجاری ناشی از چنین وزن ماده انفجاری انجام گرفته است. بدین منظور تحلیل‌های متعددی با مقادیر مختلف ماده منفجره ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی برای مخزن پر، ۱۲۵۰، ۱۳۰۰، ۱۳۵۰ و ۱۴۰۰ کیلوگرم تی ان تی برای مخزن نیمه‌پر و ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی برای مخزن خالی انجام شده است. حداقل ماده منفجره‌ای که با آن سد در سه حالت مخزن پر، نیمه‌پر و خالی دچار گسیختگی شد به ترتیب برابر ۱۵۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی به‌دست آمده است.

ریزی مش بندی بستگی به ماهیت مسئله مورد بررسی خواهد داشت، نحوه انتشار بار انفجاری و رفتار دینامیکی سازه متأثر می‌تواند به نحو دقیقی مدل گردد. مدل‌های با ابعاد مش درشت می‌تواند فقط در شبیه‌سازی کیفی انتشار بار انفجاری در محیط‌های پیچیده نظیر یک شهر شامل چند مجموع ساختمانی بکار گرفته شود. در مطالعه حاضر به‌منظور تحلیل حساسیت نتایج نسبت به ابعاد مش بندی و کالیبره نمودن دقت نتایج عددی حاصل، طی چند مرحله مش بندی مورد استفاده در مدل المان محدود به‌تدریج ریزتر گردیده فشار ماکزیمم ناشی از انفجار با مقادیر تحلیلی ارائه شده توسط رابطه (۴) و رابطه (۵) مقایسه شده است. مش‌های در نظر گرفته شده به ترتیب دارای ابعاد ۵/۳۸۲۶۹۹، ۵/۳۶، ۲/۶۹۴۰۳۶ و ۰/۶۷۳۹۱۵ متر بوده که فشار ماکزیمم آن‌ها همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است به ترتیب برابر ۳/۶۷، ۴/۴۳ و ۵/۰۱ مگا پاسکال به‌دست آمده است. با توجه به رابطه (۴) و رابطه (۵) مقدار فشار ناشی از انفجار برابر ۵/۵۴ مگا پاسکال به‌دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده این است که تحت مش به ابعاد ۰/۶۷۳۹۱۵ متر درصد خطا کمتر از ۱۰٪ گردیده بطوریکه این مقدار به‌عنوان بعد مش مناسب برای مدل المان محدود بدنه در مدل نهایی بکار گرفته شده است.

### ۵- نتایج و بحث

در این بخش رفتار بدنه سد کارون ۴ تحت بارگذاری انفجار در هوا با در نظر گرفتن شرایط مختلف تراز آب در مخزن بررسی شده است. بار انفجار در فاصله ۱۰ متری از سطح پایین دست بدنه سد و در ارتفاع ۲۲۵ متری از بستر رودخانه قرار دارد.

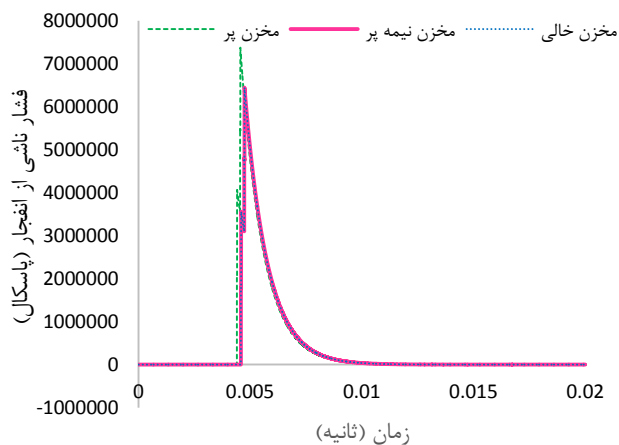
جدول ۲- مشخصات مصالح مربوط به سد کارون ۴.

۲۴ Gpa	مدول الاستیسیته استاتیکی	بتن
۳۰ Gpa	مدول الاستیسیته دینامیکی	
۰/۲	ضریب پواسون	
$24 \cdot \frac{kg}{cm^2}$	چگالی	سنگ پی
۱۰ Gpa	مدول الاستیسیته دینامیکی	
۰/۳	ضریب پواسون	
$26 \cdot \frac{kg}{cm^2}$	چگالی	آب
$1000 \cdot \frac{kg}{cm^2}$	چگالی	
۲/۱۳ Gpa	مدول بالک	

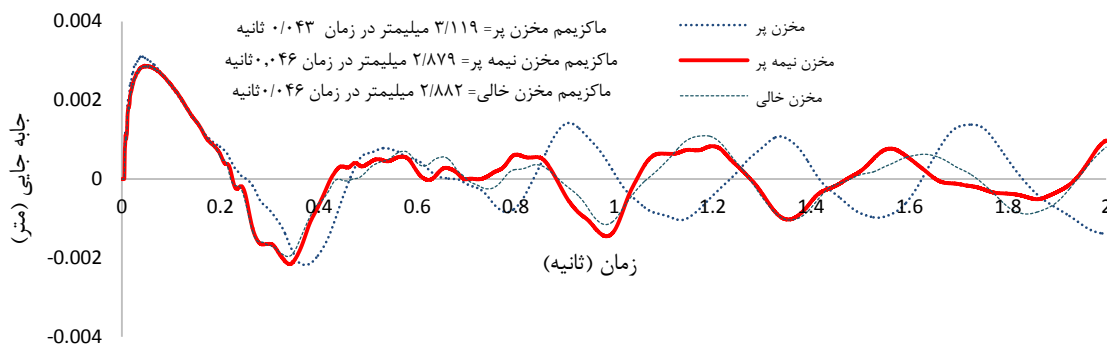
آن است که، برای موقعیت بار انفجاری فرض شده مخزن اثر کاهشی بر پاسخ سازه سد در برابر بار انفجاری دارد.

### ۵-۳- فشار هیدرودینامیک

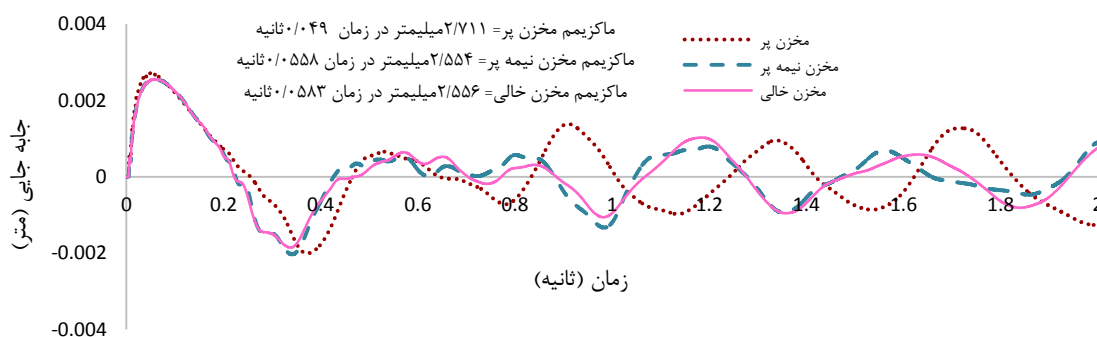
نمودارهای فشار هیدرودینامیک در پای سد برای حالت مخزن پر و نیمه پر در شکل (۱۲) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت مخزن پر نسبت به مخزن نیمه پر میزان حداکثر فشار هیدرودینامیک پای سد ۳۸٪ افزایش یافته است.



شکل ۹- نمودار فشار ناشی از انفجار.



شکل ۱۰- مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج سد در سه تراز مختلف آب در مخزن.



شکل ۱۱- مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی بدنه سد در مجاورت محل انفجار در سه تراز مختلف آب در مخزن.

### ۵-۱- فشار ناشی از انفجار

طبق رابطه (۴) و رابطه (۵) فشار ناشی از انفجار به وزن ماده منفجره و فاصله از سازه بستگی دارد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود به دلیل اینکه میزان بار انفجاری لازم جهت گسیختگی سد در حالت مخزن پر نسبت به دو حالت دیگر بیشتر بوده است میزان فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در این حالت بیشتر است. از طرفی در هر دو حالت مخزن نیمه پر و خالی به دلیل یکسان بودن بار انفجار و فاصله نمودارهای فشار بر هم منطبق شده‌اند.

### ۵-۲- جابه‌جایی

تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج سد و گره ای از بدنه سد واقع در موقعیت مقابل بار انفجاری برای سه حالت مخزن پر، نیمه پر و خالی به ترتیب در شکل (۱۰) و شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) و شکل (۱۱) نشان داده شده است، میزان جابه‌جایی تاج و گره ای از بدنه سد روبروی محل انفجار در حالت مخزن پر نسبت به دو حالت دیگر، به دلیل بیشتر بودن بار انفجاری آن بیشتر است. با توجه به اینکه میزان بار انفجار در حالت مخزن نیمه پر و خالی یکسان است. جابه‌جایی تاج در حالت مخزن نیمه پر از مخزن خالی به دلیل اثر اندرکنش مابین سد و مخزن کمتر شده است. در این حالت مخزن به‌عنوان بالشتکی ضربه‌گیر عمل نموده و اثرات کاهشی بر پاسخ سد دارد و نتایج حاکی از



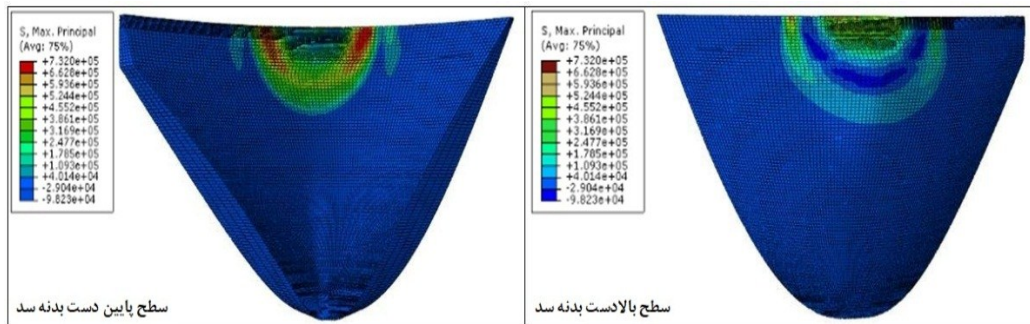


شکل ۱۲- تاریخچه زمانی تغییرات فشار هیدرودینامیک در بخش تحتانی بالادست سد.

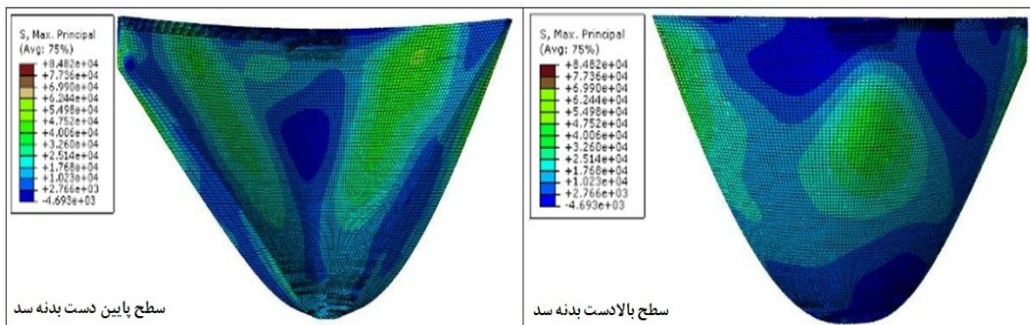
۴-۵- تنش

نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرات تنش برای دو نقطه گرهی از بدنه سد واقع در قسمت میانه در تاج سد و کف برای سه حالت مختلف ارتفاع آب در مخزن در شکل (۱۴) و شکل (۱۷) ارائه شده است. با توجه به اشکال ماکزیمم مقدار تنش در تاج سد در حالت مخزن پر در لحظه ۰/۰۸۶ ثانیه اتفاق افتاده و برابر ۲/۱۳ مگاپاسکال به دست آمده است و ماکزیمم تنش کف سد در لحظه ۰/۱۲ ثانیه در حالت مخزن خالی و برابر ۰/۱۱۳ مگاپاسکال حاصل گردیده است.

کانتورهای تنش برای سه حالت مخزن پر، نیمه پر و خالی در شکل (۱۳)، شکل (۱۴) و شکل (۱۵) برای لحظه‌ای که حداکثر جابه‌جایی اتفاق افتاده و در ثانیه یکم ارائه شده است. در لحظه‌ای که بیشترین جابه‌جایی اتفاق افتاده مقدار تنش در حالت مخزن پر ۰/۷۳۲ مگاپاسکال، در حالت مخزن نیمه پر ۰/۷۵۳۲ مگاپاسکال و در حالت مخزن خالی ۰/۵۶۸۳ مگاپاسکال و تقریباً در تاج سد اتفاق افتاده است. از طرفی مقادیر تنش در حالت ۱ ثانیه برای مخزن پر، نیمه پر و خالی به ترتیب ۰/۸۴۸۲، ۰/۱۳۶۸ و ۰/۰۶۲۴ مگاپاسکال به دست آمده است.

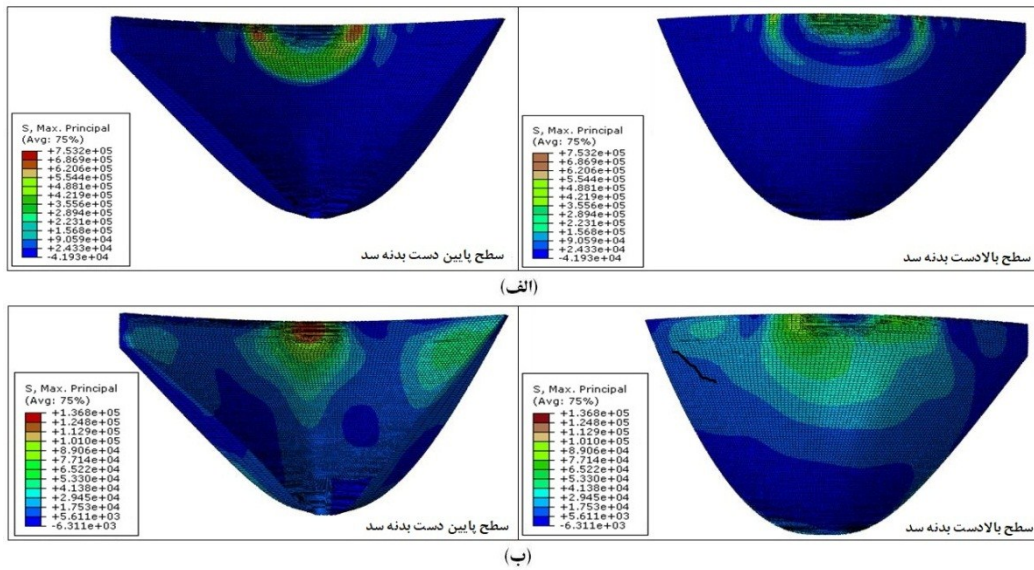


(الف)

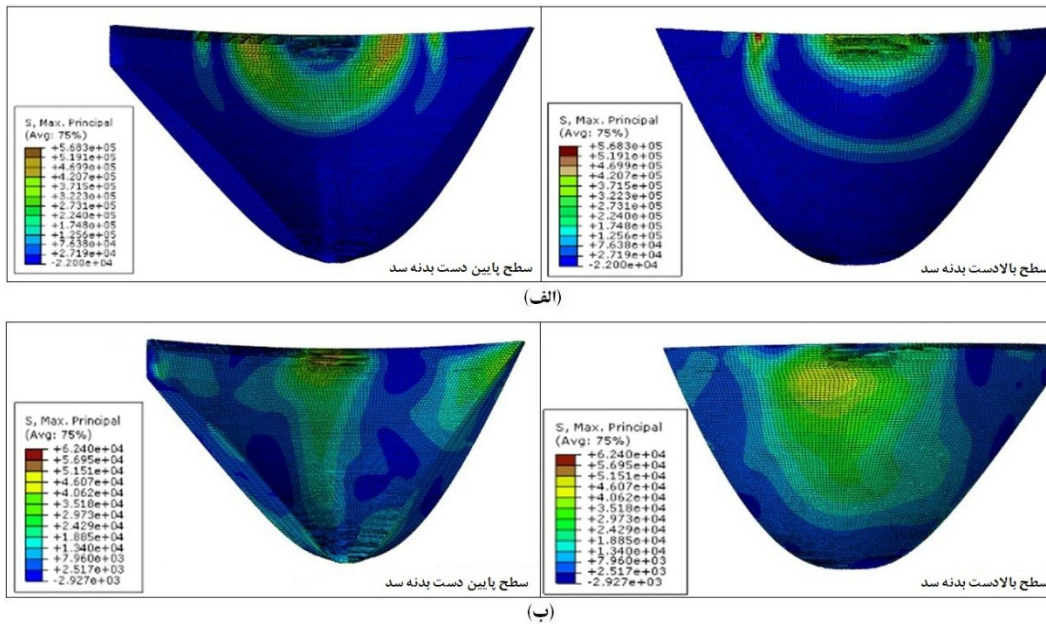


(ب)

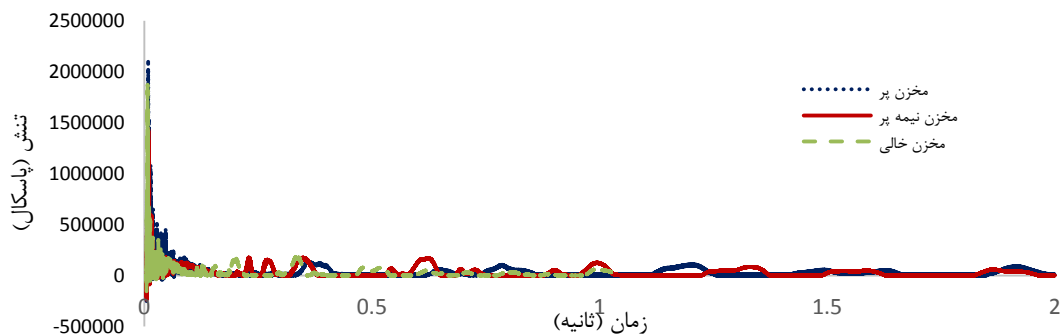
شکل ۱۳- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در حالت مخزن پر: (الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه‌جایی (ب) زمان ۱ ثانیه.



شکل ۱۴- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در حالت مخزن نیمه پر: (الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه جایی (ب) زمان ۱ ثانیه.

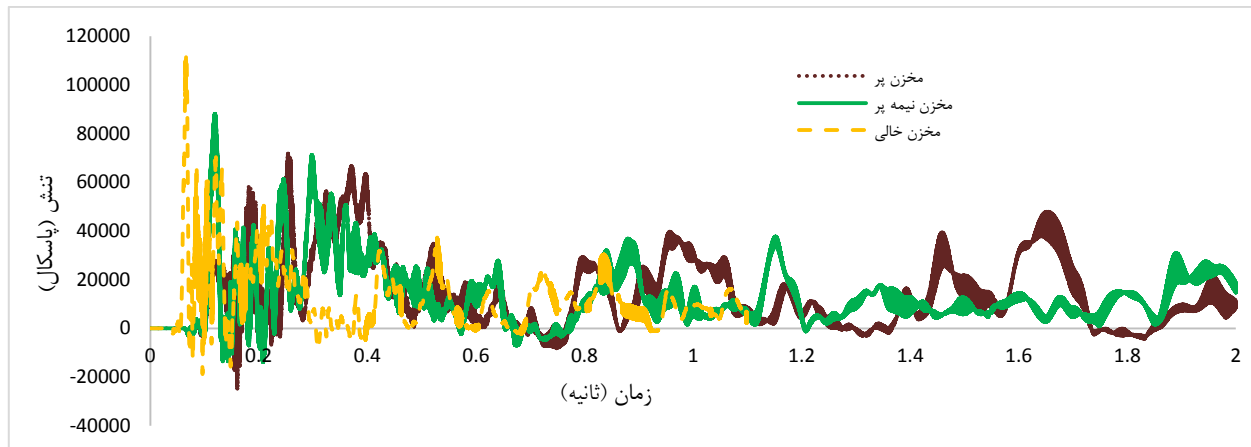


شکل ۱۵- نمودارهای تنش ناشی از بار انفجار در حالت مخزن خالی: (الف) زمان وقوع ماکزیمم جابه جایی (ب) زمان ۱ ثانیه.



شکل ۱۶- منحنی تاریخچه زمانی ماکزیمم تنش اصلی در تاج سد.





شکل ۱۷- منحنی تاریخچه زمانی ماکزیمم تنش اصلی در کف سد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثرات مخزن بر روی پاسخ دینامیکی سد بتنی دو قوسی کارون ۴ تحت بارگذاری انفجار توسط نرم افزار المان محدود آباکوس پرداخته شده است. با توجه به بررسی انجام شده نتایج زیر به دست آمده است. در تحلیل سیستم سد-مخزن-فونداسیون تحت بار انفجار، نتایج وابستگی شدیدی به مش دارند و لذا باید تا حد امکان از مش بندی با ابعاد کوچک در مدل المان محدود استفاده نمود. بدین منظور مدل را طی چند مرحله با ابعاد مش ۵/۳۸، ۲/۶۹ و ۰/۶۷ متر تحلیل کرده و مش با ابعاد ۰/۶۷ متر، به دلیل داشتن خطای کمتر از ۱۰٪ به عنوان مش مناسب تشخیص داده شده است. به منظور کم کردن زمان تحلیل فقط مش نواحی اطراف محل انفجار تا حد ممکن ریز شده است. میزان بار انفجار لازم جهت گسیختگی سد در حالت مخزن پر برابر ۱۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی، مخزن نیمه پر ۱۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی و مخزن خالی ۱۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی به دست آمده است. جابه جایی تاج سد در حالت مخزن پر به دلیل بیشتر بودن بار انفجار نسبت به دو حالت دیگر بیشتر بوده است. اما جابه جایی تاج در حالت مخزن نیمه پر نسبت به مخزن خالی به دلیل اندرکنش سازه و سیال دارای اندکی کاهش است. با مقایسه فشار هیدرو دینامیک پای سد در حالت مخزن پر و نیمه پر این نتیجه حاصل شده که فشار در حالت مخزن پر حدود ۳۸٪ بیشتر از حالت نیمه پر است. با توجه به نمودارهای تنش اصلی ماکزیمم در تاج سد میزان تنش در مخزن پر نسبت به دو حالت دیگر بیشتر بوده و مقدار آن برابر ۲/۱۳ مگاپاسکال به دست آمده و در حالت مخزن خالی از مخزن نیمه پر بیشتر بوده و برابر ۱/۸۷ مگاپاسکال به دست آمده است. در حالت کلی وجود آب در مخزن اثر کاهشی بر پاسخ سازه سد در برابر بار انفجاری در هوای آزاد دارد و بحرانی ترین حالت برای مخزن خالی به دست آمده است.

## مراجع

- [1] Ramajeyathilagam, K.; Vendhan, C.P. "Deformation and Rupture of Thin Rectangular Plates Ubjected to Underwater Shock"; Int. J. Impact. Eng. 2004, 30, 699-719.
- [2] Xie, W.; Young, Y.; Liu, T.; Khoo, B. "Dynamic Response of Deformable Structures Subjected to Shock Loadand Cavitation Reload"; Comput. Mech. 2007, 40, 667-681.
- [3] عرب زاده، ابوالفضل و خیراتی، عباس "اثر انفجار سطحی ناشی از مواد منفجره متمرکز بر روی سازه های بتنی"; پنجمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۶.
- [4] Langrand, B.; Leconte, N.; Menegazzi, A.; Millot, V. "Submarine Hull Integrity under Blast Loading"; Int. J. Impact. Eng. 2009, 36, 1070-107.
- [5] Subramaniam, K. V.; Nian, W.; Andreopoulos, Y. "Blast Response Simulation of an Elastic Structure Evaluation of the Fluid-Structure Interaction Effect"; Int. J. Impact. Eng. 2009, 36, 965-974.
- [6] Guzas, E. L.; Earls, C. J. "Air Blast Load Generation for Simulating Structural Response"; Steel Composit Struct. 2010, 10, 429-455.
- [7] شوشتری، احمد و صالح آباد، مصطفی "تحلیل دینامیکی ساختمان های بتنی نامتقارن تحت اثر بارهای انفجار"; ششمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.
- [8] Li, J.; Rong, J. "Experimental and Numerical Investigation of the Dynamic Response of Structures Subjected to Underwater Explosion"; Eur. J. Mech. B-Fluid. 2012, 32, 59-69.
- [9] Zhang, S.; Wang, G.; Wang, C.; Pang, B.; Du, C. "Numerical Simulation of Failure Modes of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater Explosion"; Eng. Fail. Anal. 2014, 36, 49-64.
- [10] Wang, G.; Zhang, S. "Damage Prediction of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater Explosion Shock Loading"; Eng. Fail. Anal. 2014, 39, 72-91.
- [11] نوروزی، فردین و کلاته، فرهود و قنبری، حسانه "مدلسازی عددی اثرات بار انفجاری در داخل مخزن بر رفتار دینامیکی سدهای وزنی بتنی"; دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران تبریز، ۱۳۹۴.
- [12] Woyak, D. "Modeling Submerged Structures Loaded by underwater Explosions with Abaqus Explicit"; Abaqus Users Conference, 2002.

- [۱۵] فلاح زاده، پوران و بازیار، محمدحسن " بررسی اثر انفجار بر سازه‌های سطحی زیرزمینی"; چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور دانشگاه سمنان، ۱۳۸۷.
- [16] 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"; *Appl. Ocean. Res.* 2014, 46, 40-53.
- [13] Sprague, M. A.; Geers, T. L. "A Spectral-Element/Finite-Element Analysis of a Ship-Like Structure Subjected to an Underwater Explosion"; *Comput. Method Appl. Mech. Eng.* 2006, 195, 2149-2167.
- [۱۴] واحدی، جعفر و رحمانی، جعفر "مروری بر روش‌های تخمین بارهای انفجاری و اثرات این نوع بارگذاری بر خواص مصالح"; چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور دانشگاه سمنان، ۱۳۸۷.