

# Numerical Investigation of the Effect of Shock Wave Caused by Air Explosion on the Nonlinear Behavior Downstream of the Arched Concrete Dam with Conwep Method

A. Mardookhpour \*, R. Sobhkhiz Foumani , M. Sahraei Lashkariani 

\*Assistance Professor of Civil Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

(Received: 26/08/2022, Revised: 19/12/2022, Accepted: 05/02/2023, Published: 22/06/2023)

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.2.5.7


## ABSTRACT

Due to the emergence of terrorist threats in recent years, in the form of air attacks, sudden explosions of ammunition and suicide bombers around special and strategically important structures such as arched concrete dams that have a very high capacity for storing surface water, the performance and design of this The threatened structures are mandatory and their possible failure can cause a huge flood, which can cause huge financial and human losses downstream. Therefore, the purpose of this research is to identify the nature of the explosion along with investigating the vulnerability of concrete dams. arching and investigating the parameters affecting the non-linear response of the structure by comparing the location change of the dam crest and the amount of compressive and tensile damage for dam-piling and dam-piling-reservoir systems due to explosion. The results of the sensitivity analysis for the linear and non-linear behavior of concrete showed that it is necessary to model the non-linear behavior of concrete in order to investigate the behavior of arched concrete dams against dynamic loads, especially loads of an impact nature such as explosion. In the linear mode, the changes in the amount of the explosive material in the time history of the location change are not noticeable and the permanent location change of the crown is very close to each other for all the explosive loading conditions and finally returns to the final value of the static condition. Also, comparing the outputs of linear and non-linear analysis showed that the difference between the answers from the explosion of 500 kg of TNT at a distance of 8 meters to 1500 kg of TNT at a distance of 2 meters has an increasing trend, so that the difference between the response of the change of location The background values for the linear and non-linear states are 18.7% and 25.2%, respectively, which emphasized the necessity of considering the non-linear behavior of concrete, especially for explosion in the near field. By comparing the maximum displacement responses of the full tank state, it was concluded that the presence of the tank reduces the influence of the reference point position and the amount of explosive charge on the crown response, compared to the empty tank state. Also, the results showed that in the full tank state The extent of pressure vulnerability is greater for the downstream, which indicates the application of hydrodynamic pressure of reservoir water to the downstream elements of the dam, and this happened due to the shape of the arch, but in the case of an empty reservoir, due to the absence of hydrodynamic pressure, the extent of this The damage was less.

**Keywords:** Numerical Analysis, Explosion, Nonlinear Behavior, Linear Behavior, Abaqus Software

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

 Authors



\* Corresponding Author Email: alireza.mardookhpour@liau.ac.ir



نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال چهاردهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲ (پیاپی ۵۴): صص ۷۳-۵۹

علمی - پژوهشی

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۸۰۳۰



## بررسی عددی اثر موج شوک ناشی از انفجار هوایی در رفتار

### غیرخطی در پایین دست سد بتنی قوسی با روش Conwep

علیرضا مردوخ پور<sup>۱\*</sup>، رامتین صبح خیز فومنی<sup>۲</sup>، محمد صحرائی لشکریانی<sup>۳</sup>

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.2.5.7

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸

#### چکیده

به دلیل ظهور تهدیدات تروریستی در سال‌های اخیر، به صورت حملات هوایی، انفجار ناگهانی مهمات و عوامل انتحاری پیرامون سازه‌های خاص و دارای اهمیت استراتژیک مانند سدهای بتنی قوسی که ظرفیت بسیار بالایی در ذخیره‌سازی آب‌های سطحی دارند، بررسی عملکرد و طراحی این سازه‌های مورد تهدید الزامی بوده و شکست احتمالی آن می‌تواند باعث ایجاد سیلاب بسیار عظیمی گردد که در نتیجه خسارات مالی و جانی بسیار زیادی را می‌تواند به پایین دست وارد کند. لذا هدف این تحقیق شناسایی ماهیت انفجار به همراه بررسی آسیب‌پذیری سدهای بتنی قوسی و بررسی پارامترهای موثر بر پاسخ غیر خطی سازه با مقایسه‌ی تغییر مکان تاج سد و میزان آسیب فشاری و کششی برای سیستم های سد- پی و سد- پی - مخزن در اثر انفجار می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت برای رفتار خطی و غیر خطی بتن نشان داد که برای بررسی رفتار سدهای بتنی قوسی در مقابل بارهای دینامیکی به خصوص بارهای با ماهیت ضربه‌ای مانند انفجار، مدل نمودن رفتار غیر خطی بتن امری ضروری است. در حالت خطی، تغییرات مقدار ماده‌ی منفجره در تاریخچه زمانی تغییر مکان محسوس نبوده و تغییر مکان ماندگار تاج برای کلیه‌ی حالات بارگذاری انفجاری بسیار نزدیک به یکدیگر است و در نهایت به مقدار نهایی حالت استاتیکی باز می‌گردد. همچنین مقایسه‌ی خروجی‌های تحلیل خطی و غیر خطی نشان داد که اختلاف بین جواب‌ها از انفجار ۵۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله ۸ متر تا ۱۵۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله ۲ متر روند افزایشی دارد به طوری که اختلاف بین پاسخ تغییر مکان‌های پیشینه برای حالت خطی و غیر خطی برای حالات مذکور به ترتیب ۱۸/۷ و ۲۵/۲ درصد می‌باشد، که بر ضرورت در نظر گرفتن رفتار غیر خطی بتن، به خصوص برای انفجار در حوزه نزدیک تاکید داشت. با مقایسه‌ی پاسخ‌های پیشینه تغییر مکان حالت مخزن پر این نتیجه حاصل شد که وجود مخزن، از تاثیر موقعیت نقطه‌ی مرجع و مقدار خرج انفجاری بر پاسخ تاج، نسبت به حالت مخزن خالی می‌کاهد. همچنین نتایج نشان داد که در حالت مخزن پر گستره‌ی آسیب‌پذیری فشاری برای پایین دست بیشتر بوده است که نشان از اعمال فشار هیدرودینامیک آب مخزن به المان‌های پایین دست سد داشته و این موضوع به دلیل شکل قوس اتفاق افتاده، اما در حالت مخزن خالی دلیل عدم وجود فشار هیدرودینامیک، گستره‌ی این آسیب کمتر بوده است.

**کلید واژه‌ها:** تحلیل عددی، انفجار، رفتار غیرخطی، رفتار خطی، نرم افزار Abaqus

<sup>۱</sup> استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران\_ (alireza.mardookhpour@liau.ac.ir) - نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران



## ۱- مقدمه

داده‌های آزمایشگاهی تطابق مطلوبی را نشان داد و مدل می‌توانست پیش‌بینی قابل اعتمادی از میزان تخریب دال بتنی ارائه دهد.

لو و همکاران [۵] از مشخصات فوم‌های انعطاف پذیر پلی اورتان به عنوان مصالح محافظ سد بتنی تحت موج انفجار قوی استفاده کردند. ایشان ابتدا مشخصات مکانیکی فوم‌ها را اندازه‌گیری کرده و سپس دو تست مقایسه‌ای برای دیوار صلب و سد بتنی به منظور بررسی تاثیر لایه‌ی فوم‌های انعطاف پذیر پلی‌اورتان در محافظت از سازه‌ها مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد با استفاده از فوم‌ها، فشار ناشی از موج شوک انفجار بر دیوار صلب و سد بتنی به میزان قابل توجهی کاهش یافته‌است. در نهایت با توجه به کاهش آسیب‌پذیری نمونه‌ها، استفاده از لایه‌های ضخیم فوم‌های انعطاف پذیر پلی اورتان به منظور حفاظت از سدهای بتنی در برابر بارهای انفجاری، توسط ایشان پیشنهاد شد.

سلاجقه و همکاران [۶] به بررسی پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی تحت اثر انفجار پرداختند و با در نظر گرفتن موقعیت های مکانی مختلف برای رخداد انفجار در حالت های مخزن پر و خالی، تراز آب مخزن را عاملی مؤثر در پاسخ دینامیکی سد دانستند. جهت مدلسازی و بررسی رفتار سازه تحت بارهای انفجاری از نرم افزار ANSYS Autodyn استفاده شده‌است. موقعیت خرج‌های انفجاری این مطالعه، در پنجه و پاشنه سد بوده و ترازهای آب مخزن؛ صفر، ۱۰۰ و ۱۲۰ متر در نظر گرفته شد. این پژوهش نشان داد موقعیت خرج انفجاری نیز بسیار حائز اهمیت است، بدین صورت که در حالت وقوع انفجار در پنجه، آسیب بیشینه تحت اثر موج اولیه انفجار اتفاق افتاد. در صورتی که پس از وقوع انفجار در پاشنه، نوسان و پدیده تشدید منجر به آسیب سد بتنی مذکور شد.

ادیب و همکاران [۷] در پژوهش خود از پارامتر انرژی تلف شده توسط خرابی، برای بررسی پایداری سدهای بتنی قوسی استفاده نمودند. ایشان با استفاده از نرم افزار Abaqus به بارگذاری انفجار زیر آب ۱۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله‌ی ۱۰ متری از بدنه سد و عمق ۳۸/۵ متری مخزن پرداخته و پارامتر انرژی تلف شده را به منظور برآورد صحیح از میزان خرابی مدل تحت اثر انفجار زیر آب و ایجاد مقایسه با سایر شبیه سازی ها در شرایط متفاوت از نظر مقدار خرج، نوع خرج، فاصله نقطه انفجار از هدف مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل پژوهش مورد نظر حاکی از آن است، که ابتدا نقطه مقابل انفجار، بر روی سد درگیر شده و المان‌های سد در آن قسمت به طور کامل مقاومت کششی خود را از دست داده‌اند و خرابی به صورت کروی به نقاط دیگر سد گسترش می‌یابد تا اینکه در ادامه‌ی ارتعاش سازه تحت اثر انفجار، بتن سد در محل اتصال به تکیه‌گاه‌ها و سپس در نواحی

یکی از مهم‌ترین اهداف ساخت سدها، ذخیره‌سازی و کنترل آب‌های سطحی می‌باشد. به دلیل ظهور تهدیدات تروریستی در سال‌های اخیر، به صورت حملات هوایی، انفجار ناگهانی مهمات و عوامل انتحاری پیرامون سازه‌های خاص و دارای اهمیت استراتژیک مانند سدهای بتنی قوسی که ظرفیت بسیار بالایی در ذخیره‌سازی آب‌های سطحی دارند، بررسی عملکرد و طراحی این سازه‌های مورد تهدید الزامی بوده و شکست احتمالی آن می‌تواند باعث ایجاد سیلاب بسیار عظیمی گردد که در نتیجه خسارات مالی و جانی بسیار زیادی را می‌تواند به پایین دست وارد کند. بنابراین ایمنی این سدها از جمله مسائلی است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و ارزیابی پاسخ دینامیکی سدهای بتنی قوسی در برابر انفجار، در علوم مهندسی و دفاعی بسیار مهم تلقی می‌شود. تحلیل انفجاری سابقه‌ای در حدود چندین قرن دارد. تحلیل‌های ابتدایی که به روش‌های تقریبی انجام می‌شد، به حدود قرن های ۱۳ و ۱۶ میلادی باز می‌گردد. با توجه به پیشرفت نرم افزارهای مهندسی، بررسی رفتار دقیق تر سازه‌ها و عملکرد آنها در برابر این نوع بارها در طی سالیان اخیر شتاب بیشتری گرفته است. در ادامه، به بررسی برخی از تحقیقات بر روی ویژگی‌های انفجار و همچنین کارهای علمی در زمینه‌ی تحلیل سازه‌ها تحت اثر انفجار پرداخته شد [۱].

فیوض و همکاران [۲] تأثیر مصالح و شکل سازه بر روی عملکرد آن در برابر انفجار را مورد بررسی قرار دادند و دریافته‌اند که هر چه سطوح عمود بر انفجار در سازه کمتر شود، عملکرد سازه برای مقابله با موج انفجار بهبود می‌یابد.

اسپرنگرز و همکاران [۳] به اندازه‌گیری تغییر شکل ورق‌های آلومینیومی تحت بارگذاری انفجار در هوا پرداخته‌اند. ۶۰ گرم ماده‌ی منفجره‌ی C-۴ در فاصله ۲۵۰ میلی‌متری ورق قرار گرفته و توسط دو دوربین سرعت بالا برای بررسی پاسخ دینامیکی ورق در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که انفجار در هوا باعث پاسخ سریع ماده در دو مرحله می‌شود. در ابتدا زمانی که شوک اتفاق می‌افتد، تمام ذرات مجبور به حرکت خارج از صفحه می‌شوند و این حرکت با یک سرعت اولیه اتفاق می‌افتد و سپس بعد از ناپدید شدن موج شوک است که تغییر شکل توسط مومنتوم ایجاد شده هدایت می‌شود.

ژائو و چن [۴] به بررسی مکانیزم تخریب و تغییر مکان دال بتن مسلح مربعی شکل تحت اثر انفجار در هوا پرداختند. آنها در این پژوهش، پاسخ دینامیکی و آسیب پذیری دال به ابعاد  $۶۰ \times ۱۰۰۰ \times ۱۰۰۰$  میلی متر تحت اثر انفجار TNT به وزن  $۰/۴۶$  کیلو گرم و به فاصله ۴۰۰ میلی‌متر از سطح دال بتنی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. نتایج عددی و مقایسه‌ی آن با

است.

نوآوری این تحقیق شناسایی ماهیت انفجار به همراه بررسی آسیب پذیری سدهای بتنی قوسی و بررسی پارامترهای موثر بر پاسخ غیر خطی سازه با مقایسه ی تغییر مکان تاج سد و میزان آسیب فشاری و کششی برای سیستم‌های سد- پی و سد- پی - مخزن در اثر انفجار بوده‌است.

## ۲- مواد و روش ها

پژوهش حاضر به بررسی انفجار در هوا و اثرات آن بر رفتار غیرخطی سد های بتنی قوسی پرداخته خواهد شد که مدلسازی این پدیده موردنظر در محیط نرم افزار Abaqus و به روش Conwep اجرا شد. در این تحقیق دو تحلیل صورت گرفت به گونه‌ای که تحلیل اول از نوع تحلیل استاتیکی به منظور به تغییر مکان تحت اثر میدان تنش ناشی از بارهای استاتیکی بوده و تحلیل دوم از نوع تحلیل دینامیکی بر اثر وقوع انفجار به روش Conwep انجام شد.

### ۲-۱- روش Conwep

در خصوص روش Conwep باید گفت که تعیین دقیق پارامترهای موج انفجار دشوار و پیچیده است. غالباً از روابط تجربی برای برآورد بار انفجار بر روی سازه استفاده می شود؛ لذا روش Conwep از پرکاربردترین روش هایی است که بر پایه ی اطلاعات آزمایشگاهی بوده و توسط کینگری و بولماش برای محاسبه ی پارامترهای موج انفجار هوایی ماده ی منفجره ی کره‌ای شکل و انفجار سطحی ماده ی منفجره ی نیمکره ای شکل ارائه شده است. مدل Conwep در قالب برنامه ی کامپیوتری در نرم افزارهای مهندسی متعددی نوشته شده و از رابطه ی نمایشی فشار-زمان موج انفجار که واقعی تر بوده و از دقت بالاتری نسبت به توزیع بار انفجار به صورت نمودار مثلثی فشار زمان برخوردار است، استفاده می کند. این مدل، اطلاعاتی از قبیل میزان و نوع ماده منفجره موردنظر و همچنین فاصله خرج تا هدف را به عنوان ورودی دریافت کرده و با توجه به ورودی داده شده، پارامترهای مختلف بارگذاری محاسبه می‌گردند. به علاوه، از خطاهای احتمالی یا عدم صحت خواندن اطلاعات از نمودارهای لگاریتمی، جلوگیری می‌کند. با بکارگیری نرم افزار اجزا محدود ABAQUS ابتدا سد بتنی قوسی در فضای سه بعدی مدل سازی خواهد شد. پس از مدل سازی هندسی سیستم، سناریوهای مختلفی از انفجار در هوا، در بخش پایین دست سد، مورد مطالعه واقع گشته و پاسخ سد در مقابل بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو گرم TNT در فواصل ۲، ۵ و ۸ متری از تاج مورد ارزیابی قرار گرفت.

مرکزی و پشت وجه رو به انفجار آسیب می‌بیند. به طور کلی در این مطالعه نشان داده شد که سدهای بتنی قوسی در مقایسه با سدهای بتنی وزنی در مقابل انفجار آسیب پذیرتر بوده و ممکن است تحت اثر انفجار در حوزه نزدیک، پایداری خود را از دست دهند.

مرادی و همکاران [۸] به بررسی اثر انفجار زیر آب بر پاسخ سد بتنی قوسی با استفاده از مدل سازی سد، پی و مخزن و ایجاد یک منبع انفجار فرضی پرداختند. ایشان در این پژوهش منبع انفجار را در فواصل مختلف از سد قرار داده و جابجایی تاج سد و پروفیل های تنش را مورد بحث قرار دادند. بررسی نتایج این مطالعه نشان داد که اعمال بار انفجار زیر آب جابجایی تاج را تا چندین برابر جابجایی ناشی از وزن و نیروی هیدرواستاتیک می‌توانست افزایش دهد. که این عدد به مقدار ماده منفجره و فاصله آن از سد و خصوصیات سد بستگی دارد. به طوری که در اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلو گرم ماده منفجره از نوع TNT در حوزه ی دور برای سد با رفتار خطی، جابجایی تاج حدود ۱۰ برابر ناشی از فشار هیدرواستاتیک و وزن به دست آمد.

رضوی طوسی و همکاران [۹] به بررسی اثر انفجار بر روی تنش های حلقوی و تغییر مکان های ایجاد شده بر روی بدنه مخزن بتن مسلح استوانه ای روزمینی ذخیره آب ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی با در نظر گرفتن میزان پرشدگی آب و ابعاد مخازن با نرم افزار تجاری آباکوس پرداخته اند. نتایج نشان داده است که تنش های حلقوی بدنه مخزن، تحت تاثیر امواج انفجار از خارج و فشار آب از داخل قرار دارد بطوریکه وجود آب در مخزن سبب شده تا تنش های حلقوی در بدنه حدود ۲۰ مگاپاسکال افزایش پیدا کند.

نجفی و همکاران [۱۰] به ارزیابی خسارت سد بتنی دو قوسی باتوجه به سرعت و فرکانس متوسط ناشی از موج انفجار در میدان نزدیک پرداختند. مدل ماده مورد استفاده در شبیه سازی عددی مواد منفجره، هوا، آب و بتن است. با استفاده از این روش انتشار موج فشار ناشی از انفجار و یافتن نقاط بحرانی بدنه سد در مقابل انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با توجه به تغییر در عمق انفجار، فاصله از بدنه سد بتنی و بار انفجاری، پاسخ های ساختاری و ویژگی های خسارت سد در سناریوهای مختلف انفجار بررسی شده است. همچنین با استفاده از پارامترهای لرزش از قبیل حداکثر مجموع برداری سرعت ذرات (PVS) و میانگین فرکانس (MF) به ارزیابی و پیشنهاد طیف ترکیبی، به روشی جهت طراحی سد مقاوم در برابر انفجار و یافتن فاصله ایمن در مواقع بحرانی رسیده است. در پایان دو طیف PVS-MF پیشنهادی با لحاظ وزن خرج و فاصله آنها جهت دسته بندی بهینه و مفید خسارت سد، به صورت حالت جزئی، متوسط و شدید خسارت جهت ارزیابی اولیه و بحرانی پیشنهاد گردیده

## ۲-۲- موج ضربه

$$P(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-\frac{at}{t_d}} \quad (1)$$

$$P(t) = P_{max} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \quad (2)$$

که در روابط فوق  $P_{so}$  و  $P_{max}$  به ترتیب بیانگر حداکثر اضافه فشار در بارگذاری نمایی و مثلثی،  $t_d$  زمان تداوم بارگذاری و  $a$  مشخصه‌ی شکل موج است که تابعی از حداکثر اضافه فشار  $P_{so}$  بوده و مقدار آن متناسب با مشخصه‌های موج انفجار می‌باشند [۱۲].

## ۲-۳- ضربه (تکانه) ویژه

ضربه‌ی ویژه موج با تکانه‌ی انفجار به صورت سطح زیر منحنی فشار زمان از لحظه‌ی رسیدن موج به نقطه‌ی مورد نظر، تا پایان فاز مثبت تعریف می‌شود و از مشخصه‌های مهم موج انفجار است که تاثیر قابل توجه بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای دارد. سطح زیر منحنی فشار-زمان مطابق شکل (۲-۲) به دو جزء ضربه‌ی فاز مثبت و فاز منفی تقسیم می‌شود و به دلیل کوچک بودن ضربه منفی، از مقدار آن در محاسبات صرف نظر می‌شود. مقادیر ضربه ویژه برای موج‌های ضربه و فشار، به ترتیب با استفاده از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌گردد [۱۱].

$$I = 0.5P_s t_d \quad (3)$$

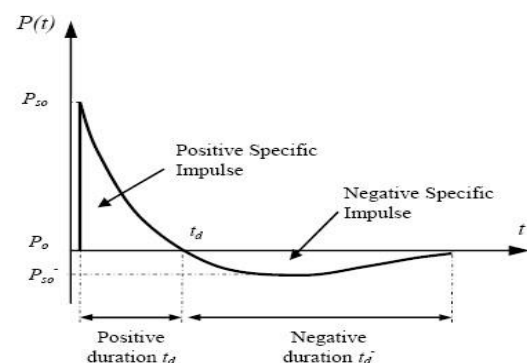
$$I = 0.64P_s t_d \quad (4)$$

در روابط ذکر شده،  $P_s$  فشار مینای انفجار و یا زمان تداوم انفجار است.

## ۲-۴- معرفی نرم افزار ABAQUS

ABAQUS مجموعه‌ای از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند می‌باشد که مبتنی بر روش اجزا محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیر خطی را داراست. این نرم‌افزار را می‌توان یک ابزار شبیه‌سازی همه‌منظوره در نظر گرفت. ABAQUS دارای مجموعه‌المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان به صورت مجازی توسط این المانها مدل کرد. این طیف وسیع از قابلیت مدل‌سازی و تحلیل نشان‌دهنده‌ی گستردگی این نرم‌افزار است [۱۳].

پس از انفجار یک لایه هوای فشرده در جلوی گازهای تولیدی که بیشترین انرژی آزاد شده از انفجار را دارا هستند، شکل می‌گیرد. این عمل، فاز مثبت یا مرحله اول ایجاد موج انفجار را تشکیل می‌دهد که در خلال آن و در یک لحظه، فشار ناشی از موج انفجار به مقدار حداکثر خود می‌رسد. فشار گازهای تولید شده از انفجار به هنگام گسیل از منبع تا رسیدن به فشار اتمسفر کاهش می‌یابد. در ادامه و در نتیجه‌ی گسترش همه‌جانبه موج اولیه، گازهای حاصل از انفجار، سرد شده و فشار آنها به مقدار کمتر از فشار اتمسفر کاهش می‌یابد. در این خلال گازها بیش از حد منبسط شده و در نتیجه به علت وجود اندکی اختلاف فشار بین شرایط جو طبیعی و فشار گازها، جریان معکوس به سمت منبع انتشار ایجاد می‌شود. این عملکرد را فاز منفی یا مرحله‌ی دوم ایجاد موج انفجار گویند که معمولاً با ایجاد مکش آغاز می‌شود. [۱۱]. تاریخچه زمان فشار ناشی از انفجار در فضای آزاد در شکل (۱) نشان داده شده است. فشار ناشی از انفجار به دو فاز مثبت و منفی تقسیم می‌شود. حداکثر اضافه فشار در فاز مثبت بلافاصله بعد از انفجار شکل می‌گیرد و آنگاه به صورت نمایی تا فشار اتمسفر کاهش می‌یابد. در مقابل فاز منفی مدت تداوم بیشتری نسبت به فاز مثبت دارد. رابطه‌ی (۱) نشان دهنده‌ی مقدار حداکثر اضافه فشار در فاصله‌ی معینی از موقعیت انفجار می‌باشد که به فشار مینای انفجار معروف است. با توجه به اینکه فاز مثبت دامنه و سطح زیر منحنی بیشتری دارد، در تحلیل سازه‌ها اغلب از این فاز استفاده می‌شود. تاریخچه زمان انفجار در فاز مثبت را می‌توان به صورت یک بار مثلثی ایده‌آل سازی کرد [۷]. رابطه‌ی (۲) معرف این بارگذاری ایده‌آل شده است. تحقیقات قبلی بر روی المان‌های سازه‌ای نشان می‌دهد استفاده از بارگذاری مثلثی به جای نمایی دقت قابل قبولی دارد و البته تا حدی محافظه‌کارانه است. شکل (۱) تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار نشان می‌دهد.



شکل (۱): تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [۱۲]

منظور گردیده است.

## ۵-۲- بررسی رفتار پلاستیک بتن



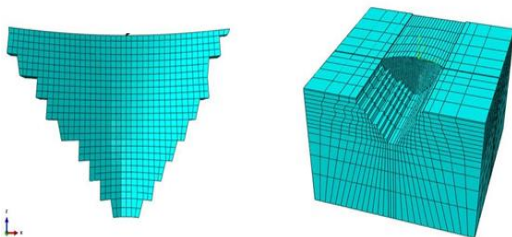
الف) ب)

شکل (۳): سد بتنی دو قوسی، الف) نمای بالادست، ب) مونولیت های در حال اجرا [۱۴]

## ۷-۲- مشخصات مدل المان محدود

مدل المان محدود پژوهش حاضر شامل ناحیه بدنه سد، پی و مخزن بوده و با استفاده از نرم افزار ABAQUS، هندسه محیط و مش المان محدود سیستم ایجاد گردید. برای در نظر گرفتن ابعاد مخزن و پی که بایستی در مدل سازی به روش المان محدود در محاسبات منظور گردد، طولی از مخزن که در مش المان محدود در نظر گرفته شده سه برابر ارتفاع آن بوده و عرض و ارتفاع پی مدل شده نیز از هر طرف دو و سه برابر ارتفاع سد در نظر گرفته شده است که با مقادیر توصیه شده توسط مراجع [۱۵] نیز همخوانی دارد.

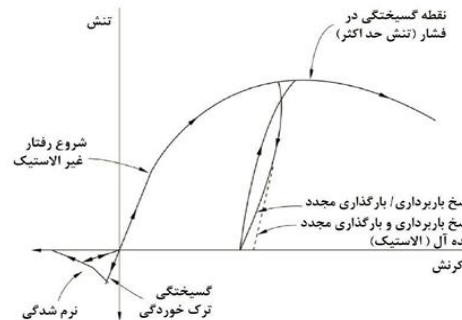
شکل (۴) سد بتنی قوسی نشان داده شده است که مدل المان محدود سیستم سد- پی - مخزن برای سد بتنی دو قوسی در حالت سه بعدی، نمای پایین دست سد و گره مرکزی در این وجه مطابق شکل می باشد. لازم به ذکر است، مرکز مختصات در مرکز تاج سد و در وجه پایین دست قرار داشته و مخزن در جهت مثبت محور Y (راستای افقی) واقع شده است.



شکل (۴): سد بتنی دو قوسی، الف) شبکه اجزا محدود سیستم سد، پی و مخزن در حالت سه بعدی، ب) نمای پایین دست

در شروع کلیه تحلیل ها محیط سد، پی و مخزن ایزوتروپ و همگن فرض گردیده و رفتار بتن در نرم افزار مورد استفاده به صورت غیر خطی تعریف شده است. جدول (۱) مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سد، پی و مخزن سد مورد مطالعه، نشان می دهد.

اگر منشوری بتنی تحت بارگذاری قرار گیرد، نمودار تنش- کرنش رسم شده مطابق شکل (۲) خواهد بود. همان طور که در این شکل مشخص است بتن تا حد مشخصی، رفتار خطی از خود نشان می دهد، ولی بعد از آن رفتار بتن کاملاً غیر خطی خواهد بود. در این مرحله اگر مطابق شکل باربرداری کامل صورت بگیرد، کرنش در بتن صفر نخواهد شد و نمونه دارای تغییر شکل دائمی خواهد بود. مسئله ی دیگری که در این شکل قابل رؤیت است، رفتار کاملاً متفاوت بتن تحت کشش و فشار به دلیل ترک خوردگی کششی می باشد. لازم به توضیح است، منحنی نرم شدگی پس از ترک خوردگی حتی در قوی ترین دستگاه ها نیز به علت سرعت بسیار بالای ترک خوردن قابل ترسیم نیست. [۱۳]. شکل (۲) نمودار تنش- کرنش کامل بتن نشان می دهد.



شکل (۲): نمودار تنش-کرنش کامل بتن [۱۳]

تانسور تنش را می توان به جای بیان بر حسب مؤلفه های تنش، به صورت معرفی تنش های اصلی و جهات اصلی بیان کرد. بنابراین می توان شکل سطوح تسلیم را به جای مؤلفه های تانسور تنش بر اساس تنش ها و جهات اصلی ارائه کرد. اما برای مواد ایزوتروپیک رفتار ماده از جهت مستقل است و شکل سطح تسلیم به جهات اصلی وابسته نیست. اما سطح گسیختگی برخلاف سطح تسلیم به تمامی مؤلفه های تانسور تنش وابسته است. زیرا بعد از ترک خوردگی، بتن دیگر یک ماده ی ایزوتروپیک نیست و خواص آن در جهات موازی و عمود بر ترک خوردگی متفاوت است. [۱۳]

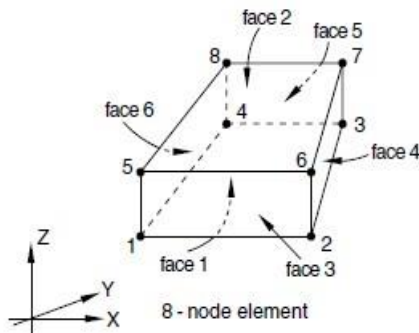
## ۶-۲- معرفی سد بتنی قوسی مورد مطالعه

به منظور تحلیل دینامیکی سد بتنی قوسی تحت اثر انفجار، سد شبیه سازی شده، از نظر مشخصات، مشابه سد دو قوسی کارون ۴ انتخاب گردیده است. در شکل (۳-الف) نمای بالادست سد بتنی دو قوسی مشاهده می گردد. سد مورد مطالعه، دارای ارتفاع ۲۳۰ متر و طول تاج ۴۴۰ متر می باشد. طبق شکل (۳-ب) سازه ی سد از ۲۱ مونولیت به عرض تقریبی ۱۹ متر تشکیل شده و ضخامت بدنه ی سد در تراز تاج ۷ متر و در تراز نهمین گاه ۳۷ متر می باشد. تراز عادی بهره برداری از مخزن ۱۰۲۵، تراز حداقل بهره برداری ۹۹۶ و تراز تاج سد نیز ۱۰۳۲ متر از سطح دریا



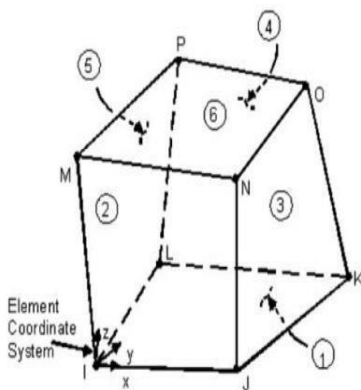
جدول (۱): مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سد، پی و مخزن سد

مصالح	مدول الاستیسیته (MPa)	مدول بالک (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	نسبت پواسون	ضریب میرایی	انرژی شکست (N/m)	$\beta_{max}$	وزن واحد حجم ( $kN/m^3$ )
بتن	۲۳۶۰۰	۱۳۱۱۱	۲/۷۵	۰/۲	۰/۰۵	۱۵۰	۰/۳۵	۲۴/۵
سنگ سبک	۱۱۵۰۰	۷۶۶۷	۳	۰/۲۵	۰/۰۵	۲۰۰	۰/۳۵	۲۵
آب	-	۲۱۳۱	-	-	-	-	-	۱۰



شکل (۵): المان سد و پی [۱۵]

شکل (۶) المان مخزن نشان می دهد بطوریکه مخزن سد نیز به طول ۶۰۰ و ارتفاع ۲۲۳ متر به گونه ای مدل شده است که دارای ۵۲۰ المان هشت گرهی از نوع AC3D8R بوده است.



شکل (۶): المان مخزن [۱۵]

در تحلیل استاتیکی تکیه گاه ها عمود بر مرز پی بسته نگه داشته شده و اثر بار وزن مصالح جامد در نظر گرفته شده است. همچنین بارهای استاتیکی به صورت تدریجی و در ده گام بارگذاری به سیستم وارد می شود. به دلیل تفاوت در مدل سازی سیال در پژوهش علیجانی و همکاران [۱۵] با پژوهش حاضر، صحت سنجی تحلیل استاتیکی در حالت مخزن خالی انجام شد. از آنجایی که محل انفجار، رو به روی سازه ی سد در پایین دست بوده و فاصلهی متغیر در بارگذاری انفجار، فاصله ی افقی خرج انفجاری از سد می باشد، موج شوک ناشی از انفجار فشار افقی به سازه ی سد وارد کرده و تغییر مکان مرکز تاج سد در راستای افق را از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده است. بدین منظور به بررسی پاسخ تغییر مکان افقی گره مرکزی تاج سد در وجه پایین دست پرداخته می شود. طبق تحلیل صورت گرفته در مطالعه ی حاضر، این تغییر مکان در حالت استاتیکی برابر با ۰/۹- سانتی متر محاسبه گردید و بسیار نزدیک به تغییر مکان گره مشابه، در پژوهش علیجانی و همکاران که برابر با ۰/۸۶- سانتی متر بدست آمد، می باشد.

## ۲-۸- مشخصات مش بندی

سد مورد مطالعه به علت قوسی بودن، در فضای ۳ بعدی مدل شده و برای نزدیک شدن نتایج به نتایج واقعی، مدل ساخته شده دربرگیرنده ی سه قسمت سد، پی و مخزن می باشد. شکل (۵) المان سد و پی نشان می دهد بطوریکه سد و پی پس از آنالیز حساسیت های صورت گرفته، به ترتیب با ۱۹۸۰ و ۳۷۲۰ المان مکعبی هشت گرهی C3D8R مدل شده است که قابلیت در نظر گرفتن رفتار غیر خطی و آسیب را داراست.

## ۹-۲- بارگذاری انفجار

به منظور شبیه‌سازی بار انفجار در نرم افزار ABAQUS به یک نقطه مرجع (rp) که Reference point نامیده می شود، نیاز است. این نقطه در واقع محل قرار گیری خرج های انفجاری مختلف می باشد که موج شوک از آنجا متضاد می گردد. فواصل این نقاط از گره H که در مرکز مختصات واقع بوده است، ۲، ۵ و ۸ متر در نظر گرفته شده که به ترتیب با rp1, rp2, rp3 نمایش داده می

شوند. لازم به ذکر است مقادیر خرج های انفجاری برابر با ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو گرم TNT و سطح بارگیر تحت اثر انفجار، سطح پایین دست سد بوده است. جدول (۲) مشخصات نقاط مرجع انفجار و پارامتر های مربوط به آن نشان داده است بطوریکه پارامتر فاصله‌ی مقیاس شده و مقادیر TNT متناظر با آن، در شرایط مذکور محاسبه شده است.

جدول (۲): مشخصات نقاط مرجع انفجار و پارامترهای مربوط به آن

Reference point	R (m)	TNT (kg)	Z (kg/m <sup>1/3</sup> )
Rp1-tnt ۱۵۰۰	۲	۱۵۰۰	۰/۱۷
Rp1-tnt ۱۰۰۰	۲	۱۰۰۰	۰/۲
Rp1-tnt ۵۰۰	۲	۵۰۰	۰/۲۵
Rp2-tnt ۱۵۰۰	۵	۱۵۰۰	۰/۴۴
Rp2-tnt ۱۰۰۰	۵	۱۰۰۰	۰/۵
Rp2-tnt ۵۰۰	۵	۵۰۰	۰/۶۳
Rp3-tnt ۱۵۰۰	۸	۱۵۰۰	۰/۷
Rp3-tnt ۱۰۰۰	۸	۱۰۰۰	۰/۸
Rp3-tnt ۵۰۰	۸	۵۰۰	۱/۰۱

TIE مقید شد. وجوه جانبی پی در جهت نرمال بسته و وجه تحتانی نیز کاملاً گیر دار فرض شده است. شرط مرزی در سطح آزاد مخزن به صورت فشار صفر بوده و برای بالادست به منظور خروج و عدم بازگشت امواج فشاری و جاری نشدن المان های سیال در انتها به سمت بیرون، مخزن را به عنوان یک محیط نیمه بی نهایت در نظر گرفته و از مرز غیر انعکاسی سامرفیلد استفاده گردید.

در جدول (۲)، ستون R شامل فاصله ی محل انفجار از مرکز تاج سد بر حسب m، ستون TNT شامل مقادیر ماده ی منفجره بر حسب kg و ستون Z شامل مقادیر فاصله‌ی مقیاس شده ی انفجار بر حسب kg/m<sup>3</sup> و نام گذاری های موجود در ستون Reference point بیانگر نقاط مرجع متناظر با مقادیر مختلف پارامترهای مورد بررسی بوده است.

## ۱۰-۲- نیروی ناشی از فشار هیدرواستاتیک و وزن سیستم

نیروی ناشی از فشار هیدرواستاتیک برای حالتی که آب در تراز نرمال و در ارتفاع ۲۲۳ متری قرار دارد، در نظر گرفته می شود. وزن سیستم نیز با توجه به مشخصات مصالح به کار رفته شده در آن اعمال می گردد.

## ۱۱-۲- شرایط مرزی

جهت تحلیل اندرکنش سد و مخزن تحت اثر موج شوک در ABAQUS نیاز به یک اندرکنش صفحه ای در سطح مشترک جامد و سیال می باشد که با تعریف قید TIE برای این سطوح، هدف مذکور میسر می شود. بنابراین و طبق آنالیزهای حساسیت انجام شده و پژوهش های پیشین سطح مشترک سد و مخزن، سطح مشترک سد و پی و همچنین مخزن و پی با استفاده از

## ۱۲-۲- انتخاب گام زمانی

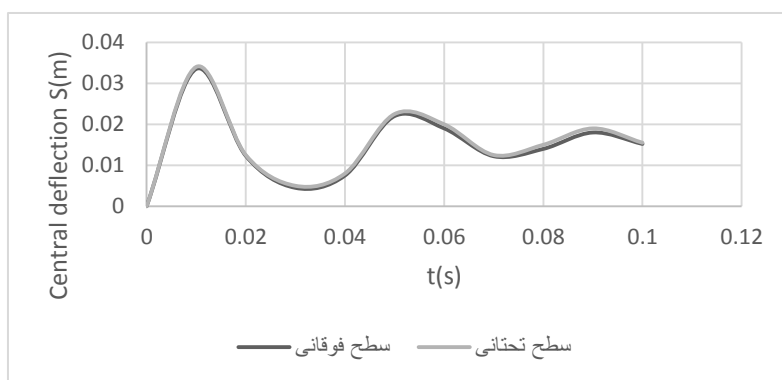
در مورد گام های زمانی باید توجه داشت که مقدار آن باید کوچکتر از حد پایداری در روش تفاضل مرکزی باشد. در غیر این صورت حل ناپایدار بوده و پاسخ تاریخچه زمانی متغیرها با دامنه های افزایشی نوسان می کند. برای مسائل انفجاری مقدار گام زمانی معمولاً در اندازه های  $1 * 10^{-6} Sec$  تا  $1 * 10^{-4} Sec$  می باشد [۱۳]. البته نرم افزار آباکوس می تواند بدون نیاز به دخالت کاربر و به طور خودکار اندازه نمو زمانی را کنترل کند تا پایداری برقرار بماند. لازم به ذکر است در این پژوهش گام های زمانی تحلیل  $2.39 * 10^{-5} Sec$  بوده است.

## ۱۳-۲- صحت سنجی

برای بررسی دقت و صحت رفتار سازه در برابر بارگذاری انفجار نیاز به مطالعه ی پژوهش های آزمایشگاهی می باشد. سپس



دال بتن مسلح در نرم افزار ABAQUS مورد شبیه سازی قرار گرفته و تحلیل انفجار به روش CONWEP صورت پذیرفت. در این مدل سازی، دال مورد نظر به ابعاد  $1000 \times 1000$  میلی متر، ضخامت ۴۰ میلی متر، خرج انفجاری از نوع TNT به وزن  $0.46$  کیلوگرم بوده و فاصله ی ماده ی منفجره تا سطح روی بتن ۴۰۰ میلی متر می باشد. در شرایط آزمایشگاهی این دال بتنی، از دو سمت گیردار و از دو سمت دیگر آزاد می باشد. میلگردهای به کار رفته در دال به قطر ۶ میلی متر، تنش تسلیم ۶۰۰ مگاپاسکال و نیز مدول یانگ فولاد و بتن به ترتیب ۲۰۰ و  $3/28$  گیگاپاسکال بوده است. تغییر مکان مرکز دال بتنی برای سطوح فوقانی و تحتانی پس از وقوع انفجار که توسط نرم افزار ABAQUS محاسبه شده است. شکل (۷) تغییر مکان گره مرکزی دال بتنی در مدل سازی عددی نشان داده شده است.



شکل (۷): تغییر مکان گره مرکزی دال بتنی در مدل سازی عددی

در جدول (۳)، شعاع آسیب دیدگی بیشینه دال بتنی و تغییر مکان مرکز دال، برای کار آزمایشگاهی و مدل سازی توسط نرم افزارهای اجزا محدود ABAQUS مورد مقایسه گرفت. نتایج حاکی از اختلاف ۵۷ درصدی در شعاع آسیب دیدگی بیشینه و اختلاف ۴ درصدی در تغییر مکان مرکز دال بوده است که دقت شبیه سازی و مطابقت قابل قبول خروجی انفجار توسط این نرم افزار را بیان کرده است.

### ۳- آنالیز و تحلیل نتایج

مدل سازی انفجار هوایی با استفاده از نرم افزار اجزا محدود ABAQUS و بررسی اثرات آن بر رفتار سد بتنی قوسی پرداخته شد. در پژوهش حاضر با تکیه بر مطالعات پیشین و به منظور پوشش ضعف های موجود، سناریوهای متفاوتی شبیه سازی گردیده و برخی از فرضیات ساده شونده اما تاثیرگذاری که در نظر گرفته نمی شد مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور جهت بررسی ضرورت انجام تحلیل غیر خطی مطالعه ی حاضر، ابتدا با انجام تحلیل خطی و مقایسه ی آن با پاسخ های غیر خطی ضرورت استفاده از تحلیل غیر خطی به اثبات رسیده

خروجی حاصل از کار آزمایشگاهی و شبیه سازی تحلیلی مورد مقایسه قرار می گیرند، تا دقت نتایج تعیین شود. به منظور صحت سنجی مدل رفتاری بتن، با شبیه سازی مطالعه ی آزمایشگاهی ژائو و چن [۱۶] در محیط نرم افزار ABAQUS، پاسخ تاریخیچه زمانی تغییر مکان و نیز آسیب پذیری دال بتنی در برابر انفجار مورد ارزیابی قرار گرفت. ژائو و چن، در پژوهشی آزمایشگاهی تغییر مکان دال بتن مسلح و کانتور آسیب دیدگی آن را تحت اثر انفجار هوایی بررسی کرده و نتایج تجربی حاصل را با نتایج عددی به دست آمده از تحلیل مدل حاضر مقایسه نمودند. باتوجه به بتنی بودن سد قوسی مورد مطالعه و همچنین بررسی آسیب پذیری سد در این پژوهش، به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از بررسی این پارامتر برای بتن، به مطالعه ی رفتار دال بتن مسلح تحت بار انفجاری پرداخته شد. بدین ترتیب

به منظور بررسی صحت سنجی آسیب دیدگی بتن، وضعیت کانتور آسیب دیدگی دال بتنی مورد مطالعه قرار گرفت. همانطور که انتظار می رفت سطح روبروی انفجار آسیب چندانی ندیده و سطح تحتانی دال بتنی در ناحیه مرکزی متحمل بیشترین آسیب شده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی دال مورد بررسی در نرم افزار ABAQUS با نتایج مطالعه ی ژائو و چن [۱۶]، نشان داد پاسخها تطابق قابل قبولی با یکدیگر دارند. جدول (۳) نتایج آزمایشگاهی و عددی حاصل از مدلسازی دال بتنی تحت اثر انفجار هوایی نشان داده شده است.

جدول (۳): نتایج آزمایشگاهی و عددی حاصل از مدل سازی دال بتنی

مدل آزمایشگاهی [۱۵]		شبیه سازی عددی در نرم افزار (ABAQUS)	
شعاع	تغییر مکان	شعاع	تغییر مکان
آسیب دیدگی	مرکز دال	آسیب دیدگی	مرکز دال
بیشینه	(mm)	بیشینه	(mm)
(mm)		(mm)	
۱۲۰	۳۵	۱۲۵	۳۳

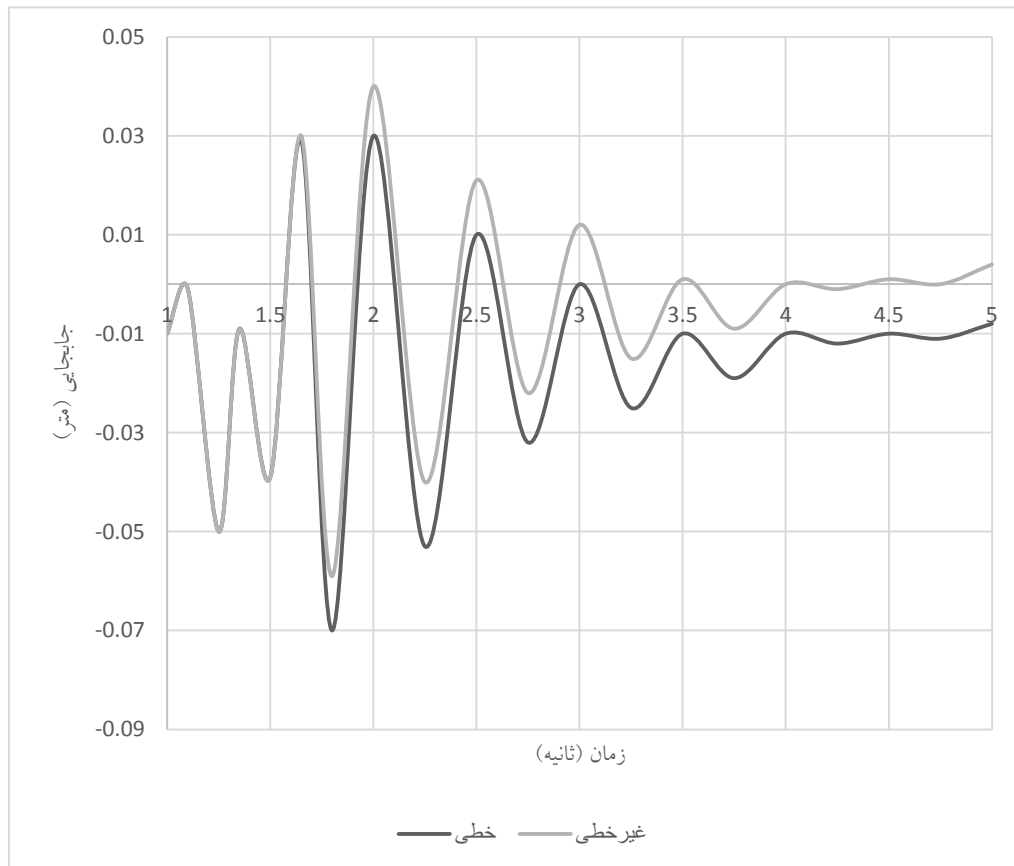
تحلیل دینامیکی تحت اثر انفجار نادیده گرفته می‌شود، در پژوهش حاضر جهت رسیدن سازه به بیشینه تغییر مکان تحت اثر بارهای استاتیکی و در نظر گرفتن تنش‌های پسماند ناشی از این بارها، دو نوع تحلیل استفاده شده است. ابتدا از زمان ۰ تا ۱ ثانیه تحلیل استاتیکی سیستم‌های سد-پی و سد-پی - مخزن صورت گرفته و در امتداد آن از زمان ۱ تا ۵ ثانیه تحلیل دینامیکی سیستم‌های مذکور تحت اثر بار انفجار مورد بررسی قرار گرفته‌است. پس از تحلیل استاتیکی سیستم، خروجی حاصل از این تحلیل به عنوان شرایط اولیه در مدل دوم و به منظور تحلیل دینامیکی تحت اثر انفجار لحاظ گردید. شکل (۸) مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی نشان داده است.

شکل (۹) مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی نشان داده است.

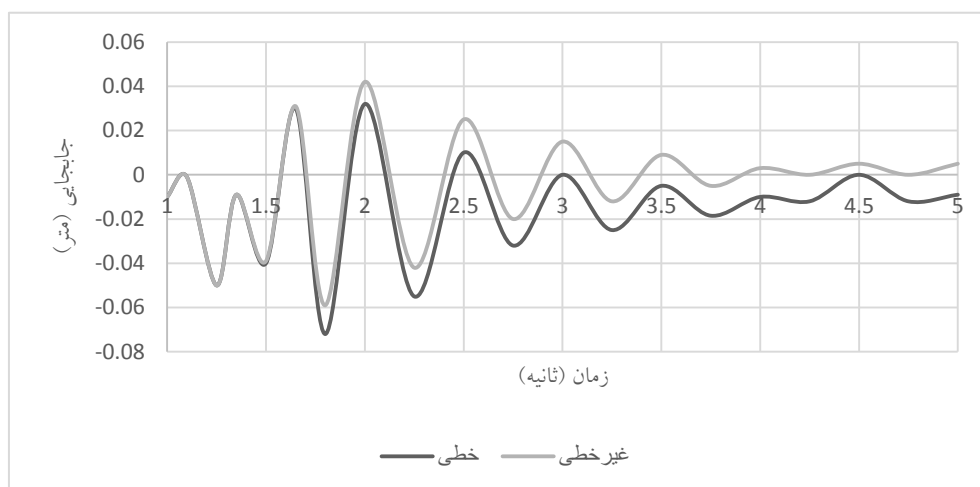
است. در این پژوهش دو نوع تحلیل استاتیکی و در امتداد آن تحلیل دینامیکی بر اثر وقوع انفجار صورت پذیرفت. به گونه‌ای که ابتدا جهت دستیابی سازه به تغییر مکان تحت اثر بارهای استاتیکی و در نظر گرفتن میدان تنش ناشی از این بارها، تحلیل استاتیکی سیستم‌های سد-پی و سد - پی - مخزن صورت گرفته و بعد از آن با اعمال پاسخ‌های استخراج شده از این تحلیل به عنوان شرایط اولیه ی تحلیل دینامیکی، سیستم‌های مذکور تحت اثر بار انفجار تحلیل گردید. نتایج حاصل در قالب تاریخچه زمانی تغییر مکان تاج سد، کانتورهای تغییر مکان بیشینه ی سیستم و آسیب‌های فشاری و کششی سد در تحلیل‌های مختلفی که صورت گرفته، ارائه و تفسیر گشته است.

### ۳-۱- تحلیل غیر خطی و مقایسه نتایج با پاسخ‌های خطی

در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل خطی و غیر خطی سد بتنی قوسی مورد مطالعه، به منظور ضرورت انجام تحلیل غیر خطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر خلاف مطالعات پیشین که میدان تنش به وجود آمده ناشی از تحلیل استاتیکی، در



شکل (۸): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

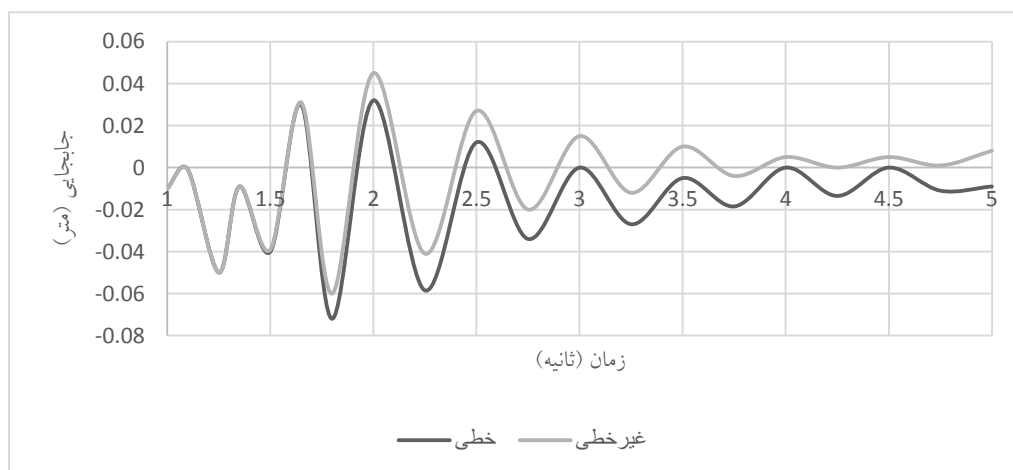


شکل (۹): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی نشان داده است.

شکل (۱۰) مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار

۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری از آن برای رفتار خطی و



شکل (۱۰): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

مقادیر ماده منفجره حساس نبوده و پاسخ نهایی پس از تحلیل دینامیکی به پاسخ استاتیکی نهایی بازگردد.

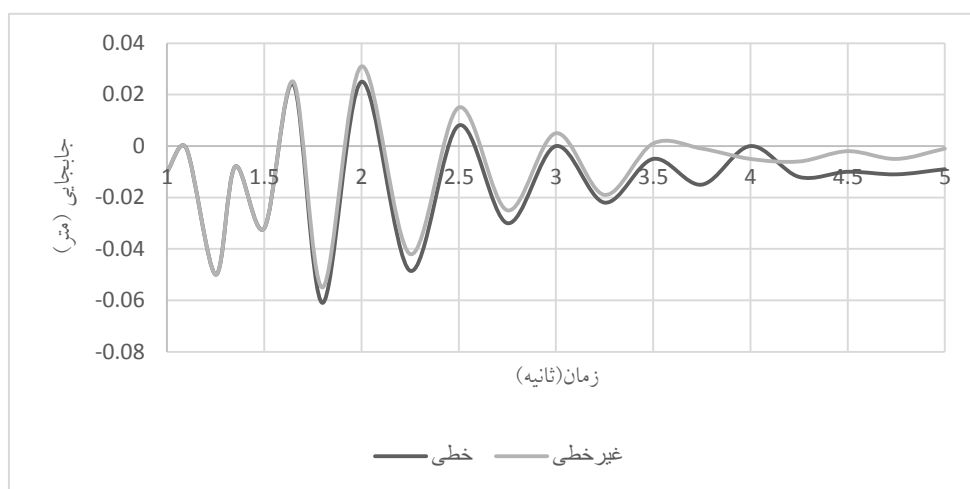
جدول (۴) حداکثر تغییر مکان افقی برای تاج سد تحت اثر انفجار های مختلف در فاصله ۲ متری نشان می دهد که در آن ستون خطی مربوط به حالت خطی بوده و در ستون های TNT1000، TNT500، و TNT1500 مقادیر تغییر مکان متناظر با ماده منفجره‌ای مذکور، بر حسب سانتی متر آورده شده است. مقادیر قسمت غیرخطی نیز به طور مشابه، مربوط به حالت غیر خطی بوده است.

از مقایسه شکل های (۸) تا (۱۰) مشاهده شد که با افزایش مقدار ماده منفجره اختلاف پاسخ های خطی و غیر خطی بیشتر شده است. به طوری که در اثر انفجار ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT این اختلاف به بیشترین میزان خود رسیده و این امر حساسیت پاسخ غیر خطی به خصوص برای انفجارهای قوی تر را نشان داده است. با افزایش مقدار TNT، همانطور که انتظار می رفت در پاسخ های غیرخطی افزایش پاسخ های ماندگار مشاهده شود در صورتی که تغییر مکان ماندگار برای حالت خطی، نسبت به تغییر

جدول (۴): حداکثر تغییر مکان افقی بر حسب cm برای تاج سد تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT در فاصله ۲ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

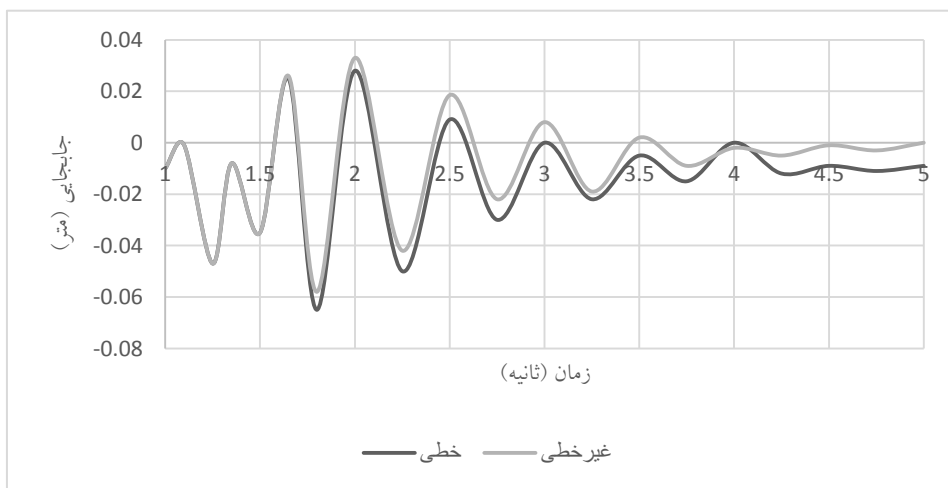
rpl					
خطی			غیرخطی		
TNT ۵۰۰	TNT ۱۰۰۰	TNT ۱۵۰۰	TNT ۵۰۰	TNT ۱۰۰۰	TNT ۱۵۰۰
۳/۰۵۲	۲/۲۳۷	۳/۳۷۱	۳/۹۹۹	۴/۲۹۶	۴/۵۱۲

شکل (۱۱) پاسخ تاج سد به ترتیب تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی نشان می دهد.



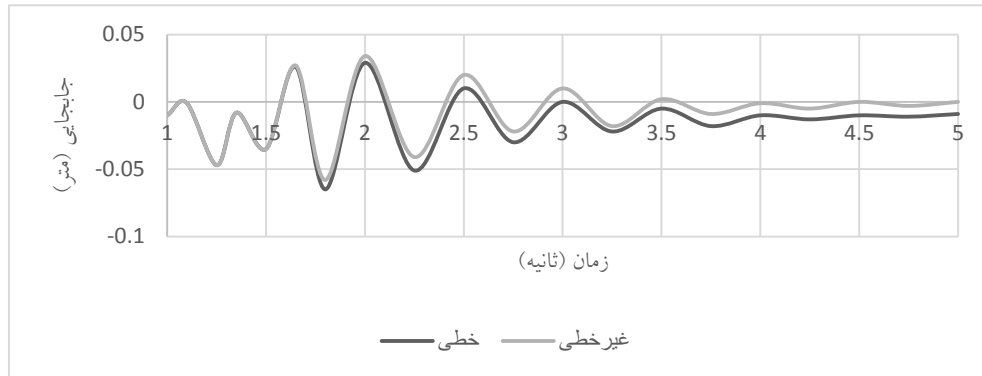
شکل (۱۱): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

شکل (۱۲) پاسخ تاج سد به ترتیب تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی نشان می دهد.



شکل (۱۲): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

شکل (۱۳) پاسخ تاج سد به ترتیب تحت اثر انفجار ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

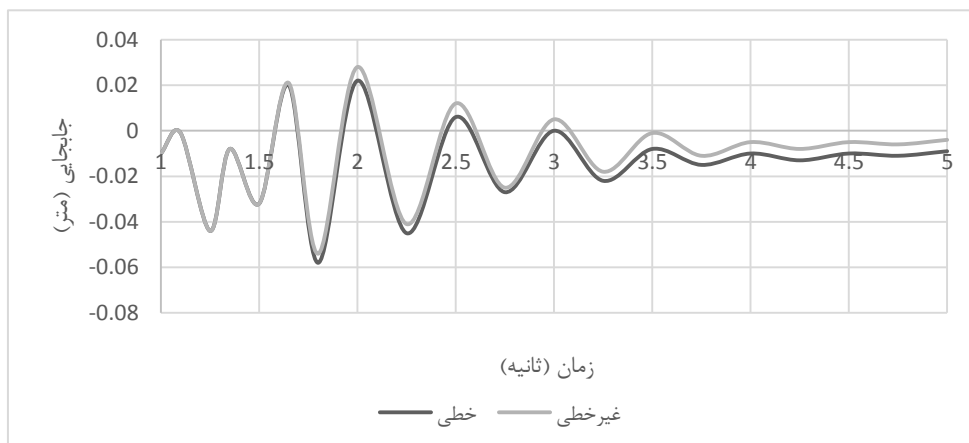
مقایسه شکل (۱۱) تا (۱۳) نشان داد برای انفجار در این فاصله از انفجار در فاصله ۲ متری از تاج، کمتر شده است. تاج نیز روند افزایشی اختلاف پاسخ های خطی و غیر خطی، با افزایش مقدار ماده منفجره پابرجاست. با این تفاوت که اختلاف پاسخ های ماندگار خطی و غیر خطی نسبت به حالت قبل، یعنی

جدول (۵): حداکثر تغییر مکان افقی بر حسب cm برای تاج سد تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT در فاصله ۵ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

rp2					
خطی			غیرخطی		
TNT ۵۰۰	TNT ۱۰۰۰	TNT ۱۵۰۰	TNT ۵۰۰	TNT ۱۰۰۰	TNT ۱۵۰۰
۲/۴۹۷	۲/۶۸۲	۲/۷۷۵	۳/۱۳۲	۳/۴۱۷	۳/۵۶۱

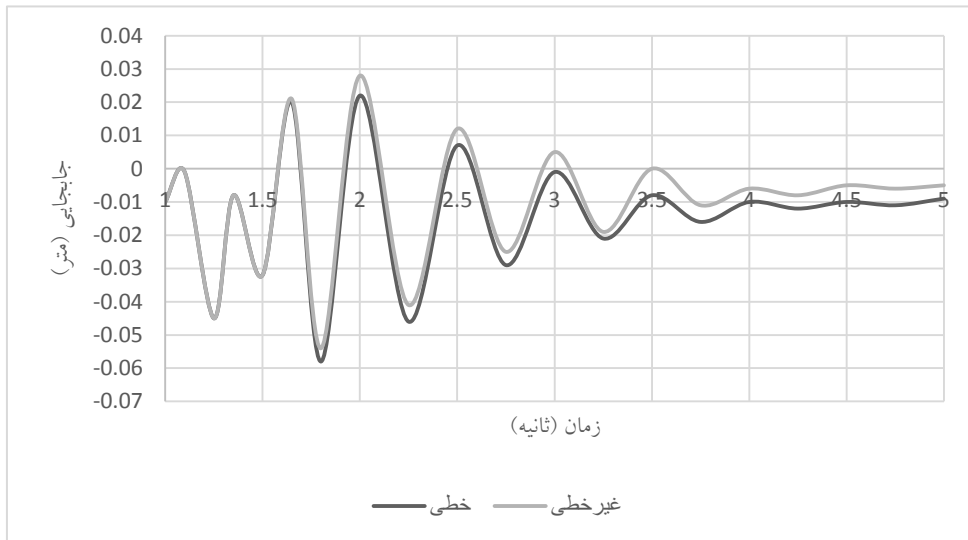
طبق جدول (۵) حداکثر تغییر همانطور که مشاهده می شود عامل فاصله‌ی محل انفجار از تاج، منجر به کمتر شدن اثر انفجار بر سازه شده و علاوه بر کاهش بیشینه تغییر مکان تاج، اختلاف بین پاسخ های خطی و غیر خطی مربوط به مقادیر یکسان TNT نیز کاهش یافت.

شکل (۱۴)، پاسخ تاج سد به ترتیب تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۸ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی را نشان می دهد.



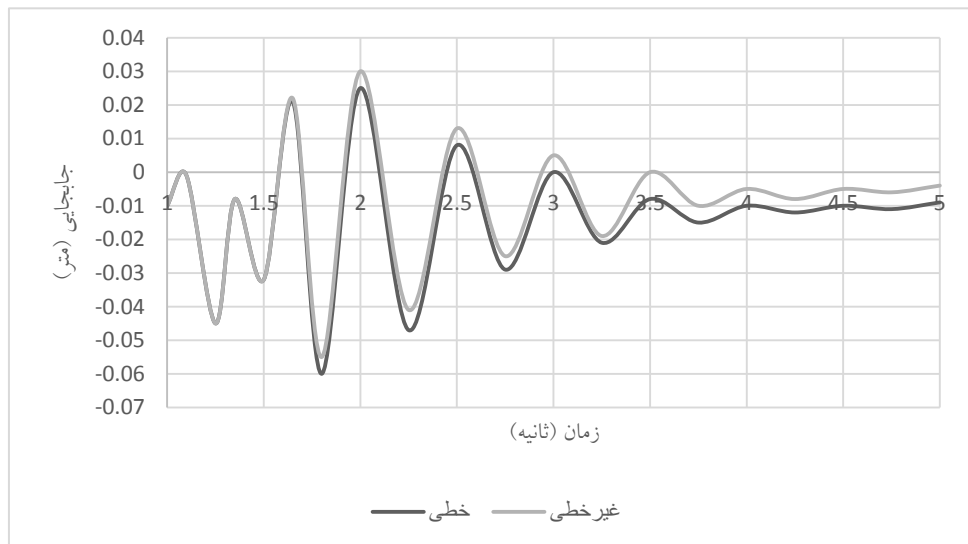
شکل (۱۴): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۸ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

شکل (۱۵) پاسخ تاج سد به ترتیب تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله ۸ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله ۸ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

شکل (۱۶) پاسخ تاج سد به ترتیب تحت اثر انفجار ۱۵۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله ۸ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار ۱۵۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله ۸ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

محسوسی داشته و نشان از شدت تاثیر گذاری فاصله بر کاهش قدرت انفجار داشته است. جدول (۶) حداکثر تغییر مکان افقی برای تاج سد تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT در فاصله ۸ متری نشان داده است.

مقایسه‌ی پاسخ‌ها در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نشان می‌دهد که اختلاف تغییر مکان‌های ماندگار خطی و غیر خطی نسبت به حالات قبل، یعنی انفجار در فاصله‌ی ۲ و ۵ متری از تاج، کاهش

جدول (۶): حداکثر تغییر مکان افقی بر حسب cm برای تاج سد تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT در فاصله ۸ متری از آن برای رفتار خطی و غیر خطی بتن در حالت مخزن خالی

Rp3					
خطی			غیرخطی		
TNT ۵۰۰	TNT ۱۰۰۰	TNT ۱۵۰۰	TNT ۵۰۰	TNT ۱۰۰۰	TNT ۱۵۰۰
۲/۲۶۶	۲/۳۱۲	۲/۳۵۹	۲/۷۸۶	۲/۸۵۴	۲/۹۲۳

تحت اثر انفجار بوده که وقوع بیشینه تغییر مکان در نواحی کناری تاج نشان می دهد.

به طور کلی با توجه به آنالیز حساسیت صورت گرفته برای رفتار خطی و غیر خطی بتن می توان دریافت که برای بررسی رفتار سدهای بتنی قوسی در مقابل بارهای دینامیکی به خصوص بارهای با ماهیت ضربه ای مانند انفجار، مدل نمودن رفتار غیر خطی بتن امری ضروری است. در حالت خطی، تغییرات مقدار ماده منفجره در تاریخچه زمانی تغییر مکان محسوس نبوده و تغییر مکان ماندگار تاج برای کلیه حالات بارگذاری انفجاری بسیار نزدیک به یکدیگر است و نهایتاً به مقدار نهایی حالت استاتیکی باز می گردد. همچنین مقایسه ی خروجی های تحلیل خطی و غیر خطی نشان داد که اختلاف بین جواب ها از انفجار ۵۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله ۸ متر تا ۱۵۰۰ کیلو گرم TNT در فاصله ۲ متر روند افزایشی دارد به طوری که اختلاف بین پاسخ تغییر مکان های پیشینه برای حالت خطی و غیر خطی برای حالات مذکور به ترتیب ۱۸/۷ و ۲۵/۲ درصد می باشد، که بر ضرورت در نظر گرفتن رفتار غیر خطی بتن، به خصوص برای انفجار در حوزه نزدیک تاکید داشت.

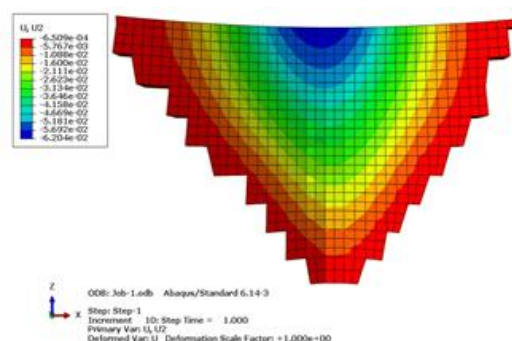
#### ۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر به بررسی انفجار در هوا و اثرات آن بر رفتار غیر خطی سدهای بتنی قوسی پرداخت. مدل سازی این پدیده توسط نرم افزار ABAQUS و به روش CONWEP انجام گرفته است. در این مطالعه مدل سه بعدی المان محدود اجزای سد بتنی قوسی؛ شامل بدنه سد، سنگ پی و آب مخزن شبیه سازی شده و تحت بارگذاری انفجار در هوا، در بخش پایین دست سد مورد بررسی قرار گرفت به گونه ای که نخست تحلیل استاتیکی برای سیستم های سد - پی و سد - پی - مخزن صورت پذیرفت، سپس با اعمال پاسخ های استخراج شده از تحلیل استاتیکی به عنوان شرایط اولیه ی تحلیل دینامیکی، سیستم های مذکور تحت اثر بار انفجار تحلیل گردید. نتایج موردی این تحقیق به شرح زیر می باشد:

۱- با مقایسه ی پاسخ های بیشینه تغییر مکان حالت مخزن پر این نتیجه حاصل شد که وجود مخزن، از تاثیر موقعیت نقطه ی مرجع و مقدار خرج انفجاری بر پاسخ تاج، نسبت به حالت

جدول (۶) نشان داده شد که افزایش مقدار TNT تاثیر کمتری بر روند افزایشی پاسخ بیشینه ی تاج نسبت به وقوع انفجار در فواصل نزدیکتر داشته است.

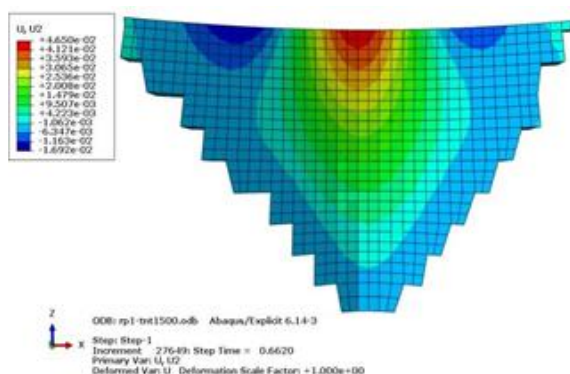
شکل (۱۷) کانتور تغییر مکان افقی سد بتنی قوسی مورد مطالعه نشان می دهد.



شکل (۱۷): کانتور حداکثر تغییر مکان افقی تاج سد در تحلیل استاتیکی برای حالت مخزن، پر

شکل (۱۷) پس از تحلیل نخست یعنی تحلیل استاتیکی تحت اثر وزن سیستم نمایش داده شده است که نشان از وقوع بیشینه ی تغییر مکان در ناحیه ی مرکزی تاج دارد.

شکل (۱۸) کانتور حداکثر تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار نشان می دهد.



شکل (۱۸): کانتور حداکثر تغییر مکان افقی تاج سد تحت اثر انفجار برای حالت مخزن پر

شکل (۱۸) حاکی از تحلیل دینامیکی سیستم سد - پی - مخزن



weighted concrete dam under the effect of explosive loads” 6th International Conference on Earthquakes and Structures, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman.2016 (in persian)

[7] A. Adib, A “Investigation of the behavior of arched concrete dams under underwater explosive loading” Master's thesis, Faculty of Civil Engineering, Zanjan University.2016(in persian)

[8] M. Moradi “Underwater explosion and its effect on the nonlinear behavior of Beti Kosi dams” Master's thesis, Faculty of Civil Engineering, Khejeh Nasir Tusi University of Technology.2017(in persian)

[9] V. Razavi Tusi, M. Moghadam, M. Shahrbanouzadeh “Dynamic analysis of reinforced concrete water tanks under explosion with regard to water-structure interaction” Scientific Journal of Passive Defense.2021(in persian)

[10] M. Najafi, M. Karkon, A. Ghanbari, M. Parviz, Evaluation of damage of double curvature arch concrete dam according to the mean frequency and velocity caused by the blast wave in the near-field. Journal of Passive Defense, 2023 (in persian)

[11] The twenty-first topic of the National Building Regulations (non-active defense); Second edition, 2017. (in persian)

[12] A. Niri, A “Analysis and design of buildings against the effects of Tehran explosion” Malek Ashtar University of Technology.2012 (in persian)

[13] Hyde, D. W “ User's Guide for Microcomputer Programs ConWep and FunPro, Applications of TM 5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons” US Army Engineer Waterways Experiment Station.1988

[14] ABAQUS, ABAQUS User's Manual", Pawtucket, Rhode Island, V6.1.

[15] M. Alijani Ardeshir, M, “Nonlinear analysis of arched concrete dams under construction fault movement” PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol. 2016 (in persian)

[16] Zhao, C. F.; Chen, J. Y “Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading” Theoretical and Applied Fracture Mech, 63: 54-62.2013

[17] R. Moghaddis Jafari, F. Rahimzadeh Royi “ Investigation of the effect of thermal gradient on the dynamic behavior of arched concrete dams” 6th National Cong of Civil Engineering, Semnan, Semnan University.2011(in persian)

[18] Chingale, A. Madhekar, S.N. “Study of Blast Resistance of a Ductile Frame and an Ordinary Frame” Int Conf on Adv in Civil and Mech Eng system.2018

[19] Kumar, A. S.; Gokul, K. U.; Rao, P. V. K.; Jagannadham, A “ Blast loading of underwater targets-A study through Explosion Bulge Test experiments” Int J Impact Eng, 76: 189-195.2015

مخزن خالی می‌کاهد. همچنین اختلاف محسوس پاسخ‌های ماندگار به خصوص برای ماده منفجره‌ی بیشتر در حوزهی نزدیک برای حالت مخزن خالی نشانگر تاثیر پذیرتر بودن تاج سد از موج شوک متصاعد از انفجار در این حالت است.

۲- با دور شدن محل وقوع انفجار از تاج سد، پاسخ‌های سازه تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT در نقاط مرجع ثابت سیر نزولی شدیدتری داشته و به یکدیگر نزدیکتر شد. به عبارتی دیگر تغییر نقاط مرجع رابطه‌ی خطی با پاسخ سازه ندارد. همچنین در کلیه‌ی حالات، سازه‌ی مورد بررسی در کشش ضعف بیشتری از خود نشان داده است که نشان‌دهنده‌ی تاثیر انفجار در پایین دست تاج بر آسیب سازه بوده است.

۳- در حالت مخزن پر، وجود آب در بالادست سد و ارتعاش گسترده‌ای که مخزن پس از وقوع انفجار در بدنه ایجاد می‌کند، از اثرات موضعی انفجار بر تاج کاسته و منجر به تغییر موقعیت شکست کششی در این حالت می‌گردد. بیشترین آسیب کششی برای این حالت در ناحیه‌ی فوقانی سطح تماس سد و مخزن در بالادست بدنه رخ داد، در حالی که تاج سد آسیب چندانی دیده نشد. با افزایش خرج انفجاری در فاصله‌ی ثابت نسبت به تاج و به خصوص در حوزهی نزدیک، موقعیت آسیب کششی از تراز پایین تر ارتفاعی که در تماس با آب است به سمت تاج و در سمت روبروی محل انفجار در بالادست متمایل می‌شود. همچنین در این حالت تکیه‌گاهی که در سمت مثبت محور X قرار دارد، در کشش آسیب پذیر نشان داد و وقوع انفجار در پایین دست این ناحیه ممکن است موجب بروز مشکل در عملکرد سازه گردد.

## ۵- مراجع

[1] A. Mohtashmi, S. Sinaei, A. Shooshtri, “ Evaluation of the behavior of steel structures against explosive loads” 5th National Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.2009(in persian)

[2] A. Fayouz, M. Mojtahdpour, M. Tavakolizadeh “Investigation of the effect of materials and structure shape on the performance of the structure against explosion” 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz University. 2008(in persian)

[3] Spranghers, K.; Vasilakos, I.; Lecompte, D.; Sol, H.; Vantomme, J “Identification of the plastic behavior of aluminum plates under free air explosions using inverse methods and full-field measurements” Int J Solids Struct, 51: 210-226.2014

[4] Zhao, C. F.; Chen, J. Y “Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading” J Theoretical and Applied Fracture Mech, 63: 54-62.2013

[5] Lu, L.; Li, X.; Zhou, J. “Protection scheme for concrete gravity dam acting by strong underwater shockwave” Adv Sci Lett, 19(1): 238-43.2013

[6] A. Selajgeh, M. Talebi, M. “Dynamic response of