

Investigation of the behavior of cylindrical steel tanks under surface blast loads

Seyed Sina Kourehli^{1*}, Mohammad Bagher Hamidi Khasraghi²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- Msc graduate, Department of Civil Engineering, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Studies of blast load and its effects on tanks is of particular importance. Blast on liquid storage structures possible to large due to the water crisis and disaster risk human health and the environment due to the spread of chemical substances and a fire hazard will result. Hence, understanding the dynamic behaviors of liquid storage structures under blast loading through numerical simulations is of utmost importance. In the present study, three dimensional (3D) finite element (FE) simulations of a steel water storage tank for different tank aspect ratios, percentages of water stored in the tank, tank wall thicknesses, boundary conditions at the bottom of the tank and magnitudes of blast loading have been performed using the FE software, Abaqus. Also check the behavior of structures resistant to the destructive effects of Blast waves, because of its importance in the design of sustainable structures against blast loading, has long been of interest to researchers. In this study, the numerical simulation of blast wave combined approach coupled as Euler - Lagrangian (CEL) and the ConWep has been paid. In this study, the explosive loading of domed fixed roof tanks with support and self-standing, considering the explosive load of 2000 kg of TNT explosive at a distance of 10 meters from the tanks is considered. To show the amount of stress at different heights on the tanks, four reference points were selected. The results show the critical situation at the reference point number three (corresponding to the empty space section of the tank). At reference point number three, the amount of stress is higher than at other points, and therefore this area is critical.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 January 2022

Revise Date: 20 May 2022

Accept Date: 03 July 2022

Keywords:

Steel storage tanks,
Blast,
Domed fixed roof tanks,
Abaqus software,
Conwep

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.323712.2688>

*Corresponding author: Seyed Sina Kourehli.

Email address: ss.kourehli@azaruniv.ac.ir

بررسی رفتار مخازن فولادی استوانه ای روزمینی تحت تحریک انفجار سطحی

سید سینا کورهلی^{۱*}، محمد باقر حمیدی خسرقی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

در مقاله حاضر، رفتار مخازن بزرگ فولادی روزمینی، استوانه ای شکل و با سقف ثابت مخروطی در برابر نیروهای حاصل از انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف ابتدا مخازن مورد بررسی توسط نرم افزار اینترگراف تنک^۱ طراحی گردیده و سپس با مدل کردن مخازن توسط نرم افزار آباکوس تنش های ایجاد شده در اثر نیروهای حاصل از انفجار مورد مطالعه قرار گرفته است. مخازن بصورت سه بعدی مدل شده و ابعاد مخازن و درصد آب ذخیره شده در مخازن بصورت متغیر لحاظ شده است. در این مقاله مخازن با نسبت های ارتفاع به قطر ۰/۷۵ و ۱ مورد مطالعه قرار گرفته و فرض شده که مخازن مورد بررسی بر روی بستر صلب قرار دارند. مخازن حاوی آب تحت بار انفجار قرار گرفته که به روش اولپلین-لاگرانژین^۲ به کمک نرم افزار آباکوس شبیه سازی گردیده است. در این مطالعه، بارگذاری انفجاری مخازن سقف ثابت گنبدی دارای تکیه گاه و خود ایستا با در نظر گرفتن بار انفجاری به مقدار ۲۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره تی ان تی در فاصله ۱۰ متری از مخازن در نظر قرار گرفته شده است. برای نمایش میزان تنش و جابجایی در ارتفاعهای مختلف روی مخازن چهار نقطه مرجع انتخاب گردید. نتایج بدست آمده نشان دهنده وضعیت بحرانی در نقطه مرجع سه (مربوط به بخش فضای خالی مخزن) است. در نقطه مرجع شماره سه مقدار تنش بیشتر از سایر نقاط می باشد و به همین سبب این ناحیه برای مخازنی که در معرض نیروی حاصل از موج انفجار قرار می گیرند، بحرانی می باشد.

کلمات کلیدی: مخازن ذخیره فولادی، انفجار، مخازن سقف ثابت گنبدی، آباکوس، کانوپ

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.323712.2688	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.323712.2688	۱۴۰۱/۱۲/۲۹	۱۴۰۱/۰۴/۱۲	۱۴۰۱/۰۴/۱۲	۱۴۰۱/۰۲/۳۰	۱۴۰۰/۱۰/۱۸
سید سینا کورهلی ss.kourehli@azaruniv.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

¹ Intergraph Tank

² CEL

۱- مقدمه

رشد تعداد فزاینده حملات تروریستی در سراسر جهان، تبدیل به یک تهدید برای تمدن بشری شده است. در دو دهه گذشته، انفجار بمب در مکان های تجاری و بازرگانی پرازدحام، ایستگاه های راه آهن زیرزمینی (مترو) و جاده ها و سایر مکان های شلوغ و پر رفت و آمد جان انسانهای زیادی را گرفته است. با این حال، پاسخ بسیاری از زیر ساخت های مهم شهری در مقابل انفجار با توجه به پیچیدگی در رفتار مواد، بارگذاری و رفتار غیر خطی هنوز به خوبی درک نشده است. یکی از نمونه های زیر ساخت های مهم شهری مخازن ذخیره مایعات می باشد. هر جامعه ای برای ذخیره سازی آب، شیر، نفت و فرآورده های نفتی مایع، مواد شیمیایی در صنایع و غیره از مخازن ذخیره سازی استفاده می کند. مخازن فولادی استوانه ای روزمینی از جمله سازه ها و تجهیزات صنعتی هستند که نقش حساسی در ذخیره مواد نفتی و پالایشگاهی، تامین آب آشامیدنی دارند. انفجار بر روی سازه های ذخیره سازی مایعات ممکن است به فاجعه بزرگی منجر شود. بنابراین درک رفتار دینامیکی سازه های ذخیره سازی مایع تحت اثر بارگذاری انفجار از طریق شبیه سازی های عددی از اهمیت زیادی برخوردار است.

در سال ۲۰۲۲ مقدم و همکاران [۱] به تحلیل دینامیکی مخازن آب بتن مسلح در معرض بار انفجار با استفاده از نرم افزار آباکوس پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر این است که میزان تغییر مکان دیوار مخزن در حالت پر ۳۱٫۲۵٪ کمتر از حالت خالی است. در سال ۲۰۲۱ جین و همکاران [۲] یک مدل عددی را برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی تلاطم و پاسخ فشار در یک مخزن آب مستطیلی دو بعدی ارائه نمودند. آنها یک سیستم موج گیر مناسب برای تمام تحریکات لرزه ای بر اساس تحلیل دینامیکی معرفی کردند. در تحقیق دیگری [۳] به بررسی عملکرد مخزن آب با تکیه گاه مستهلک کننده انرژی پرداخته شده است. در این تحقیق از فوم آلومینیومی به عنوان مواد مستهلک کننده انرژی استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده افزایش ۳۸٪ تغییر مکان مخزن بدلیل استفاده از سیستم مستهلک کننده انرژی و کاهش خسارت وارده به مخزن مورد مطالعه است. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۵ انجام شده است به مطالعه عددی رفتار مخازن آب تحت بار انفجار [۴] پرداخته شده است که نتایج بدست آمده بیانگر آنست که آب موجود در مخزن باعث کاهش کار خارجی و پاسخ مخازن آب میگردد.

در سال ۲۰۲۱ [۵] پاسخ دینامیکی و میزان آسیب مخازن ذخیره تحت اثر همزمان موج انفجار و ضربه قطعات (که موجب آسیب پذیری بیشتر سازه های مورد مطالعه خواهد شد) بررسی شده است. اثر همزمان موج انفجار و ضربه قطعه باعث افزایش چشمگیر کرنش پلاستیکی و آسیب مخزن میگردد. بر اساس پاسخ جابجایی و جذب انرژی، آسیب کلی مخزن که در معرض اثر همزمان قرار می گیرد، شدیدتر از آسیب ناشی از موج انفجار و قطعه به طور جداگانه است. در پژوهش دیگری آستانه اصل و همکاران [۶] به بررسی تاثیر انفجار ناشی از وسیله نقلیه بر روی دیوار برشی فولادی و بتنی پرداختند. این دیوار از صفحه ای فولادی که به اسکلت جوش داده شده و دالی از بتن مسلح که به وسیله بولت بر روی آنها نصب می شود، تشکیل شده است. نقطه ضعف دیوارهای بتنی معمولی در این است که این دیوارها تحت اثر انفجار خرد شده و ذرات آن با سرعت بسیار بالایی در محیط حرکت می کنند که این ترکش ها می توانند باعث بوجود آمدن خسارات و تلفات شدیدی گردند. اما در این نوع دیوار وجود صفحه فولادی در پشت دیوار مانع حرکت ذرات بتن شده و در واقع این خطر را از بین می برد. در تحقیق دیگری به بررسی اثر انفجار بر روی دالهای بتنی روسازی پرداخته شده است. در این تحقیق ابتدا دال بتنی را بصورت آزمایشگاهی تحت اثر انفجار قرار داده، سپس نتایج بدست آمده را با مدلسازی عددی مقایسه نموده اند. در این تحقیق رابطه بین قطر حفره ناشی از انفجار و وزن و محل انفجار ارائه شده و نهایتاً مقایسه ای بین مدل ها و نرم افزارهای مورد استفاده ارائه شده است [۷].

میرزایی و همکاران [۸] اثر انفجار بر روی مخازن تحت فشار گاز طبیعی را بررسی کرده اند. در نهایت، مقایسه ای بین تغییر شکل های ناشی از آتش سوزی و انفجار و همچنین رفتار شکست سیلندرهای انتهایی بسته ارائه شده است. خلیل پور و همکاران [۹] به بررسی اثر انفجار ناشی از مواد منفجره قوی بر مخازن تحت فشار مستقر در تأسیسات نفت، گاز و پتروشیمی پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان میدهد که به طور کلی مخازن تحت فشار قائم آسیب پذیری بسیار بیشتری نسبت به مخازن تحت فشار افقی و کروی در مقابل بار انفجار دارند

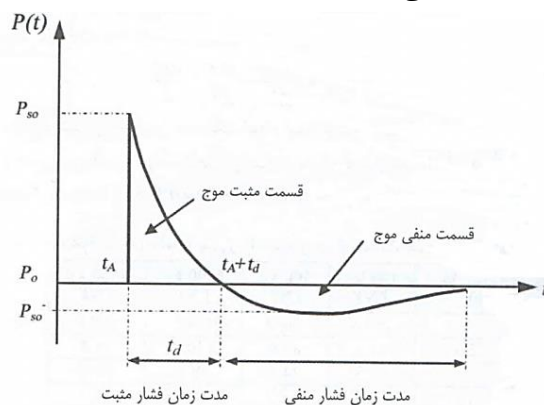
و استفاده از این نوع از مخازن می‌تواند باعث کاهش میزان ایمنی در مقابل خطرات احتمالی باشد. در تحقیق دیگری تحلیل دینامیکی مخزن ذخیره مایعات تحت بار انفجار با استفاده از روش اویلرین-لاگرانژین و بصورت کوپل سازه و سیال انجام گرفت [۱۰]. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی در نرم افزار آباکوس به بررسی رفتار مخازن پرداخته شده است.

در سال ۲۰۲۱ پاسخ دینامیکی مخازن فولادی نازک با پوشش پلی اوره به بارگذاری های طولانی مدت انفجار مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. در این پژوهش از مواد پوشش پلی اوره برای کاهش اثرات انفجار استفاده شده است. همچنین رفتار مخزن ذخیره سازی پوسته استوانه ای دیواره نازک تحت تاثیر انفجار در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. در این مطالعه برای مدل‌سازی سازه های مورد مطالعه از نرم افزار دینا استفاده شده است.

در تحقیق حاضر به بررسی آسیب پذیری مخازن در برابر نیروهای حاصل از انفجار پرداخته شده است. برای نیل به این هدف، ابتدا مخازن مورد بررسی با استفاده از استاندارد ای پی آی ۶۵۰^۳ [۱۳] و توسط نرم افزار اینترگراف تنک^۴ طراحی گردید. در مرحله بعدی با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی مخازن توسط نرم افزار آباکوس^۵ رفتار مخازن در اثر نیروهای حاصل از انفجار مورد مطالعه و بررسی گرفته است. در تحقیق حاضر به مطالعه رفتار مخازن با سقف مخروطی دارای تکیه گاه و خود ایستا در مقابل بار انفجار پرداخته شده است. لازم به توضیح است که در مخازن با سقف مخروطی دارای تکیه گاه، وزن سقف به کمک تیرهای شعاعی و ستون ها تحمل می شود. تنها نصف وزن شعاع آخر سقف به بدنه منتقل می گردد. مخازن با سقف مخروطی خود ایستا بدون ستون و تیرهای شعاعی می باشند و شکل مخروطی سقف وزن را تحمل کرده و به بدنه منتقل می نماید. در نهایت تاریخچه زمانی تنش فون میزس در چهار مخزن مختلف مورد مطالعه ارائه شده و نقاط بحرانی مشخص شده است.

۲- مدل‌سازی اثر انفجار

انفجارها به صورت ایستا و پرتابه ای وجود دارند که در تحقیق حاضر انفجارهای ایستا مورد مطالعه قرار گرفته است. رفتار معمول مواد منفجره با دو پارامتر اصلی وزن مواد منفجره و فاصله منبع انفجار تا هدف در نظر گرفته می شود. مشخصه های موج انفجار را می توان با خواص فیزیکی انفجار مدل کرد. شکل ۱ نمونه فشار معادل موج انفجار ایستا را نشان میدهد که در آن زمان وقوع انفجار، P_{so} فشار مثبت حاصل از انفجار، P_o فشار محیط، t_d فاصله زمانی فشار مثبت ایجاد شده و P_S^- فشار خلاء به وجود آمده در پشت موج انفجار است.



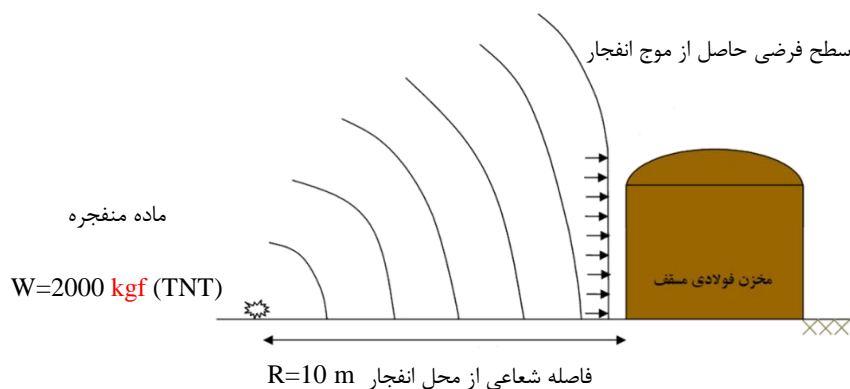
شکل ۱- نمودار فشار موج انفجار- زمان [۱۴]

³ API 650

⁴ Intergraph Tank

⁵ ABAQUS

با توجه به اینکه در اغلب مطالعات پیشین مقدار ماده منفجره TNT بین ۱۰۰ الی ۲۰۰۰ کیلوگرم و در فاصله ۱ الی ۳۰ متری مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵] لذا در تحقیق حاضر انفجار از نوع سطحی و نوع و وزن ماده منفجره ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT و در فاصله ۱۰ متری از بدنه مخازن اتفاق خواهد افتاد. (شکل ۲).



شکل ۲- مشخصات بارگذاری انفجار

تخمین بار حاصل از انفجار در هوا از طریق نرم افزارهای گوناگونی انجام میگیرد. در تحقیق حاضر از نرم افزار کانوپ^۶ استفاده شده است. این نرم افزار با استفاده از معادلات و منحنی های موجود در [۱۴] TM 5-855-1 توانایی محاسبه اثرات سلاح های متعارف جنگی را دارد. همچنین این نرم افزار قابلیت تخمین بارگذاری حاصل از انفجار در محیط باز را دارد. در جدول ۱ نتایج محاسبات مربوط به بار انفجار در نرم افزار کانوپ ارائه شده است.

جدول ۱ - محاسبات بار انفجار

وزن ماده منفجره	فاصله	فشار مثبت حاصل از انفجار	فشار منعکس شده	زمان رسیدن انفجار	زمان فاز مثبت	کل زمان انفجار
W (kgf)	R (m)	P_{so} (Kpa)	P_r (Kpa)	ثانیه	ثانیه	ثانیه
۲۰۰۰	۱۰	۲۱۶۸	۱۴۷۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۲

۳- طراحی مخازن مورد مطالعه

در شکل ۳ انواع مخازن روزمینی استوانه ای شکل ارائه شده است. در تحقیق حاضر به مطالعه رفتار مخازن با سقف مخروطی دارای تکیه گاه و خود ایستا در مقابل بار انفجار پرداخته شده است. در تحقیق حاضر چهار مخزن بر اساس آئین نامه API 650^۷ و توسط نرم افزار اینترگراف تنک^۹ طراحی شده است. انتخاب ابعاد کلی شامل قطر و ارتفاع با توجه به پراکندگی نسبت ارتفاع به قطر (H/D) انجام گرفته است. مشخصات مخازن طراحی شده در جدول ۲ ارائه گردیده است.

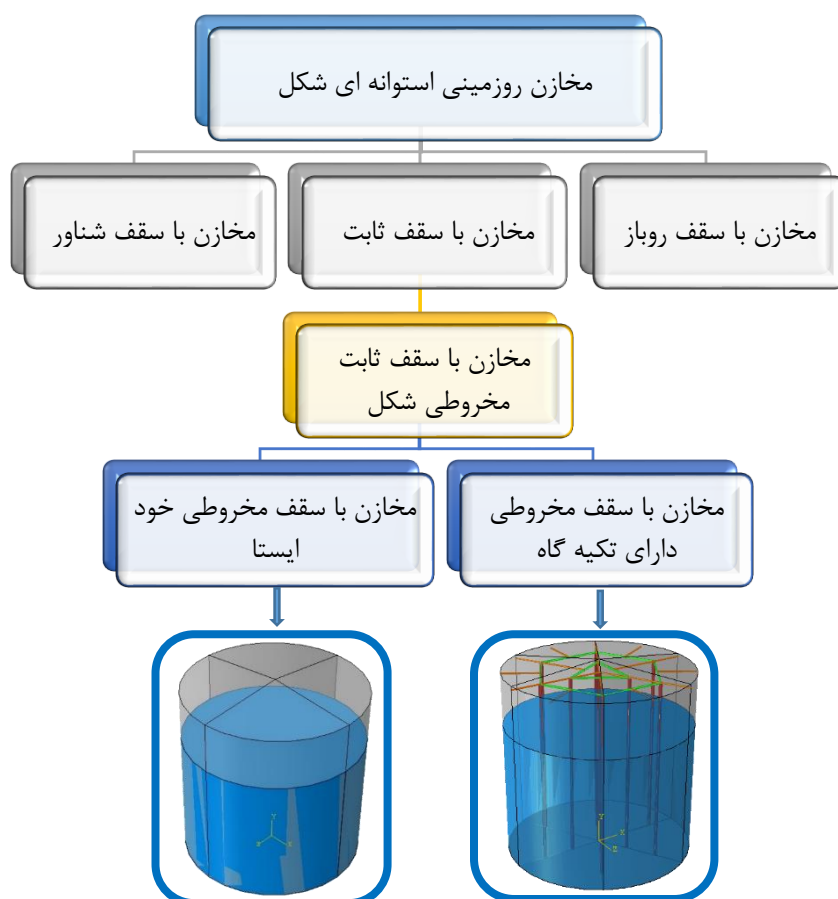
⁶ Conwep

⁷ American Petroleum Institute

⁹ Intergraph Tank 2014

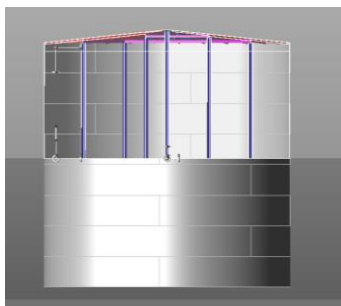
جدول ۲- مشخصات مخازن طراحی شده

ردیف	نام مخزن	ارتفاع (متر)	قطر (متر)	ارتفاع سیال (متر)	حجم مخازن m^3	H/D	نوع تکیه گاه
۱	مخزن با سقف مخروطی دارای تکیه گاه	۱۴/۶۴۰	۱۴/۶۴۰	۱۴/۱۰	۲۴۶۴	۱	گیردار
۲	مخزن با سقف مخروطی خود ایستا	۱۴/۶۴۰	۱۴/۶۴۰	۱۴/۱۰	۲۴۶۴	۱	گیردار
۳	مخزن با سقف مخروطی دارای تکیه گاه	۶	۸	۵/۵۰	۳۰۱	۰/۷۵	گیردار
۴	مخزن با سقف مخروطی خود ایستا	۶	۸	۵/۵۰	۳۰۱	۰/۷۵	گیردار



شکل ۳- انواع مخازن روزمینی استوانه ای شکل

در شکل ۴ نمایی از برش داخل مخزن شماره یک در نرم افزار اینترگراف تنک نشان داده شده است.



شکل ۴- نمایی از برش داخل مخزن شماره یک

همچنین در جدول ۳ خلاصه وزن یکی از مخازن طراحی شده (مخزن شماره یک) مربوط به بخش های مختلف مخزن ارائه شده است.

جدول ۳- خلاصه وزن مخزن شماره یک

ردیف	اجزاء مخزن	وزن
۱	جداره مخزن (با خوردگی)	۵۲۸۰۴۳۰ kgf
۲	جداره مخزن (بدون خوردگی)	۶۵۷۶۲۴۰ kgf
۳	وزن ورق های انیولار	۱۹۶۴۴۰ kgf
۴	وزن ورق کف	۱۳۱۳۸۶۰ kgf
۵	وزن ورق سقف	۷۸۱۷۷۰ kgf
۶	وزن ستون ها و تیرها	۱۱۱۷۷۱۰ kgf
۷	وزن سیال و مخزن عملیاتی	۲۲۷۵۹۱۸۶۰ kgf
۸	وزن آب	۲۳۲۲۳۶۶۰۰ kgf
۹	وزن عملیاتی (بدون خوردگی)	۲۳۷۵۷۷۹۰۰ kgf
۱۰	وزن آزمایشی (بدون خوردگی)	۲۴۲۲۲۲۶۴۰ kgf
۱۱	وزن خالی مخزن	۹۹۸۶۰۳۰ kgf

۴- مدلسازی مخازن

در این مقاله مخازن و سیال حاوی آن که آب فرض شده است تحت بار انفجار قرار گرفته و به روش اویلرین-لاگرانژین و بصورت کوپل سازه و سیال، به کمک نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. آب درون مخازن با استفاده از معادله حالت^۸ مدل سازی گردیده و از روش دینامیکی صریح^۹ برای حل مسئله استفاده شده است. تحلیل دینامیکی به صورت صریح مخصوص محاسبات مدل های بزرگ با زمان های پاسخ دینامیکی کوتاه و برای فرآیندها یا مدل های با ناپیوستگی های به شدت زیاد میباشد. این نوع از تحلیل امکان تعریف شرایط تماسی عمومی و استفاده از تئوری تغییر شکل های بزرگ را فراهم می کند [۱۶]. مخزن و پایه اصلی آن به صورت المان پوسته ای^{۱۱}، شاه تیرها و تیرهای شیروانی به صورت المان وایر^{۱۲} و سیال درون مخزن به صورت المان اویلرین^{۱۳} مدل سازی گردیده است. تماس بین پایه ها و مخزن با اتصال جوشی در نظر گرفته شده است.

^۸ Us-Up

^۹ Explicit- Dynamic

^{۱۱}Shell

^{۱۲}Wire

^{۱۳}Eulerian

^{۱۴}Eos

جنس قطعات سازه ای از فولاد در نظر گرفته شده است و خواص الاستیک و پلاستیک آن و اثرات جرمی آن لحاظ شده است. برای معرفی خواص پلاستیک فولاد از مدل جانسون کوک^{۱۰} استفاده شده است. مدل جانسون کوک یکی از معرفتترین و پر کاربردترین روابط برای ارائه رفتار ماده می باشد. از آنجایی که این مدل تغییر شکل های پلاستیک ماده را تحت شرایط کرنشی، دمایی و نرخ کرنشی مختلف به خوبی بیان میکند بطور گسترده ای بکار می رود [۱۷]. در رابطه ۱ معادله جانسون-کوک ارائه شده است [۱۸].

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - \left(\frac{T-T_0}{T_{melt}-T_0}\right)^m) \quad (1)$$

در رابطه فوق پارامتر A نشان دهنده مقاومت تسلیم اولیه در نرخ کرنشی شبه استاتیکی، پارامترهای b و n بیانگر جریان تنش مربوط به رفتار سخت شوندگی کرنشی در نرخ کرنشی شبه استاتیکی، پارامتر m تاثیر نرم شوندگی حرارتی، T_0 و T_{melt} بیانگر دمای ذوب شدگی و دمای مرجع، پارامتر C تاثیر نرخ کرنش و $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع را نشان می دهد. پارامترهای مدل جانسون-کوک بکار رفته در تحقیق حاضر در جدول ۴ ارائه شده است [۱۹].

جدول ۴- داده های خصوصیات پلاستیک فولاد

A	B	n	m	T_{melt}	T_0	C	$\dot{\varepsilon}_0$
2.46 E+08	1.30 E+08	0.0915	1	1700	1300	0.022	1

در مسائل هیدرو دینامیک آب، دو مولفه مجزا، یکی مولفه انتقالی و دیگری مولفه ضربه ای پدیدار می گردد. بنابراین پدیده امواج سطحی می تواند حائز اهمیت باشد. به این منظور از نوعی المان ۸ گره ای خاص موسوم به المان معادله حالت ۱۴ که در برنامه المان محدود آباکوس برای طراحی پدیده امواج سطحی کاربرد دارد، استفاده شده است. در جدول ۵ مشخصات مخازن مدلسازی شده در نرم افزار آباکوس ارائه شده است.

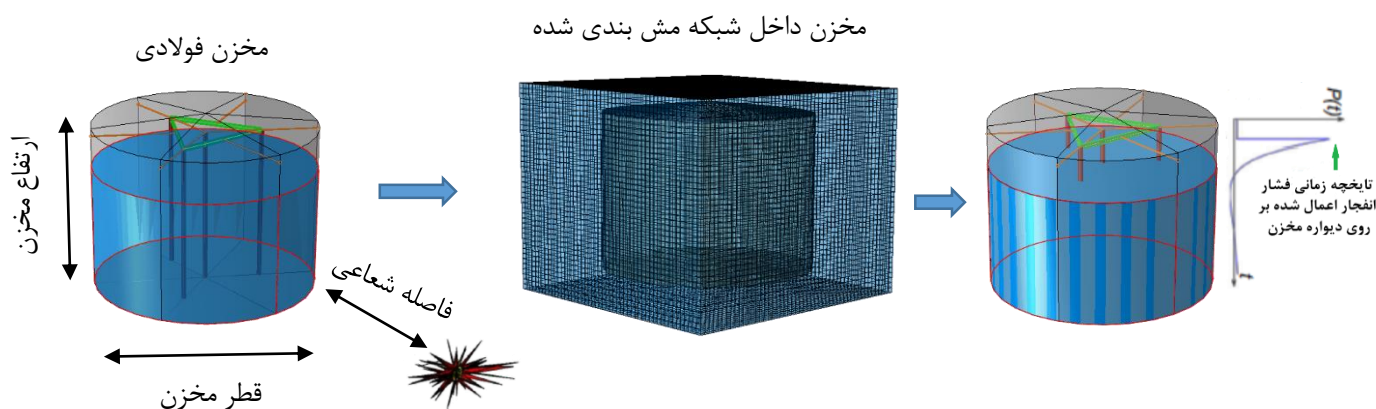
جدول ۵- مشخصات مخازن مدل سازی شده

نام مخزن	ارتفاع مخزن (متر)	قطر مخزن (متر)	نسبت ارتفاع به قطر مخزن	ارتفاع سیال (متر)	نوع مخزن
شماره یک	۱۴/۶۴۰	۱۴/۶۴۰	۱	۱۰/۵۰	سقف مخروطی دارای تکیه گاه
شماره دو	۱۴/۶۴۰	۱۴/۶۴۰	۱	۱۰/۵۰	سقف مخروطی خود ایستا
شماره سه	۶	۸	۰/۷۵	۴/۵۰	سقف مخروطی دارای تکیه گاه
شماره چهار	۶	۸	۰/۷۵	۴/۵۰	سقف مخروطی خود ایستا

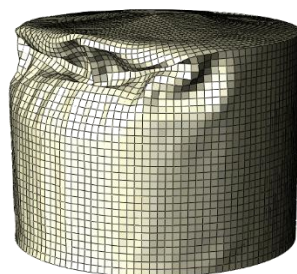
¹⁰ Johnson-Cook

در تحقیق حاضر برای نمایش وضعیت تنش در نقاط مختلف مخازن از تنش فون میزس استفاده شده است. در مورد المان هایی که تحت تنش های ترکیبی نرمال و برشی قرار دارند می توان با استفاده از معیار تنش فون میسز وضعیت تنش در سازه را نشان داد. رابطه تنش فون میزس بر اساس تنشهای اصلی بصورت زیر خواهد بود:

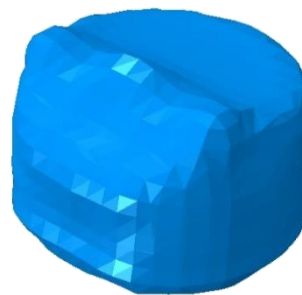
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$



مخزن تغییر شکل یافته



نوسانات آب



شکل ۵- مراحل انجام تحلیل مخازن مورد مطالعه

در مسائل هیدرو دینامیک آب، دو مولفه مجزا، یکی مولفه انتقالی و دیگری مولفه ضربه‌ای پدیدار می‌گردد. بنابراین پدیده امواج سطحی می‌تواند حائز اهمیت باشد. به این منظور از نوعی المان ۸ گره ای خاص موسوم به المان معادله حالت ۱۱ که در برنامه المان محدود آباکوس برای طراحی پدیده امواج سطحی کاربرد دارد، استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن اندرکنش آب و سیال از تماس مکانیکی و رفتار تماس مماسی^{۱۲} در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. همچنین خاک زیر مخزن بصورت صلب در نظر گرفته شده است.

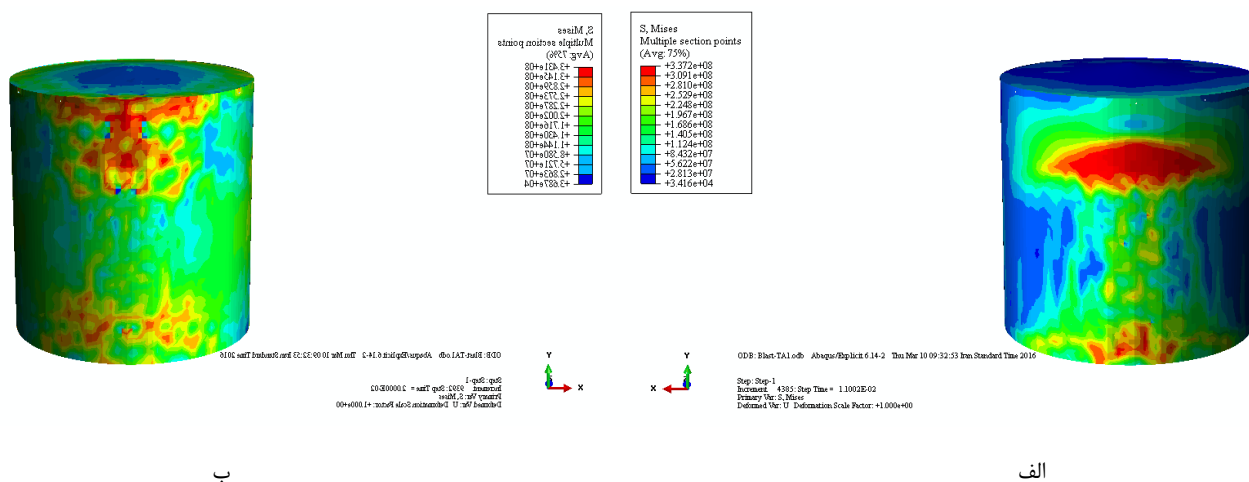
¹¹ Equation of State

¹² Tangential Behavior

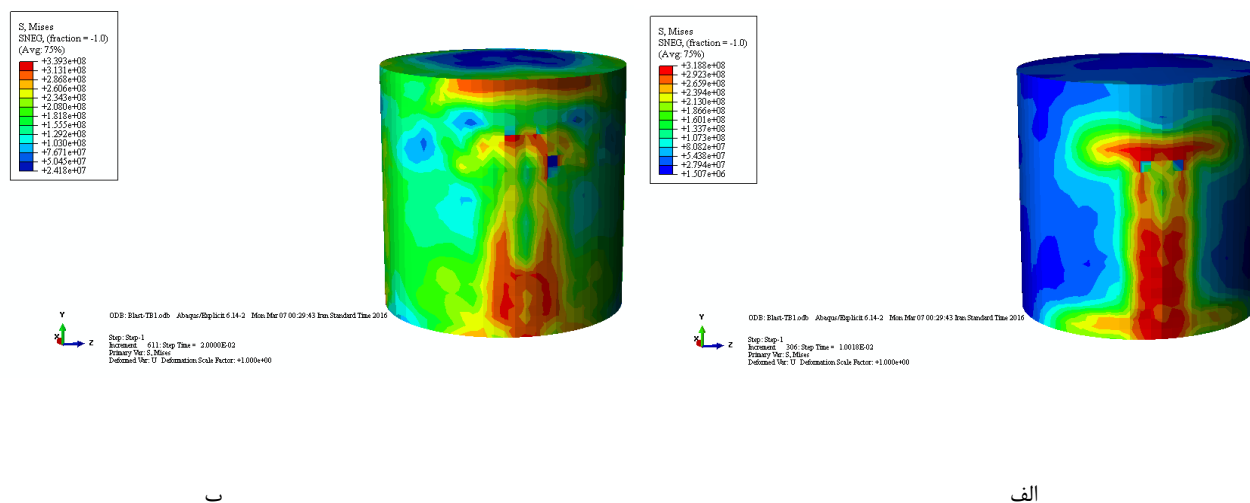
۵- تحلیل مخازن

مدلسازی سه بعدی المان محدود مخازن طراحی شده توسط نرم افزار آباکوس مدلسازی شده و در نهایت در معرض اثر انفجار (که توسط نرم افزار کانوپ شبیه سازی شده است) قرار گرفته است. پس از انجام تحلیل دینامیکی به بررسی رفتار مخازن آب پرداخته شده است. برای بررسی نتایج اقدام به استخراج نتایج تحلیل در چهار بازه زمانی ۰,۰۰۴، ۰,۰۰۱، ۰,۰۱۴ و ۰,۰۲ ثانیه شده است.

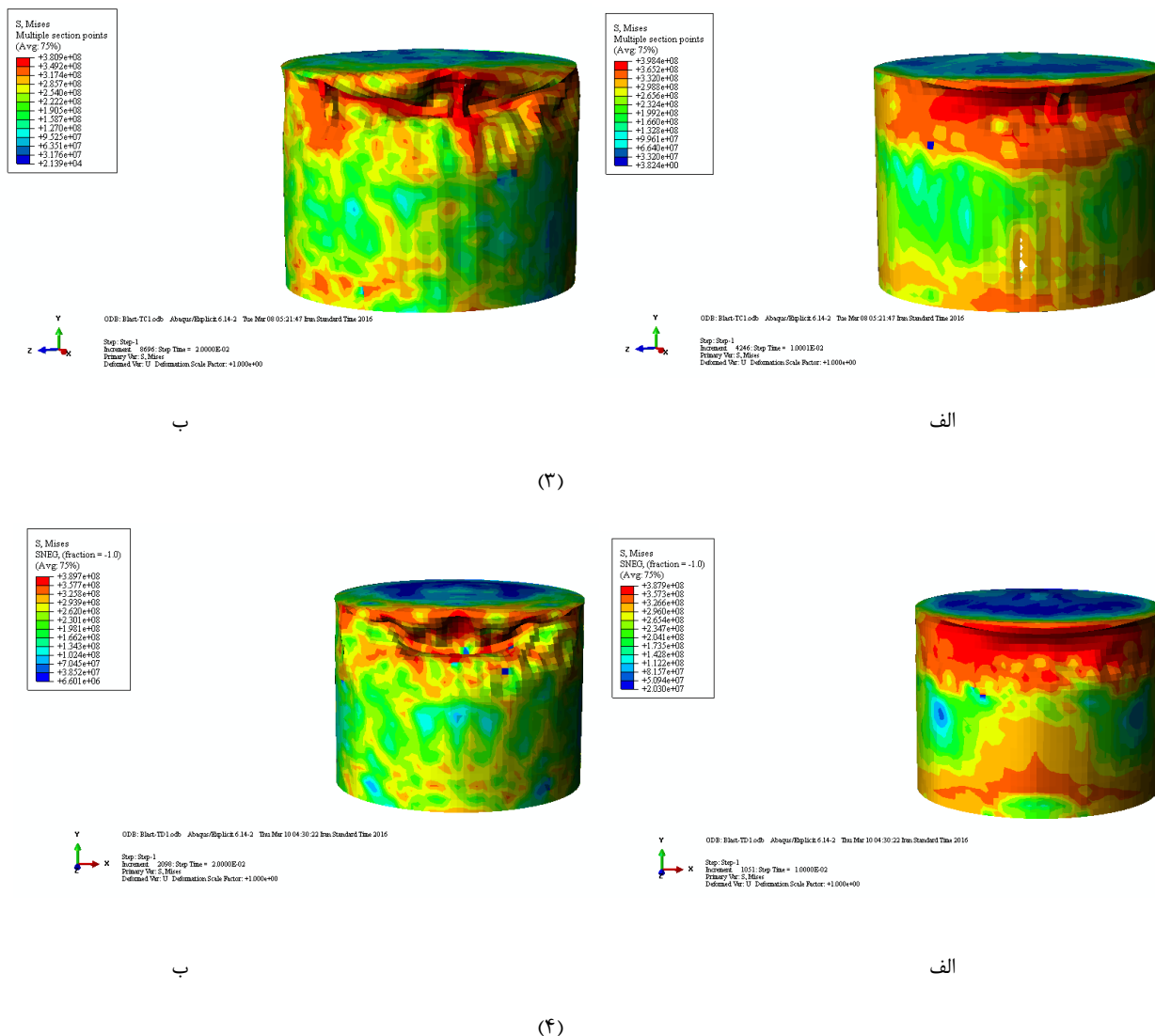
برای بررسی اثرات انفجار بر روی مخازن مورد مطالعه مقادیر تنش بر اساس معیار فون میزس برای چهار مخزن مورد مطالعه ارائه گشته است. در شکل ۶ وضعیت تنش فون میزس بر روی مخازن شماره یک تا چهار در دو زمان مختلف ۰,۰۱ و ۰,۰۲ ثانیه ارائه شده است.



(۱)



(۲)



شکل ۶- نتایج تنش فون میزس در مخازن شماره ۱ الی ۴ الف- در ثانیه ۰٫۱، ب- در ثانیه ۰٫۲

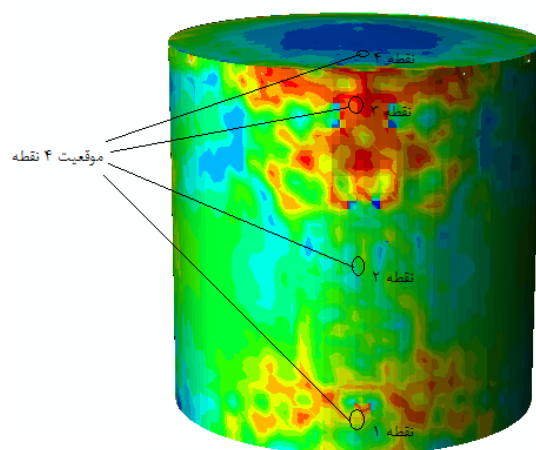
مقادیر حداکثر تنش های بدست آمده در مخازن مختلف در جدول ۶ ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده می شود حداکثر تنش وارد بر مخازن به ترتیب مربوط به مخازن شماره سه، چهار، یک و دو می باشد.

جدول ۶- ماکزیمم تنش های مخازن مختلف براساس پاسکال

مخزن شماره چهار	مخزن شماره سه	مخزن شماره دو	مخزن شماره یک	زمان (ثانیه)
9.176 e6	2.356 e8	5.696 e6	4.959 e7	0.004
3.879 e8	3.984 e8	3.188 e8	3.372 e8	0.01
3.814 e8	3.820 e8	3.414 e8	3.439 e8	0.014
3.897 e8	3.809 e8	3.393 e8	3.431 e8	0.02

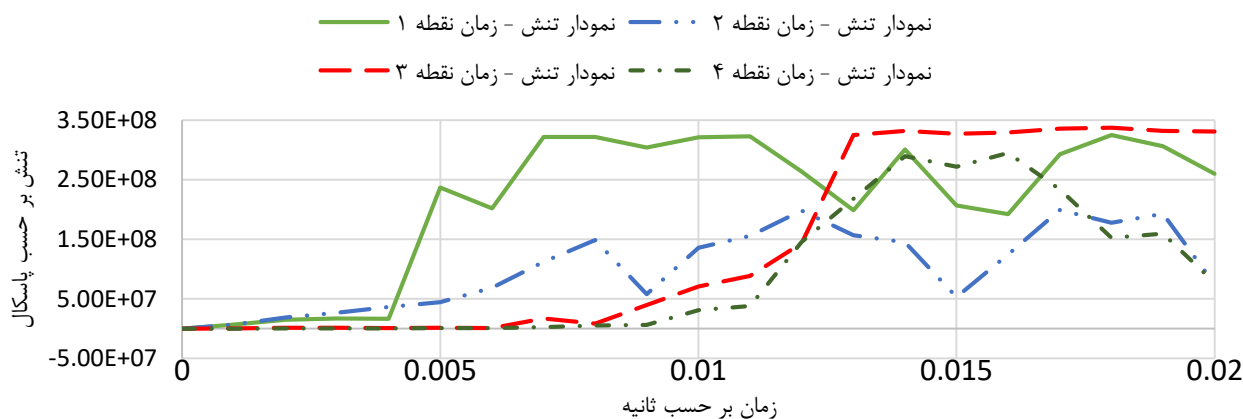
می توان دریافت که تنش در مخازن با ارتفاع کم و یا نسبت $H/D = 0.75$ بیشتر از مخازن با ارتفاع بلندتر و نسبت $H/D = 1$ می باشد؛ همین طور از خروجی های به دست آمده مشاهده می شود که تنش در مخازن دارای تکیه گاه با استفاده از تیر و ستون یعنی مخازن شماره یک و سه بیشتر از تنش در مخازن خود ایستا یعنی دو و چهار می باشد.

برای بررسی تاریخچه زمانی پاسخ در ارتفاع مختلف مخازن چهار نقطه مرجع روی مخازن انتخاب شده و تاریخچه زمانی تنش در این نقاط استخراج شده است. موقعیت نقاط مرجع در مخازن مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می شود نقطه شماره یک پایین دیواره مخزن نزدیک به کف، نقطه شماره دو قسمت میانی دیواره که حاوی سیال نیز می باشد، نقطه شماره سه قسمت فضای خالی مخزن و نقطه شماره چهارم مربوط به سقف مخزن می باشد.

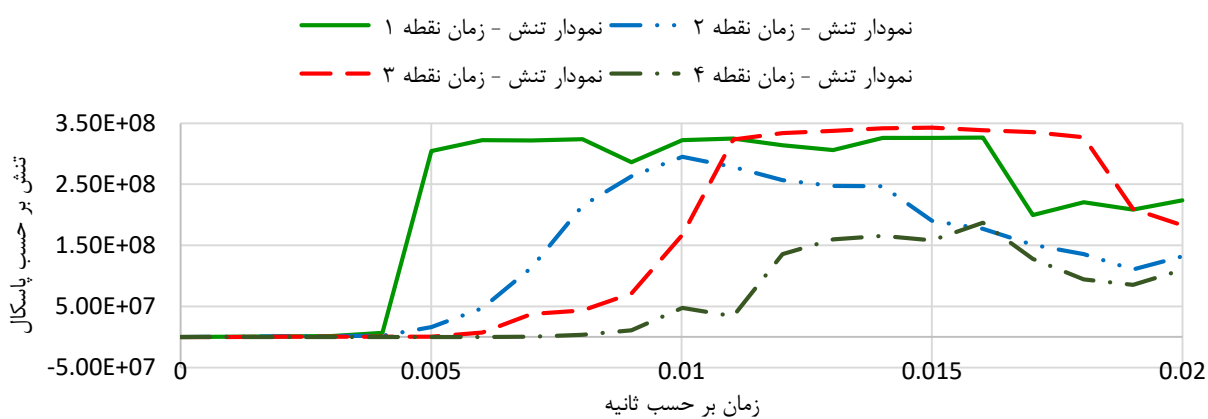


شکل ۷- موقعیت نقاط مرجع در مخازن مورد مطالعه

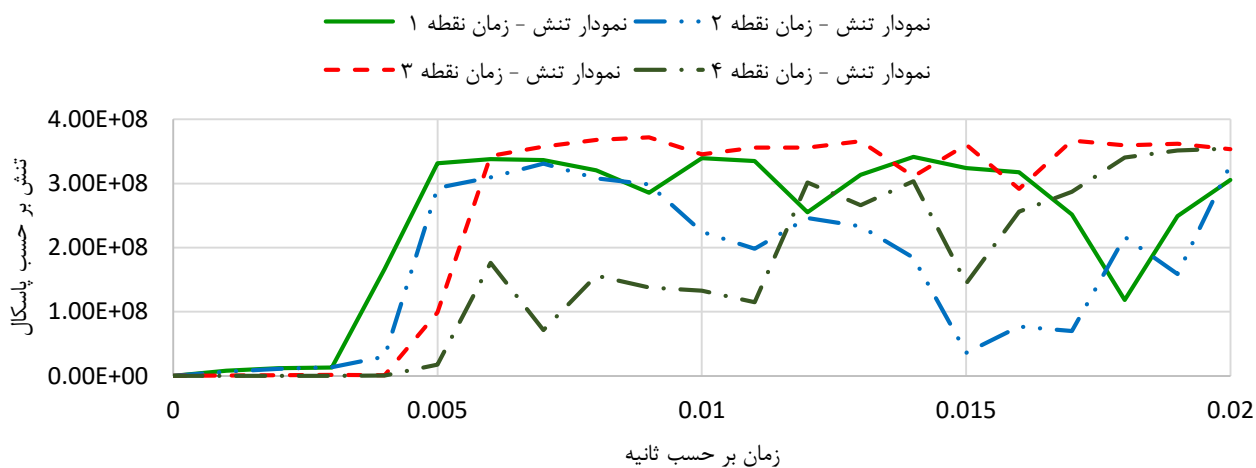
نمودارهای مربوط به تاریخچه زمانی تنش مربوط به مخازن مختلف در اشکال ۸ و ۹ ارائه شده است.



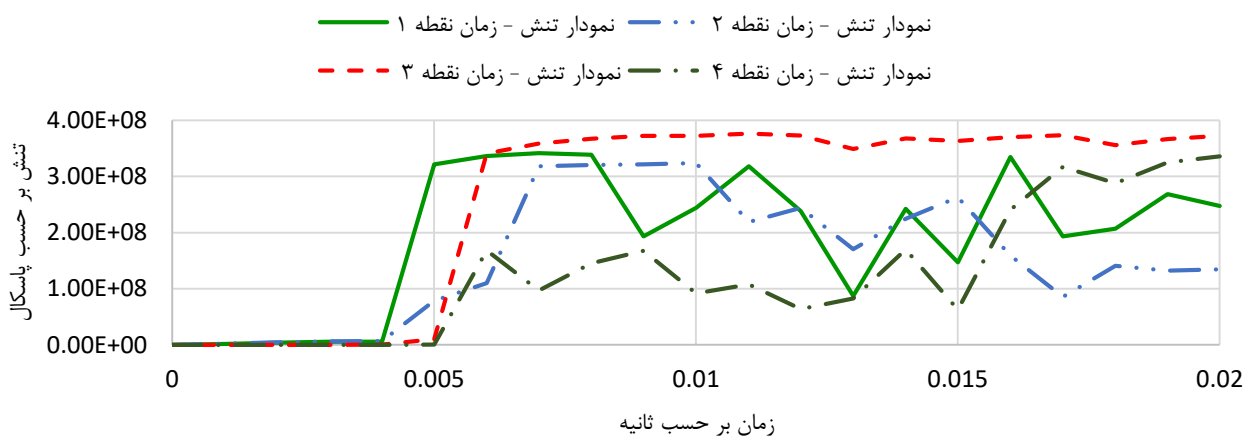
الف



ب



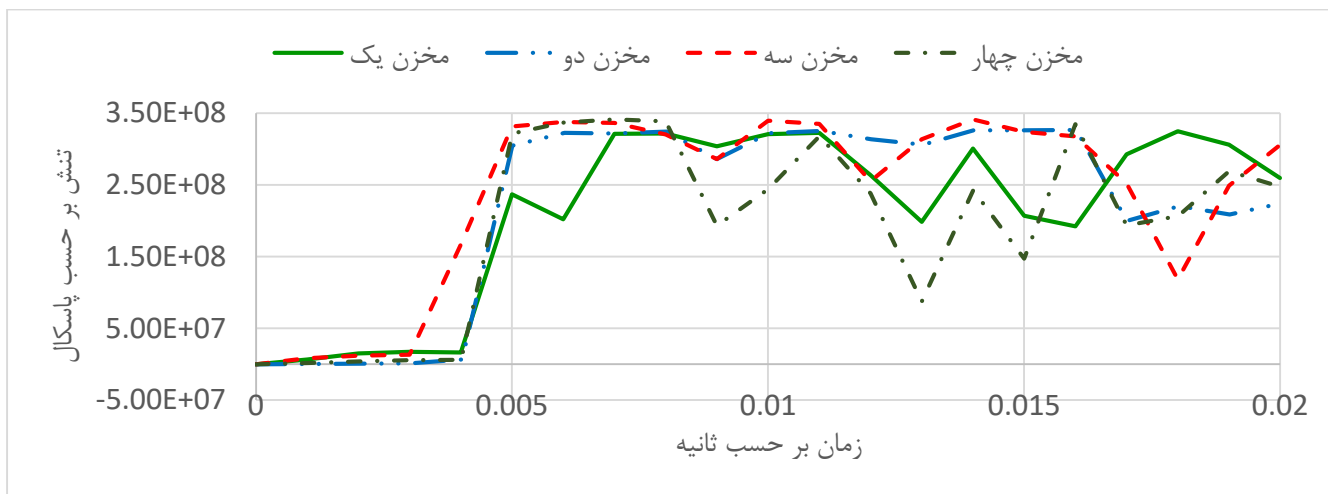
پ



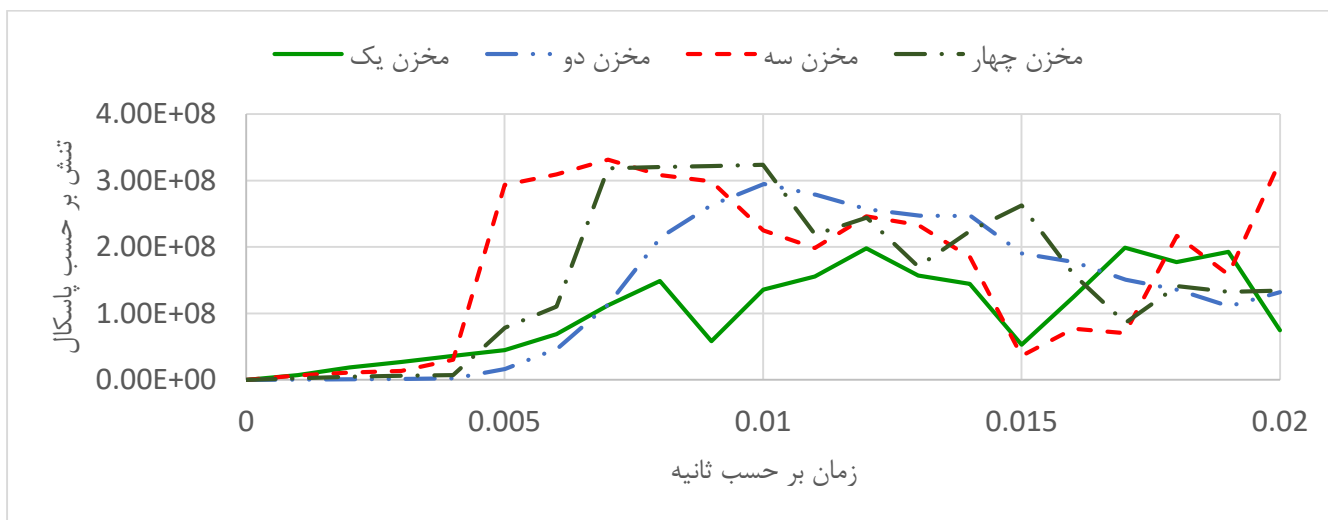
ت

شکل ۸- تاریخچه زمانی تنش بروی مخزن شماره یک (الف)، دو (ب)، سه (پ) و چهار (ت)

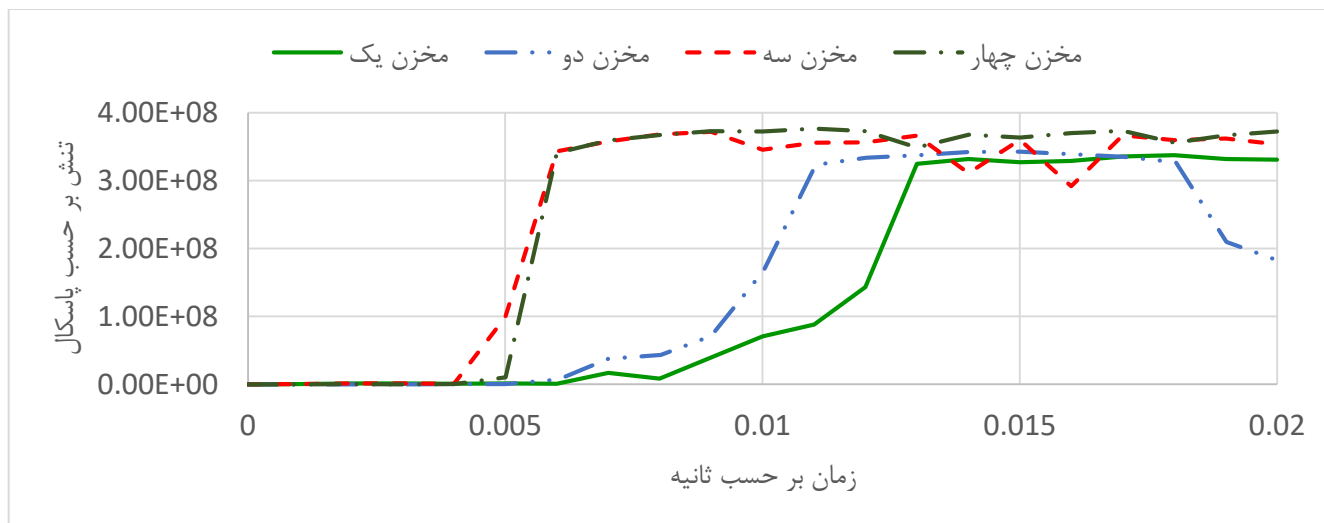
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۸ می توان مشاهده کرد که تنش ایجاد شده در نقطه یک (بخش تحتانی مخزن) سریعتر از بقیه نقاط به مقدار حداکثر خود رسیده است و بیشترین میزان تنش در نقطه مرجع شماره سه وجود دارد. همچنین در نقطه مرجع شماره سه یعنی قسمت فضای خالی مخزن مقدار تنش بیشتر از سایر نقاط می باشد و به همین سبب این ناحیه جزو نواحی بحرانی مخازنی که در مقابل نیروی حاصل از موج انفجار قرار می گیرند به حساب می آید.



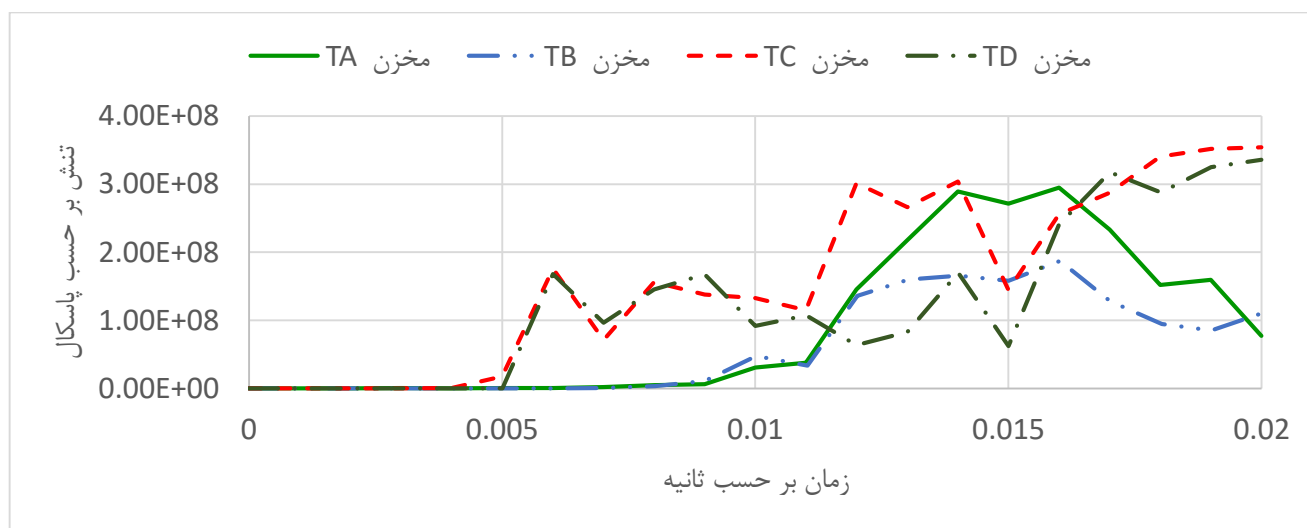
الف



ب



پ



ت

شکل ۹- تاریخچه زمانی تنش در نقطه مرجع ۱ (الف)، نقطه مرجع ۲ (ب)، نقطه مرجع ۳ (پ) و نقطه مرجع ۴ (ت) برای مخازن مختلف

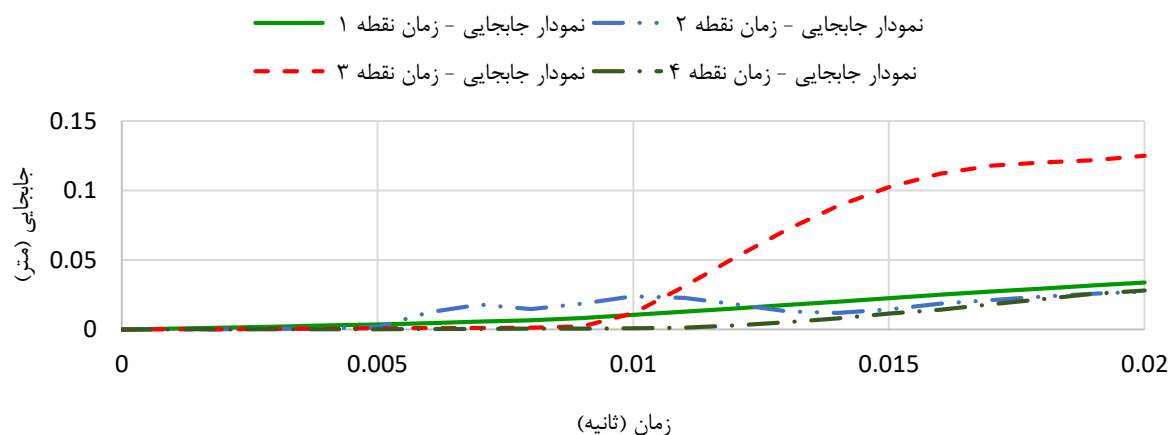
برای مقایسه بیشتر مقادیر تنش در مخازن مختلف تغییرات تنش در مخازن مختلف مربوط به یک نقطه مرجع در شکل ۹ ارائه شده است. همچنین جدول ۷ زمان وقوع حداکثر تنش و مقادیر حداکثر تنش ایجاد شده در چهار نقطه مرجع را نشان میدهد.

جدول ۷- زمان وقوع حداکثر تنش و مقادیر حداکثر تنش ایجاد شده در چهار نقطه مرجع

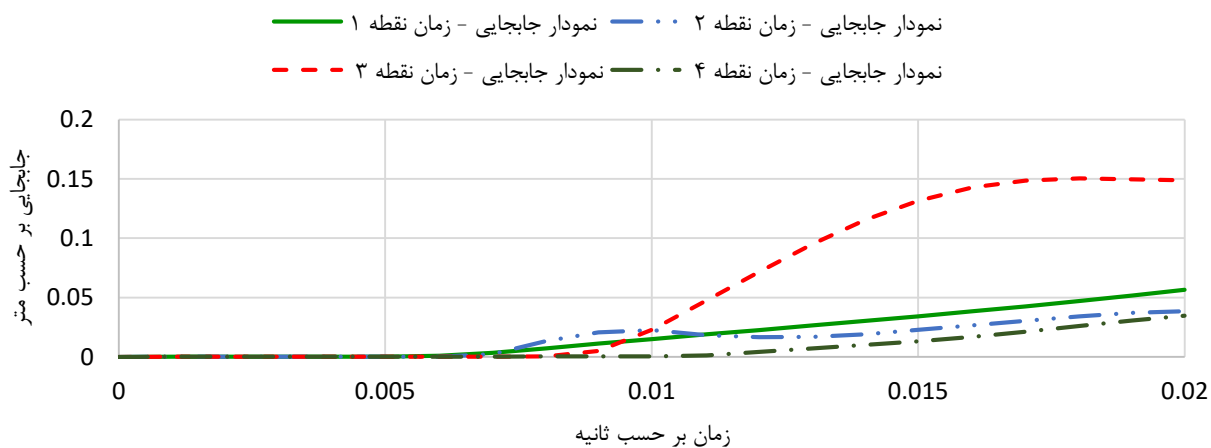
شماره نقطه مرجع	زمان وقوع حداکثر تنش (ثانیه)				مقادیر حداکثر تنش (مگاپاسکال)			
	مخزن شماره یک	مخزن شماره دو	مخزن شماره سه	مخزن شماره چهار	مخزن شماره یک	مخزن شماره دو	مخزن شماره سه	مخزن شماره چهار
یک	۰,۰۱۸	۰,۰۱۶	۰,۰۱	۰,۰۰۷	۳۲۵	۳۲۷	۳۳۹	۳۴۱
دو	۰,۰۱۷	۰,۰۱	۰,۰۰۷	۰,۰۱	۱۹۹	۲۹۵	۳۳۱	۳۲۴
سه	۰,۰۱۸	۰,۰۱۵	۰,۰۰۹	۰,۰۱۱	۳۳۷	۳۴۳	۳۷۲	۳۷۷
چهار	۰,۰۱۶	۰,۰۱۶	۰,۰۲	۰,۰۲	۲۹۵	۱۸۷	۳۵۴	۳۳۶

با توجه به نمودار تاریخچه زمانی هر چهار مخزن در نقطه مرجع یک تا چهار میتوان مشاهده کرد که ماکزیمم مقدار تنش به ترتیب در مخازن شماره چهار، سه، چهار و سه اتفاق می افتد.

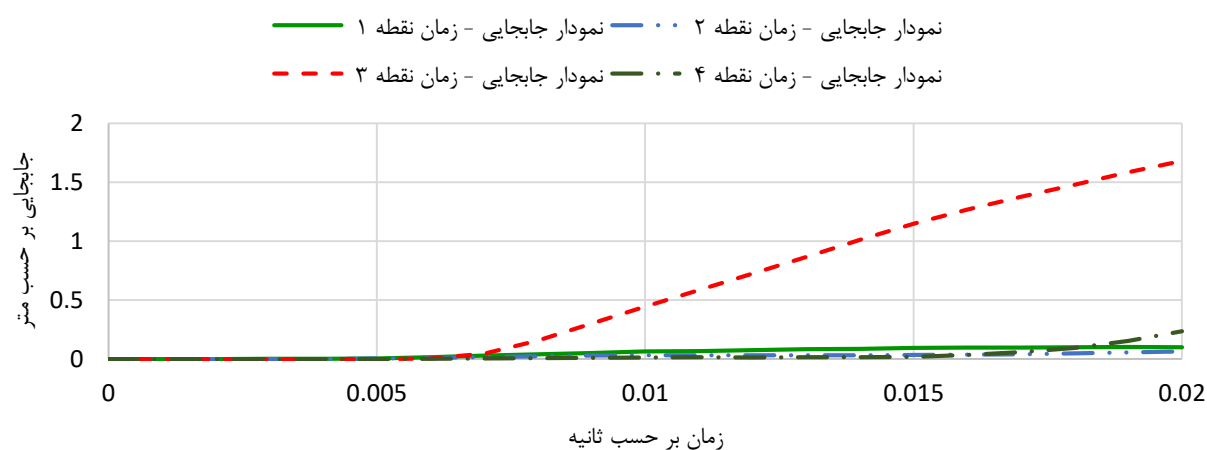
در بخش دیگری از مطالعه صورت گرفته به بررسی وضعیت جابجایی بر روی نقاط مرجع با ارتفاع های متفاوت روی مخازن پرداخته شده است. همانطوریکه در شکل ۱۰ دیده می شود تاریخچه زمانی جابجایی بروی مخزن شماره یک تا چهار در ۴ نقطه ارائه شده است. مشاهده می شود که بیشترین تغییر مکان در نقطه سه اتفاق افتاده است.



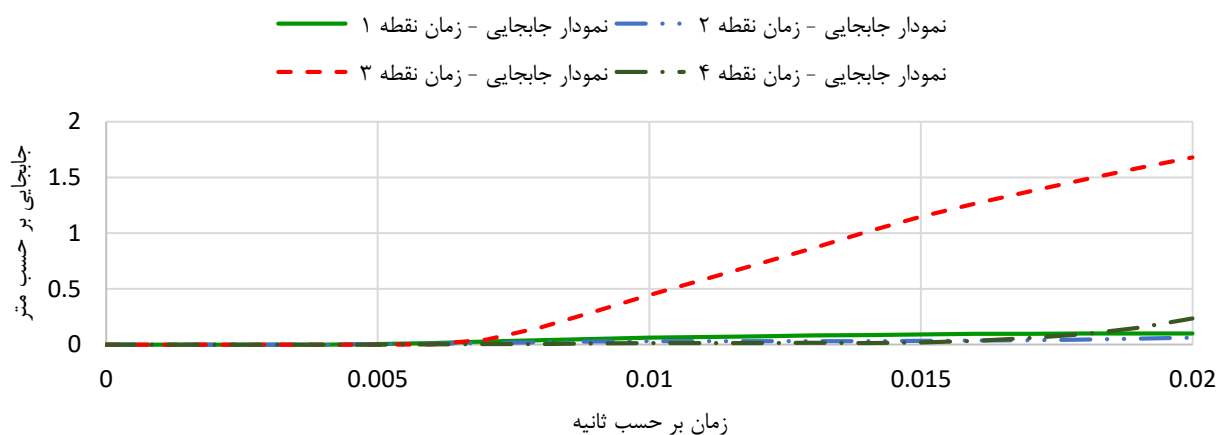
الف



ب



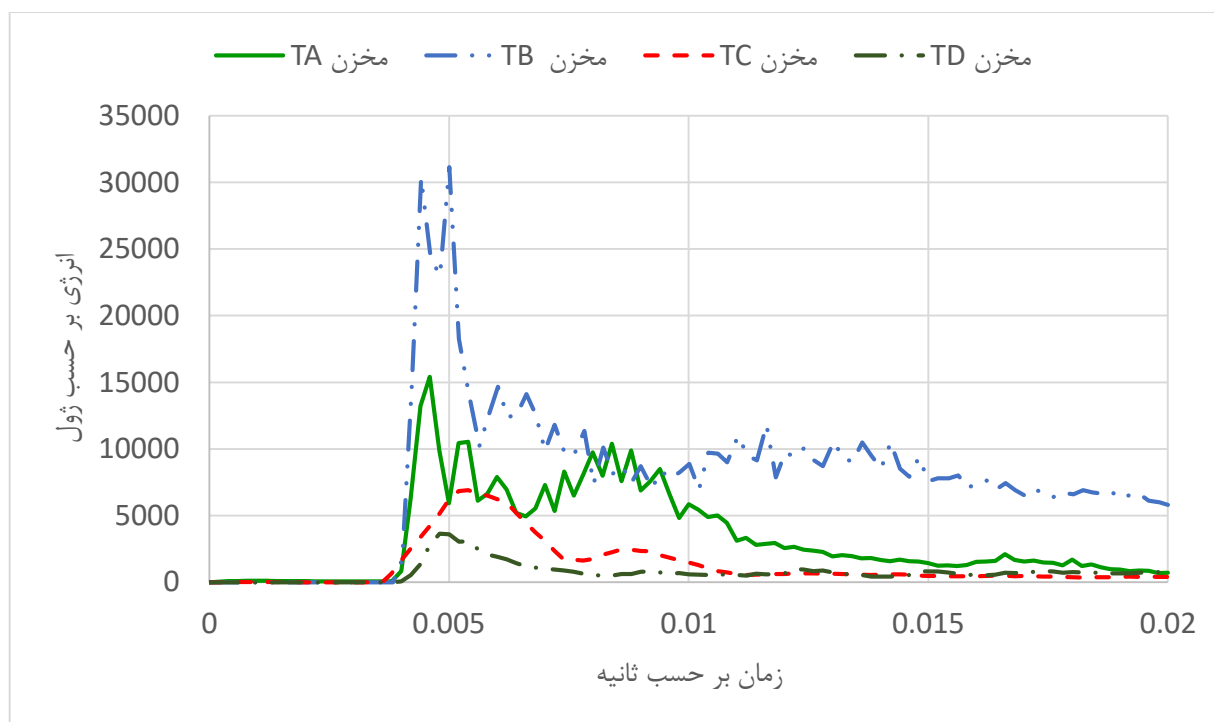
پ



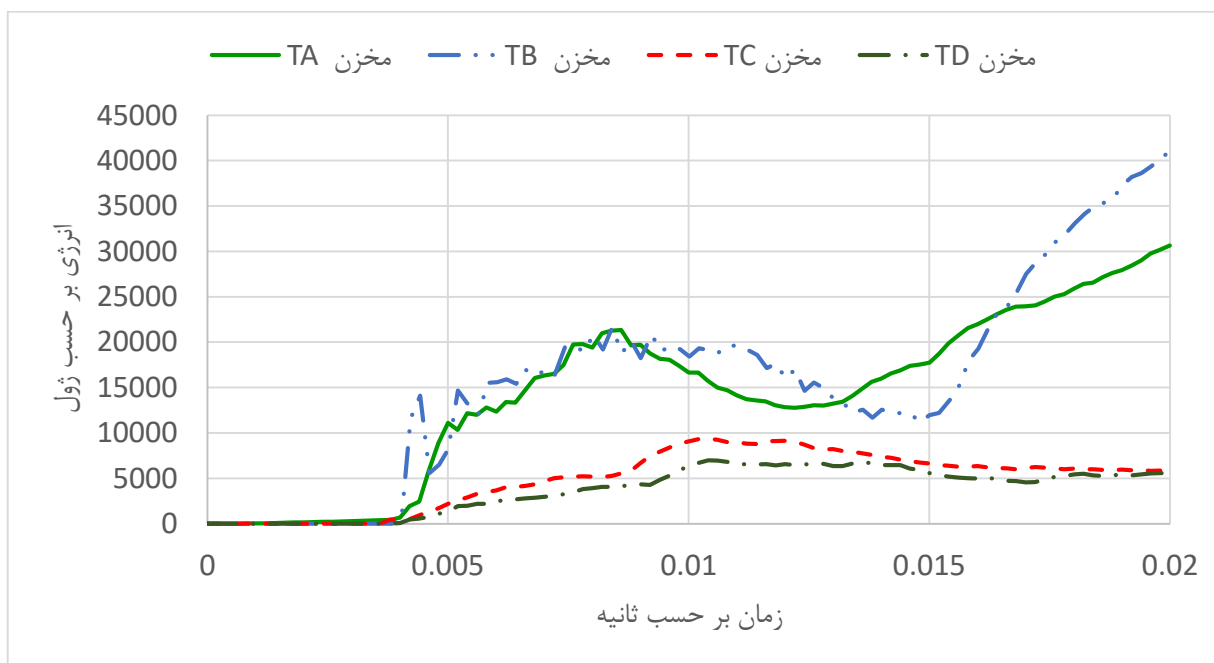
ت

شکل ۱۰- تاریخچه زمانی جابجایی بروی مخازن شماره یک (الف)، دو (ب)، سه (پ) و چهار (ت)

در بخش دیگری از مطالعات به بررسی تاریخچه زمانی انرژی جنبشی و کرنشی در تکیه گاه مخازن مورد مطالعه پرداخته شده است. در شکل ۱۱- الف انرژی جنبشی ایجاد شده در محل تکیه گاه و در شکل ۱۱- ب انرژی کرنشی در محل تکیه گاه ارائه شده است. از مقایسه نمودار انرژی جنبشی در تکیه گاه هر چهار نوع مخزن نتیجه می گیریم که انرژی جنبشی در مخازن با نسبت $(H/D=1)$ بیشتر از مخازن با نسبت $(H/D=0.75)$ میباشد. همین نتیجه از نمودار انرژی کرنشی در تکیه گاه های هر چهار نوع مخزن بدست می آید.



الف



ب

شکل ۱۱- تغییرات انرژی جنبشی (الف) و کرنشی (ب) در تکیه گاه مخازن

۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر ابتدا مخازن فولادی مورد بررسی توسط نرم افزار اینترگراف تنک طراحی گردیده و سپس توسط نرم افزار آباکوس مدل‌سازی المان محدود صورت گرفته و در معرض بار انفجاری به میزان ۲۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متری مخازن قرار گرفته است. چهار مخزن با سقف مخروطی دارای تکیه گاه و خود ایستا با نسبت ارتفاع به قطر برابر ۱ و ۰٫۷۵ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل بصورت زیر می‌باشد:

- بیشترین مقدار تنش وارده به ترتیب مربوط به مخازن نوع سه، چهار، یک و دو می باشد؛ که این نشان می دهد مخازن با ارتفاع کمتر و یا ($H/D = 0.75$) نسبت به مخازن با ارتفاع بلندتر و ($H/D = 1$) دارای مقدار تنش بیشتری هستند. همچنین مخازن با سقف ثابت مخروطی دارای تکیه گاه نسبت به مخازن با سقف ثابت مخروطی خود ایستا نیز دارای تنش بیشتری خواهند بود.
- در نقطه مرجع شماره سه یعنی قسمت فضای خالی مخزن مقدار تنش بیشتر از سایر نقاط می باشد و به همین سبب این ناحیه جزو نواحی بحرانی مخازنی که در مقابل نیروی حاصل از موج انفجار قرار می گیرند به حساب می آید.
- مقدار جابجایی در هر چهار نوع مخزن در نقطه مرجع شماره سه یعنی قسمت فضای خالی در بالای دیواره مخزن دارای بیشترین جابجایی می‌باشد. همچنین مشاهده می شود که مقدار جابجایی در مخازن با ارتفاع کم ($H/D = 0.75$) نسبت به مخازن با ارتفاع بیشتر ($H/D = 1$) در بحرانی ترین قسمت مخزن یعنی نقطه شماره سه بیشتر می باشد.
- با توجه به نمودارهای جابجایی به دست آمده در چهار نقطه انتخابی مخازن مشاهده می کنیم که مخازن با سقف ثابت مخروطی ساپورت شده نسبت به مخازن با سقف ثابت خود ایستا دارای جابجایی کمتری در هر چهار نقطه انتخابی می باشند در این صورت نتیجه می گیریم که مخازن ساپورت شده آسیب کمتری در مقابل موج حاصل از انفجار خواهند دید.

مراجع:

- [1] Moghadam, M., Razavitoose, S., & Sharbanozadeh, M. (2022). Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Water Tanks under Blast Considering Fluid-Structure Interaction. *Scientia Iranica*, DOI: 10.24200/sci.2022.57932.5478.
- [2] Jin, H., Calabrese, A., & Liu, Y. (2021). Effects of different damping baffle configurations on the dynamic response of a liquid tank under seismic excitation. *Engineering Structures*, 229, 111652.
- [3] Wang, Y., & Liew, J. R. (2015). Blast performance of water tank with energy absorbing support. *Thin-Walled Structures*, 96, 1-10.
- [4] Wang, Y., & Zhou, H. (2015). Numerical study of water tank under blast loading. *Thin-Walled Structures*, 90, 42-48.
- [5] Lai, E., Zhao, J., Li, X., Hu, K., & Chen, G. (2021). Dynamic responses and damage of storage tanks under the coupling effect of blast wave and fragment impact. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 73, 104617.
- [6] Astaneh-Asl, A., Heydari, C., & Zhao, Q. (2003, October). Analysis of car-bomb effects on buildings using MSC-dytran software and protective measures. In *Proc. of the MSC Software Virtual Product Development Conf* (pp. 13-15).
- [7] Luccioni, B. M., & Luege, M. (2006). Concrete pavement slab under blast loads. *International journal of impact engineering*, 32(8), 1248-1266.
- [8] Mirzaei, M., Malekan, M., & Sheibani, E. (2013). Failure analysis and finite element simulation of deformation and fracture of an exploded CNG fuel tank. *Engineering Failure Analysis*, 30, 91-98.
- [9] Khalilpour, S., Fayyaz, M., Khosravi, F. (2018). Numerical Analysis of High Explosive Explosion on Horizontal, Vertical and Spherical Pressure Vessels. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(2), 60-75. doi: 10.22065/jsce.2017.77655.1088.
- [10] Mittal, V., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2014). Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler-Lagrange formulation. *Thin-Walled Structures*, 84, 91-111.

- [11] Jiang, Y., Zhang, B., Wang, L., Wei, J., & Wang, W. (2021). Dynamic response of polyurea coated thin steel storage tank to long duration blast loadings. *Thin-Walled Structures*, 163, 107747.
- [12] Lu, S., Wang, W., Chen, W., Ma, J., Shi, Y., & Xu, C. (2019). Behaviors of Thin-Walled Cylindrical Shell Storage Tank under Blast Impacts. *Shock and vibration*, 2019.
- [13] API Standard 650, 12th ED (US) March 2013, Welded Tanks for Oil Storage.
- [14] U.S. Army, Fundamental of protective design for conventional weapons, US Department of the Army, Washington DC, 1986. Technical Manual TM 5-855-1.
- [15] De Silva, C. W. (2007). Vibration monitoring, testing, and instrumentation. CRC Press.
- [16] Abaqus, V. (2017). 6.14 Documentation. Dassault Systemes Simulia Corporation, 651(6.2).
- [17] Jafarian, F. (2019). Determination of Johnson-Cook equation constants for simulation of machining process using the optimization algorithm. *Journal of Modeling in Engineering*, 17(57), 315-325. doi: 10.22075/jme.2019.16596.1647.
- [18] Nam, H. S., Kim, J. S., Han, J. J., Kim, J. W., & Kim, Y. J. (2015, February). Ductile fracture simulation for A106 Gr. B carbon steel under high strain rate loading condition. In Recent Advances in Structural Integrity Analysis-Proceedings of the International Congress (APCF/SIF-2014):(APCF/SIF 2014) (p. 37). Woodhead Publishing.
- [19] Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering fracture mechanics*, 21(1), 31-48.