

Behavior of Above-Ground Reinforced Concrete Tanks under Blast Loading Considering Fluid-Structure Interaction

Majid Alipour

P.h.D Candidate, Department of Civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran.

Mojtaba Hosseini *

Professor, Department of Civil Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

Hamidreza Babaali

Department of Civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran.

Mehdi Raftari

Department of Civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran.

Reza Mahjoub

Department of Civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran.

Hosseini.m@lu.ac.ir

Keywords:

Fluid-structure interaction,
Von Mises stress,
Maximum displacement,
Kinetic energy,
Park-Ang damage index.

Abstract

Above-ground concrete tanks are exposed to external threats such as explosive loads due to their exposed location. A realistic assessment of the behavior of these structures requires consideration of the complex phenomenon of fluid-structure interaction. This study numerically investigates the response of cylindrical concrete tanks under the influence of an explosion, focusing on the effects of key variables such as tank filling level (empty, half-full, and full) and the distribution pattern of fluid hydrostatic pressure (uniform and non-uniform). Simulations were performed using the finite element software Abaqus and structural responses including maximum von Mises stress, maximum displacement, kinetic energy, and Park-Ang damage index were analyzed. The findings clearly demonstrate the pivotal role of the presence of fluid in modulating the structural response. So that the full tank condition, compared to the empty condition, resulted in a significant reduction of 41% in maximum stress, 90% in displacement, 8.9% in kinetic energy, and 15.4% in damage index. In contrast, tank emptying had the opposite effect, increasing these values by 18.1, 31.2, 4.1, and 17 percent, respectively. Also, changing the fluid pressure distribution pattern from uniform to triangular (nonuniform), although causing a 84.3 percent decrease in displacement and 4.1 percent in kinetic energy, on the other hand, we witnessed a 35.6 percent increase in stress and 2.5 percent in damage index. The results of this study emphasize the necessity of accurate modeling of fluid-structure interaction and considering tank operating conditions (filling rate and pressure pattern) in the design and evaluation of the resistance of such structures against severe dynamic loads such as explosions.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

این نشریه تحت قانون بین‌المللی کپی‌رایت CC BY-NC است.



* Corresponding Author

مطالعه و بررسی رفتار مخازن بتنی روزمینی تحت اثر بار انفجار با در نظر گرفتن اندرکنش سیال - سازه

مجید عالی پور

دانشجوی دکترای مهندسی عمران، گرایش سازه، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران.

مجتبی حسینی*

استاد دانشکده فنی و مهندسی، دپارتمان مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

حمیدرضا باباعلی

دپارتمان مهندسی عمران، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران.

مهدی رفتاری

دپارتمان مهندسی عمران، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران.

رضا محبوب

دپارتمان مهندسی عمران، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران.

Hosseini.m@lu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴ آذر ۰۵

تاریخ دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۴

چکیده

مخازن بتنی روزمینی به دلیل موقعیت قرارگیری آشکار، در معرض تهدیدات خارجی همچون بارهای انفجاری قرار دارند. ارزیابی واقع بینانه از رفتار این سازه‌ها مستلزم در نظرگیری پدیده پیچیده اندرکنش سیال و سازه است. این پژوهش به بررسی عددی پاسخ مخازن استوانه‌ای شکل بتنی تحت تأثیر انفجار، با تمرکز بر اثرات متغیرهای کلیدی: میزان پرشدگی مخزن (خالی، نیمه پر و پر) و الگوی توزیع فشار هیدرواستاتیک سیال (یکنواخت و غیریکنواخت) می‌پردازد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده و پاسخ‌های سازه‌ای شامل بیشینه تنش فون میسز، بیشینه جابه‌جایی، انرژی جنبشی و شاخص آسیب پارک - انگ مورد تحلیل قرار گرفتند. یافته‌ها به وضوح نقش محوری حضور سیال را در تعدیل پاسخ سازه نشان می‌دهند. به طوری که شرایط مخزن پر در مقایسه با حالت خالی، منجر به کاهش چشمگیر ۴۱ درصدی در تنش ماکزیمم، ۹۰ درصدی در جابه‌جایی، ۸/۹ درصدی در انرژی جنبشی و ۱۵/۴ درصدی در شاخص آسیب شد. در مقابل، تخلیه مخزن تأثیر معکوس داشته و این مقادیر را به ترتیب ۱۸/۱، ۳۱/۲، ۴/۱ و ۱۷ درصد افزایش داد. همچنین، تغییر الگوی توزیع فشار سیال از حالت یکنواخت به مثلثی (غیریکنواخت)، اگرچه باعث کاهش ۸۴/۳ درصدی جابه‌جایی و ۴/۱ درصدی انرژی جنبشی گردید، اما از سوی دیگر شاهد افزایش ۳۵/۶ درصدی تنش و ۲/۵ درصدی شاخص خرابی بودیم. نتایج این مطالعه بر ضرورت مدل‌سازی دقیق اندرکنش سیال - سازه و در نظرگیری شرایط بهره‌برداری مخزن (میزان پرشدگی و الگوی فشار) در طراحی و ارزیابی مقاومت این قبیل سازه‌ها در برابر بارهای شدید دینامیکی مانند انفجار تأکید می‌نماید.

کلیدواژه‌ها: اندرکنش سیال - سازه، تنش فون میسز، بیشینه جابه‌جایی، انرژی جنبشی، شاخص آسیب پارک - انگ.

۱- مقدمه

امنیت و پایداری سازه‌های حیاتی در شرایط بحرانی، به‌ویژه تحت بارهای دینامیکی شدید؛ مانند انفجار، از اولویتهای اصلی مهندسی عمران محسوب می‌شود. در این میان، مخازن روزمینی ذخیره سیالات، به دلیل عملکرد استراتژیک در تأمین نیازهای اساسی مانند آب آشامیدنی و اطفای حریق، اغلب به‌عنوان اهدافی آسیب‌پذیر در حملات احتمالی یا حوادث غیرعمدی موردتوجه قرار می‌گیرند. آسیب‌پذیری این مخازن، به‌ویژه انواع روزمینی، در مقایسه با نمونه‌های مدفون یا نیمه مدفون، به‌مراتب بیشتر است، چرا که هیچ پوشش محافظتی در برابر امواج ضربه‌ای ندارند. ارزیابی واقع‌بینانه از رفتار این سازه‌ها در برابر انفجار، مستلزم نگاهی فراتر از تحلیل سازه‌ای ساده است. در اینجا، پدیده اندرکنش سیال - سازه به عاملی کلیدی تبدیل می‌شود.

این اندرکنش عمدتاً ناشی از دو مکانیسم است: اول، ناتوانی سازه در پیروی کامل از تغییر شکل‌های القایی در سیال پیرامون و دوم، تأثیر دینامیکی حرکت سازه بر میدان جریان سیال؛ بنابراین، غفلت از این اثرات متقابل، به‌ویژه در سازه‌های حجیم مانند مخازن، می‌تواند منجر به برآوردهای غیرواقعی و در نهایت طراحی ناامن شود.

این پژوهش باهدف پر کردن بخشی از این خلأ دانشی، به بررسی نظام‌مند رفتار مخازن بتنی روزمینی تحت بار انفجار می‌پردازد. تمرکز اصلی بر کمی‌سازی کردن تأثیر دو متغیر اصلی است: میزان پرشدگی مخزن (در سه حالت خالی، نیمه‌پر و پر) و الگوی توزیع فشار هیدرواستاتیک سیال بر دیواره‌ها (به دو صورت یکنواخت و غیریکنواخت). پاسخ‌های سازه‌ای مورد مطالعه شامل بیشینه تنش فون میسز، بیشینه جابه‌جایی، انرژی جنبشی و شاخص خرابی پارک - انگ هستند. در این مطالعه، برای دستیابی به نتایجی دقیق‌تر، از مدل‌سازی پیشرفته با در نظرگیری اندرکنش سیال - سازه بهره گرفته شده است.

مخازن آب بتنی زمینی معمولاً در دو شکل استوانه‌ای و مکعب‌مستطیلی ساخته می‌شوند، اگرچه از نظر کلی به هر شکل هندسی زیبا و مناسب می‌توانند احداث گردند. به‌طور کلی، مخازن استوانه‌ای از لحاظ فنی و ملاحظات پدافند غیرعامل به مخازن مکعب‌مستطیلی برتری دارند. در مناطقی که ضریب باربری خاک مناسب باشد، مخازن کاسه‌ای نیز برای احجام بزرگ گزینه مناسبی است. از نقطه نظر بهره‌برداری و ملاحظات پدافند غیرعامل، مخازن معمولاً به‌صورت دوقلو در نظر گرفته می‌شوند. لیکن در صورت نبود محدودیت‌های خاص، به لحاظ اقتصادی مناسب‌ترین ابعاد هندسی برای مخازن مکعب‌مستطیلی در شرایطی حاصل می‌شود که نسبت طول به عرض مخزن ۳ به ۲ باشد. در مخازن دو قلوی استوانه‌ای نیز مناسب‌ترین حالت، استفاده از دو مخزن مستقل با حجم مساوی است [۱]. در عمل به منظور صرفه جویی در هزینه و زمان برای تحلیل و طراحی مخازن از آیین نامه‌ها و روابط تحلیلی استفاده می‌شود. این روابط آیین نامه‌ای عمدتاً بر مبنای مدل‌های مکانیکی می‌باشد. مدل‌های مکانیکی مشهور عبارتند از [۲]:

- مدل دو جرمی هاووزنر
- مدل سه جرمی هارون

• روش ساده ملهوترا

در نشریه ۱۲۳، مخازن بتنی در دو حالت مستطیلی و بتنی و هم چنین مخازن هوایی بتنی، تحلیل و بررسی شده اند [۱]. لذا مشاهده می‌شود، درصد عمده‌ای از آیین نامه‌های مذکور، در خصوص مخازن بتنی مطرح شده اند. آیین نامه‌های مختلف، روابط متنوعی را به منظور محاسبه‌ی دوره تناوب مخازن در شرایط مختلف، ارائه نموده‌اند. در شبکه‌های توزیع سیال، غالباً جریان غیرماندگار در اثر عواملی از جمله باز و بسته شدن شیرها در خطوط لوله، شروع به کار یا توقف پمپ‌ها در سیستم‌های پمپاژ، شروع به کار توربین هیدرولیکی که بار بر روی آن زیاد یا کم می‌شود و ارتعاش پره‌های پروانه پمپ ایجاد می‌شود. در تمامی موارد مذکور، پس از تغییرات صورت گرفته در سرعت جریان، نوساناتی در فشار سیال درون لوله رخ می‌دهد. در اثر این نوسانات فشاری در یک سیستم خط لوله، نیروهای دینامیکی قابل توجهی در سازه لوله ایجاد و در نتیجه جابجایی‌های دینامیکی در آن اتفاق می‌افتد. این جابجایی‌ها در جهات طولی و جانبی بوده و باعث ایجاد نیروهای قابل ملاحظه‌ای در تکیه‌گاه‌ها می‌شوند و همچنین می‌توانند بر روی امواج فشاری درون مجرا تأثیرگذار باشند. به این ترتیب پدیده‌ی اندرکنش یا تداخل سیال-سازه اتفاق خواهد افتاد و سیال و سازه بر روی هم تأثیر می‌گذارند. لذا لزوم همزمانی بررسی رفتار سیال و سازه به شدت آشکار می‌گردد. زیرا به تنهایی نمی‌توان هر یک از دو مقوله مطرح شده را مورد بررسی قرار داد و به منظور تحلیل سیستم سیال-سازه لازم است معادلات حاکم بر حرکت سیال و حرکت دینامیکی سازه، به صورت همزمان یا کوپله شده بیان شده و با روش مناسبی شود [۳]. معادلات اصلی توصیف کننده حرکت یک سیال لزج تراکم پذیر به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

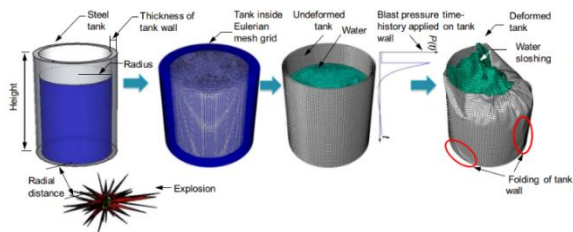
- معادلات ناویر - استوکس (معادله تکانه)
- معادله پیوستگی

پدیده انفجار را می‌توان به‌عنوان یک رهاسازی ناگهانی و فوق‌العاده سریع انرژی در قالب‌های مختلف از جمله امواج نوری، حرارتی، صوتی و به‌ویژه امواج ضربه‌ای تعریف نمود. مکانیزم این پدیده بدین صورت است که مقادیر عظیمی انرژی در بازه زمانی بسیار کوتاهی در حد میلی‌ثانیه آزاد می‌گردد. پیامد مستقیم این آزادسازی، ایجاد تشعشعات حرارتی شدید و انتشار امواج فشارقوی در محیط اطراف است. از دیدگاه ماده‌شناسی، مواد منفجره بر پایه حالت فیزیکی خود در سه دسته جامد، مایع و گاز دسته‌بندی می‌شوند. در این میان، مواد منفجره جامد به دلیل قدرت تخریب بالاتر و تولید امواج ضربه‌ای قوی‌تر، کاربرد گسترده‌تری در محموله‌های انفجاری دارند. از منظر دیگر، این مواد بر اساس حساسیت و آستانه آغاز واکنش به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: مواد منفجره اولیه که از حساسیت بسیار بالایی برخوردار بوده و با کوچک‌ترین محرک خارجی اعم از جرقه، ضربه یا حرارت ناچیز به سرعت واکنش می‌دهند، و مواد منفجره ثانویه که برای آغاز واکنش نیاز به یک محرک قوی‌تر دارند [۴].

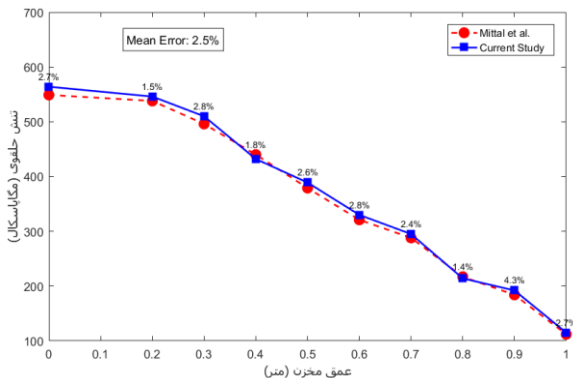
۲- مروری بر مطالعات انجام شده

است که تحقیقات گذشته برای ارزیابی دقت روش‌های مدل‌سازی عددی، جهت اعمال بار انفجار بر مخازن ذخیره آب با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین، از روش کوپل اویلری - لاگرانژی شکل (۱) برای اعتبارسنجی عملکرد مخزن آب بر اساس اندرکنش سیال - سازه استفاده شده است. در این بخش، بارگذاری انفجاری بر روی مخزن در نرم‌افزار آباکوس اعمال می‌شود و با روش مدل‌سازی عددی ارائه شده توسط میتال و همکاران مقایسه و ارزیابی می‌شود. مخزن آب فولادی با ابعاد و درصد‌های مختلف آب تحت انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف از مخزن آب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. شکل (۲) مروری بر مدل‌سازی این مخازن آب در برابر بار انفجار را نشان می‌دهد. همچنین، مشخصات مخزن آب فولادی شامل مدل سخت‌شوندگی جانسون - کوک و معادلات هوگونیوت برای آب است. این مشخصات در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و سپس نتایج مقایسه شده‌اند. در نهایت، مدل ایجاد شده اعتبارسنجی شده است. در این حالت، یک مخزن آب با ارتفاع ۱ متر، شعاع ۱ متر و ۵۰ درصد آب تحت انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری از مخزن آب، مدل‌سازی شده و در نرم‌افزار آباکوس ارزیابی شده است تا اعتبار مدل تأیید شود.

شکل (۲) نتایج حاصل از تنش حلقه‌ای بدنه مخزن آب تحت انفجار را نشان می‌دهد. نمودار تنش حلقه‌ای دیواره در نقطه اوج انفجار بررسی شده و فشارها به مخزن آب اعمال می‌شوند. در این راستا، مسیری از لبه دیواره تا کف مطابق شکل (۳) انتخاب می‌شود. انتخاب مسیر با استفاده از گره‌های المان‌های مخزن آب انجام می‌شود. در این حالت، مقدار تنش حلقه‌ای آن برای هر گره مشخص می‌شود و نمودار آن رسم می‌شود. جدول (۱) درصد خطا را در مطالعه انجام شده توسط میتال و همکاران با مطالعه حاضر مقایسه می‌کند. نتایج مقایسه نشان داد که مقدار اختلاف کمتر از ۵ درصد بوده است.



شکل ۱- مراحل شبیه‌سازی کوپل اویلر-لاگرانژ [۱۳].



شکل ۲- مقایسه تنش حلقه‌ای مدل مورد مطالعه با تحقیق میتال و همکاران [۱۳].

پیشینه تحقیقاتی گسترده‌ای به تحلیل رفتار مخازن تحت اثر بارهای دینامیکی مختلف، به‌ویژه زلزله، اختصاص یافته است. برای نمونه، برخی محققان با توسعه روش‌های تحلیلی تکراری، پاسخ دینامیکی مخازن بتنی را با مدل‌سازی سیال به‌صورت چند گره‌ای و در نظرگیری انعطاف‌پذیری دیواره‌ها مورد مطالعه قرار داده‌اند [۵ و ۶]. در رویکردی دیگر، تأثیر محتوای فرکانسی ثبت زلزله بر پاسخ مخازن مستطیلی با استفاده از روش ترکیبی المان محدود-هیدرودینامیک ذرات هموار بررسی شده است. یافته‌ها حاکی از آن است که رکوردهای با محتوای فرکانسی پایین‌تر، اگرچه باعث افزایش ارتفاع تلاطم می‌شوند، اما رکوردهای با فرکانس متوسط، پاسخ‌های سازه‌ای بزرگتری را ایجاد می‌کنند [۷].

مطالعات تجربی نیز نقش بسزایی در درک رفتار این سازه‌ها داشته‌اند. به‌عنوان مثال، تحلیل عملکرد لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای پیش‌تنیده با استفاده از میز لرزه، همگونی قابل‌قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی نشان داده است. این پژوهش نشان داد که مدل‌های با نسبت شعاع به ارتفاع بیشتر، آسیب‌پذیرتر بوده و نوسانات سیال ارتباط مستقیمی با ایجاد ترک‌های عمودی در دیواره مخزن دارد [۸].

در زمینه بارگذاری انفجاری، تحقیقات کمتری انجام شده، اما یافته‌های موجود حاوی نکات مهمی هستند. یک مطالعه بر روی مخازن استوانه‌ای بتن‌آرمه نشان داد که افزایش درصد پرشدگی مخزن، با افزایش سختی سازه، موجب کاهش ۲۵/۳۱ درصدی تغییر مکان می‌شود. همچنین، وجود سیال درون مخزن می‌تواند تنش‌های حلقوی را حدود ۲۰ مگاپاسکال افزایش دهد [۹]. پژوهشی دیگر با به‌کارگیری فرمول‌بندی اولر-لاگرانژ تأیید کرد که تنش‌ها با افزایش ارتفاع مایع و کاهش فاصله از مرکز انفجار، تشدید می‌شوند [۱۰].

راه‌حل‌های نوین برای افزایش مقاومت در برابر انفجار نیز مورد توجه بوده است. برای مثال، یک مطالعه نشان داد که استفاده از تکیه‌گاه‌های با درجه آزادی زیاد در پایه مخزن می‌تواند با اتلاف انرژی بیشتر، تغییر شکل سازه را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. همچنین، حضور سیال درون مخزن به‌عنوان یک میراکننده انرژی عمل کرده و عملکرد مخزن پر را در مقایسه با مخزن خالی بسیار مطلوب‌تر می‌سازد [۱۱].

یک پژوهش مشابه به بررسی اثر پارامترهایی مانند جرم ماده منفجره، فاصله از مخزن و شکل سطح مقطع پرداخته است. نتایج حاکی از آن بود که تغییر مقطع از دایره به مربع و نیز افزایش جرم ماده منفجره، به‌طور کلی منجر به تشدید پاسخ‌های سازه‌ای (تنش، جابه‌جایی و شاخص خرابی) می‌شود [۱۲]. باتوجه به پیشینه فوق، پژوهش حاضر با تمرکز خاص بر تأثیر هم‌زمان شرایط پرشدگی و الگوی توزیع فشار سیال بر رفتار مخازن استوانه‌ای شکل تحت بار انفجار، در پی تکمیل خلأهای موجود در ادبیات فنی این حوزه است.

۳- صحت‌سنجی و مدل‌سازی

به‌منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر، اقدام به‌راستی آزمایی نتایج ارائه شده در این پژوهش با استفاده از نتایج ارائه شده در یک مرجع معتبر، شده است. به همین منظور در این مطالعه، یکی از مدل‌های بررسی شده توسط میتال و همکاران شبیه‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج ارائه شده در این مرجع، مقایسه شده است. لازم به ذکر

الاستیسیته برابر با 23.5 Gpa در نظر گرفته شده است. برای تعریف مشخصات پلاستیک و رفتار بتن آسیب دیده، پارامترهای مربوط به بخش Concrete Damaged Plasticity را مطابق جدول (۲) و (۳) در نظر گرفتیم.

جدول ۲- پارامترهای رفتار بتن آسیب دیده.

پارامتر	K	نسبت تنش	خروج از مرکز سطح	زاویه
ویسکوزیته		دومحوری به تکمحوری	تسلیم	اتساع
۰/۰۰۰۱	۰/۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰

جدول ۳- رفتار فشاری و کششی بتن در نرم افزار آباکوس.

کرنش پلاستیک	تنش کششی (مگاپاسکال)	کرنش پلاستیک	تنش فشاری (مگاپاسکال)
۰/۰۰۰۰	۲/۸۰	۰/۰۰۰۰	۱۱/۲۵
۰/۰۰۰۱	۲/۱۰	۰/۰۰۰۰	۱۸/۷۵
۰/۰۰۰۲	۱/۴۰	۰/۰۰۰۰	۲۲/۵۰
۰/۰۰۰۳	۰/۷۰	۰/۰۰۰۲	۲۵/۰۰
۰/۰۰۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰۰۵	۲۳/۷۵
		۰/۰۰۱۰	۲۱/۲۵
		۰/۰۰۲۰	۱۷/۵۰
		۰/۰۰۳۰	۱۲/۵۰
		۰/۰۰۴۰	۱۰/۰۰

از فولاد برای مدل سازی آرماتورها در بتن استفاده شده است. مشخصات الاستیک فولاد شامل وزن مخصوص، ضریب پواسن و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر است با $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ ، 0.3 و 21000 kg/mm^2 . از آنجایی که بارهای انفجاری (از نوع بارهای ضربه ای) معمولاً نرخ کرنش فوق العاده بالایی در محدوده ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ بر ثانیه ایجاد می کنند، خواص مکانیکی مواد در سازه و مکانیسم های مورد انتظار را تغییر می دهند. طبق جدول (۴)، خواص پلاستیک فولاد با استفاده از مدل سخت شوندگی جانسون کوک برای در نظر گرفتن تأثیر نرخ کرنش بر تنش فرض شده است. طبق رابطه (۱)، تنش در مدل جانسون کوک به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و دما تعریف می شود. این ویژگی به راحتی در نرم افزار آباکوس قابل تعریف است.

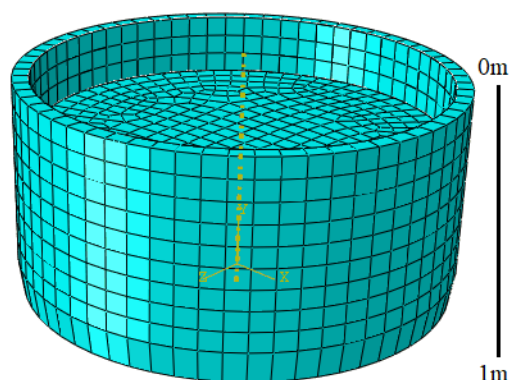
جدول ۴- مشخصات مدل جانسون کوک^۵.

پارامترها	مقادیر
A (MPa)	۳۶۰
B (MPa)	۶۳۵
n	۱/۰۳
m	۰/۱۱۴
Melting temperature (K)	۱۵۰۰
Transition temperature (K)	۲۹۸
C	۰/۰۷۵
Epsilon dot zero	۱

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (۱)$$

جدول ۱- درصد خطای روش میتال و همکاران در مقایسه با مطالعه حاضر.

عمق (متر)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
میتال	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
تحقیق	۵۴	۵۳	۴۹	۴۴	۳۷	۳۲	۲۸	۲۱	۱۸	۱۱
ق	۹	۸	۶	۰	۹	۱	۸	۷	۴	۲
حاضر	۵۶	۵۴	۵۱	۴۳	۳۸	۳۳	۲۹	۲۱	۱۹	۱۱
خطا (در صد)	۴	۶	۰	۲	۹	۰	۵	۴	۲	۵
	۱/۷	۱/۵	۱/۸	۱/۸	۱/۶	۱/۸	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۷
	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۱	۴	۲



شکل ۳- مسیر قائم از لبه ی دیواره ی مخزن تا کف مخزن.

روند مدل سازی برای تمام مدل های مورد مطالعه در پژوهش حاضر، مشابه و یکسان بوده و تفاوت مدل ها تنها در مقادیر عددی، پارامترهای هندسی و متغیرهای پژوهش خواهد بود؛ لذا در این بخش روند کلی مدل سازی یکی از مدل های مورد مطالعه، ارائه شده است. اولین گام در روند مدل سازی، ساخت پارت های^۱ مورد مطالعه است. در این مطالعه، با توجه به متغیرهای مورد مطالعه، اقدام به مدل سازی سه پارت مخزن^۲ و آب^۳ و مسلح کننده ها (عمودی و محیطی)^۴ نموده ایم. در شکل (۴)، روند تعریف پارت های مدل، در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است. مطابق شکل المانهای بتن از نوع S4R، المان آب از نوع AC3D8R و المان مسلح کننده ها از نوع T3D2 می باشد. پس از ایجاد هر سه پارت، مصالح آب، بتن و فولاد تعریف شده و به پارت های ساخته شده تخصیص می شود.

چگالی آب $1 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ و ویسکوزیته آب برابر با 0.001 در نظر گرفته شده است. همچنین برای تعریف رفتار سیال از معادلات Us-Up استفاده شده است. به همین منظور سرعت صوت $C_0 = 1480000 \text{ mm/s}$ ، ضریب شیب منحنی Us-Up برابر $s = 1.79$ و ضریب گروینیزن برابر $\Gamma_0 = 0.5$ تعریف شده است.

همچنین برای ساخت مخزن بتنی از بتن با عیار 30، وزن مخصوص بتن برابر با $2.4 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ ، نسبت پواسن برابر با 0.2 و مدول

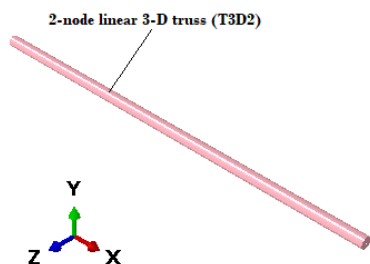
¹Part

²Tank

³Water

⁴Reinforced

⁵ Johnson-Cook



شکل ۴- مدل سازی، مش بندی و تعریف المان پارت های تولید شده در نرم افزار آباکوس.

جدول ۵- معرفی و نام گذاری سناریوهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر.

توزیع فشار سیال	فاصله استقرار	شرایط ماده	بزرگای منفجره	شکل هندسی مقطع	نام گذاری مدل
یکنواخت	۲۵ (m)	نیمه	۵۰۰ (kg)	دایره	V ₁
یکنواخت	۲۵ (m)	خالی	۵۰۰ (kg)	دایره	V ₂
یکنواخت	۲۵ (m)	پر	۵۰۰ (kg)	دایره	V ₃
غیریکنواخت	۲۵ (m)	پر	۵۰۰ (kg)	دایره	V ₄

۴- مدلها و نتایج

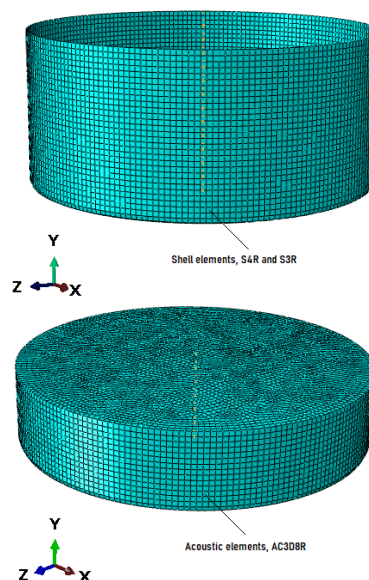
۴-۱- بررسی تأثیر شرایط استقرار سیال مخزن بر رفتار مخزن بتنی

به منظور بررسی تأثیر شرایط استقرار سیال در مخزن، سه حالت مختلف در نظر گرفته شده است. در حالت اول، مخزن نیمه پر بوده و ارتفاع سیال برابر با ۱۵۰۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است، در حالت دوم، مخزن خالی از سیال بوده و در حالت سوم، مخزن پر از سیال است و ارتفاع سیال در این حالت برابر با ۳۰۰۰۰ میلی متر می باشد. در هر سه حالت مورد مطالعه در این بخش، مقطع مخزن دایره ای، مقدار ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم، فاصله ی ماده ی منفجره از مخزن برابر با ۲۵۰۰۰ میلی متر و فشار سیال بر دیواره ی مخزن، به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. لذا در ادامه هر یک از پاسخ های تنش، جابجایی، انرژی جنبشی و شاخص خرابی برای سه حالت مورد مطالعه (مدل های بررسی شده شامل مخزن نیمه پر، خالی و پر از سیال) ارائه و با مقایسه ی نتایج، تأثیر شرایط استقرار سیال در مخزن بر پاسخ مخازن رو زمینی تحت بار انفجار با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سیال- سازه، بررسی شده است.

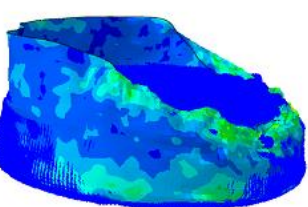
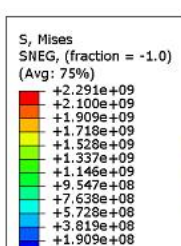
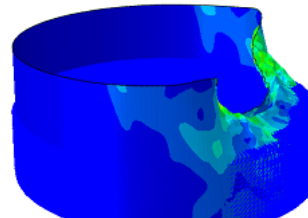
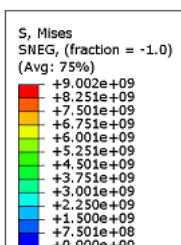
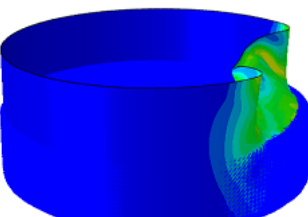
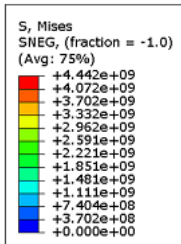
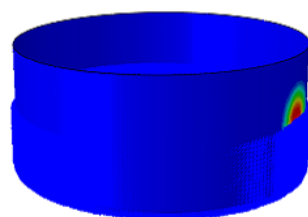
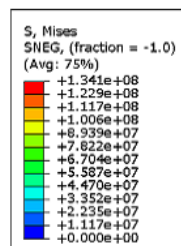
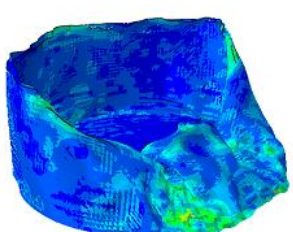
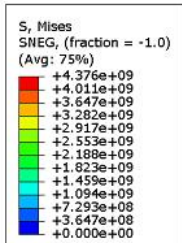
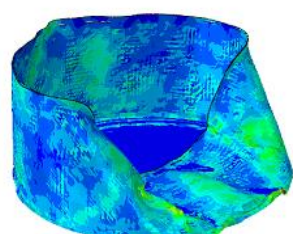
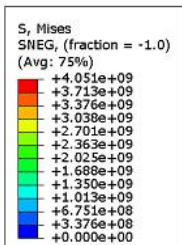
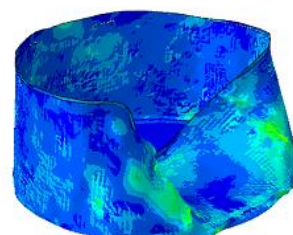
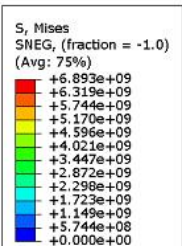
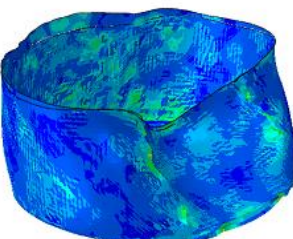
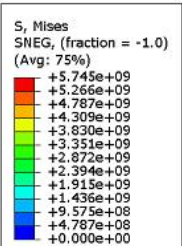
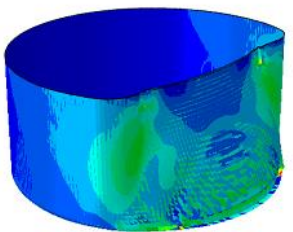
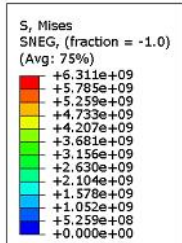
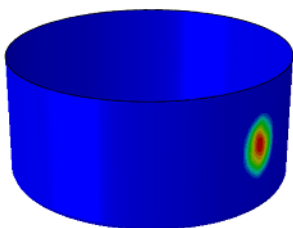
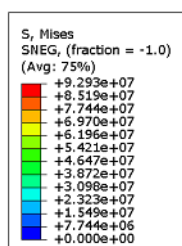
در شکل (۵) تنش توزیع شده در مدل V₁ نمایش داده شده است. همچنین در شکل های (۶) و (۷) به ترتیب تنش توزیع شده در مدل های V₂ و V₃ ارائه شده است. تفاوت بین مدل های مورد مطالعه در این حالت، ارتفاع سیال درون مخزن می باشد. ارتفاع سیال برابر با صفر، بیانگر مخزن خالی، ارتفاع سیال برابر با ۱۵ متر، بیانگر حالت نیمه پر مخزن و ارتفاع سیال برابر با ۳۰ متر، بیانگر حالت پر مخزن می باشد. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد، حضور سیال در مخزن، موجب افزایش سختی سازه و در نتیجه کاهش مقدار عددی تنش توزیع شده در جداره ی مخزن شد. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد، بیشینه تنش ایجاد شده در مدل V₁ (حالت نیمه

که در آن E^* نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد در نرخ کرنش مرجع است و $\dot{\epsilon}$ برابر با نرخ کرنش پلاستیک است؛ T^* دمای بدون بعد مربوطه است؛ A مقاومت گسیختگی اولیه فولاد در نرخ کرنش پلاستیک $\dot{\epsilon} = 1/s$ و دمای ۲۹۸ کلون است؛ B و n رفتار سخت شونده ی فولاد را مستقل از نرخ کرنش شبیه سازی می کنند؛ C رفتار سخت شونده ی وابسته به نرخ کرنش را نشان می دهد؛ m ضریب نرم شونده ی حرارتی است که برای فولاد از آزمایش های مکانیکی به دست آمده و برابر با ۰/۱۱۴ است.

پس از تخصیص مصالح به قطعات، تمامی پارت ها سرهم بندی (اسمبلی) شده و اقدام به تعریف بزرگی و فاصله ماده منفجره به روش کانونب خواهیم نمود؛ لذا نقاط مدنظر به عنوان نقاط مرجع با استفاده از Offset from point تعریف و در ادامه مقدار ماده منفجره تعریف خواهد شد. لازم به ذکر است، کف مخزن دارای تکیه گاه گیردار بوده و کاملاً مقید مدل سازی شده است. به منظور پاسخ گویی به پرسش های پژوهش و دستیابی به اهداف پژوهش، به بررسی تأثیر هر یک از متغیرهای عنوان شده بر رفتار مخزن روزمینی پرداخته شد. در این شرایط سایر متغیرها ثابت در نظر گرفته شده اند. این فرایند برای تک تک متغیرها تکرار و تأثیر تمام متغیرها بر پاسخ سازه مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. تأثیر هر یک از متغیرهای شرایط استقرار آب در مخزن (خالی، نیمه پر و پر) و نحوه توزیع فشار سیال بر مخزن (فشار یکنواخت و غیریکنواخت) بر پاسخ کلی مخزن روزمینی تحت اثر بار انفجار بررسی و ارزیابی شده است. سناریوهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر، مطابق با جدول (۵) نام گذاری شده است. سطح مقطع تمام مدل ها دایره ای بوده و بزرگای ماده منفجره و فاصله ی ماده منفجره از مخزن به ترتیب برابر با ۵۰۰ کیلوگرم و ۲۵ متر می باشد.



پر) برابر با ۵۹۰ مگاپاسکال حاصل شده است، در حالی که بیشینه تنش ایجاد شده در مدل V_2 (مخزن خالی) برابر با ۷۲۱ مگاپاسکال و بیشینه تنش ایجاد شده در مدل V_3 (مخزن پر) برابر با ۳۴۸ مگاپاسکال حاصل شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد، با کاهش ارتفاع سیال در مخزن، مقدار عددی بیشینه تنش توزیع شده در جداره‌ی مخزن روند افزایشی دارد. به نحوی که با تغییر حالت مخزن از شرایط پر شده با سیال به حالت نیمه پر، بیشینه تنش توزیع شده در مخزن بتنی، ۴۱ درصد افزایش یافت. همچنین با تغییر حالت مخزن از شرایط پر شده با سیال به حالت خالی، بیشینه تنش توزیع شده در مخزن بتنی، ۵۱/۷ درصد افزایش می‌یابد. این روند افزایشی در حالت تغییر ارتفاع سیال از ۱۵ متر به صفر متر، برابر با ۱۸/۲ درصد می‌باشد.

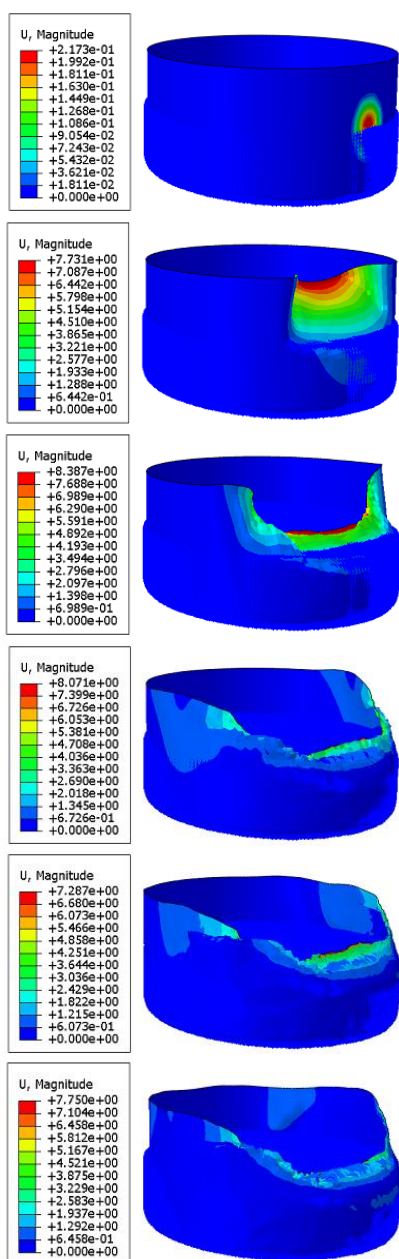


شکل ۵- تنش فون میسر^۱ توزیع شده در مدل V_1 .

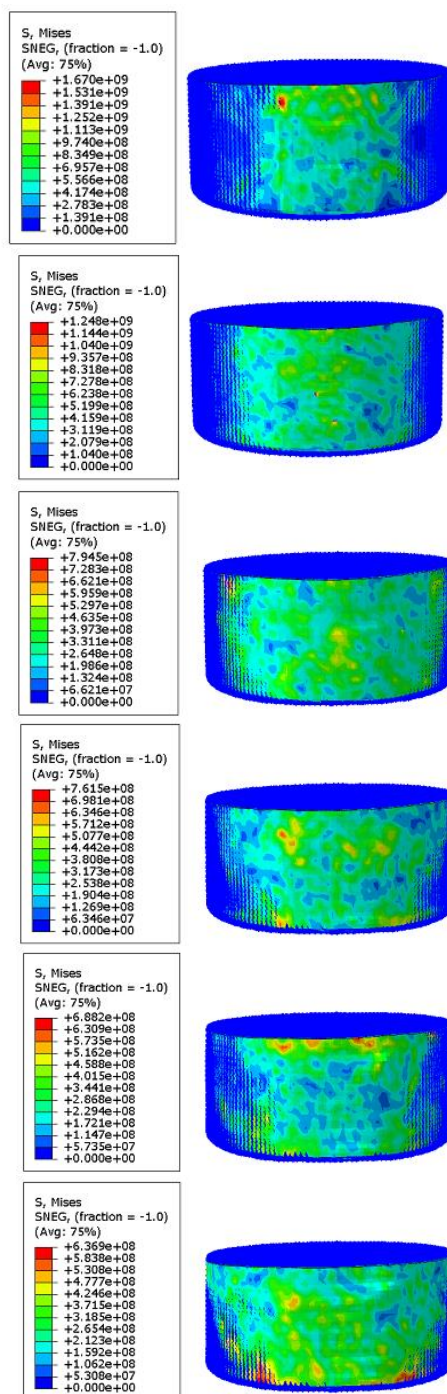
شکل ۶- تنش فون میسر توزیع شده در مدل V_2 .

^۱ Von Mises Stress

نمود. لذا در شرایطی که مخزن خالی از سیال است، سختی کم و جابجایی ایجاد شده، افزایش می‌یابد. در نقطه‌ی مقابل، مخزن پر از سیال، سختی جانی زیادی داشته و جابجایی در این حالت (مخزن پر از سیال) کم می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد بیشینه جابجایی ایجاد شده در مدل V_1 (مخزن نیمه پر) برابر با $7/5$ میلی‌متر حاصل شده است، در حالی که بیشینه جابجایی ایجاد شده در مدل V_2 (مخزن خالی از سیال) برابر با $10/9$ میلی‌متر و بیشینه جابجایی ایجاد شده در مدل V_3 (مخزن پر از سیال) برابر با $0/73$ میلی‌متر حاصل شده است. لذا بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود، با تغییر حالت استقرار سیال در مخزن از حالت پر به نیمه‌پر، بیشینه جابجایی مخزن $90/3$ افزایش می‌یابد. این روند افزایشی در شرایطی که مخزن از حالت پر به خالی تبدیل شود، $93/3$ حاصل شده است.

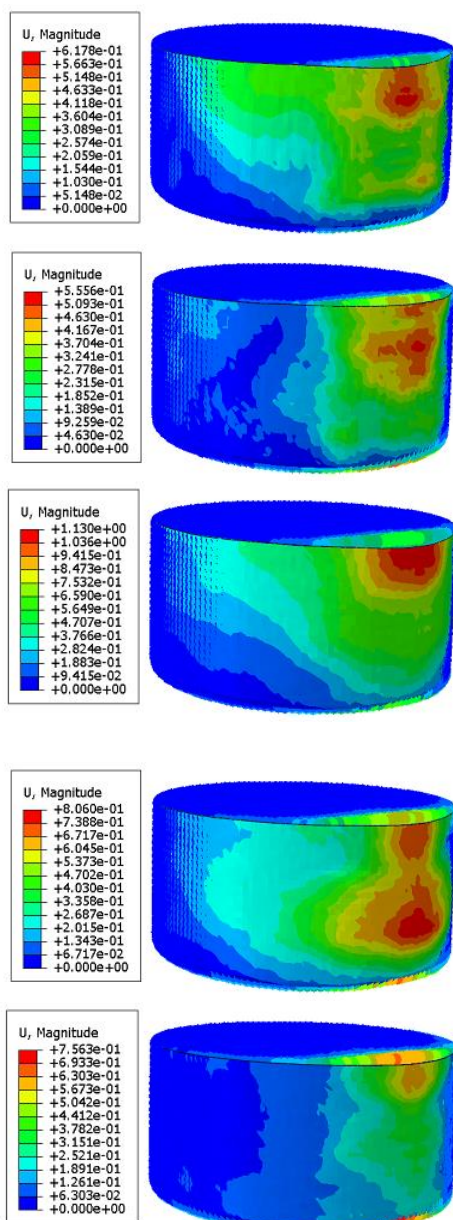


شکل ۸- جابجایی ایجاد شده در مدل V_1 .



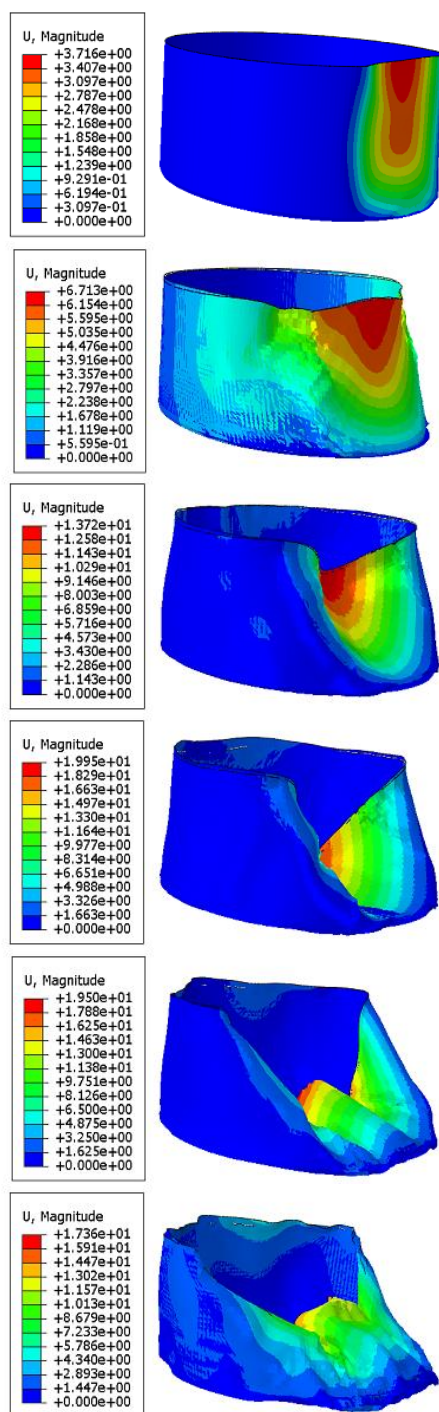
شکل ۷- تنش فون میسز توزیع شده در مدل V_3 .

در شکل (۸) بیشینه جابجایی ایجاد شده در مدل V_1 نمایش داده شده است. همچنین در شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب جابجایی ایجاد شده در مدل‌های V_2 و V_3 قابل مشاهده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، بیشینه جابجایی ایجاد شده در مخزن بتنی، در شرایطی که مخزن خالی از سیال است، بیش‌تر از حالت نیمه پر مخزن است. همچنین جابجایی ثبت شده در مخزن نیمه پر، نیز بیش‌تر از مخزن پر از سیال می‌باشد. این موضوع با توجه به عملکرد مخزن و سیال که هر دو دارای سختی بوده و عملکردی مشابه با دو فنر موازی دارند، می‌توان توجیه

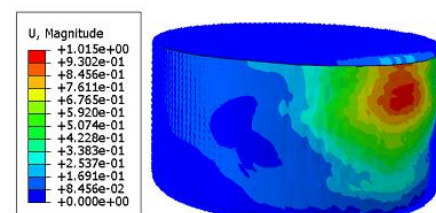


شکل ۱۰- جابه‌جایی ایجاد شده در مدل V_3 .

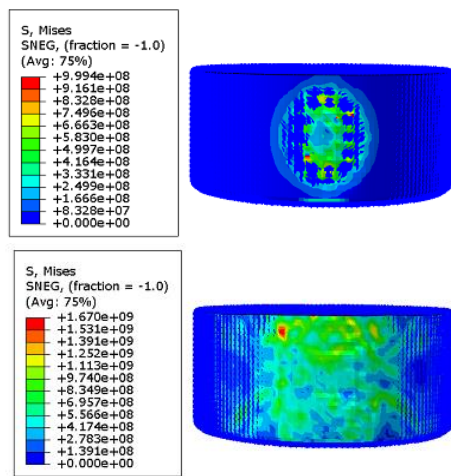
در شکل (۱۱) انرژی جنبشی ثبت شده در سه حالت مدلسازی V_1 ، V_2 و V_3 نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود، با تغییر حالت استقرار سیال در مخزن از حالت پر به نیمه پر مقدار انرژی جنبشی در مخزن ۸/۹٪ افزایش یافته است. همچنین این روند افزایشی با تغییر حالت استقرار سیال در مخزن از حالت پر به خالی مقدار انرژی جنبشی در مخزن ۱۲/۶٪ افزایش یافته است. به عبارت دیگر هر چه سیال درون مخزن کمتر باشد، شاهد افزایش پارامتر انرژی جنبشی در مخزن خواهیم بود. این روند افزایشی در حالت بیشینه برابر با ۱۲/۶٪ می‌باشد.



شکل ۹- جابه‌جایی ایجاد شده در مدل V_2 .

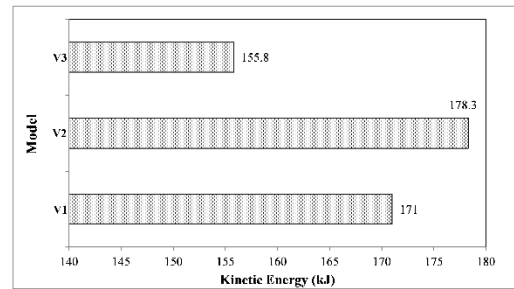


شده است. در شکل (۷) تنش توزیع شده در مدل V3 نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۱۳) تنش توزیع شده در مدل V4 ارائه شده است. تفاوت بین مدل‌های مورد مطالعه در این حالت، توزیع فشار سیال در مخزن می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، بیشینه تنش ایجاد شده در مدل V3 (مخزن با فشار یکنواخت سیال) برابر با ۳۴۸ مگاپاسکال حاصل شده است، در حالی که بیشینه تنش ایجاد شده در مدل V4 برابر با ۹۱۶ مگاپاسکال حاصل شده است. لذا بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود، توزیع فشار غیریکنواخت سیال در مخزن، موجب افزایش ۶۲ درصدی تنش توزیع شده در دیواره‌ی مخزن بتنی شده است.



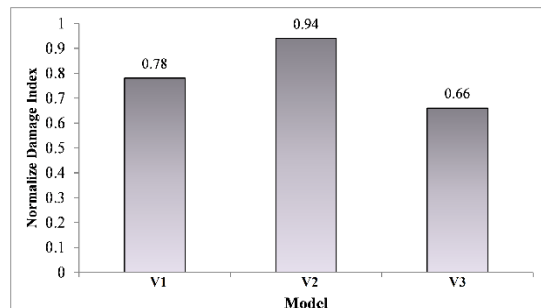
شکل ۱۳- تنش فون میسز توزیع شده در مدل V4.

در شکل (۱۰) بیشینه جابجایی ایجاد شده در مدل V3 قابل مشاهده است. همچنین در شکل (۱۴) بیشینه جابجایی ایجاد شده در مدل V4 ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، بیشینه جابجایی ایجاد شده در مدل V3 (مخزن با توزیع یکنواخت فشار سیال) برابر با ۰/۷۳ میلی‌متر و بیشینه‌ی جابجایی ایجاد شده در مدل V4 (مخزن با توزیع غیریکنواخت فشار سیال) برابر با ۱/۱۸ میلی‌متر حاصل شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، مشاهده می‌شود، توزیع غیر یکنواخت فشار سیال در مخزن، موجب افزایش ۳۸/۱ درصدی بیشینه‌ی جابجایی در دیواره‌ی مخزن بتنی شده است.



شکل ۱۱- تاثیر استقرار سیال در مخزن بر پاسخ انرژی جنبشی مخزن.

در شکل (۱۲) شاخص خرابی مربوط به سه مدل V1، V2 و V3 قابل مشاهده است. شاخص خسارت پارک و انگ، هر چه مقدار عددی شاخص به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر آسیب کمتر و هرچه مقدار عددی شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر خسارت و آسیب شدیدتر در المان خواهد بود. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، شاخص خرابی در مخزن نیمه پر، پر و خالی به ترتیب برابر با ۰/۷۸، ۰/۶۶ و ۰/۹۴ می‌باشد. به بیان دیگر با تغییر شرایط استقرار سیال در مخزن از حالت پر به نیمه پر، شاخص خرابی در مخزن ۱۵/۴٪ افزایش یافته است. همچنین با تغییر شرایط استقرار سیال در مخزن از حالت پر به خالی، شاخص خرابی در مخزن ۲۹/۸٪ افزایش یافته است. به عبارت دیگر، احتمال خرابی و آسیب در مخزن خالی از سیال، در مقایسه با مخزن پر و مخزن نیمه پر، به ترتیب ۲۹/۸٪ و ۱۷٪ بیش تر است.

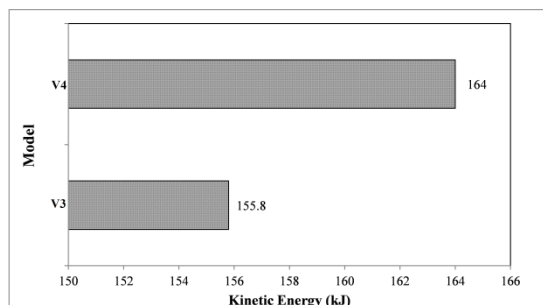


شکل ۱۲- تاثیر استقرار سیال در مخزن بر پاسخ شاخص خرابی.

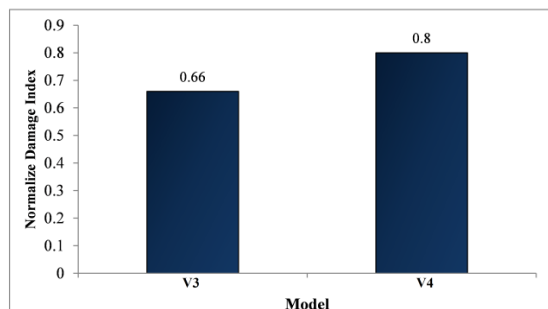
۴-۲- بررسی تأثیر توزیع فشار سیال بر مخزن بر رفتار مخزن بتنی

به‌منظور بررسی تأثیر توزیع فشار سیال مخزن، دو حالت مختلف (توزیع یکنواخت و غیریکنواخت سیال در مخزن) در نظر گرفته شده است. در حالت اول، توزیع فشار سیال به‌صورت مستطیلی و یکنواخت لحاظ شده است. در حالت دوم، توزیع فشار سیال به‌صورت مثلی و غیریکنواخت در نظر گرفته شده است. در هر دو حالت مورد مطالعه در این بخش، مقطع مخزن دایره‌ای، مقدار ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم، فاصله‌ی ماده‌ی منفجره از مخزن برابر با ۲۵ متر و ارتفاع سیال در مخزن، ۳۰ متر (مخزن پر از سیال)، در نظر گرفته

شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت، با توزیع غیریکنواخت فشار سیال در مخزن، احتمال وقوع خرابی و آسیب در مخزن در مقایسه با شرایط توزیع یکنواخت فشار سیال، ۱۷/۵ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵- تأثیر توزیع فشار سیال بر پاسخ انرژی جنبشی مخزن.



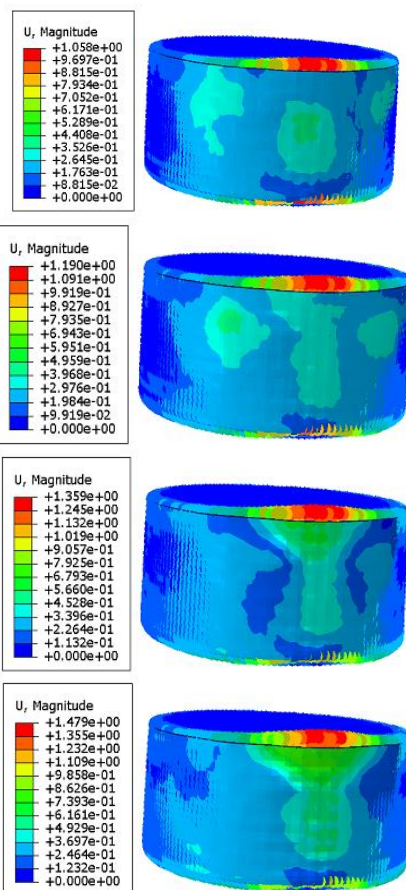
شکل ۱۶- تأثیر توزیع فشار سیال بر پاسخ شاخص خرابی.

۵- نتیجه گیری

بر اساس تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان نتایج حاصل را به‌صورت خلاصه به شرح زیر بیان نمود:

برتری ذاتی مخزن استوانه‌ای: محاسبات دوره تناوب طبیعی نشان می‌دهد مخزن استوانه‌ای در تمام حالت‌های پر، نیمه‌پر و خالی، سختی بیشتری نسبت به مخزن مکعبی دارد. این برتری تنها به دلیل کاهش تمرکز تنش نیست، بلکه ناشی از عملکرد پوسته‌ای کارآمد آن در تبدیل بار انفجاری به تنش‌های غشایی یکنواخت است.

لزوم مدل‌سازی پیشرفته مصالح: استفاده از مدل Johnson-Cook برای فولاد و Concrete Damaged Plasticity برای بتن، نشان داد که برای



شکل ۱۴- جابجایی ایجاد شده در مدل V4.

در شکل (۱۵) انرژی جنبشی ثبت شده در دو حالت مدل‌سازی V3 و V4 نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، توزیع غیریکنواخت فشار سیال بر دیواره‌ی مخزن بتنی، موجب افزایش ۵ درصدی پارامتر انرژی جنبشی در مخزن بتنی می‌شود. لذا بر اساس نتایج به دست آمده، انرژی جنبشی در مخزن با توزیع یکنواخت فشار (V3) برابر ۱۵۵/۸ کیلوژول و در مخزن با توزیع غیریکنواخت فشار سیال (V4) برابر با ۱۶۴ کیلوژول حاصل شده است. در شکل (۱۶) شاخص خرابی مربوط به دو مدل V3 و V4 قابل مشاهده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، شاخص خرابی در مخزن پر با توزیع فشار یکنواخت سیال برابر با ۰/۶۶ حاصل شده است. در حالی که شاخص خرابی در مدل V4 برابر با ۰/۸ حاصل

مراجع

- [۴] قابضی س، رسولان ا، سیافزاده ب. بررسی مقایسه حالت‌های مختلف مدلسازی سیال در تحلیل لرزه‌ای مخازن روزمینی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه. فصلنامه رویکردهای نوین در تحقیقات علوم پایه، فنی و مهندسی. ۱۳۹۹، ۹۵-۱۱۲. <https://civilica.com/doc/1669791/>
- [5] Zou D. In: Theory and technology of rock excavation for civil engineering. Singapore: Springer; 2017. p.105-170. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1989-0>
- [6] Chen JK, Kianoush MR. Seismic response of concrete rectangular tanks for liquid-containing structures. Canadian Journal of Civil Engineering. 2005;32(4):739-752. <https://doi.org/10.1139/j04-124>
- [7] Kianoush MR, Chen JK. Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular tanks. Engineering Structures. 2006; 28 (5): 704 -715. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.022>
- [8] Safi M, Rasoulpoor S, Mahdavian A. Effect of earthquake frequency content on the dynamic response of rectangular concrete tanks using the combined finite element method and smooth particle hydrodynamics. Journal of Structural and Construction Engineering. 2019; 6 (2): 87 -102. <https://doi.org/10.22065/jsce.2018.100667.1348>
- [9] Shokoohfar A, Rahai M, Sahrai A. Seismic analysis of prestressed concrete cylindrical tanks. Amirkabir Journal of Civil Engineering. 2020; 52 (6): 1577 -1592. <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15441.5935>
- [10] Moghadam M, Razavitoose SV, Shahrbanouzadeh M. Dynamic analysis of RC water tanks under explosion by consideration of water-structure interaction. Inactive Defense Magazine. 2021; 12 (2): 53 -64. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20086849.1400.12.2.5.3>
- [11] Shengzhuo L, Wang W, Weidong C, Jingxin M, Yaqin S, Chunlong X. Behaviors of thin-walled cylindrical shell storage tank under blast impacts. Shock and Vibration. 2019; 2019: 1 -21.
- Capturing رفتار واقعی تحت بارهای فوق‌سریع انفجار، مدل‌سازی مصالح تنها با مشخصات الاستیک به‌شدت همراه‌کننده و ناکافی است. تأیید برتری روش کوپل شده (CEL): راستی‌آزمایی موفقیت‌آمیز مدل با نتایج مرجع [۱۳]، اثبات می‌کند که روش کوپل اوپلری-لاگرانژی (CEL) برای مسائل اندرکنش سیال-سازه تحت بار انفجار، بر روش‌های ساده شده‌ای مانند "جرم افزوده" برتری مطلق دارد، چرا که می‌تواند پدیده‌های پیچیده‌ای مانند Sloshing و تغییر شکل بزرگ سیال را شبیه‌سازی کند. بر بودن مخزن، مؤثرترین فاکتور کاهش تغییر شکل: کاهش ۹۰ درصدی بیشینه جابه‌جایی در مخزن بر نسبت به حالت نیمه‌پر، قوی‌ترین شاهدهی است که نشان می‌دهد حضور کامل سیال، نه یک تهدید، بلکه یک سپر دفاعی بی‌نظیر در برابر بار انفجار است. این امر عمدتاً ناشی از افزایش سختی سیستم و اتلاف انرژی است. ارتفاع بحرانی سیال برای بیشینه تنش: رابطه بین ارتفاع سیال و تنش حلقه‌ای خطی نیست. تنش‌های حلقوی در ارتفاع‌های میانی (حدود ۵۰-۷۰٪ ظرفیت) به دلیل پدیده رزونانس ناشی از Sloshing به حداکثر خود می‌رسند. این یک یافته کلیدی برای تعیین سطوح بهره‌برداری ایمن است.
- [۱] دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه. ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی (نشریه شماره ۱۲۳). ویرایش دوم. تهران: انتشارات سازمان برنامه و بودجه کشور؛ ۱۳۷۴. <https://sazepplus.com/-/نشریه-۱۲۳-ضوابط-و-معیارهای-طرح-و-محاسبه-مخازن-آب>
- [2] Brode HL. Numerical Solutions of Spherical Blast Waves. Journal of Applied Physics. 1995; 26(6): 766-776. <https://doi.org/10.1063/1.1722085>
- [3] Khanmohammadi M, Akhavan Hejazi FS, Hataminia H. A study of the basics of designing concrete water storage tanks in regulations ACI350.3-06, NZS 3106-2009, EN 1998-4:2006 (E) and Journal 123. In: 8th National Congress of Civil Engineering; 2014 May 7-8; Babol, Iran. Babol: Faculty of Civil Engineering. <https://civilica.com/doc/296210/>

<https://doi.org/10.1155/2019/6515462>

[12] Alipour M, Hosseini M, Babaali H, Raftari M, Mahjoub R. Evaluation of the behavior of reinforced concrete above-ground tanks subjected to blast loading. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2025; 19 (7): 1 -24.

<https://doi.org/10.12913/22998624/202413>

[13] Mittal V, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler–Lagrange formulation. *Thin-Walled Structures*. 2014; 84: 91 -111.

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.06.004>

