

مدل سازی رفتار دینامیکی مخازن هوایی ذخیره سیال تحت بار انفجاری

فرهود کلاته^{۱*}، رافق فانی^۲

۱ - استادیار، ۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز

(تاریخ وصول: ۹۵/۳/۵، تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲۴)

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی پاسخ و رفتار دینامیکی مخازن هوایی نگه‌دارنده سیال تحت بار انفجار پرداخته شده است. بدین منظور مخزن هوایی فولادی تحت بار انفجاری با در نظر گرفتن اندرکنش جداره مخزن و سیال داخل مخزن با استفاده از فرمول‌بندی کوپل اولر-لاگرانژی که مزیت در نظر گرفتن معادلات اساسی مکانیک سازه و مکانیک سیالات را به صورت کوپل دارد مدل گردیده است. مدل المان محدود سه بعدی مخزن هوایی توسط نرم‌افزار ABAQUS تهیه گردیده است. مخزن تحت بار انفجار آزاد در هوا به میزان ۸۰ کیلوگرم TNT در یک فاصله ثابت ۵ متری از جداره مخزن مدل گردیده و تحلیل پارامتریک پاسخ سازه در مقابل پارامترهای تأثیرگذار در رفتار سازه مانند نسبت ارتفاع به شعاع مخزن، ارتفاع آب داخل مخزن و ضخامت جداره مخزن صورت گرفته است. تنش حلقوی ماکزیمم و تنش برشی در جداره مخزن و جابه‌جایی و برش پایه و لنگر واژگونی مخزن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه آب داخل مخزن بر پاسخ دینامیکی سازه مخزن است به طوری که تنش‌ها و کرنش با کاهش میزان آب داخل مخزن و کاهش ضخامت جداره مخزن، افزایش می‌یابند و جابه‌جایی، برش پایه و لنگر واژگونی با افزایش ارتفاع آب داخل مخزن کاهش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: مخازن هوایی ذخیره سیال، بار انفجاری، مدل‌سازی عددی، کوپل اولر-لاگرانژی.

Dynamic Behavior Simulation of Elevated Liquid Storage Tanks under Blast Loading

F. Kalateh*, R. Fani

University of Tabriz

(Received: 5/25/2016, Accepted: 9/14/2016)

Abstract

In the present study, dynamic behavior of elevated liquid storage tank subjected to blast loading is investigated through a three dimensional (3D) finite element (FE) model of a steel water storage elevated tank with applying different tank aspect ratios, percentages of water stored in the tank and different tank wall thickness using the FE software ABAQUS. The coupled Euler-Lagrange (CEL) formulation in ABAQUS has been adopted herein which has the advantage of considering the coupling of structural mechanics and fluid mechanics fundamental equations. The maximum hoop stress, shear stress and plastic strain in the tank wall and displacement, base shear and moment in the whole model have been studied under a free air blast arising from an 80 kg TNT for 5 m standoff point distance. The maximum hoop stress and shear stress in the tank wall and displacement, base shear and overturning moment of elevated tank have been studied. It is observed that stresses and strain increase with decreasing percentages of water stored in the tank and decreasing wall thickness. Displacement, base shear and moment decrease with increasing of percentages of water stored in the tank.

Keywords: Elevated Water Storage Tanks, Blast Loading, Finite Elements, Coupled Euler-Lagrange Formulation.

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

"Journal of Energetic Materials" Volume 11, No.4, Serial No.32, Winter 2017

۱- مقدمه

موج آب داخل مخزن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش موارد ذیل هستند:

۱- تنش حلقوی تحت بیشینه فشار انفجار در رأس مخزن و بخش فوقانی مخزن بالاتر از سطح آب، حداکثر مقدار است. با افزایش ضخامت جداره مخزن و فاصله مقیاس شده انفجار، حداکثر مقدار تنش حلقوی در رأس مخزن افزایش می‌یابد. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تنش حلقوی برای مخازن با شرایط گیرداری کامل و صلب نسبت به شرایط گیرداری ساده بیش‌تر است.

۲- با افزایش نسبت ارتفاع به شعاع مخزن توزیع تغییرات تنش برشی در جداره مخزن غیرخطی می‌شود. برای ضخامت ۱ میلی‌متری تنش برشی پایه با افزایش نسبت ارتفاع به شعاع مخزن کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت جداره مخزن و همچنین افزایش نسبت ارتفاع به شعاع مخزن برش پایه افزایش می‌یابد.

۳- در جداره مخزن در تمام نسبت ارتفاع به شعاع مخزن با فواصل مقیاس شده کم و ضخامت‌های کمتر تسلیم پلاستیکی اتفاق می‌افتد. با افزایش ضخامت جداره مخزن تسلیم پلاستیکی فقط برای حالات نسبت ارتفاع به شعاع مخزن کم رخ می‌دهد.

۴- تلاطم سطحی^۱ در مخزن با افزایش نسبت ارتفاع به شعاع مخزن افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت جداره مخزن و فاصله مقیاس شده تلاطم سطحی کاهش می‌یابد به طوری که در فواصل مقیاس شده زیاد هیچ تلاطم سطحی مشاهده نمی‌شود.

هرچند طی تحقیقات صورت گرفته اطلاعات مفیدی در خصوص پاسخ دینامیکی سازه‌های مختلف تحت بارهای انفجاری حاصل گردیده است با این وجود تا کنون مقاله‌ای که به بررسی رفتار و پاسخ مخازن هوایی تحت بار انفجاری پرداخته باشد صورت نگرفته است از این رو با توجه به اهمیت موضوع خلاء پژوهشی در این زمینه به شدت احساس می‌شود. در پژوهش حاضر رفتار و پاسخ دینامیکی مخزن هوایی تحت بار انفجاری مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مخزن فلزی را تحت بار انفجاری با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال و با استفاده از فرمول‌بندی کوپل اولر- لاگرانژی در نرم‌افزار ABAQUS، مدل‌سازی نموده و به تحلیل پارامتریک سازه در مقابل پارامترهای تأثیرگذار در رفتار سازه با استفاده از نتایج به دست آمده پرداخته شده است. از مزایای روش کوپل اولر- لاگرانژی برطرف کردن محدودیت‌های روش‌های اولری و لاگرانژی و فراهم ساختن شرایط مساعد برای مدل‌سازی همزمان قلمرو اولری و قلمرو لاگرانژی در تعامل با یکدیگر است. در این روش مشکلاتی مانند تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های بزرگ برای سیال با در نظر گرفتن آنالیز اولری کاملاً رفع شده و اندرکنش و تماس آن با محیط لاگرانژی به بهترین نحو تعریف می‌شود که امکان مدل‌سازی محیط‌های چند فازی مانند اندرکنش سازه- سیال

مخازن ذخیره سیال سازه‌هایی هستند که برای نگهداری مایعات مختلف جهت تأمین نیازهای بهداشتی، شبکه‌های آب‌رسانی شهری، تصفیه‌خانه‌ها، پالایشگاه‌ها، سایت‌های شیمیایی و... مورد استفاده قرار می‌گیرند که وجود آن‌ها برای رفع نیازهای مختلف در جوامع شهری امروزی با توجه به افزایش جمعیت و گسترش شهرها امری غیرقابل چشم‌پوشی است. تخریب این مخازن و آسیب دیدن آن‌ها ممکن است فجایع زیانباری از جمله بحران آب، تهدید سلامت موجودات زنده به دلیل پخش مواد شیمیایی، آتش‌سوزی به خاطر پخش شدن سوخت‌های مایع و فجایع انسانی و زیست‌محیطی دیگری را در پی داشته باشد. از دید اقتصادی نیز تخریب و آسیب دیدن مخازن می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را در پی داشته باشد. به عنوان مثال یک حادثه کوچک در مخازن نگه‌دارنده سیال در پالایشگاه‌های نفتی و سایت‌های شیمیایی می‌تواند میلیون‌ها دلار خسارت وارد کرده و باعث تعطیلی چندروزه تأسیسات مذکور گردد. شانگ و لین [۱]، به بررسی ۲۴۲ مورد حادثه‌ای که در چهل سال اخیر در مخازن موجود در تأسیسات صنعتی رخ داده پرداخته‌اند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که ۷۴ درصد حوادث برای مخازن در پالایشگاه‌های نفت و مخازن روغن رخ داده است که ۸۵ درصد این حوادث ناشی از انفجار و آتش‌سوزی بوده است. از این رو با توجه به اهمیت ویژه مخازن باید تدابیر لازم جهت تأمین ایمنی آن‌ها اتخاذ شود. لذا لزوم بررسی رفتار چنین سازه‌هایی تحت بار انفجاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی رفتار سازه‌های مختلف تحت بارهای انفجاری در طی سال‌های اخیر توسط محققین مختلف صورت گرفته است [۱۱-۲]. میتال و همکاران [۱۲] به آنالیز دینامیکی مخازن زمینی ذخیره سیال تحت بار انفجار پرداخته‌اند. آن‌ها مخازن نگهداری سیال استوانه‌ای شکل فولادی با جدار نازک مورد بررسی قرار دادند. این مخازن فولادی به صورت سه‌بعدی با استفاده از روش المان محدود (FEM) در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده‌اند. فرمول‌بندی به کار گرفته شده در این مقاله فرمول‌بندی کوپل اولر- لاگرانژی (CEL) است. در این مقاله توضیحات مفصلی در مورد روش CEL و نحوه مش‌بندی سیال و مخزن ارائه شده است و همچنین چهار مخزن با شعاع مقطع ثابت و ارتفاع‌ها و ضخامت‌های مختلف در نظر گرفته شده‌اند که هر کدام از این مخازن در سه حالت به طوری که ۷۵، ۱۰۰ و ۵۰ درصد مخزن پر باشد، تحت بار انفجار با بزرگی‌های مختلف مدل‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شرایط تکیه‌گاهی هر یک از مخازن نیز به سه صورت تکیه‌گاه گیردار، تکیه‌گاه ساده و تکیه‌گاه صلب در نظر گرفته شده است. بزرگی فشار انفجار نیز با در نظر گرفتن فواصل مختلف انفجار در معادله اصلاح شده فردلندر به دست آمده است. نهایتاً در این مقاله پس از مدل‌سازی مخازن، تنش حلقه و تنش برشی به وجود آمده در جداره مخزن تحت بار انفجار و حداکثر ارتفاع

1- Sloshing

$$[M]\ddot{u}_s + [C]\dot{u}_s + [K]u_s = [Q]\{P_i + P_r\} + [Q]\{P_h\} + \{F_s\} \quad (2)$$

در معادله (۲) ماتریس‌های $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه هستند و $[Q]$ ماتریس اندرکنش مابین محیط سازه و سیال مجاور است. P_i موج شوک انفجاری برخوردی به سازه و P_r موج شوک منعکس شده از سطح سازه هستند، نحوه تعیین این بردارها در بخش (۳) به تفصیل توضیح داده شده است و P_h فشار هیدرودینامیکی وارد بر سازه مخزن هستند و F_s بردار بارهای خارجی موثر بر سازه شامل وزن و ... است و u_s بردار جابجایی قلمرو سازه است.

معادله تعادل دینامیکی محیط سیال: معادله تعادل دینامیکی سیال تراکم پذیر با فرض دامنه کوچک برای حرکت ذرات سیال به صورت زیر می باشد [۱۳]:

$$\frac{\partial P_h}{\partial x} + \gamma \cdot \dot{u}_f + \rho_f \cdot \ddot{u}_f = 0 \quad (3)$$

P_h اضافه فشار در سیال، X موقعیت مکان ذره سیال، \dot{u}_f سرعت ذره سیال، \ddot{u}_f شتاب ذره سیال، ρ_f چگالی سیال، γ درگ حجمی هستند. چنانچه سیال غیرلزج، خطی و تراکم پذیر فرض شود داریم:

$$P_h = -K_f \frac{\partial u_f}{\partial x} = -K_f \nabla u \quad (4)$$

به طوری که K_f مدول بالک سیال می باشد. برای استخراج معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی مورد استفاده در انتگرال گیری مستقیم تحلیل دینامیکی معادله (۳) را بر ρ_f تقسیم کرده مشتق آن را نسبت به X به دست آورده و با اعمال ساده سازی و ترکیب نتیجه حاصل با معادله (۴)، معادله تعادل دینامیکی قلمرو سیال بر مبنای فشار سیال حاصل می گردد:

$$\frac{1}{K_f} \ddot{P}_h + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{P}_h - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P_h}{\partial x} \right) = 0 \quad (5)$$

با استفاده از فرم ضعیف معادله و اعمال روش جزء به جزء فرم نهایی گسسته شده معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$[G]\ddot{P}_h + [D]\dot{P}_h + [H]P_h = -[Q]^T \ddot{u}_s + \{F_f\} \quad (6)$$

در معادله (۶) ماتریس‌های $[G]$ ، $[D]$ و $[H]$ به ترتیب ماتریس شبه جرم، شبه میرایی و شبه سختی سازه هستند و $\{F_f\}$ بردار بارهای خارجی موثر بر سیال است. معادلات (۲) و (۶)، معادلات همبسته هستند که باید به طور همزمان در حوزه زمانی با استفاده از گزینه انتگرال گیری دینامیکی صریح در نرم افزار انتگرال گیری شوند.

۲-۳- مدل المان محدود

در مدل المان محدود مورد استفاده جهت اعمال اندرکنش مابین جداره مخزن و محیط آب داخل مخزن از روش کوپل اولری-لاگرانژی استفاده شده است. در این روش مخزن فولادی به صورت محیط لاگرانژی و آب

را فراهم می کند [۱۳]. در پژوهش حاضر سه مخزن فولادی با ارتفاع مخزن مختلف در نظر گرفته شده است که این تفاوت هندسی مخزن را با نسبت ارتفاع مخزن به شعاع مخزن (H/R) بیان می کنیم. به طور کلی در پژوهش حاضر موارد زیر را مورد مطالعه قرار می گیرند:

۱. بررسی تأثیر ارتفاع سیال داخل مخزن بر پاسخ دینامیکی آن
۲. بررسی تأثیر مشخصات هندسی مخزن (نسبت ارتفاع مخزن به شعاع مخزن) بر رفتار مخزن

۲- اجزاء مدل اولری - لاگرانژی

۲-۱- مدل کوپله اولری - لاگرانژی (CEL)

آنالیزهای کوپل اولری-لاگرانژی اجازه مدل سازی اثر متقابل قلمروهای اولری و لاگرانژی را در یک مدل فراهم می سازد. آنالیز کوپله اولری-لاگرانژی به طور معمول جهت مدل سازی اثرات متقابل جسم جامد با یک سیال یا یک ماده تسلیم شده استفاده می شود. بنابراین در روش CEL قلمرو اولری می تواند با قلمرو لاگرانژی در تماس باشد که این نوع از تماس به تماس اولری-لاگرانژی معروف است. این تماس در آنالیزهای کوپل اولری-لاگرانژی مورد استفاده قرار می گیرد از این رو این ابزار قدرتمند این امکان را ایجاد می کند که بتوان بسیاری از مسائل چند فازی از جمله تماس سازه با سیال را مدل سازی نمود. در این روش به دلیل مدل سازی سیال به صورت اولرین، مشکلات ناشی از تغییر شکل های بزرگ ایجاد شده برای سیال برطرف شده است. روش مذکور المان های سیال به صورت ثابت در فضا هستند و سیال داخل آن به راحتی جریان می یابد، سازه مخزن نیز در این روش به صورت فرمول بندی لاگرانژی است. از آنجایی که پیاده سازی روش اولری در نرم افزار آباکوس بر اساس روش حجم سیال^۱ است در این روش موقعیت ماده اولری در محیط مش بندی با محاسبه کسر حجمی اولرین در هر المان مشخص می شود. با این تعریف اگر یک المان به طور کامل از یک ماده پر شود مقدار کسر حجمی اولرین آن یک و اگر ماده ای در آن قرار نگیرد کسر حجمی اولرین آن صفر است.

۲-۲- معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر محیط سازه و سیال معادله تعادل دینامیکی قلمرو سازه

معادله دیفرانسیلی حاکم بر تعادل دینامیکی محیط سازه توسط معادله زیر بیان می شود [۱۳]:

$$\sigma_{ij,i} - F_i = \rho \frac{\partial^2 u_{s_i}}{\partial t^2} \quad (1)$$

به طوری که σ_{ij} مؤلفه های تنش، u_{s_i} مؤلفه های جابه جایی، F_i بردار بار خارجی و ρ چگالی مصالح هستند. فرم گسسته سازی معادلات فوق را می توان به صورت زیر بیان نمود [۱۴]:

است. برای دو حالت دیگر یعنی نسبت ارتفاع به شعاع ۳ و ۴ ارتفاع مخزن را به ترتیب برابر با ۶ و ۸ متر منظور شده است. شکل (۱-ب) نشان‌دهنده سه حالت مخزن مدل‌سازی شده است.

جدول ۱- خواص پلاستیکی فولاد در مدل جانسون-کوک [۱۲].

A	B	C	n	m
360 MPa	365 MPa	0.075	0.114	1

۴-۲- بارگذاری

رفتار دینامیکی سازه مخزن در پژوهش حاضر تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بار استاتیکی ناشی بار وزن خود سازه و بار دینامیکی ناشی از بار انفجار است. برای اعمال بار انفجار در نرم‌افزار ABAQUS از روش CONWEP^۲ استفاده می‌کنیم که بار حاصل از انفجار مقدار مشخصی از TNT را در فاصله معینی از سازه را محاسبه کرده و به سازه اعمال می‌کند. در این پژوهش از انفجار آزاد در هوا^۳ که بحرانی‌ترین نوع بارگذاری انفجاری در هوا برای مخزن هوایی است، استفاده گردیده است و با در نظر گرفتن یک میزان بار انفجاری مناسب برای تحلیل در یک فاصله معین به بررسی پاسخ دینامیکی سازه پرداخته شده است.

۳- بارگذاری فشاری ناشی از انفجار

در حالت کلی برای مدل‌سازی بارگذاری انفجاری بر روی سازه‌ها دو نوع دیدگاه وجود دارد:

الف: بارگذاری انفجاری به صورت تاریخچه یک فشار بر روی تمام یا قسمتی از سازه بدون در نظر گرفتن تأثیر تغییر شکل‌های سازه بر توزیع فشار، اعمال گردد.

ب: بارگذاری با مدل‌سازی کامل محیط سازه و سیال به صورت کوپل کامل مد نظر قرار گیرد.

روش دوم در صورت اجرای دقیق، به نتایج بسیار دقیق‌تر از روش اول خواهد انجامید، ولی دارای پیچیدگی‌های زیاد بوده و زمان تحلیل بسیار طولانی‌تر خواهد بود. مدل‌سازی به روش اول در نرم‌افزارهای معمولی اجزاء محدود قابل انجام است، ولی در مورد روش دوم بسیاری از نرم‌افزارهای موجود توانایی چنین تحلیلی را ندارند و یا در صورت داشتن چنین قابلیت‌هایی انجام تنظیمات آن وقت‌گیر و پیچیده خواهد بود. بسیاری از بارگذاری‌های انفجاری را می‌توان با تقریب خوبی حاصل از انفجار یک خرج کروی دانست. انفجار آزاد شدن سریع انرژی ذخیره‌شده است که با روشنایی زیاد و موج صوت قابل شنیدن همراه است.

داخل مخزن به صورت قلمرو اولری در نظر گرفته می‌شود. مدل المان محدود ساخته شده، شامل حداقل ۷۴۶۶ المان چهار گرهی پوسته (s4r) در مدل المان محدود جداره مخزن و شامل حداقل ۷۵۶۸۰ المان‌های سه بعدی هشت گرهی با انتگرال‌گیری کاهش یافته (EC3D8R) جهت مدل‌سازی محیط آب داخل مخزن می‌باشد. لازم به ذکر است در این روش قبل از شروع تحلیل، موقعیت اولیه آب در ارتفاع مورد نظر در داخل مخزن تعریف می‌شود.

مشخصات هندسی مدل: جزئیات طراحی مخزن اولیه که دارای نسبت ارتفاع به شعاع مخزن ۲ است با استفاده از نقشه‌های اجرایی شرکت ملی فرآورده‌های نفتی در نظر گرفته شده است. مخزن مورد نظر دارای حجم ۳۰ مترمکعب است. ارتفاع خود مخزن ۴ متر و شعاع آن ۲ متر است که جزئیات بیشتر در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. دو مخزن دیگر نیز با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ و ۴ نیز با همین مشخصات مدل‌سازی شده‌اند که تنها تفاوت آن‌ها در ارتفاع مخزن است. ضخامت جداره مخزن در تمامی مدل‌ها برابر با ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. این مخازن از فولاد نرم با ضریب الاستیسیته $E=210GPa$ ، ضریب پواسون $\nu=0.3$ و چگالی $\rho=7000\text{ kg/m}^3$ ساخته شده است. بارهای انفجاری معمولاً نرخ کرنش‌های بسیار بالا در محدوده 10^4 s^{-1} ایجاد می‌کنند. این نرخ کرنش بالا، خواص مکانیکی مصالح در سازه و مکانیسم‌های مورد انتظار را تغییر می‌دهد. به منظور تأثیر دادن نرخ کرنش بر تنش نیز خواص پلاستیکی فولاد را با استفاده از مدل سخت‌شوندگی جانسون-کوک^۱ مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است [۱۲]. با توجه به رابطه (۱) تنش به صورت تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و دما در مدل جانسون-کوک تعریف می‌شود [۱۳]. این ویژگی به راحتی در نرم‌افزار آباکوس قابل تعریف است.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \varepsilon^* \right) \left(1 - T^{*m} \right) \quad (7)$$

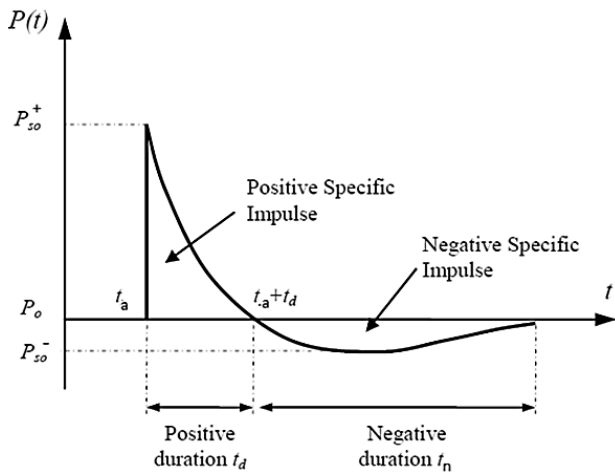
در رابطه $\varepsilon^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ (۷) نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد در نرخ کرنش مرجع می‌باشد، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل T^* دمای بدون بعد متناظر است. پارامتر A مقاومت گسیختگی اولیه فولاد در یک نرخ کرنش پلاستیک $\dot{\varepsilon}$ و درجه حرارت ۲۹۸ کلوین است. پارامترهای B و n رفتار سخت‌شدگی فولاد مستقل از نرخ کرنش را شبیه‌سازی می‌کنند و پارامتر C رفتار سخت‌شونده وابسته به نرخ کرنش را منعکس می‌سازد. کمیت m ضریب نرم‌شدگی حرارتی می‌باشد [۱۲]. در پژوهش حاضر آب به صورت سیال نیوتونی و غیر لزج در نظر گرفته شده است. چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و گرانی آن ۰/۰۰۱ پاسکال در ثانیه در تحلیل منظور گردیده است. همان طوری که در شکل (۱-الف) مشاهده می‌شود ارتفاع مخزن ۴ متر

2- Conventional Weapons
3- Free Air Blast

1- Johnson-Cook Hardening

$$P_i(t) = P_0 \left(1 - \frac{t}{t_d} \right) e^{\left(-\frac{t}{t_d} \right)} \quad (۸)$$

در رابطه (۸) تابع $P_i(t)$ نشان‌دهنده شدت بار انفجاری برخوردی به سازه می باشد. بدین معنی که P_0 فشار پیک اولیه، t_d زمان فاز مثبت انفجار و b پارامتر تجربی است و t نیز معرف زمان است.



شکل ۲- فشار- زمان برای امواج انفجاری در هوا [۱۵].

۲-۳- روش CONWEP

امروزه در بسیاری از نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی از روش CONWEP^۱ برای اعمال و محاسبه بار انفجاری استفاده می‌شود. نرم‌افزار آباکوس نیز از این مدل برای اعمال بارگذاری مستقیم امواج انفجاری استفاده می‌کند. مدل CONWEP را می‌توان به طور خلاصه با استفاده از نمودار فشار- زمان مربوط به انفجار آزاد که توسط معادله اصلاح‌شده فریدلندر توصیف می‌شود به صورت رابطه (۹) بیان کرد [۱۷]:

$$P(t) = P_i(t) (1 + \cos \theta - 2 \cos^2 \theta) + P_r(t) \cos^2 \theta \quad \cos \theta \geq 0 \quad (۹)$$

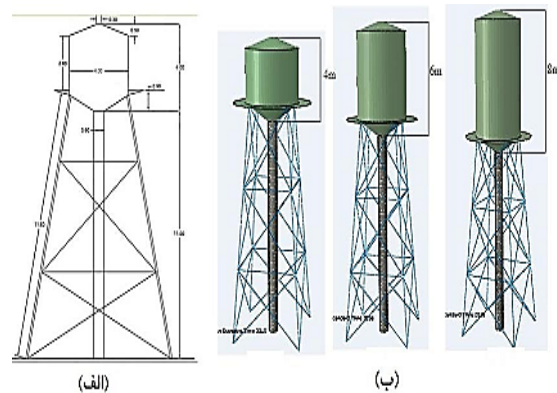
$$P(t) = P_i(t) \quad \cos \theta < 0$$

که در این رابطه شدت موج فشاری کلی اعمال‌شده بر سازه مجاور در زمان t ، $P_i(t)$ فشار فاز مثبت برخوردی در زمان t ، $P_r(t)$ فشار بازتابی در زمان t و θ نیز زاویه بین بردار نرمال سطح جسم با برداری که سطح برخورد را به محل انفجار وصل می‌کند است. لازم به ذکر است در مدل CONWEP فاز منفی انفجار در نظر گرفته نمی‌شود.

۴- بررسی استقلال نتایج از اندازه مش المان محدود

لوسیونی و همکاران [۱۸]، اثر اندازه مش المان محدود مورد استفاده در نرم‌افزارهای تجاری برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پاسخ به بارهای انفجاری را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این محققین به این نتیجه

بخشی از انرژی به صورت تشعشع حرارتی منتشر می‌شود و بخشی نیز به صورت کوپل با هوا به عنوان انفجار در هوا و بخشی هم به عنوان شوک زمینی به خاک (زمین) آزاد می‌شود به طوری که این امواج ضربه‌ای به صورت شعاعی گسترش می‌یابد. افزایش فشاری که به یک نقطه خاص می‌رسد بستگی به فاصله و میزان مواد منفجره دارد. منحنی فشار- زمان برای امواج انفجار در هوا در شکل (۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که اگر امواج انفجاری در مسیر انتشار به مانع برخورد کنند امواج ثانویه‌ای به وجود می‌آیند که از سطح منعکس می‌شود که فشار بازتابی نامیده می‌شود. به خاطر این انعکاس امواج تولیدشده میزان اضافه فشار حاصله از انفجار می‌تواند تا چندین برابر افزایش یابد. میزان تأثیر فشار منعکس‌شده به بزرگی و زاویه انفجار بستگی دارد.



شکل ۱- (الف) جزئیات طراحی مخزن اولیه. (ب) مدل‌های ساخته‌شده توسط نرم‌افزار با ابعاد مخزن متفاوت.

۳-۱- پارامترهای تعریف بارگذاری انفجاری

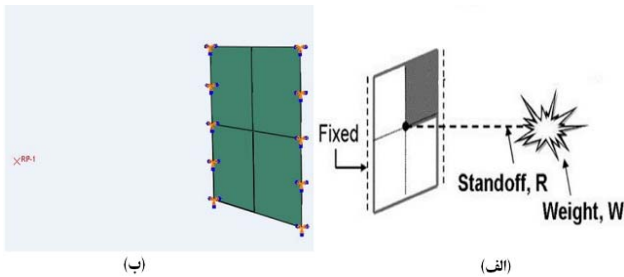
پروفایل اضافه فشار معمولاً با پارامترهایی همچون زمان ورود موج انفجار، اضافه فشار مبنای انفجار و زمان عبور موج انفجار همانند آنچه در شکل (۲) نمایش داده شده است، مشخص می‌شود. با توجه به شکل (۲) ویژگی‌های اصلی گسترش و پیشرفت این موج فشاری به شرح زیر است: t_a زمان رسیدن موج به نقطه مورد نظر است که شامل زمان انتشار موج انفجار از محل انفجار است. P_{so}^+ مقدار اوج اضافه فشار است که در این نقطه فشار با سرعت بسیار بالایی (در زمان بی‌نهایت کم) افزایش می‌یابد و سپس شروع به کم شدن می‌کند تا جایی که به فشار اولیه P_0 که اکثراً فشار اتمسفر محیط است می‌رسد. مدت زمان فاز مثبت است که در واقع زمان لازم برای رسیدن به فشار اولیه است. پس از این، فشار به پایین‌تر از فشار محیط کاهش می‌یابد تا به بیشینه مقدار منفی یعنی P_{so}^- برسد.

مدت زمان فاز منفی نیز با t_n نشان داده می‌شود. منحنی فشار- زمان شکل (۲) را می‌توان با استفاده از فرمول اصلاح‌شده فریدلندر به صورت رابطه (۸) توصیف کرد [۱۶].

الف) و پاسخ این صفحه فولادی در مقابل بار انفجاری با استفاده از کد نویسی بر اساس معادلات کینگری-بولماش بررسی گردیده است. مشخصات در نظر گرفته شده برای فولاد $E=299\text{GPa}$ ، $\nu=0.3$ و $\rho=7850\text{kg/m}^3$ هستند. همچنین به منظور تأثیر دادن نرخ کرنش بر تنش خواص پلاستیکی فولاد با استفاده از مدل سخت‌شوندگی جانسون-کوک به صورت $A=319\text{MPa}$ ، $B=554\text{MPa}$ ، $C=3.27\times 10^{-2}$ ، $n=0.135$ و $\dot{\epsilon}_0=5.7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ در نظر گرفته شده است. صفحه فولادی بررسی شده در مرجع [۲۱] با مشخصات ذکر شده در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و با استفاده از مدل CONWEP تحت بارگذاری انفجاری قرار گرفت (شکل ۴-ب) در ادامه به مقایسه نتایج به دست آمده می‌پردازیم.

۵-۱- مقایسه افزایش فشار ایجاد شده در مرکز صفحه فولادی

شکل (۵-الف) نشان‌دهنده نتایج حاصل شده برای افزایش فشار ایجاد شده در المان مرکزی صفحه فولادی در اثر بارگذاری انفجاری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار پیک اضافه فشار برای هر دو مدل بسیار نزدیک به هم است، زمان رسیدن به پیک فشاری برای دو مدل در شکل متفاوت است و نمودار مربوط به نرم‌افزار ABAQUS بعد از ۱ میلی‌ثانیه به میزان پیک فشاری می‌رسد که در مقاله Guzas و همکاران، این زمان ۱/۰۷۲ میلی‌ثانیه محاسبه شده است.



شکل ۴-الف) مدل صفحه فولادی و محل قرارگیری بار انفجاری [۲۱]، ب) صفحه فولادی مدل شده در نرم‌افزار ABAQUS.

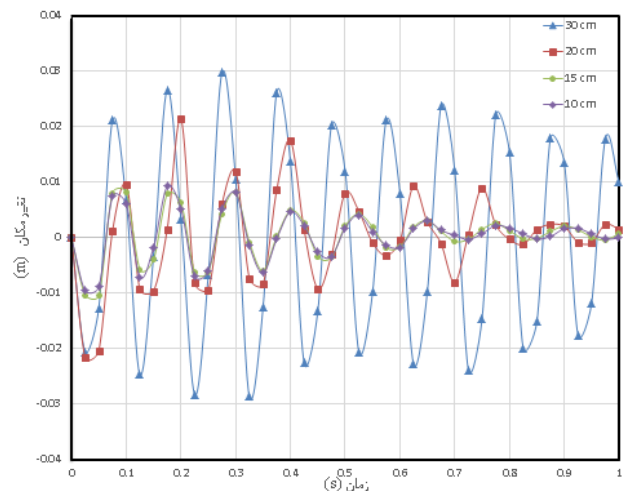
۵-۲- مقایسه جابجایی مرکز صفحه فولادی

شکل (۵-ب) نشان‌دهنده نتایج حاصل شده برای جابه‌جایی گره مرکزی صفحه فولادی در مدت زمان ۲۰۰ میلی‌ثانیه برای مدل مقاله Guzas و نرم‌افزار ABAQUS است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در پیک‌های اولیه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار ABAQUS با نتایج مقاله Guzas و همکاران مطابقت خوبی دارد اما مشاهده می‌شود بعد از مدت کمی که صفحه فولادی شروع به تغییر شکل‌های پلاستیک می‌کند

رسیدند که چنانچه اندازه مش المان محدود در حدود ۱۰ سانتیمتر انتخاب گردد، چگونگی گسترش بار انفجاری به نحو دقیقی مدل خواهد گردید. روش مورد استفاده در مقاله حاضر به منظور بررسی حساسیت نتایج به بعد مش انتخابی نیز مطابق روند پیشنهاد شده در دیگر گزارش‌ها [۱۹-۲۰] است، لذا به منظور بررسی استقلال نتایج از اندازه مش انتخابی یک نمونه از مدل را با اندازه مش‌های متفاوت مش بندی نموده و سپس نتایج حاصل باهم مقایسه شده است. به ترتیب از مش بزرگ شروع کرده و اندازه مش را تا زمانی که نتایج همگرا شوند کوچک شده است. بدین منظور اندازه مش ۳۰، ۲۰، ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متری در مدل المان محدود مخزن اعمال گردیده است و نتایج برای جابجایی رأس مخزن را مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۳) تاریخچه جابه‌جایی رأس مخزن را برای اندازه مش‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است، در اندازه مش‌های ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری نتایج همگرا شده و بر هم منطبق می‌شوند، از این‌رو در تمام مدل‌سازی‌ها از اندازه مش ۱۰ سانتی‌متری استفاده گردیده است تا اندازه مش مورد استفاده تأثیری در نتایج نداشته باشند.

۵-۳- اعتبارسنجی نحوه اعمال بار انفجاری در مدل عددی

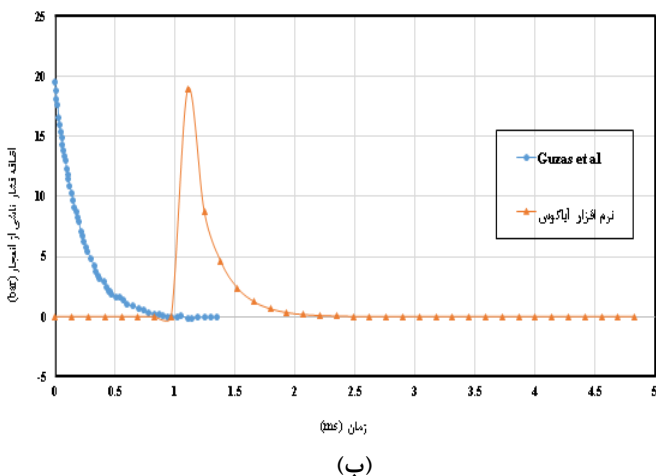
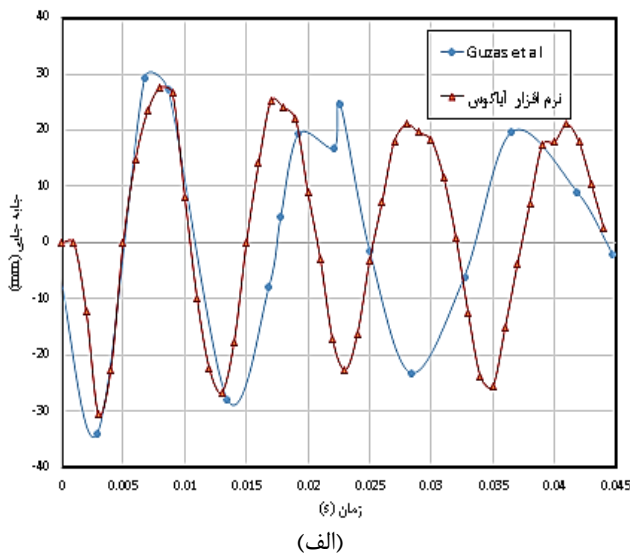
به منظور بررسی صحت روش بکار گرفته شده جهت اعمال بار انفجاری در مدل‌سازی عددی مورد استفاده مقایسه‌ای با نتایج تحقیقات قبلی صورت گرفته است. به همین منظور صورت‌سنجی عملکرد روش CONWEP در نرم‌افزار ABAQUS و پژوهش حاضر، نتایج مقاله گوزاس و همکاران [۲۱] مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در این مقاله یک صفحه فولادی مربع شکل به ابعاد طول و عرض ۹۱۴ میلی‌متر و ضخامت ۳/۱۸ میلی‌متر درحالی‌که لبه‌های کناری عمودی کاملاً گیردار هستند، در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- تاریخچه جابه‌جایی رأس مخزن برای اندازه‌های مختلف.

این صفحه فولادی تحت بار انفجاری معادل با ۱/۳۶ کیلوگرم TNT در فاصله ۱/۵۲ متری از مرکز صفحه فولادی قرار گرفته است (شکل ۴-۴)

۶۸٪ است. شکل (۷-ب) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی نیروی برش پایه سازه مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۲، تحت بار انفجاری است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مخزن خالی بیشترین برش پایه را تجربه می‌کند. در بین مخزن نیمه پر و پر هم برش به وجود آمده در مخزن نیمه پر بیش‌تر است و مخزن پر برش پایه کمتری را تجربه می‌کند. شکل (۷-ج) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۲، تحت بار انفجاری است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مخزن خالی بیشترین لنگر را تجربه می‌کند. در بین مخزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی به وجود آمده در مخزن نیمه پر بیش‌تر است و مخزن پر لنگر واژگونی کمتری را تحمل می‌کند.



شکل ۵- الف) مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی گره مرکزی صفحه فولادی (ب) مقایسه تاریخچه زمانی اضافه فشار ناشی از بار انفجاری.

نتایج برای جابه‌جایی‌ها از هم فاصله می‌گیرد، همچنین تفاوت در زمان وقوع پیک‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در روش‌های محاسباتی و فرضیات اولیه برای ویژگی‌های فولاد باشد.

۶- بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

در پژوهش حاضر پایداری سازه مخزن هوایی و پاسخ بدنه مخزن در حالات مختلف از جمله نسبت ارتفاع به شعاع مختلف، میزان مختلف سیال داخل مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این پژوهش دو نوع بررسی به منظور درک پاسخ سازه، صورت پذیرفته است. در دسته‌ای از بررسی‌ها به پارامترهای مؤثر در پایداری سازه مانند لنگر واژگونی، برش پایه و جابه‌جایی نسبی رأس مخزن پرداخته شده است و در دسته‌ای دیگر پاسخ دینامیکی بدنه مخزن در مقابل بار انفجاری از جمله تغییرات تنش حلقوی^۱، تنش برشی، تنش فون مایز و کرنش پلاستیک در جداره مخزن ارائه گردیده است. در بررسی تنش‌ها و کرنش ایجادشده در بدنه مخزن، تغییرات صورت گرفته بر روی یک مسیر انتخابی بر روی قسمت استوانه‌ای بدنه مخزن در نظر گرفته شد است، این مسیر که در شکل (۶-الف) نشان داده شده است، در وجه رو به روی نقطه انفجار قرار دارد و از نقطه A در شکل (۶-الف) شروع شده و در نقطه B خاتمه می‌یابد. در این روش در واقع تنش‌ها و کرنش‌های به وجود آمده در گره‌های موجود بر روی مسیر ثبت می‌شوند. بنابراین محور افقی نمودارها نشان‌دهنده تنش و یا کرنش به وجود آمده در جداره مخزن و محور قائم نشان‌دهنده ارتفاع مخزن در قسمت استوانه‌ای شکل آن است.

۶-۱- بررسی تأثیر ارتفاع سیال داخل مخزن بر پایداری سازه

در این بخش تأثیر میزان سیال داخل مخزن بر پایداری سازه تحت بار انفجاری آزاد و ثابت به میزان ۸۰ کیلوگرم T.N.T در فاصله ۵ متری از سطح مخزن در جهت محور x ها (نقطه a در شکل ۶-ب) مورد بررسی قرار گرفته است. سه مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع‌های ۲، ۳ و ۴ در سه حالت خالی، نیمه پر و پر مدل‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج آن‌ها در ادامه ارائه شده است.

بررسی مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۲ ($H/R=2$): شکل (۷-الف) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی جابه‌جایی رأس مخزن (نقطه B در شکل ۶-الف) در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۲، تحت بار انفجاری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابجایی مخزن خالی بیشتر از مخزن نیمه پر و پر است. همچنین جابجایی مخزن نیمه پر بیش‌تر از مخزن کاملاً پر است. با توجه به شکل (۷-ب) در صد کاهش جابه‌جایی بیشینه رأس مخزن در حالت پر نسبت به حالت نیمه پر و خالی به ترتیب برابر با ۱۲٪ و

نیمه پر صرف‌نظر از جهت جابجایی، در طول زمان تقریباً در یک محدوده است اما جابجایی حداکثر مخزن نیمه پر بیش‌تر از مخزن کاملاً پر است. در شکل (۹- الف) قابل‌توجه است که جابه‌جایی‌های مخزن خالی و نیمه پر بیش‌تر در قسمت منفی نمودار اتفاق می‌افتد که این امر به دلیل به وجود آمدن تغییر شکل دائمی در رأس مخزن بر اثر برخورد امواج انفجاری است.

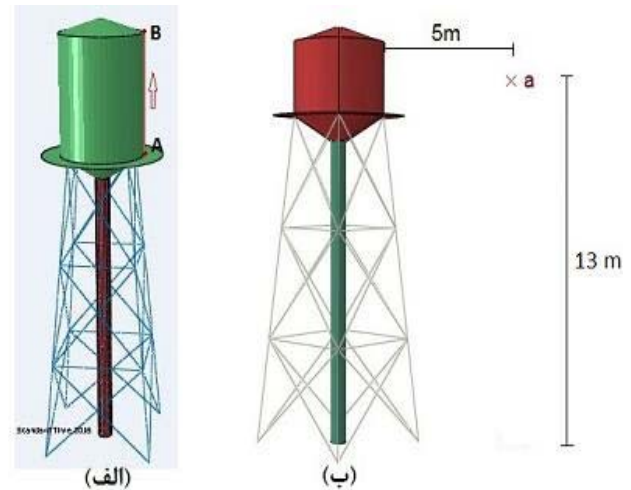
با توجه به شکل (۷) درصد کاهش جابه‌جایی بیشینه رأس مخزن در حالت پر نسبت به حالت نیمه پر و خالی به ترتیب برابر با ۳۴٪ و ۷۳٪ است. شکل (۹- ب) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی برش پایه سازه مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۴، تحت بار انفجاری است. همان طوری که مشاهده می‌شود برش پایه مخزن خالی بیشتر از مخزن نیمه پر و پر است.

با توجه به شکل (۹- ب) مشاهده می‌کنیم که در حالت $H/R=4$ تغییرات برش پایه برای حالت نیمه پر و پر غیرقابل پیش‌بینی است به طوری که در زمان‌های ابتدایی برش پایه تجربه‌شده در حالت نیمه پر بیش‌تر از حالت پر است و در زمان‌های انتهایی تحلیل، عکس این موضوع اتفاق می‌افتد، اما در حالت کلی بین مخزن نیمه پر و پر، مخزن نیمه پر حداکثر برش پایه بیش‌تری را تجربه می‌کند. شکل (۹- ج) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۴، تحت بار انفجاری است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مخزن خالی بیش‌ترین لنگر را تجربه می‌کند.

با توجه به شکل (۹- ج) مشاهده می‌کنیم که در حالت $H/R=4$ همانند تغییرات برش پایه، تغییرات لنگر واژگونی نیز برای حالت نیمه پر و پر دارای روندی نامتعارف است، به طوری که در زمان‌های ابتدایی تحلیل لنگر واژگونی تجربه‌شده در حالت نیمه پر بیش‌تر از حالت پر است و در زمان‌های انتهایی تحلیل عکس این موضوع اتفاق می‌افتد حتی در مواردی لنگر به وجود آمده در حالت پر بیش‌تر از مخزن خالی است، اما در حالت کلی به ترتیب مخزن خالی، مخزن نیمه پر و مخزن پر در مقایسه با یکدیگر حداکثر جابجایی بیش‌تری را تجربه می‌کنند، این پدیده می‌تواند به دلیل اندرکنش غیرخطی نسبتاً شدید مابین جداره مخزن و سیال داخل مخزن در این حالت و امکان تسلیم نواحی از جداره مخزن در بخش‌های تحتانی مخزن باشد به طوری که پیش‌بینی رفتار سازه را در این حالت مشکل می‌سازد.

۷- بررسی تأثیر ارتفاع سیال داخل مخزن بر رفتار بدنه مخزن

در بررسی صورت گرفته مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ منظور شده است و تنش‌ها و کرنش‌های به وجود آمده در جداره مخزن در امتداد مسیر A-B را که به عبارتی نمایانگر تغییرات در ارتفاع مخزن است را در سه حالت خالی، نیمه پر و پر مورد بررسی شده است. شکل (۱۰- الف) نشان‌دهنده کرنش پلاستیک به وجود آمده در امتداد مسیر A-B



شکل ۶- الف) مسیر AB در روی جداره مخزن (ب) مکان قرارگیری ماده انفجاری.

بررسی مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ ($H/R=3$): شکل (۸- الف) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی جابه‌جایی رأس مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳، تحت بار انفجاری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابجایی مخزن خالی بیشتر از مخزن نیمه پر و پر است. جابجایی مخزن کاملاً پر و مخزن نیمه پر صرف‌نظر از جهت جابجایی، در طول زمان تقریباً در یک محدوده است اما جابجایی حداکثر مخزن نیمه پر بیش‌تر از مخزن کاملاً پر است.

با توجه به شکل (۸- الف) درصد کاهش جابه‌جایی بیشینه رأس مخزن در حالت پر نسبت به حالت نیمه پر و خالی به ترتیب برابر با ۱۴٪ و ۶۳٪ است. شکل (۸- ب) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی برش پایه سازه مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳، تحت بار انفجاری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برش پایه مخزن خالی بیشتر از مخزن نیمه پر و پر است. در بین مخزن نیمه پر و پر هم برش به وجود آمده در مخزن نیمه پر بیش‌تر است و مخزن پر برش پایه کمتری را تحمل می‌کند. شکل (۸- ج) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳، تحت بار انفجاری است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مخزن خالی بیش‌ترین لنگر را تجربه می‌کند. در بین مخزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی به وجود آمده در مخزن نیمه پر بیش‌تر است و مخزن پر لنگر واژگونی کمتری را تحمل می‌کند.

بررسی مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۴ ($H/R=4$): شکل (۹- الف) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی جابه‌جایی رأس مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۴، تحت بار انفجاری است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود جابجایی مخزن خالی بیشتر از مخزن نیمه پر و پر است. جابجایی مخزن کاملاً پر و مخزن

خالی، نیمه پر و پر تحت بار انفجاری است. همان طوری که مشاهده می شود تنش فون ماییز به وجود آمده در حالت خالی بسیار بیش تر از دو حالت دیگر است. مخزن نیمه پر هم در مقایسه با مخزن کاملاً پر تنش فون ماییز بیشتری را تجربه می کند.

با توجه به شکل (۱۲-الف) مشاهده می شود تنش های تجربه شده در هر سه حالت در گره های پایین مخزن بیش تر است و در بخش فوقانی مخزن تنش ها کاهش می یابد و این تغییرات در مخزن خالی نامنظم تر از دو حالت دیگر است. در مخزن نیمه پر هم تغییرات تنش در مقایسه با مخزن کاملاً پر نامنظم تر است. شکل (۱۲-ب) نمونه ای از کانتورهای تنش های فون ماییز به وجود آمده در جداره مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر در یک زمان معین ارائه شده است. با بررسی کانتورها مشاهده شد که در مخزن خالی اکثراً ماکزیمم تنش ها در محل اتصال پایه های کناری به مخزن و در مخزن نیمه پر و پر در سقف مخزن به وجود می آید. در جدول (۱) نیز بیشینه مقادیر تنش های به وجود آمده در جداره مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر در کل زمان تحلیل ارائه شده است.

۷-۱- بررسی تأثیر نسبت ارتفاع به شعاع مخزن بر پایداری سازه در حالت مخزن پر

شکل (۱۳-الف) نشان دهنده تاریخچه زمانی جابه جایی رأس مخزن در سه حالت $H/R=2$ ، $H/R=3$ ، $H/R=4$ و در حالت کاملاً پر تحت بار انفجاری است. همان طور که مشاهده می شود جابه جایی مخزن با $H/R=4$ بیشتر از مخزن با $H/R=3$ و $H/R=2$ است، همچنین جابه جایی در مخزن با $H/R=3$ بیش تر از مخزن با $H/R=2$ است.

با توجه به شکل (۱۳-الف) و روند تغییرات نمودارها مشاهده می شود که مخزن با $H/R=2$ زودتر از دو مخزن دیگر حالت نوسانی خود را از دست می دهد به طوری که در طول یک ثانیه جابه جایی مخزن با نسبت $H/R=2$ تقریباً صفر می شود ولی مخزن با نسبت $H/R=4$ همچنان دارای حرکت نوسانی است.

شکل (۱۳-ب) نشان دهنده تاریخچه زمانی برش پایه مخزن در سه حالت $H/R=2$ ، $H/R=3$ ، $H/R=4$ و در حالت کاملاً پر تحت بار انفجاری است. برش پایه سازه در نسبت های مختلف ارتفاع به شعاع مخزن دارای تغییرات نامنظم و غیر قابل پیش بینی است، اما مشاهده می شود که مخزن با نسبت $H/R=3$ در ابتدای بارگذاری برش پایه بیش تری را تجربه می کند.

شکل (۱۳-ج) نشان دهنده تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت $H/R=2$ ، $H/R=3$ ، $H/R=4$ و در حالت کاملاً پر تحت بار انفجاری است. لنگر واژگونی سازه نیز مانند برش پایه در نسبت های مختلف ارتفاع به شعاع مخزن دارای تغییرات نامنظم و غیر قابل پیش بینی است، اما مشاهده می شود که مخزن با $H/R=3$ لنگر واژگونی بیش تری را تجربه می کند.

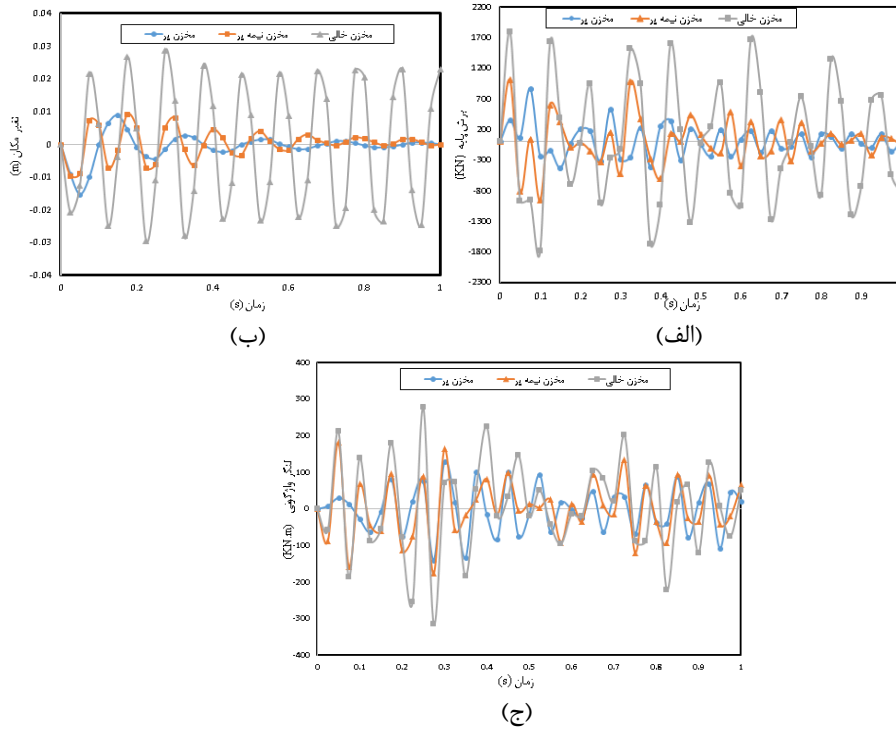
برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ در سه حالت خالی، نیمه پر و پر تحت بار انفجاری در یک زمان معین است. همان طوری که مشاهده می شود کرنش پلاستیک به وجود آمده در برای مخزن خالی بسیار بیش تر از دو حالت دیگر است. مخزن نیمه پر هم در مقایسه با مخزن کاملاً پر کرنش بیش تری را تجربه می کند. مخزن کاملاً پر تقریباً کرنشی پلاستیکی را تجربه نمی کند. با توجه به شکل (۱۰-الف) مشاهده می شود که کرنش های پلاستیک ایجاد شده در جداره مخزن در ابتدا و انتهای قسمت استوانه ای مخزن است، همچنین در حالت مخزن نیمه پر در میانه مسیر A-B یعنی در مجاورت مرز سطح آب مخزن و قسمت خالی مخزن شاهد به وجود آمدن کرنش پلاستیک (هر چند به میزان بسیار کم) هستیم.

در (شکل (۱۰-ب) نمونه ای از کانتورهای کرنش پلاستیک در جداره مخزن در سه حالت مخزن خالی، نیمه پر و پر در یک زمان معین نشان شده است. با بررسی کانتورها مشاهده شد برای مخزن خالی اکثراً کرنش ها در پایین و بالای قسمت استوانه ای مخزن به وجود می آید و در مخزن نیمه پر کرنش پلاستیک در گره های بالای بخش استوانه ای مشاهده می شود و در بخش تحتانی به دلیل وجود آب کرنش اندکی ایجاد می شود.

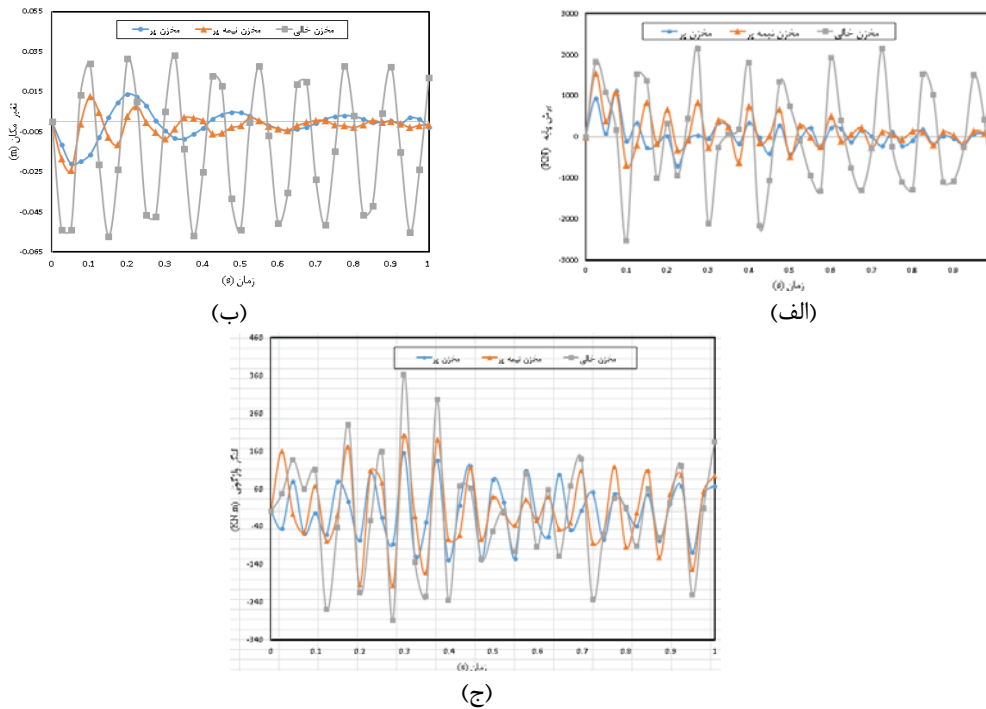
شکل (۱۱-الف) نشان دهنده تنش حلقوی به وجود آمده در امتداد مسیر A-B برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ در سه حالت خالی، نیمه پر و پر تحت بار انفجاری در یک زمان معین است. همان طوری که مشاهده می شود تنش حلقوی به وجود آمده برای مخزن خالی بسیار بیش تر از دو حالت دیگر است. مخزن نیمه پر نیز در مقایسه با مخزن کاملاً پر تنش حلقوی بیش تری را تجربه می کند. با توجه به این که در هنگام انفجار، مخزن از طرف بیرون تحت موج فشاری ناشی از انفجار و از قسمت داخلی تحت فشار ناشی از آب قرار می گیرد به همین دلیل مشاهده می کنیم که در طول مسیر، تنش های حلقوی کششی و تنش ها حلقوی فشاری در جدار i مخزن ایجاد شده است.

با توجه به شکل (۱۱-الف) ماکزیمم تنش حلقوی در حالت خالی نسبت به دو حالت نیمه پر و پر به ترتیب ۴۴٪ و ۸۶٪ درصد افزایش یافته است. شکل (۱۱-ب) نشان دهنده تنش برشی به وجود آمده در امتداد مسیر A-B برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ در سه حالت خالی، نیمه پر و پر تحت بار انفجاری است. همان طور که مشاهده می شود تنش برشی به وجود آمده در حالت مخزن نیمه پر در مقایسه با مخزن کاملاً پر بیش تر است و مخزن خالی نیز تنش برشی بسیار کمتری را تجربه می کند. از آنجایی که در طول زمان بارگذاری، مخزن دارای حرکت نوسانی است، در راستای ارتفاعی تنش های برشی مثبت و نیز تنش های برشی منفی ایجاد شده است که در شکل (۱۱-ب) قابل مشاهده است.

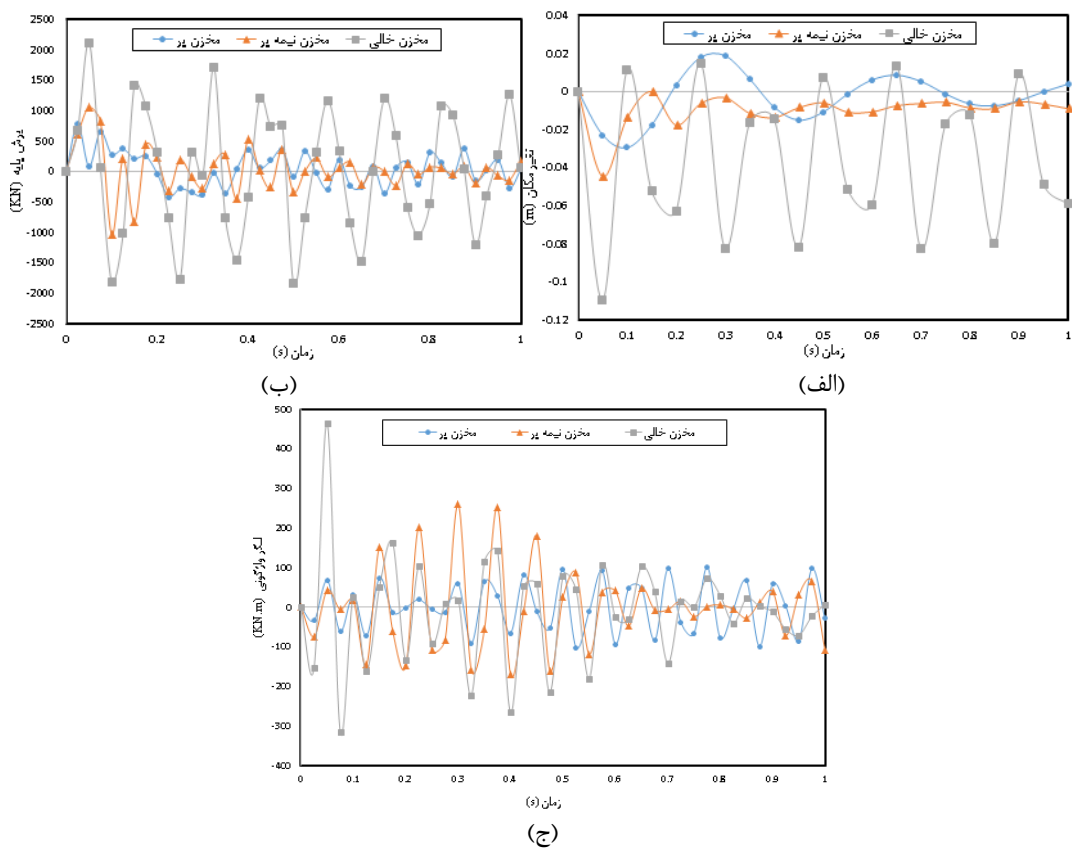
شکل (۱۲-الف) نیز نشان دهنده تنش فون ماییز به وجود آمده در امتداد مسیر A-B برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ در سه حالت



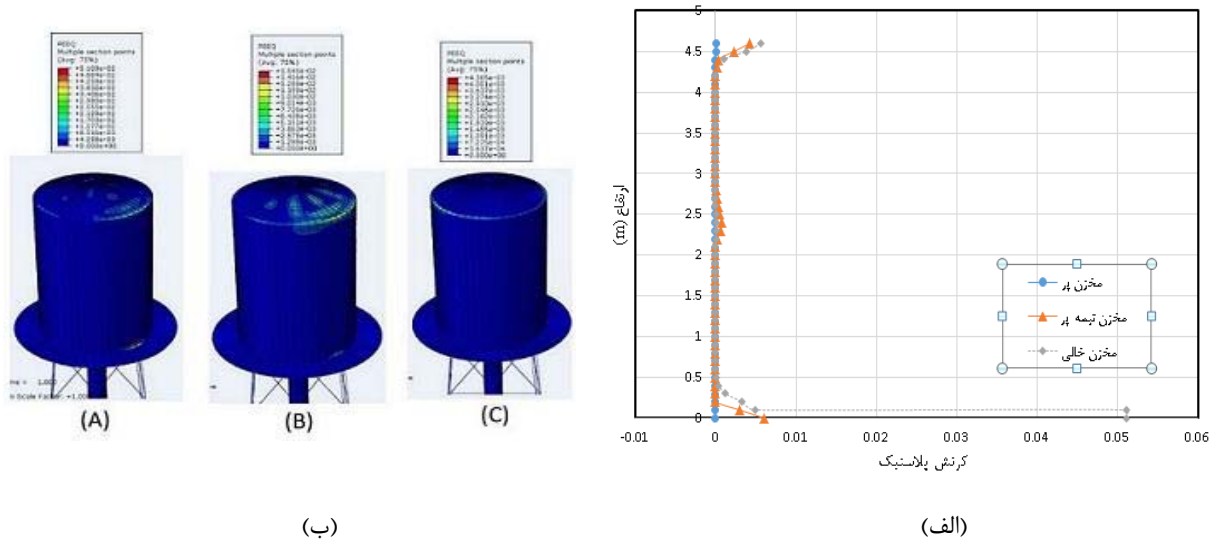
شکل ۷- مقایسه پاسخ‌های سازه در برابر بار انفجاری برای سه حالت میزان آب داخل مخزن در حالت ($H/R=2$)؛ الف) مقایسه تاریخیچه زمانی جابجایی رأس مخزن ب) مقایسه تاریخیچه زمانی نیروی برش پایه به وجود آمده در پای سازه ج) مقایسه تاریخیچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن.



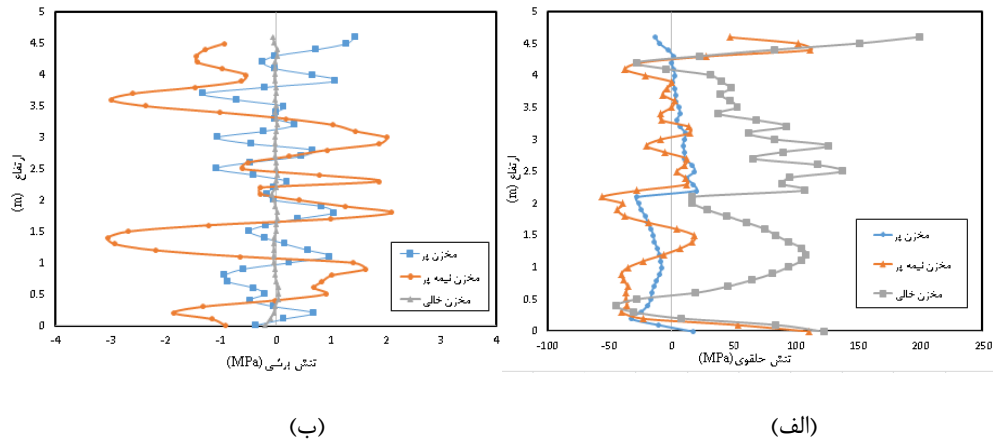
شکل ۸- مقایسه پاسخ‌های سازه در برابر بار انفجاری برای سه حالت میزان آب داخل مخزن در حالت ($H/R=3$)؛ الف) مقایسه تاریخیچه زمانی جابجایی رأس مخزن ب) مقایسه تاریخیچه زمانی نیروی برش پایه به وجود آمده در پای سازه ج) مقایسه تاریخیچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن.



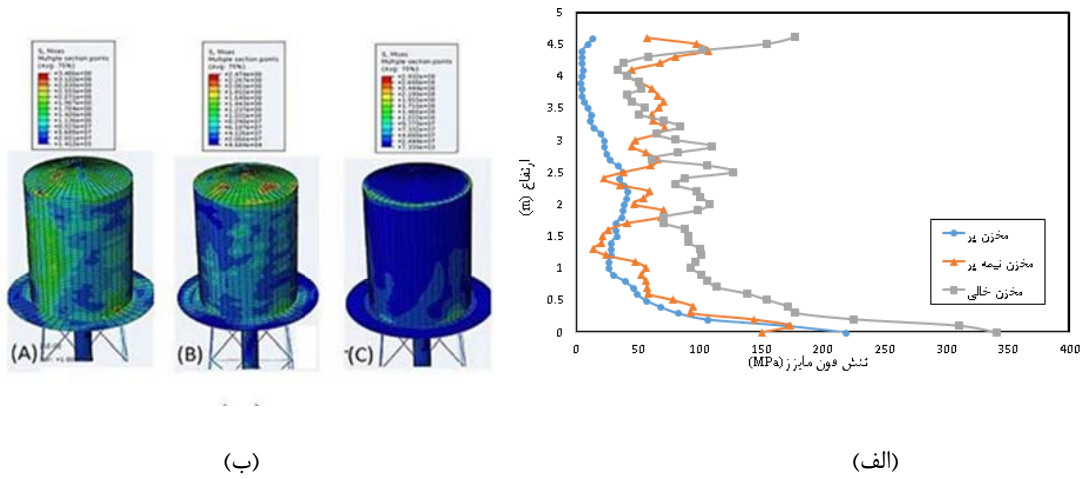
شکل ۹- مقایسه پاسخ‌های سازه در برابر بار انفجاری برای سه حالت میزان آب داخل مخزن در حالت (H/R=4)؛ مقایسه تاریخیچه زمانی جابجایی رأس مخزن (ب)مقایسه تاریخیچه زمانی نیروی برش پایه به وجود آمده در پای سازه (ج) مقایسه تاریخیچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن.



شکل ۱۰- (الف) مقایسه تغییرات کرنش پلاستیک در جداره مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر. (ب) کانتورهای کرنش پلاستیک (A): مخزن خالی، (B): مخزن نیمه پر، (C): مخزن پر.



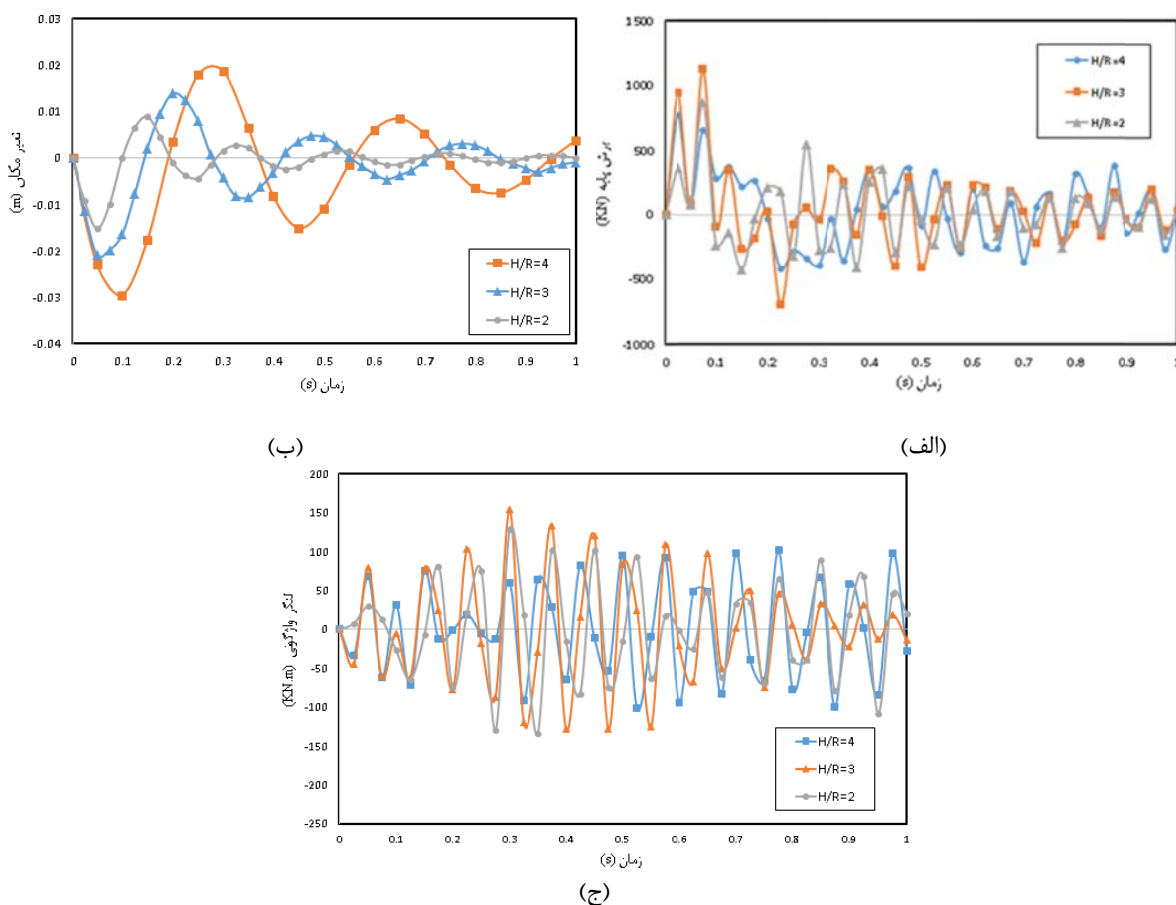
شکل ۱۱- مقایسه تنش‌های به وجود آمده در جداره مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر. الف) تنش‌های حلقوی ب) تنش‌های برشی.



شکل ۱۲- الف) مقایسه تنش‌های فون مایرز به وجود آمده در جداره مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر. ب) کانتورهای تنش فون مایرز (A): مخزن خالی، (B): مخزن نیمه پر، (C): مخزن پر.

جدول ۲- بیشینه مقادیر تنش‌های به وجود آمده در جداره مخزن در سه حالت خالی، نیمه پر و پر در کل زمان تحلیل.

	میزان آب داخل مخزن		
	کاملاً پر	نیمه پر	خالی
بیشینه تنش حلقوی (MPa)	۲۰۵/۸	۲۳۴	۳۷۸/۹
بیشینه تنش برشی (MPa)	۹۹/۰۳	۱۱۶/۲	۱۶۹
بیشینه تنش فون مایرز (MPa)	۲۹۳/۲	۳۲۷/۳	۳۴۲/۹

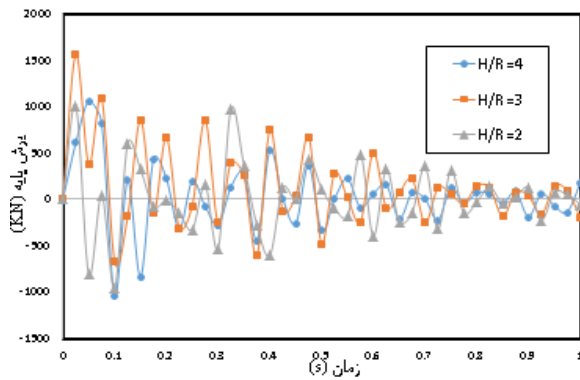


شکل ۱۳- مقایسه تاریخچه‌های زمانی پاسخ سازه در برابر بار انفجاری برای سه حالت $H/R=2$ ، $H/R=3$ و $H/R=4$ در حالت پر. (الف) تاریخچه زمانی جابجایی رأس مخزن (ب) تاریخچه زمانی برش پایه سازه (ج) تاریخچه زمانی لنگر واژگونی.

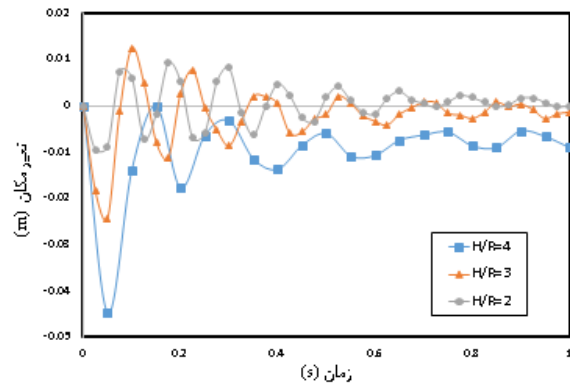
می‌افتد که این امر به دلیل به وجود آمدن تغییر شکل دائمی در رأس مخزن بر اثر برخورد امواج انفجاری است. شکل (۱۴-ب) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی برش پایه مخزن در سه حالت $H/R=2$ ، $H/R=3$ و $H/R=4$ و در حالت نیمه پر تحت بار انفجاری است. برش پایه سازه در نسبت‌های مختلف ارتفاع به شعاع مخزن دارای تغییرات نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی است، اما مشاهده می‌شود که مخزن با $H/R=3$ در ابتدای بارگذاری برش پایه بیش‌تری را تجربه می‌کند. شکل (۱۴-ج) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت $H/R=2$ ، $H/R=3$ و $H/R=4$ و در حالت کاملاً پر تحت بار انفجاری است. لنگر واژگونی سازه نیز مانند برش پایه در نسبت‌های مختلف ارتفاع به شعاع مخزن دارای تغییرات نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی است، اما مشاهده می‌شود که مخزن با $H/R=3$ لنگر واژگونی بیش‌تری را تجربه می‌کند.

۲-۷- بررسی تأثیر نسبت ارتفاع به شعاع مخزن بر پایداری سازه در حالت نیمه پر

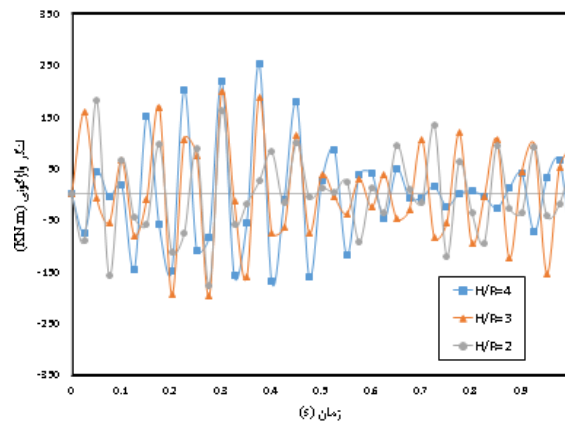
شکل (۱۴-الف) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی جابجایی رأس مخزن در سه حالت $H/R=2$ ، $H/R=3$ و $H/R=4$ و در حالت نیمه پر تحت بار انفجاری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابجایی مخزن با $H/R=4$ بیشتر از مخزن با $H/R=3$ و $H/R=2$ است، همچنین جابجایی در مخزن با $H/R=3$ بیش‌تر از مخزن با $H/R=2$ است. با توجه به شکل (۱۴-الف) و روند تغییرات نمودارها مشاهده می‌شود که مخزن با $H/R=2$ زودتر از دو مخزن دیگر حالت حرکت نوسانی خود را از دست می‌دهد به طوری که در طول یک ثانیه جابجایی مخزن با $H/R=2$ تقریباً صفر می‌شود ولی مخزن با $H/R=4$ همچنان دارای نوسان است. در شکل (۱۴-الف) جالب‌توجه است که جابجایی‌های مخزن با نسبت $H/R=4$ در قسمت منفی نمودار اتفاق



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۴- مقایسه تاریخچه‌های زمانی پاسخ سازه در برابر بار انفجاری برای سه حالت $H/R=2$ ، $H/R=3$ و $H/R=4$ در حالت نیمه پر. (الف) تاریخچه زمانی جابجایی رأس مخزن. (ب) تاریخچه زمانی برش پایه سازه. (ج) تاریخچه زمانی لنگر واژگونی.

۸- نتیجه‌گیری

- کرنش پلاستیک ایجاد شده در مخزن خالی بسیار بیش‌تر از مخزن نیمه پر و کاملاً پر است. هرچه سیال داخل مخزن بیش‌تر می‌شود کرنش ایجادشده در بدنه مخزن کاهش می‌یابد به طوری که مخزن کاملاً پر تحت بار انفجاری آزمایشی در مقایسه با مخزن نیمه پر و خالی تقریباً کرنشی را تجربه نمی‌کند. به عبارتی وجود سیال داخل مخزن از وقوع کرنش و گسیختگی جداره مخزن جلوگیری می‌کند. محل ایجاد کرنش‌ها نیز بخش تحتانی و فوقانی قسمت استوانه‌ای مخزن در مجاورت سطح آزاد سیال در تماس با جداره است.

- مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع بیشتر جابه‌جایی‌های بیش‌تری در مقایسه با مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع کمتر جابه‌جایی بیش‌تری دارند، اما برش پایه و لنگر واژگونی با افزایش نسبت ارتفاع به شعاع تغییرات قابل پیش‌بینی و قابل توجهی ندارند.

در این پژوهش رفتار و پاسخ دینامیکی مخزن فولادی هوایی سیال تحت بار انفجاری معین مورد مطالعه قرار گرفته است. سازه مخزن تحت بار انفجار آزاد در هوا به میزان ۸۰ کیلوگرم TNT در یک فاصله ثابت ۵ متری از جداره مخزن مدل گردیده و تحلیل پارامتریک پاسخ سازه در مقابل عوامل تأثیرگذار در رفتار سازه مانند نسبت ارتفاع به شعاع مخزن، ارتفاع آب داخل مخزن، ضخامت جداره مخزن صورت گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر هستند:

- میزان سیال داخل مخزن رابطه عکس با پاسخ دینامیکی مخزن دارد. به عبارت دیگر هرچه میزان سیال داخل مخزن افزایش می‌یابد، جابه‌جایی رأس مخزن، برش پایه سازه و لنگر واژگونی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که مخزن خالی جابه‌جایی، برش پایه و لنگر واژگونی بیش‌تری را تحت بار انفجاری به میزان معین در مقایسه با مخزن نیمه پر و پر تحمل می‌کند. مخزن نیمه پر نیز در مقایسه با مخزن پر جابه‌جایی، برش پایه و لنگر واژگونی بیش‌تری نشان می‌دهد.

مراجع

- [11] Bmbach, M. R. "Design of Metal Hollow Section Tubular Columns Subjected to Transverse Blast Loads"; *Thin-Walled Struct.* 2013, 68, 92–105.
- [12] 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.
- [13] Abaqus/Explicit User's Manual, Version 6.11, 2016
- [14] Kalateh, F.; Attarnejad, R. "A New Cavitation Simulation Method: Dam-Reservoir Systems"; *Int. J. Comput. Methods Eng. Sci. Mech.* 2012, 13, 161–183
- [15] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures"; *Eng. Fract. Mech.* 1985, 21, 3148–3160.
- [16] Kinney, G. F.; Graham, K. J. "Explosive Shocks in Air"; Springer-Verlag, Berlin and New York, 1985, p282.
- [17] Wilfrid, B. E. "Explosions in the Air"; University of Texas, Ausint, 1973.
- [18] Luccioni, B.; Ambrosini, D.; Danesi, R. "Blast Load Assessment Using Hydrocodes"; *Eng. Struct.* 2006, 28, 1736–1744.
- [19] Wang G.; Zhang S. "Damage Prediction of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater Explosion Shock Loading"; *Eng. Failure Anal.* 2014, 39, 72–91.
- [20] Zhang, S.; Wang, G.; Wang, C.; Pang, B.; Du, C. "Numerical Simulation of Failure Modes of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater Explosion"; *Eng. Failure Anal.* 2014, 36, 49–64
- [21] Guzas, E. L.; Earls, C. J. "Air Blast Load Generation for Simulating Structural Response"; *Steel Composit. Struct.* 2010, 10, 429–455.
- [1] Chang, J. I.; Lin, C. C. "A Study of Storage Tank Accidents"; *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2006, 19, 51–59.
- [2] Stein, L. R.; Gentry, R. A.; Hirt, C. W. "Computational Simulation of Transient Blast Loading on Three-Dimensional Structures"; *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 1977, 11, 57–74.
- [3] Koko, T. S.; Olson, M. D. "Non-Linear Transient Response of Stiffened Plates to Air Blast Loading by a Super Element Approach"; *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 1991, 90, 737–760.
- [4] Guruprasad, S.; Mukherjee, A. "Layered Sacrificial Claddings Under Blast Loading Part-I Analytical Studies"; *Int. J. Impact Eng.* 2000, 24, 957–973.
- [5] Guruprasad, S.; Mukherjee, A. "Layered Sacrificial Claddings Under Blast Loading Part-II Experimental Studies"; *Int. J. Impact Eng.* 2000, 24, 975–984.
- [6] Goel, M. D.; Matsagar, V. A.; Gupta, A. K. "Dynamic Response of Stiffened Plates Under Air Blast"; *Int. J. Prot. Struct.* 2011, 2, 139–155.
- [7] Kowal, M. K.; Kubiak, T.; Swiniarski J. "Influence of Blast Pressure Modeling on the Dynamic Response of Conical and Hemispherical Shells"; *Thin-Walled Struct.* 2011, 49, 604–610.
- [8] Goel, M. D.; Matsagar, V. A.; Marburg, S.; Gupta, A. K. "Comparative Performance of Stiffened Sandwich Foam Panels under Impulsive Loading"; *J. Perform. Constr. Facile ASCE.* 2012, 27, 540–549.
- [9] Tiwari, R.; Jain, S.; Chakraborty, T.; Matsagar, V. "Dynamic Response of Reinforced Concrete Sacrificial Wall under Blast Loading"; *Proc. of the 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2012), São Paulo, Brazil; 2012.*
- [10] Higgins, W.; Chakraborty, T.; Basu, D. "A High Strain-Rate Constitutive Model for Sand and its Application in the Finite-Element Analysis of Tunnels Subjected to Blast"; *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 2012, 37, 590–610.