محبه علمی- بژو،شی "موادیرانرژی " سال یازدیم، شاره ۳، شاره پیایی ۳۱، پاینر ۹۵: ص ۸۰- ۴۷

مدلسازی رفتار دینامیکی مخازن هوایی ذخیره سیال تحت بار انفجاری

فرهود کلاته^{ا*}، رافق فانی^۲ ۱ – استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز (تاریخ وصول: ۹۵/۳/۵، تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲۴)

چکیدہ

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 فرمول بندی کوپل اولر- لاگرانـژی کـه مزیت در نظر گرفتن معادلات اساسی مکانیک سازه و مکانیک سیالات را به صورت کوپل دارد مدل گردیده است.مدل المان محـدود سـه بعـدی مخـزن هـوایی توسط نرمافزار ABAQUS تهیه گردیده است. مخزن تحت بار انفجار آزاد در هوا به میزان ۸۰ کیلوگرم TNT در یک فاصـله ثابت ۵ متـری از جـدارهٔ مخزن مدل گردیده و تحلیل پارامتریک پاسخ سازه در مقابل پارامترهای تأثیرگذار در رفتار سازه مانند نسبت ارتفاع به شعاع مخـزن، ارتفـاع آب داخـل 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 طـوری 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 طـوری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتاید و کاهش ضخامت جداره مخزن، افزایش مییابند و جابهجایی 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 طـوری 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 طـوری رازقاع آب داخل مخزن کاهش میزان آب داخل مخزن و کاهش ضخامت جداره مخزن، افزایش مییابند و جابهجایی، برش پایه و لنگر واژگونی با افزایش

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.

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

مخازن ذخیرہ سیال سازہ ہایی ہستند کے برای نگھداری مایعات مختلف جهت تأمين نيازهاي بهداشتي، شبكههاي آبرساني شهري، تصفیه خانه ها، یالایشگاه ها، سایت های شیمیایی و... مورد استفاده قرار می گیرند که وجود آنها برای رفع نیازهای مختلف در جوامع شهری امروزی با توجه به افزایش جمعیت و گسترش شهرها امری غیرقابل چشم پوشی است. تخریب این مخازن و آسیب دیدن آن ها ممکن است فجايع زيانبارى از جمله بحران آب، تهديد 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 می تواند خسارات جبران ناپذیری را در پی داشته باشد. به عنوان مثال یک حادثه کوچک در مخازن نگهدارنده سیال در پالایشگاههای نفتی و سایتهای شیمیایی می تواند میلیون ها 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 رخداده است که ۸۵ درصد این حوادث ناشی از انفجار و آتش سوزی بوده است. ازاین 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. فرمول بندی به کار گرفته شده در این مقاله فرمول بندی کوپل اولر-لاگرانژی (CEL) است. در این مقاله توضیحات مفصلی در مورد روش CEL و نحوه مش بندی 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 ۱۰۰، ۷۵و ۵۰ درصد مخزن پر باشد، تحت بار انفجار با بزرگیهای مختلف مدلسازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شرایط تکیه گاهی هر یک از مخازن نیز به سه صورت تکیه گاه گیردار ، تکیه گاه ساده و تکیه گاه 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

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

مجله علمی ـ پژوهشی «مواد پرانرژی»؛ سال یازدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵

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 می شود. برای ضخامت ۱ میلی متری تنش برشی پایه با افزایش نسبت ارتفاع به شعاع مخزن کاهش می یابد. با افزایش ضخامت جداره مخزن و همچنین افزایش نسبت ارتفاع به شعاع مخزن برش پایه افزایش می یابد.

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 می یابد. با افزایش ضخامت جداره مخزن و فاصله مقیاس شده تلاطم سطحی کاهش می یابد به طوری که در فواصل مقیاس شده زیاد هیچ تلاطم سطحی مشاهده نمی شود.

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 یژوهشی در این زمینه به شدت احساس می شود. در پژوهش حاضر رفتار و پاسخ دینامیکی مخزن هوایی تحت بار انفجاری مورد بررسی قرارگرفته است. بدین منظور مخزن فلزی را تحت بار انفجاری با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال و با استفاده از فرمول بندی کویل اولر - لاگرانژی در نرمافزار ABAQUS، مدل سازی نموده و به تحلیل پارامتریک سازه در مقابل پارامترهای تأثیر گذار در رفتار سازه با استفاده از نتایج به دست آمده پرداخته شده است. از مزايای 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 می شود که امکان مدلسازی محیطهای چند فازی مانند اندرکنش سازه- سیال

¹⁻ Sloshing

را فراهم میکند[۱۳]. در پژوهش حاضر سه مخـزن فـولادی بـا ارتفـاع مخزن مختلف در نظر گرفته شده است که این تفاوت هندسی مخزن را با نسبت ارتفاع مخزن به شعاع مخزن(H/R) بیان میکنیم. به طور کلی در پژوهش حاضر موارد زیر را مورد مطالعه قرار میگیرد: 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 مدلسازی اثر متقابل قلمروهای اولری و لاگرانژی را در یک مدل فراهم میسازد. آنالیز کوپله اولری-لاگرانژی به طور معمول جهت مدلسازی اثرات متقابل جسم جامد با یک سیال یا یک ماده تسلیمشده استفاده میشود. 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 ازاین و این ابزار قدرتمند این امکان را ایجاد میکند که بتوان بسیاری از مسائل چند فازی از جمله تماس سازه با سیال را مدلسازی نمود. در این روش به دلیل مدلسازی سیال به صورت اولرین، مشکلات ناشی از تغییر شکلهای 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 پیادهسازی روش اولری در نرمافزار آباکوس بر اساس روش حجم سیال^۱ است در این روش موقعیت ماده اولری در محیط مـش بنـدی با محاسـبه کسـر حجمـی اولرين در هر المان مشخص مي شود. با اين تعريف اگر يك المان به طور کامل از یک ماده پر شود مقدار کسر حجمی اولرین آن یک و اگر مادهای در آن قرار نگیرد کسر حجمی اویلرین آن صفر است.

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

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

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

 F_i ، به طوری که σ_{ij} مؤلفههای تنش، u_{s_i} مؤلفههای جابهجایی r_{ij} مؤلفههای جابهجایی بردار بار خارجی و ho چگالی مصالح هستند. فرم گسسته سازی معادلات فوق را میتوان به صورت زیر بیان نمود[۱۴]:

$$M]\ddot{u}_{s} + [C]\dot{u}_{s} + [K]u_{s} = [Q]\{P_{i} + P_{r}\} + [Q]\{P_{h}\} + \{F_{s}\}$$
(7)

در معادله (۲) ماتریسهای [M]،[O]و[X]به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه هستند و [Q] ماتریس اندر کنش مابین محیط سازه و سیال مجاور است. P_i موج شوک انفجاری برخوردی به سازه و P_r موج شوک منعکسشده 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 بـه صـورت زیر می باشد[۱۳]:

$$\frac{\partial P_h}{\partial x} + \gamma \cdot \dot{u}_f + \rho_f \cdot \ddot{u}_f = 0 \tag{(7)}$$

اضافه فشار در سیال ، X موقعیت مکان ذره سیال ، u_f سرعت ذره P_h سیال ، v_f شتاب ذره سیال ، γ چگالی سیال ، γ درگ حجمی هستند. چنانچه سیال غیرلزج، خطی و تراکم پذیر فرض شود داریم:

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

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 سادهسازی و ترکیب نتیجه حاصل با معادله (۴) ، معادله تعادل دینامیکی قلمرو سیال بر مبنای فشار سیال حاصل می گردد:

$$\frac{1}{K_f}\ddot{P} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f}\dot{P} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial P}{\partial x}\right) = 0 \qquad (\Delta)$$

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

$$[G]\ddot{P}_{h} + [D]\dot{P}_{h} + [H]P_{h} = -[Q]^{T}\ddot{u}_{s} + \{F_{f}\}$$
(5)

در معادله (۶) ماتریس های [G]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 حوزهٔ زمانی با استفاده از گزینهٔ انتگرال گیری دینامیکی صریح در نرمافزار انتگرال گیری شوند.

۲–۳– مدل المان محدود

در مدل المان محدود مورد استفاده جهت اعمال اندر کنش مابین جدارهٔ 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

¹⁻ Volume of Fluid

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

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 بیش تر 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 گرفتهشده است. این مخازن از فولاد نرم با ضریب الاستیسیته E=210GPa ضريب پوآسون v=0.3 و چگالی $ho=7000\,{
m kg/m^3}$ ساخته شده است. بارهای انفجاری معمولاً نرخ کرنشهای بسیار بالا در محدوده ⁻¹۰^۴ s⁻¹ ۱۰^۲ایجاد می کنند. این نرخ کرنش بالا، خواص مکانیکی مصالح در سازه و مکانیسم های مورد انتظار را تغییر میدهد. به منظور تأثیر دادن نرخ کرنش بر تنش نیز خواص پلاستیکی فولاد را با استفاده از مدل سخت شوندگی جانسون-کوک 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 می شود[۱۳]. این ویژگی به راحتی در نرمافزار آباکوس قابل تعریف است.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{n})(l + C\ln\varepsilon^{*})(l - T^{*m})$$
(V)

در رابطه (۲) $(\dot{B} + \dot{B}) = \dot{B}$ نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد در نرخ کرنش مرجع می باشد، \dot{s} نرخ کرنش پلاستیک معادل و T دمای بدون بعد متناظر است. پارامتر A مقاومت گسیختگی اولیه فولاد در یک نرخ کرنش پلاستیک \dot{s} و درجه حرارت ۲۹۸ کلوین است. پارامترهای B و n رفتار سخت شدگی فولاد مستقل از نرخ کرنش را شبیه سازی می کنند و پارامتر C رفتار سخت شونده وابسته به نرخ کرنش را منعکس می سازد. کمیت m ضریب نرم شدگی حرارتی می باشد [۱۲]. در پژوهش حاضر آب به صورت سیال نیوتونی و غیر لزج در نظر گرفته شده است. چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و گرانروی آن ۲۰۰۱ پاسکال در ثانیه در تحلیل منظور گردیده است.

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].					
А	В	С	n	m	
360 MPa	365 MPa	0.075	0.114	1	

۲-۴- 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 ^۲ONWEP استفاده می کنیم که بار حاصل از انفجار مقدار مشخصی از TNT را در فاصله معینی از سازه را محاسبه کرده و به سازه اعمال می کند. در این پژوهش از انفجار آزاد در هوا⁷ که بحرانی ترین 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 کوپـل 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 طولانی تر 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 قابلیتی 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.

¹⁻ Johnson-Cook Hardening

²⁻ Conventional Weapons

³⁻ Free Air Blast

$$P_{i}(t) = P_{0}\left(I - \frac{t}{t_{d}}\right)e^{\left(-b\frac{t}{t_{d}}\right)} \tag{A}$$

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 d پارامتر تجربی است و t نیز معرف زمان است.



۲-۳- روش CONWEP

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

$$\begin{split} P(t) &= P_{i}(t) \left(1 + \cos \theta - \tau \cos^{\tau} \theta \right) + P_{r}(t) \cos^{\tau} \theta \quad \cos \theta \geq \cdot \quad (9) \\ P(t) &= P_{i}(t) \quad \cos \theta < 0 \end{split}$$

که در این رابطه شدت موج فشاری کلی اعمال شده بر سازه مجاور در زمان $I_i(t)$ فشار فاز مثبت برخوردی در زمان $I_i(t)$ فشار بازتابی در زمان I 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 نمی شود.

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 داده انـد. ایـن محققین بـه ایـن نتیجـه بخشی از انرژی به صورت تشعشع حرارتی منتشر می شود و بخشی نیز به صورت کوپل با هوا به عنوان انفجار در هوا و بخشی هم به عنوان شوک زمینی به خاک (زمین) آزاد می شود به طوری که این امواج ضربهای به صورت شعاعی گسترش می یابد. افزایش فشاری که به یک نقطه خاص می رسد 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 می آیند که از سطح منعکس می شود که فشار بازتابی نامیده می شود. به خاطر این انعکاس امواج تولیدشده میزان اضافه فشار حاصله از انفجار می تواند تا چندین برابر افزایش یابد. میزان تأثیر فشار منعکس شده به بزرگی و زاویه انفجار بستگی دارد.



شکل ۱ – الف) جزئیات طراحی مخزن اولیه. ب) مدل های ساخته شده توسط نرمافزار با ابعاد مخزن متفاوت.

۳-۱- پارامترهای تعریف بارگذاری انفجاری

پروفایل اضافه فشار معمولاً با پارامتره ایی 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 : $_a$ زمان رسیدن موج به نقطه مورد نظر است که شامل زمان انتشار موج انفجار از محل انفجار است. P_{s0}^+ مقدار اوج اضافه فشار است که در این نقطه فشار با سرعت بسیار بالایی (در زمان بی نهایت کم) افزایش میباید و سپس شروع به کم شدن می کند تا جایی که به فشار اولیه P_0 که اکثراً فشار اتمسفر محیط است می رسد. t_a مدت زمان فاز مثبت است که در واقع زمان لازم برای رسیدن به فشار اولیه است. پس از این، فشار به پایین تر از فشار محیط کاهش می یابد تا به بیشینه مقدار منفی یعنی P_{s0}^- برسد.

مدتزمان فاز منفی نیز با t_n نشان داده می شود. منحنی فشار - زمان شکل (۲) را می توان با استفاده از فرمول اصلاح شده فریدلندر به صورت رابطهٔ (۸) توصیف کرد [۱۶].

¹⁻Conventional Weapons

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 [۲۰-۱۹] 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 مـش را تا زمانی کـه نتایج همگـرا شـوند کوچیک شده است. بدین منظور اندازه مش ۳۰، ۲۰، ۱۵و 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. همان طور که از شکل (۳) مشخص است، در اندازه مـشهـای ۱۰ و ۱۵ سانتیمتری نتایج همگرا شده و بر هم منطبق میشوند، ازاینرو در تمام مدلسازیها از اندازهٔ مـش ۱۰ سانتیمتری استفاده گردیده است تا اندازه مش مورد استفاده تأثیری در نتایج نداشته باشند.

۵- اعتبارسنجی نحوه اعمال بار انفجاری در مدل عددی

به منظور بررسی صحت روش بکار گرفته شده جهت اعمال بار انفجاری در مدل سازی عددی مورد استفاده مقایسه ای با نتایج تحقیقات قبلی صورت گرفته است. به همین منظور صحت سنجی عملکرد روش CONWEP در نرم افزار 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 میلی متر و ضخامت ۳/۱۸ میلی متر در حالی که لبه های کناری عمودی کاملاً گیردار هستند، در نظر گرفته شده است.



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

الف) و پاسخ این صفحه فولادی در مقابل بار انفجاری با استفاده از کـد نویسی بر اساس معادلات کینگـری- بولمـاش بررسـی گردیـده اسـت.

مجله علمی ــ پژوهشی «مواد پرانرژی»؛ سال یازدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵

نویسی بر اساس معادلات گینگری- بولماش بررسی کردیده است. مشخصات در نظر گرفته شده برای فولاد P = 299 GPa و مشخصات در نظر گرفته شده برای فولاد و 299 GPa و مستند. همچنین به منظور تأثیر دادن نرخ کرنش بر تنش خواص پلاستیکی فولاد با استفاده از مدل سخت شوندگی جانسون-کوک به صورت A = 319 MPa و $S = 3.27 \times 10^{-3}$ و S = 0.135 ماست. صفحه و اندی بررسی شده است. صفحه و و لادی بر اشخصات ذکر شده در نرمافزار کرفت شده از مدل MPa مدل سازی شده و با استفاده از مدل MPa و S = 0.32 مرافزار کرفت و S = 0.23 من مست. من من معادلات محت من معادل من معان و S = 0.23 من معادل مازی من معادل مان و S = 0.23 معاد و $S = 0.23 \times 10^{-3}$ من من معاد و $S = 0.23 \times 10^{-3}$ معاد و $S = 0.23 \times 10^{-3}$ معاد و S = 0.135 من معاد و S = 0.135 من معاد و S = 0.135 من معاد و S = 0.135 معاد S = 0.135 معاد و S = 0.135 معاد و S = 0.135 معاد S = 0.135 معاد

۵-۱-۵ 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. همان طور که مشاهده می شود 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 میلی ثانیه به میزان پیک فشاری می رسد که در مقاله Guzas و همکاران، این زمان ۱/۰۷۲ میلی ثانیه محاسبه شده است .



شکل ۴ – الف) مدل صفحه فولادی و محل قرارگیری بـار انفجـاری[۲۱]، ب) صفحه فولادی مدل شده در نرمافزار ABAQUS.

۵-۲- مقایسه جابجایی مرکز صفحه فولادی

شکل (۵- ب) نشاندهنده نتایج حاصلشده برای جابهجایی گره مرکزی صفحه فولادی در مدت زمان ۲۰۰ میلی ثانیه برای مدل مقاله Guzas و نرمافزار ABAQUS است. همان طور که مشاهده می شود در پیکهای اولیه نتایج به دست آمده از نرمافزار ABAQUS با نتایج مقاله Guzas و همکاران مطابقت خوبی دارد اما مشاهده می شود بعد از مدت کمی که صفحه فولادی شروع به تغییر شکلهای پلاستیک می کند ۲۲

نتایج برای جابهجایی ها 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 ازجمله نسبت ارتفاع به شعاع مختلف، ميزان مختلف سیال داخل مخزن مورد بررسی قرارگرفته است. لازم به ذکر است که در این یژوهش دو نوع بررسی به منظور درک یاسخ سازه، صورت پذیرفته است. در دستهای از بررسیها به پارامترهای مؤثر در پایداری سازه مانند لنگر واژگونی، برش پایه و جابه جایی نسبی رأس مخزن پرداخته شده است و در دستهای دیگر پاسخ دینامیکی بدنـه مخـزن در مقابل بار انفجاری ازجمله تغییرات تنش حلقوی'، تـنش برشـی، تـنش فون مایزز و کرنش یلاستیک 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 نقط ه انفجار قرار دارد و از نقط 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 مسير ثبت مى شوند. بنابراين محور افقى نمودارها نشان دهنده تنش و یا کرنش به وجود آمده در جداره مخزن و محور قائم نشان دهنده 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 فاصله۵ متری از سطح مخزن در جهت محور x ها (نقطه a در شکل ۶– ب) مورد بررسی قرارگرفته 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 قرارگرفتهاند که نتایج آنها در ادامه ارائه شده است.

بررسی مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۲ (H/R=۲): شکل (۷– الف) نشاندهنده تاریخچه زمانی جابه جایی رأس مخزن (نقطه B درش کل ۶– الف) در سه حالت خالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۲، تحت بار انفجاری است. همان طور که مشاهده میشود جابجایی مخزن خالی بیشتر از مخزن نیمه پر و پر است. همچنین جابجایی مخزن نیمه پر بیش تر از مخزن کاملاً پر است. با توجه به شکل (۷– الف) درصد کاهش جابه جایی بیشینه رأس مخزن در حالت پر نسبت به حالت نیمه پر و خالی به ترتیب برابر با ۱۲٪ و

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 می شود که مخزن خالی بیش ترین برش پایه را تجربه می کند. در بین مخزن نیمه پر و پر هم برش به وجود آمده در مخزن نیمه پر بیش تر است و مخزن پر برش پایه را تجربه می کند. در بین مخزن نیمه پر و پر مرش پایه کمتری را تجربه می کند. شکل (۷- ج) مخزن پر بررش پایه کمتری را تجربه می کند. شکل (۷- ج) نشان دهنده تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت بالی، نیمه پر و پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۲، تحت بار انفجاری است. و مخزن در سه می کند. شکل (۷- ج) مخزن پر برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۲، تحت بار انفجاری است. با توجه به شکل مشاهده می شود که مخزن خالی واژگونی به وجود آمده در میزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی به وجود آمده در میزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی به وجود آمده در میزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی به وجود آمده در میزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی به وجود آمده در میزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی به وجود آمده در میزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی کمتری را تحمل می کند.



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

¹⁻ Hoop Stress



شکل ۶– الف) مسیر AB در روی جداره مخزن ب) مکان قرارگیـری مـادهٔ انفجاری.

بررسی مغزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ (۳=H/R): 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. همان طور 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. همان طور که مشاهده می شود 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 می کند. 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 می شود که مخزن خالی بیشترین لنگر را تجربه می کند. در بین مخزن نیمه پر و پر هم لنگر واژگونی کمتری را آمده در مخزن نیمه پر بیشتر است و مخزن پر لنگر واژگونی کمتری را تحمل می کند.

بررسی مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۴ (۴=H/R): 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. همان طوری که مشاهده می شود جابجایی مخزن خالی بیشتر از مخزن نیمه پر و پر است. جابجایی مخزن کاملاً پر و مخزن

مجله علمی ــ پژوهشی «مواد پرانرژی»؛ سال یازدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵

نیمه پر صرفنظر از جهت جابجایی، در طول زمان تقریباً دریک محدوده است اما جابجایی حداکثر مخزن نیمه پر بیشتر از مخزن کاملاً پر است. در شکل (۹- الف) قابل توجه است که جابهجاییهای مخزن خالی و نیمه پر بیشتر در قسمت منفی نمودار اتفاق می افتد 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 جابه جایی بیشینه رأس مخزن در حالت پر نسبت به حالت نیمه پر و خالی به ترتیب برابر با ۳۴٪ و ۷۳٪ است. شکل (۹- ب) نشان دهنده 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 می شود برش پایه مخزن خالی بیشتر از مخزن نیمه پر و پر است.

با توجه بـه شـكل (۹- ب) مشـاهده مـىكنـيم كـه در حالـت H/R=4 تغييرات برش پايه براى حالت نيمه پر و پر غيرقابل پيش.بينى است بـه طورى كه در زمانهاى ابتدايى برش پايه تجربهشده در حالت نيمـه پـر بيش تر از حالت پر است و در زمـانهـاى انتهـايى تحليـل، عكـس ايـن موضوع اتفاق مىافتد، اما در حالت كلى بين مخزن نيمه پر و پر، مخزن نيمه پر حداكثر برش پايه بيش ترى را تجربـه مـىكنـد. شـكل (۹- ج) نشاندهنده تاريخچه زمانى لنگر واژگـونى سـازه مخـزن در سـه حالت خالى، نيمه پر و پر براى مخزن با نسبت ارتفاع بـه شـعاع ۴، تحـت بـار انفجارى است. با توجه به شـكل مشـاهده مـىشـود كـه مخـزن خـالى بيش ترين لنگر را تجربه مىكند.

با توجه به شکل (۹- ج) مشاهده می کنیم 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 بیش تر از حالت پر است و در مواردی لنگر به وجود آمده در حالت پر بیش تر از مخزن خالی است، اما مواردی لنگر به وجود آمده در حالت پر بیش تر از مخزن خالی است، اما در حالت کلی به ترتیب مخزن خالی، مخزن نیمه پر و مخزن پر در مقایسه با یکدیگر حداکثر جابجایی بیش تری را تجربه می کنند، این پدیده می تواند به دلیل اندر کنش غیر خطی 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 پیش بینی رفتار سازه را در این حالت مشکل می سازد.

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 مسیرA-B

برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۳ در سه حالت خالی، نیمه پر و پر تحت بار انفجاری دریک زمان معین است. همان طوری که مشاهده میشود کرنش پلاستیک به وجود آمده در برای مخزن خالی بسیار بیش تر از دو حالت دیگراست. 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 میشود که کرنشهای پلاستیک ایجاد شده در جداره مخزن در ابتدا و انتهای قسمت استوانهای مخزن است، همچنین در حالت مخزن نیمه پر در میانه مسیر B-A یعنی در مجاورت مرز سطح آب مخزن و قسمت خالی مخزن شاهد به وجود آمدن کرنش پلاستیک (هرچند به میزان بسیار کم) هستیم.

در (شکل (۱۰ – ب) نمونه ای از کانتوره ای 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 گرههای بالایی بخش استوانه ای مشاهده می شود و در بخش تحتانی به دلیل وجود آب کرنش اندکی ایجاد می شود.

شکل (۱۱- الف) نشاندهنده 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 دریک زمان معین است.همان طوری که مشاهده میشود 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 افزایشیافته است. شکل (۱۱- ب) نشان دهنده تنش برشی به وجود آمده در امتداد مسیر B-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 بار گذاری، 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-م م و یا مشاهده است.

شکل (۱۲ - الف) نیز نشان دهنده تـنش فـون مـایزز بـه وجـود آمـده در امتداد مسیر A-B برای مخزن با نسبت ارتفاع بـه شـعاع ۳ در سـه حالت

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

با توجه به شکل (۱۲ – الف) مشاهده می شود تنش های تجرب ه شده در هر سه حالت در گرههای 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 مایزز 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 درکل زمان تحلیل ارائه شده است.

۲-۱- بررسی تأثیر نسبت ارتفاع به شعاع مخـزن بـر پایـداری سازه در حالت مخزن پر

شکل (۱۳– الف) نشاندهنده تاریخچه زمانی جابهجایی رأس مخزن در سه حالت H/R=3، H/R=2 و 4 در حالت کاملاً پر تحت بار انفجاری است. همان طور که مشاهده می شود جابجایی مخزن با H/R=4 بیشتر از مخزن با H/R=3 و H/R=3 است، همچنین جابهجایی 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) نشاندهنده تاریخچه زمانی برش پایه مخزن در سه حالت H/R=3 ،H/R=2 و در حالت کاملاً پر تحت بار انفجاری است. برش پایه سازه در نسبتهای مختلف ارتفاع به شعاع مخزن دارای تغییرات نامنظم و غیرقابل پیشبینی است، اما مشاهده می شود که مخزن با نسبت H/R=3 در ابتدای بارگذاری برش پایه بیشتری را تجربه می کند.

شکل (۱۳-ج) نشاندهنده تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت H/R=3، H/R=2 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 ER/H لنگر واژگونی بیشتری را تجربه میکند.



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

γγ



شکل ۹- مقایسه پاسخهای سازه در برابر بار انفجاری برای سه حالت میزان آب داخل مخزن در حالت (H/R=4)؛ الف) مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی رأس مخزن ب)مقایسه تاریخچه زمانی نیروی برش پایه به وجود آمده در پای سازه ج) مقایسه تاریخچه 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 تنش های فون مایزز به وجود آمده در جداره مخزن در سه حالت خالی،نیمه پر و پر. ب) کانتورهای تنش فون مایزز (A): مخزن خالی، (B): مخزن نیمه پر، (C): مخزن پر.

	میزان آب داخل مخزن		
	کاملاً پر	نيمه پر	خالى
بیشینه تنش حلقوی (MPa)	۲ • ۵/۸	۲۳۴	۳۷۸/۹
بیشینه تنش برشی (MPa)	٩٩/•٣	118/1	189
بیشینه تنش فون مایزز (MPa)	८४८/८	٣٢٧/٣	847/9

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

٧٩



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

۲-۲- بررسی تأثیر نسبت ارتفاع به شعاع مخـزن بـر پایـداری سازه در حالت نیمه پر

شکل (۱۴– الف) نشاندهنده تاریخچه زمانی جابهجایی رأس مخزن در سه حالت H/R=2 ا+R = 4 و در حالت نیمه پر تحت بار انفجاری است. همان طور که مشاهده می شود جابجایی مخزن با H/R=4 بیشتر از مخزن با R=3 و 2=H/R است، همچنین جابهجایی در مخزن با H/R=3 بیش تر از مخزن با 2=H/R است. با توجه به شکل(۱۴– الف) و روند تغییرات نمودارها مشاهده می شود که مخزن با 2=H/R زودتر از دو مخزن دیگر حالت حرکت نوسانی خود را از دست می دهد به طوری که در طول یک ثانیه جابهجایی مخزن با 2=H/R تقریباً صفر می شود ولی مخزن با H/R=4 همچنان دارای نوسان است. در شکل(۱۴– الف) جالب توجه است که جابهجایی های مخزن با نسبت 4=H/R 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. شکل (۱۴– ب) نشاندهنده تاریخچه زمانی برش پایه مخزن در سه حالت 2=H/R و 4=H/R و 4=H/R در حالت نیمه پر تحت بار انفجاری است. برش پایه سازه در نسبتهای مختلف ارتفاع به شعاع مخزن دارای تغییرات نامنظم و غیرقابل پیش بینی است، اما مشاهده می شود که مخزن با 3=H/R در ابتدای بارگذاری برش زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت 2=H/R دو ابتدای بارگذاری برش زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت 2=H/R دو ابتدای بارگذاری برش زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت 2=H/R دو ابتدای بارگذاری برش زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت 2=H/R دو ابتدای بارگذاری برش زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت 2=H/R دو ابتدای بارگذاری برش زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت 2=H/R دو ابتدای بارگذاری برش زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت 2=H/R دو ابتدای بارگذاری برش زمانی لنگر واژگونی سازه مخزن در سه حالت 2=H/R دو ابتدای بارگذاری برش 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 پیش بینی است، اما مشاهده می شود که مخزن با 3=H/R لنگر واژگونی بیش تری را تجربه می کند.



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

۸- نتیجهگیری

در این پژوهش رفتار و پاسخ دینامیکی مخزن فولادی هوایی سیال تحت بار انفجاری معین مورد مطالعه قرارگرفته 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 می یابد، جابه جایی رأس مخزن، برش پایه سازه و لنگر واژگونی کاهش می یاب به گونه ای که مخزن خالی جابه جایی، برش پایه و لنگر واژگونی بیش تری را تحت بار انفجاری به میزان معین در مقایسه با مخزن نیمه پر و پر تحمل می کند. مخزن نیمه پر نیز در مقایسه با مخزن پر جابه جایی، برش پایه و لنگر واژگونی بیشتری نشان می دهد.

- کرنش پلاستیک ایجاد شده در مخزن خالی بسیار بیش تر از مخزن نیمه پر و کاملاً پر است. هرچه سیال داخل مخزن بیش تر می شود 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 نمی کند. به عبارتی وجود سیال داخل مخزن از وقوع کرنش و گسیختگی جداره مخزن جلوگیری می کند. محل ایجاد کرنش ها نیز بخش تحتانی و فوقانی قسمت استوانه ای مخزن در مجاورت سطح آزاد سیال در تماس با جداره است.

– مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع بیشتر جابه جایی های بیشتری در مقایسه با مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع کمتر جابه جایی بیش تری دارند، اما برش پایه و لنگر واژگونی با افزایش نسبت ارتفاع به شعاع تغییرات قابل پیشبینی و قابل توجهی ندارند.

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.

- 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.