

تحلیل آسیب پذیری مخازن بتنی ذخیره سیال تحت اثر انفجار هوایی

محمد کریمی^{۱*}، عبدالرضا سروقد مقدم^۲، مسعود ضیایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۲- استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت: ۹۳/۰۲/۰۹، پذیرش: ۹۴/۰۷/۲۹)

چکیده

با توجه به نقش حیاتی مخازن و موقعیت جغرافیایی و استراتژیک کشور که همواره در معرض خطر حملات هوایی و تروریستی است، احداث مخازن با در نظر گرفتن اقدامات و ملاحظات پدافند غیرعامل، ضرورت پیدا می کند. از آنجایی که در زمینه آسیب پذیری مخازن در برابر بارهای ناشی از انفجار، پژوهش های چندانی صورت نگرفته است، اهمیت بررسی این نوع سازه ها در برابر بارهای انفجاری افزایش می یابد. در پژوهش حاضر مخزن بتنی استوانه ای روباز، تحت انفجار هوایی ماده منفجره مکعبی شکل، به وزن ۳۵۲/۰۸ کیلوگرم TNT مدل شده است. مخزن در چهار حالت خالی، $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}$ ارتفاع بدنه مخزن، حاوی سیال آب مدل شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که، آسیب های فشاری و کششی در مخزن خالی نسبت به حالت های دیگر بحرانی تر بوده و رفتار مخازن بتنی روباز در برابر بارهای انفجاری، متفاوت از رفتار آن ها در برابر بارهای لرزه ای ناشی از زلزله می باشد. همچنین، نشان داده شد که روش Conwep فقط اثرات رو به انفجار را لحاظ کرده و نسبت به نتایج حاصل از AUTODYN حداقل ۲۵ درصد کاهش را در آسیب فشاری نشان می داد. از نتایج حاصل از این تحقیق می توان در مقاوم سازی و نیز طراحی ایمن مخازن ذخیره سیال برای مقاومت در برابر بارگذاری انفجاری استفاده نمود.

کلید واژه ها: مخزن بتنی استوانه ای، انفجار، آسیب فشاری و کششی، شبیه سازی اجزای محدود، هیدروکد AUTODYN

Vulnerability Analysis Concrete Tanks Liquid Storage under Air Blast

M. Karami*, A. R. Sarvghadmoghadam, M. Ziaei

Malake-Ashter University of Technology

(Received: 29/04/2014, Accepted: 21/10/2015)

Abstract

According to the strategic geographic position of IRAN with the probability of terrorist threats and air strikes, and also the important crucial role of the tanks, their construction by taking passive defense measures and considerations is necessary. Because of few researches on the vulnerability of tanks against the loads due to explosion, investigate the importance of this type of structures against blast loads is increasing. In present study a hypaethral cylindrical concrete tank, exposed to air blasting by one cubic explosive TNT with weight of 352.08 kg has been modeled. The tank is modeled in four situations such as: empty state, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ of body height full of liquid. The results of simulation showed that damages of compressive and tensile in the empty tank are more critical than other modes, and the manner of hypaethral concrete tanks against explosive loads is different from their manner against seismic loads caused by the earthquake. It was also shown that the conwep method has considerate only the effects of the explosion and at least 25% reduction achieved in compressive damage compared with the results of the AUTODYN. The results of this study can be used in retrofitting and safe design of fluids storage tanks to resistance against the blast loads.

Keywords: Independent Sequence Method, Information Rate, Secret Sharing Schemes and Minimal Access Structure.

۱. مقدمه

سطحی با مقادیر متفاوت خرج انفجاری در فاصله ۱۰۰ متری از پوسته محفظه هسته‌ای انجام شد. دهقانی و عسگرپور [۱۱] در زمینه بررسی اندرکنش خاک-سازه-سیال در مخازن بتن مسلح رو زمینی تحت بار انفجار سطحی مطالعاتی را انجام دادند. در این تحقیق مشخص شد که در زلزله و انفجار، میزان خرابی سازه، بدون اندرکنش خاک-سازه بیش‌تر از حالتی است که مخزن بر روی خاک انعطاف‌پذیر قرار دارد و این اثر در خاک نرم بیش‌تر از خاک سخت است. اما در حالتی که اندرکنش خاک-سازه در نظر گرفته شود میزان خرابی مخزن تحت بار انفجار در خاک سخت، بیش‌تر از خاک نرم است و تحت بار زلزله بر عکس این حالت می‌باشد. سروقد مقدم و چمن [۱۲] در زمینه مقاوم‌سازی مخازن نفتی فولادی در برابر بارهای ناشی از انفجار و نیروی و روستایی [۱۳] در زمینه مطالعه رفتار و عملکرد مخزن فولادی مواد سوختی روزمینی تحت بارهای انفجاری، نیز مطالعاتی را انجام دادند.

در مدل‌سازی مخازن، علاوه بر سازه مخزن، مایع حاوی آن نیز جرم عمده‌ای داشته که در بارگذاری‌ها نقش خواهد داشت. بنابراین مدل‌سازی سیال درون مخزن و بررسی اثر اندرکنش سیال و سازه نیز ضرورت خواهد داشت. از طرفی باید به روش‌های موجود در نرم‌افزارها برای در نظرگیری اثرات انفجار در فواصل متوسط و دور توجه داشت و در صورت امکان از روش‌های مدل‌سازی خود ماده منفجره استفاده کرد.

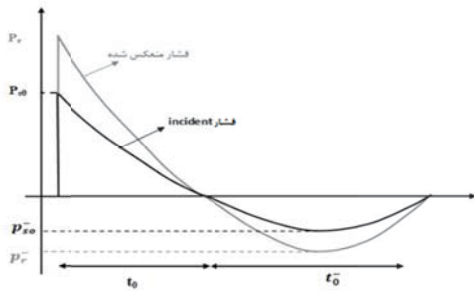
از آنجایی‌که، با مطالب عنوان‌شده و مطالعه پژوهش‌های صورت‌گرفته، در زمینه بررسی اثر انفجار بر روی مخازن به ویژه مخازن بتنی و بررسی آسیب‌پذیری مخازن بتنی زمینی در برابر موج انفجار می‌باشد، تا بتواند علاوه بر رفتارسنجی، بستری مناسب برای رشد و توسعه مقاوم‌سازی مخازن بتنی در برابر موج انفجار محسوب گردد. همچنین از نتایج این تحقیق می‌توان در ارائه یک طرح بهینه در طراحی و اجرای مخازن بتنی زمینی در برابر موج انفجار استفاده نمود. بر همین اساس، نوع انفجاری که جهت اعمال به سیستم مخزن در نظر گرفته می‌شود، انفجار هوایی است که به صورت TNT معادل در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌سازی مخزن بتنی نیز از شکل استوانه‌ای مخزن استفاده شده است.

۲. تعیین پارامترهای موج حاصل از انفجار در هوا

بارگذاری انفجاری یکی از مهم‌ترین انواع بارگذاری دینامیکی بر روی سازه‌هاست. این بارگذاری به دلیل ماهیت بسیار سریع و گذرا، بر روی سازه تأثیراتی می‌گذارد که در سایر انواع بارگذاری دینامیکی مشاهده نمی‌شود. در انفجار هوایی، محل وقوع انفجار

با توجه به موقعیت جغرافیایی و لوژیستیکی ایران، مراکز حساس و استراتژیک کشور از قبیل مخازن ذخیره‌سازی آب، نفت، گاز و فرآورده‌های نفتی که همواره در معرض خطر حملات هوایی و تروریستی است، می‌تواند منجر به بروز حوادث و بحران‌های عظیم امنیتی و زیست محیطی شود. بنابراین، احداث مخازن به‌منظور ذخیره‌سازی انواع سیالات با در نظر گرفتن اقدامات و ملاحظات پدافند غیرعامل، ضرورت پیدا می‌کند. در ادامه به صورت مختصر، به پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه بررسی اندرکنش مخزن و سیال اشاره می‌شود.

اولین گزارش‌ها بر روی مشاهدات تحلیلی و تجربی مخازن صلب مستطیلی توسط هوسکینس و ژاکوبسن تحت تحریک زلزله افقی شبیه‌سازی شد [۱]. پس از آن، مدل سیال در یک ظرف مستطیل‌شکل که مشابه مدل جرم و فنر بود، توسط گراهام و رودریگز [۲] مورد استفاده قرار گرفت. یاکوبسن [۳] جزء اولین محققانی بود که مطالعاتی را روی رفتار دینامیکی مخازن آب انجام داد. بعد از او هاوونر [۳]، روش تقریبی را برای محاسبه توزیع فشار و ارتفاع امواج سطحی مایع در مخازن استوانه‌ای و مستطیلی تحت اثر نوسان افقی تکیه‌گاه ارائه کرد. هارون این مطالعات را برای مخازن انعطاف‌پذیر گسترش داد [۴]. کاربرد گسترده از روش هانسر، به صورت یک مفهوم عملی توسط اپستین داده شد [۵]. استفاده از یک روش عددی کارآمد برای تجزیه و تحلیل اثرات محیطی (حرارتی، انقباض و تورم) در مخازن جدارنازک استوانه‌ای بتنی، برای نگهداری مایعات تحت شرایط تقارن محوری، توسط ادامند اس. ملرسکی بررسی شد [۶]. چن و کیانوش [۷] با انجام یک مطالعه پارامتری بیان کردند که انعطاف‌پذیری دیواره مخزن در هنگام محاسبه فشار هیدرودینامیکی، باید در نظر گرفته شود. لیواگلو [۸] رفتار دینامیکی یک مخزن مستطیل شکل را با توجه به اندرکنش سیال-سازه و خاک-پی، با استفاده از تغییر شرایط خاک-پی بررسی کرد و به این نتیجه رسید که جابجایی‌ها و نیروهای برشی پایه مخزن توسط سختی خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرند. کیانوش و مسلمی [۹]، رفتار دینامیکی مخازن آب استوانه‌ای باز بالای سطح زمین را بررسی کردند. تمرکز اصلی این مطالعه، شناسایی پارامترهای اصلی موثر بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها و مقابله با اندرکنش بین این پارامترها است. آنان به این نتیجه رسیدند که در حال حاضر، روش‌های طراحی در برآورد فشار هیدرودینامیک، بیش از حد محافظه کارانه است. پاندی و همکاران [۱۰]، اثر یک انفجار خارجی بر پوسته بیرونی سازه بتن مسلح محفظه هسته‌ای را بررسی کردند. در این مقاله، مطالعه پارامتری و نیز بررسی فاصله بحرانی برای انفجارهای



شکل ۲. نمودار فشار- زمان موج انفجار رویداد و منعکس شده [۱۴]

۳. الگوی رفتاری و گسیختگی بتن

بتن از جمله موادی است که سطح گسیختگی حاکم بر آن‌ها وابسته به فشار هیدرواستاتیک می‌باشد. بسته به دقت مورد نیاز می‌توان از معیارهای تسلیم متفاوتی استفاده نمود. یکی از این معیارها، معیار تسلیم دراکر- پراگر است که وابسته به فشار هیدرواستاتیکی در مدل‌سازی بتن می‌باشد.

جهت پیش‌بینی رفتار غیرخطی بتن و لحاظ نمودن آثار کاهش مقاومت بتن ناشی از خرابی، از مدل بتن آسیب‌دیده پلاستیک استفاده می‌شود. که در آن رفتار فشاری و کششی بتن و همچنین دو پارامتر خسارت فشاری و خسارت کششی در نظر گرفته می‌شود. این مدل از مفهوم آسیب دیدگی همسانگرد در محدوده خطی و با ترکیب کشش ایزوتروپ و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده می‌کند. در مدل مذکور فرض می‌گردد که پاسخ به کشش و فشار تک‌محوره به‌وسیله معیار خرابی پلاستیک کنترل می‌شود که در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده است. در اثر کشش تک‌محوره، منحنی تنش- کرنش تا نقطه تنش خرابی σ_{t0} به‌صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه می‌باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی به‌صورت ترک‌های قابل مشاهده در می‌آیند که به‌صورت منحنی نرم‌شدگی در فضای تنش- کرنش نمایش داده می‌شوند. σ_{c0}

با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری و باربرداری، سختی و مقاومت بتن دچار تنزل می‌گردد. منحنی تنش- کرنش بتن تحت بار یکنوا را می‌توان تقریباً قابل قبولی به‌عنوان پوش بارگذاری چرخه‌ای در نظر گرفت. اثر تنزل سختی نیز با پارامتری به‌عنوان پارامتر خسارت فشاری d_c معرفی می‌شود. بدین ترتیب با تعریف پارامتر خسارت برحسب تنش فشاری، طبق رابطه (۷) در سیکل n ام، سختی کاهش یافته مربوط به همان سیکل از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$d_c = 1 - \left(\frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{cn}} \right) \quad (7)$$

$$E_n = (1 - d_c)E \quad (8)$$

در ارتفاعی از زمین و فاصله افقی از سازه است که موج شوک قبل از برخورد به سازه به زمین برخورد نموده منعکس و تقویت می‌شود. تا یک فاصله افقی از ماده منفجره انعکاس منظم و پس از آن انعکاس ماخ رخ می‌دهد و جبهه ماخ تشکیل می‌شود. جهت محاسبه فاصله مقیاس‌شده حاصل از موج انفجار از رابطه (۱) استفاده می‌شود که در آن:

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

R و W به ترتیب، فاصله نقطه مورد نظر تا مرکز ماده منفجره برحسب متر و وزن TNT معادل ماده منفجره برحسب کیلوگرم می‌باشد.

جهت محاسبه بیش فشار، روابط تجربی و تحلیلی مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به رابطه برد [۹]:

اگر $ps > 10bar$ در نتیجه: (محدوده نزدیک)

$$p_s(bar) = \frac{6.7}{z^3} + 1 \quad (2)$$

اگر $0.1 < ps < 10bar$ میدان متوسط تا دور:

$$p_s(bar) = \frac{0.975}{z} + \frac{1.455}{z^2} + \frac{5.85}{z^3} - 0.019 \quad (3)$$

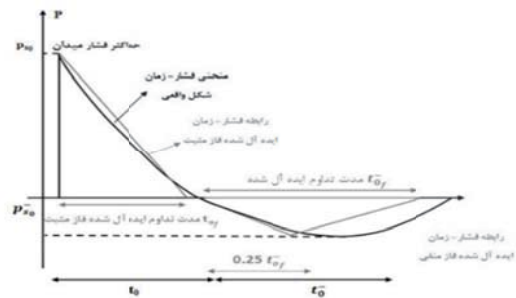
و روابط هنریش برای فشار حداکثر استاتیکی (حاصل از روابط تحلیلی) [۱۴] اشاره کرد:

$$p_s(bar) = \frac{14.072}{z} + \frac{5.540}{z^2} - \frac{0.357}{z^3} + \frac{0.00625}{z^4} \quad 0.05 \leq Z < 0.3 \quad (4)$$

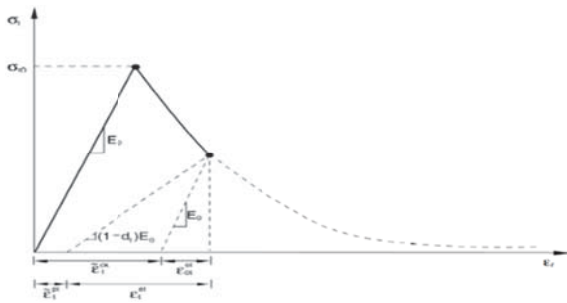
$$p_s(bar) = \frac{6.194}{z} - \frac{0.326}{z^2} + \frac{2.132}{z^3} \quad 0.3 \leq Z < 1 \quad (5)$$

$$p_s(bar) = \frac{0.662}{z} + \frac{4.05}{z^2} + \frac{3.288}{z^3} \quad 1 \leq Z < 10 \quad (6)$$

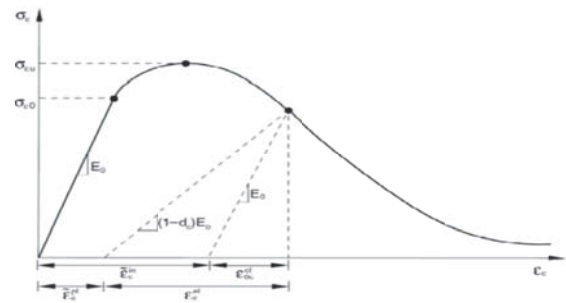
برای فشار حاصل از انفجار قبل از برخورد به سازه یا زمین (فشار در میدان آزاد) و فشار منعکس شده، در هر فاصله از محل انفجار، می‌توان یک نمودار فشار- زمان مطابق شکل (۱) و (۲) ترسیم کرد.



شکل ۱. نمودار ایده‌آل شده تاریخچه فشار- زمان موج انفجار [۱۴]



شکل ۴. پاسخ بتن تحت بارگذاری کششی محوری [۱۵]



شکل ۳. نمودار پاسخ بتن تحت بارگذاری فشاری محوری [۱۵]

۴. بیان مساله و روش مدلسازی

مخزن بتنی با دو نرم افزار تفاضل محدود اتوداین و اجزاء محدود آباکوس و دو روش بارگذاری به روش convwep و روش بارگذاری مدل شده در نرم افزار اتوداین و انتقال نتایج به نرم افزار آباکوس مدل شده است. در این مدل سازی، بتن از نوع مسلح و با رفتار غیرخطی تعریف شده است. ارتفاع بیرونی مخزن مورد مطالعه با احتساب فونداسیون برابر ۴/۹ متر، قطر داخلی مخزن برابر با ۳۰/۵ متر و ضخامت دیواره مخزن ۰/۳ متر می باشد. مقاومت فشاری بتن نیز ۳۰ مگاپاسکال، پوشش بتن در جداره مخزن ۰/۵ متر و در فونداسیون ۰/۷۵ متر می باشد.

در ابتدا به ویژگی های نرم افزار اتوداین پرداخته می شود. اتوداین یک ابزار تحلیل صریح برای مدل سازی رفتار غیرخطی دینامیکی جامدات، سیالات، گازها و عکس العمل بین آن ها می باشد. این نرم افزار برای تجزیه و تحلیل وقایع فیزیکی با نرخ کرنش بالا یا تغییر شکل های بزرگ مورد استفاده قرار می گیرد. از جمله قابلیت های این نرم افزار مطالعه و بررسی اثرات سرعت پرتابه ها، بارگذاری انفجاری در سازه ها می باشد. همچنین اتوداین از یک متد کوپل برای رسیدن به تحلیل بهینه بهره می برد. از این رو، می توان با استفاده از این دیدگاه، محیط های مختلف درگیر در مسئله مانند، سازه ها، سیالات، گازها و غیره را با استفاده از روش های مختلف عددی متناسب با هر دامنه مسئله مدل کرد. این عامل باعث کارآمدی ویژه اتوداین در تحلیل مسائل برهم کنش و تماس می شود. این نرم افزار با استفاده از تمام تکنیک ها و راه حل های مدرن، ابزارهای گرافیکی، تلفیق پردازنده و پس پردازنده در یک پنجره، استفاده از فایل اجرایی جهت شبیه سازی دوبعدی و سه بعدی و ... نتایج مناسبی را ارائه می دهد [۱۶]. مخزن تحت انفجار هوایی ماده منفجره مکعبی شکل به وزن ۳۵۲/۰۸ کیلوگرم TNT مدل شده است. مدل سازی مخزن در چهار حالت خالی، $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{3}$ و $\frac{3}{4}$ ارتفاع بدنه مخزن حاوی سیال مدل شده است. فاصله ماده منفجره از زمین نیز برابر ۳ متر و فاصله آن تا بدنه مخزن برابر با ۲۰ متر می باشد. برای مدل سازی هوا در اتوداین،

مشابه آنچه در بارگذاری چرخه ای فشاری مطرح شد، به منظور اعمال اثر کاهش سختی در کشش نیز از پارامتر خسارت کششی (d_t) استفاده می شود لذا در سیکل n ام، سختی کاهش یافته مربوط به همان سیکل از رابطه (۱۰) محاسبه می گردد.

$$d_t = 1 - \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \right) \quad (9)$$

$$E_n = (1 - d_t)E \quad (10)$$

مدل ماده بتن آسیب دیده پلاستیک که در نرم افزار آباکوس ارائه شده است، جهت تعیین رفتار پلاستیک بتن از جمله سطوح تسلیم و جریان پلاستیک از تابع پتانسیل جریان دراگر-پراگر طبق رابطه (۱۱) استفاده می کند.

$$G = \sqrt{(f_c - m \cdot f_t \cdot \tan \beta)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \beta \quad (11)$$

f_c و f_t مقاومت کششی و فشاری تک محوری و β : زاویه اتساع می باشد که بتن تحت تنش، در نزدیکی نقطه خرابی افزایش حجم می دهد. این افزایش حجم غیرالاستیک که عموماً ناشی از رشد فزاینده ریز ترکها در بتن حاصل می شود به نام اتساع شناخته می شود. در مدل ماده پلاستیسیته-آسیب این اثر در تابع پتانسیل جریان (G) در قالب زاویه اتساع دیده می شود. m : خروج از مرکزیت است که این پارامتر از تابع پتانسیل جریان، بیانگر نرخی است که تابع دارای مجانب می شود. هرچه این مقدار به صفر نزدیک تر شود تابع (G) به خط مستقیم نزدیک تر می شود. بتن تحت تنش فشاری دو محوره نسبت به حالت تک محوره افزایش مقاومت دارد. مدل ماده بتن آسیب دیده پلاستیک با دریافت نسبت تنش تسلیم در حالت دومحوره به تک محوره (f_c^{bo}/f_c) قادر به تعیین سطح تسلیم دو محوره بتن می باشد. به طوری که حداکثر افزایش به ازای ترکیب تنش (σ_1, σ_2) به نحوی که $\sigma_2 = 0.5\sigma_1$ باشد، رخ می دهد که در این حالت مقاومت فشاری دومحوره ۲۵ درصد بیش تر از مقاومت تک محوره خواهد بود. در شکل (۳) $\bar{\epsilon}_t^{ln}$ کرنش خردشدگی و در شکل (۴) $\bar{\epsilon}_t^{ek}$ کرنش ترک خوردگی می باشد.

آن می‌باشد و در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار از مقاومت مورد انتظار مصالح استفاده می‌گردد، ضرایب تبدیل مقاومت اسمی مصالح به مورد انتظار (SIF) برای بتن مسلح در جدول (۴) ارائه شده است. این افزایش مقاومت ربطی به نرخ کرنش بارگذاری مصالح ندارد [۱۷]. با توجه به این که جداره مخزن تحت بار انفجار دارای هم رفتار خمشی و هم رفتار برشی می‌باشد، پس مخزن مورد مطالعه دارای رفتار خمشی - برشی می‌باشد. بتن و فولاد تحت بارگذاری سریع مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. این مصالح به همان سرعتی که بار اعمال می‌گردد، قادر به پاسخگویی نبوده و در نتیجه تنش تسلیم آن‌ها بیشتر و تغییر شکل پلاستیک آن‌ها کم‌تر خواهد بود. برای فولاد، مدول الاستیسیته حالت دینامیک و استاتیک یکسان است ولی در ناحیه سخت‌شدگی کرنشی شیب منحنی تنش-کرنش برای پاسخ دینامیکی و استاتیکی متفاوت خواهند بود [۱۷]. ضریب افزایش دینامیکی برای بتن مسلح در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۴. ضریب افزایش مقاومت [۱۸]

مصلح	ضریب افزایش مقاومت
میلگردهای رده S۴۰۰ و کم‌تر	۱/۱۵
بتن	۱

جدول ۵. ضریب افزایش دینامیکی برای بتن مسلح [۱۸]

ضریب افزایش دینامیکی			تنش
بتن	میلگردها		
f _{dc} /f _c	F _{du} /F _u	F _{dy} /F _y	
۱/۲	۱/۰۵	۱/۲	خمشی
۱/۱	۱	۱/۱	برش مستقیم

F_{dy} مقاومت تسلیم دینامیکی طرح و F_{du} مقاومت نهایی دینامیکی طرح که در طراحی‌های انفجاری به کار می‌روند، با اعمال ضریب افزایش مقاومت و ضریب افزایش دینامیکی به مقاومت تسلیم F_y و مقاومت نهایی F_u به دست می‌آیند.

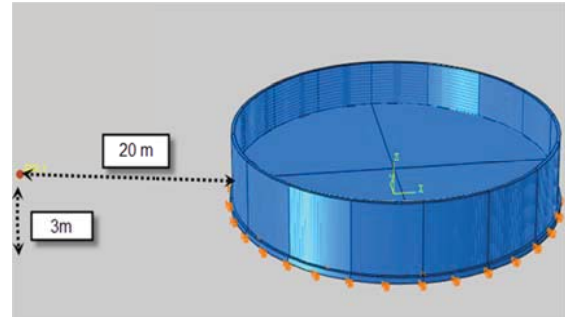
$$F_{dy} = (SIF) * (DIF) * F_y \quad (12)$$

$$F_{du} = (DIF) * F_u \quad (13)$$

$$f_{dc} = (DIF) * f_c \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) نیز f_{dc} مقاومت فشاری مشخصه دینامیکی بتن و f_c مقاومت فشاری مشخصه بتن می‌باشد. مشخصات مصالح با در نظرگیری ضریب افزایش دینامیکی در جدول (۶) و (۷) برای معرفی به نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است. البته

چگالی هوا برابر ۱/۲۲۵ (kg/m³)، گاما برابر ۱/۴ و انرژی هوا برابر e + ۰۰۶ ۲/۰۶ انتخاب شد. فاصله‌ی ماده منفجره از زمین و مخزن در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. فاصله ماده منفجره از زمین و مخزن

مشخصات TNT، مخزن بتنی و میلگردها به ترتیب در جدول (۱) تا (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ماده منفجره TNT (معادله حالت استفاده شده از نوع [jw]۱۶)

e + ۰۳۱/۶۳	چگالی (kg/m ³)
e + ۱۱۳/۷۴	پارامتر A (kPa)
+۰۹ e ۳/۷۵	پارامتر B (kPa)
۴/۱۵	پارامتر R ₁
۰/۹	پارامتر R ₂
۰/۳۵	پارامتر W
e + ۰۶ ۳/۶۸	E _{m0}

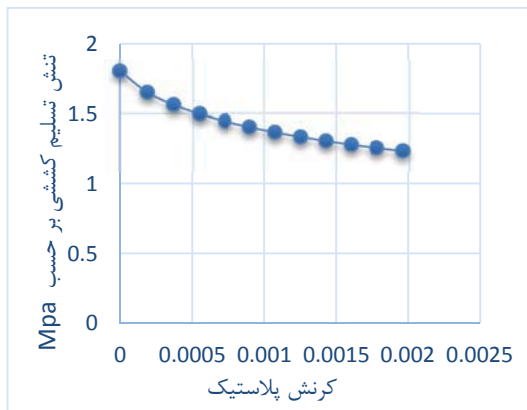
جدول ۲. مشخصات مخزن بتنی

ارتفاع دال (پهنای دال)	ضخامت دال	
(m)	(m)	
۰/۴	۰/۸	پی
۳/۵	۰/۲۵	دال کف
۴/۵	۰/۳	دال بدنه مخزن

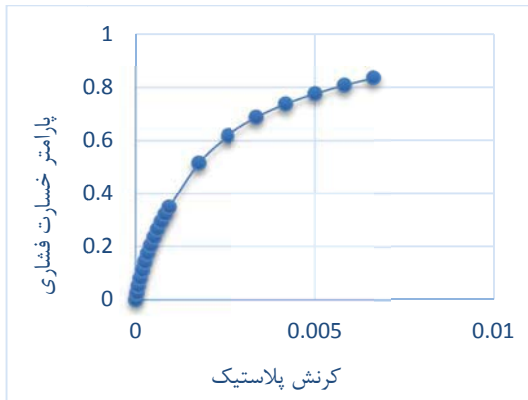
جدول ۳. مشخصات میلگردها

فاصله ی میلگردها (mm)	تعداد میلگردها	اندازه میلگردها (mm)	قطر میلگردها (mm)
۳۰۰	۶۴۰	۴۲۵۰	۱۰
۲۵۰	۳۶	سراسری	۱۶
۳۰۰	۳۲۲	۸۲۵	۱۶
۱۷۵	۴	سراسری	۲۰

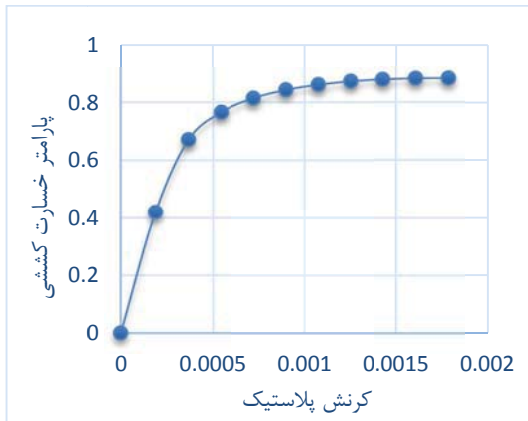
با توجه به این که مقاومت اسمی مصالح که در طراحی معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرد کم‌تر از مقاومت مورد انتظار



شکل ۷. رفتار کششی بتن با در نظر گرفتن ضریب افزایش دینامیکی [۱۹]



شکل ۸. خسارت فشاری بتن [۱۹]



شکل ۹. خسارت کششی بتن [۱۹]

۴-۱. معادله حالت انفجار

جهت انفجار از ماده منفجره TNT استفاده شده است. TNT یکی از مواد اصلی شبیه‌سازی انفجار بوده و در ابتدا براساس معادله حالت فرمول JWL به شرح ذیل می‌باشد:

$$P = A\left(1 - \frac{w\rho}{R_1\rho_0}\right)e^{\left(-R_1\frac{\rho}{\rho_0}\right)} + B\left(1 - \frac{w\rho}{R_2\rho_0}\right)e^{\left(-R_2\frac{\rho}{\rho_0}\right)} + \frac{w\rho^2}{\rho_0}E_{m_0} \quad (15)$$

همان‌طور که اشاره شد، مخزن مورد مطالعه دارای رفتار خمشی - برشی می‌باشد ولی به دلیل تفاوت در ضریب افزایش دینامیکی، در جهت اطمینان از ضریب کم‌تر، یعنی ضریب افزایش دینامیکی تحت رفتار برشی استفاده شده است.

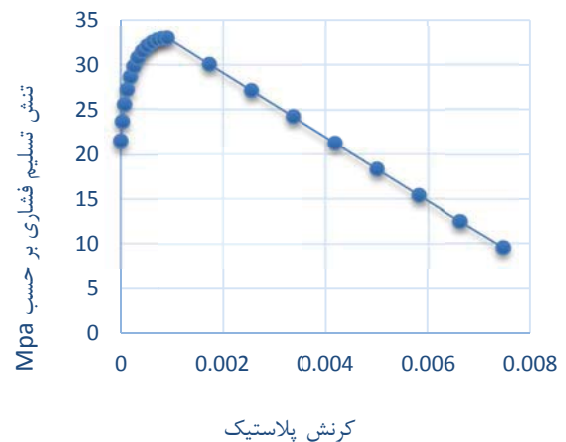
جدول ۶. مدل مقاومتی میلگردهای مخزن [۱۹]

وزن واحد حجم (kg/m ³)	e+۰۳۷/۸۵
مدول الاستیسیته (kg/m ²)	e+۱۰۲/۱
نسبت پواسون	۰/۳
تنش تسلیم (kg/m ²)	e+۰۷۲/۴
تنش نهایی (kg/m ²)	e+۰۷۳/۷
کرنش پلاستیک	۰/۱۸

جدول ۷. مشخصات الاستیک و پلاستیک بتن [۱۹]

زاویه اتساع (درجه)	۱۵
گریز از مرکز	۰/۱
fb0/fc0	۱/۱۶
K	۰/۶۶۶۷
پارامتر ویسکوزیته (N.s/m ²)	۰/۰۱
چگالی (kg/m ³)	e+۰۲۲/۴
مدول یانگ (N/m ²)	e+۱۰۲/۰
ضریب پواسون	۲/۰

رفتار فشاری و کششی بتن با در نظرگیری ضریب افزایش دینامیکی و خسارت فشاری و کششی آن بر حسب کرنش، برای معرفی به نرم‌افزار، در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده است.



شکل ۶. رفتار فشاری بتن با در نظر گرفتن ضریب افزایش دینامیکی [۱۹]

جدول ۸. مشخصات مایع مخزن (معادله حالت استفاده شده از نوع مای-گرانیسن) [۱۹ و ۲۱]

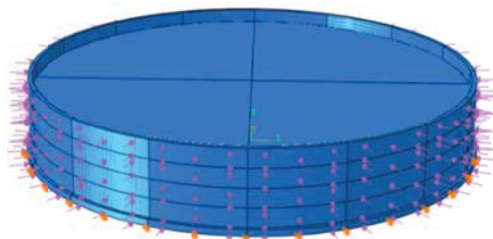
وزن واحد حجم (kg/m ³)	e+۰۳۱/۰
ویسکوزیته (N.s/m ²)	۰/۰۰۱۰۰۳
سرعت صوت در مایع (m/s)	e+۰۳۱/۵۱
شیب سطح مایع	.
گاما	.

مشخصات آب جهت مدل کردن در نرم‌افزار آباکوس، مطابق با جدول (۸) می‌باشد. جهت مدل‌سازی مخزن و سیال آب از حالت لاگرانژی با تعریف جسم جامد استفاده شده است.

۵. اندرکنش‌ها، شرایط تکیه گاهی و المان بندی مخزن

با توجه به آن که مرز فیزیکی نزدیک دو سطح در یک اسمبل برای نشان دادن هر نوع از اندرکنش مابین سطوح کافی نیست، باید اندرکنش‌ها را در سطوح تماس و برخورد تعریف کرد. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین مخزن و مایع با تعیین خواص بر همکنش از نوع contact و در نظرگیری رفتار مماسی، تماس بین دو سطح به صورت بدون اصطکاک در نظر گرفته شد. از طرفی با در نظرگیری رفتار جسم در گیر در راستای عمود بر سطح تماس با تعیین hard-contact، دو جسم در ناحیه تماس اجازه نفوذ در یکدیگر را نخواهند داشت. در نهایت با تعریف اندرکنش surface-to-surface و اختصاص خواص بر همکنش، تماس بین مخزن و سیال تعریف شد.

جهت انجام بارگذاری، نتایج برحسب فشار- زمان از نرم‌افزار اتوداین، به نرم آباکوس انتقال داده شده است. جهت اعمال فشار بر سطح مورد نظر، بدنه مخزن بتنی به ۴ قسمت مساوی تقسیم می‌شود و این تقسیم‌بندی در محیط مخزن با زوایای ۲۲.۵ درجه تکرار می‌شود. در نهایت با انتخاب هر سطح برحسب فشار و زمان، بارها وارد می‌شود. برای مدل کردن شرایط تکیه‌گاهی، با انتخاب کف و پی مخزن، جابجایی مخزن در سه راستای X، Y و Z، صفر قرار داده شده و جابجایی انتقالی مخزن در سه راستای اصلی بسته می‌شود.



شکل ۱۰. نحوه بارگذاری در آباکوس با نتایج حاصل از نرم‌افزار اتوداین برای مش‌بندی از المان‌های شش وجهی Hex استفاده شده و از

که در آن: A، B، R1، R2 مقادیر ثابت که برای انفجارهای معمول با انجام آزمایش محاسبه می‌شود. ρ_0 : چگالی اولیه ماده منفجره، p : چگالی حاصل از فرآیند انفجار E_{m0} : انرژی ویژه اولیه، w : ثابت آدیباتیک.

وقتی که TNT پس از انفجار به ۱۰ برابر شعاع اولیه خود رسید می‌توان از ترم اول و دوم معادله صرف نظر نمود و معادله حالت TNT را به گاز ایده آل تبدیل کرد. برنامه ی اتوداین این حالت را به صورت پیش فرض انجام می‌دهد [۱۶].

۴-۲. معادله حالت هوا

هوا به صورت گاز ایده آل مدل می‌شود. بنابراین، معادله حالت آن با استفاده از قانون گاز ایده آل گاما به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (16)$$

که در آن، P فشار و γ نسبت ضریب گرمای ویژه در حالت فشار ثابت به حجم ثابت تعریف می‌شود و برای گازهای دواتمی مانند هوا برابر با ۱/۴ می‌باشد [۲۰].

۴-۳. معادله حالت سیال

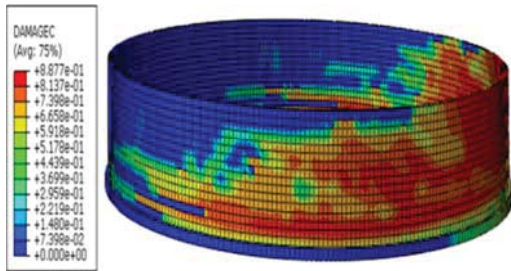
برای بررسی رفتار سیالات و اندرکنش آن با سازه می‌توان از معادله حالت خطی $U_s - U_p$ هوگونویت استفاده نمود. در اصل این معادله از معادله حالت مای-گرانیسن به دست می‌آید که در آن فشار داخل ماده به صورت تابعی از چگالی و انرژی داخلی بر واحد جرم تعریف می‌شود. معادله هوگونویت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (17)$$

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (18)$$

P: فشار، $k = \rho_0 C_0^2$: مدول بالک سیال، C_0 : سرعت انتشار موج در مایع، ρ_0 : دانسیته اولیه سیال، ρ : دانسیته ثانویه، η : کرنش حجمی اسمی، E_m : انرژی داخلی بر واحد جرم ماده، می‌باشند. Γ_0 نیز یک ثابت که به وسیله آزمایش برای هر ماده تعیین می‌شود. S و C_0 دو ضریب هستند که رابطه بین سرعت شوک U_s و سرعت ذره U_p را به صورت خطی $U_s = c_0 + sU_p$ تعریف می‌کنند. لزجت مورد استفاده باید کوچک باشد زیرا آب غیرلزج در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه فشار هیدرواستاتیک مایع و برای سیال تراکم‌ناپذیر، پارامترهای بی‌بعد S و Γ_0 صفر می‌باشند.

همان طور که مشاهده می شود در زوایای کم تر از $۶۷/۵$ درجه بیش ترین آسیب وارده مربوط به زاویه صفر درجه نبوده، بلکه بیش ترین آسیب مربوط به زوایای $۲۲/۵$ تا ۴۵ درجه می باشد. البته شایان ذکر است که در نیمه بالای مخزن بیش ترین آسیب به صورت یکسان در زوایای ۰ تا $۲۲/۵$ درجه نمایان می شود که این مقدار برابر $۸۸/۸$ درصد می باشد.

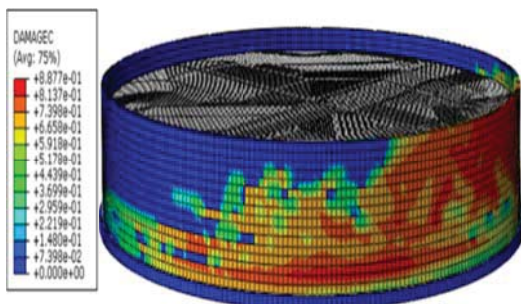


شکل ۱۱. آسیب فشاری ایجاد شده در مخزن خالی در زمان $۰/۰۸$ ثانیه (از نمای کناری)

در حالت مخزن حاوی $\frac{1}{3}$ ارتفاع مخزن سیال آب نیز مانند حالت مخزن خالی بوده و تنها کمی کاهش آسیب در ارتفاع های پایینی و بالایی مخزن، آن هم در نیمه پشتی مخزن مشاهده می شود و تفاوت چندانی نسبت به مخزن خالی مشاهده نمی شود.

در حالت مخزن حاوی $\frac{1}{3}$ ارتفاع مخزن سیال آب نیز همانند حالت مخزن خالی بوده و فقط کمی کاهش در زوایای $۶۷/۵$ درجه به بعد در ارتفاع های بالاتر مخزن مشاهده می شود. آسیب کششی در نیمه پشتی مخزن به جزء زاویه $۱۵۷/۵$ درجه، نسبت به حالت مخزن خالی، کاهش قابل ملاحظه داشته است.

در حالت مخزن حاوی $\frac{3}{4}$ ارتفاع مخزن سیال آب، نمودار ترسیم شده در شکل همانند حالت مخزن خالی می باشد، با این تفاوت که از زاویه ۹۰ درجه به بعد در ارتفاع $۲/۰۸۷۵$ متری و از زاویه ۴۵ درجه به بعد در ارتفاع $۴/۳۳۷۵$ متری آسیب فشاری و کششی به حدود صفر رسیده است.



شکل ۱۲. آسیب فشاری ایجاد شده در مخزن پر در زمان $۰/۰۸$ ثانیه (نمای کناری مخزن)

هیچ المان گوه ای استفاده نشده است. اندازه مش های مخزن بتنی ۳۰ سانتی متر و اندازه مش میلگردها، برابر ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. مایع درون مخزن از المان های لاگرانژیایی تشکیل شده است که این المان ها با اندرکنش مناسب با المان های پوسته مخزن بار ناشی از انفجار را به المان های دیگر انتقال می دهند. در مدل کردن رفتار تلاطم مایع باید توجه شود که انطباق کامل گره های سطح آزاد مایع با گره های المان های پوسته مخزن از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا در این صورت اندرکنش مناسبی بین مایع و جداره مخزن ایجاد می گردد که نرم افزار آباکوس قادر به مدل کردن اندرکنش دینامیکی بین مخزن و مایع می باشد. اندازه المان های مایع نیز برابر ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شد.

۶. بررسی آسیب فشاری و کششی ایجاد شده در جداره مخزن

هدف از این پژوهش، بررسی آسیب پذیری مخازن بتنی زمینی در برابر موج انفجار است. با توجه به آن که روش های موجود در نرم افزار آباکوس برای در نظر گیری اثرات انفجار در فواصل متوسط و دور قابل استفاده نبوده و یا فقط اثرات رو به انفجار را در نظر می گیرد و استفاده از آیین نامه نیز برای سازه های استوانه ای شکل نتایج صحیحی را در بر نخواهد داشت، به نظر می رسد استفاده همزمان از هیدروکد اتودآین و نرم افزار المان محدود آباکوس، نتایج معقولانه تری را ارائه نماید. در این پژوهش در دو بخش به بررسی آسیب پذیری مخزن پرداخته می شود. نمودارها در دو حالت ارتفاعی و زاویه ای ترسیم شده اند.

۶-۱. تحلیل با ماده منفجره به وزن $۳۵۲,۰۸$ کیلوگرم TNT

همان طور که در همه ی نمودارهای شکل (۱۳) و (۱۴) مشاهده می شود در ارتفاع $۴/۳۳۷۵$ متری و از زاویه $۲۲/۵$ درجه به بعد، آسیب همواره کاهش پیدا کرده و این کاهش آسیب در مخزن پر بیش تر است، به طوری که از زاویه $۶۷/۵$ درجه به بعد آسیب مخزن به حدود ۰ رسیده است. از زاویه ۴۵ درجه به بعد تقریباً یک روند کاهش منظمی در مخزن مشاهده می شود، به طوری که هرچه زاویه افزایش پیدا می کند، با افزایش ارتفاع مخزن، آسیب ها کاهش می یابد.

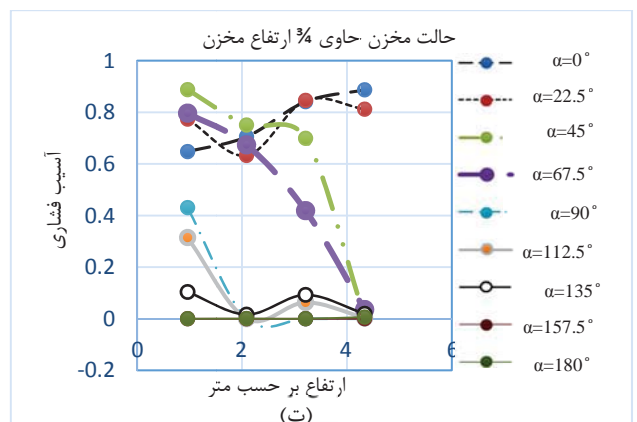
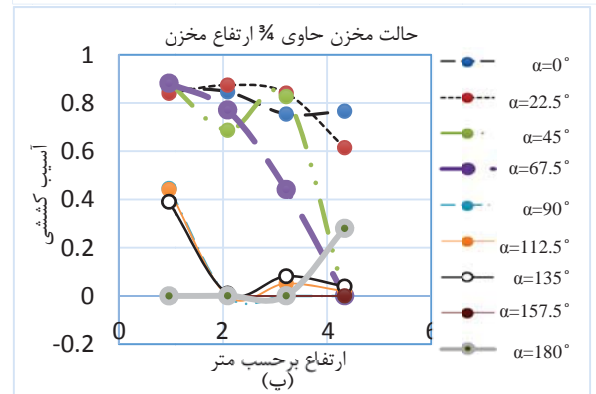
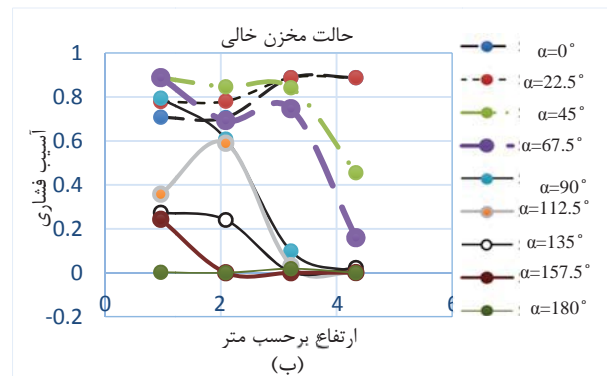
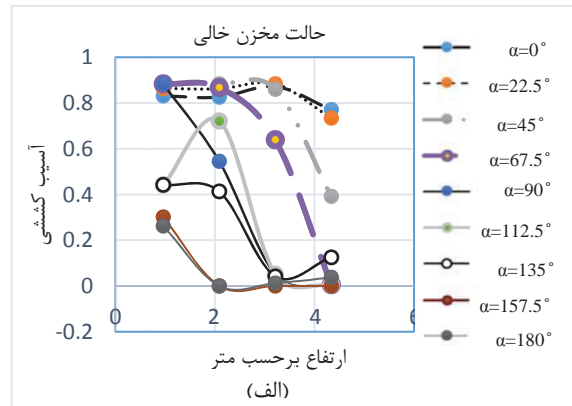
در حالت مخزن خالی، در ارتفاع $۰/۹۶۲۵$ متری، از زاویه ۰ تا زاویه ۹۰ درجه، مخزن در حدود ۷۰ درصد دچار آسیب فشاری و کششی شده است. همچنین از زاویه ۰ تا $۶۷/۵$ درجه، تا ارتفاع $۳/۲۱۲۵$ متری، مخزن بالای ۶۵ درصد، دچار آسیب فشاری و کششی شده است. از زاویه $۱۱۲/۵$ درجه به بعد به جزء ارتفاع $۲/۰۸۷۵$ متری آسیب های فشاری و کششی نهایتاً به حدود ۳۵ درصد محدود می شود.

در شکل (۱۴-ث) یک افزایش در کشش در ارتفاع ۴/۳۳۷۵ متری در زاویه ۱۸۰ درجه مشاهده می‌شود که می‌تواند مربوط به قضیه تلاطم سیال در قسمت رو به انفجار و افزایش ارتفاع آب در جلوی مخزن و کاهش آن در انتهای مخزن باشد.

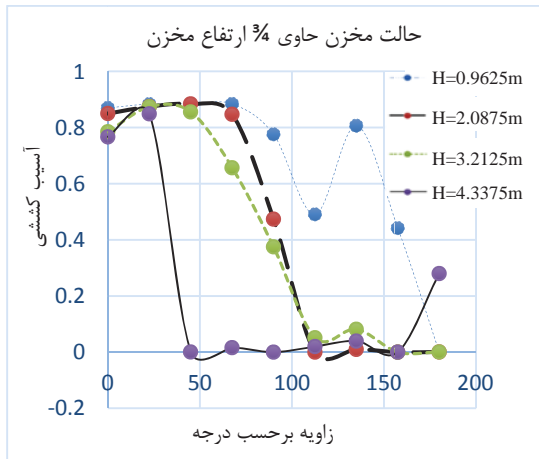
۲-۶. تحلیل با ماده منفجره به وزن ۳۵۲/۱ کیلوگرم TNT به روش conwep

مدل کردن بار انفجار با این روش، باعث می‌شود که میزان انرژی ناشی از انفجار در نقطه مذکور به صورت امواج شعاعی آزاد شده و با دور شدن موج از منبع انفجار شعاع امواج افزایش پیدا می‌کند و در عوض میزان انرژی ناشی از انفجار نیز کاهش پیدا می‌کند. این روش فشار معادل را در نظر گرفته و فقط سطح رو به انفجار را در نظر می‌گیرد و اثرات انفجار را برای پشت مخزن لحاظ نمی‌کند.

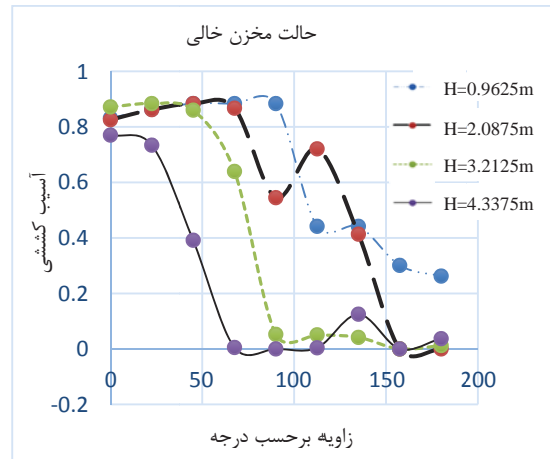
در حالت مخزن خالی همان‌طور که در شکل (۱۵-الف و ب) مشاهده می‌شود بیش‌ترین آسیب فشاری در ارتفاع ۴/۶ متری و در زاویه صفر درجه اتفاق می‌افتد و از زاویه ۶۷/۵ درجه آسیب فشاری در مخزن به حدود صفر می‌رسد. نکته قابل توجه این‌که بیش‌ترین آسیب‌ها بین زاویه ۰ تا ۴۵ درجه رخ داده و از زاویه ۴۵ درجه به بعد آسیب‌های ایجاد شده به شدت افت کرده و به حدود صفر رسیده است. ولی این در صورتی است که در تحلیل نتایج حاصل از اتوداین، مخزن تا زاویه ۹۰ درجه و به ویژه در ارتفاع‌های پایین مخزن به شدت آسیب دیده است. از طرفی بیش‌ترین آسیب فشاری ثبت شده برابر ۶۶/۲ درصد است که نسبت به تحلیل نتایج حاصل از اتوداین، حداقل ۲۵ درصد کاهش را در آسیب فشاری نشان می‌دهد. آسیب کششی در تمام مخزن و در زوایای بین صفر تا ۲۲/۵ درجه به حدود ۹۰ درصد می‌رسد، در حالی که از زاویه ۶۷/۵ درجه به بعد آسیب کششی مخزن به حدود صفر می‌رسد. البته شایان ذکر است که زمان تحلیل انجام شده در روش conwep بیش‌تر از تحلیل نتایج حاصل از اتوداین است. در حالت مخزن حاوی ۳/۴ ارتفاع مخزن سیال آب نسبت به مخزن خالی، کمی کاهش آسیب در ارتفاع حدود ۱ متری و کاهش آسیب در زاویه ۴۵ درجه قابل مشاهده می‌باشد. همچنین بیش‌ترین آسیب مربوط به ارتفاع ۴/۶ متری و در زاویه صفر درجه می‌باشد.



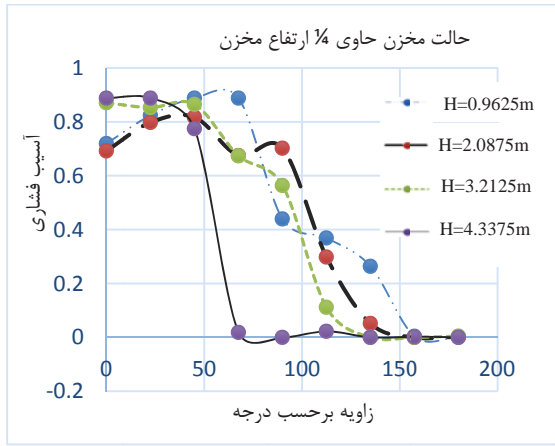
شکل ۱۳. نمودار پارامتر آسیب فشاری و کششی بر حسب ارتفاع، برای وزن ماده منفجره ۳۵۲/۰۸ کیلوگرم در زمان ۰/۰۸ ثانیه (مقادیر α بر حسب زاویه و H نقطه ارتفاعی بر روی مخزن می‌باشد)



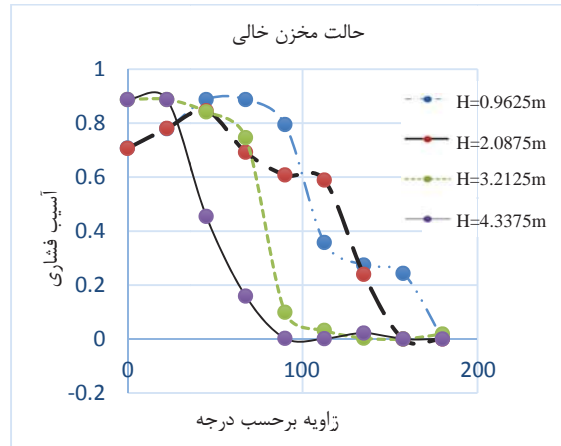
(ث)



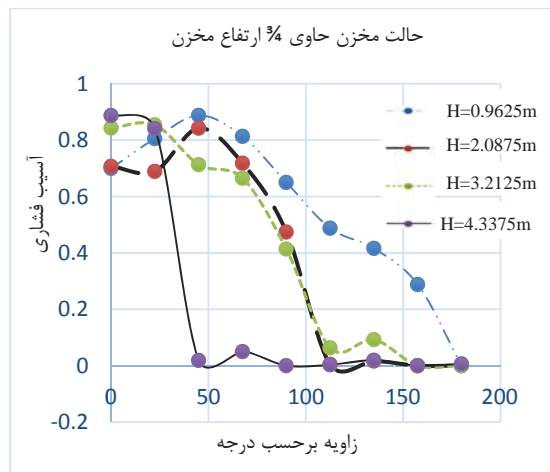
(الف)



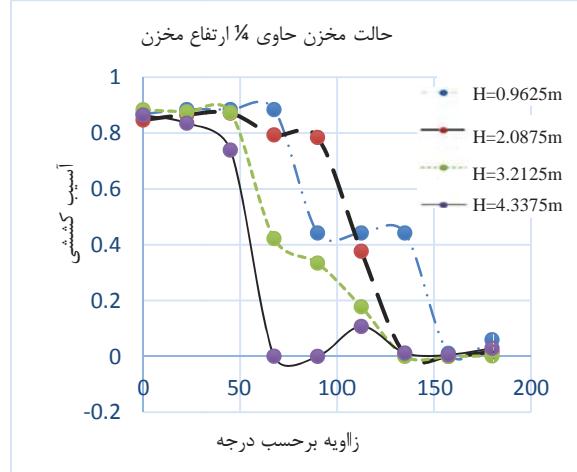
(ت)



(ب)

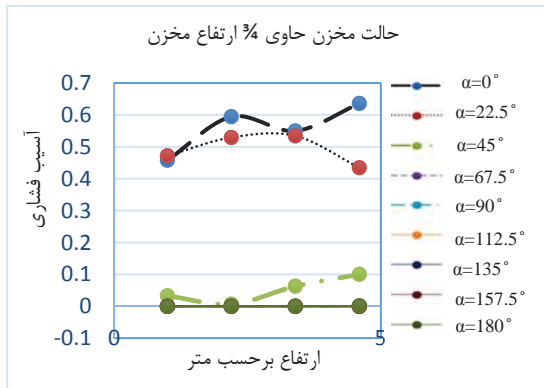


(ج)

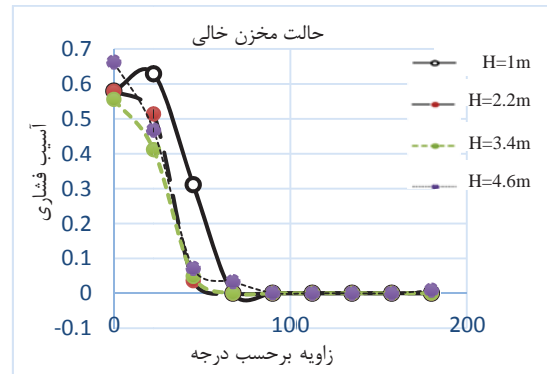


(پ)

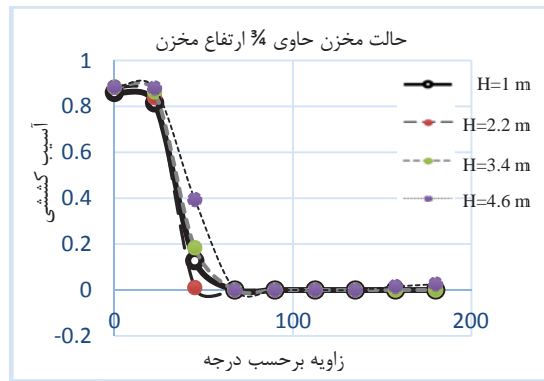
شکل ۱۴. نمودار پارامتر آسیب فشاری- زاویه و آسیب کششی- زاویه، با وزن ماده منفجره ۳۵۲/۰۸ کیلوگرم در زمان ۰/۰۸ ثانیه (H نقطه ارتفاعی بر روی مخزن می باشد)



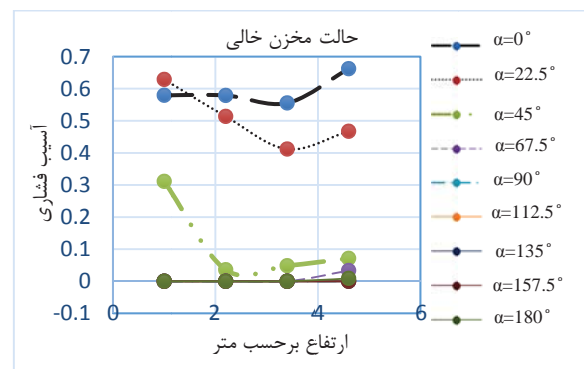
(ث)



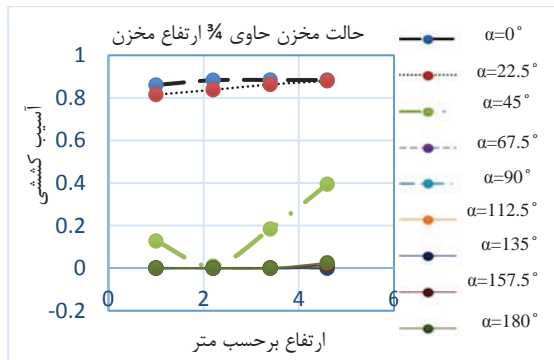
(الف)



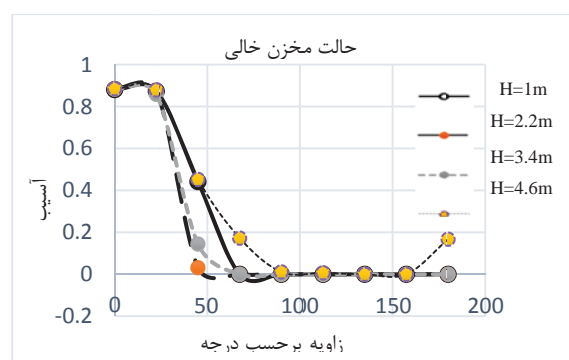
(ج)



(ب)



(چ)

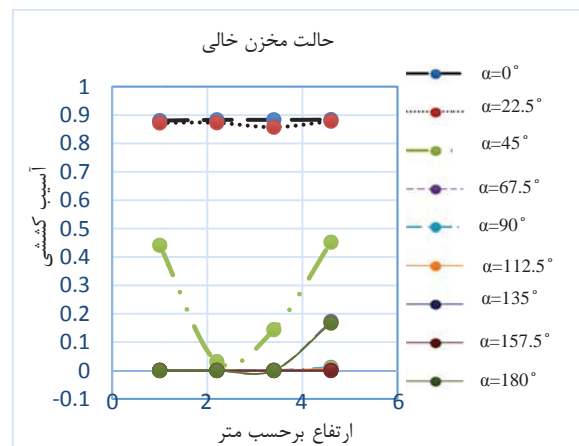


(پ)

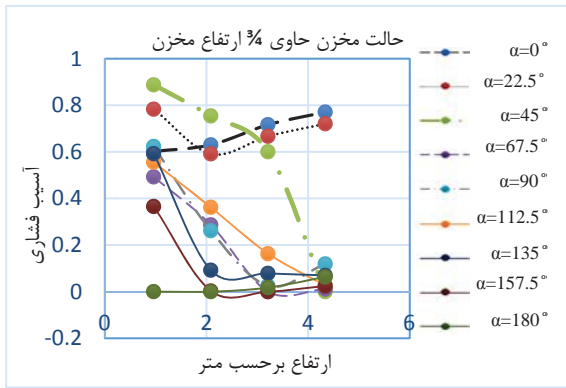
شکل ۱۵. نمودار پارامتر آسیب فشاری و کششی بر حسب ارتفاع و زاویه، برای وزن ماده ۳۵۲/۰۸ کیلو گرم با روش conwep (مقادیر α بر حسب زاویه و H نقطه‌ای ارتفاعی بر روی مخزن می‌باشد)

۳-۶. تحلیل با ماده منفجره به وزن ۱۷۶ کیلوگرم TNT

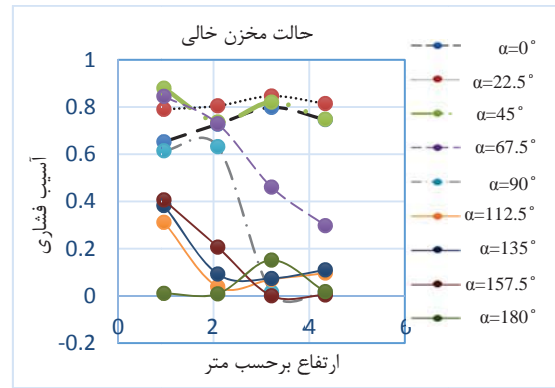
آسیب کششی نسبت به آسیب فشاری مخزن، مقادیری بیش‌تری را نشان می‌دهد. در زوایای ۰ تا ۴۵ درجه، آسیب کششی به حدود ۹۰ درصد می‌رسد. مطابق نمودار شکل (پ) و (ت) بیش‌ترین آسیب در ارتفاع ۰/۹۶۲۵ متری مخزن بوجود آمده است. نکته‌ی دیگری که قابل اشاره است مربوط به زوایای ۱۱۲/۵ درجه به بعد می‌باشد که شاهد افزایش آسیب در زوایای ۱۳۵ و ۱۵۷/۵ درجه به تناسب قرار نقاط نشان داده شده در نمودار می‌باشد.



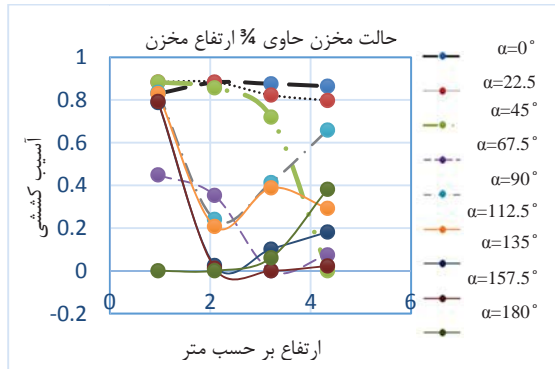
(ت)



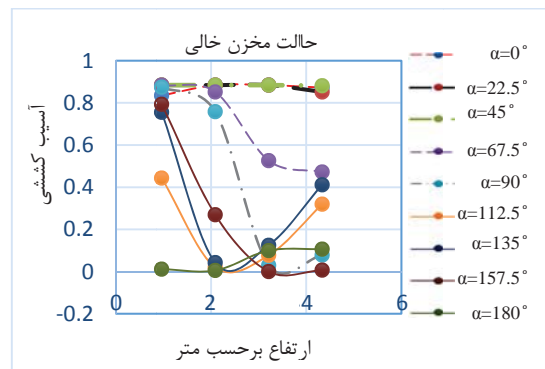
(ث)



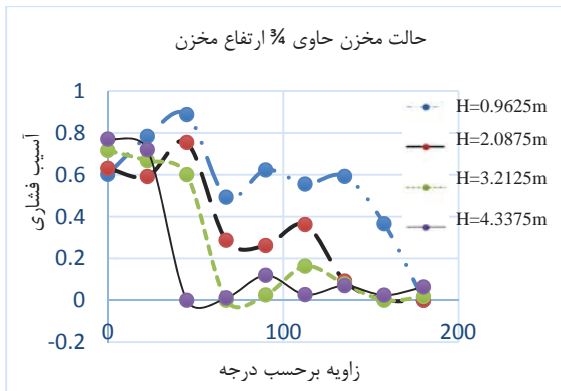
(الف)



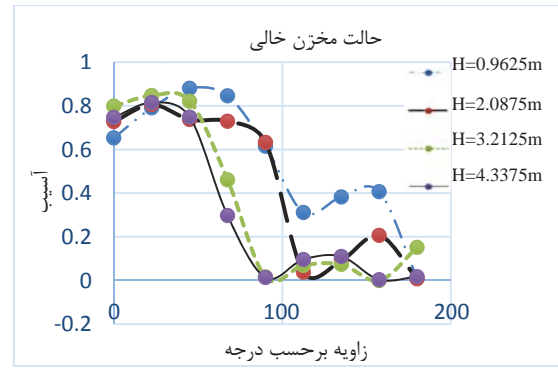
(ج)



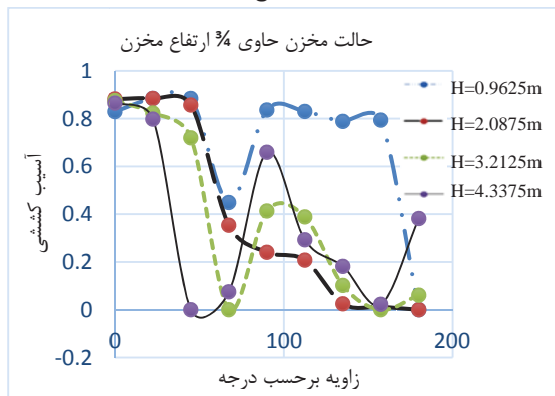
(ب)



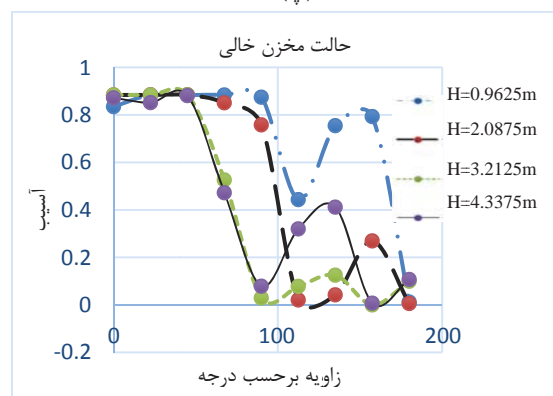
(چ)



(پ)



(ح)



(ت)

شکل ۱۶. نمودار پارامتر آسیب فشاری و کششی برحسب ارتفاع و زاویه، برای وزن ماده منفجره ۱۷۶ کیلوگرم (مقادیر α برحسب زاویه و H نقطه ارتفاعی بر روی مخزن می باشد)

۸. نتیجه‌گیری

از بررسی تحلیل آسیب‌پذیری مخازن بتنی زمینی ذخیره سیال تحت اثر انفجار هوایی در پژوهش حاضر، نتایج زیر به دست آمده است:

- وجود سیال در مخزن به دلیل افزایش سختی و در نتیجه سختی مخزن، موجب کاهش آسیب‌های فشاری و کششی نسبت به مخزن خالی می‌شود. بنابراین رفتار مخازن بتنی در برابر بارهای انفجاری متفاوت از رفتار آن‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای ناشی از زلزله می‌باشد.

- به نظر می‌رسد با توجه به این‌که بیش‌ترین آسیب در زاویه حدود کم‌تر از ۳۰ درجه از طرفین مخزن نسبت به مرکز ماده منفجره به‌عنوان نقطه مبدا (زاویه صفر درجه)، رخ می‌دهد، جهت استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی، نباید فاصله‌های انتخاب‌شده از ۳۰ درجه فراتر رود.

- طرح تقویت مخزن در ارتفاع نیز، در ارتفاع حدود یک متری به دلیل ثبت بیش‌ترین آسیب‌ها تا نواحی پشتی مخزن و همچنین در روبروی انفجار و در ارتفاع حدود ۴ متری، باید مورد توجه قرار گیرد.

- در حالت مخزن خالی، در ارتفاع ۰/۹۶۲۵ متری، از زاویه ۰ تا ۹۰ درجه، مخزن در حدود ۷۰ درصد دچار آسیب فشاری و کششی شده است.

- روش conwep فقط اثرات رو به انفجار، آن هم در زاویه ۴۵ درجه در طرفین مخزن را منظور کرده و اثرات انفجار از زاویه ۴۵ درجه به بعد و به‌ویژه در پشت مخزن را در نظر نمی‌گیرد.

- آسیب فشاری در روش conwep نسبت به روش نتایج حاصل از بارگذاری در هیدروکد اتوداین و انتقال آن به نرم‌افزار آباکوس، در مخزن پر نسبت به مخزن خالی حداقل ۲۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

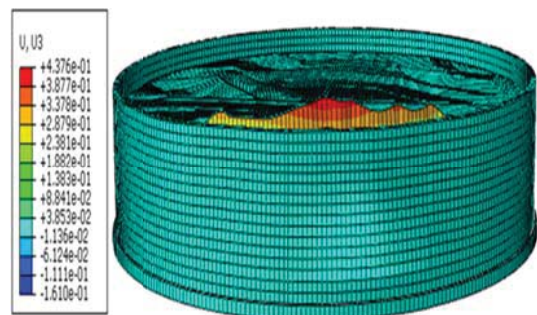
۹. مراجع

- [1] Hoskins, L. M.; Jacobsen, L. S. "Water Pressure in a Tank Caused by Simulated Earthquake"; Bull. Seismological Soc. Am. 1934, 24, 1-32.
- [2] Graham, E. W.; Rodriguez, A. M. "Characteristics of Fuel Motion Which Affect Airplane Dynamics"; J. Appl. Mech. 1952, 19, 381-388.
- [3] Hamdan, F. H. "Design of Liquid Storage Tanks"; Assessment of Eurocode 8 -Part4: European Seismic Design Practice, Elnashai, 1995.
- [4] Haroun, M. A. "Dynamic Analysis of Liquid Storage Tanks"; EERL80-4, 1980.
- [5] Epstein, H. I. "Seismic Design of Liquid Storage Tanks"; J. Struct. Division _ASCE. 1976, 102, 1659-1673.
- [6] Melerski, E. S. "Numerical Analysis for Environmental Effects in Circular Tanks"; Thin-Wall. Struct. 2002, 40, 703-727.
- [7] Kianoush, M. R.; Chen, J. Z. "Effect of Vertical Acceleration on Response of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks"; Eng. Struct. 2006, 28, 704-715.

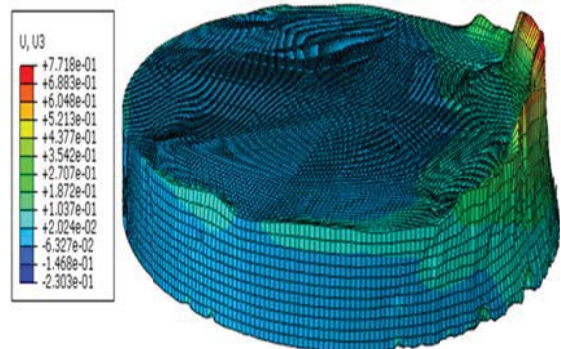
نکته قابل اشاره در این حالت نسبت به حالت (۱،۶) این است که شکل شماتیک هر دو حالت تقریباً مشابه به یکدیگر بوده و فقط کمی تفاوت در آسیب در بعضی نقاط دیده می‌شود که با متفاوت بودن وزن ماده منفجره، به نظر طبیعی می‌رسد.

۷. بررسی بالآمدگی سیال در مخزن بر اثر انفجار

در اثر پدیده تلاطم سیال، سیال ضربه‌هایی به دیواره مخزن وارد می‌کند و موج‌هایی در سطح سیال ایجاد می‌شود، در اثر این موج‌ها سیال در جهت قائم تغییر می‌کند و اگر مخزن روباز باشد سیال از مخزن خارج می‌شود. در نتیجه باید برای مخازن ارتفاع آزاد در نظر گرفته شود که این ارتفاع آزاد می‌تواند برای مخزن با سیال مختلف متفاوت باشد. در این قسمت به بررسی تلاطم سیال مایع درون مخزن تحت بار انفجار پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) زیر نیز مشاهده می‌شود موج انفجار باعث جابجایی سیال در مخزن می‌شود که موجب وارد شدن نیروی فشار از طرف سیال به جداره مخزن می‌شود. حداکثر جابجایی سیال برای مخزن حاوی $\frac{3}{4}$ ارتفاع مخزن سیال در زمان ۰/۰۸ ثانیه در راستای Z برابر ۰/۴۳۷۶ متر و این جابجایی در زمان ۰/۱۳ ثانیه برابر ۰/۷۷۱۸ متر می‌باشد.



شکل ۱۷. تغییر شکل سیال در زمان ۰/۰۸ ثانیه برای مخزن حاوی $\frac{3}{4}$ ارتفاع مخزن سیال، از نمای رو به انفجار (ضریب بزرگ‌نمایی ۴)



شکل ۱۸. تغییر شکل سیال در زمان ۰/۱۳ ثانیه برای $\frac{3}{4}$ ارتفاع مخزن سیال در راستای ارتفاعی، از نمای کناری (ضریب بزرگ‌نمایی ۴)

- [14] Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02) "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of Defense, Washington DC. 2008.
- [15] Hafez, A. "Seismic Response of Ground-Supported Circular Concrete Tanks"; Ph.D. Thesis, Graduate School of Ryerson University, 2012.
- [16] ANSYS Autodyn User's Manual, SAS IP Inc., 2011.
- [17] ASCE, "Design of Blast Resistant Building in Petrochemical Facilities"; 1997.
- [18] INBC "Iranian National Building Code, Part 21, passive defence"; Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, 2012 (In Persian).
- [19] Abaqus Finite Element Software, Simulia Inc, 2010.
- [20] Pandurangan, B. "Development, Parameterization and Validation of Dynamic Material Models for Soil and Transparent Armor Glass"; Ph.D. Thesis, Graduate School of Clemson University, 2009.
- [21] Henderson, L. F. "General Laws for Propagation of Shock Waves through Matter." Sidney, Academic Press, 2001.
- [8] Livaoglu, R. "Investigation of Seismic Behavior of Fluid-Rectangular Tank-Soil/ Foundation Systems in Frequency Domain"; Soil Dyn. Earthq. Eng. 2008, 28, 132-146.
- [9] Moslemi, M.; Kianoush, M. R. "Parametric Study on Dynamic Behavior of Cylindrical Ground-Supported Tanks"; Eng. Struct. 2012, 42, 214-230.
- [10] Pandey, A. K.; Ram, K.; Paul, D. K.; Trikha, D. N. "Non-Linear Response of Reinforced Concrete Containment Structure Under Blast Loading"; Nuclear Eng. Design. 2006, 236, 993-1002.
- [11] Asgarpour, M. "Fluid-Structure-Soil Interaction Effects on Ground Concrete Tanks under Surface Blast"; M.Sc. Thesis, Malake Ashter University of Technology, 2012 (In Persian).
- [12] Chaman, M. H. "Retrofitting of Steel Oil Tanks to Blast Loadings."; M.Sc. Thesis, Malake Ashter University of Technology, 2013 (In Persian).
- [13] Rostaye, J. "Research, Study and Design Aboveground Steel Oil Tank under Explosive Loading."; Research Activity, Malake Ashter University of Technology, 2012 (In Persian)