

مطالعه عددی پاسخ دینامیکی و آنالیز شکست مخازن ذخیره سازی مدور تحت بارگذاری انفجار خارجی

چکیده

عملکرد زیرساخت انرژی تحت شرایط بارگذاری شدید، به ویژه تحت شرایط انفجار، با وجود احتمال کم رخ دادن چنین رویدادهایی از اهمیت زیادی برخوردار است. به دلیل عواقب فاجعه بار شکست بنیادی، بهبود مقاومت زیرساخت-های انرژی در مقابل اثرات انفجار بسیار مهم است. از روش هم‌ارزی TNT برای شبیه سازی انفجار ابر بخار گاز نفت خام هنگام آنالیز پاسخ دینامیکی مخزن کروی تحت فشار بارهای انفجار خارجی استفاده شد. توزیع فشار در سطح یک مخزن ذخیره سازی کروی 1000 مترمکعبی بررسی شده است. پاسخ دینامیک مخزن، مانند توزیع تنش موثر، جابجایی سازه‌ای، حالات شکست و توزیع انرژی تحت بارهای انفجار مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج شبیه سازی نشان داد که فشار منعکس شده بر روی مخزن کروی از استوا تا قطب‌های کره به تدریج کاهش می‌یابد. با این حال، اثرات بازتاب موج تلاطم بر روی ستون آشکار نیست. آسیب ساختاری در مخزن تحت بار انفجار شامل شکست جزئی پایه‌ای در نقطه‌ی عطف تغییر شکل و مرکز تنش معنی دار است، که می‌تواند در اتصال بین ستون و پوسته‌ی پایین کروی مشاهده شود. دلیل اصلی برای تغییر شکل قابل توجه و آسیب ساختاری ناشی از انرژی داخلی اولیه‌ست که مخزن از موج انفجار تلاطم به دست آورده است. مایع درون مخزن انرژی بارهای اصابت را جذب می‌کند و پاسخ را در مرحله اولیه آسیب پس از تاثیر انفجار کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: مخزن ذخیره سازی کروی، روش هم‌ارزی TNT، تحت انفجار، پاسخ دینامیکی، آنالیز شکست

با حوزه گسترده‌ی فرآورده‌های نفتی ذخیره‌سازی، احتمال تصادفات ناشی از انفجار نفت و گاز قابل احتراق نیز افزایش می‌یابد. در طول چند سال گذشته، یک سری از آتش‌سوزی‌های مخازن نفتی و حوادث انفجار باعث تلفات و زیان‌های مالی زیادی شده است (پرسون و لانرمارک 2004؛ عباسی و عباسی 2007؛ چانگ و لین 2006). بسیاری از انفجارها با انفجار ابر بخار آغاز می‌شود که توسط خود فرآورده‌های نفتی آغاز می‌شود (لییس، 1996؛ لیب 2002). یک بار در انفجار گاز قابل اشتعال اتفاق افتاده در تاسیسات نفتی، کارخانجات مواد شیمیایی و یا مناطق ذخیره‌سازی، نه تنها ممکن است باعث آسیب جدی به مخزن نفت گردد، بلکه می‌تواند به یک واکنش زنجیره‌ای از انفجارها و فاجعه‌ی ثانویه منجر شود. بنابراین، تحقیقات درباره‌ی مکانیسم شکست و پاسخ دینامیکی مخازن ذخیره‌سازی نفت در معرض انفجار گاز قابل احتراق ضروری و لازم است.

مخازن ذخیره‌سازی می‌توانند به شکل استوانه‌ای یا کروی باشند. مخازن ذخیره‌سازی کروی در درجه اول شامل سازه‌های با پشتیبانی ضعیف‌تر و سازه‌های پوسته‌کروی هستند، که جایگزین سازه‌های پشتیبانی‌اند. به طور خاص، شکل پوسته‌می‌توانی کروی، بیضوی و یا اشکی شکل باشد، که در این بین مخازن کروی به طور گسترده‌ای مورد استفاده هستند، چرا که برای همان حجم و ضخامت، مخازن کروی نیاز به حداقل مقدار فولاد داشته و حداقل منطقه را می‌پوشاند.

در طول پنج دهه گذشته، بسیاری از پژوهشگران رفتارهای دینامیکی (جیمز و رابا 1991؛ سزان و همکاران 2008؛ کرکماز و همکاران 2011؛ مسلمی و کیانوش 2012) و حالات شکست (ارابانا و همکاران 2009؛ دوگان و همکاران 2009؛ کیم و همکاران 2009) مخازن پر شده با مایع را مورد بررسی قرار داده‌اند، که عمدتاً استوانه‌ای و مستطیلی شکل بودند و تحت تاثیر زمین لرزه قرار گرفته‌اند. پاسخ به اثرات زمین‌لرزه‌ای مخازن ذخیره‌مایع توسعه‌یافته عمدتاً به دلیل اهمیت آن‌ها در صنعت پتروشیمی مطالعه قرار گرفته است. اثرات گردش مایع در مخازن کروی در برخی از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است (مکلور 1989؛ مکلور و مکلور 1993؛ ایوانز و لینتون 1993). علاوه بر این، اخیراً دو مطالعه در مورد توسعه مدل ریاضی برای کمی‌سازی تاثیر عوامل گردش خطی در پاسخ دینامیکی مخازن

مایع کروی یا استوانه‌ای افقی تحت تحریک زلزله ارائه شده است (کاراماناس و همکاران 2006؛ پانتکاس و کاراماناس 2007). برای مورد خاص از رفتار دینامیکی مخازن کروی توسعه‌یافته تحت تحریک جانبی، تنها چند مقاله پیدا شد. به عنوان مثال، دروسوس و همکاران (2005) به طور عددی پاسخ لرزه‌ای مخزن ذخیره مایع کروی معمولی مجهز به سیستم مهاربندی چسبناک غیرخطی را مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به آنالیز دینامیکی مخازن ذخیره سازی تحت بار انفجار مطالعات متعددی با استفاده از روش تجربی و محاسباتی منتشر شده است. ژو و همکاران (2009) به بررسی ویژگی‌های پویای یک مخزن عمودی زیرزمینی در معرض اصابت انفجار پرداختند. یکی از نتیجه‌گیری‌های کلیدی این تحقیق این بود که روش بررسی لرزه‌نگاری تانک که بارهای لرزه‌ای در نظر گرفته شد، در مورد بارهای تاثیر انفجار صدق نمی‌کند. لو و همکاران (2011a, 2011b)، لو و وانگ (2012) از یک دستگاه انفجار گاز قابل اشتعال برای تولید موج تلاطم انفجار پایدار با انفجار مخلوط متان و هوا استفاده نمودند، که قبلاً در خط لوله ذخیره شده بود. دستگاه برای انجام آزمون‌های تجربی به منظور مطالعه ویژگی‌های پاسخ دینامیک و مکانیزم شکست مخازن ذخیره بزرگ مقیاس تحت تاثیر بارهای انفجار مورد استفاده قرار گرفت.

تاکنون مطالعاتی درباره‌ی پاسخ دینامیک و آنالیز شکست مخازن ذخیره سازی کروی تحت امواج تلاطم انفجار گاز قابل احتراق خارجی منتشر نشده است. از آنجا که آزمون‌های انفجار نمونه‌ی اولیه یا بزرگ مقیاس بسیار گران است، باید شبیه‌سازی‌های عددی به منظور بررسی قوانین میرایی و اثرات مخرب تلاطم انفجار گاز انجام گیرد، که به طراحی آینده از آزمون‌های تجربی کمک می‌کند.

این مطالعه شبیه‌سازی عددی به منظور بررسی پاسخ دینامیک و حالات شکست مخازن ذخیره سازی کروی تحت انفجار گاز قابل احتراق خارجی ارائه می‌دهد. نرم افزار المان محدود صریح و تجاری LS-DYNA (LSTC، 2007) برای آنالیز ظرفیت مقاومت در برابر انفجار و جذب انرژی مخازن کروی استفاده شده است. روش هم‌ارزی TNT برای ایجاد مدل‌های بار هم‌ارزی انفجار ابر بخار نفت خام مورد استفاده قرار است. با توجه به اثر عوامل نرخ کرنش مواد، پاسخ دینامیک و مکانیزم شکست مخازن تحت بارهای گاز انفجاری به منظور ارائه منابع علمی برای طراحی منطقی از چنین سازه‌هایی در آینده مورد مطالعه قرار گرفته است.

2. مدل المان محدود

2.1 کد المان محدود و روش ALE

شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار تجاری LS-DYNA انجام شد، که بر مبنای روش های عددی صریح است و به طور گسترده ای برای آنالیز مشکلات مرتبط با تغییر شکل های بزرگ، پاسخ سازه به اصابت های سرعت بالا و بار انفجار و رفتار نرخ کرنش مواد استفاده شده است. حداقل سه روش برای چنین مشکلاتی وجود دارد: (1) فرمول لاگرانژ (2) فرمول اویلر؛ و (3) رابطه ی لاگرانژی-اویلری دلخواه (ALE)، که امکان دنبال کردن جریان های زیاد از مواد مختلف را بدون مواجهه با مشکلات انحرافات عددی، اغلب تجربه شده در فرمول لاگرانژ، می دهد. فرمول المان لاگرانژی-اویلری دلخواه (ALE)، یک

روش عددی استاندارد برای حل مشکلات تغییر شکل های بزرگ دیده شده در شکل دهی فلزات ناشی از تاثیر سرعت بالا

و یا بار انفجار است. مفهوم کلی فرمول ALE این است که یک دامنه ارجاعی دلخواه برای شرح حرکتی که متفاوت از مواد (لاگرانژی) و دامنه ی فضایی (اویلری) است تعریف شده است (LSTC 2007).

3 مورد از المان های استفاده شده در اینجا: (1) المان قلاب 160: یک المان دوگرهی میله ای است که تنها قادر به حمل بارهای محوری است؛ (2) المان قشری 163: یک المان پوسته مستطیل شکل 4 گرهی که می تواند لنگر خمشی و نیروی غشاء و هر دو بارهای عادی مجاز و درون سطحی را حمل کند؛ (3) المان جامد 164: یک المان جامد هشت گرهی مورد استفاده برای مدل سازی سه بعدی سازه هاست.

2.2 مدل عددی برای مخازن کروی و منابع انفجاری

یک مدل المان محدود برای خط استوای مماس بر ستون مخزن ذخیره سازی کروی 1000 مترمکعبی ایجاد شده است که متشکل از چهار بخش است: پوسته ی کروی، ستون ها، گره ها و صفحات اتصال. ضخامت پوسته 45 میلی متر است. بعد مقطع عرضی اسمی از لوله های ستون دایره ای (قطر D ضخامت t) 250 میلی متر در 10 میلی متر است،

و بُعد گره 48 در 6 میلی متر است. شکل 1 (الف) شکل و اندازه مدل مخزن ذخیره سازی کروی را نشان می دهد. در این مطالعه،

گاز محتوی آب مغزوز در مخزن ذخیره سازی کروی (شباکو و همکاران، 2007) با حجم 80٪ از آب به منظور به ساده سازی شبیه سازی اثر انفجار در خارج از مخزن مدل شد. فاصله بین مرکز انفجار تا سطح مخزن 25 متر در نظر گرفته شد.

2.3 المان ها و شبکه بندی

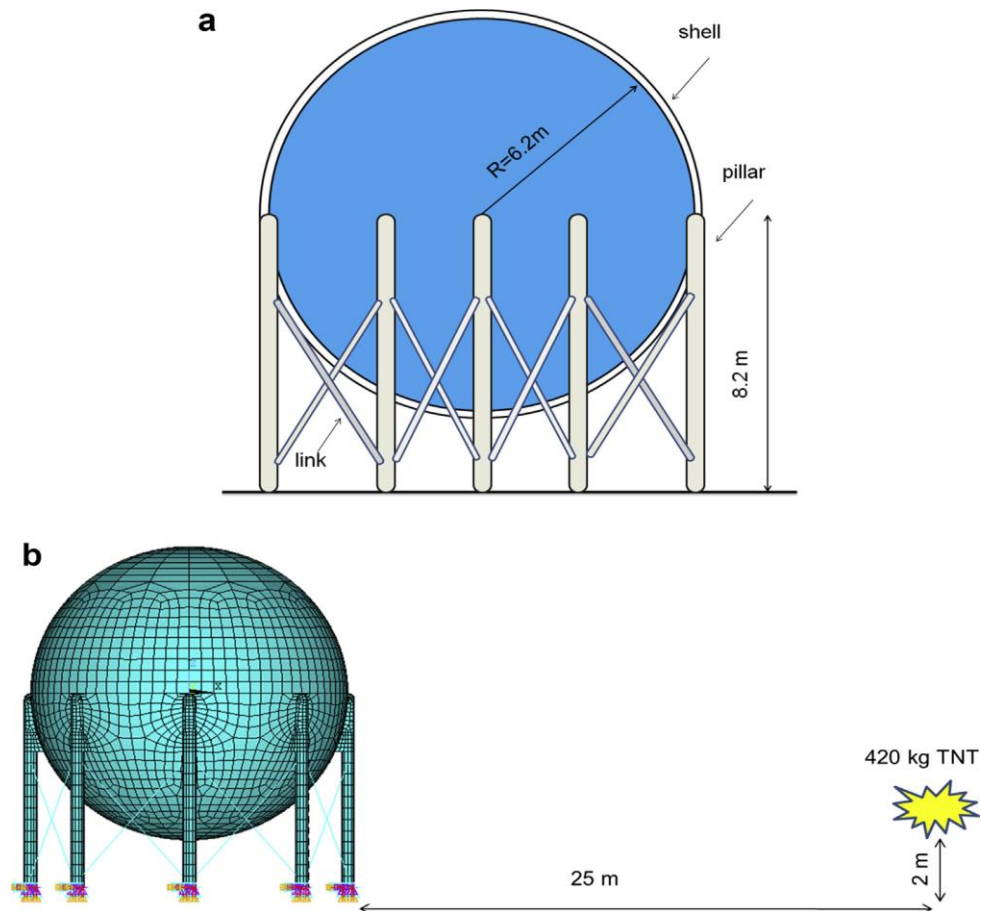
با توجه به اندازه واقعی مدل، المان قشری 163 برای شبیه سازی پوسته کروی، اتصال صفحه و ستون مخزن ذخیره سازی کروی استفاده شد و المان قلاب 160 برای نشان دادن گره ها استفاده شد. TNT، گاز مایع و هوا با استفاده از المان جامد 164 مدل شد. از آنجاییکه روش کوپلینگ مایع- جامد ALE نمی تواند به طور همزمان داخل و خارج سازه را در نظر بگیرد، روش ذرات هیدرودینامیک هموار بدون شبکه بندی (SPH) برای شبیه سازی مایع در مخزن استفاده شد و نیروهای منتقله از مایع به پوسته کروی می تواند با بررسی تماس بین آنها مدل سازی شود. برای این کار، شبکه بندی نگاشتی به تصویب رسید. اندازه المان های قشری و المان های جامد عناصر معرف TNT 40 میلی متر و اندازه المان های جامد معرف هوا 100 میلی متر است.

فعل و انفعالات سیال و سازه با استفاده از یک الگوریتم کوپلینگ شبیه سازی شد. سیال با شبکه بندی ALE ثابت / متحرک مورد عمل قرار گرفت، در حالی که سازه با شبکه بندی تغییر شکل پذیری لاگرانژ مورد عمل بود. الگوریتم کوپلینگ، نیروهای کوپلینگ در رابطه با سیال- سازه را محاسبه می نماید. این نیروها به سیال و سازه نیروهای گرهی اضافه شدند، که بر اساس آنالیز المان محدود صریح محاسبه شد. پیش بینی حداکثر فشار محلی در سازه نیازمند الگوریتم کوپلینگ سیال و سازه دقیق است. الگوریتم کوپلینگ ALE ارائه شده در این مقاله از جریمه های برمبنای فرمول های شبیه به تماس با جرایم آنالیز لاگرانژی استفاده می نماید.

2.4 مدل های مواد و معادله حالت

بارهای انفجاری در ارتباط با اثرات نرخ کرنش است. خواص مکانیکی فولاد به طور قابل ملاحظه‌ای از سویه تحت تاثیر نرخ کرنش است. بنابراین، در این مطالعه، یک مدل سفت‌شدگی جنبشی چند خطی (مدل جنبشی- پلاستیسیته- حصیری در LS-DYNA)، که قادر به در نظر گرفتن نرخ کرنش است، برای نشان دادن پاسخ فولاد Q235 استفاده شده است. استرس بازده اولیه فولاد 235 مگاپاسکال است، مدول الاستیک 206 گیگا پاسکال و ضریب پواسون 0/3 است. مدل پلاستیسیته وابسته به سرعت برای فشار بازده فولاد، پیشنهاد شده توسط کوپر و سیماندرز 1957 با رابطه‌ی زیر نشان داده شده است:

$$\sigma_{dy} = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] \sigma_y \quad (1)$$



شکل 1 طرح مخزن ذخیره سازی کروی. (الف) مدل هندسی و (ب) مدل المان محدود.

که در آن، σ_{dy} فشار بازده دینامیکی با توجه به اثر نرخ کرنش، σ_y قدرت بازده استاتیک، ϵ^p نرخ کرنش پلاستیک هم‌ارز، γ پارامتر ویسکوزیته است، و m پارامتر سفت‌شدگی نرخ کرنش است. مقادیر پیشنهاد از این دو عامل برای فولاد $\gamma = 60 \text{ s}^{-1}$ و $m=4$ است (لو و وانگ، 2012). پارامترهای مکانیکی اصلی برای مواد فولاد استفاده شده در سازه در جدول 1 نشان داده شده است.

مواد منفجره دارای چگالی 1630 کیلوگرم بر مترمکعب، با مواد منفجره با سرعت 6930 متر بر ثانیه و فشار C-J 2/11010 پاسکال هستند. شارژ انفجاری با استفاده از مدل مواد منفجره مواد با سوختگی بالا و معادله حالت جونز-ویلیکین-لی (JWL) مدل شد (EOS). معادله حالت JWL فشار را به عنوان تابعی از حجم نسبی، V و انرژی اولیه در واحد حجم، E ، به صورت کلی زیر تعریف می‌کند (لی و همکاران، 1973):

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

که در آن، E انرژی انفجار است، و V حجم نسبی انفجار است. در مدل ارائه شده، پارامترهای معادله حالت انفجاری به شرح زیر تعریف شده است:

$$B = 3.23 \times 10^9, R_1 = 4.15, R_2 = 0.95, \omega = 7 \times 10^9, E = 1, A = 3.74 \times 10^{11}$$

جدول 1 پارامترهای مورد استفاده در مدل کوپر-سیماند برای فولاد

بخش مخزن	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (N/m^2)	ضریب پواسن	فشار بازده (MPa)	شکست کششی
پوسته کوره	7.8×10^3	2.06×10^{11}	0.3	305	0.20
ستون‌ها	7.8×10^3	2.10×10^{11}	0.3	320	0.25
اتصالات	7.8×10^3	2.10×10^{11}	0.3	320	0.25
گره	7.8×10^3	2.10×10^{11}	0.3	225	0.25

هوا به عنوان یک گاز ایده آل و با استفاده از مدل مواد پوچ مدل شد و فشار را می‌توان با استفاده از یک چند جمله ای خطی EOS که تابع خطی از انرژی داخلی در واحد حجم اولیه، E است، بیان نمود و به صورت زیر داده شده است:

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (3)$$

که در آن، $C_0 \sim C_6$ مقادیر ثابت هستند، E انرژی داخلی، μ پارامتر نشان دهنده‌ی از خصوصیات تغییرات حجم مایع و $\rho_0 = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ چگالی اولیه هوا و ρ چگالی جریان هوا می باشد. مقادیر پارامترهای مدل مواد تهی و معادله چند جمله ای خطی حالت در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2: پارامترهای مورد استفاده در معادله چند جمله ای خطی حالت

ρ_0 (kg/m ³)	E (Pa)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.205	2.5×10^5	0	0	0	0	0.4	0.4	0

آب به عنوان سیال متراکم با معادله حالت میه-گرانیشن مدل شد، که از سرعت متلاطم مکعبی برای تعریف فشار برای مواد فشرده و کشیده (استنبرگ، 1978؛ گاتر، 1994)، مانند رابطه‌ی زیر استفاده می‌نماید: ($\mu > 0$)

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (4)$$

در حالت $\mu < 0$

$$P = \rho_0 C_0^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (5)$$

که در آن $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ ، $\gamma_0 = 0.4934$ گامای گرانسین است، α اولین اصلاح حجم ترتیبی به γ_0 ، ρ_0 چگالی آب، E انرژی داخلی ویژه، C_0 سرعت صوت در حالت دست نخورده و S_1 ، S_2 و S_3 مقادیر ثابت هستند (چنگ و همکاران، 2005).

2.5 برآورد رابطه‌ی هم‌ارزی TNT مواد منفجره

اثرات انفجار ابر بخار (VCE) به شکل یک موج تلاطم متشکل از یک جبهه تلاطم با فشار بالاست، که با حداکثر فشار پوسیدگی با فاصله به بیرون از مرکز انفجار گسترش می یابد (ژان، 2003). روش هم‌ارزی TNT به طور گسترده ای برای تخمین بار انفجاری ابر بخار از طریق وزن معادل شارژ TNT استفاده می‌شود (مانان، 2004؛ پلاناس-کاجی و

همکاران، 004). به منظور برآورد حداکثر فشار و ضربه مثبت درفاصله مشخص، انرژی شیمیایی موجود در یک ابر بخار تبدیل به یک وزن موثر مواد منفجره TNT بر اساس معادله زیر شد (بیکر و همکاران، 1983):

$$W_{TNT} = \alpha_e \frac{W_f Q_f}{Q_{TNT}} \quad (6)$$

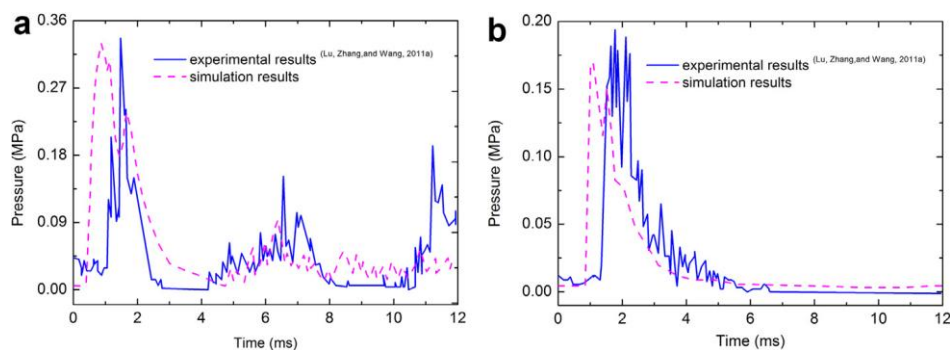
$$W_f = \rho V_e \xi \quad (7)$$

که در آن، W_{TNT} جرم معادل TNT است که می‌تواند همان اثرات انفجار را تولید نماید، α_e عامل بهره وری است، به طور کلی پذیرفته شده است که با در نظر گرفتن پایه ای برای محاسبه مقدار کل بخار در ابر، مقدار α_e بین 0/01 تا 0/05 برای بیش‌ترین انفجار است (لوباتو و همکاران، 2006) (در این مقاله، $\alpha_e = 0.03$ است). W_f جرم کل هیدروژن در ابر گازی، Q_f حرارت احتراق هیدروژن (0/418 مگاژول بر کیلوگرم)، و Q_{TNT} حرارت احتراق TNT (حدود 4/69 مگاژول بر کیلوگرم) (ون دن برگ و لانی، 1993)، ρ چگالی هیدروژن مایع (حدود 5×10^3 کیلوگرم بر مترمکعب است)، V_e حجم هیدروژن مایع در داخل مخزن، ξ یک عامل بهره وری از کل مقدار بنزین آزاد شده (برای مقاله‌ی حاضر، $\xi = 0.35$)، با توجه به معادلات (6) و (7)، جرم هم‌ارزی W_{TNT} در 420 کیلوگرم برآورد شده است.

2.6 اعتبار سنجی مدل انفجار

نتایج محاسبات از پاسخ دینامیک سازه به شدت وابسته به مدل بارگذاری انفجار است. با این حال، به دست آوردن راه حل های دقیق تحلیلی از روش بارگذاری انفجار از طریق آنالیز ساده و یا محاسبه دستی دشوار است. با توسعه تکنیک های کامپیوتری، شبیه سازی عددی روش موثری برای تجزیه و تحلیل و حل مسایل انفجار است، اگر چه دقت و قابلیت اطمینان از نتایج محاسبه نیازمند تاییدیه های تجربی است. لو و همکارانش (2011a، 2011b) یک سری از مطالعات انفجار متلاطم تجربی بر روی پاسخ دینامیکی سقف شناور و سقف ثابت نمونه مخزن مورد بررسی قرار دادند. ویژگی های فشاری ناشی از انفجار بارگذاری شده بر روی دیواره‌ی صلب در مقیاس بزرگ کشتی ضد انفجار با استفاده از سنسورهای فشار دینامیکی فرکانس بالا اندازه گیری شد. با استفاده از نتایج فشار موج تلاطم به دست آمده از

آزمایشات (لو و همکاران، 2011a، 2011b)، دقت و قابلیت اطمینان تکنیک های مدل سازی انفجار در حال بارگذاری و روش آنالیز اعتبار سنجی شد. روش ALE و روش هم‌ارزی TNT برای شبیه سازی فرآیند انفجار گاز قابل احتراق، انتشار امواج تلاطم هوا از طریق هوا، و اندرکنش‌های امواج تلاطم انفجار با دیوار سفت و سخت از کشتی ضد انفجار بزرگ مقیاس به کار گرفته شد. شکل 2 مقایسه نتایج شبیه سازی و داده های تجربی را نشان می دهد (لو و همکاران، 2011a، 2011b). شکل 2 (الف) و (ب) منحنی‌های فشار- زمان به دست آمده از مکان های مختلف کشتی به همراه و بدون موج فشار منعکس شده را نشان می دهد. شرح مفصلی از تکنیک های مدل سازی و اعتبار سنجی را در منابع یافت (لو و همکاران، 2011a، 2011b). مطالعه اعتبار سنجی از دقت و مناسب بودن مدل ارائه شده برای تخمین بارگذاری انفجار حمایت می کند.



شکل 2

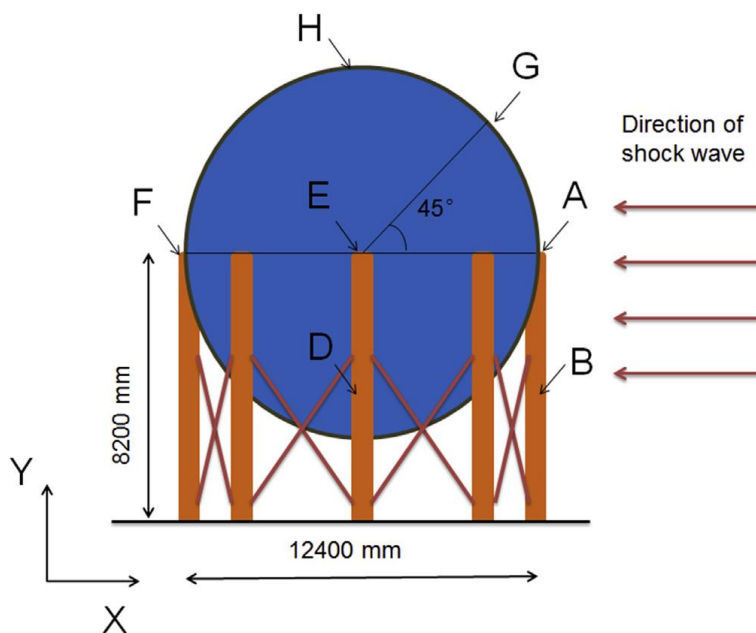
3. بحث و نتایج شبیه‌سازی

3.1 توزیع انفجار بارگذاری

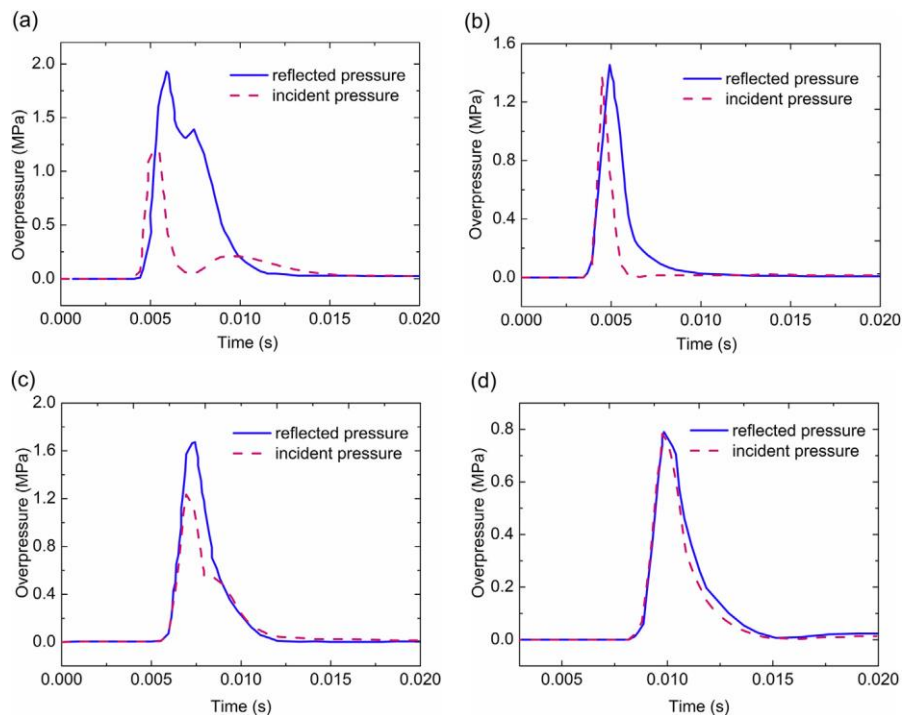
به منظور اندازه گیری توزیع فشار از موج تلاطم انفجاری در سطح سازه مخزن ذخیره سازی کروی، تعدادی نقطه‌ای اندازه گیری در مکان های متفاوت از مخزن کروی انتخاب شدند. شکل 3 اطلاعات مربوط به مکان این نقاط اندازه گیری را نشان می دهد.

منحنی های فشار- زمان به دست آمده از اندازه گیری های نقاط مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. این نشان می دهد که مقادیر پیک برای همه نقاط فشار انعکاسی بالاتر مقادیر متناظر در حالت تصادفی است. حداکثر مقدار

نقطه A حاصل شده است، که در خط استوا کره با مقدار $1/92$ مگاپاسکال می‌باشد، که در شکل 4 (الف) نشان داده شده است. در مقایسه با مقدار فشار به دست آمده در نقطه A، فشار انعکاسی در نقطه اندازه گیری B و G کمی کوچکتر هستند، که به ترتیب $1/67$ مگاپاسکال (شکل 4 ج) و $1/45$ مگاپاسکال (شکل 4 ب) است. لازم به ذکر است که فشار انعکاسی پیک در نقطه B ($1/45$ مگاپاسکال)، که در یکی از پایه‌ها قرار دارد، نزدیک به یک مقدار تصادفی ($1/37$ مگاپاسکال) است، آشکار است که پایه‌ها تنها اثرات محدودی در بازتاب موج تلاطم دارند. نقطه اندازه گیری H، که در آن حداقل فشار اوج حاصل شده است، واقع در بالای مخزن ذخیره سازی کروی است. تقریباً همان مقادیر از فشار انعکاسی و تصادفی در آن نقطه مشاهده شد، که به ترتیب $0/78$ و $0/77$ مگاپاسکال بود (نگاه کنید به شکل 4 د).

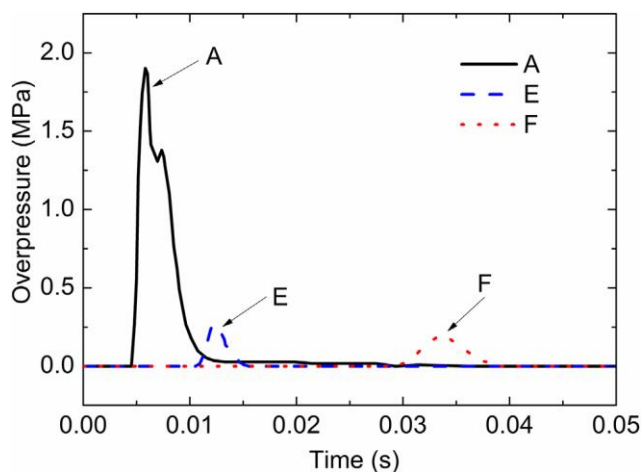


شکل 3 مکان‌های نقاط تست فشار بر روی مخزن ذخیره‌سازی کروی



شکل 4 منحنی فشار- زمان (الف) نقطه‌ی A، (ب) نقطه‌ی B، (ج) نقطه‌ی G، (د) نقطه‌ی H

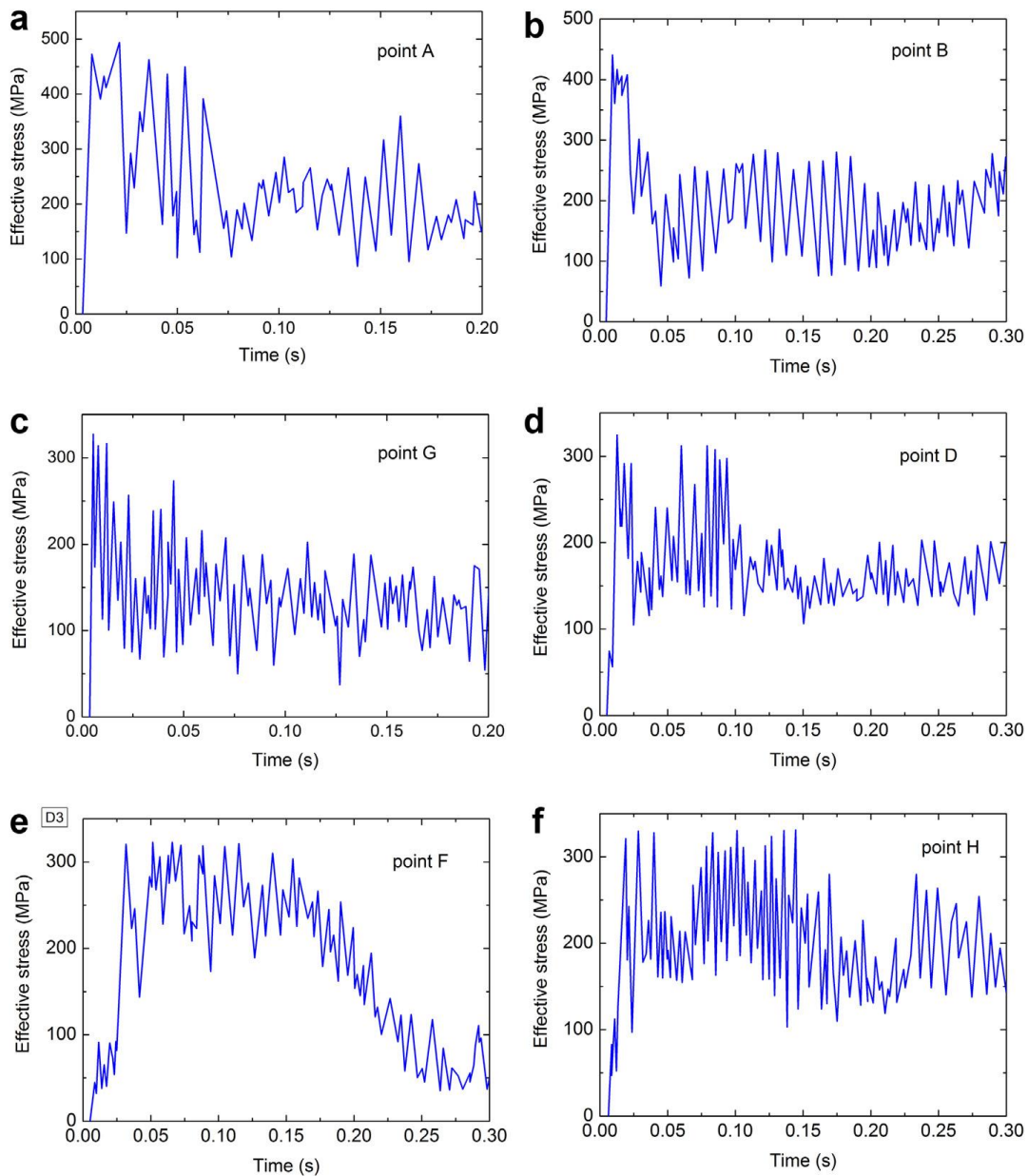
منحنی های فشار- زمان در نقطه A، E و F در شکل 5 نشان داده شده است. تمامی مراحل پراش حدود 30 میلی ثانیه طول می کشد. وقتی که مقدار فشار به دست آمده از نقطه F، که در سطح پشت انفجار واقع است، ماکزیمم مقدار خود می رسد، این پایان فرایند پراش موج متلاطم را نشان می دهد. فشار اوج در نقاط A، E و F به ترتیب 1/9، 0/27 و 0/19 مگاپاسکال هستند و روند پراش به سمت موج تلاطم حرکت می کند. مقدار فشار در سازه به سرعت در حال کاهش یافتن است. تفاوت بین فشار در جلو سطح تماس و پشت سطح تماس انفجار باعث جابجایی افقی در سازه می شود.



شکل 5 منحنی فشار-زمان در نقاط A, E و F

3.2 تنش موثر

پیشینه‌ی زمانی تنش موثر به دست آمده در نقاط مختلف در مخزن ذخیره سازی کروی در شکل 6 نشان داده شده است. تنش موثر نقش مهمی در تعیین آسیب ساختاری و شکست ایفا می‌کند. حالات تنش بالا در نقاط A و B حاصل شده است، که هر دو در ردیف اول از ستون در امتداد جهت موج متلاطم واقع شده‌اند. حداکثر تنش موثر گرفته شده توسط همه این نقاط اندازه گیری در نقطه A حاصل شده است که در واقع محل اتصال پوسته و یک ستون است. تنش موثر پیک در نقطه A به 493 مگاپاسکال در لحظه‌ی 0/002 ثانیه می‌رسد. تنش پیک نقطه B در لحظه‌ی 0/009 ثانیه به 440 مگاپاسکال می‌رسد. مشخص است که هر دو آنها را بیش از حد استحکام تسلیم فولاد هستند.

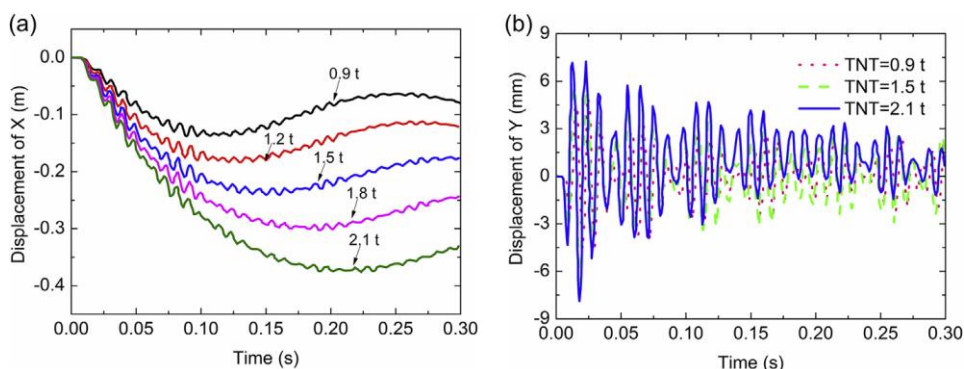


شکل 6 جدول ابری تنش موثر برای مخزن ذخیره‌سازی کروی

3.3 نتایج پاسخ جابجایی

شکل 7 که منحنی جابجایی- زمانی از مخزن ذخیره سازی کروی را در جهات افقی (X) و عمودی (Y) تحت رابطه‌ی هم ارزی TNT متفاوت نشان می دهد. بزرگترین تغییر شکل پلاستیک در اولین ردیف از ستون رو به موج تلاطم انفجار ظاهر می‌شود. نتایج آنالیز المان محدود نشان می دهد که مقدار مطلق جابجایی ستون به حدود 157 میلی متر

در لحظه 14/2 میلی ثانیه می رسد. با توجه به شکل 7 (الف)، جابجایی در جهت محور X با هم ارزی TNT تغییر می کند. با افزایش هم ارزی TNT، تغییر شکل باقی مانده از پوسته کروی نیز افزایش می یابد. با این حال، تغییر در مقادیر جابجایی با توجه به هم ارزی های TNT مختلف در امتداد جهت Y واضح نیست. از شکل 7 (ب) می توان دریافت که لرزش سازه در امتداد جهت Y به طور قابل توجهی همانند افزایش مقادیر هم ارزی TNT تغییر نمی کند. مقایسه جابجایی سازه های در این دو جهت نشان می دهد که حداکثر جابجایی مخزن در جهت X، همیشه بسیار بالاتر از جابجایی پیک در امتداد جهت Y است. بنابراین، هنگامی که هم ارزی TNT بالا است، سازه به شدت در امتداد جهت ضربه منحرف می شود. با این حال، ارتعاش جانبی ناشی از اصابت زیاد آشکار نیست، که فقط دامنه ی نوسان میلیمتری دارد. بنابراین، ارتعاش جانبی اثر کمی بر روی پاسخ دینامیک پوسته کروی دارد.

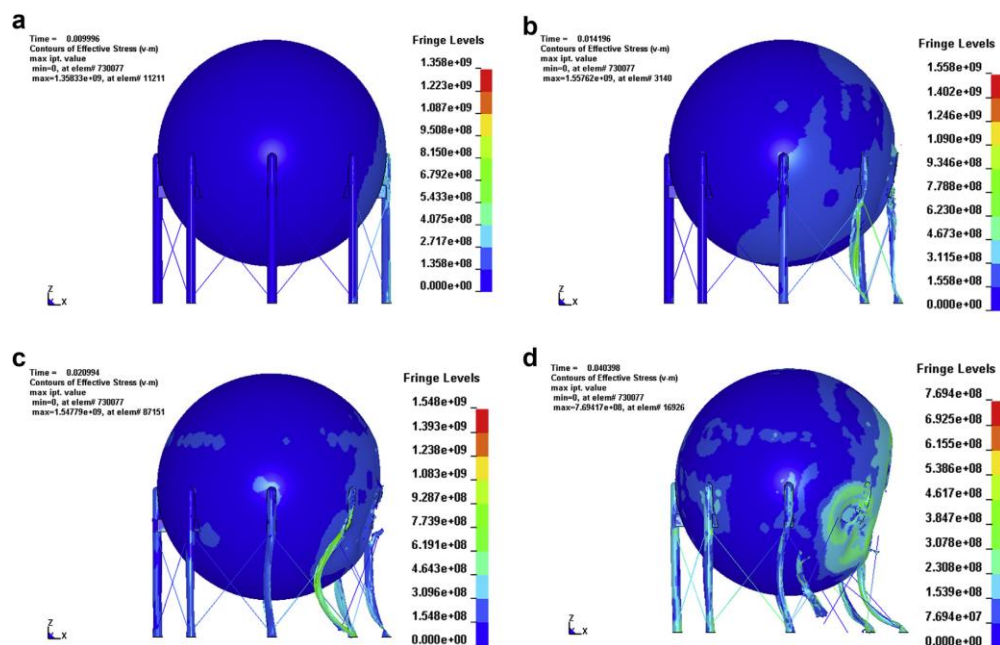


شکل 7 جابجایی (الف) X و (ب) Y

3.4 آنالیز شکست

شکل 8 فرآیند شکست مخزن ذخیره سازی کروی تحت تاثیر موج تلاطم انفجار را نشان می دهد. زمانی که موج تلاطم به سطح مخزن ذخیره سازی کروی می رسد، ستون واقع در سطح جلویی انفجار با تنش زیادی و با تغییر شکل پلاستیک مواجه می شود. در مرحله اولیه فرآیند شکست، حداکثر تنش موثر در اتصال ستون و پوسته با توجه به اثرات تراکم تنش مشاهده شد، که دارای مقدار 1358 مگاپاسکال در 9/9 میلی ثانیه است (شکل 8 (الف)). سپس تغییر شکل ویژه در ردیف اول ستون رو به انفجار در زمان 14/2 میلی ثانیه رخ داد (شکل 8 (ب)). در طول انتشار موج تلاطم، تغییر شکل قابل توجه و شکستگی برشی در ستون رو به انفجار مشاهده شد و سطح مقعر پوسته کروی نیز

در لحظه‌ی 20/9 میلی‌ثانیه دیده شد (شکل 8 ج)). حالت شکست نهایی نشان می‌دهد که آسیب جهانی سازه رخ می‌دهد. در حال حاضر در لحظه‌ی 40/4 میلی‌ثانیه، برخی از ستون‌ها پشتیبانی از پوسته کروی تحت بار انفجار را از دست داده‌اند. مقدار قابل توجهی از تغییر شکل مقعری در سطح پوسته کروی مشاهده شده و برخی از چاله‌ها می‌تواند در سطح مخازن کروی پیدا شود (شکل 8 د)).

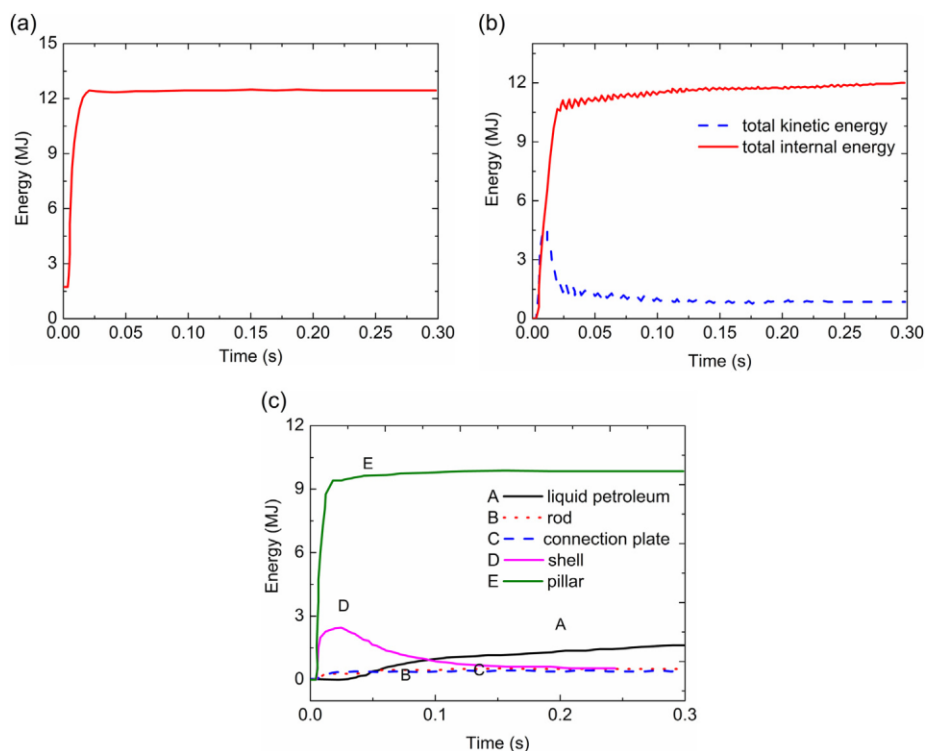


شکل 8

3.5 توزیع انرژی در مخزن

پس از اینکه موج تلاطم به سازه‌ی مخزن ذخیره سازی کروی اعمال شد، هر بخش از سازه انرژی اولیه کسب می‌کند، که متشکل از دو نوع تبدیل انرژی است. اولی تبدیل انرژی بین انرژی داخلی و انرژی جنبشی سازه، و دیگری انتقال انرژی بین اعضای سازه‌ای خود مخزن است. در این مطالعه، آنالیزها اثر نوسانات سازه و اتلاف انرژی را در نظر نمی‌گیرد. شکل 9 (الف) تغییرات انرژی کل در کل سطح مخزن تحت انفجار گازی را با زمان نشان می‌دهد. انرژی کل مخزن به یک مقدار نسبتاً ثابت (حدود 13 مگاژول) در لحظه‌ی 20 میلی‌ثانیه پس از انفجار رسید. شکل 9 (ب) نشان می‌دهد که بیشتر انرژی مخزن انرژی داخلی، که به عنوان انرژی کرنش ذخیره شده در ستون آشکار می‌شود و توسط

خمش تغییر شکل ستون در سطح مقابل انفجار پس از موج انفجار ایجاد می‌شود. بخش دیگری از انرژی، انرژی جنبشی است، زیرا مخزن با سرعت ثابت حرکت می‌کند. زمانی که سرعت به صفر کاهش می‌یابد، حداکثر مقدار جابجایی در امتداد جهت موج تلاطم رخ می‌دهد. از آنجا که تغییر شکل پلاستیک بزرگ از ستون‌ها رخ می‌دهد، که به عنوان عضو کنترل‌کننده در سختی سازه عمل می‌کنند، شکل یا موقعیت از مخزن نمی‌تواند به حالت اولیه خود بازگردد. پس از آن، انرژی جنبشی به تدریج به انرژی داخلی تبدیل شده و به عنوان تغییر شکل فشاری و یا کششی همه ستون‌های ناشی از حرکت سازه‌ی بالا آشکار می‌شود. این دیده می‌شود که انرژی داخلی اولیه بدست آمده از مخزن عامل کلیدی است که منجر به تغییر شکل‌های بزرگ و نابودی می‌شود. با این حال، انرژی جنبشی اولیه عمده‌ترین عوامل مؤثر جابه‌جایی است. شکل 9 (ج) منحنی انرژی-زمان هر بخش از مخزن را نشان می‌دهد، و روشن است که انرژی داخلی ستون‌ها بالاتر از دیگر بخش‌های سازه است.



شکل 9 منحنی انرژی-زمان (الف) انرژی کل، (ب) انرژی جنبشی و انرژی داخلی کل، (ج) انرژی بخش‌های مختلف

مخزن

3.6 تاثیر سطح مایع در مخزن

مقادیر جابجایی و انرژی با سطوح مختلف مایع در مخزن ذخیره سازی کروی تحت بارگذاری انفجار در جدول 3 ذکر شده است. هنگام محاسبه انرژی، انرژی گاز مایع محبوس در مخزن در نظر گرفته نشده است. بنابراین انرژی سطحی برای نشان دادن انرژی خود مخزن به صورت دقیق استفاده می شود. همانطور که در جدول 3 نشان داده شده، افزایش سطح مایع در مخزن ممکن است تأثیر زیادی بر پاسخ دینامیک سازه در جهت X داشته باشد، اما تأثیر کمی در جهت Y دارد. هرچه سطح مایع از 0 تا 80 درصد افزایش می یابد، جابجایی سازه در جهت X به طور متوسط 59/1٪ کاهش می یابد، و انرژی درونی تا 7/4٪ کاهش می یابد. دلیل آن این است که مایع در مخزن ذخیره سازی کروی باعث افزایش میرایی سازه شده، در نتیجه بخشی از انرژی ناشی از اصابت انفجار جذب شده است. بنابراین، پاسخ دینامیکی مخازن ذخیره سازی کروی می تواند با افزایش مایع در داخل مخزن تحت بارگذاری انفجار، کاهش یابد.

جدول 3: تاثیر سطح مایع در مخزن کروی

Liquid level (%)	Displacement of X (mm)	Displacement of Y (mm)	Total energy (MJ)	Internal energy (MJ)
0	384	6.87	11.895	11.686
50	241	6.88	11.261	11.188
80	157	6.88	10.903	10.816

4. نتیجه گیری

مطالعه عددی پاسخ دینامیک و روند شکست مخازن کروی تحت انفجار گاز قابل احتراق با استفاده از برنامه المان محدود دینامیک غیر خطی صریح LS-DYNA انجام شد. از روش هم‌ارزی TNT در این مطالعه استفاده شد. موارد زیر می تواند نتیجه گیری شود:

✓ مخزن کروی اثرات قابل توجهی بر انعکاس امواج متلاطم تحت بارگذاری انفجار دارد، که از استوا تا قطب‌های کره کاهش می یابد. با این حال، ستون‌ها تنها می توانند یک مقدار محدود از امواج متلاطم را بازتاب نمایند.

✓ خسارات ناشی از انفجار به روی مخزن کروی عبارتند از: (1) تغییر شکل معطوف قابل توجهی از ستون؛ (2) خم شدن موضعی پوسته کروی و (3) شکستگی در اتصالات بین ستون ها و پوسته کروی. از آنجا که تمرکز تنش قابل توجه تحت انفجار بارگذاری در اتصالات تولید بین ستون و پوسته کروی است، سیستم حمایتی نقش مهمی را در کنترل خسارت سازه‌ای وارده به مخزن کروی ایفا می کند.

✓ انرژی داخلی اولیه بدست آمده از انفجار در مخزن های کروی یک عامل کلیدی است که منجر به خسارات گسترده و باعث تغییر شکل های بزرگ در سازه می شود. از سوی دیگر، جابه جایی مخزن وابسته به انرژی جنبشی اولیه است. از آنجا که مایع ذخیره شده در مخزن می تواند انرژی ایجاد شده از اصابت انفجار را جذب نماید، پاسخ مخزن کروی می تواند در مراحل اولیه پس از اصابت کاهش یابد.

تشکر و قدردانی

مولفان از حمایت مالی از بنیاد علوم طبیعی ملی چین (شماره گرنت 51108141) و بنیاد علوم طبیعی استان هیلونگجیانگ چین (شماره گرنت QC2011C064) تشکر و قدردانی می نمایند.

References

- Abbasi, T., Abbasi, S.A., 2007. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): mechanism, consequence assessment, management. *J. Hazard Mater.* 141 (3), 489–519.
- Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J., Strehlow, R.A., 1983. *Explosion Hazards and Evaluation, Fundamental Studies in Engineering*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Chang, J.J., Lin, C.C., 2006. A study of storage tank accidents. *J. Loss Prev. Process Ind.* 19 (1), 51–59.
- Chen, M., Hung, K.C., Chong, O.Y., 2005. Numerical study of water mitigation effects on blast wave. *Shock Waves* 14 (3), 217–223.
- Cowper, G.R., Symonds, P.S., 1957. Strain-hardening and Strain-rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams (No. TR C 11 28). Brown Univ Providence RI.
- Dogangun, A., Karaca, Z., Durmus, A., Sezen, H., 2009. Cause of damage and failures in silo structures. *J. Perform. Constr. Facil.* 23 (2), 65–71.
- Drosos, J.C., Tsinopoulos, S.V., Karabalis, D.L., 2005. Seismic response of spherical liquid storage tanks with a dissipative bracing system. In: 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Limassol, vol. 29, pp. 313–319.
- Evans, D.V., Linton, C.M., 1993. Sloshing frequencies. *Q. J. Mech. Appl. Math.* 46 (1), 71–87.
- Gathers, G.R., 1994. *Shock Wave Physics and Equation of State Modelling*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore.
- James, R.W., Raba, G.W., 1991. Behavior of welded steel water-storage tank. *J. Struct. Eng.* 117 (1), 61–79.
- Jan, S., 2003. Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards. *J. Hazard Mater.* 96 (2–3), 189–200.
- Karamanos, S.A., Patkas, L.A., Platyrrachos, M.A., 2006. Sloshing effects on the seismic design of horizontal-cylindrical and spherical industrial vessels. *J. Press. Vessel Technol.* 128 (3), 328–340.
- Kim, J.S., An, D.H., Lee, S.Y., Lee, B.Y., 2009. A failure analysis of fillet joint cracking in an oil storage tank. *J. Loss Prev. Process Ind.* 22 (6), 845–849.
- Korkmaz, K.A., Sari, A., Carhoglu, A.I., 2011. Seismic risk assessment of storage tanks in Turkish industrial facilities. *J. Loss Prev. Process Ind.* 24 (4), 314–320.
- Lee, E., Finger, M., Collins, W., 1973. *JWL Equation of State Coefficients for High Explosives* (No. UCID-16189).
- Lees, F.P., 1996. *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. Butterworth-Heinemann.
- Lieb, J.M., 2002. Recent developments in API storage tank standards to improve spill prevention and leak detection/prevention. In: *Proceedings of the US EPA Fourth Biennial Freshwater Spills*.
- Lobato, J., Canizares, P., Rodrigo, M.A., Saez, C., Linares, J.J., 2006. A comparison of hydrogen cloud explosion models and the study of the vulnerability of the damage caused by an explosion of H₂. *Int. J. Hydrog. Energy* 31 (12), 1780–1790.
- LSTC, 2007. *LS-DYNA Keyword User's Manual Version 971*. Livermore Software Technology Corporation.
- Lu, S.Z., Wang, W., 2012. Study of destruction mechanism of floating-roof oil tank under combustible gaseous explosion in a small scale experiment. *Appl. Mech. Mater.* 137, 65–71.
- Lu, S.Z., Wang, W., Zhang, B.Y., 2011a. Experimental research on destruction mechanism of large-scale floating-roof oil tank under blast loading. *Explos. Shock Waves* 2, 158–164 (in Chinese).
- Lu, S.Z., Zhang, B.Y., Wang, W., Zhang, C.W., 2011b. Experimental research on dynamic response mechanism of thin cylindrical shell under blast loading. *J. Nanjing Univ. Sci. Technol.* 5, 621–626 (in Chinese).
- Mannan, S. (Ed.), 2004. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. Butterworth-Heinemann.
- McIver, P., 1989. Sloshing frequencies for cylindrical and spherical containers filled to an arbitrary depth. *J. Fluid Mech.* 201, 243–257.
- McIver, P., McIver, M., 1993. Sloshing frequencies of longitudinal modes for a liquid contained in a trough. *J. Fluid Mech.* 252, 525–541.
- Moslemi, M., Kianoush, M.R., 2012. Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks. *Eng. Struct.* 42, 214–230.
- Patkas, L.A., Karamanos, S.A., 2007. Variational solutions for externally induced sloshing in horizontal-cylindrical and spherical vessels. *J. Eng. Mech.* 133 (6), 641–655.
- Persson, H., Lönnermark, A., 2004. *Tank Fires*. SP Report, 14.
- Planas-Cuchi, E., Salla, J.M., Casal, J., 2004. Calculating overpressure from BLEVE explosions. *J. Loss Prev. Process Ind.* 17 (6), 431–436.
- Sezen, H., Livaoglu, R., Dogangun, A., 2008. Dynamic analysis and seismic performance evaluation of above-ground liquid-containing tanks. *Eng. Struct.* 30 (3), 794–803.
- Shebeko, YuN., Bolodian, I.A., Molchanov, V.P., Deshevih, Yu., Gordienko, D.M., Smolin, I.M., Kirillov, D.S., 2007. Fire and explosion risk assessment for large-scale oil export terminal. *J. Loss Prev. Process Ind.* 20, 651–658.
- Stenberg, D.J., 1978. *Spherical Explosions and the Equation of State of Water*, UCID-2097. USA. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- Trebuña, F., Šimčák, F., Bočko, J., 2009. Failure analysis of storage tank. *Eng. Fail. Anal.* 16 (1), 26–38.
- Van den Berg, A.C., Lannoy, A., 1993. Methods for vapour cloud explosion blast modelling. *J. Hazard Mater.* 34, 151–171.
- Zhou, J.W., Fang, Q., Zhang, Y.D., 2009. Numerical analysis of fluid-solid coupling of the underground liquid-storage tanks subjected to the ground shock induced by explosions. *J. Disaster Prev. Mitig. Eng.* 1, 35–43 (in Chinese).