

شبیه‌سازی شکست مخازن CNG فولادی در پدیده ضربه با رهیافت مکانیک آسیب

پژوهش نفت

سال بیست و چهارم
شماره ۷۸
صفحه، ۴-۱۷
۱۳۹۳
تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۲/۱۵

محمد یزدانی آریاتپه^{*}، محسن آزادی^۱، محمد مشایخی^۱ و سعید ضیایی راد^۱

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان،

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

هزینه بالا و پرخطر بودن آزمایش‌های تجربی استفاده از روش‌های عددی را روی مخازن گاز طبیعی فشرده اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در مقاله حاضر با رهیافت مکانیک آسیب به بررسی اثر تصادم و آسیب ناشی از برخورد مخازن CNG فولادی تحت فشار پرداخته شده است. معیار شناسایی آسیب و قابلیت به کارگیری مجدد مخزن پس از برخورد، مطابق استاندارد سازمان توسعه استاندارد کانادا و ایالات متحده در مخازن CNG می‌باشد. شبیه‌سازی صدمات وارد بر مخزن در تصادف و سقوط خودرو با به کارگیری مدل آسیب جانسون و کوک صورت گرفته است. محاسبات در جهت‌های مختلف برخورد و با در نظر گرفتن تاثیر فشار داخل مخزن، سرعت تصادم و ارتفاع سقوط انجام شده است. انباشتگی آسیب ناشی از برخورد برای حالت‌های مختلف به دست آمده است. تحلیل‌های عددی انجام گرفته در مقاله برای حالت‌های مختلف برخورد شامل سقوط و تصادف نشان می‌دهد بیشترین آسیب در حالت برخورد عمودی ایجاد می‌شود و با تغییر زاویه برخورد از امتداد عمودی به افقی، آسیب وارده به مخزن کمتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مکانیک آسیب- مخازن CNG فولادی- برخورد- شکست- اجزای محدود

مقدمه

گاز طبیعی از نظر اقتصادی، سوختی با صرفه و کم هزینه با منابعی فراوان است و از طرف دیگر آلودگی‌های احتراق آن نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی رایج کمتر است. یک مساله اساسی هنگام استفاده از سوخت گاز طبیعی در صنایع گوناگون، ذخیره‌سازی آن است. مخازن CNG جهت ذخیره‌سازی سوخت در فشار بالا و در تجهیزاتی با سوخت گاز طبیعی فشرده^۱، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مخازن CNG با توجه به جنس به کار رفته در آن به چهار دسته تفکیک می‌شوند که عبارتند از: ۱- تمام فلزی^۲، ۲- پوسته فلزی با پوشش مواد مرکب در قسمت استوانه‌ای^۳، ۳- پوسته فلزی با پوشش کامل مواد مرکب^۴ و ۴- تمام

1. Compressed Natural Gas (CNG)
2. All-Metal
3. Metal Liner Hoop Wrapped
4. Metal Liner Fully Wrapped

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی

m.yazdaniariatape@me.iut.ac.ir

به‌کارگیری در مسایل برخورد مناسب‌تر هستند که دلیل آن را می‌توان به وابسته نبودن معادلات که سبب کاهش زمان حل می‌شود و همچنین ضرایب ماده کمتر و کالیبراسیون دقیق، نسبت داد [۵]. بنا بر پژوهش صورت گرفته توسط تنگ از میان مدل‌های آسیب بر مبنای دیدگاه شکست نرم، مدل آسیب جانسون و کوک^۵ در حوزه تنش سه‌محوری و کرنش پلاستیک معادل فرمول‌بندی شده است و می‌تواند الگوهای واقعی شکست و همزمان سرعت‌های پسماند نسبتاً صحیح را محاسبه کند و برای پیش‌بینی شکست ناشی از برخورد در سرعت بالا کارآمد است. جانسون و کوک یک مدل متشکله را برای توصیف خواص ماده تحت بارگذاری دینامیکی ارائه کردند که سطح تسلیم فون میز همراه با قانون جریان وابسته به آن در این مدل به کار رفته است. آنها به همراه مدل متشکله ماده، یک معیار شکست را برای مسایل شکست دینامیکی معرفی کردند. مدل مذکور تأثیر پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد [۶]. آنها فرض کردند کرنش شکست مشابه مدل متشکله تابع غیر وابسته‌ای از تنش سه‌محوری، نرخ کرنش و دما است. مدل متشکله، ماده و کرنش شکست جانسون و کوک به ترتیب در عبارت‌های زیر آمده است [۷ و ۸]:

$$\bar{\sigma} = [A + B \varepsilon_{pl}^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^q \right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_h}{\sigma} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right] \quad (2)$$

عبارت اولیه در براکت‌های موجود در سمت راست عبارت ۲، همان فرم معرفی شده توسط هانکوک و مکنزی است و خصوصیات ماده را تحت بارگذاری شبه استاتیک در دمای اتاق بیان می‌کند [۶]. در معادله حاضر کرنش شکست با افزایش تنش سه‌محوری کاهش می‌یابد. به طور کلی تنش سه‌محوری ثابت نبوده و حین فرآیند بارگذاری تغییر می‌کند. تابع نمایی موجود در این عبارت توسط جانسون

مواد مرکب^۱. مخازن فولادی، پرکاربردترین نوع در میان این مخازن هستند [۱ و ۲].

ایمنی، از مهم‌ترین مباحث در طراحی و تولید این مخازن است. تکنولوژی مخازن تمام فلزی نسبت به مخازن دیگر، شناخته شده‌تر می‌باشد. بنابراین قابلیت عملکرد آنها ایمن‌تر است. با توجه به اهمیت حفظ ایمنی و کاهش نگرانی کاربران تجهیزات گازسوز به دلیل حوادث ناشی از برخورد مخزن CNG با موانع به‌ویژه در اثر سوانح، لازم است شرایط برخورد مخازن قبل از به‌کارگیری مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به این که به‌طور خاص در زمینه پدیده برخورد مخازن CNG پژوهش ویژه‌ای تاکنون صورت نگرفته است، تحقیق پیش‌رو گامی مهم در این زمینه محسوب می‌شود. بکر و همکاران در سال ۱۹۹۱ برای اطمینان از حمل و نقل ایمن مخزن تحت فشار یک راکتور، تعدادی آزمایش سقوط از ارتفاع‌های متفاوت ترتیب دادند و نتایج خود را با داده‌های تحلیلی مقایسه کردند. هدف این آزمایش‌ها اثبات نتایج تحلیل سازه‌ای مجموعه است [۳].

روزنبرگ و همکاران در سال ۱۹۹۴ به منظور محاسبه فشار بحرانی و اندازه ترک‌ها برای ایجاد زوال روی مخازن تحت فشار فولادی در اثر اصابت گلوله تعدادی آزمایش انجام دادند و طبق محاسبات انجام شده بر پایه دینامیک گازها نتیجه گرفتند که میزان خروج گاز از سیلندر حین برخورد، با توجه به ناچیز بودن زمان حادثه قابل صرف نظر بوده و می‌توان فرض کرد که فشار ثابتی طی فرآیند درون مخزن وجود دارد. مطابق بررسی‌های صورت گرفته توسط پژوهشگران، فشار داخلی مخزن، انرژی جنبشی جسم برخورد کننده و ویژگی‌های مخزن از عوامل موثر در ایجاد آسیب ناشی از برخورد در مخازن تحت فشار محسوب می‌شوند [۴].

روش تحلیل مسأله

طبق بررسی‌های تنگ، و وایرزیکی از میان دیدگاه‌های مختلف شکست در فلزات مانند فاکتور شدت تنش و انتگرال J^۲، مدل المان چسبنده^۳، مدل گرسن^۴ و شکست نرم، معیارهای مبتنی بر پایه دیدگاه شکست نرم برای

1. All-Composite
2. Stress Intensity Factor and J- Integral
3. Cohesive Element Method
4. Gurson
5. Johnson and Cook
6. Residual Velocities

مشابه نرخ کرنش، تأثیر افزایش دما می‌تواند توسط نسبت کرنش شکست در دمای افزایش یافته، به کرنش شکست در دمای اتاق بررسی شود. برای رسیدن به این هدف، نمونه‌ها تا دمای خاصی گرم شده و سپس تا نقطه شکست در شرایط بارگذاری شبه استاتیکی تحت کشش قرار می‌گیرند. به همین روش می‌توان اثر نرخ کرنش را از اثر افزایش دما، بر روی شکست متمایز ساخت. همان‌طور که در عبارت ۲ مشاهده می‌شود، جانسون و کوک رابطه خطی را بین ضریب کرنش شکست و افزایش دما پیشنهاد کردند. به دلیل شکل ساده فرمولاسیون، سهولت کالیبراسیون و بازه بزرگ دسترسی به ثابت‌ها تعداد زیادی از فلزات و همچنین موجود بودن در برخی نرم افزارهای اجزای محدود، مدل جانسون و کوک کاربردهای فراوانی در مقالات پژوهشی و صنعت دارد.

شبیه‌سازی مسأله

در این بخش به مدل‌سازی و تحلیل مخزن CNG هنگام برخورد پرداخته شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها بیان شده است.

مقدمات مدل‌سازی مخزن

یک مخزن به حجم ۶۰ lit ساخت شرکت فابر^۱ ایتالیا با ارتفاع قسمت استوانه‌ای ۶۶۸ mm، قطر خارجی ۳۱۸ mm و قطر داخلی ۳۰۱/۸ mm مطابق شکل ۱ برای قسمت استوانه‌ای و عدسی‌های دو سر در شبیه‌سازی‌ها به کار رفته است. جنس مخزن، فولاد آلیاژ ۴۳۴۰ می‌باشد. ثوابت ماده و مدل آسیب جانسون و کوک برای فولاد مذکور مطابق جدول ۱ استخراج شده است [۸].

تحلیل‌ها در محیط آباکوس صریح برای حالت تصادم در امتدادهای افقی و عمودی و سقوط در امتدادهای افقی، مایل (۴۵ درجه) و قائم انجام شده است. به منظور شبکه‌بندی هدفمند، بررسی میزان آسیب وارده به مخزن در اثر ضربه و قابلیت به کارگیری مخزن پس از برخورد از استاندارد سازمان توسعه استاندارد کانادا و ایالات متحده در مخازن CNG استفاده شده است.

و کوک اعمال گردید تا بتوان مکان شکست را با منحنی پیوسته‌ای در سراسر بازه نمایش داد. آنان رشد آسیب در روند خطی را به فرم زیر ارائه نمودند [۵]:

$$D = \int_0^{\epsilon_{pt}} \frac{1}{\epsilon_f} d\epsilon_{pt} \quad (۳)$$

تحت شرایط جاری نرخ کرنش، دما، فشار و تنش معادل شکست در D برابر یک رخ خواهد داد. مدل جانسون و کوک توسط آزمون‌های کششی روی میله دایره‌ای صاف و فاق‌دار و به صورت ترکیبی در آنالیزهای تئوری یا شبیه‌سازی اجزای محدود، کالیبره می‌شود [۶]. پژوهش‌های تئوری صورت گرفته روی رشد ریز حفره‌ها و تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط بریج‌من در آزمون‌های کششی روی میله دایره‌ای، نشان داد که فشار هیدرواستاتیک تأثیر بسزایی روی حالت و کرنش شکست دارد، اما جریان پلاستیک را تغییر نمی‌دهد [۶]. تنش سه‌محوری به صورت $\sigma_{11}/\bar{\sigma}$ تعریف می‌شود و برای نشان دادن حالت تنش در عبارت ۲ به کار می‌رود. چون تنش هیدرواستاتیک تغییر ناپذیر اول تنش و تنش فون‌میزز جذر تغییر ناپذیر دوم تنش است، بنابراین مقدار تنش سه‌محوری به دستگاه مختصات وابسته نبوده و برای تغییر شکل پلاستیک بالا، مناسب است [۶].

برخورد با سرعت بالا شامل تغییر شکل پلاستیک بزرگ، نرخ کرنش بالا و افزایش دما است. بسته به نرخ کرنش‌های بالا، حرارت قابل توجهی توسط بخش بزرگی از انرژی پلاستیک تولید می‌شود که زمان کافی برای انتقال به توده ماده پیرامون خود را ندارد و این امر سبب افزایش دما می‌شود. هر دو عامل نرخ کرنش و دما به صورت آشکار در خصوصیات شکست نمونه تحت بارگذاری نقش دارند. تأثیر نرخ کرنش به صورت نسبت کرنش شکست در بارگذاری دینامیکی، به کرنش شکست تحت شرایط شبه استاتیکی و طی عملیات آزمایشگاهی به دست می‌آید. جانسون و کوک این نسبت را به صورت تابع لگاریتمی از نرخ کرنش معرفی کردند [۵]. جانسون و هولمکوئیست مقدار پارامتر D_4 را برای بیش از ده فلز پرکاربرد به دست آورده و نتیجه گرفتند که به طور کلی کرنش شکست به آرامی با نرخ کرنش افزایش می‌یابد [۶].

1. Faber

جدول ۱- ثوابت ماده برای فولاد آلیاژ ۴۳۴۰ [۸]

E (GPa)	ν	$\rho(\text{kg/m}^3)$	T_m (K)	T_0 (K)	C_v (J/kg.K)
۲۰۰	۰/۲۹	۷۸۳۰	۱۷۹۳	۲۹۳	۴۷۷
$(\text{K}^{-1})\alpha$	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
۰/۰۰۰۰۳۲	۷۹۲	۵۱۰	۰/۲۶	۰/۰۱۴	۱/۰۳
$\dot{\epsilon}_0$ (S^{-1})	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
۱	۰/۰۵	۳/۴۴	-۲/۱۲	۰/۰۰۲	۰/۶۱

و بررسی شده است.

شبیه‌سازی مخزن در تصادم

در این بخش به منظور بررسی اثر امتداد برخورد در مقدار آسیب وارده بر مخزن به تحلیل مخزن CNG در تصادم عمودی و افقی پرداخته شده است. به دلیل تقارن موجود در مساله، مدل یک دوم مخزن در نظر گرفته شده و در لبه‌های برش خورده مخزن شرط مرزی تقارن اعمال شده است. با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ در مدل‌های اجزای محدود برای شبیه‌سازی تصادم مخزن، دو سطح صلب مکعب مستطیل شکل در نظر گرفته شده است که یکی به‌عنوان تکیه‌گاه مخزن هنگام تصادف و دیگری به‌عنوان جسم برخورد کننده فرض می‌شود. به منظور بررسی تاثیر عوامل فشار داخلی مخزن و سرعت برخورد مانع بر آسیب وارده بر مخزن برای هر یک از امتدادهای شبیه‌سازی تصادم، فشار ۲۰۰ bar (فشارکاری مخزن) و ۵۰ bar به صورت یکنواخت به سطح داخلی مخزن و سرعت ۱۸۰ km/hr (سرعت بحرانی) و ۱۲۰ km/hr (حداکثر سرعت مجاز حرکت در بزرگراه) به نقطه مرجع جسم صلب برخورد کننده، اعمال شده است.

مقایسه مقدار آسیب در دو طرف مخزن هنگام برخورد نشان می‌دهد در تصادم افقی، دیواره پشت مخزن و در تصادم عمودی، عدسی مقابل انباشتگی آسیب بیشتری را نسبت به دیگر نواحی آسیب دیده تحمل کرده و ناحیه بحرانی محسوب می‌شود.

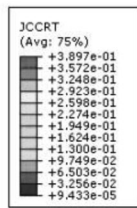
به منظور طبقه‌بندی صدمات وارد بر مخازن CNG هر خراش یا سوراخی که به دلیل حوادث مختلف در مخزن ایجاد شود، طبق دستورالعمل‌های عمومی موسسه CSA در بازرسی مخازن خودروهای گازسوز، به سه دسته زیر تقسیم می‌شود که عبارتند از [۹]:

دسته اول - چنانچه عمق آسیب حاصله کمتر یا برابر ۰/۲۵ mm باشد، مخزن نیازی به تعمیر یا تعویض ندارد.

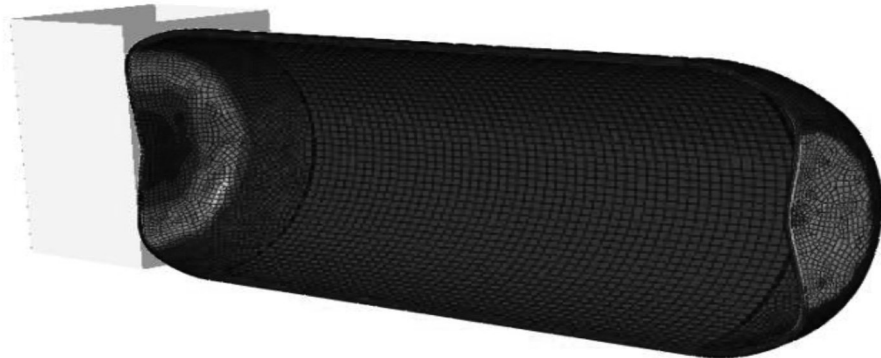
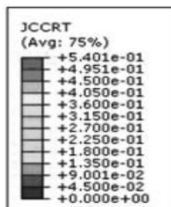
دسته دوم - چنانچه عمق آسیب حاصله بین ۰/۲۷ تا ۱/۲۷ mm باشد، مخزن باید تحت تعمیر قرار داده شود تا مجدداً مورد استفاده قرار گیرد.

دسته سوم - چنانچه عمق آسیب حاصله بیشتر از ۱/۲۷ mm باشد، مخزن غیر قابل استفاده بوده و باید تعویض شود.

بنابراین از شبکه‌بندی ریزتری تا عمق ۱/۲۷ mm از سطح بیرونی دیواره مخزن استفاده شده است. همچنین نواحی که به صورت مستقیم تحت ضربه است شبکه‌بندی ریزتری نسبت به سایر نواحی دارد که این اقدام موجب افزایش سرعت محاسبات می‌شود. در کلیه مدل‌ها از المان‌های آجری خطی، هشت گرهی با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده و ضریب اصطکاک میان تمامی سطوح ۰/۱ در نظر گرفته شده است. برای نمایش عیوب ناشی از برخورد در سطح مخزن از روش حذف المان استفاده شده است. مدت زمان فرآیند برخورد در شبیه‌سازی‌ها ۲۰ ms در نظر گرفته شده که مقدار آسیب طی این مدت به مقدار ثابتی می‌رسد. برای تمامی حالات برخورد نواحی زوال یافته در مناطق آسیب دیده بحرانی، نمودارهای آسیب و دیگر پارامترهای مؤثر در دیدگاه آسیب جانسون و کوک در نقطه‌ای از نواحی مذکور ترسیم



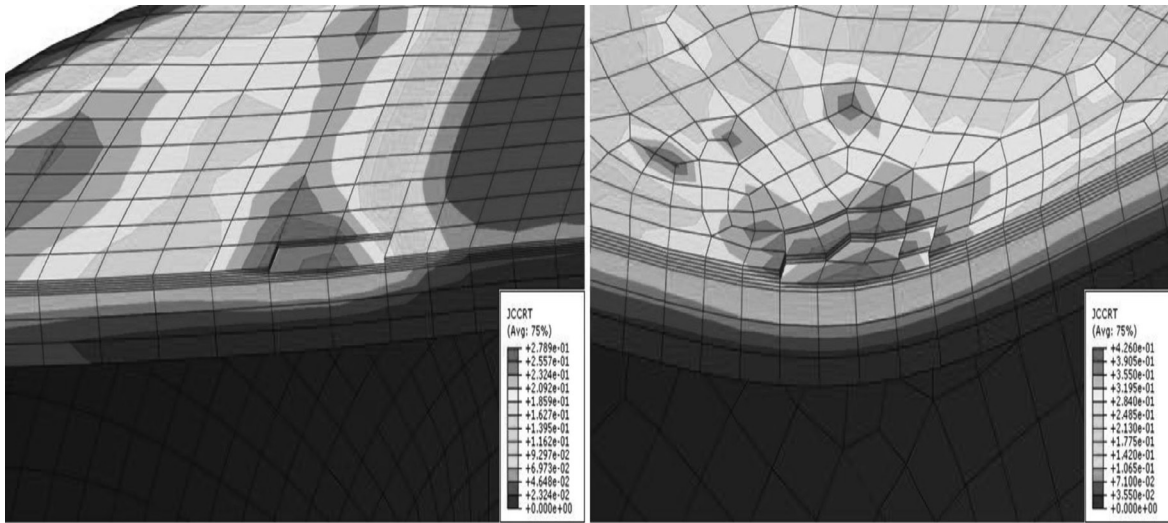
شکل ۱- مدل تغییر شکل یافته مخزن پس از تصادم افقی



شکل ۲- مدل تغییر شکل یافته مخزن پس از تصادم عمودی

و ۷ نشان می‌دهد آسیب در کلیه حالت‌ها به سرعت رشد کرده و پس از مدت کوتاهی به مقدار ثابتی می‌رسد. میزان انباشتگی آسیب برای شرایط یکسان در امتداد عمودی نسبت به افقی حدود دو برابر است. در نتیجه تعداد المان‌های حذف شده بیشتر می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت در فشار کمتر و سرعت بیشتر مقدار آسیب انباشته شده برای هر امتداد خاص بیشتر است. مقایسه تاریخچه کرنش پلاستیک معادل بین نقاط بحرانی تصادم در شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد این کمیت نیز از روندی مشابه رشد آسیب پیروی می‌کند. در این جا هم در امتداد عمودی، فشار کمتر و سرعت برخورد بالاتر، کرنش پلاستیک بیشتری ایجاد می‌نماید.

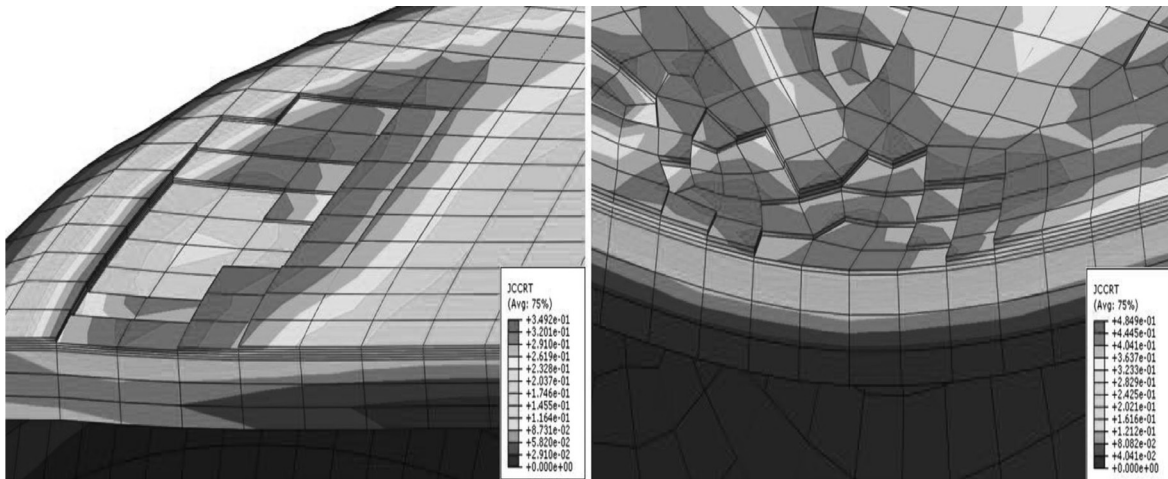
با حذف المان‌های زوال‌یافته در نواحی آسیب دیده در شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود برای تصادم افقی در فشار کاری و سرعت‌های مختلف، عمق آسیب دیدگی دیواره مخزن در مقایسه با مقادیر بیان شده در استاندارد CSA مخزن با تعمیر مجدداً قابل استفاده است. اما در فشار ۵۰ bar و سرعت ۱۸۰ km/hr عمق آسیب از مقدار مجاز فراتر رفته و مخزن از کارافتاده تلقی می‌شود. در کلیه حالت‌های تصادم قائم، عمق آسیب دیدگی دیواره مخزن از مقدار مجاز بیشتر بوده و مخزن غیر قابل استفاده می‌گردد. در فشار ۵۰ bar و شرایط یکسان، میزان عمق فرورفتگی نسبت به فشارکاری بیشتر است که نشان می‌دهد در فشار داخلی کمتر، مقدار آسیب وارده بیشتر است. شکل‌های ۶



(ب)

(الف)

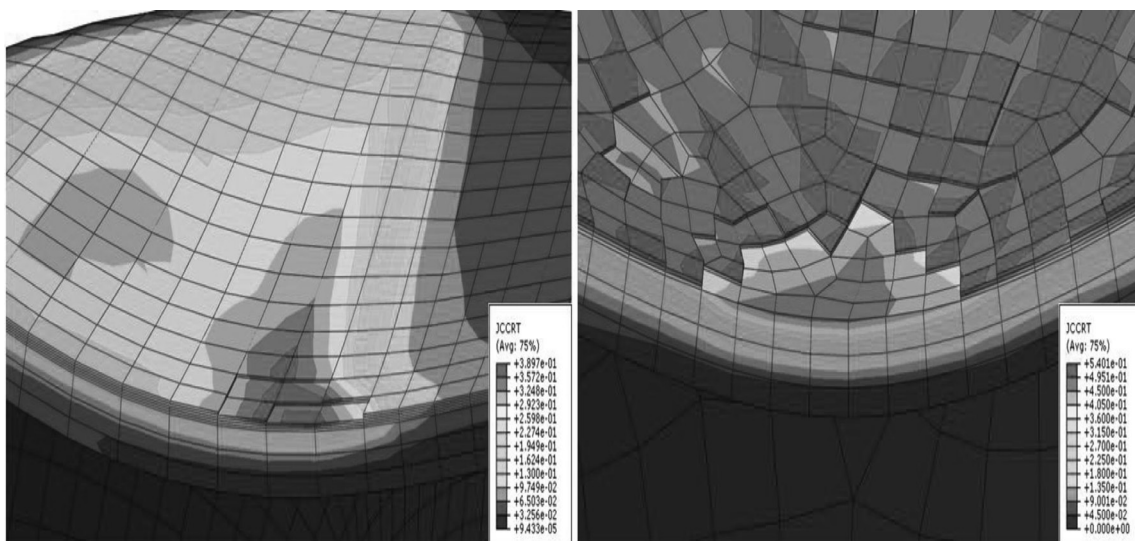
شکل ۳- ناحیه زوال‌یافته بحرانی در تصادم برای فشارکاری و سرعت ۱۲۰ km/hr (الف) امتداد عمودی و (ب) امتداد افقی



(ب)

(الف)

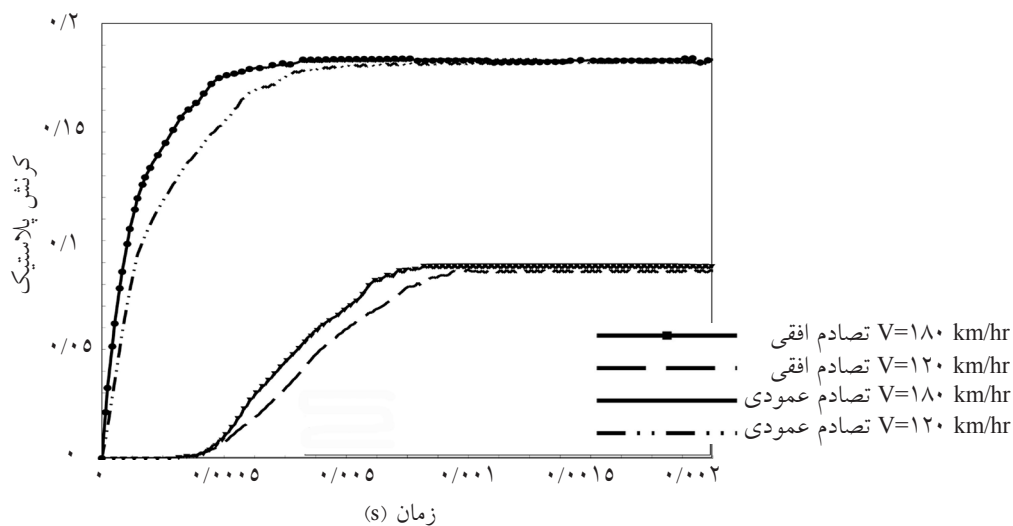
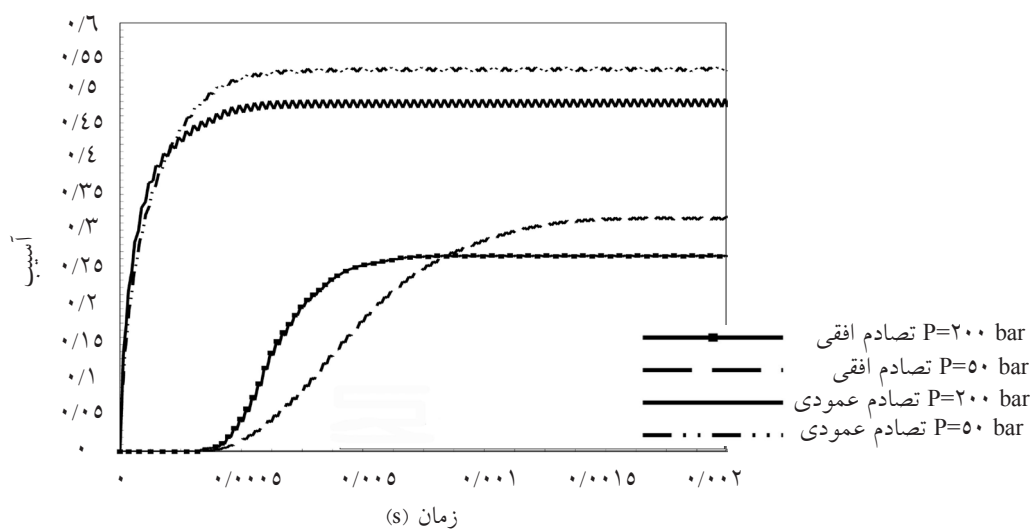
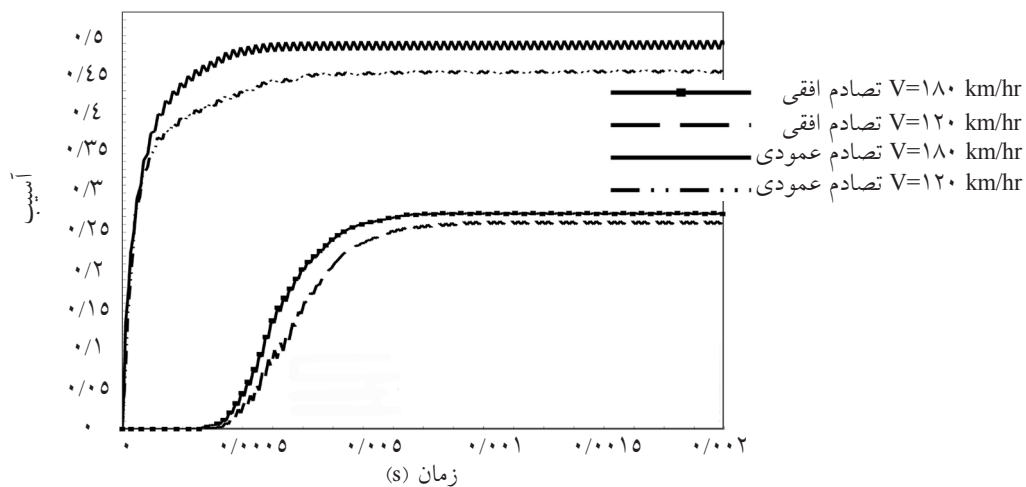
شکل ۴- ناحیه زوال‌یافته بحرانی در تصادم برای فشارکاری و سرعت ۱۸۰ km/hr (الف) امتداد عمودی و (ب) امتداد افقی

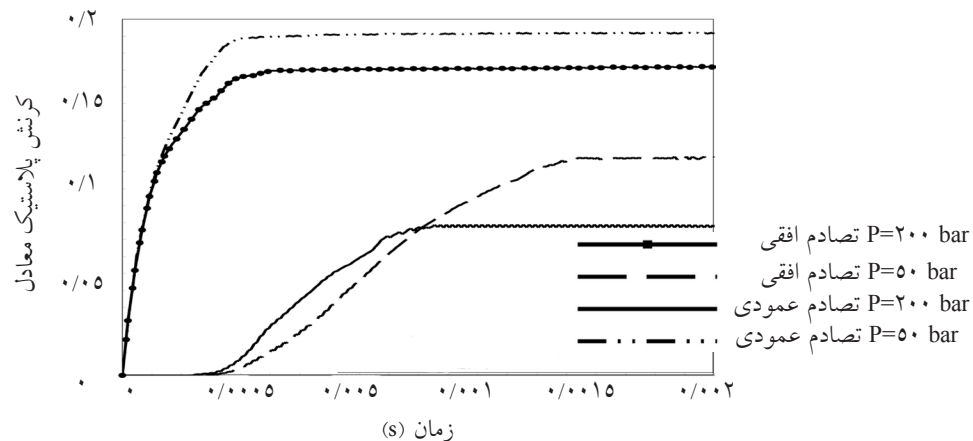


(ب)

(الف)

شکل ۵- ناحیه زوال‌یافته بحرانی در تصادم برای فشار ۵۰ bar و سرعت ۱۸۰ km/hr (الف) امتداد عمودی و (ب) امتداد افقی





شکل ۹- تغییرات زمانی کرنش پلاستیک معادل در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده بحرانی برای تصادم در سرعت ۱۸۰ km/hr

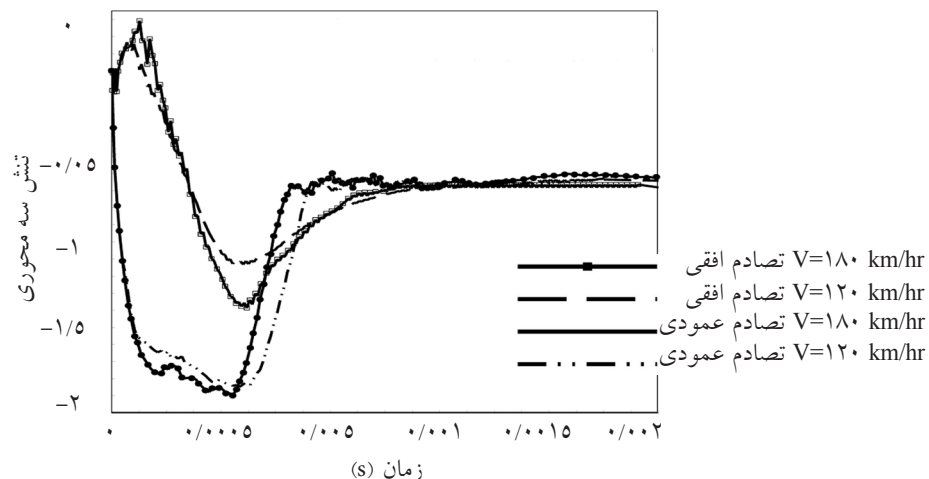
هریک از امتدادهای شبیه‌سازی به صورت سرعت اولیه به مخزن، اعمال شده است.

شکل ۱۴ برای تمامی حالت‌های سقوط افقی و مایل یکسان بوده و نشان می‌دهد در تمامی حالات سقوط افقی و مایل، عمق آسیب از حد مجاز فراتر نرفته و مخزن بدون نیاز به تعمیر قابل استفاده است. لازم به ذکر است که در فشار داخلی کمتر، رشد آسیب نسبت به حالت‌های دیگر بیشتر می‌باشد، هرچند منجر به حذف المانی از مخزن نشده است. مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶ در حالت‌هایی که مخزن در فشارکاری و ارتفاع‌های متفاوت در امتداد قائم سقوط کرده است، با توجه به مقدار عمق آسیب دیدگی، مخزن را می‌توان پس از تعمیر مجدداً مورد استفاده قرار داد. در شرایطی که مخزن با فشار داخلی ۵۰ bar از ارتفاع ۲۵ m سقوط نماید، عمق آسیب دیدگی از مقدار بحرانی فراتر رفته و مخزن قابل استفاده نخواهد بود.

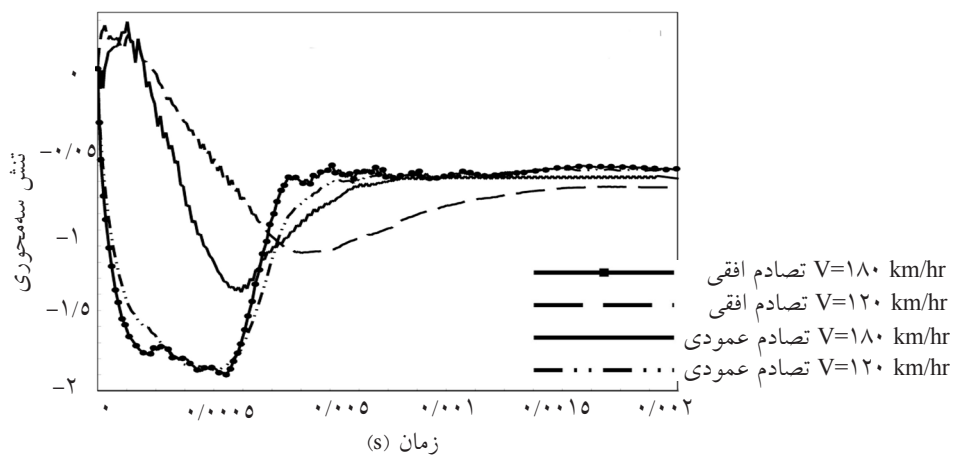
تاریخچه تنش سه‌محوری برای نواحی بحرانی امتدادهای مختلف تصادم در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد این نواحی در قسمت بزرگی از فرآیند برخورد تحت تنش سه‌محوری کمتر از ۰/۵- قرار دارند که حاکی از فشار غالب در منطقه آسیب دیده است. پس از آغاز فرآیند برخورد افت بیشتری در نمودار ناحیه بحرانی تصادم عمودی رخ داده است که این امر نشان دهنده فشار بیشتر ناشی از خمش در این جهت است.

شبیه‌سازی مخزن در سقوط

در این بخش به تحلیل مخزن CNG هنگام سقوط در امتدادهای قائم، مایل (۴۵ درجه) و افقی پرداخته شده است. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ در مدل‌های المان محدود ایجاد شده برای شبیه‌سازی مربوط به سقوط مخزن سطح صلب مکعب مستطیل شکل به عنوان سطح برخورد در نظر گرفته شده است. علاوه بر اعمال فشارهای داخلی متفاوت مشابه حالت تصادم، ارتفاع سقوط ۲۵ m و ۶ m برای



شکل ۱۰- تغییرات زمانی تنش سه‌محوری در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده بحرانی برای تصادم در فشارکاری



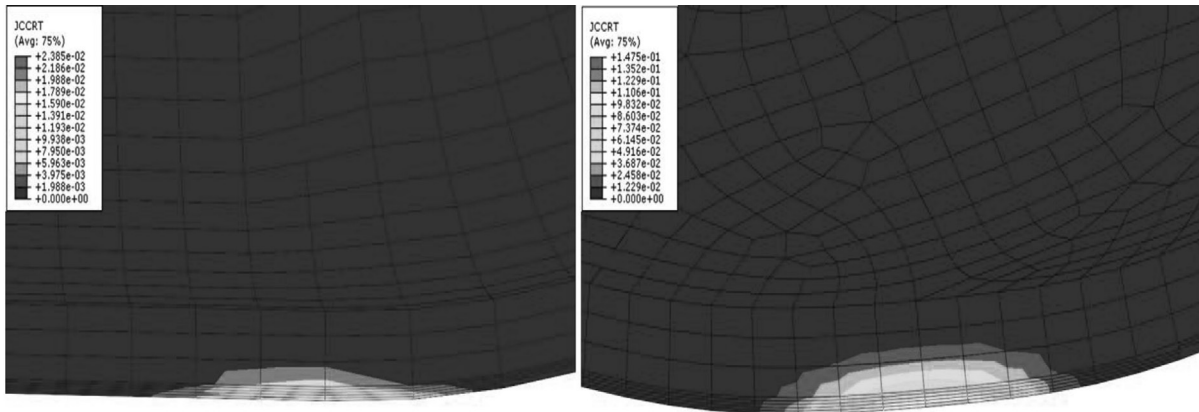
شکل ۱۱- تغییرات زمانی تنش سهمحوری در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده بحرانی برای تصادم در سرعت ۱۸۰ km/hr



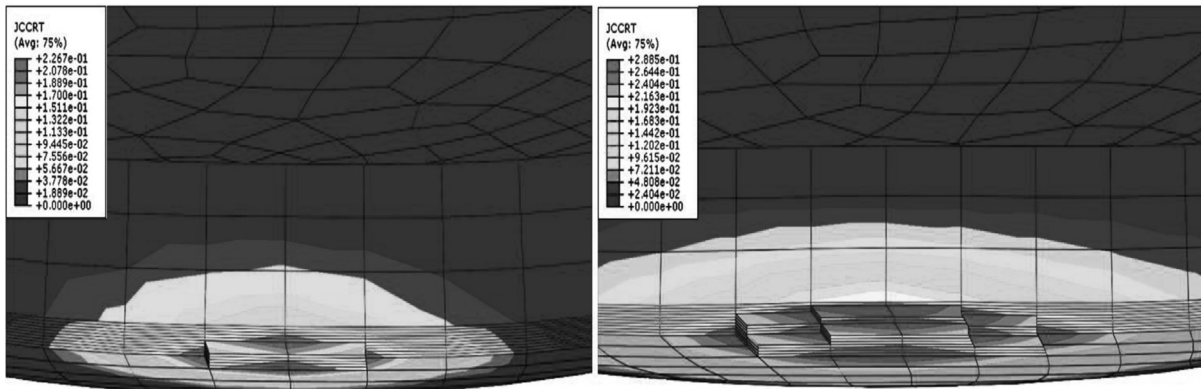
شکل ۱۲- مدل تغییر شکل یافته مخزن پس از سقوط قائم و مایل



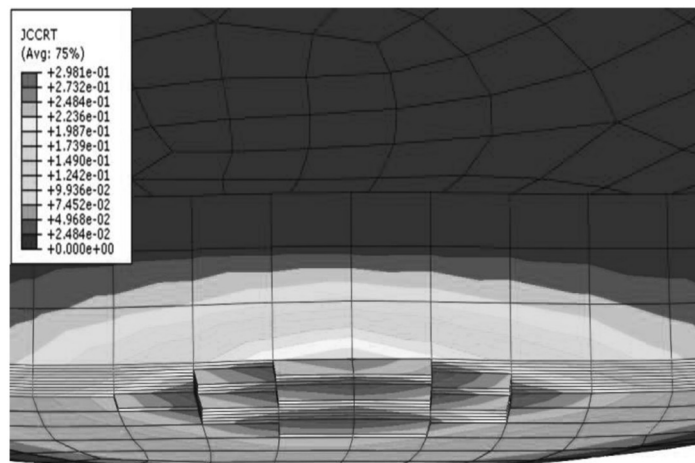
شکل ۱۳- مدل تغییر شکل یافته مخزن پس از سقوط افقی



شکل ۱۴- ناحیه بحرانی مخزن برای تمامی حالت‌های الف) سقوط مایل و ب) سقوط افقی



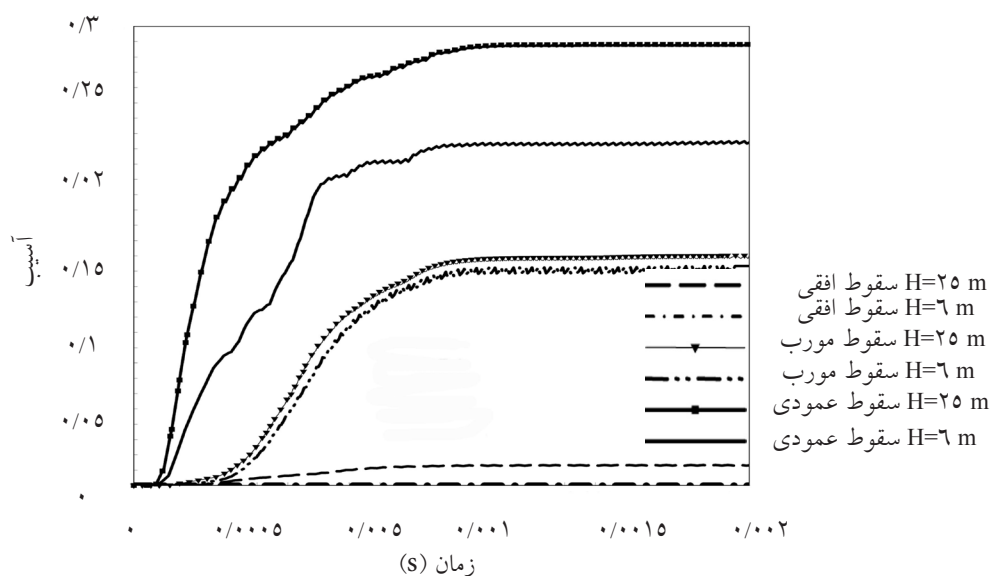
شکل ۱۵- ناحیه بحرانی مخزن در سقوط عمودی برای فشارکاری از الف) ارتفاع ۲۵ m و ب) ارتفاع ۶ m



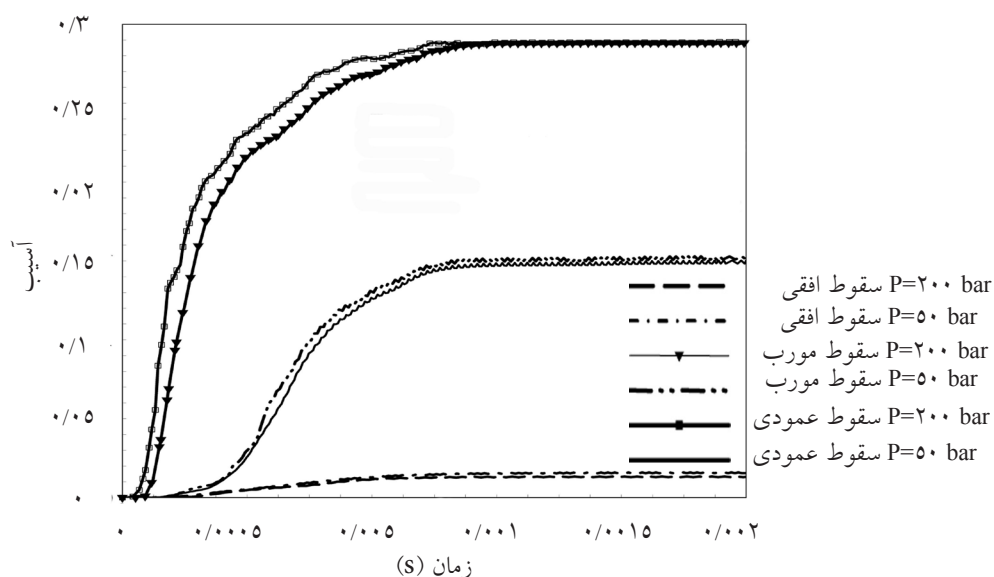
شکل ۱۶- ناحیه بحرانی مخزن در سقوط عمودی برای فشار ۵۰ bar و ارتفاع ۲۵ m

آسیب در امتداد قائم با سرعت بیشتری نسبت به امتدادهای دیگر انباشته شده و با شیب تندتری رشد کرده است که این روند نیز با کاهش زاویه برخورد کندتر شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت با کاهش فشار و افزایش ارتفاع سقوط، آسیب در تمامی جهت‌ها بیشتر شده است.

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود آسیب به سرعت رشد کرده و در نهایت به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین مقدار آسیب انباشته شده طی شرایط یکسان در امتداد عمودی از امتدادهای دیگر بیشتر بوده و با تغییر زاویه برخورد از امتداد عمودی به افقی این مقدار کاهش یافته است.



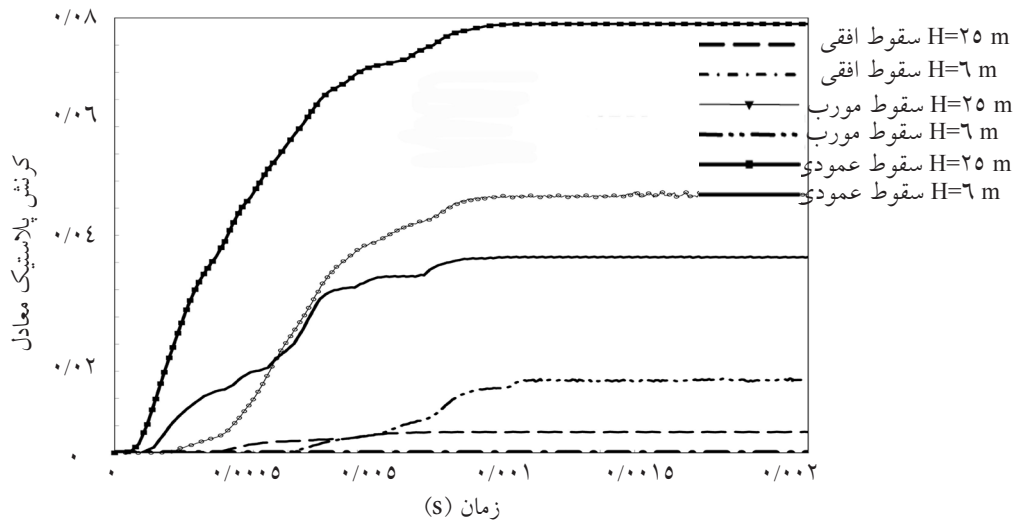
شکل ۱۷- رشد آسیب در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده برای سقوط در فشارکاری



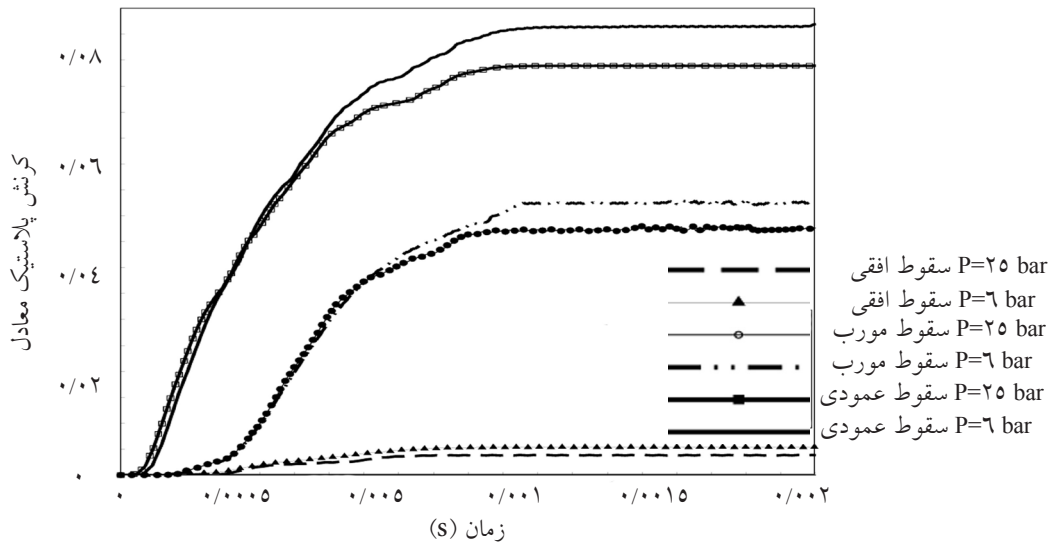
شکل ۱۸- رشد آسیب در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده برای سقوط از ارتفاع ۲۵ m

دارای افت می‌کنند که این روند در امتداد عمودی و مایل بارزتر بوده و سپس تقریباً به صفر رسیده است. افت نمودارهای تنش سه‌محوری در ناحیه آسیب دیده به دلیل فشار ناشی از خمش در اثر ضربه وارد بر جداره خارجی دیواره مخزن است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت برای هر ناحیه آسیب دیده در امتداد خاص، در فشار و سرعت بالاتر افت نمودار تنش سه‌محوری بیشتر است.

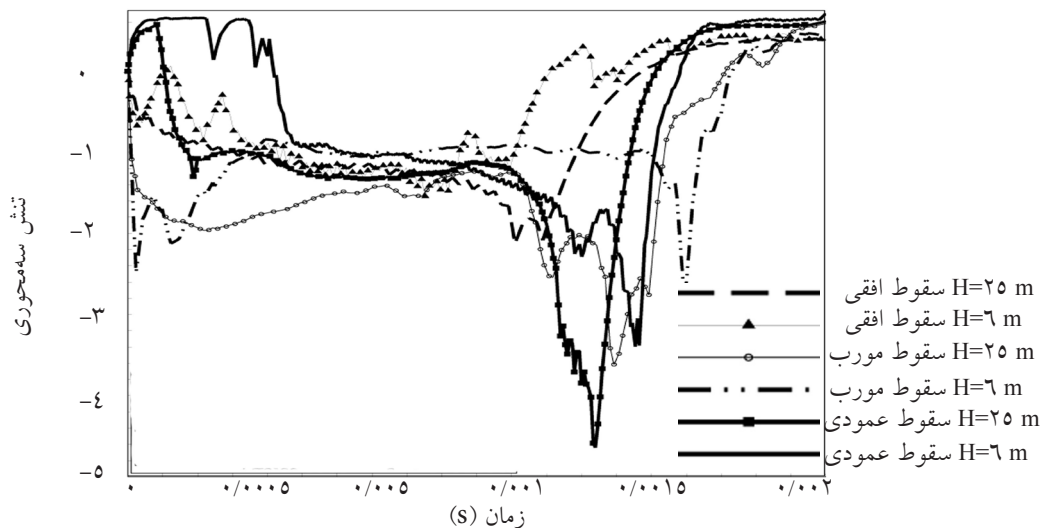
باتوجه به شکل‌های ۱۹ و ۲۰ کرنش پلاستیک معادل در حالت سقوط نیز از روندی مشابه رشد آسیب پیروی می‌کند. در این جا هم در امتداد عمودی، در فشار کمتر و ارتفاع سقوط بالاتر، کرنش پلاستیک بیشتری ایجاد می‌شود. با توجه به شکل‌های ۲۱ و ۲۲ تنش سه‌محوری در قسمت بزرگی از زمان برخورد منفی است که نشان می‌دهد ناحیه آسیب دیده به طور غالب تحت فشار است. کلیه نمودارهای تنش سه‌محوری در بازه زمانی ۱/۱ تا ۱/۷ m/s



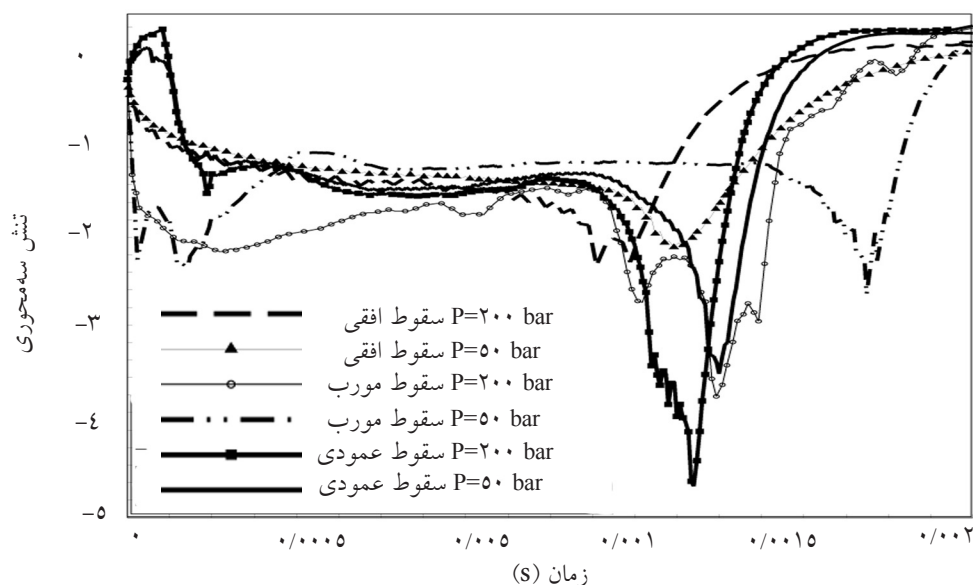
شکل ۱۹- تغییرات زمانی کرنش پلاستیک معادل در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده برای سقوط در فشارکاری



شکل ۲۰- تغییرات زمانی کرنش پلاستیک معادل در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده برای سقوط از ارتفاع ۲۵ m



شکل ۲۱- تغییرات زمانی تنش سهمحوری در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده برای سقوط در فشارکاری



شکل ۲۲- تغییرات تنش سهمحوری در نقطه‌ای از ناحیه آسیب دیده برای سقوط از ارتفاع ۲۵ m

نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از مکانیک آسیب به بررسی اثر امتداد، سرعت برخورد، فشار داخلی و ارتفاع سقوط در آسیب وارد بر مخازن CNG فولادی هنگام برخورد پرداخته شده است. بررسی نمودارها نشان می‌دهد بیشترین مقدار کمیت آسیب در جهت عمودی ایجاد شده و با تغییر زاویه برخورد از امتداد عمودی به افقی، صدمه وارده کمتر خواهد شد.

با حذف المان‌های آسیب دیده و مقایسه عمق آسیب دیدگی ناشی از برخورد، با استاندارد CSA مشاهده می‌شود که در بیشتر حالت‌های تصادم و سقوط عمودی، مخزن قابلیت استفاده مجدد را از دست می‌دهد. در صورتی که در حالت‌های برخورد افقی، مخزن بدون عیب باقی مانده و یا با تعمیر، قابلیت به کارگیری مجدد را داراست. بنابر نتایج به دست آمده، در تصادم افقی به دیواره پشتی مخزن و در تصادم عمودی به عدسی مقابل مخزن، آسیب بیشتری وارد شده و ناحیه بحرانی برخورد محسوب می‌شود. برای یک جهت خاص هنگام برخورد، در فشار داخلی کمتر، سرعت برخورد بیشتر و ارتفاع سقوط بالاتر، صدمه وارده بیشتر خواهد بود. همچنین نواحی آسیب دیده به صورت غالب تحت فشار هستند و کرنش پلاستیک بالایی را متحمل شده‌اند.

فهرست علائم

- A : ثابت مدل ماده (MPa)
 B : ثابت مدل ماده (MPa)
 C : ثابت مدل ماده
 C_V : گرمای ویژه (J/kg.K)
 D : انباشتگی آسیب
 $D_{1...5}$: ثوابت مدل آسیب
 E : مدول الاستیسیته (GPa)
 n : ثابت مدل ماده
 q : ثابت مدل ماده
 T : دمای فعلی (K)
 T_0 : دمای اتاق (K)
 T_m : دمای ذوب ماده (K)
 α : ضریب انبساط طولی (K^{-1})
 ε_0 : کرنش پلاستیک مرجع
 ε_f : کرنش شکست
 ε_{pl} : کرنش پلاستیک معادل
 ρ : چگالی (Kg/m^3)
 σ_0 : تنش جریان پلاستیک (MPa)
 $\bar{\sigma}$: تنش فون میزز (MPa)
 σ_h : تنش هیدرواستاتیک (MPa)
 D : ضریب پواسون

مراجع

- [1]. Trudgeon M., *An overview of NGV cylinder safety standards*, Production and In-Service Requirements, 2005.
- [2]. Chamberlain S. S., *Development of a physics of failure model and quantitative assessment of the fire fatality risk of compressed natural gas bus cylinders*, PhD Thesis, Mechanical Engineering Department, University of Maryland, 2004.
- [3]. Becker D. L., Burgess D. M. and Lindquist M. R., "Drop testing conducted to benchmark the shipping port reactor pressure vessel package safety analysis", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 130, pp. 133-145, 1991.
- [4]. Rosenberg Z., Mironi J., Cohen A. and Levy P., "On the catastrophic failure of high-pressure vessels by projectile impact", *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 15, pp. 827-831, 1994.
- [5]. Teng X. and Wierzbicki T., "Evaluation of six fracture models in high velocity perforation", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 1653–1678, 2006.
- [6]. Teng X. *High velocity impact fracture*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [7]. Johnson G. R. and Cook W. H. "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", in: *Proceedings of the seventh international symposium on ballistics*. Hague, Netherlands, pp. 541–47, 1983.
- [8]. Johnson G. R. and Cook W. H., "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 31–48, 1985.
- [9]. CSA America Inc., "CNG fuel system inspector study guide", National Energy Technology Laboratory, U. S. Department of Energy, DE-FC26-05NT42608, pp. 27-32, 2008.