

ارزیابی آسیب پذیری اتاق کنترل بتن مسلح ضد انفجار در تأسیسات پالایشگاهی به روش همبسته اویلری - لاگرانژی

محمدرضا محمدی زاده^{۱*}، محمد علیخان محمدی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد بندرعباس

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

چکیده

اتاق کنترل محلی است که به عنوان یک مرکز عملیات، فرایندهای تولید در آن، پایش و کنترل می شوند. در طراحی اتاق های کنترل دو فاکتور اصلی باید در نظر گرفته شود. اولین فاکتور، حفاظت ساختمان اتاق کنترل در برابر خطرات احتمالی و دومین فاکتور، جانمایی اتاق کنترل و ترتیب پانل ها، جهت اطمینان از عملکرد مؤثر و ارگونومیک آن در شرایط نرمال و اضطراری می باشد که بایستی به گونه ای طراحی گردد که خطر وارده به ساکنین اتاق کنترل در حد قابل قبول بوده و جهت اهداف نگهداری و حفاظت واحد مناسب باشد. همچنین با توجه به مرتبط بودن سایر واحدهای پالایشگاهی با اتاق کنترل، ضرورت تمهیداتی ضد انفجاری برای این اتاق در نظر گرفته شود. در این پژوهش چهار تپ ستون بتنی و چهار مدل دیوار خارجی اتاق کنترل برای انفجار یک بمب ۲۵۰ کیلوگرمی در فاصله ۱۰ متر بر اساس مقررات پناهگاه سوئد طراحی شده و سپس در برابر انفجارهای ۴۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرمی در فاصله اطمینان ۴۰ متر به روش همبسته اویلری - لاگرانژی (Eulerian-Lagrangian coupling) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که روش طراحی انفجار یک عضو براساس مقدار ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله سرد ۱۰ متر براساس مقررات پناهگاه سوئد یا طراحی بر اساس فشار انفجار مشخص به دلیل نادیده گرفتن اثرات زمان و ضربه انفجار محافظه کارانه نیست. بنابراین طراحی باید بر مبنای عملکرد کلی سازه بر اساس مجموعه ای از انفجارهای مختلف در فاصله دور و نزدیک صورت گیرد. همچنین با مقاوم سازی عناصر سازه ای با الیاف GFRP، سطح عملکرد مورد نیاز براساس آیین نامه ASCE برای استفاده بی وقفه، L5-1 به دست می آید.

کلیدواژه ها: اتاق کنترل، تأسیسات پالایشگاهی، انفجار، اویلری - لاگرانژی، آسیب پذیری.

۱- مقدمه

پتروشیمی، محصولات گازی و محصولات خام موجود کنترل می شود. همچنین باید به این نکته توجه کرد تمامی فرآیندهای این صنعت، وابسته به در ارتباط بودن قسمت های مختلف واحدهای پتروشیمی است. باتوجه به نفت خیز بودن و وجود سرمایه عظیم در کشور ایران، لازم است طراحی این نوع از سازه ها با دقت بیشتری انجام شود. در پالایشگاه های پتروشیمی، ساختمان های بسیار پرجمعیت (به عنوان مثال، اتاق های کنترل) باید تا آنجا که امکان دارد، در خلاف جهت باد و دور از مناطق ذخیره سازی واقع شوند، جایی که تحت تأثیر حادثه در این مکان ها قرار نگیرند. این مسئله در تضاد مستقیم با محل فنی ایده آل برای یک ساختمان اتاق کنترل می باشد. با جانمایی اتاق کنترل در وسط سایت پتروشیمی، هزینه های اتصال آن به کنترل و ابزار دقیق کمتر می شود و عملیات میدانی راحت تر انجام می پذیرد. در صورتی که یک اتاق کنترل با فاصله ایمن از منطقه فرآیند قرار نگیرد تا از اثرات مستقیم در اثر

به طور کلی، مطالعات مکان یابی و ارزیابی ریسک برای مدل سازی خطرات مانند آتش سوزی، انتشار سمی مواد و انفجار ابر- بخار و سایر انفجارها در کارخانه های فرآوری شیمیایی و پتروشیمی استفاده می شود. همچنین در طراحی اولیه برای هر نوع ساختمان در صنعت نفت، گاز یا پتروشیمی، تأسیسات مربوطه باید با در نظر گرفتن مراقبت از کارکنان، پیمانکاران و عموم کارگران از اثرات انفجار، آتش سوزی یا انتشار گاز سمی باشد. خطراتی مانند انفجار می تواند عواقب ویرانگری بر ساختمان ها و از دست رفتن زیرساخت ها شود و یا بخش های زیادی از یک کارخانه را از کار بیندازد (ASCE، ۲۰۱۰).

یکی از مهم ترین بخش ها در پالایشگاه های نفت و پتروشیمی، اتاق کنترل است. در این اتاق کلیه فرآیندهای تولید نفت، میعانات

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۳۱۹۸۲۶۲۱

عددی به محققان این امکان را می‌دهد تا بسیاری از پارامترهای مؤثر بر پاسخ سازه‌ها یا المان‌های سازه‌ای را بررسی نمایند. همچنین، در انفجارهای نزدیک به سازه که ابزارها غیرقابل اعتماد می‌شوند و مستعد آسیب هستند، روش‌های عددی مبتنی بر فیزیک با قابلیت بالا، بهترین روش انتخاب را برای محققان ارائه می‌دهند (Luccioni و همکاران، ۲۰۰۲).

روش‌های عددی قادر به شبیه‌سازی فرآیند انفجار و برهم‌کنش^۳ موج انفجار با المان سازه‌ای و تحلیل آن را دارا می‌باشند. علاوه بر این، نرم‌افزارهای المان محدود موجود و کدهای دینامیک سیالات محاسباتی دارای کتابخانه‌ای غنی از مدل‌های رفتاری مواد تحت بارگذاری انفجار می‌باشند. از جمله مواردی که می‌توان در مدل‌سازی عددی بررسی نمود، اثرات نرخ کرنش بالا و تکامل موج انفجار در هوا می‌باشد. نتایج تحقیقاتی که تاکنون در خصوص استفاده از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی انفجار و مطالعه پاسخ و رفتار المان‌های سازه‌ای، منتشر شده است، همبستگی خوبی را با نتایج تجربی آزمایش‌های میدانی انفجار نشان داده است.

Zhang و همکاران (۲۰۱۵) ستون‌های فولادی پر شده از بتن (CFST)^۴ را تحت بارگذاری انفجار ناشی از انفجارهای تماسی آزمایش نمودند و در نرم‌افزار (LS-DYNA) مدل‌سازی نمودند. در این تحقیق نتایج نشان می‌دهد که رفتار تجربی ستون‌های فولادی پر شده از بتن را می‌توان به‌طور عددی شبیه‌سازی کرد.

Li و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA برای مدل‌سازی ستون‌های مختلف بتن مسلح تقویت شده با FRP^۴ تحت بارگذاری انفجار، نمودارهای فشار-ضربه ستون‌ها را بر اساس ظرفیت محوری باقی‌مانده آن‌ها به‌دست آوردند.

Mollaei و همکاران (۲۰۲۱) به شبیه‌سازی عددی ستون بتنی و بررسی میزان خسارت و کاهش ظرفیت باربری ستون تحت بار انفجار پرداختند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS نشان دادند که اثرات نیروی محوری اولیه در ستون بر رفتار آن در شرایط بارگذاری انفجاری قابل توجه است که باید در هر مدل‌سازی مورد توجه قرار گیرد. همچنین به‌طور کلی، پدیده $P-\delta$ تأثیر کمتری بر روی ستون‌های با مقطع دایره‌ای نسبت به ستون‌های با مقطع مربعی داشت.

Shi و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی عددی خرد شدن ستون‌های بتنی تحت بار انفجار پرداختند. در این تحقیق یک مدل سه-بعدی شبیه‌سازی شد و در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردید. آن‌ها با یک شبیه‌سازی قدرتمند به بررسی پارامترهای مختلف ستون تحت بار انفجار پرداختند. در مدل‌سازی

حادثه که در آنالیز ریسک تشخیص داده می‌شود، دور باشد، باید با مقاومت در برابر آتش، مقاومت در برابر انفجار و محافظت در برابر ورود بخارات سمی متناسب با قرار گرفتن در معرض آن، طراحی شود. در جانمایی اتاق کنترل در محوطه یک پتروشیمی باید نکات زیر را در نظر گرفت:

(الف) ضلع کوتاه ساختمان باید مقابل هر منبع انفجاری بالقوه قرار داشته باشد.

(ب) ساختمان‌های مسکونی که برای عملیات ضروری نیستند تا آنجا که ممکن است باید از محل عملیات پالایشگاهی با فاصله ایمن واقع شده باشند.

(ج) ساختمان‌ها باید دور از محل ازدحام و محاصره و همچنین مکان‌هایی که پتانسیل ایجاد نیروهای انفجاری از انفجار را دارند، جانمایی شوند.

(د) ساختمان‌ها نباید در جهت باد و خارج شدن گازهای آلوده قرار گیرند.

(ت) ساختمان‌ها نباید در مسیر زهکشی یا ارتفاعات کم (جایی که مایعات سمی ممکن است جمع شوند)، قرار گیرند (National Fire Protection Association، ۲۰۱۴).

تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه طراحی عناصر مختلف سازه ضد انفجار انجام پذیرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. اما با توجه به غیرقابل پیش‌بینی بودن بار انفجار و عدم قطعیت‌ها در این خصوص، تحقیقات بیشتری باید صورت پذیرد. در گذشته در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار یا عناصر سازه‌ای، بار انفجار به‌صورت یک بار گسترده یکنواخت بر سازه یا عناصر سازه‌ای اعمال می‌شد. این فرض بر این استوار است که اجزای ساختمان یا کل سازه تحت بارگذاری انفجارهای دور از سازه (یا در ساقه ماخ ناشی از انفجار در سطح زمین) قرار می‌گیرند (Walters، ۲۰۰۲). زیرا یکی از فرضیات مهم در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار این است که انفجار در نزدیکی سازه رخ نخواهد داد. مفروضات بارگذاری یکنواخت، استفاده از مدل دینامیکی یک درجه آزادی (SDOF)^۱ را برای مطالعه رفتار المان‌های سازه‌ای در معرض بارگذاری انفجار امکان‌پذیر می‌کند. با این حال، در بیشتر موارد، اجزای ساختمان با بارهای غیرخطی بارگذاری می‌شوند. آزمایش‌های میدانی انفجار در مقایسه با سایر آزمایش‌های دیگر سازه‌ای بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند. صحت و ماندگاری ابزارها و کرنش‌سنج‌ها در آزمایش‌های میدانی بسیار مهم است. برای به حداقل رساندن هزینه‌های تحقیقاتی، بسیاری از محققان برای مطالعه اثرات بارگذاری انفجار بر روی سازه‌های مختلف از روش‌های عددی مبتنی بر قوانین فیزیک استفاده می‌نمایند. صرف‌نظر از صرفه‌جویی‌های آشکار در هزینه، روش‌های

3. Concrete Filled Steel Tube

4. Fiber Reinforced Plastic

1. Single-Degree-of-Freedom

2. Interaction

انجام گرفته میزان خردشدن بتن براساس فاصله محل انفجار، میزان سختی ستون بتنی و شرایط مرزی بررسی گردید.

Altunışık و همکاران (۲۰۲۱) اثرات مقاومت بتن و بازشوها در دیوارهای میانقابلی بر پاسخ ساختمان‌های بتنی در معرض مواد منفجره را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، دو بازشو مختلف در دیوارهای میانقابلی و شش مقاومت فشاری مختلف بتن در نظر گرفته شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری بتن به میزان $22/50\%$ ، حداکثر جابه‌جایی‌ها به میزان $32/16\%$ کاهش می‌یابد. طراحی سازه‌های ضد انفجار به‌طور معمول برای یک فشار خاص تولید شده از مقدار معین انفجار در فاصله هدف (فاصله‌ای که امکان انفجار بر اساس آنالیز ریسک در آن زیاد است) صورت می‌گیرد. همچنین در اکثر آیین‌نامه‌های مربوط به صنعت نفت و پتروشیمی برای طراحی مخازن تحت بار زلزله و باد نسبت به بار انفجار، اهمیت بیشتری در نظر گرفته شده است. یکی از آیین‌نامه‌های طراحی سازه ضد انفجار، مقررات پناهگاه سوئد است که از بررسی سازه‌های تخریب شده در جنگ جهانی دوم به‌دست آمده است (Räddningsverk و Ekengren, ۱۹۹۴).

مقررات پناهگاه سوئد، طراحی پناهگاه‌های دفاع شهری در سوئد را تنظیم می‌کند و شامل الزامات مشخص شده برای این سازه‌های حفاظتی است. پناهگاه‌های دفاع غیرنظامی نه تنها برای مقاومت در برابر اثرات تسلیحات متعارف، بلکه برای مقاومت در برابر تشعشعات رادیواکتیو، جنگ شیمیایی و بیولوژیکی و گازهای انفجاری و غیره طراحی شده‌اند. با بررسی این الزامات پناهگاه‌ها باید با خطر ناچیز کشته یا مجروح شدن برای افرادی که نیاز به سرپناه دارند طراحی شده و قادر به مقاومت در برابر اثر موج فشاری تولید شده توسط یک بمب ۲۵۰ کیلوگرمی در فاصله ۱۰ متر باشد. علاوه بر این، پناهگاه باید با خطر ناچیز کشته یا مجروح شدن شدید ساکنان پناهگاه، بتواند در مقابل تأثیر ترکش ناشی از انفجار بمب مقاومت کند. همچنین الزامات طراحی مناسب و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود در برابر انفجار، می‌تواند کاهش قابل توجهی در هزینه‌ها داشته باشد. با توجه به موارد مطرح شده فوق، آنالیز و طراحی سازه‌های پالایشگاهی در برابر بار انفجار و مقاوم‌سازی اعضا آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین انفجار در فاصله دور و بارگذاری المان‌های سازه‌ای در سازه‌های بتن مسلح شامل پدیده‌هایی است که هنوز به‌خوبی شناخته نشده‌اند. به‌منظور افزایش دانش در این زمینه، مطالعه عددی حال حاضر ارائه می‌شود. لذا در این مطالعه چهار تیپ ستون بتنی اتاق کنترل و چهار

مدل دیوار خارجی اتاق کنترل برای انفجار یک بمب ۲۵۰ کیلوگرمی در فاصله ۱۰ متر بر اساس مقررات پناهگاه سوئد طراحی شده و سپس در برابر انفجارهای ۴۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرمی در فاصله اطمینان ۴۰ متر به‌روش کوپل اویلری-لاگرانژی در نرم‌افزار Autodyn مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی عددی

به‌طور کلی سه تکنیک عددی رایج برای تجزیه و تحلیل سازه‌ها در برابر انفجار استفاده می‌شود:

الف) روش‌های تحلیلی ساده مانند نمودارهای فشار-ضربه (PI)^۹، تحلیل دینامیکی یک درجه آزادی (SDOF)^{۱۰} یا چند درجه آزادی (MDOF)^{۱۱} با استفاده از پارامترهای بار (فشار بازتاب) انفجار به‌دست آمده از نمودارها و روابط تجربی ارائه شده توسط آیین‌نامه (Department of Defense) UFC-3-340-02, ۲۰۰۸).

ب) تجزیه و تحلیل اجزای محدود غیرخطی که پارامترهای بار انفجار را از معادلات و نمودارهای تجربی آیین‌نامه استخراج می‌کند،

ج) برنامه‌های تحلیل المان محدود با استفاده از حلگر صریح فرایند انفجار، انتشار موج انفجار و برهم کنش سیال و سازه (FSI)^{۱۲} را بررسی می‌کند (Larcher و همکاران، ۲۰۱۴).

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Autodyn و استفاده از حلگر صریح، انتشار موج انفجار و اندرکنش موج با سازه بررسی می‌شود. اگر چه اندرکنش سیال و سازه نیازمند المان‌بندی دقیق و میزان محاسبات زیاد است اما می‌توان با استفاده از تکنولوژی نگاشت^۹ و استفاده از محاسبات در فضای ابری^{۱۰} تا میزان قابل قبولی این مشکل را برطرف نمود.

۳- مدل مواد

بار انفجار یک بار دینامیکی مانند بار زلزله است اما تفاوت اصلی بار انفجار با بار زلزله، مدت زمان اعمال بار است. در بار انفجار به‌دلیل سرعت زیاد اعمال بار به سازه، فرصت میراشدن وجود ندارد. همچنین مقاومت مواد مختلف تحت بارگذاری‌های سریع افزایش می‌یابد. برای رفع این مشکل، دو راهکار استفاده از ضریب افزایش دینامیکی^{۱۱} یا استفاده از مدل‌های مقاومت^{۱۲} با در نظر گرفتن نرخ کرنش پیشنهاد می‌شود. بخش‌های زیر پارامترهای مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده را ارائه می‌دهند (Forni و همکاران، ۲۰۱۷).

9. Mapping Technology
10. High computing in Cloud Space
11. Dynamic Increase Factor
12. Strength Model

5. Pressure-Impulse Diagram
6. Single- Degree-of-Freedom
7. Multi-Degree-of-Freedom
8. Fluid Structure Interaction

۳-۱- مدل مقاومت بتن

به دلیل اعمال سریع بار انفجار بر روی سازه و ایجاد تغییر شکل در سازه در زمان اندک (حدود ۲۰۰ میلی ثانیه)، اثرات نرخ کرنش بر روی بتن تحت بارگذاری انفجار مهم است. بنابراین باید در هر مدل رفتاری موادی که در شبیه سازی های نرخ کرنش بالا در نظر گرفته می شود، اثر نرخ کرنش لحاظ شود (Wu و همکاران، ۲۰۲۰).

در این مطالعه مدل مواد RHT^{۱۳} (مدل مقاومت) برای بتن در نظر گرفته شده است. روابط (۱) تا (۶) برای به دست آوردن تنش در بتن مورد استفاده قرار می گیرد که در آن f_c ، مقاومت فشاری تک محوری است، A ثابت سطح شکست و N ، توان سطح شکست است. P_{spall}^* مقاومت شکست نرمال شده $(P_{spall}^* = P^*(\frac{f_t}{f_c}))$ که در آن f_t مقاومت کششی محوری است. همچنین در رابطه (۱)، $r_3(\theta)$ تابعی از تغییرناپذیرهای تانسور تنش انحرافی و ψ نسبت نصف النهار براساس روابط (۳) تا (۵) محاسبه می شوند. که در این روابط J_2 و J_3 دومین و سومین تغییرناپذیرهای تانسور تنش انحرافی هستند. همچنین Q نسبت نصف النهار کششی به فشاری و B ثابت ماده بتن می باشد.

$F_{rate}(\dot{\epsilon})$ فاکتور سخت شونده گی کرنش است و با دو شرط مختلف برای فشار و کشش در رابطه (۶) ارائه شده است. که در آن P^* ، فشار هیدرواستاتیکی، α ، توان نرخ کرنش فشاری و δ ، توان نرخ کرنش کششی و $\dot{\epsilon}_0$ ، نرخ کرنش اولیه است. در جدول (۱) برای بتن با مقاومت فشاری ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال، پارامترهای بتن مورد استفاده برای مدل RHT ارائه شده است (Li و همکاران، ۲۰۲۰).

$$Y_{fall} = (p^*, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_c(p^*) \times r_3(\theta) \times F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (۱)$$

$$Y_c(p^*) = f_c \times \left[A \times (p^* - P_{spall}^*) \times F_{rate}(\dot{\epsilon}) \right]^N \quad (۲)$$

$$r_3(\theta) = \frac{2(1-\psi^2)\cos\theta}{4((1-\psi^2))\cos^2\theta + (1-2\psi)^2} + \frac{(2\psi-1)\sqrt{4((1-\psi^2))\cos^2\theta + 5\psi^2 - 4\psi}}{4((1-\psi^2))\cos^2\theta + (1-2\psi)^2} \quad (۳)$$

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{(J_2)^{\frac{3}{2}}} \quad (۴)$$

$$\psi = r_t/r_c = Q + BQp^* \quad (۵)$$

$$F_{rate}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\alpha & \text{for } P^* \leq 1/3 f_c \\ \text{Compression, } \dot{\epsilon}_0 = 30 \times 10^{-6} s^{-1} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\delta & \text{for } P^* \geq 1/3 f_t \\ \text{Tension, } \dot{\epsilon}_0 = 30 \times 10^{-6} s^{-1} \end{cases} \quad (۶)$$

۳-۲- مدل مقاومت فولاد

مدل مواد جانسون- کوک^{۱۴} برای آرماتورهای طولی و عرضی (جهت مسلح کردن بتن) در شبیه سازی بر اساس روابط (۷) و (۸) استفاده شده است. مدل مقاومت جانسون- کوک، رفتار فولاد مسلح کننده در بتن را تحت بارگذاری انفجاری به طور دقیق پیش بینی می کند. در این مدل به جای استفاده از ضریب افزایش دینامیکی، منحنی تنش- کرنش حقیقی^{۱۵} را با توجه به ثابت نرخ کرنش مسئله تعریف می کند. ثابت های معادله جانسون- کوک بر اساس تست میله هایپکینسون^{۱۶} به دست می آید. جدول (۱) ثابت های معادله جانسون- کوک برای فولاد A572-grade60 با تنش تسلیم ۴۲۰ مگاپاسکال را برای استفاده در شبیه سازی ارائه می دهد (Forni و همکاران، ۲۰۱۶).

$$\sigma = [A' + B' \epsilon_p^n][1 + C' \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}](1 - T^*)^m \quad (۷)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (۸)$$

در این رابطه σ تنش جریان، ϵ_p^n کرنش پلاستیک، $\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}$ نرخ کرنش پلاستیک نرمال، T دما، T_{melt} دمای ذوب ماده و T_{room} دمای محیط است. ضرایب A' ، C' ، B' ، n ، m ، $Gadoni$ و همکاران، ۲۰۱۸).

۳-۳- مدل مقاومت GFRP

در نرم افزار اتوداین خصوصیات مصالح GFRP، با استفاده از ثابت های مهندسی در ماتریس انطباق^{۱۸} قرار می گیرد (ANSYS، ۲۰۱۹). خواص مکانیکی GFRP در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است.

۳-۴- معادله حالت هوا

محیط هوایی که موج انفجار در آن انتشار یافته است با استفاده از معادله گاز ایده آل، رابطه (۹) مدل سازی شده است. در این رابطه ρ' چگالی فعلی و ρ'_0 چگالی اولیه هوا برابر با g/cm^3 ۰/۰۰۱۲۵ است. انرژی داخلی E'' ، در این مدل برای هوای

16. Hopkinson Bar test

17. Glass fiber reinformant polymer

18. Compliance matrix

13. Riedel-Hiermaier-Thoma

14. Johnson-Cook

15. True Stress-Strain

امونیوم نیترات، مقطع ستون در نظر گرفته شده، موقعیت کرنش سنج‌ها بر روی ستون شبیه‌سازی شده در فضای دوبعدی انفجار، نگاشت انفجار از دو بعد به‌روی سه بعد و پاسخ سازه را نشان می‌دهد. برای انجام شبیه‌سازی انفجار ۱۵۰ کیلوگرم ANFO در اتوداین، ابتدا انفجار در یک صفحه متقارن دوبعدی مدل‌سازی شده و به‌عنوان شرایط اولیه بر روی مدل عددی سه‌بعدی مجدداً نگاشت می‌شود. استفاده از نگاشت مدل دوبعدی در مدل سه‌بعدی باعث صرفه‌جویی در زمان اجرا و همچنین ایجاد المان مناسب برای مدل سه‌بعدی می‌شود. این روش همچنین دقت مدل عددی را افزایش می‌دهد. شعاع ماده منفجره ANFO با استفاده از رابطه (۱۱) با استفاده از وزن و چگالی ماده آمونیوم نیترات محاسبه می‌شود. شعاع ماده منفجره معادل برحسب رابطه (۱۱) برای انفجار ۱۵۰ کیلوگرم آمونیوم نیترات برابر ۳۳۵ میلی‌متر است. سپس مدل دو بعدی هوا ایجاد و با ANFO مطابق شکل (۱-پ) اشغال شده است. نقطه انفجار در شکل (۱-پ) که زمان شروع را تعیین می‌کند نیز در مدل دو بعدی قرار داده می‌شود.

شکل (۱-ت)، انتشار امواج انفجاری را از طریق مدل دوبعدی با تقارن محوری نشان می‌دهد. برای انفجار در محیط اویلری از حل گر اویلری و معادله JWL استفاده شده است. مقادیر ثابت‌های معادله JWL برای ماده منفجره آمونیوم نیترات که از کتابخانه نرم-افزار استخراج شده در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین شرایط مرزی متفاوتی در قسمت‌های مختلف مدل عددی برای نشان دادن شرایط مرزی در برنامه آزمایشی استفاده شده است. هر دو تکیه‌گاه بالا و پایین ستون همانند برنامه آزمایشگاهی، گیردار در نظر گرفته شده‌اند. لذا شرایط مرزی در نرم‌افزار اتوداین با تنظیم سرعت انتقال و چرخش گره‌ها به‌میزان صفر مطابق شکل (۲-ج) مدل-سازی شده است. برای محیط اویلری (هوای اطراف) شرایط مرزی Flow-out در نظر گرفته می‌شود شکل (۲-د). شرایط مرزی Flow-out از بازتاب انفجار به محیط داخل جلوگیری می‌کند و اجازه خروج انفجار را می‌دهد. همچنین برای زمین، این شرایط مرزی به‌منظور بازتاب کامل، در نظر گرفته نشده است. برای بتن ستون‌ها از المان هشت گرهی SOLID و برای میلگردها از المان دو گرهی BEAM استفاده شده است. برای مدل‌سازی رفتار بتن با مقاومت فشاری ۴۲ مگاپاسکال از مدل RHT-Concrete و برای مدل‌سازی رفتار فولاد سازه‌ای با تنش تسلیم ۴۴۸ مگاپاسکال از مدل جانسون-کوک بر اساس جدول (۱) با توجه به اثر انفجار بر روی نرخ کرنش مصالح به‌جای ضریب افزایش دینامیکی و تعریف منحنی رفتاری بتن و فولاد استفاده شده است. برای به‌دست آوردن پاسخ ستون، کرنش سنج‌هایی بر اساس شکل (۱-ج) در روی ستون تعبیه شده است. شکل (۱-ث) نگاشت دوبعدی به

استاندارد (kJ/m^3) ۲۵۳/۵ و نسبت حرارتی ویژه γ برابر ۱/۴ فرض شده است. در طی پروسه شبیه‌سازی، انرژی داخلی محیط هوا با فشار اتمسفر ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال آغاز می‌شود (فشار اتمسفر) (Bighlarkhani و همکاران، ۲۰۱۷).

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho'}{\rho_0} E'' \quad (9)$$

۵-۳- معادله حالت ماده منفجره

معادله حالت (JWL) ^{۱۹}، در نرم‌افزار ANSYS Autodyn با استفاده از داده‌های تجربی برای انواع مختلف مواد منفجره تنظیم شده است. برای مدل‌سازی در این مطالعه، مواد منفجره آمونیوم نیترات و TNT استفاده شده است. رابطه (۱۰) معادله (JWL) را بیان می‌کند که در آن P ، فشار انفجار، v' ، حجم مخصوص محصولات انفجار در یک حجم واکنش نداده انفجار و E'' ، انرژی مخصوص داخلی است. همچنین پارامترهای A, B, R_1, R_2, ω ثابت‌های این معادله حالت بوده و از مشخصات ماده منفجره است (Lee و همکاران، ۱۹۷۳).

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v'} \right) e^{R_1 v'} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v'} \right) e^{R_2 v'} + \frac{\omega E''}{v'} \quad (10)$$

در جدول (۲) ثابت‌های معادله (JWL) برای دو ماده آمونیوم نیترات و TNT ارائه شده است. همچنین شعاع ماده منفجره R_E بر اساس رابطه (۱۱) در شبیه‌سازی محاسبه می‌شود که در آن W وزن ماده منفجره و ρ_0''' چگالی ماده منفجره است.

$$R_E = \sqrt[3]{\frac{3 \times W}{4 \times \pi \times \rho_0'''}} \quad (11)$$

۴- صحت‌سنجی

در این مطالعه برای صحت‌سنجی از مدل تجربی سیبا (siba، ۲۰۱۴) و Razaqpur و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده است. در تحقیقات مذکور به‌ترتیب به بررسی اثر انفجار نزدیک بر روی ستون‌های بتن آرمه با میلگردهای عرضی با فاصله‌های متفاوت و دال تقویت شده با GFRP به‌صورت تجربی پرداخته شده است.

۴-۱- بررسی ستون رو به انفجار

شکل (۱-الف) تا (۱-ج) به‌ترتیب شکل شماتیک ستون انفجار متصل به تکیه‌گاه و قرارگیری ماده منفجره به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم

Beam استفاده شده است. در مدل تقویت شده با GFRP، الیاف با ضخامت $1/3$ میلی متر با المان Shell و بر اساس ضرائب جدول (۱) مدل سازی شده اند. اندازه المان ۵ میلی متر برای تمام عناصر لاگرانژی انتخاب شده است. پیوند بین بتن و GFRP با در نظر گرفتن تنش نرمال S_N و تنش برشی مجاز چسب بین GFRP و بتن، S_S بر اساس روابط (۱۲) و (۱۳) در جدول (۱) ارائه شده است.

$$S_N = 0.447(f'_c)^{0.055} \quad (12)$$

$$S_S = 1.5\beta_W S_N \quad (13)$$

که در رابطه (۱۳) β_W برابر ۱ فرض می شود. برای انفجار $33/4$ کیلوگرم آمونیوم نیترات با شعاع 20.4 میلی متر همانند بخش قبل، ابتدا در فاصله ۳ متر از سطح دال به صورت دو بعدی مدل سازی شده و سپس به روی سه بعد نگاشت می شود. محیط سه بعدی اولیه در نظر گرفته شده به ابعاد $3000 \times 1000 \times 1000$ با اندازه المان 100 میلی متر در هر جهت اصلی بر اساس بررسی مطالعات قبلی انتخاب شده است. شکل (۲-پ) تا (۲-ج) به ترتیب کانتور تنش (خرابی)، رشد ترک و کانتور خیز وسط دال را نشان می دهد. مقایسه نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی متناظر، در جدول (۳) ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که روش عددی دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی می باشد.

سه بعدی را نشان می دهد. اندرکنش بین ستون ها و ناحیه هوا (انفجار) در دستیابی به نتایج مطلوب مهم می باشد. بر این اساس، یک اندرکنش^{۲۰} کاملاً مرتبط برای هر دو بخش Eulerian و Lagrangian استفاده شد. اندرکنش کامل به هوا اجازه می دهد تا انرژی انفجار را به ستون بتنی در سطح تماس بین ستون ها و هوا منتقل نماید. اتصال بین میلگرد و بتن به صورت کامل و بدون لغزش در نظر گرفته شده است. جدول (۳) مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی برای ستون conv20 را نشان می دهد. همچنین شکل (۱-ج) و (۱-چ) به ترتیب کانتور تنش (خرابی) ایجاد شده در ستون و نمودار جابه جایی در شبیه سازی عددی را نشان می دهد.

۴-۲- بررسی دال رو به انفجار

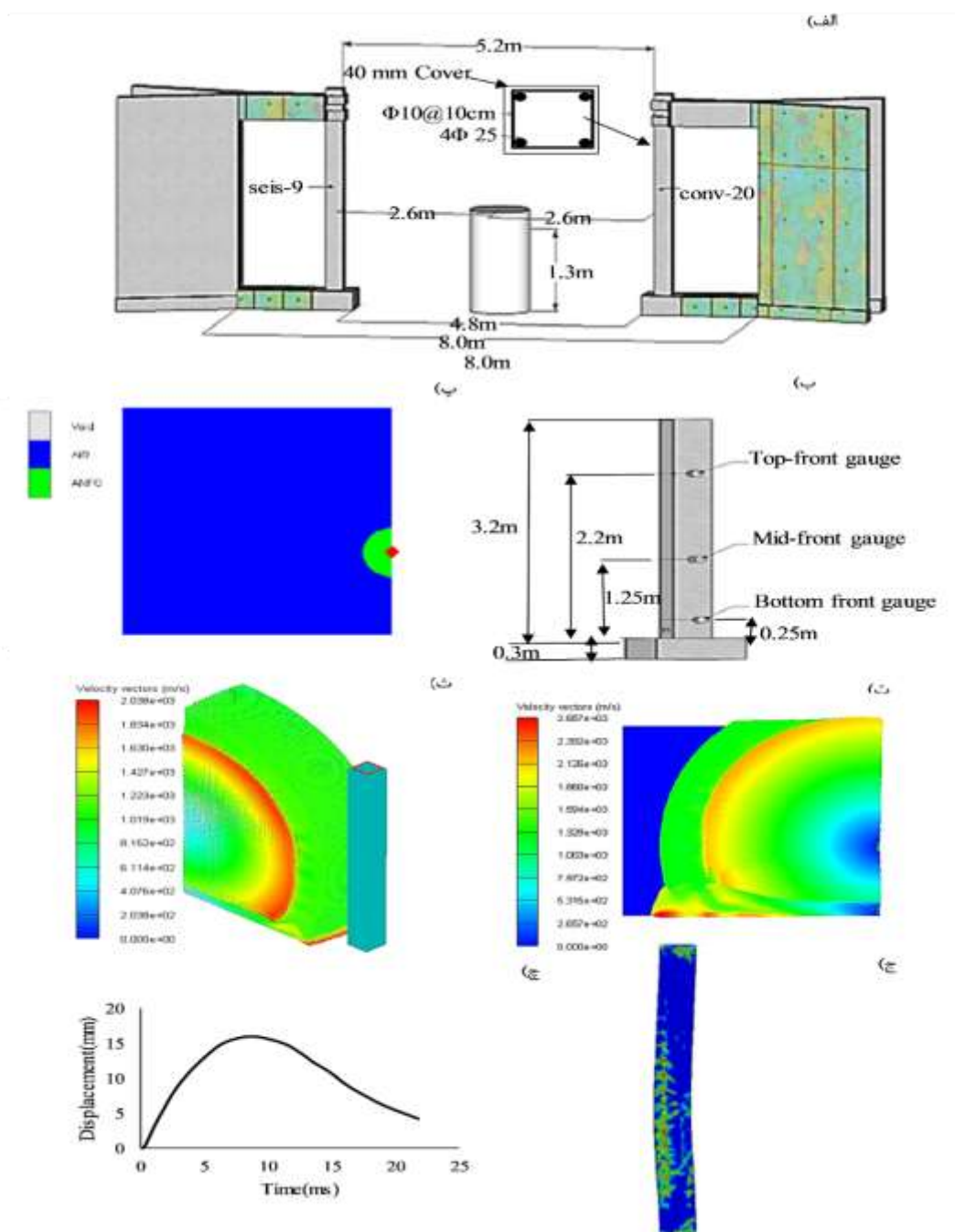
دو دال بتن آرمه در آزمایش Razaqpur و همکاران به ابعاد $70 \times 1000 \times 1000$ میلی متر تقویت نشده (CS3) و تقویت شده با دولا به الیاف یک جهته^{۲۱} عمود بر هم GFRP (90° و 0°)، (GSS4) شکل (۲-الف)، برای اعتبارسنجی انتخاب شده اند. تنش تسلیم میلگرد و مقاومت نهایی به ترتیب 448 مگاپاسکال و 600 مگاپاسکال و مقاومت فشاری 28 روزه بتن 42 مگاپاسکال گزارش شده است. برای بتن دال مانند بخش قبل از مدل مقاومت RHT و المان Solid و برای فولاد از مدل مقاومت جانسون- کوک با المان

جدول ۱- پارامترهای مواد بتن، GFRP و فولاد

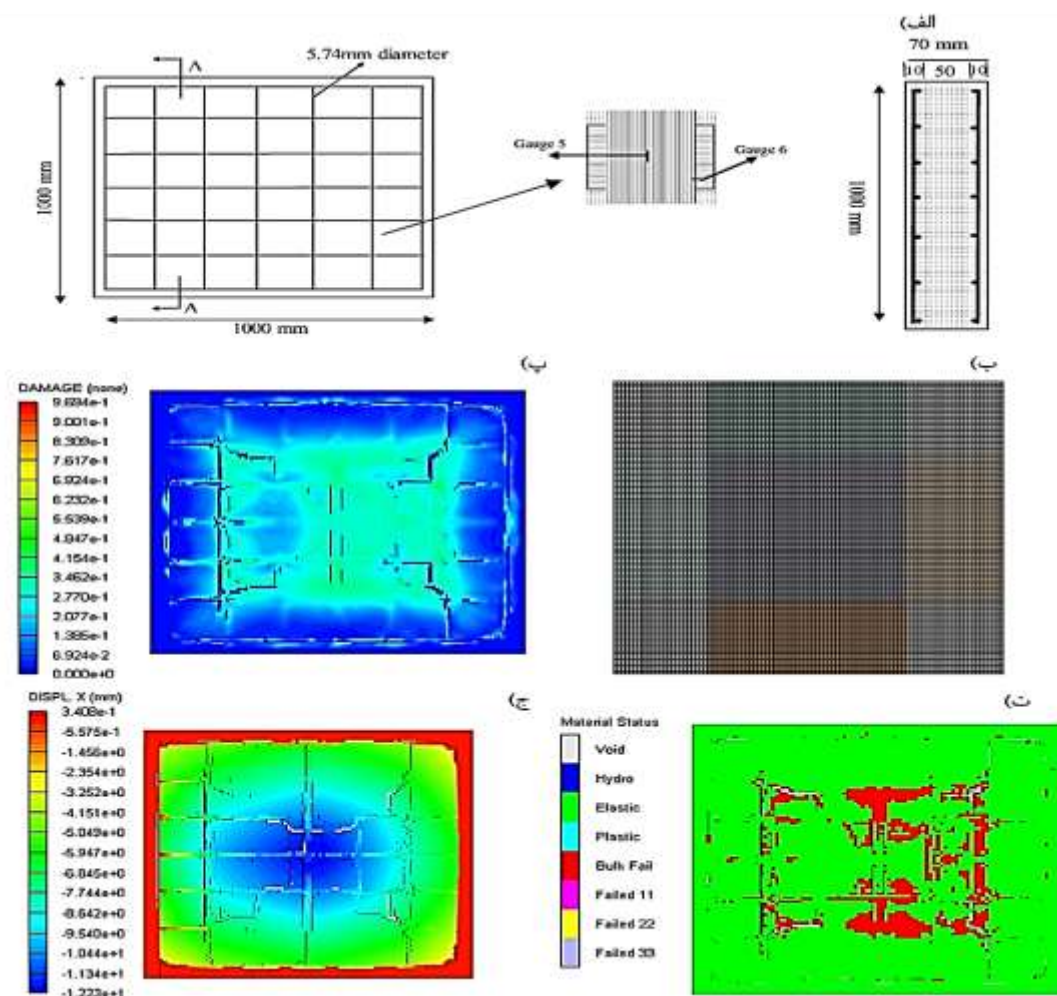
بتن (RHT)									
۰/۲۵	-	ν_{13}	نسبت پواسون	مقاومت فشاری (MPa)					
۱/۵۹	(GPa)	G_{12}	مدول برشی	۴۰	۳۵				
۱/۱۱	(GPa)	G_{23}	مدول برشی	۰/۱	۰/۱	-	(f_t/f_c)	مقاومت کششی نرمال شده	
۱/۵۹	(GPa)	G_{13}	مدول برشی	۱/۹۲	۱/۶	-	A	ثابت سطح شکست	
۲۸۲	(MPa)	f_{u11}	تنش کششی گسیختگی	۰/۷۶	۰/۶۱	-	N	توان سطح شکست	
تماس بتن و GFRP				۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۰۵	-	-	ضریب انتقال تردی به شکل پذیری	
۴	(MPa)	S_N	تنش نرمال	۲	۲	-	-	نسبت مدول برشی کشسان به مدول برشی کشسان خمیری	
۳/۱	(MPa)	S_S	تنش برشی	۰/۷	۰/۷	-	-	نسبت مقاومت کشسان به مقاومت کششی	
فولاد (J.C)				۱/۲۲	۱/۶	-	B	ثابت مقاومت شکستگی	
۴۴۸	(MPa)	A'	ثابت	۱/۶۷e7	۱/۶۷e7	(kPa)	-	مدول برشی	
۷۸۲	(MPa)	B'	ثابت	۰/۶۹	۰/۶۸۰۵	-	Q	نسبت نصف النهار کششی به فشاری	
۰/۰۲۴۷	-	C'	ثابت	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	=	α	توان نرخ کرنش فشاری	
۰/۵۶	-	n	ثابت	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	=	δ	توان نرخ کرنش کششی	
۱/۰۳	-	m	ثابت	ماده GFRP					
۱۷۹۳	K	T	دما	۱۶/۹۴	(GPa)	E_{11}	مدول الاستیسته		
				۵/۲	(GPa)	E_{22}	مدول الاستیسته		
				۵/۲	(GPa)	E_{33}	مدول الاستیسته		
				۰/۲۵	-	ν_{12}	نسبت پواسون		
				۰/۴۳		ν_{23}	نسبت پواسون		

جدول ۲- پارامترهای معادله حالت JWL

TNT	آمونیم نیترات			
۱/۶۳	۰/۹۳	$\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	ρ_0'''	چگالی
۳۳۷/۷	۴۹۴	(GPa)	A	ثابت
۳/۷۴	۱/۱۸۹	(GPa)	B	ثابت
۴/۱۵	۳/۱۹	-	R_1	ثابت
۰/۹	۱/۱	-	R_2	ثابت
۰/۳۵	۰/۳۳	-	ω	ثابت



شکل ۱- (الف) شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی، (ب) کرنش سنجهای تعبیه شده، (پ) قرارگیری ماده منفجره در محیط اویلری دوبعدی، (ت) بردار سرعت انفجار دوبعدی، (ث) نداشت دوبعدی به سه بعدی، (ج) کانتور تنش (خرابی)، (چ) نمودار جابه جایی



شکل ۲- (الف) شکل شماتیک دال، (ب) المان بندی مدل GSS4، (ج) کانتور تنش (خرابی) مدل CS3، (ت) کانتور رشد ترک CS3
 (ج) کانتور جابه جایی CS3

جدول ۳- مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و نتایج کار آزمایشگاهی

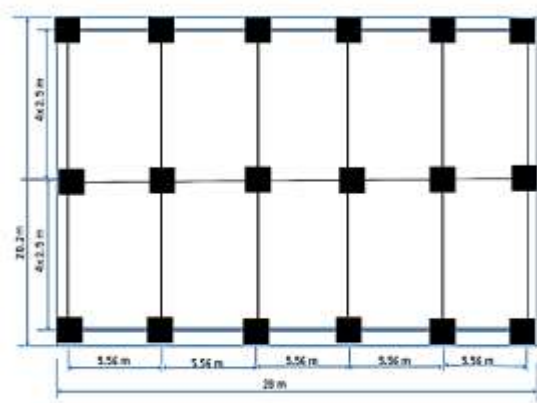
میزان خطا (%)	جابه جایی جایی عددی (mm)	جابه جایی آزمایشگاهی (mm)	فشار بازتاب آزمایشگاهی (kPa)	فشار بازتاب عددی (kPa)	ضربه بازتاب عددی (kPa - ms)	فاصله مقیاس شده $Z(\frac{m}{Kg^{1/3}})$	وزن معادل TNT	وزن ماده منفجره آمونیوم نیترات (kg)	آزمایش	نمونه
۶/۵	۱۲/۲۳	۱۳/۱۲	۵۷۱۲	۵۰۰۶	۱۶۷۷	۱	۲۷	۳۳/۴	Razaqpur و همکاران	CS2
۱۳/۸۴	۱۰/۳۶	۹/۱۰	۵۰۳۰	۵۰۰۶	۱۶۷۷	۱	۲۷	۳۳/۴	Razaqpur و همکاران	GSS4
۵/۵	۱۷	۱۸	۲۷۰۹۲	۲۷۴۱۲	۶۶۸۸	۰/۵۳	۱۲۱/۱	۱۵۰	Siba	Conv20

۵- ارزیابی اتاق کنترل در برابر انفجار

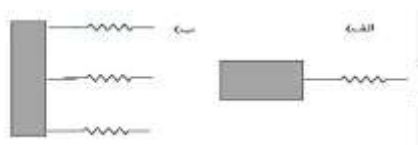
پلان اتاق کنترل در نظر گرفته شده در این مطالعه را نشان می دهد. با توجه به امکان پذیر نبودن مدل سازی کلی سازه به دلیل حجم محاسبات زیاد و زمان بر بودن به روش کوپل اوپلری- لاگرائژی، در مرحله نخست از این مطالعه، فرض بر این است که دیوار پیرامونی وجود نداشته و بار انفجارهای ۴۰۰۰، ۶۰۰۰ و

به طور کلی اتاق کنترل از دو قسمت سازه اصلی و دیوار پیرامونی تشکیل می شود. دیوار پیرامونی به عنوان اولین لایه دفاعی وظیفه محافظت از سازه اصلی در برابر انفجار را دارد. شکل (۳)،

دورپیچ کامل می باشد (جدول (۴)). برای بتن ستون ها از المان هشت گرهی SOLID و برای میلگردها از المان دو گرهی BEAM استفاده شده است. برای مدل سازی رفتار بتن با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال از مدل RHT-Concrete و برای مدل سازی رفتار فولاد سازه ای با تنش تسلیم ۴۴۸ مگاپاسکال از مدل جانسون- کوک بر اساس جدول (۱) استفاده شده است. جدول (۵) پارامترهای به دست آمده از انفجارهای مختلف را ارائه می دهد. جدول (۶) مقادیر جابه جایی نسبی طبقه را در حالات حدی آیین- نامه نشان می دهد. همچنین به منظور اعمال شرایط مرزی و ایجاد تکیه گاه صلب در پایین ستون تمام نقاط گرهی در پایین مقید می شوند. در بالای ستون به منظور ایجاد رفتار شبیه به واقعیت با استفاده از فنر با سختی به میزان مشخص مطابق با جدول (۷) ایجاد می شود.



شکل ۳- پلان اتاق کنترل در نظر گرفته شده به مساحت ۵۶۵ متر مربع



شکل ۴- مدل سازی سختی خمشی قاب پشت: الف) ستون، ب) دیوار با فنر معادل

جهت گیری لایه های الیاف GFRP مطابق شکل (۸) انجام می شود. در تمام مدل سازی ها اتصال کامل بین ورق GFRP و ستون بتنی فرض شده است. بعد از اعمال شرایط مرزی به ستون، با استفاده از حل گر Lagrange، برای اعمال محیط اولیری، ستون به اتوداین انتقال می یابد. برای این منظور از حل گر Euler-FCT چند ماده ای برای تعریف هوای اطراف دیوار و ستون انتخاب می شود و انفجار یک بعدی با سائز المان ۰/۲۵ میلی متر بر روی محیط سه- بعدی با ابعاد ۴۰×۱×۳ متر برای ستون ها و ۴۰×۲۰×۳ متر برای دیوار با اندازه المان ۱۰۰ میلی متر نگاشت می شود.

۸۰۰۰ کیلوگرم TNT به ستون وسط سازه در وجه رو به انفجار برخورد می کند. برای این منظور ۴ تیپ مختلف ستون (شامل ۲ تیپ مقاوم سازی شده با GFRP) در معرض مستقیم بار انفجار ۴۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرم TNT ارزیابی می شوند. در مرحله دوم دیوار خارجی سازه به صورت کلی برای بار انفجار ۲۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۴۰ متر طراحی و مدل سازی شده و با مقاوم سازی دیوار پیرامونی با GFRP در معرض مستقیم بار انفجار ۴۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرم TNT ارزیابی می شود. در تمامی مراحل، سختی خمشی قاب پشت ستون و دیوار به صورت فنر مدل سازی می شود (شکل (۴)). مشخصات ستون های بررسی شده در این مطالعات در جدول (۴) ارائه شده است. عناصر برابر سازه ای مانند ستون تحت بار انفجار مطابق با آیین نامه مقررات ملی مبحث ۲۱ پدافند غیرعامل (مقررات ملی پدافند غیرعامل، ۲۰۱۶) و آیین نامه طراحی پناهگاه سوئد برای انفجار ناشی از بمب ۲۵۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متر طراحی شده اند. در بررسی اتاق کنترل تحت بار انفجار، وجه رو به انفجار اتاق کنترل باید کوچک ترین بعد سازه را داشته باشد. همچنین کمترین فاصله نقطه شروع انفجار تا سازه ۴۰ متر و فاصله سازه از مخازن ۶۰ متر در نظر گرفته می شود (National Fire Protection Association، ۲۰۱۴)، در غیر این صورت اعضای سازه باید در برابر انفجارهای محتمل در آینده ارزیابی شوند. به منظور بررسی رفتار المان های ستون و دیوار اتاق کنترل در برابر بار انفجار، ابتدا هر یک از این المان ها به صورت جداگانه در برابر انفجارهای در نظر گرفته شده ۴۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۴۰ متر مورد بررسی قرار می گیرند. سپس رفتار کلی سازه و ارتباط المان ها با هم در برابر شدیدترین نوع انفجار بررسی می شود. در جدول (۵) نتایج به دست آمده از انفجار در اتوداین پس از برخورد موج ناشی از انفجار با ستون ارائه شده است. همچنین در شکل های (۵)، (۶) و (۷) تاریخچه فشار- زمان و ضربه- زمان (فشار و ضربه حادثه و بازتاب) برای انفجارهای ۲۵۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۴۰ متر را نشان می دهد. جدول (۶) میزان جابه جایی نسبی مجاز دیوار و ستون را برای حالت های حدی مختلف خرابی ارائه می دهد (ASCE، ۲۰۱۰).

۵-۱- مدل سازی عددی ستون ها

همان طور که از جدول (۴) مشاهده می شود، ۴ تیپ ستون در این مطالعه در نظر گرفته شده است. تیپ A، ستون با مقطع ۵۰×۴۰ سانتی متر با نسبت های متفاوت فولاد، تیپ B، ستون با ابعاد ۵۰×۵۰ سانتی متر با نسبت های متفاوت فولاد، تیپ C، ستون با مقطع ۵۰×۵۰ سانتی متر تقویت شده با GFRP فقط در وجه رو به انفجار ستون و تیپ D، ستون تقویت شده با GFRP به صورت

جدول ۴- ابعاد ستون های بررسی شده

عضو	تیپ	ردیف	ابعاد ستون b×h (cm)	درصد فولاد %	آرماتورهای طولی	آرماتورهای عرضی	کاور بتن (cm)	تعداد لایه GFRP ^{۲۲} برای تقویت ستون	جهت الیاف
ستون	A	۱	۵۰ × ۴۰	۲/۵	8φ29	φ10@10cm	۵	-	-
		۲	۵۰ × ۴۰	۳	12φ25	φ10@10cm	۵	-	-
		۳	۵۰ × ۴۰	۳/۲	8φ32	φ10@10cm	۵	-	-
		۴	۵۰ × ۵۰	۲	8φ29	φ10@10cm	۵	-	-
	B	۵	۵۰ × ۵۰	۲/۴	12φ25	φ10@10cm	۵	-	-
		۶	۵۰ × ۵۰	۲/۶	8φ32	φ10@10cm	۵	-	-
		۷	۵۰ × ۵۰	۲/۵	16φ22	φ10@10cm	۵	-	-
	C	۸	۵۰ × ۵۰	۲/۴	12φ25	φ10@10cm	۵	۱	(۰°)
		۹	۵۰ × ۵۰	۲/۴	12φ25	φ10@10cm	۵	۲	(۰° و ۹۰°)
		۱۰	۵۰ × ۵۰	۲/۴	12φ25	φ10@10cm	۵	۳	(۰° و ۴۵° و ۹۰°)
دیوار	D	۱۱	۵۰ × ۵۰	۲/۴	12φ25	φ10@10cm	۵	۲	دورپیچ کامل (۰° و ۹۰°)
		۱۲	۵۰ × ۵۰	۲/۴	12φ25	φ10@10cm	۵	۳	دورپیچ کامل (۰° و ۴۵° و ۹۰°)
		۱	۳۰ × ۲۰۰۰	-	φ16@20cm	φ16@20cm	۵	-	-
		۲	۳۰ × ۲۰۰۰	-	φ20@20cm	φ20@20cm	۵	-	-
دیوار	W	۳	۴۰ × ۲۰۰۰	-	φ16@20cm	φ16@20cm	۵	-	-
		۴	۳۰ × ۲۰۰۰	-	φ16@20cm	φ16@20cm	۵	۳	(۰° و ۴۵° و ۹۰°)

جدول ۵- پارامترهای به دست آمده از انفجارهای مختلف

مقدار ماده منفجره (Kg)	فاصله سرد (m)	پارامتر مقیاس $Z(\frac{m}{Kg^{1/3}})$	فشار بازتاب $P_r(kPa)$	ضربه بازتاب $I_r(kPa - ms)$	مدت تداوم انفجار $t_d^+(ms)$	سرعت موج شوک $V(m/s)$
۲۵۰	۱۰	۱/۵۹	۲۱۳۰	۳۰۴۸	۱۳/۳	۷۶۴
۴۰۰	۴۰	۲/۵۲	۵۳۵	۴۳۷۱	۳۶/۹	۵۳۰
۶۰۰	۴۰	۲/۲	۷۹۲	۵۸۷۳	۳۸/۳	۵۸۱
۸۰۰	۴۰	۲	۱۰۵۵	۷۲۶۳	۴۰/۹	۶۲۶

جدول ۶- حالت های حدی آیین نامه

حالت حدی ۱	حالت حدی ۲	حالت حدی ۳
LS-1	LS-2	LS-3
خرابی کم	خرابی متوسط	خرابی زیاد
Drift ratio	Drift ratio	Drift ratio
۰/۰۲	۰/۰۲۸	۰/۰۴

جدول ۷- سختی قاب معادل با فنر

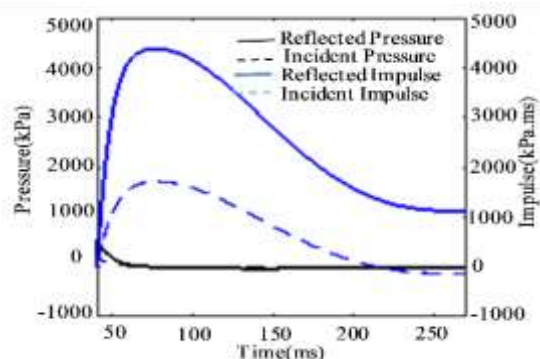
تیپ	A	B, C, D, W
$\frac{N}{mm}$ سختی	۹۴۲۳۱/۳۱	۱۸۴۰۴۵/۹

به طور کلی در محیط هوای اوپلری انفجار سه بعدی پس از از برخورد به مرز اوپلری به صورت خودکار بازتاب می شود. برای جلوگیری از این موضوع شرایط مرزی Flow-out در انتهای محیط اوپلری به منظور خروج فشار انفجار در نظر گرفته می شود. همچنین کرنش سنج هایی برای محاسبه جابه جایی در بالای ستون و دیوار در نظر گرفته شده است. برای انجام محاسبات از پردازش موازی و استفاده هم زمان از چند پردازشگر^{۲۳} لحاظ شده است. پس از اتمام شبیه سازی عددی، نموداری های جابه جایی و کانتور خرابی

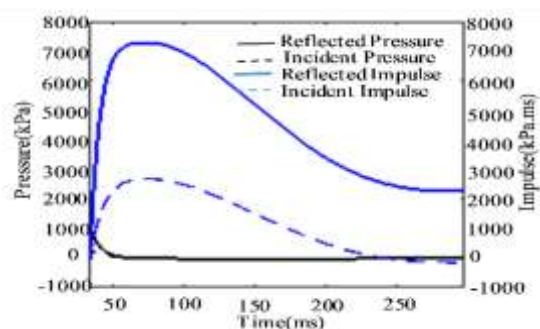
22. Glass Fiber Reinforcement Polymer

23. Parallel processing

به ترتیب نمودار جابه جایی بالای ستون B-5 بعد از انفجار ۲۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرم و کانتور تنش (خرابی) در لحظات مختلف انفجار ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT را نشان می دهد.



شکل ۶- فشار و ضربه بازتاب و حادثه به دست آمده از انفجار ۴۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله سرد ۴۰ متر



شکل ۷- فشار و ضربه بازتاب و حادثه به دست آمده از انفجار ۸۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله سرد ۴۰ متر

۶- بحث

بعد از انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی برای هر ستون و دیوار برای انفجارهای در فاصله ۴۰ متر، نتایج مربوط به حالت های حدی مختلف در جدول (۸) ارائه شده است. نتایج در جدول (۵) و (۸) نشان می دهد که استفاده از روش طراحی انفجار برای یک مقدار ماده منفجره در فاصله معین محافظه کارانه نیست.

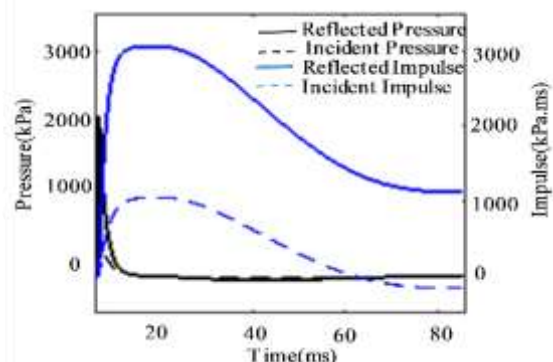
در جدول (۵) برای انفجار ناشی از ۲۵۰ کیلوگرم ماده TNT در فاصله ۱۰ متر، مقدار فشار بازتاب حدود ۲/۱ مگاپاسکال (در زمان حدود ۱۳ میلی ثانیه)، بیشتر از انفجارهای ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۴۰ متر است. اما به دلیل اثر مدت زمان بیشتر انفجارهای ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۴۰، سطح زیر نمودار فشار بازتاب- زمان که نماینده ضربه بازتاب است، از ضربه بازتاب ناشی از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متر بیشتر است. بنابراین برای طراحی اعضای سازه هایی مانند اتاق

برای ستون به دست می آید. با استفاده از نمودار جابه جایی (جابه-جایی نسبی)^{۲۴} و حالت های حدی ستون مورد ارزیابی قرار می گیرد (جدول (۸)). لازم به ذکر است که حداکثر چرخش مجاز آیین نامه برابر ۰/۰۲۸ رادیان می باشد، اما با توجه به حساسیت اتاق کنترل، حداکثر چرخش بالای ستون به میزان ۰/۰۲ رادیان محدود می شود.

جدول ۸- پاسخ سازه در برابر انفجارهای مختلف بر اساس

حالات حدی

انفجار (کیلوگرم)			تایپ	ردیف
۸۰۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰		
حالت حدی	حالت حدی	حالت حدی		
پاسخ	پاسخ	پاسخ		
LS-3	LS-3	LS-2	A	۱
LS-3	LS-3	LS-2		۲
LS-3	LS-2	LS-1		۳
LS-3	LS-2	LS-2	B	۴
LS-3	LS-2	LS-2		۵
LS-2	LS-1	LS-1		۶
LS-3	LS-2	LS-1	C	۷
LS-3	LS-2	LS-2		۸
LS-3	LS-2	LS-1		۹
LS-1	LS-1	LS-1	D	۱۰
LS-2	LS-1	LS-1		۱۱
LS-1	LS-1	LS-1		۱۲
LS-3	LS-3	LS-2	W	۱
LS-3	LS-3	LS-2		۲
LS-2	LS-2	LS-1		۳
LS-1	LS-1	LS-1		۴

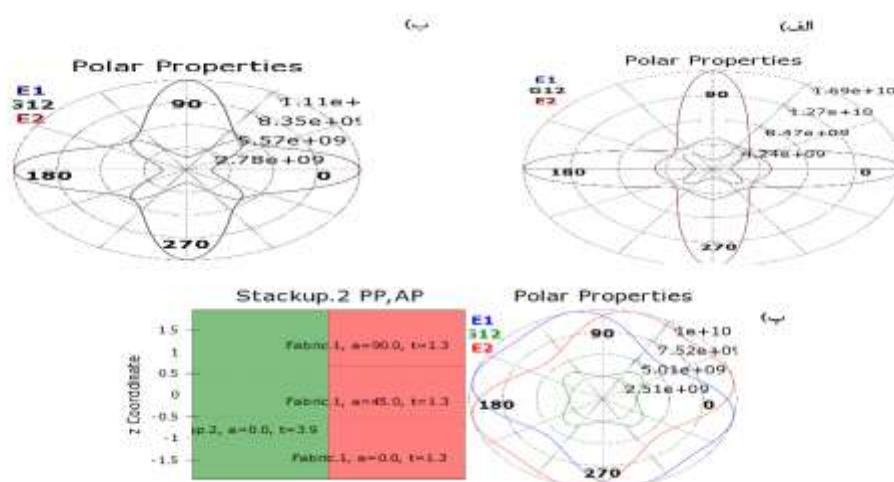


شکل ۵- فشار و ضربه بازتاب و حادثه به دست آمده از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله سرد ۱۰ متر

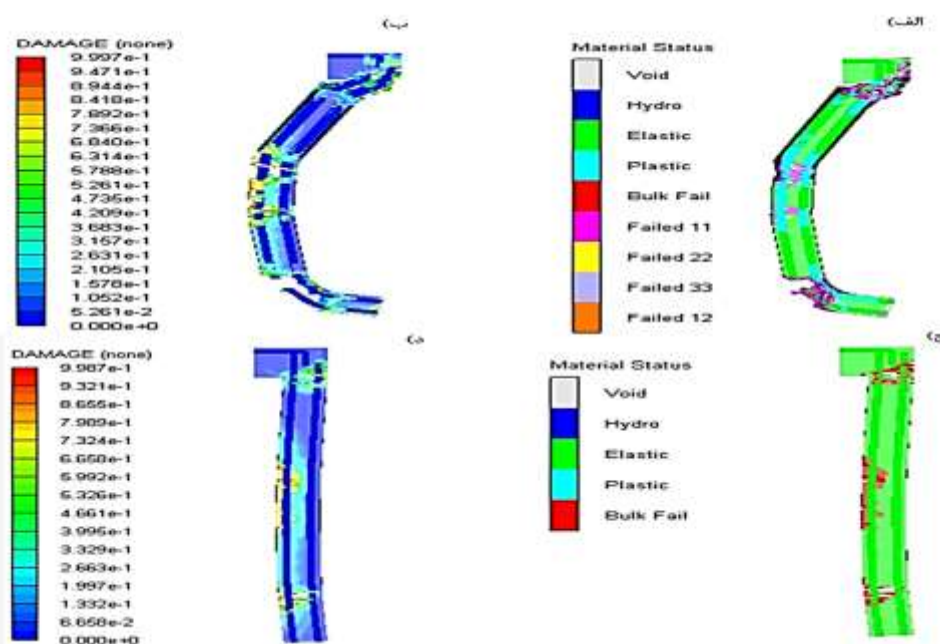
شکل (۹) کانتور تنش (خرابی) دیوار W1 بعد از برخورد انفجار ۸۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT و شکل های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲)

میزان خود می‌رسد. با توجه به فاصله زیاد انفجار سازه تا اعضای هدف و کاهش فشار و ضربه حادثه در وجوه کناری سازه اتاق کنترل (ستون‌ها و دیوارهای نزدیک به گوشه‌های سازه)، استفاده از الیاف GFRP فقط در وجه روبه انفجار اقتصادی‌تر است. اما به-طور کلی با در نظر گرفتن میزان خسارت ناشی از توقف تولید در یک پالایشگاه پتروشیمی، استفاده از راهکارهای مقاوم‌سازی بسیار مقرون به‌صرفه است.

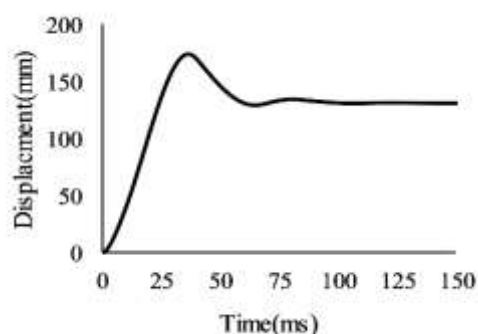
کنترل پیشنهاد می‌شود پاسخ اعضای سازه در مقابل انفجار در فاصله دور در هنگام طراحی بررسی گردد. همچنین نتایج جدول (۸) نشان می‌دهد افزایش میلگرد تاثیر ناچیزی در کاهش پاسخ حدی ستون نسبت به افزایش بعد ستون در جهت موج انفجار دارد. برای مثال با مقایسه ستون های A1 و B7 با درصد فولاد یکسان و بعد بیشتر ستون B7، نتایج نشان می‌دهد میزان جابه‌جایی نسبی ستون با افزایش بعد ستون کاهش یافته است. همچنین با مقاوم-سازی ستون و دیوارها با الیاف GFRP، پاسخ‌های حدی به کمترین



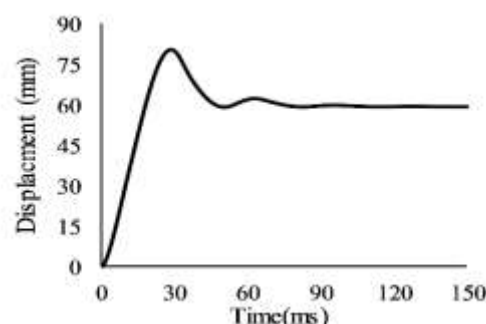
شکل ۸- مشخصات قطبی: الف) الیاف تک‌محوره، ب) دولایه الیاف در دو جهت متعامد، پ) سه‌لایه الیاف در جهات کامل (0° و 45° و 90°)



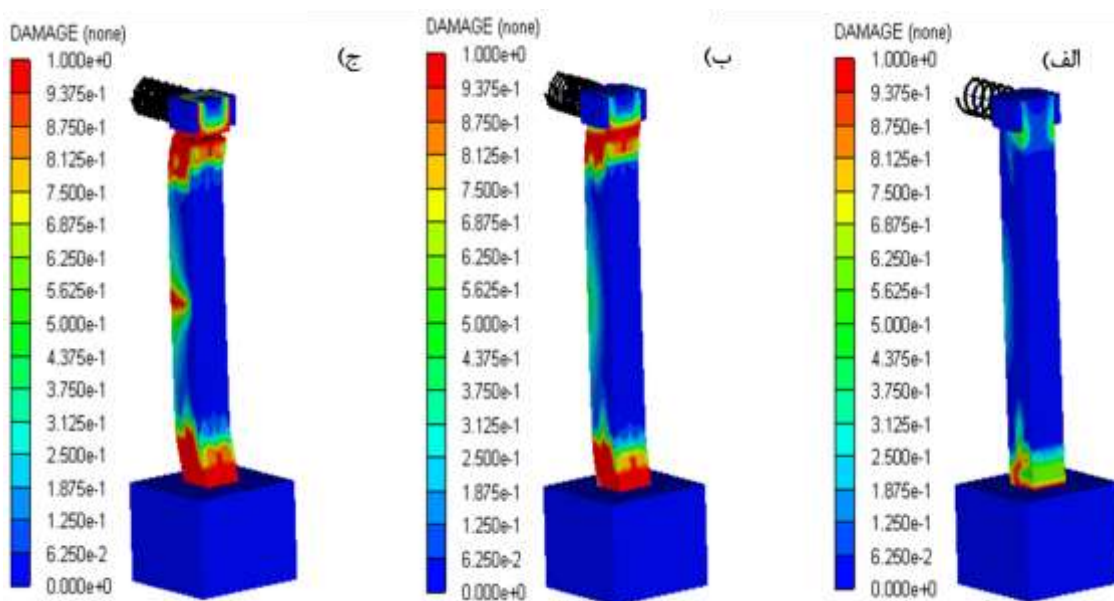
شکل ۹- الف) کانتور نقاط پلاستیک و خرابی دیوار W1 تحت انفجار ۸۰۰۰ کیلوگرم، ب) کانتور تنش (خرابی) دیوار W1 تحت انفجار ۸۰۰۰ کیلوگرم، ج) کانتور نقاط پلاستیک و خرابی دیوار W1 تحت انفجار ۲۰۰۰ کیلوگرم، د) کانتور تنش (خرابی) دیوار W1 تحت انفجار ۲۰۰۰ کیلوگرم



شکل ۱۱- نمودار جابه‌جایی بالای ستون B-5 بعد از انفجار ۸۰۰۰ کیلوگرم TNT



شکل ۱۰- نمودار جابه‌جایی بالای ستون B-5 بعد از انفجار ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT



شکل ۱۲- کانتور تنش (خرابی) ستون B-5 بعد از انفجار ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT در زمان: (الف) ۶ میلی ثانیه، (ب) ۱۲ میلی ثانیه، (ج) ۳۰ میلی ثانیه از شروع انفجار

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با توجه به این‌که بیشتر انفجارهای پتروشیمی از نوع انفجار مخزن در فاصله‌های زیاد است با استفاده از روش کوپل اولیری- لاگرانژی و تکنیک نگاشت به‌منظور کاهش حجم محاسبات، جابه‌جایی نسبی قسمت‌های مختلف سازه اتاق کنترل در برابر انفجار بررسی شده است. برخی از نتایج به‌دست آمده بشرح زیر می‌باشد:

- فاصله نقطه انفجار تا سازه هدف مهم‌ترین پارامتر انفجار است. بنابراین آنالیز ریسک انفجار با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری قبل از احداث سازه‌های با اهمیت زیاد در پتروشیمی به‌منظور بررسی نقاط خطر و احتمال بالقوه انفجار بایستی انجام شود.
- استفاده از ستون و دیوار مقاوم‌سازی شده با الیاف GFRP به‌صورت دورپیچ کامل و استفاده از الیاف سه‌لایه در جهت‌های

(۰° و ۴۵° و ۹۰°) سازه کمترین میزان جابه‌جایی را در مقابل انفجارهای شدید نشان می‌دهد. همچنین استفاده از این مواد نسبت به هزینه‌های توقف تولید در صنعت پتروشیمی بسیار مقرون به‌صرفه است.

- نتایج نشان می‌دهد استفاده از روش طراحی انفجار یک عضو بر اساس یک مقدار ماده منفجره در فاصله معین یا تحمل فشار معین، محافظه کارانه نیست. برای نمونه، طراحی یک عضو برای مقاومت در برابر انفجار ۲۵۰ کیلوگرم در ۱۰ متر بر اساس الزامات آیین‌نامه پناهگاه سوئد نمی‌تواند ایمنی کافی برای انفجارهای ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ ایجاد کند. بنابراین طراحی باید بر مبنای عملکرد کلی سازه بر اساس مجموعه‌ای از انفجارهای مختلف در فاصله دور و نزدیک صورت گیرد و اثرات زمان اعمال بار انفجار یا ضربه انفجار در طراحی لحاظ شود.

- Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 1973.
- Li Y, Chen Z, Ren X, Tao R, Gao R, Fang D, "Experimental and numerical study on damage mode of RC slabs under combined blast and fragment loading", *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 142, 103579. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103579>.
- Li ZX, Zhang X, Shi Y, Wu C, Li J, "Finite element modeling of FRP retrofitted RC column against blast loading", *Composite Structures*, 2021, 263, 113727. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113727>.
- Luccioni B, Ambrosini D, Danesi R, "Blast load assessment using hydrocodes", *Engineering Structures*, 2006, 28 (12), 1736-1744. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.02.016>.
- Mollaei S, Babaei M, JalilKhani M, "Assessment of damage and residual load capacity of the normal and retrofitted rc columns against the impact loading", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2021, 9 (1), 29-51. <https://doi.org/10.22075/JRCE.2020.20000.1394>.
- National Building Regulations of Iran (Topic 21) Passive Defense, 2016, Tehran.
- Razaqpur AG, Tolba A, Contestabile E, "Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates", *Composites Part B: Engineering*, 2007, 38 (5-6), 535-546. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.06.016>.
- Shi Y, Hao H, Li ZX, "Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads", *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35 (11), 1213-1227. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.09.001>.
- Siba F, "Near-field explosion effects on reinforced concrete columns", An experimental investigation, Master Thesis, Carleton University, 2014. <https://doi.org/10.22215/etd/2014-10573>.
- US Department of Defense, "Structures to resist the effects of accidental explosions", 2008, UFC 3-340-02.
- Wu J, Zhou Y, Zhang R, Liu C, Zhang Z, "Numerical simulation of reinforced concrete slab subjected to blast loading and the structural damage assessment", *Engineering Failure Analysis*, 2020, 118, 104926. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104926>.
- Yan Q, Liu C, Wu J, Wu J, Zhuang T, "Experimental and numerical investigation of reinforced concrete pile subjected to near-field non-contact underwater explosion", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20, 2040003. <https://doi.org/10.1142/S0219455420400027>.
- Zhang F, Wu C, Wang H, Zhou Y, "Numerical simulation of concrete filled steel tube columns against BLAST loads", *Thin-Walled Structures*, 2015, 92, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.02.020>.
- Zukas JA, Walters WP, "Explosive effects and applications", Springer Science & Business Media, 2002.
- استفاده از روش کوپل اوپلری- لاگرانژی دارای مزایایی بشرح زیر می باشد:
- (الف) لحاظ شدن فشار مثبت و منفی انفجار به سازه و در نتیجه اثرات بازتاب به خوبی دیده می شود.
- (ب) با استفاده از شبیه سازی عددی، خرابی ستون و جابه جایی آن با کمترین میزان خطا نسبت به بررسی تجربی به دست می آید.
- (ج) بار انفجار به صورت دینامیکی به سازه اعمال و اثرات غیرخطی مصالح مانند اثر نرخ کرنش، افزایش مقاومت سازه در برابر بارهای سریع و کاهش شکل پذیری به خوبی بررسی می شود.
- ## ۸- مراجع
- Alsayed SH, Elsanadedy HM, Al-Zaheri ZM, Al-Salloum, YA, Abbas H, "Blast response of GFRP-strengthened infill masonry walls", *Construction and building materials*, 2016, 115, 438-451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.053>.
- Altunışık AC, Önalın F, Sunca F, "Effects of Concrete Strength and Openings in Infill Walls on Blasting Responses of RC Buildings Subjected to TNT Explosive", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2021, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00563-x>.
- ANSYS Theory manual. ANSYS. Inc. Southpointe, PA, USA. Mollaei S, 2019.
- ASCE, T.C. on B.-R.D. of the P.C. of the E.D. of, Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities, American Society of Civil Engineers, 2010.
- Biglarkhani M, Sadeghi K, "Incremental explosive analysis and its application to performance-based assessment of stiffened and unstiffened cylindrical shells subjected to underwater explosion", *Shock and Vibration*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3754510>.
- Cadoni E, Forni D, Gieleta R, Kruszka L, "Tensile and compressive behaviour of S355 mild steel in a wide range of strain rates", *The European Physical Journal Special Topics*, 2018, 227 (1), 29-43. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2018-00113-4>.
- Ekengren B, Räddningsverk SS, "Shelter regulations: SR -English edition", Statens räddningsverk, 1994.
- Forni D, Chiaia B, Cadoni E, "Blast effects on steel columns under fire conditions", *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 136, 1-10. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.04.012>.
- Forni D, Chiaia B, Cadoni E, "High strain rate response of S355 at high temperatures", *Materials & Design*. 2016, 94, 467-478. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.160>.
- Larcher M, Casadei F, Solomos G, "Simulation of blast waves by using mapping technology in EUROPLEXUS", Technical Note, PUBSY No. JRC91102, EUR Report, 26735. <https://doi.org/10.2788/98310>.
- Lee E, Finger M, Collins W, "JWL equation of state coefficients for high explosives (No. UCID-16189)",

EXTENDED ABSTRACT

Vulnerability Assessment of Blast-Resistant RC Control Room In Refinery Facilities by Eulerian-Lagrangian Coupling Method

Mohammad Reza Mohammadizadeh^{a,*}, Mohammad Alikhan Mohammadi^b

^a *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran*

^b *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran*

Received: 16 January 2022; **Review:** 17 January 2023; **Accepted:** 18 January 2023

Keywords:

Control Room, Refinery, Explosion, Eulerian-Lagrangian, Vulnerability.

1. Introduction

A control room is a place where, as a center of operations in the petrochemical industry, production processes are monitored and controlled. Two main factors must be considered in the design of control rooms. The first factor is the protection of the control room building against possible hazards and the second factor is the location of the control room and the arrangement of the panels, to ensure the effective and ergonomic operation of the control room in normal and emergency conditions, which must be designed in such a way that the danger to the residents of the control room is acceptable and be suitable for the maintenance and protection of the unit (ASCE, 2010; Association, 2014). One of the regulations for the design of blast-resistant structures is the Swedish shelter regulations, which are derived from the examination of structures destroyed in the second world war (Ekengren and räddningsverk, 1994). The Swedish Shelter Regulations regulate the design of civil defense shelters in Sweden and include the requirements specified for these protection structures. Civilian defense shelters are designed not only to withstand the effects of conventional weapons, but also to withstand radioactive radiation, chemical and biological warfare, and gases explosion. By considering these requirements, shelters should be designed with minimal risk of death or injury to those in need of shelter, and be able to withstand the effects of the shockwave generated by a 250-kg bomb at a distance of 10 meters. Also, the requirements of proper design and retrofitting of existing structures against explosion can significantly reduce costs. In view of the above, the analysis and design of refinery structures against explosion loads and the strengthening of their members has great importance. Long-distance explosions and loading of structural elements also include phenomena that are not yet well understood. In order to increase knowledge in this field, a numerical study is currently presented. For this purpose, in this study, four types of concrete columns and four models of exterior wall for the control room were designed according to Swedish regulations to withstand the pressure of an explosion of a 250kg TNT at a distance of 10 meters and then against explosions of 6000, 4000 and 8000 kilograms at a safety distance of 40 meters is evaluated by the Eulerian-Lagrangian coupling method in Autodyn software. Response limit-state are selected according to the ASCE standard (ASCE, 2010).

2. Methodology

2.1. Material Model

Numerical analyzes require material strength-models to describe the response of structural members. The response of structures under blast loading is a very complex phenomenon due to the high strain rate, the effects of geometric and materials nonlinearities. In any hydro code, for solving three equations of conservation of mass, momentum and energy, Equation of State and strength model should be considered (Woodruff, 1976).

* Corresponding Author

E-mail addresses: mrz_mohammadizadeh@hormozgan.ac.ir; mrzmohammadizadeh@yahoo.com (Mohammad Reza Mohammadizadeh), khanmohamdie.ma@gmail.com (Mohammad Alikhan Mohammadi).

In this study the Jones-Walkins-Lee (JWL) equation of state and ideal gas EOS (Equation of state) have been used for explosion and air (ANSYS, 2019). Also to solve the effect of strain rate on material strength, two solutions are proposed: using dynamic increase coefficient or using strength-models considering the strain rate. The Johnson-Cook strength model with strain rate sensitive behavior used for longitudinal and transverse reinforcements in this study. The Johnson-Cook strength model accurately predicts the behavior of reinforcing steel in concrete under blast loading. Johnson-Cook equations constant parameters are obtained based on the Hopkinson bar test. Also for considering the effect of high strain-rate for concrete model, in this study, the RHT material strength model is considered (Li et al., 2020; Riedel, 2009; Wu et al., 2020). In Autodyn software, the properties of GFRP materials are included in the compliance matrix using engineering constants.

2.2. Model Parts

In this study four column types and for different exterior wall are considered. In all stages, the flexural stiffness of the frame located behind the column and the wall is modeled as a spring. For columns and walls, solid element (eight-node element) is used for concrete and beam element (two-node element) is used for rebars. Also, in order to apply the boundary conditions and create a rigid support at the bottom of the column, all nodes are fixed at bottom. Shell element (6 degrees of freedom) used to model the GFRP sheet in ANSYS Composite pre-post software, the resistance model for orthotropic materials. The orthotropic strength model is defined for GFRP materials.

3. Results and discussion

The results show that the design of a blast-resistant structure based on a specific blast pressure or a certain amount of explosive at a given distance is not conservative. For example, the pressure and impact obtained for an explosion of 250kg TNT at a distance of 10 meters are equal to 2.1MPa and 3MPa, respectively. This is while for an explosion of 8000kg TNT at a distance of 40meters, despite the lower explosion pressure (1MPa), due to the longer duration, the area under the pressure-time diagram increases and more impact is applied to the structure. Therefore, for designing members of structures such as control rooms, it is recommended that the response of structural members to explosions with different amounts of explosives at different distances be investigated during design. The results show that increasing the rebar has a small effect on reducing the response of the column compared to increasing the column dimension in the direction of the blast wave. Also, by retrofitting columns and walls with GFRP sheets, damage is significantly reduced.

4. Conclusions

In this study using the Eulerian-Lagrangian method and parallel processing in the cloud space, four types of concrete columns and four models of exterior wall designed for 250 kg TNT at a distance of 10 meters for explosions of 4,000, 6,000 and 8,000 at a safe distance of 40 meters were evaluated the result show that:

- The design should be based on the overall performance of the structure against a series of different explosions at near and far distances and the effects of explosion impact along with explosion pressure should be considered in the design.
- The type of failure for reinforced concrete members is different for contact and far field explosions. For example, for blasts at far distances, shear and bending fractures occur, but for contact explosion, failure due to spall damage occurs.
- Using the Eulerian-Lagrangian coupling method has advantages such as:
 1. Positive and negative pressure is applied to the structure member and the effects of reflection are well observed.
 2. Blast load is dynamically applied to the structure and the nonlinear effects of materials such as the effect of strain rate are well investigated.

5. References

- ANSYS Theory manual. ANSYS. Inc. Southpointe, PA, USA. Mollaei S, 2019.
- ASCE, T.C. on B.-R.D. of the P.C. of the E.D. of, Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities, American Society of Civil Engineers, 2010.
- Association, N.F.P., Flammable and Combustible Liquids Code: NFPA 30. National fire protection Association,

2014.

Ekengren B, Räddningsverk SS, "Shelter regulations: SR -English edition", Statens räddningsverk, 1994.

Li Y, Chen Z, Ren X, Tao R, Gao R, Fang D, "Experimental and numerical study on damage mode of RC slabs under combined blast and fragment loading", *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 142, 103579. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103579>.

Riedel W, 10 years RHT: a review of concrete modelling and hydrocode applications. *Predictive Modeling of Dynamic Processes*, Springer Science+Business Media, 143-165, 2009. Doi.org/10.1007/978-1-4419-0727-1 9.

Woodruff JP, "KOVEC User's Manual", University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-17306, 1976.

Wu J, Zhou Y, Zhang R, Liu C, Zhang Z, "Numerical simulation of reinforced concrete slab subjected to blast loading and the structural damage assessment", *Engineering Failure Analysis*, 2020, 118,