

بررسی تاثیر بازشو بر بارگذاری انفجار محبوس

صفا پیمان^{۱*}، امین لطفی^۲

۱- استادیار، ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۶/۰۹/۱۵، پذیرش: ۹۷/۰۲/۰۴)

چکیده

سازه‌های مختلف به دلایل تروریستی و غیرتروریستی در معرض انفجار قرار دارند. بررسی عوامل موثر در کاهش آسیب‌های ناشی از انفجار از مباحث مهم پدافند غیرعامل به‌شمار می‌رود. یکی از این عوامل، وجود بازشو در سازه تحت انفجار محبوس است. در این بررسی تاثیر بازشو بر بارگذاری ناشی از انفجار محبوس به صورت نمودارهای فشار-زمان و تکانه-زمان مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، با استفاده از آیین‌نامه UFC 3-340-02 و شبیه‌سازی عددی هیدروکد AUTODYN، انفجار محبوس ماده منفجره TNT با جرم‌های مختلف در محفظه‌ای مکعبی شکل با وجود بازشوه‌های متفاوت از نظر اندازه و موقعیت مکانی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی تاثیر هر یک از عوامل موقعیت بازشو، تعداد وجوه دارای بازشو و نیز اندازه بازشو را بر بارگذاری وارد بر سطح داخلی سازه، ناشی از انفجار محبوس مشخص می‌نماید. در پایان نیز علاوه بر تعیین بازشو بهینه به‌صورت پارامتریک، نتایج انفجار محبوس حاصل از شبیه‌سازی عددی با آیین‌نامه UFC 3-340-02 مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: انفجار محبوس، بازشو، نمودار فشار-زمان، نمودار تکانه-زمان، بارگذاری انفجاری، پدافند غیرعامل

Investigating the Effect of Opening on Loaded Explosion

S. Peyman*, A. Lotfi

Imam Hossein University

(Received: 06/12/2017; Accepted: 24/04/2018)

Abstract

Various structures are subject to explosion for terrorist and non-terrorist reasons. The study of effective factors in reducing the damage caused by the explosion is one of the most important issues of passive defense. One of these factors is the presence of openings in the structure under confined explosion. In this study, the effect of opening on the loading caused by the explosion has been examined in terms of pressure-time and impulse-time graphs. In this regard, using the UFC 3-340-02 regulations and numerical simulation of the AUTODYN hydrocode, the confined explosion of a TNT explosive with different masses in a cubic chamber, with different openings in terms of size and location, has been investigated. The investigation results of the effect of each of the opening position factors specify the number of pop-ups with openings and the size of the opening on the loading exerted on the inner surface of the structure due to the confined explosion. Finally, in addition to determining the parametric optimal optimization, the results of the confined explosion resulting from numerical simulation are compared and examined with the UFC 3-340-02 regulations.

Keywords: Confined Explosion, Opening, Pressure-Time Graph, Impulse-Time Graph, Explosive Loading, Passive Defense

* Corresponding Author E-mail: speyman@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

تاثیر شکل محفظه انفجار بر الگوی بارگذاری وارد بر سازه تحت انفجار محبوس پرداخته است.

در این راستا پیرامون اثر بازشو بر انفجار محبوس نیز پژوهش‌هایی صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به بررسی لو و همکاران [۱۴] پیرامون پیش‌بینی سرعت ذرات پرتاب شده از محفظه بتنی دارای بازشو تحت انفجار محبوس اشاره نمود. تاثیر شکل و پوشش بازشو بر انفجار محبوس نیز توسط فلدگان و همکاران [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. ژنگ و همکاران [۱۶] نیز پاسخ دینامیکی الاستو-پلاستیک ورقه فلزی تقویت شده تحت بارگذاری ناشی از انفجار در محفظه محبوس دارای بازشو را مورد بررسی قرار دادند. شایان توجه است که در بررسی تاثیر بازشو در دستورالعمل UFC 3-340-02 اثر موقعیت بازشو لحاظ نشده است و تاثیر بازشو بر فشار وارد بر سطح داخلی سازه تحت انفجار داخلی تنها با متغیر $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ یعنی نسبت مجموع مساحت‌های بازشوها بر حجم محفظه به توان $\frac{2}{3}$ بررسی شده است. لذا در این دستورالعمل اشاره‌ای به موقعیت مکانی این بازشوها و تاثیر آن بر انفجار محبوس نشده است.

به‌طور کلی با وجود تحقیقات انجام شده هنوز اثر بازشو بر بارگذاری ناشی از انفجار محبوس به طور کامل روشن نشده است و تحقیقات بیشتری را می‌طلبد. در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آیین‌نامه UFC 3-340-02، انفجار محبوس ماده منفجره TNT با جرم‌های مختلف در محفظه مکعبی شکل با وجود بازشوهایی متفاوت از نظر اندازه و موقعیت مکانی مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار AUTODYN، استفاده شده است. نتایج بررسی تاثیر هر یک از عوامل موقعیت بازشو، تعداد وجوه دارای بازشو و نیز اندازه بازشو را بر نمودار فشار-زمان و تکانه-زمان وارد بر وجوه داخلی سازه مشخص می‌نماید. در پایان نیز علاوه بر تعیین بازشو بهینه بصورت پارامتریک، نتایج انفجار محبوس حاصل از شبیه‌سازی عددی با آیین‌نامه UFC 3-340-02 مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

۲. انفجار

انفجار، آزاد شدن بسیار سریع انرژی به صورت نور، گرما، صوت و موج ضربه‌ای است [۱۷]. بر اساس تقسیم‌بندی دستورالعمل UFC 3-340-02 همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است، انفجارها از نظر موقعیت ماده منفجره نسبت به سازه به دو گروه اصلی، انفجار غیرمحبوس و انفجار محبوس تقسیم‌بندی می‌شوند.

پدافند غیرعامل به مجموعه اقدامات غیرمسلحانه‌ای گفته می‌شود که موجب کاهش آسیب‌پذیری نیروی انسانی، ساختمان‌ها، تاسیسات، تجهیزات، اسناد و شریان‌های حیاتی کشور در مقابل عملیات خصمانه و مخرب دشمن می‌گردد. علاوه بر سازه‌های نظامی مانند کارگاه‌های تولید و نگهداری موشک و سلاح، تونل‌های زیرزمینی، آزمایشگاه‌های تست انفجار و ... سایر سازه‌های غیرنظامی همچون ساختمان‌های مسکونی و اداری، پمپ بنزین‌ها و ... نیز در معرض انفجار قرار دارند. از این جهت شناخت اثرات حاصل از انفجار بر سازه‌ها می‌تواند در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و طراحی سازه‌های جدید نقش مهمی را ایفا نماید.

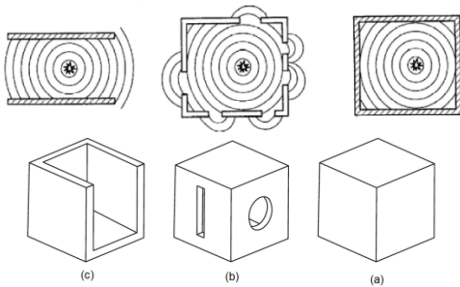
تحقیقات قابل توجهی به‌منظور بررسی پاسخ سازه به بارگذاری انفجار خارجی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات انجام شده توسط لوسیونی و همکاران [۱]، وو و همکاران [۲]، جونز و همکاران [۳] و ژو و همکاران [۴] اشاره نمود. همچنین در مورد انفجار در هوای آزاد روابطی توسط براد [۵]، هنریچ [۶] و کینی و گراهام [۷] ارائه شده است. البته نمودارهای UFC 3-340-02 [۸] نیز مرجع مناسبی برای محاسبه پارامترهای ناشی از انفجار خارجی است [۹].

این در حالی است که با توجه به پیچیدگی‌های انفجار محبوس نسبت به انفجار در هوای آزاد، تحقیقات کمی در زمینه انتشار موج انفجار درون سازه‌ها صورت گرفته است. مطالعه انجام شده توسط لیو^۱ و همکاران (۲۰۰۸) و نیز شی^۲ و همکاران (۲۰۰۹) در خصوص انتشار موج انفجار در داخل یک تونل یا محفظه، نشان داده است که نه تنها بیش‌فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در یک محفظه بسته بیشتر از انفجار در هوای آزاد است، بلکه مدت زمان اعمال فشار نیز طولانی‌تر است [۱۰]. در این راستا ادوی و همکاران [۱۱] به بررسی نمودار فشار-زمان حاصل از انفجار محبوس و نحوه ساده‌سازی آن پرداختند و نیز مطالعاتی توسط دراگوس و همکاران [۱۲] به منظور توسعه الگویی جهت بررسی رفتار سازه تحت انفجار محبوس صورت پذیرفته است. همچنین هو و همکاران [۱۰] پژوهش‌هایی پیرامون توسعه یک مدل عددی برای بررسی بار ناشی از انفجار در داخل محفظه‌های فاقد بازشو، با توجه به تغییر پارامترهای شکل ماده منفجره، جهت‌گیری ماده منفجره، هندسه و حجم محفظه‌های تحت انفجار انجام دادند. همچنین سالوادو و همکاران [۱۳] به بررسی

^۱ Liu^۲ Shi

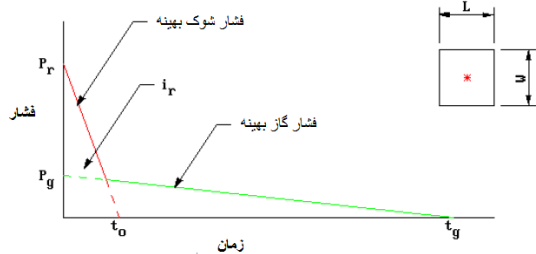
انفجار داخلی یا همان انفجار محبوس مطابق شکل (۲) به سه قسمت تقسیم بندی می گردد [۱۳]:

- کاملا محبوس^۶
- نسبتا تهویه پذیر^۷
- کاملا تهویه پذیر^۸

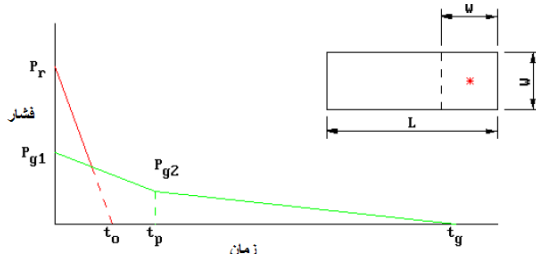


شکل ۲. مقایسه انواع حالت های سازه در انفجار داخلی؛ (a): کاملا محبوس (b): نسبتا تهویه پذیر (c): کاملا تهویه پذیر [۱۳]

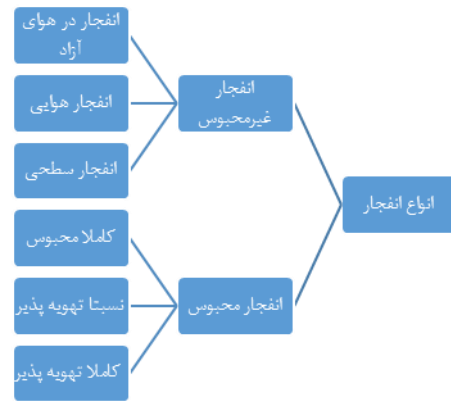
نمودار فشار- زمان مربوط به انفجار محبوس در دستورالعمل UFC 3-340-02 بر اساس شکل هندسی سازه به دو صورت کلی بیان شده است. در صورتی که سازه به شکل مکعبی باشد نمودار فشار- زمان آن مطابق با شکل (۳) است. در صورتی که سازه شکل هندسی مکعب- مستطیل داشته باشد و در واقع نسبت طول به عرض آن قابل توجه باشد نمودار فشار- زمان ناشی از انفجار داخلی در آن مطابق شکل (۴) است.



شکل ۳. نمودار فشار زمان- زمان ترکیبی فشار شوک و فشار گاز در انفجار محبوس برای سازه مکعبی شکل [۸]



شکل ۴. نمودار فشار زمان- زمان ترکیبی فشار شوک و فشار گاز در انفجار محبوس برای سازه با شکل هندسی مکعب مستطیل [۸]



شکل ۱. تقسیم بندی انواع حالت های انفجار با توجه به موقعیت ماده منفجره نسبت به سازه، مطابق با دستورالعمل UFC 3-340-02 [۸].

انفجار غیرمحبوس^۱: اگر انفجار در بالای یک سازه به گونه ای صورت پذیرد که بین ماده منفجره و سازه هیچ گونه تقویت موج شوک اولیه ای رخ ندهد، این نوع انفجار را انفجار در هوای آزاد^۲ می نامند. ولی در صورتی که انفجار در فاصله ای مشخص از سطح زمین اتفاق افتد، موج اولیه از نقطه انفجار منتشر شده و پس از برخورد با سطح زمین در ارتفاعی موسوم به ارتفاع ماخ که ناشی از اندرکنش موج اولیه و موج منعکس شده است منتشر می گردد که این نوع انفجار، انفجار هوایی^۳ نامیده می شود. به همین ترتیب در انفجار سطحی^۴ اگر یک انفجار در سطح زمین رخ دهد، موج اولیه انفجار پس از برخورد با زمین منعکس شده و با ترکیب موج اولیه و موج منعکس شده به صورت یک موج به شکل نیم کره منتشر می گردد.

انفجار محبوس^۵: در صورتی که ماده منفجره در داخل سازه منفجر شود، انفجار داخلی رخ داده است. زمانی که این اتفاق رخ می دهد بیش فشار اولیه به علت انعکاس های متوالی امواج درون سازه افزایش خواهد یافت و موجب تقویت بیش فشار ثانویه می گردد و نمودار فشار- زمان حاصل از انفجار محبوس را شدیداً نامنظم خواهد نمود. اثرات حرارت های بالا و توده محصولات گازی تولید شده از طریق فرایند شیمیایی در انفجار، به صورت افزایش فشار و افزایش مدت زمان بارگذاری داخلی سازه اعمال خواهد شد؛ به طوری که اثرات ترکیبی این فشارها می تواند منجر به تخریب سازه گردد. برای بررسی رفتار سازه های متأثر از فشار داخلی ناشی از انفجار، دو پدیده فشار شوک و فشار گاز قابل بررسی است. فشار شوک یا فشار تکانشی عبارت است از فشار منعکس شده و تقویت شده از طریق جداره های سازه و زمین در داخل سازه و فشار گاز نیز فشار مربوط به محصولات گازی تولیدی و گازهای منبسط شده است [۱۸].

⁶ Fully Confined
⁷ Partially Vented
⁸ Fully Vented

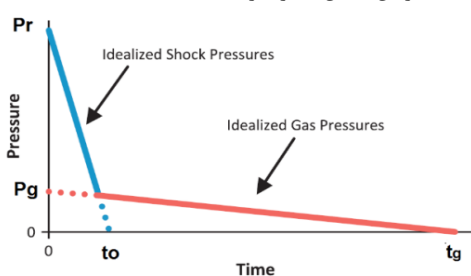
¹ Unconfined Explosion
² Free Air Burst
³ Air Burst
⁴ Surface Burst
⁵ Confined Explosion

تحقیقات بیشتری پیرامون انفجار خارجی صورت گرفته است. اما انفجار محبوس به دلیل پیچیدگی‌های فراوان و پارامترهای مختلف موثر بر آن با ساده‌سازی‌های فراوانی در این فصل از آیین‌نامه بیان شده است.

ساده‌سازی انفجار محبوس در آیین‌نامه UFC 3-340-02: به علت پیچیدگی‌های مبحث انفجار داخلی و تاثیر عوامل متعدد بر آن و همچنین کمبود اطلاعات مربوط به تست‌های آزمایشگاهی محبوس، آیین‌نامه UFC 3-340-02 با ساده‌سازی به بررسی مبحث انفجار داخلی پرداخته است. بدین صورت که شکل هندسی سازه مدنظر باید مکعبی یا مکعب-مستطیل باشد و ماده منفجره نیز از جنس TNT و به صورت کروی و فاقد پوشش در نظر گرفته شود. همچنین میزان بازشو موجود در سازه نیز تنها با نسبت $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ (A: مجموع مساحت بازشوهایی موجود در سازه و V_f : حجم کل سازه) بیان گردیده و اشاره‌ای به موقعیت بازشو صورت نگرفته است. البته شایان توجه است که گراف‌ها و جداول مربوط به مبحث انفجار داخلی در این فصل شامل دامنه محدودی از انفجارها است که کاربر را در طی فرآیند محاسبات مجبور به استفاده از درون‌یابی و برون‌یابی‌های عددی فراوانی می‌نماید که این امر خود می‌تواند باعث کاهش دقت محاسبات گردد.

متغیرهای موثر در نمودار فشار-زمان در حالت انفجار محبوس بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02: بررسی مبحث انفجار محبوس بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02 منتج به نمودار فشار-زمان می‌گردد. این نمودار بیان‌گر بارگذاری انفجاری ناشی از انفجار محبوسی است که بر سطح داخلی یک وجه مشخص از سازه اعمال می‌شود. به منظور رسم نمودار فشار-زمان مطابق با شکل (۶) کفایت مقادیر هر یک از متغیرهای زیر به‌دست آیند. این متغیرها عبارتند از:

- P_r : بیش فشار انعکاسی {psi}
- t_0 : مدت زمان اعمال فشار تکانشی {m sec}
- P_g : بیش فشار گاز {psi}
- t_g : مدت زمان اعمال فشار گاز {m sec}

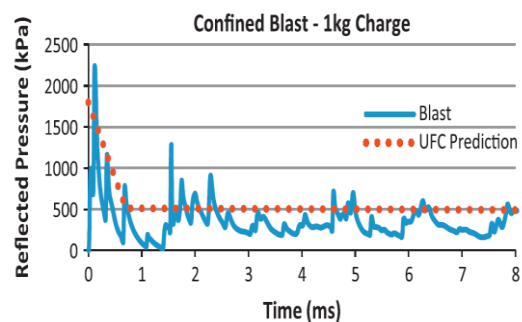


شکل ۶. نمودار فشار-زمان ایده‌آل UFC 3-340-02 [۱۹]

هر یک از متغیرهای موجود در نمودار عبارت‌اند از:

- P_r : بیش فشار انعکاسی {psi}
- t_0 : مدت زمان اعمال فشار تکانشی {sec m}
- P_g : بیش فشار گاز {psi}
- t_g : مدت زمان اعمال فشار گاز {sec m}
- t_r : تکانه انعکاسی، مجموع فشارهای انعکاسی در بازه زمانی (تا t_0) {sec m . psi}

البته لازم به‌ذکر است که نمودارهای ارائه شده توسط دستورالعمل UFC 3-340-02 (شکل‌های ۳ و ۴) بیانگر حالت کلی انفجار محبوس است. یعنی با فرض وجود بازشو این نمودارها ایجاد می‌گردد. این در حالی است که اگر انفجار داخلی در حالت کاملا محبوس یعنی بدون بازشو صورت پذیرد، مطابق با این دستورالعمل تنها تفاوتی که حاصل می‌گردد در ثابت ماندن فشار گاز (P_g) است. در همین راستا شکل (۵) مقایسه بین نمودار فشار-زمان واقعی و نیز ساده‌سازی‌شده UFC حاصل از انفجار محبوس یک کیلوگرم ماده منفجره را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار فشار زمان واقعی و UFC مربوط به انفجار محبوس یک کیلوگرم ماده منفجره [۱۹]

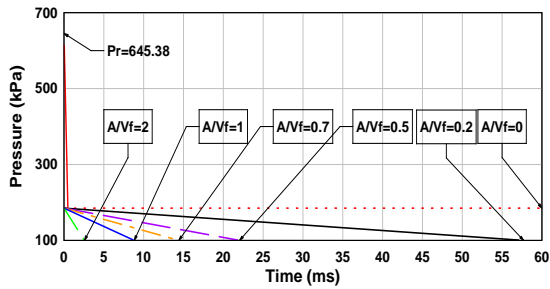
البته در حالتی که سازه کاملا تهویه‌پذیر باشد، نمودار فشار-زمان آن فقط شامل نمودار مربوط به فشار تکانشی یا همان فشار شوک است و از فشار گاز به علت تخلیه کامل آن می‌توان صرف‌نظر نمود.

۳. بارگذاری انفجار محبوس بر اساس ضوابط آیین‌نامه UFC 3-340-02

فصل دوم آیین‌نامه UFC مربوط به مبحث بارگذاری انفجاری سازه است. این فصل شامل جداول و گراف‌های متعددی است که عموماً از نتایج تجربی حاصل از تست‌های انفجار مختلف به‌دست آمده‌اند [۲۰]. شایان توجه است که این فصل پیرامون انفجار خارجی محتوایی ساده و در عین حال جامع‌تری به نسبت مبحث انفجار داخلی دارد. علت این امر هم این است که به‌طور کلی

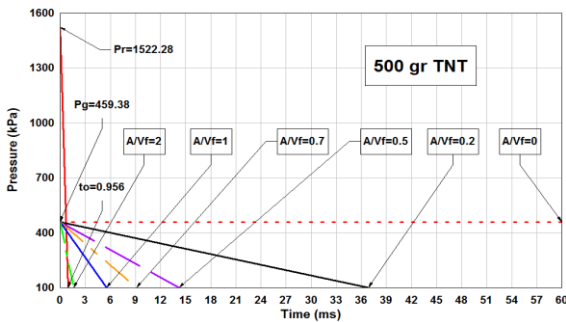
¹ Reflected Overpressure

² Gas Pressure

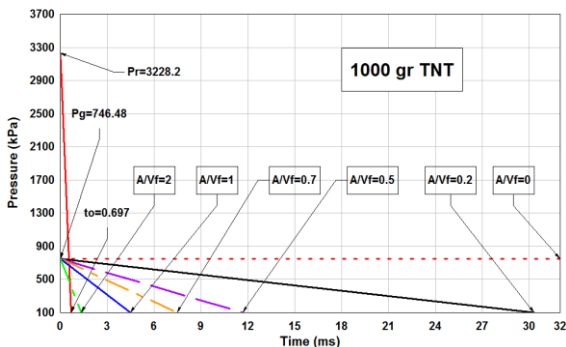


شکل ۸. نمودارهای فشار-زمان مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با شش حالت مختلف بازشو، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک، بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02

بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02، ابعاد بازشو فقط بر زمان اتمام فشار گاز یا همان (t_g) تاثیر گذار می باشد و بر بیش‌فشار انعکاسی (P_r) و یا بر بیش‌فشار گاز (P_g) تاثیری ندارد. صحت نتیجه مذکور با تغییر در جرم ماده منفجره، تایید می‌گردد.



شکل ۹. نمودارهای فشار-زمان مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با شش حالت مختلف بازشو، تحت انفجار محبوس ۵۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک، بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02



شکل ۱۰. نمودارهای فشار-زمان مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با شش حالت مختلف بازشو، تحت انفجار محبوس ۱۰۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک، بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02

۴. شبیه‌سازی عددی انفجار محبوس

تعبیه بازشوهایی مناسب علاوه بر تامین نور کافی و سایر کاربردهای رایج آن، در کاهش بارگذاری انفجاری ناشی از انفجار

انفجار محبوس بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02: مسئله مورد نظر اتاقکی مکعبی شکل به بعد ۲ متر است که تحت انفجار محبوس ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک، مطابق با شکل (۷) قرار گرفته است. شایان توجه است که در بررسی تاثیر بازشو در دستورالعمل UFC ۳-۳۴۰-۰۲ اثر موقعیت بازشو لحاظ نشده است و تاثیر بازشو بر فشار وارد بر سطح داخلی سازه تحت انفجار داخلی تنها با متغیر $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ یعنی نسبت مجموع مساحت‌های بازشوها بر حجم اتاقک به توان $\frac{2}{3}$ بررسی شده است. لذا در این دستورالعمل اشاره‌ای به موقعیت مکانی این بازشوها و تاثیر آن بر انفجار محبوس نشده است. در این راستا با هدف بررسی تاثیر ابعاد بازشو بر انفجار محبوس، شش حالت مختلف مساحت بازشو به صورت زیر تقسیم‌بندی شده است.

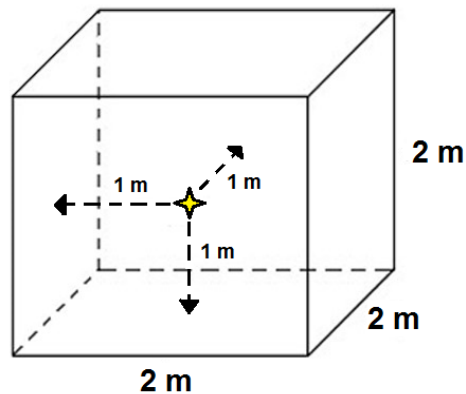
$$\text{حالت اول: } \frac{A}{V_f^{2/3}} = 0, \text{ حالت دوم: } \frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.2$$

$$\text{حالت سوم: } \frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.5, \text{ حالت چهارم: } \frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.7$$

$$\text{حالت پنجم: } \frac{A}{V_f^{2/3}} = 1, \text{ حالت ششم: } \frac{A}{V_f^{2/3}} = 2$$

A: مجموع مساحت بازشوها

V_f: حجم محفظه تحت انفجار



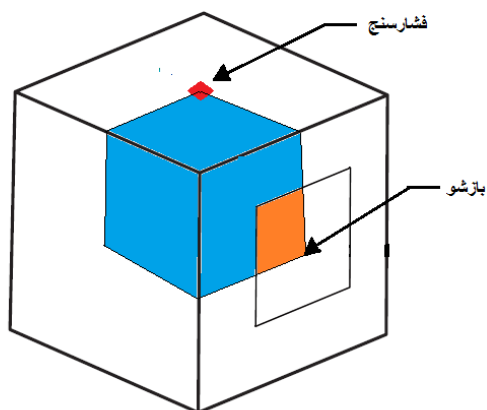
شکل ۷. انفجار محبوس ماده منفجره TNT در مرکز محفظه مکعبی شکل به بعد ۲ متر

نتایج انفجار محبوس بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02:

همانطور که پیش از این در بخش (۲-۶) توضیح داده شد؛ بررسی مبحث انفجار محبوس بر اساس آیین‌نامه UFC ۳-۳۴۰-۰۲ منتج به نمودار فشار- زمان می‌گردد. شکل‌های (۱۰-۸) مقایسه نمودارهای فشار- زمان مربوط به شش حالت مختلف بازشو با جرم‌های مختلف ماده منفجره TNT را که بر اساس ضوابط آیین‌نامه UFC ۳-۳۴۰-۰۲ مورد محاسبه قرار گرفته است، نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱۲) مشخص است از آنجایی که این انفجار از نوع سه بعدی متقارن در سه محور است، شبیه‌سازی عددی انتشار موج ناشی از انفجار ماده منفجره، به صورت شبیه‌سازی یک‌هشتم از حجم سازه در نرم‌افزار AUTODYN لحاظ شده است. البته به منظور لحاظ تقارن در سه محور در صورت وجود بازشو(ها)یی در یک وجه، در سمت مقابل به آن وجه نیز بازشو(ها)یی با همان موقعیت و اندازه در نظر گرفته شده است.

شایان توجه است که این روش مدل‌سازی روش مرسوم جهت انجام هرچه ساده‌تر، سریع‌تر و در عین حال دقیق‌تر نمونه سه‌بعدی کاملاً متقارن با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است که توسط آقای سالوادو و همکاران [۱۳] نیز در بررسی تاثیر شکل محفظه انفجار بر الگوی بارگذاری وارد بر سازه تحت انفجار محبوس مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱۲. نمای کلی از مدل‌سازی یک‌هشتم تمام حجم محفظه

محیط انتشار موج: از هوا به‌عنوان گاز ایده‌آل برای پر کردن محیط انتشار موج ناشی از انفجار استفاده شده است.

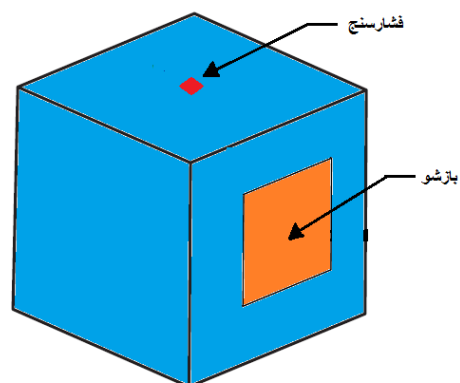
جنس، ابعاد و مقطع محفظه: محفظه انفجار مکعبی شکل به ضلع ۲ متر، به صورت سه‌بعدی با لحاظ تقارن در سه محور مدل‌سازی شده است. در این بررسی جنس پوشش محفظه به صورت صلب در نظر گرفته شده و با تقریب مناسب از زبری سطح آن صرف نظر می‌شود.

ماده منفجره: خرج انفجاری به شکل مکعبی، بدون پوشش و با جرم‌های ۱۰۰ گرم، ۵۰۰ گرم و ۱۰۰۰ گرم از جنس TNT مدل شده است.

محبوس بر سطوح داخلی سازه موثر است. شایان توجه است که بیش‌فشار وارد بر سطوح داخلی سازه شامل بیش‌فشار برخوردی^۱ (اولیه) و بیش‌فشار انعکاسی (ثانویه) است. در حالت انفجار کاملاً محبوس (فاقد بازشو) مقدار بیش‌فشار انعکاسی از بیش‌فشار برخوردی وارد بر سطوح داخلی سازه، بیشتر است. مشاهده می‌شود با تعبیه بازشو و همچنین بزرگتر شدن آن، باوجود این‌که مقدار بیش‌فشار انعکاسی کاهش می‌یابد اما مقدار بیش‌فشار برخوردی ثابت باقی می‌ماند. لذا در این مقاله برابر شدن بیش‌فشار انعکاسی و بیش‌فشار برخوردی به عنوان معیاری جهت طراحی بهینه سازه‌ها تحت انفجار محبوس مورد نظر قرار گرفته است. نتایج بررسی باید تاثیر هر یک از عوامل موقعیت بازشو، تعداد وجوه دارای بازشو و نیز اندازه بازشو را بر بیش‌فشار برخوردی و بیش‌فشار انعکاسی مشخص نماید. در پایان نیز میزان بازشو بهینه‌ای که باعث اعمال حداقل بیش‌فشار وارد بر سازه می‌گردد، از لحاظ ابعاد و موقعیت مکانی به صورت پارامتریک ارائه شده است.

شکل (۱۱) نمای کلی محفظه‌ای را نشان می‌دهد که تحت انفجار داخلی قرار دارد. بدین ترتیب که ماده منفجره دقیقاً در مرکز این محفظه و فشارسنج نیز در مرکز سقف آن قرار دارد. موقعیت بازشو(ها) نیز با توجه به شبیه‌سازی‌های متفاوت تغییر می‌نماید.

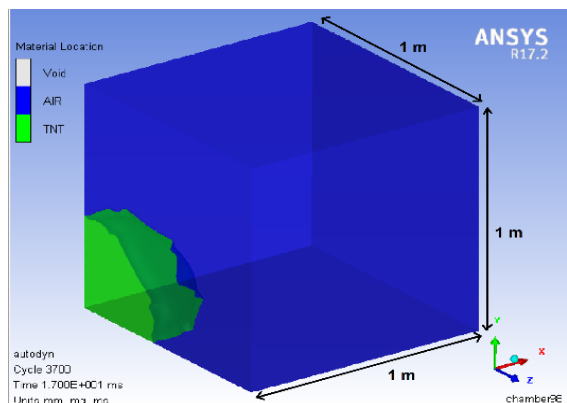
پس از آغاز انفجار ماده منفجره در مرکز این محفظه، جبهه موج شوکی به صورت کره‌ای شکل به مرکزیت ماده منفجره منتشر می‌گردد و پس از برخورد با فشارسنج، بلافاصله بیش‌فشار برخوردی یا بیش‌فشار اولیه (P_1) را ایجاد می‌نماید. پس از آن امواج انعکاس یافته از سطوح مختلف، بیش‌فشار انعکاسی یا همان ثانویه (P_2) را در فشارسنج ایجاد می‌نمایند.



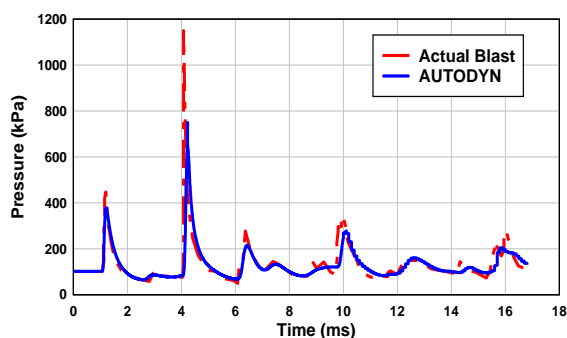
شکل ۱۱. نمای کلی محفظه مکعبی شکل تحت انفجار محبوس

^۱ Incidence overpressure (primary)

را نشان می‌دهد. شایان توجه است که به دلیل تقارن سه‌محوری مدل، تنها یک‌هشتم نمونه، مدل‌سازی شده است. در شکل (۱۶) نمودار فشار- زمان انفجار حاصل از شبیه‌سازی AUTODYN با نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی دراگوس و همکاران [۱۹] مقایسه شده است.



شکل ۱۵. شبیه‌سازی یک‌هشتم مدل مربوط به انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در محفظه مکعبی با حجم ۸ مترمکعب



شکل ۱۶. نمودار فشار- زمان حاصل از بررسی آزمایشگاهی دراگوس و شبیه‌سازی AUTODYN.

۶. شبیه‌سازی و نتایج عددی

شبیه‌سازی مرحله اول: در تمام مدل‌سازی‌های صورت گرفته محفظه انفجار ثابت و به صورت مکعبی با حجم ۸ مترمکعب در نظر گرفته شده است که البته تنها یک‌هشتم آن شبیه‌سازی شده است. بازشوها نیز در این مدل‌سازی در سه موقعیت مکانی متفاوت قرار گرفته‌اند؛ موقعیت اول در مرکز وجه، موقعیت دوم در وسط لبه‌های وجه و موقعیت سوم در گوشه‌های وجه مورد نظر مطابق با شکل (۱۷) لحاظ شده است.

برای بدست آوردن نمودار فشار- زمان، در مرکز وجه متعامد با وجوه دارای بازشو، فشارسنجی تعبیه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل تقارن سه‌محوری مدل، به‌کارگیری فشارسنج بر روی مرکز سقف سازه نیز نتایج یکسانی را ثبت می‌نماید.

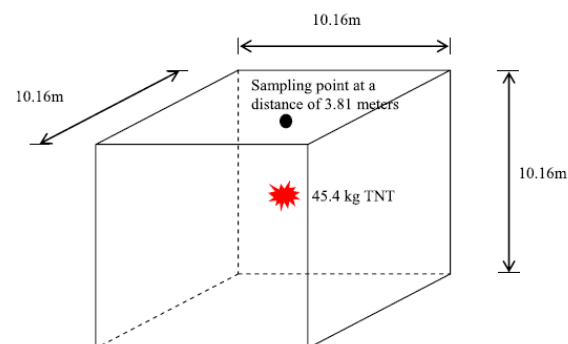
نرم‌افزار و حلگر مورد استفاده: در این پژوهش از هیدروکد توانمند AUTODYN استفاده شده است. با توجه به تغییر شکل‌های بزرگ و مسائل درگیر با سیالات و گازها، نوع حلگر اویلری در شبیه‌سازی عددی به‌کار گرفته شده است.

از دیدگاه اویلری برای شبیه‌سازی حرکت ماده استفاده می‌شود. در این روش ناظر ساکن بوده و این ماده است که در میان شبکه‌بندی اجازه عبور دارد. به همین دلیل این روش در تغییر شکل‌های بسیار بزرگ به‌راحتی عمل می‌نماید.

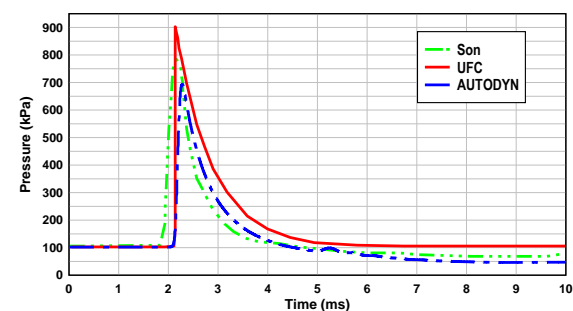
۵. صحت‌سنجی شبیه‌سازی

اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیله شبیه‌سازی‌های زیر انجام شده است.

صحت سنجی اول: شکل (۱۳) مربوط به انفجار ۴۵/۴ کیلوگرم ماده منفجره TNT در هوای آزاد است. فشارسنج در فاصله ۳/۸۱ متر از ماده منفجره قرار دارد. در شکل (۱۴) نمودار فشار- زمان انفجار حاصل از شبیه‌سازی AUTODYN با نتایج حاصل از بررسی سان و همکاران [۲۱] و نیز دستورالعمل UFC ۰۲-۳۴۰-۳ مقایسه شده است.



شکل ۱۳. شبیه‌سازی انفجار در هوای آزاد



شکل ۱۴. نمودار فشار- زمان حاصل از بررسی سان، UFC و شبیه‌سازی AUTODYN.

صحت‌سنجی دوم: شکل (۱۵) شبیه‌سازی مربوط به انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در محفظه مکعبی با حجم ۸ مترمکعب

شایان توجه است که در شکل‌های مذکور پارامترهای زیر معرف ویژگی‌های مختلف شبیه‌سازی است.

OPENING: همان نسبت $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ است که به صورت درصد بیان

شده است ($\frac{A}{V_f^{2/3}} * 100 = OPENING$).

Vent1: بازشو در مرکز وجه

Vent2: بازشو در لبه وجه

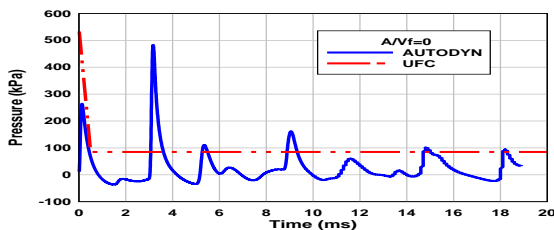
Vent3: بازشو در گوشه‌های وجه

Vent4: بازشو در مرکز چهار وجه جانبی

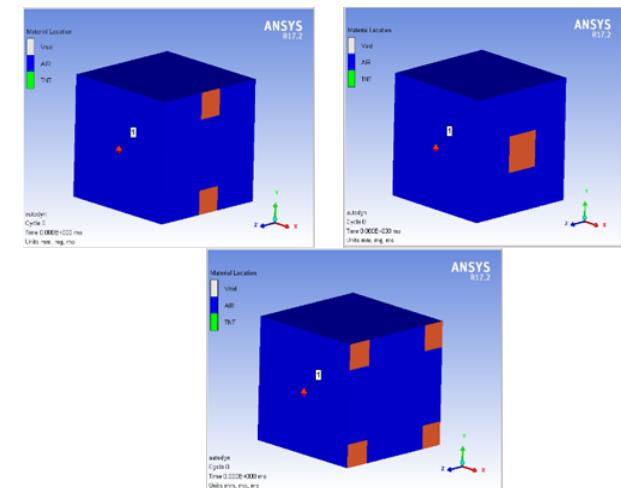
(لازم به ذکر است که تنها در vent4 هر چهار وجه جانبی دارای

بازشو بوده اما در سایر حالت‌ها فقط دو وجه روبروی هم، دارای

بازشو هستند.)



شکل ۱۷. سه موقعیت مکانی متفاوت بازشو؛ مرکز وجه، لبه وجه و گوشه وجه



شکل ۱۷. سه موقعیت مکانی متفاوت بازشو؛ مرکز وجه، لبه وجه و گوشه وجه

مساحت بازشوها در هر یک از موقعیت‌های مکانی نیز مطابق با بخش (۳-۳) به ۶ حالت مختلف تقسیم‌بندی شده‌است.

شکل (۱۸) مربوط به مدل‌سازی بازشو در موقعیت مکانی

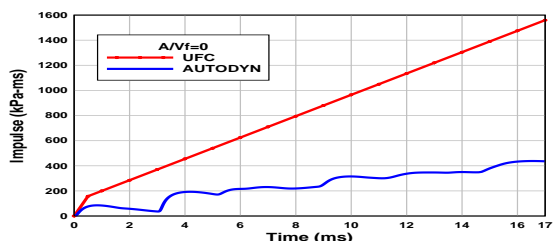
مرکز وجه با ۶ حالت مختلف ابعاد بازشو را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی ۶ حالت مختلف ابعاد بازشو در موقعیت مکانی لبه

وجه و گوشه‌های وجه نیز به همین ترتیب صورت گرفته است.

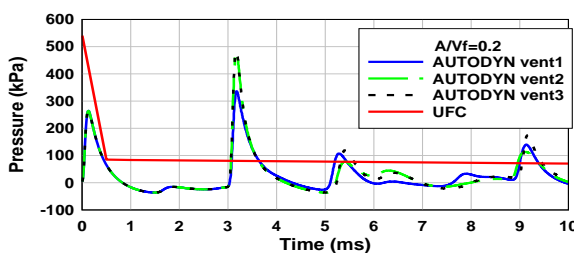
شکل ۱۹. مقایسه نمودار فشار- زمان حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT

در مرکز اتاقک



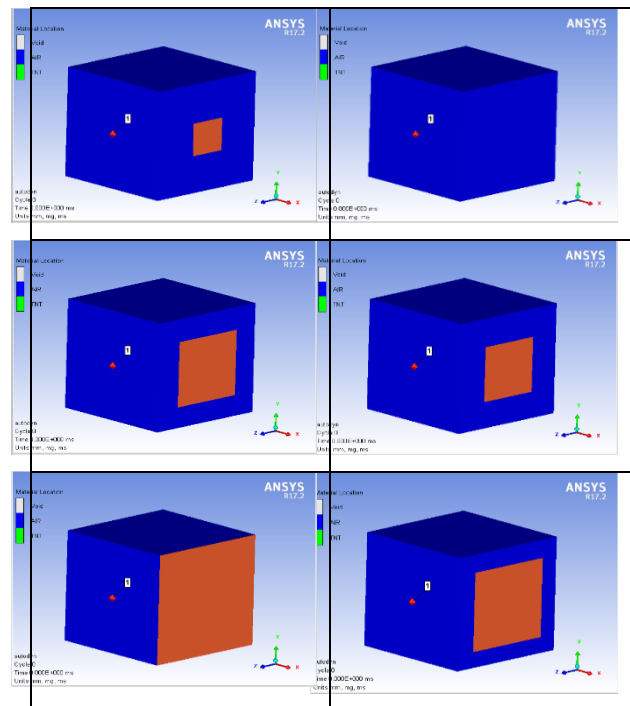
شکل ۲۰. نمودار تکانه- زمان حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به تکانه وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز

اتاقک



شکل ۲۱. نمودار فشار- زمان سه حالت متفاوت موقعیت مکانی بازشو حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.2$ ، تحت

انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک

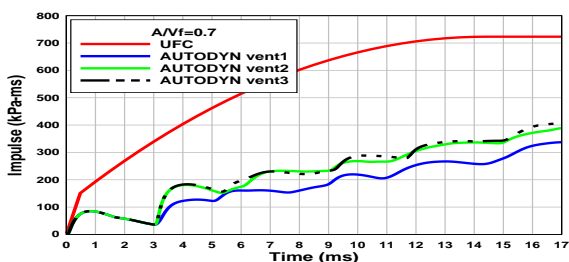


شکل ۱۸. شش حالت مختلف ابعاد بازشو در موقعیت مکانی مرکز وجه

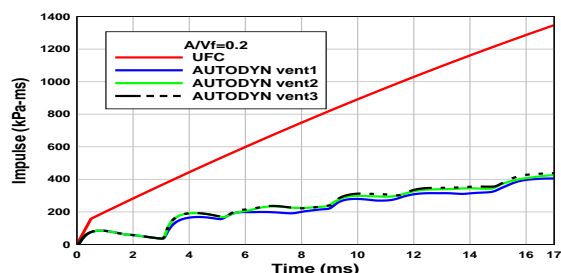
شکل‌های (۱۹) تا (۳۲) تاریخچه فشار- زمان ثبت شده به‌وسیله

فشارسنج ۱، حاصل از انفجار محبوس در مرکز اتاقک را به‌ازای

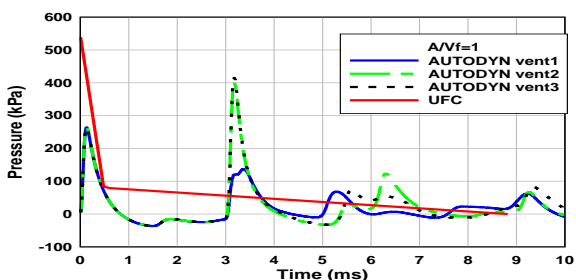
بازشوهایی مختلف و مقدار ماده منفجره متفاوت را نشان می‌دهد.



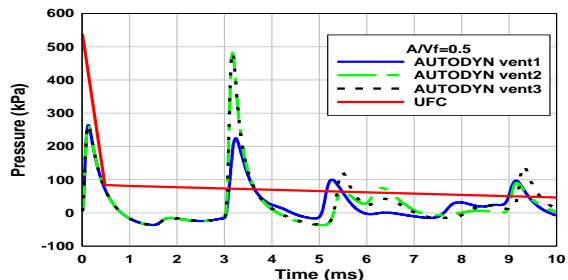
شکل ۲۶. نمودار تکانه- زمان سه حالت متفاوت موقعیت مکانی بازشو حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به تکانه وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.7$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک



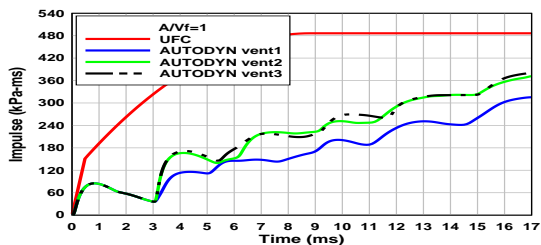
شکل ۲۲. نمودار تکانه- زمان سه حالت متفاوت موقعیت مکانی بازشو حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به تکانه وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.2$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک



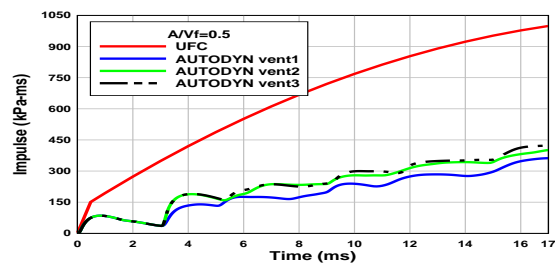
شکل ۲۷. نمودار فشار- زمان سه حالت متفاوت موقعیت مکانی بازشو حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 1$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک



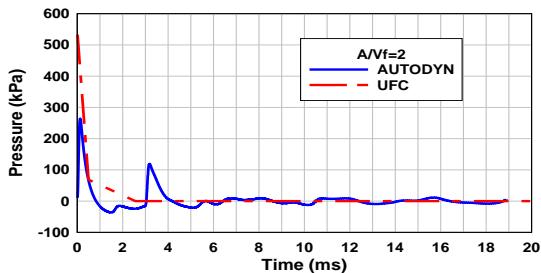
شکل ۲۳. نمودار فشار- زمان سه حالت متفاوت موقعیت مکانی بازشو حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.5$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک



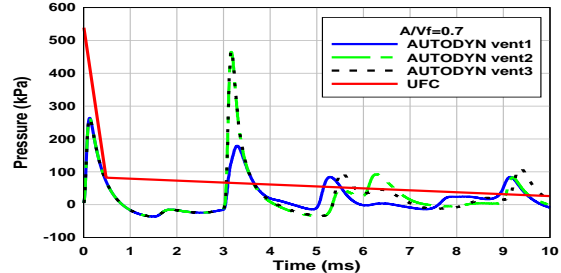
شکل ۲۸. نمودار تکانه- زمان سه حالت متفاوت موقعیت مکانی بازشو حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به تکانه وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 1$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک



شکل ۲۴. نمودار تکانه- زمان سه حالت متفاوت موقعیت مکانی بازشو حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به تکانه وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.5$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک

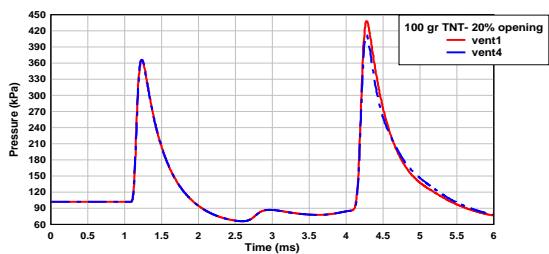


شکل ۲۹. نمودار فشار- زمان حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 2$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک

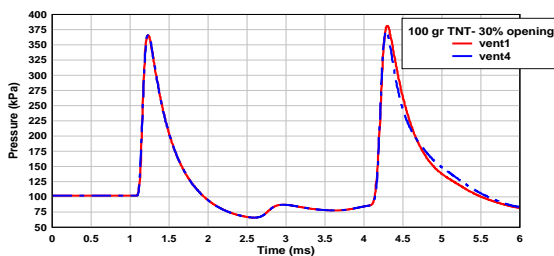


شکل ۲۵. نمودار فشار- زمان سه حالت متفاوت موقعیت مکانی بازشو حاصل از شبیه‌سازی عددی با UFC، مربوط به فشار وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.7$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک

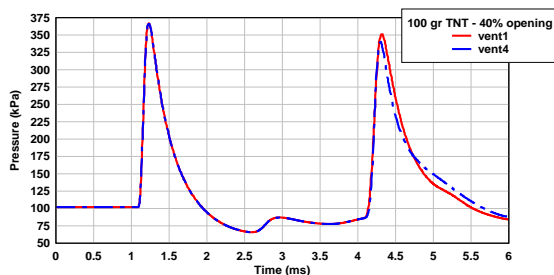
شبه‌سازی مرحله دوم: در گام دوم شبه‌سازی از آنجایی که مطابق با نتایج به‌دست‌آمده بهترین وضعیت بازشو از نظر موقعیت مکانی، وجود بازشو در مرکز دو وجه و با نسبت $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ بین ۰/۲ تا ۰/۵ است، لذا در این مرحله به بررسی تاثیر تعداد وجوه دارای بازشو پرداخته می‌شود. بنابراین تفاوت این مرحله با مرحله قبلی این است که به جای ۲ وجه روبرویی، هر ۴ وجه جانبی دارای بازشو در مرکز هستند. مطابق با شکل‌های (۳۳ تا ۳۶) نسبت $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ در این مرحله نیز بین ۰/۲ تا ۰/۵ لحاظ شده تا بررسی شود که در چه حالتی با حداقل میزان بازشو مقدار بیش‌فشار اولیه (P_1) با بیش‌فشار ثانویه (P_2) برابر می‌گردد.



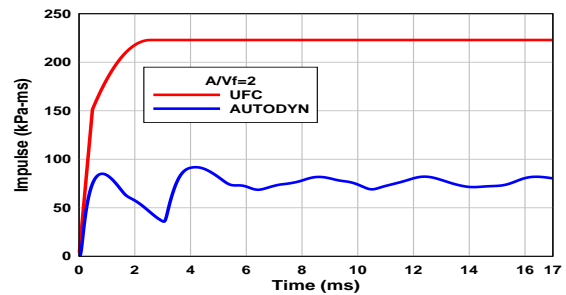
شکل ۳۳. نمودار فشار- زمان حاصل از انفجار ۱۰۰ گرم TNT، در حالت بازشو در مرکز دو وجه (vent 1) با بازشو در مرکز چهار وجه (vent 4)، $(\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.2)$



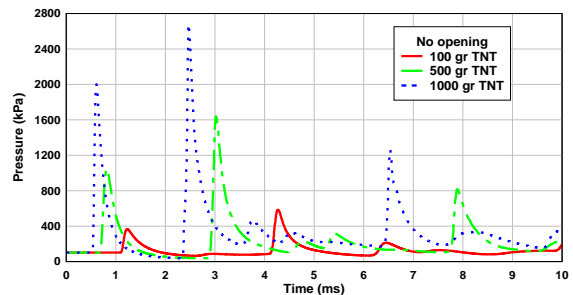
شکل ۳۴. نمودار فشار- زمان حاصل از انفجار ۱۰۰ گرم TNT، در حالت بازشو در مرکز دو وجه (vent 1) با بازشو در مرکز چهار وجه (vent 4)، $(\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.3)$



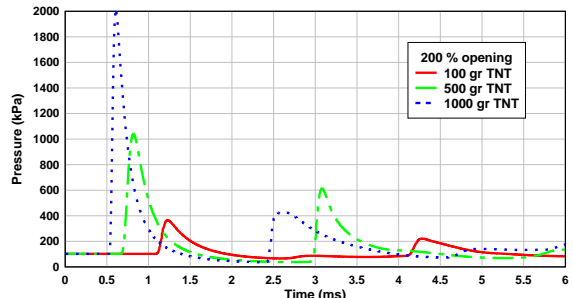
شکل ۳۵. نمودار فشار- زمان حاصل از انفجار ۱۰۰ گرم TNT، در حالت بازشو در مرکز دو وجه (vent 1) با بازشو در مرکز چهار وجه (vent 4)، $(\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.4)$



شکل ۳۰. نمودار تکانه- زمان حاصل از شبه‌سازی عددی با UFC مربوط به تکانه وارد بر سطح داخلی یک وجه اتاقک مکعبی شکل با نسبت بازشو $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 2$ ، تحت انفجار محبوس ۱۰۰ گرم TNT در مرکز اتاقک



شکل ۳۱. نمودار فشار- زمان انفجار کاملاً محبوس ($\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0$) با سه حالت متفاوت مقدار جرم ماده منفجره TNT؛ ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ گرم



شکل ۳۲. نمودار فشار- زمان انفجار با $\frac{A}{V_f^{2/3}} = 2$ مربوط به سه حالت متفاوت مقدار جرم ماده منفجره TNT؛ ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ گرم

جدول ۱. نتایج حاصل از شکل (۳۱)

P_2/P_1	$P_2 - P_1$	P_1		P_2		جرم ماده منفجره (گرم)
		بیش‌فشار ثانویه (کیلوپاسکال)	زمان (میلی ثانیه)	بیش‌فشار اولیه (کیلوپاسکال)	زمان (میلی ثانیه)	
۱/۵۹۴	۲۱۸	۵۸۵	۴/۲۷	۳۶۷	۱/۲۳	۱۰۰
۱/۵۷۷	۶۰۰	۱۶۴۰	۳/۰۲	۱۰۴۰	۰/۸۱۲	۵۰۰
۱/۳۴	۶۸۰	۲۶۸۰	۲/۴۷	۲۰۰۰	۰/۶۰۷	۱۰۰۰

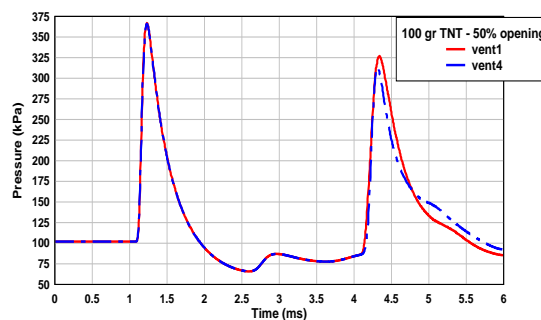
باشند و نسبت $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ برای مدل سازی 0.3 در نظر گرفته شود. نسبت $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ بهینه در مواردی که دو وجه سازه دارای بازشو در مرکز باشند، بین 0.3 تا 0.4 است. بر خلاف دستورالعمل UFC 3-340-02 که به ازای مقدار ثابت $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ همواره نمودار مربوط به فشار- زمان آن ثابت است، اما در این بررسی نشان داده شد که به ازای $\frac{A}{V_f^{2/3}}$ ثابت موقعیت مکانی متفاوت بازشو، در نمودار

فشار-زمان تاثیرگذار است. با توجه به نمودارهای شکل های (۳۱) و (۳۲) مشخص شد که با افزایش جرم ماده منفجره، زمان ایجاد بیش فشار اولیه و بیش فشار انعکاسی کاهش می یابد. علت این امر هم این است که با افزایش جرم ماده منفجره انرژی بیشتری موجب پیشبرد موج شوک و به طبع آن موج انعکاسی می گردد. در تمام نمودارهای فشار- زمان و تکانه- زمان نتایج حاصل از آیین نامه UFC 3-340-02 در مقایسه با نتایج شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی بسیار محافظه کارانه است. نتایج حاصل از UFC در مقایسه با نتایج شبیه سازی عددی به ازای میزان بازشو $(0 \leq \frac{A}{V_f^{2/3}} \leq 1)$ ، هرچه میزان بازشو کمتر باشد نتایج UFC محافظه کارانه تر می گردد و هر چه میزان بازشو بیشتر شود، نتایج UFC به شبیه سازی عددی نزدیکتر می شود. بیشترین شباهت نتایج حاصل از UFC با شبیه سازی عددی مربوط به میزان بازشو $(\frac{A}{V_f^{2/3}} = 1)$ است که شباهت نتایج حاصل از نمودار تکانه- زمان

و فشار- زمان به بیشترین میزان خود می رسد. در میان بازشوهایی مختلف حداقل فشار و تکانه وارد بر سطح داخلی محفظه تحت انفجار داخلی، به ترتیب مربوط به بازشو در وسط وجه، بازشو در لبه وجه و بازشو در گوشه وجه است. به عبارت دیگر به ازای میزان بازشو ثابت تعبیه بازشو در مرکز وجه به نسبت تعبیه بازشو در لبه و گوشه وجه، باعث کاهش بیش فشار و تکانه وارد بر وجه داخلی سازه می گردد. علت این امر هم این است که با تعبیه بازشو در مرکز وجه، سرعت خروج محصولات حاصل از انفجار از سازه بیشتر می شود و لذا باعث کاهش بیش فشار ثانویه وارد بر سطح داخلی سازه می گردد.

۸. مرجع ها

- [1] Luccioni, B. M.; Ambrosini, R. D.; Danesi, R. F. "Analysis of Building Collapse under Blast Loads"; Int. J. Eng. Struct. 2004, 63-71.
- [2] Wu, C.; Hao, H.; Lu, Y. "Dynamic Response and Damage Analysis of Masonry Structures and Masonry in filled RC Frames to Blast Ground Motion"; Int. J. Eng. Struct. 2005, 27, 323-33.



شکل ۳۶. مقایسه نمودار فشار- زمان حاصل از انفجار ۱۰۰ گرم TNT، در حالت بازشو در مرکز دو وجه (vent 1) با بازشو در مرکز چهار وجه (vent 4)، $(\frac{A}{V_f^{2/3}} = 0.5)$

۷. نتیجه گیری

در این مقاله به تحلیل رفتار سازه دارای بازشو، تحت انفجار داخلی پرداخته شده است. تاثیر بازشوهایی مختلف از نظر موقعیت مکانی، اندازه بازشو و تعداد وجوه دارای بازشو، بر بیش فشار و تکانه ناشی از انفجار وارد بر سطوح داخلی سازه بر اساس آیین نامه UFC 3-340-02 و شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج به دست آمده بر تاثیر قابل توجه بازشو در کاهش آسیب های ناشی از انفجار داخلی و طراحی بهینه سازه تاکید دارد. در نتیجه بازشو بهینه حداقل میزان بازشو موجود در سازه است که باعث اعمال حداقل بیش فشار وارد بر سازه می گردد. نمودارهای حاصل از شبیه سازی عددی نشان داد که در انفجار محبوس (انفجار داخلی) بیش فشار اولیه (P_1) وارد بر هر وجه، وابسته به اندازه و موقعیت بازشو ناست. در واقع در هر نوع موقعیت مکانی بازشو، با تغییر در مساحت بازشو تفاوتی در مقدار بیش فشار اولیه ایجاد نمی گردد. هر چه بازشو به مرکز وجه نزدیکتر باشد، هر چند در بیش فشار اولیه (P_1) وارد بر سایر وجوه تغییری حاصل نمی شود اما باعث کاهش بیش فشار انعکاسی (P_2) می گردد. علت این امر هم این است که هر چه بازشو به مرکز وجه سازه نزدیکتر باشد تخلیه مواد حاصل از انفجار، تسریع می گردد. از آنجایی که حداقل مساحت بازشو جهت طراحی بهینه، مورد نظر است؛ در این بررسی نشان داده شد که هر چه تعداد وجوه بیشتری دارای بازشو باشند، مساحت کمتری از بازشوها جهت طراحی بهینه مورد نیاز است. تعبیه بازشو مناسب در سازه می تواند بیش فشار وارد بر سطوح داخلی سازه تحت انفجار محبوس را با توجه به جرم ماده منفجره، تا 680 کیلو پاسکال و به عبارت دیگر تا 37 درصد کاهش دهد. در این بررسی بهینه ترین موقعیت مکانی بازشو و اندازه آن در شرایطی رخ می دهد که هر چهار وجه سازه دارای بازشویی در مرکز وجه

- [13] Salvado, F. C.; Tavares, A. J.; Teixeira-Dias, F.; Cardoso, J. B. "Confined Explosions: The Effect of Compartment Geometry"; *J. Loss. Prev. Process. Ind.* 2017, 48, 126-144.
- [14] Lu, Y.; Xu, K. "Prediction of Debris Launch Velocity of Vented Concrete Structures under Internal Blast"; *Int. J. Impact. Eng.* 2007, 34, 1753-1767.
- [15] Feldgun, V. R.; Karinski, Y. S.; Yankelevsky, D. Z. "Some Characteristics of an Interior Explosion within a Room without Venting"; *Struct. Eng. Mech.* 2011, 37, 633-649.
- [16] Zheng, C.; Kong, X.; Wu, W.; Liu, F. "The Elastic-Plastic Dynamic Response of Stiffened Plates Under Confined Blast Load"; *Int. J. Impact. Eng.* 2016, 95, 141-153.
- [17] Shirvand, M. R.; Shabani, M. J. "Behaviour of the Special Moment Frames and Braced Frames in Steel Structures under Blast Loadings"; *Passive Defence Sci. & Technol.* 2013, 2, 109-114.
- [18] Baba Janyan Bisheh, H. "Determine Vent Size for Exit the Gas Pressure Duo to Internal Explosion"; *Passive Defence Quarterly* 2010, 2, 37-45.
- [19] Dragos, J.; Wu, C.; Oehlers, D. J. "Simplification of Fully Confined Blasts for Structural Response Analysis"; *Int. J. Eng. Struct.* 2013, 56, 312-326.
- [20] Peyman, S.; Amini Mazraeno, M.; Lotfi, A. "Loading, Analysis and Design of an Open Explosive Concrete Booth under the Influence of Internal Explosion"; MSc. Thesis, Imam Hossein University, 2017.
- [21] Son, J.; Lee, H. "Performance of Cable-Stayed Bridge Pylons Subjected to Blast Loading"; *Int. J. Eng. Struct.* 2011, 33, 1133-1148.
- [3] Jones, J.; Wu, C. Q.; Oehlers, D. J.; Whittaker, A. S.; Sun, W.; Marks, S.; Coppola, R. "Finite Difference Analysis of Simply Supported RC Slabs for Blast Loadings"; *Int. J. Eng. Struct.* 2009, 31, 2825-32.
- [4] Zhou, X. Q.; Kuznetsov, V. A.; Hao, H.; Waschl, J. "Numerical Prediction of Concrete Slab Response to Blast Loading"; *Int. J. Impact. Eng.* 2008, 35, 1186-1200.
- [5] Brode, H. L. "Numerical Solution of Spherical Blast Waves"; *J. Appl. Phys.* 1995, 6, 766-775.
- [6] Henrych, J. "The Dynamics of Explosion and its Use"; Elsevier, Amsterdam, 1979.
- [7] Kinney, G. F.; Graham K. J. "Explosive Shocks in Air"; Springer-Verlag, Berlin 1985.
- [8] Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02), "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of Defense, Washington DC, 5 December 2008.
- [9] Peyman, S.; Tahmasbzadeh, M. "Effect of Blast Wave Trap in Tunnels with 90 Degrees Bend on Reduction of Pressure Produced by an Explosion Outside the Tunnel"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2015, 3, 201-210.
- [10] Hu, Y.; Wu, C.; Lukaszewicz, M.; Dragos, J.; Ren, J.; Haskett, M. "Characteristics Of Confined Blast Loading In Unvented Structures"; *Int. J. Prot. Struct.* 2011, 2, 1, 21-43.
- [11] Edri, I.; Savir, Z.; Feldgun, V. R.; Karinski, Y. S.; Yankelevsky, D. Z. "on Blast Pressure Analysis Due to a Partially Confined Explosion: 1. Experimental Studies"; *Int. J. Prot. Struct.* 2010, 2, 1-20.
- [12] Dragos, J.; Wu, C.; Oehlers, D. J. "Simplification of Fully Confined Blasts for Structural Response Analysis"; *Int. J. Eng. Struct.* 2013, 56, 312-326.