

# نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال دهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، (پیاپی ۴۰): صص ۹۰-۸۱

## شبیه‌سازی عددی و بارگذاری انفجاری اتاقک ایمن تست انفجار

### تحت انفجار داخلی

مصطفی امینی مزرعه‌نو<sup>۱\*</sup>، حسین خدارحمی<sup>۲</sup>، امین‌اله خادمی‌پور<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

#### چکیده

امروزه با توجه به تهدیدات تروریستی و خصمانه علیه کشور و نیاز مبرم به در نظر گرفتن اصول پدافند غیرعامل، مطالعه پدیده‌هایی چون؛ تست مواد منفجره، اثر انفجار بر روی اهداف مختلف، انتشار امواج شاک در اجسام، ارزیابی ایمنی و کیفیت ساخت تجهیزات امن و دیگر موضوعات کاربردی، ضروری می‌باشد. یکی از این موضوعات، تست انفجار بوده که با داشتن یک اتاقک ایمن می‌توان نتایج حاصل از تست مواد منفجره را به‌دست آورد. برای داشتن چنین مکانی، طراحی یک اتاقک مقاوم در برابر بارگذاری‌های انفجاری، لازم است. برای طراحی اتاقک تست انفجار در برابر انفجار داخلی، به‌دست آوردن حداکثر فشار شوک ناشی از انفجار وارد بر وجوه سازه لازم می‌باشد. در این پژوهش، انفجار داخلی در اتاقک تست انفجار با ابعاد  $3 \times 3 \times 5$  متر به کمک نرم‌افزار AUTODYN شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی، فشار به‌صورت نقطه‌ای به‌دست می‌آید و برای یک وجه مشخص، فشار وارد بر آن به‌صورت کلی و متوسط به‌دست نمی‌آید. برای حل این مشکل، نمودارهای فشار شوک- زمان گنج‌های تعبیه‌شده در یک وجه مشخص، با کمک تابع شکل موقعیت گنج‌ها به یک نمودار فشار یکنواخت، معادل شده است. سپس این نمودار با روش پیشنهادی ارائه‌شده، خطی و با نمودار به‌دست آمده بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02 مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر فشار شوک به‌دست آمده بر اساس شبیه‌سازی، نسبت به نتایج آیین‌نامه UFC 3-340-02 در انفجار داخلی، بزرگتر می‌باشد. همچنین نمودار فشار یکنواخت معادل به‌دست آمده بر اساس تابع شکل درست می‌باشد و می‌توان از آن برای طراحی اتاقک استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: انفجار داخلی، اتاقک تست انفجار، بارگذاری انفجاری، آیین‌نامه UFC 3-340-02

۱- مربی، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>، (amini.maz.59@gmail.com) - نویسنده مسئول

۲- استاد، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

۳- کارشناسی ارشد پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

## ۱. مقدمه

و مدل‌های انفجاری (دایره‌ای، مکعبی، استوانه‌ای) [۳]، ویرهیجم و همکارانش در سال ۲۰۰۷ اثر تغییر ابعاد داخلی مدل‌های انفجاری [۴] و در سال ۲۰۱۲ اثر شکل خرج به‌صورت روکش‌دار و بدون روکش (پوسته) [۵] و زو همکارانش در سال ۲۰۱۲ تغییر دانسیته بتن جداره نمونه [۶] را بر فشار شوک به‌دست‌آمده ناشی از انفجار داخلی بررسی کردند.

همچنین لطفی در تابستان سال ۱۳۹۷ تاثیر هر یک از عوامل موقعیت بازشو، تعداد وجوه دارای بازشو و نیز اندازه بازشو بر بارگذاری وارد بر سطح داخلی سازه ناشی از انفجار داخلی را بررسی نمود [۷].

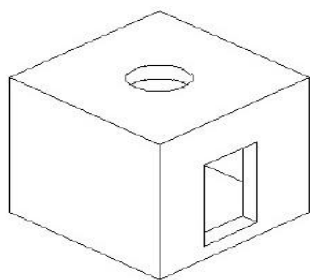
در ادامه پژوهش‌های انجام شده ادبی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ پژوهشی را انجام دادند که در آن چگونگی توزیع فشار بر روی سطوح سازه در اثر انفجار داخلی و همچنین بررسی روند تخلیه فشار شوک و گاز از بازشدگی ایجادشده در سقف نمونه انفجاری نشان داده شده است که رویکردی جدید نسبت به پژوهش‌های گذشته محسوب می‌شود [۸].

همچنین یکی از موضوعات مهم تعیین پارامترهای موج انفجار است که بروندیچ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی و تعیین دقیق زمان رسیدن موج به وجه، حداکثر فشار شوک و مدت زمان تداوم فشار انفجاری در محفظه ساخته شده با ورق‌های استیل جوش داده شده به یکدیگر، پرداخته‌اند [۹].

در پژوهش‌های بررسی شده بین نتایج شبیه‌سازی عددی انفجار داخلی و آیین‌نامه UFC مقایسه‌ای صورت نگرفته بود و همچنین فشارهای شوک وارد بر وجه هدف به‌صورت نقطه‌ای (گیج‌های فشار سنج) بود و یک نمودار فشار متوسط و کلی جهت طراحی ارائه نشده بود.

این پژوهش علاوه بر تکمیل موارد و کمبودهای ذکرشده می‌تواند با روش پیشنهادی ارائه‌شده در آن، در به‌دست آوردن نمودار فشار یکنواخت در تعدادی از اشکال هندسی که در آیین‌نامه UFC برای آن‌ها محدودیت وجود دارد، کمک نماید.

انفجار در داخل سازه‌های محصور شده با میزان باز شدگی‌های خیلی کم مطابق شکل (۱) هم ایجاد فشار شوک و هم فشار گاز خواهد نمود که مقادیر آن‌ها نیز حداکثر می‌باشد.



شکل (۱): سازه محصور با بازشدگی

برای جلوگیری از خسارت‌های مالی و جانی در برابر انفجارهای داخلی تصادفی یا عمدی به‌وجود آمده در سازه‌ها، باید سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری طراحی شوند. اولین گام در مسیر نیل به این هدف، شناخت و تحلیل عملکرد این موضوع برای ارائه نتایج دقیق می‌باشد. روش‌های تجربی با آزمایش‌های زیاد و بررسی پارامترهای مختلف نسبت به روش‌های عددی و شبیه‌سازی، نتایج واقعی‌تری را در اختیار محققین می‌گذارند.

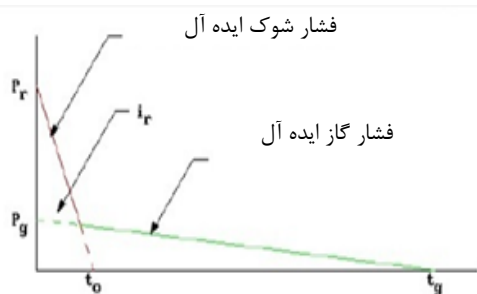
برای طراحی یک سازه ایمن در برابر انفجار داخلی، به‌دست آوردن حداکثر فشار شوک ناشی از انفجار داخلی وارد بر وجوه سازه لازم است. در این پژوهش روشی عددی برای به‌دست آوردن یک نمودار فشار- زمان وارد بر وجه هدف، جهت طراحی سازه پیشنهاد شده است. برای این کار به کمک نرم‌افزار اتوداین یک اتاقک بتنی تست انفجار بدون بازشو و با ابعاد  $3 \times 3 \times 5$  متر، با ابعاد واقعی به صورت سه بعدی شبیه‌سازی می‌شود که ۱۰۰ گرم ماده منفجره TNT در مرکز آن و در فاصله ۱/۵ متر از کف اتاقک قرار دارد. اما در نرم‌افزار اتوداین فشار به صورت نقطه‌ای به‌دست می‌آید و برای یک وجه مشخص، فشار وارد بر آن به‌صورت کلی و متوسط به‌دست نمی‌آید. برای حل این مشکل، نمودارهای فشار شوک- زمان گیج‌های یک وجه مشخص، با کمک تابع شکل موقعیت گیج‌ها به یک نمودار فشار- زمان یکنواخت، معادل شده است. سپس این نمودار با روش پیشنهادی ارائه شده در این پژوهش ساده‌سازی شده و خطی گردید و با نمودار به‌دست‌آمده بر اساس آیین‌نامه UFC 3-340-02 مقایسه شد و شباهت‌ها و تفاوت‌های دو نمودار فوق به‌دست آمد و نیز می‌توان نمودار فشار- زمان بهینه را جهت طراحی تعیین نمود.

## ۲. پیشینه تحقیق

در پژوهش‌های سال‌های گذشته، آن‌هایی به‌عنوان پیشینه تحقیق مورد نظر بودند که موضوع برآورد فشار شوک و گاز ناشی از انفجار داخلی و عوامل موثر بر آنها را در محفظه‌های محبوس و نیمه محبوس بررسی کردند یا این‌که در قسمتی از تحقیق خود به موضوعات فوق پرداختند.

روش‌های استفاده‌شده در این پژوهش‌ها به‌صورت تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزارهای LS-DYNA و PRONTO بود.

تحقیقاتی در خصوص تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر فشار شوک ناشی از انفجار داخلی انجام شده است به‌طوری‌که لی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ تاثیر فاصله خرج تا وجه هدف [۱]، ویبول در سال ۱۹۶۸ تاثیر وزن خرج و ریز ودرشت بودن مش [۲]، گروبو و همکارانش در سال ۱۹۸۲ اثر شکل هندسی نمونه‌ها



شکل (۳): تفکیک فشار شوک و فشار گاز

در مرحله فشار شوک برای تعیین مشخصه‌های ضربه انفجار می‌توان از وزن خرج TNT معادل، فاصله تا سطح هدف و انحراف آن استفاده کرد [۱۰].

با محاسبه حداکثر فشار بازتاب شده  $P_r$  و تکانه  $it$ ، می‌توان مدت زمان تکانه و موج فشار بازتاب شده  $tr$  را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

(۱)

$$t_r = \frac{2 \times i_r}{P_r}$$

### ۳. صحت‌سنجی

برای این‌که از درستی مدل‌سازی و صحت نتایج آن آگاه شد، باید نتایج یک آزمایش تجربی را با نتایج شبیه‌سازی مدل مقایسه کرد. البته باید این نکته را در نظر گرفت که در انفجار محبوس به دلیل پیچیدگی و ترکیب فشار ناشی از موج شوک و فشار گاز، نتایج آزمایش با نتایج مدل شبیه‌سازی شده کاملاً یکسان نخواهد بود و کمی خطا وجود دارد.

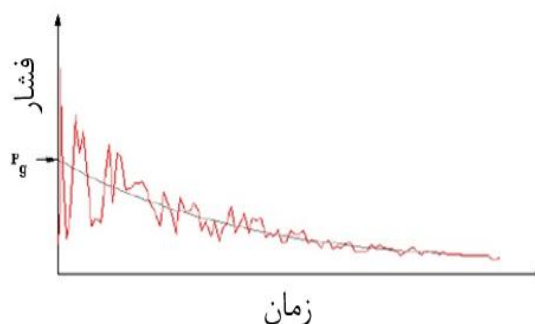
برای صحت‌سنجی از مقاله ورهیچم در سال ۲۰۰۷ استفاده شده است. با به‌کارگیری یک ترکیب ویژه از پالس‌های اشعه ایکس قوی، ثبت و ضبط تغییر شکل‌های اولیه، روند شکست، سنجش کرنش و فشار انجام گرفت و خلاصه‌ای از نتایج، آزمایش‌ها و تفسیرهای روند فروپاشی و شکست ارائه گردید.

مطابق شکل (۴) ابعاد اتاق  $0.5 \times 1 \times 2$  متر و سقف آن به صورت دال یک طرفه بتن مسلح می‌باشد [۱۱].

در صحت‌سنجی انجام شده، هدف مقایسه متوسط بیشترین فشار می‌باشد و به شکست بتن و کرنش آن پرداخته نمی‌شود. به همین دلیل حداکثر فشار حاصل از انفجار داخلی در اتاقک با سقف بتنی مسلح و غیر مسلح تفاوتی نمی‌کند و در شبیه‌سازی هم، کل وجوه و دیوارها به جز وجه زیرین به‌صورت بتن غیرمسلح مدل شده است.

مدت زمان تداوم فشارهای گاز و در نتیجه تکانه ناشی از آن به میزان بازشدگی‌های فضای بسته ارتباط خواهد داشت. نکته‌ای که وجود دارد این است که لزوماً شروع فشارهای گاز همزمان با شروع فشارهای شوک نخواهد بود. همچنین پس از آغاز اعمال فشارهای گاز مدت زمان مشخصی طول خواهد کشید تا این فشارها به حداکثر مقدار خود برسند. البته این تاخیر زمانی بین لحظه آغاز فشارهای گاز تا لحظه رسیدن آن به حداکثر مقدار کوچک می‌باشد و معمولاً برای مقاصد طراحی در اکثر سازه‌های محصور شده می‌توان از آن صرف‌نظر نمود و این دو را همزمان در نظر گرفت.

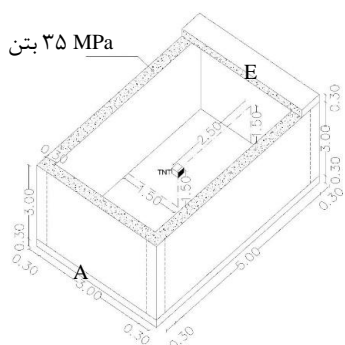
بعد از مرحله شوک، تعریف محیط انفجار بسیار پیچیده می‌شود. امواج شوک بازتابی با سطوح مختلف اندرکنش داشته و هر اندرکنش، امواج شوک بازتابی جدیدی را تولید می‌کند که این فرآیند تا مدت زمان قابل ملاحظه‌ای ادامه می‌یابد. در همین زمان، به دلیل گسترش انفجار به فضای محبوس، گازهای با فشار و دمای بالا تولید می‌شوند. زمان تداوم مرحله فشار گازی، بسیار طولانی‌تر از زمان تداوم مرحله شوک بوده و به‌عنوان فاز شبه استاتیکی شناخته می‌شود. فشار ترکیب شده در مقابل تاریخچه زمان برای یک انفجار داخلی در شکل (۲) نشان داده شده است. ضربه ناشی از شوک بازتابی از یک سری فشار بازتابی پایین حاصل می‌شود، که این فرآیند همان مرحله تشکیل فشار گازی است که به تدریج باعث از بین رفتن فشار اولیه و ایجاد فشار پیرامونی می‌شود. این مرحله از فشار گازی را می‌توان با یک منحنی با شیب کم و آرام که از میان تعداد زیادی فشار گازی مختلف عبور می‌کند، تقریب زده و این تقریب در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): فشار شوک و فشار گاز

در محاسبات، مرحله شوک و مرحله فشار گاز مطابق شکل (۳) با ضربه مثلی تقریب زده می‌شوند. فشار شوک با حداکثر فشار بازتاب شده  $P_r$  و زمان تداوم  $t_r$  مشخص می‌شود و مرحله فشارگازی دارای مقدار حداکثر  $P_g$  و زمان تداوم  $t_g$  است که در نزدیکی منبع انفجار بر هم منطبق هستند.

سه عدد گویج فشارسنج در قسمت داخلی وجه با طول  $2\text{ m}$  و ارتفاع  $0.5\text{ m}$ ، متوسط بیشترین فشار در طول مدت بارگذاری را نشان می‌دهد.  $0.5$  کیلوگرم TNT در مرکز و با فاصله  $25\text{ cm}$  از کف اتاقک قرار دارد.



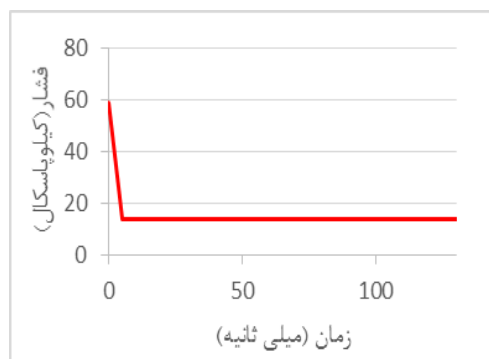
شکل (۶): نمایش سه بعدی اتاقک تست انفجار بدون بازشو

در این پژوهش نمودارهای فشار- زمان وارد بر وجه  $E$  و  $A$  بر اساس شبیه‌سازی و آیین‌نامه UFC 3-340-02 به دست می‌آید.

#### ۴-۱. آیین‌نامه UFC 3-340-02

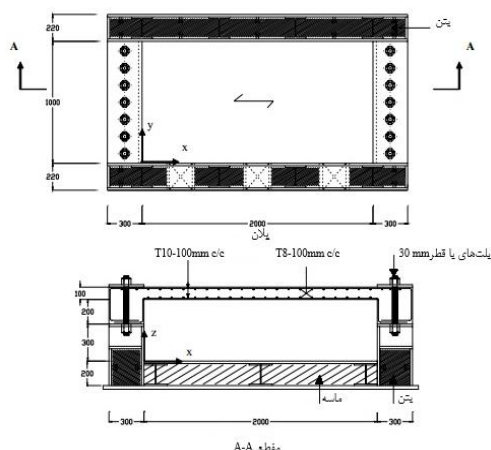
آیین‌نامه UFC 3-340-02 [۱۲] روشی را پیشنهاد می‌کند که در آن با توجه به مشخصه‌های هندسی فضا، تعداد دیوارهای موجود، میزان خرج انفجار و موقعیت نقطه انفجار نسبت به دیوار مورد نظر، فشار دینامیکی متوسطی برای دیوار هدف به همراه تکانه ویژه آن تعیین می‌شود. استفاده از این روش مبتنی بر بهره‌گیری از بیش از  $100$  نمودار راهنما است که ارائه همه آنها در متن حاضر مقدور نبوده و جهت استفاده می‌توان به متن اصلی آیین‌نامه مراجعه نمود. همچنین حداکثر فشار گاز ناشی از انفجار داخلی بر اساس نسبت وزن مواد منفجره به حجم اتاقک تعیین شده است.

نمودارهای فشار- زمان به صورت زیر به دست آمده‌اند.



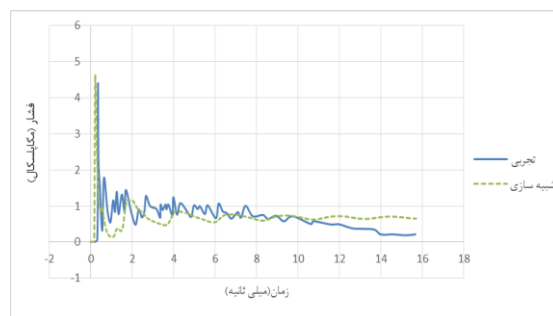
شکل (۷): نمودار فشار- زمان کل ناشی از انفجار داخلی وارد بر وجه  $E$  بر اساس آیین‌نامه UFC

سه عدد گویج فشارسنج در قسمت داخلی وجه با طول  $2\text{ m}$  و ارتفاع  $0.5\text{ m}$ ، متوسط بیشترین فشار در طول مدت بارگذاری را نشان می‌دهد.  $0.5$  کیلوگرم TNT در مرکز و با فاصله  $25\text{ cm}$  از کف اتاقک قرار دارد.



شکل (۴): ابعاد اتاقک آزمایش انفجار داخلی

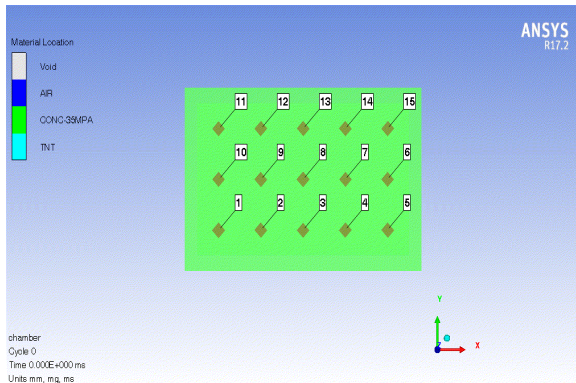
مطابق شکل (۵)، متوسط بیشترین فشار در وجه مذکور در تست تجربی  $4/36\text{ MPa}$  و در شبیه‌سازی  $4/64\text{ MPa}$  می‌باشد. همچنین در آزمایش انجام شده، به علت ترک خوردن سقف بتن مسلح، گاز حاصل از انفجار از داخل اتاقک تخلیه می‌شود و از یک زمان به بعد نمودار فشار- زمان ( $0.5$  کیلوگرم TNT) به سمت صفر میل می‌کند. در صورتی که در شبیه‌سازی این اتفاق نمی‌افتد و بنابراین، فشار گاز ثابت می‌ماند و از اتاقک خارج نمی‌شود. مقایسه نمودارهای فشار- زمان به دست آمده از تست تجربی و شبیه‌سازی حاصل از انفجار داخلی در شکل (۵) نشان داده شده است.



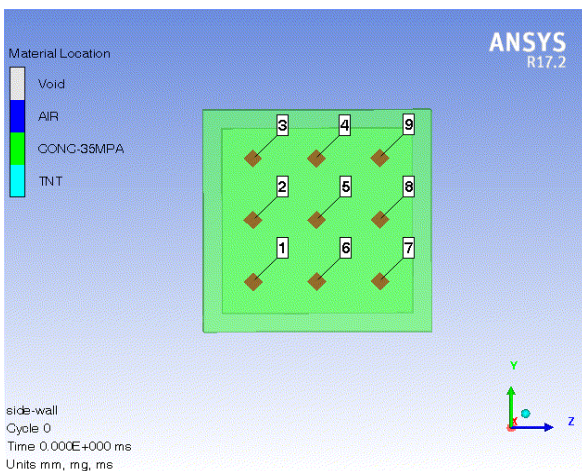
شکل (۵): مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تست تجربی برای  $0.5\text{ kg}$  ماده انفجاری TNT

#### ۴. محاسبه فشار شوک و گاز وارد بر وجوه اتاقک

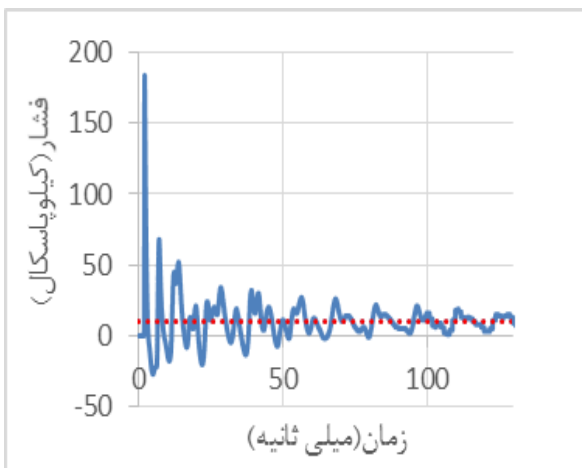
در این پژوهش، یک اتاقک تست انفجار به صورت بتنی با  $f_c = 25\text{ MPa}$  و  $\nu = 0.3$ ، غیرمسلح و بدون بازشو با ابعاد



شکل (۹): وضعیت قرارگیری گیج‌ها در وجه E

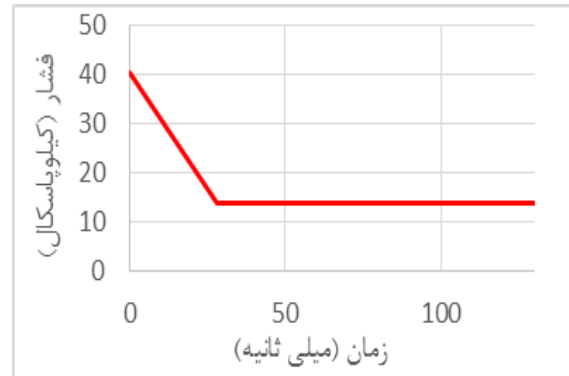


شکل (۱۰): وضعیت قرارگیری گیج‌ها در وجه A



شکل (۱۱): نمودار فشار- زمان گیج مرکزی وجه E

با توجه تقارن سازه، نمودارهای فشار- زمان وارد بر وجوه با ابعاد  $3 \times 5$  متر مشابه نمودار فشار- زمان وارد بر وجه E می‌باشد.



شکل (۸): نمودار فشار- زمان کل ناشی از انفجار داخلی وارد بر وجه A بر اساس آیین‌نامه UFC

با توجه تقارن سازه، نمودارهای فشار- زمان وارد بر وجوه با ابعاد  $3 \times 3$  متر مشابه نمودار فشار- زمان وارد بر وجه A می‌باشند. همچنین با توجه به این‌که اتاقک، ایمن و مقاوم در برابر انفجار می‌باشد، بنابراین، وجه شکننده‌ای وجود ندارد و به‌علت عدم تخلیه گازهای ناشی از انفجار، مدت تداوم فشار گاز نسبت به پریود اصلی سازه بسیار بزرگ خواهد بود. به همین دلیل فشار گاز در تمام مدت انجام تجزیه و تحلیل به صورت ثابت تداوم خواهد داشت.

#### ۴-۲. شبیه‌سازی

اتاقک تست انفجار با مشخصات ذکر شده در نرم‌افزار اتوداین شبیه‌سازی شده است و بر روی وجوه مورد نظر مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) گیج‌هایی تعبیه گردیده است.

در اثر انفجار داخلی به‌ازای هر گیج یک نمودار فشار- زمان به‌دست می‌آید که به‌صورت نمونه نمودارهای فشار- زمان گیج‌های مرکزی دال‌های بتن  $3 \times 3$  متر و  $5 \times 3$  متر در شکل‌های (۱۱-۱۲) نشان داده شده است. برای به‌دست آوردن یک فشار متوسط و کلی که بر وجه اعمال می‌گردد، بایستی نمودارهای فشار- زمان گیج‌ها به یک نمودار فشار- زمان یکنواختی معادل شود که در قسمت بعدی به آن پرداخته خواهد شد. سپس می‌توان این نمودار معادل را با نمودار به‌دست‌آمده از آیین‌نامه UFC 3-340-02 مقایسه نمود.

$$F_{eq}(t) = K_S F(t) \quad (۶)$$

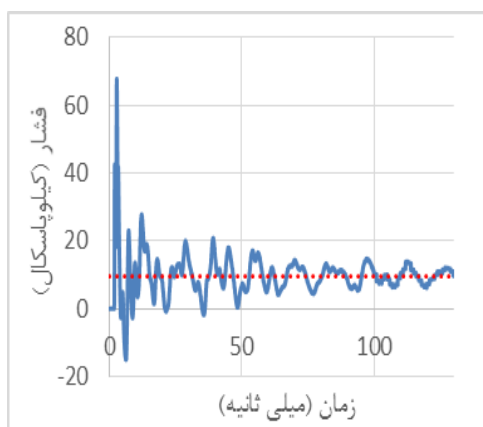
بنابراین،  $K_S(t)$  را با استفاده از رابطه (۳) و (۶) می‌توان برای زمان‌های مختلف در سطح المان به‌دست آورد [۱۳].

$$K_S(t) = \frac{\int_A p(x,y,t)\phi(x,y)dA}{\int_A p(x,y,t)dA \int_A \phi(x,y)dA} \times A \quad (۷)$$

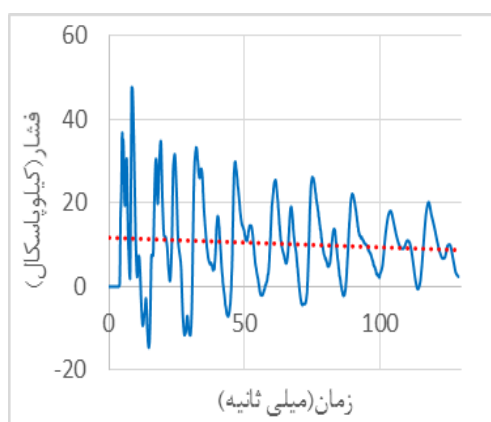
به کمک روابط ارائه‌شده فوق و با داشتن تابع شکل، نمودارهای فشار-زمان گج‌ها در شبیه‌سازی را می‌توان به یک نمودار معادل تبدیل نمود. مقدار تابع شکل در موقعیت گج‌ها بر اساس مختصاتشان از رابطه (۸) برای دال با چهارلبه گیردار، به‌دست می‌آیند [۱۴].

$$\phi(x) = \frac{16x^2(L-x)^2}{L^4} \quad \phi(y) = \frac{16y^2(L-y)^2}{L^4} \quad (۸)$$

بدین ترتیب نمودار فشار-زمان یکنواخت معادل به‌صورت شکل‌های زیر به‌دست می‌آید.

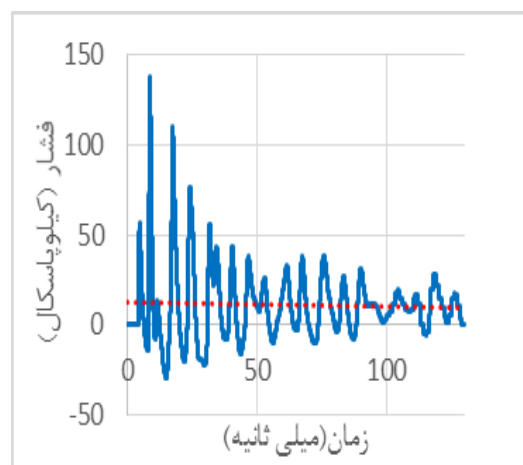


شکل (۱۳): نمودار فشار-زمان یکنواخت وارد بر وجه E (بر اساس تابع شکل)



شکل (۱۴): نمودار فشار-زمان یکنواخت وارد بر وجه A (بر اساس تابع شکل)

خط مستقیم هاشورخورده در شکل‌های (۱۳-۱۴) همان فشار گاز ثابت می‌باشد.



شکل (۱۲): نمودار فشار-زمان گج مرکزی وجه A

خط مستقیم هاشورخورده در شکل‌های (۱۱-۱۲) همان فشار گاز ثابت می‌باشد.

## ۵. به‌دست آوردن فشار یکنواخت معادل برای بارهای ناشی از انفجار داخلی

با استفاده از روش سیستم یک درجه آزادی و اصل هم ارزی انرژی کرنشی ارتجاعی، می‌توان فشار غیریکنواخت وارد بر یک سطح را به فشاری یکنواخت (Equivalent)، معادل نمود که مراحل آن به‌صورت زیر به‌دست آمده است.

$$\int_A p(x,y,t)\phi(x,y)dA = \int_A P_{eq}(t)\phi(x,y)dA \quad (۲)$$

$\phi(x,y)$  تابع شکل مربوط به سطح المان مورد نظر است که به ازای مختصات  $x$  و  $y$  هر نقطه از سطح به‌دست می‌آید.  $p(x,y,t)$  فشار ناشی از انفجار است که به مختصات  $x$  و  $y$  از سطح مربوطه و در زمان دلخواه  $t$  اعمال می‌شود.

با توجه به پارامترهای فوق، فشار معادل از انتگرال خارج و به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$P_{eq}(t) = \frac{\int_A p(x,y,t)\phi(x,y)dA}{\int_A \phi(x,y)dA} \quad (۳)$$

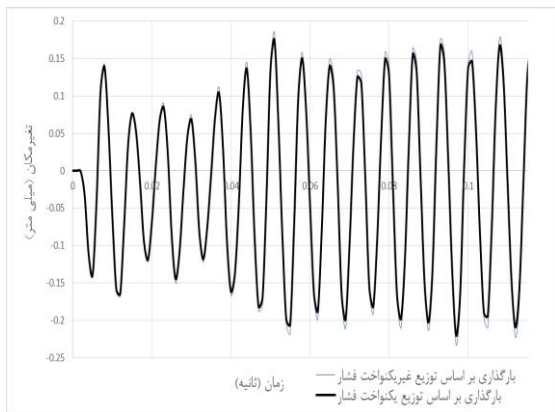
تابع شکل صفحه در رابطه (۳) را می‌توان به صورت حاصلضرب تابع شکل دو راستای متعامد یعنی  $\phi(x,y) = \phi(x)\phi(y)$  نوشت. برای تبدیل بار غیریکنواخت به بار یکنواخت معادل، باید ضربی را به‌دست آورد تا این عمل را انجام دهد. طبق سیستم یک درجه آزادی می‌توان نوشت:

$$F_e(t) = K_L F_{eq}(t) \quad (۴)$$

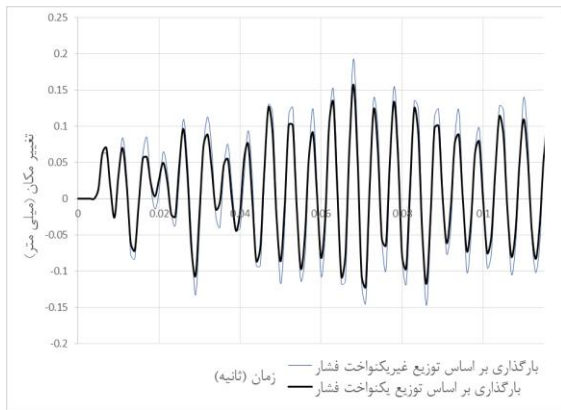
که در آن،  $K_L$  ضریب بار،  $F_e(t)$  نیروی خارجی وارد بر جسم و  $F_{eq}(t)$  نیروی یکنواختی است که بر سطح  $A$  وارد می‌شود.

$$F_{eq}(t) = A P_{eq}(t) \quad (۵)$$

ضربی است که بار واقعی غیریکنواخت را به بار یکنواخت معادل تبدیل می‌کند. بنابراین، می‌توان نوشت:



شکل (۱۶): مقایسه تغییر مکان مرکز هندسی وجه E (ناشی از اعمال فشار غیر یکنواخت و فشار یکنواخت)



شکل (۱۷): مقایسه تغییر مکان مرکز هندسی وجه A (ناشی از اعمال فشار غیر یکنواخت و فشار یکنواخت)

همان‌طور که در شکل‌های (۱۶-۱۷) مشاهده می‌شود اختلاف تغییر مکان در موقعیت پیک‌های نمودارها کم بوده و درصد اختلاف تغییر مکان‌ها در مرکز هندسی وجوه E و A به ترتیب حدود ۵ و ۱۲ درصد است. البته با توجه به این‌که در وجه A گنج کمتری وجود دارد، دقت نمودار تغییر مکان در اثر اعمال بار یکنواخت کمتر شده است. با توجه به این‌که فشار گاز در اتاقک ثابت است و مدت زمان زیادی اعمال می‌شود، به نظر می‌رسد تغییر مکان‌ها در مدت زیاد با توجه به تأثیر استهلاک، به عددی ثابت خواهند رسید و درصد اختلاف ثابت خواهد شد.

بنابراین، با توجه به نتایج فوق می‌توان از درستی معادل‌سازی توزیع غیریکنواخت به توزیع یکنواخت اطمینان حاصل نمود. برای مقایسه نمودار فشار یکنواخت با نمودار فشار بر اساس آیین‌نامه *UFC 3-340-02*، بایستی این نمودار از حالت غیرخطی، به حالت خطی تبدیل شود.

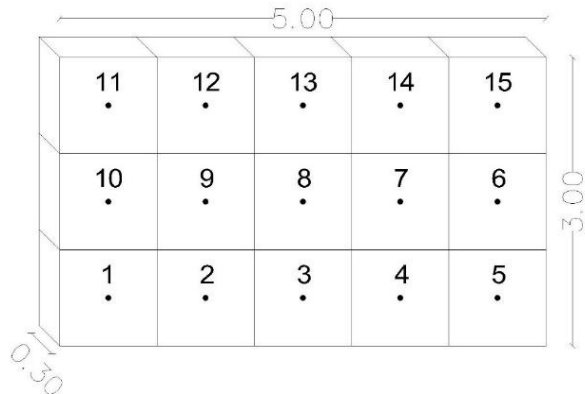
بنابراین، نمودارهای فشار شوک گنج‌های وارد بر وجه مورد نظر، به یک نمودار فشار یکنواخت معادل گردید.

### ۵-۱. مناسب بودن روش

همان‌طور که در قسمت قبل مشاهده شد، نمودار فشار- زمان یکنواخت به‌دست آمد. در این قسمت به بررسی مناسب بودن این روش معادل‌سازی پرداخته شده است.

تطابق پاسخ تغییر مکان مرکز هندسی وجه هدف، تحت اثر دو بارگذاری توزیع یکنواخت و غیریکنواخت فشار، می‌تواند گواه خوبی از مناسب بودن این معادل‌سازی باشد. بنابراین، نتایج تغییر مکان ناشی از بارگذاری دو نوع توزیع به‌دست‌آمده و با یکدیگر مقایسه شدند.

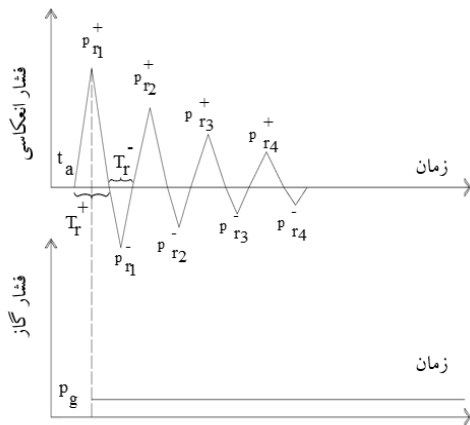
برای به‌دست آوردن تغییر مکان مرکز هندسی وجه هدف، به کمک نرم افزار *SAP* این دو نوع بارگذاری بر وجه اعمال می‌شود. برای این کار وجوه E و A به تعداد گنج‌های تعبیه شده روی هر دال، به یک سری المان تقسیم می‌گردند، به طوری که مرکز هر المان، به گنج‌های وجه اختصاص داده می‌شود. این تقسیم المان در شکل (۱۵) برای وجه E نشان داده شده است.



شکل (۱۵): تقسیم وجه E (دارای ۱۵ گنج) به ۱۵ المان در نرم‌افزار *SAP*

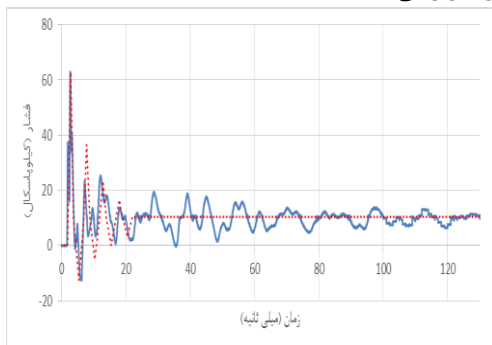
دو دال بتنی به‌صورت داخل به داخل در نظر گرفته شدند و اتصال آن‌ها به لبه دیوارهای متعامد به‌صورت گیردار می‌باشند. برای نشان دادن اثر بار غیر یکنواخت، نمودار فشار- زمان هر گنج به المان مختص خودش اعمال می‌گردد و برای اثر بار یکنواخت، نمودار فشار- زمان یکنواخت معادل به کل سطح اعمال می‌گردد. مقایسه نمودارهای تغییر مکان ناشی از اعمال بارهای غیریکنواخت (*non uniform*) و یکنواخت در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.

زمان متناظر با مقادیر حداکثر و حداقل فشارهای انعکاسی در مرکز مدت زمان فازهای منفی و مثبت قرار دارد. همچنین زمان فازهای مثبت و منفی در کل نمودار فشار- زمان انعکاسی به ترتیب مقادیرهای  $T_T^+$  و  $T_T^-$  می‌باشد و این‌که نمودار فشار- زمان ثابت گاز از زمان متناظر با حداکثر فشار انعکاسی اولیه شروع می‌شود و تا پایان ادامه دارد.

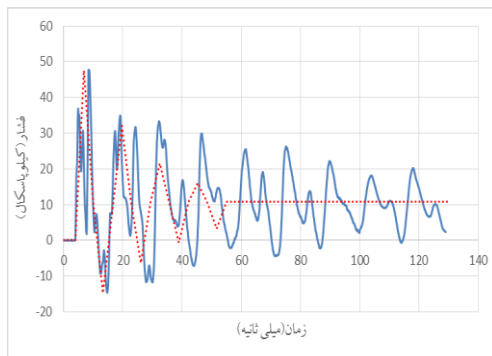


شکل (۱۸): تفکیک نمودارهای فشار انعکاسی و فشار گاز از نمودار یکنواخت غیرخطی

مطابق شکل‌های (۱۹-۲۰) نمودارهای فشار- زمان خطی به صورت زیر می‌باشند.



شکل (۱۹): مقایسه نمودارهای فشار- زمان غیرخطی و خطی یکنواخت معادل وارد بر وجه E



شکل (۲۰): مقایسه نمودارهای فشار- زمان غیرخطی و خطی یکنواخت معادل وارد بر وجه A

## ۶. خطی‌سازی منحنی فشار- زمان یکنواخت

نمودار فشار- زمان ناشی از انفجار داخلی به صورت نوسانی و پیوسته در حال افزایش و کاهش بوده و تغییرات فشار بر حسب زمان در آن‌ها به شدت غیرخطی می‌باشد. برای مقایسه نمودار غیرخطی فشار- زمان انفجار داخلی با نمودار خطی فشار- زمان به دست آمده از آیین‌نامه UFC، باید از حالت غیرخطی به حالت خطی تبدیل شود.

نمودار تغییر مکان ناشی از نمودار غیرخطی فشار- زمان باید به طور تقریبی با نمودار تغییر مکان ناشی از نمودار خطی فشار- زمان یکسان باشد. بنابراین، روند خطی‌سازی نمودار غیرخطی فشار- زمان بر اساس یکسان بودن تغییر مکان‌های ناشی از اعمال فشارها بر وجه مورد نظر می‌باشد. برای خطی‌سازی می‌توان مراحل زیر را به‌عنوان یک روش پیشنهادی دنبال نمود:

۱- تفکیک فشار گاز از شوک با انجام مراحل زیر بر روی نمودار فشار- زمان کل وارد بر وجه مورد نظر.

۱-۱- به دست آوردن روند متوسط تغییرات فشار به‌عنوان منحنی تغییرات فشار گاز. به‌عنوان مثال این منحنی متوسط را می‌توان با استفاده از اجرای روش Trend Line در نرم افزار Excel بر روی نمودار فشار- زمان کل به دست آورد.

۱-۲- استخراج منحنی فشار گاز از نمودار فشار- زمان کل و در نتیجه به دست آوردن صرفاً تاریخچه زمانی فشار شوک. (ابتدای نمودار فشار- زمان گاز از زمان بیشینه فشار انعکاسی شروع می‌شود).

۲- انجام محاسبات ذیل بر روی تاریخچه زمانی فشار شوک.  
۲-۱- به دست آوردن مدت زمان اعمال فاز مثبت فشار انعکاسی از زمان رسیدن موج انفجار و مدت زمان اعمال فاز منفی انفجار از لحظه شروع فاز منفی در فاز اول به‌طور جداگانه. ( $T_T^+$  و  $T_T^-$ )

۲-۲- تعیین حداکثر و حداقل فشار انعکاسی.

۲-۳- تعیین زمان رسیدن موج به وجه ( $t_a$ ).

۳- رسم ۲ نمودار خطی فشار انعکاسی و فشار گاز مطابق شکل (۱۸) و ترکیب آن‌ها با یکدیگر.

همچنین در مقادیر نمودارهای فوق از مقادیر به دست آمده از نمودار فشار- زمان یکنواخت غیرخطی به صورت زیر استفاده می‌کنیم.

$$P_{r_{max}} = P_{r_1}^+ \quad P_{r_2}^+ = \frac{P_{r_1}^+}{2} \quad P_{r_3}^+ = \frac{P_{r_2}^+}{2} \quad P_{r_4}^+ = \frac{P_{r_3}^+}{2}$$

$$P_{r_{min}} = P_{r_1}^- \quad P_{r_2}^- = \frac{P_{r_1}^-}{1.5} \quad P_{r_3}^- = \frac{P_{r_2}^-}{1.5} \quad P_{r_4}^- = \frac{P_{r_3}^-}{1.5}$$



است که بر نمودار تغییر مکان اثرگذار است. حداکثر تغییرمکان ناشی از اعمال دو نوع بار به هم نزدیک و ۲٪ اختلاف دارند.

از نتایج فوق و تطابق تقریباً مناسب نمودارهای تغییرمکان، می‌توان این نتیجه را گرفت که روش پیشنهادی ارائه شده برای خطی سازی منحنی فشار- زمان یکنواخت وارد بر وجوه، مناسب است.

## ۷. تحلیل و مقایسه

مقایسه نمودارهای خطی حاصل از شبه‌سازی و آیین‌نامه UFC 3-340-02 در جدول‌های (۱-۲) برای دو وجه E و A نشان داده شده است.

جدول (۱): مقایسه مقادیر فشار حداکثر (وجه E)

	Pr max (kpa)	Pg max(kpa)	Pt max (kpa)
Pufc(t)	۴۴/۷۵	۱۴/۰۶	۵۸/۸۱
Peq (t)	۵۲/۱۶	۱۰/۸	۶۲/۹۶

جدول (۲): مقایسه مقادیر فشار حداکثر (وجه A)

	Pr max (kpa)	Pg max(kpa)	Pt max (kpa)
Pufc(t)	۲۶/۳۵۵	۱۴/۰۶	۴۰/۴۱۵
Peq (t)	۳۶/۴۷	۱۱/۲	۴۷/۶۷

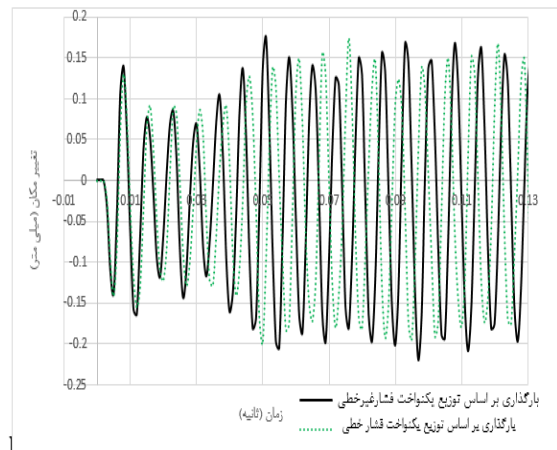
جدول‌های فوق می‌باشد. گاز و Pt فشار شوک کلی است که جمع فشار گاز و انعکاسی در فشار Pg، فشار انعکاسی، Pr فشار یکنواخت خطی، Peq (t) فشار یکنواخت خطی و گاز و Pt فشار شوک کلی است که جمع فشار گاز و انعکاسی در جدول‌های فوق می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر فشار حاصل از شبه‌سازی با آیین‌نامه UFC 3-340-02 در وجه E حدود ۷٪ و در وجه A حدود ۱۷٪ اختلاف و در فشار ثابت گاز حدود ۲۰٪ اختلاف دارند. علت این اختلاف به نظر می‌رسد به این دلیل باشد که در آیین‌نامه UFC نمودار فشار متوسط وارد بر وجوه بر اساس کمترین و بیشترین فشار به‌دست‌آمده ولی در شبه‌سازی بر اساس تابع شکل گنج‌ها به‌دست‌آمده که دقت آن با تعداد گنج‌های بیشتر بر روی وجوه بیشتر شده است. همچنین نمودار فشار حاصل از شبه‌سازی شامل فاز مثبت و منفی می‌باشد اما در نمودار فشار آیین‌نامه UFC 3-340-02 فقط فاز مثبت در نظر گرفته شده است.

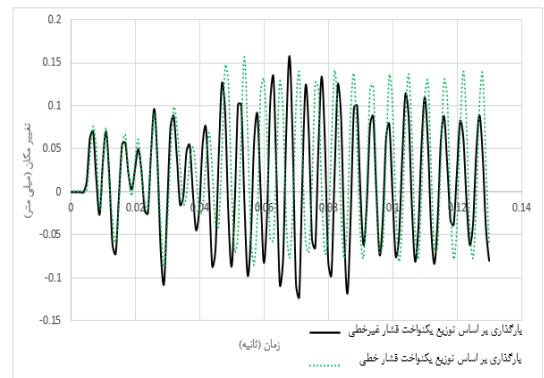
فشار گاز نمودار دو وجه در آیین‌نامه UFC 3-340-02 مساوی

بنابراین، نمودارهای یکنواخت از حالت غیرخطی به حالت خطی تبدیل شدند و اکنون می‌توان این نمودارها را با نمودارهای به‌دست آمده از آیین‌نامه UFC 3-340-02 مقایسه کرد.

با اعمال نمودارهای فشار یکنواخت خطی بر کل سطح وجه E و A نمودار تغییر مکان مرکز هندسی این دو وجه به‌دست می‌آید و با تغییر مکان ناشی از اعمال نمودار فشار- زمان یکنواخت غیرخطی مقایسه می‌شود که این مقایسه در شکل‌های (۲۱-۲۲) نشان داده شده است.



شکل (۲۱): مقایسه تغییر مکان مرکز هندسی وجه E ناشی از اعمال فشارهای یکنواخت خطی و غیرخطی



شکل (۲۲): مقایسه تغییر مکان مرکز هندسی وجه A ناشی از اعمال فشارهای یکنواخت خطی و غیرخطی

اختلاف تغییرمکان‌های نمودارها در موقعیت پیک‌ها در بازه زمانی صفر تا حدود ۰/۰۳ ثانیه نسبت به زمان‌های دیگر کمتر است. اما از این زمان به بعد، اختلاف تغییر مکان‌ها افزایش یافته و تقریباً تا زمان ۰/۱۲ ثانیه با روند یکسان و اختلاف ثابتی پیش می‌روند. به نظر می‌رسد علت این اختلاف این است که در نمودار فشار خطی، از زمان حدوداً ۰/۰۳ ثانیه فشار به مقدار فشار ثابت گاز نزدیک شده و تا زمان ۰/۱۲ ثانیه ادامه پیدا می‌کند. ولی در نمودار فشار غیرخطی، از زمان فوق هر چند تغییرات کم شده و به فشار ثابت گاز نزدیک می‌شود ولی باز هم دارای پیک‌هایی

## ۹. مراجع

1. S. G. Lee, H. S. Lee, J. S. Lee, Y. Y. Kim, and G. G. Choi, "Shock Response Analysis of Blast Hardened Bulkhead in Naval Ship under Internal Blast," 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany, 2015.
2. R. W. Weibull, "Pressures recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charges," Royal Swedish Fortifications Administration Stockholm, Sweden, 1968.
3. E. F. Gorbunov, A. G. Ivanov, V. A. Mogilev, A. A. Pekhterev, A. T. Plyukhin, A. A. Siroto, V. N. Sofronov, Yu. I. Faikov, and Yu. A. Fateev, "Reaction of reinforced-concrete chambers to internal blast loading," Russian, 1982.
4. J. Weerheijm and H. S. Lim, "Break-up of concrete structures under internal explosion," In TNO Defence Security and Safety, Netherlands, 2007.
5. J. Weerheijm, A. Stolz, W. Riedel, and J. Mediavilla, "Modelling loading and break-up of RC structure due to internal explosion of fragmenting shells," In TNO Defence Security and Safety, 2012.
6. C. F. Zhao, J. Y. Chen, Y. Wang, and S. J. Lu, "Damage mechanism and response of reinforced concrete containment structure under internal blast loading," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, no. 12, pp. 12-20, 2012.
7. A. Lotfi, "Investigating the Effect of Opening on Loaded Explosion," Imam Hossein Comprehensive University, Fasname Elmi Paghoooheshi Oloom va Fannavarihayeh Padafand Novin, pp. 90-100, 1397. (in Persian)
8. I. Edri, Z. Savir, and V. R. Feldgun, "On Blast Pressure Analysis Due to a Partially Confined Explosion: I. Experimental Studies," International Journal of Protective Structures, 2011.
9. A. L. Brundage, K. E. Metzinger, D. J. Vangoethem, and S. W. Attaway, "Model Validation of a Structure Subjected to Internal Blast Loading," Sandia National Laboratories, 2006.
10. A. Niri, "Tahlil va Tarrahi Sakhtemanha dar Barabare Asarate Enfejar," University Malek Ashtar, no.1, pp. 183-191, 1393. (in Persian)
11. J. Weerheijm and H. S. Lim, "Break-up of concrete structures under internal explosion," In TNO Defence Security and Safety, Netherlands, 2007.
12. Department of Defense, "Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02)," United States of America, 5 desember 2008.
13. P. D. Smith and J. G. Hetherington, "Blast and ballistic loading of structures," Butterworth-Heinemann Ltd, no. 1, pp. 73-74, 1994.
14. E. Rigby Samuel, "Blast wave clearing effects on finite-sized targets subjected to explosive loads," The Department of Civil and Structural Engineering at the University of Sheffield, pp. 132-134, 2014.

هستند که علت آن نسبت ثابت جرم ماده منفجره به حجم اتاقک است ولی در نمودارهای فشار یکنواخت با توجه به دقت در انتخاب مش و تعداد گیج‌ها، مساوی نیستند ولی نزدیک به هم هستند.

با توجه به انتخاب مش مناسب (۳۰ میلی‌متر) در شبیه‌سازی این اتاقک، نتایج فوق به‌دست آمده است، بنابراین، اشتباه در انتخاب مش بهینه ممکن است نتایج را متفاوت نشان بدهد.

## ۸. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایجی که از این پژوهش حاصل می‌شود به‌صورت زیر می‌باشد.

- در نمودار خطی به‌دست آمده از شبیه‌سازی، مقدار حداکثر فشار و مقدار فشار ثابت گاز آن از  $P_{ufc}(t)$  به ترتیب ۱۲٪ بیشتر و ۲۰٪ کمتر است.

- در نمودار خطی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، مقادیر فشار شامل فاز مثبت و منفی می‌باشد ولی در  $P_{ufc}(t)$  فقط فاز مثبت وجود دارد.

- با توجه نمودارهای به‌دست‌آمده بر اساس شبیه‌سازی برای دو وجه E و A اتاقک بتنی، به‌طور کلی مقادیر فشار انفجاری نسبت به آیین‌نامه UFC بزرگتر است و طراحی دست بالاتر ولی غیراقتصادی به‌دست می‌آید.

- با توجه به این‌که اتاقک تست انفجار بازو ندارد، نمودارهای فشار- زمان به سمت صفر میل نمی‌کنند و فشار گاز حاصل از انفجار در داخل اتاقک باقی و نمودار ثابت است.

- با توجه به مقایسه جدول‌های (۱-۲)، مقدار فشار ثابت گاز حاصل از شبیه‌سازی برای دو وجه E و A (در واقع برای همه وجوه)، یکسان می‌باشد (حدود ۱۱ kpa).

- نمودار به‌دست‌آمده بر اساس توزیع غیریکنواخت فشار، با نمودار به‌دست‌آمده بر اساس توزیع یکنواخت فشار ناشی از تابع شکل، تقریباً یکسان هستند و این نشان می‌دهد که روندی که برای معادل‌سازی نمودارهای فشار گیج‌ها به یک نمودار یکنواخت طی شده، درست است.

- هر چه تعداد گیج‌ها بیشتر باشد، نمودارهای تغییر مکان ناشی از توزیع فشار یکنواخت و غیریکنواخت به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. (در وجه A تعداد گیج‌ها کمتر از گیج‌های وجه E می‌باشد و درصد اختلاف تغییر مکان در نمودار تغییر مکان وجه A بیشتر است).

---

# The Numerical Simulation and Blast loading of Safe Chamber for Blast Test under Internal Blast

M. Amini\*, H. Khodarahmi, A. Khademipoor

## Abstract

Nowadays, due to the terrorist and hostile threats against the country and the urgent need to consider the principles of passive defense, it is essential to study some phenomena and subjects such as blast testing, blast effects on various targets, shock wave propagation in objects, evaluation of safety and manufacturing of high quality safe equipment and other applications. One of these issues is the explosion test, the results of which, can be obtained by having a safe chamber. To have such a place, it is necessary to design an explosive loading resistant chamber. For the design of the explosion test chamber, it is necessary to obtain the maximum shock pressure due to the internal blast on faces of the chamber structure. In this research, an internal blast in a chamber without opening with dimensions of  $3 \times 3 \times 5$  m is simulated with the help of AUTODYN software. But in that simulation, the obtained pressure is the pressure as exerted on a point, and the average pressure exerted on a given side of the chamber as a whole is not obtained. To solve this problem, the diagrams of pressure - time of gauges on a specified face of the chamber is made equivalent to a uniform pressure graph, with the help of the shape function of the configuration of gauges. Then, this graph is linearized with the proposed method, and is compared with the obtained graphs based on the UFC 3-340-02 regulation. The results of this study show that the maximum shock pressure obtained on the basis of simulation is larger than the results of the UFC 3-340-02 regulation in the internal blast. Also, the obtained equivalent uniform pressure graph based on the shape function is correct and can be used to design the chamber.

**Key Words:** *Internal Blast, Chamber of Blast Test, Blast Loading, UFC3-340-02 Regulation*

---

\* Imam Hossein University, (amini.maz.59@gmail.com) - Writer-in-Charge