



ارزیابی پاسخ الاستوپلاستیک پوسته‌های تک‌انحنایی فولادی تحت فشار ناشی از انفجار TNT با استفاده از روش ConWep

رضا ضیاء توحیدی^۱، علی بهنام طالب زاده^۱، عباسعلی صادقی^{۱*}

^{۱*} گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(abbasali.sadeghi@mshdiau.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱)

چکیده

در سال‌های گذشته توجه ویژه‌ای به انفجار و اثر آن بر سازه‌های گوناگون به‌خصوص سازه‌های جدارنازک شده است. یکی از مؤثرترین عامل‌های تغییر رفتار این‌گونه سازه‌ها، بارهای حرارتی و ضربه‌ای ناشی از انفجار می‌باشد. در این میان، با توجه به ماهیت هندسی پوسته‌ها که از سطحی گسترده و ضخامت کمی برخوردار هستند و همچنین، کاربرد گسترده‌ی آن‌ها در صنایع مختلف نظیر صنایع موشکی، صنایع هسته‌ای، صنعت کشتی‌سازی و ساخت سیلواها، بررسی اثر این بارها بر روی رفتار دینامیکی غیرخطی پوسته‌ها ضرورت می‌یابد. حال آن‌که با دانستن تغییرشکل زیاد این‌گونه سازه‌ها تحت این بارها، راه‌کارهایی کاربردی و مقرون به صرفه نظیر تقویت پوسته‌ها با استفاده از سخت‌کننده توصیه می‌گردد. از سویی، مشکلات اجرایی و احتمال ایجاد بازشو در پوسته‌ها منجر به تغییر رفتار آن‌ها می‌گردد. در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، به بررسی پاسخ الاستوپلاستیک پوسته‌های تک‌انحنایی فولادی با و بدون بازشو و سخت‌کننده در برابر بارهای انفجاری پرداخته می‌شود. نتایج حاکی از عملکرد بهتر پوسته با شرط تکیه‌گاهی گیردار در مقایسه با سایر شرایط تکیه‌گاهی بوده است. همچنین می‌توان نتیجه گیری کرد که افزایش انحنای پوسته در ابتدا منجر به افزایش تغییرمکان و سپس روند کاهشی داشته است. از سوی دیگر، پژوهش حاضر نشان دهنده ی این واقعیت است که ایجاد بازشوی دایره‌ای و مربعی باعث کاهش سختی پوسته و به‌دنبال آن افزایش مقدار تغییرمکان شده است که میزان افزایش تغییرمکان برای بازشوی مربعی بیشتر از بازشوی دایره‌ای بوده است.

کلمات کلیدی

پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی، بارهای انفجاری، پوسته‌ی دارای بازشو، سخت‌کننده.



Evaluation of Elasto-Plastic Single-Curved Steel Shells' Response under the Pressure of TNT Blast by Using the Method of ConWep

Reza Zia Tohidi ¹, Ali Behnam Talebzadeh ¹, Abbasali Sadeghi ^{*1}

^{*1} Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

(abbasali.sadeghi@mshdiau.ac.ir)

(Date of received: 16/12/2022, Date of accepted: 21/01/2023)

ABSTRACT

In the past years, special attention has been drawn to the explosion and its effect on various structures, especially thin-walled structures. One of the most effective factors for changing the behavior of such structures is thermal and shock loads caused by explosions. In the meantime, considering the geometric nature of the shells, which have a wide surface and thinness, as well as their wide application in various industries such as missile industries, nuclear industries, shipbuilding and silo construction, it is necessary to investigate the effect of these loads on the nonlinear dynamic behavior of the shells. However, knowing the large deformation of such structures under these loads, practical and cost-effective solutions such as strengthening the shells using hardeners are recommended. On the other hand, implementation problems and the possibility of creating an opening in the shells lead to a change in their behavior. In this thesis, using the ABAQUS finite element software, the elastoplastic response of single-curvature steel shells with and without opening and stiffener against blast loads is investigated. For this purpose, the effect of the supporting conditions, the thickness of the single curved shell, the mass of the TNT material, the distance from the place of explosion to the centre of the shell, the curvature of the shell, and the effect of opening and stiffener have been investigated. The results indicated better performance of the shell with the bearing support condition compared to other support conditions. Increasing the curvature of the shell initially led to an increase in displacement and then a decreasing trend. Results of the research indicate that the creation of circular and square openings has reduced the stiffness of the shell, followed by an increase in displacement, and the increase in displacement for square openings is more than circular openings.

Keywords:

Steel single curvature shell, Blast loads, Opening shell, Stiffener.



نیروهای ناشی از انفجار یکی از مخربترین بارهایی است که سازه ممکن است در طول عمر مفید خود تجربه کند. بسیاری از سازه‌های موجود در مقابل بارهای ناشی از موج انفجار آسیب‌پذیر می‌باشند، لذا می‌بایست مقاومت آن‌ها در برابر چنین بارهایی مورد بررسی قرار گیرد تا با تشخیص نقاط حساس و بحرانی بتوان با استفاده از مصالح و شیوه‌های اجرایی مناسب و بهره‌گیری از روش‌های مختلف، سازه را تقویت نمود. در سال‌های اخیر تأثیر انفجار بر سازه‌های جدارنازک نظیر صفحه‌ها و پوسته‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و صنعت‌گران بوده است. تاریخچه‌ی پژوهش درباره‌ی اثرات انفجار بر این‌گونه سازه‌ها به زمان جنگ جهانی دوم برمی‌گردد که نیاز به مقاوم‌سازی بدنه‌ی کشتی‌های جنگی نسبت به انفجارهای زیر آب احساس می‌شد. محاسبه‌ی دقیق پارامترهای بارهای دینامیکی ناشی از موج انفجار همواره مورد علاقه‌ی مهندسان سازه بوده است. انجام آزمایش‌هایی در مورد انفجارهای قوی و یا هسته‌ای بسیار دشوار و هزینه‌بر بوده و اگر تمهیدات کافی برای ثبت نتایج آزمایش انجام نشود، اهداف آزمایش محقق نخواهد شد. رخدادهای تروریستی، اخیراً طراحی سازه را دچار چالش‌هایی نموده است. در سال ۱۹۱۹ قانون مقیاس برای انفجارهای ساده توسط بیکر و همکاران^۱ [۱]، ارائه شد که البته پایه‌ی ریاضی نداشته؛ ولی از نظر کلاسیک حائز اهمیت است. بر اساس این مطالعه، اگر دو سازه با شکل و مصالح مشابه؛ ولی در اندازه‌های مختلف تحت اثر انفجار قرار گیرند، مقدار ماده‌ی منفجره‌ی مورد نیاز برای ایجاد آثار مشابه، با توان سوم ابعاد سازه نسبت مستقیم دارد. بعداً رانکینگ^۲ [۲]، تغییرات در فشار، سرعت و چگالی گازها را پس از عبور موج تحریک، کشف و نتایج مطالعات خود را در مقاله‌ای ارائه نمود که این تحلیل نقش قابل ملاحظه‌ای در مطالعه‌ی رفتار انفجار داشت. تیلور^۳ [۳]، نحوه‌ی انتشار و استهلاک موج‌های انفجار ناشی از سلاح‌های متعارف را بررسی کرده، رفتار موج‌های انفجار ناشی از نخستین انفجار اتمی در نیومکزیکو در سال ۱۹۴۶ را به صورت موردی مطالعه کرد. تیلور [۴] برای اولین بار به بررسی آزمایشگاهی و نظری اثر انفجار بر روی رفتار دینامیکی صفحه‌ها پرداخت. اکثر این آزمایش‌ها مربوط به تأثیر انفجارهای زیر آب بر روی رفتار صفحه‌ها بودند. فانوس و گریمن^۴ [۵]، مدهای خرابی مخازن فولادی را تحت بارگذاری دینامیکی داخلی ناشی از انفجار گازی بررسی نمودند. آن‌ها مؤلفه‌های محیطی تغییرمکان و تنش را برای مدل متقارن محوری محاسبه نمودند. فشار اعمالی به سطح مخزن با استفاده از سری فوریه بیان شد و با استفاده از آن معادلات حاکم توسط روش اختلاف محدود حل شد. حالت واماندگی برای زمانی که کرنش محیطی به مقدار کرنش تسلیم رسید، تعریف گردید. از این مدل ساده‌سازی شده می‌توان برای طراحی مخازن تحت بارهای دینامیکی داخلی استفاده نمود. آن‌ها در پژوهشی دیگر [۶]، روشی ساده برای بررسی پاسخ پوسته‌های متقارن محوری تحت بارگذاری ضربه‌ای که موجب تغییرشکل‌های بزرگ می‌شود، ارائه نمودند. آن‌ها در این روش، سازه را به عنوان مدلی الاستیک و یک درجه آزادی فرض کرده و با استفاده از روش انرژی، تغییرشکل نهایی را محاسبه نمودند. آن‌ها فرض کردند که در این حالت ضربه به صورت موضعی بر یک سطح دایره‌ای وارد شده و موجب ایجاد تغییرشکل نهایی فرضی به شکل بیضی می‌گردد. قطر بزرگ این بیضی در جهت محیطی و قطر کوچک آن در راستای طول استوانه انتخاب شد. از انرژی کرنش حاصل از خمش و برش صرف نظر شد. هدف اصلی این روش، طراحی مخازنی است که بر اثر بار ضربه وارد فاز پلاستیک نمی‌شوند. آکای^۵ [۷] تحلیل دینامیکی غیرخطی تغییرشکل‌های بزرگ صفحه‌ها را با استفاده از روش اجزای محدود ترکیبی مورد مطالعه قرار داد. او یک جزء چهارضلعی چهارگره‌ی ایزوپارامتریک را برای تحلیل دینامیکی تغییرشکل بزرگ صفحه‌ها طراحی نمود. بدین ترتیب، معادله‌های دینامیکی صفحه‌ی فن کارمن به منظور در نظر گرفتن اثر تغییرشکل برشی عرضی در نظریه‌ی صفحه‌ی رایزنر اصلاح شد. همچنین، معادله‌های اجزای محدود حرکت توسط روش ترکیبی گلرکین به دست آمدند. علاوه بر این، صفحه‌ای با خواص مواد مشابه توسط بایلس و همکاران^۶ [۸] مورد تحلیل قرار گرفته

¹ Baker et al.

² Ranking

³ Taylor

⁴ Fanous and Greimann

⁵ Akay

⁶ Bayles et al.



بود که یک برنامه‌ی تفاوت محدود برای معادله‌های دینامیکی فن کارمن ارائه نمودند. آن‌ها در تحلیل خود از یک شبکه‌ی مش‌بندی 8×8 میلی‌متر با گام زمانی 0.005 ثانیه استفاده کردند. یک تحلیل نظری مشابه تحت عنوان تأثیر دامنه‌های بزرگ بر روی ارتعاشات انعطاف‌پذیر صفحه‌های کشسان توسط یاماکی^۷ [۹] انجام گردید. نیوبرگر و همکاران^۸ [۱۰] پاسخ صفحه‌های دایره‌ای در معرض انفجار کروی، تحت عنوان بارگذاری انفجاری در هوا را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آن‌ها، تشابه و همسان‌سازی با استفاده از مقیاس رپلیکا برای تمام پارامترهای هندسی به‌دست آمد، در حالی که به‌طور معمول اثر انفجار با استفاده از روش معروف هوپکینسون مقیاس می‌شود. آن‌ها نیز به بررسی اثر حساسیت نرخ تغییرشکل نسبی و تغییرپذیری خواص مواد در راستای ضخامت صفحه بر روی پاسخ مدل مقیاس‌شده پرداختند. لیلپ و تورن^۹ [۱۱]، پاسخ پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای را تحت بارگذاری ضربه‌ای به شیوه‌ی تحلیلی بررسی نمودند. پوسته از یک انتها به‌صورت کاملاً گیردار و از انتهای دیگر با تکیه‌گاه ساده مقید شد. رفتار صلب پلاستیک پوسته توسط سطح تسلیم مربعی کنترل شد. در این پژوهش، اثر ممان خمشی محوری، نیروی غشایی محیطی و نیروی برشی عرضی حفظ شده است. آنها دریافتند، تغییرشکل پوسته‌ی استوانه‌ای تحت بارگذاری پالسی با لغزش برشی در تکیه‌گاه‌ها آغاز می‌گردد. همچنین، با افزایش طول استوانه، اثر لغزش برشی در تغییرشکل کاهش می‌یابد. شی و گاو^{۱۰} [۱۲]، یک عدد بدون بعد بر اساس عدد بی بعد ژائو برای بررسی پاسخ پلاستیک پوسته‌های کروی و استوانه‌ای در برابر بارهای دینامیکی ارائه دادند. این عدد از معادله‌ی حرکت بدون بعد پوسته‌ها استخراج گردید. از مزایای استفاده از اعداد بدون بعد می‌توان به استفاده از آن‌ها در مقاصد مقیاس‌بندی و سازماندهی آزمایشات تجربی و محاسبات عددی برای جلوگیری از تکرار نتایج در فضای ابعادی اشاره نمود. مهم‌ترین تفاوت عدد بدون بعد این پژوهش با عدد بدون بعد ژائو تفاوت فرمولاسیون آن برای استوانه‌های کوتاه و بلند است. زمانی و همکاران [۱۳]، با استفاده از روش انرژی یک حل تئوری جدید برای محاسبه‌ی تغییرشکل نهایی پوسته‌های استوانه‌ای آلومینیومی تحت انفجار داخلی ارائه نمودند. از آب و هوا به‌عنوان محیط‌های واسط انتقال انرژی استفاده شده است. همچنین یک سری آزمایش‌های تجربی با استفاده از ماده‌ی منفجره‌ی C4 طراحی گردید. مقایسه‌ی بیشینه‌ی تغییرشکل شعاعی محاسبه‌شده از این تئوری با نتایج آزمایش‌ها صحت آن را تأیید نمود. تان و همکاران^{۱۱} [۱۴]، مدلی تئوری برای پیش‌بینی تغییرشکل و شتاب پوسته‌های استوانه‌ای و کروی پر از ماده‌ی منفجره تا مرز شکست ارائه نمودند. ماده‌ی سازنده‌ی پوسته‌ها به‌صورت صلب-ویسکوپلاستیک در نظر گرفته شد و انفجار نیز به‌صورت متقارن فرض شد. شتاب پوسته‌ی کروی و استوانه‌ای که با استفاده از این مدل محاسبه شده بود، با آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی انجام‌شده توسط نرم‌افزار DYNA 2D توافق خوبی داشته است. از این مدل می‌توان برای محاسبه‌ی بیشینه‌ی شتاب و سرعت پوسته قبل از ایجاد شکست استفاده نمود. هیرو و همکاران^{۱۲} [۱۵]، با استفاده از انجام آزمایش‌های تجربی نمونه‌های استوانه‌ای را با استفاده از مقادیر مختلف خرج میانی استوانه‌ای منبسط نمودند. نمونه‌های مذکور از جنس فولاد و آلومینیوم بوده‌اند. در این پژوهش اثر ضخامت دیواره، جنس استوانه‌ها، ایجاد شیار در دیواره، قطر خرج میانی و مکان قرارگیری چاشنی بر تغییرشکل و رفتار شکست نمونه‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. ترکش‌های حاصله، بازیابی شده و با استفاده از مدل‌های تشکیل ترکش مورد تحلیل قرار گرفته است. بر اساس یافته‌های این پژوهش، اثر انرژی ماده‌ی منفجره و ماده‌ی سازنده‌ی پوسته بر انبساط آن قابل پیش‌بینی است؛ اما رفتار انبساطی آن به تغییرمکان قرارگیری چاشنی و ایجاد شیار بسیار حساس است. کریمی و میرزایی [۱۶]، با استفاده از روش اجزای محدودی رشد ترک در لوله‌ی جدار نازک را تحت بارگذاری انفجاری ناشی از گاز شبیه‌سازی نمودند. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار WARP 3D انجام شد. لوله‌ی مورد نظر حاوی ترک اولیه‌ی سطحی در راستای محوری بوده و از معیار CTOA به‌عنوان پارامتر شکست برای شبیه‌سازی رشد ترک استفاده شده است. بر اساس این

⁷ Yamaki

⁸ Neuberger et al.

⁹ Lellep and Torn

¹⁰ Shi and Gao

¹¹ Tan et al.

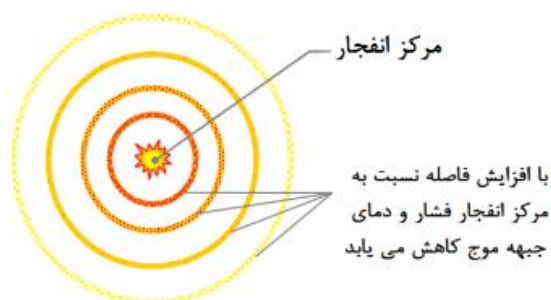
¹² Hiroe et al.



پژوهش مشخص شد که شبیه‌سازی واقعی رشد ترک در لوله تحت بارگذاری داخلی انفجاری به تحلیل کامل دینامیکی در بخش سازه و شکست نیاز دارد که موجب در نظر گرفتن امواجی با تمام طیف‌ها و تمام پارامترهای مورد نیاز در مکانیک شکست دینامیکی می‌شود. مارتینیانو و همکاران^{۱۳} [۱۷]، یک مدل ساختاری ویسکوپلاستیک برای انبساط پوسته‌های استوانه‌ای تحت انفجار داخلی ارائه نمودند. این مدل ناپایداری پلاستیک را که پیش از شکست بر روی سطح پوسته رخ می‌دهد، بررسی می‌کند. در این مدل از مدل پلاستیسیته جانسون-کوک، معادله‌ی حالت مای گرونایزن و سطح تسلیم گرسون استفاده شد و توسط یک زیر برنامه توسط نرم‌افزار ABAQUS حل شد. بر اساس یافته‌های این پژوهش نواحی موضعی شده کرنش پلاستیک، از سطح داخلی به سطح خارجی پوسته گسترش می‌یابد و به‌طور مستقیم به تشکیل باندهای برشی وابسته است. خیزآب و همکاران [۱۸]، قاب‌های فولادی خمشی با و بدون دیوار برشی فولادی (۳، ۶ و ۹ طبقه) به‌صورت دو بعدی در دو سناریو داخل و خارج صفحه‌ی قاب تحت بار انفجاری تحلیل دینامیکی غیرخطی شده‌اند و در نهایت امکان رخداد فروریزش پیش‌رونده بررسی و مقایسه گردیده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در سناریوی بارگذاری انفجار داخل صفحه‌ی قاب، سیستم دوگانه‌ی دیوار برشی فولادی عملکرد مناسبی در مقایسه با سیستم قاب خمشی داشته و باعث محدود شدن فروریزش پیش‌رونده گردیده درحالی‌که در سناریوی بارگذاری انفجار خارج از صفحه‌ی قاب به دلیل انتشار موج انفجار بر دیوار برشی فولادی، سیستم قاب خمشی عملکرد بهتری داشته است. همچنین بر اساس مقایسه‌ی شاخص تنومندی در سناریوهای بارگذاری انفجار داخل و خارج قاب به ترتیب سازه‌های دارای دیوار برشی فولادی و قاب خمشی عملکرد مطلوب‌تری داشته‌اند. در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، به بررسی پاسخ الاستوپلاستیک پوسته‌های تک‌انحنایی فولادی با و بدون بازشو و سخت‌کننده در برابر بارهای انفجاری پرداخته می‌شود.

۲- مدل‌سازی بار ناشی از انفجار

آزاد شدن سریع و ناگهانی مقدار زیادی انرژی تحت اثر واکنشی شیمیایی در مدت زمان بسیار کم، مقدار عظیمی از گازها را تولید می‌کند. این گازها به شدت منبسط شده و هوای جلوی خود را به اطراف می‌راند، یک لایه از هوای فشرده در جلوی این گازها ایجاد می‌شود که به سمت خارج از محیط گسترده می‌شود. این لایه، بیش‌ترین انرژی را در برگرفته که اصطلاحاً موج انفجار نامیده می‌شود [۱۹]. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، با طی شدن زمان و همچنین فاصله گرفتن از محل وقوع انفجار میزان فشار حاصل از آن کاهش می‌یابد.



شکل ۱: شماتیکی از موج انفجار (که با افزایش فاصله، شدت آن کاهش می‌یابد) [۱۹].

به‌طور کلی بارگذاری‌های انفجاری بر اساس موقعیت قرارگیری ماده‌ی منفجره و همچنین میزان و فاصله‌ی آن تا هدف مورد نظر تقسیم بندی می‌شوند، به گونه‌ای که هر کدام به‌ترتیب به انفجار خارجی و داخلی و انفجار در محدوده‌های نزدیک، متوسط و دور تقسیم می‌شوند. محل انفجار در قدرت تخریب‌پذیری آن نقش مهمی دارد. انواع انفجار بر اساس محیط و محل پخش امواج، قابل

¹³ Martineau et al.



تقسیم‌بندی می‌باشند: انفجار در هوای آزاد؛ انفجار در زیر آب؛ انفجار در زیر زمین و انفجار در سطح زمین. یکی از شاخصه‌های مهم در انفجارها توان آن می‌باشد. توان یک انفجار به‌وسیله‌ی مقدار انرژی آزادشده مشخص می‌شود. مقدار TNT معادل انفجار با استفاده از میزان کل انرژی توصیف می‌گردد [۲۰]. واحد توان را می‌توان بر اساس واحد انرژی یا همان ژول بیان کرد. به‌عنوان مثال، انفجار TNT در حدود ۴۶۱۰ تا ۴۶۸۰ ژول بر گرم انرژی تولید می‌کند. هم‌ارز یا معادل TNT، روشی برای ارزیابی میزان انرژی آزادشده در اثر انفجار است. یک گرم TNT برابر با ۴۶۲۴ ژول است که در اثر انفجار یک گرم تری‌نیتروتولون، آزاد می‌گردد. کیلوگرم TNT و مگاگرم TNT یک‌پایه‌ی هستند که برای ارزیابی انرژی حاصل از انفجار به‌کار برده می‌شوند. مقدار انرژی آزادشده برای یک گرم TNT، به‌عنوان استاندارد برای مقایسه‌ی انرژی آزادشده‌ی سایر انفجارها استفاده می‌شود. به‌منظور تسهیل در پیش‌بینی انرژی آزادشده و اضافه فشار انفجاری، مواد منفجره نسبت به مواد TNT سنجیده می‌شوند. این ضریب معادل TNT، برای مقدار اضافه فشار و ضربه متفاوت می‌باشد [۲۰]. مؤسسه‌ی سازمان مدیریت بحران فدرال (FEMA) مقدار جرم معادل TNT برای انفجار وسایل نقلیه و دیگر عامل‌ها، مطابق جدول (۱) بیان نموده است که می‌توان به‌عنوان تخمینی از مقدار TNT از آن استفاده نمود [۲۱].

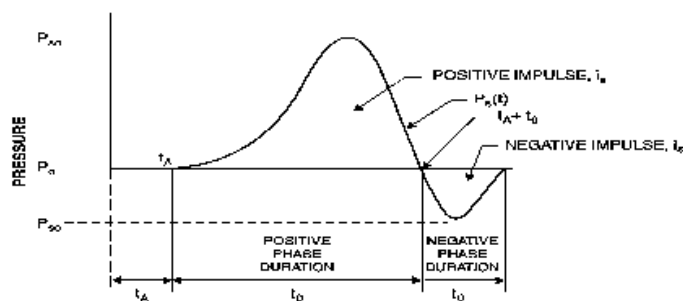
جدول ۱: انواع تهدیدهای معمول و وزن معادل آن‌ها [۲۱].

Threat Description	Explosive Mass (TNT Equivalent) (kg)	Building Evacuation Distance (m)	Outdoor Evacuation Distance (m)
Pipe Bomb	2.3	21	259
Suicide Belt	4.5	27	330
Suicide Vest	9	34	415
Briefcase/Suitcase Bomb	23	46	564
Compact Sedan	227	98	457
Sedan	454	122	534
Passenger/Cargo Van	1814	195	838
Small Moving Van/Delivery Truck	4536	263	1143
Moving Van/Water Truck	13608	375	1982
Semitrailer	27217	475	2134

هنگامی که مواد منفجره عمل می‌کنند، موج انفجار به وجود می‌آید. موج انفجار، توسعه‌ی گازهای سوزان و فشرده‌ای است که پس از انفجار با سرعت به خارج حرکت کرده و فشار اتمسفر اطراف را بالا می‌برند. امواجی که در لحظه‌های بعدی به اطراف گسترده می‌شوند، سرعت آن‌ها از امواج اولیه زیادتر است؛ زیرا از داخل هوایی عبور می‌کنند که توسط امواج اولیه گرم شده است. به همین دلیل امواج ثانویه در یک زمان معین به امواج اولیه می‌رسند و فشار آن‌ها با هم توأم می‌گردد و تشکیل یک سطح می‌دهند که به‌نام جبهه‌ی ضربه (جبهه‌ی موج) خوانده می‌شود. هنگامی که جسمی در برابر این جبهه قرار گیرد، فشار رویه‌ی آن بالا رفته و در یک لحظه‌ی بسیار کوتاه به بیشینه اندازه خود می‌رسد. این فشار به سادگی جسم را دور زده و از همه طرف آن را احاطه کرده و تحت تأثیر قرار می‌دهد. فشار حاصل از امواج انفجاری فشار استاتیکی نامیده می‌شود. در پشت جبهه‌ی ضربه، هوایی که با موج انفجاری همراه است و دارای سرعت زیادی است، فشار دیگری را به‌وجود می‌آورد که می‌خواهد اجسام را در جهت حرکت خود به جنبش در آورد. در نتیجه یا آن‌ها را واژگون می‌کند یا می‌غلطاند و یا قطعات آن‌ها را از هم جدا می‌کند که این فشار را فشار دینامیکی می‌نامند. بعضی از سازه‌ها مانند ساختمان‌ها که پنجره‌ها و درهای کوچک و دیوار مقاوم دارند، در مقابل فشار استاتیکی تأثیرپذیرند، در حالی که برج‌ها و تجهیزات نظامی (مانند خودروها و توپخانه‌ها) بیش‌تر در اثر فشار دینامیکی خسارت می‌بینند. در اثر پیمایش جبهه‌ی موج انفجار، فشار بعضی از نواحی جو، با چنان سرعتی کاهش می‌یابد که از فشار اتمسفر اطراف کمتر می‌شود. در این حالت یک فشار منفی ایجاد می‌شود که هوا را می‌مکد. این مرحله به‌نام مرحله‌ی مکش یا منفی خوانده می‌شود، تا از مرحله‌ی مثبت یا تراکم متمایز

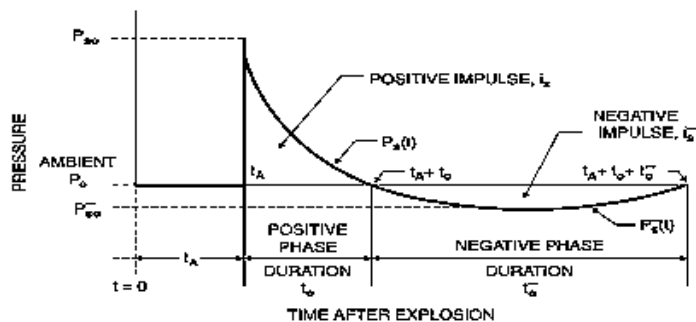


گردد. در ابتدای انفجار، فشار به بیشینه مقدار خود می‌رسد (مرحله‌ی مثبت)، در ادامه به تدریج کم شده و به مقدار اتمسفر می‌رسد و سپس مرحله‌ی منفی آغاز شده و بالاخره فشار به فشار اتمسفر باز می‌گردد. انفجارهایی که حاصل از مواد شیمیایی هستند، بر اساس سرعت واکنش به دو دسته‌ی اصلی اشتعال و شوک انفجاری تقسیم می‌شوند. اشتعال یک فرآیند اکسیداسیون است که سرعت پخش امواج آن کم‌تر از سرعت صوت است. امواج در این دسته از نوع امواج فشاری می‌باشند که در شکل (۲) نشان داده شده است. در این حالت، فشار حداکثر به‌صورت ناگهانی افزایش نمی‌یابد. در حالی که در شوک‌های انفجاری سرعت پخش امواج، فراصوتی می‌باشد و فشار حداکثر در یک زمان کوتاه اتفاق می‌افتد [۲۰].



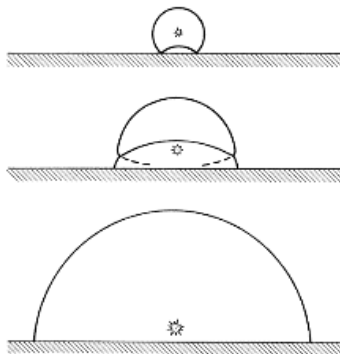
شکل ۲: موج فشاری حاصل از اشتعال [۲۰].

از آنجایی که فشار متناسب با سرعت واکنش است، فشار شوک‌های انفجاری چندین برابر فشار امواج اشتعالی است. نمودار شوک انفجاری در شکل (۳) نشان داده شده است. انفجارهای با قدرت زیاد بر اساس سرعت واکنش، دارای سرعت پخش متفاوت می‌باشند که برای فشار هر ماده یک پارامتر مهم و اساسی است. سرعت پخش امواج انفجاری بین ۳۰۰ تا ۳۰۰۰۰ فوت بر ثانیه، دمای آن در حدود ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار آن در حدود ۳۰۰ کیلوپار می‌باشد [۲۰].



شکل ۳: شوک انفجاری حاصل از انفجار ناگهانی [۲۰].

رفتار انفجار در هوا به عوامل زیادی بستگی دارد، از جمله عوامل مهم در انفجارهای هوایی، ارتفاع ماده‌ی منفجره از سطح زمین در حین انفجار است. در شکل (۴) تنها عامل تغییر بین انفجارها، ارتفاع ماده‌ی منفجره از سطح زمین می‌باشد. در این شکل حالت اول، حالتی است که انفجار در هوا اتفاق می‌افتد و موج در برخورد با زمین منعکس می‌شود به طوری که زاویه‌ی بین موج برخوردی و سطح زمین کم‌تر از حدود ۴۰ درجه است، در این حالت فقط پدیده شکست و انعکاس وجود دارد [۲۲].

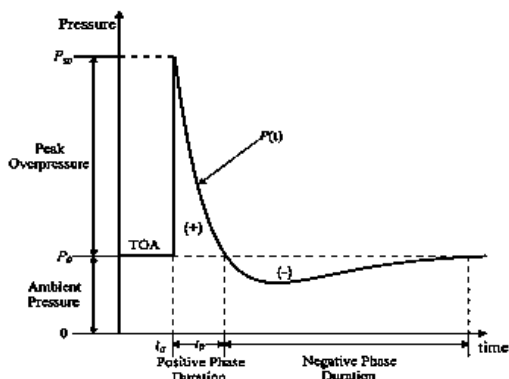


شکل ۴: رفتار امواج در انفجار هوایی [۲۲].

در شکل (۴) قسمت پایین، ارتفاع ماده‌ی منفجره به قدری کم است که موج انفجاری بدون هیچ موج بازگشتی روی سطح زمین حرکت می‌کند، در این حالت انفجار روی سطح زمین رخ داده است. ولی قسمت میانی شکل ۳-۱۰، حالت مهمی در انفجارهای هوایی محسوب می‌شود و قدرت تخریب این حالت به مراتب از حالت‌های دیگر بیشتر است. در این حالت ارتفاع ماده‌ی منفجره از زمین به گونه‌ای است که زاویه‌ی بین موج برخوردی و سطح زمین کمی بیش‌تر از ۴۰ درجه است، در این حالت جبهه‌ی ماخ شکل می‌گیرد. رفتار موج در این سه حالت با هم متفاوت است. در این حالت، اگر ارتفاع ماده به اندازه‌ی خاصی (تقریباً زاویه‌ی موج برخوردی بین ۴۰ تا ۴۵ درجه باشد) باشد، موج منعکس شده به موج برخوردی اصابت کرده و یک جبهه‌ی جدید فشاری شکل می‌گیرد. این موج با سرعت و فشار بیش‌تری نسبت به موج برخوردی اولیه حرکت می‌کند [۲۲]. برای تعیین مشخصات هر انفجار، نیاز به سه پارامتر مستقل اضافه فشار بیشینه، مدت زمان انفجار و ضربه می‌باشد. زمان رسیدن موج در موارد طراحی اهمیت چندانی ندارد؛ ولی در بعضی موارد که مدت زمان واکنش به انفجار مورد نیاز باشد، این پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. قسمت مثبت نمودار نشان داده شده در شکل ۳-۴ با رابطه‌ی (۱) بیان می‌شود [۲۲].

$$P_t(t) = (P_{so} - P_0) \left(1 - \frac{t}{t_p}\right) e^{-\frac{\alpha t}{t_p}} \quad (1)$$

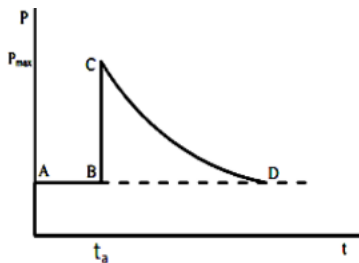
که در آن P_{so} مقدار اضافه فشار بیشینه‌ی انفجار، t_p مدت زمان انفجار در فاز مثبت، ضریب افت α یک مقدار ثابت و P_0 فشار محیط است.



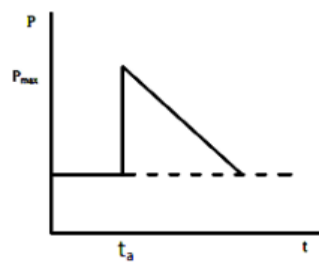
شکل ۵: نمودار فشار - زمان یک موج انفجاری [۲۲].



با توجه به شکل (۵) در صورت پذیرش مقداری خطا، می توان پالس انفجار را به شکل نمایی یا مثلثی و صرفاً در محدوده‌ی فاز مثبت در نظر گرفت و از فاز منفی که تاثیر کمی در بازتاب ماکزیمم سازه دارد و بیشتر در انفجار در مایعات اهمیت دارد صرف نظر نمود (شکل ۶) [۲۳].



(ب) تابع نمایی در فاز مثبت



(الف) تابع خطی ساده شده در فاز مثبت

شکل ۶: نمودار بیشینه فشار - زمان ساده شده (الف) تابع خطی ساده شده در فاز مثبت (ب) تابع نمایی در فاز مثبت [۲۳].

قابل ذکر است که انفجار در هوای آزاد و انفجار در روی سطح زمین دارای تفاوت می باشند. انفجار در روی سطح زمین مقدار فشار بیشتری نسبت به انفجار در هوا ایجاد می کند، این تفاوت ناشی از انعکاس و برخورد امواج با سطح زمین است. برای یک سطح زمین بسیار سخت، مقدار تأثیر انفجار مانند دو برابر کردن مقدار ماده‌ی منفجره می باشد، در حالی که برای زمین های نرم، این ضریب کم تر از دو است. به عبارت دیگر در زمین های سخت کل انرژی رسیده به زمین بازگردانده می شود، در حالی که در زمین نرم مقداری انرژی توسط لایه های پایین تر جذب می شود. به منظور تعیین اضافه فشار بیشینه ی یک انفجار، وزارت دفاع آمریکا (DOD) یک سری نمودارهای تجربی بر اساس فاصله ی مقیاس شده برای انفجارهای در هوای آزاد و روی سطح زمین ارائه نموده است. فاصله ی مقیاس- شده (Z) مطابق رابطه ی (۲) تعیین می شود.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

در این رابطه، R فاصله ی مرکز انفجار تا نقطه ی مورد نظر برحسب متر و W جرم ماده ی منفجره برحسب کیلوگرم است. روابط متعددی برای محاسبه ی اضافه فشار بیشینه ی انفجار (P_{so}) توسط محققین پیشنهاد شده است که از جمله می توان به رابطه ی زیر که توسط بورد مطرح گردید، اشاره نمود [۲۴]:

$$P_{so} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} \text{ bar} \quad (0.1 \text{ bar} < P_{so} < 10 \text{ bar}) \quad (3)$$

$$P_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar} \quad (10 \text{ bar} < P_{so}) \quad (4)$$

مدت زمان انفجار، زمان بین عبور جبهه ی موج تا زمان رسیدن فشار مثبت به فشار محیط است. مدت زمان انفجار شاخص مهمی در میزان صدمه و خرابی به سازه است. به دلیل این که فشار مثبت انفجار خیلی بیشتر از فشار منفی آن است، میزان خرابی و خسارت موج فشار مثبت خیلی بیشتر از موج فشار منفی است. از این رو، از مدت زمان در فاز منفی صرف نظر می گردد و مدت زمان فاز



مثبت به عنوان کل مدت زمان انفجار در نظر گرفته می شود. مدت زمان انفجار در هوا (t_0) برای انفجارهای شیمیایی از رابطه ی (۵) و برای انفجارهای هسته ای از رابطه ی (۶) به دست می آید [۲۴].

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = \frac{980 \left(1 + \left(\frac{z}{0.54} \right)^{10} \right)}{\left(1 + \left(\frac{z}{0.02} \right)^3 \right) \left(1 + \left(\frac{z}{0.74} \right)^6 \right) \sqrt{1 + \left(\frac{z}{6.9} \right)^2}} \quad (5)$$

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = \frac{180 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{z}{100} \right)^3} \right)}{\sqrt{1 + \frac{z}{40}} \sqrt[6]{1 + \left(\frac{z}{285} \right)^5} \sqrt[6]{1 + \frac{z}{50000}}} \quad (6)$$

در این رابطه ها، W جرم ماده ی منفجره و Z فاصله ی مقیاس شده می باشد. یکی دیگر از عوامل مهم در تخریب سازه هایی که در معرض انفجار قرار می گیرند، ضربه می باشد. ضربه در واحد سطح معادل با سطح زیر منحنی فشار - زمان است. قسمت اعظم ضربه، مربوط به قسمت مثبت منحنی فشار - زمان می باشد و سطح زیر منحنی قسمت منفی در نظر گرفته نمی شود. علاوه بر عامل های اضافه فشار بیشینه و مدت زمان انفجار، نرخ کاهش فشار نیز در ضربه تأثیر مستقیم دارد. اگر دو دیاگرام فشار - زمان با اضافه فشار و مدت زمان برابر در نظر گرفته شود، وقتی منحنی A از منحنی B سریع تر نزول کند. مشخص است که ضربه ی مربوط به منحنی A از منحنی B کمتر است. انفجارهای هسته ای نرخ کاهش سریع تری نسبت به انفجارهای شیمیایی دارند. بنابراین، ضربه ی انفجارهای شیمیایی از انفجارهای هسته ای بیش تر است [۲۵]. مقدار ضربه در واحد سطح را می توان برای انفجارهای شیمیایی و هسته ای از رابطه ی (۷) به دست آورد. در این رابطه، فاصله ی مقیاس شده (Z) از رابطه ی (۲) به دست می آید.

$$\frac{I}{A} = \frac{0.047 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{z}{0.23} \right)^4} \right)}{z^3 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{1.55} \right)^3}} \quad (7)$$

که در آن، I مقدار ضربه در واحد سطح و A مساحت قسمت مثبت منحنی فشار - زمان می باشد.

۳- مدل سازی عددی

در این پژوهش، از جزء پوسته ای چهاروجهی چهارگره ی ($S4R$) برای مدل سازی پوسته های با و بدون بازشو مربعی، و از جزء پوسته ای مثلثی سه گره ی ($S3R$) برای مدل سازی پوسته های دارای بازشو دایره ای استفاده شده است. همچنین برای مدل سازی انفجار از روش کان وپ بهره گرفته شده است. در تمام تحلیل ها، مدت زمان بارگذاری ۵۰ میلی ثانیه انتخاب گردیده است. در بخش مطالعات عددی، اثر شرایط تکیه گاهی پوسته، ضخامت پوسته (h)، میزان جرم ماده ی منفجره ی TNT (W)، فاصله ی انفجار تا مرکز پوسته (R) و انحنای پوسته (K) مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته است. نوع ماده ی استفاده شده برای پوسته، فولاد ST37-2 می باشد. در جدول ۲ پارامترهای اولیه ی آلیاژ فولاد ST37-2 نشان داده شده است.



جدول ۲: پارامترهای اولیهی آلیاژ فولاد ST37-2.

E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)	0.01 σ (MPa)	0.2 σ (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u
210	0.3	7850	192	240	415	0.24

تنش و کرنش‌های محاسبه‌شده با رابطه‌ی راسموسن، تنش و کرنش‌های اسمی یا مهندسی هستند که باید توسط رابطه‌های (۸) و (۹) به تنش و کرنش‌های واقعی تبدیل شوند. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار آباکوس، کرنش‌ها باید به صورت کرنش پلاستیک (رابطه‌ی (۱۰)) و تنش‌ها نیز از تنش جاری‌شدن به بعد یعنی محدوده‌ی پلاستیک وارد گردند. بنابراین، برای محدوده‌ی الاستیک فولاد مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) و برای تحلیل دینامیکی چگالی (ρ) کفایت می‌کند.

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} \times (1 + \epsilon_{nom}) \quad (۸)$$

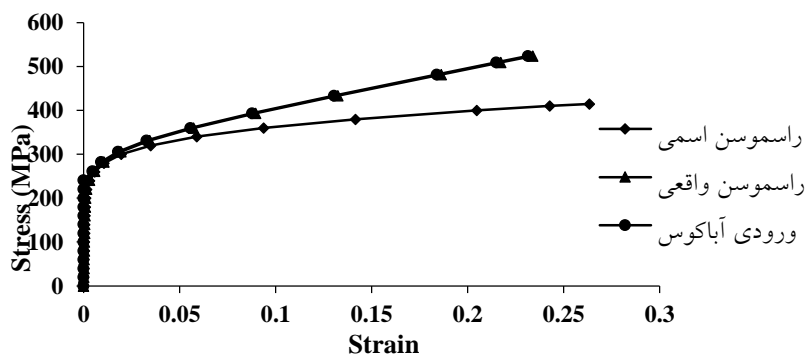
$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad (۹)$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (۱۰)$$

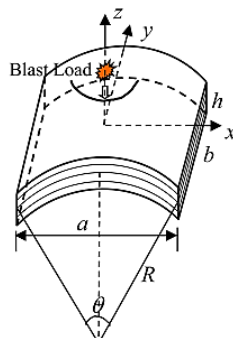
جدول (۳) پارامترهای رابطه‌های راسموسن را ارائه می‌دهد، همچنین، در شکل (۷) منحنی تنش - کرنش اسمی و واقعی راسموسن و منحنی تنش - کرنش ورودی در آباکوس نشان داده شده است.

جدول ۳: پارامترهای رابطه‌های راسموسن.

n	e	0.2 E (GPa)	m	0.2 ϵ
13.42513	0.001143	8.5735	3.024096	0.003143



شکل ۷: نمودار تنش و کرنش اسمی و واقعی.



شکل ۸: نمایش شماتیک هندسه و مختصات دکارتی پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی تحت بار انفجاری.

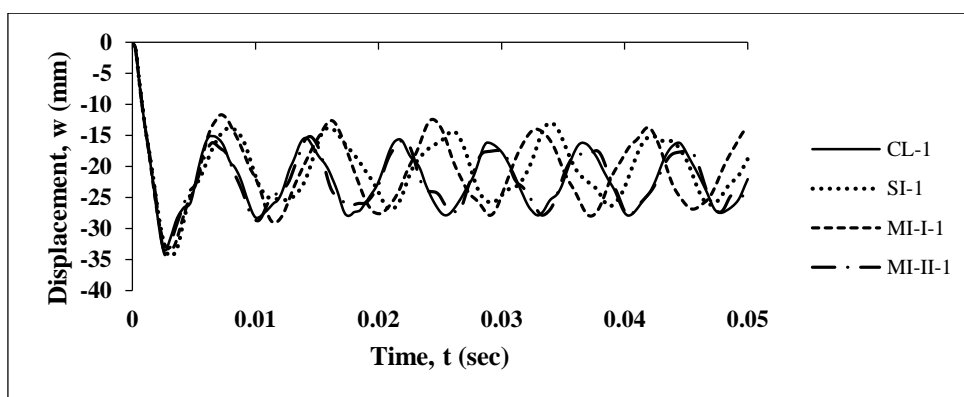
۴- تحلیل نتایج

برای بررسی اثر شرط تکیه‌گاهی، پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی با ابعاد $a=b=1$ متر، ضخامت ۱۰ میلی‌متر و انحنای 0.25 (شعاع انحنای ۴ متر) با چهار شرط تکیه‌گاهی گیردار، ساده، ترکیبی نوع ۱ و ترکیبی نوع ۲ تحت بارهای انفجاری مختلف با فاصله‌ی ثابت ماده‌ی منفجره ۵۰۰ میلی‌متر مدل‌سازی گردید. منظور از شرط ترکیبی نوع ۱، بستن درجه‌های آزادی $u_x = v_y = w_z = 0$ در دو لبه‌ی $x = \frac{a}{2}$ و $x = -\frac{a}{2}$ و بستن درجه‌های آزادی $u_x = v_y = w_z = \varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$ در دو لبه‌ی $y = \frac{b}{2}$ و $y = -\frac{b}{2}$ می‌باشد و منظور از شرط تکیه‌گاهی ترکیبی نوع ۲، بستن درجه‌های آزادی $u_x = v_y = w_z = 0$ در دو لبه‌ی $y = \frac{b}{2}$ و $y = -\frac{b}{2}$ و بستن درجه‌های آزادی $u_x = v_y = w_z = \varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$ در دو لبه‌ی $x = \frac{a}{2}$ و $x = -\frac{a}{2}$ است. پس از مدلسازی و انجام تحلیل، حداکثر تغییرمکان مرکز پوسته‌های تک‌انحنایی فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف تحت بارهای انفجاری در جدول (۴) آورده شده است. در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نمودار تغییرمکان - زمان پوسته‌ی فولادی برای مقادیر مختلف TNT، چهار شرط تکیه‌گاهی مختلف و ضخامت ثابت ۱۰ میلی‌متر نشان داده شده است. یکی دیگر از عوامل موثر در پاسخ سازه در برابر بار انفجار، ضخامت پوسته می‌باشد. با هدف بررسی تأثیر ضخامت پوسته، پوسته‌ی فولادی با ابعاد $a=b=1$ متر، انحنای 0.25 (شعاع انحنای ۴ متر) با شرط تکیه‌گاهی گیردار تحت بار انفجاری 0.5 کیلوگرم ماده‌ی TNT در فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متری از مرکز پوسته با شش ضخامت ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ میلی‌متری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در جدول (۵) حداکثر تغییرمکان مرکز پوسته برای شش ضخامت مختلف پوسته‌ی فولادی آورده شده است. همچنین، نمودار تغییرمکان - زمان مرکز پوسته در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. نتایج حاکی بر کاهش تغییرمکان با افزایش ضخامت پوسته‌ی فولادی می‌باشد.

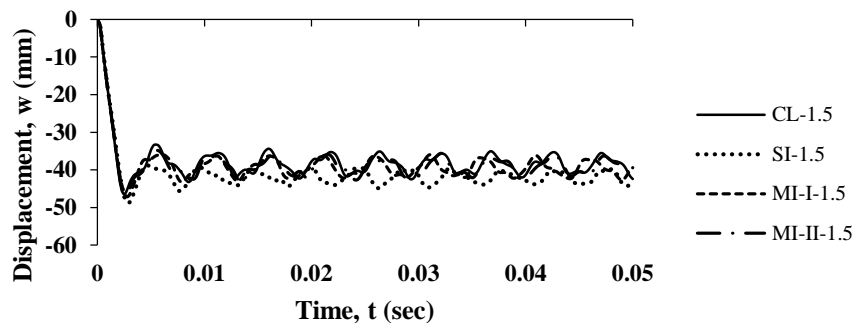


جدول ۴: حداکثر تغییرمکان مرکز پوسته‌ی فولادی بر اساس شرایط تکیه‌گاهی و مقدار ماده‌ی منفجره.

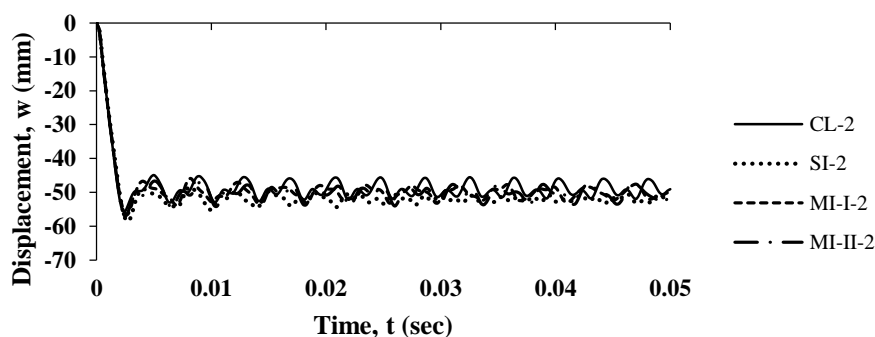
نمونه	W (kg)	شرایط تکیه‌گاهی	حداکثر تغییرمکان مرکز پوسته (mm)
CL-1	۱	گیردار	-۳۳/۴۱۹
MI-I-1	۱	ترکیبی نوع ۱	-۳۳/۷۲۹
MI-II-1	۱	ترکیبی نوع ۲	-۳۴/۳۵۸
SI-1	۱	ساده	-۳۴/۴۰۷
CL-1.5	۱/۵	گیردار	-۴۶/۴۹۵
MI-I-1.5	۱/۵	ترکیبی نوع ۱	-۴۷/۱۵۳
MI-II-1.5	۱/۵	ترکیبی نوع ۲	-۴۷/۳۱۴
SI-1.5	۱/۵	ساده	-۴۸/۶۳۶
CL-2	۲	گیردار	-۵۵/۵۷۹
MI-I-2	۲	ترکیبی نوع ۱	-۵۶/۳۶۴
MI-II-2	۲	ترکیبی نوع ۲	-۵۷/۰۳۹
SI-2	۲	ساده	-۵۸/۵۱۱
CL-2.5	۲/۵	گیردار	-۶۳/۶۱۷
MI-I-2.5	۲/۵	ترکیبی نوع ۱	-۶۴/۹۴۰
MI-II-2.5	۲/۵	ترکیبی نوع ۲	-۶۴/۶۹۷
SI-2.5	۲/۵	ساده	-۶۶/۵۲۱
CL-3	۳	گیردار	-۷۰/۷۰۸
MI-I-3	۳	ترکیبی نوع ۱	-۷۲/۴۵۴
MI-II-3	۳	ترکیبی نوع ۲	-۷۱/۵۳۸
SI-3	۳	ساده	-۷۴/۱۵۱



شکل ۹: نمودار تغییرمکان - زمان مرکز پوسته‌ی فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف برای نمونه با $W=1 \text{ kg}$.



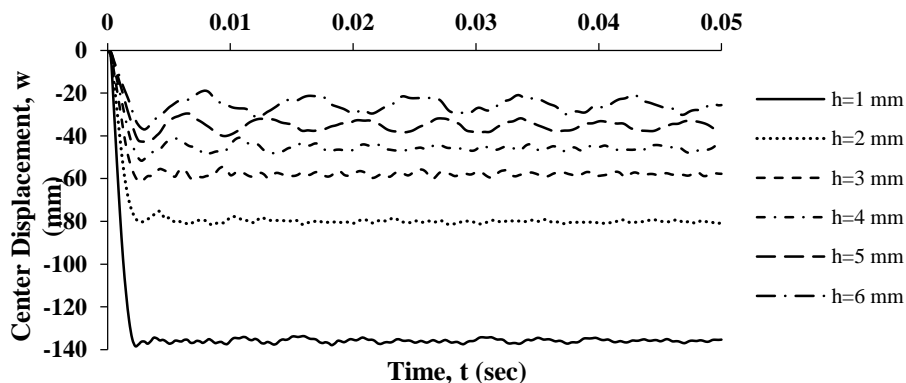
شکل ۱۰: نمودار تغییرمکان - زمان مرکز پوسته‌ی فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف برای نمونه با $W=1.5$ kg.



شکل ۱۱: نمودار تغییرمکان - زمان مرکز پوسته‌ی فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف برای نمونه با $W=2$ kg.

جدول ۵: مقایسه‌ی بین حداکثر تغییرمکان مرکز پوسته‌ی فولادی برای ضخامت‌های مختلف.

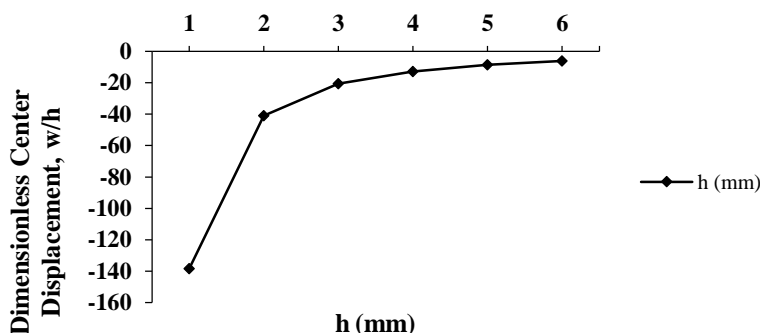
Decrease (%)	Maximum w (mm)	h (mm)
-	-۱۳۸/۳۵۵	۱
۴۰/۸۷	-۸۱/۷۹۷	۲
۵۵/۴۷	-۶۱/۶۰۶	۳
۶۲/۶۷	-۵۱/۶۳۹	۴
۶۹/۰۵	-۴۲/۸۰۹	۵
۷۳/۲۶	-۳۶/۹۸۸	۶



شکل ۱۲: نمودار تغییرمکان - زمان مرکز پوسته‌ی فولادی برای ضخامت‌های مختلف.



در شکل (۱۳) حداکثر تغییرمکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی فولادی بر حسب هر یک از ضخامت‌های پوسته‌ی فولادی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای مقدار ماده‌ی منفجره ۰/۵ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متری از پوسته، در ابتدا افزایش ضخامت پوسته‌ی فولادی (از ۱ به ۲ میلی‌متر) منجر به کاهش شدید تغییرمکان مرکز پوسته شده است. اما با افزایش بیشتر ضخامت، مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان پوسته کاهش کمتری را نشان داده است.

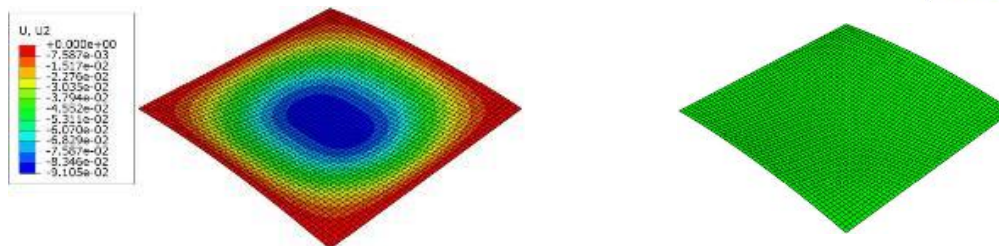


شکل ۱۳: حداکثر تغییرمکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی فولادی بر حسب ضخامت‌های مختلف.

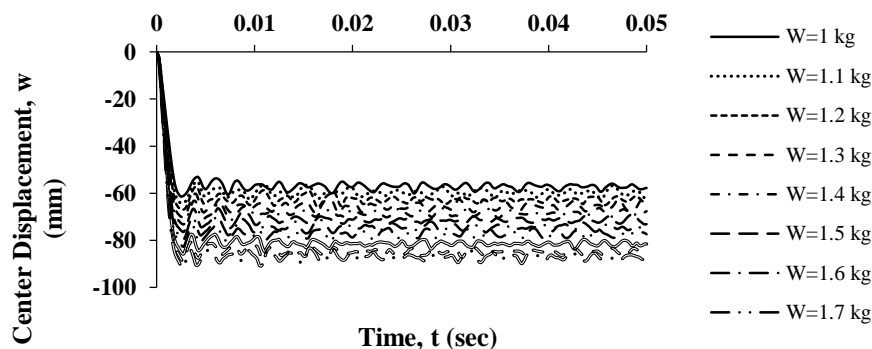
با هدف مطالعه‌ی اثر ماده‌ی منفجره‌ی TNT، پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی با نسبت ابعاد $a/b=1$ و ضخامت ۵ میلی‌متر با انحنای ۰/۲۵ تحت بارگذاری انفجار تجزیه و تحلیل شده است. بدین منظور، از مقادیر مختلف ماده‌ی منفجره استفاده شده است. فاصله‌ی محل وقوع انفجار تا پوسته ثابت و برابر ۵۰۰ میلی‌متر لحاظ شده است. در جدول (۶) حداکثر تغییرمکان مرکز پوسته‌ی فولادی برای یازده جرم مختلف ماده‌ی منفجره آورده شده است. همچنین، نحوه‌ی تغییر شکل و کانتور تغییرمکان پوسته‌ی فولادی تحت انفجار ۲ کیلوگرم TNT و نمودار تغییرمکان - زمان پوسته‌ی فولادی به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با ثابت در نظر گرفتن فاصله‌ی محل وقوع انفجار تا پوسته‌ی مورد نظر، با زیاد شدن مقدار ماده‌ی TNT تغییرمکان پوسته افزایش می‌یابد.

جدول ۶: مقایسه‌ی بین بیشینه‌ی تغییرمکان مرکز پوسته‌ی فولادی برای جرم‌های مختلف ماده‌ی TNT.

Increase (%)	Maximum w (mm)	W (kg)
-	-۶۱/۳۹۹	۱
۴/۶۲	-۶۴/۲۳۸	۱/۱
۹/۱۰	-۶۶/۹۸۷	۱/۲
۱۴/۲۷	-۷۰/۱۶۴	۱/۳
۱۹/۲۹	-۷۳/۲۴۲	۱/۴
۲۴/۳۷	-۷۶/۳۶۵	۱/۵
۲۹/۶۱	-۷۹/۵۸۲	۱/۶
۳۴/۶۶	-۸۲/۶۸۲	۱/۷
۳۹/۶۷	-۸۵/۷۵۷	۱/۸
۴۴/۵۶	-۸۸/۷۶۱	۱/۹
۴۹/۲۹	-۹۱/۶۶۷	۲

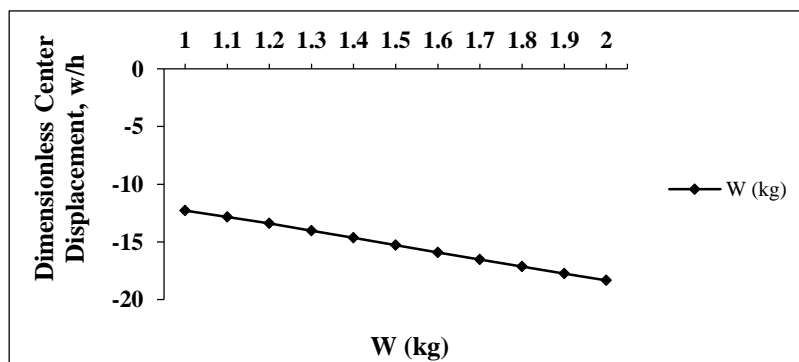


شکل ۱۴: تصویر تغییرشکل یافته‌ی پوسته‌ی فولادی تحت بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متر.



شکل ۱۵: نمودار تغییرمکان - زمان مرکز پوسته‌ی فولادی بر حسب جرم‌های مختلف ماده‌ی TNT.

در شکل (۱۶) حداکثر تغییرمکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی بر حسب جرم‌های مختلف ماده‌ی منفجره نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار تغییرمکان پوسته با افزایش جرم ماده‌ی TNT با شیب ثابتی افزایش پیدا کرده است که این نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی خطی بین مقدار تغییرمکان و جرم ماده‌ی TNT می‌باشد.



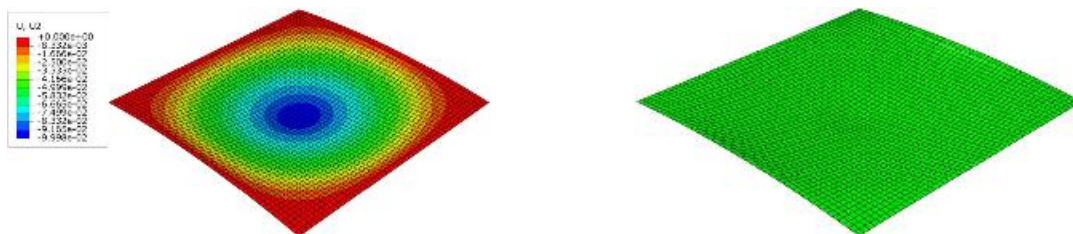
شکل ۱۶: حداکثر تغییرمکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی بر حسب جرم‌های مختلف ماده‌ی TNT.

قابل پیش‌بینی است که عامل فاصله‌ی مرکز انفجار تا موقعیت پوسته، بر روی رفتار دینامیکی پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی اثرات مستقیمی داشته باشد. به منظور ارزیابی این عامل، پوسته‌ی فولادی با نسبت ابعاد $a/b=1$ و ضخامت ۵ میلی‌متر با انحنای 0.25 و تحت بار انفجاری ۱ کیلوگرم TNT در فاصله‌های مختلف با شرط مرزی گیردار مورد تحلیل قرار گرفته شد. در جدول (۷) حداکثر تغییرمکان مرکز پوسته برای ۹ فاصله‌ی مختلف ماده‌ی منفجره آورده شده است. نحوه‌ی تغییرشکل و کانتور تغییرمکان پوسته‌ی فولادی تحت انفجار ۱ کیلوگرم TNT و نیز، نمودار تغییرمکان - زمان مرکز پوسته‌ی فولادی برای فاصله‌های مختلف ماده‌ی منفجره به ترتیب در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نمایش داده شده است.

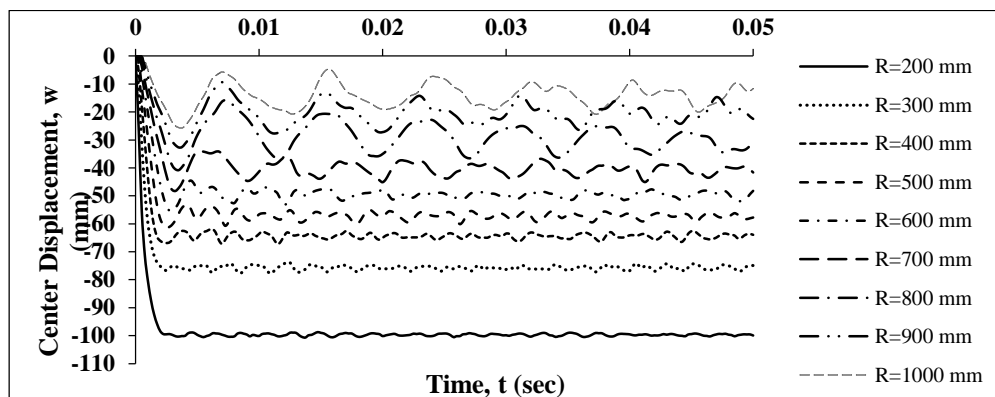


جدول ۷: مقایسه‌ی بین بیشینه‌ی تغییر مکان مرکز پوسته‌ی فولادی برای فاصله‌های مختلف ماده‌ی منفجره.

Decrease (%)	Maximum w (mm)	R (mm)
-	-۱۰۰/۷۰۸	۲۰۰
۲۲/۷۲	-۷۷/۸۲۴	۳۰۰
۳۳/۱۳	-۶۷/۳۳۹	۴۰۰
۳۹/۰۳	-۶۱/۳۹۹	۵۰۰
۴۵/۰۵	-۵۵/۳۳۶	۶۰۰
۵۲/۰۹	-۴۸/۲۴۰	۷۰۰
۵۹/۵۴	-۴۰/۷۴۶	۸۰۰
۶۷/۵۵	-۳۲/۶۷۲	۹۰۰
۷۴/۴۶	-۲۵/۷۱۳	۱۰۰۰

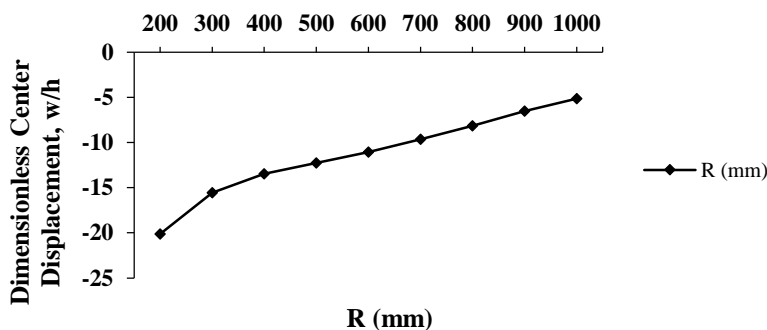


شکل ۱۷: تصویر تغییر شکل یافته‌ی پوسته‌ی فولادی تحت بار انفجاری ۱ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۲۰۰ میلی‌متر.



شکل ۱۸: نمودار تغییر مکان - زمان مرکز پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی بر حسب فاصله‌های مختلف ماده‌ی منفجره.

در شکل (۱۹) حداکثر تغییر مکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی بر حسب فاصله‌های مختلف ماده‌ی منفجره نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدا با افزایش فاصله‌ی انفجار (از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی‌متر)، مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان پوسته با شیب تقریباً تندی کاهش پیدا کرده است. اما با افزایش بیشتر فاصله‌ی انفجار، میزان کاهش بیشینه‌ی تغییر مکان کمتر شده است.



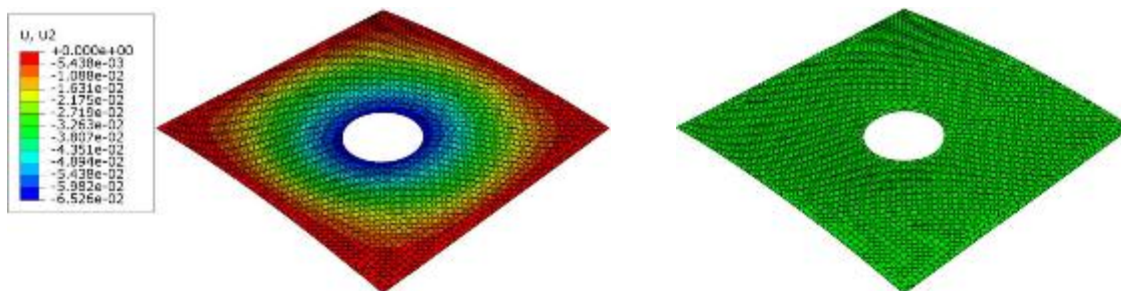
شکل ۱۹: حداکثر تغییرمکان بدون بعد مرکز پوسته‌ی تک‌انحنایی فولادی بر حسب فاصله‌های مختلف ماده‌ی منفجره.

یکی دیگر از اهداف اصلی این پژوهش، بررسی اثر انفجار بر پوسته‌های دارای بازشو می باشد. به منظور بررسی رفتار پوسته‌های فولادی دارای بازشو، درصد و نوع بازشو مورد مطالعه قرار گرفته است. بازشوها در مرکز پوسته‌ی فولادی در نظر گرفته شده و مقدار درصد بازشو به شکل متعارفی انتخاب گردیده است. شعاع r بازشوی دایره‌ای و ضلع e بازشوی مربعی طبق سطوح بازشوها تعیین شده است. اندازه‌ی r و e طبق درصد بازشو در جدول (۸) محاسبه شده است.

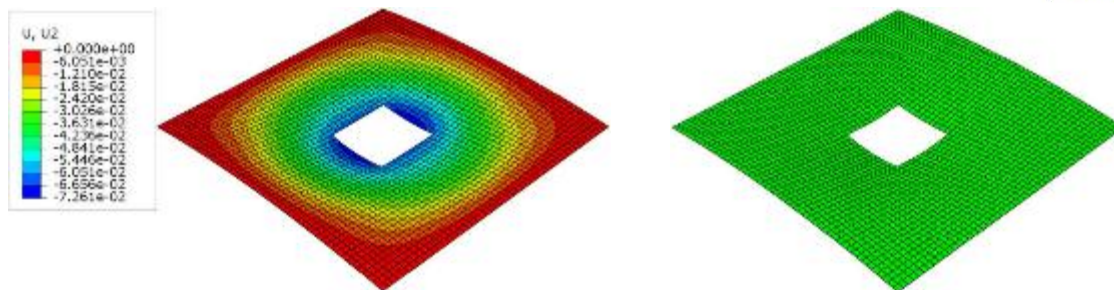
جدول ۸: اندازه‌ی r و e طبق درصد بازشو.

e (mm)	r (mm)	OR (%)
۱۰۰	۵۶/۴۱۹	۱
۱۴۱/۴۲۱	۷۹/۷۸۸	۲
۱۷۳/۲۰۵	۹۷/۷۲۱	۳
۲۰۰	۱۱۲/۸۳۸	۴
۲۲۳/۶۰۷	۱۲۶/۱۵۷	۵

پس از تجزیه و تحلیل الاستوپلاستیک پوسته‌های فولادی، در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نحوه‌ی تغییرشکل و کانتور تغییرمکان پوسته‌های دارای بازشوی دایره‌ای و مربعی و در جدول (۹) حداکثر تغییرمکان این پوسته‌ها نشان داده شده است. مقدار حداکثر تغییرمکان برای پوسته‌ی دارای بازشوی دایره‌ای بر روی محیط دایره و برای پوسته‌ی دارای بازشوی مربعی در وسط ضلع مربع گزارش شده است. در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نمودار تغییرمکان - زمان پوسته‌های فولادی دارای بازشوی دایره‌ای و مربعی برای ۵ مقدار درصد بازشو با شرط تکیه‌گاهی گیردار نشان داده شده است.



شکل ۲۰: تصویر تغییرشکل یافته‌ی پوسته‌ی فولادی با بازشوی دایره‌ای (OR=5%) تحت بار انفجاری ۱ کیلوگرم.

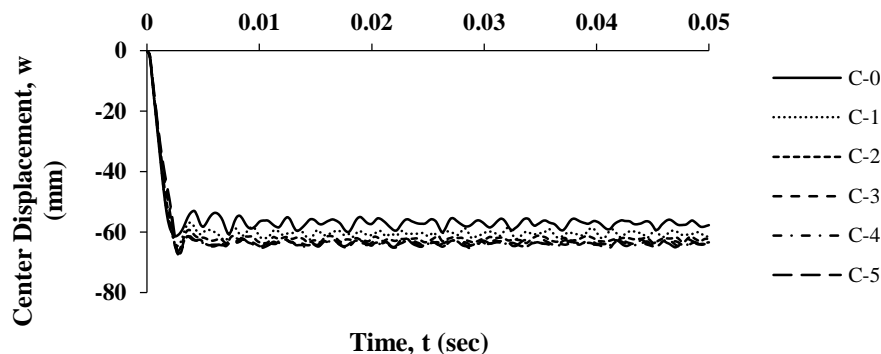


شکل ۲۱: تصویر تغییرشکل یافته‌ی پوسته‌ی فولادی با بازشوی مربعی (OR=5%) تحت بار انفجاری ۱ کیلوگرم.

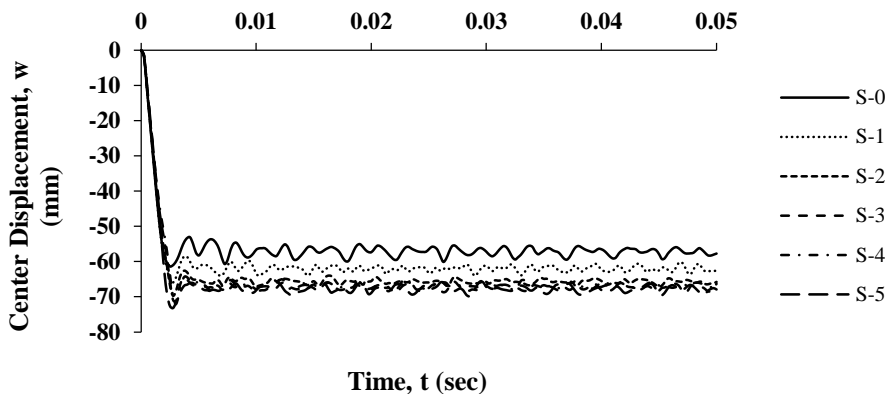
در شکل های فوق، نماد OR درصد بازشو را نشان می دهد. چنان که مشهود است، با افزایش درصد بازشو، مقدار حداکثر تغییرمکان پوسته‌ی دارای بازشوی دایره‌ای و مربعی افزایش یافته است. همچنین دیده می شود که مقدار افزایش حداکثر تغییرمکان برای بازشوی مربعی بیشتر از بازشوی دایره‌ای بوده است. در جدول (۹) مقدار حداکثر تغییرمکان پوسته‌های با و بدون بازشو با هم مقایسه شده است.

جدول ۹: بیشینه‌ی تغییرمکان پوسته‌ی فولادی با بازشوی دایره‌ای و مربعی بر اساس نوع و درصد بازشو.

نمونه	درصد بازشو (%)	بیشینه‌ی تغییرمکان پوسته (mm)	میزان افزایش (%)
C-0	۰	-۶۱/۳۹۹	-
C-1	۱	-۶۴/۵۶۵	۵/۱۶
C-2	۲	-۶۶/۴۷۲	۸/۲۶
C-3	۳	-۶۷/۴۸۳	۹/۹۱
C-4	۴	-۶۷/۴۴۲	۹/۸۴
C-5	۵	-۶۶/۹۵۵	۹/۰۵
S-0	۰	-۶۱/۳۹۹	-
S-1	۱	-۶۶/۰۱۰	۷/۵۱
S-2	۲	-۶۹/۶۴۹	۱۳/۴۴
S-3	۳	-۷۱/۴۹۷	۱۶/۴۵
S-4	۴	-۷۲/۱۵۳	۱۷/۵۱
S-5	۵	-۷۳/۱۹۵	۱۹/۲۱



شکل ۲۲: نمودار تغییرمکان - زمان پوسته‌ی فولادی دارای بازشوی دایره‌ای با درصد بازشوهای مختلف.



شکل ۲۳: نمودار تغییرمکان - زمان پوسته‌های فولادی دارای بازشوی مربعی با درصد بازشوهای مختلف.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با هدف ارزیابی رفتار و پاسخ الاستوپلاستیک پوسته‌های تک‌انحنایی فولادی با و بدون بازشوهای دایره‌ای و مربعی در برابر بارگذاری انفجار از نرم‌افزار عددی آباکوس بهره گرفته شده است. بعد از اطمینان از نحوه‌ی مدل‌سازی پوسته‌های فولادی و بارگذاری انفجار، نخست، با هدف دستیابی به شبکه‌بندی مناسب برای پوسته، ابعاد المان تغییر داده شد تا تغییرمکان پوسته به یک مقدار ثابت میل کند. بدین منظور، اثر شرط تکیه‌گاهی پوسته، اثر ضخامت پوسته‌ی فولادی، اثر مقدار ماده‌ی TNT، اثر فاصله‌ی محل انفجار تا مرکز پوسته و اثر انحنای پوسته مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، اثر بازشو، با توجه به شرایط تکیه‌گاهی پوسته‌ی فولادی، مشاهده شد که شرایط تکیه‌گاهی ساده و ترکیبی نوع ۱ تغییرمکان بیش‌تری را نسبت به شرایط تکیه‌گاهی گیردار و ترکیبی نوع ۲ ایجاد می‌کنند. یکی دیگر از نتایج مستخرج از این مقاله، بررسی اثر بازشوها در رفتار پوسته‌های تک‌انحنایی فولادی در برابر انفجار می‌باشد. بررسی پوسته‌های فولادی دارای بازشو نتایج نشان داد که با زیاد کردن درصد بازشو، مقدار حداکثر تغییرمکان پوسته‌ی فولادی دارای بازشوی دایره‌ای و مربعی افزایش پیدا کرده است. ولی مقدار افزایش حداکثر تغییرمکان برای بازشوی مربعی بیشتر بوده است که دلیل این موضوع می‌تواند کاهش سختی پوسته در گوشه‌های بازشوی مربعی باشد. همچنین مشاهده گردید، با افزایش درصد بازشو، مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان پیوسته‌ی دارای بازشوی مربعی با شیب نسبتاً تندی افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که در پوسته‌ی دارای بازشوی دایره‌ای مقدار افزایش تغییرمکان با افزایش درصد بازشو کمتر بوده است.

۶- مراجع

- 1- Baker, J. F., Leader Williams, E. and Lax, P., 1948, **The design of framed buildings against high explosive bombs**, The Civil Engineer in War, UK Institution of Civil Engineers, London, p. 80.
- 2- Ranking, W. J. M., 1870, **The Thermodynamic Theory of Waves of Finite Longitudinal Disturbance**, Philosophical Transactions.
- 3- Taylor, G. I., 1939, **The Propagation and Decay of Blast Waves**, UK Home Office.
- 4- Taylor, G. I., 1950, **The Distortion under Pressure of a Diaphragm Which is Clamped Along Its edge and Stressed Beyond Its Elastic Limit**, Underwater Explosion Research, 3, The Damage Process, 107-121, Office of Naval Research (originally written 1942).
- 5- Fanous, F. and Greimann, L., 1991, **Steel containment resistance under dynamic pressure**, Nuclear Engineering and Design, 130, 163-170.
- 6- Fanous, F. and Greimann, L., 1988, **Simplified analysis for impulsively loaded shells**, Journal Structural Engineering, 4, 114, 885-99.



- 7-Akay, H. U., 1980, **Dynamic Large Deflection Analysis of Plates Using Mixed Finite Elements**, Computers and Structures, 12, 5, 1-11.
- 8- Bayles, D. J., Lowery, R. L. and Bovd, D. E., 1973, **Nonlinear Vibrations of Rectangular Plates**, American Society of Civil Engineers Journal of The Structural Division, 99, ST5.
- 9- Yamaki, N., 1961, **Influence of Large Amplitudes on Flexural Vibrations of Elastic Plates**, Zeitschrift for Angewandte Mathematik and Mechanik, 41, 12, 501-510.
- 10- Neuberger, A., Peles, S. and Rittel, D., 2007, **Scaling the Response of Circular Plates Subjected to Large and Close-Range Spherical Explosions. Part I: Air-Blast Loading**, International Journal of Impact Engineering, 34, 7, 859-873.
- 11- Lellep, J., and Torn, K., 2004, **Plastic response of a circular cylindrical shell to dynamic loadings**, International Journal of Impact Engineering, 30, 555-576.
- 12- Shi, X. H., and Gao, Y. G., 2001, **Generalization of response number for dynamic plastic response of shells subjected to impulsive loading**, International journal of pressure vessels and piping, 453-459.
- 13- Zamani Ashani, J., Hadavi, V., and Mozaffari, A., 2012, **Theoretical calculation of the maximum radial deformation of a cylindrical shell under explosive forming by a new energy approach**, Journal of Mechanical Engineering Science, 226, 576-584.
- 14- Tan, D., Sun, C., and Wang, Y., 2003, **Acceleration and Viscoplastic Deformation of Spherical and Cylindrical Casings under Explosive Loading**, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 28, 1, 1-12.
- 15- Hiroe, T., Fujiwara, K., Hata, H., and Takahashi, H., 2008, **Deformation and fragmentation behavior of exploded metal cylinders and the effects of wall materials**, configuration, explosive energy and initiated locations, International Journal of Impact Engineering, 35, 1578-1586.
- 16- Karimi R, and Mirzaei M., 2009, **Undesired Local Cooling Phenomenon and Its Effect on Energy Consumption in Floor Heating Systems**, Modares Mechanical Engineering, 9, 1, 51-72.
- 17- Martineau, R. L., Prime, M. B., and Anderson, C. A., 1999, **An explicit model of expanding cylindrical shells subjected to high explosive detonations**, ABAQUS Users' Conference, Chester, United Kingdom, May 25-28.
- 18- Khizab, B., Sadeghi, A., Hashemi, S. V., Mehdizadeh, K., and Nasser, H., 2021, **Investigation the performance of Dual Systems Moment-Resisting Frame with Steel Plate Shear Wall Subjected to Blast Loading**, Journal of Structural and Construction Engineering, 8, 8, 102-127.
- 19- Baker, W. E., 1973, **Explosions in Air**, University of Texas Press, Austin.
- 20- Dusenberry, O. D., 2010, **Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings**, John Wiley & Sons Inc, Canada
- 21- FEMA 452, 2005, **Risk Management Series, Risk Assessment: A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Buildings**, 245 pages.
- 22- Kinney, G. F. and Graham, K. J., 1985, **Explosive Shocks in Air**, Springer, New York, second Edition.
- 23- Smith, P. D. and Hetherington, J. G., 1994, **Blast and Ballistic Loading of Structures**.
- 24- Sewell, R. G. S., Zulkosi, T. R. and Graham, K. F., 1975, **Blast Parameter Characterization Naval Weapons**, Center Technical Report AFWL-TR 73-55, Air Forces Systems Command.