



بررسی اثر انفجار بر سازه‌های فضاکار چلیکی دولایه

علیرضا فیوض^۱، احمدرضا آرامی باغملایی^۲، محمد واقفی^۳

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر، fiouz@pgu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

۳- عضو هیأت علمی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

چکیده

با توجه به افزایش روزافزون حملات تروریستی در سراسر دنیا، طراحی سازه‌ها در مقابل بارهای ناشی از انفجار در حوزه پدافند غیرعامل مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. با توجه به سبکی وزن سازه‌های فضاکار به نظر می‌رسد که این نوع سازه مقاومت کمی در برابر بارهای انفجاری داشته باشد. در این مقاله رفتار سازه‌های فضاکار چلیکی دولایه تحت اثر بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. نسبت‌های خیز به دهانه ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ در نظر گرفته شده که طول، دهانه و ارتفاع همه آن‌ها به ترتیب: ۴۲، ۳۰ و ۱/۵ متر است. بارگذاری از نوع متقارن بوده و شرایط تکیه‌گاهی از نوع مفصلی برای گره‌های در امتداد طولی و از نوع غلتکی برای گره‌های روی دو قوس انتهایی لایه پایین، فرض گردیده است. تحلیل و طراحی اولیه سازه به صورت استاتیکی انجام شده است. در تحلیل دینامیکی، برای مدل‌سازی بار انفجار دو پارامتر شامل: وزن ماده منفجره و فاصله از مرکز انفجار مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای مدل‌سازی و تحلیل از نرم‌افزار Formian V.2.2 و نرم‌افزار المان محدود ABAQUS/CAE V.6.13-1 استفاده شده است.

کلمات کلیدی: انفجار، سازه‌های فضاکار، چلیک دولایه

مقدمه

امروزه با پیشرفت علوم و تکنولوژی، نیازها و خواسته‌های جدیدی در زمینه مهندسی سازه اتفاق افتاده است. عامل زمان در ساخت سازه‌ها اهمیت دوچندان یافته و این امر گرایش به سازه‌های پیش‌ساخته را افزایش داده است. هم‌چنین با افزایش جمعیت در دنیا علاقه به داشتن فضاهای بزرگ بدون حضور ستون‌های میانی خواهان بسیاری پیدا کرده است. از اوایل قرن حاضر تعدادی از متخصصین جذب قابلیت‌های منحصربه‌فرد سازه‌های فضاکار گشته و پاسخ بسیاری از نیازهای جدید را در این سازه‌ها جستجو کرده‌اند و البته به نتایج بسیار مثبتی نیز دست یافته‌اند. سازه‌های فضاکار به آن دسته از سازه‌ها اطلاق می‌شوند که اصولاً دارای رفتار و عملکرد مسلط سه‌بعدی می‌باشند، به طوری که اثر هیچ‌یک از سه بعد در رفتار سازه تحت تأثیر نیروهای وارده قابل صرف نظر کردن نیست. طراحی سازه‌ها در برابر انفجار، چندی است که توجه کارشناسان و مهندسان ساختمان را به خود جلب نموده است. در گذشته به خصوص پس از جنگ جهانی دوم مطالعات پراکنده‌ای در این باره انجام شد، ولی تمرکز این مطالعات بیش‌تر بر روی سازه‌های نظامی و خاص بود به گونه‌ای که کمتر به ساختمان‌های متعارف پرداخته می‌شد. تاکنون درباره رفتار سازه‌های فضاکار در برابر بارهای

دینامیکی هم چون: بار زلزله و باد، تحقیقات زیادی انجام گرفته ولی با توجه به این که بررسی مبحث انفجار بر روی سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بر روی این سازه‌ها نیز مورد ارزیابی قرار نگرفته و عدم طراحی سازه‌ها در برابر بار انفجار موجب خسارت‌های جانی و مالی جبران‌ناپذیری می‌گردد، تصمیم گرفته شد این بارگذاری بر این سازه‌ها و از نوع چلیک دولایه آن‌ها اعمال شود و نتایجی که از آن به دست خواهد آمد را به‌عنوان یک پیشنهاد و کار علمی در قالب این تحقیق به مهندسين و علاقه‌مندان این عرصه ارائه کرد که در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

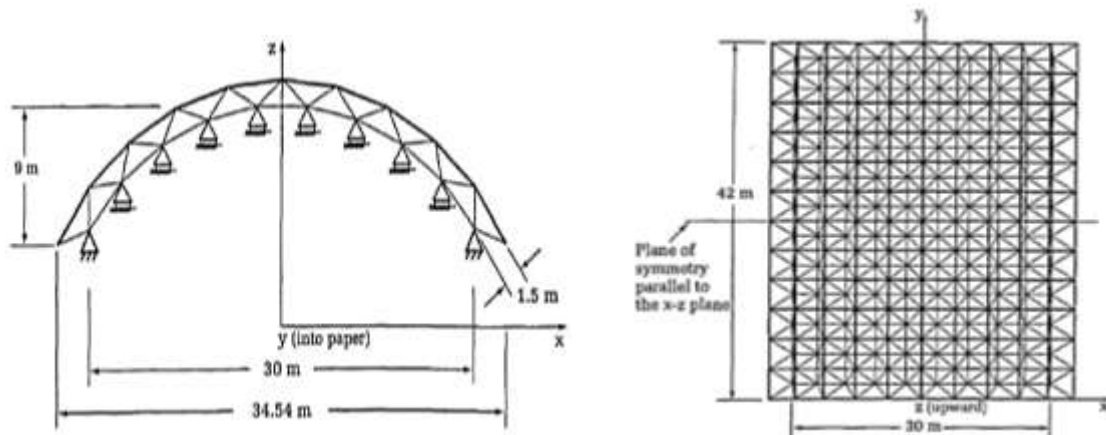
مروری بر تحقیقات انجام شده

تحلیل‌های انفجاری سابقه‌ای در حدود چندین قرن دارد. تحلیل‌های ابتدایی که به روش‌های تقریبی انجام می‌شد به حدود قرن‌های ۱۳ و ۱۴ میلادی بازمی‌گردد. در سال ۱۹۱۹ قانون مقیاس برای انفجارهای ساده توسط هاپکینسون [۱] ارائه شده که البته پایه ریاضی نداشته ولی از نظر کلاسیک دارای اهمیت بود. وی ادعا نمود که اگر دو ساختمان با شکل و مصالح مشابه ولی در اندازه‌های مختلف ساخته شوند و سپس تحت اثر انفجار قرار گیرند، مقدار ماده منفجره مورد نیاز برای ایجاد تأثیرات مشابه با توان سوم ابعاد ساختمان‌ها نسبت مستقیم دارد. این قانون به‌طور کامل و در سال ۱۹۲۶ توسط گرنز ارائه شد [۲]. پیشرفت‌ها در زمینه انفجار علاوه بر هاپکینسون مدیون زحمات چند تن از دانشمندان انگلیسی نیز بود. هوراس لمب ریاضی‌دان و استاد ریاضی دانشگاه منچستر در سال ۱۸۹۵ تحقیق‌هایی در مورد هیدرودینامیک و پدیده انتشار امواج انجام داد [۳]. دیگر دانشمند انگلیسی تیلور بود که مطالعاتش بر روی دینامیک موج‌های انفجار ناشی از مواد منفجره نقش بسیار زیادی در پیشرفت مرکز تحقیقات وزارت دفاع بریتانیا در سال‌های بین ۱۹۳۶ تا ۱۹۵۰ داشت. مقالات ابتدایی وی در مورد انتشار و استهلاک موج‌های انفجار ناشی از سلاح‌های متعارف بود ولی در مطالعات بعدی وی بر روی رفتار موج‌های انفجار ناشی از نخستین انفجار اتمی در نیومکزیکو در سال ۱۹۴۶ متمرکز شد [۴]. پژوهش دیگری که توسط آستانه در زمینه انفجار انجام شده است، مربوط است به بررسی تأثیر انفجار ناشی از وسیله نقلیه بر روی دیوار پیشنهادی ایشان که ترکیبی از دیوار برشی فولادی و بتنی می‌باشد [۵]. فیوض، تأثیر مصالح و شکل سازه بر روی عملکرد سازه در برابر انفجار را مورد بررسی قرار دادند که در این تحقیق سازه‌ها با شکل‌های مختلف، رفتارهای متفاوتی در برابر موج انفجار از خود نشان می‌دهند و درک صحیح عملکرد سازه در برابر انفجار می‌تواند در انتخاب شکل متناسب سازه مفید و مؤثر واقع شود. در این تحقیق به بررسی رفتار غیرخطی سازه‌های فولادی و بتنی با شکل‌های ساده نظیر مکعب، نیم استوانه، نیم کره و ... در برابر بار ناشی از موج انفجار به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع تنش تا حد بسیار زیادی تابع شکل سازه است. سازه‌های مکعبی و نیم استوانه‌ای تنش‌ها و تغییر فرم زیادی دارند و وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند، در صورتی که میزان تنش و تغییر فرم سازه‌های نیم‌کره‌ای خیلی جزئی بوده و رفتار سازه در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند [۶]. شیراوند، رفتار سیستم‌های مهاربندی در سازه‌های فولادی تحت اثر بارهای ناشی از انفجار را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد سیستم مقاوم جانبی مهاربند برون‌محور (EBF) نسبت به سیستم مقاوم جانبی مهاربند هم‌محور (CBF) از سطوح عملکرد بهتری در برابر بارهای ناشی از انفجار برخوردار می‌باشد [۷]. محتشمی، رفتار قاب‌های فولادی در برابر بارهای انفجاری را مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور، یک قاب خمشی فولادی سه طبقه با ترکیب از ابعاد تیر و ستون، تحت اثر دو بارگذاری انفجاری و به صورت سه بعدی به کمک نرم‌افزار ABAQUS تحلیل می‌شود. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد، ستون‌ها مهم‌ترین عامل در تعیین رفتار قاب می‌باشند و با افزایش ابعاد آن‌ها، معیار آسایش به نحو قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد و تغییر مکان مطلق طبقات کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند [۸]. ان جی اُ در سال ۲۰۰۷، بارگذاری انفجاری و اثرات انفجار روی سازه‌ها را مورد تحقیق قرار دادند [۹]. یکی دیگر از محققینی که در زمینه انفجار تحقیقات زیادی انجام داده، لوچینی است که از مقالات وی می‌توان به رفتار دال بتنی تحت اثر بار انفجار اشاره نمود [۱۰]. یانگ در سال ۲۰۰۷، از دانشگاه ملی

سنگاپور، تحلیل ساختمان‌های بتن مسلح در برابر موج انفجار را با در نظر گرفتن تأثیر نرخ (سرعت) کرنش بر روی مقاومت آرماتورهای فولادی را انجام دادند. در این مقاله روشی جدید برای محاسبه مقاومت دینامیکی بتن مسلح تحت اثر موج انفجار ارائه شده است [۱۱]. در راستای تحقیقات صورت گرفته دستورالعمل‌هایی نیز در زمینه طراحی سازه‌ها و ساختمان‌ها و فضاهای شهری در برابر انفجار تدوین شده است. دستورالعمل TM5-855-1 که در سال ۱۹۸۶ توسط دپارتمان نیروی زمینی ارتش آمریکا برای سازه‌های مقاوم در برابر انفجار تهیه شده است که از اوایل دهه ۵۰ میلادی به بعد تهیه و تکمیل شده است [۹]. دستورالعمل فنی شماره TM5-1300 دپارتمان نیروی هوایی و دریایی (ارتش) آمریکا در سال ۱۹۹۰ میلادی تهیه شد که به صورت گسترده توسط محققین و مهندسين مورد استفاده قرار گرفت [۱۲]. همچنین می‌توان از دستورالعمل فنی انفجار و خرابی پیش‌رونده انجمن فولاد آمریکا که در سال ۲۰۰۴ [۱۳] و در نهایت در سال ۲۰۰۸ دستورالعمل UFC 3-340-02 که نسخه به‌روز شده TM5-1300 می‌باشد توسط وزارت دفاع آمریکا تهیه شد و امروزه غالباً به‌عنوان مبنای اصلی طراحی و تحقیقات در این حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴].

شکل و خصوصیات هندسی چلیک ها

برای مطالعه رفتار چلیک های دولایه در تحقیق حاضر چلیک های دولایه با نقش دوراهه روی دوراهه و با نسبت‌های خیز به دهانه ۰/۳ و ۰/۴۵ در نظر گرفته شده که طول، دهانه و ارتفاع همه آن‌ها به ترتیب برابر ۴۲، ۳۰ و ۱/۵ متر می‌باشد. شکل (۱) نمونه‌ای از این چلیک ها را نشان می‌دهد با نسبت خیز به دهانه ۰/۳ که برای صحت سنجی [۱۵] مدل‌سازی از آن استفاده شده است.



شکل ۱: مشخصات هندسی چلیک

سازه‌های فضاکار چلیکی دولایه در برنامه Formian [۱۶] تاشه پردازی شده و سپس با انتقال به نرم‌افزار اتوکد (Auto CAD) فاصله دقیقی بین گره‌های روی دو قوس لایه بالا و پایین مشخص گردید چون برای مدل‌سازی و تحلیل و طراحی اولیه سازه در نرم‌افزار المان محدود آباکوس (ABAQUS) به این فاصله‌ها نیاز داشتیم.

طراحی اولیه سازه و صحت سنجی مدل سازی

به منظور مطالعه رفتار سازه های فضاکار چلیکی دولایه و اطمینان از صحت مدل سازی انجام گرفته برای بارگذاری انفجاری، با استفاده از نرم افزار ABAQUS/CAE V.6.13-1 چلیک دولایه مورد نظر در شکل (۱) را مدل سازی می کنیم. مشخصات دیگر مدل سازی به شرح ذیل می باشند.

مشخصات مصالح

با در نظر گرفتن این مسئله که سازه مورد نظر بایستی تحت اثر بار انفجاری قرار گیرد، ورود سازه چلیکی به ناحیه پلاستیک اجتناب ناپذیر می نماید. به همین علت در مورد شبیه سازی رفتار فولاد بایستی هر دو ناحیه الاستیک و پلاستیک در نظر گرفته شده و اطلاعات مورد نظر در هر قسمت به نرم افزار داده شود. مشخصات الاستیک مصالح مورد استفاده در کلیه تحلیل ها به صورت زیر می باشند:

$$E \text{ (مدول الاستیسیته یا مدول یانگ): } (205 \times 10^9 \text{ N/m}^2)$$

$$\nu \text{ (ضریب پواسون): } 0.3$$

$$\rho \text{ (وزن واحد حجمی مصالح): } (7850 \text{ kg/m}^3)$$

$$F_y \text{ (تنش تسلیم مصالح): } (275 \times 10^6 \text{ N/m}^2)$$

مشخصات پلاستیک مصالح نیز در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر تنش و کرنش واقعی فولادی

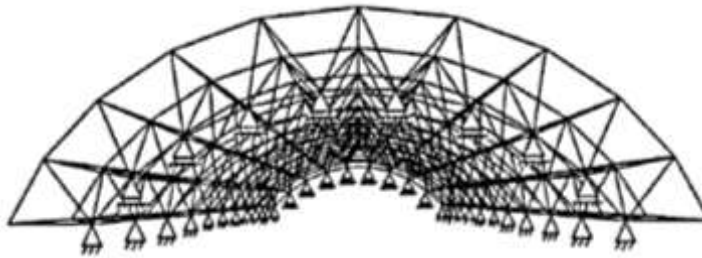
کرنش پلاستیک (بدون بُعد)	تنش واقعی (مگاپاسکال)
۰/۰	۲۷۵
۰/۰۲۵	۳۵۰
۰/۱	۳۷۵
۰/۳۵	۴۰۰

مشخصات مقاطع

اعضای مورد استفاده در مدل ها به صورت زیر در نظر گرفته شده اند: اعضای میانی از لوله های به قطر خارجی ۱۳۹/۷ میلی متر و ضخامت جدار نازک ۴ میلی متر و اعضای واقع بر روی قوس های انتهایی هر دولایه از لوله های به قطر خارجی ۱۳۹/۷ میلی متر و ضخامت جدار نازک ۵/۶ میلی متر انتخاب گردیده و به تمامی اعضا اختصاص داده می شود.

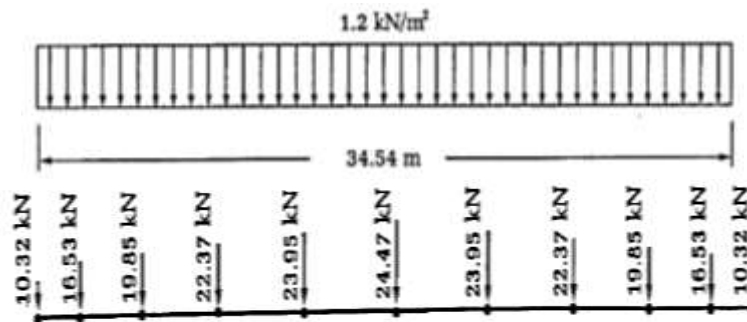
شرایط تکیه گاهی و بارگذاری

شرایط تکیه گاهی از نوع مفصلی برای گره های در امتداد طولی و از نوع غلتکی برای گره های روی دو قوس انتهایی لایه پایین، برای هر یک از چلیک ها منظور گردیده که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: شرایط تکیه‌گاهی چلیک‌ها

بارگذاری چلیک‌ها از نوع متقارن در نظر گرفته شده و به صورت بار متمرکز بر روی همه گره‌های لایه بالا اعمال شده است. ترکیب بارگذاری مورد استفاده شامل: ترکیب بار مرده (D.L) و زنده (L.L) هم‌زمان هر دو باهم می‌باشد (D.L+L.L). بارگذاری اعمالی به صورت زیر انجام شده است:



شکل ۳: ترکیب بار مرده و زنده متقارن وارد بر گره‌های لایه بالایی

نوع تحلیل

برای مدل‌سازی و طراحی اولیه سازه از تحلیل استاتیکی (Static, General) در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌کنیم. زمان تحلیل را اثنانیه در نظر می‌گیریم. برای صحت سنجی مدل‌سازی پارامتری که باید کنترل گردد تغییر مکان ماکزیمم گره وسط سازه فضاکار چلیکی دولایه در نظر گرفته شده است. در تحلیل حاضر از عنصر تیری تیموشنکو (Beam 32) استفاده شده است. عنصر تیری تیموشنکو تغییر شکل‌های برشی را لحاظ نموده و با انتخاب این عنصر، توسط نرم‌افزار در وسط هر عضو گره اضافی ایجاد و دقت محاسبات عددی افزایش می‌یابد [۱۷].

صحت سنجی

پس از پایان مدل‌سازی و تحلیل و طراحی اولیه سازه فضاکار چلیکی دولایه در نرم‌افزار آباکوس در قسمت مشاهده نتایج تغییر مکان ماکزیمم گره وسط را کنترل می‌کنیم که از صحت مدل‌سازی خود اطمینان حاصل کنیم.

جدول ۲: تغییر مکان ماکزیمم گره وسط پس از انجام تحلیل استاتیکی

تغییر مکان ماکزیمم گره وسط (متر)	تغییر مکان ماکزیمم گره وسط (متر) در رساله دکتری صادقی [۱۵] برای نسبت خیز به دهانه ۰/۳
بدست آمده از نرم‌افزار برای نسبت خیز به دهانه ۰/۳	۰/۰۱۷
۰/۰۱۷۴	

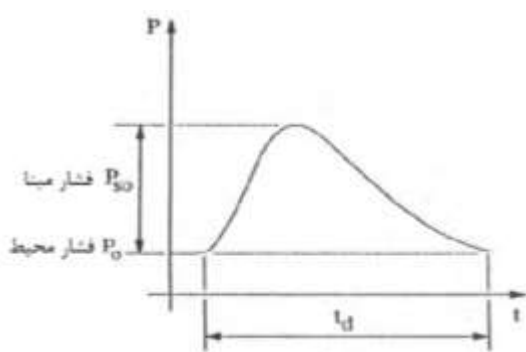
مقایسه نتیجه بدست آمده با جواب موردنظر دقت کار و صحت مدل‌سازی انجام‌گرفته را نشان می‌دهد و می‌توان در ادامه برای تحلیل دینامیکی از مدل موردنظر استفاده کرد.

مبانی بارگذاری انفجاری

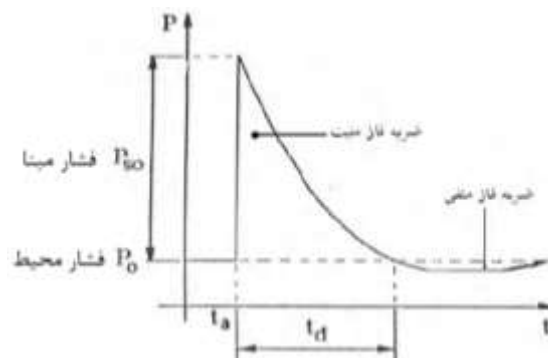
یکی از مباحث مهم پدافند غیرعامل مقاوم‌سازی سازه‌ها در مقابل اثرات ناشی از انفجار می‌باشد. انفجار، واکنشی است که در آن نرخ سوختن مواد با سرعتی به مراتب بیشتر از سرعت صوت انجام می‌شود که در نتیجه آن گرادیان دما و فشار بسیار بالا ایجاد و موج شوک بلافاصله تولید و با سرعت بسیار بالا منتشر می‌شود. هر بارگذاری ناشی از موج انفجار توسط سه پارامتر مهم شکل موج، حداکثر اضافه فشار یا فشار مبنای انفجار (P_{so} یا P_{max}) و زمان دوام انفجار (t_d) تعیین می‌شود. دو نوع از انواع موج‌های انفجار قابل تعریف است:

الف- موج ضربه (شوک): این موج یک رشد ناگهانی تقریباً لحظه‌ای را در فشار محیط تا رسیدن به بیشینه افزایش فشار دارا می‌باشد. بیشینه افزایش فشار به تدریج با برخی نوسان‌ها در استهلاك فشار به فشار محیط بازمی‌گردد. که این نوسان‌ها باعث ایجاد موج فشار منفی بعد از فاز مثبت می‌شوند. فاز منفی یک موج شوک معمولاً ضعیف‌تر و کوتاه‌تر از فاز مثبت است و به همین دلیل در طراحی مقاوم در برابر انفجار معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود.

ب- موج فشار: این موج دارای یک رشد تدریجی تا رسیدن به بیشینه افزایش می‌باشد و همین‌طور استهلاك آن نیز تدریجی می‌باشد و نیز دارای فازی منفی مشابه موج ضربه است.

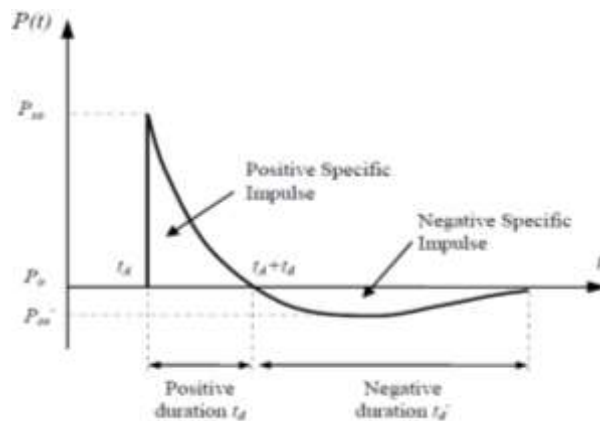


شکل ۵: موج فشار



شکل ۶: موج ضربه

شکل کلی منحنی فشار- زمان برای موج انفجار در هوای آزاد در شکل ۶ نشان داده شده است، اما در طراحی مقاوم در برابر انفجار معمولاً متداول است که از شکل‌های ساده‌شده موج انفجار بجای شکل‌های واقعی آن استفاده شود.



شکل ۶: منحنی فشار- زمان ناشی از انفجار [۱۴]

بارگذاری انفجاری به زمان و مکان به‌طور همزمان وابسته است. در ادامه به توزیع مکانی و زمانی بار انفجاری پرداخته می‌شود.

الف- توزیع مکانی: برای توزیع مکانی بار وارد بر سازه از روش معادل استفاده شده است. افراد مختلف روابط زیادی برای بدست آوردن حداکثر اضافه فشار انفجار (P_{max}) ارائه داده‌اند که ازجمله می‌توان از: روابط براد (Brode)، هنریش (Henrych)، نیومارک (Newmark)، هنسن (Hansen)، بیکر (Baker)، کنگری (Kingery) و میلز (Mills) نام برد. در این تحقیق برای بدست آوردن P_{max} از رابطه کینی (Kinney) [۱۸] استفاده شده است. در روش معادل، میزان فشار وارده بر هر نقطه از سازه برحسب فاصله از مرکز انفجار و میزان ماده منفجره از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$\frac{P_{max}}{P_0} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (1)$$

این فرمول به این علت انتخاب گردید که برای کلیه Zها قابل استفاده است اما در روابط ارائه شده دیگر Z دارای محدودیت می‌باشد. این فرمول رابطه ای تجربی برای محاسبه افزایش فشار استاتیکی ناشی از انفجار بر روی سازه می‌باشد که برحسب پارامتر فاصله مقیاس شده، Z (Scaled Distance) در رابطه (۲) بیان شده است. این پارامتر بر اساس وزن ماده منفجره محاسبه می‌شود:

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

در این رابطه، R فاصله از مرکز انفجار برحسب متر و W وزن معادل ماده منفجره برحسب کیلوگرم تی ان تی معادل می‌باشد.

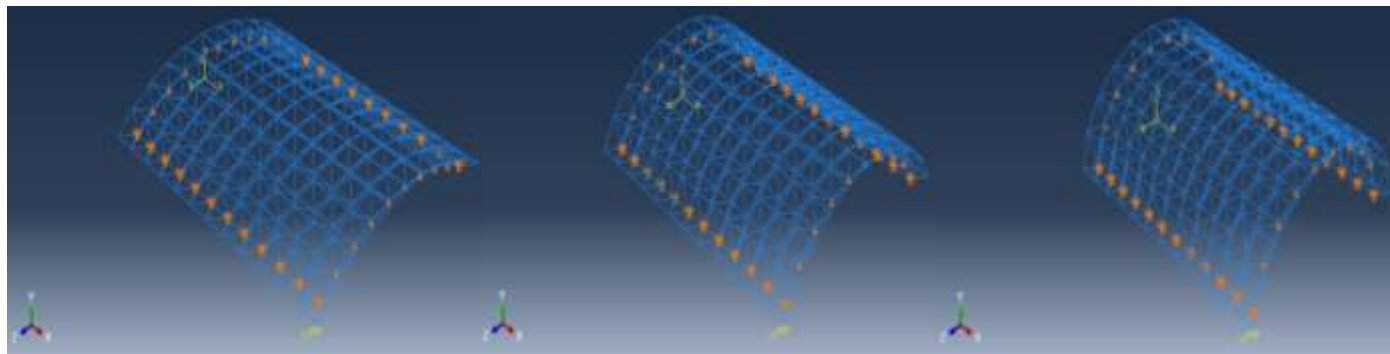
روش مورد استفاده برای معادل‌سازی بار انفجار به این گونه است که افزایش فشار وارد بر هر یک از گره‌های تشکیل دهنده سازه با استفاده از روابط تجربی ارائه شده، محاسبه شده و سپس با ضرب این فشار در سطح بارگیر هر گره به نیرو (برحسب نیوتن) تبدیل شده است و به آن گره اعمال گردیده است. برای کلیه مدل‌ها محل وقوع انفجار در فاصله ۲ متری از سازه در راستای افقی فرض گردیده است. ولی وزن ماده منفجره ۲۰، ۴۰ و ۱۰۰ کیلوگرم تی ان تی در نظر گرفته شده است. با داشتن فاصله و به تبع آن فاصله مقیاس شده، افزایش فشار استاتیکی ناشی از انفجار بر اساس روابط ارائه شده بدست می‌آید. با ضرب این فشار در سطح بارگیر هر گره نیروی وارده بر آن محاسبه می‌شود. مسئله حایز اهمیت عمود بودن این نیرو بر سطح هر گره می‌باشد که به جهت ایجاد امکان تعریف بار متمرکز در نرم افزار آباکوس بایستی مؤلفه این نیرو در هر یک از سه

امتداد اصلی محورهای مختصات کارتزین محاسبه شود. باید خاطر نشان کرد بارگذاری انفجاری روی نصف سازه چلیکی دولایه و گره های بالایی آن اعمال می شود. چون آن قسمت که مورد بارگذاری قرار نگرفته است به دلیل این که تحت مکش قرار می گیرد و اثر بسیار کم و ناچیزی در اثر انفجار خواهند داشت از بارگذاری بر روی این گره ها صرف نظر می گردد.

ب-توزیع زمانی: برای توزیع مقدار بار وارده در طول زمان بسیار اندک ۰/۰۲ ثانیه از جدول (۳) استفاده شده است.

جدول ۳: دامنه زمانی بارگذاری مدلها

دامنه	زمان (ثانیه)
۰	۰
۱	۰/۰۰۱
۱	۰/۰۱
۰	۰/۰۲



شکل ۷: موقعیت قرارگیری ماده منفجره در مدل های ساخته شده با نسبت های خیز به دهانه ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ (RP نشان گر نقطه مرجع انفجار می باشد)

بازتاب (انعکاس) موج انفجار و فشارهای ناشی از آن

موج انفجار پس از برخورد با مانعی صلب منعکس می گردد. با فرضی محافظه کارانه فشار بازتاب P_r را می توان بر اساس برخورد موج انفجار به صورت عمودی به سازه مطابق رابطه (۳) محاسبه نمود و به عنوان فشار ماکزیمم باید در سطح بارگیر هر گره طبق مرجع [۱۹] ضرب نمود و نیروی متمرکز وارد بر هر گره را که در نرم افزار باید وارد کنیم، بدست آورد.

$$P_r = 2p_{so} \left[\frac{7p_o + 4p_{so}}{7p_o + p_{so}} \right] \quad (3)$$

P_{so} : فشار مبنای انفجار یا فشار ماکزیمم

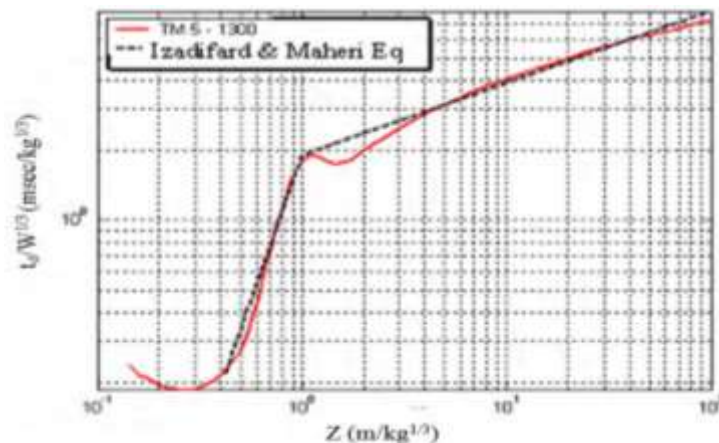
P_0 : فشار محیطی

مدت زمان فاز مثبت انفجار (زمان تداوم انفجار) (t_d)

مدت زمان فاز مثبت انفجار، مدت زمانی است که در اثر انفجار فشار بیش از فشار محیطی است. از آن جا که در کارهای انفجاری از اثر فاز منفی صرف نظر می شود، لذا می توان مدت زمان فاز مثبت (t_d) را زمان تداوم انفجار فرض نمود. در آیین نامه TM5-1300 نموداری برای محاسبه مدت زمان فاز مثبت (t_d) ارائه شده است. این نمودار توسط ایزدی فرد و ماهری با رابطه زیر ساده سازی شده است.

$$\log_{10}(t_d / W^{1/3}) = 2.5 \log_{10}(Z) + 0.28 ; \quad Z \leq 1 \quad (4)$$

$$\log_{10}(t_d / W^{1/3}) = 0.31 \log_{10}(Z) + 0.28; \quad Z \geq 1$$



شکل ۸: مقایسه رابطه ایزدی فرد و ماهری با TM5-1300 برای محاسبه مدت زمان فاز مثبت (t_d)

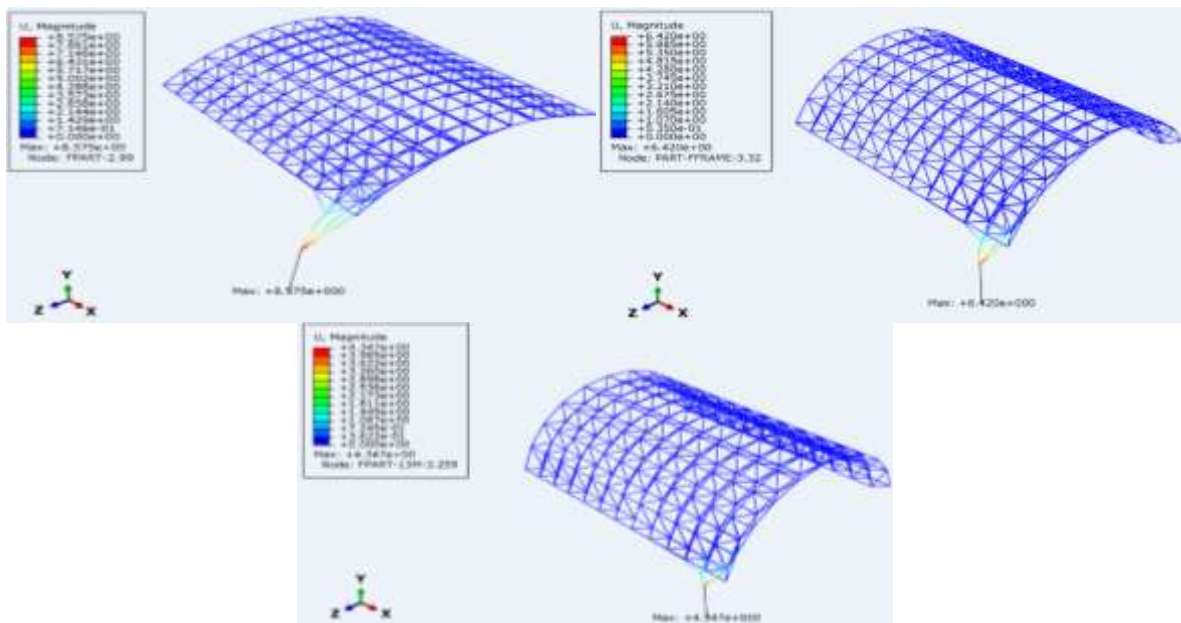
تحلیل دینامیکی مدل‌ها

در این بخش، رفتار سازه تحت اثر بارگذاری انفجاری بررسی می‌شود. بدین منظور، از نرم‌افزار ABAQUS برای تحلیل اجزای محدود دینامیکی سازه استفاده می‌شود. برای تحلیل مدل‌ها از تحلیل‌گر دینامیکی صریح (Dynamic, Explicit) نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. از این تحلیل‌گر در مواردی که هدف، تحلیل دینامیکی مدل در زمانی بسیار اندک موردنظر باشد، استفاده می‌گردد. به دلیل سرعت بالا در روش حل، قدرت همگرایی بالاتر در صورت انتخاب بازه زمانی کوچک‌تر، قابلیت تحلیل ساده‌تر تغییر فرم‌های خیلی بزرگ و دارا بودن توانایی‌های بهتر در زمینه تحلیل غیرخطی از تحلیل‌گر صریح استفاده شده است. در طی تحلیل رفتار کلیه مدل‌ها در مدت ۰/۰۲ ثانیه ثبت گردیده است. در قسمت نتایج پارامترهای تغییرمکان، تنش و انرژی موردبررسی قرار گرفته‌اند و از معیار فون میسز برای شکست استفاده شده است.

نتایج

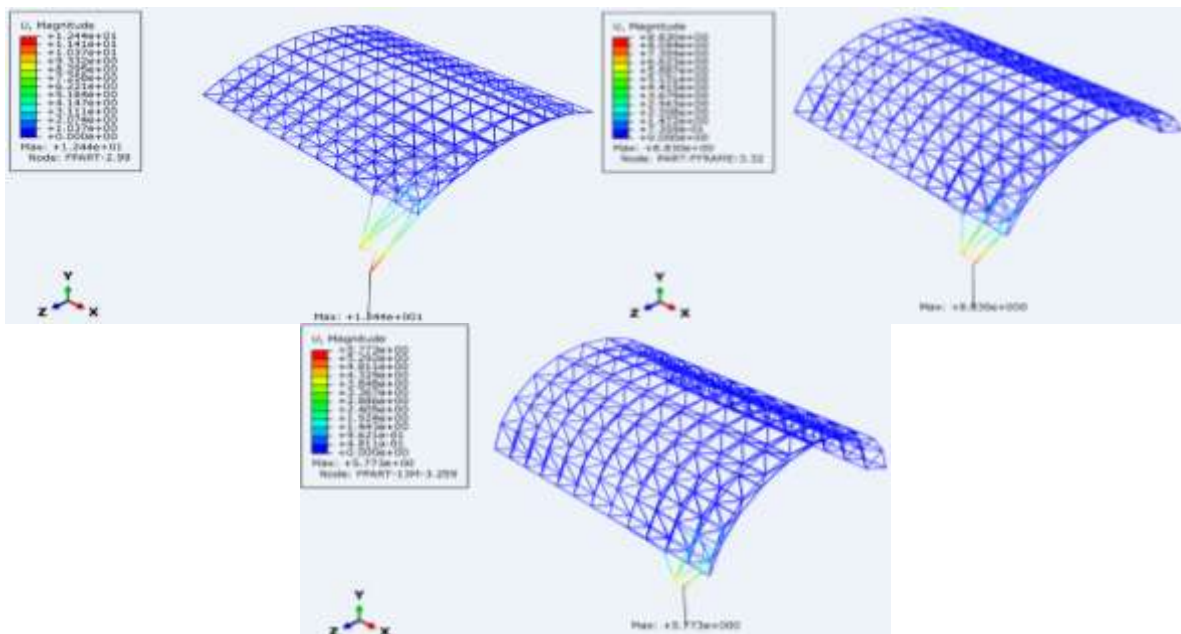
در این قسمت پارامترهای تغییرمکان و تنش مدل‌های ساخته شده که تحت اثر بارگذاری انفجاری قرار گرفته‌اند تعیین و با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند.

الف- تغییرمکان: وضعیت کلی تغییرمکان مدل‌ها در لحظه بیشینه تغییرمکان برای وزن‌های ۴۰، ۲۰ و ۱۰۰ کیلوگرمی در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



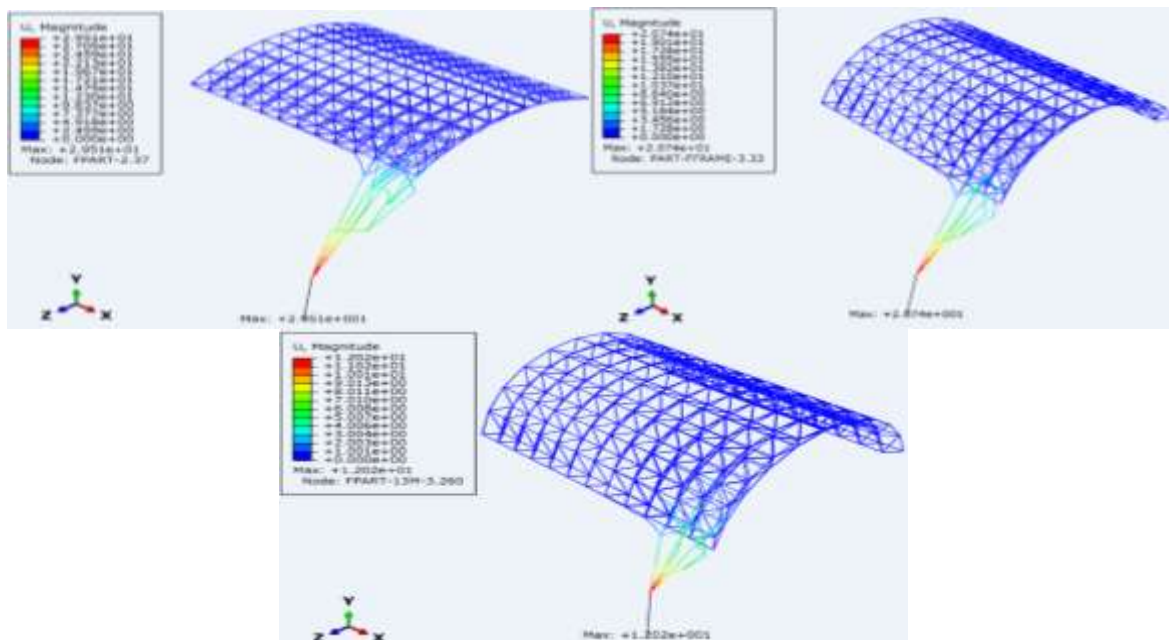
شکل ۹: وضعیت تغییر مکان کلی مدل‌های مورد بررسی برای وزن ۲۰ کیلوگرم تی ان تی

نتایج نشان می‌دهد که تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۱۵، ۸/۵۷۵ متر شده است. تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۳، ۶/۴۲ متر و تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۴۵، ۴/۳۴۷ متر بدست آمده که همگی در نزدیک ترین گره به ماده منفجره به وقوع پیوسته است.



شکل ۱۰: وضعیت تغییر مکان کلی مدل‌های مورد بررسی برای وزن ۴۰ کیلوگرم تی ان تی

نتایج نشان می دهد که تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۱۵، ۱۲/۴۴ متر شده است. تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۳، ۸/۸۳ متر و تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۴۵، ۵/۷۷۳ متر بدست آمده که همگی مانند: حالت ۲۰ کیلوگرم تی ان تی در نزدیک ترین گره به ماده منفجره به وقوع پیوسته است.

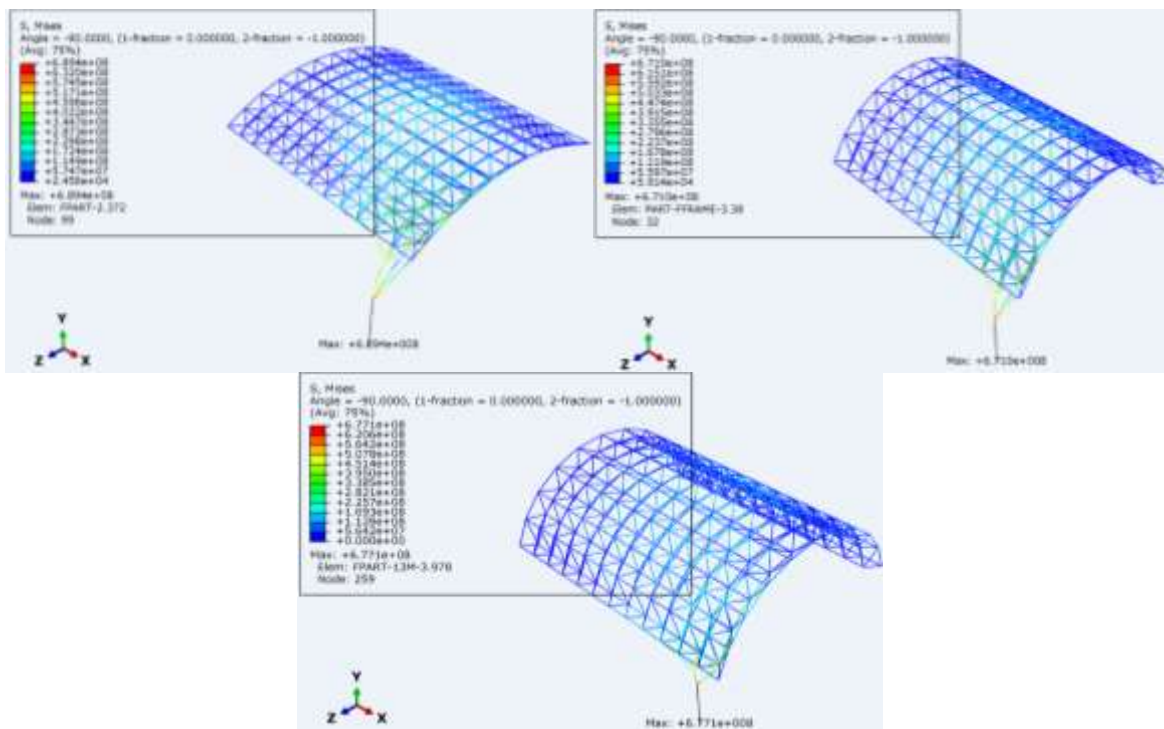


شکل ۱۱: وضعیت تغییر مکان کلی مدل های مورد بررسی برای وزن ۱۰۰ کیلوگرم تی ان تی

نتایج نشان می دهد که تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۱۵، ۲۹/۵۱ متر شده است. تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۳، ۲۰/۷۴ متر و تغییر مکان ماکزیمم مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۴۵، ۱۲/۰۲ متر بدست آمده که همگی مانند: حالت های قبلی در نزدیک ترین گره به ماده منفجره به وقوع می پیوندند.

بیشترین تغییر مکان گره وسط سازه های فضاکار مدل سازی شده در مدت زمان ۰/۰۲ ثانیه که مدت زمان وقوع انفجار می باشد تعیین شده که به دلیل دور بودن از ماده منفجره تغییر فرم های زیادی نداده اند. در سازه فضاکار چلیکی دو لایه با خیز ۴/۵ متر، ۲/۵ سانتی متر جابه جایی داشتیم. در سازه فضاکار چلیکی دو لایه با خیز ۹ متر، ۲ سانتی متر جابه جایی و سازه فضاکار چلیکی دو لایه با خیز ۱۳/۵ متر ۲/۶ سانتی متر تغییر فرم ایجاد شده است.

ب- تنش: در این قسمت به بررسی وضعیت تنش در سازه های چلیکی دو لایه پرداخته شده است. که در این جا یک حالت در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۲: وضعیت کلی تنش مدل‌های مورد بررسی به عنوان برای وزن ۲۰ کیلوگرم تی ان تی

همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۱۵، به تنش ۶۸۹ مگاپاسکال رسیده و از مقدار تنش تسلیم فراتر رفته است و مدل‌های تحت این بارگذاری وارد ناحیه پلاستیک رفتار خود می‌شوند و به همین علت حتی پس از پایان بارگذاری و صفر شدن میزان بار وارده به سازه مقادیر تنش‌ها دیگر به عدد صفر نمی‌رسند و همواره مقداری از تنش به صورت پسماند در سازه باقی می‌ماند. مقدار تنش موجود در مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۳، ۶۷۱ مگاپاسکال می‌باشد که در این مورد نیز سازه موردنظر جاری شده است. و در نهایت برای مدل با نسبت خیز به دهانه ۰/۴۵، مقدار تنش ۶۷۷ مگاپاسکال بدست آمده که از مقدار تنش تسلیم بیشتر بوده و مدل وارد ناحیه پلاستیک رفتار خود می‌شود و خرابی اتفاق می‌افتد. برای وزن‌های دیگر که بررسی صورت گرفت نیز کلیه مقادیر مربوط به تنش در هر سه مدل از مقدار تنش تسلیم بیشتر شده و مدل‌ها وارد ناحیه رفتار پلاستیک شدند. که در این قسمت فقط برای وزن ۲۰ کیلوگرم تی ان تی مقادیر تنش میسن نشان داده شده است.

نتیجه گیری

- با مروری که بر نتایج تحلیل‌ها صورت گرفته می‌توان موارد زیر را به عنوان نتایج نهایی ارائه نمود.
- ۱- تحت بارهای انفجاری، کلیه سازه‌های فضاکار چلیکی دولایه مدل سازی شده وارد ناحیه پلاستیک رفتار خود شده اند چون مقدار تنش بیشتر از تنش تسلیم شده است و به همین دلیل پس از انفجار قابل استفاده نخواهند بود.
 - ۲- محل وقوع بیشینه تنش در تمامی سازه‌ها در محل تکیه‌گاه‌ها و ردیف اول نزدیک‌ترین گره‌ها به مرکز انفجار می‌باشد که بایستی این نقاط را برای تحمل بارهای وارده تقویت نمود.

۳- در این تحقیق فاصله از مرکز انفجار ثابت فرض گردید و میزان ماده منفجره به عنوان پارامتر متغیر گرفته شد. مسلماً هرچه فاصله سازه تا مرکز انفجار نزدیک تر باشد میزان خرابی بیش تر و تغییر مکان ها نیز بیشتر خواهند بود و بالعکس هرچه مرکز انفجار دورتر از سازه مورد نظر باشد میزان خرابی و خسارات کمتری متوجه سازه خواهد بود.

۴- هرچه خیز سازه های فضاکار چلیکی دولایه کمتر باشد تغییر مکان بیش تری پیدا خواهد کرد. با تحلیل سازه های مدل شده این نتیجه بدست آمد که هر چه خیز سازه های فضاکار چلیکی دولایه بیش تر باشد دارای عملکرد بهتر و مقاومت بیشتری در برابر بارهای انفجاری می باشند.

مراجع

- [1] Baker, J.F., Leader Williams, E. and Lax, P., "The design of framed buildings against high explosive bombs", *The Civil Engineer in War, UK Institution of Civil Engineers*, London., (1948), p 80.
- [2] Brode, H.L., "Blast wave from a spherical charge, *The Physics of Fluids*", 2(2), March/April, (1959)
- [3] Lamb, H., "Hydrodynamics", Cambridge Press, (1895)
- [4] Taylor, G.I., "The Propagation and Decay of Blast Waves", UK Home Office, ARP department, (1939)
- [5] Astaneh, A., Zhao, Qihong, "Analysis of Car-Bomb Effects on Building using MSC-Dytran Software and Protective Measures", *Proceedings of the MSC Software Virtual Product Development Conference, Dearborn, Michigan*, (2003)
- [۶] فیوض، ع.، مجتهد پور، م.، توکل زاده، م.، بررسی تأثیر مصالح و شکل سازه بر روی عملکرد سازه در برابر انفجار، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، (۱۳۸۸)
- [۷] شیراوند، م.، شعبانی، م.، بررسی رفتار سیستم های مهاربندی در سازه های فولادی تحت اثر بارهای ناشی از انفجار، سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد، سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه، اولین کنفرانس ملی سازه های سبک فولادی (LSF)، (۱۳۹۱)
- [۸] محتشمی، ا.، سینایی، س.، شوشتری، ا.، ارزیابی رفتار قاب های فولادی در برابر بارهای انفجاری، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، (۱۳۸۹)
- [9] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, J. Ramsay, "Blast Loading and Blast Effects on Structures", *EJSE Special Issue: Loading on Structures*, (2007)
- [10] Luccioni, B.M., Rougier, V.C., "Concrete Pavement Slab under blast loads", *International Journal of Impact Engineering*, (2006)
- [11] Yang, G., Lok, T., "Analysis of RC structures subjected to air-blast loading accounting for strain rate effect of steel reinforcement", *International Journal of Impact Engineering*, (2007)
- [12] Washington, DC: US Department of the Army, "Structures to resist the effects of accidental explosions", Technical manual TM5-1300, (1990)
- [13] Kirk A. Marchand, Walter P. Moore & Associates, Inc, Farid Alfawakhiri, AISC, Inc., Blast and Progressive Collapse, American Institute of Steel Construction, Inc., (2004)
- [14] Unified Facilities Criteria (UFC), "STRUCTURES TO RESIST THE EFFECTS OF ACCIDENTAL EXPLOSIONS", United States of America, UFC 3-340-02, (2008)
- [15] Sadeghi, A., Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Equivalent Earthquake Loads for Some Families of Barrel Vaults, Space Structures Research Centre Civil Engineering School of Engineering University of Surrey, P73-113, (2002)
- [16] Nooshin, H., Disney, P., Formex Configuration Processing I, *International Journal of Space Structures*, Volume 15, No.1, (2000)
- [۱۷] عابدی، ک.، شکسته بند، ب.، "تحلیل پایداری سازه های فضاکار"، انتشارات دانشگاه صنعتی سهند، (۱۳۸۸)
- [18] Larcher, M., "Pressure-Time Functions for the Description of Air Blast Waves", *European Commission Joint Research Centre Institute for the Protection and Security of the Citizen*, Italy, P8, (2008)
- [19] Jeremy Knight, J., "Blast Load Time History Analysis An Example in S-FRAME", S-FRAME Software Inc., CANADA, p13, (2010)