



بررسی عملکرد قاب خمشی ویژه فولادی تحت بار انفجاری

علی جعفروند^۱، حامد عیوضی^۲

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه زنجان، ali_jafarvand@znu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه زنجان

چکیده

در سال‌های اخیر تسحیلات انفجاری مخصوصاً خودروهای بمب‌گذاری شده، با توجه به دسترسی نسبتاً به این تسحیلات و نیز به اطلاعات مربوط به کاربری آن‌ها به‌گزینه‌ای پرکاربرد برای انواع عملیات‌های تروریستی تبدیل شده است و بارگذاری انفجاری را به یکی از مخاطرات و ملاحظات اصلی و مهم در طراحی سازه تبدیل نموده‌اند. قاب خمشی دارای مزیت‌های بسیار بوده که مهم‌ترین مزیت آن تنوع معماری آن می‌باشد. مزیت دیگر آن شکل‌پذیری بالای این قاب می‌باشد و ایمنی آن در برابر زلزله می‌باشد. سوال این است که آیا ساختمانهایی که برای زلزله طراحی شده‌اند، در برابر بار انفجاری مقاوم هستند. برای این منظور با استفاده از نرم افزار ABAQUS دو قاب یک و سه طبقه خمشی فولادی به صورت تک دهانه تحت بار انفجاری تحلیل می‌گردد. قاب‌ها در فواصل مختلف با خرج‌های مختلف بار انفجاری مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته‌اند. مقادیر برش پایه، کانتورهای تنش قاب‌ها و استهلاک انرژی در این تحلیل بررسی شده‌اند.

کلمات کلیدی: بارگذاری انفجاری، قاب خمشی، تحلیل غیرخطی دینامیکی، برش پایه، جابجایی

۱- مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون حملات تروریستی در سراسر دنیا، ضرورت بررسی پدیده انفجار، شناخت رفتار و آسیب‌پذیری سازه‌ها و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار به خصوص در ساختمان‌های حساس و شریان‌های حیاتی در حوزه پدافند غیرعامل لازم به نظر می‌رسد. از مشخصه‌های اساسی یک انفجار که باعث وارد شدن نیرو بر سازه می‌شود، می‌توان به اتفاقی بودن موقعیت انفجار، دینامیکی و گذرا بودن نیروها و زمان اثر کم (بین چند میلی‌ثانیه تا چند ثانیه) اشاره کرد. هنگامی که یک انفجار صورت می‌گیرد، انرژی به صورت ناگهانی آزاد می‌شود. اثر این آزاد شدن انرژی را می‌توان به دو بخش تشعشعات حرارتی و انتشار امواج در زمین و هوا تقسیم کرد. امواجی از انفجار که در هوا منتشر می‌شوند، عامل اصلی تخریب سازه هستند. این امواج با سرعتی بیش از سرعت صوت حرکت کرده و به سازه برخورد می‌کند. در اثر بازتاب این امواج بر روی سطح سازه، فشار حاصل از آنها افزایش می‌یابد. همچنین بخشی از امواج هوایی از طریق درها، پنجره و بازشوها به داخل سازه نفوذ کرده و اعضای داخلی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در حین این جریان، انکسار امواج نیز در گوشه‌های سازه رخ می‌دهد که

می تواند سبب کاهش یا افزایش فشار حاصل از موج گردد. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می کند که همه محیط قابل دسترسی سازه تحت اثر فشار موج قرار گیرد. از طرف دیگر، امواجی که با زمین برخورد می کنند، در مسیر حرکت خود، مولکولهای هوا را فشرده کرده و یک فشار کلی محیطی (فشار اتفاقی) ایجاد می نمایند [۱].

تحلیل بارگذاری بار انفجاری از سال ۱۹۶۰ آغاز شد. دپارتمان ارتش ایالات متحده کتابچه راهنمای فنی به نام سازه های مقاوم در برابر انفجار تصادفی را در سال ۱۹۵۹ منتشر کردند. تجدید نظر شده ی کتاب فوق، تحت عنوان TM 5-1300 [۲] در سال ۱۹۹۰ به طور گسترده توسط سازمان های نظامی و غیرنظامی ارائه شد، جهت طراحی سازه ها به منظور جلوگیری از انتشار انفجار و تامین حفاظت پرسنل و تجهیزات با ارزش مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعه گسترده ای توسط محققین در زمینه بررسی رفتار سازه ها تحت اثرات مستقیم و غیرمستقیم پدیده انفجار صورت گرفته است.

از جمله آنها می توان به مطالعات سابولا و همکارانش [۳] که رفتار اتصالات فولادی کاملاً گیردار را تحت بارگذاری بارهای انفجاری بوسیله آنالیز المان محدود را بررسی نمودند، اشاره نمود. نتایج نشان می دهد که اتصال تقویت شده عملکرد بهتری را از خود نسبت به اتصال تقویت نشده به نمایش گذاشته و جابجایی، دوران و تنش کمتری را نشان داده اند. محل نگران کننده اتصال، جوش شیاری پایینی اتصال تقویت نشده تحت بارگذاری انفجاری بوده، زیرا تنش های موجود در جوش ها از تنش تسلیم دینامیکی آن بالاتر است. ورق هایی که بر بال تیر جهت تقویت نمودن اتصال اضافه شده اند کفایت لازم برای کاهش تمرکز تنش در جوش شیاری را دارا می باشند. محل تشکیل مفصل پلاستیک در اتصالات تقویت شده از ناحیه اتصال دور می باشند. تنش در اتصالات پایینی کمتر از اتصالات بالایی می باشد و دیرتر دچار تسلیم می شود. در اتصالات تقویت نشده گسیختگی در ناحیه اتصال، با تسلیم موضعی ناحیه نزدیک جوش پایین اتفاق می افتد و گره جوش پایین دچار گسیختگی می شود.

هیون چانگ بییم [۴] مطالعاتی راجع به اتصالات خمشی فولادی تحت بار انفجاری و خرابی پیشرونده انجام داد. دیاگرام ضربه-لنگر به عنوان خواص اتصالات دینامیکی در این مطالعه پیشنهاد شده است. دیاگرام شامل محدوده لنگر و یک محدوده ضربه که به عنوان تاریخچه زمانی بار انفجاری تعریف می شود. به این دلیل که این دیاگرام شامل محدوده خسارت ضربه و شبه استاتیکی می باشد، انتظار می رود که یک روش موثر برای توصیف اتصالات سازه باشد.

اورگسا و همکارانش [۵] آنالیز المان محدود قاب های فولادی تحت بارگذاری انفجاری انجام شده است. رفتار سازه های فولادی با قاب صلب را با سه نوع اتصال مختلف تحت بار انفجاری مورد مقایسه قرار گرفته است. مطالعه نشان می دهد، اتصال Side Plate که دارای ستون و انتهای تیر قوی تری می باشد عملکرد بهتری نسبت به اتصال استاندارد دارد. اتصال TA هم که شامل صفحات افقی برای انتقال ناحیه پلاستیک به جایی دورتر از ستون ها می باشد، عملکرد بهتری نسبت به اتصال استاندارد دارد. دو برابر کردن ضخامت ورق اتصال به طور قابل توجهی جابجایی های داخل صفحه را کاهش می دهد. به طوریکه افزایش ضخامت، نوسان اتصالات استاندارد را ۱۴ درصد، اتصالات TA را ۱۶ درصد و اتصالات Side Plate را ۲۰ درصد کاهش می دهد. اگرچه این عمل هزینه اضافی را برای ساخت تحمیل می کند.

آقایان اردشیر دیلمی و محمد زینالو [۶] تاثیر ضوابط لرزه ای بر خرابی پیشرونده قاب خمشی فولادی تحت بار انفجاری را بررسی کردند. چنین استنتاج می شود که در قاب های متوسط ظرفیت تیرها بیشتر و ظرفیت ستون ها به مراتب کمتر از قاب های ویژه است. نقش تیرها در مهار نیروی انفجاری که منجر به پدیده خرابی پیشرونده می شود نیز به مراتب بیشتر از ستون ها می باشد، به قسمی که این اختلاف ظرفیت کم تیرها در دو سیستم به اختلاف ظرفیت ستون ها غلبه دارد. در کل چنین می توان جمع بندی کرد که در سازه های با تعداد دهانه ها و طبقات کمتر چنانچه طراح بخواهد سازه ای مقاوم در مقابل انفجار با سطح عملکرد بالا طراحی کند (به این معنا که سازه اجازه ورود به تغییر شکل های بزرگ را ندهد)، بهتر

است از قاب قاب خمشی متوسط استفاده نماید، لیکن چنانچه سطح عملکرد انتظاری از سازه پایین باشد (به این معنا که به سازه اجازه ورود به تغییر شکل‌های بزرگ داده شود)، بهتر است از قاب خمشی ویژه استفاده شود و این دقیقاً برعکس رویه‌ای است که در مواجهه با نیروی زلزله اتخاذ می‌شود.

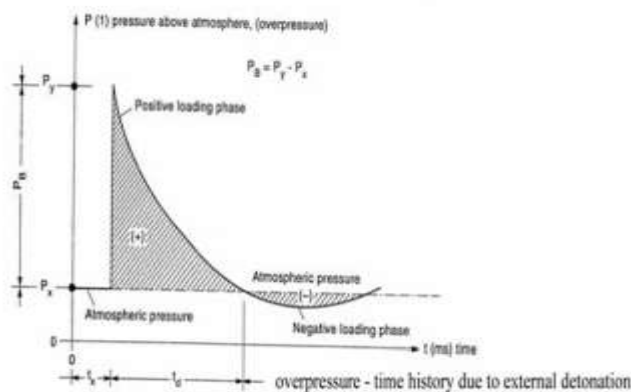
۲- انفجار و بار انفجاری

انفجار آزاد شدن بسیار سریع انرژی به صورت نور، گرما، صدا و موج ضربه‌ای می‌باشد، که این فرایند حاصل تبدیل سریع ماده منفجره به گاز می‌باشد. این آزاد شدن گاز به نوبه‌ی خود می‌تواند باعث پرتاب شدن قطعات و اشیاء به اطراف و تبدیل آنها به ترکش شود [۷]. امواج ناشی از انفجار توسط سه پارامتر شکل موج، حداکثر اضافه فشار P_{so} و زمان تناوب td تعیین می‌شود. بر حسب منشا انفجار، موج‌های ناشی از آن به دو شکل موج ضربه و موج فشار تقسیم می‌گردد [۸]. اثر یک بمب معمولی به وسیله‌ی دو پارامتر مهم، اندازه بمب یا مقدار آن W که برحسب کیلوگرم و فاصله بین انفجار و هدف R که برحسب متر تعریف می‌شود. موج ضربه ناشی از انفجار مواد منفجره جامد بوده و در آن فشار گازهای شکل گرفته از انفجار، با انتشار از چشمه‌ی انفجار، گسترش و تا فشار مبنای p_{so} (مگاپاسکال) افزایش و سپس تا فشار محیطی کاهش می‌یابد. به این مرحله فاز مثبت می‌گویند. در نتیجه‌ی انتشار موج، گازهای حاصل از انفجار سرد شده و فشار آنها به مقدار ناچیزی کمتر از فشار اتمسفر می‌رسد. به علت این اختلاف فشار جهت جریان معکوس شده و به سمت مرکز انفجار باز می‌گردد، نتیجه‌ی این عمل کاهش فشار یا مکش خواهد بود.

در کل با گسترش موج ضربه‌ای که شامل هوای بسیار متراکم است و به صورت شعاعی از منبع انفجار به سمت خارج حرکت می‌کنند، مقدار فشار به سرعت کاهش می‌یابد (متناسب با توان سوم فاصله). در آخر پدیده‌ی انفجار، موج ضربه‌ای منفی ایجاد می‌شود که این مورد به عنوان فاز منفی بارگذاری نامیده می‌شود. P_y اضافه فشار برای اولین موج انفجار برخوردارکننده، P_x فشار اتمسفر، tx زمانی که طول می‌کشد تا اولین موج ناشی از انفجار به مانع برخورد کند، که این زمان به سرعت موج انفجار و فاصله مانع بستگی دارد و td زمان استمرار فاز مثبت می‌باشد [۸]. موج انفجار در یک بازه زمانی بسیار کوتاه به صورت صدم ثانیه رخ می‌دهد. اندازه فشار P به طور نسبی به مقدار ماده منفجره W بستگی دارد [۹].

$$Z\alpha \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

که R فاصله از مرکز خراج انفجار معادل TNT و بر حسب kg ، lb ، $toone$ بیان می‌شود.



شکل ۱: نمودار فشار-زمان

Brode برای به دست آوردن مقدار اضافه فشار در یک انفجار کروی، معادلات زیر را ارائه کرده است [۱۰]:

$$P_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar} \quad P_s > 10 \text{ bar} \quad (2)$$

$$P_{so} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ bar} \quad 0.1 < P_s < 10 \text{ bar}$$

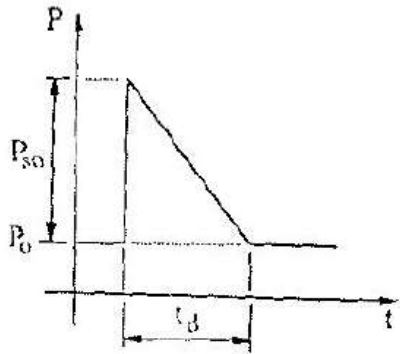
برای مدت زمان فاز مثبت روابط زیر توسط Kinney و Graham در مقیاس صدم ثانیه ارائه شده است [۱۱].

$$\frac{t_d}{W^{\frac{1}{3}}} = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54} \right)^{10} \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.02} \right)^8} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.74} \right)^6} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9} \right)^2}} \quad (3)$$

وقتی موج انفجار در منطقه آزاد به یک سطح برخورد می‌کند، موج منعکس می‌شود. تاثیر انعکاس موج انفجار این است که سطح فشار خیلی بیشتری از مقدار اوج پیش فشار رخداد تجربه می‌کند، مقدار فشار موج منعکس P_r معمولاً توسط ضریبی ضربدر اضافه فشار P_{so} رخداد مشخص می‌شود [۱۲].

$$P_r = 2P_{so} \left[\frac{4P_{so} + 7P_a}{P_{so} + 7P_a} \right] \quad (4)$$

برای ساده سازی روند طراحی، پروفیل های عمومی موج انفجار، به صورت ایده آل یا خطی شده، شکل (۲)، در نظر گرفته می‌شوند.

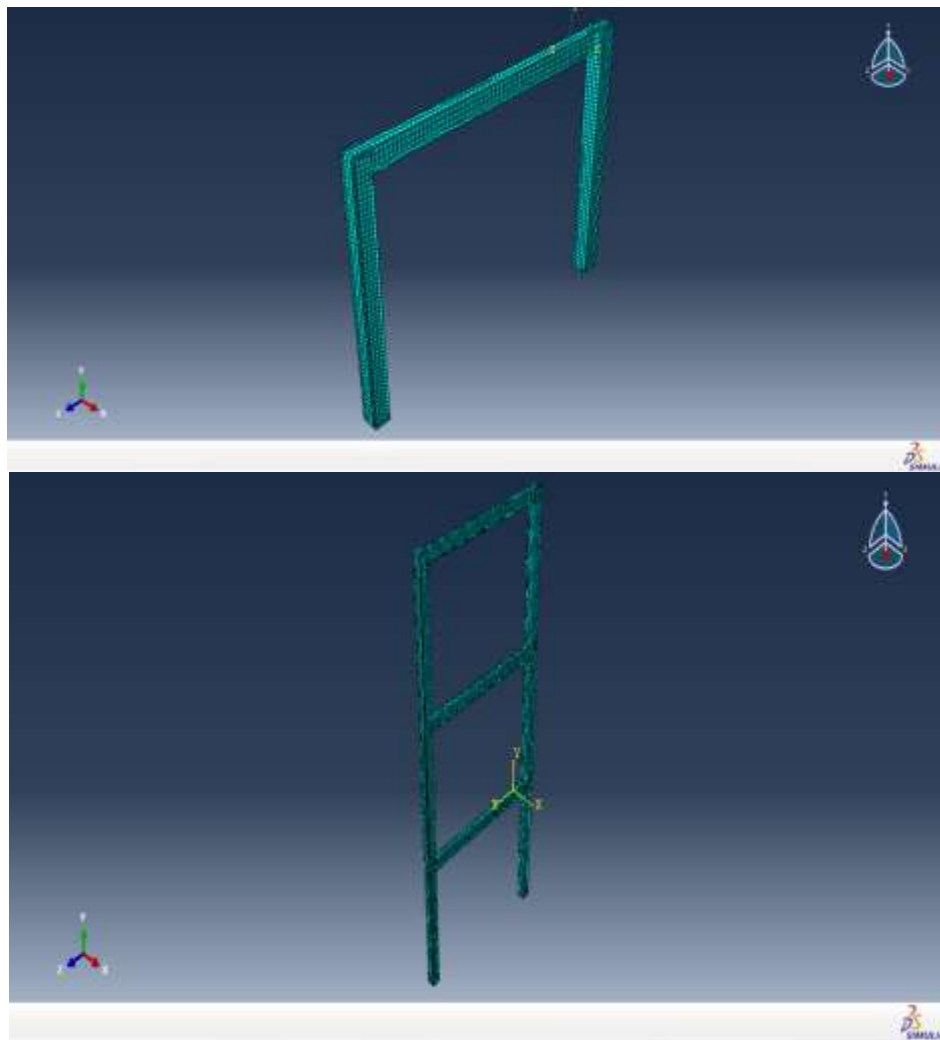


شکل ۲: شکل ایده ال شده بار انفجاری

۳- شیوه تحقیق و مدلسازی

با توجه به اینکه سازه های فولادی به طور معمول براساس بارهای ثقلی و لرزه ای مورد طراحی قرار گرفته اند، نیاز است اثرات ناشی از بارهای انفجاری بر روی سازه ها مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق به منظور بررسی رفتار سازه های فولادی دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی (MRF) تحت اثر بارهای ناشی از انفجار، مطالعاتی عددی بر روی مدل های سازه ای با تعداد طبقات ۳ و ۵ طبقه صورت گرفته است. بارگذاری ثقلی و لرزه ای مدل ها براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۳] و ویرایش سوم آیین نامه ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۱۴] صورت گرفته است. همچنین طراحی مدل ها در برنامه ETABS انجام گرفته است.

به منظور مدل سازی بار ناشی از موج انفجاری، فشار ایده ال سازی شده از خرج های انفجاری با وزن معادل TNT با مقادیر ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۲۵۰۰، ۲۷۵۰ کیلوگرم در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ متر با توجه به پارامترهای تهدیدی که توسط نشریه FEMA453 توصیه شده اند، محاسبه شده و مدل سازی شده اند. به منظور مدل سازی نحوه توزیع بار انفجاری بر روی ساختمان با توجه به روابط براد بدست آمده است. فشار را در نقاط مختلف ارتفاعی قاب ها محاسبه و اقدام به استخراج منحنی توزیع بار در بر سازه شده است. نرم افزار ABAQUS قابلیت تعریف بارگذاری توسط رابطه شکل توزیع بار را دارد. بدین منظور رابطه توزیع فشار مقابل ارتفاع در طبقات مختلف سازه تعریف شده است. از آنجا که فواصل نقاط هدف تا مرکز خرج انفجار متغیر می باشد، لذا مدت زمان تداوم انفجاری برای هر طبقه جداگانه محاسبه شده و بارگذاری هر طبقه را مشابه آنچه که به صورت واقعی در سناریوهای انفجاری رخ می دهد، مدل سازی شده است. برای تحلیل از تحلیلگر صریح (EXPLICIT) نرم افزار استفاده شده است. از این تحلیلگر در مواردی که هدف، تحلیل دینامیکی مدل در زمان بسیار اندک مورد نظر باشد، استفاده می گردد.



شکل ۳: مدل های تحلیل شده

۴- مشخصات مصالح

در این مطالعه از فولاد نرمه ساختمانی St37 با مدول الاستیسیته 2.1×10^{10} کیلوگرم بر مترمربع و جرم حجمی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون ۰٫۳ استفاده شده است. با در نظر گرفتن این مسئله که قاب مورد نظر بایستی تحت اثر بار انفجاری قرار گیرد، ورود قاب 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 پلاستیک در جدول ۱ آمده است.

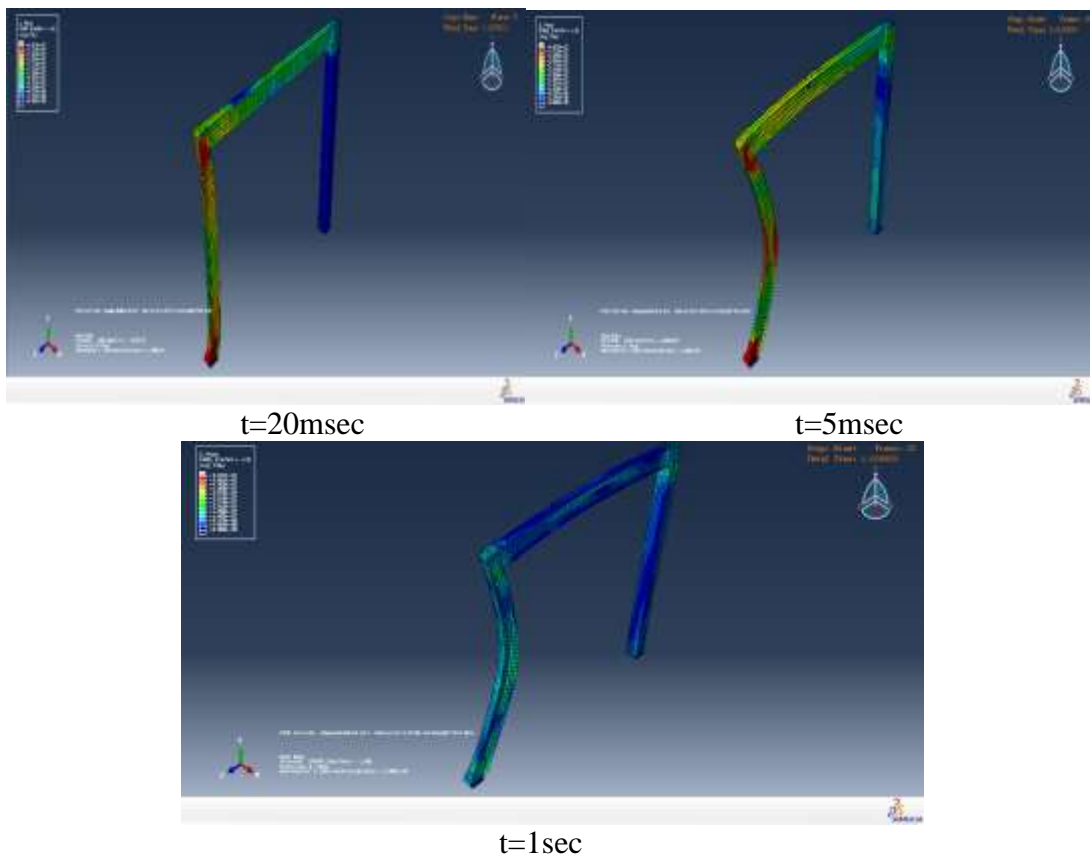
جدول ۱: مقادیر تنش کرنش برای فولاد st37

STRAIN	STRESS(kg/cm ²)
0	0
0.002	2520
0.05	3055
0.1	3620
0.15	4000
0.18	4072

۵- نتایج حاصل از تحلیل مدل ها

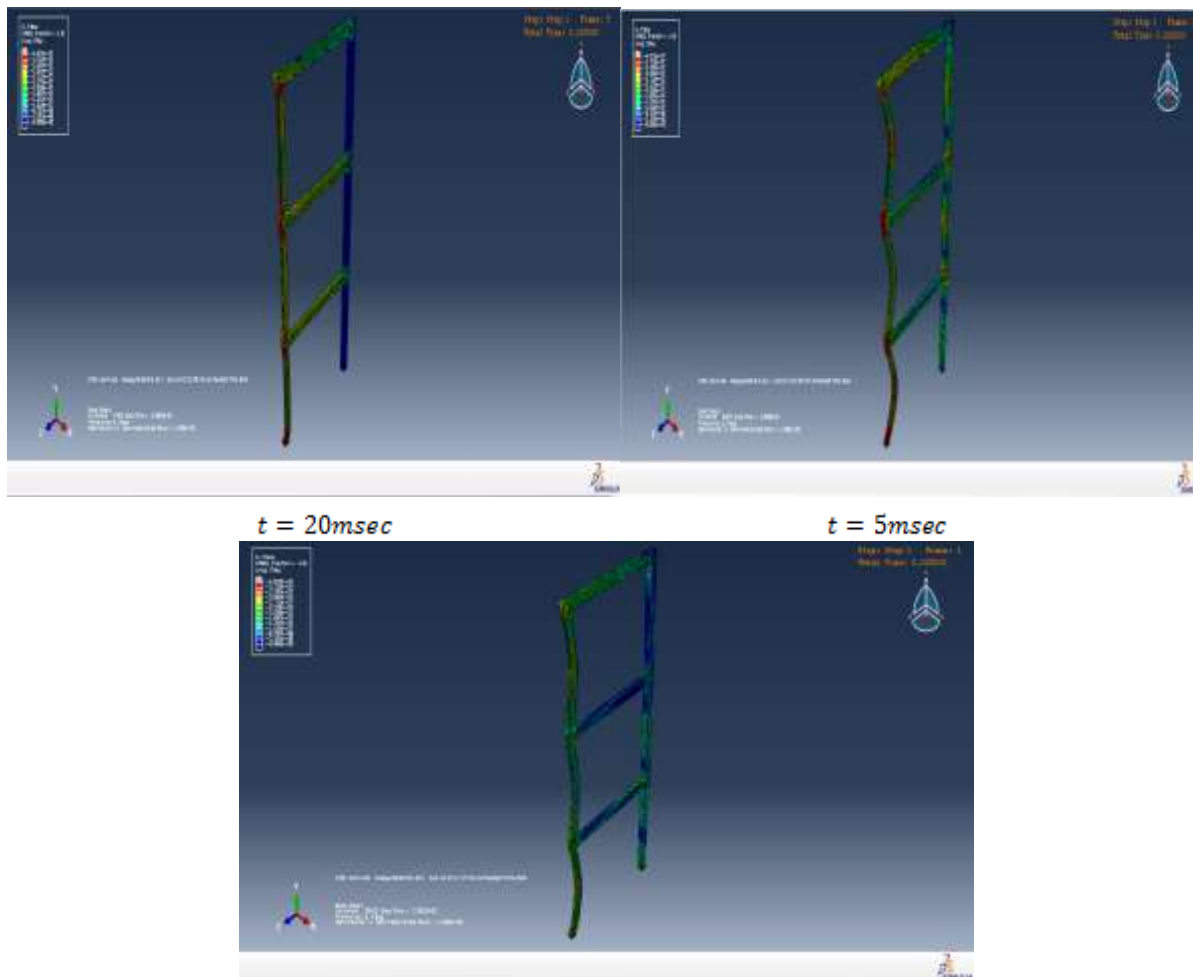
۱-۵ بررسی کانتورهای تنش

شکل ۴ و ۵ تاریخچه کانتورهای تنش قاب MRF1 و MRF3 تحت بارگذاری انفجاری را نشان می دهد.



شکل ۴: کانتورهای تنش مایسز قاب MRF1 در طول زمان بارگذاری و ۱ ثانیه پس از وقوع انفجار

در ۵ میلی ثانیه بعد از وقوع انفجار، تسلیم شدگی بخش هایی از ستونی که در وجه مقابل موج انفجاری قرار گرفته است، قابل مشاهده می باشد و قسمت های پایینی جان و بال ستون مذکور به تنش نهایی رسیده اند. در زمان ۲۰ میلی ثانیه پس از وقوع انفجار، تنش در انتهای ستون به طور کامل پلاستیک شده است و بخش هایی از ستون مقابل وجه انفجاری پلاستیک شده و دچار تغییر شکل برشی شده و دوران انتهای ستون به حداکثر مقدار خود رسیده است. تصویر ۱ ثانیه پس از وقوع انفجار تغییر شکل های پلاستیک ماندگار ستون مقابل موج انفجاری را نشان می دهد.

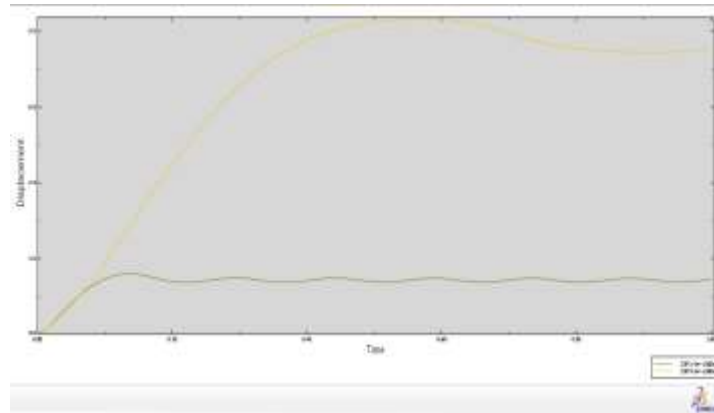


شکل ۵: کانتورهای تنش مایسز قاب MRF3 در طول زمان بارگذاری و ۱ ثانیه پس از وقوع انفجار

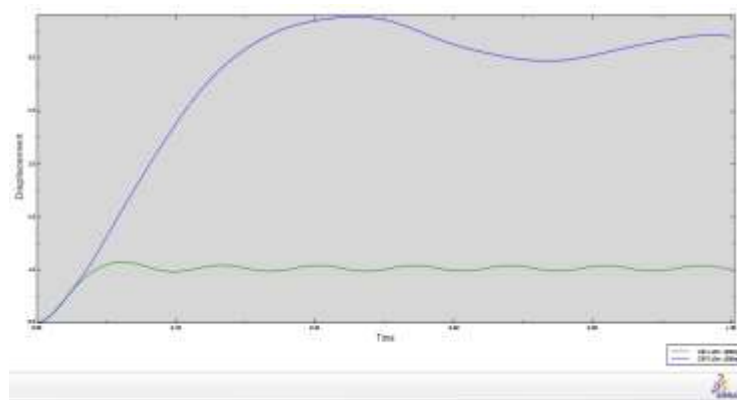
در ۵ میلی ثانیه، ستون طبقه اول در قسمت های پایینی پای ستون و بالایی نزدیک به چشمه اتصال تیر به ستون وارد ناحیه غیرخطی شده است. در ستون های طبقه دوم و سوم به علت پایین بودن مقدار فشار حاصل از موج انفجاری به سبب زیاد بودن فاصله از مرکز خرج انفجاری، مقادیر تنش ها کمتر می باشد. همچنین ستون طرف دورتر به دلیل وارد نشدن مستقیم فشار انفجار تنش های کمتری را دریافت می کند. در ۲۰ میلی ثانیه پس از وقوع انفجار، ستون های مقابل وجه انفجاری دچار تغییر شکل برشی شده و قسمت هایی پلاستیک شده است. تنش در ستون طرف دیگر هم افزایش پیدا کرده است. در ۱ ثانیه پس از وقوع انفجار، تنش های ماندگار در ستون ها قابل مشاهده است.

۲-۵ میزان تغییر مکان قاب ها

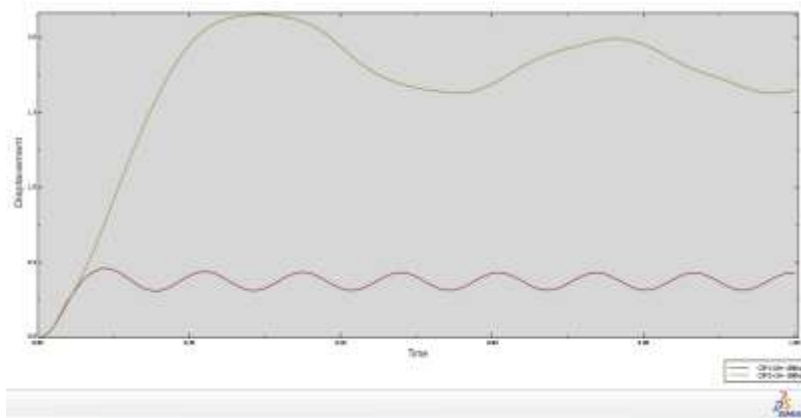
بیشینه جابجایی افقی سازه معیار خوبی از تغییر شکل کلی سازه، مخصوصا برای سازه های اسکلت فلزی می باشد. مقدار جابجایی های محاسبه شده مربوط به جابجایی انتهای قاب در تراز بام می باشد.



MRF5m-1500kg



MRF10m-1500kg



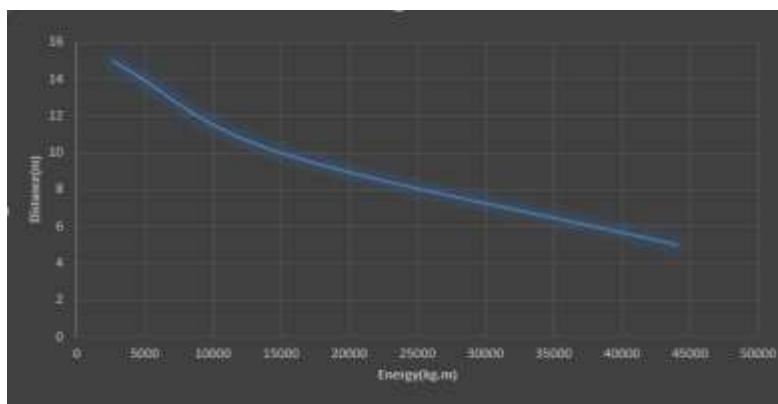
MRF15m-1500kg

شکل ۶: تاریخچه نوسان قاب MRF1 و MRF3 تحت بارگذاری انفجاری

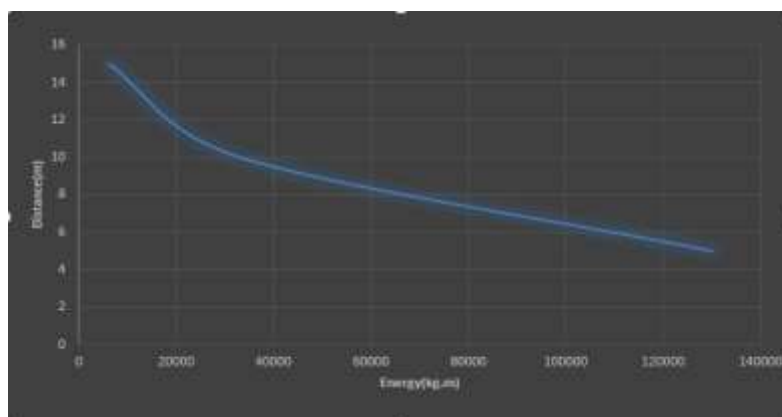
همانطور که در نمودارها مشاهده می شود، مقدار جابجایی در قاب یک و سه طبقه سیستم قاب خمشی در فواصل مختلف را نشان می دهد. با افزایش فاصله خرج انفجاری از ساختمان مشاهده می شود که میزان جابجایی کاهش یافته است و این مقدار برای قاب سه طبقه سه برابر قاب یک طبقه می باشد.

۳-۵ استهلاك انرژی

یکی از معیارهای مهمی که برای خرابی سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد، انرژی جذب و مستهلک شده توسط تغییرشکل های پلاستیک سازه می باشد. در نرم افزار ABAQUS برای تعیین این مقدار گزینه ویژه ای دارد. جذب و استهلاك انرژی در سازه ها معمولا دو منشا عمده دارد، یکی میرایی ذاتی سیستم سازه ای است که به سرعت سازه بستگی دارد و با سرعت گرفتن آن بروز پیدا می کند و دیگری ناشی از غیرخطی شدن اجزای سازه ای و تشکیل مفصل پلاستیک در آنها است. معمولا سازه در مقابل بارگذاری انفجاری، تغییرشکل های پلاستیک بزرگی را تجربه می کند و انرژی قابل توجهی را جذب می کند.



MRF1



MRF3

شکل ۷: نمودار استهلاك انرژی برای قاب یک طبقه و سه طبقه MRF تحت بارگذاری انفجاری

نمودارهای بالا میزان استهلاک انرژی را بر حسب فاصله خرج انفجاری برای دو قاب یک و سه طبقه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش فاصله خرج انفجاری مقدار استهلاک انرژی افزایش پیدا کرده است. قاب های سه طبقه نیز میزان استهلاک انرژی بالاتری نسبت به قاب یک طبقه دارند، به این دلیل که در قاب سه طبقه اعضای باربر سازه ای برای جذب انرژی بیشتر از قاب یک طبقه بوده و میزان استهلاک انرژی در این قاب بیشتر است.

۶- نتیجه گیری

مقاله حاضر به بررسی دینامیکی غیر خطی قاب خمشی هم محور تحت انفجار می پردازد. که می توان نتیجه گرفت مدل تحلیل اجزا محدود به طور موفقیت آمیزی پاسخ های دینامیکی غیر خطی شامل تاریخچه زمانی جابه جایی، کانتورهای تنش و استهلاک انرژی را به درستی شبیه سازی می کند. زمانی که یک انفجار رخ می دهد، یک موج فشاری با سرعت بالا بر سازه وارد می شود و می تواند بارهای بسیار قوی با سرعت بالا در مدت زمان بسیار کوتاه بر سازه وارد کند. بسیاری از سازه ها به طور مناسب برای مقاومت در برابر بارهای زلزله طراحی شده اند، بنابراین در این مقاله سعی می شود تا رفتار این قاب ها را تحت بار انفجاری بررسی نمود، که در این راستا، پارامترهای تاریخچه نوسان، کانتورهای تنش و استهلاک انرژی برای دو قاب یک و سه طبقه خمشی بررسی شده اند. همانطور که مشاهده می شود، در بارگذاری انفجاری ستون ها نقش به سزایی در جذب انرژی دارند و مهم ترین عضو سازه ای در بارگذاری انفجاری می باشد و دچار تغییر شکل های برشی می شود و کماتش کرده اند. قسمت هایی از پای ستون و بالای ستون نزدیک چشمه اتصال به تنش نهایی رسیده اند. میزان استهلاک انرژی و تاریخچه نوسان برای دو قاب یک و سه طبقه با هم مقایسه شده اند که میزان استهلاک انرژی برای قاب سه طبقه به دلیل وجود اعضای باربر بیشتر نسبت به قاب یک طبقه، بیشتر می باشد.

مراجع

- [۱] محتشمی احسان، سینیایی سینا، شوشتری احمد، ارزیابی رفتار قاب های فولادی در برابر بارهای انفجاری، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، اردیبهشت ۱۳۸۹
- [2] TM 5-1300 "The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", US Department of The Army, Navy and Air Force, Washington DC, 1990.
- [3] Tapan Sabuwala, Daniel Linzell, Theodor Krauthammer, Finite element analysis of steel beam to column connection subjected to blast load, Department of civil and environmental engineering, The Pennsylvania State University, 861-876, 2005.
- [4] Hun Chang Him, Department of Architectural, SungKyun Kwan University, Engineering Building, Korea, 2009.
- [5] Girum S. Urgessa, Tomasz Arciszewski, Department of Civil, Environmental and Infrastructure Engineering, George Mason University, USA, 2012.
- [۶] دلمی اردشیر، زینالو محمد، بررسی تاثیر لرزه ای بر فروریزش تدریجی قاب های خمشی فولادی تحت بترهای انفجاری، ششمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ایران-تهران، اردیبهشت ۱۳۹۰.
- [۷] فراهانی احمد، هادیان فرد محمدعلی، بررسی اثر شکل پذیری بر رفتار قاب ها تحت اثر بار انفجاری، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، اردیبهشت ۱۳۸۹.
- [۸] مبحث بیست و یکم، پدافند غیر عامل، مقررات ملی ساختمان، ویرایش ششم ۱۳۹۲.
- [9] Bangash.M.Y.H, Bangash.T, explosive-resistant buildings, London, UK, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [10] Blast Loading and Blast Effects on Structure – An Overview, T.Ngo, P .Mendis, A. Gupta & J.Ramsay, The University of Melbourne, Australia, EJSE Special Issue: Loading on structure, 2007

[11] Non-linear response of Reinforced Concrete Containment Structure Under Blast Loading, A.K. Pandey, Ram Kumar, D.K. Paul, D.N. Trikha, Nuclear Engineering And Design 236, 2006, 993-1002.

[12] Numerical simulation of blast wave interaction with structure columns, Yanchao Shi, Hong Hao, Zhong-Xian Li, Springer-Verlag, Shock Waves, 2007, 113-133.

[۱۳] مبحث ششم، پدافند غیر عامل، مقررات ملی ساختمان، ویرایش ششم ۱۳۹۲.

[۱۴] آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ۲۰۰۵.