

### مطالعه عملکرد بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار و بررسی تغییر مقاومت‌ها

امین فقریان<sup>۱</sup>، اکبر قنبری<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>تاریخچه</b> دریافت: ۱۱ بهمن ۱۳۹۶ پذیرش: ۱۷ اسفند ۱۳۹۶	پدیده انفجار از بدو ابداع مواد منفجره مانند باروت مورد توجه محققین هر عصر قرار گرفته است. اوج این تحقیقات در دوران جنگ جهانی و پس از آن بوده است. در سال‌های اخیر اقدامات تروریستی زیادی با استفاده از مواد منفجره انجام شده است. بدین روی تحقیقات متعددی در سال‌های اخیر پیرامون انفجار و ساختمان‌ها صورت گرفته است. ماده منفجره ترکیبی شیمیایی است که مقدار بالایی انرژی در پیوندهای خود ذخیره کرده است. پس از وقوع انفجار در طی یک فرآیند شیمیایی انرژی زیادی در کسری از ثانیه آزاد شده و حاصل آن ایجاد موج فشاری در اتمسفر پیرامون محیط انفجار است. موج انفجار پس از برخورد به ساختمان به آن نیرو وارد می‌کند. معمولاً ساختمان‌های بتنی مسلح به دلیل جرم بالا در مقابل انفجار مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. در این تحقیق یک ساختمان با ساختمان‌هایی که احتمال حمله انفجاری را دارند طراحی و مدلسازی شده است. در مدلسازی این ساختمان از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده گردیده است. در مدلسازی سعی بر این بوده است تا مدل‌های ساخته شده به واقعیت بسیار نزدیک بوده و جزئیات مناسبی را پوشش دهند. با توجه به نتایج به وضوح دیده می‌شود که فاصله در کاهش فشار موج انفجار و به تبع آن بار وارده بسیار چشمگیر است.
<b>کلید واژگان:</b> بتن بارگذاری انفجاری سیستم بارگذاری حملات تروریستی آباکوس	



## ۱- مقدمه

بررسی رفتار ساختمان‌های عمومی و سازه‌های خاص در برابر بارگذاری‌های ضربه‌ای و انفجاری، در چند دهه اخیر مورد بررسی مهندسان قرار گرفته و به ویژه پس از حادثه ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ و برخورد هواپیمای مسافربری بوئینگ به برج‌های دوقلوی مرکز تجارت جهانی در نیویورک مورد توجه ویژه قرار گرفته است. پس از واقعه ۱۱ سپتامبر نگاه طراحان سازه به مقوله در نظر گرفتن بارگذاری‌های نادر و غیر معمول در طراحی‌ها دچار تحول اساسی گردید به گونه‌ای که اگر تا پیش از آن در نظر گرفتن بارگذاری‌هایی مانند بارهای انفجاری فقط در ساختمان‌های با اهمیت بسیار زیاد و خاص مانند سازه‌های بلند و ساختمان‌های شریان‌های حیاتی صورت می‌گرفت؛ از آن پس تلاش‌ها برای هرچه ایمن‌تر کردن سازه‌های متداول در برابر حمله‌های تروریستی و به ویژه انفجار آغاز گردید [۱]. مطالعات مربوط به بارگذاری ضربه‌ای و انفجاری سازه‌ها و چگونگی مستحکم‌سازی آنها در برابر این نوع بارگذاری خاص، گسترش بیشتری داشته است. این مطالعات شامل بررسی‌های تئوریک دینامیک سازه، رفتار غیرخطی مصالح، مدلسازی‌های ریاضی توسط نرم‌افزارهای تحلیل دینامیکی و نیز مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت برای بارگذاری ضربه‌ای و انفجاری اجزای سازه‌ای بوده است. باتوجه به جدیدبودن نسبی موضوع در مقایسه با بارگذاری مرسوم استاتیک و پیچیدگی تئوریک آن و نیز سختی و پرهزینه بودن آزمایش‌های مربوطه، مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی در کشورهای مختلف هنوز در حال بررسی گسترده این مطالعات می‌باشند. مسأله انفجار تقریباً جدید بوده و به سبب رویدادهای متفاوت یا وقایع عمدی، رفتار اعضای سازه‌ای تحت بارگذاری انفجار، موضوع طرح‌های تحقیقاتی زیادی در سال‌های اخیر بوده است. سازه‌های متداول خصوصاً آنهایی که بر روی سطح زمین ساخته می‌شوند، معمولاً به منظور مقابله با نیروهای انفجار طراحی نمی‌شوند و از آنجاییکه بزرگای نیروهای طراحی به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقادیر نیروهای انفجار می‌باشد، سازه‌های معمول در معرض خسارات حاصل از انفجار قرار دارند. با در نظر داشتن این مطلب، سازندگان، معماران، و مهندسان به طور روزافزونی به دنبال راه حلی جهت محافظت از ساکنان و سازه‌های ساختمانی هستند. لذا یکی از گام‌های اساسی جهت حفظ سرمایه‌های ملی و کاهش خطر، مطالعه و شناخت رفتار ساختمان‌ها تحت اثر بارهای ضربه‌ای و انفجار می‌باشد [۲]. فراوانی استفاده از بتن در ساخت انواع سازه‌های دفاعی به دلیل در دسترس بودن مصالح مورد نیاز در بیشتر نقاط از یک طرف و وقوع جنگ‌ها و حوادث تروریستی متعدد در این چند سال اخیر از طرف دیگر اهمیت بررسی عملکرد بتن در مقابل بارهای ضربه‌ای و انفجاری را دو چندان کرده است [۳]. انفجار بمب در مجاورت یک ساختمان می‌تواند خسارات زیادی را ایجاد نماید. آسیب دیدن سازه ساختمان و فروپاشی آن، آسیب دیدن نمای ساختمان و از بین رفتن آن و آسیب دیدن اموال و دارایی‌های داخل ساختمان به واسطه نفوذ موج انفجار به داخل ساختمان، حتی اگر ساختمان دچار فروپاشی نگردد، شکسته شدن شیشه‌ها و نمای ساختمان باعث ایجاد پرتابه‌های تیز و خطرناکی می‌شوند که باعث ایجاد جراحات شدید و حتی مرگ افراد حاضر در محل می‌گردد. مهمترین عامل ایجاد خسارت بیشینه فشار موج انفجار است که بار ناشی از انفجار متاثر از آن است. در این تحقیق نشان داده می‌شود که بیشینه فشار موج انفجار با فاصله رابطه عکس دارد و افزایش فاصله بین نقطه انفجار و ساختمان باعث افت شدید بیشینه فشار خواهد شد. بطور کلی می‌توان روش‌های محافظت ساختمان در برابر انفجار را به دو دسته تقسیم نمود: روش‌های سازه‌ای و روش‌های غیرسازه‌ای. در روش‌های دسته اول به طور مخصوص مهندس سازه با در نظر داشت تمهیدات سازه‌ای مطابق با دستورالعمل‌ها یا تجربه تلاش دارد تا ساختمان مورد طراحی را تا حد مورد نظر خود در برابر انفجار مقاوم طراحی نماید، و یا در مورد یک ساختمان از موجود (ساخته شده در گذشته) با رعایت تمهیدات خاصی سعی در مقاوم سازی آن ساختمان در برابر انفجار دارد. در روش‌های دسته دیگر عوامل طراح مانند معمار ساختمان، مهندس منظر، مدیر پروژه و ... با در نظر داشت نکات ایمنی تلاش دارند تا ساختمان و محیط اطراف آن را در برابر بار انفجار ایمن بسازند. روش‌های غیرسازه‌ای در مقایسه با روش‌های سازه‌ای مقاوم‌سازی ساده‌تر هستند، ولی تاثیرگذاری بسیار زیادی بر مقاومت ساختمان در برابر انفجار دارند. مسئله مورد بررسی در این تحقیق انفجارهای تروریستی است. باتوجه به بررسی حملات تروریستی که در گذشته اتفاق افتاده است و هدفشان ساختمان‌ها بوده‌اند دیده

می شود که به دلیل بزرگ بودن هدف، ساختمان، معمولاً مقدار ماده منفجره زیاد است، از یک تن بیشتر، لذا این مقدار بمب حتماً بواسطه یک وسیله نقلیه به محل حمله انتقال می یابد. باتوجه به مقدار ماده منفجره به کاررفته در بمب این وسیله نقلیه می تواند یک اتومبیل کوچک باشد یا یک کامیون بزرگ. در این تحقیق ابتدا یک ساختمان بتن مسلح در نرم افزار تجاری ETABS طراحی شده و سپس بخشی از این ساختمان در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. در مدل سازی تلاش شده است جزئیات ساختمان در مدل کامپیوتری وارد گردد، مانند جزئیات آرماتورگذاری. در این تحقیق دو دیدگاه بزرگ بینانه و ریزبینانه باهم تلفیق شده است تا یک قاب بزرگ ساختمانی با داشتن جزئیات به خوبی بررسی شود. سعی شده است این مدل تا حد امکان مشابه اهداف تروریست ها باشد. مدل یک ساختمان ۵ طبقه است. این ساختمان ابتدا در نرم افزار ETABS طراحی شده و سپس در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. در تحلیل مدل های این تحقیق از روش اجزای محدود استفاده شده است. به دلیل ماهیت دینامیکی بار انفجار روش حل صریح انتخاب گردیده است. نرم افزار ABAQUS برای انجام تحلیل ها انتخاب گردیده است و دلیل این انتخاب عملکرد مناسب و قابل قبول این نرم افزار در انجام تحلیل های دینامیکی و غیرخطی است.

بتن مصالحی است که به صورت سنتی و نیز به دلیل خواص مناسب آن در ساخت اکثر سازه ها به خصوص برای سازه های حفاظتی و راهبردی مورد استفاده قرار می گیرد. باتوجه به حوادث و حملات تروریستی و نیز جنگ های اخیر که در مناطق و کشورهای قبیل بالکان، عراق، افغانستان، لیبی و سوریه به وقوع پیوسته است بارگذاری انفجاری و ضربه ای به عنوان یکی از بارگذاری های مهم در سازه ها به خصوص سازه های مهم و راهبردی جهت بالابردن ضریب ایمنی و نیز سطح سرویس دهی سازه ها مطرح گردیده است. این نوع از بارگذاری ها به صورت دینامیکی غیرخطی می باشند که با نرخ کرنش بالایی در سازه ها تاثیرگذار می باشند و از طرفی به دلیل رفتار غیرخطی بتن موجب شده است که بررسی تاثیرات این بارگذاری ها با پیچیدگی هایی همراه گردد و بررسی آنها دو چندان دشوارتر شود و لذا نمی توان به وسیله روش های تحلیلی متعارف این بارگذاری ها را تحلیل و بررسی نمود. سه روش جهت بررسی این نوع از بارگذاری به کارگرفته می شود که عبارتند از روش شبیه سازی عددی، روش آزمایشات تجربی و روش روابط تحلیلی و تجربی. روش آزمایشات تجربی با صرف هزینه و زمان بسیار بالای همراه می باشد و نیز از این روش برای سازه های بزرگ نمی توان استفاده نمود و در مقیاس آزمایشگاهی هم دارای دقت مناسب نمی باشد و تکرار آزمایشات هم دارای توجیه اقتصادی نمی باشد. روش روابط تجربی و تحلیلی نیز دارای محدودیت هایی در حوزه کاربردی می باشند و کلیه شرایط مرزی و اولیه که در اکثر مسائل در نتایج تاثیرگذار هستند، در این روش در نظر گرفته نمی شوند و در مواردی هم دارای دقت لازم و مناسب نمی باشند. لذا این دو روش کارایی لازم را جهت بررسی تاثیرات بارگذاری های ضربه ای و انفجاری بر سازه ها را ندارند. روش شبیه سازی عددی یک روش جدید می باشد که در حال حاضر در حال تکامل و پیشرفت می باشد که اگر همراه با صحت سنجی و مدل سازی مناسبی باشد و نیز مدل های رفتاری باتوجه به نوع مصالح و بارگذاری انتخاب گردد نتایج مناسبی را ارائه خواهد نمود. این روش نسبت به دو روش دیگر از لحاظ صرف زمان و هزینه به صرفه تر می باشد (لپان، ۲۰۰۲). لوچیونی و همکاران [۴] ساختمان بتنی ستاد مشترک آرژانتین و اسرائیل که در سال (۱۹۹۴) هدف انفجار قرار گرفت را توسط نرم افزار AUTODYN مدل سازی و تحلیل نمودند. نتایج تحلیل همخوانی نسبتاً خوبی با آثار باقیمانده از ساختمان بعد از انفجار داشت و تاییدی بر صحت مدل سازی بود. فرض های ساده کننده ای که آنها به کارگرفتند باعث سهولت مدل سازی و افزایش سرعت تحلیل شد. روش آنها می تواند برای ارزیابی و پیش بینی تخریب ساختمان در حوادث احتمالی آنها به کار رود اما با توجه به آنکه تخریب و فروریزش به عنوان سطح عملکرد تلقی نمی شود، در تدوین آیین نامه طراحی کارایی ندارد. بینگ لی و همکاران [۵]، یک قاب از ساختمان شش طبقه بتنی را یکبار با پانل پوششی خارجی و بار دیگر بدون پانل توسط نرم افزار ABAQUS مدل سازی کردند و پاسخ دینامیکی قاب ها را تحت انفجار معینی مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد بار انفجار وارد بر قاب های با پانل پوششی خارجی بسیار بزرگتر بوده و در نتیجه سازه برای مستهلک کردن انرژی ناشی از انفجار، تغییر شکل های پلاستیک بزرگتر و خسارت بیشتری را تجربه



خواهد کرد. در این روش تغییر مکان نسبی طبقه به عنوان یک معیار کلی ملاک ارزیابی قرار گرفته و رفتار اعضای سازه، خسارات وارده بر آنها و سطوح عملکردی عضو و سازه بررسی نشده است. شوشتری و گمار [۶] طی مقاله ای قاب ساختمانی دو طبقه بتن مسلح را تحت انفجار مشخصی در نرم افزار ABAQUS مدلسازی کرده و اثر تقویت قاب را توسط نوارهای کامپوزیت کربن بررسی نمودند. نتایج بیانگر کاهش جابجایی بیشینه ستون‌ها در اثر انفجار بود، همچنین نتایج حاکی از آن بود که تقویت ستون‌های میانی اثر قابل توجهی در افزایش مقاومت قاب ندارند لذا به جای تقویت ستون‌های میانی، می‌توان با تقویت ستون‌های خارجی در دو لایه، جابجایی بیشینه را تا ۳۰ درصد کاهش داد. در این تحقیق باتوجه به مدلسازی سه بعدی سازه، اندرکنش تیر-ستون و اثر سختی چشمه اتصال آنها لحاظ شده است. در مقاله فوق، معیارهای عملکردی اعضا از جمله تغییر مکان وسط ستون‌ها و دوران تکیه‌گاهی بررسی و کنترل نشده است. کاراپینار [۷] طی یک کارگاه تخصصی در پراگ، فرآیندی ارائه نمود که در آن، اعضای سازه جداگانه با المان‌های مکعبی در نرم افزار ABAQUS مدلسازی و تحت بار انفجار، تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌شوند. رسیدن عضو به دوران تکیه‌گاهی ۴ درجه به عنوان معیار خرابی عضو محسوب می‌گردد. در مرحله بعد کل سازه با المان‌های قاب در نرم افزار SAP مدلسازی و اعضای خراب شده، از مدل سازه حذف می‌شوند، سپس وضعیت کل سازه از نظر تخریب پیش رونده ارزیابی می‌گردد. بدیهی است که در این روش اندرکنش اعضای سازه‌ای تحت بار انفجار لحاظ نمی‌گردد. در روش کاراپینار یک عضو مجزا تحت انفجار ارزیابی می‌شود و زمانی کاربرد خواهد داشت که عضو، سطح عملکردی آستانه فروریزش را ارضا نکرده و به سطح لحاظ نشده برسد که در این مرحله بررسی تخریب پیش رونده و مسیرهای بار جایگزین مطرح خواهد شد. تجزیه و تحلیل سازه‌های ایجاد شده از مواد ترد و شکننده مانند بتن تحت بارگذاری انفجاری مساله‌ای بسیار پیچیده است. بارگذاری در مدت زمان کوتاه و با بزرگای زیاد می‌تواند تاثیر چشمگیری بر روی پاسخ سازه داشته باشد. فرکانس‌های بارهای انفجاری می‌توانند نسبت به بارهای معمولی خیلی بیشتر باشند و بارهای دینامیکی مدت زمان کوتاه، تغییرات زمانی و مکانی قوی از خود نشان می‌دهند که به گرادیان‌های تنش تند در سازه‌ها و یک نرخ کرنش متغیر برای مدت زمان تحلیل منجر می‌شود [۸]. آزمایشات بارگذاری بر روی پانل‌های بتنی مسلح با تکیه گاه ساده همراه با بازشوها توسط مایز و همکاران انجام شده است [۹]. آزمایش پانل‌های بتن مسلح گیردار تحت بارگذاری انفجاری توسط رزاق پور و همکارانش [۱۰] انجام پذیرفته است، آزمایش انفجار بر روی پانل بتن مسلح یک طرفه با تکیه گاه ساده توسط سان [۱۱] انجام شده است، آزمایشات انفجار هوایی بر روی پانل‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی با انواع الیاف مختلف و شرایط مرزی متفاوت توسط لوک و ژیاو [۱۲] انجام شده اند. همچنین پاسخ‌های انفجاری پانل‌های ساندویچی متشکل از ورق‌های فولادی نرم و هسته‌های آلومینیومی توسط چی و همکارانش [۱۳] مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش تجربی در مقیاس کامل معمولاً زمان‌بر و پرهزینه است. سیستم ساده با یک درجه آزادی (SDOF) به صورت گسترده برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی یک عضو سازه تحت بارهای انفجاری به کاربرده شده است. نایتو و ویتون [۱۴] از ترکیبی از تحلیل اجزای محدود استاتیک و یک تحلیل دینامیکی SDOF معادل برای تعیین پاسخ یک دیوار برش بتنی مسلح تحت بارگذاری انفجاری استفاده نمودند. دیوار فولادی ضدزنگ موجودار تحت بارگذاری انفجاری توسط فلاح و لوکا [۱۵] با استفاده از مدل SDOF با منحنی مقاومت بدست آمده از تحلیل اجزای محدود تحت آنالیز قرار گرفت. در مطالعه لاو و همکاران [۱۶] یک دال بتنی مسلح به یک سیستم SDOF معادل ساده سازی شد، و یک پاسخ پیک دینامیکی از سیستم SDOF برای بارهای انفجاری به صورت دینامیکی حل شد. پاسخ یک مدل ایده آلی SDOF، شامل تقریبی از جابجایی در بعضی نقاط مهم در یک سازه واقعی است. این روش نمی‌تواند شاخص دقیقی از آسیب محلی یک جزء سازه ارائه دهد [۱۷]. به منظور بدست آوردن پیش‌بینی‌های دقیقتری از رفتار سازه‌ای در سازه‌های بتن مسلح و اعضای سازه تحت بارگذاری انفجاری و اجتناب از تعداد زیاد آزمایشات تکراری، تلاش‌های بسیاری در سالیان اخیر بر روی توسعه تکنیک‌های عددی مطمئن صورت گرفته است. تاکنون، نرم افزارهای تجاری مانند AUTODYN و LSDYNA در چند مطالعه مورد استفاده قرار گرفته اند. یک مدل اجزای محدود سه بعدی توسط ژو و یانگ لو [۸] با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA برای مدلسازی

ورق‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار پیشنهاد شد که در آن المان‌های سه بعدی برای مدلسازی بتن استفاده شدند درحالی‌که تاثیر آرماتوربندی‌ها بر روی بتن مسلح توسط مدل ترکیبی شبیه سازی شد. درجات مختلفی از آسیب در بتن مورد بررسی قرار گرفت و معادلات تجربی در مطالعه آنها به صورت معیارهای پوسته شدن پیشنهاد شدند. همچنین مقاومت انفجاری دال‌های بتنی دال‌های بتنی مسلح توسط نم و همکاران [۱۸] با استفاده از نرم افزار LS-DYNA مورد بررسی قرار گرفت. المان‌های تیر و حجمی با مدل‌های ماده وابسته به نرخ برای مدلسازی بتن و آرماتورها به کاربرده شدند و جابجایی و کرنش بیشینه دال‌های بتنی گزارش شدند. پیرا و همکاران [۱۹] به بررسی مقاومت انفجاری سازه‌های فولادی ترک خورده ترمیم شده با کامپوزیت کربنی (CFRP) با استفاده از نرم افزار LS-DYNA پرداختند. پاسخ دال بتنی مسلح به بارگذاری انفجاری توسط ژو و همکاران [۱۷] در نرم افزار AUTODYN تخمین زده شد، و در آن انتشار موج انفجار در یک شبیه‌سازی دو بعدی مدلسازی شد و سپس نتایج بدست آمده از این محاسبه دوبعدی برای مدلسازی سه بعدی جهت در نظر گرفتن اندرکنش بین موج انفجار و دال بتنی، نگاشته شد. مدل ماده دینامیکی برای بتن در مدل عددی آنها اصلاح و بکارگرفته شد. فشار انفجاری و آسیب بر روی دال‌های بتنی پیش بینی شدند. لوچیونی و همکاران [۴] فروپاشی سازه ای یک ساختمان بتنی مسلح را تحت بارگذاری انفجاری در محیط نرم افزار AUTODYN شبیه سازی کردند. بجای مدلسازی بتن و آرماتوربندی‌ها به صورت جداگانه، یک مدل ماده الاستوپلاستیک همگن به کاربرده شد که سهم آرماتوربندی‌ها را در کشش در نظر می گرفت و برای شبیه سازی رفتار اجزای بتن مسلح مورد استفاده قرار گرفت. اگرچه مطالعات پیشین در مدلسازی عددی سازه‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری پیشرفت داشته اند، اما توسعه های عددی هنوز بواسطه پیچیدگی پاسخ دینامیکی سازه‌های بتنی مسلح، از حالت ایده آل خود دور هستند. به علاوه، اثرات پارامترهای مختلف بر روی مقاومت انفجاری سازه های بتنی مسلح به ندرت گزارش شده است [۲۰]. لین و همکارانش [۲۰] در مطالعه خود یک مدل اجزای محدود برای شبیه سازی رفتار سازه پانل‌های بتنی مسلح فولادی تحت بارگذاری انفجاری را توسعه داده اند. به خصوص، مدل ماده دینامیکی بتن تحت بارگذاری انفجاری به تفصیل با در نظر گرفتن تاثیر اندازه المان و اثر نرخ کرنش مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها از بسته نرم افزاری LY-DYNA برای انجام تحلیل اجزای محدود غیرخطی با استفاده از انتگرال گیری زمانی استفاده نمودند، همچنین اثرات یک سری از پارامترها مانند وزن مواد منفجره، فاصله استندآف، ضخامت پانل و نسبت آرماتوربندی بر روی مقاومت انفجاری پانل‌های بتنی مسلح با استفاده از مدل اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- پدیده شناسی انفجار

هنگام وقوع انفجار، ماده منفجره در طی یک فرآیند شیمیایی به دو فرآورده مهم تبدیل می‌شود؛

الف) مواد حاصل از واکنش

ب) انرژی آزاد شده

مواد حاصل از واکنش شیمیایی انفجار معمولاً به صورت گاز هستند. این مواد به دلیل قرارگیری در فاز گازی حجم بسیار زیادی را نسبت به ماده اولیه انفجار، به طور مثال تی ان تی، اشغال می‌کنند.

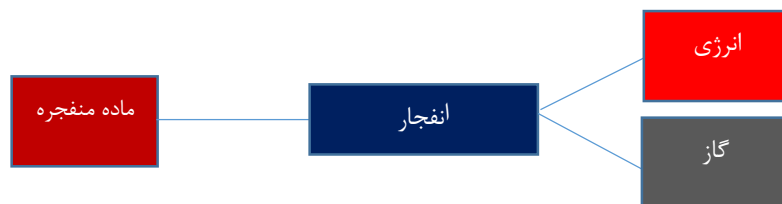
$$Volume_{products} \gg Volume_{TNT}$$

محصول دوم و البته مهمترین محصول انفجار انرژی است. این انرژی بسته به نوع ماده انفجاری می‌تواند اقسام مختلفی داشته باشد، مانند انرژی گرمایی- تشعشعی و انرژی رادیواکتیویته- تشعشعی. در انفجارهای متعارف انرژی رادیواکتیویته وجود ندارد و مقدار انرژی گرمایی نیز به نوع و جرم ماده منفجره بستگی دارد. گازهای محصول انفجار، بر اثر انرژی حاصل از انفجار، دمایشان بالا رفته و افزایش دما باعث

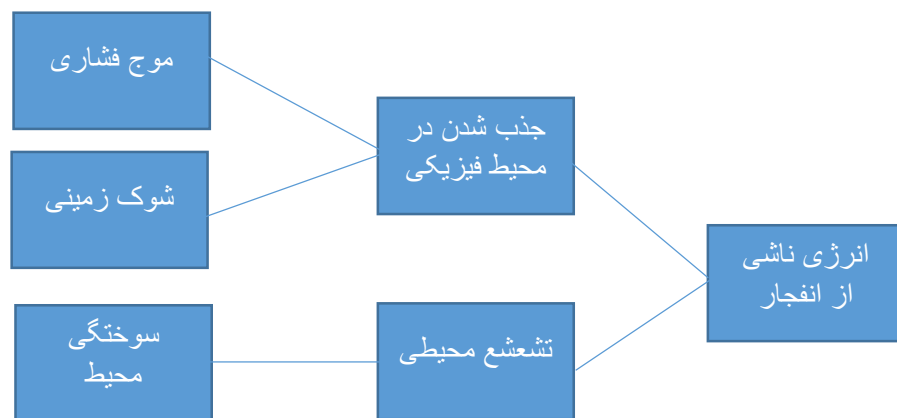


انبساط آنها می‌شود. بیان شد که حجم کوچکی از مواد منفجره تبدیل به حجم بسیار زیادی از گاز می‌شود که این گاز تحت انرژی افزایش حجم می‌دهند. نتیجه این واکنش و افزایش حجم ایجاد یک منطقه فشاری و در کسری از ثانیه در محل وقوع انفجار است. هندسه این منطقه فشاری به صورت کروی است. موج فشاری در هوای اطراف منتشر می‌شود. باتوجه به مسافتی که موج از نقطه انفجار دور شده است از فشار جبهه پیشانی اش کاسته می‌شود. پس از رسیدن موج انفجار به یک جسم مانند یک ساختمان برخورد انجام می‌شود و به جسم مورد نظر فشار وارد می‌شود، لذا بار انفجار بر روی اجسام اطراف محل انفجار به صورت یک بار فشاری خواهد بود مانند بار باد، در نتیجه هندسه بیرونی جسم در مقدار بار وارده بسیار تأثیرگذار است. به طور مثال اگر دو جسم وجود داشته باشد که یکی از آنها به صورت مکعبی و دیگری هندسه‌ای آیرودینامیکی داشته باشد، هر دو دارای حجم یکسان باشند و تحت انفجار یکسان قرار بگیرند جسمی که دارای هندسه آیرودینامیکی است بار کمتری را برداشت می‌کند. بخش دیگر این انرژی جذب زمین شده و پدیده شوک زمینی را ایجاد می‌کند. شوک زمینی نیز همانند یک موج در زمین حرکت کرده و ساختمان‌ها را دچار لرزش می‌کند. اگر مقدار انرژی جذب شده در زمین بزرگ باشد، شوک زمینی می‌تواند به سازه‌های مدفون شده در زمین نیز آسیب وارد نماید. بخش دیگر انرژی ناشی از انفجار به صورت تشعشع حرارتی در محیط پراکنده می‌شود. این بخش از انرژی نیز می‌تواند بسیار مخرب باشد. بالارفتن دمای محیط نه تنها باعث سوختگی در بدن انسان می‌شود بلکه می‌تواند به بعضی تجهیزات حساس نیز آسیب وارد نماید [۲۱] شکل (۲-۳)

نشان دهنده توزیع انرژی و پدیده‌های ناشی از آن است.



شکل ۱. فرآیند انفجار



شکل ۲. انرژی ناشی از انفجار

## ۲-۱ اثر انفجار روی ساختمان

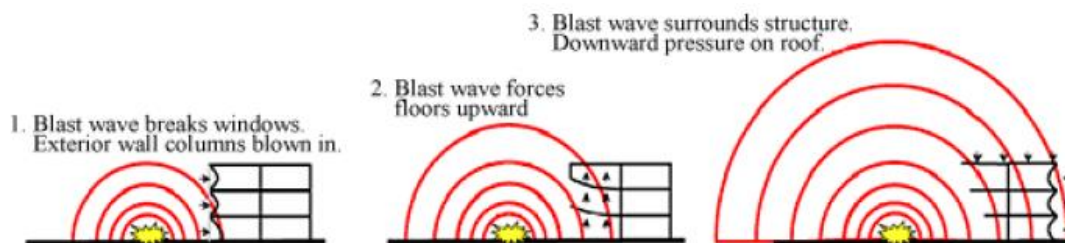
بارگذاری ناشی از یک انفجار بر روی ساختمان، یک حالت فوق العاده بارگذاری تلقی می‌شود. این بار فوق العاده دارای مشخصه‌های زیر است که این مشخصات ناشی از ماهیت غافلگیرانه و غیرقابل پیش‌بینی حملات انفجاری است [۲۱]:

الف) ماهیت تصادفی

ب) ماهیت دینامیکی و گذرا

پ) مدت زمان بسیار کوتاه بارگذاری

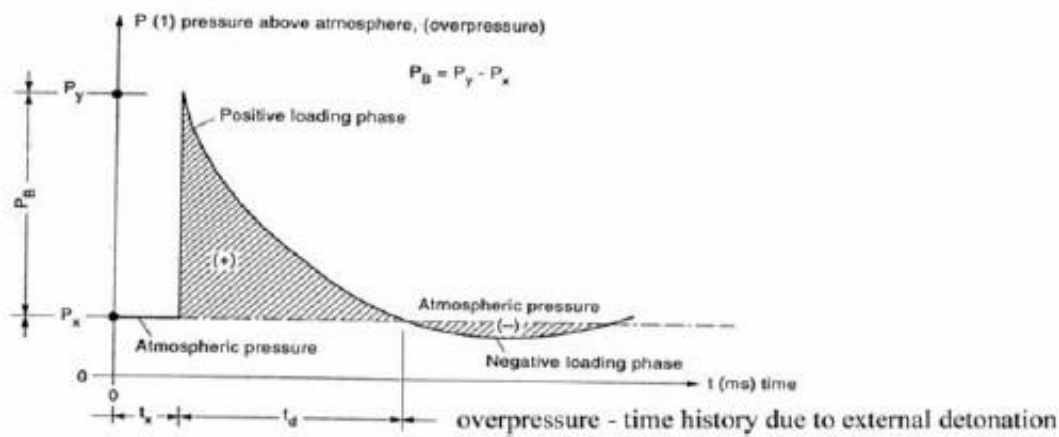
واضح است که قبل از وقوع یک حمله تروریستی مشخص نیست که حمله در کدام موقعیت نسبت به ساختمان صورت خواهد گرفت. بار ناشی از انفجار دارای مدت زمان بسیار کوتاه است. پس از وقوع یک انفجار، فشار محل انفجار در مدت زمان بسیار اندکی، کمتر از یک میلی ثانیه، به شدت بالا می‌رود. انرژی ناشی از انفجار در فضای ماده مخطط اطراف محل انفجار به صورت موج فشاری در هوا پخش می‌شود، این موج با فاصله گرفتن از نقطه انفجار از فشارش کاسته می‌شود، این کاهش فشار به صورت نمایی است. به محض اینکه موج به یک جسم مانند یک ساختمان می‌رسد برخورد بین جبهه پیشانی موج و ساختمان شکل می‌گیرد، این موج فشاری به دیوارهای ساختمان فشار وارد می‌کند، اگر باز شو وجود داشته باشد از راه بازشوها وارد ساختمان می‌شود، به افراد و وسایل داخل طبقه ضربه ناگهانی وارد می‌کند و باعث درهم ریختگی وسایل می‌شود، کف طبقات به سمت پایین و سقف طبقه را به سمت بالا فشار می‌دهد. سپس موج انفجار به سقف ساختمان می‌رسد و سقف را به سمت پایین فشار می‌دهد. در مرحله بعدی این موج که مقداری از انرژی آن نیز تحلیل رفته است به دیوارهای پشتی فشار وارد می‌کند و اگر این دیوارها نیز دارای باز شو بودند مانند آنچه در بالا گفته شد موج از این بازشوها نیز به داخل طبقات نفوذ می‌کند. شکل (۳) مکانیزم پخش شدن موج انفجار را بر ساختمان نشان می‌دهد.



شکل ۳. پخش شدن موج انفجار روی ساختمان [۲۲]

بیان شد که پس از وقوع انفجار فشار در محل انفجار به یک باره بالا می‌رود و به صورت نمایی کاهش می‌یابد. این روند کاهشی ادامه می‌یابد تا فشار از فشار اتمسفریک کمتر می‌شود (فشار منفی یا مکشی) این بخش از موج، فاز منفی یا مکشی نام دارد. شکل (۴) فشار و فازهای مختلف یک موج انفجار را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. موج انفجار پس از برخورد با ساختمان انعکاس پیدا می‌کند که فشار در هنگام انعکاس بالاتر خواهد بود. در گوشه‌های ساختمان نیز پدیده انکسار موج دیده می‌شود.



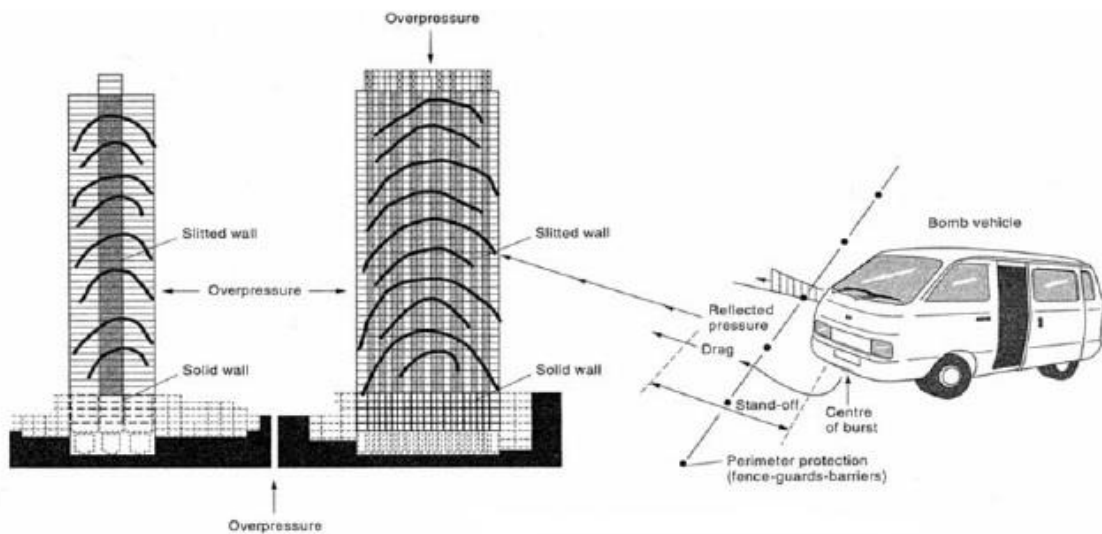


شکل ۴. دیاگرام فشار- زمان برای یک انفجار [۲۳]

## ۲-۲ فرمولاسیون ریاضی انفجار

در طراحی ساختمان‌ها سعی بر این است تا ساختمان در برابر بارهای احتمالی وارده مقاوم باشد. در این بین بار ناشی از انفجار یک بار فوق العاده است. جدا از روش‌های غیر سازه‌ای در مقاوم‌سازی سازه در برابر انفجار، که تا حد بسیار زیادی کارآمد هستند مقاوم بودن سازه ساختمان در برابر انفجار همیشه موضوعی برای مهندسین عمران بوده و خواهد بود، اینکه بتوان با استفاده از کمترین ملاحظات سازه را مقاوم نمود. در هنگام وقوع یک انفجار انرژی شیمیایی ذخیره شده در ماده منفجره آزاد می‌شود. انرژی ناشی از انفجار به دو قسمت مختلف تقسیم می‌شود، انرژی گرمایی که به صورت تشعشع فروسرخ در محیط پخش می‌شود که کوبله شدن با هوا و زمین که به ترتیب انفجار هوایی و شوک زمینی نامیده می‌شوند. موج ناشی از انفجار هوایی عامل اصلی خسارات وارده به ساختمان‌ها است، این موج به صورت یک موج فشاری با سرعت بسیار آزاد به ساختمان برخورد می‌کند، درست مانند باد، اما با سرعت بیشتر و مدت زمان اثر کمتر. این امواج با سرعت به ساختمان برخورد می‌کنند و با فشار افزایش یافته انعکاس می‌یابند. موج انفجار هوایی از بازشوها به داخل ساختمان نفوذ می‌کند و موجب خسارت داخلی ساختمان می‌شود. در مدت کوتاهی موج تمام ساختمان را فرا می‌گیرد و تمامی وجوه ساختمان تحت فشار قرار می‌گیرند. فشار به صورت تابعی از زمان و مکان به صورت نمایی کاهش می‌یابد و در نهایت مکش صورت می‌گیرد که این رفتار را فاز منفی موج انفجار می‌خوانند. اثر دیگر موج انفجار هوایی، فشار دینامیکی نام دارد، سرعت بسیار بالایی دارد و عامل به هوا پرتاب شدن ذرات ناشی از انفجار است. شکل (۵) به طور مثال انفجار ناشی از یک اتومبیل و اثر آن روی یک ساختمان را نشان می‌دهد.





شکل ۵. بار انفجار روی ساختمان [۲۳]

فشار ناشی از انفجار با مقدار ماده منفجره رابطه مستقیم و با فاصله از نقطه انفجار رابطه معکوس دارد.

$$P \propto W \quad (1)$$

$$P \propto \frac{1}{R} \quad (2)$$

که  $P$  فشار ناشی از موج انفجار،  $W$  جرم ماده انفجاری، و  $R$  فاصله تا نقطه انفجار است.

$$P \propto \frac{W}{R} \quad (3)$$

در گذر زمان روابط تجربی ارایه شده اند که فشار ناشی از انفجار را در فواصل گوناگون به خوبی محاسبه می کنند.

### ۲-۳ قانون مقیاس کردن امواج

رابطه هاپکینسون-کرانز که عموماً به رابطه ریشه سوم نیز مشهور است در بررسی پدیده انفجار کاربرد بسیار زیادی دارد. فرض شود که دو انفجار با ماده منفجره یکسان به جرم های  $W_1$  و  $W_2$  و قطرهای  $d_1$  و  $d_2$  (اینجا فرض می شود که بمبها به صورت کره هستند) صورت بگیرند، رابطه زیر بین جرمها و فواصل برقرار است [۲۴].

$$\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/2} \quad (4)$$

همچنین  $W_1$  و  $W_2$  به ترتیب با  $d_1^2$  و  $d_2^2$  متناسب هستند. فرض می شود که دو بمب با جرم های  $W_1$  و  $W_2$  و فواصل  $R_1$  و  $R_2$  فشار یکسانی را ایجاد کنند با نسبت  $d_1/d_2$  و زمان فاز مثبت ثابت. بین فاصله و جرم انفجار رابطه زیر حاکم است:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/2} \quad (5)$$

در اینجا نسبتی تعریف می شود که در اکثر روابط مربوط به محاسبات انفجار کاربرد دارد، فاصله مقیاس شده  $Z$ :

$$Z = \frac{R}{W^{1/2}} \quad (6)$$

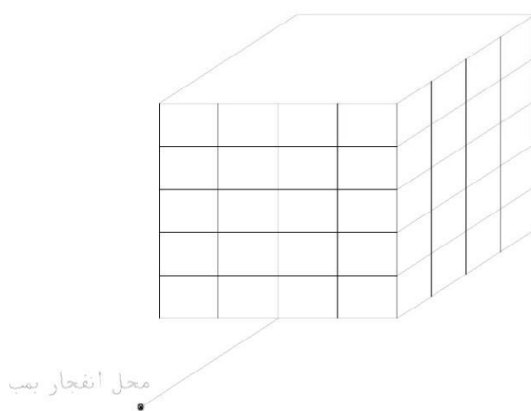
این نسبت نه تنها برای انفجارهای متعارف بلکه برای انفجارهای اتمی و انفجارهای شیمیایی قابل استفاده است. ضربه ناشی از موج انفجار بوسیله مساحت زیر نمودار فشار-زمان بدست می آیند. ضربه ناشی از فاز مثبت به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+t_o} P(t)dt = cP_{so}t_o \quad (7)$$

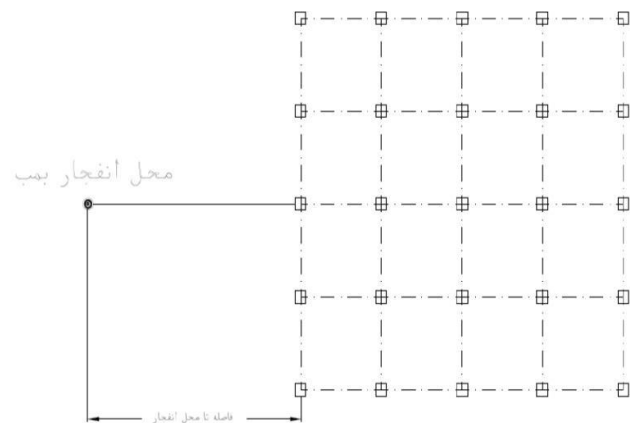
که در آن  $P(t)$  رابطه فشار-زمان،  $P_{so}$  بیشینه فشار ناشی از انفجار،  $t_o$  مدت زمان فاز مثبت،  $t_a$  زمان رسیدن موج انفجار به نقطه مورد نظر و  $c$  یک عدد بین ۰٫۲ تا ۰٫۵ وابسته به نوع تابع تعریف شده برای  $P(t)$  است. هنگامیکه موج انفجار در اتمسفر پخش می شود، هوای پشت جبهه پیشانی موج انفجار با سرعت کمتری حرکت می کند. سرعت ذرات معلق در هوا و همچنین فشار باد به بیشینه فشار ناشی از انفجار بستگی دارد. سرعت باد باعث ایجاد فشار دینامیکی می شود،  $q$  برای شرایط معمولی و انفجارهای متعارف روابطی بین بیشینه فشار، فشار دینامیکی، سرعت باد، که همه آنها به مقدار بیشینه فشار وابسته هستند. وقتی جبهه پیشانی موج انفجار به یک ساختمان برخورد می کند فشار بسیار بزرگی را به سطح برخوردی اعمال می کند و از بازشوها به داخل ساختمان نفوذ می کند. بیشینه فشار به صورت فشار هیدروستاتیکی خواهد بود و فشار دینامیکی باعث ایجاد بار درگ می شود. فشار انعکاس یافته بعد از انعکاس موج انفجار از سطح برخوردی ایجاد می شود. [۲۱]:

### ۳- مدل سازی

هدف از انجام این تحقیق بررسی ساختمان های بتن مسلح در برابر حملات تروریستی است. ساختمان های مورد هدف تروریست ها مراکز یا ساختمان هایی با هندسه نسبتاً مشخص هستند. پس از بررسی ساختمان ها و مراکزی که مورد حمله قرار گرفته اند یا این امکان وجود دارد که مورد حمله قرار بگیرند. یک مدل برای تحقیق انتخاب شده است. سعی شده است این مدل تا حد امکان مشابه اهداف تروریست ها باشد. مدل یک ساختمان ۵ طبقه (چهار طبقه به علاوه همکف) است، ارتفاع طبقات ۴ متر است. این ساختمان دارای چهار دهانه ۶ متری در هر راستا می باشد، لذا طول و عرض ساختمان ۲۴ متر و ارتفاع آن ۲۰ متر است. سیستم سازه ای این ساختمان قاب خمشی ویژه بدون داشتن دیوار برشی است. اشکال ۶ و ۷ نشان دهنده هندسه ساختمان مورد نظر است. این ساختمان ابتدا در نرم افزار ETABS طراحی شده و سپس در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است.



شکل ۷. نمای ساختمان مدل و محل انفجار.



شکل ۶. پلان ساختمان مدل و محل انفجار

## ۳-۱ روش و نرم افزار مورد استفاده

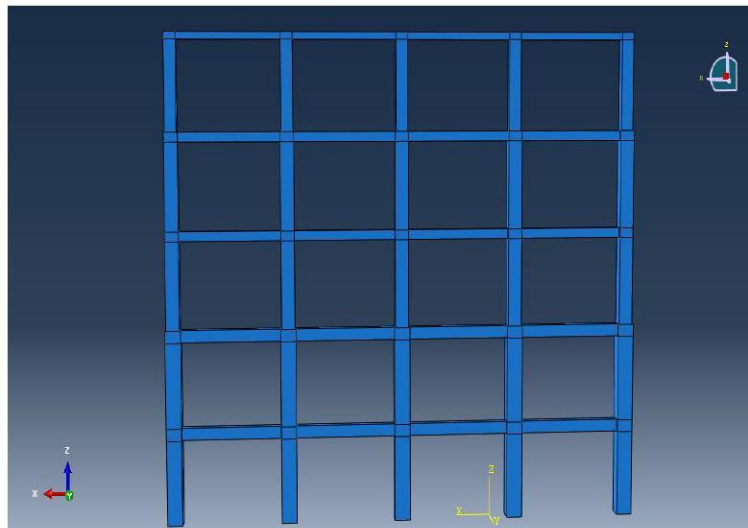
در تحلیل مدل‌های این تحقیق از روش اجزای محدود استفاده شده است. به دلیل ماهیت دینامیکی بار انفجار روش حل صریح انتخاب گردیده است. نرم‌افزار ABAQUS برای انجام تحلیل‌ها انتخاب گردیده است و دلیل این انتخاب عملکرد مناسب و قابل قبول این نرم‌افزار در انجام تحلیل‌های دینامیکی و غیرخطی است.

## ۳-۱-۱ مدل‌سازی انفجار

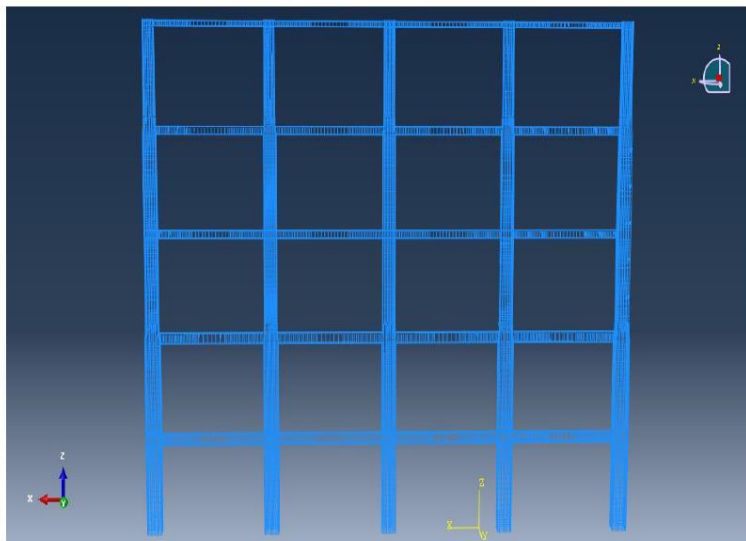
برای انتخاب محل انفجار در این مدل‌سازی حملات صورت گرفته در گذشته بررسی شده است. پس از انجام بررسی محل انفجار در روبروی یکی از وجوه ساختمان (روبروی قاب وسط) انتخاب شده است. نقاط انفجار در فواصل ۱۰ و ۲۰ متر انتخاب شده است. جرم ماده منفجره نیز از ۱۰۰ کیلوگرم تا ۲۰۰۰ قرار داده شده است. در این تحقیق سعی شده است تا جزئیات سازه‌ای نیز در مدل‌سازی وارد شود، مانند جزئیات آرماتورها، مدل‌سازی یک ساختمان سه بعدی با این جزئیات زمان انجام تحلیل را بسیار افزایش خواهد داد لذا مدل‌سازی ساختمان در دو بخش انجام شده است: ۱- مدل‌سازی یک قاب کامل، ۲- مدل‌سازی یکی از دیوارها.

## ۳-۱-۲ مدل‌سازی قاب

برای انتخاب اینکه کدام قاب از ساختمان برای مدل‌سازی انتخاب گردد ابتدا یک مدل ساده تحت بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به اینکه قاب میانی بیشترین جابجایی و تنش را متحمل می‌شود، قاب میانی ساختمان مورد مطالعه برای مدل‌سازی انتخاب گردیده است. تلاش شده است تا تمامی مدل‌های تحقیق بیشترین جزئیات ممکن را دارا باشند، همانگونه که در اشکال دیده می‌شود قاب مورد مطالعه نیز جزئیات خوبی را پوشش داده است.



شکل ۸. قاب مدل‌سازی شده بتنی



شکل ۹. قاب مدلسازی شده آرماتورها

### ۳-۱-۳ مدلسازی دیوار

بار ناشی از انفجار به دلیل ماهیت فشاری (موج هوایی فشاری) از طریق سطوح بارگیر به سازه ساختمان منتقل می‌شوند، بار ناشی از انفجار روی دیوارها بسیار زیاد هستند و همین امر باعث شده است که در همه انفجارهای نسبتاً بزرگ دیوارها به طور کامل تخریب شده‌اند ولی در بعضی موارد سازه ساختمان دچار آسیب‌های جدی نشده است. اگر یک دیوار در بار انفجار تخریب گردد اجزای آن مانند آجر/ بلوک‌ها به داخل طبقه پرتاب می‌شوند که این خود عامل بسیار بزرگی در ایجاد خسارات جانی و مالی است. لذا بررسی دیوار ساختمان در مدلسازی انفجار دارای اهمیت است. اینجا یکی از دیواره‌های طبقات میانی برای مدلسازی انتخاب شده است. مدل دیوار با چند هندسه ایجاد و تحلیل شده است:

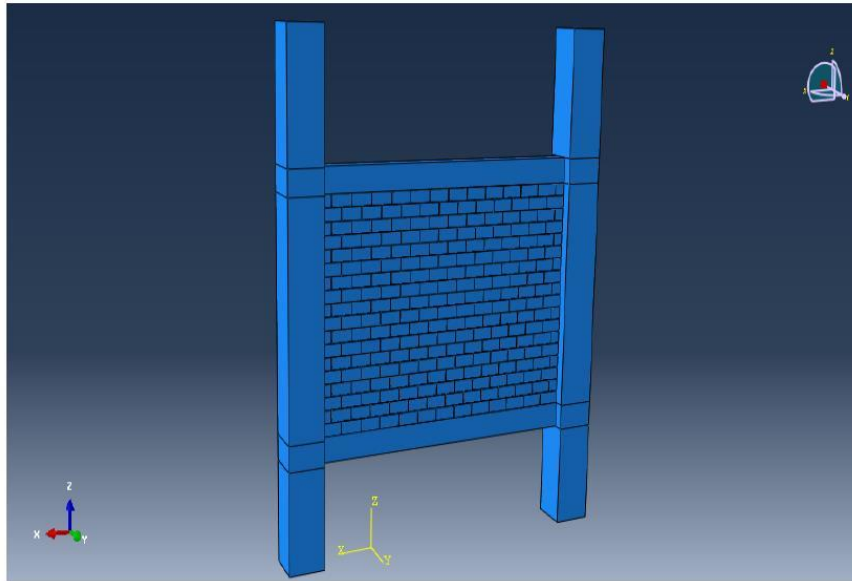
۱- دیوار با بلوک تقویت نشده

۲- دیوار با بلوک تقویت شده افقی

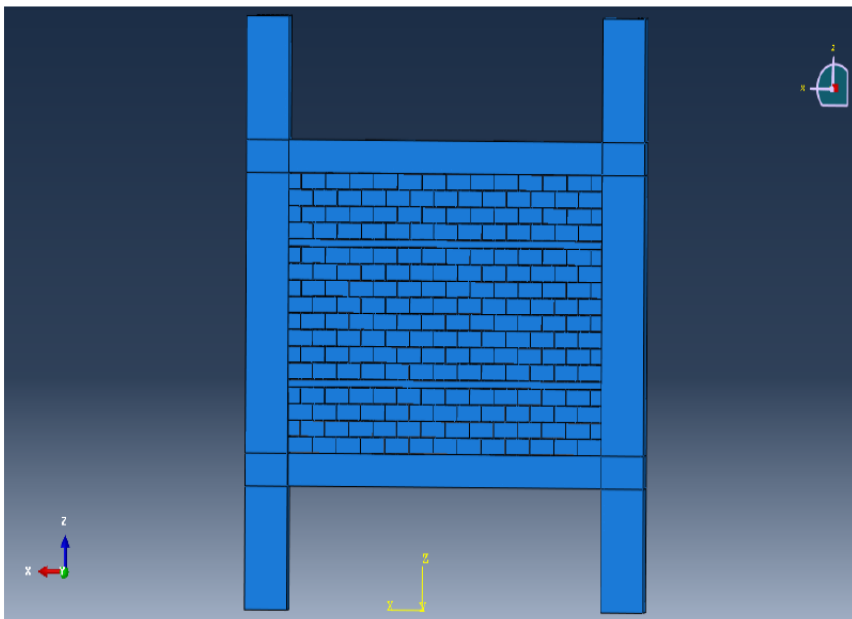
۳- دیوار با دو ردیف بلوک معمولی (فاصله بین بلوک‌ها برای قراردادن عایق حرارتی)

۴- دیوار با دو ردیف بلوک تقویت شده (فاصله بین بلوک‌ها برای قراردادن عایق حرارتی)

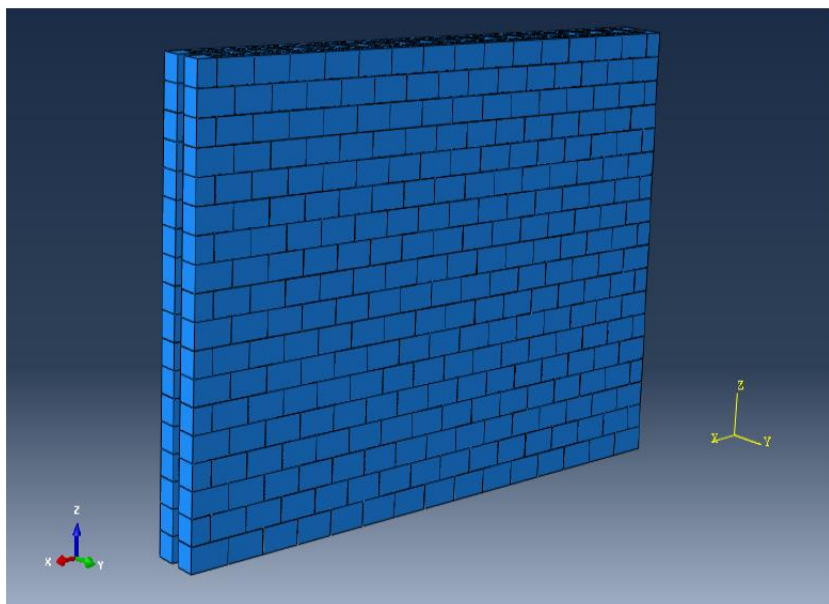
این مدل‌ها در برابر انفجارهایی با مقادیر مختلف تی ان تی و فواصل گوناگون مورد تحلیل قرار گرفته است، نتایج این تحلیل‌ها در ادامه آورده شده است.



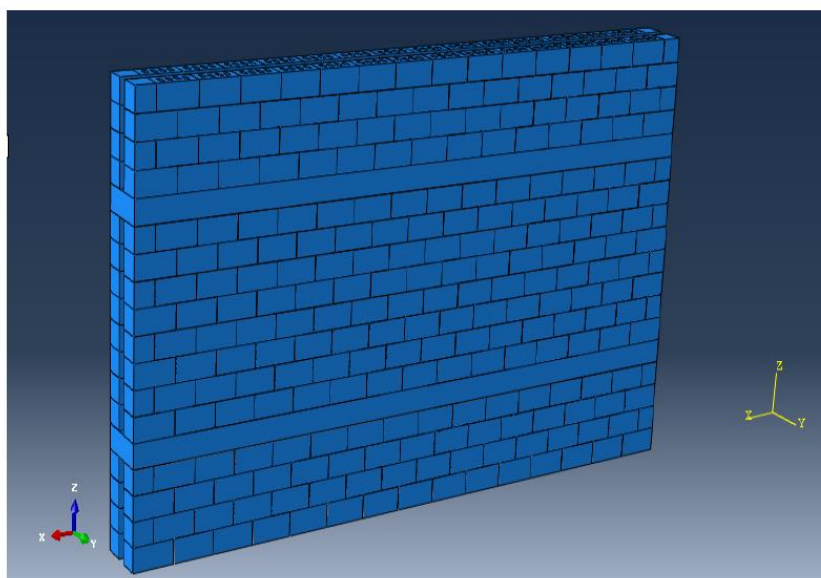
شکل ۱۰. دیوار مدلسازی شده به همراه قسمتی از قاب- دیوار معمولی بلوکی



شکل ۱۱. دیوار تقویت شده بلوکی

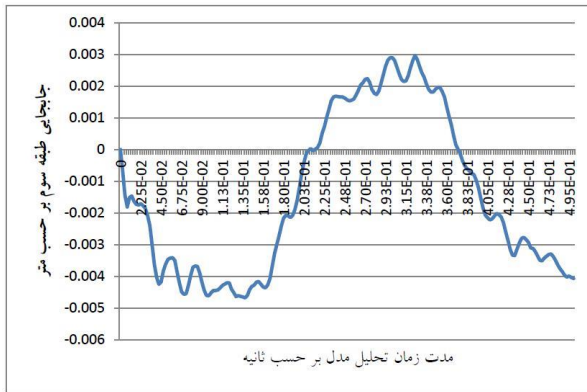


شکل ۱۲. دیوار معمولی با دو ردیف آجرچینی

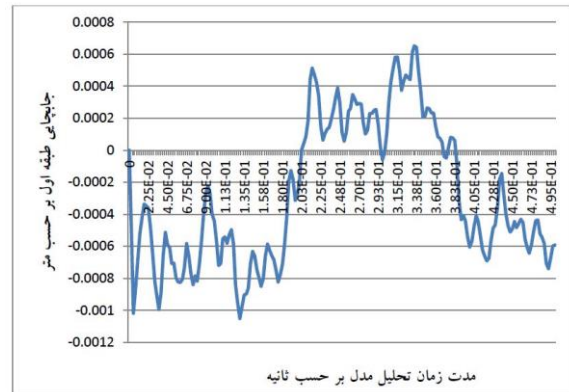


شکل ۱۳. دیوار تقویت شده با دو ردیف آجرچینی

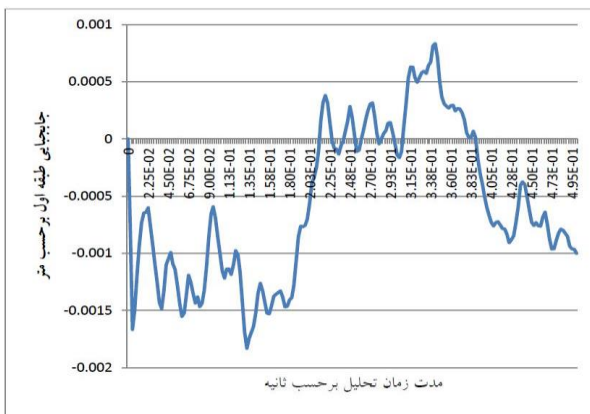
۴- نتایج تحلیل



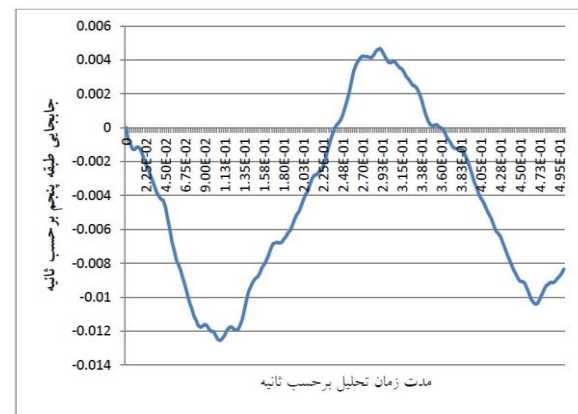
شکل ۱۵. جابجایی طبقه سوم در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



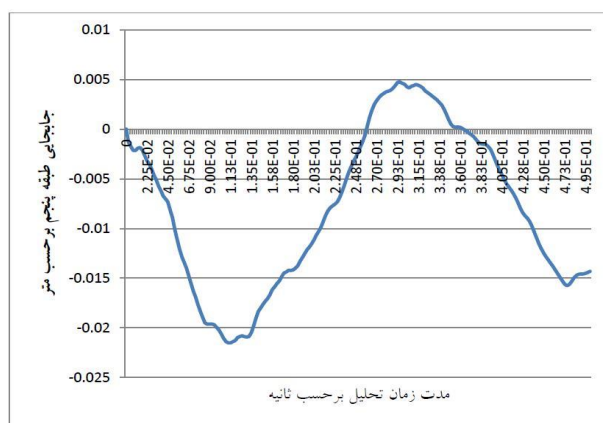
شکل ۱۴. جابجایی طبقه اول در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



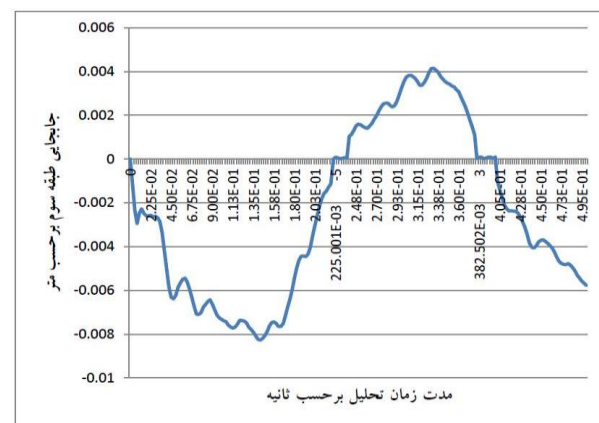
شکل ۱۷. جابجایی طبقه اول در اثر انفجار ۲۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



شکل ۱۶. جابجایی طبقه پنجم در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری

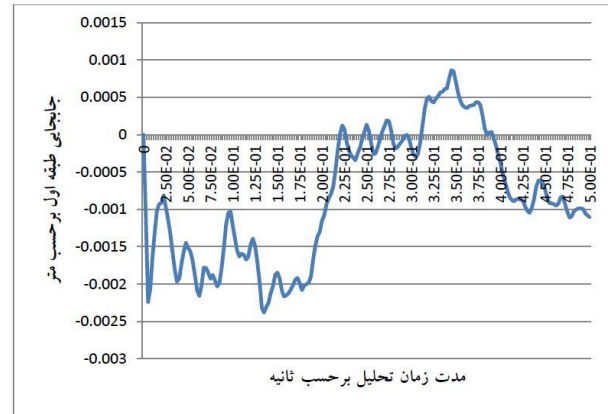
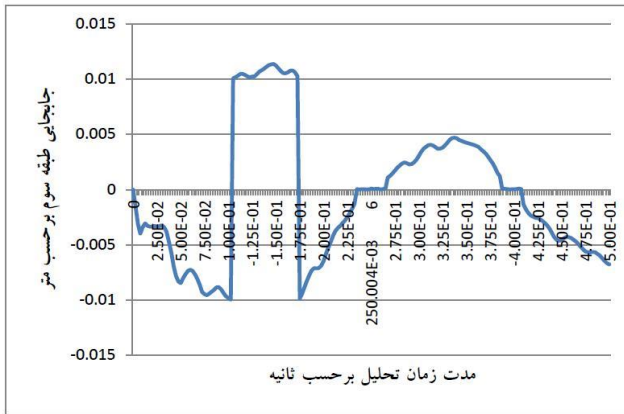


شکل ۱۹. جابجایی طبقه پنجم در اثر انفجار ۲۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



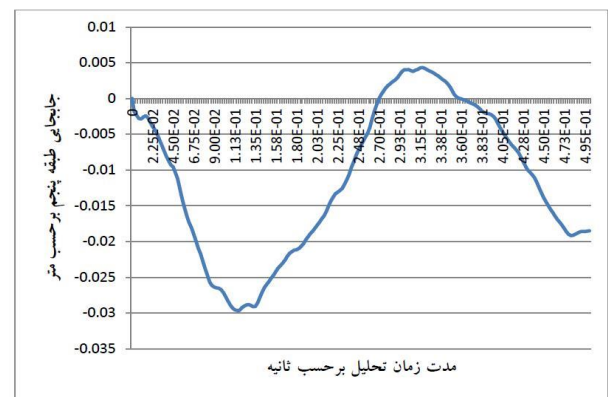
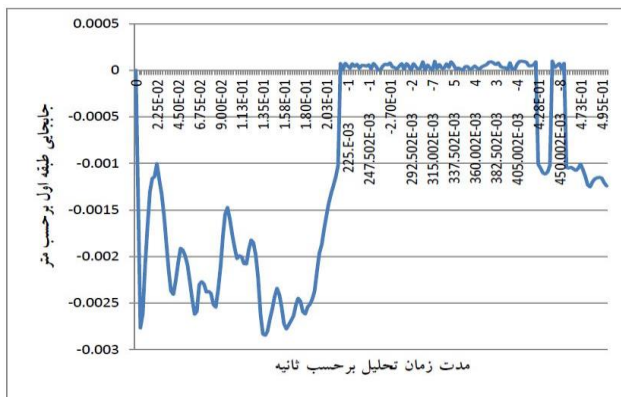
شکل ۱۸. جابجایی طبقه سوم در اثر انفجار ۲۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری





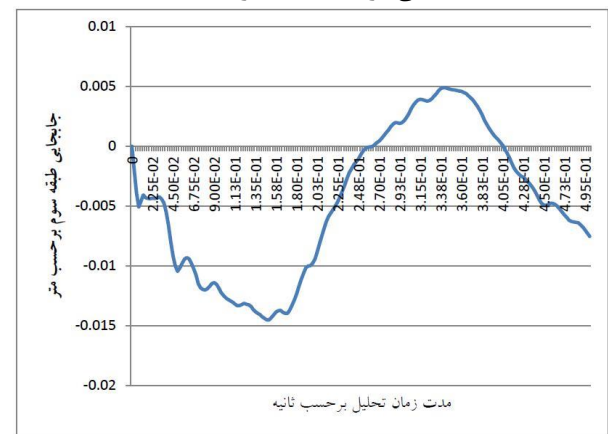
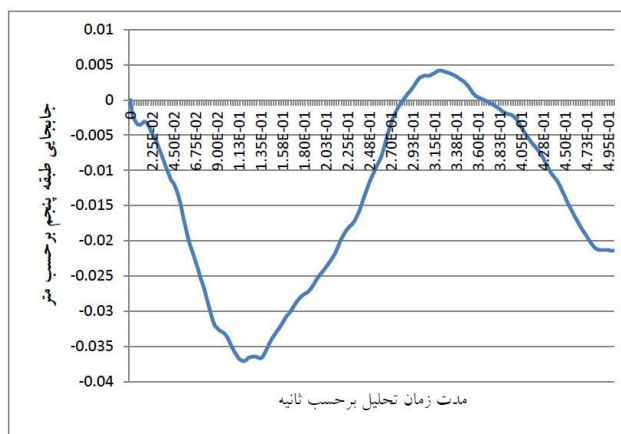
شکل ۲۱. جایگاهی طبقه سوم در اثر انفجار ۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری

شکل ۲۰. جایگاهی طبقه اول در اثر انفجار ۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



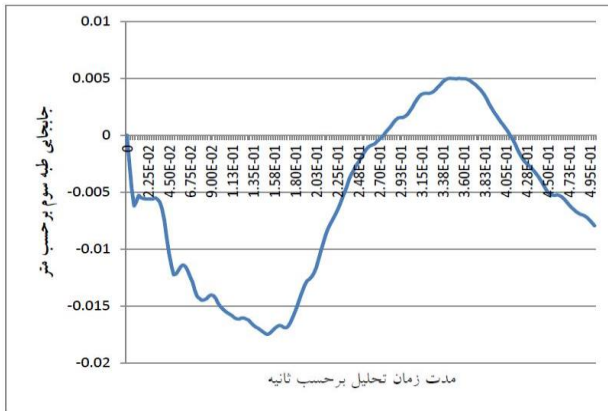
شکل ۲۳. جایگاهی طبقه اول در اثر انفجار ۴۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری

شکل ۲۲. جایگاهی طبقه پنجم در اثر انفجار ۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری

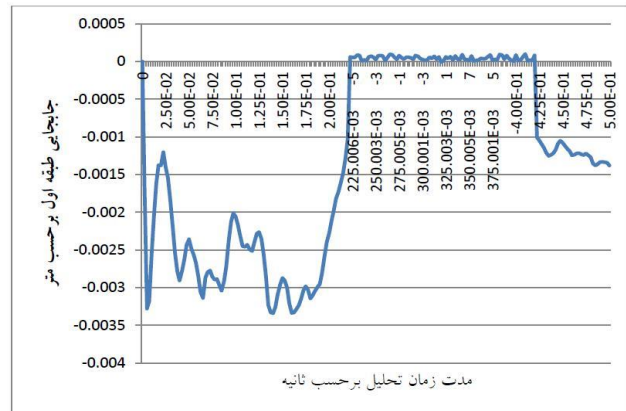


شکل ۲۵. جایگاهی طبقه پنجم در اثر انفجار ۴۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری

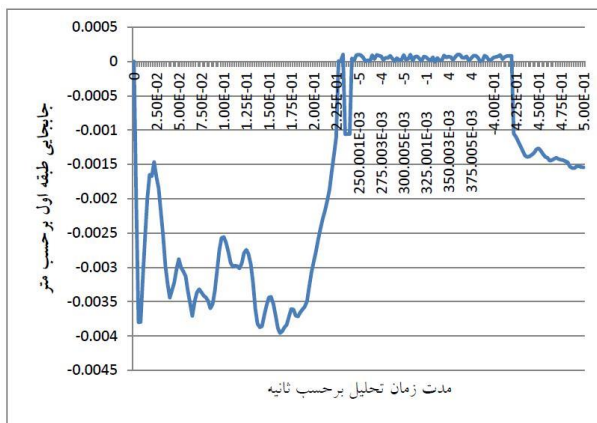
شکل ۲۴. جایگاهی طبقه سوم در اثر انفجار ۴۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



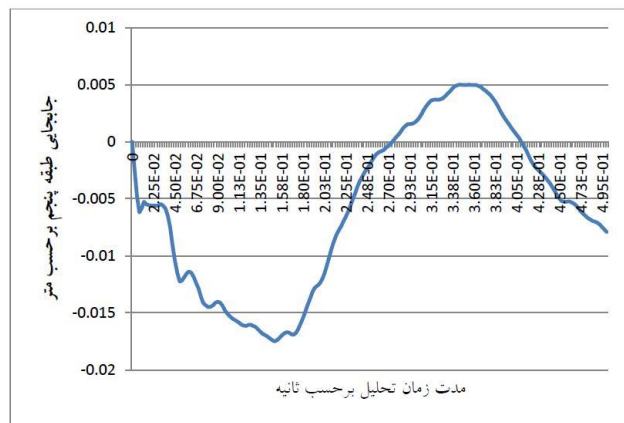
شکل ۲۷. جابجایی طبقه سوم در اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



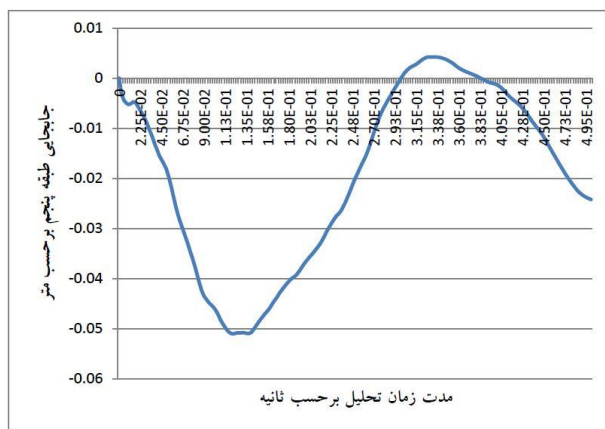
شکل ۲۶. جابجایی طبقه اول در اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



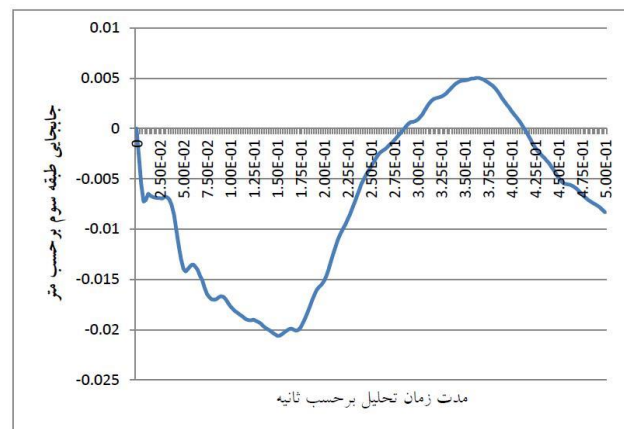
شکل ۲۹. جابجایی طبقه اول در اثر انفجار ۶۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



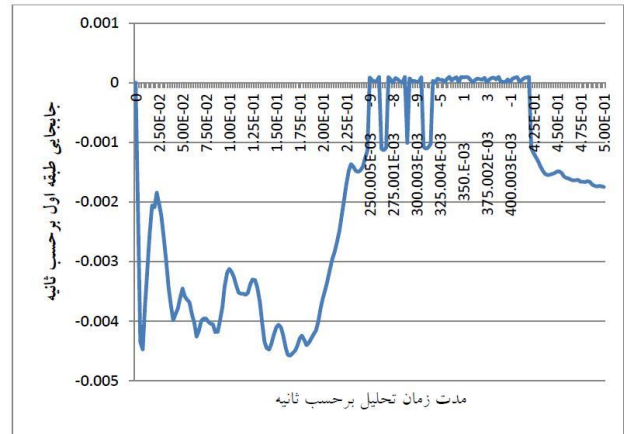
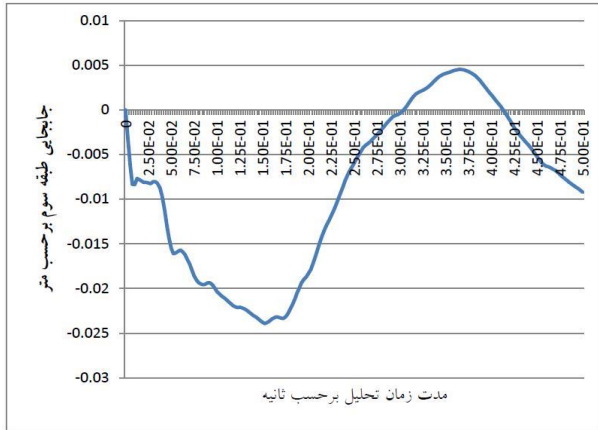
شکل ۲۸. جابجایی طبقه پنجم در اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



شکل ۳۱. جابجایی طبقه پنجم در اثر انفجار ۶۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری

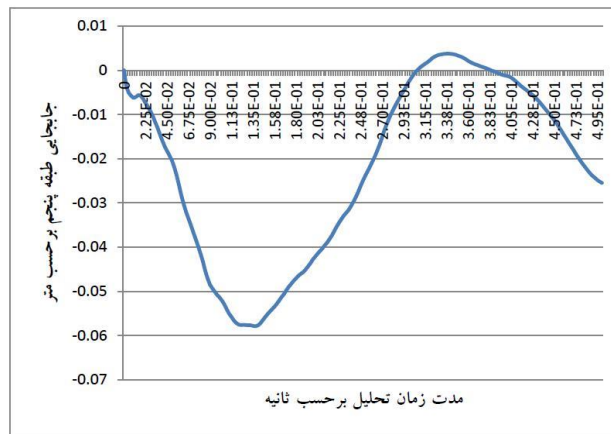


شکل ۳۰. جابجایی طبقه سوم در اثر انفجار ۶۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری



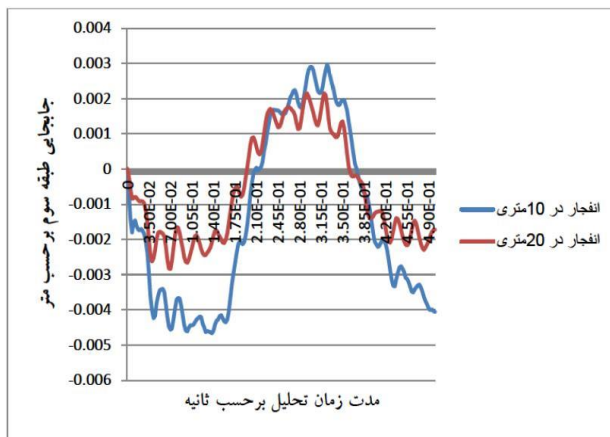
شکل ۳۲. جابجایی طبقه اول در اثر انفجار ۷۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری

در فاصله ۱۰ متری

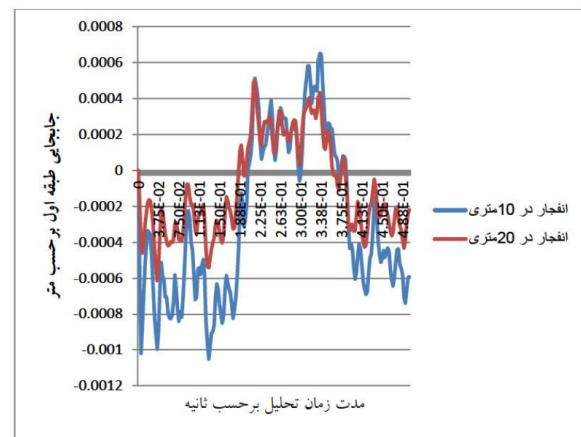


شکل ۳۴. جابجایی طبقه پنجم در اثر انفجار ۷۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۱۰ متری

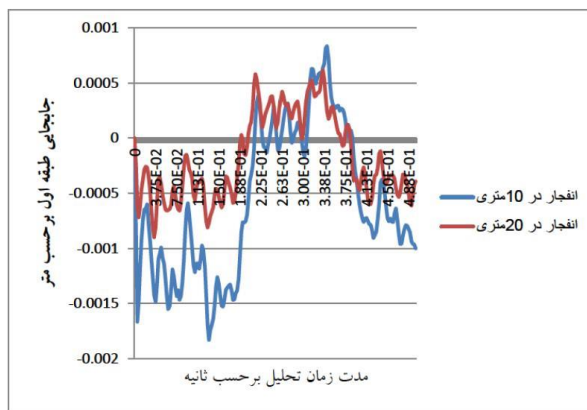
۱-۴ تاثیر فاصله در جابجایی طبقات



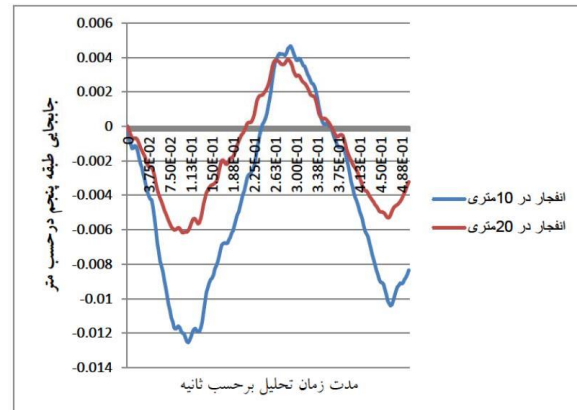
شکل ۳۶. مقایسه جابجایی طبقه سوم در انفجار ۱۰۰ کیلوگرم در فواصل ۱۰ و ۲۰ متر



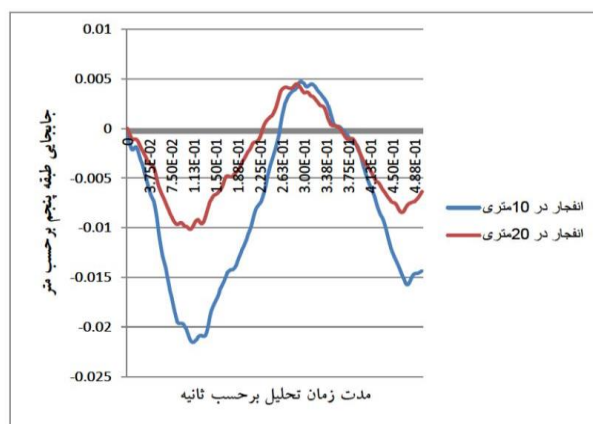
شکل ۳۵. مقایسه جابجایی طبقه اول در انفجار ۱۰۰ کیلوگرم در فواصل ۱۰ و ۲۰ متر



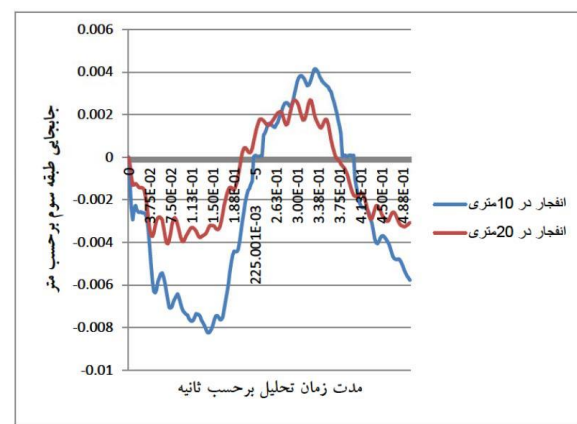
شکل ۳۸. مقایسه جابجایی طبقه اول در انفجار ۲۰۰ کیلوگرم در فواصل ۱۰ و ۲۰ متر



شکل ۳۷. مقایسه جابجایی طبقه پنجم در انفجار ۱۰۰ کیلوگرم در فواصل ۱۰ و ۲۰ متر

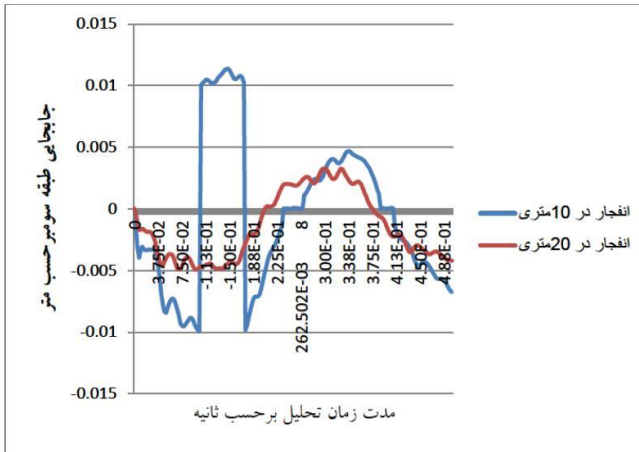


شکل ۴۰. مقایسه جابجایی طبقه پنجم در انفجار ۲۰۰ کیلوگرم در فواصل ۱۰ و ۲۰ متر



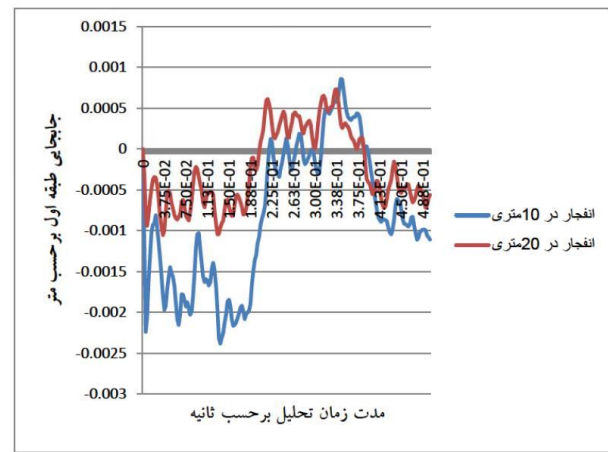
شکل ۳۹. مقایسه جابجایی طبقه سوم در انفجار ۲۰۰ کیلوگرم در فواصل ۱۰ و ۲۰ متر





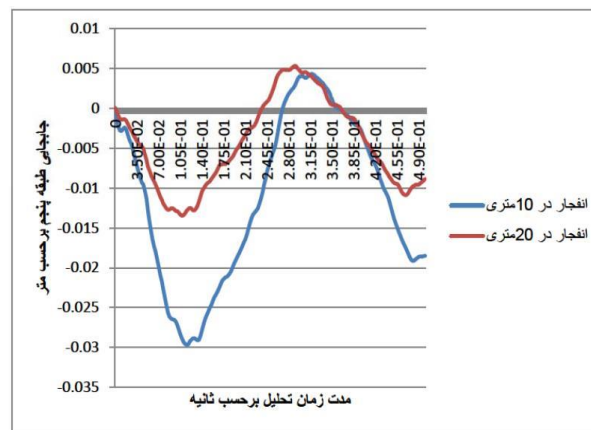
شکل ۴۲. مقایسه جابجایی طبقه سوم در انفجار ۳۰۰ کیلوگرم در

فاصل ۱۰ و ۲۰ متر



شکل ۴۱. مقایسه جابجایی طبقه اول در انفجار ۳۰۰ کیلوگرم در

فاصل ۱۰ و ۲۰ متر



شکل ۴۳. مقایسه جابجایی طبقه پنجم در انفجار ۳۰۰ کیلوگرم در فواصل ۱۰ و ۲۰ متر

## ۵- بحث و نتیجه گیری

همانگونه که مشاهده گردید انفجار بمب در مجاورت یک ساختمان می‌تواند خسارات زیادی را ایجاد نماید. آسیب دیدن سازه ساختمان و فروپاشی آن، آسیب دیدن نمای ساختمان و از بین رفتن آن و آسیب دیدن اموال و دارایی‌های داخل ساختمان به واسطه نفوذ موج انفجار به داخل ساختمان، حتی اگر ساختمان دچار فروپاشی نگردد، شکسته شدن شیشه‌ها و نمای ساختمان باعث ایجاد پرتابه‌های تیز و خطرناکی می‌شوند که باعث ایجاد جراحات شدید و حتی مرگ افراد حاضر در محل می‌گردد. مهمترین عامل ایجاد خسارت بیشینه فشار موج انفجار است که بار ناشی از انفجار متاثر از آن است. باتوجه به روابط بیان شده دیده می‌شود که بیشینه فشار موج انفجار با فاصله رابطه عکس دارد و افزایش فاصله بین نقطه انفجار و ساختمان باعث افت شدید بیشینه فشار خواهد شد. بطور کلی می‌توان روش‌های محافظت ساختمان در برابر انفجار را به دو دسته تقسیم نمود: الف- روش‌های سازه‌ای ب- روش‌های غیرسازه‌ای.

در روش‌های دسته اول به طور مخصوص مهندس سازه با در نظر داشت تمهیدات سازه‌ای مطابق با دستورالعمل‌ها یا تجربه تلاش دارد تا ساختمان مورد طراحی را تا حد مورد نظر خود در برابر انفجار مقاوم طراحی نماید، و یا در مورد یک ساختمان از موجود (ساخته شده در گذشته) با رعایت تمهیدات خاصی سعی در مقاوم سازی آن ساختمان در برابر انفجار دارد. در روش‌های دسته دیگر عوامل طراح مانند معمار ساختمان، مهندس منظر، مدیر پروژه و ... با در نظر داشت نکات ایمنی تلاش دارند تا ساختمان و محیط اطراف آن را در برابر بار



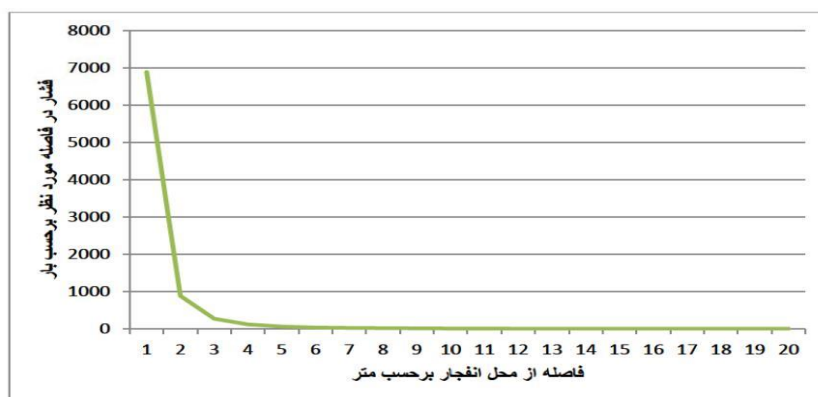
انفجار ایمن بسازند. روش‌های غیرسازه‌ای در مقایسه با روش‌های سازه‌ای مقاوم‌سازی ساده‌تر هستند، ولی تاثیرگذاری بسیار زیادی بر مقاومت ساختمان در برابر انفجار دارند.

مسئله مورد بررسی در این تحقیق انفجارهای تروریستی است. باتوجه به بررسی حملات تروریستی که در گذشته اتفاق افتاده است و هدفشان ساختمان‌ها بوده‌اند دیده می‌شود که به دلیل بزرگ بودن هدف، ساختمان، معمولاً مقدار ماده منفجره زیاد است، از یک تن بیشتر، لذا این مقدار بمب حتماً بواسطه یک وسیله نقلیه به محل حمله انتقال می‌یابد. اگر بجای خودرو از بمب بسته‌بندی شده استفاده گردد، این روش نیز در دسته اول قرار می‌گیرد. تفاوت بزرگ در این دو روش در نحوه مقابله با آنها است. در روش اول به هر طریقی و در هر زمان ممکن بمب به محل رسیده و در وقت مناسب منفجر می‌شود. برای مقابله با این روش می‌بایست از روش‌های مختلفی برای چک کردن خودروهای پارک شده استفاده نمود، مانند استفاده از سگ‌های بمب‌یاب. در روش دوم، یک خودرو با سرعت به سمت یک ساختمان در حال حرکت است، لذا افراد مسئول در محل بخصوص گاردهای حاضر باید آموزش لازم برای این حمله را دیده باشند و طبق آموزش‌های دیده شده عکس‌العمل سریع و موثر انجام دهند. پس از انفجار ماده بمب فشار اطراف محل انفجار به یکباره بالا رفته و ایجاد یک موج فشاری قوی می‌کند. این موج در برخورد به ساختمان به آن بار فشاری وارد می‌کند. بار فشاری مذکور باعث ایجاد خسارات به ساختمان خواهد بود. بار فشاری به بیشینه فشار جبهه پیشانی وابسته است. بیشینه فشار موج با مقدار ماده منفجره رابطه مستقیم و با فاصله رابطه عکس دارد:

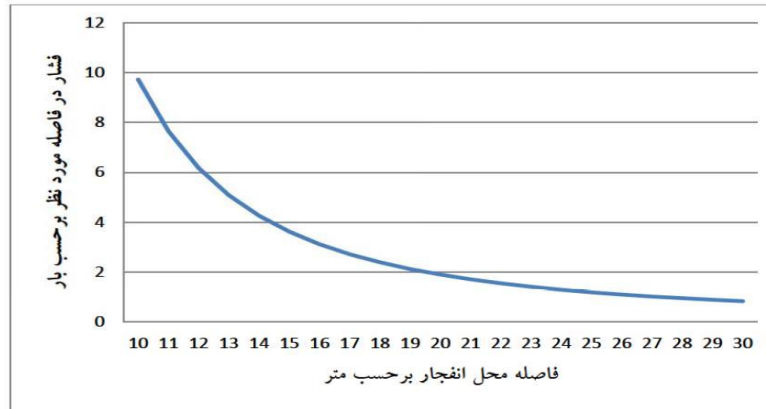
$$\text{Load explosion } \propto P_{so}$$

$$P_{so} \propto \frac{W}{R}$$

برای مقدار ماده مشخص ۱ تن نمودار بیشینه فشار برحسب فاصله به شکل زیر است، دیده می‌شود که با افزایش فاصله از یک متر به پنج متر، بیشینه فشار موج ده برابر کاهش می‌یابد. روند کاهش فشار برحسب فاصله ادامه دارد. باتوجه به گفته‌های بالا دیده نتیجه می‌شود که اولین و مؤثرترین استراتژی برای محافظت از ساختمان در برابر بار انفجار ایجاد فاصله بین ساختمان و محل وقوع احتمالی انفجار است. به فاصله بین ساختمان و نقطه انفجار استندآف گفته می‌شود.



شکل ۴۴. بیشینه فشار- فاصله برای یک تن تی تی از فاصله ۱ متر تا ۲۰ متر



شکل ۴۵. بیشینه فشار- فاصله برای ۱ تی ان تی از فاصله ۱۰ متر تا ۲۰ متر

انفجار پدیده‌ای است که سال‌ها موضوع تحقیق بوده است. در انفجارهای متعارف ماده منفجره در کسری از ثانیه در واکنشی شیمیایی انرژی ذخیره شده در پیوندهای شیمیایی خود را آزاد کرده و دو دسته محصولات انفجار را ایجاد می‌کند. دسته اول محصولات مادی مانند گازهای حاصل از انفجار و دسته دوم انرژی آزاد شده. انرژی آزاد شده باعث ایجاد موج فشاری در محیط اتمسفری اطراف محل انفجار می‌شود. این موج در محیط اطراف با الگوی روی شکل پخش می‌شود و با توجه به فاصله‌ای که از نقطه انفجار دور می‌شود از فشارش کاسته می‌شود. پس از رسیدن به ساختمان، جبهه پیشانی موج با آن برخورد می‌کند و به ساختمان بار وارد می‌کند، در کنار عواملی مانند مقدار ماده منفجره و فاصله، مقدار بار وارده به شدت به هندسه ساختمان بستگی دارد. سطوح بارگیر دیوارها هستند و بیشترین خرابی را در حوادث انفجاری به خود اختصاص می‌دهند. موج انفجار از بازشوها وارد ساختمان شده و باعث ایجاد خسارات جانی و مالی می‌گردد. با گذشت زمان فشار موج تحلیل می‌رود و فشار به مقداری کمتر از فشار اتمسفری محیط می‌رسد که به این حالت فاز منفی یا مکش موج انفجار گفته می‌شود، در این فاز ذرات کوچک به هوا پرتاب می‌شوند. بررسی پدیده انفجار پس از جنگ جهانی شدت بیشتری گرفته است و بیشتر این تحقیقات در بخش‌های نظامی صورت گرفته‌اند و حاصل آنها بعضی دستورالعمل‌ها هستند. روابط ریاضی حاکم بر پدیده انفجار مبتنی بر روابط گازهای کامل و آزمایشات انجام شده است. برای بررسی رفتار یک ساختمان در برابر بار انفجار مدل‌سازی‌های مختلفی انجام شده است و هر مدل‌سازی مزایای خود را دارد. در این تحقیق یک ساختمان با ساختمان‌هایی که احتمال حمله انفجاری را دارند طراحی و مدل‌سازی شده است. در مدل‌سازی این ساختمان از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده گردیده است. مدل‌سازی در دو دسته انجام شده است: دسته اول مدل‌سازی یک قاب کامل ساختمان و دسته دوم مدل‌سازی دیوار ساختمان. در هر دو دسته مدل‌سازی سعی بر این بوده است تا مدل‌های ساخته شده به واقعیت بسیار نزدیک بوده و جزئیات مناسبی را پوشش دهند. مدل‌های ساخته شده تحت بارهای مختلف انفجار تحلیل شده و نتایج تحلیل در فصل چهارم آورده شده است. با توجه به روابط فصل سوم و نمودارهای حاصل از آنها در فصل چهارم به وضوح دیده می‌شود که فاصله در کاهش فشار موج انفجار و به تبع آن بار وارده بسیار چشمگیر است. در این فصل نتایج حاصل از بررسی تحلیل‌ها ارائه خواهد شد. پس از بررسی تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل‌های ساخته شده نتایج بدست آمده به شرح زیر هستند.

۱- در انفجارهای معمولی و مقدار ماده منفجره متوسط سازه ساختمان دچار فروپاشی نمی‌شود درحالی‌که دیوارها خراب می‌شود.

۲- با مقایسه نتایج تحلیل قاب‌هایی که ضوابط آیین نامه بتن مسلح در آنها رعایت شده با قاب‌هایی که ضوابط مذکور در آنها رعایت نشده‌اند این نتیجه حاصل می‌شود که ضوابط آیین نامه ای تا حد بسیار خوبی سازه ساختمان را در برابر بارهای ناشی از انفجار مقاوم خواهد کرد.



- ۳- برای جلوگیری از فروپاشی ساختمان ستون‌ها نقش بسیار مهمی دارند، لذا برای جلوگیری از فروپاشی ساختمان و کاهش خسارات محافظت از ستون‌ها با استفاده از راهکارهای غیرسازه‌ای مانند استفاده از بلوک دیوار حائل بسیار موثر است.
- ۴- دیوارهای معمولی ساخته شده از آجر و یا بلوک در مقابل کوچکترین انفجارها نیز مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند و به راحتی خراب می‌شوند و با ترکش پراکنی و پرت شدن آجرها به داخل ساختمان بسیار خطرناک هستند، لذا در طراحی مقاوم در برابر انفجار حتماً باید مقاوم‌سازی دیوارها مورد توجه قرار بگیرد.
- ۵- دیوارهای مقاوم‌سازی در برابر انفجارهایی با مقدار ماده منفجره متوسط از خود مقاومت نشان می‌دهند. در برخی موارد که دچار تغییرشکل‌های غیرقابل برگشت شده باشند باید تعمیر و نوسازی شوند.
- ۶- در طراحی ساختمان‌های معمولی نیز با بکاربردن مقاوم‌سازی دیوار می‌توان آنها را نه تنها در برابر انفجارهای محتمل بلکه در برابر زلزله نیز مقاوم ساخت.
- ۷- افزایش فاصله منبع انفجار (استندآف) در کاهش فشار موج انفجار و به تبع آن کاهش بار وارده به ساختمان بسیار موثر است.
- ۸- نمای ساختمان به هیچ وجه در برابر انفجار مقاومت نخواهد داشت ولی با طراحی مناسب می‌توان از خطر ناشی از خردشدن و شکسته شدن آنها کاست.
- ۹- طراحی ساختمانی مقاوم، در برابر طیف وسیعی از انفجارها یک کار غیر اقتصادی خواهد بود.
- ۱۰- اگر ساختمانی در برابر زلزله طراحی شود و تمامی نکات سازه‌ای و غیرسازه‌ای در آن رعایت گردد، این ساختمان توانایی مقاومت در برابر بارهای معمولی انفجاری را خواهد داشت، این نکته از آنجا اهمیت پیدا می‌کند که معمولاً آیین‌نامه‌های طراحی انفجاری یا براحتی در دسترس نیستند و یا طراحان به خوبی با آنها آشنا نمی‌باشند. البته این نکته برای طراحی ساختمان‌های معمولی بیان شده است و برای طراحی یک ساختمان مقاوم در برابر انفجار حتماً باید نکات طراحی در برابر انفجار که در آیین‌نامه‌ها گنجانده شده‌اند مورد توجه قرار بگیرند.
- ۱۱- در مدلسازی و تحلیل کامپیوتری انتخاب هندسه نزدیک به واقعیت بسیار اهمیت دارد.

## منابع

- [1] Sharbatdar, M. K., Zahiri-Hashemi, R., Jamshidi, H. "Study of Confined Concrete Effects by Compressive Stirrup on Behavior of Reinforced Concrete Moment Resisting Frame Under Explosion Loading (2011) [in Persian].
- [2] Mortezaei, A. "Case Study of a RC Building Resisting Subjected to Earthquake under Explosion Loading." *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering* (2013) [in Persian].
- [3] Khodarahmi, H., Azizian, A., Amini, M. "Experimental Study of Projectiles Impact on High-Strength Concrete Targets, *Modares Civil Engineering Journal* (2015) [in Persian]
- [4] Luccioni, B. M., R. D. Ambrosini, and R. F. Danesi. "Analysis of building collapse under blast loads." *Engineering structures* 26.1 (2004): 63-71.
- [5] Li, Bing, Tso-Chien Pan, and Anand Nair. "A case study of the effect of cladding panels on the response of reinforced concrete frames subjected to distant blast loadings." *Nuclear engineering and design* 239.3 (2009): 455-469.
- [6] Shooshtari, M.; Goomar, H. "Blast Rehabilitation of Concrete Structures Using CFRP"; 6th National Civil Engineering Congress, Semnan, Iran, 2011.



- [7] Karapinar, S.; Sanri, I.; Altay G. "Workshop"; Prague, March 2007, 30-31.
- [8] Xu, Kai, and Yong Lu. "Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading." *Computers & Structures* 84.5 (2006): 431-438.
- [9] Mays, G. C., J. G. Hetherington, and T. A. Rose. "Response to blast loading of concrete wall panels with openings." *Journal of structural Engineering* 125.12 (1999): 1448-1450.
- [10] Razaqpur, A. Ghani, Ahmed Tolba, and Ettore Contestabile. "Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates." *Composites Part B: Engineering* 38.5 (2007): 535-546.
- [11] Sun, Wenbin. "Experimental studies on reinforced concrete (RC) slabs subjected to blast loads." *J Liaoning Tech Univ (Nat Sci)* 28 (2009): 217-220.
- [12] Lok, T. S., and J. R. Xiao. "Steel-fibre-reinforced concrete panels exposed to air blast loading." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and buildings* 134.4 (1999): 319-331.
- [13] Chi, Y., G. S. Langdon, and G. N. Nurick. "The influence of core height and face plate thickness on the response of honeycomb sandwich panels subjected to blast loading." *Materials & Design* 31.4 (2010): 1887-1899.
- [14] Naito, C. J., and K. P. Wheaton. "Blast assessment of load-bearing reinforced concrete shear walls." *Practice periodical on Structural design and Construction* 11.2 (2006): 112-121.
- [15] Fallah, A. Soleiman, and L. A. Louca. "Pressure–impulse diagrams for elastic-plastic-hardening and softening single-degree-of-freedom models subjected to blast loading." *International Journal of Impact Engineering* 34.4 (2007): 823-842.
- [16] Low, Hsin Yu, and Hong Hao. "Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading." *Structural safety* 23.2 (2001): 157-178.
- [17] Zhou, X. Q., et al. "Numerical prediction of concrete slab response to blast loading." *International Journal of Impact Engineering* 35.10 (2008): 1186-1200.
- [18] Nam, Jin-Won, et al. "Numerical evaluation of the retrofit effectiveness for GFRP retrofitted concrete slab subjected to blast pressure." *Composite structures* 92.5 (2010): 1212-1222.
- [19] Pereira, J. M., et al. "Blast response of cracked steel box structures repaired with carbon fibre-reinforced polymer composite patch." *Materials & Design* 32.5 (2011): 3092-3098.
- [20] Lin, Xiaoshan, Y. X. Zhang, and Paul J. Hazell. "Modelling the response of reinforced concrete panels under blast loading." *Materials & Design* 56 (2014): 620-628.
- [21] Bangash, M. Y. H., & Bangash, T. (2006). Explosions–resistant buildings: design, analysis, and case studies.
- [22] Koccaz, Z., Sutcu, F., & Torunbalci, N. (2008). Architectural and structural design for blast resistant buildings. In *The 14th world conference on earthquake engineering October* (pp. 12-17).
- [23] Bangash, M. Y. H. (1999). *Prototype building structures: analysis and design*. Telford.
- [24] Smith, P. D., & Hetherington, J. G. (1994). *Blast and ballistic loading of structures*. Digital Press.



---

**Research Article**

---

**The study of reinforced concrete under loading system and investigation of resistance variations**Amin Faghrian<sup>1</sup>, Akbar Ghanbari<sup>2</sup>

---

**ARTICLE INFO****Article history**

Received 31 January, 2018

Accepted 8 March, 2018

---

**Key words:**

Concrete

Explosion loading

Loading system

Terrorist attacks

ABAQUS

---

**ABSTRACT**

Explosion phenomenon has been most attractive subject for researchers during different era, from innovation of gunpowder to these days. The biggest of these researchers has been done during WW2. At last years, many terrorist attacks have been done by using explosion materials and bombs. Explosion is a chemical reaction; it finishes in some mill-second. During reaction a huge amount of energy release in the atmosphere and cause a pressure wave by high speed. Wave attacks building, impacts and forces them. In general, RC buildings have better reaction to explosion wave, because of their high mass. In this study, main goal is to observe the RC building under explosion load and finding ways to reduce or prevent damages. To model the RC building the ABAQUS Finite Element software has been used. For modeling it has been tried to make the model very close to the reality and to cover the proper details. The results show that distance has significant effect on reducing the explosion wave pressure and consequently on applied explosion loading.

---

---

Corresponding author: Amin FaghrianE-mail addresses: Aminfaghrian@gmail.com

---

