کانون سراسری انجمن های صنفی مهندسان معمارایران
همایش بین المللی معماری،عمران و شهرسازی در هزاره سوم
تهران - تیر ماه ۹۴

ارزیابی اثر بارهای انفجاری بر ساختمان‌های بتن مسلح متداول

امیرحسین نجفی شکیب[۱]، حسین تحقیقی[۲]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، بلوار قطب راوندی، کاشان، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، بلوار قطب راوندی، کاشان، ایران

چکیده

امروزه با بالا گرفتن ناآرامی‌ها در کشورهای دنیا تعیین رفتار و طراحی ساختمان‌ها در برابر بارهای ناشی از انفجار از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. انفجار مواد منفجره در اطراف ساختمان سبب اعمال بارگذاری ضربه‌ای ناگهانی بر آن می‌گردد و میتواند سبب خسارات مالی و جانی جبران ناپذیری شود. هدف پژوهش حاضر، در ابتدا معرفی و نحوه مدل سازی امواج ناشی از انفجار و سپس ارزیابی اثرات این امواج بر یک ساختمان قاب خمشی بتن مسلح می‌باشد. بارگذاری انفجار بر حسب پارامترهای فاصله تا مرکز انفجار و مقدار مواد منفجره تعریف می‌گردد. برای تحلیل دینامیکی غیرخطی، مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار ABAQUS/Explicit صورت می‌گیرد. پاسخ سازه شامل جابجایی و برش پایه با مقادیر نظیر ناشی از زلزله طرح مقایسه میگردد. نتایج بدست آمده نشان میدهد که سازه مقاوم در برابر لرزه باید برای مقاومت در برابر بارهای انفجاری مفروض مورد ارزیابی قرار گیرد. ضمنا به منظور سنجش صحت عملکرد نرم افزار آباکوس در مدل‌سازی، از نتایج موجود آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری انفجار، ساختمان بتنی، مدل سازی ، آباکوس، تحلیل غیر خطی

۱- مقدمه

از پیدایش تکنولوژی انفجار و دانش مربوط به بارهای انفجاری مدت زیادی می‌گذرد. در این مدت پژوهش های نظری و آزمایشگاهی بسیاری توسط مهندسان و دانشمندان بر روی مصالح و بارهای انفجاری انجام شده است .امروزه با گسترش تاسف بار حملات تروریستی، تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نیز توسعه یافته است و آئین نامه های متعددی توسط مراجع مختلف برای تحلیل و طراحی انفجاری ارائه شده است .از طرفی با پیدایش مصالح نوین، گسترش کاربرد آنها در مهندسی عمران و کاربری مناسب آنها در بهسازی سازه‌های موجود، چشم انداز جدیدی در جهت مقابله با این وقایع فراهم شده است.

طی چند دهه گذشته، آنالیز و طراحی سازه های ضد انفجار مورد توجه محققین و مهندسین بوده است. طراحی سازه های مقاوم در برابر انفجار در صنعت پتروشیمی در سال ۱۹۷۶ توسط بردفورد و کالبرتون به صورت استاتیکی بیان گردید[۱]. در سال ۱۹۸۲، فربز روشهای طراحی دینامیکی سازه های ضد انفجار را ارائه نمود[۲]. نیکولاس روزسکی در سال ۱۹۸۸ به بررسی ساختمان های کنترل در واحدهای صنعتی تحت اثر بار انفجار پرداخته و در این مطالعه بارگذاری سازه، فلسفه طراحی، انتخاب سیستم سازهای و مصالح ساختمانی این ساختمانها در برابر بار انفجار در شرایط دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. با توجه به گسترش پالایشگاه ها و همچنین تسلیحات هسته‌ای، بررسی و مطالعه ساختمان های ضد انفجار بیش از پیش احساس میشود.

آیین نامه های طراحی مختلف ضوابط و معیارهایی جهت طراحی مقاوم سازه در مقابل موج انفجار ارائه نموده اند [۶-۴]. هدف این آیین نامه ها تعیین حداقل ضوابط و مقررات برای طرح و اجرای ساختمانها در برابر تهدیدهای انسان ساز می باشد به طوری که با رعایت آن انتظار می رود ساختمان های با درجه اهمیت حیاتی پس از انفجار قابلیت خدمت رسانی خود را حفظ کرده و ساختمان های با درجه اهمیت کمتر با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و اجتماعی ضمن کاهش تلفات، خسارتهای سازه ای و غیر سازه ای به حداقل قابل قبولی برسد. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش مشخصات بارهای انفجاری، اثر امواج ناشی از انفجار روی سازه ها و مقایسه نتایج آن با مقادیر ناشی از اثر زلزله روی یک ساختمان بتن آرمه متداول دارای قاب خمشی مورد بحث و بررسی بیشتر قرار می گیرد.

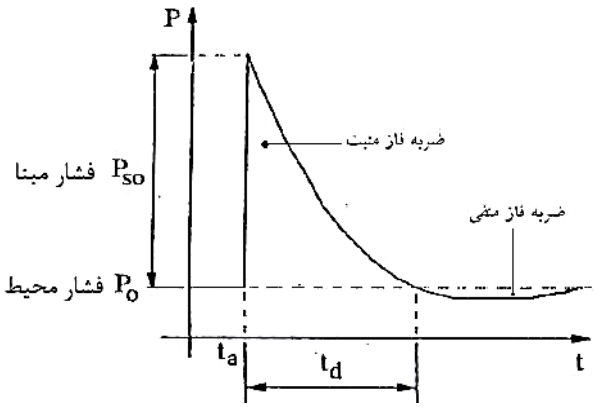
۲- امواج ناشی از انفجار

انفجار واکنشی است که در آن نرخ سوختن مواد با سرعتی بیشتر از سرعت صوت انجام می شود که در نتیجه دما و فشار بسیار بالایی ایجاد می کند و باعث تولید موج انفجار که با سرعت بسیار زیادی منتشر می شود. بارگذاری ناشی از موج انفجار توسط سه پارامتر شکل موج، حداکثر اضافه فشار Pso و زمان تداوم t_d تعیین می‌شود. بر حسب فشار، انفجار، موجهای ناشی از آن به دو شکل موج ضربه و موج انفجار تقسیم می گردند.

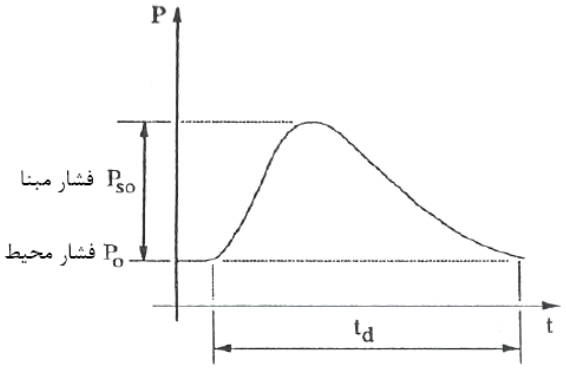
موج ضربه ناشی از انفجار مواد منفجره، جامد بوده و در آن فشار گاز های شکل گرفته از انفجار، با انتشار از چشمه انفجار گسترش و تا فشار مبنای Pso افزایش و سپس تا فشار محیطی کاهش می یابد که به این موج فاز مثبت می گویند. در نتیجه انتشار موج، گازهای حاصل از انفجار سرد شده و فشار آنها به مقدار ناچیزی کمتر از فشار اتمسفر می رسد. سپس بدلیل اختلاف فشار جهت جریان معکوس شده و به سمت مرکز انفجار باز می گردد. نتیجه این عمل کاهش فشار یا مکش خواهد بود که به آن فاز منفی گفته می شود.

فشار فاز منفی نسبتا کوچک و تدریجی بوده به طوری که در طراحی سازه های مقاوم در برابر انفجار در اکثر مواقع از آنها صرف نظر می شود ولی در مورد ملحقات ساختمان می تواند باعث پیامدهای جدی باشد. اثر فاز منفی در هنگام ورود جبهه موج به محیط داخل ساختمان قابل توجه است. موج فشار ناشی از انفجار مواد منفجره گازی و مایع بوده و از ان میزان فشار به

صورت تدریجی تا فشار مبنای انفجار Pso افزایش و سپس تا مقدار فشار محیطی Po، کاهش می یابد. موج فشار معمولا فاز منفی ندارد(شکل ۲). در شکل های ۱ و ۲، t_d برابر مدت زمان فاز مثبت انفجار است که به نوعی زمان دوام انفجار است.



شکل۱- مشخصات موج ضربه،[۶]



شکل۲- موج فشار،[۶]

۳- فشار مبنای انفجار PSO

حداکثر اضافه فشار ناشی از انفجار هوایی (PSO) را فشار مبنای واقعی انفجار گویند. برای تعیین فشار مبنای انفجار از حرکت موج انفجار، روابط مختلفی توسط محققین ارائه شده است که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود:

روابط براد[۱]

فشار مبنای انفجار Pso در حوزه نزدیک، و در حوزه میانی و یا دور طبق روابط زیر به دست می آید[۶]:

$$p_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad (p_{so} > 10 \quad kg/cm^2) \qquad (۱)$$

$$p_{so} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad (0.1 < p_{so} < 10 \quad kg/cm^2) \qquad (۲)$$

۱ - Brode

در رابطه (۲و۱) Z: فاصله مقیاس شده است و مطابق رابطه (۲-۳) محاسبه می شود:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (۳)$$

R: فاصله خرج انفجار تا محل مورد نظر (متر) W: وزن معادل خرج انفجار بر حسب وزن TNT معادل (کیلوگرم)

رابطه هنریش[۲]

$$p_{so} = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.54}{Z^2} + \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad (0.05 \le Z < 0.3) \quad (۴)$$

$$p_{so} = \frac{6.194}{Z} + \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \quad (0.3 \le Z < 1) \quad (۵)$$

$$p_{so} = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad (1 \le Z \le 10) \quad (۶)$$

روابط براد انطباق خوبی با نتایج تجربی برای فواصل میانی و دور از چشمه انفجار دارد، در حالیکه روابط هنریش برای انفجار حوزه نزدیک انطباق خوبی با نتایج تجربی از خود نشان می دهد[۶].

۴- معرفی سازه مورد نظر

در این پژوهش، یک ساختمان بتنی ۴ طبقه که دارای پلان به ابعاد ابعاد ۱۲*۱۲ متر و ارتفاع تمام طبقات یکسان و برابر ۴ متر در نظر گرفته شده است. ساختمان مذکور در شهر تهران و واقع بر خاک تیپ ۲ مطابق استاندارد ۲۸۰۰ می باشد. فرض می شود ساختمان در هر دو جهت x و y دارای سیستم قاب خمشی و اتصال تیرها به ستونها به صورت صلب و اتصال پای ستونها گیردار می باشد. طراحی متعارف سازه به کمک نرم افزار رایج طراحی ساختمان های طبقاتی ETABS، مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و تحت اثر بارهای مرده،زنده و زلزله براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان انجام شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع تمام طبقات یکسان و برابر ۴ متر فرض می شود. در نتیجه طراحی ابعاد ستونها برابر ۴۰*۵۰ سانتیمتر و دارای ۱۰ عدد آرماتور طولی شماره ۲۸ و ابعاد تیرها ۴۰*۴۰ سانتینتر و دارای ۸ عدد آرماتور طولی شماره ۲۵ و خاموتها دارای شماره ۱۲ به فاصله ۱۵ سانتیمتر از هم در نظر گرفته می شوند.

۵- تعریف مصالح در نرم‌افزار ABAQUS

در این تحقیق دو نوع مصالح بتن و فولاد مورد استفاده قرار گرفته است که برای مدل کردن خصوصیات هر کدام، از مدل رفتاری مختص آن ماده بهره برده‌ایم و به تعریف پارامترهای مربوط به هر مدل پرداخته‌ایم. برای تعریف مشخصات الاستیسیته[۳] مصالح از مواد ایزوتروپیک[۴] که مدول الاستیسیته آنها در تمام جهات یکسان می‌باشد استفاده گردیده است.

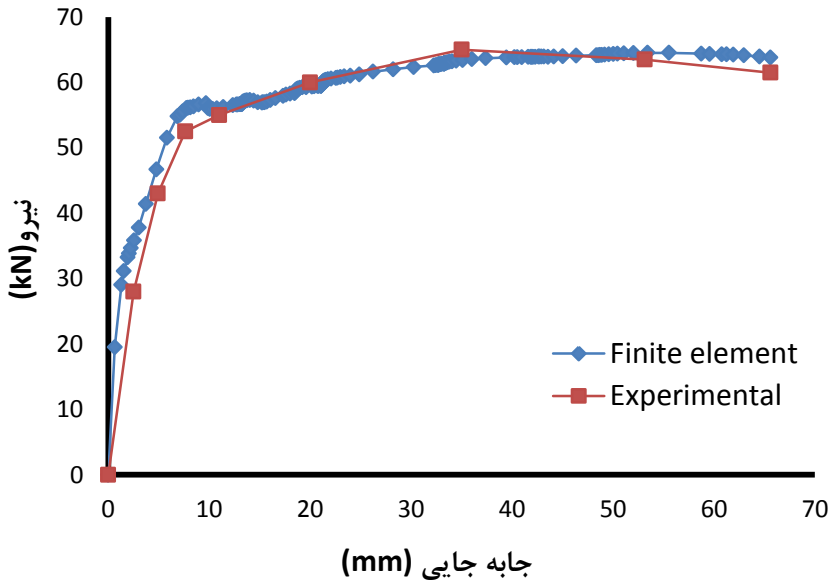
بتن: برای مدل‌سازی بتن شیوه‌ها و گزینه‌های مختلفی در نرم‌افزار ABAQUS موجود است که با عنایت به رفتار ترد و شکننده بتن از گزینه Concrete Damage Plasticity استفاده می‌شود[۸]. در این گزینه امکان وارد نمودن نقاط مختلف منحنی تنش – کرنش بتن در کشش و فشار وجود دارد.

۲ - Henrych
۳ Elasticity
٤ Isotropic

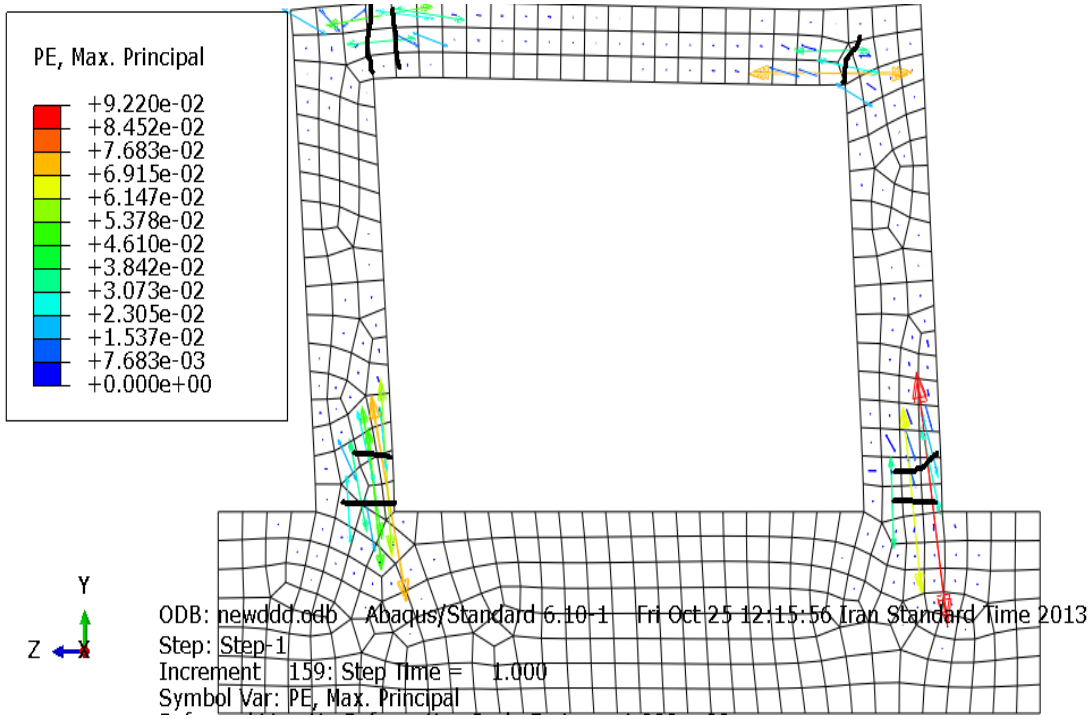
فولاد: میزان مدول الاستیسیته فولاد مصرفی ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسگال و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است. برای تعریف مشخصات پلاستیسیته مصالح از منحنی دو خطی تنش- کرنش فولاد با میزان سخت‌شوندگی نیم درصد برای مدلسازی منحنی تنش- کرنش استفاده شده است. مصالح تعریف شده دارای قابلیت سخت‌شوندگی سینماتیک می‌باشند.

۶- صحت سنجی عملکرد مدل رفتاری

جهت بررسی صحت عملکرد المان‌ها و مدل‌های رفتاری نرم افزار ABAQUS برای مصالح بکار رفته، از نتایج مدل آزمایشگاهی یک قاب بتن مسلح استفاده شده است [۸]. شکل ۳ نتایج عددی و آزماشگاهی را برای منحنی نیرو- تغییر مکان جانبی این قاب نمایش می‌دهد. مقایسه نتایج در شکل ۳ نشان دهنده انطباق قابل قبول عملکرد مدل عددی می‌باشد. بعلاوه شکل ۴ محل تشکیل مفاصل پلاستیک و موقعیت ایجاد ترک‌ها را با استفاده از مدل اجزای محدود در وضعیت تغییر مکان نهایی قاب نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که که این نتایج نیز انطباق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی دارند.



شکل۳- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی منحنی نیرو- تغییر مکان جانبی قاب بتن مسلح

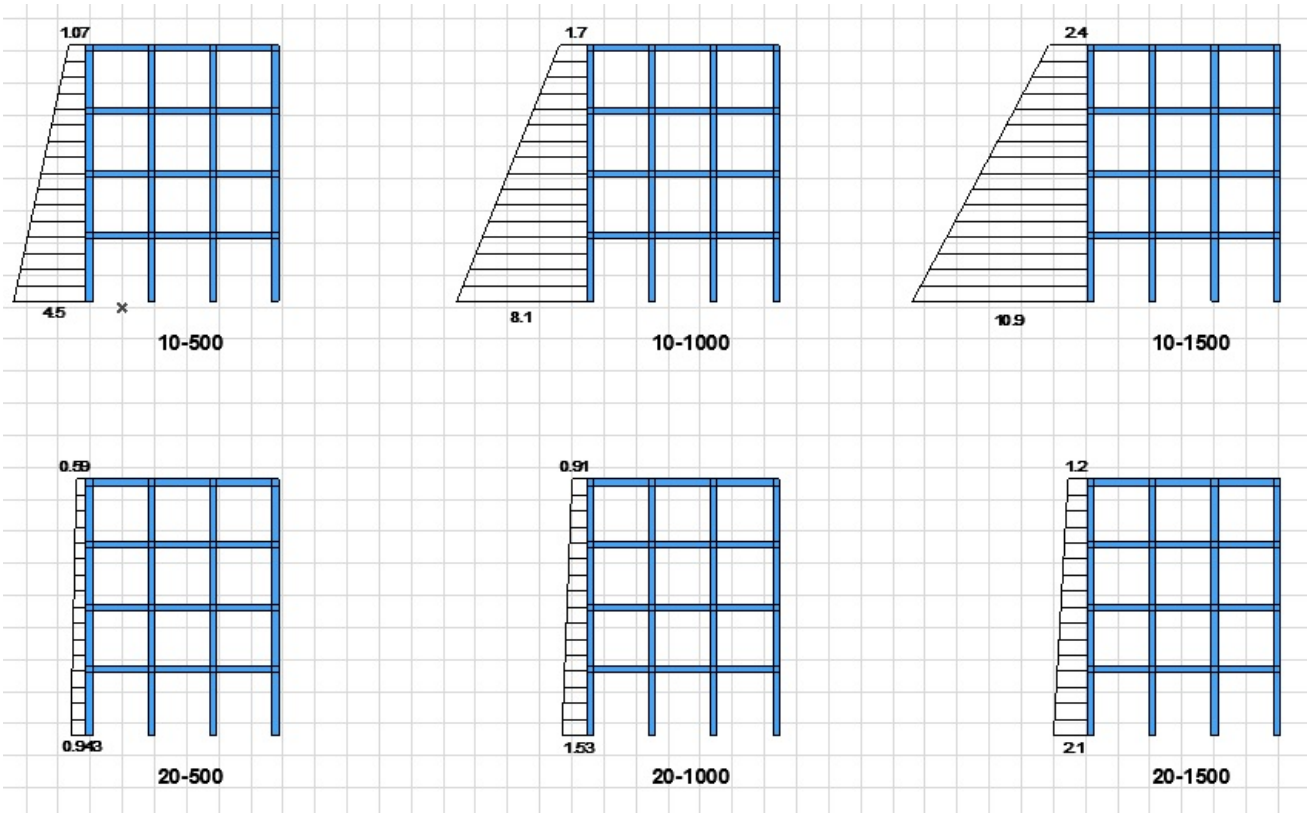


شکل۴- محل تشکیل کرنش‌های پلاستیک و موقعیت ترک‌ها در قاب بتن مسلح با استفاده از مدل اجزای محدود

۷- تحلیل سازه در برابر انفجار

با توجه به تقارن موجود در ساختمان و برای کاهش در زمان انجام تحلیل، قابها بصورت جداگانه و دو بعدی در نظر گرفته میشوند. شکل ۵ مقادیر و فواصل فرض شده برای ماده منفجره تا ساختمان و همچنین توزیع فشار ناشی از موج انفجار بر سازه را نشان می دهد. با توجه به شکل مقرر است اثر بارگذاری انفجار روی قاب بتنی ناشی از ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT واقع در فواصل ۱۰ و ۲۰ متری از ساختمان مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. با توجه به ماهیت بار انفجار وارد بر ساختمان از گزینه تحلیل دینامیکی غیر خطی صریح[۵] توسط نرم افزار ABAQUS استفاده می شود که در آن از روش تفاضل مرکزی برای حل معادلات حرکت استفاده می کند. قابل ذکر است که در این پژوهش جهت بررسی صحت عملکرد المان‌ها و مدل‌های رفتاری نرم افزار ABAQUS برای مصالح بکار رفته، از نتایج مدل آزمایشگاهی یک قاب بتن مسلح استفاده شده است [۷].

۵ Explicite



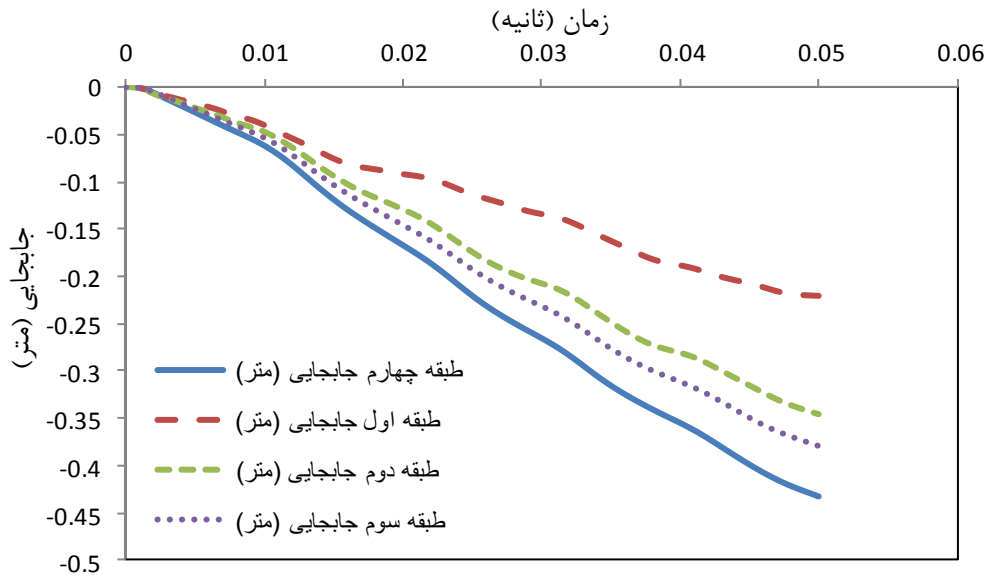
شکل ۵- مقادیر بارگذاری (برحسب مگاپاسکال) با توجه به فاصله (متر) و وزن ماده منفجره(کیلوگرم)

۸- نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی

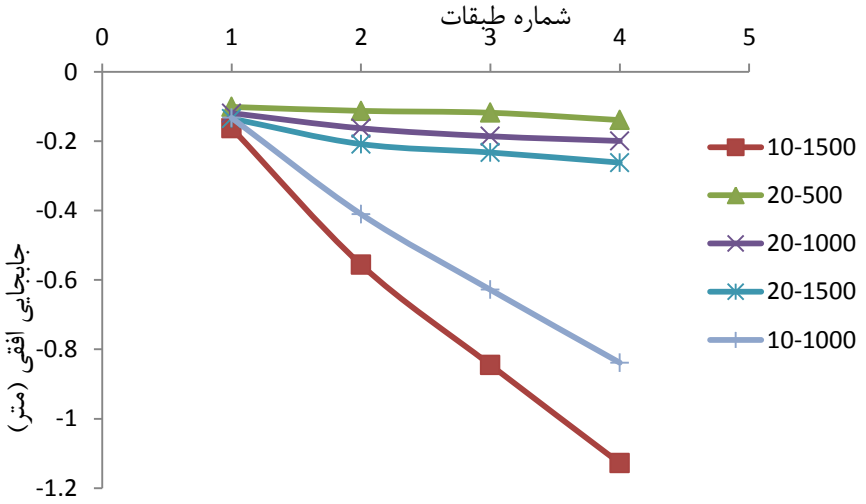
در این قسمت به بررسی و مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی ناشی از انفجار پرداخته می‌شود. بعنوان نمونه، نمودار تاریخچه زمانی جابجایی طبقات قاب ناشی از انفجار ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲۰ متری ازساختمان در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه با شکل، مشاهده میشود که جابجایی افقی قاب با گذشت زمان به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. بعلاوه، در طبقات بالاتر میزان جابجایی افقی افزایش یافته است و این افزایش به صورت خطی می‌باشد. به منظور مقایسه روند تغییر مکان جانبی در برابر فاصله و میزان مواد منفجره، شکل ۷ جابجایی افقی طبقات را بر حسب شماره طبقه در زمان ۰/۰۳ ثانیه به عنوان زمان مرجع نشان میدهد. بر اساس نتایج این شکل می‌توان بیان کرد که کاهش فاصله و افزایش مقدار ماده منفجره در طبقات بالاتر تاثیر چشم گیری بر افزایش تغییر مکان جانبی سازه دارد. شکل ۸ مقایسه تغییر مکان جانبی طبقات برای بارگذاری انفجار و همچنین بار زلزله ناشی از طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ را نشان میدهد با توجه به نتایج شکل مشاهده میشود که میزان تغییر مکان ناشی از اثر زلزله طرح بسیار کمتر از تغییر مکان ناشی از انفجار مواد منفجره فرض شده می باشد.

شکل ۹ تغییرات برش پایه ساختمان بر حسب زمان ناشی از انفجار ماده منفجره با مقادیر وزنی مختلف و به ازای فواصل گوناگون ازساختمان را نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج این شکل مشخص است بیشترین میزان برش پایه در زمان تقریباً ۰/۰۱ ثانیه اتفاق می‌افتد. ضمنا با افزایش میزان مواد منفجره مقدار برش پایه افزایش می‌یابد، همچنین هرچه موقعیت انفجار به اقاب نزدیک تر باشد میزان برش پایه نیز افزایش یافته است. شکل ۱۰ مقایسه حداکثر برش پایه ساختمان را در دو حالت بارگذاری انفجار و زلزله طرح نشان میدهد. مشاهده میشود که مقدار برش پایه ناشی از انفجار میتواند به مراتب بیشتر از مقدار

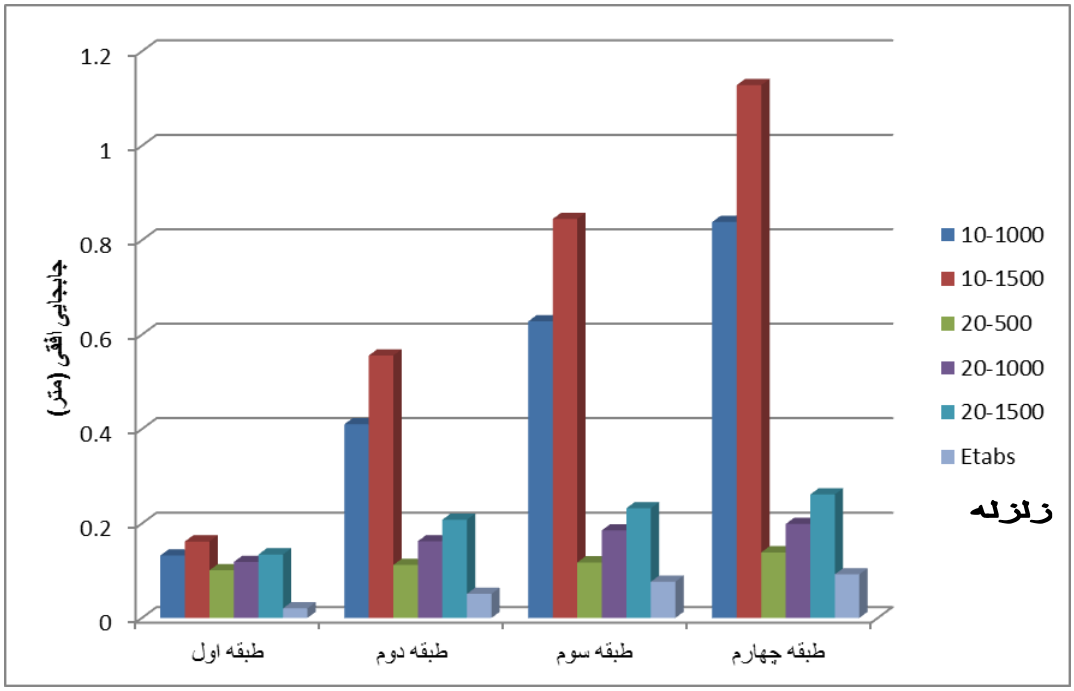
نظیر آن در اثر زلزله باشد. با توجه به مقادیر نشان داده شده در شکل ۱۰، با دو برابر شدن میزان مواد منفجره میزان برش پایه دو برابر نمی شود بلکه حدود ۴۲ درصد افزایش پیدا می کند و با دو برابر شدن فاصله انفجار تا سازه مقدار برش پایه حدود ۶۷ درصد کاهش می یابد.



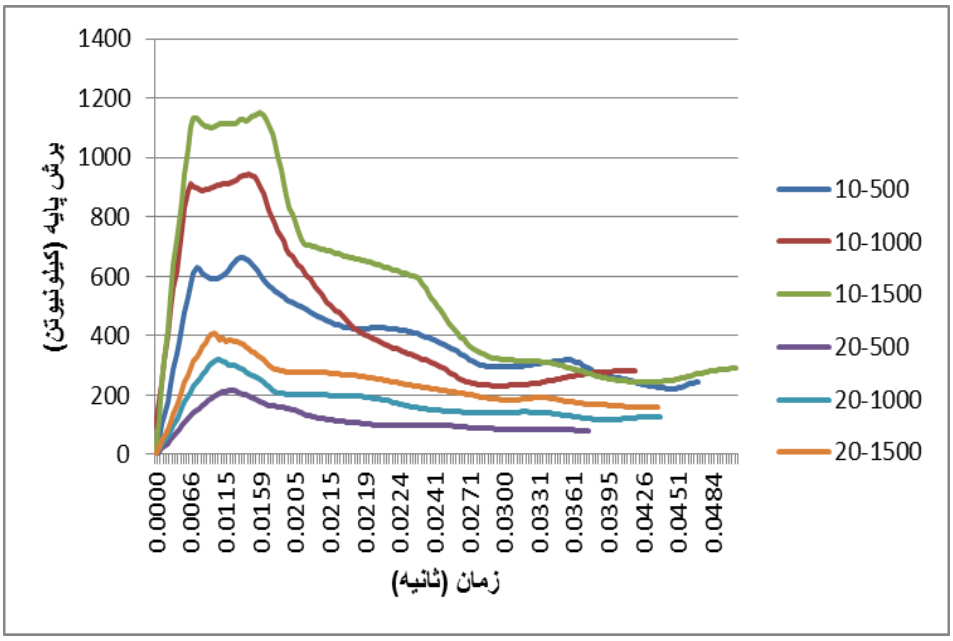
شکل۶ - منحنی‌های جابجایی طبقات قاب برای میزان ۱۵۰۰ کیلوگرم مواد منفجره و در فاصله ۲۰ متری از ساختمان



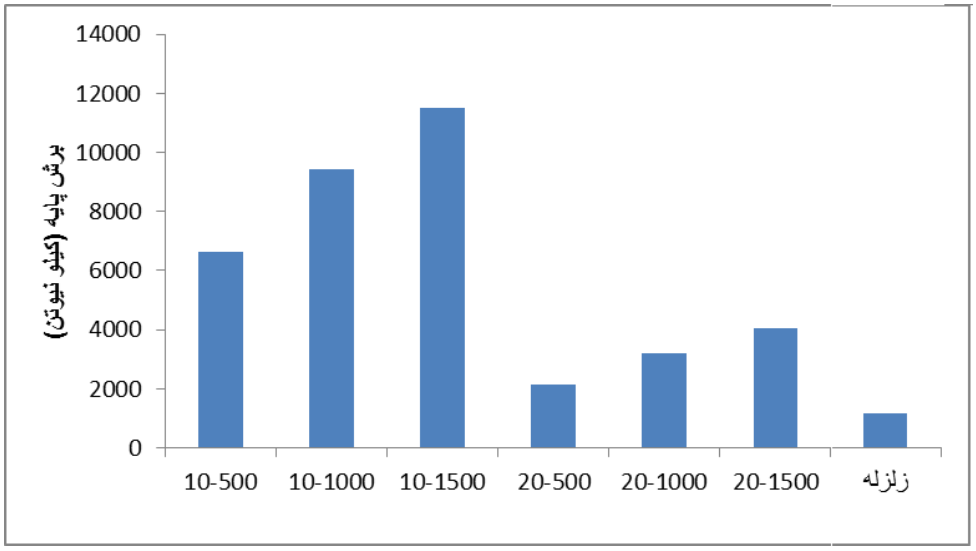
شکل۷- منحنی جابجایی طبقات در زمان مرجع برابر ۰.۰۳ ثانیه



شکل۹- مقایسه حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات برای بارگذاری انفجار و زلزله



شکل۹- برش پایه بر اساس میزان مواد منفجره (کیلوگرم) و فاصله از سازه (متر)



شکل ۱۰- برش پایه حداکثر حاصل از قله هر نمودار زمان- برش.

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پس از معرفی و نحوه مدل سازی امواج ناشی از انفجار به منظور صحت سنجی عملکرد نرم افزار آباکوس در مدل‌سازی، از نتایج موجود آزمایشگاهی یک قاب بتن مسلح استفاده گردید. سپس به کمک نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، تحلیل‌های دینامیکی برای ارزیابی اثر بار انفجار بر یک ساختمان بتنی چهار طبقه قاب خمشی صورت پذیرفت.

نتایج عددی بدست آمده نشان میدهد که اگر سازه ای بر اساس ضوابط مقاوم لرزه ای طراحی و اجرا شده باشد باید برای مقاومت در برابر بارهای انفجاری مورد بازنگری دقیق و مجدد قرار گیرد. همچنین نتایج حاصل از تحلیل‌ها بر حسب منحنی-های تغییر مکان و برش پایه نشان می‌دهد که:

- دو برابر شدن میزان مواد منفجره، برش پایه را حدود ۴۲ درصد افزایش می‌دهد و با دو برابر شدن فاصله انفجار تا سازه مقدار برش پایه حدود ۶۷ درصد کاهش می یابد.

- با دو برابر شدن میزان مواد منفجره، مقدار حداکثر جابجایی طبقات نیز به میزان ۴۳ درصد افزایش می یابد. ضمنا با دو برابر شدن فاصله مقدار جابجایی حداکثر طبقات به میزان ۷۶ درصد کاهش می یابد.

- میزان برش پایه حاصل از تحلیل لرزه‌ای برای ساختمان مورد مطالعه در این مقاله به مراتب کمتر از مقادیر نظیر حاصل از تحلیل انفجاری می‌باشد.

مراجع

[۱] Bradford and Culbertson, (۱۹۶۷), “Design of Control Houses to Withstand Explosive Forces”, Loss . Preventton, (۱), American Institute of Chemical Eng., New York, pp ۲۸-۳۰.

[۲] Forbes, (۱۹۸۲), “Design of Blast-Resistant Buildings in Petroleum and Chemical Plants”, Safety and Accident Prevention in Chemical Operations, ۲nd Edt., pp ۴۸۹-۵۰۶.

[۳] Rouzsky, N, (۱۹۸۸), “Blast-resistance Control Buildings”, Structural Safety (۵), p ۲۵۳-۲۶۶.

[۴] ASCE-Manuals and reports on engineering practice-NO.۴۲, “Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects,”

[۵] Safety Guide, SG-۲۲. (۱۹۷۸), “Sitting and Construction of new Control Houses for Chemical Manufacturing Plants”, Manufacturing Chemists Association.

[۶] پیشنویس مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان،(۱۳۸۸)،" پدافند غیر عامل ، "مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

[۷] Hemati,A.,(۲۰۱۳) Investigation on flexural Behavior of the HPRFCC Beams and Frame. Ph.D Dissertation. Semnan University, Semnan.Iran.

[۷] سروش نیا. س و بهشتیان.ن (۱۳۹۲)، کاملترین مرجع کاربردی ABAQUS ، انتشارات نگارنده دانش

[۸] Hemati,A.,(۲۰۱۳) Investigation on flexural Behavior of the HPRFCC Beams and Frame. Ph.D Dissertation. Semnan University, Semnan.Iran.