



اثرات انفجار بر ساختمان های بتنی مقاوم در برابر زلزله

محمود بزرگوار^۱، احمد شوشتری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

ashoosht@um.ac.ir

خلاصه

در این مقاله، رفتار ساختمان های بتنی مقاوم در برابر زلزله که در براساس آیین نامه ۲۸۰۰ طراحی شده اند در برابر بارهای انفجاری بررسی می شود. بدین منظور، یک ساختمان ۴ طبقه مسکونی بتنی تحت ترکیبات مختلف بارگذاری قرار می گیرد و به صورت سه بعدی به کمک نرم افزار المان محدود ABAQUS تحلیل می شود. سپس عملکرد سازه تحت این بارگذاری ها بررسی می شود. در ادامه پاسخ های ناشی از بارگذاری انفجار نظیر برش پایه و جابجایی طبقات با پاسخ های لرزه ای نظیرشان مقایسه می شوند و مقایسه پاسخ های موجود آمده ناشی از انفجار و زلزله نشان می دهد که مدت زمان بارهای انفجاری با اینکه بسیار کمتر از زلزله می باشد ولی برش پایه و جابجایی بیشتری در ساختمان ایجاد می کند. بنا بر نتایج بدست آمده، ساختمانهای مقاوم در برابر زلزله برای مقاومت در برابر بارهای انفجاری باید مورد ارزیابی مجدد قرار گیرند.

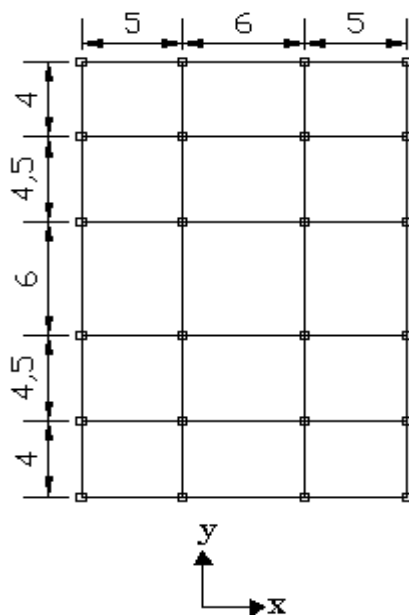
کلمات کلیدی: بارهای انفجاری، ارزیابی عملکرد، ساختمان بتنی مقاوم لرزه ای، نرم افزار ABAQUS

۱. مقدمه

امروزه با گسترش حملات انفجاری وارده به ساختمان ها، بررسی دقیق رفتار سازه ها تحت بارهای انفجاری یک ضرورت محسوب می شود. از آنجا که ایران، در روی کمر بند زلزله قرار گرفته است، غالباً در طراحی ساختمانها به رفتار لرزه ای توجه میگردد. لذا رفتار سازه های مقاوم لرزه ای تحت بارهای انفجاری در این مقاله مورد کنکاش قرار میگیرد تا نقاط ضعف آنها بهتر مشخص گردد. شکل پذیری، پیوستگی اعضای سازه ای، مقاومت، سختی از جمله عواملی هستند که نقش مهمی را در بقای سازه ها تحت هر دو نوع بار لرزه ای و انفجاری ایفا می کنند. در این مقاله رفتار ساختمانهای بتنی که در طراحی آنها ضوابط لرزه ای مد نظر قرار گرفته اند تحت اثر بارهای انفجاری قرار میگیرند و برای حصول نتیجه ی دقیقتر به صورت سه بعدی مورد تحلیل واقع میشوند.

۲. ساختمان مورد بررسی

در این پژوهش، یک ساختمان بتنی ۴ طبقه با کاربرد مسکونی که پلان آن دارای ابعاد ۱۶×۲۳ متر میباشد، در نظر گرفته شده است. سیستم باربری جانبی سازه در هر دو جهت X و Y به صورت قاب خمشی انتخاب شده است. اتصال تیرها به ستون ها به صورت صلب و اتصال پای ستون ها گیردار می باشد. در طراحی ساختمان از بتن با مقاومت فشاری ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و از فولاد با تنش جاری شدن ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع استفاده شده است. طراحی متعارف سازه به کمک نرم افزار رایج طراحی ساختمان های طبقاتی، ETABS، مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۱] و تحت اثر بارهای مرده، زنده و زلزله که بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۲] محاسبه گشته اند، انجام شده است. محل احداث ساختمان شهر مشهد، و در روی زمینی با خاک نوع II بنا شده است. در شکل ۱، پلان ساختمان نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع تمام طبقات یکسان و برابر ۳ متر می باشد. ضمناً مشخصات مقاطع تیر و ستونها برای قابهای داخلی و خارجی در امتدادهای X، عرضی (۱۶ متر)، و Y، طولی (۲۳ متر) در جداول ۱ تا ۴ به تفکیک ارائه شده اند.



شکل ۱- پلان ساختمان ۴ طبقه (ابعاد به متر میباشند).

جدول ۱- مشخصات قاب های خارجی عرضی (در جهت محور X) - تمامی ابعاد به سانتیمتر میباشند.

طبقه	مقطع تیر و آرماتور گذاری آن	مقطع ستون و آرماتور گذاری آن
1	40x40; 5#20top; 3#20bottom	50x50; 12#25
2	40x40; 5#20top; 3#20bottom	40x40; 10#25
3	30x40; 4#20top; 2#20bottom	40x40; 10#25
4	40x40; 3#20top; 2#20bottom	40x40; 10#25

جدول ۲- مشخصات قاب های داخلی عرضی (در جهت محور X) - تمامی ابعاد به سانتیمتر میباشند.

طبقه	مقطع تیر و آرماتور گذاری آن	مقطع ستون و آرماتور گذاری آن	
		داخلی	خارجی
1	40x40; 7#20top; 3#20bottom	50x50; 12#25	50x50; 12#25
2	40x40; 7#20top; 3#20bottom	50x50; 12#25	40x40; 10#25
3	40x40; 6#20top; 3#20bottom	40x40; 10#25	40x40; 10#25
4	40x40; 4#20top; 3#20bottom	40x40; 10#25	40x40; 10#25

جدول ۳- مشخصات قاب های داخلی طولی (در جهت محور Y) - تمامی ابعاد به سانتیمتر میباشند.

طبقه	مقطع تیر و آرماتور گذاری آن	مقطع ستون و آرماتور گذاری آن
1	40x40; 4#20top; 3#20bottom	50x50; 12#25
2	40x40; 4#20top; 3#20bottom	40x40; 10#25
3	30x40; 4#20top; 2#20bottom	40x40; 10#25
4	30x40; 3#20top; 2#20bottom	40x40; 10#25

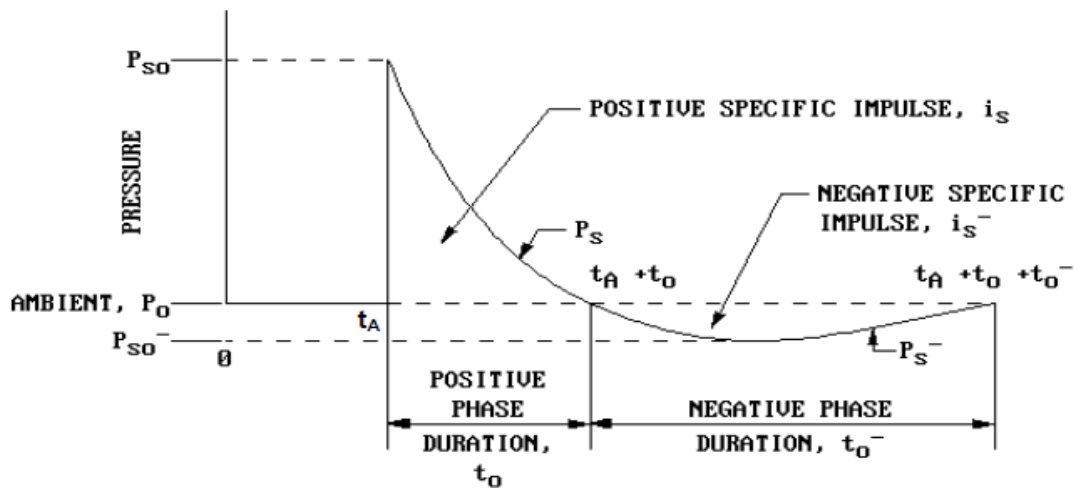


جدول ۴- - مشخصات قاب های خارجی طولی (در جهت محور Y) - تمامی ابعاد به سانتیمتر میباشد.

طبقه	مقطع تیر و آرماتورگذاری آن	مقطع ستون و آرماتورگذاری آن	
		داخلي	خارجي
1	40x40; 6#20top; 4#20bottom	50x50; 12#25	50x50; 12#25
2	40x40; 6#20top; 4#20bottom	50x50; 12#25	40x40; 10#25
3	40x40; 5#20top; 3#20bottom	40x40; 10#25	40x40; 10#25
4	40x40; 4#20top; 3#20bottom	40x40; 10#25	40x40; 10#25

۳. بارگذاری انفجاری

در اثر تمام انفجارها موجی از هوا آزاد می شود که به نام موج ضربه ای شناخته می شود. این موج هوای بسیار متراکمی می باشد که به صورت کروی با سرعتی بسیار زیاد از منبع انفجار به سمت خارج حرکت می کند. در شکل ۲، منحنی تاریخچه زمانی بار انفجار نشان داده شده است. در طول چند هزارم ثانیه، فشار ناشی از فشار اتمسفر (P_0) به فشار بیشینه ($P_{S_0}^+$) می رسد و در طول چند صدم ثانیه دوباره به فشار اتمسفر باز می گردد، و در ادامه در طول چند دهم ثانیه فشار منفی ($P_{S_0}^-$) ایجاد می شود [۳]. در این پژوهش از فشار منفی صرف نظر شده است.

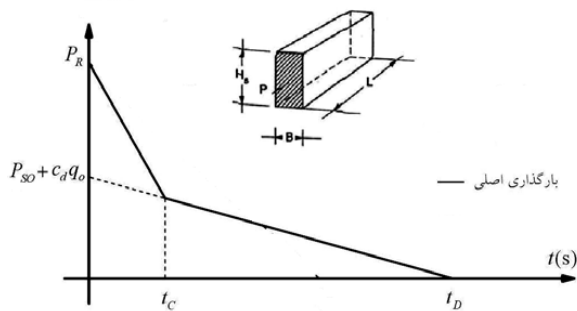


شکل ۲- منحنی تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [۳].

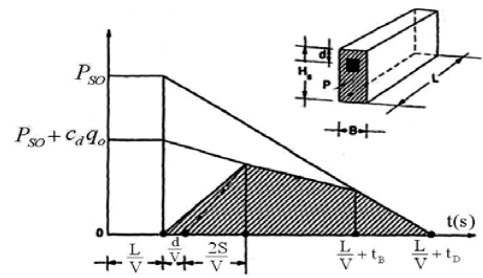
در این پژوهش سه حالت بارگذاری مختلف با مقادیر ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوگرم TNT در راستای محور تقارن طولی سازه و در فاصله ۱۵ متری از قاب جلویی سازه اعمال می شود. در انفجار دو پارامتر مهم مستقل وجود دارد که عبارتند از میزان مواد منفجره که بر حسب TNT معادل می شود (W) و فاصله مواد منفجره از سازه (R). حاصل این دو کمیت به صورت پارامتر Z (فاصله مقیاس شده) معرفی می گردد.

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

در رابطه (۱) W بر حسب کیلوگرم و R بر حسب متر می باشد. برای هر یک از سه حالت بارگذاری بارهای وارده به تیرها و ستونها به صورت مجزا محاسبه و در فایل ورودی درج میگردد. لازم به ذکر است که فشارهای ناشی از انفجار به صورت یکنواخت فرض شده است. بدین ترتیب برای محاسبه فشار وارده بر انفجار مشخصات مرکز سطح ستون رو به انفجار در نظر گرفته شده است و در مورد تیرهای عرضی میانگین فشارهای وارده به ستون های میانی و کناری لحاظ شده است. در شکل ۳ نمودار بارگذاری انفجاری بر وجه جلو و پشت ستون نمایش داده شده است و بار واقعی وارده بر ستون معادل اختلاف این دو فشار می باشد [۵].



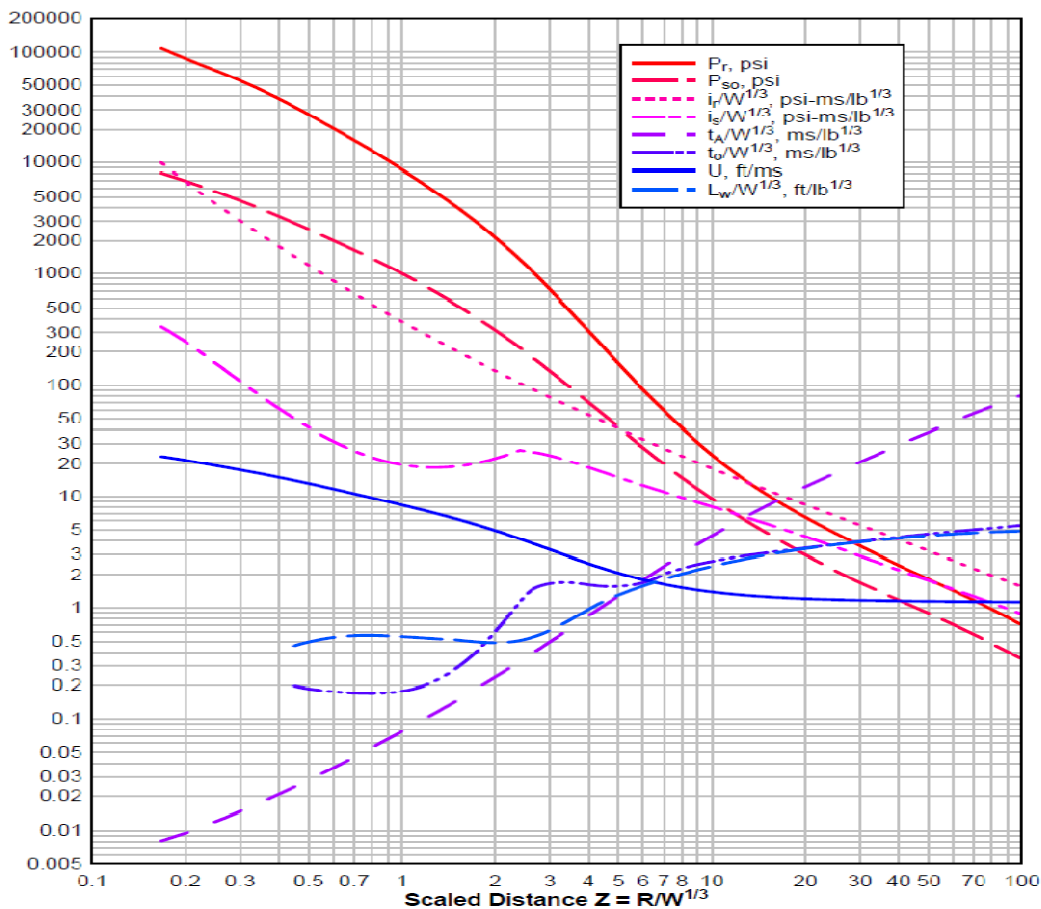
ب) تغییرات فشار بر روی وجه جلویی سازه



الف) تغییرات فشار بر روی وجه پستی سازه

شکل ۳- نمودار تغییرات فشار بر حسب زمان ناشی از انفجار روی وجوه مختلف ساختمان [۵].

در این نمودارها، P_{So} فشار افزوده، q حداکثر فشار دینامیکی ناشی جابجایی ذرات هوا می باشد و در واقع بادی است که در اثر انفجار بوجود می آید. $P_{r\alpha}$ حداکثر فشار موج بازتابی می باشد که در اثر جمع شدن فشار حاصل از برخورد بازتاب موج از سطح سازه می باشد. t_D مدت زمان اثر فشار دینامیکی، فاصله زمانی است که فشار حاصل از انفجار بر وجه جلویی سازه اثر می کند. t_C مدت زمان اثر موج بازتابی می باشد و بازه ای است که موج انفجار به وجه جلویی سازه رسیده و همزمان با موج بازتاب شده، حداکثر فشار ممکن را به سازه وارد می کند. t_B مدت زمان اثر موج ضربه ای برای وجوه کناری و پستی سازه می باشد. S نیز برابر با مقدار کوچکترین بین ارتفاع سازه و نصف طول وجه جلویی (رو به انفجار) سازه بر حسب متری باشد. در شکل ۴ کلیه پارامترهای لازم در محاسبه بار انفجاری و مدت زمان آن بر حسب Z های مختلف بدست می آید.



شکل ۴- پارامترهای موج شوک فاز مثبت برای انفجارات سطحی کروی [۱].



۴. تحلیل سازه تحت اثر انفجار

همانطور که قبلاً ذکر شد رفتار کل سازه با تمام قاب های طولی و عرضی و به صورت سه بعدی تحت اثر بارگذاری انفجاری بررسی می شود. بدین منظور از نرم افزار ABAQUS برای تحلیل اجزای محدود دینامیکی غیرخطی سازه استفاده می شود. در اکثر تحقیقاتی که در زمینه اثر بار انفجاری بر ساختمانها انجام شده است قابها به صورت جداگانه و دو بعدی منظور شده اند اما در این پژوهش برای دستیابی به نتایج دقیقتر، ساختمان به صورت کامل و به صورت سه بعدی تحلیل شده است. در این پژوهش مقاومت فشاری بتن ۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی بتن در ناحیه پلاستیک و بررسی تخریب در آن از مدل خسارت مومسانی بتن (Concrete Damage Plasticity) استفاده شد. مشخصات مورد استفاده برای مدل سازی بتن در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است [۶].

جدول ۵- مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در کشش

مقاومت کششی (مگاپاسکال)	کرنش ترک خوردگی	پارامتر تخریب در کشش
۵/۳	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰
۵/۳۱	۰/۰۰۰۱۷۶	۰/۲۵
۰/۵۸	۰/۰۰۱۵۳۹	۰/۹۹

جدول ۶- مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در فشار

مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	کرنش غیرالاستیک	پارامتر تخریب در فشار
۱۷/۵	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰
۲۵/۷	۰/۰۰۰۳۸	۰/۱۱۲
۳۴/۹	۰/۰۰۱۸۹	۰/۴۲۹
۳۵	۰/۰۰۲۱۸	۰/۴۶۶
۲۸	۰/۰۰۴۵۶	۰/۷۰۱

برای مدلسازی فولاد در تحلیل انفجاری باید به این نکته توجه داشت که آرماتورهای مدفون در بتن در ناحیه مومسانی وارد میشوند و لذا باید هر دو ناحیه کشسان و مومسان در نظر گرفته شود. در ناحیه کشسان، ضریب کشسانی ۲۱۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چگالی نسبی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض می شود. ویژگی های فولاد در ناحیه مومسانی نیز در جدول ۷ ارائه شده اند.

جدول ۷- مقادیر تنش و کرنش واقعی فولاد

تنش واقعی (مگاپاسکال)	کرنش پلاستیک
۳۰۰	۰/۰۰۰
۳۵۰	۰/۰۲۵
۳۷۵	۰/۱۰۰
۳۹۴	۰/۲۰۰
۴۰۰	۰/۳۵۰



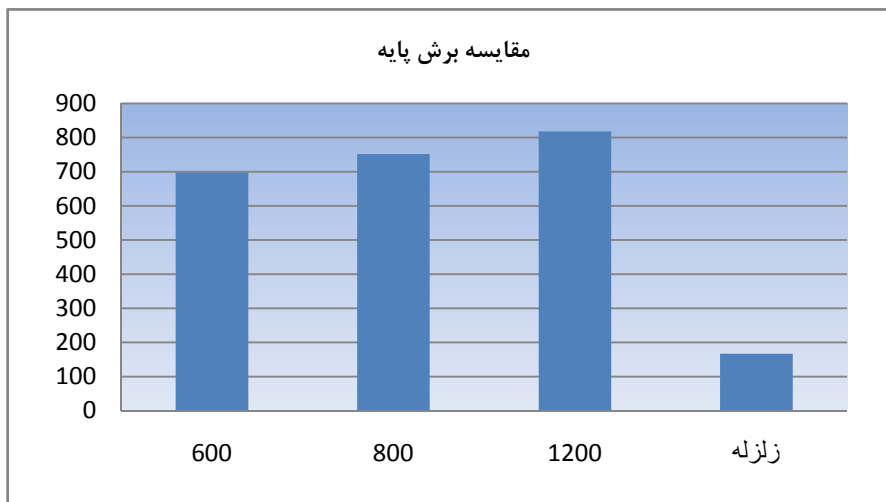
۵. پاسخ سازه به بارگذاری های انفجاری

در این قسمت به بررسی نتایج تحلیل انفجار پرداخته می شود. در شکل ۵ برش پایه ساختمان برای سه حالت مختلف شامل ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوگرم TNT به نمایش درآمده است. همانطور که مشاهده میشود برش پایه برای دو حالت اول بایکدیگر تفاوت عمده ای از خود نشان نمیدهند.



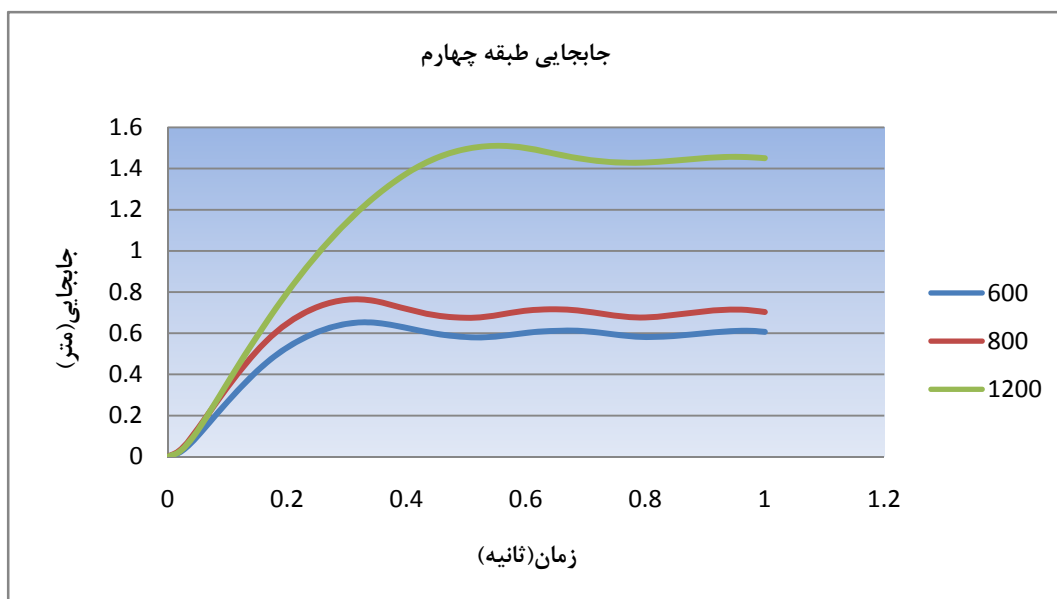
شکل ۵- نمودار تاریخچه زمانی برش پایه برای سه حالت بارگذاری انفجاری

در شکل ۶ حداکثر برش پایه در سه حالت بارگذاری انفجاری با برش پایه طراحی لرزه ای ساختمان مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده میشود برش پایه برای تحلیل لرزه ای حدود ۲۳٪ حداکثر تحلیل انفجاری با ۶۰۰ کیلوگرم TNT میباشد. این نسبت برای دو حالت دیگر بارگذاری انفجاری به ترتیب حدود ۲۱٪ و ۱۹٪ میباشد. در هر سه حالت تفاوت عمده بین برش پایه ناشی از انفجار با آنچه که ساختمان بر آن اساس طراحی شده است مشاهده میگردد.



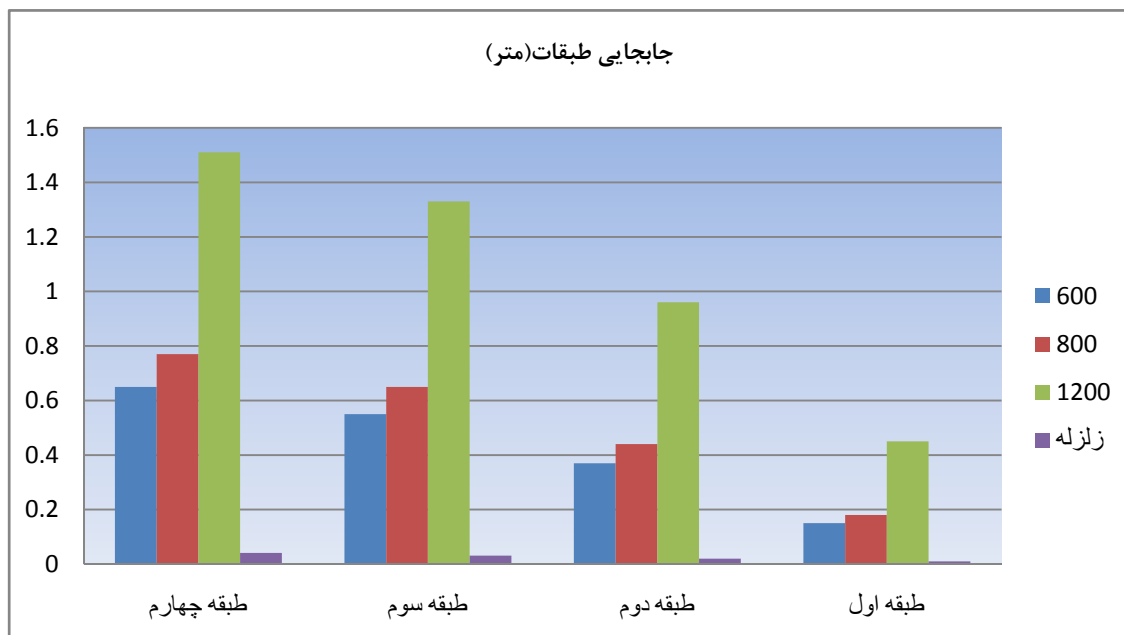
شکل ۶- مقایسه برش پایه های ماکزیمم ناشی از بارگذاری انفجاری و زلزله (بر حسب تن)

از دیگر پارامترهایی که در این پژوهش مقایسه شده اند، تغییر مکان پشت بام ساختمان میباشد. در شکل ۷ تغییر مکان ها در سه حالت بارگذاری انفجاری در بام (طبقه چهارم) با یکدیگر مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده میشود با افزایش مقدار ماده منفجره، تغییر مکان بام افزایش می یابد که البته متناسب با میزان افزایش مقدار ماده منفجره نیست. به عبارت دیگر با دو برابر شدن مقدار ماده منفجره از ۶۰۰ به ۱۲۰۰ کیلوگرم، حداکثر تغییر مکان حدود ۱۳۵٪ افزایش داشته است.



شکل ۷- مقایسه تغییر مکان جانبی سازه در سه حالت بارگذاری مختلف در تراز بام

برای مقایسه بیشتر حداکثر تغییر مکان جانبی در تراز هر ۴ طبقه ناشی از انفجار با مقادیر مختلف ماده منفجره با تغییر مکان جانبی ناشی از بار لرزه‌ای طراحی مقایسه شده و در شکل ۸ به نمایش درآمده‌اند. همانطور که مشاهده میشود تغییر مکان جانبی ناشی از زلزله بسیار کمتر از تغییر مکان جانبی ناشی از بارگذاری جانبی میباشد.



شکل ۸- مقایسه حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات برای سه حالت بارگذاری انفجاری و زلزله



۶. نتیجه گیری

هدف از این پژوهش یافتن اثرات بارهای ناشی از مقادیر مختلف ماده منفجره بر روی ساختمانهای بتنی است که بر اساس ضوابط آئین نامه‌ای در برابر زلزله مقاوم میباشند. با تحلیل سه بعدی ساختمان ۴ طبقه بتنی تحت اثر بار ناشی از انفجار و مقایسه آن با نتایج تحلیل استاتیکی بار زلزله مشخص شد که تغییر مکان تراز بام ناشی از ۶۰۰ کیلوگرم TNT حدود ۸ برابر تغییر مکان بام در طراحی لرزه‌ای میباشد. همچنین این افزایش در برش پایه ساختمان حدود ۳ برابر میباشد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش میتوان این موضوع را بیان نمود که در صورتیکه ساختمانی بر اساس ضوابط لرزه‌ای مقاوم طراحی و ساخته شده‌است باید برای مقاومت در برابر بارهای انفجاری مورد بازنگری دقیق و مجدد قرار گیرد. البته با افزایش میزان فاصله محل انفجار از ساختمان و همچنین کاهش میزان ماده منفجره فاصله بین نتایج دو تحلیل انفجاری و لرزه‌ای کاهش می‌یابد.

۷. مراجع

۱. مقررات ملی ساختمان، "مبحث نهم: طرح و اجرای ساختمان های بتنی".
۲. مقررات ملی ساختمان، "مبحث ششم: بارهای وارد بر ساختمان".
3. U.S. Department of the Army Technical Manual, 2008, TM5-1300 Structures to resist the effects of accidental explosions, United States Department of the Army, Navy and Air Force
4. Bing, L., Tso-Chien, P. and Anand., N., (2008), "A case study of the effect of cladding panels on the response of reinforced concrete frames subjected to distant blast loadings", Elsevier, Singapore
۵. محتشمی، ا.، سینایی، س.، شوشتری، ا.، ۱۳۸۹، ارزیابی رفتار قاب های فولادی در برابر بارهای انفجاری، مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
۶. توکلی زاده، م.، مجتهدپور، م.، فاضلی پور، م.، ۱۳۸۹، مقاوم سازی دیوارهای بتنی یکطرفه با ورق های FRP در برابر بار انفجاری عمود بر دیوار، مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد