

ارزیابی پاسخ غیر خطی قاب‌های بتن مسلح طراحی شده بر مبنای آیین‌نامه‌های زلزله در برابر بار انفجار

میلاذ لزگی^۱، رمضانعلی ایزدی فرد^{۲*}، محمدرضا لشگری^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شریف ۲- استادیار، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۵/۰۸/۲۵، پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۶)

چکیده

سازه‌های بتن مسلح از رایج‌ترین ساختمان‌های در معرض انفجار خودروهای بمب‌گذاری شده هستند. در این پژوهش ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه، با سامانه قاب خمشی ویژه برای تحمل بارهای ثقلی و زلزله، در معرض انفجارهای متعارف و شدید قرار گرفتند. در مرحله اول آسیب‌های موضعی ستون‌های نزدیک به محل انفجار و احتمال تخریب پیش‌رونده بررسی شد. در مرحله دوم عملکرد کلی ساختمان‌ها تحت فشار جبهه موج انفجار و زلزله بررسی و مقایسه شده‌اند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد تهدیدات تروریستی در ساختمان‌های کوتاه عوارض شدیدتری نسبت به ساختمان‌های متوسط و بلند ایجاد می‌کند و عمدتاً ناشی از تخریب ستون‌های نزدیک به محل انفجار و وقوع تخریب پیش‌رونده است. قاب‌های خمشی در صورتی که دچار آسیب موضعی ستون نشده باشند، تغییر مکان مطلق و نسبی طبقات، برش پایه و آسیب مفاصل کمتر از زلزله را تجربه کرده‌اند. از این رو باید عمده تلاش طراحان در جلوگیری از آسیب به عناصر سازه‌ای منفرد و ممانعت از تخریب پیش‌رونده باشد.

کلیدواژه‌ها: قاب خمشی ویژه، سازه‌های کوتاه، متوسط و بلندمرتبه، بار انفجار، تحلیل دینامیکی غیرخطی

Evaluation of Nonlinear Response of Reinforced Concrete Frames Designed According to Earthquake Codes and Subjected to Blast Loading

M. Lezgi, R. A. Izadifard*, M. R. Lashgari

International Imam Khomeini University

(Received: 15/11/2015; Accepted: 15/01/2017)

Abstract

Reinforced concrete structures are of the most common buildings exposed to vehicle bombs. In this study three typical structures were exposed to conventional and severe blasts. Three, six and ten story buildings with special moment frames designed according to earthquake were considered. Firstly, the local failure of first columns in front of explosion and the probability of progressive collapse were investigated and secondly, overall response of structures under explosion and earthquake was determined and compared. After analyses, it was found that explosions will create more severe consequences in low-rise structures than mid and high-rise structures, mostly due to the destruction of columns and the following progressive collapse. If columns are not damaged locally, there will be less severe responses in the frames due to explosion rather than earthquakes, containing displacement, drift ratio, base shear and plastic hinges. Therefore, major designer's efforts should be in preventing damage to individual structural elements and preventing progressive collapse.

Keywords: Special Moment Frame, Low, Mid and High-Rise Structures, Blast Loading, Nonlinear Dynamic Analysis

*Corresponding Author E-mail: izadifard@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

نتیجه گرفتند. اگرچه منظور نمودن ضوابط لرزه‌ای موجب افزایش استحکام سازه در برابر بارهای انفجاری می‌گردد ولی نمی‌تواند استحکام کافی را برای جلوگیری از تخریب سازه فراهم نماید. با توجه به تحقیقات فوق، بررسی هم‌زمان دو رفتار پاسخ کلی سازه و تخریب پیش‌رونده در سازه‌های بتن مسلح طراحی‌شده بر اساس آیین‌نامه زلزله ایران، موضوع تحقیقاتی بسیار مهم و ضروری است که در این مقاله بدان پرداخته شده است.

با انجام واکنش شیمیایی و ایجاد موج انفجار در ماده منفجره، حجم قابل توجه از گاز با فشار بالا (تا ۳۰۰ Kbar) و دمای زیاد (۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ درجه سلسیوس) تولید شده و حجم وسیعی را اشغال می‌نماید. بر روی این حجم لایه هوای فشرده‌ای تشکیل می‌شود که جبهه موج انفجاری است. مقدار این فشار که با فاصله گرفتن از مرکز انفجار تقلیل می‌یابد، از روابط و گراف‌های متعدد ارائه شده در مراجع مختلف قابل محاسبه است. رابطه (۱) از دقیق‌ترین روابط محاسبه فشار (Ps بر حسب kPa) ناشی از انفجار w کیلوگرم ماده TNT در فاصله R متری از مرکز ماده منفجره است [۱۷].

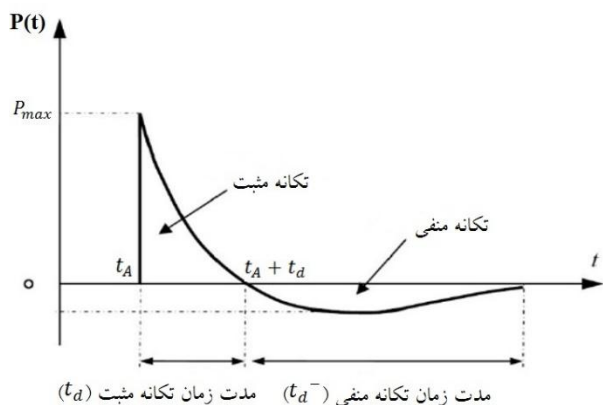
$$\log_{10} [\log_{10} P_s] = -0.1319X^2 - 0.3231X + 0.4644$$

$$X = \log_{10}(Z) \quad (1)$$

که در آن، Z فاصله مقیاس شده انفجار است (رابطه (۲)):

$$Z = R/W^{1/3} \quad (2)$$

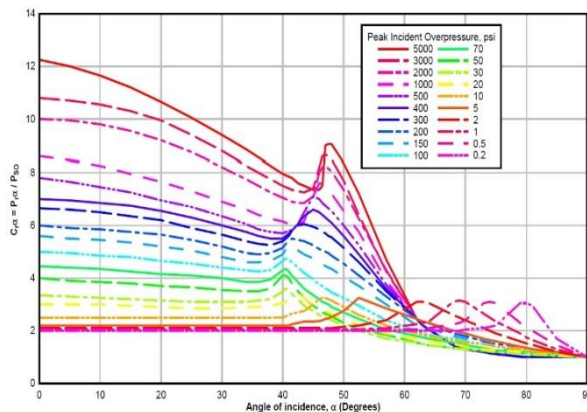
بعد از مدت زمان کوتاهی (Ts) فشار توده هوا با فشار محیط برابر می‌شود و پس از آن به مقادیر پایین‌تر از فشار پیرامونی نزول نموده و با ایجاد مکش موضعی هوای پیرامونی به درون منطقه انفجاری کشیده خواهد شد (شکل (۱)). معمولاً در محاسبه بارهای انفجاری از مکش فوق‌الذکر (فاز منفی) صرف‌نظر و تنها اثر تکانه ناشی از فشار مثبت در نظر گرفته می‌شود [۱۸ و ۱۹].



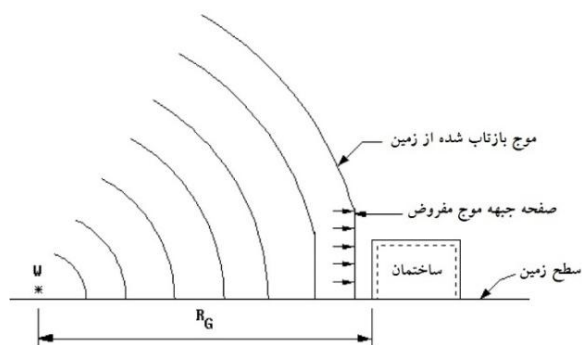
شکل ۱. فاز فشار و مکش در محیط اطراف انفجار [۲۰]

انفجار به عنوان یک پدیده فیزیکی آثار مختلفی بر محیط پیرامون خود دارد. استفاده از مواد منفجره چمدانی و یا خودرویی از چند کیلو تا حدود یک تن و نیز اصابت بمب‌های جنگی در اطراف ساختمان‌ها به عنوان تهدیدات رایج مطرح است. وقوع چنین حملاتی در قرن بیست و یک در مقیاس شهری افزایش چشمگیری یافته است. قاب بتن مسلح، سازه‌ای بسیار پر کاربرد در ساختمان‌های اداری، تجاری، نظامی، گردشگری و ... است که اگر چه بر اساس آیین‌نامه‌های متعارف در برابر بارهای ثقلی و زلزله طراحی می‌شوند ولی در معرض بارهای غیر متعارفی چون امواج انفجاری هستند. انجام آزمایش‌های میدانی انفجار بر روی قاب‌های ساختمانی بسیار پرهزینه، زمان‌بر و با محدودیت‌های فراوانی روبه‌رو است. از این رو پژوهش‌های اندکی در این زمینه وجود دارد که از جمله آن آزمون‌های میدانی بر روی سازه‌های بتن مسلح سه بعدی با نیروهای ثقلی متفاوت تحت انفجار سطحی توسط رستمی و ایزدی فرد [۱] است. به منظور شناخت گسترده‌تر سازه‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری پژوهش‌های گسترده‌ای با استفاده از شبیه‌سازی عددی و یا تحلیل‌های تئوریک مبتنی بر راست آزمایی با آزمایش‌های تجربی انجام شده است. بخش بزرگی از این تحقیقات بر رفتار اعضای سازه‌ای همچون تیرهای بتن مسلح با عملکرد خمشی تحت مقادیر متفاوت مواد منفجره [۲]، تیرهای با رفتار برشی [۳] و ستون‌های بتن مسلح تحت بار انفجار نزدیک [۴] متمرکز است. علی‌رغم وجود رایانه‌های قوی و پرسرعت، همچنان مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی سازه‌های بتن مسلح متشکل از تعداد زیادی المان‌های تیر و ستون تحت بار انفجار، پروژه‌ای پرهزینه و وقت‌گیر است. از این رو اغلب باید بین کارایی، دقت و زمان محاسبات عددی تعادلی منطقی به وجود آید. برخی محققین روش‌هایی مانند تحلیل مرحله‌ای [۵]، تحلیل یکپارچه با لحاظ معیارهای برآورد ریسک [۶] و استفاده از فن زیرسازه [۷] برای کاهش زمان محاسبات رایانه‌ای با دستیابی به دقت مورد نظر ارائه نمودند. با این حال عمده مطالعات در زمینه سازه‌های بتن مسلح زیر اثر بار انفجار معطوف به تخریب موضعی یک المان از سازه و به تبع آن تخریب پیش‌رونده سازه است [۷-۱۲] و مطالعات معدودی بر روی پاسخ کلی قاب بتن مسلح ناشی از انفجارهای دور یا نزدیک انجام شده است [۱۳-۱۵]. بررسی و همکاران [۱۶]، چند ساختمان دولتی که صرفاً تحت بار ثقلی و استانداردهای قبل از سال ۱۹۷۰ طراحی شده‌اند و موارد مشابه که در آن‌ها ضوابط لرزه‌ای استاندارد EC8 در نظر گرفته شده است را تحت بارگذاری انفجاری قرار داده و با مقایسه پاسخ‌های سازه‌ای

انفجار ناشی از یک ماده منفجره که بر روی زمین و یا خیلی نزدیک به زمین قرار دارد، یک انفجار سطحی در نظر گرفته می‌شود. موج اولیه انفجار توسط سطح زمین بازتاب و تقویت شده و موج منعکس شده را ایجاد می‌کند. به منظور تعیین کمیت‌های بیش فشار ایجاد شده توسط انفجار ناشی از منابع قدرتمند انفجاری در تماس با زمین، باید تغییرات و اصلاحاتی بر وزن یا توان مواد منفجره صورت گیرد. پیشنهاد می‌شود امواج انفجاری ناشی از انفجار در سطح، معادل امواج حاصل از انفجار در هوای آزاد با انرژی ۱/۸ برابر انرژی منبع اصلی در نظر گرفته شود [۱۸] و [۲۰]. شایان ذکر است اگر فرض کنید زمین یک انعکاس دهنده کامل باشد و هیچ انرژی به واسطه تولید گودال و شوک‌های زمینی تلف نشود، در آن صورت ضریب انعکاس ۲ خواهد بود. شکل (۴) نشان می‌دهد چگونه موج ناشی از انفجار سطحی در هوای پیرامون منتشر و به هدفی مانند ساختمان برخورد می‌کند [۲۰].



شکل ۳. نسبت فشار انعکاسی به فشار برخورد [۲۰]



شکل ۴. انتشار امواج انفجار سطحی [۲۰]

۲. روش تحقیق

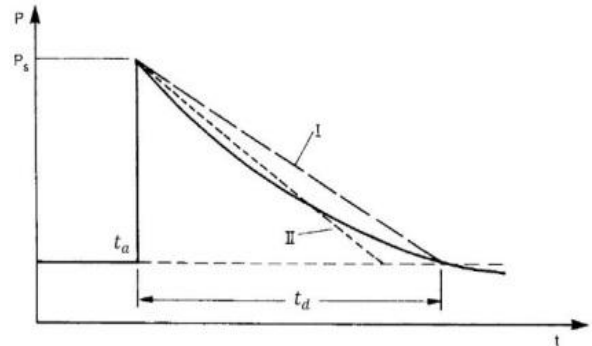
در این پژوهش به منظور اعمال فشارهای وارد شده از طرف ماده منفجره بر سازه، فرض شده است که دیوارهای میان قابی که در

سطح زیر نمودار فاز مثبت به تکانه فشاری (Im) موسوم است و از رابطه (۳) بر حسب Pa-s قابل محاسبه است [۱۷].

$$\log_{10}(I_m/W1/3) = [-3.423X^4 - 10.143X^3 - 7.558X^2 - 1.614X + 2.14]; Z < 0.8 \quad (3)$$

$$\log_{10}(I_m/W1/3) = [-0.070X^2 - 0.853X + 2.153]; Z \geq 0.8$$

ایده‌آل‌سازی نمودار زمان-فشار موج انفجار در شکل (۲) به تصویر درآمده است [۱۸]. مطابق این شکل موج انفجار ماده منفجره که پس از زمان t_a به نقطه مورد نظر می‌رسد، باعث ایجاد بیش فشار ناگهانی شده و سپس با کاهشی خطی به مدت زمان t_d به فشار محیط تنزل می‌یابد. شایان ذکر است در این نمودار توزیع فشار II طوری به دست آمده است که تکانه ایجاد شده در این توزیع خطی برابر تکانه ایجاد شده توسط توزیع واقعی فشار است و توزیع I توزیع محتاطانه پروفیل موج انفجار است.



شکل ۲. ایده‌آل‌سازی نمودار فشار- زمان ناشی از انفجار [۱۸]

با توجه به ساده‌سازی فوق، زمان بارگذاری فشار مثبت از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$t_d = \frac{I_m}{2P_s} \quad (4)$$

زمان رسیدن موج به نقطه مورد نظر روی سازه (t_a) از تقسیم فاصله آن از مرکز انفجار به سرعت جبهه موج (U_s) به دست می‌آید که سرعت جبهه موج مطابق رابطه (۵) است.

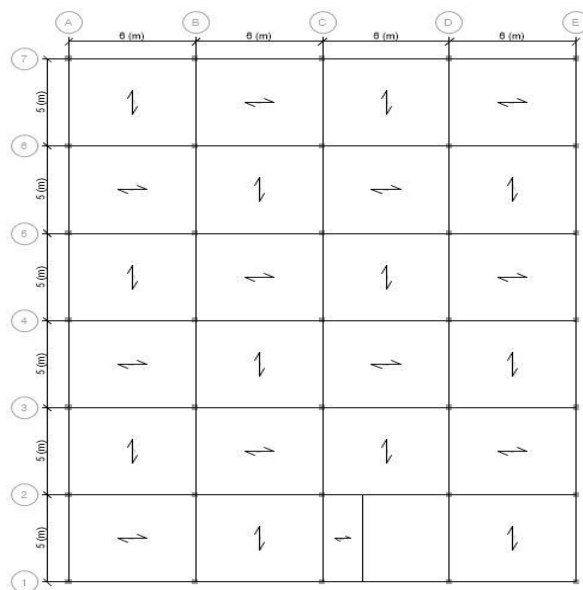
$$U_s = \sqrt{\frac{6P_s + 7P_0}{7P_0}} \cdot a_0 \quad (5)$$

a_0 سرعت صوت در محیط و P_0 فشار هوا در محیط اطراف است. بار گسترده وارد بر سطح سازه، معادل فشار انعکاسی (P_r) ناشی از برخورد موج انفجار با یک سطح سخت است که مقدار آن به وزن ماده منفجره، فاصله از محل انفجار و زاویه برخورد بستگی دارد و از گراف‌هایی مانند شکل (۳) و یا از روابط تقریبی (۶) قابل محاسبه است [۲۰].

$$P = P_i [1 + \cos(\theta) - 2\cos^2(\theta)] + P_r \cos^2(\theta) \quad (6)$$

حاشیه خیابان و یا در جنب دروازه (گیت)های حفاظتی منفجر می‌شود، با توجه به عرض پیاده‌روی خیابان‌ها و محوطه‌های ساختمان‌های نسبتاً مهم، فاصله مرکز انفجار تا سازه ۵ تا ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. از این رو برای بررسی رفتار سازه در بازه گسترده‌ای از شرایط محتمل، در یک مرحله مواد منفجره به وزن‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متری سازه قرار گرفته‌اند و در مرحله دوم به منظور بررسی اثر فاصله ماده منفجره تا سازه، ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره تی‌ان‌تی، در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری از سازه قرار گرفته و نتایج تحلیل‌ها بررسی خواهد شد.

در این مطالعه پاسخ سازه‌ها شامل جابه‌جایی طبقات، برش پایه، جابه‌جایی نسبی طبقات (دریفت) و نحوه شکل‌گیری مفاصل پلاستیک بررسی خواهد شد. با توجه به اینکه سازه‌های معمول، علاوه بر بارهای ثقلی نسبت به بارگذاری زلزله طراحی می‌شوند مقادیر این پارامترها ناشی از اثرات زلزله و انفجار با یکدیگر مقایسه می‌شوند. ساختمان‌های تحلیل شده با سقف تیرچه و بلوک بوده و موقعیت آن‌ها در شهر تهران فرض می‌شود، سامانه سازه در هر دو جهت قاب خمشی ویژه هست، کاربری ساختمان در همه طبقات اداری است و زمین محل اجرای ساختمان از نوع تیپ II (مطابق استاندارد ۲۸۰۰) در نظر گرفته می‌شود. پلان ساختمان‌ها یکسان، ابعاد دهانه‌ها در جهت طولی و عرضی به ترتیب ۵ و ۶ متر و ارتفاع طبقات ۳/۵ متر است (شکل ۶).



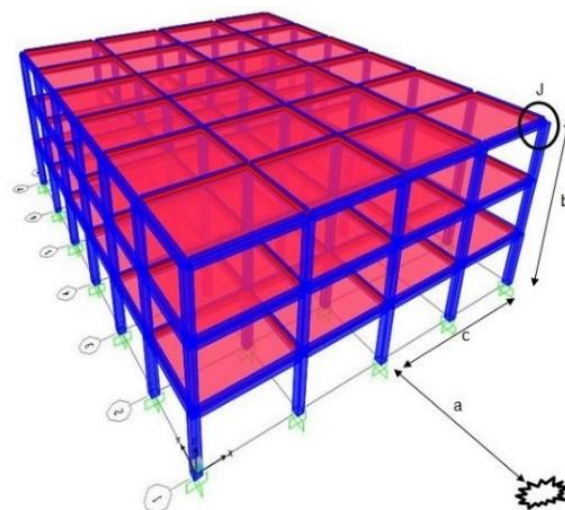
شکل ۶. پلان ساختمان‌های مورد مطالعه

در طراحی ساختمان‌ها از بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگا پاسکال و فولاد با تنش تسلیم ۴۰۰ مگا پاسکال استفاده شده

برابر انفجار قرار می‌گیرند از نوع پانل‌های پیش‌ساخته سه بعدی هستند و اگر چه ممکن است دچار آسیب‌هایی شوند، ولی بار را به تیرها و ستون‌های اطراف خود منتقل می‌کنند. جهت کاستن از حجم محاسبات رایانه‌ای بدون از دست دادن دقت جواب‌ها، بار وارد بر میان قاب با ترسیم خطوط نیم سازه، بین تیرها و ستون‌های اطراف آن توزیع می‌گردید، از این رو در این مدل‌سازی، دیوارهای میان قاب مدل نشده‌اند و محل اثر بارهای وارده از طرف انفجار برای تحلیل ستون منفرد در طول عضو و در تحلیل کل سازه، گره‌های اتصال تیرها و ستون‌ها هستند. مطابق شکل (۵) اگر فاصله بین ماده منفجره و یک نقطه اتصال تیر و ستون مانند I در راستای طولی a، در راستای عرضی c و در راستای z، b باشد، در آن صورت فاصله بین محل انفجار و نقطه مورد نظر و همچنین زاویه برخورد مطابق روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند.

$$R = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (7)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b^2 + c^2}{a^2}\right) \quad (8)$$



شکل ۵. محل وقوع انفجار نسبت به سازه

هدف از این پژوهش، بررسی پاسخ غیرخطی سازه‌های بتنی مسلح با در نظر گرفتن مقادیر مختلف بار انفجار در فواصل متفاوت از سازه است. در این مطالعه، بار انفجار بر ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه بتنی اعمال می‌شود. از آنجا که تهدیدات تروریستی معمولاً با جاسازی مواد منفجره در خودروها انجام می‌شود و مقدار آن بسته به نوع خودرو متغیر است، وزن‌های ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم برای انفجارهای متعارف قابل انجام توسط خودروهای سواری تا کامیونت، و ۱۰۰۰ کیلوگرم برای انفجار شدید توسط کامیون‌ها در نظر گرفته می‌شود. چون خودروهای حامل مواد در

حسب فاصله و زاویه برخورد موج متفاوت خواهد بود و عناصر سازه‌ای نزدیک به انفجار شدت بسیار زیادی را متحمل خواهند شد. از این رو یکی از اثرات انفجار بر سازه‌ها، خرابی‌های موضعی در یک و یا چند ستون و یا تیر است که ممکن است سامانه سازه‌ای را دچار خرابی پیش‌رونده کند. بنابراین لازم است ابتدا امکان خرابی اولین ستون مقابل انفجار به صورت موضعی بررسی شود و در صورتی که سازه مورد مطالعه دچار تخریب موضعی و به تبع آن تخریب پیش‌رونده نگردد اثرات کلی انفجار بر سازه بررسی خواهد شد.

۳. نتایج و بحث

به منظور بررسی تخریب موضعی المان‌ها، سختی جانبی تکیه‌گاه ستون میانی طبقه اول در جهت طولی به دست آمده و به صورت یک فنر در نرم‌افزار SAP2000 [۲۵] در انتهای ستون مدل شده است. مقدار سختی جانبی گره فوقانی ستون طبقه اول ساختمان‌های سه طبقه، شش طبقه و ده طبقه در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴. مقدار سختی اولین ستون ساختمان‌ها در جهت طولی

سختی kN/m	جابه‌جایی (متر)	ساختمان
۳/۱۲×۱۰۵	۳/۲×۱۰-۶	سه طبقه
۹/۶۸×۱۰۵	۱/۰۳×۱۰-۶	شش طبقه
۱/۶۵×۱۰۶	۰/۶×۱۰-۶	ده طبقه

هر یک از ستون‌های ساختمان‌ها تحت بارهای مختلف انفجاری با یک تحلیل دینامیکی غیر خطی آنالیز شده‌اند [۲۶]. بررسی اثر موضعی انفجار بر روی ستون‌های طبقه همکف ساختمان‌های شش و ده طبقه نشان می‌دهد به دلیل ابعاد قابل توجه ستون‌ها، انفجارهای متعارف (تا ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ده متر معادل فاصله مقیاس شده ۲/۱۵ تا ۱/۲۵ متر بر کعب کیلوگرم) و حتی انفجارهای بسیار شدید (۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله پنج متر و یا ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ده متر معادل فاصله مقیاس شده ۰/۶۳ و ۱ متر بر مکعب کیلوگرم) نتوانسته است موجب تخریب شدید موضعی و به تبع آن خرابی پیش‌رونده گردد (شکل‌های (۷ و ۸)). همان‌طور که در شکل (۹) دیده می‌شود در ساختمان سه طبقه به دلیل ابعاد کوچک‌تر ستون‌ها، انفجارهای معمولی ($Z > 1$) موجب آسیب ستون‌های طبقه همکف می‌شوند و در انفجارهای شدید ($Z < 1$) از ناحیه فروریزش (CP) تجاوز می‌نمایند و تخریب موضعی شدید را به دنبال خواهد داشت.

است. پس از تعیین مقدار بارهای ثقلی و جانبی مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۲۱] و بارگذاری لرزه‌ای بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [۲۲]، ساختمان‌ها در نرم‌افزار ETABS [۲۳] مدل‌سازی و مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۲۴] طراحی شده‌اند. مقاطع طراحی شده تیرها و ستون‌های ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه به ترتیب در جدول‌های (۱-۳) ارائه شده است.

جدول ۱. مقاطع اختصاص یافته به اعضای ساختمان سه طبقه

طبقه	مقطع ستون‌ها	مقطع تیرها
سوم	۴۰×۴۰	۳۰×۴۰
دوم	۴۰×۴۰	۳۰×۴۰
اول	۴۵×۴۵	۳۰×۴۰

جدول ۲. مقاطع اختصاص یافته به اعضای ساختمان شش طبقه

طبقه	مقطع ستون‌ها	مقطع تیرها
ششم	۴۰×۴۰	۳۰×۴۰
پنجم	۴۵×۴۵	۳۰×۴۵
چهارم	۵۰×۵۰	۳۰×۴۵
سوم	۵۰×۵۰	۴۰×۵۰
دوم	۶۰×۶۰	۴۰×۵۰
اول	۶۰×۶۰	۴۰×۵۰

جدول ۳. مقاطع اختصاص یافته به اعضای ساختمان ده طبقه

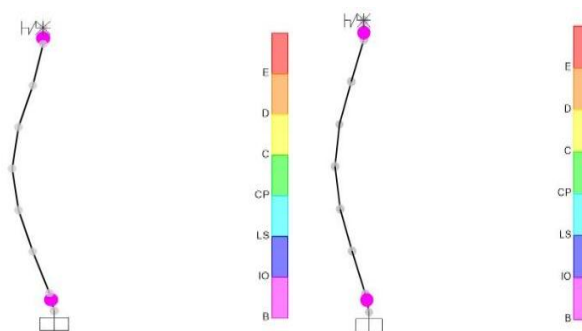
طبقه	مقطع ستون‌ها	مقطع تیرها
دهم	۴۰×۴۰	۳۰×۴۰
نهم	۵۰×۵۰	۴۰×۴۵
هشتم	۵۵×۵۵	۴۰×۴۵
هفتم	۵۵×۵۵	۴۰×۴۵
ششم	۶۰×۶۰	۴۰×۵۰
پنجم	۶۰×۶۰	۴۰×۵۰
چهارم	۶۰×۶۰	۴۰×۵۵
سوم	۷۰×۷۰	۴۰×۵۵
دوم	۷۰×۷۰	۴۰×۵۵
اول	۷۰×۷۰	۴۰×۵۵

با برخورد موج انفجار به سازه، بخش زیادی از وجوه پیرامونی سازه (و یا حتی کل وجوه ساختمان‌ها) تحت بار انفجاری قرار می‌گیرند. بدیهی است مقدار فشار وارده به نقاط مختلف سازه بر

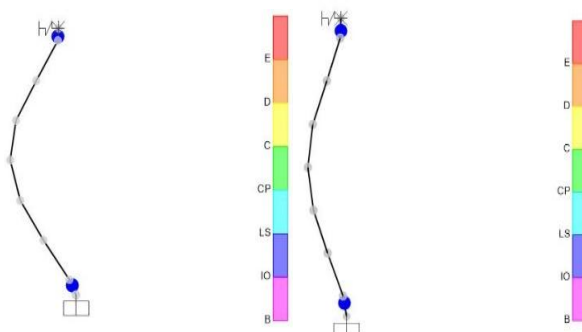
در سازه‌هایی که ستونی از آن‌ها تخریب می‌شود احتمالاً آسیب به المان‌های دیگر تسریع یافته و دچار پدیده تخریب پیش‌رونده در کل و یا بخش زیادی از سازه می‌گردند.

بررسی این پدیده خارج از هدف این مقاله است بنابراین ادامه پژوهش (بررسی رفتار کلی سازه در برابر انفجار) معطوف به ساختمان‌هایی خواهد بود که تخریب موضعی به دلیل فاصله مقیاس شده بزرگ و یا تقویت موضعی، در هیچ یک از ستون‌های آن ایجاد نشده است و سازه توانسته است به صورت یکپارچه در برابر بار جانبی عمل نماید. گره‌های ساختمان‌های مورد بحث، بر اساس توضیحاتی که در بخش بارگذاری داده شد تحت اثر برآیند بار انفجاری وارد بر سطح بارگیر قرار گرفته و تحلیل غیرخطی دینامیکی شده‌اند. شکل (۱۰-الف) تغییر مکان بام ساختمان سه طبقه را تحت انفجار مقادیر مختلف ماده TNT در فاصله ۱۰ متری نشان می‌دهد. وزن‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره به ترتیب باعث تغییر مکان حداکثر ۱/۲۴، ۵/۴۰، ۸۶/۸، ۱۵۳/۸ میلی‌متر و تغییر مکان ماندگار ۸/۹، ۱۷/۵، ۵۳، ۳۴/۸- در بام این ساختمان شده‌اند

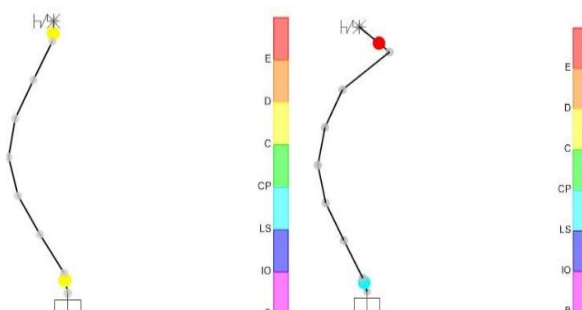
همان‌طور که قبلاً مطرح شد انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ده متری منجر به تخریب موضعی ستون طبقه همکف شد از این رو به تبع آن تخریب پیش‌رونده محتمل خواهد بود. بنابراین از تحلیل فوق می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگر به روش‌هایی مانند تقویت موضعی ستون و یا انتقال مناسب بار جانبی به گره‌ها، از تخریب موضعی ستون جلوگیری گردد عملکرد یکپارچه سازه در برابر چنین انفجار شدیدی منجر به تغییر مکان بیش از ۱۵ سانتی‌متر در بام می‌شود (معادل جابه‌جایی نسبی ۱/۵ درصد). شکل (۱۰-ب) تغییر مکان بام ساختمان سه طبقه ناشی از انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود با کاهش فاصله (به ازای مقدار مشخص TNT) که با افزایش بار جانبی همراه است تغییر مکان بام افزایش می‌یابد ولی اگر فاصله به ۵ متر کاهش یابد علی‌رغم افزایش تکانه انفجاری، بار وارده با شدت زیاد به صورت موضعی اعمال می‌گردد و فرصت لازم برای توزیع آن در محدوده وسیع از سازه به دست نمی‌آید. بنابراین در این حالت آسیب موضعی افزایش می‌یابد (قبلاً امکان تخریب پیشرفته در این حالت دیده شد) ولی تغییر مکان بام که عمدتاً ناشی از رفتار یکپارچه سازه به شرط عدم وقوع تخریب پیش‌رونده است کاهش یافته است. شکل‌های (۱۱ و ۱۲) تغییر مکان بام ساختمان‌های شش و ده طبقه را تحت دو حالت بارگذاری وزن ثابت و فاصله ثابت نشان می‌دهد.



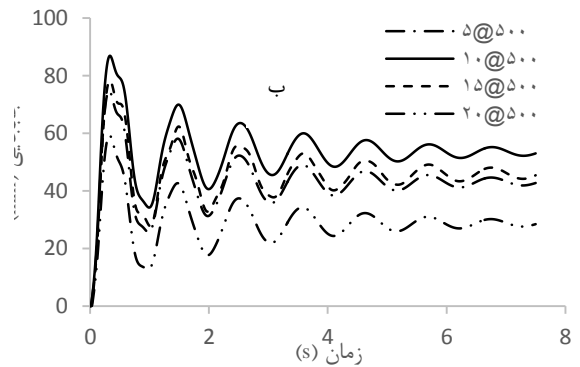
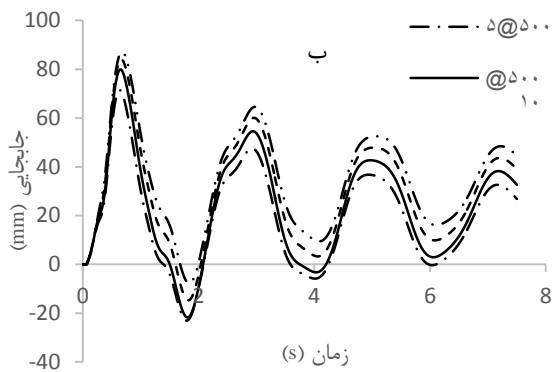
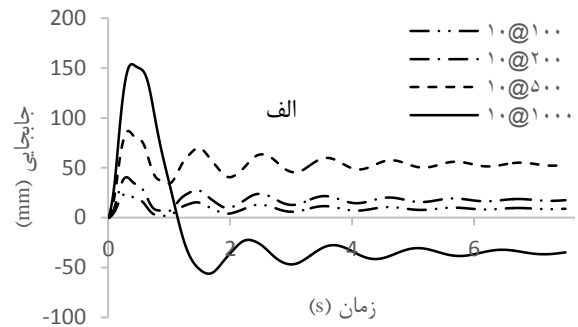
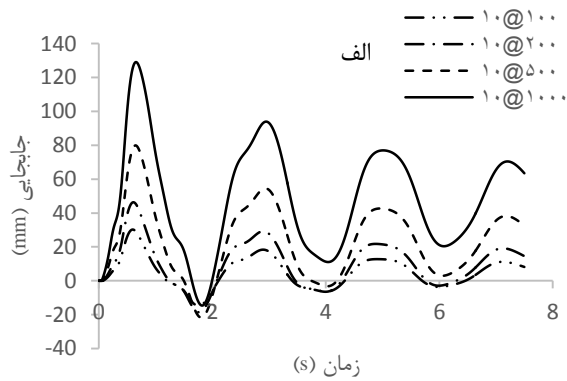
شکل ۷. اثر انفجار بر نزدیک‌ترین ستون ساختمان ده طبقه. الف: ۵۰۰ کیلوگرم در فاصله ۵ متر. ب: ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متر



شکل ۸. اثر انفجار بر نزدیک‌ترین ستون ساختمان شش طبقه. الف: ۵۰۰ کیلوگرم در فاصله ۵ متر. ب: ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متر



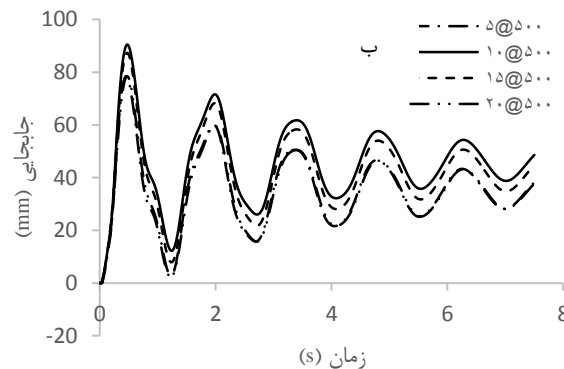
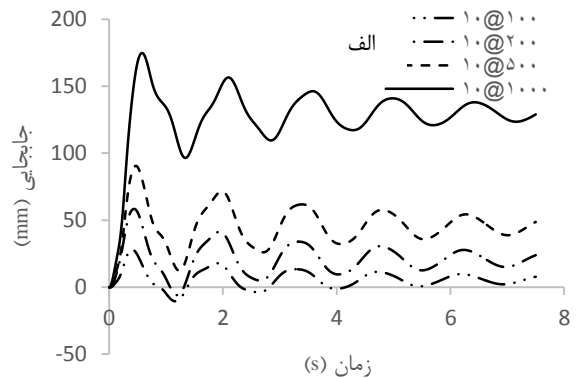
شکل ۹. اثر انفجار بر نزدیک‌ترین ستون ساختمان سه طبقه. الف: ۵۰۰ کیلوگرم در فاصله ۵ متر. ب: ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متر



شکل ۱۲. تغییر مکان بام ساختمان ده طبقه در برابر الف) وزن‌های مختلف خرج در فاصله ثابت ۱۰ متری. ب) ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف

شکل ۱۰. تغییر مکان بام ساختمان سه طبقه در برابر الف) وزن‌های مختلف خرج در فاصله ثابت ۱۰ متری. ب) ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف

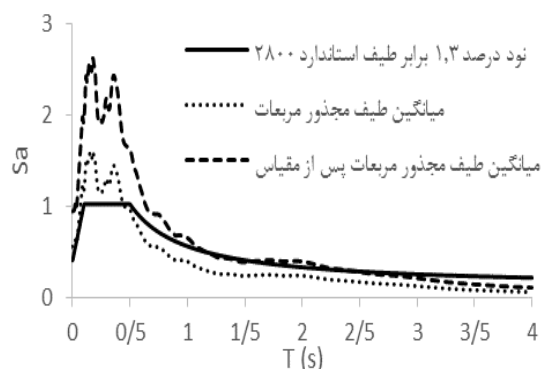
برای یافتن پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله، از سه رکورد زلزله منجیل (۱۹۹۰)، طبس (۱۹۷۸) و پارک فیلد (۱۹۶۶) استفاده شده است. این رکوردها مطابق استاندارد ۲۸۰۰ طوری مقیاس شده‌اند که برای هر پیروید در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ برابر پیروید اصلی ساختمان، مقدار متوسط طیف جذر مجموع مربعات مربوط به تمام زوج مؤلفه‌ها بیش از ده درصد از ۱/۳ برابر مقدار متناظر طیف طرح استاندارد کمتر نشود [۲۱]. در این راستا ابتدا هر جفت شتاب‌نگاشت به بیشینه شتاب خود تقسیم شده‌اند، سپس با روش SRSS برآیند آن‌ها محاسبه گردید. در مرحله بعد طیفی با میانگین‌گیری برآیند سه زوج شتاب‌نگاشت ساخته شد که این طیف نباید در بازه پیرویدی ذکر شده از $1/17 (= 1/3 \times 0/9)$ برابر طیف استاندارد ۲۸۰۰ کمتر گردد. در شکل (۱۳) متوسط طیف جذر مجموع مربعات برای ساختمان شش طبقه نشان داده شده است. بازه پیرویدی برای این ساختمان ۰/۱۵ ثانیه تا ۱/۱۶ ثانیه است. همان طور که ملاحظه می‌شود در این بازه، پس از اعمال ضرایب مقیاس به هر رکورد، میانگین طیف جذر مجموع مربعات بیشتر از ۹۰ درصد ۱/۳ برابر طیف استاندارد ۲۸۰۰ شده است.



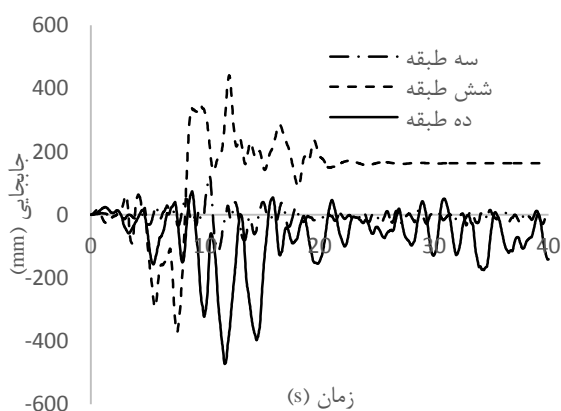
این فرآیند به طور مشابه برای ساختمان‌های سه و ده طبقه نیز انجام گرفته و ضرایب مقیاس مرتبط با زلزله‌های مذکور برای آنالیز ساختمان‌های مورد مطالعه به شرح جدول (۵) است. تغییر مکان بام ساختمان‌ها در برابر زلزله در شکل (۱۴) ارائه شده است.

شکل ۱۱. تغییر مکان بام ساختمان شش طبقه در برابر الف) وزن‌های مختلف خرج در فاصله ثابت ۱۰ متری. ب) ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف

۰/۶۳ تا ۲/۵) نشان داده شده است. همچنین در هر ردیف نسبت جابه‌جایی نسبی ناشی از انفجار به زلزله در داخل پراتز ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در همه موارد انفجار نتوانسته است جابه‌جایی نسبی بام ساختمان‌ها را از مقادیر متناظر زلزله بیشتر نماید. در جدول (۷) همین بررسی برای خرج‌های متفاوت انفجاری در فاصله ۱۰ متری (انفجار شدید تا معمولی معادل Z از ۱ تا ۲/۱۵) انجام شده است و مشاهده می‌شود جز در ساختمان کوتاه سه طبقه در حالت بارگذاری انفجاری بسیار شدید، در دیگر موارد جابه‌جایی نسبی بام ناشی از زلزله به مراتب بیشتر از مقادیر مشابه ناشی از انفجار است.



شکل ۱۳. متوسط طیف جذر مجموع مربعات و مقیاس آن بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰



شکل ۱۴. تغییر مکان بام ساختمان‌ها در اثر اعمال زلزله

جدول ۶. نسبت جابه‌جایی نسبی حداکثر مرکز جرم بام ساختمان‌ها تحت اثر ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT

فاصله (متر)	سه طبقه	شش طبقه	ده طبقه
۵	۰/۰۰۸ (۰/۵۷)	۰/۰۰۵۴ (۰/۱۱)	۰/۰۰۳۲ (۰/۱۶)
۱۰	۰/۰۰۹۷ (۰/۶۹)	۰/۰۰۶۳ (۰/۱۳)	۰/۰۰۳۴ (۰/۱۷)
۱۵	۰/۰۰۸۹ (۰/۶۳)	۰/۰۰۶۴ (۰/۱۳)	۰/۰۰۳۶ (۰/۱۸)
۲۰	۰/۰۰۶۲ (۰/۴۴)	۰/۰۰۶۰ (۰/۱۲)	۰/۰۰۳۹ (۰/۱۹)
زلزله	۰/۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲

جدول ۷. نسبت جابه‌جایی نسبی حداکثر مرکز جرم طبقات ساختمان‌ها (mm) تحت اثر انفجار در فاصله ۱۰ متری از سازه

مقدار ماده منفجره (کیلوگرم)	سه طبقه	شش طبقه	ده طبقه
۱۰۰	۰/۰۰۲۶ (۰/۱۸)	۰/۰۰۲۷ (۰/۰۵)	۰/۰۰۱۷ (۰/۰۸)
۲۰۰	۰/۰۰۴۵ (۰/۳۲)	۰/۰۰۴۴ (۰/۰۸)	۰/۰۰۲۵ (۰/۱۲)
۵۰۰	۰/۰۰۹۷ (۰/۶۹)	۰/۰۰۶۳ (۰/۱۲)	۰/۰۰۳۴ (۰/۱۷)
۱۰۰۰	۰/۰۱۸ (۱/۲۸)	۰/۰۱۲۷ (۰/۲۵)	۰/۰۰۵ (۰/۲۵)
زلزله	۰/۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲

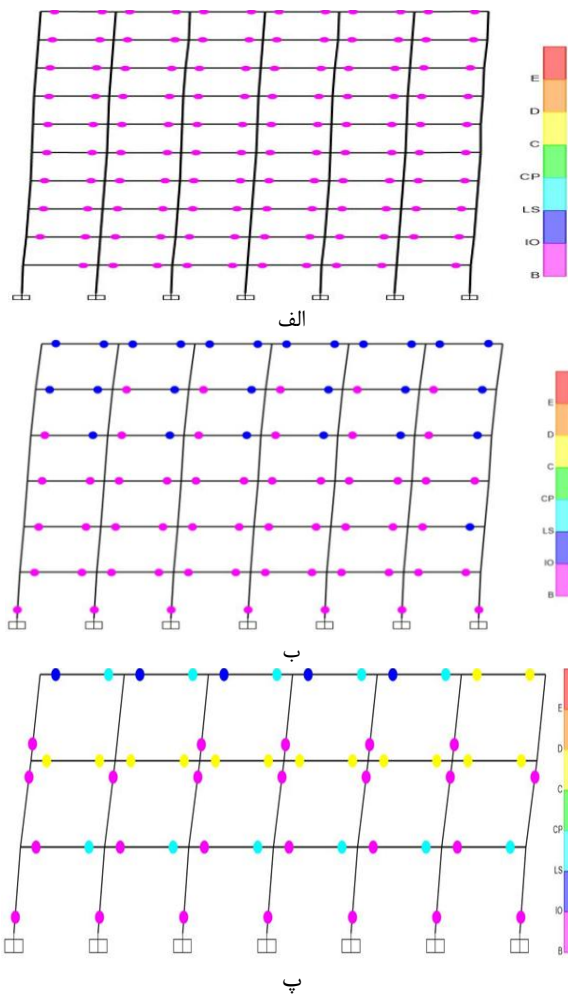
در جدول (۵) تغییر مکان حداکثر طبقات ساختمان‌های مورد بررسی تحت اثر زلزله ارائه شده و با مقادیر متناظر ناشی از انفجار شدید ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۰ متری (Z = ۱) مقایسه شده است. تغییر مکان ناشی از انفجار شدید در طبقات اول تا سوم ساختمان سه طبقه به ترتیب ۲۷، ۳۵ و ۲۵ درصد بیش از تغییر مکان ایجاد شده در زلزله است. ملاحظه می‌شود که درصد افزایش تغییر مکان در طبقات پایین‌تر به دلیل نزدیکی به منبع انفجار بیشتر از طبقات فوقانی است. با افزایش تعداد طبقات ساختمان، اثر انفجار شدید کاهش می‌یابد به طوری که در ساختمان ده طبقه و شش طبقه (جز در طبقه اول) تغییر مکان ناشی از انفجار در همه طبقات کمتر از تغییر مکان ناشی از زلزله است.

جدول ۵. تغییر مکان حداکثر مرکز جرم بام ساختمان‌ها (mm) تحت زلزله و انفجار

طبقه	سه طبقه		شش طبقه		ده طبقه	
	انفجار	زلزله	انفجار	زلزله	انفجار	زلزله
۱	۲۸۱/۰۵	۳۷/۸۴	۱۳/۲۹	۱۶/۶۳	۱۵/۴۹	۱۱/۰۶
۲	۷۹/۴۸	۱۰۱/۳۵	۴۵/۹۵	۴۶/۱۵	۴۸/۷۰	۲۷/۷۶
۳	۱۲۲/۹۵	۱۵۲/۸۹	۹۸/۶۳	۷۵/۰	۹۳/۳۲	۴۴/۶۹
۴	-	-	۱۶۶/۸۷	۹۵/۴۳	۱۴۷/۰۷	۵۹/۶۸
۵	-	-	۲۸۴/۷	۱۳۰/۲۱	۲۰۷/۱۱	۷۰/۹۷
۶	-	-	۴۴۱/۸۱	۱۷۴/۷۴	۲۷۱/۲۴	۷۸/۲۲
۷	-	-	-	-	۳۳۴/۶۶	۸۵/۸۷
۸	-	-	-	-	۳۹۲/۵۴	۹۸/۴۹
۹	-	-	-	-	۴۳۹/۹۳	۱۱۶/۳
۱۰	-	-	-	-	۴۷۲/۳۴	۱۲۹/۱

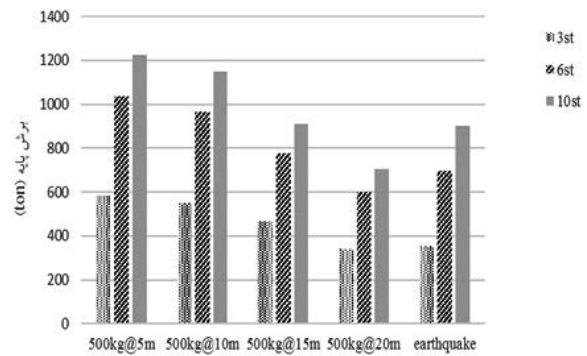
در جدول (۶) نسبت حداکثر جابه‌جایی نسبی مرکز جرم بام ساختمان‌ها ناشی از زلزله و نیز تحت ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل ۵ تا ۲۰ متر (انفجار بسیار شدید تا معمولی معادل Z از

دارای شرایط مطمئن تری هستند. در قاب وسط (بحرانی) ساختمان شش طبقه هیچ یک از مفاصل به مرحله تخریب شدید نمی‌رسند و صرفاً حدود ۳۶٪ از مفاصل به مرحله آسیب با حفظ جان ساکنین (LS) می‌رسند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این ساختمان در مواجهه با انفجار شدید فوق‌الذکر آسیب شدیدی را تحمل نخواهد کرد. همچنین در اثر انفجار فوق‌هیچ یک از مفاصل ساختمان ده طبقه از آستانه IO تجاوز نمی‌کند و به عبارت دیگر این ساختمان آسیب جدی را تجربه نخواهد کرد و پس از اصابت موج انفجار همچنان پایدار باقی خواهد ماند. همچنین درصد شکل‌گیری مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون‌های کلیه قاب‌های ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه در دو حالت بارگذاری خرج‌های انفجاری مختلف در فاصله ثابت ۱۰ متری و خرج انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف در جدول‌های (۸-۱۳) نشان داده شده است.

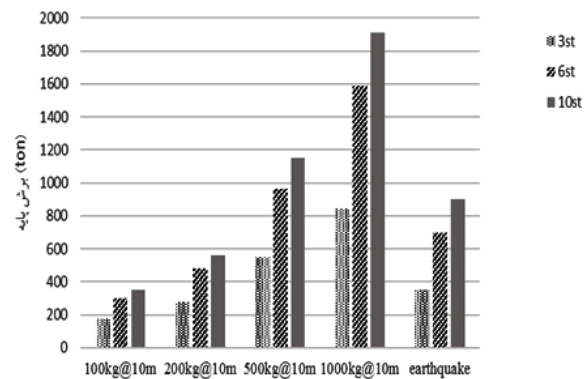


شکل ۱۷. شکل‌گیری مفاصل پلاستیک ساختمان‌ها تحت بار انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۰ متر الف: ده طبقه ب: شش طبقه پ: سه طبقه

در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) نیز حداکثر برش پایه دو حالت بارگذاری انفجار و زلزله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بسته به فاصله و مقدار ماده منفجره، مقدار برش پایه ناشی از انفجار می‌تواند بیشتر یا کمتر از زلزله باشد. نتایج این دو شکل نشان می‌دهد جز در انفجارهای تروریستی بسیار شدید (بیش از ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ده متری معادل $Z = 0.63$)، برش پایه ناشی از زلزله در همه ساختمان‌های مورد بحث بیش از برش پایه ناشی از انفجار بوده است.



شکل ۱۵. مقایسه حداکثر برش پایه ناشی از زلزله و انفجار با مقدار ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم



شکل ۱۶. مقایسه حداکثر برش پایه ناشی از زلزله و انفجار در فاصله ۱۰ متری

در شکل (۱۷) مفصل‌های پلاستیک ایجاد شده در ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه تحت ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج تنها برای قاب وسط هم‌راستی انتشار موج انفجار ارائه شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ساختمان سه طبقه برای تیرها، تعداد ۶ مفصل در محدوده IO، ۵ مفصل در محدوده LS و ۱۴ مفصل از CP تجاوز می‌نمایند. بر این اساس حدود ۳۹٪ از تیرهای این قاب تخریب و حدود ۱۴٪ از دیگر مفاصل این قاب آسیب دیده ولی در محدوده حفظ جان ساکنین (LS) خواهند بود. البته دیگر قاب‌های این ساختمان به دلیل داشتن فاصله بیشتر از محل انفجار آسیبی کمتر دیده و

جدول ۱۱. درصد شکل‌گیری مفاصل پلاستیک ایجاد شده تحت خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف و زلزله در ساختمان شش طبقه

زلزله	۲۰	۱۵	۱۰	۵	فاصله (m)	
۰	۲۵	۲۵	۱۵	۱۷	الاستیک	
۱۶	۷۵	۷۵	۸۵	۸۳	IO	
۱۷	۰	۰	۰	۰	LS	تیر
۱۷	۰	۰	۰	۰	CP	
۵۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	
۸۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	الاستیک	
۱۳	۰	۰	۰	۰	IO	
۰	۰	۰	۰	۰	LS	ستون
۰	۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	

جدول ۱۲. درصد شکل‌گیری مفاصل پلاستیک ایجاد شده تحت اثر خرج‌های انفجاری (در فاصله ۱۰ متری) و زلزله در ساختمان ده طبقه

زلزله	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	وزن خرج (kg)	
۰	۲	۱۵	۴۳	۷۰	الاستیک	
۲۵	۹۸	۸۵	۵۷	۳۰	IO	
۵۰	۰	۰	۰	۰	LS	تیر
۲۵	۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	
۹۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	الاستیک	
۱۰	۰	۰	۰	۰	IO	
۰	۰	۰	۰	۰	LS	ستون
۰	۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	

جدول ۱۳. درصد شکل‌گیری مفاصل پلاستیک ایجاد شده تحت خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف و زلزله در ساختمان ده طبقه

زلزله	۲۰	۱۵	۱۰	۵	فاصله (m)	
۰	۲۵	۱۵	۱۵	۱۵	الاستیک	
۲۵	۷۵	۸۵	۸۵	۸۵	IO	
۵۰	۰	۰	۰	۰	LS	تیر
۲۵	۰	۰	۰	۰	CP	
۵۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	
۹۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	الاستیک	
۱۰	۰	۰	۰	۰	IO	
۰	۰	۰	۰	۰	LS	ستون
۰	۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	

جدول ۸. درصد شکل‌گیری مفاصل پلاستیک ایجاد شده تحت اثر خرج‌های انفجاری (در فاصله ۱۰ متری) و زلزله در ساختمان سه طبقه

زلزله	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	وزن خرج (kg)	
۰	۰	۰	۰	۱۴	الاستیک	
۰	۱۷	۵۰	۸۳	۸۶	IO	
۶۶	۱۴	۵۰	۱۷	۰	LS	تیر
۳۴	۳۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۳۹	۰	۰	۰	تخریب کامل	
۱۰۰	۵۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	الاستیک	
۰	۴۵	۰	۰	۰	IO	
۰	۰	۰	۰	۰	LS	ستون
۰	۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	

جدول ۹. درصد شکل‌گیری مفاصل پلاستیک ایجاد شده تحت خرج ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف و زلزله در ساختمان سه طبقه

زلزله	۲۰	۱۵	۱۰	۵	فاصله (m)	
۰	۰	۰	۰	۰	الاستیک	
۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	IO	
۶۶	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	LS	تیر
۳۴	۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	
۱۰۰	۰	۰	۰	۰	الاستیک	
۰	۰	۰	۰	۰	IO	
۰	۰	۰	۰	۰	LS	ستون
۰	۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	

جدول ۱۰. درصد شکل‌گیری مفاصل پلاستیک ایجاد شده تحت اثر خرج‌های انفجاری (در فاصله ۱۰ متری) و زلزله در ساختمان شش طبقه

زلزله	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	وزن خرج (kg)	
۰	۰	۰	۲۵	۶۷	الاستیک	
۱۶	۶۴	۵۰	۷۵	۳۳	IO	
۱۷	۳۶	۵۰	۰	۰	LS	تیر
۱۷	۰	۰	۰	۰	CP	
۵۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	
۸۷	۸۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	الاستیک	
۱۳	۱۳	۰	۰	۰	IO	
۰	۰	۰	۰	۰	LS	ستون
۰	۰	۰	۰	۰	CP	
۰	۰	۰	۰	۰	تخریب کامل	

۴. نتیجه‌گیری

تولید شده از اصابت امواج انفجار تروریستی متعارف و کمتر از برش پایه حاصل از انفجار تروریستی شدید است. بررسی مفاصل پلاستیک تشکیل شده در ساختمان‌های در معرض تهدید انفجاری شدید نشان می‌دهد صرفاً بخشی از مفاصل قاب نزدیک به محل انفجار در ساختمان سه طبقه به مرحله گسیختگی (CP) رسیده‌اند و مفاصل دیگر قاب‌ها در این ساختمان و نیز کلیه قاب‌ها در ساختمان‌های شش و ده طبقه، آسیب شدید ندیده و در مراحل IO و LS می‌باشند. بر اساس گزاره‌های فوق و در چارچوب نمونه‌های تحلیل شده می‌توان نتیجه گرفت تهدیدات تروریستی در ساختمان‌های کوتاه عوارض شدیدتری نسبت به ساختمان‌های متوسط و بلند ایجاد می‌کند. تخریب ستون‌های نزدیک به محل انفجار و وقوع تخریب پیش‌رونده در قاب، بیش از اصابت امواج انفجار به کل سازه در آسیب‌پذیری ساختمان‌ها ناشی از تهدیدات تروریستی مؤثر است. قاب‌های خمشی ویژه بتن مسلح که در برابر زلزله طراحی شده بودند وقتی در معرض انفجار تروریستی قرار گرفتند، در صورتی که دچار آسیب موضعی ستون نشده باشند، تغییر مکان مطلق و نسبی طبقات، برش پایه و آسیب مفاصل کمتر از زلزله را تجربه کرده‌اند (جز در ساختمان کوتاه سه طبقه در معرض انفجار شدید). از این رو پیشنهاد می‌شود عمده همت طراحان باید در بررسی رفتار عناصر سازه‌ای منفرد به ویژه ستون‌های محیطی طبقه همکف که در فاصله نزدیک به انفجار محتمل هستند و جلوگیری از آسیب آن‌ها و به تبع ممانعت از تخریب پیش‌رونده باشد.

۵. مراجع

- [1] Rostami, M. "Evaluation of Reinforced Concrete Moment Frames Under the Blast Loading"; M.Sc. Thesis, Malek Ashtar University of Technology, 2009.
- [2] Izadifard, R.; Gholipour, A.; Hajikarimian, H. "Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams Under the Blast Loading (Experimental Test and Numerical Simulation)"; Eng. Mat. 2016, 12, 1 (in Persian).
- [3] Li, Z.; Zhong, B.; Shi, Y. "An Effective Model for Analysis of Reinforced Concrete Members and Structures under Blast Loading"; Adv. Struc. Eng. 2016, 19, 1815-1831.
- [4] Codina, R.; Ambrosini, D.; De Borbón, F. "Experimental and Numerical Study of a RC Member Under a Close-In Blast Loading"; Eng. Struct. 2016, 127, 145-158.
- [5] Li, J.; Hao, H. "A Two-Step Numerical Method for Efficient Analysis of Structural Response to Blast Load"; Int. J. Protect. Struct. 2011, 2, 103-126.
- [6] Cichocki, K.; Ruchwa, M. "Integrity Analysis for Multi Storey Buildings"; Ovidius University Annals Constantza, Series Civil Engineering, 2013, 15, 45.
- [7] Li, J.; Hao, H. "Numerical Study of Structural Progressive Collapse Using Substructure Technique"; Eng. Struct. 2013, 52, 101-113.
- [8] Yan, S.; Wang, J. H.; Wang, D.; Zhang, L. "Mechanism Analysis on Progressive Collapse of RC Frame Structure under Blast Effect"; Eng. Mech. 2009, 6, 119-123.

گسترش تهدیدات تروریستی ناشی از خودروهای حاوی مواد منفجره علیه ساختمان‌های مهم به ویژه سازه‌های بتن مسلح که در برابر بارهای ثقلی و زلزله طراحی شده‌اند ایجاب می‌نماید که رفتار آن‌ها در برابر انفجارهای شدید ($Z < 1$) و متعارف ($Z > 1$) کنکاش گردد. برای بررسی اثر امواج انفجار بر سازه‌ها، در مرحله اول ستون‌های نزدیک به محل انفجار تحت بارگذاری جانبی قرار گرفته و آسیب‌های موضعی آن‌ها بررسی شد. در این مرحله مشخص خواهد شد که آیا احتمال آسیب شدید موضعی ستون و به تبع آن احتمال تخریب پیش‌رونده ساختمان وجود دارد یا خیر؟ در مرحله دوم قاب‌هایی که ستون آن‌ها تخریب نشده است تحت امواج گسترده ناشی از حرکت جبهه موج قرار گرفته و عملکرد کلی آن شامل تغییر مکان مطلق و نسبی طبقات، برش پایه و مفاصل پلاستیک بررسی می‌شود. همچنین مقادیر این پارامترها با مقادیر متناظر ناشی از اعمال زلزله مقایسه می‌گردد. بدیهی است پارامترهای متعددی همچون تعداد و طول دهانه‌ها، ارتفاع طبقات، نوع کاربری و بارهای قائم متناظر و ... می‌توانند در رفتار سازه مؤثر باشند. تحلیل‌های انجام شده در این مقاله که بر صرفاً بر تفاوت تعداد طبقات متمرکز بوده‌اند نشان می‌دهند که در ساختمان‌های شش و ده طبقه به دلیل بزرگ بودن ابعاد ستون‌ها، اگر چه انفجارها موجب آسیب‌های موضعی به ستون‌های نزدیک به محل انفجار شده‌اند ولی تخریب کامل ستون و به تبع آن تخریب پیش‌رونده احتمالی رخ نخواهد داد. ستون طبقه همکف ساختمان‌های سه طبقه تحت انفجارهای شدید دچار فروریزش شده و کل ساختمان را در معرض تخریب پیش‌رونده قرار داده است. از طرف دیگر، با افزایش شدت انفجار، تغییر مکان جانبی طبقات همانند بارگذاری زلزله افزایش می‌یابد. در ساختمان‌های شش و ده طبقه، تنها در حالت بارگذاری انفجاری شدید، صرفاً تغییر مکان طبقه اول از تغییر مکان ناشی از بارگذاری زلزله تجاوز می‌کند. تغییر مکان طبقات دیگر در بارگذاری شدید انفجاری و نیز تمام طبقات در انفجار تروریستی متعارف، کمتر از مقادیر متناظر ناشی از اعمال بار زلزله می‌باشند. در ساختمان سه طبقه که دارای تیرها و ستون‌هایی با ابعاد کوچک‌تر از ساختمان‌های بلندتر است تغییر مکان ناشی از انفجار شدید حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از مقادیر مشابه ناشی از زلزله بیشتر است. در این تحقیق مشخص شد که جابه‌جایی نسبی طبقات و بام ساختمان‌ها ناشی از بارگذاری زلزله به مراتب بیشتر از جابه‌جایی نسبی ناشی از انفجار متعارف و شدید است و تنها در ساختمان سه طبقه جابه‌جایی نسبی حاصل از انفجار تروریستی شدید از جابه‌جایی نسبی ناشی از زلزله تجاوز می‌کند. تقریباً در همه ساختمان‌های بررسی شده، برش پایه ناشی از اعمال زلزله بیشتر از برش پایه

- [17] Izadifard, R.; Foroutan, M. "Blast Wave Parameters Assessment at Different Altitude Using Numerical Simulation"; Turk. J. Eng. Environ. Sci. 2010, 34, 25-42.
- [18] Smith, P.; Hetherington, G.; "Blast and Ballistic Loading of Structures" Translated By Izadifard, R.; Malik Ashtar University of Technology Pub., 2015.
- [19] FEMA-426 "Reference Manual To Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings"; Federal Emergency Management Agency, Report No. 426, Washington D.C., 2003.
- [20] Manual, Facilities Planning "Unified Facilities Criteria (UFC)"; 2008.
- [21] Islamic Republic of Iran, Ministry of Roads & Urban Development "National Building Code, Part 6"; 2013.
- [22] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings "Standard No. 2800 (4th Edition)"; 2014.
- [23] ETABS, Version 2013 "Computers and Structures"; Inc., Berkeley, CA, 2013.
- [24] Islamic Republic of Iran, Ministry of Roads & Urban Development "National Building Code, Part 9"; 2013.
- [25] SAP2000, Version 14 "Computers and Structures"; Inc., Berkeley, CA, 2007.
- [26] American Society of Civil Engineers "Global Topics Report on the Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings"; Federal Emergency Management Agency, FEMA 357, 2000.
- [9] Weerheijm, J.; Mediavilla, J.; Van Doormaal, J. C. A. M. "Explosive Loading of Multi Storey RC Buildings: Dynamic Response and Progressive Collapse"; Struct. Eng. Mech. 2009, 32, 193-212.
- [10] Jayasooriya, R.; Thambiratnam, D.; Perera, N.; Kosse, V. "Response and Damage Evaluation of Reinforced Concrete Frames Subjected to Blast Loading"; Proc. 34th Conf. on Our World in Conc. & Struct. 2009, 28, 123-130.
- [11] Jayasooriya, R.; Thambiratnam, D.; Perera, N.; Kosse, V. "Damage Assessment of 3D Reinforced Concrete Frame Under External Explosion Loading"; 1st Makassar Int. Conf. on Civil Engineering, Makassar, Indonesia, 2010.
- [12] Jayasooriya, R.; Thambiratnam, D.; Perera, N.; Kosse, V. "Blast and Residual Capacity Analysis of Reinforced Concrete Framed Buildings"; Eng. Struct. 2011, 33, 3483-3495.
- [13] Brunesi, E.; Nascimbene, R. "Extreme Response of Reinforced Concrete Buildings through Fiber Force-Based Finite Element Analysis"; Eng. Struct. 2014, 69, 206-215.
- [14] Sun, W. B.; Jiang, Y.; He, W. Z. "An Overview on the Blast Loading and Blast Effects on the RC Structures"; Appl. Mech. Mater. 2011, 94, 77-80.
- [15] Siwiński, J.; Stolarski, A. "Modeling of Buildings Behavior under Blast Load"; Dynam. Syst. Theor. Appl. 2015, 341-352.
- [16] Parisi, F.; Augenti, N. "Influence of Seismic Design Criteria on Blast Resistance of RC Framed Buildings: A Case Study"; Eng. Struct. 2012, 44, 78-93.