

مقایسه اقتصادی و ایمنی سطوح مختلف عملکردی در طراحی ساختمان‌های فولادی با قاب مهاربندی هم‌محور در مقابل انفجار

پویا حسنوند^{*}، عبدالرضا سروقد مقدم^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ۲- دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (تاریخ وصول: ۰۹۹/۱۰/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰)

چکیده

امروزه با افزایش حملات تروریستی در نزدیکی اماکن شهری، طراحی ساختمان‌ها در مقابل بارهای ناشی از انفجار به‌ویژه در برخی ساختمان‌های حساس و شریان‌های حیاتی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. هنگامی که یک انفجار رخ می‌دهد، انتشار امواج در فضا می‌تواند منجر به بروز خسارات شدید در سازه و به خطر افتادن جان افراد شود. با توجه به اینکه سازه‌های فولادی موجود به‌طور معمول بر اساس بارهای ثقلی و لرزه‌ای متعارف مورد طراحی قرار گرفته‌اند، نیاز است عملکرد این سازه‌ها تحت بارهای ناشی از انفجار مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله مطالعات عددی بر روی مدل‌های سازه‌ای ۲ بعدی با تعداد طبقات ۵ و ۱۰ دارای سامانه قاب ساده فولادی با مهاربند هم‌محور (CBF) در برابر بارگذاری انفجاری صورت گرفته است. مدل‌های مورد بررسی بر اساس دستورالعمل UFC 3-340-02، برای انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲۰ متری از سازه، در نرم‌افزار SAP 2000 مورد طراحی و تحلیل دینامیکی غیر خطی قرار گرفته‌اند. هر یک از مدل‌های سازه‌ای در این تحقیق به روش طراحی بر اساس عملکرد به ازای سه سطح عملکرد بالا، پایین و بسیار پایین تحلیل و طراحی می‌شود. در نهایت طرح‌های حاصل از روش عملکردی در سطوح مختلف به لحاظ اقتصادی و ایمنی مقایسه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: سازه فولادی، مهاربند هم‌محور، روش عملکردی، پدافند غیر عامل، انفجار.

Economic and Safety Comparison of Different Performance Levels in the Design of Steel Buildings with Coaxial Bracing Frame against Explosion

P. Hassanvand^{*}, A. Sarvghad Moghadam

Bu Ali Sina University of Hamadan

(Received: 01/05/2021, Accepted: 05/10/2021)

Abstract

Nowadays, with the increase of the terrorist attacks around the urban places, the building design under the blast loadings is of primary considerations, especially for some important buildings and vital arteries. When an explosion occurs, the blast waves can cause severe damage to the structure and endanger the lives of people. Since the existing steel structures are usually designed for the typical gravity and seismic loads, it is necessary to investigate their performances under blast loadings. In this study, analytical studies have been done for 2D structural models of simple steel frame system with concentrically bracing (CBF) with different number of stories 5 and 10 under blast loading. The nonlinear dynamic method is applied for analyzing and designed the studied models in SAP 2000 software according to UFC 3-340-02 instructions for blasting 1000 kg of TNT at a distance of 20 meters from the structure. Each of the structural models in this study is analyzed and designed by performance-based design method for three levels of high, low, and very low performance. Finally, the designs results from the performance method at different levels are compared in terms of economics and safety.

Keywords: Steel Structure, Coaxial Bracing, Performance Method, Passive Defense, Explosion.

۱- مقدمه

مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. مقایسه نتایج در این مطالعه نشان داد قاب‌های فولادی با اتصالات تقویت شده با ورق‌های کناری در مقایسه با انواع متعارف عملکرد مناسب‌تری در برابر بارهای ناشی از انفجار از خود نشان می‌دهد.

خاندلوال و همکاران [۱۲] رفتار سازه‌های فولادی مهاربندی را تحت اثر انفجار و بروز پدیده خرابی پیش‌رونده مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه سازه‌های فولادی ۱۰ طبقه دارای سامانه مهاربند هم‌محور و سامانه مهاربند برون‌محور به صورت دو بعدی مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد هنگامی که مهاربندها در پیرامون سازه قرار گیرند، سازه‌ها با سامانه مهاربند برون‌محور رفتار بهتری به نسبت سامانه مهاربند هم‌محور از خود نشان می‌دهد.

شیرمحمدی و همکاران [۱۳] چند قاب فولادی تک دهانه تحت بار انفجاری در فواصل مختلف را مورد تحلیل دینامیکی غیر خطی قرار دادند. طبق نتایج این تحقیق ستون‌ها نقش به‌سزایی در جذب انرژی دارند و مهم‌ترین عضو سازه‌ای در بارگذاری انفجاری هستند. مودهای خرابی ستون‌ها به صورت شکست برشی و کماتشی گزارش شد. میزان استهلاک انرژی و تاریخچه نوسان برای دو قاب یک و سه طبقه با هم مقایسه شدند و نشان داده شد که میزان استهلاک انرژی برای قاب سه طبقه به دلیل وجود اعضای باربر بیشتر نسبت به قاب یک طبقه بیشتر است.

قدیمی و همکاران [۱۴] مطالعه عددی بر روی سامانه قاب خمشی و دیوار برشی فولادی در مقابل انفجار به دو روش ضرایب بار و مقاومت LRFD و سطوح عملکردی انجام دادند. در این تحقیق یک قاب فولادی خمشی ۵ طبقه با دیوار برشی فولادی در برابر بارگذاری انفجاری با مقدار بار انفجاری ناشی از TNT مشخص در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی و مورد تحلیل دینامیکی غیر خطی قرار گرفت. مدل سازه‌ای در این تحقیق یک بار به روش طراحی بر اساس عملکرد به ازای سطح عملکرد ایمنی جانی LS و یک بار به روش ضرایب بار و مقاومت LRFD تحلیل و طراحی شدند. طرح حاصل از روش عملکردی با طرح حاصل از روش LRFD به لحاظ اقتصادی و ایمنی مقایسه گردید.

حیدری و همکاران [۱۵] مطالعه عددی بر روی مقایسه تأثیر روش طراحی سامانه توأم قاب خمشی و دیوار برشی بتنی نیمه مدفون در مقابل انفجار به دو روش مقاومت نهایی و عملکردی به منظور ارزیابی اقتصادی و ایمنی این نوع سامانه‌ها انجام دادند. در این تحقیق، مطالعات عددی بر روی مدل‌های سازه‌ای ۲ بعدی دارای سامانه توأم قاب خمشی و دیوار برشی بتنی نیمه مدفون صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که وزن مصالح مصرفی در قاب‌های طراحی شده به روش مقاومت نهایی بیشتری مقدار را به خود اختصاص داده است و وزن مصالح مصرفی قاب‌های طراحی شده برای سطوح عملکرد IO، LS و CP به ترتیب کاهش می‌یابد. وزن مصالح مصرفی برای طرح حاصل از روش عملکردی برای سطح عملکرد CP می‌تواند تا ۶۰ درصد نسبت به طرح حاصل از روش مقاومت نهایی کمتر باشد.

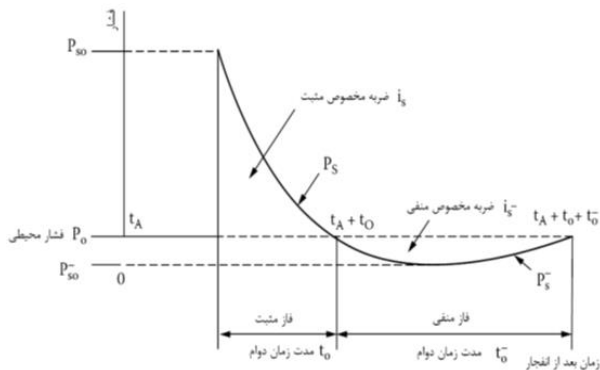
امروزه با توجه به افزایش حملات تروریستی در سراسر دنیا، طراحی ساختمان‌ها در مقابل بارهای ناشی از انفجار به‌ویژه در برخی از ساختمان‌های حساس و شریان‌های حیاتی در حوزه پدافند غیر عامل مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. اهمیت بررسی اثرات انفجار بر روی سازه‌ها سبب شده است تا دستورالعمل‌هایی در زمینه طراحی ساختمان‌ها و فضاهای شهری در برابر انفجار تدوین گردد. دستورالعمل TM5-855-1 [۱] که توسط دپارتمان نیروی زمینی ارتش آمریکا برای سازه‌های مقاوم در برابر انفجار تهیه شده است را می‌توان به‌عنوان یکی از اولین دستورالعمل‌ها دانست که از اوایل دهه ۵۰ به بعد تهیه و تکمیل شده است [۲]. پس از آن دستورالعمل TR 87-57 [۳] توسط بخش مهندسی نیروی هوایی آمریکا به منظور آنالیز و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجارهای غیر اتمی ارائه شد. سپس دستورالعمل TM 5-1300 [۴] به صورت مشترک توسط دپارتمان نیروی زمینی، نیروی دریایی و نیروی هوایی ارتش آمریکا تهیه شد که به صورت گسترده جهت طراحی سازه‌ها در برابر انفجار مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، دستورالعمل‌های دیگری همچون DOE/TIC 11268 [۵] توسط دپارتمان انرژی آمریکا و دستورالعمل‌های ASCE 1995 [۶]، DAHSCWE 1995 [۷]، FEMA 426 [۷]، FEMA 427 [۸]، FEMA 428 [۹] تهیه شده‌اند. در نهایت دستورالعمل UFC 3-340-02 [۱] که نسبت به دستورالعمل‌های پیشین جامعیت بیشتری داشته و نسخه به‌روز شده TM 5-1300 [۴] است، توسط دپارتمان دفاعی آمریکا تهیه شد و هم‌اکنون اکثراً به‌عنوان مبنای اصلی طراحی و تحقیقات در این حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مورد طراحی سازه‌های فولادی در برابر انفجار تحقیقات وسیعی انجام شده است که در ادامه به مرور برخی از پژوهش‌های گذشته پرداخته می‌شود.

ریچارد لیو [۱۰] بر روی مقاومت قاب‌های فولادی تحت اثر هم‌زمان انفجار و آتش‌سوزی مطالعاتی انجام داده است. در این مطالعات اثرات نرخ سریع کرنش ناشی از انفجار و دمای ناشی از آتش‌سوزی به‌طور هم‌زمان بر روی قاب‌های فولادی پنج طبقه اعمال و اندرکنش انفجار و آتش‌سوزی در آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که تغییر شکل اولیه ناشی از انفجار در ستون‌هایی که به صورت کمانش موضعی و جاری شدگی در آن‌ها مشاهده می‌گردد، سبب می‌شود ظرفیت باربری ستون‌ها تحت بارهای حرارتی ناشی از آتش‌سوزی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. بر این اساس کمانش موضعی و تغییر شکل‌های ماندگار ناشی از انفجار در اعضای سازه سبب می‌شود با اعمال بارهای حرارتی، پایداری کل سازه تحت تأثیر قرار گیرد.

اورگسا و همکاران [۱۱] پاسخ قاب‌های فولادی دارای اتصالات متعارف و اتصالات تقویت شده با ورق‌های کناری را تحت بارهای ناشی از انفجار

نامیده می‌شود. پشت جبهه موج، بیش فشار خیلی سریع تا حدود نصف بیش فشار حداکثر افت می‌کند و تقریباً در ناحیه مرکزی انفجار به صورت یکنواخت باقی می‌ماند. با افزایش فاصله، حداکثر فشار موج شوک کاهش می‌یابد. شکل (۱) منحنی فشار - زمان موج انفجار را برای انفجار در محیط آزاد نشان می‌دهد. این منحنی به دو فاز مثبت و منفی تقسیم می‌شود که اغلب در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار فاز منفی از اهمیت کمتری برخوردار است [۷، ۸، ۱۷ و ۱۸].



شکل ۱- تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [۱۴].

در مقایسه با دیگر بارهای وارد بر ساختمان (نظیر زلزله، باد، سیل و...)، بار ناشی از انفجار دارای خصوصیات و تفاوت‌هایی است که حتماً باید مورد توجه واقع شود [۷]:

الف- میزان فشار وارد بر ساختمان در هنگام انفجار می‌تواند چندین برابر بزرگ‌تر از فشار ناشی از دیگر مخاطرات باشد؛ مثلاً فشار بیشینه ناشی از انفجار یک خودرو که در کنار پیاده‌رو پارک شده است، بر ساختمان‌های مجاور تا مقدار باور نکردنی ($70 \cdot \text{ton/m}^2$) می‌رسد.

ب- فشار ناشی از انفجار با سرعت بسیار زیادی از بین می‌رود. به همین دلیل تخریب ناشی از انفجار در قسمتی از ساختمان که رو به انفجار است، به مراتب شدیدتر و وسیع‌تر از پشت ساختمان خواهد بود.

ج- بازه زمانی و در نتیجه، دوره بارگذاری در انفجار بسیار کوتاه است که به طور معمول در زمان‌هایی نظیر چند هزارم تا چند صدم ثانیه رخ می‌دهد. در حالی که مدت دوام بار زلزله چند ده ثانیه و مدت دوام بار باد تا چند ده دقیقه متغیر هستند.

د- موج ضربه‌ای ناشی از انفجار همچنین در جهاتی اثر می‌کند که احتمالاً سازه برای تحمل بار در آن جهات طراحی نشده است؛ مثلاً نیروی ناشی از انفجار در جهت بالا بر سقف‌های ساختمان اثر می‌کند. مقدار بار ناشی از موج انفجار و نحوه توزیع فشارهای حاصله بر روی سازه تابع عوامل زیر هستند [۷، ۸، ۱۷ و ۱۸]:

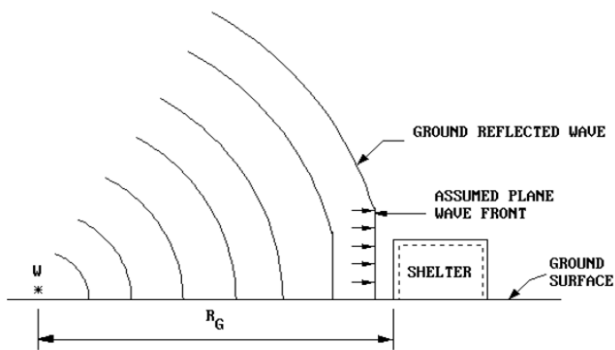
- هندسه و شکل سازه
 - موقعیت محل انفجار نسبت به سازه
 - خواص مواد منفجره مانند جنس، وزن، مقدار انرژی آزاد شده
 - مقدار تشدید موج در اثر تداخل با زمین، حفاظ یا خود سازه
- برای محاسبه پارامترهای انفجار معمولاً از روشی به نام روش فاصله

خیزآب و همکاران [۱۶] عملکرد سامانه‌های دوگانه‌ی قاب خمشی با دیوار برشی فولادی تحت اثر انفجار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای این کار مدل‌های سازه‌ای را به صورت سه بعدی در نرم‌افزار ETABS بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ی طراحی و سپس قاب دو بعدی کناری را استخراج و مورد تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی تحت بارگذاری انفجاری در دو سناریو داخل و خارج صفحه قاب در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس قرار دادند و در نهایت امکان رخداد فروریزش پیش‌رونده را بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که در سناریوی بارگذاری انفجار داخل صفحه قاب، سامانه دوگانه‌ی دیوار برشی فولادی عملکرد مناسبی در مقایسه با سامانه قاب خمشی داشته و باعث محدود شدن فروریزش پیش‌رونده گردیده در حالی که در سناریوی بارگذاری انفجار خارج از صفحه قاب به دلیل انتشار موج انفجار بر دیوار برشی فولادی، سامانه قاب خمشی عملکرد بهتری داشته است. همچنین بر اساس مقایسه‌ی شاخص تنومندی (RI) در سناریوهای بارگذاری انفجار داخل و خارج قاب به ترتیب سازه‌های دارای دیوار برشی فولادی و قاب خمشی عملکرد مطلوب‌تری داشته‌اند. برای طراحی یک سازه روش‌های گوناگونی وجود دارد و با توجه به ماهیت بار انفجاری از لحاظ بزرگی و شدت، در صورتی که روش طراحی به درستی و با انتخاب معیار مناسب صورت نگیرد ممکن است هزینه ساخت سازه بسیار افزایش یابد و هزینه‌های گزافی را بر کشور تحمیل کند. به همین دلیل در صدد آمده شد تا به بررسی و طراحی ساختمان‌های فولادی با قاب مهاربندی هم‌محور در مقابل انفجار به روش طراحی عملکردی و در سطوح مختلف عملکردی پرداخته شد و مقایسه اقتصادی و ایمنی بین طرح‌های حاصل از سطوح مختلف انجام داده شد و یک الگوی طراحی مناسب برای سامانه فوق‌الذکر ارائه شد.

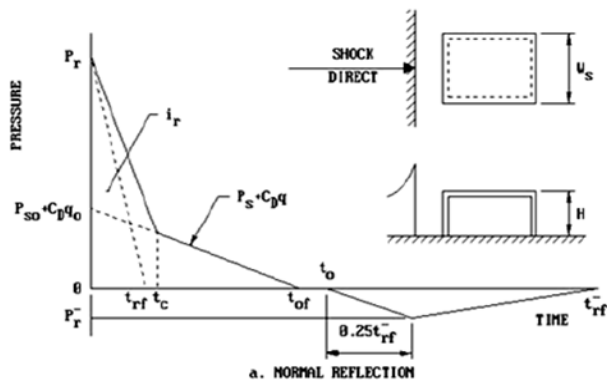
۲- آشنایی با پدیده انفجار

۲-۱- موج انفجار

به‌طور کلی، انفجار نتیجه آزاد شدن بسیار سریع مقدار زیادی انرژی در یک فضای محدود است. آزاد شدن ناگهانی انرژی، یک موج فشاری در محیط تولید می‌کند که موج شوک نامیده می‌شود. زمانی که یک انفجار اتفاق می‌افتد، انبساط گازهای داغ، یک موج فشاری در محیط اطراف تولید می‌کند. با حرکت این موج از مرکز انفجار، بخش داخلی به وسیله جبهه موج از محل اولیه‌ای که قبلاً در آنجا تحت فشار قرار داشت و اکنون داغ شده است حرکت می‌کند. در حین حرکت موج فشاری با سرعت صوت، دما حدود $3000-4000^\circ\text{C}$ و فشار نزدیک 300 kbar است و این عوامل باعث افزایش بیشتر سرعت موج می‌شود. بخش داخلی موج با سرعت بیشتری شروع به حرکت می‌کند و به تدریج از بخش جلویی موج پیش می‌افتد. پس از یک زمان کوتاه جبهه موج فشاری جدا می‌شود و یک جبهه موج شبیه تشکیل می‌دهد. حداکثر بیش فشار در جبهه موج رخ می‌دهد و بیش فشار حداکثر



شکل ۲- موج ناشی از انفجار سطحی [۱].



شکل ۳- تغییرات فشار - زمان دیوار مقابل سازه [۲].

۳- روش تحقیق و فرآیند مدل سازی

با توجه به اینکه سازه‌های فولادی موجود به‌طور معمول بر اساس بارهای ثقلی و لرزه‌ای متعارف مورد طراحی قرار گرفته‌اند، نیاز است عملکرد این سازه‌ها تحت بارهای ناشی از انفجار مورد بررسی قرار گیرد تا مشخص شود، سامانه به‌کار رفته در این سازه‌ها جوابگوی بارهای حاصل از انفجار احتمالی خواهد بود یا خیر. بر همین اساس در این تحقیق سعی شده است عملکرد ساختمان‌های فولادی با سامانه باربری جانبی مهاربندی شده هم‌محور (CBF) که بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های متداول مورد طراحی قرار گرفته‌اند، تحت اثر بارهای ناشی از انفجار نیز مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۱- انتخاب مدل‌ها

در این تحقیق به‌منظور بررسی رفتار سامانه قاب‌های ساده فولادی مهاربندی شده هم‌محور (CBF) تحت اثر بارهای ناشی از انفجار مطالعاتی عددی بر روی مدل‌های سازه‌ای ۲ بعدی با تعداد طبقات ۵ و ۱۰ طبقه صورت گرفته است. تمامی مدل‌ها دارای پلان‌های یکسان مربعی مطابق شکل (۴) به ابعاد ۳ دهانه ۵ متری در دو جهت X و Y و ارتفاع طبقات ۳ متر است. اتصال تیرها به ستون‌ها به‌صورت ساده و اتصال پای ستون‌ها به پی گیردار است.

مقیاس بندی شده استفاده می‌کنند. عمومی‌ترین روش مقیاس گذاری انفجار روش هاپکینسون - کرانز یا ریشه سوم است که ابتدا توسط هاپکینسون و سپس توسط کرانز فرمول بندی شد [۱۸]. بر اساس این قانون امواج مشابه هنگامی به وجود می‌آیند که دو ماده منفجره با جنس یکسان در فواصل مقیاس گذاری شده مشابه منفجر شوند [۱۸]. مواد منفجره مختلف فشارهای متفاوتی را ایجاد می‌کنند، بنابراین برای داشتن یک مبنا برای مقایسه، مواد منفجره مختلف با ماده منفجره TNT معادل و مقایسه می‌شوند. پارامتر مقیاس Z_G (فاصله مقیاس شده)، برای محاسبه اثر انفجار بر مبنای وزن معادل TNT طبق معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$Z_G = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

در این رابطه، R فاصله از محل انفجار و W وزن ماده منفجره معادل TNT است.

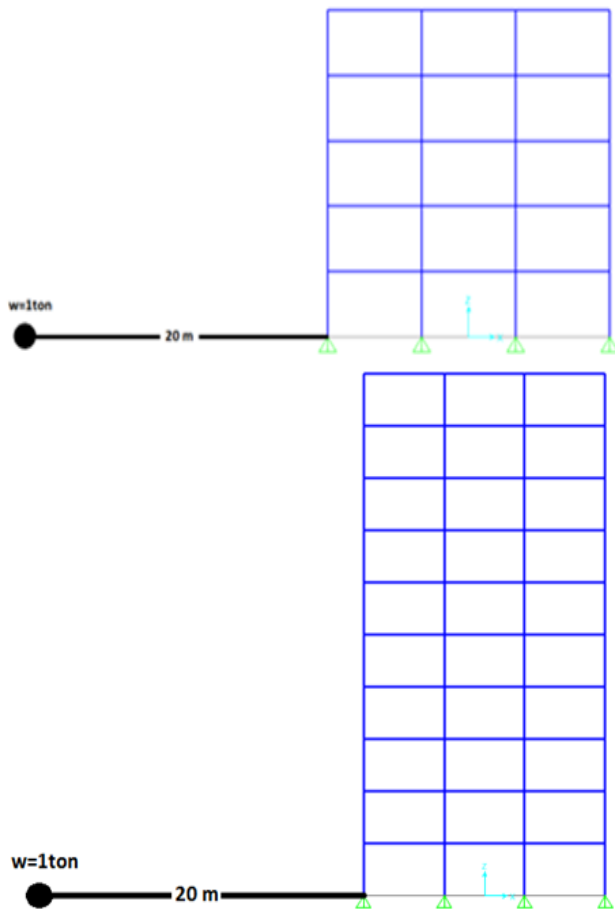
تعیین پارامترهای انفجار و همچنین روابط مناسب جهت محاسبه فشار ناشی از انفجار، هدف تعداد بسیاری از تحقیقات علمی تاکنون بوده است.

۲-۲- نوع انفجار مورد مطالعه

انفجارها از نظر موقعیت نسبت به سازه به دو گروه اصلی انفجار داخلی و انفجار خارجی تقسیم بندی می‌شوند. انفجار خارجی را نیز می‌توان در سه گروه انفجار در هوای آزاد، انفجار هوایی و انفجار سطحی تقسیم بندی نمود. انفجار در هوای آزاد زمانی رخ می‌دهد که یک انفجار در بالای یک سازه طوری روی دهد که میان منبع ماده منفجره و سازه هیچ‌گونه تقویت موج شوک اولیه وجود نداشته باشد؛ اما اگر انفجار در فاصله‌ای مشخص از سطح زمین روی دهد، موج اولیه از نقطه انفجار منتشر شده و پس از برخورد با سطح زمین و انعکاس به سطح سازه برخورد می‌کند؛ بنابراین موج در امتداد سطح زمین در ارتفاعی موسوم به ارتفاع ماک که ناشی از اندرکنش موج اولیه و موج منعکس شده است منتشر می‌گردد. به همین ترتیب همان‌طور که در شکل (۲) نیز نشان داده شده است اگر یک انفجار در سطح زمین رخ دهد، موج اولیه انفجار پس از برخورد با زمین منعکس شده و با ترکیب موج اولیه و موج منعکس شده به‌صورت یک موج به شکل نیم‌کره منتشر می‌گردد. نتایج نشان داده‌اند که در شرایط یکسان از نظر نوع انفجار و فاصله یکسان، انفجارهای سطحی به دلیل تشدید ناشی از برخورد موج با زمین نسبت به انفجار در هوای آزاد امواج شدیدتری تولید می‌کنند [۲].

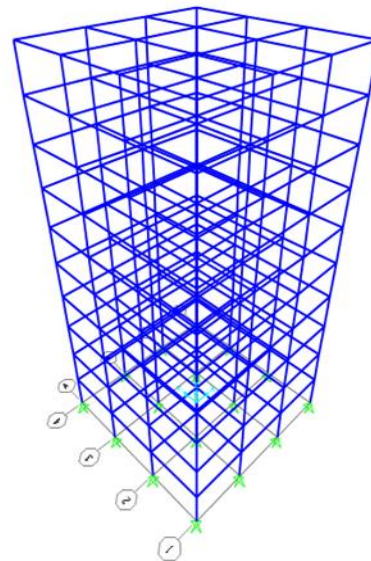
فاز مثبت و منفی فشار، ضربه، دوره تناوب و دیگر پارامترهای ناشی از انفجار سطحی بر روی دیوار مقابل، بام و پشت سازه مطابق شکل (۳) به‌صورت تابعی از فاصله مقیاس شده از نقطه انفجار با استفاده از منحنی‌های ارائه شده در دستورالعمل UFC 3-340-02 [۲] و مطابق الگوی تغییرات بار وارده بر حسب زمان محاسبه می‌شود.

مثبت و منفی فشار ناشی از یک انفجار سطحی در مقابل یک وجه سازه انجام شده است. پارامترها و بار ناشی از انفجار در مقابل سازه برای سطح انفجار انتخاب شده بر اساس دستورالعمل UFC 3-340-02 [۲] محاسبه شده است. نمودار فشار - زمان ناشی از انفجار را برای گره‌های سازه‌ای وجوه مختلف (جلو، بام و پشتی) سازه مطابق شکل (۵) به دست آورد. سپس، بارهای گرهی از حاصل ضرب فشار گره‌ها در سطح بارگیر متناظر گره‌ها حساب می‌شود.

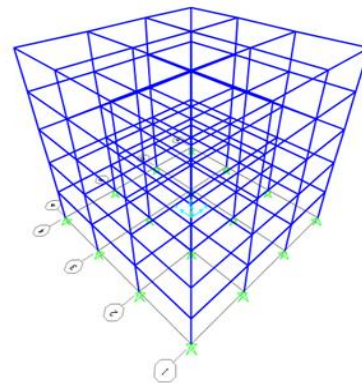


شکل ۵- نمای قاب‌ها و محل بار انفجاری.

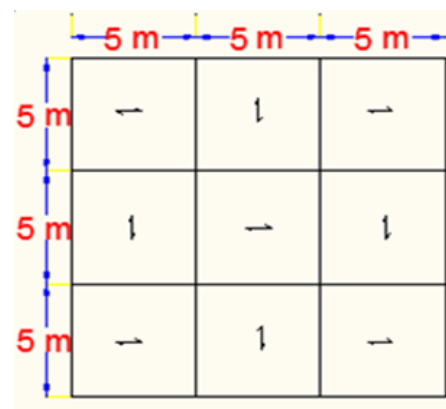
عوامل مؤثر بر بارگذاری انفجاری وارد بر سازه شامل مقدار و نوع ماده منفجره، موقعیت انفجار نسبت به سازه مورد نظر (ارتفاع و فاصله)، شکل هندسی و اندازه سازه، راستا و زاویه سازه نسبت به جبهه موج انفجار و سطح زمین و وضعیت سازه نسبت به سطح زمین (روزمینی، زیرزمینی و مدفون) است. روش‌های ارائه شده در UFC 3-340-02 [۲] فقط برای سازه‌های مستطیلی روزمینی و جبهه موج تخت (سازه در جبهه ماخ واقع باشد) صادق است. برای تعیین پارامترهای موج انفجار و رسم نمودارهای فشار - زمان ارائه شده در شکل (۶) مربوط به دیوار جلویی، سقف و دیوار پشتی، می‌توان از منحنی‌های ارائه شده در دستورالعمل UFC 3-340-02 [۲] (به صورت نمونه در شکل (۶ و ۷)) استفاده کرد که بر اساس آن می‌توان با توجه به محاسبه فاصله مقیاس



الف- ساختمان ۱۰ طبقه فولادی



ب- ساختمان ۵ طبقه فولادی



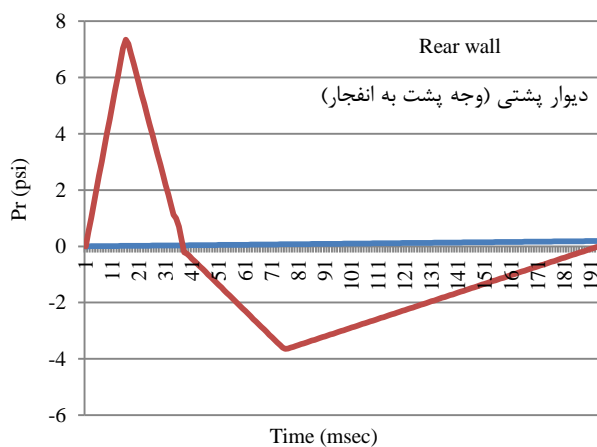
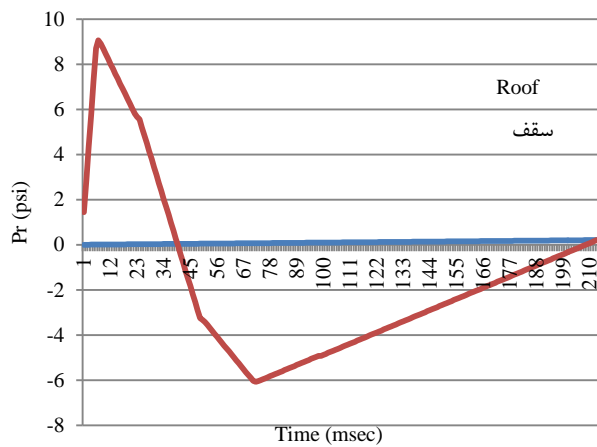
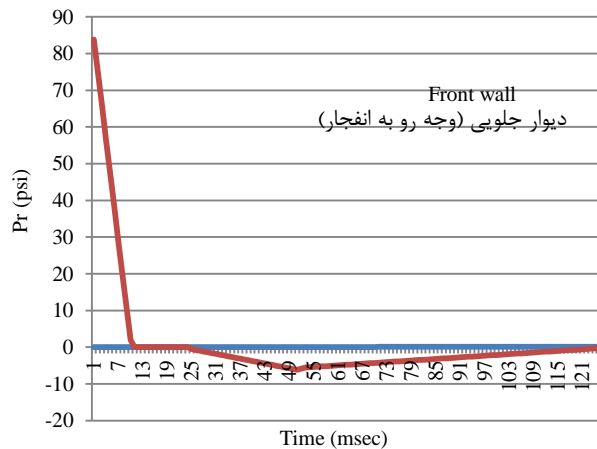
ج- پلان معماری ساختمان مورد مطالعه

شکل ۴- ساختمان‌های مورد مطالعه و پلان معماری آن‌ها.

۲-۳- بارگذاری انفجاری

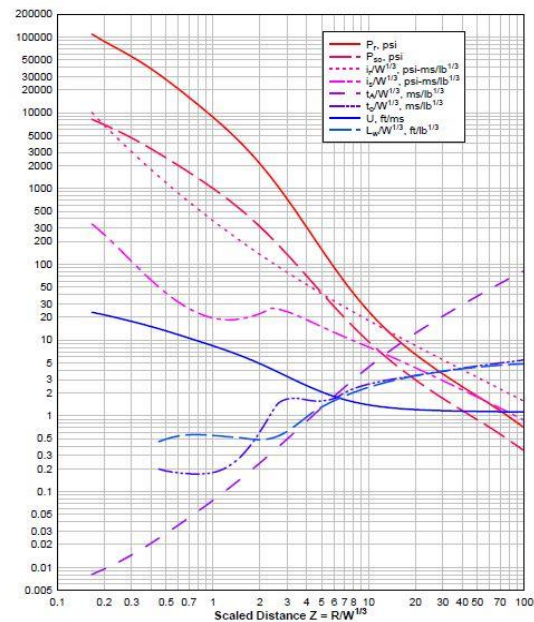
مدل‌ها با توجه به مقدار ماده منفجره بر اساس دستورالعمل UFC 3-340-02 [۲] تحت اثر بارگذاری انفجاری مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. سطح انفجار معادل انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲۰ متری از سازه در نظر گرفته شده است. بارگذاری انفجاری مدل‌ها بر اساس فاز

نمونه نشان داده شده است. ضرایب افزایش دینامیکی (DIF) بر اساس دستورالعمل UFC 3-340-02 [۲] به ترتیب برای خمش و کشش - فشار در حالت تسلیم ۱/۱۹ و ۱/۱۲ و برای حالت نهایی ۱/۰۵ است. این ضرایب در مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی جدول (۱) ضرب می‌شوند. درصد میرایی در مدل‌سازی‌های صورت گرفته در نرم‌افزار به میزان ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

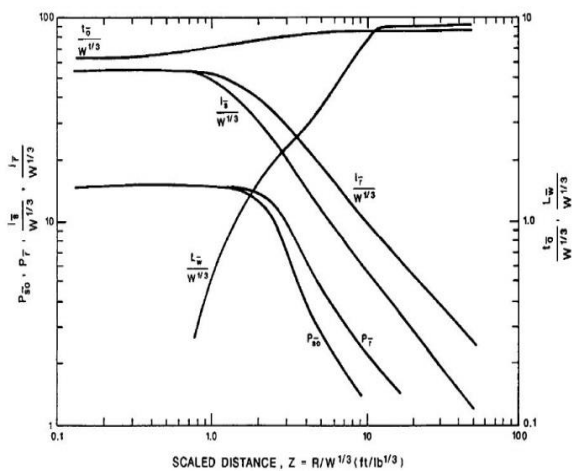


شکل ۸- نمودارهای فشار - زمان وارد بر وجوه مختلف سازه.

شده، پارامترهایی نظیر بیشینه فشار انفجار در فاز مثبت و منفی، مدت زمان فاز مثبت و منفی انفجار، ضربه ناشی از انفجار در فاز مثبت و منفی و... را تعیین نمود.



شکل ۶- پارامترهای فاز مثبت موج انفجار [۲].



شکل ۷- پارامترهای فاز منفی موج انفجار [۲].

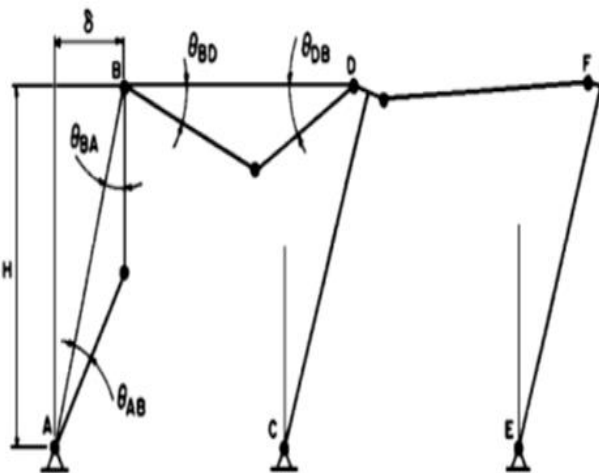
نمودارهای فشار - زمان به دست آمده بر اساس دستورالعمل UFC 3-340-02 [۲] برای قاب ۵ طبقه و فاصله ۲۰ متری از ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرمی در نمودارهای شکل (۸) نشان داده شده است.

۳-۳- مشخصات مصالح مصرفی

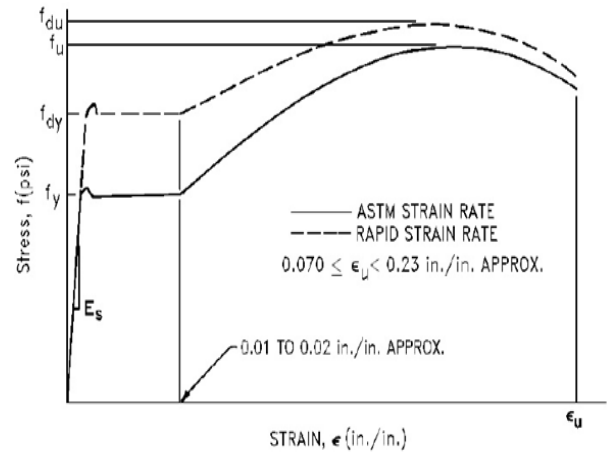
با توجه به اینکه بارگذاری انفجاری از نوع بارگذاری‌های سریع است، این خاصیت باعث ایجاد افزایش در سطح تنش تسلیم و همچنین تنش نهایی قبل از گسیختگی مصالح می‌شود [۲ و ۴]. در شکل (۹) اثرات نرخ کرنش بر منحنی تنش - کرنش فولاد در حالت تک محوری به‌طور

۳-۵- تحلیل مدل‌ها

در این تحقیق دو نوع قاب فولادی ۵ و ۱۰ طبقه که در هر قاب سه دهانه که عرض هر دهانه ۵ متر و ارتفاع هر طبقه ۳ متر می‌باشد در نرم‌افزار SAP 2000 جهت طراحی مدل می‌گردد. سامانه باربری جانبی مدل به صورت مهاربندی شده هم‌محور (CBF) انتخاب شده است. طراحی متعارف مدل به کمک نرم‌افزار رایج طراحی ساختمان‌های طبقاتی، SAP 2000، مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۹] و تحت اثر بارهای مرده و زنده که بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۲۰]، محاسبه گشته‌اند، انجام شده است. ترکیب بار مورد استفاده در طراحی به صورت $1BL + 1.2DL + 0.5LL + 0.2SL$ به نرم‌افزار معرفی شد. به این صورت که ابتدا یک تحلیل استاتیکی برای بارهای زنده و مرده انجام شد تا وضعیت اولیه سازه پیش از اعمال بار دینامیکی مشخص شود و سپس تحلیل بار انفجار از انتهای این حالت ادامه داده شد. بارهای ناشی از انفجار به صورت مجموعه‌ای از بارهای متمرکز و گسترده بر روی وجوه رو به انفجار، سقف و پشت به انفجار و در محل اتصال تیر به ستون بر قاب وارد شدند. بارهای انفجاری به صورت یک بار تاریخچه زمانی وارد نرم‌افزار می‌شوند. به تعداد بارهای ورودی، الگوی بار برای نرم‌افزار تعریف شد. بار گسترده مرده وارد بر تیرهای طبقات و بام به ترتیب $12/5 \text{ kg/cm}$ و $15/5 \text{ kg/cm}$ و بار گسترده زنده وارده به ترتیب 10 kg/cm و $7/5 \text{ kg/cm}$ و بار برف وارده بر طبقه بام $6/7 \text{ kg/cm}$ محاسبه شد. تعریف مشخصات مفاصل غیر خطی اعضا نیز بر اساس دستورالعمل FEMA 356 [۲۱] و با اعمال محدودیت‌های تغییر شکل اعضاء در سطوح عملکردی مختلف انجام شده است. با توجه به اینکه HHT (Hilber-Hughes-Taylor) روش ضمن داشتن دقت قابل قبول از همگرایی مناسبی در روند حل غیر خطی نیز برخوردار است. در این تحقیق از این روش جهت انتگرال‌گیری زمانی در آنالیز دینامیکی استفاده شده است.



شکل ۱۰- دوران مفاصل پلاستیک در اعضای قاب [۲].



شکل ۹- اثر بارگذاری سریع در نمودار تنش - کرنش فولاد.

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی.

فولاد مصرفی از نوع ST52 با مشخصات زیر				
$\rho(\text{Kg/m}^3)$	γ	$E(\text{Kg/m}^3)$	$F_u(\text{Kg/m}^2)$	$F_y(\text{Kg/m}^2)$
۷۸۵۰	۰/۳	۲۱۰۰۰۰۰	۵۲۰۰	۳۶۰۰
تنش‌های فولاد مصرفی با اعمال ضریب افزایش دینامیکی (DIF)				
$F_{dy} = 1.12 * F_y$ (کشش/ فشار)	$F_{dy} = 1.19 * F_y$ (برش/ خمش)	$F_{du} = 1.05 * F_u$		
۴۰۳۲	۴۲۸۴	۵۴۶۰		

۳-۴- ضوابط پذیرش اعضا

ضوابط پذیرش اعضای سازه با توجه به محدودیت‌های تغییر شکل در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شده است. معیار اولیه برای اندازه‌گیری پاسخ سازه، تعیین نسبت شکل پذیری (μ) برای اعضای سازه‌ای می‌باشد، این معیار به این منظور کنترل می‌شود تا عضو مورد نظر از سازه پیش از رسیدن به دوران مورد نظر دچار کمانش نشود. میزان دوران (θ) در محل مفصل پلاستیک مطابق شکل (۱۰)، نیز معیار دیگری است که پاسخ تغییر شکل حداکثر را تابعی از طول دهانه عضو می‌نماید و نشان دهنده درصد ناپایداری در نواحی بحرانی عضو می‌باشد.

جدول ۲- ضوابط پذیرش اعضای قاب فولادی.

ضوابط پذیرش		سطح عملکرد
μ	(θ رادیان)	
۱/۵	۰/۰۱۷	استفاده بی‌وقفه (IO)
۲	۰/۰۲۶	ایمنی جانی (LS)
۳	۰/۰۳۵	آستانه فروریزش (CP)

۳-۶- اعتبار سنجی نرم افزار SAP 2000

به منظور صحت سنجی نتایج تحلیل و شبیه سازی نرم افزار SAP 2000 در این تحقیق، از یک مقاله انجام گرفته توسط حسینی و همکاران [۲۲] استفاده شده است. در تحقیق ذکر شده یک قاب فولادی با سامانه قاب خمشی تحت اثر بارگذاری انفجاری با مقدار بار انفجاری مشخص (۱۰۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۳۰ متری) قرار گرفته و در نرم افزار SAP 2000 تحلیل و به روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD) طراحی شده است. در تحقیق حسینی قاب مورد مطالعه دارای ۸ طبقه و ارتفاع هر طبقه ۳ متر می باشد و در هر طبقه سه دهانه ۵ متری قرار دارد. کاربری ساختمان مذکور اداری و خاک محل احداث خاک نوع ۲ است. نمای کلی قاب و مقاطع به کار رفته در مدل سازی قاب به ترتیب در شکل (۱۱) و جدول (۳) ارائه شده است.

مقادیر حداکثر جابه جایی افقی، حداکثر جابه جایی قائم و حداکثر دوران در قاب های مدل سازی شده در جدول (۴) ارائه و با هم مقایسه گردیده است. حد اکثر اختلاف حدود ۱۱ درصدی نتایج ارائه شده در تحقیق حسینی و همکاران و نتایج تحلیل مجدد در نرم افزار SAP 2000 نشان دهنده قابل اعتماد بودن نتایج تحلیل در نرم افزار SAP 2000 می باشد.

۴- نتایج حاصل از تحلیل و طراحی مدل ها در سطوح

مختلف عملکردی

۴-۱- طراحی برای سطح عملکرد بالا (استفاده بی وقفه (IO))

الف) مقاطع به دست آمده در طراحی قاب دو بعدی ۵ طبقه برای سطح عملکرد بالا (استفاده بی وقفه (IO)) در شکل (۱۲) و جدول (۵) نمایش داده شده است.

ب) مقاطع به دست آمده در طراحی قاب دو بعدی ۱۰ طبقه برای سطح عملکرد بالا (استفاده بی وقفه (IO)) در شکل (۱۳) و جدول (۶) نمایش داده شده است.

۴-۲- طراحی برای سطح عملکرد پایین (ایمنی جانی (LS))

الف) مقاطع به دست آمده در طراحی قاب دو بعدی ۵ طبقه برای سطح عملکرد پایین (ایمنی جانی (LS)) در شکل (۱۴) و جدول (۷) نمایش داده شده است.

جدول ۳- مقاطع به کار رفته در مدل سازی (ابعاد به سانتی متر).

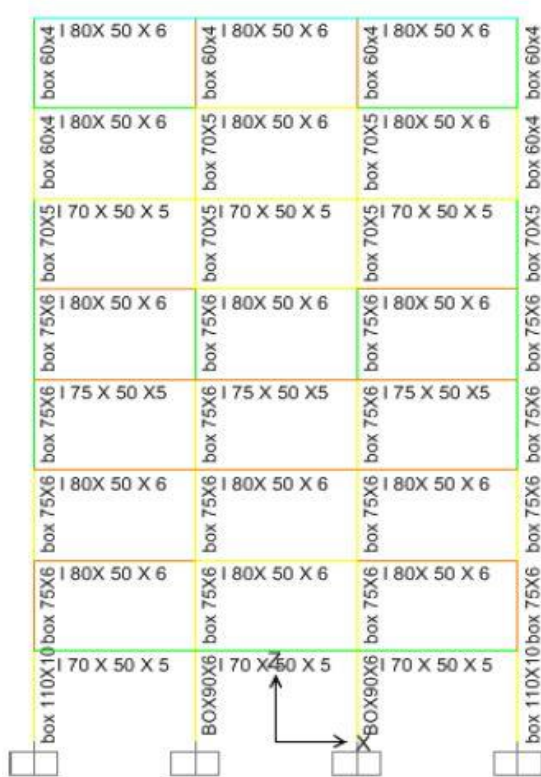
نوع جزء	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۶	طبقه ۷	طبقه ۸
ستون های پیرامونی	BOX 110*10	BOX 75*6	BOX 75*6	BOX 75*6	BOX 75*6	BOX 70*5	BOX 60*4	BOX 60*4
ستون های داخلی	BOX 90*6	BOX 75*6	BOX 75*6	BOX 75*6	BOX 75*6	BOX 70*5	BOX 70*5	BOX 60*4
تیر طبقه	I 70*50*5	I 80*50*6	I 80*50*6	I 75*50*5	I 80*50*6	I 70*50*5	I 80*50*6	I 80*50*6

ب) مقاطع به دست آمده در طراحی قاب دو بعدی ۱۰ طبقه برای سطح عملکرد پایین (ایمنی جانی (LS)) در شکل (۱۵) و جدول (۸) نمایش داده شده است.

۴-۳- طراحی برای سطح عملکرد بسیار پایین (آستانه فروریزش (CP))

الف) مقاطع به دست آمده در طراحی قاب دو بعدی ۵ طبقه برای سطح عملکرد بسیار پایین (آستانه فروریزش (CP)) در شکل (۱۶) و جدول (۹) نمایش داده شده است.

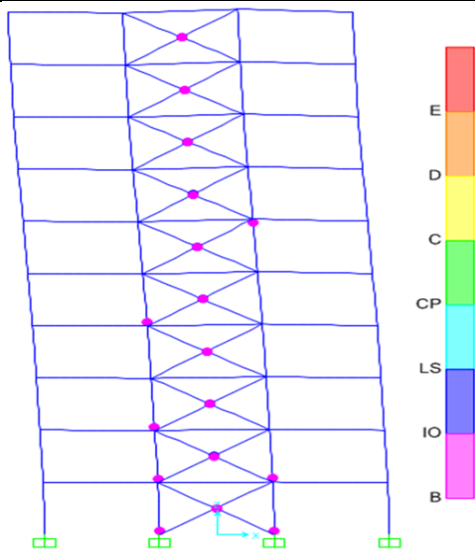
ب) مقاطع به دست آمده در طراحی قاب دو بعدی ۱۰ طبقه برای سطح عملکرد بسیار پایین (آستانه فروریزش (CP)) در شکل (۱۷) و جدول (۱۰) نمایش داده شده است.



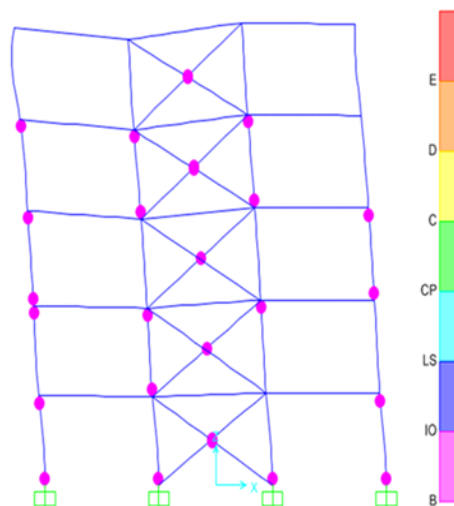
شکل ۱۱- نمای قاب مورد مطالعه در تحقیق حسینی [۲۶].

جدول ۴ - مقایسه نتایج در تحقیق حسینی و نرم افزار SAP 2000.

نوع	نتایج تحقیق حسینی و همکاران	نتایج تحلیل مجدد در SAP 2000	اختلاف (بر حسب درصد)
حداکثر جابه‌جایی افقی (بر حسب سانتی‌متر)	۱۴/۹	۱۶/۵۳	۱۰/۹۳
حداکثر جابه‌جایی قائم (بر حسب سانتی‌متر)	۱/۳۵	۱/۲۳	۸/۸۸
حداکثر دوران (بر حسب رادیان)	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸۴۵	۶/۱۱



شکل ۱۳- قاب ۱۰ طبقه طراحی شده برای سطح عملکرد بالا (استفاده بی‌وقفه (IO)).



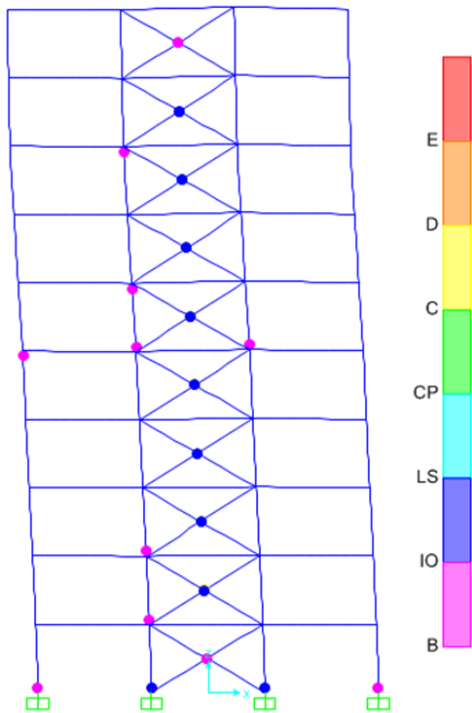
شکل ۱۲- قاب ۵ طبقه طراحی شده برای سطح عملکرد بالا (استفاده بی‌وقفه (IO)).

جدول ۵- مقاطع حاصله از طراحی قاب ۵ طبقه برای سطح عملکرد بالا (استفاده بی‌وقفه (IO)).

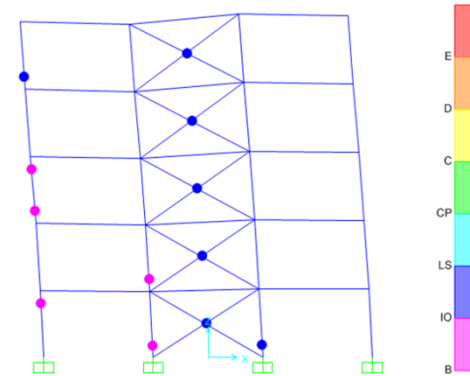
مقاطع طراحی شده (ابعاد به سانتی‌متر)				
ردیف	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی	تیر	مهاربند
طبقه ۱	BOX 18*18*1.5	BOX 40*40*3.5	IPE 33	BOX 24*24*2
طبقه ۲	BOX 18*18*1.5	BOX 30*30*2.5	IPE 33	BOX 23*23*2
طبقه ۳	BOX 18*18*1.5	BOX 30*30*2	IPE 33	BOX 20*20*2
طبقه ۴	BOX 18*18*1.5	BOX 20*20*2	IPE 33	BOX 18*18*1.5
طبقه ۵	BOX 18*18*1.5	BOX 17*17*1.5	IPE 36	BOX 15*15*1.5

جدول ۶- مقاطع حاصله از طراحی قاب ۱۰ طبقه برای سطح عملکرد بالا (استفاده بی‌وقفه (IO)).

مقاطع طراحی شده (ابعاد به سانتی‌متر)				
ردیف	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی	تیر	مهاربند
طبقه ۱	BOX 30*30*2	BOX 70*70*5	BOX 30*30*1	BOX 35*35*1
طبقه ۲	BOX 30*30*2	BOX 60*60*4	BOX 30*30*1	BOX 35*35*1
طبقه ۳	BOX 30*30*2	BOX 60*60*3	BOX 30*30*1	BOX 35*35*1
طبقه ۴	BOX 30*30*2	BOX 55*55*3	BOX 30*30*1	BOX 35*35*1
طبقه ۵	BOX 30*30*2	BOX 50*50*2.5	BOX 30*30*1	BOX 25*25*1
طبقه ۶	BOX 30*30*2	BOX 45*45*2.5	BOX 30*30*1	BOX 25*25*1
طبقه ۷	BOX 30*30*2	BOX 45*45*2.5	BOX 30*30*1	BOX 20*20*1
طبقه ۸	BOX 30*30*2	BOX 45*45*2.5	BOX 30*30*1	BOX 20*20*1
طبقه ۹	BOX 30*30*2	BOX 45*45*2.5	BOX 30*30*1	BOX 20*20*1
طبقه ۱۰	BOX 30*30*2	BOX 40*40*2	BOX 30*30*1.5	BOX 20*20*0.8



شکل ۱۵- قاب ۱۰ طبقه طراحی شده برای سطح عملکرد پایین (ایمنی جانی (LS)).



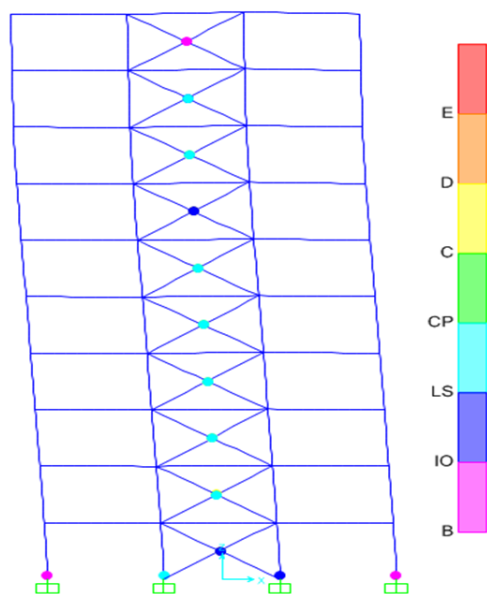
شکل ۱۴- قاب ۵ طبقه طراحی شده برای سطح عملکرد پایین (ایمنی جانی (LS)).

جدول ۷- مقاطع حاصله از طراحی قاب ۵ طبقه برای سطح عملکرد پایین (ایمنی جانی (LS)).

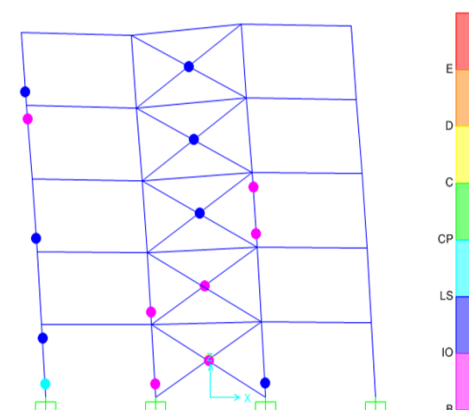
مقاطع طراحی شده (ابعاد به سانتی‌متر)				
مهاربند	تیر	ستون‌های میانی	ستون‌های کناری	ردیف
BOX 22*22*2	IPE 33	BOX 40*40*3.5	BOX 18*18*1.5	طبقه ۱
BOX 22*22*2	IPE 33	BOX 30*30*2.5	BOX 18*18*1.5	طبقه ۲
BOX 19*19*2	IPE 33	BOX 23*23*2	BOX 18*18*1.5	طبقه ۳
BOX 18*18*1.3	IPE 33	BOX 18*18*2	BOX 18*18*1.5	طبقه ۴
BOX 15*15*1.2	IPE 36	BOX 16*16*1.5	BOX 18*18*1.5	طبقه ۵

جدول ۸- مقاطع حاصله از طراحی قاب ۱۰ طبقه برای سطح عملکرد پایین (ایمنی جانی (LS)).

مقاطع طراحی شده (ابعاد به سانتی‌متر)				
مهاربند	تیر	ستون‌های میانی	ستون‌های کناری	ردیف
2UPN 24/5	BOX 30*30*1	BOX 68*68*5	BOX 30*30*2	طبقه ۱
2UPN 30/5	BOX 30*30*1	BOX 58*58*4	BOX 30*30*2	طبقه ۲
2UPN 30/5	BOX 30*30*1	BOX 55*55*3	BOX 30*30*1.5	طبقه ۳
2UPN 30/5	BOX 30*30*1	BOX 50*50*3	BOX 30*30*1.5	طبقه ۴
2UPN 30/4	BOX 30*30*1	BOX 50*50*3	BOX 30*30*1.5	طبقه ۵
2UPN 24/5	BOX 30*30*1	BOX 45*45*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۶
2UPN 24/5	BOX 30*30*1	BOX 45*45*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۷
BOX 20*20*0.5	BOX 30*30*1	BOX 40*40*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۸
2UPN 22/2	BOX 30*30*1	BOX 40*40*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۹
BOX 20*20*0.5	BOX 30*30*1.5	BOX 40*40*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۱۰



شکل ۱۷- قاب ۱۰ طبقه طراحی شده برای سطح عملکرد بسیار پایین (آستانه فروریزش (CP)).



شکل ۱۶- قاب ۵ طبقه طراحی شده برای سطح عملکرد بسیار پایین (آستانه فروریزش (CP)).

جدول ۹- مقاطع حاصله از طراحی قاب ۵ طبقه برای سطح عملکرد بسیار پایین (آستانه فروریزش (CP)).

مقاطع طراحی شده (ابعاد به سانتی‌متر)				
مهاربند	تیر	ستون‌های میانی	ستون‌های کناری	ردیف
BOX 21*21*2	IPE 33	BOX 40*40*3.5	BOX 18*18*1.3	طبقه ۱
BOX 21*21*2	IPE 33	BOX 30*30*2.5	BOX 18*18*1.3	طبقه ۲
BOX 19*19*2	IPE 33	BOX 23*23*2	BOX 18*18*1.3	طبقه ۳
BOX 18*18*1.2	IPE 33	BOX 18*18*2	BOX 18*18*1.3	طبقه ۴
BOX 15*15*1	IPE 36	BOX 16*16*1.5	BOX 18*18*1.3	طبقه ۵

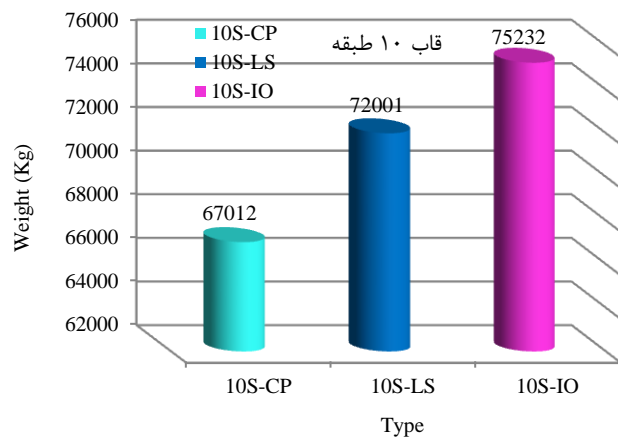
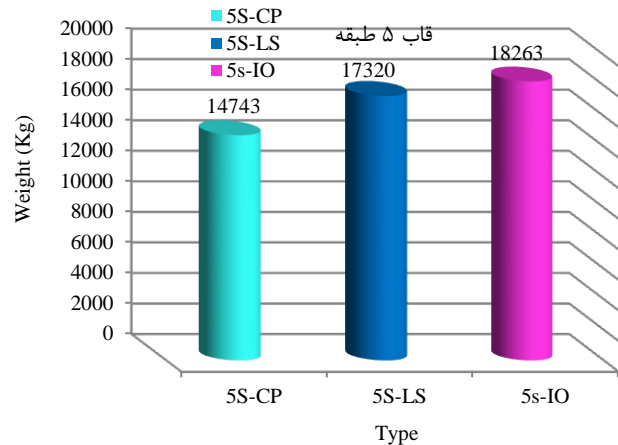
جدول ۱۰- مقاطع حاصله از طراحی قاب ۱۰ طبقه برای سطح عملکرد بسیار پایین (آستانه فروریزش (CP)).

مقاطع طراحی شده (ابعاد به سانتی‌متر)				
مهاربند	تیر	ستون‌های میانی	ستون‌های کناری	ردیف
2UPN 22/2	BOX 30*30*1	BOX 60*60*5	BOX 30*30*2	طبقه ۱
2UPN 26/4	BOX 30*30*1	BOX 56*56*4	BOX 30*30*2	طبقه ۲
2UPN 28/4	BOX 30*30*1	BOX 55*55*3	BOX 30*30*1.5	طبقه ۳
2UPN 26/4	BOX 30*30*1	BOX 50*50*3	BOX 30*30*1.5	طبقه ۴
2UPN 26/4	BOX 30*30*1	BOX 50*50*3	BOX 30*30*1.5	طبقه ۵
2UPN 22/4	BOX 30*30*1	BOX 45*45*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۶
2UPN 22/4	BOX 30*30*1	BOX 45*45*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۷
2UPN 18/2	BOX 30*30*1	BOX 40*40*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۸
2UPN 18/2	BOX 30*30*1	BOX 40*40*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۹
BOX 20*20*0.5	BOX 30*30*1.5	BOX 40*40*2	BOX 30*30*1.5	طبقه ۱۰

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مقایسه تأثیر روش طراحی بر وزن مصالح مصرفی

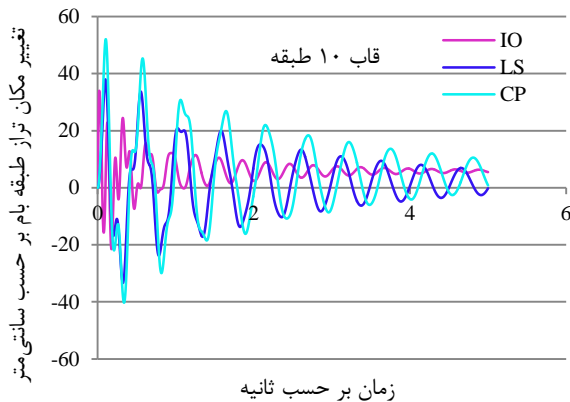
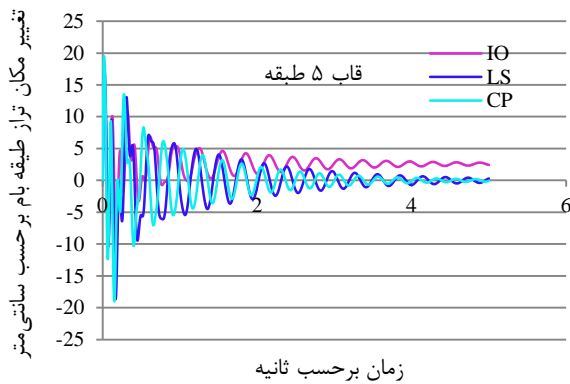
نمودار مقایسه‌ای وزن مصالح مصرفی در قاب‌های پنج و ده طبقه برای انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲۰ متری از سازه و برای سطوح مختلف عملکردی به صورت نمودار (۱) درآمد. در نمودارهای (۱) منظور از S تعداد طبقات، IO طراحی به روش سطح عملکردی استفاده بی‌وقفه، LS طراحی به روش سطح عملکردی ایمنی جانی، CP طراحی به روش سطح عملکردی آستانه فروریزش می‌باشد.



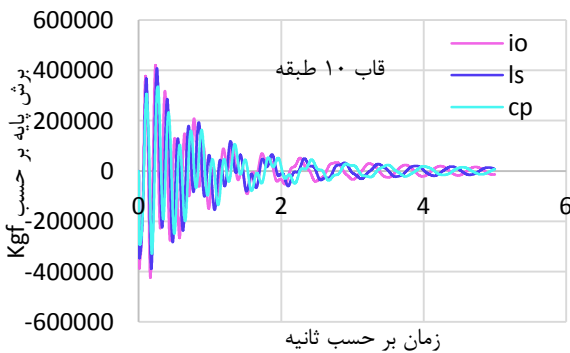
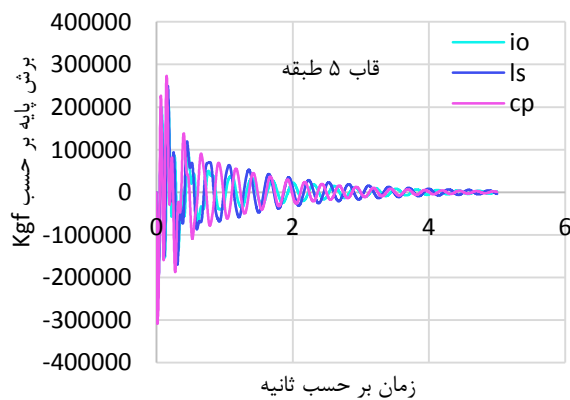
نمودار ۱- نمودار مقایسه‌ای وزن مصالح مصرفی در قاب‌های پنج و ده طبقه.

۵-۲- مقایسه تأثیر روش طراحی در سطوح مختلف عملکردی در مقادیر پاسخ سازه‌ای

بررسی پاسخ سازه‌ای قاب‌های طراحی شده، شامل تاریخچه زمانی تغییر مکان کلی بام، تاریخچه زمانی مقدار شتاب طبقات و تاریخچه زمانی برش پایه است و مشاهده می‌شود که هم در نمونه‌های سازه‌ای پنج طبقه و هم ده طبقه، مقادیر پاسخ مربوط به طراحی بر اساس سطوح مختلف عملکردی در نمودارهای به ترتیب (۲، ۳، ۴) نمایش داده شده است. همچنین نمودار تغییر مکان تراز طبقه بام در مقابل پایین آمدن سطح عملکرد سازه (کاهش وزن سازه) برای قاب ۵ و ۱۰ طبقه در نمودار (۵) نمایش داده شده است.



نمودار ۲- مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان کلی بام در قاب ۵ و ۱۰ طبقه برای سطوح مختلف عملکردی.



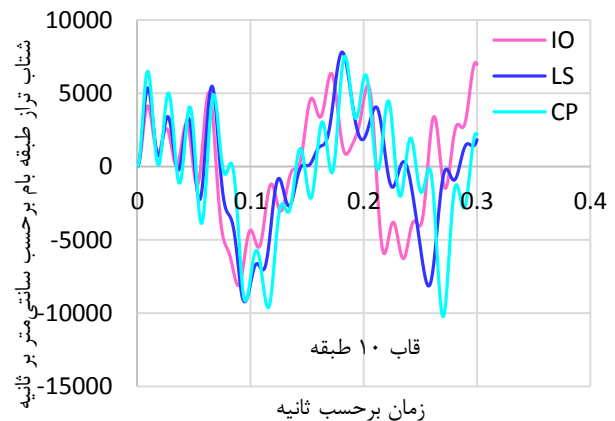
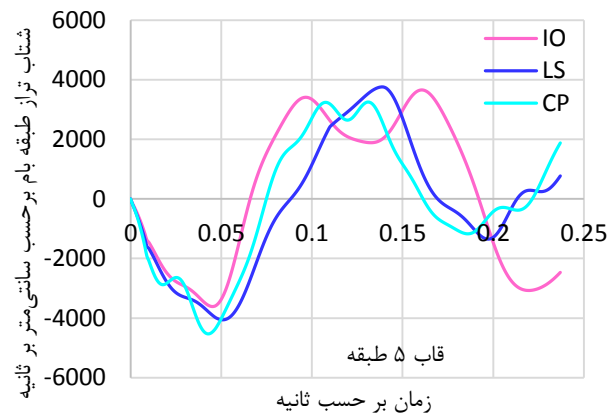
نمودار ۳- مقایسه تاریخچه زمانی مقدار برش پایه در قاب ۵ و ۱۰ طبقه برای سطوح مختلف عملکردی.

۶- نتیجه گیری

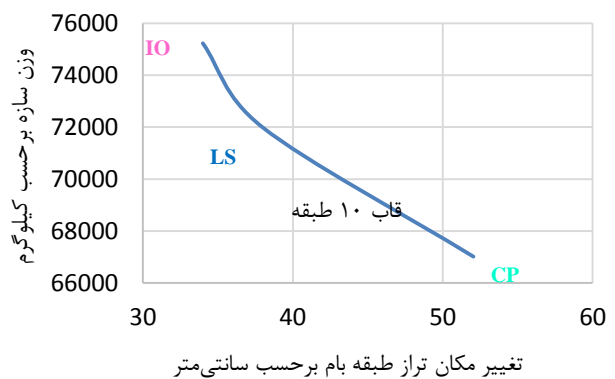
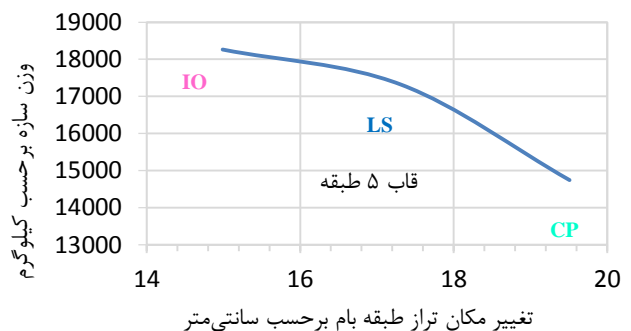
بررسی و مقایسه نتایج ارائه شده در این تحقیق نشان می دهد که همان طور که انتظار می رفت، سازه با سطح عملکرد بالاتر، ایمنی بیشتری را تأمین می کند. ناظر به این موضوع نتایج حاصل از نمودارهای مقایسه ای میزان جابه جایی، سرعت و شتاب تراز طبقه بام قاب ها نشان داد که برای قاب های ۵ طبقه برای جابه جایی حدوداً ۲۰٪ کاهش، سرعت حدوداً بین ۵٪ تا ۵۰٪ کاهش، شتاب ۹٪ تا ۲۰٪ کاهش و برای قاب های ۱۰ طبقه این پارامترها به ترتیب، ۲٪ تا ۳۵٪ کاهش، حدوداً ۵٪ کاهش، ۱۵٪ تا ۲۰٪ کاهش می یابد. در طراحی المان های قاب های طراحی شده، مشاهده شد که ستون های کنار سامانه مهاربندی جانبی (ستون های میانی) به مراتب قوی تر از ستون پیرامونی (ستون های کناری) به دست آمدند. جداول مقاطع حاصله از طراحی ها در بند ۴ بیانگر این مطلب است. با افزایش تعداد طبقات (ارتفاع ساختمان) اختلاف مقادیر به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی به ویژه مقادیر جابه جایی، سرعت و شتاب، به تدریج افزایش یافته و میزان امن بودن سازه به مراتب کاهش می یابد. در مدل ها طراحی شده در سطوح مختلف عملکردی مشاهده شد که مفاصل پلاستیک اکثراً بر روی مهاربندها و ستون های کنار سامانه مهاربندی جانبی (ستون های میانی) و بیشتر در طبقات پایین تشکیل شده است.

مراجعه

- [1] TM 5-855-1 "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; Headquarters, Department of the Army, 1986, 3 November 1.
- [2] Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02), "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of Defense, Washington DC, 2008.
- [3] TR 87-57. "Protective Construction Design Manual: Resistance of Structural Elements"; Tyndall Air Force Base, Fla.: Air Force Engineering and Services Center, Engineering and Services Laboratory, 1989.
- [4] TM 5-1300. "The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of the Army, Navy, and Air Force, Washington DC. 1990.
- [5] DOE/TIC 11268. "Manual OF Blast and Fragment Loadings on Structures"; US Department of Energy (DOE), January 2000.
- [6] ASCE 1995. "Minimum Design Loads for Buildings and other Structures"; American Society of Civil Engineers, New York, NY 1995.
- [7] FEMA426. "Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Building"; Federal Emergency Management Agency, 2003, 4, 1-20.
- [8] FEMA427. "Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks"; Federal Emergency Management Agency, December 2003, Chapter 4, 1-10.
- [9] FEMA428. "Primer for Design Safe Schools Projects in Case of Terrorist Attacks (Risk Management Series)"; Federal Emergency Management Agency, December 2003, Chapter 4, 1-13.
- [10] Richard Leiw, J. "Survivability of Steel Frame Structures Subject to Blast and Fire"; J. Constr. Steel. Res. 2008, 64, 854-866.



نمودار ۴- مقایسه تاریخچه زمانی شتاب طبقات در قاب ۵ و ۱۰ طبقه برای سطوح مختلف عملکردی.



نمودار ۵- نمودار تغییر مکان تراز طبقه بام در مقابل پایین آمدن سطح عملکرد سازه (کاهش وزن سازه).

- [17] Bangash, N. Y. H.; Bangash, T. "Shock, Impact and Explosion"; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, 388-393.
- [18] ISC. "Facts for Steel Buildings, Blast and Progressive Collapse"; American Institute of Steel Construction, 2004, 1-13.
- [19] Bangash, N. Y. H.; Bangash, T. "Explosion-Resistant Buildings"; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006, 67-101.
- [۲۰] دفتر مقررات ملی ساختمان "طرح و اجرای ساختمان های فولادی (مبحث دهم)", وزارت راه و شهرسازی، تهران، ۱۳۹۲.
- [۲۱] دفتر مقررات ملی ساختمان "بارهای وارد بر ساختمان (مبحث ششم)", وزارت راه و شهرسازی، تهران، ۱۳۹۲.
- [22] FEMA356. "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings"; Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [۲۳] حسینی، سیداحمد و بشیری، سجاد و دهقانی اشکذری، قاسم "ارزیابی اقتصادی طراحی سیستم قاب خمشی فولادی در مقابل بار انفجار به دو روش ضرایب بار و مقاومت و سطوح عملکردی"، نشریه علوم و فناوری های پدافند نوین، دوره ۹، شماره ۲، صفحه ۱۶۵-۱۵۱، تهران، ۱۳۹۵.
- [24] ANSI/AISC 360-10. "Specification for Structural Steel Buildings"; American Institute of Steel Construction, 2016, July 7.
- [25] ASCE 41-13. "Seismic Evaluation and Retrofit Rehabilitation of Existing Buildings"; American Society of Civil Engineers, 2014.
- [11] Urgessa, G. S.; Arciszewski, T. "Blast Response Comparison of Multiple Steel Frame Connections"; Finite. Elem. Anal. Des. 2011, 47, 668-675.
- [12] Khandelwal, K.; El-Tawil, S.; Sadek, F. "Progressive Collapse Analysis of Seismically Designed Steel Braced Frames"; J. Constr. Steel. Res. 2009, 65, 699-708.
- [۱۳] شیرمحمدی، حمید و عیوضی یدالهی، حامد و مظاهری، مهدی "مدلسازی قاب خمشی فولادی تحت بار انفجاری"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، شهر مشهد، صفحه ۲، اردیبهشت ۱۳۸۹.
- [۱۴] قدیمی، مصطفی و دهقانی اشکذری، قاسم و حسینی، سیداحمد "مقایسه طراحی سیستم قاب خمشی و دیوار برشی فولادی در برابر انفجار با دو روش طراحی ضرایب بار و مقاومت LRFD و سطوح عملکرد"، کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران معماری شهرسازی، صفحه ۳، شهر تهران، شهریور ۱۳۹۴.
- [۱۵] حیدری رسول آبادی، محمد "مقایسه طراحی سیستم قاب خمشی بتنی و دیوار برشی بتنی نیمه مدفون در برابر بارهای انفجاری با روش های مقاومتی نهایی و سطوح عملکردی"، پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، صفحه ۴۲، ۱۳۹۴.
- [۱۶] خیزآب، بهاران و صادقی، عباسعلی و هاشمی، سیده وحید و مهدی زاده، کوروش و ناصری، حمیدرضا "بررسی عملکرد سیستم های دوگانه ی قاب خمشی با دیوار برشی فولادی تحت اثر انفجار"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، انتشار آنلاین، تهران، ۱۳۹۹.