

## ارزیابی رفتار سازه‌های فولادی نامنظم در پلان با سیستم قاب خمشی در برابر گسیختگی پیش‌رونده ناشی از انفجار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

کد مقاله: ۱۳۹۱۰

محمد باقر باقری مجد<sup>۱</sup>، مجتبی حسینی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

فروپاشی پیش‌رونده گسترش خرابی‌های زنجیروار در یک سازه است که از حداقل یک عضو بحرانی سازه‌ای شروع شده و بطور پیوسته به سایر اعضای سازه منتقل می‌شود و باعث خرابی کلی یا بخش اعظمی از آن سازه می‌گردد. این اتفاق می‌تواند در اثر انفجار در نزدیکی سازه رخ دهد. امروزه با افزایش حملات تروریستی و ایجاد انفجار در اماکن شهری، طراحی معمول سازه‌ها تحت بارهای ثقلی و لرزه‌ای و در شرایط عادی کفایت نمی‌کند و بررسی تأثیر شرایط مختلف بر پاسخ سازه تحت خرابی پیش‌رونده ناشی از انفجار خصوصاً برای سازه‌های مهم ضرورت دارد. در این پژوهش مدل‌های سازه‌ای سه بعدی با تعداد طبقات ۳، ۷، ۱۱ و ۱۵ دارای سیستم قاب خمشی فولادی نامنظم در پلان با استفاده از نرم‌افزار ایتبس در برابر بار زلزله با استفاده از روش دینامیکی طیفی (خطی) طراحی و سپس با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ارزیابی شده‌اند. مبنای تجزیه و تحلیل تخریب پیش‌رونده بر اساس آیین‌نامه UFC می‌باشد. با مقایسه نمودارهای تغییر مکان جانبی تراز بام نسبت به زمان و نمودارهای انرژی داخلی سازه مشخص گردید حذف دو ستون میانی و گوشه شرایط بحرانی تری نسبت به حالت حذف بدون ستون و حذف ستون میانی به تنهایی بوجود می‌آورد؛ و نیز مشخص گردید آسیب پذیری سازه در فواصل نزدیک به طور مثال فاصله ۲ متری بیشتر از فواصل بیشتر مانند ۴ و ۱۰ متر می‌باشد. یعنی با افزایش فاصله تأثیر انفجار بر سازه کمتر می‌شود. البته نرخ کاهش تأثیر انفجار با افزایش فاصله برای سازه‌های بلندتر کمتر است همچنین افزایش ارتفاع و طبقات سازه باعث تأثیر بیشتر انفجار روی انرژی درونی سازه می‌شود که بخاطر افزایش شکل پذیری سازه بلندتر بوده است.

واژگان کلیدی: بارگذاری انفجاری، خرابی پیش‌رونده، قاب خمشی فولادی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه، موسسه آموزش عالی جویندگان علم کوهدشت، [mb.bagheri89@gmail.com](mailto:mb.bagheri89@gmail.com)  
۲- دکترای مهندسی عمران، دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی و دانشگاه لرستان و موسسه آموزش عالی جویندگان علم کوهدشت  
(نویسنده مسئول) [hosseini.m@lu.ac.ir](mailto:hosseini.m@lu.ac.ir)

فروپاشی پیش رونده گسترش خرابی های زنجیره وار در یک سازه که از حداقل یک عضو بحرانی سازه ای شروع شده بطور پیوسته به سایر اعضای سازه منتقل شده و باعث خرابی کلی یا بخش اعظمی از آن سازه می شود. این حادثه وحشتناک می تواند در اثر یک حادثه غیر عادی مانند انفجار بمب، انفجار کپسول گاز، برخورد وسایل نقلیه و یا حتی یک گود برداری غیر اصولی که باعث حذف ناگهانی یک یا چند عضو بحرانی از سازه شود به وجود آید (اسکویی و فرهادی پور، ۱۳۹۸). موضوع فروپاشی پیش رونده یعنی حذف اعضاء کلیدی سازه ها در اثر یک حادثه ناگهانی مانند انفجار، برخورد وسایل نقلیه و بارهای غیرعادی اولین بار در سال ۱۹۶۸ پس از خرابی یکپارچه ساختمان رونان در لندن بر اثر انفجار گاز در طبقه هجدهم این ساختمان ۲۲ طبقه توجه محققین و آیین نامه ها را به خود جلب کرد. در این ساختمان با توجه به انتقال بار توسط دیوارهای باربر بتنی و حذف این بار در اثر انفجار در طبقه هجدهم ونمود مسبر فرعی برای حمل بار ساختمان و نیز شدت ضربه ناشی از سقوط پانل های بتنی فوقانی در مدت بسیار کوتاهی دچار فروپاشی پیش رونده شد. همچنین در سال ۱۹۹۵ ساختمان اداری در شهر اکلاهما در آمریکا به نام آلفرد که با استفاده از سیستم سازه ای بتن مسلح ساخته شده بود در اثر انفجار یک کامیون شامل حدود ۲۳۰۰ کیلوگرم نیترات آمونیم مواد منفجره در ضلع شمالی آن دچار فروپاشی پیش رونده گردید (شکل ۱). نقطه اوج خرابی پیش رونده نیز حمله تروریستی به برجهای تجارت جهانی آمریکا در سپتامبر ۲۰۰۱ می باشد (شکل ۲) در این حادثه در اثر برخورد دو هواپیما به این برجها در طبقات ۱۰۶ و ۱۰۷ تخریب رخ داد که نهایتاً منجر به خرابی پیش رونده در این برجها شد. در این حادثه وحشتناک ۲۷۵۳ نفر جان باختند و شمار زیادی نیز زخمی شدند. پس از این حادثه آیین نامه هایی ویژه طراحی سازه ها در برابر فروپاشی پیش رونده تدوین شد. مانند آیین نامه اداره سرویسهای عمومی (GSA) و آیین نامه ستاد تسهیلات متحد آمریکا (UFC) (اسکویی و فرهادی پور، ۱۳۹۸).



شکل (۲): خرابی پیش رونده در برج های تجارت جهانی در سپتامبر ۲۰۰۱ (اسکویی و فرهادی پور، ۱۳۹۸)



شکل (۱): تخریب ساختمان آلفرد پی مورا (اسکویی و فرهادی پور، ۱۳۹۸)

انفجار حاصل آزاد شدن ناگهانی انرژی است که می تواند به صورت احتراق گازها، انفجار هسته ای یا در اثر انواع مختلف بمب باشد. واحد تی ان تی (TNT) معمولاً به عنوان مرجعی برای تعیین قدرت انفجار استفاده می شود. زمانی که ماده منفجره از نوع TNT نباشد، معادل آن را میتوان با استفاده از ضرایب قید شده در جداول به دست آورد. از مشخصه های اساسی یک انفجار که باعث وارد شدن نیرو بر سازه میشود، می توان به اتفاقی بودن موقعیت انفجار، دینامیکی و گذرا بودن نیروها و زمان اثر کم (بین چند میلی ثانیه تا چند ثانیه) اشاره کرد. هنگامی که یک انفجار صورت می گیرد، انرژی به صورت ناگهانی آزاد می شود. اثر این آزاد شدن انرژی را می توان به دو بخش تشعشعات حرارتی و انتشار امواج در زمین و هوا تقسیم کرد که در این مقاله فقط بخش دوم مورد توجه قرار میگیرد. امواجی از انفجار که در هوا منتشر میشوند، عامل اصلی تخریب سازه هستند. این امواج با سرعتی بیش از سرعت صوت حرکت کرده و به سازه برخورد می کنند. در اثر بازتاب این امواج بر روی سطح سازه، فشار حاصل از آنها افزایش می یابد. همچنین بخشی از امواج هوایی از طریق درها، پنجره و بازشوها به داخل سازه نفوذ کرده و اعضای داخلی سازه را تحت تأثیر قرار می دهند. در حین این جریان، انکسار امواج نیز در گوشه های سازه رخ می دهد که می تواند سبب کاهش یا افزایش فشار حاصل از موج گردد. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا میکند که همه محیط قابل دسترسی سازه تحت اثر فشار موج قرار گیرد. از طرف دیگر، امواجی که با زمین برخورد میکنند، در مسیر حرکت خود، مولکولهای هوا را فشرده کرده و یک فشار کلی محیطی (فشار اتفاقی) ایجاد می نمایند (شیراوند و شعبانی، ۱۳۹۹).

## ۲- مبانی نظری

### ۲-۱- تاریخچه تخریب پیشرونده

موضوع تخریب پیشرونده اولین بار در سال ۱۹۶۸ و بعد از تخریب بخشی از ساختمان رونان در نیوهام انگلستان مطرح شد. این موضوع برای اولین بار باعث گردید تا برخی کشورها نظیر بریتانیا و کانادا استانداردهایی برای جلوگیری از خرابی پیشرونده تنظیم نمودند. در ۱۹۷۶ دستورالعمل‌های ساختمانی بریتانیا الزام نمود ساختمانها طوری طراحی شوند که خرابی‌های نامتناسب را با یکپارچه کردن اعضای سازه‌ای، افزودن درجه نامعینی و فراهم کردن مقاومت کافی برای مقابله با بارهای غیرعادی، تحمل کرده و در برابر آن مقاومت کنند. این الزامات به منظور ساخت سازه‌های مقاوم، شکلپذیر و با توانایی باز توزیع بارهای وارده تنظیم گردید. به مدت سه دهه و پیشرفت‌های نسبتاً کم در موضوع تخریب پیشرونده، تخریب ساختمان مورا در شهر اوکلاهاما در سال ۲۶۶۱ باعث توجه دوباره محققین به این موضوع شد. مهم‌ترین و معروف‌ترین نمونه، تخریب پیشرونده برجهای تجارت جهانی است که به وسیله حملات هوایی در سپتامبر ۲۰۰۱ مورد اصابت قرار گرفتند و به صورت زنجیری کاملاً منهدم شدند. این سه نمونه از تخریب پیشرونده مراحل مهمی را در توسعه تحقیقات و توصیه‌های دستورالعمل‌ها و الزامات آیین‌نامه‌ها و استانداردها برای جلوگیری از تخریب پیشرونده رقم زدند (صاحبی و خانجانی، ۱۳۹۶).

### ۲-۲- تقسیم بندی دیدگاه‌های موجود برای کاهش خرابی پیشرونده

تقسیم بندی استراتژی‌های طراحی در برابر خرابی پیشرونده در نوشته‌های مربوطه به تدریج پدیدار میشود و شامل معرفی سه دیدگاه برای کاهش خرابی پیشرونده می‌باشد. این تقسیم بندی بصورت زیر آشکار میشود:

الف) مقاومت محلی مشخص شده، و اندازه‌گیری‌های حفاظتی غیر سازه‌ای (کنترل رویداد).

ب) مسیر جایگزین بار

ج) قوانین طراحی تجویزی

دیدگاه‌های الف و ب به صورت مستقیم ارجاء داده می‌شوند در حالی که به دیدگاه ج بصورت غیر مستقیم ارجاء داده می‌شود. به صورت مشخص از دیدگاه مقاومت محلی، المانهای باربر عمودی کلیدی به طور مشخص طوری طراحی می‌شوند که توانایی مقاومت در برابر خطرات پیشبینی شده مانند بارهای انفجار یا آتشسوزی را داشته باشند. طراحی المانهای کلیدی نیازمند تکنیک تحلیلی پیشرفته برای محاسبه رفتار دینامیکی غیر خطی سازه می‌باشند. دیدگاه مسیر بار جایگزین در طراحی سازه بکار می‌رود به طوری که تنشها می‌تواند بر اساس المانهای باربر عمودی باز توزیع شود. ساده سازی تا اندازه زیادی برای پروسه طراحی و اطمینان از وجود مسیر جایگزین قابل قبول است. دامنه این روش از تحلیل‌های استاتیکی خطی، تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی، تا تحلیل‌های دینامیکی خطی یا غیر خطی را شامل می‌شود. دیدگاه مسیر بار جایگزین توسط استانداردهای گوناگونی مانند مدیریت تعمیرات کلی و وزارت دفاع انتخاب شده اند هر دو ارگان راهنمایی که بطور کامل جزئیات روش‌های محاسبات را مشخص می‌کند منتشر کردند. بنابراین دیدگاه‌های الف و ب دیدگاه‌های مستقیم هستند، زیرا این دیدگاه‌ها بر اساس محاسبات عددی برای حالت‌های مشخص بار هستند. ولیکن دیدگاه ج به صورت غیر مستقیم مطرح میشود. این دیدگاه به قوانین طراحی مربوط به افزایش قدرت کلی یک سازه می‌پردازد ولی در آن محاسبه عددی برای حالت بارگذاری مشخصی انجام نمیشود. در این دیدگاه مقررات مربوطه به بارهای گرهی که توسط کد اروپایی، استانداردهای انگلیسی و وزارت دفاع ارائه می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف این آیین‌نامه‌ها اطمینان از اتصال مناسب بین اجزاء افقی و قائم است بطوریکه سازه توانایی انتقال از ستون منهدم شده با اثرات زنجیروار را داشته باشد. برای اطمینان از عملکرد ساختمان در هنگام وقوع زلزله می‌بایست قبل از طراحی ملاحظات را در نظر داشت که در ظاهر ممکن است مهم به نظر نیاید ولی تأثیر عمده‌ای بر رفتار لرزه‌ای سازه دارد. در حقیقت سه مقوله ملاحظات سازه‌ای و معماری و ژئوتکنیکی در طراحی سازه‌ها مهم می‌باشند که در ابتدا بایستی مد نظر قرار گیرند. این سه اصل در ادامه بررسی می‌شود (صاحبی و خانجانی، ۱۳۹۶).

### ۲-۳- انواع مختلف خرابی پیشرونده

**خرابی پن کیک:** مهمترین مثال برای این نوع، خرابی برج‌های تجارت جهانی می‌باشد. برخورد هواپیماها و آتش سوزی متعاقب آن باعث ایجاد خرابی‌های موضعی در محل اصابت شد و به دنبال آن کاهش باربری عمودی اتفاق افتاد. در پی این کاهش باربری، بار اضافی بین مقاطع باربر سالم برج تقسیم شد. در هنگام خرابی طبقات بالاتر شروع به سقوط کرده و انرژی جنبشی آنها به صورت تجمعی زیاد شد. با برخورد طبقات خراب شده که انرژی جنبشی افزایش یافته‌ای را دارا بودند به طبقات سالم، و ایجاد نیروهایی بیش از مقاومت آن‌ها خرابی تشدید شده و انرژی جنبشی افزایش یافت. خرابی به همین صورت پیش رفت و در نهایت باعث خرابی کلی سازه شد

**خرابی زیپی:** بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی پل‌های معلق، با پاره شدن یک کابل سازه نباید پایداری خود را از دست بدهد. در این مواقع نباید خرابی یک کابل و اضافه بار آن بر روی کابل‌های همسایه باعث پاره شدن آنها شود. در صورتی که

طراحی درست صورت نگرفته باشد این مساله باعث پارگی کابل های دیگر و ایجاد خرابی پیش رونده می‌شود. البته این نوع خرابی برای دیوارهای حائل مهار شده نیز می‌تواند اتفاق بیفتد

**خرابی دو مینویی:** مکانیسم این نوع خرابی به صورت زیر می‌باشد:

- واژگونی اولیه یک المان
- افتادن المان به صورت حرکت زاویه ای جسم صلب حول یک گوشه از جسم
- تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی
- ضربه جانبی گوشه بالای المان به المان مجاور که ترکیبی از نیروهای استاتیکی و دینامیکی را ایجاد می‌کند.
- پیش رفتن خرابی در جهت واژگونی.
- سازه هایی که مهار جانبی مناسبی ندارند دچار این خرابی می‌شوند مانند داربست یا پایه های خطوط انتقال آب مثالی از این نوع خرابی است.

**خرابی مقطع:** یک تیر تحت خمش یا آرماتور تحت نیروی محوری کششی را در نظر بگیرید. وقتی قسمتی از سطح مقطع می برد نیرو بین باقی سطح مقطع پخش می‌شود. بر این اساس افزایش نیروی مقطع می‌تواند باعث گسیختگی مقطع شود. این نوع خرابی تقریباً شبیه خرابی زبیلی است. بر اساس مکانیک شکست، تنش‌ها در اطراف ترک با کمتر شدن فاصله به سمت بی نهایت میل می‌کنند. البته در سیستم سازه ای المان‌ها از هم فاصله دارند و فواصلشان صفر نیست. ولیکن با این حال تمرکز نیرو در اعضای مجاور عضو آسیب دیده وجود دارد

**خرابی به علت ناپایداری:** به طور معمول سازه‌ها طوری طراحی می‌شوند که ناپایدار نشوند. شکست المان‌های مهاربندی می‌تواند باعث ناپایداری سازه و ایجاد خرابی شود. این حالت می‌تواند در خرپا یا تیر سازه‌هایی اتفاق بیافتد که المان‌های مهاربندی که برای پایداری، المان‌های فشاری بکار می‌روند دچار شکست شوند. حالت دیگر، خرابی پلیت سخت کننده است که باعث ناپایداری موضعی و در نهایت منجر به خرابی کلی می‌شود. در این حالت یک اتفاق کوچک منجر به خرابی گسترده می‌شود. البته کمانش ستون نیز میتواند باعث ناپایداری کلی سازه شود و در پی آن خرابی کل سازه اتفاق بیافتد

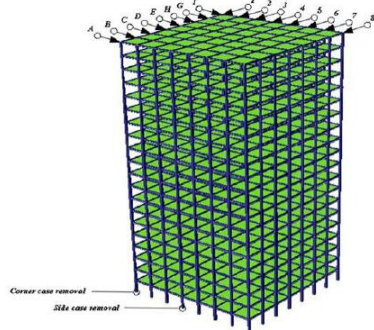
**خرابی ترکیبی:** خرابی‌ها پیش رونده‌ای که تاکنون اتفاق افتاده کاملاً بر یکی از گونه‌های گفته شده منطبق نیست. در بسیاری از موارد خرابی ترکیبی از چند حالت مختلف خرابی است.

## ۲-۴- تاریخچه مطالعات انجام شده

به منظور بررسی و شبیه سازی دقیق مسئله، شناخت پارامترهای مختلف و نیز بررسی استفاده از نتایج پژوهشگران که بسیار حائز اهمیت است، لذا در ادامه سعی می‌شود تا به شرح برخی از کارهای انجام شده توسط دیگر محققان پرداخته شود. خیرالدین و مداحی (۱۳۹۸) در تحقیقی با عنوان بررسی خرابی پیشرونده در قابهای خمشی فولادی با پلان L شکل به کمک آنالیز حساسیت به بررسی موقعیت ستون بحرانی در پلان L شکل پرداخته‌اند. برای این منظور سازه‌های ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ طبقه به صورت سه بعدی مدلسازی شده‌اند. برای تعیین المان کلیدی در این نوع پلانها، ستونها در موقعیت‌های مختلف حذف شده و سازه‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته قرار گرفته‌اند. بر اساس مقادیر ظرفیت باربری سازه، شاخص حساسیت محاسبه شده و المانی که بیشترین مقدار شاخص حساسیت را دارا باشد به عنوان المان کلیدی در خرابی پیشرونده تعیین می‌شود. نتایج بدست آمده در این مقاله نشان می‌دهند که در پلان L شکل، ستون مرکزی بحرانی‌ترین ستون در خرابی پیشرونده می‌باشد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که در سازه‌هایی با ارتفاع بیشتر، حذف ستون می‌تواند شرایط بحرانی تری از نظر خرابی پیشرونده به وجود آورد (مداحی و خیرالدین، ۱۳۹۸).

راه نورد و سیاه پهلوی (۱۳۹۹) در تحقیقی با عنوان مقایسه عملکرد قاب خمشی و قاب خمشی با مهاربند هم محور در سازه‌های بلند فولادی در اثر خرابی پیشرونده به این موضوع پرداخته‌اند که سازه‌های فولادی تقریباً نیمی از سازه‌های موجود در دنیا را تشکیل می‌دهند. سیستم قاب خمشی فولادی و قاب خمشی فولادی به همراه مهاربند همگرا دو نوع از سیستم‌های رایج و متداول فولادی هستند که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. اکثر آیین‌نامه‌های مربوط به این سازه‌ها ضوابط بسیاری را برای مقابله در برابر نیروی زلزله بیان کرده‌اند ولی اشاره‌ای به طراحی این سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی آنی همچون انفجار و یا برخورد ماشین به آنها نکرده‌اند. در صورتی که عوامل ذکر شده باعث خرابی یکی از عناصر کلیدی سازه همچون ستون گردند ممکن است خرابی کلی یا بخشی از سازه را فراهم آورد. از این رو بررسی این سازه در برابر خرابی پیشرونده ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود و با بکارگیری نرم‌افزار آباکوس ساختمان ۲۰ طبقه فولادی (شکل ۳) با دو نوع سیستم سازه‌ای و دو نوع سناریوی حذف ستون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج عددی با استفاده از خروجی‌های آزمایشگاهی صحت سنجی گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سازه از نظر افزایش نیروی محوری و لنگر خمشی در حالت حذف ستون کناری نسبت به ستون گوشه بحرانی‌تر است. همچنین مشاهده گردید که تفاوت چندانی بین پاسخ سیستم‌های جانبی مختلف در برابر خرابی پیشرونده وجود ندارد. بار ستون‌های مجاور بعد از حذف ستون تقریباً دو برابر می‌شود، بنابراین برای مقابله با خرابی

پیشرونده پیشنهاد می‌گردد ستون های سازه برای نیروی دو برابر ناشی از بارهای سرویس نیز کنترل گردد (راه نورد وسیاه پلو ، ۱۳۹۹)



شکل (۳): نمونه مدل عددی (راه نورد وسیاه پلو ، ۱۳۹۹)

فنگ فو در سال (۲۰۱۹) به بررسی خرابی پیشرونده یک ساختمان ۲۰ طبقه فولادی با مدل سازی اجزا محدود سه بعدی پرداخت. در مدل سازی خاصیت غیر خطی مصالح و رفتار غیر خطی هندسی در نظر گرفته شد و همچنین پاسخ سازه تحت سناریو های مختلف حذف ستون به صورت ناگهانی (مستقل از عامل خرابی) مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر های تاریخچه تغییر مکان گره بالای عضو حذف شده و تاریخچه نیروی محوری اعضا مجاور عضو حذف شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز نشان داد که مدل سازی سه بعدی به روش اجزا محدود می تواند تمام رفتار سازه ای ساختمان چندین طبقه را با دقت کافی ارائه دهد (فو ، ۲۰۱۹).

جینکو کیم و داوون آن (۲۰۱۹) در تحقیقی به بررسی اثر عمل زنجیره ای روی پتانسیل خرابی پیشرونده در ساختمان های فولادی با سیستم مقاوم قاب خمشی پرداختند. ایشان تحلیل استاتیکی غیر خطی و تحلیل دینامیکی غیر خطی را روی سازه های ۳ و ۶ طبقه با وجود سیستم مهاربندی و بدون وجود سیستم مهاربندی با استفاده از روش مسیر جایگزین توصیه شده در آیین نامه UFC 2003 انجام دادند. بر اساس تحلیل استاتیکی خطی، پتانسیل خرابی پیشرونده و تاثیر عمل زنجیره ای با افزایش تعداد طبقات و تعداد دهانه ها افزایش می یابد. تحلیل دینامیکی غیر خطی نشان می دهد تغییر مکان حداکثر ناشی از برداشتن ستون با در نظر گرفتن اثر عمل زنجیره ای کاهش می یابد (کیم و آن ، ۲۰۱۹)

### ۳- روش شناسی پژوهش

در این پژوهش نمونه قابهای فولادی نامنظم در پلان ۳ و ۷ و ۱۱ و ۱۵ طبقه در حالت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته اند. سقف سازه ها به صورت تیرچه فلزی با جان باز بوده و بارگذاری ثقلی بر اساس جدول (۱) در نظر گرفته شده است. همچنین در بارگذاری نمونه ها از توصیه های مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ویرایش سوم سال ۱۳۹۲ در خصوص بار انفجار استفاده شده است که بر اساس آن سازه یکبار در حالت کلی طراحی می شود و در مرحله بعد با حذف ستون های منتخب ظرفیت سازه طراحی شده با ترکیبات بارگذاری خاص کنترل میگردد. برای طراحی سازه در برابر بار زلزله از روش خطی دینامیکی طیفی استفاده میکنیم. (انواع روش های خطی مجاز برای سازه های مختلف در جدول (۲) آورده شده است. در این روش می توان از طیف طرح استاندارد یا طیف طرح ویژه ساختمان استفاده کرد. مطابق استاندارد ۲۸۰۰ در شرایط زیر حتما باید از طیف طرح ویژه ساختمان استفاده کرد:

ساختمان های با اهمیت زیاد و خیلی زیاد.  
ساختمان های بلند تر از ۵۰ متر که روی زمین نو IV ساخته شوند.  
ساختمان های بلند تر از ۵۰ متر که روی زمین نو III و II با ضخامت لایه خاک بیش از ۶۰ سانتی متر ساخته می شوند.  
با توجه به مطالب ذکر شده، در این پایان نامه طیف مورد استفاده طیف طرح استاندارد بوده است. مقاطع بدست آمده از طراحی در ایتبس ۲۰۱۵ به روش تحلیل طیفی در جدول (۳) ذکر گردیده است.

جدول (۱): بارگذاری ثقلی

موقعیت	بار مرده $Kg/m^2$	بار خطی مرده $Kg/m$	بار زنده $Kg/m^2$	بار معادل تیغه ها
بام	۳۴۵	-	۱۵۰	-
طبقات	۳۰۰	-	۲۰۰	۱۱۵
دیوار جانبی بدون نما	-	۷۳۰	-	-
دیوار جانبی با نما	-	۷۵۰	-	-
جان پناه	-	۲۵۱	-	-
راه پله	۷۰۰	-	۵۰۰	-
برف	۱۷۰	-	-	-

جدول (۲): مقطع ستون های مدل شده

موقعیت	سازه ۳ طبقه	سازه ۷ طبقه	سازه ۱۱ طبقه	سازه ۱۵ طبقه
ستون های طبقه همکف	IPB 300	IPB450	IPB700	IPB900
ستون های طبقه ۱	IPB 300	IPB450	IPB700	IPB900
ستون های طبقه ۲	IPB 200	IPB360	IPB700	IPB900
ستون های طبقه ۳		IPB360	IPB700	IPB700
ستون های طبقه ۴		IPB200	IPB450	IPB700
ستون های طبقه ۵		IPB200	IPB450	IPB700
ستون های طبقه ۶		IPB200	IPB450	IPB450
ستون های طبقه ۷			IPB360	IPB450
ستون های طبقه ۸			IPB360	IPB360
ستون های طبقه ۹			IPB300	IPB360
ستون های طبقه ۱۰			IPB300	IPB300
ستون های طبقه ۱۱				IPB300
ستون های طبقه ۱۲				IPB300
ستون های طبقه ۱۳				IPB300
ستون های طبقه ۱۴				IPB300

جدول(۳): مقاطع تیر های مدل شده

تیر طبقات	سازه ۳ طبقه	سازه ۷ طبقه	سازه ۱۱ طبقه	سازه ۱۵ طبقه
طبقه همکف	IPB 220	IPB300	IPB400	IPB550
طبقه ۱	IPB 220	IPB300	IPB400	IPB550
طبقه ۲	IPB 180	IPB260	IPB400	IPB550
طبقه ۳		IPB260	IPB400	IPB400
طبقه ۴		IPB160	IPB300	IPB400
طبقه ۵		IPB160	IPB300	IPB400
طبقه ۶		IPB160	IPB300	IPB300
طبقه ۷			IPB260	IPB300
طبقه ۸			IPB260	IPB260
طبقه ۹			IPB220	IPB260
طبقه ۱۰			IPB220	IPB220
طبقه ۱۱				IPB200
طبقه ۱۲				IPB200
طبقه ۱۳				IPB200
طبقه ۱۴				IPB200

در ادامه پس از طراحی معمولی سازه ها در برابر بار زلزله با مدل سازی در نرم افزار آباکوس، تغییر مکان بوجود آمده در سازه ها و نیز میزان انرژی جذب شده حاصل از انفجار در فواصل مختلف از منبع انفجار، تحت شرایط گسیختگی پیشرونده بررسی و مقایسه شده اند. به طور کلی هرگونه تحلیلی که بر اساس آن قرار است قسمتی از سازه تخریب شده و رفتار سازه تحت این شرایط بررسی گردد از نوع تحلیل گسیختگی پیشرونده است.

ابتدا تحلیل سازه ۳ طبقه در سه حالت بدون حذف ستون، حذف ستون میانی و حذف ستون میانی و گوشه مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای تغییر مکان تراز بام و انرژی جذب شده در هر سه حالت مقایسه شده است. در ادامه نیز سازه های ۷ و ۱۱ و ۱۵ طبقه هر کدام در دو حالت بدون حذف ستون و نیز حالت بحرانی تر حذف همزمان ستون میانی و گوشه مورد بررسی قرار گرفته اند و نمودارهای تغییر مکان تراز بام و انرژی داخلی سازه استخراج شده است. مبنای تجزیه و تحلیل تخریب پیش رونده بر اساس آیین نامه UFC می باشد. روش مورد استفاده در این تحقیق، روش نرم افزاری بوده و به منظور تجزیه و تحلیل نمونه ها از روش

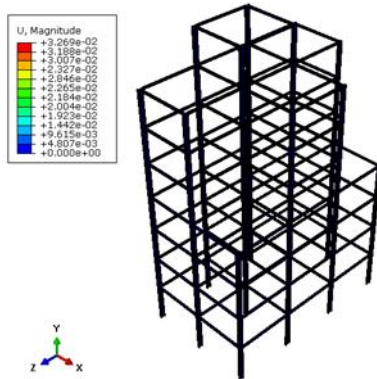
عددی و نرم افزار قدرتمند المان محدود آباکوس ۲۰۱۶ بهره گرفته شده است. هدف اصلی از تمامی این بررسی تاثیر فاصله محل انفجار، بر پاسخ سازه های فولادی نامنظم در پلان در شرایط وقوع تخریب پیش رونده و ارائه راهکارهای عملی جهت کاهش و رفع اثرات منفی پدیده تخریب پیش رونده ناشی از انفجار بر سازه ها می باشد.

#### ۴- یافته ها

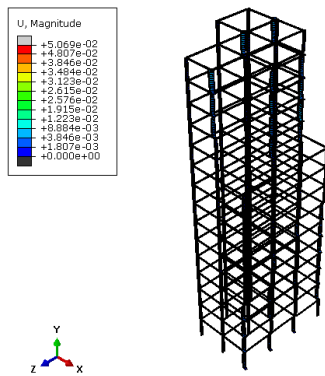
##### ۴-۱- مشاهده نتایج در مدول Visualization

در این مدول می توان وضعیت اجسام بعد اجرای برنامه به صورت عکس و پویانمایی و مش بندی شده مشاهده نمود.

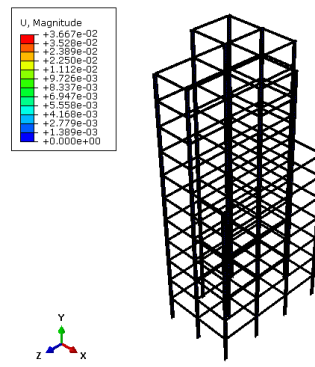
الف- تصاویر و نمودارهای خروجی نمونه ها، استخراج شده از آباکوس



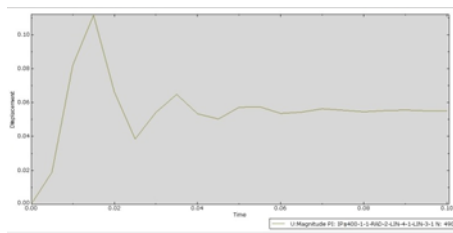
شکل (۴): نمونه ای از تصویر تغییر مکان جانبی در سازه ۷ طبقه نامنظم



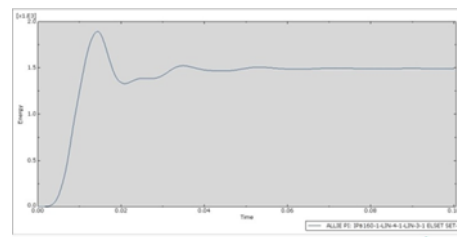
شکل (۶): نمونه ای از تصویر تغییر مکان جانبی در سازه ۱۵ طبقه نامنظم



شکل (۵): نمونه ای از تصویر تغییر مکان جانبی در سازه ۱۱ طبقه نامنظم

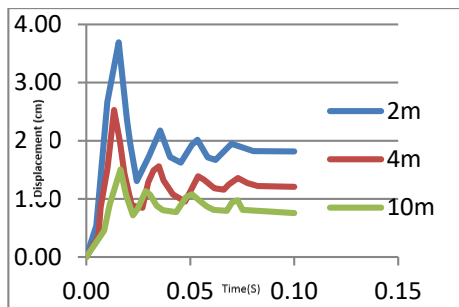


شکل (۸): نمونه ای از نمودار جابجایی جانبی طبقه بام استخراج شده از نرم افزار آباکوس

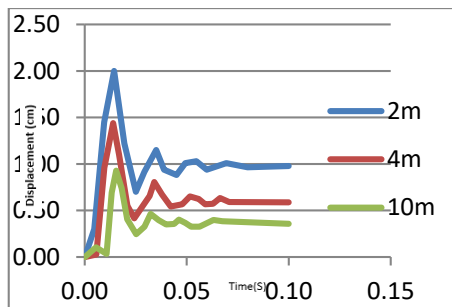


شکل (۷): نمونه ای از نمودار انرژی داخلی استخراج شده از نرم افزار آباکوس

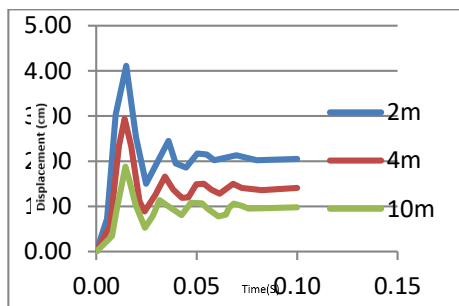
ب- نمودارهای استخراج شده از نرم افزار



نمودار (۲): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۳ طبقه نامنظم در پلان با حذف المان ستون میانی برای فواصل مختلف انفجار



نمودار (۱): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۳ طبقه نامنظم در پلان بدون حذف المان برای فواصل مختلف انفجار

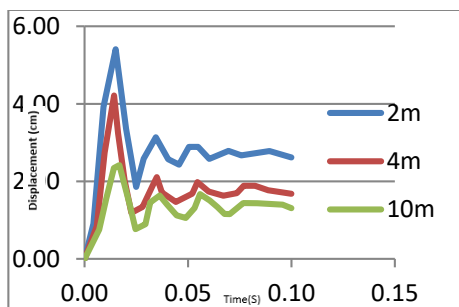


نمودار (۳): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۳ طبقه نامنظم در پلان با حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای برای فواصل مختلف انفجار

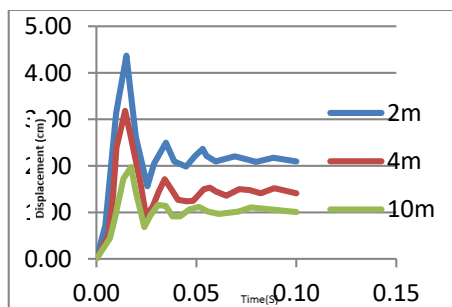
با توجه به سه نمودار فوق و مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۳ طبقه نامنظم در پلان (برای مدل بدون حذف المان در تحلیل غیرخطی در فاصله ۲ متر انفجار، ۲۰ میلی‌متر و مدل حذف المان ستون میانی ۳۲ میلی‌متر و مدل حذف المان ستون میانی و کناری شرایط بحرانی تری را نتیجه می‌شود که حذف یک ستون میانی و حالت بدون حذف ستون پدید می‌آورد. در نتیجه در ادامه سازه‌ها در حالت بدون حذف ستون و حذف دو ستون میانی و گوشه بررسی می‌شوند.

همچنین همانطور که مشخص است هرچه منبع انفجار از سازه فاصله می‌گیرد تغییر مکان کمتر میشود که این نشان دهنده آسیب پذیری سازه در فواصل نزدیک است.

از علل انتخاب ستون‌های میانی و کناری به عنوان عضوهای بحرانی در درجه اول بالا بودن بار محوری بالا در ستون میانی و دوم تکیه گاه بودن ستون کناری در مقابل بار جانبی می‌باشد. همچنین بر خلاف انتظار پس از حذف عضوهای بحرانی مقدار تغییر مکان جانبی تغییرات بزرگی ندارد که این نشان دهنده اضافه مقاومت اعضا می‌باشد.

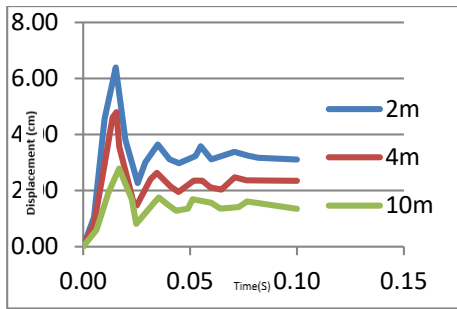


نمودار (۵): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۷ طبقه نامنظم در پلان - با حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای برای فواصل مختلف انفجار

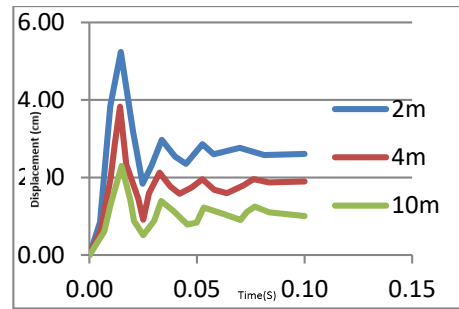


نمودار (۴): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۷ طبقه نامنظم در پلان - بدون حذف المان برای فواصل مختلف انفجار

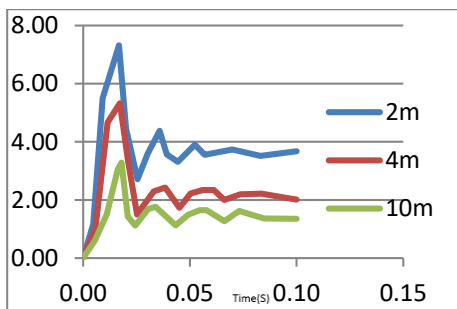




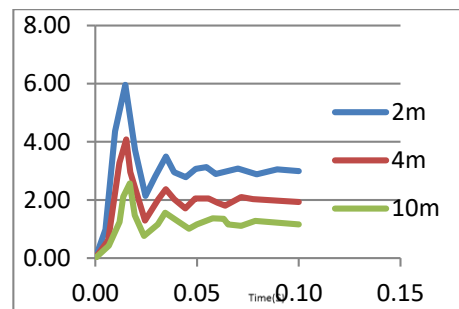
نمودار (۷): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۱۱ طبقه نامنظم در پلان - با حذف ستون میانی و گوشه‌ای برای فواصل مختلف انفجار



نمودار (۶): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۱۱ طبقه نامنظم در پلان - بدون حذف المان برای فواصل مختلف انفجار

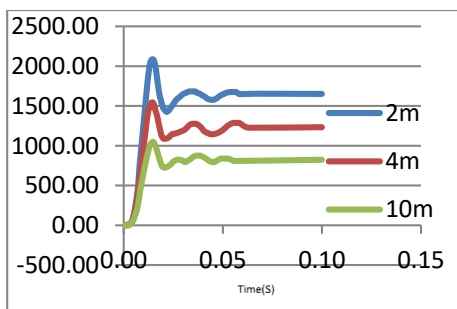


نمودار (۹): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۱۵ طبقه نامنظم در پلان - با حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای برای فواصل مختلف انفجار

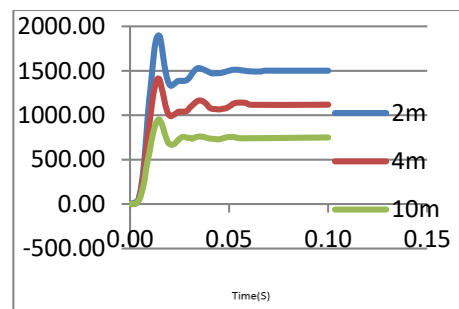


نمودار (۸): مقایسه تغییر مکان جانبی در تراز بام سازه ۱۵ طبقه نامنظم در پلان - بدون حذف المان برای فواصل مختلف انفجار

همانطور که در نمودارهای تغییر مکان تراز بام در سازه‌های ۷ و ۱۱ و ۱۵ طبقه نیز مشخص است حالت حذف دو ستون شرایط بحرانی تری را نتیجه می‌دهد. همچنین مجدداً نتیجه می‌شود که با افزایش فاصله منبع انفجار از سازه میزان آسیب پذیری سازه کمتر می‌شود. در خصوص بار انفجار مهم‌ترین عامل مقایسه و بررسی انرژی داخلی ایجاد شده در سازه است. در ادامه و با شرایط گفته شده سازه‌های ۳، ۷، ۱۱ و ۱۵ طبقه با استفاده از نمودارهای انرژی بررسی می‌شوند.

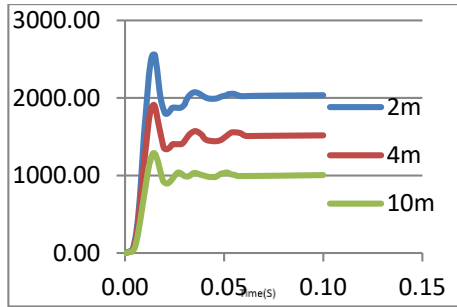


نمودار (۱۱): مقایسه انرژی سازه ۳ طبقه نامنظم در پلان - با حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای برای فواصل مختلف انفجار

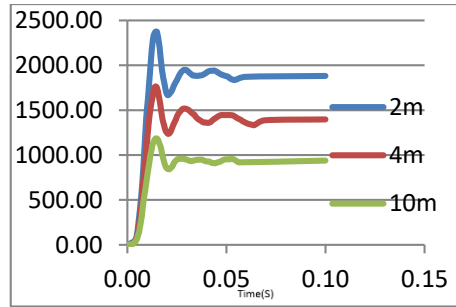


نمودار (۱۰): مقایسه انرژی سازه ۳ طبقه نامنظم در پلان - بدون حذف المان برای فواصل مختلف انفجار

با توجه به دو نمودار فوق برای مقایسه انرژی سازه ۳ طبقه نامنظم در پلان برای فواصل مختلف انفجار برای مدل بدون حذف المان در تحلیل غیرخطی در فاصله ۲ متر انفجار، ۱۸۰۰ ژول و مدل حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای با ۲۱۰۰ ژول انرژی داخلی (ALLIE) بحرانی‌ترین مدل می‌باشد و برای فواصل انفجار ۴ متر ۵۰ درصد کاهش و برای فاصله انفجار ۱۰ متر، ۸۰ درصد کاهش انرژی داخلی (ALLIE) ایجاد شد.

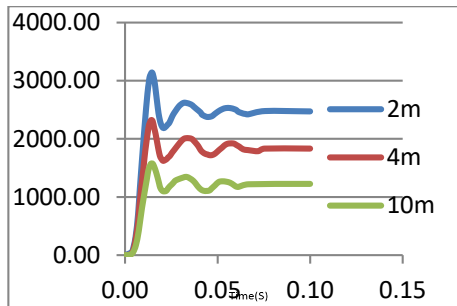


نمودار (۱۳): مقایسه انرژی سازه ۷ طبقه نامنظم در پلان  
- با حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای برای فواصل  
مختلف انفجار

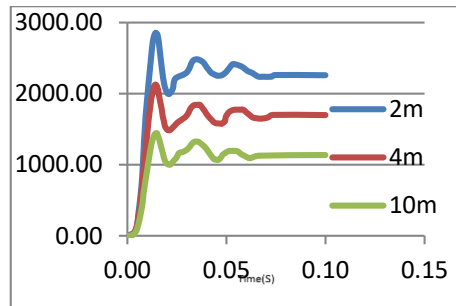


نمودار (۱۲): مقایسه انرژی سازه ۷ طبقه نامنظم در پلان  
- بدون حذف المان برای فواصل مختلف انفجار

با توجه به دو نمودار فوق برای مقایسه انرژی سازه ۷ طبقه نامنظم در پلان - برای فواصل مختلف انفجار برای مدل بدون حذف المان در تحلیل غیرخطی در فاصله ۲ متر انفجار، ۲۳۰۰ ژول و مدل حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای با ۲۶۰۰ ژول انرژی داخلی (ALLIE) بحرانی‌ترین مدل می‌باشد و برای فواصل انفجار ۴ متر ۴۷ درصد کاهش و برای فاصله انفجار ۱۰ متر، ۷۷ درصد کاهش انرژی داخلی (ALLIE) ایجاد شد.

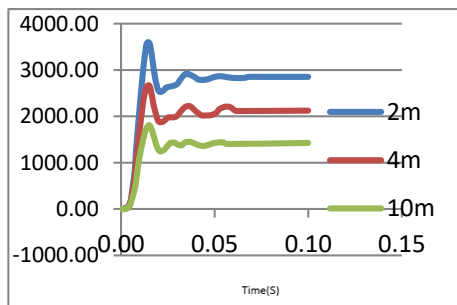


نمودار (۱۵): مقایسه انرژی سازه ۱۱ طبقه نامنظم در پلان  
- با حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای برای فواصل  
مختلف انفجار

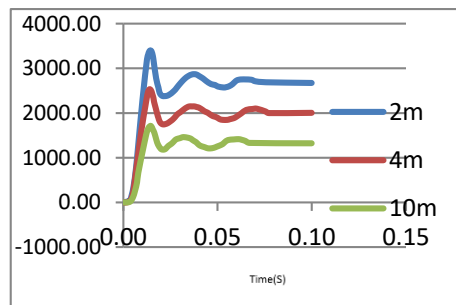


نمودار (۱۴): مقایسه انرژی سازه ۱۱ طبقه نامنظم در پلان  
- بدون حذف المان برای فواصل مختلف انفجار

با توجه به دو نمودار فوق برای مقایسه انرژی سازه ۱۱ طبقه نامنظم در پلان - برای فواصل مختلف انفجار برای مدل بدون حذف المان در تحلیل غیرخطی در فاصله ۲ متر انفجار، ۲۷۰۰ ژول و مدل حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای با ۳۲۰۰ ژول انرژی داخلی (ALLIE) بحرانی‌ترین مدل می‌باشد و برای فواصل انفجار ۴ متر ۴۵ درصد کاهش و برای فاصله انفجار ۱۰ متر، ۷۴ درصد کاهش انرژی داخلی (ALLIE) ایجاد شد.



نمودار (۱۷): مقایسه انرژی سازه ۱۵ طبقه نامنظم در پلان  
- با حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای برای فواصل  
مختلف انفجار



نمودار (۱۶): مقایسه انرژی سازه ۱۵ طبقه نامنظم در پلان  
- بدون حذف المان برای فواصل مختلف انفجار

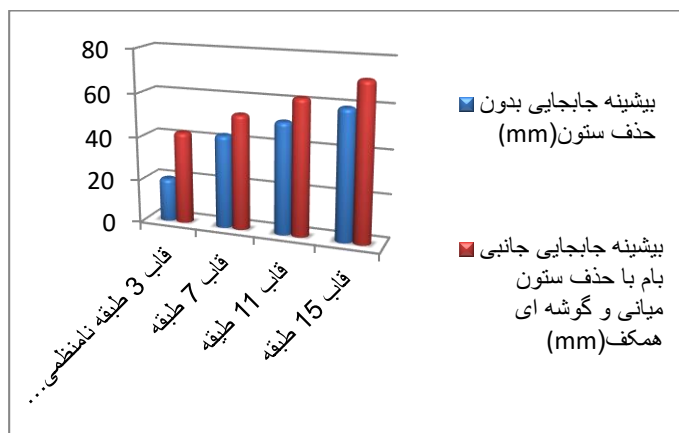
با توجه به دو نمودار فوق برای مقایسه انرژی سازه ۱۵ طبقه نامنظم در پلان - برای فواصل مختلف انفجار برای مدل بدون حذف المان در تحلیل غیرخطی در فاصله ۲ متر انفجار، ۳۳۰۰ ژول و مدل حذف المان ستون میانی و گوشه‌ای با ۳۷۰۰ ژول انرژی داخلی (ALLIE) بحرانی‌ترین مدل می‌باشد و برای فواصل انفجار ۴ متر ۳۹ درصد کاهش و برای فاصله انفجار ۱۰ متر، ۷۱ درصد کاهش انرژی داخلی (ALLIE) ایجاد شد. در جدول (۴) تغییر مکان جانبی بیشینه سازها در تراز بام در حالت‌های مختلف و در جدول (۵) انرژی داخلی آنها مقایسه شده است.

جدول (۴): مقایسه تغییر مکان جانبی بیشینه در تراز بام سازه مدل‌ها، بدون و با حذف المان

نمونه سازه‌ای	بیشینه جابجایی بدون حذف ستون (mm)	بیشینه جابجایی جانبی بام با حذف ستون میانی و گوشه‌ای همکف (mm)	بیشینه جابجایی جانبی بام با حذف ستون میانی
قاب ۳ طبقه	۲۰	۴۲/۴	۳۱/۹
قاب ۷ طبقه	۴۲/۸	۵۲/۷	-
قاب ۱۱ طبقه	۵۱/۱	۶۲	-
قاب ۱۵ طبقه	۵۹/۲	۷۱/۴	-

جدول (۵): مقایسه انرژی داخلی (ALLIE) سازه مدل‌ها، بدون و با حذف المان

نمونه سازه‌ای	بیشینه انرژی داخلی بدون حذف ستون (J)	بیشینه انرژی جنبش با حذف ستون میانی و گوشه‌ای همکف (J)
قاب ۳ طبقه	۱۸۰۰	۲۱۰۰
قاب ۷ طبقه	۲۳۰۰	۲۶۰۰
قاب ۱۱ طبقه	۲۷۰۰	۳۲۰۰
قاب ۱۵ طبقه	۳۳۰۰	۳۷۰۰



نمودار (۱۸): مقایسه تغییر مکان جانبی بیشینه در تراز بام سازه مدل‌ها، بدون و با حذف المان

بر اساس مطالعات انجام شده به ترتیب برای فواصل ۴ و ۱۰ متر مقدار انرژی به میزان ۴۵ و ۷۵ درصد نسبت به فاصله ۲ متر کاهش یافته است. با افزایش ارتفاع سازه اثرات انفجار بر انرژی سازه بیشتر شده است و برای فواصل مشابه و با افزایش فاصله از ۲ تا ۱۰ متر، انرژی ایجاد شده در سازه بلندتر به میزان کمتری کاهش یافته است چراکه برای سازه ۳ طبقه مقادیر انرژی ۵۰ و ۸۰ درصد به ازای فواصل ۴ و ۱۰ متر نسبت به فاصله ۲ متر کاهش داشت و برای سازه ۷ طبقه این میزان کاهش به ترتیب برابر با ۴۷ و ۷۷ درصد بود و برای سازه ۱۱ طبقه این میزان کاهش به ترتیب برابر با ۴۵ و ۷۴ درصد بود و برای سازه ۱۵ طبقه این میزان کاهش به ترتیب برابر با ۳۹ و ۷۱ درصد بود.

## نتیجه گیری

در این تحقیق از نمونه قابهای خمشی فولادی نامنظم در پلان ۳ و ۷ و ۱۱ و ۱۵ طبقه در حالت سه بعدی استفاده شده است.

شکل پذیری نمونه قاب ها و سازه ها براساس توصیه ها و ضوابط آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و براساس مشخصات نمونه‌ها در نظر گرفته شده است.

در تجزیه و تحلیل نمونه سازه و قابها مشخصات فولاد غیرخطی فرض شده است.

نامنظمی در پلان در این بررسی مورد توجه بوده است.

در تمامی نمونه ها ارتفاع طبقه اول ۳/۶ متر و ارتفاع سایر طبقات ۳/۲ متر فرض شده است.

تیرها و ستون ها از نوع IPB فرض شده است و آیین نامه طراحی فولاد نیز AISC می باشد

در بارگذاری نمونه ها از توصیه های مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ویرایش سوم سال ۱۳۹۲ در خصوص بار انفجار استفاده شده است.

کاربری نمونه های مورد بررسی اعم از نمونه قاب ها و سازه های سه بعدی در این تحقیق مسکونی فرض شده است.

به منظور مدلسازی گسیختگی پیش رونده، ستون ها با موقعیت های مهم که حذف آنها بیشترین تاثیر را بر نتایج دارد در هر مرحله از تحلیل به صورت پی در پی حذف شده و پاسخ نمونه ها در هر حالت بررسی شده است.

مبنای تجزیه و تحلیل تخریب پیش رونده بر اساس آیین نامه UFC<sup>۱</sup> می باشد.

روش مورد استفاده در این تحقیق ، روش نرم افزاری بوده و به منظور مدلسازی و تجزیه و تحلیل نمونه ها از روش عددی و

نرم افزار قدرتمند المان محدود آباکوس بهره گرفته شده است.

سایر فرضیات مورد نیاز در صورت لزوم در خلال انجام تحقیق به طور منطقی و براساس توصیه و ضوابط آیین نامه های معتبر

داخلی و بین المللی در نظر گرفته شده است.

مبنای تجزیه و تحلیل و مدلسازی نمونه و کنترل نتایج براساس توصیه های دستورالعمل بهسازی لرزه ای ایران و همچنین

دیگر آیین نامه های معتبر می باشد.

در این پژوهش رفتار سازه های فولادی خمشی نا منظم در پلان در برابر گسیختگی پیش رونده ناشی از انفجار در فواصل

مختلف و ارتفاع های مختلف بررسی گردید که نتایج زیر براساس مطالعه روی نمونه ها به قرار موارد زیر حاصل گردید.

۱. نتایج بدست آمده در شرایط حذف دو ستون میانی و گوشه بحرانی تر از حذف یک ستون می باشد.

۲. با افزایش ارتفاع سازه به دلیل افزایش شکل پذیری سازه میزان جذب انرژی افزایش می یابد و سازه می تواند

انرژی بیشتری را مستهلک کند

۳. با توجه به نتیجه قبل هر چه خاصیت غیر ارتجاعی (رفتار غیر خطی) مصالح بیشتر باشد قدرت جذب انرژی بیشتر

خواهد بود.

۴. با افزایش فاصله سازه از منبع انفجار نرخ کاهش انرژی جذب شده در سازه های کوتاهتر بیشتر است.

## منابع

۱. آیین نامه ۲۸۰۰، ۱۳۹۸.
۲. احمدی فیروز آباد، ابوزر، حسینی، مجتبی، بهرامی چگنی، ایمان (۱۳۹۸). ارزیابی خرابی پیشرونده در قابهای خمشی فولادی نامنظم در ارتفاع، دومین همایش ملی مهندسی سازه ایران، اسفند ماه ۱۳۹۸، تهران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ص ۷-۱۲.
۳. اسکویی ا و، فرهادی پور ح. (۱۳۹۸). مقایسه عملکرد قابهای فولادی با مهاربند همگرا و واگرا در برابر فروپاشی پیش رونده. نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.
۴. اکبرپور، عباس، محمودی یگانه، امیر، (۱۳۹۹)، تحلیل دیوار برشی فولادی مرکب با استفاده از دو لایه فولادی تقویتی تحت بار انفجاری، پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد، تهران، انجمن سازه های فولادی ایران، دانشگاه شهید بهشتی.
۵. تنکابنی پور م. (۱۴۰۰). اصول مقاوم سازی ساختمان ها (اصول بهسازی لرزه ای ساختمان ها). ۳. تهران: انتشارات آزاده، ۲۳۸ صفحه.
۶. جراحی فریبرز، حسین، کرامتی، ابوالقاسم، (۱۳۹۹)، بررسی سطوح عملکرد سازه های بتنی نامنظم قبل و بعد از تقویت با مهاربند فولادی، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و زیرساخت های شهری، تبریز، دبیرخانه دائمی کنفرانس.
۷. جواهرزاده س، مجتهدی ج، قلیزاده ا. (۱۳۹۸). بررسی شکل پذیری و انواع سیستم های سازه ای متداول در ساختمان های بلند. سومین همایش ملی مهندسی عمران، خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ۴ اسفند.
۸. حاجی قاسمعلی، س؛ حمیدی، ف (۱۳۹۸)، تعیین بارگذاری ناشی از انفجار بر روی سطوح سازه با استفاده از روش تجربی، دومین کنگره بین المللی سازه ، معماری و توسعه شهری.

۹. حلاجی خسرو شاه، امین، یثربی نیا، یاشار(۱۳۹۷). بررسی خرابی پیش رونده در سیستم قاب خمشی و مهاربندی فولادی، نشریه آنالیز سازه- زلزله، دوره ۱۳، شماره ۴، صفحه ۳۸-۲۹.
۱۰. خیرالدین ع، هاشمی م، ر، کارگردان ع. (۱۳۹۸). بررسی سطح عملکرد لرزه ای قاب های خمشی فولادی با مهاربندی هم محور نزدیک به گسل. پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۵: ۳۹-۴۲.
۱۱. راه نورد، روح اله، سیاه پلو، نوید (۱۳۹۹). مقایسه عملکرد قاب خمشی و قاب خمشی با مهاربند هم محور در سازه های بلند فولادی در اثر خرابی پیشرونده، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۴، شماره ۴، ص ۵۷-۴۲.
۱۲. رضایی ف، گرامی م، نادرپور ح. (۱۳۹۹). ارزیابی قابلیت اطمینان لرزه‌های قابهای خمشی فولادی بهسازی شده با مهاربندهای همگرا با مدل‌های احتمالاتی. مهندسی سازه و ساخت، ۴: ۵-۱۸.
۱۳. رضایی م، خادمی ی. (۱۳۹۹). مقایسه عملکرد لرزه ای مهاربندهای واگرا و زانویی در سیستم قاب خمشی. چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیر خانه دایمی کنفرانس، دانشگاه شهید بهشتی، ۷-۹ دی.
۱۴. سحاب م، محمدی م، جالو م. (۱۳۹۷). مدیریت بحران پدافند غیرعامل: تعیین و مقایسه بارگذاری های انفجاری بر اساس روابط نظری و آیین نامه های عملی. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، ۱۷-۱۸ اردیبهشت.
۱۵. شیرواند د م، رشعبنانی م م ج. (۱۳۹۹). ارزیابی رفتار سیستم های قاب خمشی ویژه و قاب مهاربندی در سازه های فولادی تحت اثر بار های ناشی از انفجار. علوم و فناوری های پدافند نوین، ۴: ۱۰۹-۱۱۴.
۱۶. صاحبی م م، خانجانی ف. (۱۳۹۶). ارزیابی عملکرد لرزه ای مهاربندهای هم محور ضربدیری مجهز به میراگر تسلیمی خمشی. مهندسی سازه و ساخت، ۴: ۱۲۳-۱۳۸.
۱۷. عدالتی، محمود، امیر اویسی زاده، آرش کریمی پور، (۱۳۹۶). بررسی و ارزیابی سازه های سبک فولادی LSF، اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران.
۱۸. فیروزآباد ا، چگنی ا ب، حسینی م. (۱۳۹۴). ارزیابی خرابی پیشرونده در قاب های خمشی فولادی نامنظم در ارتفاع، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه لرستان.
۱۹. محتشمی ا، سینیای س، شوستری ا. (۱۳۹۶). ارزیابی رفتار سازه های فولادی در برابر بارهای انفجاری. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۴-۱۶ اردیبهشت.
۲۰. محمدی ب، منصوری ع. (۱۳۹۵). مقایسه رفتار ساختمان های فولادی با مهاربندهای همگرا و واگرا تحت اثر بارهای انفجار متوالی. کنگره ملی مهندسی عمران، قوچان، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان، ۲۱-۲۲ اردیبهشت.
۲۱. محمودی صاحبی م، کوزانی س، تیموری ط، هاشمی س. (۱۳۹۵). ارزیابی پایداری قابهای خمشی فولادی در برابر خرابی های پیشرونده. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱: ۴۶، ۵۹-۶۷.
۲۲. مداحی م، خیرالدین ع. (۱۳۹۵). بررسی خرابی پیشرونده در قاب های خمشی فولادی با پلان L شکل به کمک آنالیز حساسیت. مهندسی سازه و ساخت، ۳: ۷۳-۸۵.
۲۳. نجی، آ؛ ایرانی، ف (۱۳۹۹) تحلیل تقریبی خرابی پیشرونده سازه های فولادی، نشریه مهندسی عمران، دوره ۴۰، شماره ۳ (پیاپی ۶۳)، صفحه ۷۱-۶۱.
۲۴. ولادی ه، شرقی م. (۱۳۹۹). تأثیر عملکرد سیستم های مختلف سازه ای بر خرابی پیشرونده، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز.
25. Fu F. (2019). Progressive collapse analysis of high-rise building with 3-D finite element modeling method. *Journal of Constructional Steel Research*, 65: 1269-1278.
26. Kim J·An D. (2019). Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action. *The structural design of tall and special buildings*, 18: 455-465.
27. Kim J·kim T. (2018). Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 65: 169-179.
28. Samadi MT, Saghil MH, Rahmani AR, Torabzadeh H. Murad Beig River Valley of Hamedan Water Quality Zoning using Geographic Information System (GIS) *Scientific Journal of Hamadan University of Medical Sciences*. 2019; 16(3): 38-43. (In Persian)
29. Yang, J. N., He, X. J., & Liu, J. (2016). Study on the impact of water depth on dynamic characteristics of bridge. In *Mechanics and Mechanical Engineering: Proceedings of the 2015 International Conference (MME2015)* (pp. 219-225).

