



http://journal.issis.ir

## شبیه‌سازی خرابی پیش‌رونده در قاب‌های فولادی: تمرکز بر معیار دررفت قائم و سطوح عملکرد

اشکان خدابندهلو\*

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

\*aromiyeh@iaou.ac.ir، صندوق پستی ۹۶۹، a.khodabandehlou@iaou.ac.ir

### چکیده

خرابی پیش‌رونده به پدیده‌ای اشاره دارد که در آن یک آسیب اولیه و موضعی، به صورت زنجیره‌ای گسترش یافته و منجر به فروپاشی جزئی یا کلی سازه می‌شود. مطالعات اخیر در مورد شکست سازه‌ها، اهمیت این پدیده را به‌ویژه در برابر بارهای غیرمترقبه‌ای مانند برخورد، انفجار و زلزله نشان می‌دهد. بر اساس آیین‌نامه مدیریت تأسیسات ایالات متحده (UFC) و دستورالعمل وزارت دفاع آمریکا (DoD)، از دست دادن ظرفیت باربری یک ستون به‌عنوان سناریوی محتمل برای ارزیابی رفتار سازه تحت بارهای غیرعادی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، یک سازه فولادی ۹ طبقه با سیستم قاب خمشی به صورت سه‌بعدی طراحی شد. سپس ستون‌ها در ترازها و موقعیت‌های مختلف در پلان حذف شد و با استفاده از دستورالعمل وزارت دفاع آمریکا و روش مسیر جایگزین انتقال بار (APM)، به کمک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، بیشینه دررفت قائم بررسی و با سطوح عملکردی مفصل پلاستیک مقایسه شد. نتایج تحلیل نشان داد که بحرانی‌ترین حالت، مربوط به حذف ستون گوشه است. همچنین در تمامی حالات حذف ستون‌های گوشه، میانی و کناری، حذف ستون در طبقه آخر نسبت به طبقات پایین‌تر، اثر بحرانی‌تری بر سازه دارد. به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع، آسیب‌پذیری سازه در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از حذف ناگهانی ستون افزایش می‌یابد. علاوه بر این، حذف ستون گوشه در طبقات میانی و بالا باعث عبور از سطح عملکرد ایمنی جانی شده و معیارهای پذیرش را برآورده نمی‌کند. همچنین با افزایش ارتفاع، میزان دررفت قائم در دهانه‌ای که ستون آن حذف شده است، افزایش می‌یابد.

### واژگان کلیدی

خرابی پیش‌رونده، قاب خمشی فولادی، دررفت قائم، روش مسیر جایگزین انتقال بار

## Progressive Collapse Simulation of Steel Frames: A Focus on Vertical Drift Criterion and Performance Levels

A. KhodaBandehLou

### Abstract

Progressive collapse is a structural failure phenomenon where local damage spreads progressively, leading to partial or total collapse. It has gained attention due to recent incidents under abnormal loads such as impact, explosion, and earthquake. According to the U.S. Department of Defense (DoD) and the Unified Facilities Criteria (UFC), the loss of a column's load-bearing capacity is a key scenario for evaluating structural behavior under such conditions. In this study, a 9-story steel moment-resisting frame was modeled in three dimensions. Columns were removed at different heights and locations to assess the structure's response. Nonlinear time-history analyses were performed following the DoD guidelines and the Alternative Path Method (APM) to determine the maximum vertical drift and relate it to the performance levels of plastic hinges. The results indicated that removing a corner column produces the most critical condition, leading to greater deformation and reduced structural capacity. Moreover, removing a column at the top floor resulted in higher vulnerability compared to lower floors. This suggests that as building height increases, the risk of progressive collapse due to sudden column loss becomes more significant. In some cases, especially when removing corner columns at intermediate or upper levels, the structure exceeded life-safety performance criteria.

### Keywords

Progressive Collapse, Steel Moment Frame, Vertical Drift, Alternative Path Method (APM)



خطاب می‌شوند. بسیاری از این بارها، ماهیت دینامیکی و ناگهانی دارند و پاسخ دینامیکی سازه را برمی‌انگیزند.

نیروی زلزله می‌تواند باعث ایجاد تنش‌ها و نیروهای جانبی شدیدی در سازه شود. این اثر می‌تواند منجر به اضافه‌بارشدن و ازدست‌رفتن یک یا چند عضو باربر اصلی شود و به دنبال آن، امکان گسترش خرابی به دیگر اعضای سازه وجود دارد. مشاهدات از خسارات زمین‌لرزه‌های گذشته، نشان می‌دهد که بارهای لرزه‌ای می‌تواند باعث از بین رفتن تکیه‌گاه‌ها شوند و یک گسیختگی اولیه می‌تواند به صورت پیش‌رونده به دیگر اعضای سازه در مسیرهای مختلف گسترش یابد [۲]. این پدیده حتی می‌تواند برای سازه‌های طراحی شده مطابق با آیین‌نامه‌های روز، در هنگام رخداد زلزله‌های شدید مشکل‌ساز شود و تا حد فروپاشی کامل پیش رود. به عبارت دیگر، هرگونه ضعف در طراحی یا اجرای اجزای سازه‌ای ممکن است باعث فعال‌شدن مکانیزم خرابی پیش‌رونده تحت بارگذاری لرزه‌ای نیز شود. بنابراین مطالعه و بررسی اثر این پدیده بر روی سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد [۳].

از نمونه‌های شناخته‌شده خرابی پیش‌رونده، می‌توان به ساختمان رونان پوینت، ساختمان فدرال آلفرد مورا، ساختمان بانکرز تراست، برج الکوبار و برج‌های تجاری دولوی ایالات متحده اشاره کرد. تحقیقات در این حوزه را می‌توان به دو رویکرد اصلی دسته‌بندی کرد: الف) توسعه سیستم‌های سازه‌ای مقاوم در برابر خرابی پیش‌رونده. ب) توسعه روش‌های تحلیلی مناسب و کارآمد برای ارزیابی آن [۴].

استاروسک<sup>۱</sup> (۲۰۰۶)، دو مفهوم کلیدی «استواری» (Robustness) و «مقاومت در برابر فروپاشی» (Collapse Resistance) را مورد بررسی قرار داد. به‌طور خلاصه:

- استواری: یک ویژگی ذاتی سازه است و مستقل از علت ایجاد آسیب اولیه می‌باشد.

- مقاومت در برابر فروپاشی: این ویژگی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله خصوصیات سازه و همچنین ماهیت و شدت عامل ایجادکننده آسیب اولیه قرار دارد [۵].

جینکو کیم<sup>۲</sup> و تای وان کیم<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) ظرفیت مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده قاب‌های خمشی فولادی را بررسی کردند. آن‌ها روش‌های تحلیلی استاتیکی و دینامیکی (خطی و غیرخطی) را مطابق با دستورالعمل‌های UFC و DoD باهم مقایسه کردند [۶] و به این نتیجه رسیدند که تحلیل دینامیکی غیرخطی، ابزاری دقیق

بر اساس استاندارد مدیریت تأسیسات ایالات متحده (UFC) [۱]، خرابی پیش‌رونده به این صورت تعریف می‌شود: "شرایطی که در آن گسیختگی موضعی یک عضو سازه‌ای اولیه، منجر به فروپاشی اعضای متصل به آن و در نتیجه، تخریب گسترده‌تر شود؛ به طوری که میزان خرابی کلی با علت اولیه آن نامتناسب باشد". این آیین‌نامه، الزامات تحلیل و طراحی را برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های اداری و فدرال جدید و همچنین پروژه‌های مهم تعیین کرده است تا اطمینان حاصل شود که پتانسیل این پدیده در مراحل طراحی، برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های نوین و نوسازی مورد توجه قرار می‌گیرد.

در میان روش‌های مختلف طراحی برای مقابله با خرابی پیش‌رونده، روش «مسیر جایگزین» (Alternative Path Method) به‌طور گسترده در آیین‌نامه‌ها توصیه می‌شود. در این روش، سازه به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند پس از وقوع یک خرابی موضعی، با ایجاد مسیرهای جدیدی برای انتقال بار، پایداری خود را حفظ نماید. در این رویکرد، اثر حذف یک عضو اصلی (مانند یک ستون) بر رفتار سازه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. پس از حذف فرضی آن عضو، سازه باقی‌مانده باید بتواند برای مدت زمان کافی (حداقل به‌منظور تخلیه ایمن ساکنان و ارزیابی خسارت) بارهای وارده را تحمل کند.

اگرچه وقوع خرابی پیش‌رونده نادر است، اما می‌تواند پیامدهای فاجعه‌باری از نظر تلفات جانی و خسارات مالی به دنبال داشته باشد. این پدیده معمولاً زمانی رخ می‌دهد که یک آسیب نسبتاً کوچک و موضعی، به صورت زنجیره‌ای گسترش یابد و منجر به فروپاشی کامل یا بخش عمده‌ای از سازه شود. نکته حائز اهمیت آن است که اغلب بین علت اولیه آسیب و خرابی نهایی تناسبی وجود ندارد. عواملی همچون انفجار، برخورد وسایل نقلیه، آتش‌سوزی، برخورد هواپیما، خطاهای طراحی یا اجرایی، بارگذاری بیش‌ازحد و بلایای طبیعی مانند زلزله می‌تواند به‌عنوان محرک این پدیده عمل نمایند. از آنجایی که احتمال وقوع چنین رویدادهایی کم در نظر گرفته می‌شود، معمولاً به‌صورت مستقیم در طراحی سازه‌ها منظور نمی‌شوند و یا با تمهیدات غیرمستقیم

<sup>1</sup> Starossek  
<sup>2</sup> Jinkoo Kim  
<sup>3</sup> Taewan Kim

برای ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های ساختمانی است [۷].

**تایوان کیم و همکاران (۲۰۰۹)**، با استفاده از روش تحلیل بارافزون ثقلی Pushdown، مقاومت قاب‌های خمشی فولادی را در برابر خرابی پیش‌رونده ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد طبقات و دهانه‌ها، مقاومت افزایش می‌یابد، اما با افزایش طول دهانه، مقاومت کاهش پیدا می‌کند. همچنین با مقایسه منحنی‌های بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل بارافزون ثقلی Pushdown و تحلیل دینامیکی افزایشی غیرخطی، مشخص شد که عوامل بار بیشینه حاصل از تحلیل دینامیکی، مقداری کم‌تر از مقادیر حاصل از تحلیل بارافزون ثقلی Pushdown هستند. این نشان می‌دهد که روش بارافزون ثقلی Pushdown ممکن است ظرفیت ذاتی سازه را در برابر خرابی پیش‌رونده بیش‌ازحد برآورد کند. آن‌ها همچنین دریافتند که با افزایش سطح طراحی لرزه‌ای، ظرفیت باربری سازه افزایش می‌یابد [۸].

**فو<sup>۱</sup> (۲۰۱۰)** رفتار یک ساختمان ۲۰ طبقه کامپوزیت فولادی را تحت سناریوی حذف ستون، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد مطالعه قرار داد. مطالعات پارامتریک بر اساس تغییر مقاومت بتن، مقاومت فولاد و اندازه‌ش‌بندی انجام شد. نتایج نشان داد که سناریوی حذف یک ستون، محتمل‌ترین حالت است؛ بنابراین تمرکز اکثر تحقیقات بر روی این سناریو می‌باشد. همچنین مشخص شد که اندازه‌ش‌بندی تأثیر ناچیزی بر رفتار کلی سازه دارد، اما افزایش اندازه المان‌ها (ش‌بندی درشت‌تر) منجر به افزایش تغییر شکل‌ها می‌شود [۹].

**قلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۳)**، اثر ارتفاع سازه را بر روی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در قاب‌های خمشی با دیوارهای بنایی بررسی کردند. آن‌ها یک قاب سه طبقه را با نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که اگرچه سختی و مقاومت دیوار به‌عنوان یک عامل مثبت در جلوگیری از خرابی عمل می‌کند، اما وزن دیوارهای طبقات بالاتر می‌تواند این نوع خرابی را تشدید نماید. آن‌ها استفاده از دیوارهای پیرامونی در تمامی دهانه‌ها را به‌عنوان مناسب‌ترین راهکار برای مقابله با آن پیشنهاد دادند [۱۰].

در تحقیق حاضر نیز از روش مسیر جایگزین برای مدل‌سازی خرابی پیش‌رونده استفاده شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی حداکثر جابه‌جایی قائم و متعاقباً، بیشینه دررفت قائم ناشی از حذف ستون‌ها است. با توجه به بررسی پیشینه تحقیق، بررسی

ارتباط بین سطوح عملکردی سازه و مقادیر بیشینه دررفت قائم ناشی از خرابی پیش‌رونده، موضوعی است که به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته است و همین امر، ضرورت انجام این تحقیق را دوچندان می‌کند.

## ۲- روش مسیر جایگزین

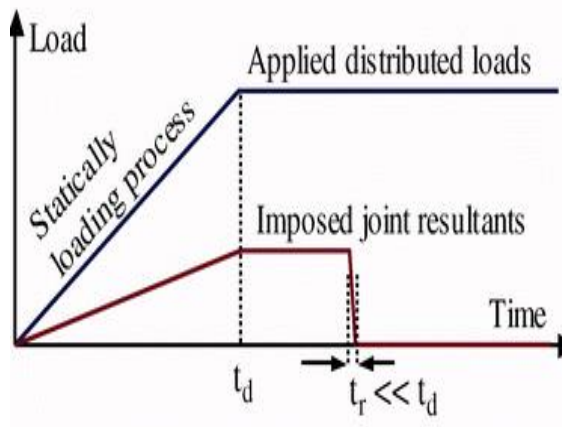
در این رویکرد، اگرچه وقوع خرابی موضعی در یک عضو اصلی سازه مجاز شمرده می‌شود، اما فلسفه طراحی به‌گونه‌ای است که با ایجاد مسیرهای جایگزین برای انتقال بار، توزیع مجدد مؤثر نیروها را ممکن ساخته و از گسترش خرابی به سایر بخش‌های سازه جلوگیری می‌نماید. به‌جای اعمال مستقیم بارهای غیرمترقبه بر روی سازه، در این روش یک عضو سازه‌ای به‌صورت فرضی حذف شده و سپس با انجام تحلیل‌های لازم، این موضوع بررسی می‌شود که آیا سازه حتی پس از از دست‌دادن آن عضو، همچنان قادر به تحمل بارهای طراحی مطابق آیین‌نامه خواهد بود یا خیر. مطالعه و مقایسه روش‌های مختلف کاهش خطر خرابی

پیش‌رونده نشان می‌دهد که روش مسیر جایگزین، به‌عنوان یک روش جامع، منطقی و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر این پدیده شناخته می‌شود. این روش قابلیت اجرا با چارچوب‌های تحلیلی مختلف شامل روش استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی، دینامیکی خطی و دینامیکی غیرخطی را دارا است.

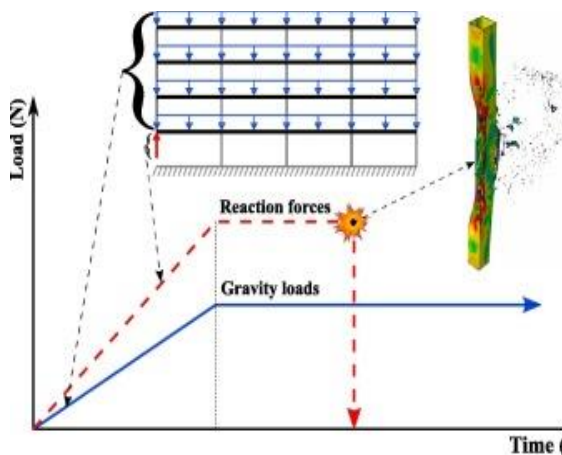
نکته حائز اهمیت در کاربرد روش مسیر جایگزین، توجه به ماهیت از دست‌دادن عضو است. در حالتی که عضو به‌صورت تدریجی و آرام ظرفیت خود را از دست می‌دهد، بازتوزیع نیروها نیز به‌تدریج صورت گرفته و استفاده از تحلیل استاتیکی برای ارزیابی رفتار سازه کافی به‌نظر می‌رسد. در مواردی که خرابی عضو به‌صورت ناگهانی و ترد (Brittle) و تحت شرایط بارگذاری رخ می‌دهد، اثرات دینامیکی قابل‌توجهی بروز می‌یابد. این اثرات منجر به افزایش موقتی (ضربه‌ای) در نیروهای داخلی اعضا شده و در صورتی که این افزایش از حد ظرفیت اعضای مجاور فراتر رود، می‌تواند موجب گسیختگی زنجیره‌ای و گسترش خرابی در سراسر سازه شود. بنابراین با در نظر گرفتن ماهیت ذاتی دینامیکی پدیده خرابی پیش‌رونده، باید توجه داشت که تحلیل استاتیکی مسیر جایگزین، تنها یک شبیه‌سازی تقریبی از رفتار واقعی سازه ارائه می‌دهد و برای دستیابی به ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از رفتار سازه پس از حذف ناگهانی عضو، لحاظ کردن اثرات دینامیکی امری ضروری است [۱۱].

<sup>1</sup> Fu

میرایی بحرانی فرض شده است که اغلب برای تحلیل سازه‌های تحت تغییر شکل‌های بزرگ به کار می‌رود.



(الف)



(ب)

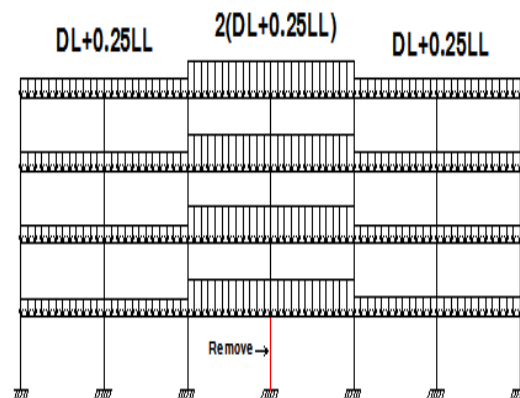
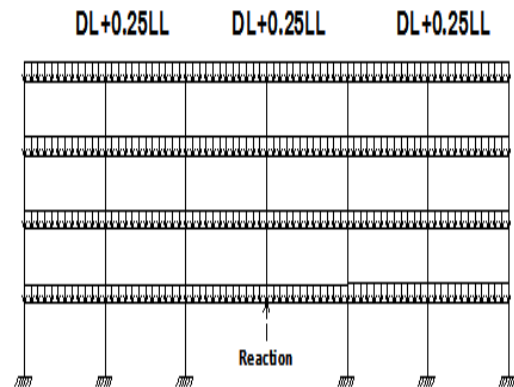
شکل ۲- نمودار تاریخچه زمانی در تحلیل دینامیکی غیرخطی (الف) خرابی پیش‌رونده تحت زلزله (ب) تحت انفجار

### ۳- نتایج عددی

در این مطالعه آسیب‌پذیری ساختمان فولادی ۹ طبقه در برابر خرابی پیش‌رونده با استفاده از نرم افزار SAP2000 v.22 و روش مسیر جایگزین مورد بررسی قرار گرفته است. نوع سیستم این ساختمان قاب خمشی فولادی است. تمامی ساختمان‌ها دارای ابعاد پلان یکسان برابر با ۴۰ متر در ۴۰ متر بوده و ارتفاع طبقات در همه آن‌ها ۳/۲ متر است. در شکل (۳) پلان ساختمان مورد مطالعه، نشان داده شده است. برای مصالح تیر و ستون‌های به‌کاررفته از فولاد ASTM A992 ( $F_y=50$  ksi,  $F_u=65$  ksi) استفاده شده است. برای بارگذاری ثقلی از آیین‌نامه ASCE 41-23، برای طراحی اعضای فولادی از AISC 360-22 و برای تحلیل خرابی پیش‌رونده از روش مسیر

### ۲-۱- تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی

در این نوع تحلیل از همان ابتدا ستون مورد نظر از مدل تحلیلی حذف شده و سازه تحت بارگذاری نشان داده شده در شکل (۱)، که مطابق با دستورالعمل GSA است، به صورت استاتیکی غیرخطی تحلیل می‌شود.



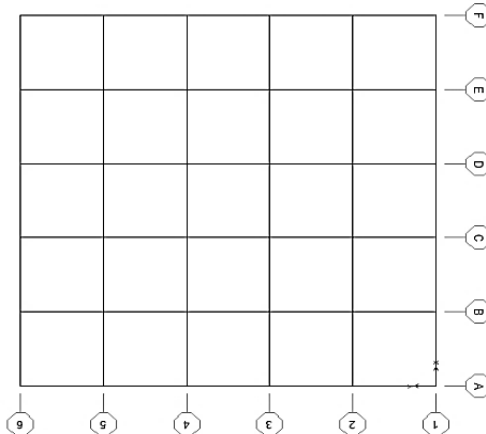
شکل ۱- بارگذاری تحلیل خرابی پیش‌رونده در GSA

### ۲-۲- تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی

قبل از شروع تحلیل دینامیکی غیرخطی، ابتدا سازه اولیه (حالت بدون حذف ستون) را تحت بار ثقلی  $DL+0.25LL$  تحلیل استاتیکی خطی نموده و نیروهای داخلی ستونی که قرار است حذف شود، به دست می‌آید؛ سپس در مدل تحلیلی، ستون مورد نظر را حذف نموده و نیروهای داخلی مذکور تحت عنوان نیروی معادل ستون در جهت عکس واکنش ستون در دو انتهای آن وارد می‌شود.

به منظور مدل‌سازی حذف آبی ستون، از دو تابع تاریخچه زمانی برای بار ثقلی روی سیستم و نیروی عکس‌العمل ستون مطابق شکل (۲) استفاده شده است. نسبت میرایی برابر با ۵٪

جایگزین ارائه شده در آیین نامه GSA-2003 استفاده شده است [۱۲-۱۴].



شکل ۳- پلان مدل تحلیلی

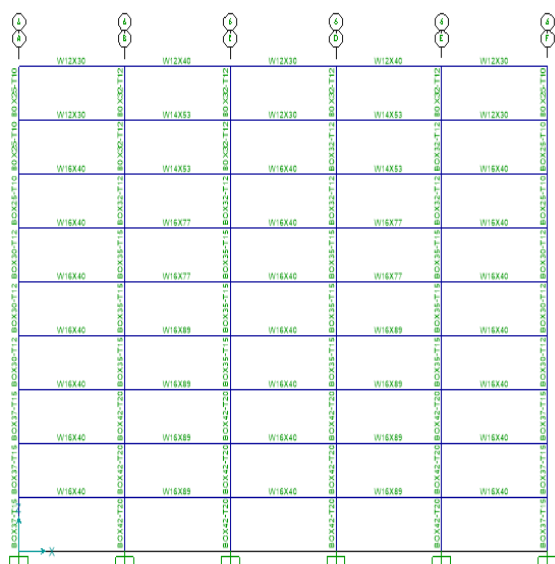
سناریوی حذف ستون به ترتیب در طبقات اول، سوم، ششم و نهم و در ستون گوشه A6، ستون میانی C3 و ستون کناری F3 صورت گرفته است. از آنجایی که پروسه‌های تحلیل غیرخطی در عملکرد سازه دقیق‌تر از پروسه‌های خطی هستند، از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای ارزیابی خرابی پیش‌رونده استفاده شده است. طبق توصیه آیین‌نامه UFC-2009، از مدل سه‌بعدی در این مطالعه استفاده شده است [۱۵ و ۱۶]. طبق این آیین‌نامه استفاده از مدل‌های دوبعدی برای ارزیابی خرابی پیش‌رونده مجاز نیست.

### ۳-۱- ستون گوشه A6

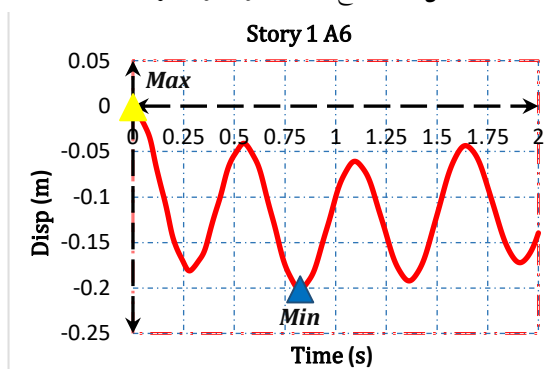
مقاطع ستون‌های گوشه A6 در شکل (۴) نشان داده شده است. بیشینه جابه‌جایی حاصل از حذف ستون گوشه A6 در طبقات اول، سوم، ششم و نهم به ترتیب در شکل‌های (۵) الی (۸) نشان داده شده است. در جدول (۱) نیز ماکزیمم جابه‌جایی نسبی قائم حاصل از حذف ستون گوشه A6 در طبقات ذکر شده و سطوح عملکردی حاصل، ارائه شده است.

جدول ۱- ماکزیمم جابه‌جایی نسبی قائم حاصل از حذف ستون گوشه A6

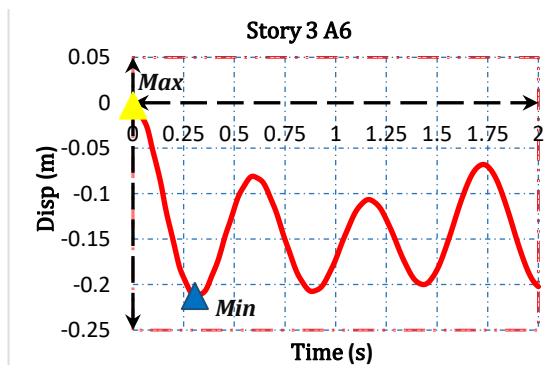
	Story1	Story3	Story6	Story9
<b>Vertical Drift</b>	0.02518	0.02655	0.0427	0.9945
<b>Performance Level</b>	< IO <sup>1</sup>	IO	CP <sup>2</sup>	CP >



شکل ۴- مقاطع حذف ستون گوشه برای A6



شکل ۵- جابه‌جایی قائم حاصل از حذف ستون گوشه A6 در طبقه اول

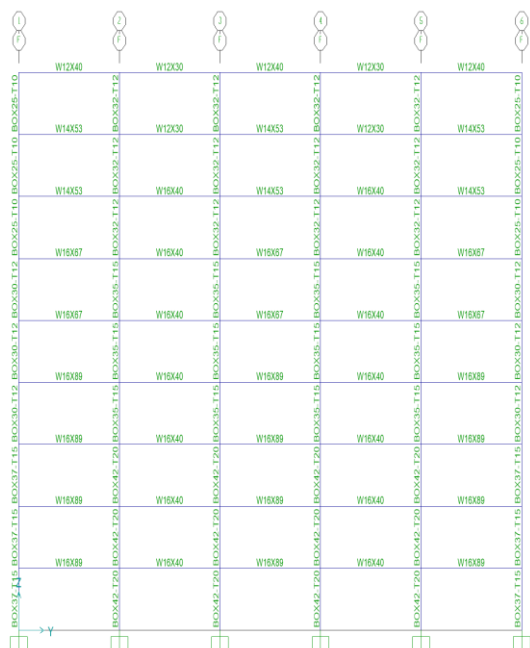


شکل ۶- جابه‌جایی قائم حاصل از حذف ستون گوشه A6 در طبقه سوم

<sup>2</sup> Collapse Prevention

<sup>1</sup> Immediate Occupancy

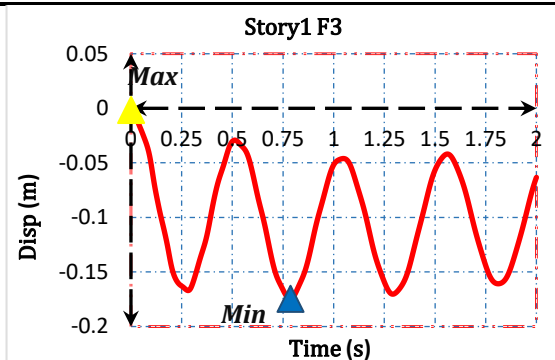




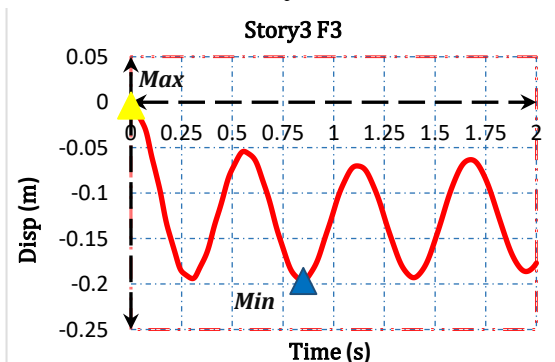
شکل ۱۴- مقاطع حذف ستون کناری برای F3

جدول ۳- ماکزیمم جابه‌جایی نسبی قائم حاصل از حذف ستون کناری F3

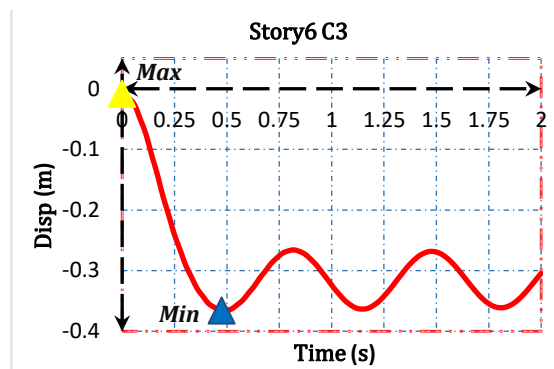
	Story1	Story3	Story6	Story9
Vertical Drift	0.0218	0.0245	0.0371	0.6376
Performance Level	4	8	5	3
	< 10	10	10	CP >



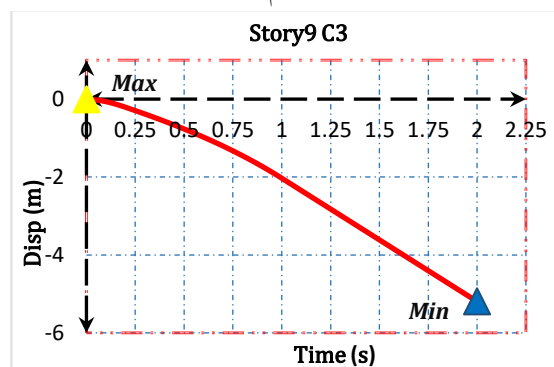
شکل ۱۵- جابه‌جایی قائم حاصل از حذف ستون کناری F3 در طبقه اول



شکل ۱۶- جابه‌جایی قائم حاصل از حذف ستون کناری F3 در طبقه سوم



شکل ۱۲- جابه‌جایی قائم حاصل از حذف ستون میانی C3 در طبقه ششم



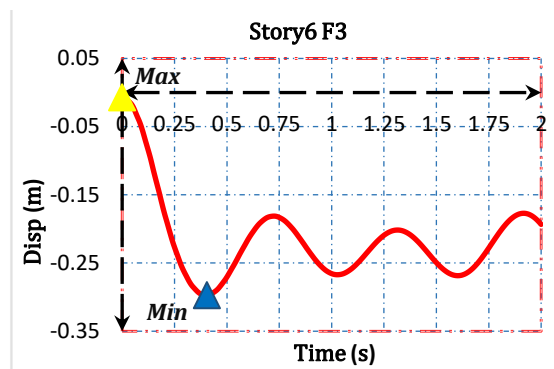
شکل ۱۳- جابه‌جایی قائم حاصل از حذف ستون میانی C3 در طبقه نهم

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از حذف ستون میانی C3 در طبقات اول، سوم، ششم و نهم و جابه‌جایی قائم، حذف ستون در طبقه آخر بحرانی‌تر بوده و حد ایمنی جانی را رد کرده است. همچنین با توجه به جابه‌جایی نسبی طبقات حاصل از حذف ستون، دررفت قائم حاصل از حذف ستون در طبقه ششم تقریباً دوبرابر دررفت قائم حاصل از حذف ستون در طبقات اول و سوم است و با این وجود در سطح عملکردی سکونت فوری (IO) می‌باشد. ولی با افزایش دررفت قائم در طبقه نهم حاصل از حذف ستون، سازه از سطح ایمنی جانی (LS) نیز عبور کرده و وارد سطح پیشگیری از خرابی (CP) شده است. با توجه به شکل‌های (۱۰) الی (۱۲) در لحظه حذف ستون، جابه‌جایی قائم نقطه بالای ستون پس از اندکی کاهش حول یک وضعیت تعادل، شروع به نوسان می‌کند؛ ولی با توجه به شکل (۱۳) سازه قادر به تحمل خرابی پیش‌رونده نبوده و دچار فروریزش شده است.

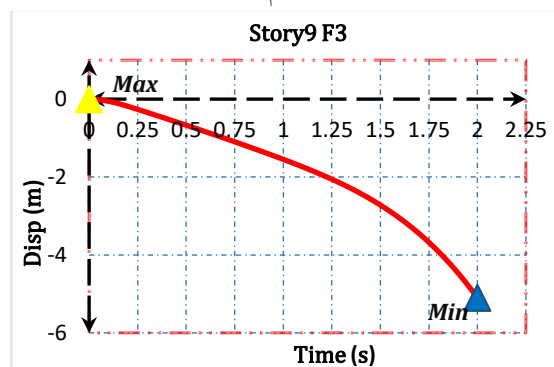
### ۳-۳- ستون میانی F3

مقاطع ستون‌های میانی F3 در شکل (۱۴) نشان داده شده است. بیشینه جابه‌جایی حاصل از حذف ستون کناری F3 در طبقات اول، سوم، ششم و نهم به‌ترتیب در شکل‌های (۱۵) الی (۱۸) نشان داده شده است. در جدول (۳) نیز ماکزیمم جابه‌جایی نسبی قائم حاصل از حذف ستون کناری F3 در طبقات ذکر شده و سطوح عملکردی حاصل، ارائه شده است.

ارزیابی قرار گرفت. با توجه به حداکثر جابه‌جایی قائم حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای هر یک از حالت‌های حذف ستون و دریافت قائم متناظر به‌دست‌آمده و سطح عملکرد سازه در لحظه جابه‌جایی ماکزیمم مشاهده شد که بحرانی‌ترین حالت در حذف ستون طبقات، حذف ستون در طبقه آخر رخ داده و در این حالت سازه در برابر خرابی پیش‌رونده آسیب‌پذیر است. همچنین با توجه به بیشه دریافت قائم به‌دست‌آمده و سطوح عملکردی متناظر در لحظه جابه‌جایی حداکثر در سه حالت حذف ستون گوشه A6، ستون میانی C3 و ستون کناری F3، بحرانی‌ترین حالت حذف ستون، حذف ستون گوشه است؛ زیرا جابه‌جایی قائم و دریافت قائم متناظر تقریباً ۲۰٪ از دو حالت حذف ستون میانی C3 و ستون کناری F3 در طبقات اول و سوم بیش‌تر است. همچنین با حذف ستون گوشه در طبقات ششم و نهم، سازه حد ایمنی جانی را رد کرده و دچار فروریزش شده است.



شکل ۱۷- جابه‌جایی قائم حاصل از حذف ستون کناری F3 در طبقه ششم



شکل ۱۸- جابه‌جایی قائم حاصل از حذف ستون کناری F3 در طبقه نهم

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از حذف ستون کناری F3 در طبقات اول، سوم، ششم و نهم و جابه‌جایی قائم، حذف ستون در طبقه آخر همانند حذف ستون گوشه A6 و حذف ستون میانی C3 بحرانی‌تر بوده و حد ایمنی جانی را رد کرده است. همچنین با توجه به جابه‌جایی نسبی طبقات حاصل از حذف ستون و دریافت قائم حاصل از حذف ستون در طبقه ششم، سازه در سطح عملکردی سکونت فوری (IO) است؛ ولی با افزایش بیش‌ازحد دریافت قائم در طبقه نهم حاصل از حذف ستون همانند دو حالت حذف ستون دیگر مشاهده می‌شود که سازه سطح ایمنی جانی (LS) را نیز رد کرده و وارد سطح پیشگیری از خرابی (CP) شده است. با توجه به شکل‌های (۱۵) الی (۱۷) در لحظه حذف ستون، جابه‌جایی قائم نقطه بالای ستون پس از اندکی کاهش حول یک وضعیت تعادل، شروع به نوسان می‌کند. ولی با توجه به شکل (۱۸)، سازه قادر به تحمل خرابی پیش‌رونده نبوده و دچار فروریزش شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آسیب‌پذیری قاب خمشی فولادی ۹ طبقه در برابر خرابی پیش‌رونده، به‌روش مسیر جایگزین GSA2003 مورد

[16] FEMA 356 (2000), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

[۱۷] مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. (۱۳۹۳)، "آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)", ویرایش چهارم.

[۱۸] مقررات ملی ساختمان ایران (۱۴۰۱)، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، ایران.

[۱۹] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، بارهای وارد بر ساختمان، (۱۳۹۸)، وزارت مسکن و شهرسازی: تهران، ایران.

[1] GSA (2003), "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects", The U.S. General Services Administration.

[۲] رشیدی‌الاشتی، ع. (۱۳۹۱)، "تأثیر خرابی‌های پیش‌رونده بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

[۳] اکبرپور، س. (۱۳۸۹)، "خرابی پیش‌رونده و تأثیر آن بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن‌آرمه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران.

[4] Kim, J., Park, J.H., and Lee, T.H. (2011), "Sensitivity Analysis of Steel Buildings Subjected to Column Loss", *Engineering Structures*, 33, pp.421-432.

[5] Starossek, U., and Haberland, M. (2009), "Evaluating measures of structural robustness", In *Structures Congress: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*, pp.1-8.

[6] Unified Facilities Criteria (UFC) (2005), "Design of Buildings to Resist Progressive Collapse", Department of Defense.

[7] Kim, J., and Kim, T. (2009), "Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1), pp.169-179.

[8] Kim, T., Kim, J., and Park, J. (2009), "Investigation of progressive collapse-resisting capability of steel moment frames using push-down analysis", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(5), pp.327-335.

[9] Fu, F. (2010), "3-D nonlinear dynamic progressive collapse analysis of multi-storey steel composite frame buildings—Parametric study", *Engineering Structures*, 32(12), pp.3974-3980.

[۱۰] رضایا، م.، مرادیگی، ح.، و قلی‌زاده، ا. (۱۳۹۲). "اثر ارتفاع سازه بر خرابی پیش‌رونده در میان قاب بتنی با قاب خمشی"، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری (۱۵ صفحه).

[11] Murtha-Smith, E. (1988), "Alternate path analysis of space trusses for progressive collapse", *Journal of Structural Engineering*, 114(9), pp.1978-1999.

[12] American Society of Civil Engineers (2005), ASCE 7-05: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, New York.

[13] ANSI/AISC 360-22, (2022), Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.

[14] ANSI/AISC 341-22, (2022), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.

[15] Unified Facilities Criteria (UFC) (2009), Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, UFC 4-023-03, Including Change 1 (2010), Department of Defense.

