

## مطالعه اثر سقف کامپوزیت در کنترل تخریب پیش‌رونده ساختمان‌های قاب خمشی فولادی

وحید بروجردیان<sup>۱\*</sup>، غلامرضا قدرتی امیری<sup>۲</sup>، اسماعیل محمدی ده‌چشمه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۶/۳/۱۸، پذیرش: ۹۹/۸/۲۱، نشر آنلاین: ۹۹/۸/۲۱)

### چکیده

تخریب پیش‌رونده عموماً با تخریب تصادفی یکی از اعضای اصلی ساختمان مانند ستون یا دیوار باربر شروع می‌شود و با ایجاد بار افزون در اعضا و اتصالات متصل به عضو تخریب‌شده باعث گسترش خرابی در کل سازه می‌شود. سقف کامپوزیت ساختمان‌ها می‌تواند نقش مؤثری در کنترل تخریب‌های محتمل سازه‌ای داشته باشد. سقف کامپوزیت بارهای کف طبقات را به اعضای اصلی سازه منتقل می‌کند و همچنین هنگام زلزله نقش یکپارچه‌سازی را در تغییر مکان جانی هر طبقه دارد، به طوری که می‌توان حرکت افقی این اعضا را به صورت یک جسم صلب در نظر گرفت. هنگام تخریب پیش‌رونده نیز این اعضا می‌توانند تا حدی کار یکپارچه‌سازی طبقات را انجام دهند و از تغییر شکل‌های زیاد طبقات جلوگیری کنند. در این مطالعه، با مدل‌سازی سناریوهای مختلف حذف ستون، رفتار سازه ۳ طبقه در مقابل تخریب پیش‌رونده بررسی شد. در مجموع، ۵ سناریوی حذف تک‌ستون و ۱۰ سناریوی حذف جفت ستون در نظر گرفته شده است. سازه مورد مطالعه از نوع قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط است. مدل‌سازی سه‌بعدی به روش اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. هر دو نوع رفتار غیرخطی هندسی و مصالح در مدل‌سازی‌ها لحاظ شد. برای مدل‌سازی سقف کامپوزیت، سختی و مقاومت معادل آن‌ها در جهت قائم محاسبه و لحاظ شد. نشان داده شد که سختی معادل سقف کامپوزیت در چشمه‌های گوشه کم‌تر از چشمه‌های میانی و پیرامونی است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در نظر گرفتن سقف کامپوزیت در مدل‌سازی‌ها تأثیر بسزایی در تخمین صحیح رفتار سازه در مقابل تخریب پیش‌رونده دارد. در این تحقیق مدل ساده‌ای برای لحاظ اثر مقاومت و سختی سقف کامپوزیت، به صورت یک فنر دوخطی در محل اتصالات تیر و ستون در قاب‌های خمشی پیشنهاد شد.

**کلیدواژه‌ها:** تخریب پیش‌رونده، تحلیل دینامیکی غیرخطی، قاب خمشی فولادی، سقف کامپوزیت.

### ۱- مقدمه

حمله‌های تروریستی در سال‌های اخیر، لزوم در نظر گرفتن بارهای غیرعادی و خطاهای انسانی در طراحی ساختمان‌ها، به طوری که بتوان از تخریب پیش‌رونده جلوگیری نمود مشخص شده است (Starossek, ۲۰۱۸).

از نظر آیین‌نامه خدمات عمومی آمریکا (GSA, ۲۰۱۶)، تخریب پیش‌رونده وضعیتی است که در آن شکست موضعی اجزای اصلی ساختمان به سمت تخریب اجزای مجاور هدایت می‌شود و به نوبت فروریزش به شکل زنجیری افزایش می‌یابد و در نهایت موجب آسیب نامتناسب به سازه می‌شود. آیین‌نامه بارگذاری آمریکا (ASCE/SEI, ۲۰۱۶، ۷) و گزارش منتشرشده توسط مؤسسه ملی استاندارد و

تخریب پیش‌رونده عبارت است از گسترش خرابی در سازه در اثر یک خرابی موضعی اولیه در این پدیده، باز توزیع نیروها در هر مسیر باعث گسیختگی اعضای سازه‌ای آن مسیر می‌شود و سپس مسیر انتقال بار عوض می‌شود و این فرآیند تا فروریزش کل سازه یا فروریزش بخش عمده‌ای از سازه ادامه پیدا می‌کند. این میحث اولین بار پس از واقعه تخریب ساختمان رونان پوینت<sup>۱</sup> در انگلیس مطرح شد و پس از آن زمان تاکنون مورد توجه محققین قرار گرفته است. پس از حوادث فاجعه‌آمیز تخریب ساختمان‌های رونان پوینت، آلفرد مورا<sup>۲</sup> و مرکز تجارت جهانی و با توجه به روند افزایشی

2. Alfred P. Murrah

1. Ronan Point

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۷۳۲۲۸۱۵۸

## ۲- پیشینه تحقیق

بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه تخریب پیش‌رونده (Mehdizadeh و Karamodin، ۲۰۱۸)، می‌توان این‌گونه جمع‌بندی کرد که قاب‌های خمشی نسبت به حذف ستون‌های گوشه بحرانی‌تر هستند. علاوه بر این، حذف ستون در طبقات اول این قاب‌ها نسبت به طبقات میانی و بالاتر بحرانی‌تر است. همین‌طور حذف ستون در طبقات میانی نسبت به طبقات بالاتر بحرانی‌تر است. در قاب‌های خمشی هر چه شکل‌پذیری بیشتر باشد، تغییر مکان‌های ایجاد شده در سازه بیشتر است. Mahmoudi و همکاران (۲۰۱۶) با مقایسه انواع تحلیل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی تخریب پیش‌رونده، نتیجه گرفتند که تحلیل استاتیکی خطی محافظه‌کارانه‌تر از سایر روش‌های تحلیل دینامیکی و غیرخطی است.

Kim و Kim (۲۰۰۹) نشان دادند که علت آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در هنگام تخریب پیش‌رونده، خرابی تیرها در طبقات پایینی است. در سال‌های اخیر برای تحلیل سازه‌ها تحت حوادث تصادفی مختلف، روش‌های احتمالاتی نیز مورد بررسی محققین قرار گرفته است. در این روش‌ها عدم قطعیت‌ها در شبیه‌سازی احتمالاتی سازه در نظر گرفته می‌شود. در یکی از تحقیقات این حوزه، Chen و همکاران (۲۰۱۶) یک روش قابلیت اعتماد پیشرفته<sup>۱</sup> ارائه دادند که شاخص ارزیابی عملکرد سازه را بر اساس احتمال گسیختگی کلی سازه پیشنهاد می‌کند. در تحقیق مزبور، بر اساس تغییرات مؤلفه‌های انرژی داخلی، حساسیت تخریب پیش‌رونده در حذف ناگهانی یک ستون در نظر گرفته شده و یک مدل خرابی ساده جهت تحلیل انرژی جذب شده تیرهای سازه‌ای تحت تغییر شکل‌های بزرگ پیشنهاد شده است. علاوه بر این ارتباط بین ترکیب عملکرد زنجیره‌ای لنگر خمشی و نیروی محوری در داخل تیرها در کل فرآیند گسترش تغییر شکل مطالعه شده است.

Gerasimidis و Sideri (۲۰۱۶) با استفاده از ابزار قدرتمند محاسباتی اجزای محدود به روش توزیع جزئی خرابی<sup>۲</sup> به بحث تخریب پیش‌رونده در ساختمان‌های فولادی پرداختند. در تحقیق مورد اشاره، با بررسی شاخص خسارت<sup>۳</sup> و بررسی انتشار خرابی<sup>۴</sup>، نشان داده شده است که با در نظر گرفتن توزیع جزئی خرابی در سیستم، مکانیزم خرابی می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای اصلاح شود و به‌طور کلی پاسخ سازه تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

Kim و An (۲۰۰۹) و Li و همکاران (۲۰۱۵) اثر عملکرد زنجیره‌ای بر خرابی پیش‌رونده سازه‌های فولادی قاب خمشی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در مطالعات خود نشان دادند که در

تکنولوژی آمریکا (Ellingwood و همکاران، ۲۰۰۷)، تخریب پیش‌رونده را گسترش خرابی موضعی اولیه از عضوی به عضو دیگر معرفی می‌کنند. این فرآیند نهایتاً منجر به خرابی کل سازه و یا منجر به خرابی بخش بزرگی از سازه می‌شود که با تخریب اولیه نامتناسب است. از دیدگاه UFC (۲۰۰۹)، خرابی پیش‌رونده نوعی خرابی تکثیرشونده است که در آن آسیب نهایی نسبت به خرابی اولیه بسیار وسیع‌تر است.

جلوگیری از وقوع تخریب پیش‌رونده در سازه‌ها به‌منظور ممانعت از تکرار فجایع گذشته امری ضروری به حساب می‌آید. این مسئله در آیین‌نامه‌های مختلف دنیا به صورت‌های متفاوتی وارد شده است. با این حال، هنوز این بحث در آیین‌نامه‌های ایران به‌صورت جدی مورد توجه قرار نگرفته است. لازم به ذکر است مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان ایران با عنوان پدافند غیرعامل به موضوع طراحی، اجرا و بهره‌برداری سازه‌ها در مقابل حملات تروریستی و انفجار و ... می‌پردازد. موضوع تخریب پیش‌رونده در ویرایش ششم پیش‌نویس مبحث ۲۱ (INBC Part 21<sup>th</sup>، ۲۰۰۹) در قالب یک فصل گنجانده است. در این مبحث، ساختمان‌ها به ۵ گروه با درجه اهمیت‌های ویژه، بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم تقسیم‌بندی می‌شوند. بر اساس مقررات مندرج در مبحث مزبور، رعایت ضوابط تخریب پیش‌رونده برای ساختمان‌های با اهمیت ویژه، الزامی است. در حالی که برای ساختمان‌های با اهمیت بسیار زیاد، توصیه اکید و برای اهمیت زیاد، توصیه شده است. برای سایر ساختمان‌ها نیز موضوعیت ندارد. در ویرایش‌های جدید آیین‌نامه‌های ایران بحث تخریب پیش‌رونده مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

برخی از عوامل مؤثر در مدل‌سازی صحیح تخریب پیش‌رونده عبارت‌اند از: در نظر گرفتن نوع اتصال، اثر سقف، اثر چشمه اتصال، اثر میان قاب و ... هدف این تحقیق، بررسی و مقایسه سناریوی حذف ستون در کف‌های سازه‌ای با توجه به ابعاد چشمه‌های مختلف سقف کامپوزیت، تعداد چشمه‌های متصل به ستون حذف شده و جهت تیرهای فرعی است. برای این کار، سناریوهای مختلف حذف ستون (تک و جفت ستون) به‌صورت اعمال بار به‌جای ستون‌های حذف شده مورد بررسی قرار گرفتند. برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی غیرخطی ساختمان از روش اجزای محدود استفاده شده است. از ویژگی‌های تحقیق حاضر در مقایسه با سایر تحقیقات می‌توان به بررسی ابعادی چشمه‌های سقف، حذف جفت ستون، ریزمدل‌سازی با مصالح غیرخطی، تحلیل دینامیکی غیرخطی و معرفی فنر دوخطی معادل سقف کامپوزیت جهت به‌کارگیری در مدل‌های اجزای محدود اشاره کرد.

3. Damage index  
4. Damage propagation

1. Advanced First Order Reliability Method, AFORM  
2. Partial Distributed Damage Method, PDDM

اعضای تیر و ستون سازه منتقل می‌شود و ورق فولادی سقف‌های کامپوزیت در ایجاد مقاومت سقف، بیش از ۶۵ درصد نقش باربری دارند. در حالی که مش میلگردهای مسلح کننده داخل بتن تأثیر ناچیزی در مقاومت سقف دارد. در یک تحقیق مشابه، Ren و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی حذف ستون پیرامونی با در نظر گرفتن چهار نوع اتصال در آزمایشگاه پرداختند. آن‌ها سه عملکرد مهم در مقابل تخریب پیش‌رونده شامل مقاومت خمشی، کنش زنجیره‌ای و عملکرد کششی تیر مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین نشان داده شد که بعد از حذف ستون پیرامونی، عملکرد خمشی در خرابی پیش‌رونده بسیار مؤثر عمل می‌کند، عملکرد زنجیره‌ای قابل صرف‌نظر است و عملکرد کششی اعضا نقش مهمی در مقابل کاهش خرابی در تغییر شکل‌های بزرگ دارد. بر اساس مطالعات Wang و همکاران (۲۰۲۰) روی سیستم کامپوزیت، نشان داده شد که با افزایش پیوستگی و مقیدسازی ورق‌های عرشه فولادی، افزایش ضخامت عرشه فولادی، و افزایش تعداد برش‌گیر می‌توان مقاومت خرابی پیش‌رونده را افزایش داد.

Fu و همکاران (۲۰۱۸) در یک مطالعه آزمایشگاهی، سقف‌های کامپوزیت با ابعاد مختلف چشمه را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که ظرفیت تحمل بار نمونه با ابعاد چشمه کوچک‌تر، بیشتر است. در عین حال، ظرفیت تغییر شکل نمونه با ابعاد چشمه بزرگ‌تر، بیشتر است. در سیستم سقف کامپوزیت با حذف ستون گوشه عملکرد کنسولی از تیرها و دال مشاهده می‌گردد و عملکرد زنجیره‌ای، عملکرد کششی اعضا و رفتار قوسی فشاری در بتن مشاهده نمی‌شود.

Tan و Fu (۲۰۱۹) نشان دادند با حذف ستون گوشه، شکل‌پذیری کم‌تری نسبت به حالت حذف ستون میانی مشاهده می‌شود و ضرایب افزایش بار دینامیکی ستون‌های گوشه نسبت به سایر ستون‌ها بیشتر است. همچنین حذف ستون پیرامونی نسبت به میانی شرایط بدتری برای سیستم سقف کامپوزیت ایجاد می‌کند و می‌تواند بحرانی‌تر باشد. خطوط تسلیم مثبت به‌صورت مورب در اطراف محل حذف ستون و خطوط تسلیم منفی در ناحیه‌های پیرامونی در لبه‌ها به‌صورت بیضوی ایجاد می‌گردد. بر اساس نتایج تحقیق Zhang و همکاران (۲۰۲۰)، افزایش ارتفاع تیرها در سازه‌های کامپوزیت، ظرفیت تسلیم آن‌ها را افزایش داده اما به دلیل ضعف در شکل‌پذیری، ظرفیت نهایی را کاسته است. در طراحی سیستم سقف کامپوزیت متداول آیین‌نامه‌ای باید از شکل‌پذیری و مقاومت اتصال در مقابل تخریب پیش‌رونده اطمینان ایجاد کرد زیرا عدم شکل‌پذیری و مقاومت اتصال در صورت وقوع تغییر شکل‌های بزرگ، ممکن است منجر به خرابی سیستم سقف شود (Fu و Tan، ۲۰۱۹).

نظر گرفتن عملکرد زنجیره‌ای در کاهش جابه‌جایی‌ها بسیار مؤثر است. همچنین نشان دادند عملکرد زنجیره‌ای در هنگام وقوع تخریب پیش‌رونده در ستون‌های میانی نسبت به ستون‌های پیرامونی تأثیرگذارتر است و در ناحیه میانی نسبت به ناحیه پیرامونی سازه در مقابل تخریب پیش‌رونده مقاومت بیشتری دارد. Liu و Pirmoz (۲۰۱۶) ظرفیت قاب‌های فولادی پس‌تنیده را با افزایش جابه‌جایی‌های قائم در جهت و امتداد ستون حذف‌شده به‌صورت سیستماتیک بررسی کردند. در مطالعه مزبور نشان داده شد که علاوه بر انرژی مستهلک‌شده توسط المان‌های سازه، عملکرد قوسی و زنجیره‌ای تیرها منبع اصلی ظرفیت سازه در قاب‌های فولادی پس‌تنیده در برابر تخریب پیش‌رونده است.

Rezvani و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند با کاهش طول دهانه‌های قاب‌های سازه، سیستم در مقابل تخریب پیش‌رونده مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. Song و Sezen (۲۰۱۳) برای مقایسه دقت تحلیل سه‌بعدی و دوبعدی، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی استاتیکی و دینامیکی را با نتایج تجربی حاصل از حذف برخی از ستون‌های طبقه اول یک ساختمان چهار طبقه واقعی (ساختمان دانشگاه اوهایو) دارای قاب خمشی فولادی مقایسه کردند. در مطالعه مزبور نشان داده شد، چون مدل‌های سه‌بعدی اثر تیرهای عرضی یا قاب‌های عرضی را در مدل‌سازی در نظر می‌گیرند نتایج دقیق‌تری را در اختیار قرار می‌دهند.

Kim و همکاران (۲۰۱۵) و Hadjioannou و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی اثر سیستم سقف کامپوزیت در مقابل خرابی پیش‌رونده، عملکرد مناسب این سیستم را نشان دادند. Dimopoulos و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی عددی فرآیند خرابی پیش‌رونده در یک ساختمان پنج طبقه دارای سیستم دوگانه قاب خمشی به‌همراه مهاربندی و اتصالات پیش‌تنیده پرداختند. آن‌ها اثرات سقف کامپوزیت در مدل‌سازی سه‌بعدی را لحاظ کردند و نشان دادند که سقف کامپوزیت تا ۳۰ درصد در کاهش جابه‌جایی‌های قائم مؤثر است. در یک تحقیق دیگر، Dimopoulos و همکاران (۲۰۲۰)، با مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی، ضرایب افزایش بار دینامیکی (DIF) را در سیستم دارای سقف کامپوزیت تعیین کردند. آن‌ها نشان دادند می‌توان با افزایش حدود دو برابری بار ثقلی پیشنهادی UFC در تحلیل دینامیکی، ساختمان موردنظر را در مقابل تخریب پیش‌رونده مقاوم دانست.

Kong و همکاران (۲۰۲۰) در یک تحقیق آزمایشگاهی، به مطالعه اثر حذف ستون میانی سازه دارای یک طبقه و دو دهانه با مقیاس یک‌سوم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با حذف ظرفیت باربری سقف کامپوزیت در تغییر شکل‌های بزرگ، بار به

مصالح می‌توان بر ایمنی سازه در مقابل تخریب پیش‌رونده را تأمین کرد. در روش طراحی مستقیم، به‌طور کلی بر روی مقاومت کلی سازه تأکید می‌شود؛ که این روش خود شامل دو روش مقاوم‌سازی محلی ویژه<sup>۱۰</sup> و روش مسیر بار جایگزین<sup>۱۱</sup> است. در روش مقاوم‌سازی محلی ویژه کافی است که المان‌های بحرانی در برابر حوادث را شناسایی و سپس آن‌ها را طوری طراحی نمود که در برابر حوادث غیرعادی مقاومت کنند. در روش مسیر بار جایگزین، سازه به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند خرابی موضعی پیش آمده را مدیریت کرده و مسیر بار جدیدی برای انتقال بارها به وجود آورد. این روش که معمولاً با حذف یک ستون از طبقه اول سازه انجام می‌شود، منطقی‌ترین و جامع‌ترین روش برای جلوگیری از تخریب پیش‌رونده به نظر می‌رسد. زیرا هم پایداری کلی سازه را موردبررسی قرار می‌دهد و هم یک روش اقتصادی است.

برای انجام محاسبات روش مسیر بار جایگزین نیاز به تحلیل سازه است. به‌طور کلی روش‌های تحلیل سازه برای بررسی تخریب پیش‌رونده عبارت‌اند از:

الف) تحلیل استاتیکی خطی: این روش برای ساختمان‌های تا حداکثر ۱۰ طبقه مجاز است. این روش اثرات دینامیکی از قبیل ضریب بزرگ‌نمایی، استهلاک انرژی و نیروهای اینرسی را لحاظ نکرده و رفتار غیرخطی مصالح را در نظر نمی‌گیرد.

ب) تحلیل استاتیکی غیرخطی: این روش به‌صورت گسترده‌ای برای تحلیل سازه‌ها در برابر بارهای جانبی کاربرد دارد. این روش منتج به پاسخ‌های بسیار محافظه‌کارانه برای تخریب پیش‌رونده می‌شود. در این روش تحلیل، ممکن است اعضایی که از محل آغازگر آسیب<sup>۱۲</sup> دور هستند به‌طور مناسب در پدیده تخریب دخالت داده نشوند. این تحلیل زمان زیادی احتیاج دارد و برای سازه‌هایی که الگوی رفتاری آن‌ها قابل تشخیص است، قابل استفاده است. به‌طور کلی می‌توان گفت چنین تحلیلی فقط به‌عنوان مکمل تحلیل استاتیکی خطی قابل توجیه است.

پ) تحلیل دینامیکی خطی: این روش خصوصیات رفتار دینامیکی را لحاظ نموده ولی رفتار غیرخطی مصالح را در نظر نمی‌گیرد و نیاز به محاسبات اضافی برای به دست آوردن گام‌های زمانی و نیروهای داخلی دارد.

ت) تحلیل دینامیکی غیرخطی: این روش تحلیل برای بررسی تخریب پیش‌رونده دقیق‌ترین روش موجود است. در این روش به مصالح اجازه داده می‌شود که وارد ناحیه غیرخطی شوند و در آن‌ها تغییرشکل‌های بزرگ و اتلاف انرژی و ترک‌خوردگی و شکست رخ

سیستم سقف کامپوزیت در ساختمان‌های با قاب ساده نیز می‌تواند در تخریب پیش‌رونده مؤثر باشد. نتایج تحقیقات Johnson و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند سازه‌های باربر ثقلی طراحی‌شده برای کاربری تجاری حتی با اتصالات برشی ساده مقاومت خوبی در برابر خرابی پیش‌رونده از خود نشان می‌دهند زیرا مقاومت خمشی سیستم سقف کامپوزیت در هنگام حذف ستون‌های گوشه و پیرامونی خیلی مؤثر می‌باشد.

Wang و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند مود غالب گسیختگی سقف‌های کامپوزیت، شکست برشی برش‌گیرها می‌باشد. بر اساس مطالعات Wang و همکاران (۲۰۱۹) در خصوص حذف ستون پیرامونی مجاور ستون گوشه<sup>۱</sup> مشاهده شده است که حداکثر ظرفیت سیستم سازه با سقف‌های کامپوزیت در تحلیل دینامیکی و استاتیکی به ترتیب حدود ۴/۲ و ۳/۶ برابر ترکیب بار آیین‌نامه ASCE می‌باشد. همچنین به دلیل خرابی اتصال تیر به ستون، ناحیه‌های خرابی، در اطراف ستون محذوف اتفاق می‌افتد و همواره وضعیت اتصال در بهبود عملکرد سقف کامپوزیت در تخریب پیش‌رونده بسیار مهم و تأثیرگذار است. در یک تحقیق دیگر، Zhang و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که سیستم سازه در مقابل حذف ستون‌های IEC<sup>۲</sup> به دلیل ضعیف بودن شرایط مرزی نسبت به حذف ستون‌های IEI<sup>۳</sup> دارای عملکرد ضعیف‌تری در منحنی نیرو-جابه‌جایی می‌باشند. با این وجود، با لحاظ اثر سقف کامپوزیت مقدار اختلاف این دو به حداقل می‌رسد.

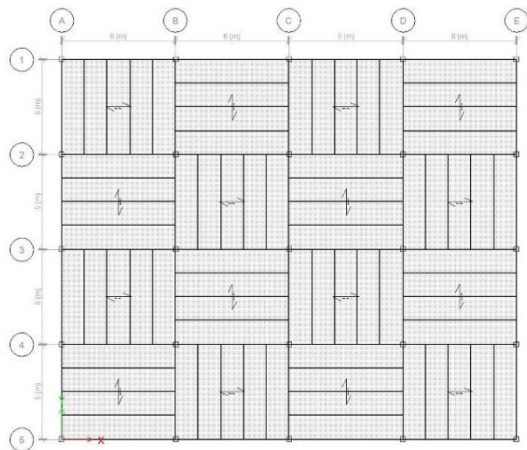
به‌طور کلی مطابق آیین‌نامه‌های مختلف دنیا روش‌های متفاوتی برای کاهش خطر احتمالی تخریب پیش‌رونده در ساختمان‌ها پیشنهاد شده است که مهم‌ترین و عمده‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از (Starossek, ۲۰۰۶):

- ۱- روش کنترل حادثه<sup>۴</sup>،
  - ۲- روش طراحی غیرمستقیم<sup>۵</sup>،
  - ۳- روش طراحی مستقیم<sup>۶</sup>.
- در روش کنترل حادثه، برای تأمین این هدف می‌توان حادثه موردنظر را پیش‌بینی کرده و از آن جلوگیری نمود و یا راه‌های محافظتی در مقابل آن اندیشید. برای مثال، با اجرا نمودن موانع محافظتی در برابر ضربه وسایل نقلیه، یا ایجاد فاصله ایمنی برای مقابله با حملات تروریستی، یا ممنوع کردن استفاده از گاز آشپزی در ساختمان‌ها، می‌توان از ایجاد خطر جلوگیری کرد.
- در روش طراحی غیرمستقیم، با مشخص کردن ترازهای حداقل مقاومت<sup>۷</sup>، پیوستگی<sup>۸</sup> و شکل‌پذیری<sup>۹</sup> برای اتصالات، اعضا و

7. Strength  
 8. Continuity  
 9. Ductility  
 10. The Specific Local Resistance Method  
 11. Alternate Path Method  
 12. Initial Damage

1. Penultimate Edge Column  
 2. Interior-Edge-Corner  
 3. Interior-Edge-Intermediate  
 4. Event Control Method  
 5. Indirect Design Method  
 6. Direct Design Method

(St37) و نوع بتن در سیستم دال کامپوزیت، C25 استفاده شده است. بارگذاری ثقلی سازه عبارت است از: بار مرده طبقات  $585 \text{ kg/m}^2$ ، بار زنده  $200 \text{ kg/m}^2$ ، بار مرده تیرهای پیرامونی طبقات  $550 \text{ kg/m}^2$ ، بار مرده بام  $550 \text{ kg/m}^2$ ، بار زنده بام  $150 \text{ kg/m}^2$  بار مرده تیرهای پیرامونی بام  $190 \text{ kg/m}$ .



شکل ۱- پلان ساختمان

جدول ۱- مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان ۳ طبقه

طبقه	ستون		
	جهت X	جهت Y	تیر
۱ و ۲	BOX 300*300*12	BM 300*10 F200*12	BM 300*8 F200*10
۳	BOX 250*250*10	BM 300*10 F150*12	BM 300*8 F150*12

جدول ۲- مشخصات اعضای سقف- تیرهای فرعی

تیرهای کامپوزیت	طول تیرهای فرعی	
	پروفیل تیر آهن	پروفیل تیر آهن
	L = 600 cm	IPE 20
	L = 500 cm	IPE 18

### ۳-۲- معرفی سناریوهای تخریب پیش‌رونده

با توجه به پلان ساختمان مورد مطالعه که در شکل (۱) نشان داده شده است، ۱۵ سناریوی شروع خرابی شامل ۵ حالت حذف تک ستون و ۱۰ حالت حذف جفت ستون مورد نظر قرار گرفته است. مطابق شکل (۲)، تمامی حالت‌های ممکن حذف تک ستون از نظر موقعیت در پلان به صورت سه نوع ستون گوشه، پیرامونی و میانی و نیز از نظر ابعاد چشمه سقف لحاظ شده است.



این روش با توجه به لحاظ نمودن رفتار دینامیکی و رفتار غیرخطی مصالح، نسبت به سایر روش‌های تحلیل از دقت بیشتری برخوردار است، اما کاربرد آن نیازمند تأیید و بررسی گسترده نتایج به دست آمده بوده و بسیار پیچیده است. از جمله نقاط ضعف این روش حساسیت بسیار زیاد به داده‌ها و نیز زمان زیاد مورد نیاز برای تحلیل است. در این مطالعه برای بررسی تخریب پیش‌رونده از روش مسیر بار جایگزین و تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده شده است.

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- معرفی مدل‌های عددی

قاب‌های خمشی فولادی، سیستم‌های سازه‌ای رایجی هستند که معمولاً در مناطق با لرزه‌خیزی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. قاب‌های خمشی فولادی در سه سطح شکل‌پذیری معمولی، متوسط و ویژه طراحی می‌شوند. استفاده از ساختمان‌های قاب خمشی فولادی متوسط در مناطق مستعد زلزله بسیار رایج است. با این حال، مطالعات کمی در مورد این سیستم وجود دارد و بیشتر مطالعات در مورد ساختمان‌های فولادی قاب ویژه است (Kim و Kim، ۲۰۰۹؛ El-Tawil و Khandelwal، ۲۰۰۷). سیستم ساختمانی مورد بررسی در این مطالعه قاب خمشی فولادی متوسط است.

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ETABS (CSI، ۲۰۱۶) و مقاطع مرسوم در ساختمان‌های فولادی کشور، ساختمان ۳ طبقه به روش LRFD، مطابق آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌های فولادی ایران (INBC Part 10<sup>th</sup>، ۲۰۱۳) و آمریکا (AISC 360، ۲۰۱۶) طراحی شده است. سطح اشغال بنا ۴۸۰ مترمربع (۲۰ متر در ۲۴ متر) دارای ۴ دهانه ۶ متری در جهت x و ۴ دهانه ۵ متری در جهت y است. ارتفاع طبقات ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. بارگذاری ساختمان مطابق مبحث ششم مقررات ملی ایران (INBC Part 6<sup>th</sup>، ۲۰۱۳) صورت گرفته است و همچنین ملاحظات لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ (IBCS، ۲۰۱۳) مدنظر قرار گرفته است. پلان ساختمان مزبور در شکل (۱) نمایش داده شده است. مقاطع ستون‌ها و تیرهای اصلی به دست آمده مطابق جدول (۱) است. به عنوان مثال برای ستون، مقطع BOX 300\*300\*12 دارای شکل جعبه مربعی توخالی با عرض ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت ورق ۱۲ میلی‌متر است و برای تیر، مقطع BM 300\*10 F200\*12 به صورت I شکل دارای ابعاد جان ۳۰۰\*۱۰ میلی‌متر و ابعاد بال‌های بالا و پایین ۲۰۰\*۱۲ میلی‌متر می‌باشد. سقف مورد استفاده در این مدل‌سازی از نوع کامپوزیت است. مقاطع تیرهای فرعی سقف در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. ضخامت دال بتنی سقف، ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. نوع فولاد مصرفی در سیستم سازه ساختمانی این تحقیق، از نوع فولاد معمولی ساختمانی

به صورت گیردار مدل سازی شده است. در شکل های (۲) و (۳)، محل حذف ستون ها در سناریوهای مختلف با علامت  و انتهای گیردار  نشان داده شده است. نحوه به دست آوردن فنر معادل برای سقف های کامپوزیت در بخش های بعد توضیح داده شده است.

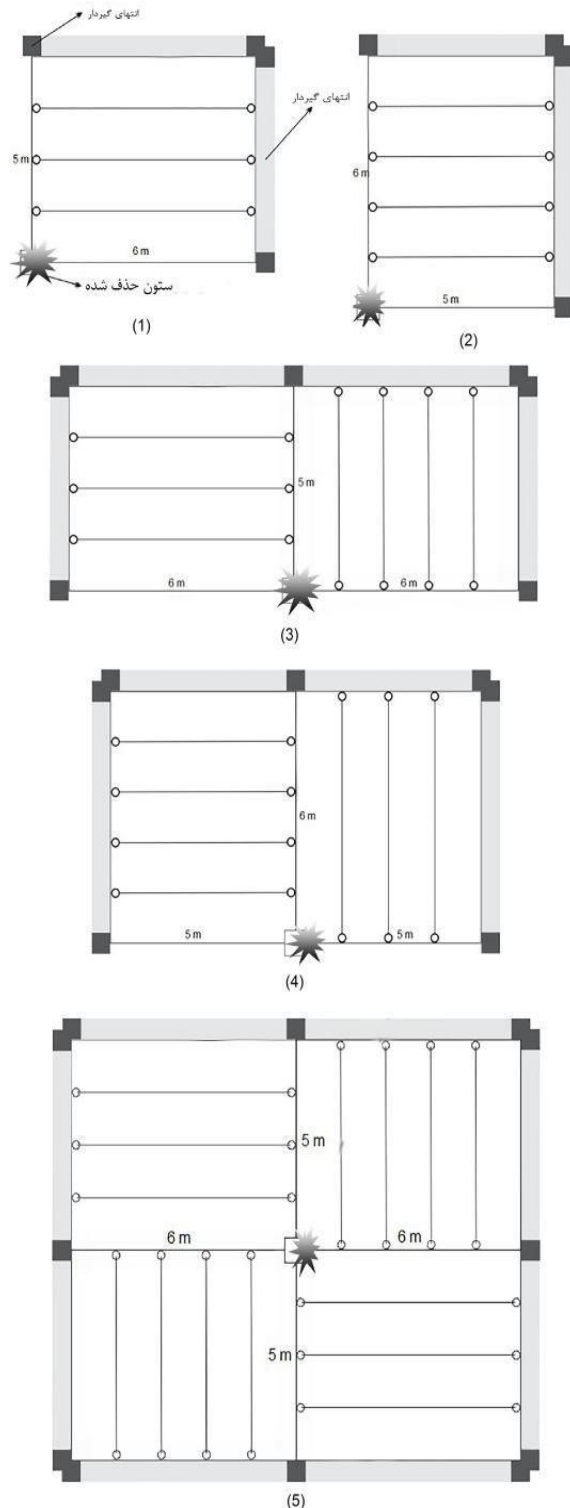
### ۳-۳- بارگذاری تخریب پیش رونده و حذف دینامیکی ستون

ترکیب بارگذاری مورد استفاده در تحلیل دینامیکی غیرخطی برای تمامی قاب های تحلیل شده بر اساس معیارهای تسهیلات متحد (UFC، ۲۰۰۹) و خدمات عمومی آمریکا (GSA، ۲۰۱۶) مطابق رابطه زیر است:

$$G = 1.2 D + (0.5 L \text{ or } 0.2 S) \quad (1)$$

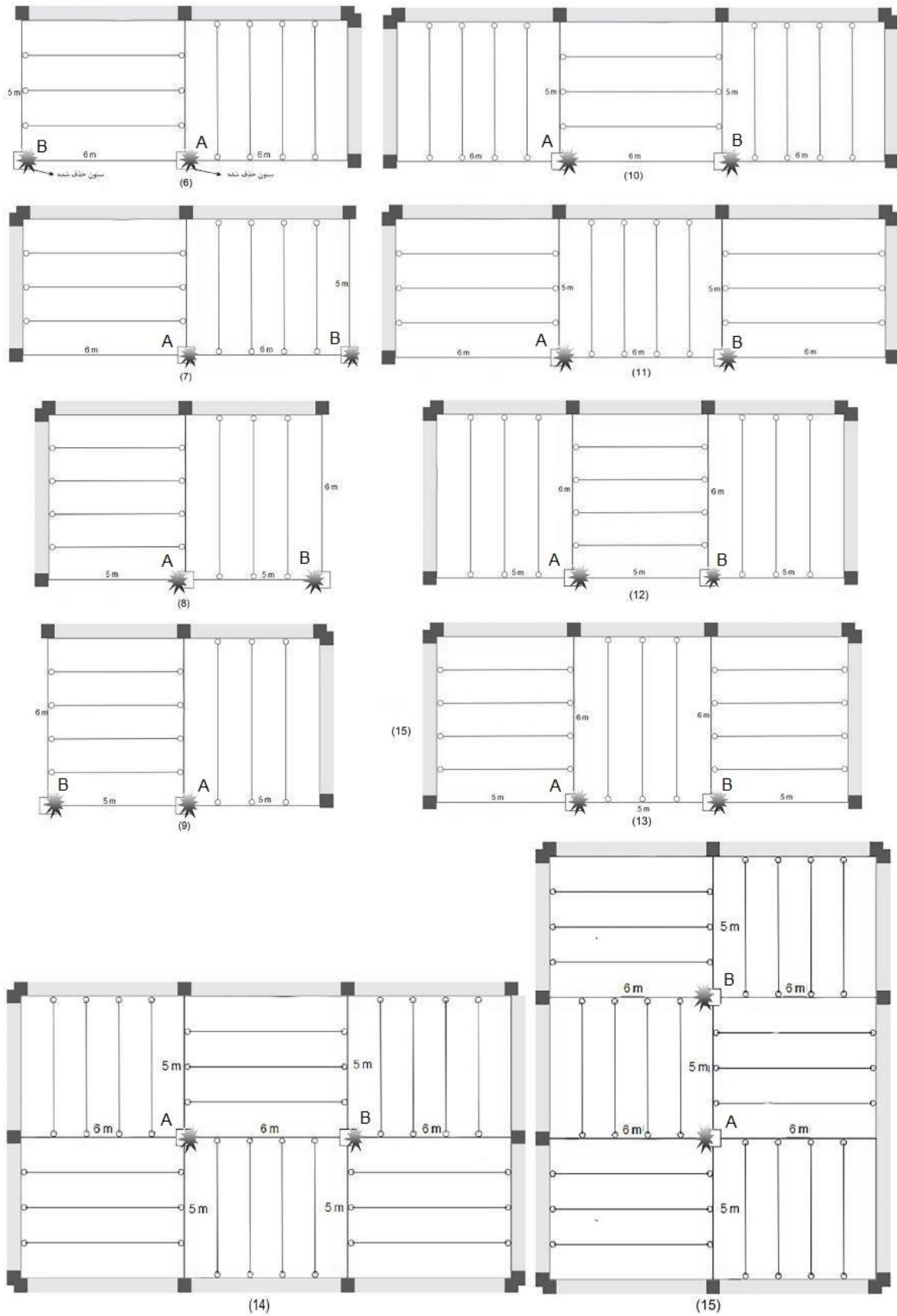
که در آن  $D$  بار مرده،  $L$  بار زنده و  $S$  بار برف است. برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی از نرم افزار ABAQUS (SIMULIA، ۲۰۱۴) استفاده شده است. ابتدا سازه مورد نظر مطابق رابطه (۱) بارگذاری شده و نیروهای داخلی (برش  $V$ ، لنگر  $M$  و نیروی محوری  $P$ ) ستون مورد نظر قبل از حذف شدن محاسبه می شود. سپس نیروهای مزبور را در مدل نرم افزار ABAQUS جایگزین ستون محذوف می کنیم. برای شبیه سازی حذف ستون، مطابق شکل (۴)، نیروهای (V-M-P) به صورت افزایشی در جهت معکوس در محل ستون محذوف اعمال می شوند.

در برخی از آیین نامه ها مانند آیین نامه بارگذاری آمریکا (ASCE/SEI 7-10، ۲۰۱۰) پیشنهاد شده است، برای اطمینان از پایداری سازه، به رابطه (۱) ترم  $0.2W$  اضافه شود که در آن  $W$  بار باد است. در برخی از استانداردهای اخیر الزام شده است که پایداری سازه با تحمیل یک بار جانبی کوچک فرضی معادل  $0.002 \sum P$  در هر طبقه بررسی شود که در آن  $\sum P$  نیروهای ثقلی تجمعی ناشی از بارهای مرده و زنده اعمال شده به طبقه بالای هر طبقه است. اگر چنین کنترلی برای پایداری سازه انجام شود، ترم  $0.2W$  در رابطه (۱) در نظر گرفته نمی شود.



شکل ۲- حالت های ۱ تا ۵ حذف تک ستون در بررسی سقف کامپوزیت در هنگام تخریب پیش رونده

مطابق شکل (۳) تمام حالات حذف جفت ستون برای سه نوع حالت جفت ستون گوشه، پیرامونی و میانی در نظر گرفته شده است. مطابق روش استفاده شده توسط Zhang و همکاران (۲۰۱۹)، در این تحقیق، نواحی مرزی دور از محل حذف ستون،



شکل ۳- حالت‌های ۶ تا ۱۵ حذف جفت ستون در بررسی سقف کامپوزیت در هنگام تخریب پیش‌رونده

نظر گرفته شده است. این فرض را می‌توان با فراهم نمودن برش‌گیرها فرضی منطقی و قابل قبول دانست.

- اتصال تیرهای فرعی به تیرهای اصلی اتصال جان است. با توجه به این‌که در شرایط اجرایی، این اتصال با جفت نبشی جان انجام می‌شود جان به صورت یکپارچه عمل می‌کند و در این مدل‌سازی جان تیرهای فرعی به جان تیرهای اصلی به صورت یکپارچه (Tie) شده است.

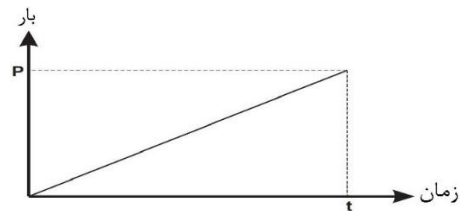
- عکس‌العمل مرکب سقف و تیرهای اصلی ممکن است دارای سختی اولیه بیشتر و نیز ناحیه الاستیک بیشتر نسبت به حالت عکس‌العمل سقف تنها و تیرهای اصلی تنها داشته باشند. با این‌حال، فرض شده است که ناحیه الاستیک هر سه حالت در یک جابه‌جایی است.

- بارگذاری تخریب پیش‌رونده به صورت سریع است. در مدل‌سازی عملکرد سقف کامپوزیت از بارگذاری خطی استفاده شده است (شکل (۴)). این فرض را می‌توان تا حدی محافظه‌کارانه در نظر گرفت. زیرا فولاد و بتن در کرنش‌های سریع می‌توانند مقاومت بالاتری از خود نشان دهند.

### ۳-۵- جزئیات مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS

مدل‌سازی سقف کامپوزیت به صورت ریز مدل‌سازی با استفاده از مقاطع به دست آمده انجام شده است و اتصال بین اجزای سازه‌ای با اندرکنش Tie برقرار شده است. در این شبیه‌سازی تیرهای اصلی، تیرهای فرعی، ستون‌ها، ورق‌های پیوستگی و سخت‌کننده‌ها از نوع المان صفحه‌ای با تابع درجه ۱ و انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (S4R)<sup>۲</sup> و دال بتنی از المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای با تابع درجه یک و انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R)<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده است. نوع تحلیل انتخابی، تحلیل دینامیکی صریح<sup>۴</sup> است.

برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن از مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن<sup>۵</sup> استفاده شده است. معیار خرابی این مدل Drucker Prager و تابع تسلیم آن Lubliner می‌باشد. به عنوان منحنی رفتاری بتن غیرمحصور دال بتنی سقف کامپوزیت از مدل رفتاری Kent و Park<sup>۶</sup> (Mander و همکاران، ۱۹۸۸) استفاده شده است. با توجه به تعداد زیاد حالت‌های موردبررسی (۱۵ سناریو مورد اشاره در شکل‌های (۲) و (۳))، در اینجا فقط به عنوان نمونه شکل‌های مربوط به حالت ۱ آورده شده است. شکل (۵) نماهای سه‌بعدی حالت ۱ را در نرم‌افزار آباکوس<sup>۷</sup> نشان می‌دهند.



شکل ۴- بارگذاری در محل ستون‌های حذف‌شده

### ۳-۴- فرضیات مدل‌سازی

فرضیاتی که برای تعیین رفتار سقف در مدل‌سازی لحاظ شده است به صورت زیر است:

- اثر سقف در تخریب پیش‌رونده ساختمان فقط در جهت قائم است.

- تکیه‌گاه‌های سقف‌های مدل‌سازی شده به صورت ثابت (گیردار) هستند (Kong و همکاران، ۲۰۲۰؛ Ren و همکاران، ۲۰۲۰). در این مطالعه با توجه به ماهیت خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌ها از اثرات قاب‌های عرضی و چشمه‌های سقف دور از محل حذف ستون صرف‌نظر شده است.

- مقاومت در نظر گرفته‌شده برای اعضای سقف تا مرحله قبل از کمانش در نظر گرفته شده است و از رفتار پساکمانشی اعضا صرف‌نظر شده و فرض شده که این اعضا پس از رسیدن به مرحله کمانش مقاومت خود را از دست می‌دهند و سختی آن‌ها به صفر می‌رسد.

- در مدل‌سازی‌ها، اتصالات، ورق‌های پیوستگی و ورق‌های مضاعف بررسی نشده و فرض شده است که تأثیر ناچیزی در عملکرد سقف مرکب دارند؛ زیرا در طراحی اتصالات در مقابل بار زلزله سعی می‌شود که طوری طراحی صورت گیرد که این اعضا در مقابل تغییر شکل‌های زیاد تیرها و ستون‌ها خصوصاً تیرها مقاومت کافی را داشته باشند و تنش در آن‌ها به حد تسلیم و مقاومت نهایی خود نرسد.

- اتصالات تیر به ستون، تیر فرعی به تیر اصلی و المان تقویتی به تیر و ستون به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و نوع اتصال بین این اعضا Tie<sup>۱</sup> است.

- اتصال دال بتنی به اعضای تیر فرعی و تیرهای اصلی به صورت یکپارچه (Tie) در نظر گرفته شده است. اتصال دال با تیر اصلی در نقاطی فراهم‌شده که در تشکیل مفصل پلاستیک مزاحمتی ایجاد نکند. سطح اتصال دال با تیر، یک محیط اتصال یکپارچه با امکان انتقال کامل نیروهای برشی بین دال و تیر در

5. Concrete Damaged Plasticity

6 Kent & Park Model

7. ABAQUS

۱. اتصال Tie، اتصالی است که کرنش بین دو سطح اتصال در هنگام تغییر شکل یکسان است و دو سطح کاملاً پیوسته با یکدیگر تغییر شکل می‌دهند.

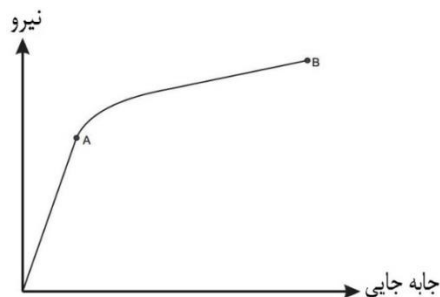
2. 4-node general-purpose reduced integration shell

3. General Purpose Linear Brick Element, With Reduced Integration

4. Explicit Dynamic Analysis

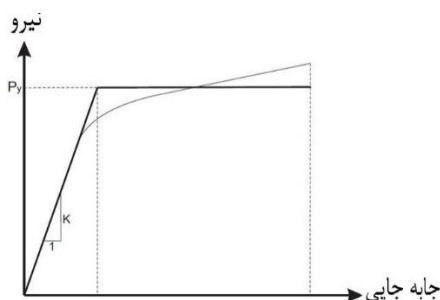


مجزا در شکل (۷) نشان داده شده است. نقطه A نقطه تسلیم سقف محسوب می‌شود و نقطه B نقطه حداکثر تغییر مکان محل ستون حذف شده است. نقطه B نقطه‌ای است که اعضای سازه کماتش می‌کنند یا به مقاومت نهایی خود می‌رسند و یا نقطه‌ای است که عملکرد زنجیره‌ای اعضا شروع می‌شود. در صورتی که اعضا کماتش کنند، توانایی باربری لازم را از دست می‌دهند و نقطه نهایی محسوب می‌شود. در صورت شروع عملکرد زنجیره‌ای نیز، دیگر نمی‌توان روی مقاومت اتصالات و اعضا در کشش حساب کرد لذا مجدداً این نقطه به عنوان نقطه نهایی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷- عملکرد نیرو- جابه‌جایی سقف در اثر تخریب پیش‌رونده

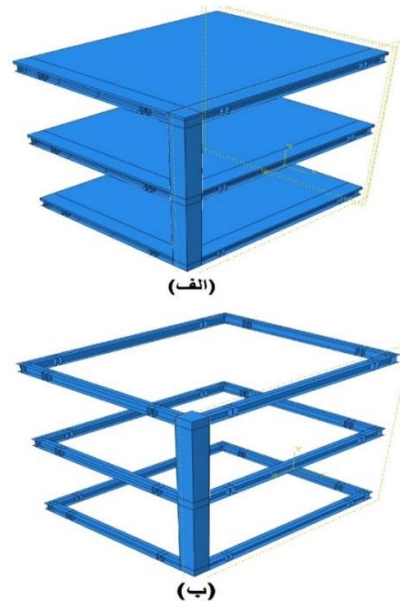
منحنی رفتاری سقف در هر سناریو خرابی پیش‌رونده به صورت یک منحنی نیرو- جابه‌جایی است که می‌توان آن را مطابق شکل (۸) با استفاده از نشریه بهسازی ایران (MPO 360، ۲۰۱۴) و دستورالعمل آیین‌نامه مدیریت بحران فدرال آمریکا (FEMA 356، ۲۰۰۰) به صورت دوخطی ساده کرد. در نهایت می‌توان این نمودار دوخطی را در نرم‌افزار برای فنر معادل سقف در نظر گرفت.



شکل ۸- منحنی ساده‌شده نیرو تغییر مکان

#### ۴- نتایج مدل‌سازی و بحث در نتایج

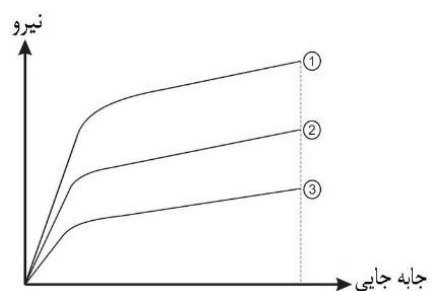
برخی از نتایج مدل‌سازی و تحلیل، به عنوان نمونه، در این قسمت آورده شده است. به این منظور، شکل‌های تغییر یافته سازه نظیر سناریو ۱۵ به صورت سه‌بعدی و دوبعدی در شکل (۹-الف) و



شکل ۵- نمای سه‌بعدی طبقات مدل شده حالت مورد بررسی ۱: (الف) تیرهای اصلی و فرعی و دال بتنی، (ب) تیرهای اصلی

#### ۳-۶- فنر معادل سقف کامپوزیت در جهت قائم

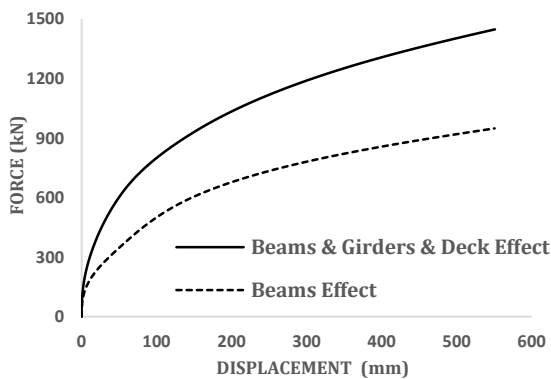
در هر سناریو تخریب پیش‌رونده، برای محاسبه میزان مشارکت سقف (دال بتنی و تیرهای فرعی) در منحنی بار- تغییر مکان قائم، می‌توان تخریب پیش‌رونده را یک بار با مدل کردن کامل سقف و تیرهای اصلی شبیه‌سازی کرد (شکل (۵-الف)) و یک بار هم فقط تیرهای اصلی را در مدل داشته باشیم (شکل (۵-ب)). به این ترتیب، منحنی‌های بار- تغییر مکان شماره ۱ و ۲ در شکل شماتیک (۶) به دست می‌آیند. سپس برای به دست آوردن منحنی عملکرد سقف کافی است، اختلاف منحنی ۱ و ۲ محاسبه شود تا منحنی شماره (۳) در شکل (۶) به دست آید.



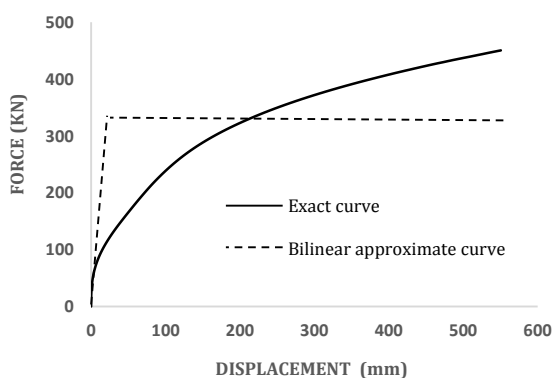
شکل ۶- منحنی نیرو- جابه‌جایی: (۱) اعضای اصلی، تیرهای فرعی و دال بتنی، (۲) اعضای اصلی، (۳) سقف (تیرهای فرعی و دال بتنی)

منحنی عملکرد سقف (منحنی شماره (۳) در شکل (۶)) شامل یک ناحیه خطی و یک ناحیه غیرخطی است که به صورت

منحنی نیرو و جابه‌جایی برای سناریو ۱۵ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این منحنی تغییرات نیرو-جابه‌جایی محل حذف ستون A و B برای حالت ۱۵ را نشان می‌دهد که باید دقت شود با توجه به تقارن بارگذاری و تقارن هندسی منحنی به‌دست‌آمده برای ستون A و B مشابه هستند. در این شکل، منحنی توپر مربوط به عملکرد کلی سقف کامپوزیت است و منحنی توخالی مربوط به عملکرد تیرهای اصلی است. در نهایت با تفاضل این دو منحنی در جابه‌جایی‌های ثابت، منحنی شکل (۱۲) به‌دست‌آمده است. با توجه به برابر بودن مقاومت و سختی دو منحنی برای عکس‌العمل سقف کامپوزیت در محل ستون A و B، تنها منحنی مربوط به یکی از حالت‌ها آورده شده است. نهایتاً با دوخطی کردن منحنی شکل (۱۲) مقدار  $k$  برابر با ۹۰۹۶ نیوتن بر میلی‌متر مقدار  $P_y$  برابر با ۳۴۱۱۲۲ نیوتن به‌دست آمده است.



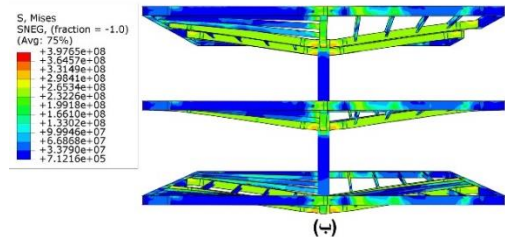
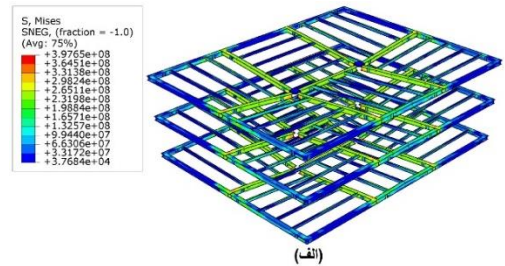
شکل ۱۱- نمودارهای نیرو- جابه‌جایی برای حالت ۱۵ در محل حذف ستون A و B



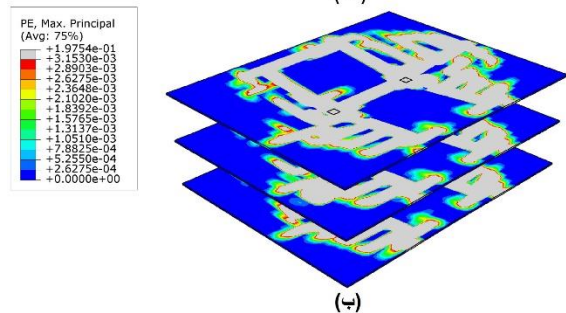
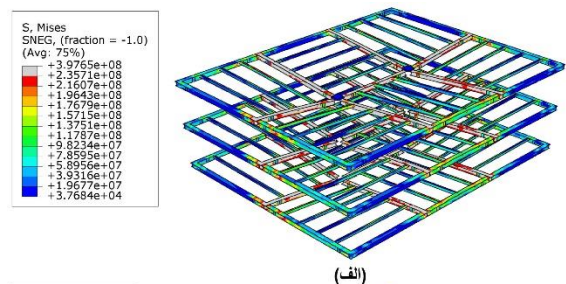
شکل ۱۲- نمودار عملکرد نیرو- جابه‌جایی سقف برای حالت ۱۵ و در محل حذف ستون A و B

در این قسمت با توجه به تعداد زیاد حالت‌های مورد بررسی از آوردن شکل‌های تغییر شکل یافته، منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی

شکل (۹-ب) نشان داده شده است. شکل (۱۰-الف) توزیع تنش در تیرهای اصلی و فرعی را نشان می‌دهد. نقاط دارای تنش بیشتر از تنش تسلیم بارنگ سفید مشخص شده‌اند. شکل (۱۰-ب) توزیع کرنش در دال بتنی را نشان می‌دهد. کرنش‌های بیشتر از کرنش نهایی بارنگ سفید مشخص شده‌اند. خطوط تسلیم در دال‌های بتنی و تیرهای فولادی مشابه تحقیق Kong و همکاران (۲۰۲۰) است.



شکل ۹- حالت ۱۵ سقف کامپوزیت تغییر شکل یافته: (الف) سه‌بعدی، (ب) دوطبقی



شکل ۱۰- توزیع تنش و کرنش در اعضای سقف کامپوزیت در سناریو ۱۵: (الف) تنش در تیرهای اصلی و فرعی، (ب) کرنش در دال بتنی

می‌توان گفت چیدمان تیرهای فرعی در سقف و تعداد و طول آن‌ها در تخریب پیش‌رونده تأثیر زیادی در نتایج دارد.

با مقایسه حالت‌های ۵ و ۱۵ در جدول (۳) مشاهده می‌شود که با حذف تک‌ستون میانی حالت ۵،  $k = 12148 N/mm$  و  $P_y = 485912 N$  و حذف جفت‌ستون میانی حالت ۱۵،  $k = 9096 N/mm$  و  $P_y = 341122 N$  است. این موضوع نشان‌دهنده این است که نسبت سختی اولیه و مقاومت تسلیم کلی چشمه سقف حالت ۵ به حالت ۱۵ به ترتیب برابر  $1/35$  و  $1/42$  است.

با بررسی و مقایسه حالت‌های ۱ و ۳ و ۵ با (حذف تک‌ستون)، مشاهده می‌شود حالت ۱ حذف ستون گوشه  $k = 3994 N/mm$  و  $P_y = 79877 N$  حالت ۳ حذف ستون پیرامونی و  $k = 6216 N/mm$  و  $P_y = 217577 N$  حالت ۵ حذف ستون میانی  $k = 12148 N/mm$  و  $P_y = 485912 N$  است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر سختی و مقاومت تسلیم سقف کامپوزیت در گوشه‌های ساختمان کم‌تر از پیرامون ساختمان و سختی سقف کامپوزیت در پیرامون ساختمان کم‌تر از سختی سقف کامپوزیت در ناحیه میانی است.

پس با توجه به جدول فوق برای در نظر گرفتن اثر سقف کامپوزیت در جهت قائم در هنگام تخریب پیش‌رونده، می‌توان بعد از مدل‌سازی اعضای اصلی قاب (تیرها و ستون‌ها) در محل گره‌های تیر و ستون، سختی ناشی از سقف کامپوزیت را به صورت یک فنر با توجه به نوع حالت تخریب و حذف ستون در نظر گرفت.

#### ۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر سقف کامپوزیت در جابه‌جایی‌های قائم در ساختمان منظم و ابعاد مشخص مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که اثر سقف قابل توجه بوده و در تحلیل تخریب پیش‌رونده نمی‌تواند صرف نظر شود. در حالی که اکثر تحقیقات با موضوع تخریب پیش‌رونده این اثر را در مدل‌سازی‌ها در نظر نگرفته‌اند. در این تحقیق، با ایده دوخطی کردن نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به اثر سقف، یک راه‌حل ساده برای در نظر گرفتن اثر سقف به صورت یک فنر دوخطی در محل اتصال تیر و ستون پیشنهاد شده است. مطابق این تحقیق می‌توان نتایج زیر را در مورد مقاومت سقف کامپوزیت در جهت قائم در هنگام تخریب پیش‌رونده ارائه کرد:

- به‌طور کلی سقف‌های کامپوزیت تأثیر بسزایی در تخریب پیش‌رونده دارند به نحوی که در نظر نگرفتن این اثر باعث خطای زیاد در نتایج مدل‌سازی تخریب پیش‌رونده می‌شود.
- نحوه چیدمان تیرهای فرعی در سقف و تعداد و طول آن‌ها در تخریب پیش‌رونده تأثیر بسزایی دارد.
- با حذف جفت‌ستون اثرات سقف در جلوگیری از تخریب پیش‌رونده خیلی کم‌تر از حالت حذف تک‌ستون است.

محل حذف ستون و نیز منحنی مقاومتی نیرو-جابه‌جایی سقف (تیرهای فرعی و دال بتنی) خودداری شده است.

جدول (۳) سختی ( $k$ ) و مقاومت تسلیم ( $P_y$ ) به‌دست‌آمده از تحلیل حالت‌های مختلف خرابی سقف کامپوزیت را نشان می‌دهد. در این جدول برای حالت حذف جفت ستون، دو منحنی نیرو و جابه‌جایی به دست آورده شده است که در نهایت ۲ سختی ( $k$ ) و ۲ مقاومت تسلیم ( $P_y$ ) ظاهر شده است. یادآوری می‌شود، موقعیت ستون‌های A و B در هر حالت در شکل (۳) مشخص شده است.

جدول ۳- سختی و مقاومت تسلیم معادل سقف

حالت مورد بررسی	تعداد ستون حذف شده	نام ستون	$k$ (N/mm)	$P_y$ (N)
۱	۱	A	۳۹۹۴	۷۹۸۷۷
۲	۱	A	۴۶۸۵	۹۳۶۹۷
۳	۱	A	۶۲۱۶	۲۱۷۵۷۷
۴	۱	A	۷۶۸۷	۲۳۰۶۱۰
۵	۱	A	۱۲۱۴۸	۴۸۵۹۱۲
۶	۲	A	۳۷۰۷	۱۱۱۲۰۸
		B	۲۰۰۳	۱۰۰۱۶۲
۷	۲	A	۳۹۶۳	۱۲۲۸۶۵
		B	۲۲۰۹	۱۱۰۴۶۸
۸	۲	A	۲۷۲۱	۹۵۲۱۸
		B	۱۳۸۷	۷۶۲۹۵
۹	۲	A	۳۱۲۸	۱۰۹۴۹۱
		B	۱۸۹۸	۴۹۹۰۷
۱۰	۲	A	۳۸۶۵	۲۱۲۶۰
		B	۳۸۶۵	۲۱۲۶۰
۱۱	۲	A	۳۴۴۰	۱۵۴۸۰۷
		B	۳۴۴۰	۱۵۴۸۰۷
۱۲	۲	A	۴۰۱۶	۱۵۰۶۴۶
		B	۴۰۱۶	۱۵۰۶۴۶
۱۳	۲	A	۴۳۶۵	۱۵۲۷۶۳
		B	۴۳۶۵	۱۵۲۷۶۳
۱۴	۲	A	۱۰۳۴۴	۴۷۵۸۴۱
		B	۱۰۳۴۴	۴۷۵۸۴۱
۱۵	۲	A	۹۰۹۶	۳۴۱۱۲۲
		B	۹۰۹۶	۳۴۱۱۲۲

همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، حالت ۲ نسبت به حالت ۱ مقدار  $k$  و  $P_y$  بزرگ‌تری به دست می‌دهد. به نحوی که برای حالت ۱،  $k = 3994 N/mm$  و  $P_y = 79877 N$  و برای حالت ۲،  $k = 4685 N/mm$  و  $P_y = 93697 N$  است. قابل ذکر است، در حالت ۱، سقف دارای سه تیر فرعی با طول ۶ متر است و در حالت ۲، سقف دارای چهار تیر فرعی با طول ۵ متر است. لذا،

- 33-44, Elsevier.
- Gerasimidis S, Sideri J, "A new partial-distributed damage method for progressive collapse analysis of steel frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 119, 233-45.
- GSA, "Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects", Washington, DC. 2016.
- Hadjioannou, Michalis, Sean Donahue, Eric B Williamson, Michael D Engelhardt, "Large-scale experimental tests of composite steel floor systems subjected to column loss scenarios", *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144 (2), 4017184.
- IBCS, "Iranian building codes and standards, iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard no.2800, 4th edition", 2013.
- INBC Part 10<sup>th</sup>, "Iranian national building code, part 10<sup>th</sup>, design and construction of steel buildings", 2013.
- INBC Part 21<sup>th</sup>, "Iranian national building code, passive defense, draft 01", 2009.
- INBC Part 21<sup>th</sup>, "Iranian national building code, passive defense, edition 01", 2013.
- INBC Part 21<sup>th</sup>, "Iranian national building code, passive defense, edition 02", 2017.
- INBC Part 6<sup>th</sup>, "Iranian national building code, part 6<sup>th</sup>, design loads for buildings", 2013.
- Johnson, Eric S, Jeffrey E Meissner, Larry A Fahnestock. "Experimental behavior of a half-scale steel concrete composite floor system subjected to column removal scenarios", *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142 (2), 4015133.
- Khandelwal, Kapil, Sherif El-Tawil, "Collapse behavior of steel special moment resisting frame connections", *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133 (5), 646-55.
- Kim, Jinkoo, Dawoon An, "Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2009, 18 (4), 455-65.
- Kim, Jinkoo, Taewan Kim, "Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65 (1), 169-79.
- Kim, Seonwoong, Cheol-Ho Lee, Kyungkoo Lee, "Effects of floor slab on progressive collapse resistance of steel moment frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 110, 182-90.
- Kong DY, Bo Y, Elchalakani M, Kang Chen, Lu-Ming Ren, "Progressive collapse resistance of 3d composite floor system subjected to internal column removal: experiment and numerical simulation", *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172, 106208.
- Li T, Zhongfeng Shang YJ, Chuanqing L, "Research on catenary action of frame structure in progressive collapse with fiber model", In 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation, Atlantis Press, 2015.
- Mahmoudi M, Hazhir Koozani T, Teimoori S Sh, Hashemi, "Stability assessment of steel moment frames against progressive collapse", 2016.
- Mander, John B, Priestley Michael JN, Park R. "Theoretical stress-strain model for confined - با توجه به سختی و مقاومت تسلیم به دست آمده برای عکس العمل سقف‌های کامپوزیت در جهت قائم می‌توان گفت که سختی سقف کامپوزیت در گوشه‌های ساختمان کم‌تر از سختی سقف کامپوزیت در پیرامون ساختمان و سختی سقف کامپوزیت در پیرامون ساختمان کم‌تر از سختی سقف کامپوزیت در ناحیه میانی است.
- در پایان برای افزایش مقاومت در مقابل تخریب پیش‌رونده، پیشنهاد می‌شود اتصالات تیر به تیر و تیر به ستون در مقابل خرابی پیش‌رونده طراحی شده و از اتصالات با ورق‌های کناری برای ایجاد پیوستگی اتصال استفاده شود.
- ### ۶- مراجع
- AISC 360. Specification for Structural Steel Buildings. One East Wacker Drive, Suite 700, Chicago, Illinois 60601-1802: American National Standard, 2016.
- ASCE/SEI 7. "Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16)", In American Society of Civil Engineers, 2016.
- Chen, Chang Hong, Yan Fei Zhu, Yao Ying Huang, and Xu Long, "An evaluation method to predict progressive collapse resistance of steel frame structures", *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 122, 238-50.
- CSI. "Linear and nonlinear static and dynamic analysis and design of three-dimensional structures", Berkeley (CA, USA), Computers and Structures Inc, 2016.
- Dimopoulos, Christoforos A, Fabio Freddi, Theodore L Karavasilis, George Vasdravellis, "Progressive collapse resistance of steel self-centering mrfs including the effects of the composite floor", *Engineering Structures*, 2020, 208, 109923.
- Dimopoulos, Christoforos, Fabio Freddi, Theodore Karavasilis, George Vasdravellis, "3D numerical assessment of the progressive collapse resistance of a seismic-resistant steel building with post-tensioned beam-column connections", In 9<sup>th</sup> Greek National Steel Structures Conference, 2017.
- Ellingwood, Bruce R, Robert Smilowitz, D O Dusenberry, Dat Duthinh, Hai S Lew, Nicholas J Carino, "Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings", NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), 7396, 2007.
- Fema 356, "Fema 356: prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings in rehabilitation requirements", American Society of Civil Engineers Washington, DC, USA, 2000.
- Fu, Qiu Ni, Kang Hai Tan, "Parametric effects on composite floor systems under column removal scenario", *Engineering Structures*, 2019, 187, 161-76.
- Fu, Qiu Ni, Kang Hai Tan, Xu Hong Zhou, Bo Yang. "Three-dimensional composite floor systems under column-removal scenarios", *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144 (10), 4018196.
- Fu, Qiuni, Kang-Hai Tan, "Numerical study on steel-concrete composite floor systems under corner column removal scenario", In *Structures*, 2019, 21,

- concrete." Journal of structural engineering, 1988, 114 (8), 1804-1826.
- Mehdizadeh, Kourosh, Abbas Karamodin, "Evaluation the possibility of the occurrence of progressive collapse in steel moment frames (ordinary, intermediate and special) due to sudden column removal", Journal of Structural and Construction Engineering, 2018, 5 (3), 85-105.
- MPO 360, Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, Office of Deputy for Strategic Supervision Department of Technical Affairs, No. 360 ,First Revision.
- Pirmoz, Akbar, Min Max Liu, "Finite element modeling and capacity analysis of post-tensioned steel frames against progressive collapse", Engineering Structures, 2016, 126, 446-56.
- Ren, Lu-Ming, Bo Yang, Kang Chen, Ya-Juan Sun, De-Yang Kong, "Progressive collapse of 3d composite floor systems with rigid connections under external column removal scenarios", Journal of Structural Engineering, 2020, 146 (11), 4020244.
- Rezvani, Farshad Hashemi, Amir Mohammad Yousefi, and Hamid Reza Ronagh, "Effect of span length on progressive collapse behaviour of steel moment resisting frames", In Structures, 2015, 3, 81-89. Elsevier.
- SIMULIA, "Abaqus/CAE 6.14 User's Manual", Dassault Systèmes Inc. Providence, RI, USA, 2014, 1-1146.
- Song, Brian I, Halil Sezen, "Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building", Engineering Structures, 2013, 56, 664-72.
- Starossek, Uwe, "Progressive collapse of structures: nomenclature and procedures", Structural Engineering International, 2006, 16 (2), 113-17.
- Starossek, Uwe, Progressive Collapse of Structures, 153, thomas telford London, 2018.
- UFC, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Department of Defence, 2009.
- Wang, Junjie, Wei Wang, Yihai Bao, Dawn Lehman, "Full-scale test of a steel moment-resisting frame with composite floor under a penultimate edge column removal scenario", Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162, 105717.
- Wang, Junjie, Wei Wang, Yihai Bao, Dawn Lehman, "Numerical investigation on progressive collapse resistance of steel-concrete composite floor systems", Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 1-15.
- Wang, Junjie, Wei Wang, Dawn Lehman, Charles Roeder. "Effects of different steel-concrete composite slabs on rigid steel beam-column connection under a column removal scenario", Journal of Constructional Steel Research, 2019, 153, 55-70.
- Zhang, Jing-Zhou, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, "Collapse of steel-concrete composite frame under edge-column loss-experiment and its analysis", Engineering Structures, 2020, 209, 109951.
- Zhang, Jing-Zhou, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Wen-Jin Zhang, "Collapse resistance of composite framed-structures considering effects of slab boundary restraints", Journal of Constructional Steel Research, 2019, 158, 171-81.

## EXTENDED ABSTRACT

# Effect of Composite Floors on Progressive Collapse Control in the Steel Moment Frame Structures

Broujerdian Vahid<sup>a,\*</sup>, Ghodrati Amiri Gholamreza<sup>a</sup>, Mohammadi Dehcheshmaeh Esmail<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Structural Engineering Department, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran

<sup>b</sup> Earthquake Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran

Received: 09 June 2017; Accepted: 12 November 2020

### Keywords:

Progressive collapse, Non-linear dynamic analysis, Steel moment frame, Alternate load path method, Composite floor.

## 1. Introduction

According to ASCE 7 (2016), Progressive collapse is described as the distribution of an initial local failure from element to element, resulting finally in the collapse of an entire structure or an extremely large part of it. Now, it has become evident that abnormal loads need to be considered in the design of structures to prevent progressive collapse. Building collapse such as Ronan Point, Alfred P. Murrah, and World Trade Center have shown the catastrophic nature of the progressive collapse, and with an increasing trend towards more terrorist action in the future, it is clear that structural design must include progressive collapse (Starossek, 2018).

## 2. The importance and aim of the research

Generally, progressive collapse triggers by the failure of the main member of the building, such as a column or a bearing wall. This event creates a super load in the members and the connections in the vicinity of the failed one. This super-loading may cause new failures and consecutively, the failure spreads across the entire structure. Composite floors of buildings play a key role in possible structural damages. Composite floors transfer the floor loads to the main structural members. Moreover, as a rigid body and with horizontal movement, composite floors integrate lateral displacements of the floors during earthquakes. Considering progressive collapse, composite floors can steel have an integrating effect and also decrease deformations of stories. At the end of the study, the reaction of composite floors was obtained with bilinear spring elements.

## 2. Methods of Analysis

In order to study the building's structure performance against progressive collapse using the alternative path method in DOD code, there are three analyses (LS, NS, and ND) to control the behavior of main members such as beams and columns which are destroyed suddenly (GSA, 2016).

### 2.1. Linear static approach

In this method, as the simplest one, to check the member's susceptibility against progressive collapse, to rectify the effects resulting from member geometry and dynamic load in gravity loading of upper members of removed column a factor called  $m_{LIF}$  is applied. Regarding the type of structure, whether steel, concrete, etc.,

\* Corresponding Author

E-mail addresses: broujerdian@iust.ac.ir (Vahid Broujerdian), ghodrati@iust.ac.ir (Gholamreza Ghodrati Amiri), [www.SID.ir](http://www.SID.ir), esmaeil\_mohammadi@civileng.iust.ac.ir (Esmail Mohammadi Dehcheshmaeh).

and also the kind of joints, a factor called magnifying coefficient ( $m$ ) is extracted. It is necessary to mention that  $m_{LIF}$  is the smallest magnifying coefficient ( $m$ ) of elements that are joined to the beam. In the current research, the amount of  $m$  has been taken into account regarding the improved rigid joint. The loading coefficient ( $\Omega$ ) is calculated concerning the  $m_{LIF}$ .

## 2.2. Nonlinear static approach

In Nonlinear Static Method (NS), the factor which resulted from the dynamic loading effect is added to the gravity loading of the removed column's upper members. This coefficient is calculated and extracted based on the defined tables in the code regarding the type of structure and joints.

## 2.3. Nonlinear dynamic approach

In Nonlinear Dynamic Method, to evaluate members, first, the existing interior forces in the nodes of the removed column are calculated. Then the mentioned column is removed from the numerical modeling and analogous reactions in the mentioned node are applied. To calculate displacement and specify the condition of plastic joints of the members' elements, the incoming reactions are removed from the structure in the form of an impact load. It is necessary to mention that the time period of removing the load is a time history algorithm.

## 3. Design against progressive collapse

Design measures for ensuring progressive collapse can be classified into event control, indirect and direct methods (Starossek, 2018).

### 3.1. Event Control method

In this method, for provided objective with a predicted event or removed it or find ways of structure protection against progressive collapse. For example, with the implementation of protective barriers against the impact of vehicles and etc. can protect structure against possible events. Another two following methods are used to provide resistance versus progressive collapse.

### 3.2. Direct method

In this method, explicit consideration of resistance to progressive collapse during the design process through either. Alternate Path Method: A method that allows local failure to occur but seeks to provide alternative load paths so that the damage is absorbed and major collapse is averted.

Specific Local Resistance Method: A method that seeks to provide sufficient strength to resist against failure from accidents or misuse.

### 3.3. Indirect method

In this method, implicit consideration of resistance to progressive collapse during the design process through the provision of minimum levels of strength, continuity, and ductility.

## 4. Description of the structure

The studied structure was of steel moment frame type with intermediate ductility. The usage of steel intermediate moment frame buildings is very common in earthquake-prone areas. However, there are only a few studies on this system and most of the studies are about steel special moment frames (Khandelwal & El-Tawil, 2007; Kim & Kim, 2009). The structure was a 3-story and 4-bay. The height of each story was 3.2 m and the bays were 6 m and 5 m long.

### 4.1. Materials

Steel: Steel is an isotropic material that has good ductility and strength. It generates significant deformation prior to failure. In this paper, steel was considered as an elastoplastic material. The values of steel properties are shown in Table 1.

Concrete: In order to describe the nonlinear damage and the fracture characteristics of the concrete, the HJC constitutive equation, and the damage model were adopted. The axial compressive strength of the concrete is 25 MPa. Other values of the concrete specifications are presented in Table 2.

**Table 1.** Material properties of steel (units: Cm, Kgf, Sec)

$\rho$ (Density)	$E$ (Young's modulus)	$\mu$ (Poisson's ratio)	$F_y$ (Yield stress)	$F_u$ (Ultimate stress)
7.85e-3	2.1e6	0.3	2400	3700

**Table 2.** Material properties of concrete (units: Cm, Kgf, Sec)

$\rho$ (Density)	$E$ (Young's modulus)	$\mu$ (Poisson's ratio)	$f_c'$ (Yield stress)
2.5e-3	2e5	0.15	250

#### 4.2. Loading of structure

The assumed gravity Loads for the design of structures have been presented in Table 3.

**Table 3.** The assumed gravity Load (units: m, Kgf, Sec)

Story	Dead load (uniform)	Live load (uniform)	Dead load of the Surrounding beams
1 & 2	585	200	550
floor	550	150	190

#### 4.3. Structural elements

For this purpose, three steel intermediate moment frame buildings with three stories were designed (INBC Part 6<sup>th</sup>, 2013; INBC Part 10<sup>th</sup>, 2013; IBCS, 2013), modeled, and analyzed using ETABS software. The structural members and the slab members of the three-story model structures are presented in Table 4.

**Table 4.** Dimension of structural members (units: mm)

Story	Columns	Main beams	
		X Direct	Y Direct
1 & 2	BOX 300*300*12	H 300*200*10 *12	H 300*200*8*10
3	BOX 250*250*10	H 300*150*10 *12	H 300*150*8* 12
Girder beams of composite slab		IPE 200	IPE 180

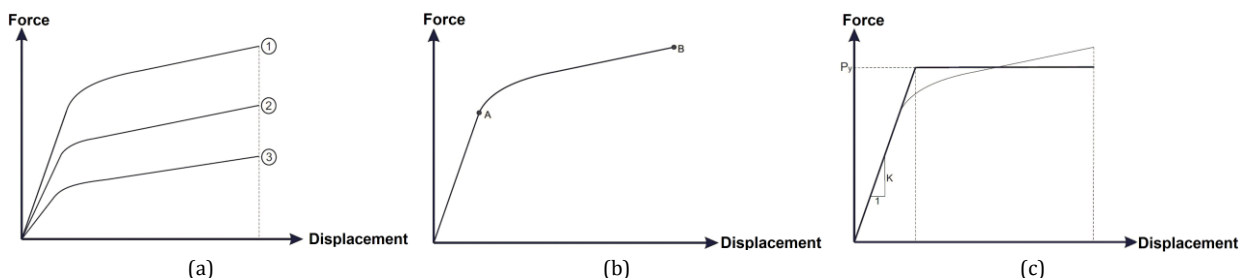
### 5. Load combinations of progressive collapse

According to GSA (2016): In the event of progressive collapse gravity load is applied to the structure. The gravity load on the members is a combination of Dead Load (DL) and Live Load (LL). The load combination for the progressive collapse was assumed as  $DL+0.25LL$ .

### 6. Results and discussion

#### 6.1. Spring of equivalent composite floor

According to Fig. 1-a, in this part to simplify and obtain the equivalent spring of the composite floors; First, the force-displacement curve of the main beams, girder beams, and the deck has been obtained (curve 1), second, the force-displacement curve of the main beams has been obtained (curve 2) and in the third step, the difference between the curves 1 and 2 is obtained that this curve is equivalent to the slab. Curve 3 alone is shown in Fig. 1-b and this curve with a bilinear curve has been replaced (Fig. 1-c).



**Fig. 1.** Force-displacement curves: a) Force-displacement relationship, b) Force-displacement relationship equivalent of slab, c) Idealized to force-displacement relationship equivalent of slab

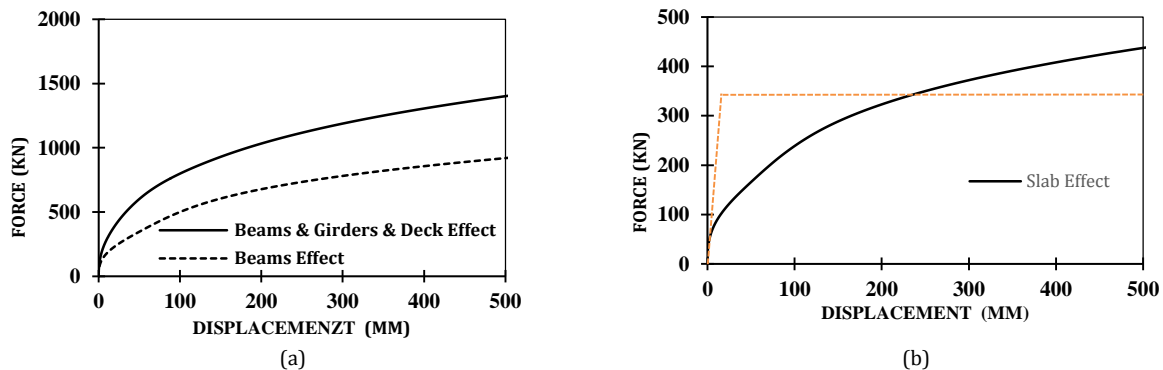


## 6.2. Simulation

Analyzing various scenarios of removing columns in this study. The simulations were done using the finite element method in a three-dimensional macro-modeling approach by ABAQUS software. The fixed end condition of panels is similar to the research of Kong et al. (2020) and Ren et al. (2020). Both non-linearity of geometry and material were considered in the models. In order to simulate composite floors, their equivalent stiffness and resistance in the vertical direction were calculated (Table 6). For example, the curves of scenario 15 are shown in Fig. 2.

**Table 5.** Results of stiffness and resistance equivalent of composite floors

State of Scenario	Number of removed column	Column named	$k$ (N/mm)	$P_y$ (N)
1	1	A	3994	79877
2	1	A	4685	93697
3	1	A	6216	217577
4	1	A	7687	230610
5	1	A	12148	485912
6	2	A	3707	111208
		B	2003	100162
7	2	A	3963	122865
		B	2209	110468
8	2	A	2721	95218
		B	1387	76295
9	2	A	3128	109491
		B	1898	49907
10	2	A	3865	21260
		B	3865	21260
11	2	A	3440	154807
		B	3440	154807
12	2	A	4016	150646
		B	4016	150646
13	2	A	4365	152763
		B	4365	152763
14	2	A	10344	475841
		B	10344	475841
15	2	A	9096	341122
		B	9096	341122



**Fig. 2.** a) Force- displacement relationship for scenario 15, b) Force- displacement relationship equivalent of slab for scenario 15

## 7. Conclusions

It was shown that the hardness of the composite floors in the corner panels is less than the corresponding values in the central and edge panels. Based on the results, to obtain an acceptable estimation of the behavior of the building against the progressive failure, it is necessary to include composite floors in the modeling and analysis.

## 8. References

American Society of Civil Engineers (ASCE 7-10), Minimum design loads for buildings and other structures, New York, 2010.

GSA, "Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major

- modernization projects”, Washington, DC. 2016.
- IBCS, “Iranian building codes and standards, iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard no.2800, 4<sup>th</sup> edition”, 2013.
- NBC Part 10<sup>th</sup>, “Iranian national building code, part 10<sup>th</sup>, design and construction of steel buildings”, 2013.
- INBC Part 6<sup>th</sup>, “Iranian national building code, part 6<sup>th</sup>, design loads for buildings”, 2013.
- Khandelwal, Kapil, Sherif El-Tawil, “Collapse behavior of steel special moment resisting frame connections”, Journal of Structural Engineering, 2007, 133 (5), 646-55.
- Kim, Jinkoo, Taewan Kim, “Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames”, Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65 (1), 169-79.
- Kong DY, Bo Y, Elchalakani M, Kang Chen, Lu-Ming Ren, “Progressive collapse resistance of 3d composite floor system subjected to internal column removal: experiment and numerical simulation”, Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172, 106208.
- Ren, Lu-Ming, Bo Yang, Kang Chen, Ya-Juan Sun, De-Yang Kong, “Progressive collapse of 3d composite floor systems with rigid connections under external column removal scenarios”, Journal of Structural Engineering, 2020, 146 (11), 4020244.
- Starossek, Uwe, Progressive Collapse of Structures, 153, thomas telford London, 2018.