

بررسی تاریخچه خرابی‌های پیشرونده در ساختمان‌های شهری

عباس احمدیان

کارشناسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهقان

چکیده

خرابی‌های پیشرونده در ساختمان‌های شهری یکی از مسائل جدی در مهندسی عمران و معماری است که می‌تواند عواقب وخیمی برای ایمنی و پایداری سازه‌ها به همراه داشته باشد. لذا این پژوهش با بررسی تاریخچه خرابی‌های پیشرونده در ساختمان‌های شهری انجام شد. روش تحقیق کتابخانه‌ای با استفاده از کتب، مقالات و پایان‌نامه‌ها بود. نتایج نشان می‌دهد که با اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه و ارتقاء آگاهی در زمینه خطرات خرابی‌های پیشرونده، می‌توان به بهبود ایمنی و کیفیت زندگی در جوامع شهری کمک کرد.

واژه‌های کلیدی: شهر، خرابی، خرابی‌های پیشرونده، ساختمان

مقدمه

خرابی های پیش‌رونده در ساختمان‌های شهری یکی از چالش‌های مهم در مهندسی عمران و معماری است که می‌تواند عواقب جدی و غیرقابل جبرانی را به همراه داشته باشد. این پدیده به معنای تخریب تدریجی و غیرقابل کنترل سازه‌ها به دلیل عوامل مختلفی نظیر طراحی نادرست، نقص‌های ساختاری، بارگذاری‌های غیرمترقبه و شرایط محیطی است. تاریخچه بررسی خرابی های پیش‌رونده نشان‌دهنده اهمیت این موضوع در حفظ ایمنی و پایداری ساختمان‌ها و همچنین تأثیرات اجتماعی و اقتصادی آن بر جوامع شهری است. از زمان‌های قدیم، انسان‌ها به دنبال ساخت سازه‌هایی بودند که نه تنها زیبا و کارآمد باشند، بلکه ایمنی و پایداری را نیز تضمین کنند. با این حال، وقوع حوادثی نظیر ریزش ساختمان‌ها و خرابی‌های ناگهانی، توجه مهندسان و محققان را به بررسی علل و عوامل مؤثر در این پدیده جلب کرده است. در دهه‌های اخیر، با پیشرفت فناوری و روش‌های تحلیلی، امکان شناسایی و پیش‌بینی خرابی‌های پیش‌رونده بهبود یافته است. این مقاله به بررسی تاریخچه و روند تحولات علمی و عملی در زمینه خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های شهری می‌پردازد.

اهمیت بحث خرابی پیش‌رونده

در بررسی پدیده خرابی پیش‌رونده باید ابتدا عامل بارگذاری غیرعادی و خرابی های جزئی ناشی از آن بررسی گردد و پس از آن با توجه به خرابی های پدید آمده، برخی از توانایی ها سازه از جمله پیوستگی، شکل پذیری و درجه نامعینی سازه برای جلوگیری از گسترش خرابی، مورد بررسی قرار گیرد. پدیده خرابی پیش‌رونده در اکثر نقاط جهان یک پدیده نادر می باشد، با این وجود در صورتی که این پدیده رخ دهد، می تواند نتایج بسیار ناگواری از خود بجای بگذارد. با توجه به افزایش حملات تروریستی به ساختمان های مهم در سال های اخیر، مطالعه و بررسی دقیق تر این بحث ضروری به نظر می رسد.

تاریخچه خرابی پیش‌رونده

در سال های اخیر بحث خرابی پیش‌رونده مورد توجه قرار گرفته است و محققین مطالعات بسیاری در این رابطه انجام داده اند که در ادامه برخی از کارهای انجام شده مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

یکی از اولین تحقیقاتی که در زمینه خرابی پیش‌رونده انجام شد توسط ویلیامسون^۱ و کاواکوچی^۲ [۱] در سال ۲۰۰۳ میلادی بود. آن ها با استفاده از یک مدل دو بعدی به مقایسه دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی در بحث خرابی پیش‌رونده پرداختند و به این نتیجه رسید که در تحلیل استاتیکی چون اثرات دینامیکی ناشی از حذف ستون دیده نمی شود، جواب ها دست پایین می باشند. البته باید به این نکته توجه داشت که در زمان انجام تحقیقات آن‌ها هنوز آیین نامه ای در زمینه خرابی پیش‌رونده تدوین نشده بود چرا که در آیین نامه های خرابی پیش‌رونده که پس از آن تدوین شدند، در تحلیل‌های استاتیکی برای لحاظ کردن تقریبی اثرات دینامیکی ناشی از حذف ستون از ضرایب افزایش بار استفاده شد.

پاول^۳ [۲] در سال ۲۰۰۵ میلادی با استفاده از یک مدل دو بعدی به مقایسه تحلیل های استاتیکی و دینامیکی پرداخت و به این نتیجه رسید که ضریب افزایش بار ۲ در تحلیل های استاتیکی، منجر به نتایج محافظه کارانه می‌شود و بهتر است که برای تحلیل خرابی پیش‌رونده از تحلیل دینامیکی غیر خطی استفاده گردد.

^۱ - Williamson

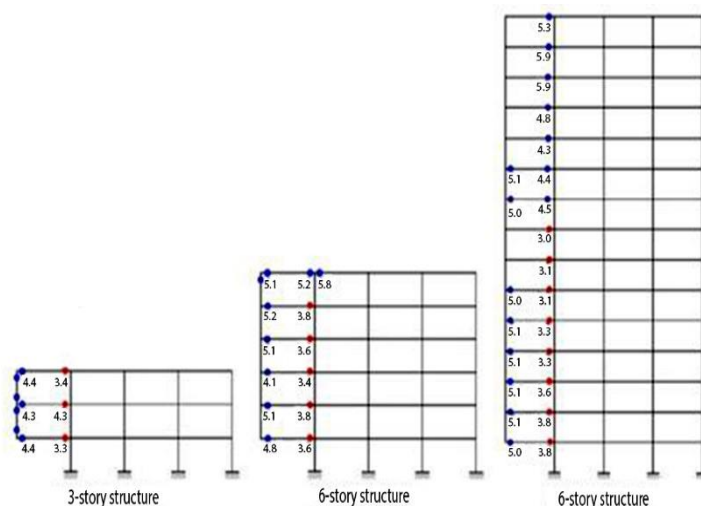
^۲ - Kaewakulchai

^۳ - Poweel et a

روت^۴ و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۶ با ادامه کار پاول به این نتیجه رسیدند که استفاده از ضریب افزایش بار ۱/۵ بجای ۲ به خصوص در سازه های قاب خمشی منجر به جواب های دقیق تری می شود.

تسای و لین^۵ در سال ۲۰۰۸ [۴] با بررسی تحلیل های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بر روی یک سازه بتنی قاب خمشی به این نتیجه رسیدند که در صورتی که برای تحلیل های استاتیکی غیر خطی از ضریب افزایش بار^۲ استفاده گردد، نتایج در مقایسه با نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی بسیار محافظه کارانه می شود.

آقایان جینکو کیم و تائیوان کیم^۶ [۵] در سال ۲۰۰۸ به ارزیابی پتانسیل خرابی پیش رونده خمشی فولادی که بر اساس آیین نامه طراحی سازه های فولادی کره و به روش LRFD طراحی شده بود، پرداختند. در این مطالعه علاوه بر مقایسه نتایج تحلیل خطی و غیر خطی اثر پارامترهایی مانند محل حذف ستون و تعداد طبقات نیز بررسی شد. مدل های مورد بررسی در این مطالعه قاب های سه، شش و پانزده طبقه بودند و لازم به ذکر است که تمامی مدل های به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار گرفتند. مدل های مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده اند. آن ها در تحقیق خود برای بررسی پدیده پیش رونده از روش مسیرهای جایگزین^۷ استفاده کردند. در این روش سازه طوری طراحی می گردد که اگر یک عضو از سازه خراب گردد، مسیرهای دیگر برای انتقال بار وجود دارند که به واسطه آنها خرابی در کل سازه رخ نخواهد داد. برای بررسی پدیده خرابی پیش رونده از معیارهای دو آیین نامه GSA2003 و UFC2005 استفاده شده است و در نهایت نتایج با یکدیگر مقایسه شده اند. پس از تحلیل مشاهده شد که قاب های که تنها برای بارهای ثقلی و جانبی طراحی می شوند، لزوماً در مقابل پدیده خرابی پیش رونده مقاوم نیستند. همچنین مشاهده شد که پتانسیل خرابی پیش رونده هنگامی که ستون های گوشه سازه حذف شوند، افزایش می یابد. از طرف دیگر مشاهده شد که با افزایش تعداد طبقات پتانسیل خرابی پیش رونده در سازه کاهش می یابد. لازم به ذکر است که در این تحقیق کلیه اتصالات به صورت کاملاً صلب در نظر گرفته شد.



شکل (۱): مدل های مورد بررسی توسط آقایان جینکو کیم و تائیوان کیم

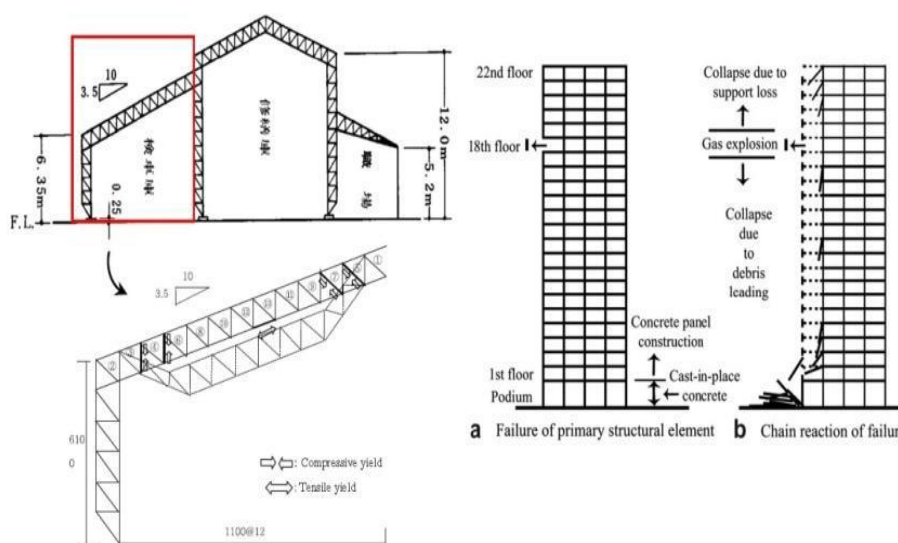
^۴- Ruth et al

^۵- Meng- Hao Tsai & Bing- Hui Lin

^۶- Jinkoo Kim & Teawan Kim

^۷- Altenate path Method

جاهوگو دونگ کوک^۸ در سال ۲۰۰۹ [۶] دو سازه را که در اثر خرابی پیش رونده دچار واژگونی شده بودند را بررسی نظری کردند و نتایج خود را با نتایج واقعی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایجشان تا حد زیادی با واقعیت هماهنگی داشت. اولین سازه مورد بررسی مربوط به ساختمان خط راه آهن در کره بود که علت خرابی اولیه آن بار برف بود و دومین سازه نیز مربوط به ساختمان رونان پوینت واقع در لندن انگلیس می باشد. انفجار گاز در نزدیکی یکی از گوشه های ساختمان گزارش شد. ایشان پس از مقایسه نتایج واقعی و نتایج نظری که تا حد زیادی با هم انطباق داشت، راهکارهایی برای جلوگیری از خرابی پیش رونده در آن سازه ها پیشنهاد دادند. در شکل (۲) نمایی از این دو سازه نشان داده شده است.

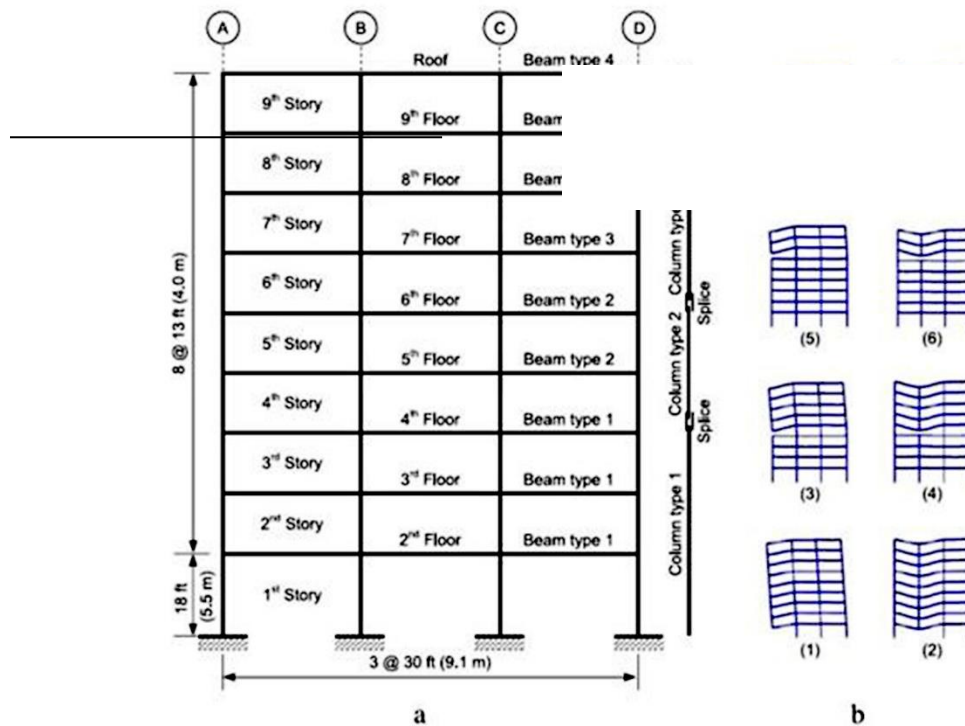


شکل (۲) مدل های مورد بررسی توسط جاهوگو و دونگ کوک

در سال ۲۰۱۰ آقای مین لیو^۹ [۷] به طراحی بهینه سازی شده یک قاب خمشی فولادی پرداخت به طوری که این قاب علاوه بر نیروهای جانبی در برابر خرابی پیش رونده نیز مقاوم سازی شده بود. ایشان در تحقیق خود پتانسیل خرابی پیش رونده را توسط روش مسیره های جایگزین و معیارهای آیین نامه UFC تعیین کردند و در تحلیل قاب از سه روش تحلیل استاتیکی خطی، استاتیکی غیر خطی استفاده شد. طراحی بهینه نیز بر اساس به حداقل رساندن وزن فولاد مصرفی انجام شد. در این تحقیق مشاهده شد که طراحی بهینه بر اساس روش سنتی به حداقل رساندن وزن فولاد، که بحث خرابی پیش رونده را در نظر نمی گیرد، نمی تواند معیارهای آیین نامه UFC را برای بحث خرابی پیشرونده تأمین کند. قابی که ایشان از آن استفاده کردند و محل ستون هایی که در هر مرحله از قاب حذف شد، در شکل (۳) نشان داده شده است. ایشان برای بررسی پدیده خرابی پیشرونده همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود، ۸ حالت مختلف حذف ستون را بررسی کردند که طراحی بهینه بر اساس روش استاتیکی خطی بدست بالاترین و سنگین ترین طراحی در برابر خرابی پیشرونده می باشد، در مقابل روش های تحلیل استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی به طراحی های اقتصادی ترین که بحث خرابی پیشرونده را نیز در برمی گیرد، منجر می شود اما در مقابل در این تحلیل ها مدل سازی و تحلیل های کامپیوتری وقت گیرتر می باشد.

^۸ - Jae Hyouk & Dong Kuk chang

^۹ - Min Liu



شکل (۳) مدل مورد بررسی شده توسط مین لیو

باید به این نکته اشاره کرد که روش تحلیلی ایشان بر چندین فرض استوار است که عبارتند از:

۱. فونداسیون سازه می تواند خود را با هرگونه حذف ستون و بازتوزیع بارها مطابقت دهد.
 ۲. استفاده از مدل تحلیل دو بعدی می تواند به طور مناسبی رفتار بار توزیعی بار را در مدل اصلی سازه پیش بینی کند
- نتایج بدست آمده از این تحقیق را می توان به صورت زیر درآورد:
۱. استفاده از روش سنتی بهینه سازی، معیارهای آیین نامه UFC را برای مقابله در برابر خرابی پیشرونده ارضاء نمی کند. بعلاوه با توجه به مقاومت های اضافه ای که در سازه برای کنترل دریافت داریم، بازهم توانایی سازه برای مقاومت در برابر خرابی پیشرونده کافی نیست.
 ۲. با استفاده از روش های بهینه سازی طراحی در برابر خرابی پیشرونده در این مقاله، علاوه براینکه یک قاب خمشی متوسط مقاوم در برابر زلزله طراحی کردند، بلکه معیارهای خرابی پیشرونده را نیز درنظرمی گیرد و این طرح بهینه از نظروزن فولاد و اقتصادی بسیار مناسب می باشد.
 ۳. استفاده از روش استاتیکی خطی منجر به محافظه کارانه ترین طرح می باشد و این روش معیارهای خرابی پیشرونده در روش های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی را نیز برآورده می کند. وزن فولاد بدست آمده از این روش تحلیل، سنگین تر می باشد. در افزایش وزن فولاد ناشی از روش های مختلف طراحی در برابر خرابی پیشرونده نسبت به حالتی که قاب در مقابل زلزله طراحی شده باشد در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) مقایسه وزن اسکلت سازه در مدل آقای مین لیو

تحلیل دینامیکی غیر خطی	تحلیل استاتیکی غیر خطی	تحلیل استاتیکی خطی	روش تحلیلی برای درحلتی که بحث خرابی پیشرونده در نظر گرفته شد
۸٪. ۲	۱۳٪. ۲	۳۸٪. ۸	درصد افزایش وزن فولاد سازه نسبت به حالتی که بحث خرابی پیشرونده در نظر گرفته نشود

۴. تمامی خرابی تیرها در این مقاله، که بر اساس روش مسیر جایگزین در آیین نامه UFC اندازه گیری شد، ناشی از ظرفیت پلاستیک ناکافی در اتصالات تیر به ستون بود. از آنجایی که اتصالات استفاده شده در مقاله حاضر از نوع WUF بوده است، افزایش ظرفیت چرخش پلاستیک اتصالات به ناچار، افزایش ابعاد تیر را به همراه خواهد داشت. این امر نشانگر این مهم می باشد که برای مقاصد علمی و کاربردی می توان با در نظر گرفتن انواع دیگر اتصالات که ظرفیت چرخش بالاتر دارند، به طراحی بهینه تری دست یافتند.

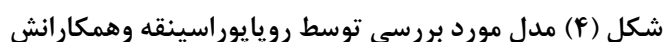
در سال ۲۰۱۰ آقای روپاسینگه^{۱۰} و همکارانش [۸] خرابی پیشرونده در یک ساختمان فلزی سه بعدی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها برای بررسی این پدیده از نرم افزار SAP2000 و سه روش تحلیل استاتیکی خطی، استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی استفاده کردند. یک قاب از این سازه در شکل (۴) نشان داده شده است.

آن ها برای تحلیل های غیر خطی، مشخصات مفاصل پلاستیک و مصالح را از آیین نامه FEMA356 برداشت کردند. آن ها برای تحلیل فرض های زیر در نظر گرفتند:

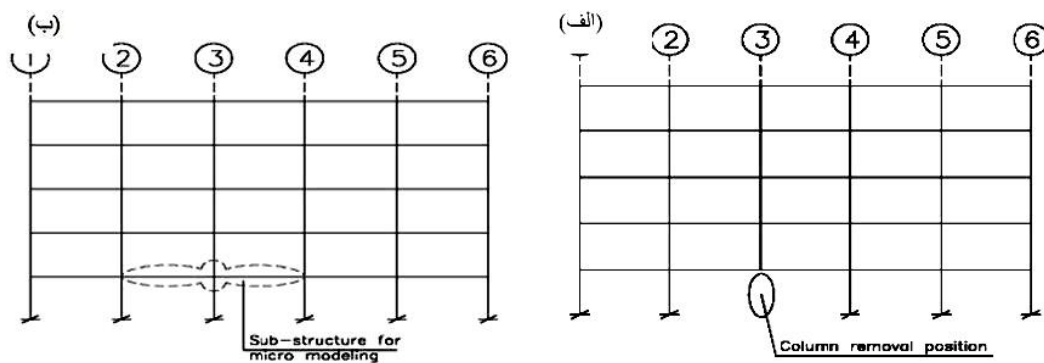
۱. برای روش های خطی، اتصالات خمشی تیر به ستون ظرفیت بیشتری نسبت به اعضا دارند و می توانند پیوستگی خود را در انتقال بار بعد از حذف ستون حفظ کنند.

۲. برای روش های غیر خطی، مفاصل غیر خطی کاهنده مقاومت مربوط به اتصالات قبل از زلزله نورتریج فرض شده اند.

¹⁰- Rupa Purasinghe

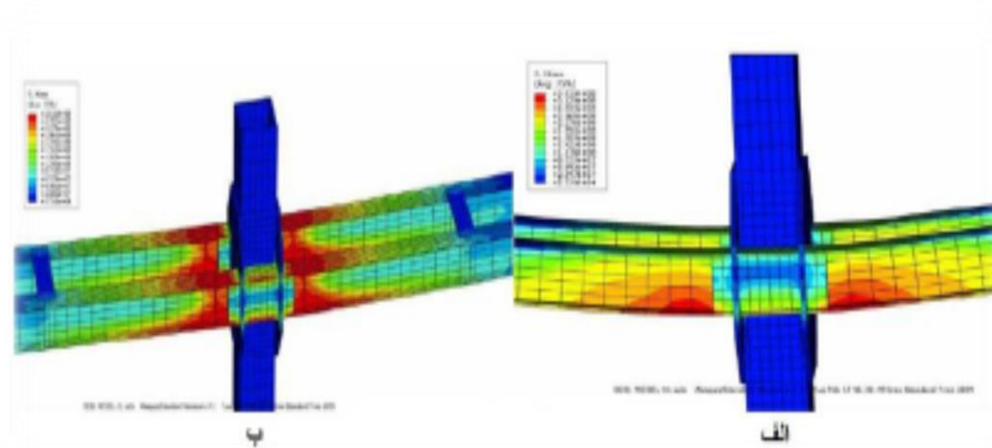


ایشان برای بررسی خرابی پیشرونده در قاب موردنظرشان که یک قاب پنج طبقه می باشد، از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده کردند. مدل سازی کلی سازه در نرم افزار SAP2000 انجام شد و همچنین دلیل لزوم مدل سازی اتصالات در ارزیابی سازه در برابر خرابی پیشرونده، مدل سازی زیر سازه مناسب به روش اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام گرفت. در شکل (۵) قاب مورد بررسی در نرم افزار SAP2000 و همچنین زیرسازه مدل شده در نرم افزار ABAQUS نشان داده شده است. در نرم افزار ABAQUS برای مدل سازی زیر سازه مورد نظر از المان (solid (C3D8R استفاده شده است.



شکل (۵) مدل مورد بررسی توسط میرقادری و فهمی

با توجه به مدل سازی های ماکرو انجام شده، از آنجایی که قاب های خورجینی دارای شکل پذیری بالاتری نسبت به قاب های خمشی متعارف هستند و همچنین پیوستگی رفتار سازه با توجه به پیوسته بودن تیرها در قاب های خورجینی بیشتر می باشد، عملکرد مناسب تری از این قاب ها در برابر خرابی پیشرونده مشاهده می شود. در بررسی ناحیه اتصال در نرم افزار اجزاء محدودی ABAQUS رفتار اتصال تحت خمش و نیروی محوری بررسی شده است. با توجه به مدل سازی انجام شده از زیرسازه انتخاب شده ایجاد نیروی محوری بعد از تشکیل مفصل پلاستیک مشاهده می شود. نیروی محوری ایجاد شده باعث ایجاد توزیع تنش نامتقارن در ناحیه مفصل پلاستیک می شود. با بررسی تنش های ایجاد شده در ناحیه اتصال وضعیت تنش درستون مناسب بوده و این مدل تشکیل مفصل پلاستیک پایدار را در تیرهای قاب خورجینی تأمین می کند. (شکل ۶)



شکل (۶) الف) وضعیت تنش هنگام اعمال ۲۵٪ تغییر مکان هدف

ب) وضعیت تنش هنگام اعمال ۱۰۰٪ تغییر مکان هدف

علل و پیامدهای خرابی های پیش‌رونده در ساختمان‌های شهری

علل و پیامدهای خرابی های پیش‌رونده در ساختمان‌های شهری به شرح زیر است:

علل خرابی های پیش‌رونده:

۱. **طراحی نادرست:** طراحی‌های غیرمناسب و عدم رعایت استانداردهای مهندسی می‌تواند منجر به ضعف‌های ساختاری و آسیب‌پذیری ساختمان‌ها شود.
۲. **نقص‌های ساختاری:** وجود نقص‌های فنی در ساخت و ساز، مانند استفاده از مصالح بی‌کیفیت یا اجرای نادرست جزئیات، می‌تواند به خرابی پیش‌رونده منجر شود.
۳. **بارگذاری‌های غیرمترقبه:** بارهای ناگهانی مانند زلزله، طوفان یا باران‌های شدید می‌توانند فشار اضافی به سازه‌ها وارد کنند و موجب خرابی شوند.
۴. **شرایط محیطی:** عوامل محیطی مانند تغییرات دما، رطوبت و آلودگی می‌توانند به تدریج به مصالح آسیب برسانند و موجب خرابی پیش‌رونده شوند.
۵. **عدم نگهداری مناسب:** عدم انجام بازرسی‌ها و نگهداری‌های منظم می‌تواند به شناسایی دیر هنگام مشکلات و نواقص منجر شود.
۶. **تغییرات در کاربری ساختمان:** تغییر در کاربری ساختمان و افزایش بارهای وارده به سازه، بدون انجام اصلاحات لازم، می‌تواند به خرابی پیش‌رونده منجر شود.

پیامدهای خرابی های پیش‌رونده:

۱. **خسارات مالی:** خرابی پیش‌رونده می‌تواند منجر به هزینه‌های بالای تعمیر و بازسازی، و همچنین کاهش ارزش ملک شود.
 ۲. **تهدید ایمنی:** این نوع خرابی می‌تواند جان افراد را به خطر بیندازد و موجب حوادث ناگوار شود.
 ۳. **تأثیرات اجتماعی:** خرابی ساختمان‌ها می‌تواند به جابجایی ساکنان، از دست رفتن محل‌های کار و کاهش کیفیت زندگی در جوامع منجر شود.
 ۴. **آسیب به زیرساخت‌ها:** خرابی پیش‌رونده می‌تواند به زیرساخت‌های شهری آسیب بزند و موجب اختلال در خدمات عمومی مانند آب، برق و حمل و نقل شود.
 ۵. **تأثیرات زیست‌محیطی:** تخریب ساختمان‌ها می‌تواند به آلودگی محیط زیست و ایجاد زباله‌های ساختمانی منجر شود.
 ۶. **کاهش اعتماد عمومی:** وقوع خرابی‌های پیش‌رونده می‌تواند به کاهش اعتماد عمومی به سازندگان و مهندسان و همچنین به سیستم‌های نظارتی منجر شود.
- با توجه به این علل و پیامدها، ضروری است که اقدامات پیشگیرانه و مدیریتی به منظور کاهش خطرات خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های شهری انجام شود [۱۰].

راهکارهای پیشگیری از خرابی های پیشرونده در ساختمان های شهری

برای پیشگیری از خرابی های پیشرونده در ساختمان های شهری، می توان از راهکارهای زیر استفاده کرد:

۱. **طراحی مناسب و دقیق:** استفاده از طراحی های مهندسی دقیق و مطابق با استانداردهای روز می تواند به کاهش احتمال خرابی پیشرونده کمک کند. این شامل تحلیل های ساختاری و بارگذاری های دقیق است.
 ۲. **استفاده از مصالح با کیفیت:** انتخاب مصالح با کیفیت و مناسب برای ساخت و ساز، به ویژه در مناطق با شرایط جوی خاص، می تواند به افزایش پایداری و مقاومت ساختمان ها کمک کند.
 ۳. **بررسی و ارزیابی مستمر:** انجام بازرسی های دوره ای و ارزیابی های مستمر از وضعیت ساختمان ها به شناسایی زودهنگام مشکلات و نواقص کمک می کند. این ارزیابی ها باید شامل بررسی های ساختاری و محیطی باشد.
 ۴. **مدیریت بارگذاری:** طراحی سیستم های بارگذاری مناسب و مدیریت بارهای وارده به ساختمان ها، به ویژه در برابر زلزله و سایر بارهای دینامیکی، می تواند از خرابی های پیشرونده جلوگیری کند.
 ۵. **آموزش و آگاهی رسانی:** آموزش مهندسان، معماران و پیمانکاران در زمینه خطرات خرابی پیشرونده و روش های پیشگیری از آن، می تواند به بهبود کیفیت ساخت و ساز کمک کند.
 ۶. **استفاده از فناوری های نوین:** به کارگیری فناوری های نوین مانند مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و تحلیل های پیشرفته می تواند به شبیه سازی رفتار سازه ها و شناسایی نقاط ضعف کمک کند.
 ۷. **توسعه برنامه های نگهداری:** تدوین و اجرای برنامه های نگهداری منظم و پیشگیرانه برای ساختمان ها، به ویژه در مناطق با خطر بالای خرابی، می تواند به حفظ ایمنی و پایداری سازه ها کمک کند.
 ۸. **مشارکت جامعه:** ایجاد بسترهای مناسب برای مشارکت شهروندان در نظارت و گزارش مشکلات ساختمانی می تواند به شناسایی زودهنگام نواقص و خطرات کمک کند.
 ۹. **توسعه استانداردها و مقررات:** تدوین و اجرای استانداردها و مقررات سخت گیرانه در زمینه ساخت و ساز و نگهداری ساختمان ها، می تواند به کاهش خطر خرابی پیشرونده کمک کند.
- با اجرای این راهکارها، می توان به بهبود ایمنی و پایداری ساختمان های شهری و کاهش خطر خرابی پیشرونده دست یافت.

منابع و مأخذ

- [1] Kaewkulchai, G., & Williamsin, EB. (2003). Dynamic behavior of planar frames during progressive collapse. In: 16 th ASCE engineering mechanics conference.
- [2] Powell, G., (2005). Progressive collapse; Case study using nonlinear analysis In: Proceedings of the 2005 structures congress and the 2005 forensic engineering symposium.
- [3] Ruth, P., Marchand, K., & Wiliamson, EB. (2006). Static equivalency in progressive collapse alternative path analysis: Reducing conservatism while retaining structural integrity, performance of constructed Facilitities. 20 (4), pp.349-364.
- [4] Meng, H., & Bing, H. (2008). Investigation of progressive collapse resistance and inelastic response for an earthquake-resistant RC building subjected to column failure, Engineering Stures (Elsevier), Vol.30, pp. 349-364.
- [5] Jinkoo, K., & Taewan, K. (2009). Assessment of progressive collapse – resisting capacity of steel moment frames, Journal of Constructional Steel Research (Elsevier), vol.65, pp. 169-179.
- [6] Jae- hyoung, Ch., & Dong -kuk, Ch. (2009). Prevention of progressive collapse for building structures to member disappearance by accidental actions, Loss prevention in the process Industries, vol.22, pp. 1016-1019.
- [7] Min, L. (2010). Progressive collapse design of seismic steel frames using structural optimization. Journal of Constructional Steel Research (Elsevier), Vol.67, pp.322-332.
- [8] Purasinghe, R., (2010). Cuong Nguyen and Kenneth Gebhart. Progressive collapse analysis of a steel building with pre- northridge moment connections, The Structural Design of Tall and Special Buildings (wileyonlinelibrary.com). vol.21, pp.465-474.
- [۹] میرقادر، س. ر. و فهمی، ف. (۱۳۸۹) بررسی گسیختگی تدریجی سازه با اتصال خورجینی بر اثر حذف یک ستون در ناحیه تحتانی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران.
- [۱۰] بشیری، محمدرضا، ضیایی، مسعود، ساعدی داریان، امیر، بهرام پور، حسام الدین (۱۳۸۹) خرابی پیشرونده تئوری و کاربرد، انتشارات انگیزه.