

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال دوازدهم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۰، (سابقه ۴۷): صص ۱۰-۱

علمی-پژوهشی

ارزیابی خرابی پیش‌رونده در سازه‌ی فضا کار با سناریوی حذف هم‌زمان ستون و مهاربند (نمونه موردی: سازه تونل توفان عمودی)

رامتین رضاخانی^۱، شاهرخ رضایی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

چکیده

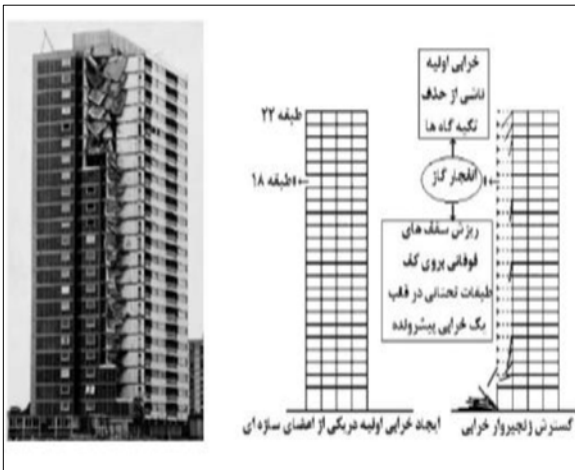
خرابی پیش‌رونده در سازه به صورت گسترش خرابی موضعی اولیه از عضوی به عضو دیگر که سرانجام به گسیختگی تمام سازه و یا قسمت بزرگی از آن می‌انجامد، تعریف می‌شود. خطرات احتمالی که می‌تواند موجب خرابی پیش‌رونده شود شامل آتش‌سوزی، انفجار و زلزله و غیره می‌باشد. در سازه و کار خرابی پیش‌رونده یک خرابی و گسیختگی جزئی مانند حذف یک ستون باعث یک خرابی کلی و قابل‌ملاحظه می‌شود که به فروپاشی سازه منجر خواهد شد. پژوهش‌ها درباره خرابی پیش‌رونده سازه‌ها معمولاً روی بارگذاری‌های ثقلی و انفجاری متمرکز می‌شوند که در آن هدف طراحی افزایش تاب‌آوری سازه‌ها برای جلوگیری از بروز خرابی پیش‌رونده می‌باشد. هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی خرابی پیش‌رونده در سازه‌ی مهاربندی‌شده با سناریو حذف هم‌زمان ستون و مهاربند است. در این تحقیق یک تیپ سازه فضا کار و نگه‌دارنده سازه‌ی اصلی تونل باد در نظر گرفته شد. سازه فولادی بلند طبقه با سیستم سازه ترکیبی مهاربندی‌شده که به بررسی حالات مختلف سناریوی خرابی پرداخته شده است. مدل‌های موردنظر ابتدا در نرم‌افزار Etabs طراحی شده و خروجی آن‌ها در نرم‌افزار SAP2000 وارد شده و تحلیل استاتیکی غیرخطی یا پوش‌آور بر روی آن مدل‌ها انجام شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد به دلیل عدم مهاربند در اثر انفجار فقط در اعضای نزدیک به المان‌های حذف‌شده افزایش برش مشاهده می‌شود. میزان جابجایی سازه در تحلیل استاتیکی معادل با حذف یک ستون و مهاربند بیشتر از حالت قبل است. همچنین با حذف هم‌زمان ستون و مهاربند احتمال رخ دادن خرابی پیش‌رونده در قاب‌هایی که به فاصله نزدیک به قسمتی که سناریوی خرابی بر آن اعمال شده، بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: خرابی پیش‌رونده، سازه‌های مهاربندی‌شده، حذف هم‌زمان ستون و مهاربند، سازه نگه‌دارنده تونل باد

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات قشم، قشم.

۲- استادیار، سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نزاجا ایران- نویسنده مسئول (shahrokh.rezaei@gmail.com)

طراحی و امنیت ساختمان‌های جدید می‌باشد. در روش مسیر جایگزین، سازه به گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند اثر خرابی موضعی پیش‌آمده را جذب کرده و مسیر جدیدی برای انتقال بارها به وجود آورد.



شکل (۱): ساختمان رونان پوینت و ساز و کار خرابی پیش‌رونده این سازه [۳]

۱-۱- مطالعات پیشین

بحث خرابی پیش‌رونده از دهه ۱۹۷۰ میلادی به دنبال رخداد حادثه‌ی ساختمان رونان پوینت در سال ۱۹۶۸ در انگلستان که در شکل (۱) نشان داده شده است، شروع شد. این ساختمان یک ساختمان ۲۲ طبقه متشکل از قطعات پیش‌ساخته‌ی کف و دیوارهای غیرمسلح باربر بود که در اثر انفجار گاز در یک گوشه‌ی طبقه‌ای هجدهم آن دیوار باربر جلویی ساختمان در این طبقه منهدم شد و در نتیجه تکیه‌گاه طبقات بالایی حذف و به علت عدم وجود پیوستگی در بین اعضای باربر، این طبقات به روی طبقات زیرین افتادند و موجب خرابی مطابق شکل (۱) شدند. نحوه تخریب بخش بزرگی از ساختمان رونان پوینت در سال ۱۹۶۸ توجه محققین را به این پدیده نادر معطوف ساخت. همچنین فروریزش کامل برج‌های دوقلوی تجارت جهانی در سال ۲۰۰۱ بر اثر حمله تروریستی از نمونه‌های بارز خرابی پیش‌رونده هستند. ریزش ساختمان مسکونی هفت طبقه در سعادت‌آباد تهران در سال ۱۳۸۷ و ساختمان تجاری پلاسکو در زمستان سال ۱۳۹۵ از نمونه‌های خرابی پیش‌رونده در ایران هستند [۴].

در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه بررسی رفتار، شبیه‌سازی، مقاوم‌سازی و مطالعاتی از این دست در زمینه خرابی‌های پیش‌رونده و عوامل ایجادکننده آن مانند انفجار و برخورد و حذف المان‌های اصلی سازه‌ای صورت گرفته است. رفتار سازه‌های بلندمرتبه با سناریوی حذف دو ستون توسط رهنورد و

۱- مقدمه

وقوع حوادث مختلفی از قبیل انفجار، آتش‌سوزی، برخورد وسایل نقلیه، اضافه‌بار تصادفی، ضربه، خطا در محاسبات یا ساخت می‌تواند منجر به خرابی کل سازه و یا بخش بزرگی از آن شود. این پدیده را خرابی پیش‌رونده^۱ می‌نامند. خرابی پیش‌رونده با توجه به تعریف موسسه ملی استاندارد و فناوری عبارت است از انتشار آسیب اولیه ناشی از یک واقعه آغازگر از یک عضو به عضو دیگر که می‌تواند منجر به فروریزش کل سازه یا بخش بسیار بزرگی از آن شود [۱]. همچنین بر اساس آیین‌نامه بارگذاری آمریکا خرابی پیش‌رونده به صورت گسترش یک خرابی موضعی اولیه از یک عضو به عضو دیگر و در نتیجه تخریب کلی سازه و یا تخریب نامتناسب قسمت بزرگی از آن تعریف می‌شود [۲].

خرابی پیش‌رونده با حالت مختلفی به وقوع می‌پیوندد که عبارت‌اند از پنکیکی، زپیی شکل، دومینویی یا زنجیره‌ای، مقطعی، ناپایداری و حالات ترکیبی می‌باشند. انجمن مهندسی عمران آمریکا دو راه کلی طراحی مستقیم و طراحی غیرمستقیم را برای کاهش امکان تخریب پیش‌رونده و مقابله با آن تعریف می‌کند. در راه طراحی مستقیم به مقاومت در برابر تخریب پیش‌رونده در طول مراحل طراحی توجه می‌شود. مقاومت در برابر تخریب پیش‌رونده در طول مراحل طراحی با استفاده از روش‌های Alternate Load Path و ELR تأمین می‌شود. در روش طراحی غیرمستقیم، مقاومت در برابر تخریب پیش‌رونده با ایجاد حداقل سطحی از مقاومت، پیوستگی و شکل‌پذیری تأمین می‌شود که از جمله این روش‌ها، روش Tie Force است.

بررسی خرابی پیش‌رونده امروزه یکی از موضوعات مهم و در خط مقدم تحقیقات محققان است. در شکل (۱) ساختمان رونان پوینت پس از تخریب نشان داده شده است. این یک نمونه از گسیختگی پیش‌رونده است که از دست دادن عضو باربر منجر به خرابی کلی سازه شده است. برنامه‌ریزی و طراحی یک ساختمان جدید، با توجه به اندازه‌گیری‌ها برای تعدیل اثرات حملات تروریستی بر روی ساختمان‌ها می‌تواند باعث شود ساختمانی متفاوت از ساختمانی که بدون توجه به این مسائل ساخته شده است، ساخته شود. همچنین بسیاری از اندازه‌گیری‌های تعدیل نسبتاً ارزان هستند و اگر در مراحل اولیه پروسه طراحی در نظر گرفته شوند، به راحتی قابل اجرا می‌باشند. بنابراین لازم است در ساختمان‌های جدید این اندازه‌گیری‌ها در مرحله برنامه‌ریزی در نظر گرفته شوند نه آنکه پس از ساخت ساختمان به آن توجه شود. این بخش توجهات مختلفی که برای ساخت ساختمان‌های جدید لازم است را توضیح می‌دهد که شامل: برنامه‌ریزی، آنالیز،

¹ Progressive Collapse

سه‌بعدی فولادی دریافت که ستون‌های مجاور ستون حذف‌شده باید برای بارمحوری معادل دو برابر بار طراحی خود طرح شوند. در ژوئن ۲۰۰۳، مرکز مدیریت ساختمان‌های دولتی ایالات متحده (GSA) دستورالعملی را برای کنترل ساختمان‌های دولتی امریکا در برابر خرابی پیش‌رونده ارائه کرد، [۱۲] و در پی آن در سال ۲۰۰۵، دپارتمان دفاعی ایالت متحده (DOD) آیین‌نامه‌ی خویش را در این خصوص ارائه کرد [۱۳]. خاندلوال و همکاران [۱۴] رونالد همبرگر و همکاران [۱۵] با روش مسیر جایگزین به تجزیه و تحلیل پتانسیل فروپاشی تدریجی قاب خمشی فولادی، با تحلیل دینامیکی غیرخطی در حالت‌های مختلف پرداختند. روش‌های تحلیلی ارزیابی خرابی پیش‌رونده عبارت‌اند از: روش استاتیکی خطی، روش استاتیکی غیرخطی، روش دینامیکی خطی، روش دینامیکی غیرخطی. کیم و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۹، در تحقیقی به کمک آنالیزهای غیرخطی دینامیکی ظرفیت مقاوم در برابر خرابی پیش‌رونده در قاب‌های خمشی فولادی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از کمربندهای انتقال بار در تیرهای پیرامونی سازه تا حد بسیار زیادی باعث ایجاد مسیرهای انتقال بار جایگزین بیشتری در سازه می‌شود.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق به بررسی یک نمونه سازه تونل توفان پرداخته‌شده است که تحت عنوان یک کتاب نیز توسط محقق به چاپ رسیده است [۳]. از دیدگاه محقق، این سازه استراتژیک که ممکن است تحت اثر انفجار ناشی از حملات تروریستی قرار بگیرد از اهمیت بالایی در زمینه پدافند غیرعامل برخوردار است. این سازه (سازه فضا کار با هدف نگه‌دارنده سازه اصلی) تماماً فولادی می‌باشد و برای مهار بارهای جانبی از مهاربندهای ضربدری استفاده‌شده است. در تحقیق‌های قبلی روی این سازه، معمولاً به حذف ستون پرداخته‌شده است. هدف اصلی این تحقیق حذف هم‌زمان ستون و مهاربند با یکدیگر می‌باشد که مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نتیجه هدف اصلی این پژوهش آسیب حداقلی سازه در اثر بار انفجار و به‌طور کلی جلوگیری از فروریزش سازه در اثر سناریوهای مختلف خرابی است.

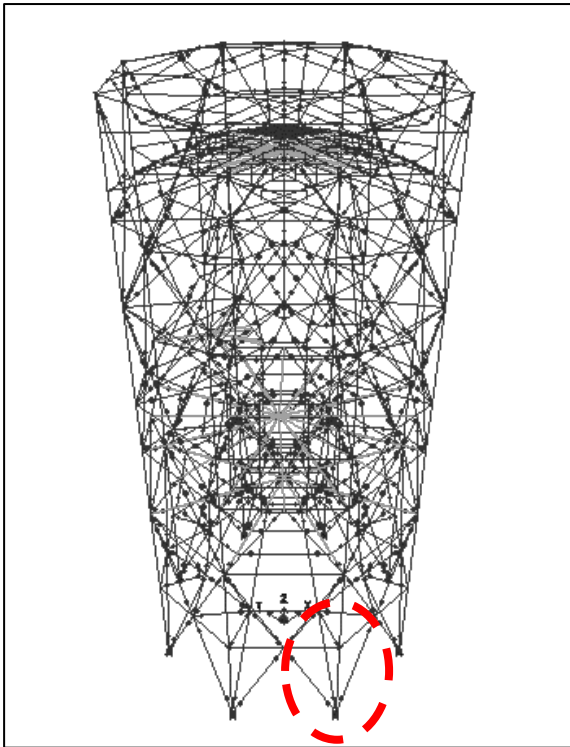
در این مقاله سناریوی ایجادکننده خرابی پیش‌رونده در سازه از طریق حذف هم‌زمان یکی از ستون‌های اصلی و مهاربند هم‌رس به آن در طبقه همکف مورد بررسی قرار گرفته و سازه برای تعیین اثر حذف این المان‌ها تحلیل می‌گردد. با حذف هم‌زمان ستون و مهاربند سازه باقیمانده بایستی پایدار باشد تا بتواند بارهای موجود در آن المان‌ها را برای حالت عملکردی استفاده

همکاران [۵] با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است سازه‌ها با دو سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی و در پلان‌های منظم و غیرمنظم مدل‌سازی شده‌اند و رفتار سازه در حالت‌های ذکر شده باهم مقایسه گردیده است. بدرلو [۶] به مطالعه خرابی پیش‌رونده در قاب‌های خمشی بتن مسلح ویژه، ناشی از حذف ناگهانی ستون پرداخته است و به کمک روش تحلیل استاتیکی خطی و نیز استاتیکی غیرخطی به بررسی ظرفیت چند عدد قاب خمشی بتن مسلح با تعداد طبقات مختلف و تحت دو سناریوی بارگذاری مختلف پرداخته‌شده است. این تحقیق چنین نشان داد که استفاده از روش تحلیل استاتیکی خطی در تعیین ظرفیت این قاب‌ها نتیجه بسیار محافظه‌کارانه‌ای را ارائه می‌دهد. هاشمی و همکاران [۷] به ارزیابی عملکرد سازه‌های فولادی با اتصال درختی در برابر خرابی پیش‌رونده پرداختند. این تحقیق نشان می‌دهد که قاب‌های دارای تعداد طبقات بیشتر عملکرد بهتری در برابر خرابی پیش‌رونده از خود نشان دادند که علت این امر دارا بودن مسیرهای جایگزین بیشتری برای انتقال بار می‌باشد. امام‌زاده و همکاران [۸] به تحلیل خرابی پیش‌رونده سیستم قاب خمشی فولادی مهارشده با دیوار برشی بتنی پرداختند. در این تحقیق با روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به بررسی رفتار یک سازه ۲۶ طبقه پرداخته شد. بر اساس نتایج حاصله آرایش مناسب دیوارهای برشی در سیستم‌های دوگانه در محدوده ضوابط آیین‌نامه‌ای توانایی مناسبی برای مقابله با خرابی پیش‌رونده را از خود نشان داده است.

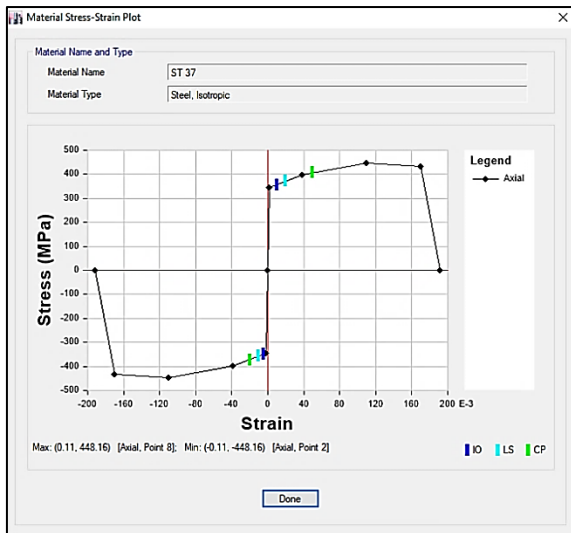
همچنین مطالعات عددی نیز در سال‌های اخیر بر روی مقاوم‌سازی و نیز بررسی سازه‌های فلزی و بتنی در برابر بارهایی نظیر انفجار که موجب خرابی پیش‌رونده می‌شوند، صورت گرفته است که شامل بررسی اتصالات فولادی پیچی در دسته سازه‌های فولادی و نیز مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی به‌وسیله ژاکت‌های فولادی از این دسته می‌باشند [۷ و ۱۷]. لی و همکاران [۹] با تحلیل قاب‌های فولادی علاوه بر محاسبات ضریب بزرگنمایی دینامیکی، شاخص جدید برای تعیین میزان استحکام سازه در برابر خرابی پیش‌رونده ارائه داده‌اند. این شاخص اثرات دینامیکی و توزیع ثانویه نیرو را در نظر می‌گیرد و وابسته به پارامترهای مختلف تأثیرگذار در رفتار سازه است. آنگیو و مرجانیسلی [۱۰] به تشریح تحلیل خرابی پیش‌رونده قاب سه‌بعدی با چهار روش استاتیکی خطی (LS)، استاتیکی غیرخطی (NLS)، دینامیکی خطی (LD) و دینامیکی غیرخطی (NLD) با نرم‌افزار SAP2000 پرداختند.

فو [۱۱] با تحلیل غیرخطی دینامیکی یک قاب ۲۰ طبقه

شده و به تدریج سازه دچار خرابی شده و مفاصل را تشکیل می‌دهد شکل (۴).



شکل (۲): مدل سازه تونل توفان در حالت آسیب‌نندیده (نرمال)، ستون و مهاربند در دایره قرمز پس از خرابی حذف می‌گردند.



شکل (۳): رفتار غیرخطی فولاد در نرم‌افزار ETABS

جدول (۱): مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی

مدول الاستیسیته	مقاومت کششی نهایی	مقاومت تسلیم	تیپ فولاد
۲۰۰ GPa	۳۷۰ MPa	۲۱۵ MPa	ST-37

بی‌وقفه طراحی و کنترل کرد [۱۳]. این سازه به روش استاتیکی غیرخطی یا بار افزون^۱ مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش در قسمت فوقانی سازه بار جانبی از نوع تغییر مکان هدف اعمال شده و پاسخ کلی سازه در برابر این تغییر مکان بررسی شده است. در این تحقیق جایجایی هدف را در نرم‌افزار SAP2000 اختصاص داده و در انتها با تغییر وضعیت سازه مفاصل پلاستیک تشکیل شده را مشاهده می‌کنیم.

۲-۱- معرفی مدل سازه مورد مطالعه

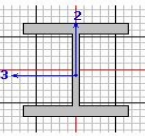
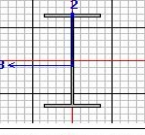
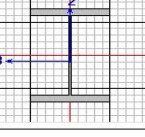
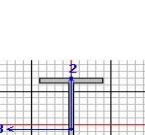
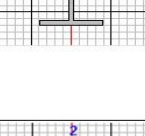
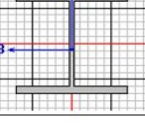
در این تحقیق یک مطالعه موردی که در آن سازه‌ی نگه‌دارنده‌ی تونل توفان با اثر هم‌زمان ستون و مهاربند مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه سازه مذکور ۱۴۰۷ المان دارد و نیز در دسته سازه‌های با ضریب اهمیت بالا قرار می‌گیرد، المان‌های سازه اعم از ستون و تیر و مهاربند عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. این سازه ارتفاع کلی ۵۱ متری دارد و به‌صورت پلان ۸ وجهی است (شکل ۱ و ۲). به‌منظور بررسی اثر حذف ستون و مهاربند در این سازه، دو مدل مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از آن‌ها به‌صورت سازه سالم یا آسیب‌نندیده و دیگری در حالت سناریوی حذف هم‌زمان ستون و مهاربند قرار گرفته است.

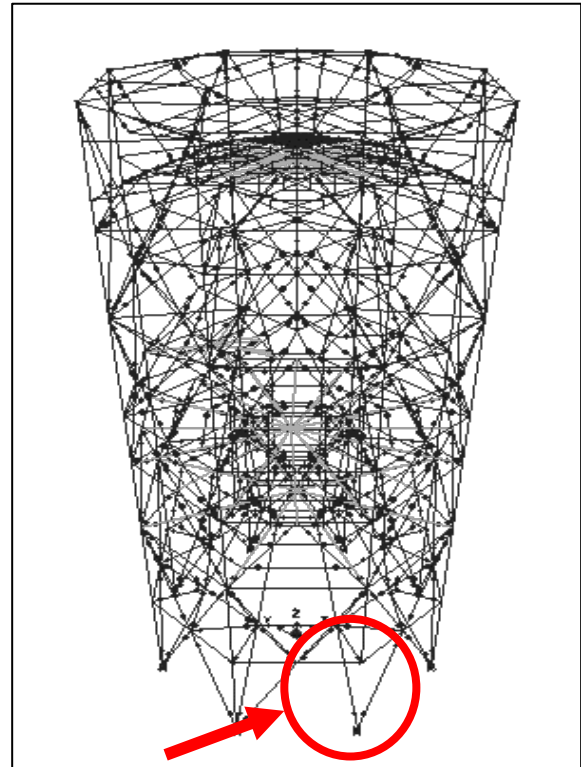
به دلیل ماهیت خرابی این سازه، تمامی اتصالات بین اعضاء از نوع مفصلی تعریف می‌شود. مصالح مورد استفاده در اعضای این سازه از نوع فولاد ST-37 می‌باشد. مقطع ستون‌های این سازه از نوع مقاطع بال‌پهن و تیرورق بوده و تیرهای این سازه از نوع مقاطع تیر آهن IPE می‌باشد. مهاربندها نیز از نوع مقاطع باکس فولادی می‌باشد. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح در نرم‌افزار ETABS از مدل شکل (۳) و با مشخصات جدول (۱) استفاده شده است. این مدل مصالح به ما این امکان را می‌دهد که نمودار بار افزون یا ظرفیت سازه را در دو حالت مختلف استخراج کنیم. به‌منظور شبیه‌سازی خرابی پیش‌رونده در این سازه، فرض شده است که یک ستون و یک مهاربند در طبقه تحتانی سازه تحت اثر عاملی خارجی همچون انفجار، برخورد و یا غیره حذف شده است که در شکل (۲) و (۵) این اعضا نشان داده شده است.

سپس بر روی سازه آسیب‌دیده تحلیل بار افزون (پوش‌آور) یا به عبارتی تحلیل استاتیکی غیرخطی است انجام می‌شود. در آخر پس از انجام تحلیل منحنی‌های بار تغییر مکان سازه و نیز مفاصل پلاستیک تشکیل شده مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اثر حذف ستون و مهاربند در این سازه دیده شود. مفاصل پلاستیک تشکیل شده در این سازه پای ستون متحمل بیشترین برش پایه

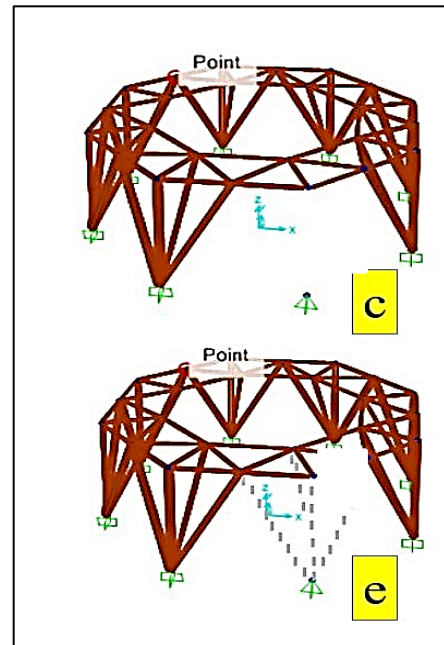
^۱ Pushover Analysis

جدول (۲): مشخصات المان‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

نام	نوع المان	مقطع
HE200M HE220M HE240M HE260M	ستون	
PG1 PG2 PG3 PG4	تیر	
PG-COL-1 PG-COL-2 PG-COL-3	ستون	
IPE 100 IPE 140 IPE 160 IPE 180 IPE 200 IPE 220 IPE 240 IPE 300	تیر	
IPB 200 IPB 240	تیر	
HSCF باکس 140x140 150x150 160x160 180x180 200x200 250x250 300x300 350x350 400x400	مهاربند و تیر	



شکل (۴): مدل سازه تونل توفان در حالت آسیب‌دیده (خرابی)، ستون و مهاربند حذف‌شده با فلش قرمز رنگ مشخص شده است.

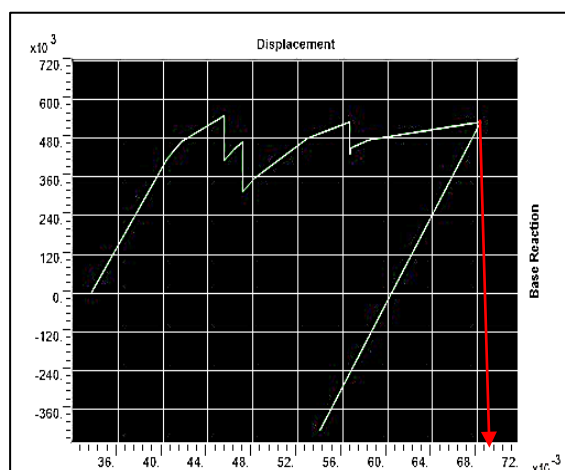


شکل (۵): المان‌های سازه‌ای حذف‌شده در طبقه همکف به‌عنوان مدل سازه آسیب‌دیده.

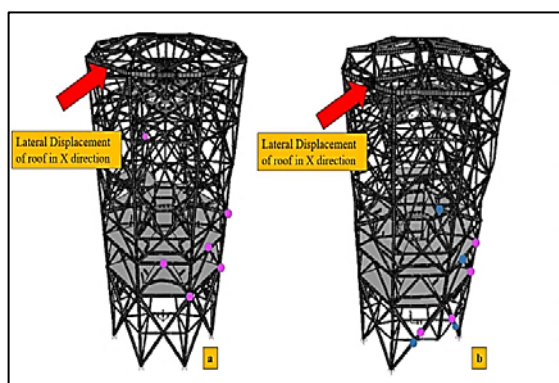
۳- نتایج و بحث

جهت طراحی با بهسازی لرزه‌ای و یا بررسی اثر خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها بر اساس سطح عملکرد مطابق آیین‌نامه‌های موجود معمولاً روش بار افزون مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش منحنی بار افزون بیانگر تغییرات برش پایه نسبت به تغییر مکان جانبی نقطه خاصی از سازه است (عموماً نقطه‌ای در بالاترین تراز سازه (این روش به‌نوعی جایگزین عملکرد دینامیکی غیرخطی سازه می‌شود). با توجه به مقادیر قابل توجه تغییر مکان‌های جانبی در حالت پلاستیک مشخصات مصالح و سطح مقطع اعضا تأثیر به‌سزایی در منحنی بار افزون می‌گذارند.

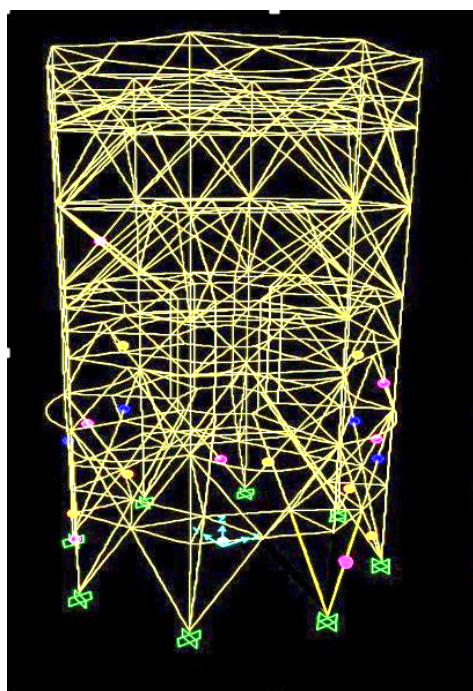
در جدول (۲) مشخصات المان‌های مورد استفاده در مدل‌سازی آورده شده است.



شکل (۷): نمودار تغییر مکان برحسب مکان اولیه یا دریافت در سازه نرمال (تغییر مکان سقف نسبت به مکان اولیه)



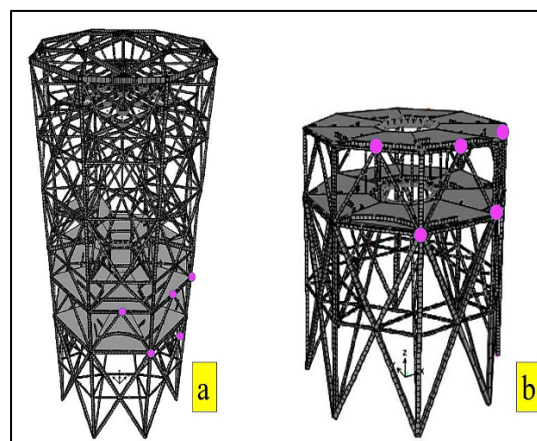
شکل (۸): مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل سازه در حالت آسیب‌نندیده در سمت چپ و سازه آسیب‌دیده در سمت راست



شکل (۹): مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل سازه در حالت آسیب‌دیده

در ادامه به بررسی نمودار بار افزون سازه‌ی تونل توفان در دو حالت زیر پرداخته شده است. در حالت اول، سازه اولیه بدون هیچ تغییری مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این آنالیز درک رفتار عمومی سازه به‌عنوان معیار و یا نمونه شاهد در مقابل بارهای جانبی بوده است. در حالت دوم با توجه به اهمیت بسیار بالای سازه‌ی تونل توفان اقدام به حذف یک تکیه‌گاه (حذف هم‌زمان یک ستون و مهاربند) از سازه اولیه شد تا باربری و پایداری سازه مورد بررسی قرار گیرد. در مرحله اول به‌منظور ایجاد امکان مقایسه بین رفتار دو سازه نرمال و آسیب‌دیده، یک‌بار تحلیل بار افزون را بر روی سازه سالم انجام می‌دهیم تا مفاصل پلاستیک و نیز منحنی پوش آن استخراج گردد. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، به دلیل نوع کاربری خاص این سازه که عملکرد استفاده بی‌وقفه از آن مورد انتظار می‌باشد، طراحی سازه به‌گونه‌ای انجام شده است که تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در آن تا حد امکان حداقل گردد که این مورد در شکل (۶) ملاحظه می‌شود. همچنین در شکل (۷) منحنی دریافت سازه تا تغییر مکان هدف ترسیم شده است.

سپس در مرحله دوم با توجه به شکل (۵)، یک ستون و مهاربند از طبقه تحتانی این سازه حذف می‌گردد و مجدداً تحلیل پوش آور بر روی این سازه انجام می‌گیرد. در شکل (۸) و (۹) مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سازه آسیب‌دیده تحت اثر حذف ستون و مهاربند نشان داده شده است. در نتیجه این المان‌هایی که حذف شد باعث ایجاد قدرت تخریب بیشتری در سازه می‌شود. همان‌طور که در شکل (۸) و (۹) ملاحظه می‌شود، نه‌تنها تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده بیشتر شده است، بلکه دریافت سازه نیز در حدود ۶ درصد افزایش یافته است که حاکی از طراحی مناسب این سازه در برابر خرابی پیش‌رونده می‌باشد چراکه با حذف ناگهانی یک ستون و مهاربند، سازه همچنان توانسته است قابلیت بهره‌برداری خود را حفظ نماید.

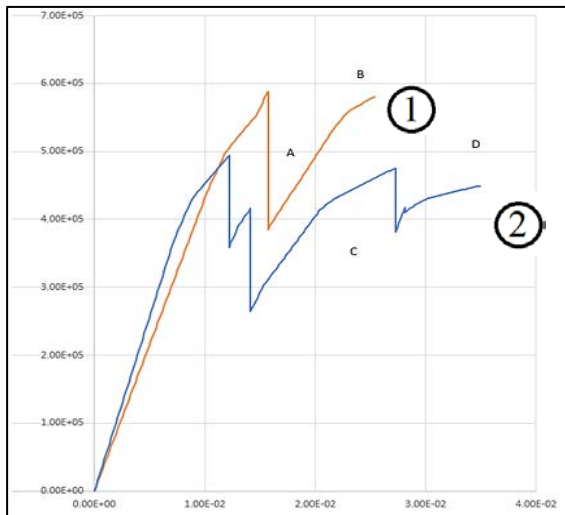


شکل (۶): مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل سازه در حالت آسیب‌نندیده. سمت چپ نمای کلی قاب سه‌بعدی. سمت راست سه‌طبقه اول سازه برای وضوح بیشتر.

جابجایی شاهد کاهش سختی سازه هستیم که نشان‌دهنده تشکیل مفاصل در سازه است، اما کماکان برش پایه در حال افزایش است که ناشی از درجه نامعینی بالای سیستم (به دلیل وجود تعداد اعضای زیاد) است. در ناحیه B تا C شاهد افت لحظه‌ای برش پایه به ۳۸۰ ton هستیم که حدود ۱۲۰ ton کمتر از برش پایه حد الاستیک است. این کاهش لحظه‌ای در برش پایه ناشی از ناپایداری لحظه‌ای به علت تشکیل مفاصل هم‌زمان است. در ناحیه C تا D در این قسمت شاهد غلبه سازه بر ناپایداری لحظه‌ای ایجاد شده هستیم و برش پایه مجدداً شروع به افزایش کرده است. هرچند این افزایش برش پایه با وجود سختی کمتر سازه به علت تشکیل مفاصل است. باربری نهایی در این مرحله کمتر از بیشینه تجربه شده توسط سازه است (نقطه D).

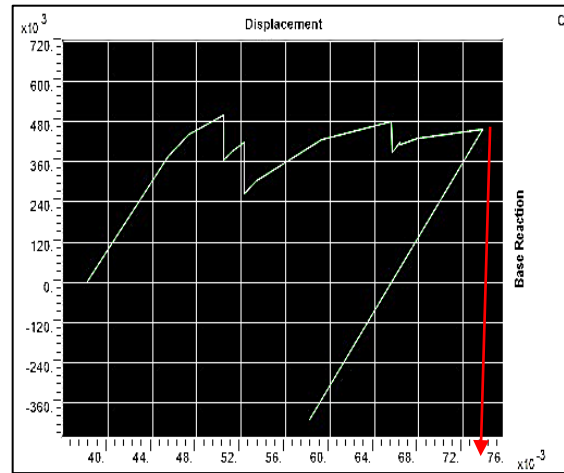
۳-۲- مقایسه کمی منحنی پوش آور در دو حالت نرمال و آسیب‌دیده

در شکل (۱۲) منحنی پوش آور سازه نرمال با شماره ۱ نمایش داده شده است و شماره ۲ بیانگر منحنی پوش آور سازه پس از حذف هم‌زمان ستون و مهاربند طبقه تحتانی می‌باشد. در حالتی که تکیه‌گاه حذف شده است شاهد افت باربری کلی هستیم.



شکل (۱۲): مقایسه منحنی پوش آور در حالت سازه نرمال و حالت حذف هم‌زمان ستون و مهاربند

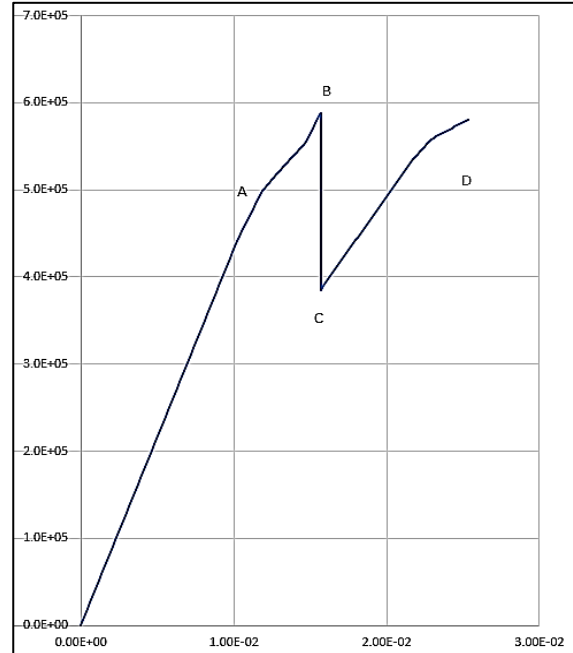
برش پایه در انتهای ناحیه الاستیک با حذف تکیه‌گاه صد تن کاهش یافته ($Q_{max} = 400 \text{ ton}$) که ۲۰ درصد کمتر از حالت اولیه سازه است. حذف تکیه‌گاه باعث کاهش ۱۵ درصدی در برش پایه شده است. با وجود کاهش سختی و باربری کلی سازه با حذف تکیه‌گاه، سختی سازه در مراحل ابتدایی تقریباً یکسان بوده و با توجه به مقایسه شیب منحنی‌ها در بخش الاستیک چنین



شکل (۱۰): نمودار تغییر مکان برحسب مکان اولیه یا دریفت در سازه آسیب‌دیده (تغییر مکان سقف نسبت به مکان اولیه)

۳-۱- توضیح نواحی مختلف منحنی پوش آور

در مرحله اول وضعیت منحنی پوش آور سازه اصلی بدون هیچ‌گونه تغییری مورد بررسی قرار گرفته است و در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود.



شکل (۱۱): نمودار پوشی آور در سازه آسیب‌دیده یا نرمال

ناحیه A تا B که این ناحیه متناظر با انتهای رفتار خطی سازه و شروع تشکیل مفاصل پلاستیک اولیه در سازه است. بیشینه باربری سازه در حالت خطی در حدود $Q_{max} = 500 \text{ ton}$ است که در تغییر مکان $(\delta_{target}) 6 \text{ mm}$ رخ داده است. با افزایش

نتیجه‌گیری به‌دست آمده است.

کلی سازه از نظر پایداری در برابر خرابی پیش‌رونده می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] B. R. Ellingwood, R. Smilowitz, D. O. Dusenberry, D. Duthinh, H. S. Lew, and N. J. Carino, "Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings," U.S. Natl. Inst. Stand. Technol. (NIST), 2007.
- [2] ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16), 2016.
- [3] R. Reza khani, "Evaluation of the progressive collapse in steel buildings," 1st ed. Tehran: Pooneh Pub., 2020.
- [4] A. Eidi and S. Gholizadehfard, "Progressive collapse of steel structures and exploring the causes of the Plasco's building collapse," in 4th national conference of civil engineering and architecture, K. N. Toosi University, 2017.
- [5] R. Rahnavard, F. F. Z. Fard, A. Hosseini, and M. Suleiman, "Nonlinear analysis on progressive collapse of tall steel composite buildings," Case Stud. Constr. Mater., vol. 8, pp. 359–379, 2018.
- [6] B. Badrloo, "Study of Progressive Collapse in Reinforced Concrete Special Moment Resisting Frames Due to the Sudden Removal of Columns," Sci. J. Passiv. Def., no. 3, pp. 21–33, 2018.
- [7] S. S. Hashemi, S. Javidi, H. Farhadi, and A. Fiouz, "Evaluation the Progressive Collapse of Steel Structures with Beam to Column-Tree Connections," Passiv. Def. Q., vol. 10, no. 2, pp. 1–13, 2019.
- [8] S. Emmamzadeh and A. Arbab NoushAbadi, "Progressive Collapse Analysis of Dual System Special Moment Steel Frame with Special Concrete Shear Wall," Passiv. Def. Q., vol. 11, no. 3, pp. 67–78, 2020.
- [9] L. L. Li, G. Q. Li, B. Jiang, and Y. Lu, "Analysis of robustness of steel frames against progressive collapse," J. Constr. Steel Res., vol. 143, 2018.
- [10] S. Marjanishvili and E. Agenew, "Comparison of various procedures for progressive collapse analysis," J. Perform. Constr. Facil., vol. 20, no. 4, pp. 365–374, 2006.
- [11] F. Fu, "Progressive collapse analysis of high-rise buildings with 3D finite element method modeling," J. Constr. Steel Res., vol. 65, pp. 1222–1262, 2002.
- [12] "Progressive collapse analysis and design guideline for new federal office buildings and major modernization," Washington D.C., 2003.
- [13] "Design of building to resist progressive collapse," 2013.
- [14] K. Khandelwal, S. El-Tawil, and F. Sadek, "Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames," J. Constr. Steel Res., vol. 65, no. 3, 2009.
- [15] Z.-X. Fang, "Discussion of 'Practical Means for Energy-Based Analyses of Disproportionate Collapse Potential' by Donald O. Dusenberry and

جدول (۳): مقادیر کمی و درصد تغییرات پارامترهای مقاومت جانبی و تغییر مکان افقی سازه در دو حالت سالم و آسیب‌دیده

درصد تغییرات	سازه آسیب‌دیده	سازه سالم
-۱۸٪	۴۸۲ ton	۵۹۴ ton
-۲۳٪	۴۴۲ ton	۵۸۰ ton
۳۴٪	۳۵ mm	۲۶ mm
۲۵٪	۱۲ mm	۱۶ mm

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد یک سازه تونل توفان در برابر یک سناریوی ایجادکننده حالت خرابی پیش‌رونده مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش آور) قرار گرفت. بدین منظور در این سناریو یک ستون و مهاربند از طبقه تحتانی سازه حذف شد و سازه در دو حالت موردبررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق چنین نشان می‌دهد که این سازه می‌تواند تا حد مطلوبی در برابر این سناریو شرایط عملکرد استفاده بی‌وقفه را ارضا کند.

در حالت اول به‌منظور یافتن منحنی ظرفیتی بار تغییر مکان و درواقع نحوه پاسخ سازه، آنالیز استاتیکی غیرخطی روی آن انجام شد. سپس چنین فرض می‌شود که یک ستون و مهاربند در طبقه اول سازه تحت اثر عاملی خارجی مانند انفجار، تصادف و یا غیره به‌طور ناگهانی حذف شود؛ بنابراین در حالت دوم این سازه آسیب‌دیده مجدد تحت اثر آنالیز بار افزون و به‌منظور تعیین منحنی ظرفیت آن قرار می‌گیرد. در جدول (۳) مقادیر کمی و نیز درصد تغییرات مقاومت جانبی کلی سازه و نیز جابجایی الاستیک و نیز نهایی سازه در دو حالت سالم و آسیب‌دیده آورده شده است. چنانچه با مقایسه شکل‌های (۶) و (۹) مشاهده می‌شود، در حالت آسیب‌دیده تعداد مفاصل پلاستیک و نیز محدوده‌های عملکردی سازه افزایش داشته‌اند. همچنین حداکثر جابجایی سازه در شکل‌های (۷) و (۱۰) چنین حاصل شده است که حداکثر جابجایی و یا دریفت کلی سازه در حدود ۶ درصد اضافه شده است که سازه همچنان در محدوده عملکردی خدمت‌رسانی بی‌وقفه (IO) باقی‌مانده است. همچنین ظرفیت سازه آسیب‌دیده به میزان حدود ۳۸۰ ton رسیده است که نسبت به حالت آسیب‌دیده که ۵۰۰ ton می‌باشد، ۱۲۰ ton کاهش یافته است. درنهایت با مقایسه دو منحنی ۱ و ۲ در شکل (۱۲) چنین استنتاج می‌شود که شکل‌پذیری و یا به بیانی دیگر ظرفیت جذب انرژی سازه پس از حذف یک ستون و مهاربند در طبقه تحتانی، با حفظ مقاومت و پایداری کلی در محدوده قابل‌قبول، افزایش داشته است که نشان از بهینه بودن طراحی

- Steel Jacket Exposed to Explosion,” *Passiv. Def. Q.*, vol. 42, pp. 73–81, 2020.
- [18] FEMA 356, “FEMA 356 - Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings”, Federal Emergency Management Agency,” Rep. FEMA-356, Washington, DC, 2000.
- Ronald O. Hamburger,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 21, no. 5, 2007.
- [16] T. Kim and J. Kim, “Collapse analysis of steel moment frames with various seismic connections,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 6, 2009.
- [17] S. Molaei and A. Pakzad, “Effect of Rehabilitation of Reinforced Concrete Column Retrofitted with

The Evaluation of Progressive Collapse in the Space-Structure with the Scenario of Simultaneous Removal of a Column and Brace (Case Study: Wind Tunnel Retaining Structure)

R. Rezakhani, Sh. Rezaei*

Abstract

Progressive collapse is defined as the propagation of some primary local failure from one member to another that eventually leads to the failure of the entire structure or a large part of it. Potential hazards or incidents that can result in progressive damage include fire, collision, explosion, and earthquake. In the mechanism of progressive collapse, a local failure, such as the major damage or removal of a column, causes a total and significant collapse that will lead to the collapse of the entire structure. The aim of the present study is to investigate the progressive collapse in a special braced wind tunnel retaining structure with the scenario of simultaneously removing one of the main columns and bracings in the base level. In this study, a wind tunnel retaining space structure that supports the main structure of the wind tunnel is considered. This high-rise steel structure is braced with a composite structural system, which incorporates various failure scenarios. The models are first analyzed and designed in ETABS software and their output is transferred in SAP2000 software and then nonlinear static analysis is performed on those models. The results show that in case of the removal of bracing in the event of an explosion, only in members close to the removed elements, an increase in shear is observed. The amount of displacement of the structure in nonlinear static analysis is equivalent to removing one column and bracing more than the previous case. The results show that by removing the column and bracing simultaneously, the progressive collapse will probably mostly occur in elements close to the part to which the failure scenario is applied.

Key Words: *Progressive Collapse, Constructed Structures, Column and Bracing Simultaneous Removal, Wind Tunnel Retaining Structure*