

معرفی خرابی پیشرونده و بررسی پایداری و تاثیر آن بر انواع سازه‌های فولادی

آرش بخشی پور صدآپشته، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، آذربایجان شرقی، ایران

بابک علی نژاد، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: arash.bakshipoor@yahoo.com

دریافت: ۹۶/۱۱/۰۶ - پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

صفحه ۱۳۱-۱۱۵

چکیده

امنیت سازه همیشه در طراحی پروژه های مهندسی عمران برای مهندسان امری کلیدی بوده است. یکی از مکانیزم های که سازه در آن دچار شکست می شود و در چند دهه توجه زیادی به آن شده است مربوط به تخریب پیشرونده است که در آن یک یا چند عضو سازه ای ناگهان به علت تصادف یا حمله تروریستی یا غیره دچار شکست شده و سپس ساختمان به شکل پیشرونده ای دچار فروریزش می گردد. تخریب پیشرونده رویدادی نسبتاً نادر است که در آن بارهای غیر متعارف آسیب موضعی را ایجاد می کنند و سازه بدلیل کمبود پیوستگی، شکل پذیری و نامعینی آسیب را پخش می کند. به بیان ساده تر خرابی پیش رونده در سازه ها را می توان به عنوان یک واکنش زنجیره ای تعریف کرد که در آن تحت علیی خاص، صدمه موضعی در ناحیه نسبتاً کوچکی از سازه رخ می دهد و در شرایطی این صدمه موضعی، به بخش های دیگری از سازه گسترش یافته و در نهایت به خرابی کلی سازه، منتهی می شود. در این مقاله نگارندگان برای آشنایی مخاطبان ابتدا مفاهیم و روش های خرابی پیشرونده را توضیح داده و سپس با ارائه چند مثال کاربردی از تحلیل خرابی پیشرونده در انواع سازه های فولادی، مفهوم و تئوری این پدیده را به زبان ساده بیان کنند. در انتها نیز نتایج بدست آمده از تحلیل و پایداری سازه های فولادی در برابر پدیده خرابی پیشرونده ارائه می شود.

واژه های کلیدی: خرابی پیشرونده، سازه های فولادی، شکست سازه، قاب خمشی، مهاربند فولادی

۱- مقدمه

لندن که در سال ۱۹۶۸ اتفاق افتاد بوجود آمد. وقایع ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ به عنوان نیروی محرک توجه بیشتری به این موضوع را ایجاد کرد. کمیته های گوناگون بررسی و بازبینی کرده و استانداردهای خود را برای طراحی در برابر خرابی پیشرونده ارتقاء دادند (ساعدی، ۱۳۸۹). تخریب پیشرونده عکس العملهای زنجیروار از شکست می باشد که توسط از دست رفتن یک و یا تعدادی از اجزای باربر آغاز می شود. عامل شروع تخریب پیشرونده میتواند عاملهایی انسانی مانند انفجار، آتشسوزی و

اطمینان از سازه همیشه به عنوان یک اصل برای مهندسانی که مسئول طراحی پروژه های عمرانی بوده اند مطرح بوده است. یکی از مکانیزم هایی که در دهه های اخیر توجه به آن افزایش پیدا کرده است خرابی پیشرونده نامیده می شود که به علت تصادف یا حمله، یک یا تعدادی از اعضای سازه ناگهانی خراب می شوند و پس از آن ساختمان بصورت پیشرونده خراب می شود. توجه به موضوع خرابی پیشرونده در جامعه مهندسی اولین بار به خاطر خرابی موضعی ساختمان رونان پوینت در

نسبت به سازه‌های دارای مهاربند همگرا در خرابی پیشرونده آسیب پذیری کمتری دارند (Kapil,2009). ایتو و همکاران، پتانسیل خرابی پیشرونده را با عمل زنجیروار آن در طول اعمال یک تغییر شکل بزرگ مطالعه نمودند (Ito,2011).

کیم و هونگ عملکرد خرابی پیشرونده را در سازه های بلند نامنظم، با تحلیل های دینامیکی و استاتیکی غیرخطی بررسی کردند (Ito,2011). کیم و همکاران مطالعات تحلیلی مرتبط به نامعینی و خرابی پیشرونده روی یک ساختمان واقعی را انجام دادند (Kim,2012).

استاتیکی و دینامیکی را برای ارزیابی خرابی پیشرونده قاب‌های خمشی با دال تخت انتخاب نمودند و نتایج حاصل از آنها را مقایسه نمودند (Seweryn,2012). لیو تاثیر نوع تحلیل خرابی پیشرونده را بر اقتصاد طرح بررسی کرد (Liu,2013). توکلی و رشیدی پدیده خرابی پیشرونده را برای قاب‌های خمشی تحت بارگذاری جانبی بررسی کردند و استقامت سازه آسیب دیده را ارزیابی نمودند (Tavakoli,2013). خیرالدین و مشهدی علی به بررسی خرابی پیشرونده ساختمان های بلند فولادی دارای سیستم مهاربندی شش وجهی پرداخته‌اند (Mashhadiali,2014). ایتو و همکاران تحقیقاتی در زمینه شاخص مربوط به نامعینی یا المان های کلیدی انجام دادند (Ito,2014). اوساما رابطه‌ای برای ضریب افزایش بار سورین و همکاران، روش‌های در تحلیل‌های خرابی پیشرونده پیشنهاد نمود که دقت تحلیل را افزایش می‌دهد (Osama,2015).

۳- تعریف تخریب پیشرونده

تخریب پیشرونده عبارت است از شکست کل سازه و یا بخش نسبتاً وسیع یا مهمی از آن، ناشی از حوادث محلی مانند شکست در یک یا چند عضو باربر ثقلی و یا جانبی و عدم توانایی اعضای مجاور برای باز توزیع اضافه بار از طریق مسیری که بتواند پایداری و پیوستگی کلی را حفظ کند. مطابق تعریف ASCE 7 تخریب پیشرونده عبارت است از پخش شدن شکست اولیه محلی از المانی به المان دیگر که نتیجه آن تخریب کل سازه و یا بخش وسیع نامتناسبی از آن است (ساعدی، ۱۳۸۹).

برخورد وسایل نقلیه و یا خطرهای طبیعی مانند زلزله باشد. وقتی که یک عضو باربر سازه‌های دچار شکست یا از دست دادن مقاومت میشود، بار عضو از طریق مسیری جایگزین به اعضای مجاور منتقل میشود. آزاد شدن انرژی داخلی به دلیل حذف عضو سازه‌های منجر به افزایش نیروهای داخلی دینامیکی در اعضای مجاور میشود. باز توزیع نیروهای داخلی سازه از طریق مسیرهای انتقال بار منجر به حمل بار اضافی ناشی از حذف عضو سازه‌های توسط سایر اعضای سازه‌ها میشود. اگر اضافه بار توزیع شده از ظرفیت تحمل اعضای صدمه دیده مجاور تجاوز کند، ممکن است شکست محلی دیگری را به وجود آورد. چنین شکستهای پیاپی ممکن است از المانی به المان دیگر پخش شود و سرانجام به تخریب کل سازه و یا بخش وسیعی از آن منجر شود (فاروقی، ۱۳۹۶).

۲- پیشینه تحقیق

جین کوکیم و همکاران اثر زنجیره گونه پتانسیل خرابی پیشرونده سازه‌های فولادی قاب خمشی را بررسی کرده و تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی روی سازه‌ها ۳ و ۶ طبقه با بادبند و بدون بادبند را بر اساس بار جایگزین پیشنهاد شده مورد بررسی قرار دادند (GSA,2003) مارجانیشویلی و همکاران به تشریح تحلیل خرابی پیشرونده قاب سه بعدی به چهار روش NLS,LD, LS و NLD با نرم افزار SAP2000 پرداختن (Marjanshvili,2006). کپیل و همکاران، بوجود آمدن خرابی پیشرونده در سازه های فولادی با سیستم قاب خمشی ویژه را بررسی کردند (Kapil,2008).

ویبو نشان داد که خرابی پیشرونده می تواند در هنگام وقوع زلزله نیز اتفاق افتد، بنابراین خرابی پیشرونده فقط به بارهای انفجاری و ثقلی محدود نمی‌شود (Wibowo,2009). ویبو و لائو همچنین روی تاثیرات بار جانبی در رفتار سازه ها در خرابی پیشرونده تمرکز کردند و به این نتیجه رسیدند که خرابی پیشرونده لرزه‌ای با اصلاح روش‌های آنالیزی، انجام می‌شود (Wibowo,2009). کپیل و تاویل، خرابی پیشرونده را در قاب‌های مهاربند شده همگرا و واگرا بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سازه های دارای مهاربندهای واگرا

۴- تفاوت تخریب پیشرونده و تخریب نامتناسب
بعضی از محققین بین عبارت تخریب پیشرونده و تخریب نامتناسب تمایز قائل می شوند. تخریب پیش رونده، تخریب کل و یا قسمتی از یک سازه است که به وسیله صدمه و یا شکست قسمت به نسبت کوچکی از آن شروع و تسریع شده است و تخریب نامتناسب، تخریب سازه ای است که نسبت به عامل اولیه نامتناسب می باشد(فاروقی، ۱۳۹۶).

۶- روش های تحلیل خرابی پیشرونده

جهت بررسی سازه ساختمان ها در برابر خرابی پیشرونده با استفاده از روش مسیر بار جایگزین در آیین نامه DOD، سه نوع تحلیل استاتیکی خطی (LS)، استاتیکی غیر خطی (NS) و دینامیکی غیر خطی (ND) پیشنهاد می شود (DoD,2009).

۶-۱- روش استاتیکی خطی

در این روش که ساده ترین روش محسوب می شود، برای ارزیابی اعضا در برابر خرابی پیشرونده، ضریبی تحت عنوان mLIF برای تصحیح تاثیرات ناشی از هندسه اعضا و بار دینامیکی در بارگذاری ثقلی اعضا در نظر گرفته می شود. با توجه به نوع سازه، اعم از فولادی، بتنی یا غیره و همچنین نوع اتصالات، ضریبی تحت عنوان ضریب بزرگ نمایی (متر) برای هریک از اعضا، استخراج می گردد. mLIF کوچک ترین ضریب بزرگ نمایی (متر) المان های متصل به تیر می باشند (ASCE,2010, DoD,2009) (دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۸).

۶-۲- روش استاتیکی غیر خطی

در روش استاتیکی غیر خطی (NS)، ضریبی که تنها ناشی از تاثیرات بازگذاری دینامیکی است، به بارگذاری ثقلی اعضای بالای عضو حذف شده، افزوده می شود. این ضریب با توجه به نوع سازه و همچنین نوع اتصالات آن، تعیین و از جداول تعریف شده در آیین نامه استخراج می شود (محمودی، ۱۳۹۵). ضریب افزایش بار دینامیکی (DIF) برای تحلیل استاتیکی غیر خطی از ضوابط پیشنهادی آئین نامه ASCE41-06 به دست می آید (ASCE,2010). یکی از بخش های مهم در تحلیل استاتیکی غیر خطی تعریف مدل بار تغییر شکل اعضاست. در شکل شماره ۱ رفتار بار- تغییر شکل عضو خمشی به همراه مقادیر مجاز آن (برای هریک از عملکردهای IO (بهره برداری

۵- علل ایجاد کننده تخریب پیشرونده

خرابی پیشرونده در نتیجه یک رویداد بارگذاری غیر متعارف ایجاد می شود که چهار نوع علت عمومی آن به شرح ذیل است (بسته جامع خرابی پیش رونده در سازه ها، ۱۳۹۶).

۵-۱- ضربات تصادف

ضربات اتومبیل هر چیز دیگری به اعضای کلیدی در سازه هایی چون ساختمان و پل (تخریب پیشرونده در پل ۱۸۰ در ایالت Nebraska آمریکا) نمونه ای از این بارگذاری غیر متعارف می باشند.

۵-۲- ساخت و سازه های معیوب

برای نمونه برداشتن بی موقع نگهدارنده ها در ساختمان (تخریب پیشرونده ساختمان Skyline Plaza در ایالت Virginia آمریکا) موجب شکست موضعی شده و به دنبال آن تخریب پیشرونده رخ خواهد داد.

۵-۳- شکست پی

شکست قسمت کوچکی از پی ساختمان می تواند منجر به از دست دادن نگهدارنده های اصلی سازه شود. این شکست می تواند به دلیل فرسایش، مسایل زمین شناسی، تخریب ناشی از انفجار و غیره باشد.

۵-۴- تغییرات شدید در فشار هوا

تغییرات شدید در فشار هوا که در پی انفجار گاز، انفجارهای بزرگ با بمب (تخریب پیشرونده ساختمان فدرال

۷-۱ روش کنترل حادثه

در بعضی موارد، احتمال خرابی پیشرونده به علت حوادث غیرعادی از قبیل انفجار گاز یا برخورد وسایل نقلیه را می‌توان با استفاده از روش های زیر کاهش داد.

حذف حادثه: به طور مثال به وسیله عدم استفاده از گاز یا عدم ذخیره مواد اشتعال زا.

حفاظت در برابر حادثه: به طور مثال با ایجاد حصار برای ستون ها و دیوارهایی که در معرض برخورد وسایل نقلیه هستند.

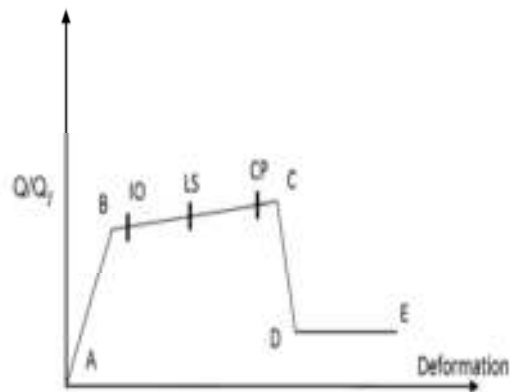
کاهش اثر حادثه: به طور مثال با تهیه سوراخ برای اینکه فشار ایجاد شده، توسط انفجار را کاهش دهند.

روش کنترل حادثه، چون مقاومت سازه را در مقابل خرابی پیشرونده افزایش نمی‌دهد و از طرفی به عواملی بستگی دارد که از کنترل طراح خارج می باشند، لذا کمتر مورد استفاده قرار می گیرد.

۷-۲ روش طراحی غیر مستقیم

در این روش با مشخص کردن ترازهای مینیمم مقاومت، پیوستگی و شکل پذیری برای اتصالات، اعضا و مصالح، بر روی مقاومت سازه در مقابل خرابی پیش رونده تاکید می شود، یعنی اگر مقاومت، پیوستگی و شکل پذیری اجزاء تشکیل دهنده از مقادیر معمول تعیین شده در آیین نامه‌ها بیشتر باشد، خرابی پیش رونده اتفاق نخواهد افتاد. به عنوان مثال برای انجام این کار در هنگام طراحی می توان از افزایش ضرایب اطمینان برای تمام اعضا نام برد. معمولاً برای توصیف روش غیر مستقیم از عبارت تمامیت عمومی سازه‌ای استفاده می‌شود. منظور از تمامیت عمومی سازه‌ای، قابلیت رضایت بخش سازه برای ایجاد ارتباط روی ناحیه آسیب دیده و محدود کردن صدمه اولیه می باشد.

بی وقفه، LS (ایمنی جانی) و CP (آستانه فرو ریزش)) به صورت شماتیک نشان داده شده است (محمودی، ۱۳۹۵).



شکل ۱. معیارهای کنترل در تحلیل غیر خطی

۶-۳ روش دینامیکی غیر خطی

در روش دینامیکی غیرخطی (ND) که رفتار واقعی تر سازه را در بر می گیرد، برای محاسبه تغییر مکان ها و مشخص شدن وضعیت مفاصل پلاستیک در اعضا، عکس العمل‌های وارده به صورت یک بار ضربه‌ای، در یک مدت زمان محدود، از روی سازه حذف می شود و برای سازه تحت بارگذاری جدید، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام می‌شود (ASCE,2010, DoD,2009).

۷- روش‌های مقاوم سازی سازه‌ها در برابر خرابی

پیشرونده

روش‌های متنوعی برای کاهش احتمال خطر خرابی پیشرونده، در سازه‌ها پیشنهاد شده است که مهمترین و عمده‌ترین این روش‌ها عبارتند از ۱- روش کنترل حادثه، ۲- روش طراحی غیر مستقیم، ۳- روش طراحی مستقیم (عابدی، ۱۳۸۲).

۷-۳-۳- روش طراحی مستقیم

روش طراحی مستقیم شامل دو روش مقاوم سازی محلی ویژه و روش مسیر جایگزین می باشد، که به شرح زیر است.

المان‌های بحرانی، بعد از تشخیص به گونه‌ای طراحی می‌شوند که خرابی محلی در آنها اتفاق نیافتد. ولی در روش مسیر جایگزین، از همان ابتدای طراحی احتمال وقوع خرابی محلی در نظر گرفته می‌شود ولی با جستجوی مسیرهای جدید تعادل برای انتقال بار، از پیشرفت آن جلوگیری می‌شود.

۷-۳-۱- روش مقاوم سازی محلی ویژه

در روش مقاوم سازی محلی ویژه، مقاومت کافی برای ایستادگی در برابر حوادث را در المان‌های بحرانی فراهم می‌شود. به عبارت دیگر بعد از مشخص کردن المان‌های بحرانی، آنها باید به گونه‌ای طراحی شوند که سازه بتواند به طور کامل در برابر خرابی پیش رونده، مقاومت کند. در روش مقاوم سازی ویژه، المان‌های بحرانی در مقابل بارهای غیرعادی به صورت مقاوم طراحی می‌شوند. این المان‌ها باید مقاومت و سختی کافی برای ایستادگی در برابر بارهای غیرعادی را داشته باشند.

۸- انواع خرابی پیش‌رونده

انواع خرابی پیش‌رونده شامل ۶ نوع خرابی می‌شود، که به شرح زیر است (ساعدی، ۱۳۸۹).

۸-۱- خرابی پن کیکی

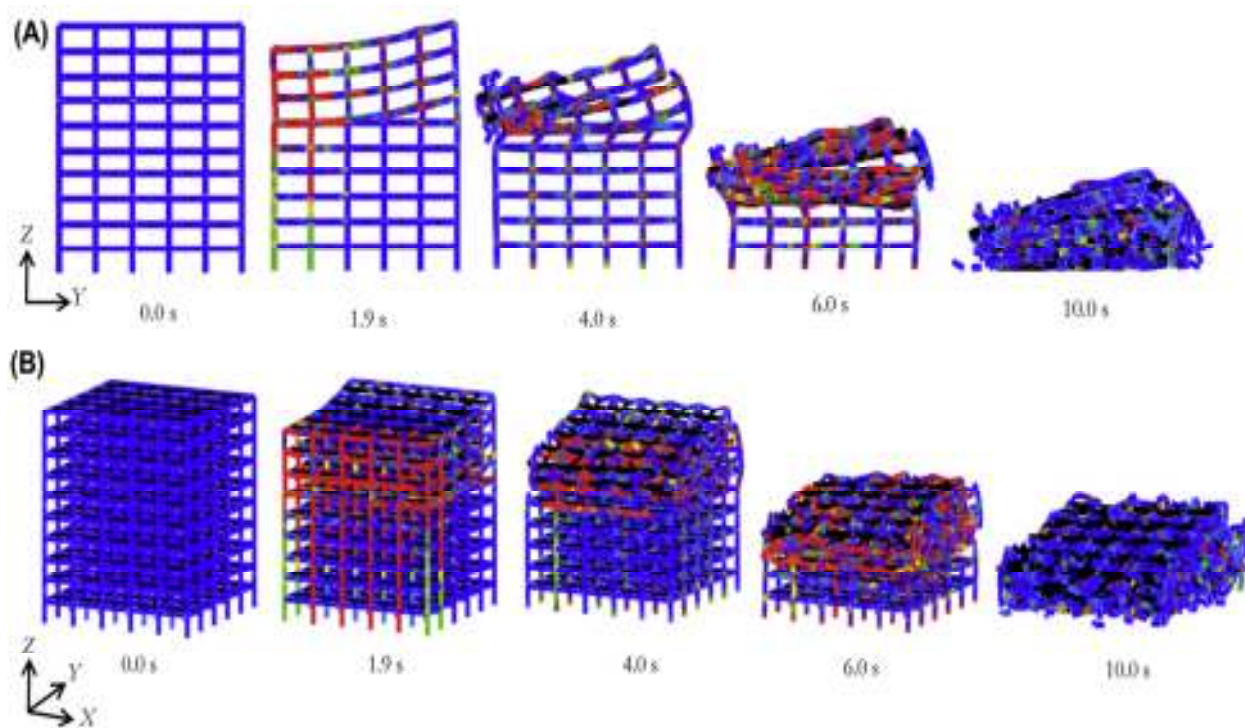
مهمترین مثال برای این نوع، خرابی برج‌های تجارت جهانی می‌باشد. برخورد هواپیماها و آتش سوزی متعاقب آن باعث ایجاد خرابی‌های موضعی در محل اصابت شد و به دنبال آن کاهش باربری عمودی اتفاق افتاد. در پی این کاهش باربری، بار اضافی بین مقاطع باربر سالم برج تقسیم شد. در هنگام خرابی، طبقات بالاتر شروع به سقوط کرده و انرژی جنبشی آنها به صورت تجمعی زیاد شد.

با برخورد طبقات خراب شده که انرژی جنبشی افزایش یافته‌ای را دارا بودند به طبقات سالم، و ایجاد نیروهایی بیش از مقاومت آن‌ها خرابی تشدید شده و انرژی جنبشی افزایش یافت. خرابی به همین صوت پیش رفت و در نهایت باعث خرابی کلی سازه شد. شکل شماره ۳ خرابی برج‌های تجارت جهانی را نشان می‌دهد و شکل شماره ۴ به صورت شماتیک نحوه مدل سازی آن را بیان می‌کند. شکل شماره ۲ یک مثال عددی از تجزیه و تحلیل فروپاشی پیش‌رونده در یک سازه در زمان شروع تخریب و ثانیه صفر تا پایان فروپاشی یعنی ثانیه ۱۰ را نشان می‌دهد. این نوع خرابی بصورت کلی شامل مواردی که اشاره می‌شود است.

۷-۳-۲- روش مسیر جایگزین

در روش مسیر جایگزین از ابتدا، مسیرهای جدید برای انتقال بار تعیین می‌شود و برخلاف روش مقاوم سازی محلی ویژه، امکان وقوع خرابی محلی در سازه‌ها داده می‌شود، ولی مسیرهای جایگزین بار، طوری فراهم می‌شوند که صدمه اولیه جذب و از پیشرفت آن جلوگیری شود. در این روش سازه به گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند خرابی موضعی پیش آمده را جذب کرده و مسیر جدیدی برای انتقال بارها بوجود آورد. در این روش تنها حذف یک المان اصلی و بحرانی مورد بررسی قرار می‌گیرد و سازه برای تعیین اثر حذف این المان، آنالیز می‌شود. وقتی یک المان سازه ای برداشته می‌شود، سازه باقیمانده بایستی پایدار باشد تا اینکه بتواند بارهای موجود در آن المان را برای یک مدت زمان کافی (حداقل برای تخلیه با امنیت سازه و بازرسی وسعت خرابی) تحمل نماید.

روش مسیر جایگزین هم مثل روش مقاوم سازی در هنگام طراحی در مقابل خرابی پیش رونده روی افزایش مقاومت تاکید می‌کند. تنها تفاوت این دو روش را می‌توان به این صورت بیان کرد که در روش مقاوم سازی محلی ویژه،



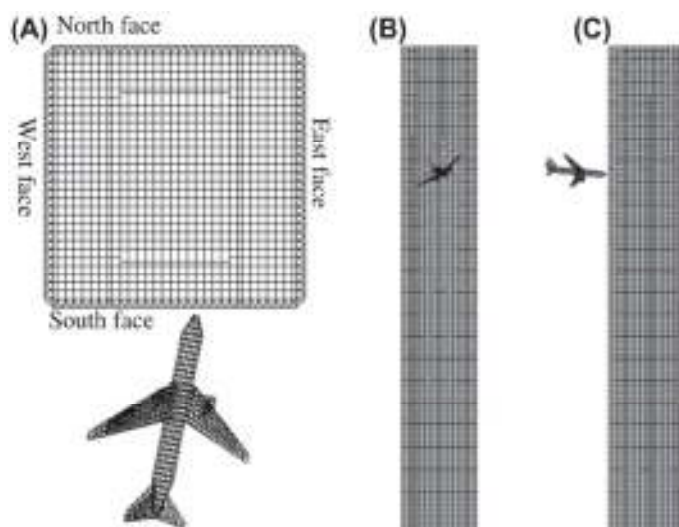
شکل ۲. یک مثال عددی از تجزیه و تحلیل فروپاشی پیشرونده است (A) - نمای جلو، (B) نمای دور (DAIGORO, 2017)



شکل ۳. خرابی برج‌های تجارت جهانی (DAIGORO, 2017)

۱- خرابی اولیه المان‌های باربر عمودی یا از بین رفتن خاصیت باربری عمودی المان‌ها ۲- جدایی جزئی و کلی المان و سقوط آن، بصورت حرکت جسم صلب در راستای قائم ۳- تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی ۴- اصابت

۵- از اعضای جدا شده و خراب شده بر روی باقی سازه ۵- از بین رفتن خاصیت باربری المان‌های دیگر بر اثر اصابت ۶- پیشروی خرابی در جهت قائم.



شکل ۴. نحوه شماتیک مدل سازی عددی (DAIGORO,2017)

حائل مهار شده نیز می تواند اتفاق بیفتد. شکل شماره ۵ نشان دهنده این نوع از خرابی است. مشخصات این نوع خرابی عبارت است از:

۱- خرابی اولیه یک یا تعداد کمی از اجزای سازه ۲- باز پخش نیروها ۳- بارگذاری ضربه ای بر اثر پارگی ناگهانی اولیه ۴- پاسخ دینامیکی باقی سازه به بارگذاری ضربه ای ۵- ترکیب بارهای استاتیکی و دینامیکی در المانهای باربر مجاور المان آسیب دیده و پخش بارها ۶- پیشروی خرابی

۸-۲- خرابی زیپی

بر اساس آئین نامه های طراحی پل های معلق، با پاره شدن یک کابل، سازه نباید پایداری خود را از دست بدهد. در این مواقع نباید خرابی یک کابل و اضافه بار آن بر روی کابل های همسایه باعث پاره شدن آنها شود. در صورتی که طراحی درست صورت نگرفته باشد، این مساله باعث پارگی کابل های دیگر و ایجاد خرابی پیشرونده می شود. البته این نوع خرابی برای دیوارهای



شکل ۵. خرابی به علت پارگی کابل و افزایش بار بر کابل‌های همسایه (ساعدی، ۱۳۸۹)

خطوط انتقال آب (ساعدی، ا، ۱۳۸۹). شکل ۶ و ۷ مثالی از این نوع خرابی است. مکانیسم این نوع خرابی به صورت زیر است:

- ۱- واژگونی اولیه یک المان ۲- افتادن المان به صورت حرکت زاویه ای جسم صلب حول یک گوشه از جسم ۳- تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی ۴- ضربه جانبی گوشه بالای المان به المان مجاور که ترکیبی از نیروهای استاتیکی و دینامیکی را ایجاد می کند. ۵- پیش رفتن خرابی در جهت واژگونی.

۸-۳- خرابی دو مینویی

این نوع تخریب از نظر فرآیند و اهمیت شبیه تخریب فروریزی می باشد. در این نوع تخریب نیروهای اصلی در المانهای خراب شده، عمود بر جهت تخریب می باشد. این نوع تخریب در گروهی از ساختمانهای مجاور لاغر در زلزله های پیشین مشاهده شده است (فاروقی، ۱۳۹۶). سازه هایی که مهار جانبی مناسبی ندارند دچار این خرابی می شوند مانند داربست یا پایه های



شکل ۶. خرابی ساختمان رونان پوینت (ساعدی، ا، ۱۳۸۹)



شکل ۷. نمونه ای از خرابی دومینویی (فاروقی، ۱۳۹۶)

مقطع شود. بر اساس مکانیک شکست، تنش ها در اطراف ترک با کمتر شدن فاصله به سمت بی نهایت میل می کنند. البته در سیستم سازه ای المان ها از هم فاصله دارند و فواصلشان صفر نیست. ولیکن با این حال تمرکز نیرو در اعضای مجاور عضو آسیب دیده وجود دارد.

۸-۵- خرابی به علت ناپایداری

به طور معمول سازه ها طوری طراحی می شوند که ناپایدار نشوند. شکست المان های مهاربندی می تواند باعث ناپایداری سازه و ایجاد خرابی شود. این حالت می تواند در خرپا یا تیر سازه هایی اتفاق بیافتد که المان های مهاربندی که برای پایداری، المان های فشاری بکار میروند دچار شکست شوند. حالت دیگر، خرابی پلست سخت کننده است که باعث ناپایداری موضعی و در نهایت منجر به خرابی کلی می شود. در این حالت یک اتفاق کوچک منجر به خرابی گسترده می شود. البته کماتش ستون نیز می تواند باعث ناپایداری کلی سازه شود و در پی آن خرابی کل سازه اتفاق بیافتد. شکل شماره ۸ نشان دهنده خرابی از

در شکل شماره ۶ که مربوط به تخریب برج رونان پوینت در انگلستان می باشد، در ۱۶ می ۱۹۶۸ نشت گاز از فرخوراک پزی در گوشه آشپزخانه طبقه ۱۸ در ساختمان ۲۲ طبقه با سیستم پیش ساخته و دیوارهای باربری بتنی در نیوهم انگلستان منجر به شکست نامتناسب در این ساختمان شد. فشار انفجار گاز باعث پرتاب دیوارهای خارجی به طرف بیرون شده و پانل پیش ساخته باربر گوشه ساختمان را جا به جا کرده بود. شکست چشمه گوشه به سمت بالا و پایین گسترش یافته و کل ارتفاع ساختمان را در بر گرفته و شکست نامتناسب به وجود آورده است. در این حادثه چهار نفر کشته و هفده نفر زخمی شدند.

۸-۴- خرابی مقطع

این نوع تخریب مشابه تخریب زیبایی می باشد با این تفاوت که در این حالت، تخریب در مقطع المان اتفاق می افتد. یک تیر تحت خمش یا آرماتور تحت نیروی محوری کششی را در نظر بگیرید. وقتی قسمتی از سطح مقطع می برد نیرو بین باقی سطح مقطع پخش می شود. بر این اساس افزایش نیروی مقطع می تواند باعث گسیختگی

برای کمیته های تدوین کننده آیین نامه ها و آژانسهای دولتی در ایالات متحده و سایر کشورها به وجود آورد تا دستور العملهای طراحی و معیارهایی را که برای جلوگیری و یا به حداقل رساندن پتانسیل تخریب پیشرونده تهیه کنند. در ادامه اشاره کوتاهی به این آیین نامهها می کنیم (فاروقی، ۱۳۹۶).

آیین نامهها، استانداردها و دستور العملهای طراحی متعددی برای جلوگیری از تخریب پیشرونده وجود دارد:

American Society of civil Engineering (ASCE 7-05, 10), American concrete Institute (ACI 318 - 08, 11), National Building Code of Canada (NBCC, 2005), British Standards (BS, 2002,2005), New York City Building code (NYCBC, 1998), Interagency Security Committee (ISC, 2001), General Service administration (GSA, 2003), Department of Defense (DOD, 2005, 2013).

۹-۱- انجمن مهندسين عمران آمریکا ASCE 7

دو رویکرد کلی طراحی برای به حداقل رساندن پتانسیل تخریب پیشرونده در ASCE 7 - 10 تعریف شده است که عبارتند از رویکرد طراحی غیر مستقیم و رویکرد طراحی مستقیم.

۹-۲- آیین نامه بتن آمریکا ACI318

این آیین نامه شامل ضوابطی برای بهبود یکپارچگی سیستم سازه ای سازه های بتنی می باشد، اما نامی به صورت ویژه از تخریب پیشرونده نبرده است.

۹-۳- آیین نامه کانادا NBCC

این آیین نامه توصیه هایی را برای کاهش خرابی پیشرونده با ایجاد طرح سازه ای مناسب، پیوستگی، فولاد گذاری و مکانیزم های سازه ای ارائه می دهد.

این نوع است. این نوع خرابی به صورت موارد ذکر شده پیش می رود.

۱- خرابی اولیه در اعضای مهاربندی المانهای باربر فشاری ۲- ناپایداری عضو فشاری ۳- شکست ناگهانی این عضو تحت کوچکترین تحریک و گسترش خرابی.

۸-۵- خرابی ترکیبی

خرابی ها پیش رونده ای که تاکنون افتاده کاملاً بر یکی از گونه های گفته شده منطبق نیست. در بسیاری از موارد خرابی ترکیبی از چند حالت مختلف خرابی است. برای مثال شکلهای شماره ۹ و ۱۰ نمونه های از ترکیب خرابی های پن کیکی و دومینویی هستند.

تخریب ساختمان فدرال مورا که در شکل شماره ۹ نشان داده شده است ترکیبی از تخریب فروریزی و دومینویی است. تخریب ساختمان مورا باعث شد تا موضوع تخریب پیشرونده دوباره در بحث و بررسیهای مهندسان و دولت مردان قرار بگیرد و بسیاری از مطالعات بعد از این حادثه توسط آژانسهای دولتی انجام شده زیرا اینگونه تصور میشد که ساختمانهای دولتی بیشتر در معرض چنین خطرهایی هستند (فاروقی، ۱۳۹۶).

۹- ضوابط دستورالعمل ها و آیین نامه ها

تخریب پیشرونده از این نظر دارای اهمیت است که صدمات محلی ممکن است باعث تخریب وسیع و تخریب سیستم سازه ای شود. اولین حادثه تخریب پیشرونده در سال ۱۹۶۸ منجر به تدوین ضوابطی برای جلوگیری از تخریب پیشرونده در آیین نامه های بریتانیا و کانادا شد. در سالهای اخیر گسترش حملات تروریستی، نیاز مبرمی را

۹-۴- استانداردهای انگلیسی BS

استانداردهای انگلیسی بر یکپارچه بودن اعضای سازه ای مختلف یک ساختمان با یکدیگر تاکید دارد، همچنین اعضای کلیدی باید قادر به تحمل بار تصادفی به میزان ۳۴ کیلوپاسگال باشند.

۹-۵- دستورالعمل ساختمانی شهر نیویورک NYCBC

این دستورالعمل، اکثر مفاد متدولوژی خود را از استاندارد انگلیسی می گیرد و روش های طراحی آن شامل طراحی مستقیم و غیر مستقیم می باشد.

۹-۶- ISC – Security Design Criteria

این آیین نامه بر روش های طراحی مستقیم تاکید می کند و هیچ اشاره ای به روش غیر مستقیم یا اتصالات سازه ای نمی کند. همچنین آیین نامه ISC رویه های زیر را مدنظر قرار می دهد:

۱- طراحی اقتصادی در برابر انفجار ۲- استفاده از فولاد گذاری متقارن هندسی (برای مقابله با انفجار) ۳- استفاده از جزئیات شکل پذیر در اتصالات به خصوص در اتصالات عضو سازه ای ۴- فولاد گذاری برشی در برابر تغییر شکل های بزرگ ۵- حداقل نمودن فواصل بین ستون ها (با حد بالای عملی ۹ متر) ۶- حداقل نمودن ارتفاع طبقه (با حد بالای عملی ۵ متر).

۹-۷- دستورالعمل GSA

موسسه GSA آمریکا دستورالعمل GSA را با عنوان ((دستورالعمل تحلیل و طراحی تخریب پیشرونده برای ساختمان هایی جدید اداری فدرال و پروژه های بزرگ)) به منظور اطمینان از طرح پتانسیل تخریب پیشرونده در

طراحی، برنامه ریزی و ساخت ساختمان های اداری جدید فدرال و پروژه های نوسازی بزرگ ارائه کرد. هدف این دستورالعمل جلوگیری از انتشار تخریب بعد از رخ دادن شکست محلی است. روش اصلی تحلیل در این دستورالعمل، تحلیل استاتیکی الاستیک خطی می باشد.

۹-۸- دستورالعمل وزارت دفاع آمریکا DOD

وزارت دفاع آمریکا سندی در قالب (Unified Facilities Criteria) چاپ کرده است. مطابق این سند ساختمان های DOD با سه طبقه و بیشتر باید تخریب پیشرونده را در نظر بگیرند. دستورالعمل (UFC 4-023) (DOD 03) قابل اعمال به ساختمان های بتن مسلح، فولادی، بنایی، چوبی و ساختمان های فولادی سرد نورد شده می باشد.

۱۰-۱- بررسی پایداری و تاثیر خرابی پیشرونده در

سازه های فولادی

در ادامه به بررسی رفتار انواع سازه های فولادی در برابر تخریب پیشرونده می پردازیم و با چند مثال به توضیح آن پرداخته و نتایج بررسی می شود. هدف از این قسمت آشنایی با مقالات مربوط به موضوع خرابی پیشرونده می باشد و علاقمندان جهت مطالعه کامل مقاله می تواند به رفرنس مورد نظر که در پایین ذکر شده مراجعه کنند.

۱۰-۱-۱- بررسی میزان مقاومت سازه های لوله در لوله

فولادی در مقابل خرابی پیش رونده تحت اثر زلزله

در اینجا خرابی پیشرونده در سازه های لوله در لوله ی فولادی تحت اثر بارهای لرزه ای بررسی شده است. به این منظور ۳ تیپ سازه ی لوله در لوله ی فولادی با فواصل ستون های ۲، ۲/۶۷ و ۳/۲ متر و تعداد طبقات ۳۰، ۴۵ و

در سازه‌ی ۶۰ طبقه با افزایش فاصله ستون‌ها تا ۳/۲ متر، پتانسیل خرابی پیشرونده کاهش یافته است. سازه ۶۰ طبقه لوله در لوله با فاصله ستون‌های ۳/۲ متر، در مقابل شتاب نگاشت با ضریب ۱/۸ برابر ضریب مقیاس مقاوم است و خرابی پیشرونده در آن رخ نمی‌دهد. از آنجا که ۸۰٪ افزایش تاب نگاشت بسیار غیر محتمل است، لذا می‌توان ادعا کرد در این سازه‌ها تحت اثر بارهای لرزه‌ای متعارف آیین‌نامه‌ها، خرابی پیشرونده اتفاق نمی‌افتد. به دلیل اینکه در سازه‌های لوله‌ای مود غالب تغییر شکل برشی است، لذا مفاصل خمیری به جای طبقات اول در طبقات میانی و بالایی شکل گرفته و این مسئله عامل مهمی در مقاومت این سازه‌ها در مقابل بارهای جانبی و خرابی پیشرونده است (Douglas, 2002).

۶۰ طبقه مدل سازی شده‌اند. آنالیز انجام شده به صورت دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی بوده است. نتایج آنالیزهای صورت گرفته نشان می‌دهد که در سازه‌های ۳۰ و ۴۵ طبقه، با افزایش فاصله ستون‌ها پتانسیل خرابی پیش رونده افزایش می‌یابد. علت این امر شکل‌گیری مفاصل خمیری در طبقات پایینی سازه و وجود تاخیر برشی منفی در طبقات بالای سازه است. در سازه‌ی ۶۰ طبقه با افزایش فاصله ستون‌ها تا ۳/۲ متر، پتانسیل خرابی پیشرونده به علت توزیع مفاصل خمیری در ارتفاع سازه و عدم وجود تاخیر برشی منفی در سازه کاهش یافته است (کیوانی، ۱۳۹۴). با توجه به شکل شماره ۱۱ این نتایج بدست می‌آید که در سازه‌های با تعداد طبقات کمتر (۳۰ و ۴۵ طبقه)، با افزایش فاصله ستون‌ها پتانسیل خرابی پیشرونده افزایش می‌یابد.



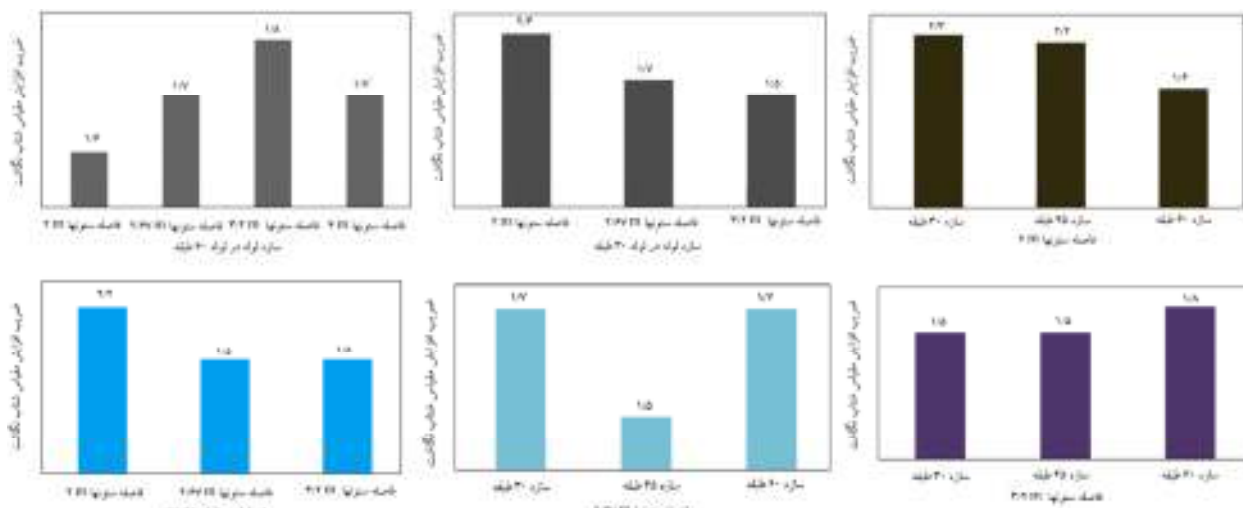
شکل ۸ خرابی در اثر ناپایداری (ساعدی، ۱۳۸۹)



شکل ۹. ساختمان آلفرد پی مورا پس از خرابی (ساعدی، ۱۳۸۹)



شکل ۱۰. ترکیب خرابی‌های دومینویی و پن کیکی (ساعدی، ۱۳۸۹)



شکل ۱۱. مقایسه‌ی پیشینه‌ی شتاب نگاشت قابل تحمل در سازه‌ها در فواصل و ارتفاعات مختلف (کیوانی، ۱۳۹۴)

۱۰-۴- بررسی خرابی پیشرونده در سیستم قاب خمشی

و مهاربندی فولادی

برای بررسی این موضوع از سازه‌های فولادی، سازه‌هایی با تعداد طبقات ۵، ۸، ۱۰ و ۱۵ با سیستم مقاوم جانبی خمشی که اتصالات آن گیردار باشد و با سیستم قاب ساده مهاربندی شده که اتصالات آن مفصلی باشد، تحت بارگذاری قرار گرفته و در نرم افزار SAP2000 مدل‌سازی و طراحی شده است. با تحلیل تاریخچه زمانی مدلها مشخص می‌گردد که مقدار پاسخ‌های لرزه‌ای از جمله مقدار تغییر مکان جانبی طبقات، برش پایه، مقدار نیروی داخلی ستون‌ها و همچنین گسترش خرابی پیشرونده در سازه‌ها در حالت استفاده از قاب خمشی و قاب مهاربندی نسبت بهم متفاوت می‌باشد. لازم به توضیح است که، مقادیر نیروهای محوری، برشی و خمشی المانها در قابهای خمشی بیشتر از قابهای مهاربندی بوده و بر اساس موقعیت حذف ستون متفاوت می‌باشد. لذا می‌توان گفت که مقادیر

نیروهای داخلی در قاب خمشی بیشتر از مهاربندی و مقدار جابجایی قائم کمتر از قاب مهاربندی می‌باشد (حلاجی، ۱۳۹۵). با توجه به نتایج حاصل از گسترش خرابی (نحوه تشکیل مفصل پلاستیک) در شکل‌های شماره ۱۲ و ۱۳ برای سازه های فولادی با اتصالات گیردار و مفصلی مشاهده می‌شود که میزان خرابی و مقدار خرابی در اثر تغییر اتصال تغییر می‌یابد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که، در سازه‌های با اتصالات گیردار، سطح گسترش خرابی نسبت به سازه‌های فولادی با اتصالات مفصلی بیشتر می‌باشد (حلاجی، ۱۳۹۵).

جدول ۷: مقادیر داخلی حساسیت برای سازه ۱۵ طبقه

سورن حذف شده	A_{avg} (ton)	A_p (ton)	SI	درجه خرابی کل
A1	۱۱۸۸۸/۹	۹۸۰/۶	۰/۳۷	۳/۷
B1	۱۱۸۸۸/۹	۹۹۱/۱	۰/۲۲	۲/۲
E1	۱۱۸۸۸/۹	۹۸۷/۲	۰/۳۶	۳/۱
E2	۱۱۸۸۸/۹	۹۷۷/۱	۰/۳۶	۳/۸
C8	۱۱۸۸۸/۹	۹۴۶/۶	۰/۴۶	۴/۶
B2	۱۱۸۸۸/۹	۸۶۶/۳	۰/۴۳	۴/۳

جدول ۸: مقادیر داخلی حساسیت برای سازه ۲۰ طبقه

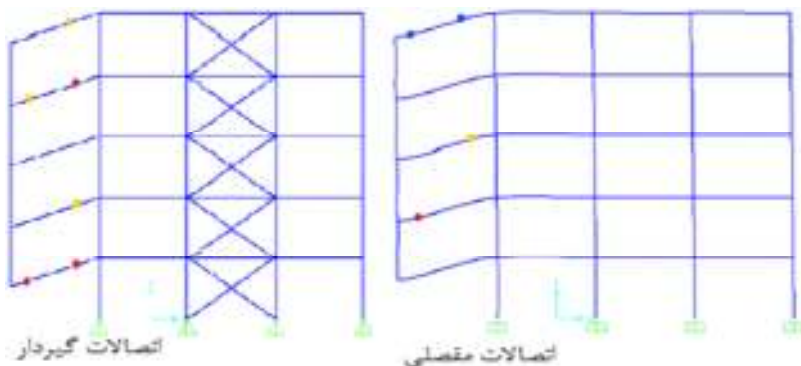
سورن حذف شده	A_{avg} (ton)	A_p (ton)	SI	درجه خرابی کل
A1	۷۹۳۷/۳	۴۹۵/۶	-۰/۲۱	۲/۱
B1	۷۹۳۷/۳	۴۶۳/۵	-۰/۲۲	۲/۲
E1	۷۹۳۷/۳	۴۸۸/۱	-۰/۲۱	۲/۱
E2	۷۹۳۷/۳	۴۸۳/۳	-۰/۲۱	۲/۸
C8	۷۹۳۷/۳	۴۶۸/۶	-۰/۲۸	۲/۷
B2	۷۹۳۷/۳	۳۶۶/۱	-۰/۳۲	۲/۲

جدول ۹: مقادیر داخلی حساسیت به اثر نسبت المانهای کل

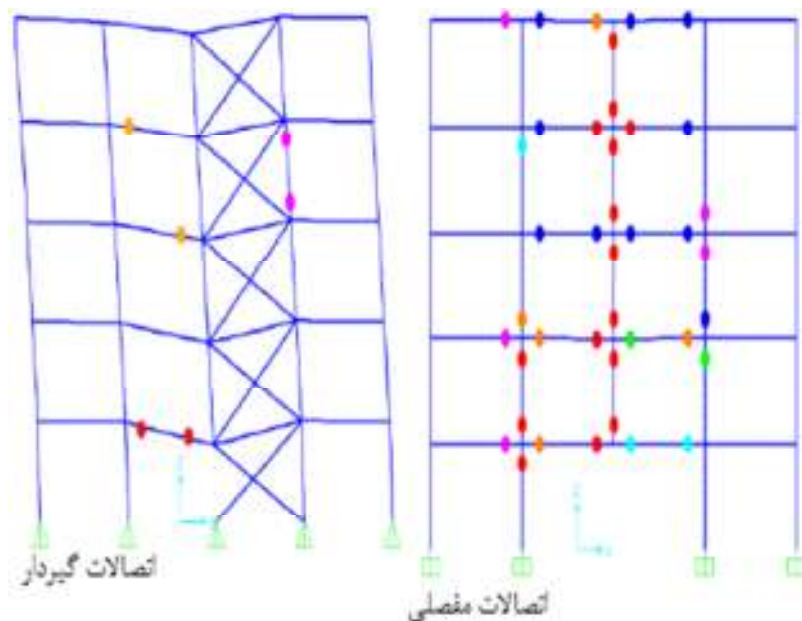
نوع سازه	درجه خرابی کل	نسبت المانهای کل (متر)	خراب	اصلی
۱۵ طبقه	۳/۷	۶/۸	T _۱	T _۸
۲۰ طبقه	۴/۳	۶/۶	T _۱	T _۳
۲۰ طبقه	۶/۸	۶/۸	T _۱	T _۷

جدول ۱۰: مقادیر داخلی حساسیت برای سازه ۲۰ طبقه

سورن حذف شده	A_{avg} (ton)	A_p (ton)	SI	درجه خرابی کل
A1	۲۰۱۱۰/۶	۴۷۸/۶	-۰/۴۹	۴/۸
B1	۲۰۱۱۰/۶	۴۸۸/۳	-۰/۴۸	۴/۸
E1	۲۰۱۱۰/۶	۴۸۲/۸	-۰/۴۱	۴/۱
E2	۲۰۱۱۰/۶	۴۸۰/۸	-۰/۴۸	۴/۸
C8	۲۰۱۱۰/۶	۴۸۱/۶	-۰/۴۲	۴/۶
B2	۲۰۱۱۰/۶	۳۶۶/۱	-۰/۴۸	۴/۸



شکل ۱۲. نحوه گسترش خرابی در مدل ۵ طبقه در حالت حذف ستون گوشه طبقه اول (حلاجی، ۱۳۹۵)



شکل ۱۳. نحوه گسترش خرابی در مدل ۵ طبقه در حالت حذف ستون کناری طبقه اول (حلاجی، ۱۳۹۵)

۱۱- نتیجه گیری

استاتیکی، بعضی از ستون‌ها مستعد خرابی هستند. به طور کلی می‌توان ادعا کرد روش استاتیکی خطی نسبت به روش‌های دیگر محافظه کارانه‌تر عمل می‌نماید.

در خرابی پیشرونده از شاخص حساسیت برای تعیین بحرانی‌ترین ستون استفاده می‌گردد. مقدار این پارامتر به ظرفیت باربری کلی سازه قبل و بعد از حذف ستون بستگی دارد. در سازه‌های فولادی دارای پلان L شکل در نتیجه حذف ستون مرکزی، بیشترین پتانسیل ایجاد خرابی پیشرونده و در عین حال کمترین عملکرد زنجیره‌ای را دارا می‌باشند و پایداری سازه در رسیدن به تعادل جایگزین پس از حذف ستون، با تقویت چنین عملکردی بهبود خواهد یافت. در سازه‌هایی با ارتفاع بیشتر، حذف ستون می‌تواند شرایط بحرانی‌تری از نظر خرابی پیشرونده به وجود آورد.

مقادیر نیروهای محوری، برشی و خمشی المانها در قابهای خمشی بیشتر از قابهای مهاربندی بوده و بر اساس

بر اساس مطالعات انجام شده در این پژوهش نتایج زیر بدست آمده است. در سازه‌های ۳۰ و ۴۵ طبقه، با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها پتانسیل خرابی پیش رونده افزایش می‌یابد. علت این امر شکل‌گیری مفاصل خمیری در طبقات پایینی سازه و وجود تاخیر برشی منفی در طبقات بالای سازه است. در سازه‌ی ۶۰ طبقه با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها تا ۳/۲ متر، پتانسیل خرابی پیشرونده به علت توزیع مفاصل خمیری در ارتفاع سازه و عدم وجود تاخیر برشی منفی در سازه کاهش یافته است.

اکثر تیرهای موجود در قاب، قادر هستند پس از حذف ستون، بر روی المان‌های دیگر پل بزنند. هرچند بر اساس نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی خطی بعضی از تیرها، در معرض خطر قرار دارند. تیرهای قرار گرفته در بالاترین طبقه ساختمان از این قاعده مستثنی هستند و در تمامی تحلیل‌ها از عملکرد مناسبی برخوردار نمی‌باشند. در مورد ستون‌ها نیز نتایج نشان می‌دهند که فقط بر اساس تحلیل

رونده تحت اثر زلزله"، مجله مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۱، شماره ۱/۲، ۴۷، ص. ۵۴.

- محمودی صاحبی، م.، کوزانی، ه.، تیموری، ط.، هاشمی، ش.، (۱۳۹۵) "ارزیابی پایداری قاب‌های خمشی فولادی در برابر خرابی‌های پیشرونده"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۶، شماره ۱، ص. ۵۹-۶۷.

- مداحی، م.، خیرالدین، ع.، (۱۳۹۵)، "بررسی خرابی پیشرونده در قاب‌های خمشی فولادی با پلان L شکل به کمک آنالیز حساسیت"، مجله مهندسی سازه و ساخت، سال سوم، شماره ۲، ص. ۷۳-۸۵.

- ASCE, (2010), "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-10)", US.

- ASCE, (2010), "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-10)", US.

- DoD, (2009), "Design of Buildings to Resist Progressive Collapse (UFC 4-023-03)", Washington DC, US.

-Douglas, A.F. and Seung-Yul, Y. (2000), "Modeling of steel moment frames for seismic loads", Journal of Constructional Steel Research, 58, pp. 529-564.

- GSA, (2003), "Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. The U.S. General-Services-Administration.

-Ito, T. and Fukuyama, T.; "A Potential Strength and Ultimate Behavior of Framed Structures Considering Catenary Effects after Failure Mechanism Formation Subjected to

موقعیت حذف ستون متفاوت می باشد. لذا می توان گفت که مقادیر نیروهای داخلی در قاب خمشی بیشتر از مهاربندی و مقدار جابجایی قائم کمتر از قاب مهاربندی می باشد. گسترش خرابی در سازه‌های با اتصالات گیردار بیشتر از سازه‌های با اتصالات مفصلی است. خرابی پیشرونده در مقدار جابجایی قاب‌های خمشی، تاثیر چندانی نداشته ولی در حالت قاب مهاربندی، مقدار جابجایی افزایش می یابد.

۱۲-مراجع

- (۱۳۹۶)، "بسته جامع خرابی پیش رونده در سازه‌ها"، پایگاه اینترنتی سرزمین دانش.

- حلاجی خسروشاه، الف.، یثربی نیا، ی.، (۱۳۹۵)، "بررسی خرابی پیشرونده در سیستم قاب خمشی و مهاربندی فولادی"، فصلنامه آنالیز سازه-زلزله، دوره ۱۳، شماره ۴، ص. ۲۹-۳۹.

- دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، (۱۳۸۸)، "مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان"، ۱۳۸۸.

- ساعدی داریان، الف.، بهرام پور، ح.، ضیائی، م.، بشیری، م.، (۱۳۸۹)، "خرابی پیشرونده، تئوری و کاربرد"، انتشارات انگیزه.

- عابدی، ک.، چناقلو، م.، علیرضایی، س.، "بررسی خرابی پیشرونده در قاب‌های خمشی فولادی فضایی"، نشریه بین المللی علوم مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴، ص. ۱۶۱-۱۷۹.

- فاروقی، ع.، (۱۳۹۶)، "تخریب پیشرونده"، استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق.

- کیوانی، جعفر.، منصور، مجید.، (۱۳۹۴)، "بررسی میزان مقاومت سازه های لوله در لوله فولادی در مقابل خرابی پیش

- Wibowo, H.; (2009), "Modeling Progressive Collapse of RC Bridges during Earthquakes"; CSCE Annual General Conference.
- "Progressive Collapse Analysis Of Structures (2017), Numerical Codes and Applications", DAIGORO ISOBE, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
- Ito, T., Takemura, T., (2014), "Sensitivity Analysis of Redundancy of Regular and Irregular Framed"; International Journal of High-Rise Buildings, Vol. 3, No. 4, pp.297-304.
- Kapil, K. and El-Tawil, S.; (2009), "Progressive Collapse Analysis of Seismically Designed Steel Braced Frames"; Journal of Constructional Steel Research, 65, pp.699-708.
- Marjanshvili, S. and Agnew, E, (2006), "Comparison of Various Procedure for Progressive Collapse Analysis", Journal of Performance of Constructed Facilities.
- Mashhadiali, N. and Kheyroddin, A.; (2014), "Progressive Collapse Assessment of New Hexagrid Structural System for Tall Buildings"; Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 23, No. 12, pp.947-961.
- Osama A. M., (2015), "Calculation of Load Increase Factors for Assessment of Progressive Collapse Potential in Framed Steel Structures", Case Studies in Structural Engineering, 3, pp.11-18.
- Vertical Load"; Theoretical and Applied Mechanics Japan, 59, pp.29-38.
- Kapil Khandelwal, (2008), "Multi-scale computational simulation of progressive collapse of steel frames". Doctoral dissertation, University of Michigan.
- Kim, J. and Hong, S., (2012), "Progressive Collapse Performance of Irregular Buildings"; Structural Design of Tall and Special Buildings, 20, pp.721-734.
- Kwon, K. H., Park, S. R. M. and Kim, J. K.; (2012), "Evaluation of Progressive Collapse Resisting Capacity of Tall Building"; International Journal of High-Rise Buildings, 1(3), pp.229-235.
- Liu, M., (2014), "A New Dynamic Increase Factor for Nonlinear Static Alternate Path Analysis of Building Frames Against Progressive Collapse", Engineering Structures, 48, pp.666-673.
- Seweryn K., Armelle A., Paolo N., George S., (2012), "Static and Dynamic Analysis of a Reinforced Concrete Flat Slab Frame Building for Progressive Collapse", Engineering Structures, 40, pp.205-217.
- Tavakoli, H. R., Rashidi A., (2013), "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Multi-Story Moment Resisting Steel Frame Buildings Under Lateral Loading", Scientia Iranica, 20 (1), pp.77-86.
- Wibowo, H. and Lau, D.T.; (2009), "Seismic Progressive Collapse Qualitative Point of View"; Civil Engineering Dimension, 11(1), pp.8-14.

