همایش ملی
مهندسی عمران کاربردی
و دستاوردهای نوین

بررسی آسیب پذیری ساختمان های فولادی در برابر خرابی پیشرونده بر اساس آیین نامه GSA

میثم باقری پوراصیل[1*]، مهدی شادمند[2]، ایمان شجاع[3]، میلاد باقری پوراصیل[4]

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان
۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، مدیر فنی آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی تحکیم بنای خزر
۳- مدیر فنی شرکت فنی و مهندسی پایدار سازه بتا
۴- کارشناس مهندسی عمران

(*Meysam_bagheri_p@yahoo.com*)

چکیده

در این مطالعه اصول اساسی مربوط به حداقل رساندن پتانسیل وقوع خرابی پیشرونده در طراحی ساختمان های فولادی مطابق آیین نامه GSA مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این آیین نامه، ارزیابی پتانسیل وقوع خرابی پیشرونده و کاهش وقوع آن در سازه هایی است که در معرض بارهای غیرعادی می باشند و بدین منظور سه روش مختلف برای تحلیل خرابی پیشرونده در آن معرفی شده است. علاوه بر این جزئیاتی نظیر ضوابط بارگذاری و معیارهای پذیرش آیین نامه GSA نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. برای جلوگیری از خرابی پیشرونده، در طراحی لرزه ای ساختمان ها بایستی مقادیر کافی از پیوستگی و شکل پذیری برای ساختمان ها فراهم شود تا بدین ترتیب مسیرهای باربری جایگزین بتوانند فقدان عضو یا اعضای حذف شده را جبران کنند. همچنین این مقاله نتایج حاصل از تعدادی از مطالعاتی را که در آن ها، تحلیل و ارزیابی پتانسیل وقوع خرابی پیشرونده در سازه های فولادی، مطابق آیین نامه GSA صورت گرفته است را معرفی و مورد بررسی قرار می دهد.

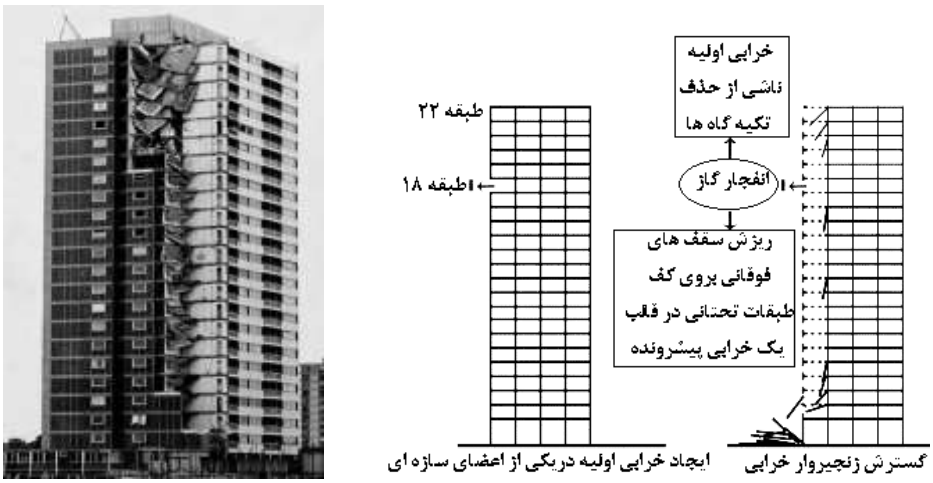
واژه‌های کلیدی: خرابی پیشرونده، آیین نامه GSA، بارهای غیرعادی، روش مسیر جایگزین

۱- مقدمه

امروزه جلوگیری از گسیختگی پیشرونده در سازه ها به یک ضرورت بلامنازع در مهندسی سازه تبدیل شده و بسیاری از کشورها با انجام تحقیقات متعدد، انتشار ضوابط و دستورالعمل های لازم و صرف هزینه های فراوان سعی در جلوگیری از این پدیده، با هدف کاهش خسارت های جانی و مالی دارند.

خرابی پیشرونده حالتی از خرابی می باشد که در آن خرابی موضعی عضو سازه ای اصلی موجب خرابی اعضای مجاور یکی پس از دیگری شده و در نهایت منجر به خرابی کلی می گردد. بنابراین می توان به این نتیجه دست یافت که خرابی کلی نسبت به خرابی موضعی اولیه نامتناسب است [۱]. می توان گفت که تاریخچه مساله گسیختگی پیشرونده به عنوان یک معضل مهندسی ریشه در تخریب ساختمان رونان پوینت در سال ۱۹۶۸ درشرق شهر لندن، دارد. رونان پوینت یک ساختمان جدید ۲۲ طبقه بود که از پنل های باربر پیش ساخته ای که توسط پیچ به یکدیگر متصل می شدند، تشکیل می شد. کمی پس از

اسکان ساکنین در ساختمان، در اثر انفجار گاز طبیعی در طبقه ۱۸ تنها یکی از پانل های دیوار باربر در آن طبقه تخریب گردید. این تخریب منجر به از دست رفتن تکیه گاه سقف بالای آن و متعاقباً باعث ریزش سقف های فوقانی برروی کف طبقات تحتانی در قالب یک تخریب پیشرونده گردید و تا تراز پایین ساختمان ادامه یافت. این واقعه منجر به ایجاد تغییرات مهمی در قوانین ساختمانی انگلستان گردید. پس از آن واقعه طبق مقررات ساختمانی انگلستان، اعضای سازه ای می بایست به حد کافی به یکدیگر کلاف می شدند و اعضایی که در پایداری سازه نقش بحرانی داشتند می بایست برای مقاومت در برابر فشار مضاعف انفجار ناشی از احتراق گاز طبیعی طراحی می گردیدند. این فشار معادل ۳۴ کیلونیوتن بر متر مربع و به صورت استاتیکی فرض می شد. در شکل (۱) ساختمان رونان پوینت پس از تخریب نشان داده شده است. بنابراین کشور انگلستان اولین کشوری بود که ضوابط و مقررات در زمینه جلوگیری از خرابی پیشرونده در طراحی های سازه ای به کار برد [۲].



شکل۱ – فروپاشی ساختمان رونان پوینت به دلیل انفجار گاز در طبقه هجدهم

۲- انواع روش های مورد استفاده در طراحی سازه ها در برابر خرابی پیشرونده

استاندارد های انگلیس برای جلوگیری از خرابی پیشرونده از سه روش Tie Force، Alternate Load Path یا مسیر بارجایگزین و روش مقاوم سازی محلی ویژه استفاده می کنند [۳].

۲-۱- روش Tie Force

مقاومت کششی که برای انتقال بار از ناحیه آسیب دیده سازه به دیگر قسمت های آسیب ندیده سازه استفاده می شود Tie Force نامیده می شود شود و می تواند با استفاده از المان های سازه ای موجود که با روشهای طراحی معمول و برای تحمل بارهای متعارف طراحی شده اند ایجاد شود Tie Force .روشی است که پیوستگی ، شکل پذیری و قید های اضافی ساختمان را بوسیله کلاف ها (کش ها) افزایش میدهد و در صورت ورود یک بارگذاری غیر عادی کل ساختمان با هم عمل میکند و به شکل اتوماتیک با هم کش می آید و مسیرهای فرعی دیگری برای توزیع بار ایجاد می شود. این روش ساده بوده و در آن طراحی و مدل سازی پیچیده ای مورد نیاز نیست. در عین حال بر مبنای قواعد استاتیکی از قبیل تعادل و سازگاری تغییر شکل ها است که در سازه آسیب دیده بکار می رود. برای تامین نیازمندی های این روش می توان از سیستم کف و یا اعضای افقی سازه استفاده کرد.

۲-۲- روش Alternate Load Path

در روش مسیر جایگزین از ابتدا، مسیرهای جدید برای انتقال بار تعیین می شود و برخلاف روش مقاوم سازی محلی ویژه، امکان وقوع خرابی محلی در سازه ها داده می شود، ولی مسیرهای جایگزین بار، طوری فراهم می شوند که صدمه اولیه جذب و از پیشرفت آن جلوگیری شود. در این روش، سازه به گونه ای طراحی می شود 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 می گیرد و سازه برای تعیین اثر حذف این المان، آنالیز می شود. وقتی یک المان سازه ای برداشته می شود، 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.

۲-۳- روش مقاوم سازی محلی ویژه

در روش مقاوم سازی محلی ویژه، مقاومت کافی برای ایستادگی در برابر حوادث در المان های بحرانی فراهم می شود. به عبارت دیگر، بعد از مشخص کردن المان های بحرانی، آن ها باید به گونه ای طراحی شوند که سازه بتواند به طور کامل در برابر حوادث غیر عادی، مقاومت کند. در روش مقاوم سازی ویژه، المان های بحرانی در مقابل بارهای غیرعادی به صورت مقاوم طراحی می شوند. این المان ها باید مقاومت و سختی کافی برای ایستادگی در برابر بارهای غیرعادی را داشته باشند.

در حادثه دیگری در سال ۱۹۹۵ بر اثر انفجار یک بمب قوی در داخل ماشینی نزدیک به ساختمان فدرال آلفرد مورا تقریبا نصف ساختمان در اثر گسیختگی پیشرونده فرو ریخت. در این حادثه، انفجار بمب ابتدا باعث تخریب تعدادی از ستون های خارجی و دیوارهای خارجی ساختمان شد که در نتیجه آن و با یک مکانیسم خرابی پیش رونده کف طبقات روی یکدیگر آوار شدند و در نهایت منجر به تخریب نیمی از طبقات ساختمان گردید. همانند حادثه ساختمان رونان پوینت، در این حادثه هم عامل شروع گسیختگی، انفجار بود. این حادثه از این جهت اهمیت داشت که تخریب اولیه ناشی از بار انفجار قابل ملاحظه نبوده و در حد تخریب چند ستون محدود بود. ولی تخریب عمده سازه نه به دلیل انفجار، بلکه به دلیل بیش بارگذاری اعضا پس از انفجار بوده است. به عبارتی پس از تخریب ناشی از انفجار، سازه در حالت پایداری قرار نداشته است و به سرعت فرو ریخته است [۴].

شکل۲ – ساختمان فدرال در اوکلاهاما قبل و پس از حادثه [۵]

پس از این حادثه فعالیت های تحقیقاتی مفصلی در این زمینه صورت گرفت و قوانین موجود در طراحی اصولی و دقیق، بازنگری شد و به ویژه در آمریکا دستورالعمل های متنوع و جدیدی برای کاهش اثر خرابی پیشرونده تدوین گردید. اگرچه سرخط هایی کلی برای کاهش خرابی پیشرونده در آیین نامه های ساختمانی و استاندارد های کلی و استاندارد های خصوصی طراحی در آمریکا وجود دارد. ولیکن در این خصوص در آمریکا دو آیین نامه دولتی مختص این بحث وجود دارد. اولین آنها GSA می باشد که برای ساختمان های فدرال شکل گرفته است و بعدی UFC که برای ساختمان های نظامی تهیه شده و در قسمت دفاعی ارتش آمریکا بکار می رود و به همین جهت گاهی این آیین نامه به نام DoD نیز شناخته می شود. فلسفه فعلی اکثر آیین نامه های موجود ساختمانی، طراحی سازه ها برای بارهای قابل قبولیست که ممکن است در طول عمر سازه بر آن وارد شود. سازه ها را معمولاً برای حوادث غیر طبیعی که می توانند موجب خرابی های فراگیر شوند طراحی نمی کنند. اکثر آیین نامه های رایج فقط دارای توصیه های کلی برای تعدیل تأثیرگسیختگی پیشرونده در سازه هایی هستند که فراتر از بارهای طراحی شان بارگذاری می شوند [۶]. استاندارد ASCE یا انجمن مهندسین عمران آمریکا [۷]، نیز استاندارد رایجی است که به مسئله گسیختگی پیشرونده در جزئیات می پردازد. این استاندارد بر نیاز به محافظت از سازه در برابر شدیدترین حوادثی تأکید می کند که می توانند منتج به گسیختگی پیشرونده شوند. در این تحقیق اصول اساسی مربوط به حداقل رساندن پتانسیل وقوع خرابی پیشرونده در طراحی ساختمان های فولادی مطابق آیین نامه GSA مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- تحلیل خرابی پیشرونده از دیدگاه آیین نامه GSA

۳-۱- دیدگاه کلی

هدف کلی دستورالعمل ها و مقررات وضع شده در این آیین نامه، کاهش و یا جلوگیری از خرابی پیشرونده در ساختمان های موجود و نیز ساختمان های در حال ساخت می باشد. از دیدگاه GSA احتمال وقوع خرابی پیشرونده در یک سازه فولادی که دارای درجه نامعینی کافی (redundancy) بوده و از شکل پذیری (ductility) و پیوستگی (continuity) مناسبی نیز برخوردار است بسیار کم می باشد. این آئین نامه کاربری ساختمان، نوع سکونت، نوع ساختمان، نزدیکی به وسایل نقلیه متحرک یا پارک شده را همانند خصوصیات سازه ای مانند طراحی لرزه ای لحاظ می نماید، تا به طراح برای تصمیم گیری در لزوم طراحی در برابر خرابی پیشرونده ساختمان کمک کند.

برای طراحی در برابر خرابی پیشرونده، توصیه های کلی زیر ارائه شده است:

استفاده از جزئیات و اعضای عمودی جانبی اضافی به منظور افزایش درجه نامعینی سازه

طراحی در برابر گسیختگی برشی

طراحی در برابر حذف ستون های ستون های مختلف

طراحی برای مقاومت در برابر تکرار بار برای مکان های عمومی با پارکینگ های حفاظت نشده

لحاظ نمودن اثرات سه بعدی در طراحی و تحلیل های مورد بررسی

۳-۲- روش های تحلیل

همان طور که اشاره گردید GSA به منظور کاهش احتمال خرابی پیشرونده در سازه ها استفاده از روش مسیر بار جایگزین را توصیه می کند و دو روش تحلیل استاتیکی خطی و دینامیکی غیرخطی را برای تحلیل سازه معرفی نموده است.

۳-۲-۱- تحلیل استاتیکی خطی

مطابق ضوابط ارائه شده در آئین نامه GSA برای ساختمان های تا حدود ده طبقه می توان از تحلیل استاتیکی الاستیک خطی استفاده کرد. به منظور اطمینان از نتایج روش مذکور، سازه بایستی از الگوی نسبتا ساده ای برخوردارباشد، تا اثرات غیرخطی و پاسخ دینامیکی آن به نحو روشنی قابل پیش بینی گردد. از این رو کاربرد این تحلیل برای سیستم های مرکب از قاب و دیوار و همچنین اعضای باربری که دچار عدم پیوستگی اند و حتی سازه با پلان نامنظم و ابعاد متفاوت دهانه ها از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار نبوده و استفاده از آنالیزهای دقیقتر در این موارد غیرقابل اجتناب است [۸]. با وجود اینکه انجام تحلیل استاتیکی الاستیک خطی نسبتا ساده بوده و محاسبات آن توسط کامپیوتر به سادگی قابل انجام است و بررسی صحت نتایج در آن معمولا از طریق یک سری محاسبه دستی امکان پذیر است، اما اثرات دینامیکی از قبیل ضریب بزرگنمایی، استهلاک انرژی و نیروهای اینرسی را لحاظ نکرده و رفتار غیرخطی مصالح را نیز مورد توجه قرار نمی دهد [۹]. جهت مدلسازی در نرم افزار، در این آنالیز پدیده آسیب آغازگر به صورت حذف ناگهانی نیروهای داخلی ستون بحرانی منظور می شود. بدین منظور ابتدا سازه تحت اثر بارهای ثقلی تحلیل شده و نیروهای انتهایی ستونی که قرار است حذف شود، بدست می آید. سپس، ستون حذف شده و نیروهای داخلی آن به عنوان عکس العمل، در بالای آن به سازه اعمال میگردد. توجه به این نکته ضروری است که نتایج تحلیل سازه در این مرحله، مشابه نتایج تحلیل اولیه سازه است. در نهایت، به منظور مدلسازی حذف لحظه ای ستون، نیروهایی برابر و مخالف با نیروی اعمالی مرحله قبل، به صورت ناگهانی به سازه وارد میگردد و آنالیز دینامیکی روی آن انجام می شود.

۳-۲-۲- تحلیل استاتیکی خطی

این آنالیز به صورت گسترده ای برای تحلیل سازه ها در برابر بارهای جانبی کاربرد دارد، زیرا با درگیر شدن بسیاری از اعضا در مسئله طراحی، طرح بهینه گردیده و در آن به اعضای سازه ای اجازه داده می شود تا رفتار غیرخطی داشته باشند. از طرفی به کمک این روش میتوان از طریق یافتن نسبت حداکثر تغییرمکان به تغییرمکان جاری شدن، میزان شکل پذیری سیستم را تعیین نمود. کاربرد این روش برای تحلیل خرابی پیشرونده، نیاز به کمی اصلاح دارد، به نحوی که تا زمان رسیدن به بار یا تغییرمکان حداکثر در سیستم، بارهای عمودی به صورت گام به گام افزایش یابند.

البته در بیشتر موارد به دلیل اینکه قبلا سازه تحت اثر بارهای سرویس معمولی طرح شده است، حالت بار کنترل کننده پیش می آید. ازآنجاکه خرابی پیشرونده در اکثر موارد با یک آسیب کوچک آغاز میگردد، آنالیز پوش آور عمودی به احتمال زیاد به جاری شدن تعداد محدودی از اعضا منجر شده و اعضایی که از محل آسیب آغازگر به نسبت دور هستند، ممکن است به نحوه درستی در پدیده دخالت نکنند. همچنین به دلیل قابل توجه نبودن نرخ تغییرات کرنش محوری در ستون های بالای ستون محذوف، در بیشتر موارد نتایج این تحلیل منجر به گسیختگی کلیه تیرهای بالای آن ستون تا بالاترین طبقه شده و براین اساس، خرابی پیشرونده به وقوع خواهد پیوست. بنابراین آنالیز مذکور برای پیشگیری از خرابی پیش رونده منتج به پاسخ های بسیار محافظه کارانه می شود. از این گذشته، چنین آنالیزی علاوه بر زمان بر بودن تنها برای سازه هایی که الگوی رفتار دینامیکی آنها به راحتی قابل تشخیص است، مناسب می باشد. نتیجه اینکه علی رغم مفید بودن انجام آنالیز پوش آور برای بدست آوردن الگوی فروریزش سازه های پیچیده که تشخیص الگوی غیرخطی آنها به آسانی امکان ندارد، به طور کلی انجام چنین تحلیلی فقط به عنوان مکمل تحلیل استاتیکی الاستیک خطی، فاقد توجیه است [۱].

در تحلیل های استاتیکی می بایست یک بار ثقلی مطابق رابطه (۱) به کل سازه اعمال گردد.

$$Load = 2(DL + 0.25LL) \qquad (۱)$$

که در آن DL بار مرده و LL بار زنده می باشد. در GSA تنها ۲۵ درصد بار زنده در ترکیب بارگذاری مورد استفاده قرار

می گیرد. ضریب ۲ نیز برای در نظر گرفتن اثر دینامیکی در تحلیل استاتیکی می باشد.

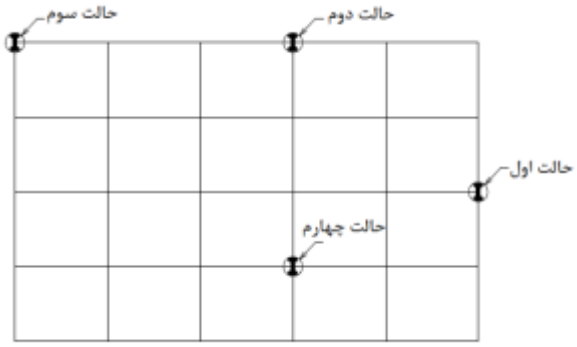
در روش ارزیابی پتانسیل خرابی پیشرونده معرفی شده در آیین نامه GSA مهندسین می بایست حالت های مختلفی از حذف ستون ها را مورد بررسی قرار دهند. این حالت ها عبارتند از:

حالت (۱) یک ستون خارجی واقع در ضلع کوتاه تر

حالت (۲) یک ستون خارجی واقع در ضلع بلندتر

حالت (۳) ستون واقع در گوشه ساختمان

حالت (٤) ستون داخلی



شکل۳ – انواع حالت های بررسی حذف ناگهانی ستون ها [۱]

۳-۳- معیارهای تحلیل

خرابی ناشی از حذف تکیه گاه های قائم موجود در سازه باید محدود گردد. محدوده مجاز خرابی یک ساختمان معمولا بستگی به طول دهانه های سازه دارد [۱]. با توجه به اینکه در سازه ممکن است دهانه هایی وجود داشته باشد که دارای طول بسیار بزرگی هستند، بنابراین می بایست محدوده مجاز خرابی بر حسب طول دهانه ها مشخص گردد. بدین منظور GSA حداکثر محدوده خرابی را مطابق جدول (۱) ارائه داده است.

جدول (۱): حداکثر محدوده خرابی مجاز

حداقل مقادیر برای هر حالت		
۱۷۰ مترمربع	دهانه های مرتبط با ستون حذف شده	حالت اول : حذف ستون خارجی
۳۳۰ مترمربع	دهانه های مرتبط با ستون حذف شده	حالت دوم : حذف ستون داخلی

۴-۳- معیارهای پذیرش

برای ساده سازی تحلیل، GSA از معیار پذیرش DCR (نسبت تقاضا به ظرفیت) استفاده می نماید که به صورت رابطه (۱) تعریف شده است:

$$DCR = \frac{Q_{UD}}{Q_{CE}} \qquad (۱)$$

Q_{UD} نیروی حاصل از انجام تحلیل در عضو یا اتصال و Q_{CE} ظرفیت مورد انتظار در عضو یا اتصال می باشد. به عنوان مثال چنانچه نسبت DCR ستون ها از عدد ۲ بزرگتر شود، عضو به شدت آسیب دیده و به احتمال زیاد فروریزش خواهد نمود و با حذف آنها از مدل، محدوده خرابی با مقادیر مجاز مقایسه می گردد. GSA افزایش مقاومت مصالح در آنالیز استاتیکی خطی را مجاز می داند، که این مقدار برای اعضا سازه ای فولادی به میزان ۵ تا ۱۰ درصد می باشد و بتن و آرماتور فولادی ۲۵٪ می باشد.

جدول (۲): حداکثر محدوده خرابی مجاز

مقادیر DCR	عضو / اتصال	
۳	تیرها	۱
۲	ستون ها	۲
۲	اتصالات خمشی گیردار	۳
۳	اتصالات خمشی نیمه گیردار	٤

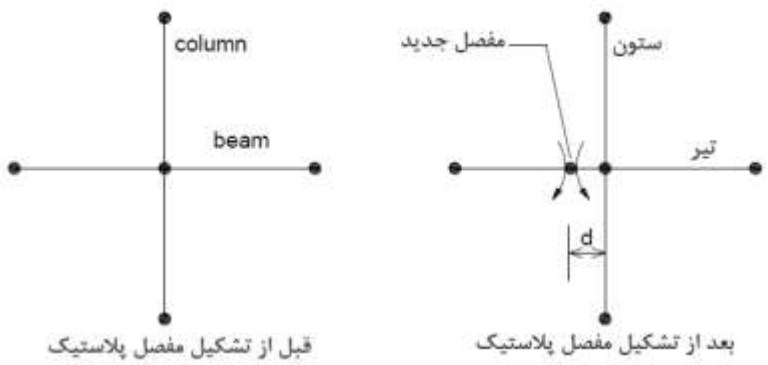
۴- مراحل تحلیل استاتیکی خطی در ارزیابی پتانسیل وقوع خرابی پیشرونده

مراحل مورد نیاز برای انجام تحلیل استاتیکی خطی مطابق GSA به شرح زیر می باشد:

مرحله اول: ستون یا ستون های بحرانی می بایست از سازه سازه حذف گردند و ترکیب بارگذاری معرفی شده در رابطه (۱) به سازه اعمال گردد و پس از آن تحلیل مدل با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی انجام گردد.

مرحله دوم : پس از انجام تحلیل، نیروها، تغییرمکان ها و محدوده های خرابی های ایجاد شده در سازه با حدود مجاز مقایسه می شوند. در صورتیکه مقادیر DCR، نیرو و تغییرمکان کمتر از حد مجاز باشند، تحلیل کامل شده و سازه در مقابل خرابی پیشرونده مقاوم می باشد. ولی در غیر اینصورت می بایست بسته به نوع اعضا اعم از اینکه خمشی و یا برشی باشند آن اعضا از سازه حذف گردند و تحلیل دوباره تکرار گردد.

به عنوان مثال در مورد اعضای خمشی می توان به این نکته اشاره نمود که درصورتیکه لنگر ایجاد شده در تیر از ظرفیت خمشی آن فراتر رفت، با ایجاد مفصل در آن نقطه و قرار دادن دو ممان مختلف الجهت به میزان مقاومت خمشی تیر، به نوعی عملکرد پلاستیک مدلسازی می شود. این روند در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل۴ – تشکیل مفصل پلاستیک و نحوه اعمال ممان ها به مدل استاتیک خطی [۱]

۴- مروری بر نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده در زمینه خرابی پیشرونده

در زمینه گسیختگی پیشرونده، مطالعات تئوری و تجربی گوناگونی در سراسر جهان انجام شده است. سوکاگلو و همکاران به بررسی چگونگی ایجاد خرابی در یک سازه فولادی که چندین ستون در آن دچار خرابی شد پرداختند و نشان دادند که قاب های در برگیرنده ی ستون حذف شده، بار ناشی از حذف ستون را بیشتر جذب می کنند. در نتیجه برای محاسبه خیز، نحوه ی توزیع مفصل های خمیری و بررسی DCR (نسبت تقاضا به ظرفیت) اعضا در یک سازه سه بعدی، کافی است قاب های دوبعدی شامل ستون حذف شده بررسی شوند [۱۰]. آستانه اصل و همکاران به منظور بررسی اثر گسیختگی پیشرونده بر روی سازه های فولادی متعارف ساخته شده با اتصالات مفصلی، یک سازه فولادی یک طبقه به ابعاد ۲۰ فوت در ۶۰ فوت را مورد آزمایش قرار دادند و نشان داده شد که بعد از خرابی یکی از ستون های میانی سازه، عمل مشترک بین سقف بتنی و سایر تیرها و ستون ها سبب توزیع نیروهای اضافی می شود. به گونه ای که در این آزمایش، سقف بدون خرابی قابل توجه توانایی تحمل بارهای مرده و زنده را داشت. در این آزمایش نیرو به سایر قسمت های سازه به خوبی انتقال یافت [۱۱]. ویلیامسون به ارزیابی گسیختگی پیشرونده یک مدل دوبعدی با استفاده از دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی پرداخت و نشان داد، از آنجا که در تحلیل استاتیکی اثرات دینامیکی ناشی از حذف ستون دیده نمی شوند، جواب های حاصل دست پایین می باشند. البته باید به این نکته توجه داشت که در زمان انجام مطالعه ی مذکور هنوز آیین نامه ای در زمینه گسیختگی پیشرونده تدوین نشده بود؛ چرا که در آیین نامه های گسیختگی پیشرونده که پس از آن تدوین شدند، در تحلیل های استاتیکی برای لحاظ کردن تقریبی اثرات دینامیکی ناشی از حذف ستون از ضریب افزایش بار استفاده شد [۱۲]. خاندل وال و همکاران در پژوهشی، گسیختگی پیشرونده سازه های فولادی با سیستم قاب خمشی ویژه طراحی شده برای نیروهای لرزه ای را مورد بررسی قرار دادند و نتایج مدلسازی آنها نشان داد سیستم هایی که در آن ها قاب های محیطی برای نیروهای زلزله طراحی می شوند مقاومت کافی در برابر بارهای غیر عادی که سبب حذف یکی از ستون های سیستم باربر بارهای گرانشی می شود را ندارند. یکی دیگر از نتایج مهم این مطالعه این بود که نشان داد کاهش بال تیرها برای اتصالات RBS ، آسیب پذیری سیستم را در برابر خرابی ستون افزایش می دهد [۱۳]. پاول به مقایسه بین تحلیل های استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی در ارزیابی گسیختگی پیشرونده به روش مسیر بار جایگزین پرداخت و نشان داد که ضریب بار ۲ در تحلیل های استاتیکی باعث پاسخ های بسیار محافظه کارانه تری نسبت به تحلیل دینامیکی می شود [۱۴]. ظرفیت قاب های خمشی دو بعدی ۳، ۶ و ۱۲ طبقه در برابر گسیختگی پیشرونده، با استفاده از مدل های عددی شبیه سازی شده در نرم افزار OpenSees و روش مسیر جایگزین بار که در آیین نامه GSA معرفی شده است، توسط جینکوکیم و تااِوا کیم مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور از روش های تحلیل دینامیکی غیر خطی و استاتیکی خطی استفاده گردید و این نتیجه حاصل شد که هرچند تحلیل استاتیکی، تغییر مکان های کمتری نسبت به تحلیل دینامیکی غیرخطی ارائه می دهد، اما مقاومت سازه را بسیار کمتر محاسبه کرده و یک روش محافظه کارانه می باشد. از سوی دیگر با توجه به اینکه در تحلیل دینامیکی غیر خطی گسیختگی پیشرونده، نیازی به مدلسازی رفتار پیچیده ی هیسترزیس سازه نیست، می توان از آن به عنوان یک روش دقیق و عملی در ارزیابی پتانسیل وقوع گسیختگی پیشرونده در سازه ها استفاده نمود. همچنین نتایج حاصل نشان داد قاب های خمشی طراحی شده برای بارجانبی نظیر باد و بار ثقلی از آسیب پذیری کمی در برابر گسیختگی پیشرونده برخوردار هستند [۱۵].

شکل (۵): مقایسه بین مقادیر DCR و محل های تشکیل مفصل پلاستیک در تحلیل های دینامیکی و استاتیکی [۱۵]

۵- نتیجه گیری

آیین نامه GSA یک رویکرد و معیار واقعی را به منظور ارزیابی خرابی پیشرونده در سازه ها ارائه می دهد. نکته قابل توجه آن است که روش استاتیکی خطی مورد استفاده در این آیین نامه از نظر تئوری ساده بوده و می تواند بدون مدلسازی غیرخطیِ پیچیده انجام شود و در نهایت می تواند منجر به اتخاذ یک تصمیم محافظه کارانه در زمینه ارزیابی پتانسیل وقوع خرابی پیشرونده در سازه در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی شود[۱۵]. از مجموع مطالب چنین بر می آید که برای یک طراحی مناسب در مقابل بارهای غیرعادی نظیر انفجار، برخورد وسایل نقلیه و خطاهای طراحی و اجرا با مسائل متفاوتی نسبت به آنچه که در بار گذاری های متعارف با آن ها آشنا هستیم، روبه رو خواهیم شد.

مراجع

1- U. S. General Services Administration, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects, Washington, DC, 2003.
2- Shankar, R. 2004. Progressive Collapse Basics, North American Steel Construction Conference (NASCC), Long Beach, California, 11 pp.
3- U. S. Department of Defense, Design of building to resist progressive collapse, Unified Facility Criteria, UFC 4-023-03, Washington, DC, 2005.
4- Corley, W., Mlakar, P. F. G., Sozen, M. A., Thorton, C. H. 1998. The Oklahoma City Bombing: Analysis of Blast Damage to the Murrah Building. J. Perf. of Constr. Fac., ASCE, 12(3), 113-119.
5- http://911research.wtc7.net/non911/oklahoma/
6- Liu, Y.2007. Progressive-Failure Analysis of Steel Building Structures under Abnormal Loads. Waterloo, University of Waterloo.A thesis for the degree of Doctor of Philosophy.
7- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2005). "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures" ، ASCE/SEI 7-05. Reston. Va.
8- Lew, H., (2003), "Analysis Procedures for Progressive Collapse of Buildings," Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology.
9- Marjanishvili, S., (2004), "Progressive Analysis Procedures For Progressive Collapse", Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE,18(2), pp 79–85.
10- Sucuoglu, H., Citipitiogu, E., Altin, S. 1994. Resitance mechanisms in RC building frames subjected to column failure. Journal of Structural engineering. 120(3), 765-82
11- Astaneh-Asl, A., Jones, B., Zhao, Y., Hwa, R. 2001. Floor cetenary action to prevent progressive collapse of steel structures. Final Report.
12- Ruth, P., Marchand, A., Wiliamson, E.b. 2006. Static Equivalency in progressive collapse alternative path analysis: reducing conservatism while retaining structural integrity. Jouranal of performance of Constructed Facilities. 20(4), 349-364.
13- Khandelwal, K., El-Tawil, S. 2007. Collapse behavior of steel special moment resisting frame connections. Journal of Structural Engineering, ASCE.
14- Powell, GP. 2005. Progressive Collapse: Case studies Using Nonlinear Analysis. Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium. New York. USA; Apr. 20–24.
15- Kim, J., Kim, T. 2009. Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames. Journal of Constructional Steel Research. 65(1), 169-179.